



中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

D07-生物医用材料
D07-Biomedical Materials

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D07. 生物医用材料

分会主席：顾忠伟、罗奎、曹晓东、张兰、马红石

D07-01

针对肿瘤能量代谢的肽类支化高分子材料

罗奎*¹

1. 四川大学

报告人突破线型高分子和树状分子给药系统设计的常规策略，创新性地提出了对线型高分子载体材料分子结构可控支化的设计思路，构建了分子量较高的肿瘤微环境响应的肽类支化高分子载体材料及其给药系统，实现了小分子抗肿瘤药物的肿瘤高靶向递送、可控释放、特别是在肿瘤部分的深度渗透和长期滞留，在高转移性乳腺癌的治疗方面取得了重要突破。报告人研究发现，相比于线型高分子，支化高分子能更显著地干扰肿瘤细胞代谢的几个重要环节从而阻碍对胞内氧化还原稳态的维持。这些干预显著降低了肿瘤细胞对抗药物等治疗手段的应激保护能力，使得细胞更容易在光动力治疗后受到损伤而死亡。鉴于此，报告人研究了线型-树状高分子给药系统干扰蛋白质翻译对肿瘤细胞命运的影响；通过蛋白组学研究发现该体系能显著地抑制肿瘤细胞的蛋白质翻译过程，其调控过程为减少能量供应、降低 tRNA 功能以及 eIF2 下调核糖体 RNA；代谢组学的研究进一步揭示了蛋白质翻译过程的下调还与作为合成原料的胞内氨基酸在受到干预后显著降低有关。报告人通过多组学（Multi-Omics）研究初步揭示了氨基酸代谢和蛋白质翻译在受到高分子给药系统干预后的调控过程及内在机制，为阐明肿瘤细胞接受药源性刺激后的代谢响应机制奠定了重要的理论基础，是协同抗肿瘤的又一途径。

D07-02

生物材料增效肿瘤介入栓塞治疗研究

程亮*¹

1. 苏州大学

癌症是威胁人类健康的几种重大恶性疾病之一。到目前为止，预防和治疗所取得的进展依然有限，需要开发新的治疗机制来提高癌症的治疗效果。在报告中我将介绍利用各种化学方法合成一系列生物活性纳米智能材料，利用其特殊的光、磁、声、电、催化等理化学性质，应用于影像导航下的新型肿瘤治疗及肿瘤介入治疗。同时利用可代谢功能纳米材料的生物效应用于增效离子免疫治疗。绝大部分的纳米材料能从体内代谢出去，降低其毒性，大大拓展无机功能纳米材料在肿瘤高效低毒中的应用。

D07-03

金属及合金纳米酶增强对肿瘤的光/催化联合治疗

曾乐勇*¹

1. 河北大学

金属及合金纳米酶具有多酶活性，能够调节肿瘤微环境（TME）实现特异性催化治疗，但其催化活性较低，限制了其在催化治疗中的应用。在本报告中，以具有类过氧化氢（CAT）/过氧化物（POD）/葡萄糖氧化酶（GOx）等多酶活性的金铂（AuPt）合金纳米酶为载体，通过包裹二氧化锰（MnO₂）和二氧化铈（CeO₂）分别构建了 AuPt@MnO₂ 和 AuPt@CeO₂ 纳米酶；利用类 CAT 活性产生 O₂ 缓解了肿瘤缺氧，进而提高了单线态氧产率，并增强了类 GOx 活性；AuPt 联合 Mn²⁺ 和 CeO₂ 的类 POD 活性提高了羟基自由基产率；而且，AuPt 具有近红外一区和二区光热性能，光热升温提升了多酶活性，最终实现了对乳腺癌增强的光/催化联合治疗。

D07-04

一氧化氮仿生递送载体及其抗肿瘤作用机制

俞思明*¹, 薛巍¹

1. 暨南大学

近年来, 一氧化氮 (NO) 在纳米医学领域的应用备受关注。然而, NO 气体分子存在随意扩散、不可控、缺乏靶向等不足, 极大限制了其生物治疗效率。

基于此, 近年来, 团队聚焦 NO 气体递送载体材料的开发与生物应用研究, 在 NO 气体靶向递送、精准控释及其抗肿瘤机制方面取得了一些前沿进展[1-5]。构建了基于肿瘤细胞膜/脂质体、生物矿化细菌外囊泡等杂合膜的 NO 仿生递送载体, 显著提升了 NO 肿瘤靶向递送效率[1-2]。基于聚酰胺-胺等高分子杂化材料, 设计合成新型光控、声控 NO 控释体系, 实现了 NO 在肿瘤原位的高效控释[3-5]。与此同时, 团队提出 NO 协同治疗新策略, 系统阐述了 NO 协同增效光热 (PTT)、自由基 (ROS) 等抗肿瘤作用和机制。

研究表明, NO 仿生递送载能有效控释 NO 在肿瘤原位的产生, 通过 NO 协同作用实现肿瘤高效治疗。机制研究方面, 团队最新研究发现, NO 可与 ROS (尤其是超氧阴离子 O₂•-) 通过级联反应生成高活性过氧亚硝基阴离子 ONOO-, 进而通过诱导线粒体凋亡途径、上调 3-Nitrotyrosine 蛋白及下调 DNA 损伤修复蛋白 PARP1 的表达, 诱导肿瘤细胞凋亡。同时, NO 能够有效诱导免疫原性细胞死亡 (ICD), 通过促进树突状细胞 (DC) 熟化等激活抗肿瘤免疫反应, 逆转免疫抑制微环境, 增强抗肿瘤治疗效果。

参考文献:

- [1] Wei Xue, Siming Yu*, et al. *Biomaterials*, 2025, 317, 123045.
- [2] Siming Yu*, Wei Xue*, et al. *Small*, 2024, 2403527.
- [3] Wei Xue, Siming Yu*, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2025.
- [4] Siming Yu, Wei Xue*, et al. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(50), 1905697.
- [5] Siming Yu, Wei Xue*, et al. *Advanced Functional Materials*, 2018(20), 28, 1707440.

D07-05

基于肠-脑轴的无创诊疗策略研究

缪养宝*¹

1. 电子科技大学

随着 2011 年微生物-肠-脑轴概念的提出, 肠-脑轴相关研究的展开为探究肠道与脑健康的病因以及肠-脑轴药物递送系统提供了新的方向。然而, 如何克服胃肠道的生理屏障, 并在肠道中检测中枢神经系统疾病或递送药物, 成为了关键的科学问题。为了解决这一问题, 本课题组采用了多种策略, 包括仿生矿化、孔径装载和表面修饰等, 以克服胃肠道的生理屏障, 实现口服无创诊疗中枢神经系统疾病的目标。

D07-06

无载体纳米药物 AI 筛选平台与高阶功能化研究

张成元¹, 罗奎², 周兴*¹

1. 昆明医科大学

2. 四川大学华西医院

本研究创新性地构建了基于机器学习的无载体纳米药物筛选与设计平台, 通过整合药物理化参数与逻辑回归模型 (预测准确率 91.89%), 系统解析了非甾体抗炎药 (NSAIDs) 与抗肿瘤药物 (如紫杉醇、多柔比星) 的自组装机理, 揭示了 π - π 堆叠、氢键及静电作用在纳米结构形成中的关键作用。

针对临床应用需求与领域难题, 研究团队进一步开发了三种功能化纳米药物体系: ①相较于游离阿霉素, PEG 修饰的长循环吡哆美辛/紫杉醇纳米药物 (PiPTX) 显著提升了药物在肝癌模型中蓄积量与体内循环时间; ②pH 响应型吡哆美辛/多柔比星纳米药物 (iDOX), 利用肿瘤微环境酸性特征 (pH 6.5) 实现药

物可控释放；③昆布多糖修饰的吲哚美辛/多柔比星纳米药物 (LiDOX)，通过主动靶向单核细胞/髓源性抑制细胞 (MDSCs)，并跟随其富集至肿瘤部位，显著提升肿瘤部位药物含量，并呈现出免疫调控与化疗协同作用特征，获得良好的动物在体治疗效果。

该研究突破了既往无载体纳米药物开发瓶颈，通过 AI 驱动的药物组合筛选与机制解析，显著缩短无载体纳米药物研发周期，为高效低毒的肿瘤治疗纳米药物开发提供了全新范式。研究成果于 2025 年成功发表于《Advanced Science》上，为心脑血管疾病、免疫性疾病等免疫相关疾病的纳米药物创制提供了普适性方法论。

D07-07

自组装超分子纳米系统用于肿瘤诊疗

丁玲*¹

1. 东华大学

自组装作为一种基本概念和强大的功能材料创制方法，近年来在生物诊疗纳米材料工程领域备受关注，其在纳米医学中的应用前景尤为广阔。树枝状大分子凭借其独特的明确结构和多价协同性，成为理想的诊疗纳米载体。[1]本研究聚焦于构建创新的自组装树枝状大聚合物纳米系统，通过整合多种功能性试剂，实现对肿瘤的高效、精准诊疗。具体而言，我们利用放射性核素进行正电子发射断层成像(PET)、[2]单光子发射计算机断层成像(SPECT) [3]以及造影剂进行磁共振成像(MRI),[4]并通过多价协同作用负载核酸分子,[5]实现不同类型核酸药物(siRNA)选择性和适应性递送，用以精准治疗恶性肿瘤。这些纳米系统在特异性靶向肿瘤病变方面展现出巨大潜力，显著提升了成像/治疗质量，同时借助独特的肿瘤微环境和树枝状大分子的多价结构，大幅减少了不良反应。此外，该自组装超分子树枝状大分子体系在整合多种诊疗方式方面具有独特优势，为诊断和诊疗引导的个性化医疗提供了新的视角。

参考文献：

[1] Z. Lyu, L. Ding, A. Tintaru, L. Peng, *Acc. Chem. Res.* 2020, 53, 2936.

[2] P. Garrigue, J. Tang, L. Ding, A. Bouhleb, A. Tintaru, E. Laurini, Y. Huang, Z. Lyu, M. Zhang, S. Fernandez, L. Balasse, W. Lan, E. Mas, D. Marson, Y. Weng, X. Liu, S. Giorgio, J. Iovanna, S. Pricl, B. Guillet, L. Peng, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 2018, 115, 11454.

[3] L. Ding, Z. Lyu, B. Louis, A. Tintaru, E. Laurini, D. Marson, M. Zhang, W. Shao, Y. Jiang, A. Bouhleb, L. Balasse, P. Garrigue, E. Mas, S. Giorgio, J. Iovanna, Y. Huang, S. Pricl, B. Guillet, L. Peng, *Small* 2020, 16, 2003290.

[4] L. Ding, Z. Lyu, T. Perles-Barbacaru, A. Huang, B. Lian, Y. Jiang, T. Roussel, C. Galanakou, S. Giorgio, C. Kao, X. Liu, J. Iovanna, M. Bernard, A. Viola, L. Peng* *Adv. Mater.* 2023, 2308262.

[5] D. Dhumal, W. Lan, L. Ding, Y. Jiang, Z. Lyu, E. Laurini, D. Marson, A. Tintaru, N. Dusetti, S. Giorgio, J. Iovanna, S. Pricl, L. Peng, *Nano Res.* 2021, 14, 2247.

D07-08

生物活性纳米材料增效肿瘤金属免疫治疗

杨乃霖*¹

1. 苏州大学

金属免疫疗法通过利用金属离子与免疫系统的协同作用增强抗肿瘤效果。基于此，我们构建了铋组分肖特基纳米异质结 ($\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{Pt}$)，其自身的生物学效应联合声催化放大的氧化应激能力，显著诱导癌细胞 Caspase-1/GSDMD 依赖性焦亡。该策略有效逆转免疫抑制，增强抗肿瘤免疫反应。进一步地，我们构建了智能自级联焦亡-STING 激动剂氟化钴 (CoF_2) 纳米催化剂用于增强金属免疫治疗， CoF_2 在外源超声和内源 H_2O_2 刺激下显著诱导癌细胞焦亡的发生，随后特异性增强 cGAS-STING 通路的激活。这一级联事件触发了免疫反应，显著增强治疗疗效。此外，我们提出了一种无外源设备的原电池治疗策略，通过构建锰原

电池用于增强金属免疫治疗。锰原电池不仅通过释放 Mn^{2+} 激活和放大 cGAS-STING 通路，还可调节肿瘤葡萄糖代谢抑制 TREX2 表达，协同增强该通路激活，从而实现双向协同 H2-免疫治疗。综上，我们通过发展声/电催化纳米生物材料体系整合金属离子的免疫调控功能，为肿瘤金属免疫治疗提供了高效、可控的创新策略。金属免疫疗法通过利用金属离子与免疫系统的协同作用增强抗肿瘤效果。基于此，我们构建了铋组分肖特基纳米异质结 ($Sb_2Se_3@Pt$)，其自身的生物学效应联合声催化放大的氧化应激能力，显著诱导癌细胞 Caspase-1/GSDMD 依赖性焦亡。该策略有效逆转免疫抑制，增强抗肿瘤免疫反应。进一步地，我们构建了智能自级联焦亡-STING 激动剂氟化钴 (CoF_2) 纳米催化剂用于增强金属免疫治疗， CoF_2 在外源超声和内源 H_2O_2 刺激下显著诱导癌细胞焦亡的发生，随后特异性增强 cGAS-STING 通路的激活。这一级联事件触发了免疫反应，显著增强治疗疗效。此外，我们提出了一种无外源设备的原电池治疗策略，通过构建锰原电池用于增强金属免疫治疗。锰原电池不仅通过释放 Mn^{2+} 激活和放大 cGAS-STING 通路，还可调节肿瘤葡萄糖代谢抑制 TREX2 表达，协同增强该通路激活，从而实现双向协同 H2-免疫治疗。综上，我们通过发展声/电催化纳米生物材料体系整合金属离子的免疫调控功能，为肿瘤金属免疫治疗提供了高效、可控的创新策略。金属免疫疗法通过利用金属离子与免疫系统的协同作用增强抗肿瘤效果。基于此，我们构建了铋组分肖特基纳米异质结 ($Sb_2Se_3@Pt$)，其自身的生物学效应联合声催化放大的氧化应激能力，显著诱导癌细胞 Caspase-1/GSDMD 依赖性焦亡。该策略有效逆转免疫抑制，增强抗肿瘤免疫反应。进一步地，我们构建了智能自级联焦亡-STING 激动剂氟化钴 (CoF_2) 纳米催化剂用于增强金属免疫治疗， CoF_2 在外源超声和内源 H_2O_2 刺激下显著诱导癌细胞焦亡的发生，随后特异性增强 cGAS-STING 通路的激活。这一级联事件触发了免疫反应，显著增强治疗疗效。此外，我们提出了一种无外源设备的原电池治疗策略，通过构建锰原电池用于增强金属免疫治疗。锰原电池不仅通过释放 Mn^{2+} 激活和放大 cGAS-STING 通路，还可调节肿瘤葡萄糖代谢抑制 TREX2 表达，协同增强该通路激活，从而实现双向协同 H2-免疫治疗。综上，我们通过发展声/电催化纳米生物材料体系整合金属离子的免疫调控功能，为肿瘤金属免疫治疗提供了高效、可控的创新策略。

D07-09

离子键细胞内凝胶材料的智能设计及其在急性肺炎的应用探究

陈彦铭¹，周印¹，张雨薰¹，何一燕*¹，顾忠伟¹

1. 南京工业大学

本研究构建了一种以细胞为结构组成部分、在其内部原位合成水凝胶的功能性生物材料。通过一次冻融过程将海藻酸钠引入细胞内，随后利用膜渗透作用使镓离子缓慢进入细胞。在此过程中，海藻酸钠与镓离子于细胞内逐渐接触并发生离子配位交联，从而形成均匀的水凝胶结构，有效克服了传统离子键凝胶反应速率过快、成胶不均的缺陷。我们进一步利用贝叶斯优化算法对制备过程中海藻酸钠和镓离子溶液的浓度等关键参数进行了优化调控，成功获得了结构均一、细胞膜完整的细胞内凝胶材料。通过一系列表征手段，我们验证了细胞内水凝胶的成功构建，并系统评估了其细胞膜完整性、机械稳定性、储存稳定性、载药能力及药物释放性能。最终，在小鼠模型中验证了该内部凝胶化巨噬细胞对肺部炎症的靶向性，证实了膜蛋白在凝胶化过程中的有效保留。综上所述，本研究成功构建了一种具备完整细胞膜结构及膜蛋白活性的细胞内凝胶材料，展现出其作为药物递送载体的巨大应用潜力。

D07-10**超声响应智能生物医药材料**罗宇*¹

1. 上海工程技术大学

随着精准医疗概念的提出以及光学、纳米技术的发展，科研人员借助于光、磁场、超声波等外加能量场作为触发药物释放媒介的智能递送系统或者智能药物研究得以迅速发展。其中，相比于激光而言，超声波具有良好的安全性和更深的组织穿透能力（穿透深度 ≥ 10 cm），具有更好的临床应用和转化前景。

为此，我们团队基于材料学、化学、医学等学科交叉，通过对脂质体、有机半导体小分子、生物大分子等进行个性化设计和改造，构建了基于临床使用超声波功率范围内的智能纳米药物控释系统。利用超声波和材料之间的相互作用产生的 ROS 作为 Pro-drug 共价键断裂或者纳米胶囊结构塌陷的开关，实现了免疫药物 NGL919、R848、PD-L1、凝血酶等药物在外加超声场作用下病灶部位精准控释，并在动物活体治疗上取得了重要进展。

D07-11**细胞衍生生物的活性发现及其在疾病治疗中的应用**周兴*¹

1. 昆明医科大学

细胞是生命体组成的基本单元，以其为单元可衍生出细胞、细胞器、细胞膜、细胞源囊泡、细胞源天然分子等多种衍生物。报告人长期围绕细胞衍生生物的活性发现和疾病应用展开研究先后利用酵母细胞壁、昆布植物细胞壁、中性粒细胞膜、狂犬病毒衣壳、线粒体、外泌体等细胞来源组分实现了炎症、肿瘤、脑损伤等靶向递送应用，以及炎症调控、细胞修复和肿瘤转移干预等应用，并进一步建立了细胞、细胞器疗法等策略的功能增强技术，相关研究发表在 Science Advances、ACS nano、Advanced Science 等期刊。本报告将围绕上述细胞衍生物，探讨细胞衍生物在抗炎、靶向富集、配体/受体作用等生物活性，并展示上述生物活性在肿瘤、脏器损伤、炎症等多种疾病种的应用潜力。

D07-12**开发工程化外泌体靶向细胞外基质重塑的肺纤维化力治疗策略**马玉菲*¹

1. 西安交通大学

全球范围内肺纤维化的患病人数呈现持续增长的趋势，肺纤维化确诊后的中位生存率仅为 2-4 年。目前的临床治疗主要依赖于吡非尼酮和尼达尼布。这两种药物在减缓肺功能衰退方面取得了一定效果，但仍无法治愈肺纤维化或显著改善患者生活质量。此外，在临床使用中常伴随严重的副作用且患者可能出现药物耐受性。因此，迫切需要开发更安全、更有效的肺纤维化治疗新策略。本研究首先对肺纤维化在体条件下的病理特征进行全面评估。研究发现，与正常小鼠肺组织相比，纤维化小鼠肺组织模量显著升高。小鼠和人肺纤维化切片结果显示细胞外基质（ECM）中病理性胶原纤维和弹性纤维的沉积明显增加。同时，YAP 和 α -SMA 的表达显著上调，提示肺纤维化过程中 ECM 过度沉积和力学信号转导异常。随后，采用冻融法制备内部负载维替泊芬（VP）和表面携带中性粒细胞弹性蛋白酶（NE）的外泌体/脂质体融合纳米生物平台。接着，利用 C57BL/6 小鼠肺纤维化模型，通过气道给药评估纳米生物平台的药物分布和抗纤维化效果。肺纤维化小鼠治疗后，组织羟脯氨酸含量、 α -SMA 和 YAP 表达量以及组织模量均显著降低。通过进一步研究治疗机理发现，融合纳米生物平台到达纤维化肺组织后，NE 能够降解胶原纤维和弹性纤维，VP 能够调控 LaminA/C 介导的核膜张力，通过内外源相结合抑制肺纤维化进程。本研究基于肺纤维化的病理基础设计开发了一种双载药工程化外泌体平台，通过外源性降解 ECM 和内源性抑制纤维化力学信号转导重塑纤维化肺组织 ECM，达到治疗效果。研究成果将为未来肺纤维化临床治疗提供新的力学调控策略。

D07-13**手性生物材料的研发及其医学应用**周超*¹

1. 上海交通大学医学院附属第六人民医院

2021年上海交通大学携手 Science 杂志发布了“新 125 个科学问题”。其中有一问就是：为什么生命需要手性？在生命体中，氨基酸、DNA、蛋白质、多糖、细胞膜、细胞乃至这个生命体结构，都是手性的。因此手性是生命体的基本属性之一。有一个经典案例，杜丽莎安（一种镇痛剂），左旋镇痛，而右旋则导致畸形。这是生命体的手性系统对外界手性物质的选择性识别作用导致的。因此，我以此为理论基础，开发设计手性生物材料。通过手性材料微环境识别匹配作用，实现组织修复和疾病治疗。首先，聚焦于骨修复材料领域。目前骨修复材料结构微环境与天然骨结构不匹配，导致骨长入和骨整合受限，且结构活性不共存，无法有效治疗骨缺损。因此，急需开发一种结构功能匹配、且具有骨引导和骨诱导能力的生物材料用于骨修复。针对上述问题，我仿生天然骨矿物的手性多级结构创制了手性多级结构生物陶瓷材料。该材料兼具手性多级结构匹配和成骨活性，可有效实现骨修复。

D07-14**可降解生物医用共轭高分子**田斯丹*¹

1. 华中科技大学

生物医用高分子的可降解性对于这类材料的体内应用具有重要意义，而可降解生物医用高分子的种类仍然非常有限。近年来，生物传感、生物医学光子学和生物电子学的飞速发展对生物医用材料的光电性能提出了新的需求，兼具优异光电性能和生物相容性的共轭高分子材料展现出不可替代的重要价值。然而，由于共轭高分子的主链结构通常表现出较强的化学惰性，难以降解的分子主链造成其体内代谢与生物安全性不明，成为限制这类材料体内应用的主要瓶颈。因此，发展具有优良生物安全性的可降解共轭高分子，是推动共轭高分子材料生物医学应用与转化的重中之重。报告人致力于可降解生物医用共轭高分子材料的设计、制备及应用研究。主要成果包括：1，发展调控聚二炔分子结构的模板拓扑聚合法，设计并制备取代基结构简单的共轭聚二炔分子；2，提出氧化降解聚二炔主链共轭烯-炔结构的策略，揭示了聚二炔分子主链完全氧化降解的分子机理；3，构建了基于可降解聚二炔的活性氧响应生物医用材料，发挥其降解过程和降解产物的生理功能。

D07-15**新型多肽药物与载体材料**徐翔晖*¹

1. 湖南大学

D07-16**镓基抗菌高分子材料**何一燕*¹

1. 南京工业大学

D07-17**肿瘤微环境响应性结构形变驱动的免疫活性金属离子时空协同编程用于癌症协同治疗**项心语¹，罗宇*¹，董立乐²

1. 上海工程技术大学

2. 中国科学院赣江创新研究院

肿瘤微环境 (TME) 的动态异质性和免疫抑制特性阻碍了免疫活性金属离子 (如 Co^{2+} 、 Fe^{2+}) 的有效递送与协同编程, 导致免疫激活与逃逸失衡。传统金属免疫疗法面临静态纳米材料无法适配动态治疗阶段需求, 以及金属离子 (如 Mn^{2+} 全身毒性、 Fe^{2+} 过早消耗) 释放不可控的核心矛盾。

本研究开发了核壳结构金-钴铁纳米系统 $\text{Au}@\text{Co}_3\text{O}_4\text{-Fe}$ (ACF), 作为时空编程的智能 STING 激动剂。其特点在于 TME 响应性门控形变与功能切换: 早期 (消融): 金纳米聚集体利用光热/声动力效应高效消融原发肿瘤。中期 (代谢干预/激活): TME 触发壳层降解, 释放超小金颗粒模拟葡萄糖氧化酶, 切断肿瘤能量供应并生成 H_2O_2 ; 同时时空编程释放: Co^{2+} : 特异性结合 STING 蛋白 CDNs 域, 精准激活 I 型干扰素通路。 Fe^{2+} : 通过级联催化 ($\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \cdot\text{OH} \rightarrow$ 脂质过氧化) 诱导铁死亡, 放大免疫原性细胞死亡 (ICD) 和免疫应答 (释放 mtDNA 协同激活 cGAS-STING)。后期 (免疫记忆): ACF 促进记忆 T 细胞扩增, 建立长效抗肿瘤免疫。

本研究利用 TME 响应性形变驱动金属离子时空协同编程, 实现了多机制协同治疗, 显著提升抗肿瘤疗效并诱导长效免疫记忆。

D07-18

纳米气体疗法与炎症性/感染性疾病

蔡晓军*¹

1. 温州医科大学附属口腔医院

CO 、 H_2S 、 NO 等是重要的内源性信号分子, 在生理和病理条件下都发挥着一系列重要的治疗作用, 但其气态特质使得可控递送和精准释放变得极具挑战。本课题组近年来构筑了系列内源性刺激响应调控的 $\text{CO}/\text{H}_2\text{S}$ 递送系统, 如 ROS 响应释放 CO 的钼基多金属氧酸盐/埃洛石纳米管/甘露糖化的树状多肽纳米凝胶; GSH 响应释放 H_2S 的蒙脱土纳米制剂/工程化益生菌外膜囊泡等; 外源性刺激响应调控的 CO/NO 递送系统, 如光动/光热调控的可释放 CO/NO 的两性树状多肽纳米凝胶、纳米胶束等递送系统; 并系统证实: 1) ROS 响应释放的 CO 递送系统可通过响应炎症性肠病、关节炎、牙周炎、肝缺血再灌注部位、以及糖尿病溃疡部位的高浓度 ROS 来响应释放 CO ; 生成的 CO 可通过清除 ROS、激活 HO-1、抑制促炎信号通路的激活来发挥抗氧化/抗炎作用; 2) 光动/光热介导的 CO 可控递送系统具有显著的协同抗菌、抗生物膜、和抗肿瘤作用; 3) GSH 响应释放 H_2S 的蒙脱土纳米制剂/工程化益生菌外膜囊泡可通过高效抗氧化、抗炎、保护肠道黏膜屏障、调节肠道菌群来高效管理炎症性肠病; 可缓释 H_2S 的水凝胶敷料可通过高效抗菌、抗炎、促上皮化/血管化来显著加速糖尿病溃疡的愈合; 4) 富含 L-Arg 或胍基的两亲性树状多肽/聚合物纳米胶束可作为 NO 的大分子供体, 协同 PDT 高效抗菌和促感染伤口快速愈合。

D07-19

用于缺血性脑卒中治疗的药物递送系统构建

郭星*¹

1. 西南交通大学

血脑屏障的阻碍是导致脑缺血后再灌注损伤治疗效果差的主要因素。缺血发生后, 中性粒细胞被大量募集到缺血炎症部位。因此, 以中性粒细胞为中转的递送表现出独特的优势, 在低血流速度甚至血管闭塞的条件下也能有效穿透血脑屏障, 实现纳米载体在缺血大脑的高效富集。基于中性粒细胞具有噬菌的特性, 我们开发了系列仿细菌药物递送系统, 以细菌外膜囊泡、棒状纳米颗粒等作为载体材料, 分别通过配体识别、形貌靶向的方式被中性粒细胞捕获, 再搭乘中性粒细胞“便车”进入缺血大脑, 提高药物在靶点的作用浓度。搭载的药物包括抑制铁死亡和脂质过氧化的吡格列酮、抑制反应性星形胶质细胞的咯利普兰、减少小胶质细胞炎症因子释放的白皮衫醇等, 分别作用于脑内各个细胞的各个靶点减轻神经炎症并修复损伤血脑屏障。该策略为缺血性脑卒中的治疗提供了新的研究思路。

D07-20**磁性药物递释系统**汪志义*¹

1. 华南理工大学化学与化工学院

D07-21**纳米催化耦合微生态重塑**陈潜*¹

1. 同济大学附属第四人民医院

癌症与微生物间的相互关系逐渐得到确认，其中瘤内细菌成为肿瘤微环境中的关键新兴成分，这些细菌不仅影响肿瘤的发生和发展，还影响治疗效果和肿瘤的转移。具核梭杆菌是已知与结直肠癌发生密切相关的病原体，与肿瘤的侵袭、转移、化疗耐药及不良预后有着直接的联系。因此，调控肿瘤内的病原体可能为肿瘤治疗及其转移抑制提供新的靶点。

我们此前开发了多种纳米材料用于肿瘤治疗（*Chemical Engineering Journal* 2024, 493, 152753; *Advanced Functional Materials*, 2023, 2215244; *Nano Today*, 2022, 43, 101374），并在此基础上设计了具抗菌功能的纳米材料，旨在抑制结直肠癌内的致病菌，从而实现肿瘤的高效治疗。首先，我们采用一种通用的配位氧化还原策略，将抗菌的超小银纳米颗粒原位均匀地生长在树枝状介孔二氧化硅纳米颗粒上，并进一步负载化疗药物。通过清除具核梭杆菌抑制自噬，克服化疗耐药，从而提高治疗效果（*Nano Today*, 2023, 52: 101994）。我们还构建了一种抗菌纳米平台（Au@BSA-CuPpIX），该平台在超声激发下产生活性氧（ROS），展现出卓越的抗菌活性。重要的是，Au@BSA-CuPpIX 通过抑制肿瘤内具核梭杆菌，降低了凋亡抑制蛋白的水平，从而增强了 ROS 诱导的细胞凋亡。体内实验结果表明，该平台能有效消除瘤内具核梭杆菌，提高声动力治疗对原位结直肠癌的疗效，并抑制肺转移。此外，被包裹的金纳米颗粒也减少了治疗过程中金属卟啉在皮肤中的光毒性，防止了严重的炎症和皮肤损伤（*ACS Nano*, 2023, 17, 11466–11480）。随后，我们提出了破坏菌瘤共生体的策略，通过杀灭肿瘤内的具核梭杆菌来破坏这一共生体并协同杀死结直肠癌细胞。我们开发的蛋白基铜单原子纳米酶（BSA-Cu SAN）通过产生活性氧和消耗谷胱甘肽（GSH）发挥催化作用。体外和体内实验表明，BSA-Cu SAN 可被动靶向肿瘤部位，并有效清除肿瘤内具核梭杆菌，破坏菌瘤共生体。结果显示，清除肿瘤内具核梭杆菌抑制了由该菌介导的自噬升高，从而缓解了结直肠肿瘤对 ROS 的抵抗，实现了高效的纳米催化治疗（*Signal Transduction And Targeted Therapy*, 2023, 8:277）。

综上所述，我们提出了一种新的纳米催化微生态调控协同治疗肿瘤的方法，通过破坏肿瘤内的菌瘤共生体来阻断肿瘤内病原菌与肿瘤细胞的相互作用，增强肿瘤治疗效果，为纳米催化材料的设计及病原菌相关肿瘤治疗提供了新的思路。

D07-22**新型肿瘤微环境响应性前药纳米载体增强肿瘤联合治疗研究**于倩倩*¹

1. 华南理工大学

载体递送小分子药物是提高药物治疗效果的研究重点。本研究通过活性自由基聚合合成了具有响应性二硫键的前药两亲性高分子，其可以自组装形成纳米囊泡结构，高分子囊泡结构具有同时装载亲疏水药物的能力，便于实现多药物协同治疗的目的。前药两亲性高分子与药物共组装能够形成稳定的响应性前药高分子纳米体系，其中二硫键与肿瘤微环境中过表达的谷胱甘肽（GSH）反应断裂并释放小分子药物与载药，通过原位核磁共振技术研究了响应性前药载体在模拟体内 GSH 环境中响应释放药物能力，结果表示小分子药物在 GSH 存在下缓慢释放，10 mM GSH 处理 20 小时后，小分子药物的累计释放量达到 80%。并通过细胞实验和动物实验均证明了响应性前药高分子囊泡体系具有优异的抗肿瘤效果，响应性前药高分子纳米体系对乳腺癌细胞的抑制率达到 93%，对小鼠肿瘤抑制率达到 89%。响应性前药高分子纳米载体实现在

肿瘤微环境响应缓慢释放小分子药物与载药，实现优异的多模式肿瘤治疗效果。

D07-23

晶格畸变和缺陷诱导的铌基钙钛矿极化级联调节 Na⁺/K⁺ATP 酶增强癌症治疗中的焦亡

张可心*¹, 罗宇¹, 王凯阳¹

1. 上海工程技术大学

设计晶格存储诱导的钙钛矿材料，通过靶向钠钾 ATP 酶 (Na⁺/K⁺ATP 酶) 破坏细胞内钠离子 (Na⁺) 稳态，已成为癌症治疗中一种有前途的治疗策略。然而，精确操纵 Na⁺ 平衡以实现靶向抗肿瘤作用仍然具有挑战性。在这里，利用 NNO_x 的压电催化和光热特性，合成了晶格畸变且富含氧空位的铌基钙钛矿 NaNbO₃ (NNO_x)，实现了 Na⁺/K⁺ATP 酶的级联调节。特别是在超声波和近红外 II 激光照射下，NNO_x 不仅释放外源性 Na⁺ 以提高局部细胞内 Na⁺ 浓度，而且有效地产生活性氧，诱导线粒体损伤并损害肿瘤细胞中的 ATP 合成。这种线粒体功能障碍显著降低了 Na⁺/K⁺ATP 酶活性，损害了细胞 Na⁺ 外流，并进一步加剧了细胞内 Na⁺ 积累。因此，严重的离子失衡会导致快速的渗透性肿胀和气泡形成，引发焦亡细胞死亡和强烈的抗肿瘤免疫反应。体外和体内研究表明，NNO_x 有效抑制肿瘤生长并激活强大的抗肿瘤免疫，突出了离子破坏诱导的焦亡和免疫原性细胞死亡的创新策略。这种方法为未来离子稳态靶向癌症免疫疗法提供了有价值的见解。

D07-24

搭中性粒细胞便车的工程化纳米囊泡抑制放疗后肿瘤转移

米佳钰¹, 曹红梅¹, 刘金剑¹, 刘鉴峰*¹

1. 中国医学科学院北京协和医学院放射医学研究所

目的: 世界卫生组织将 90% 以上的癌症相关死亡归因于肿瘤转移。中性粒细胞 (Neutrophils, NEs) 作为肿瘤微环境的重要组成部分, 通过多种机制促进肿瘤转移, 其中胞外陷阱 (Neutrophil Extracellular Traps, NETs) 发挥关键作用。放疗作为肿瘤治疗的重要方式, 会通过诱导炎症因子招募 NEs 至肿瘤部位并促使其释放更多 NETs, 从而加剧肿瘤转移。因此, 在放疗引起的炎症微环境中精准调控 NEs 功能, 增强其抗肿瘤活性并有效抑制 NETs 介导的肿瘤转移具有重要意义。

方法: 本研究构建了工程化纳米囊泡 (OS-D), 通过电穿孔将靶向 CCDC25 的 siRNA 封装入细菌外膜囊泡内部, 并将 pH 敏感的 DSPE-PEOz 类磷脂结构插入膜中。通过透射电镜 (TEM)、粒度仪 (DLS) 等表征 OS-D 的结构与理化性质; 结合 RNA 测序、流式细胞术、ELISA 等分析 OS-D 对 NEs 的调控作用; 采用 Western blot、RT-PCR 评估 CCDC25 敲降效率, 并通过细胞趋化、迁移及免疫共沉淀等实验验证 OS-D 阻断 NET 与肿瘤细胞结合的能力; 在黑色素瘤肺转移小鼠模型中评价 OS-D 的肿瘤靶向性、放疗增敏作用及肿瘤转移抑制效果。

结果: TEM 和 DLS 显示 OS-D 成功装载 siRNA, 形态由杯状囊泡结构变为实心纳米颗粒; 体外实验表明, OS-D 敲降肿瘤细胞中 CCDC25 的效率达到了 40%, 能够有效阻断 NET-DNA 与 CCDC25 的结合, 抑制细胞骨架重排并阻断肿瘤细胞的趋化和迁移能力。而且, GO 和 KEGG 通路富集分析显示 OS-D 能够诱导中性粒细胞向抗肿瘤表型分化, 并具备溶酶体逃逸能力。体内实验表明, OS-D 可借助 NEs 的“便车”靶向肿瘤部位, 在放疗诱导的炎症微环境下显著增强放疗疗效并有效抑制肿瘤转移。

结论: 本研究成功构建的工程化纳米囊泡能够在放疗引起的炎症微环境中在体调控中性粒细胞的功能, 诱导其向抗肿瘤表型分化, 同时能够阻断 NET-DNA 介导的肿瘤远端转移, 为提高肿瘤放疗效果提供了一种全新的策略。

D07-25**仿生杂化生物医用材料的设计构建及应用研究**赵娜娜¹, 徐福建*¹

1. 北京化工大学

受自然界中生命体结构与功能启发的仿生策略, 通过模拟生物系统识别与响应机制, 增强材料与生物体之间的相互作用, 提升治疗效果, 为高性能生物医用材料开发提供了新的策略。受病毒利用尖刺表面及丝状病毒(如埃博拉病毒)高长径比特性介导增强宿主细胞侵入行为的启发, 通过形貌设计提高纳米酶性能, 所得粗糙表面形貌及一维结构的纳米酶具有与细胞和细菌更强的相互作用, 进而展现出高效的肿瘤及细菌杀伤效果, 并可利用一维形貌在外场作用下的机械力杀伤肿瘤细胞提高治疗效果。细菌等活性物质结合纳米颗粒也可以构建仿生活性材料用于肿瘤、抗菌及炎症性肠病等疾病治疗。另外, 为模拟巨噬细胞捕获、杀伤细菌的功能, 构建了多糖/纳米颗粒杂化凝聚液滴, 通过液滴富集细菌, 装载在凝聚液滴内部的纳米颗粒原位产生 ROS, 实现对细菌的吞噬杀伤。这些仿生体系的设计和制备为多功能生物医用材料的构建提供了新的思路, 也有利于研究生物医用材料与生物体系的相互作用, 并拓展其在生物医学领域的应用。

D07-26**边界生物医学 SERS 生物探针**林杰*¹, 吴爱国¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

边界生物医学是研究疾病病灶形成、边界判别及演进过程中关键问题的前沿交叉学科。与组织活检相比, 体外液体活检技术具有快速、简便和无损伤等优势。当影像学检查还没有发现任何病灶前, 外周血液中循环肿瘤细胞/阿尔兹海默症(AD)生物标志物检测可为疾病早期诊断和预后评估提供重要依据。循环肿瘤细胞(CTCs)、AD 生物标志物的高效检测可有效地应用于疾病体外早期诊断、预后及存活时间判断、快速判断治疗效果、体内耐药性检测、分子分型鉴定、个体化治疗、复发检测等, 具有重要的科学意义和临床应用价值。表面增强拉曼散射光谱(SERS)技术是高灵敏的指纹光谱分析技术, 具有快速、精准、无损检测等优势, 可适用于固相、液相等复杂的检测体系。SERS 纳米生物探针与谱学/影像技术的结合, 为实现循环肿瘤细胞和 AD 生物标志物的精准诊断带来新的契机。研发功能型半导体 SERS 纳米生物探针, 随后结合具有光、电、磁场响应的半导体 SERS 探针试剂盒仪器设备, 完成外周血样中循环肿瘤细胞、AD 生物标志物的快速富集、高效分离、准确检测和分型鉴定, 从而通过 SERS 光谱/图像分析实现疾病的精准诊断应用突破, 并开发可推广的检测试剂盒 1-5。重点突破液体活检发展中检测成本高、耗时长、细胞富集难和靶向性差等难题。

Reference

- 1) Angew. Chem. Int. Ed. 2024, 63, e202407597.
- 2) Angew. Chem. Int. Ed. 2024, 63, e202407597
- 3) J. Am. Chem. Soc., 2022, 144, 21908-21915
- 4) Nano Today, 2024, 54, 102140.
- 5) Fundam. Res., 2024, 4, 858

D07-27**病理环境响应的生物材料及其生物医学的应用**刘锡建*¹

1. 上海工程技术大学

病理环境存在一些特殊的性质, 阻止药物治疗效果。但是病理特殊的微环境也可以作为特异性治疗的靶点, 针对病理特殊环境, 可以设计智能响应性的纳米材料, 在病理环境发生特异性的催化反应, 调控病

理微环境, 进行针对性治疗。目前开发针对病理微环境的纳米材料进行治疗也成为生物医学研究的热点, 然而面对复杂的病理环境, 材料的响应性受到诸多因素的影响, 因此, 尚需进一步研究病理微环境智能响应的生物材料, 提高其特异性治疗效果。

基于以上研究现状, 开发了几种新型的病理环境响应的纳米生物材料, 例如: mZMD[1]、CMPB-MoS₂-PEG[2]、CMFO[3]、CuS@SiO₂@MnO₂[4]、Se@Bi@SiO₂[5]、CMGOx[6]、OMVs[7]等, 在病理微环境智能响应, 发生级联反应, 材料降解, 释放药物和金属离子等, 调节病理微环境, 提高治疗效果, 实现了增强化学动力治疗、光热治疗、放疗、化疗、声动力治疗和免疫治疗等联合, 克服了单一治疗模式的缺陷, 发挥了协同作用, 达到了更有效的治疗效果。

参考文献:

[1] S. Guan, X. Liu*, C. Li, X. Wang, D. Cao, J. Wang, L. Lin, J. Lu, G. Deng, J. Hu, *Small*, 2022,18(13): 2107160.

[2] S. Guan, X. Liu*, Y. Fu, C. Li, J. Wang, Q. Mei, G. Deng, W. Zheng, Z. Wan, J. Lu, *J. Colloid Interface Sci.* 2022, 608: 344-354.

[3] X. Wang, C. Li, H. Jin, X. Wang, C. Ding, D. Cao, L. Zhao, G. Deng, J. Lu, Z. Wan*, X. Liu*, *Chem. Eng. J.* 2022, 432:134438.

[4] M. Zhang, X. Liu*, Q. Luo, Q. Wang, L. Zhao, G. Deng, R. Ge, L. Zhang*, J. Hu, and J. Lu*. *Chem. Eng. J.*, 2020, 389:124450.

[5] N. Zheng, Q. Wang, C. Li, X. Wang, X. Liu*, X. Wang, G. Deng, J. Wang, L. Zhao and J. Lu, *Adv. Healthcare Mater.*, 2021, 10,202002024.

[6] X. Wang, C. Ding, Z. Zhang, C. Li, D. Cao, L. Zhao, G. Deng, Y. Luo, C. Yuan, J. Lu, X. Liu*, *Chin. Chem. Lett.* 2023, 34:107951.

[7] C. Ding, R. He, T. Cheng, J. Wang, X. Liu*, G. Guo*, Y. Chen*, *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33, 2304168.

D07-28

仿生纳米策略诱导肿瘤干细胞分化克服实体肿瘤放疗抵抗

王姝湘¹, 曹红梅¹, 刘鉴峰¹

1. 中国医学科学院放射医学研究所

目的: 肿瘤干细胞 (CSCs) 是肝细胞癌放疗效果不佳的关键因素之一。本研究探究了脯氨酸顺反异构酶 Pin1 和 Notch1 在维持 CSCs 侵袭性和放射抗性方面的协同作用, 基于此, 拟设计一种 CSCs 靶向的仿生纳米囊泡, 以破坏 Pin1 和 Notch1 串扰并诱导 CSCs 分化, 提高放疗敏感性。

方法: 通过 TCGA 数据库和临床样本分析 Pin1 和 Notch1 的表达情况, 探究其与肝细胞癌分期和生存率的相关性; 合成了 CSCs 靶向肽修饰且装载 Pin1 抑制剂全反式视黄酸的脂质纳米囊泡, 并与肿瘤细胞膜囊泡融合, 内包裹装载 Notch1 抑制剂 γ 分泌酶抑制剂的 MOF 纳米颗粒, 得到仿生纳米囊泡; 通过透射电子显微镜、紫外光谱等考察其形貌、电位和稳定性等理化性质; 通过免疫荧光染色研究其同源靶向性和 CSCs 识别能力; 通过蛋白凝胶电泳、流式细胞术等考察其对靶基因蛋白水平的表达及关键干性转录因子的影响; 通过克隆形成实验、细胞周期和细胞凋亡实验考察其放疗增敏能力; 构建肿瘤模型评估其体内抗肿瘤效果。

结果: Pin1 和 Notch1 的交叉调控与肝癌预后显著相关; 仿生纳米囊泡具有明显“壳层”结构, 直径约 100 nm, 在酸性环境下具有时序释药特性; 通过同源靶向及特异性识别 CD133 受体的能力, 仿生纳米囊泡被 CSCs 摄取, 显著降低了 Pin1 和 Notch1 及其靶基因的蛋白水平, 也抑制了 Pin1 和 HES-1 的转录活性; 此外仿生纳米囊泡也通过降低 CD133、EPCAM 及干性转录因子的表达, 诱导 CSCs 分化, 明显消除了肿瘤球的扩张。在射线作用下, 其细胞毒性与 DNA 损伤大大增加, 将细胞周期阻滞于放疗敏感的 G2/M 期, 促进了细胞凋亡; 对各类肝癌模型均具有显著的肿瘤抑制效果。

结论: 揭示了肝细胞癌中 Pin1 和 Notch1 之间的串扰及其对放疗的不利影响, 并成功开发了一种仿生纳米递送系统, 通过协同阻断 Pin1 和 Notch1 诱导 CSCs 分化, 为克服 CSCs 介导的放疗抵抗提供新策略。

D07-29**基于二维材料和细胞膜仿生纳米材料的肿瘤微环境靶向调控研究**赵岳涛*¹

1. 中南大学

肿瘤微环境严重影响药物对肿瘤的治疗效果，调控肿瘤微环境是提高药物疗效的重要策略。我们以二维材料为基础构建新型免疫纳米材料，实现对胞外基质屏障、肿瘤微血管、免疫抑制因子等多种免疫抑制微环境的靶向调控。有效降解肿瘤细胞外致密基质屏障，促进免疫细胞的浸润；重构肿瘤微血管结构，降低血管渗透性；逆转腺苷、TGF- β 等抑制因子对免疫细胞的负面效应，多重协同效应共同提高免疫响应。进一步我们以红细胞膜为基础构建仿生纳米药物，靶向调控 CD73、肿瘤神经等靶点，促进肿瘤免疫治疗，抑制肿瘤骨转移，并缓解肿瘤转移带来的骨疼痛。此外，我们还以红细胞膜、肿瘤细胞膜等仿生纳米载体为基础对化疗药物进行靶向递送，促进化疗治疗效果，逆转化疗抗药性。相关研究成果以第一作者和通讯作者身份发表于 *Angew. Chem. Int. Ed.*、*Biomaterials*、*Chem. Eng. J.*、*J. Nanobiotechnol.* 等期刊。

D07-30**镧系收缩效应实现超声介导的胞内外钙总动员并诱导免疫治疗**段冰冰*¹，罗宇¹，王恺阳¹，朱晓风¹

1. 上海工程技术大学

扰乱胞内钙稳态可有效造成癌细胞死亡，但传统钙调控策略的非特异性与补偿效应严重限制了其临床转化。受镧系元素独特的“镧系收缩”现象启发，本研究提出利用镧离子 (La^{3+}) 特别的离子半径和超高电荷密度，构建了一种超声响应型锰酸镧 (LaMnO_3) 纳米平台，精准实现胞内外钙募集与钙稳态扰乱。超声刺激下，该纳米体系快速释放的 La^{3+} 可精确占据钙 ATP 酶的关键 Ca^{2+} 结合位点，并形成稳定且无法被内源 Ca^{2+} 竞争取代的复合物，阻断 Ca^{2+} 外排；同时，伴随 US 下产生的 ROS 激活细胞膜瞬时受体电位通道 (TRPA1)，大幅增强胞外 Ca^{2+} 的内流。更关键的是， La^{3+} 诱导线粒体钙单向转运体 (MCU) 异常激活，迫使线粒体过量摄取钙离子，引发线粒体膜电位被破坏及能量代谢崩溃，最终导致肿瘤细胞发生“泛凋亡”效应，并显著提高肿瘤免疫原性，释放大量损伤相关分子模式 (DAMPs)，有效激活宿主抗肿瘤免疫反应。本研究不仅揭示了镧系收缩现象在肿瘤治疗中的全新应用，更为精准调控细胞钙稳态提供一种创新路径，有望突破现有钙治疗策略的瓶颈。

D07-31**新型柔性生物传感器设计及在健康监测中的应用**蔡仁*¹

1. 湖南大学

高生物活性的柔性生物传感器在人体呼吸和关节运动健康监测方面的潜力巨大，对相关呼吸性和关节运动性疾病预防和监测具有重要意义。传统纤维素膜传感器只能在限定应用条件下响应，对复杂场景中的信号识别受限，难以实现在高温、高湿和强酸碱度环境中生物性能的精准监测。针对这些问题，通过构造新型生物膜结构，本报告将介绍高湿强度、高稳定性、适用性广、高灵敏的多功能生物传感器，为重要健康参数的高效监测和分析提供重要工具。在这个报告中，汇报人将介绍本课题组发展的新型 Pd@Au 纳米框架水凝胶贴片传感器在伤口监测和促进伤口愈合中的研究进展。同时，汇报人将简略介绍一种基于机器学习的智能汗液监测传感器和高灵敏度、高选择性和实时监测汗液中的乳酸含量，为个性化健康管理提供新的解决方案。

D07-32**临床用可吸收聚酯材料结构/性能调控及其产业化**郭颖志*¹

1. 国家卫生健康委科学技术研究所

聚乳酸、聚乙醇酸、聚己内酯等脂肪族聚酯类高分子材料具有良好的生物相容性、生物降解性、生物可吸收性，其理化性能、机械性能、降解性能可通过共聚、共混、无机复合等方式达到性能调控、功能多样的目的；因而成为目前研究广泛、临床应用种类多、价值高的高端生物医用材料。但是，作为植入级生物医用材料，其产品临床标准要求以及加工工艺技术壁垒高、材料合成生产条件苛刻，导致材料规模化、产业化生产困难；加之我国生物医用材料行业起步晚，研制生产及应用进程滞后，国产化严重不足。目前相应临床产品、材料供给严重依赖进口，总体上处于被国外垄断的“卡脖子状态”。报告从调节材料结构组成从而调控材料性能并满足不同临床需求的角度，介绍已获 FDA 批准的可吸收聚酯材料在可吸收医疗器械、组织工程/修复材料、药物输送系统等方面的临床应用。列举相应材料临床产品商业化实例，探讨材料自主研发、公斤级放大生产的关键技术及存在的相关问题，为打破国外垄断，改善严重依赖进口的局面，形成稳定可靠的规模化生产能力提供技术基础。

D07-33**组织修复功能化的无机气凝胶止血材料研究**朱钰方*¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

D07-34**基于天然活性基元仿生材料加速组织再生修复**马红石*¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

紧急创伤救助是挽救生命的重要手段，这激励着学者们研究发展具有优异止血和伤口愈合性能的生物医用材料。无机粉体材料因力学性能不匹配，残留粉体易导致血栓栓塞、细胞毒性、组织钙化等而极大限制其用于止血和伤口愈合应用的前景。无机/有机复合材料因其具有良好的生物相容性和柔韧的力学特性，且避免了无机粉体直接侵入创伤组织，较好地解决了无机粉体材料的使用难题。然而，无机/有机复合材料是以有机高分子基质为主体构建，无机组分含量通常较低，这难以充分发挥无机材料生物活性的优势。

无机气凝胶呈现出高孔隙率、高比表面积和良好的柔韧性，在软组织创伤的快速止血和伤口愈合中展现出应用潜力。本研究基于皮肤和肝脏创伤的治疗需求，选择了羟基磷灰石超长纳米线和活性硅酸盐功能化二氧化硅无机纳米纤维为无机自支撑材料制备了兼具良好力学性能、高吸收性和生物相容性的无机生物医用气凝胶，研究其在快速止血和伤口愈合中的应用[1-2]。

参考文献：

[1] Yi Zheng, Wenping Ma, Zhibo Yang, Hongjian Zhang, Jingge Ma, Tian Li, Huicong Niu, Yanling Zhou, Qingqiang Yao, Jiang Chang, Yufang Zhu*, Chengtie Wu*. An ultralong hydroxyapatite nanowire aerogel for rapid hemostasis and wound healing. *Chemical Engineering Journal* 2022, 430: 132912.

[2] Jimin Huang, Yi Zheng, Wenping Ma, Yahui Han, Jianmin Xue, Zhiguang Huan, Chengtie Wu*, Yufang Zhu*. SiO₂-based inorganic nanofiber aerogel with rapid hemostasis and liver wound healing functions. *Acta Biomaterialia* 2025, 194: 483 - 497.

D07-35

基于超声驱动的压电催化与离子稳态调控的肿瘤治疗策略

王恺阳^{*1}, 刘锡建¹, 罗宇¹, ...

1. 上海工程技术大学

传统肿瘤治疗手段常面临非特异性副作用明显、难以有效激活宿主抗肿瘤免疫反应等多重瓶颈, 极大限制其临床疗效。因此, 开发多模式联合、精准调控肿瘤微环境并有效诱导抗肿瘤免疫的新兴治疗策略至关重要。近年来, 基于超声触发的压电催化反应, 通过有效调控肿瘤微环境中的氧化应激水平与细胞内外离子稳态, 精准诱导新型细胞死亡方式及免疫级联激活, 为突破上述挑战提供新思路。

本研究围绕超声驱动的压电催化效应, 以纳米材料的晶体结构与带隙工程为切入点, 系统探索了多种新型纳米体系在肿瘤治疗中的创新应用: (1) 构建超小带隙的铜钨氧化物 (CuWO_4) 纳米平台, 借助压电催化效应, 精准调控胞内铜离子与谷胱甘肽 (GSH) 水平, 实现铜死亡与铁死亡的级联效应, 诱导显著的免疫原性细胞死亡 (ICD); (2) 开发带隙可调的低带隙铋基钙钛矿 (KBiO_3), 利用其强压电效应与 ROS 生成特性, 通过 ROS-NLRP3-Caspase-1-GSDMD 通路, 高效诱导肿瘤细胞焦亡, 显著增强肿瘤免疫应答;

(3) 设计晶格畸变且富含氧空位的铌基钙钛矿 (NaNbO_3), 依托压电催化与光热效应, 实现 Na^+/K^+ ATPase 的级联调控, 诱导肿瘤细胞内钠离子稳态严重失衡, 触发细胞焦亡并增强免疫激活效果; (4) 利用镧系元素特有的“镧系收缩”现象, 精准构建了镧系钙钛矿 (LaMnO_3) 纳米平台, 通过镧离子 (La^{3+}) 的高电荷密度与离子半径收缩特性, 在超声刺激下精确扰乱胞内钙稳态, 引发泛凋亡效应, 进而释放大量损伤相关分子模式 (DAMPs), 有效激发宿主抗肿瘤免疫。

上述策略通过压电催化作用, 精准调控肿瘤细胞氧化还原平衡与离子稳态, 协同诱导多种新型免疫原性细胞死亡模式, 实现了显著的体内外肿瘤抑制效果, 并有效地激活了强大的抗肿瘤免疫应答。这些成果突破了传统治疗模式单一、效率低下的限制, 为开发兼具高效性、选择性与免疫激活能力的压电催化-离子稳态调控型肿瘤治疗方法提供扎实的理论基础, 展现出良好的临床转化前景。

D07-36

生物材料纳米界面工程及多维度功能调控

王国成^{*1}

1. 中国科学院深圳先进技术研究院

纳米材料的精确控制和动态协同作用为糖尿病并发症、病毒感染和骨科植入修复等医学难题提供了创新的解决方案。本研究利用纳米限域和界面工程技术, 构建了多种响应型功能材料。例如, 在糖尿病创面愈合方面, 我们研发的氨硼烷负载介孔硅 (AB@MSN) 微针可以持续清除深层氧化应激, 调节巨噬细胞极化, 并同步触发氧化石墨烯背衬层释放钴离子 (Co^{2+}) 促进血管新生[1]。此外, 基于钙钛矿杂化体系的氢气 (H_2)/镁离子 (Mg^{2+}) 双释放平台则通过基因表达重编程加速糖尿病骨缺损的神经血管网络重建。同样的动态响应理念也应用于抗病毒和抗菌领域。 α -氢氧化钴纳米片 (CHN) 凭借高密度三价钴位点破坏病毒刺突蛋白结构[2], 而二氧化钛-石墨烯 ($\text{TiO}_2\text{-G}$) 超表面则通过近红外光控制抗生素释放和光催化活性氧的产生, 实现植入体感染的协同清除, 同时逆转光动力损伤并激活成骨基因表达[3]。本研究聚焦于纳米限域控释、多模态功能协同及病理微环境响应三大核心, 致力于将纳米材料从静态功能载体升级为动态生物调节器, 为代谢疾病、感染和再生医学的整合治疗提供智能化的材料设计新思路。

参考文献

[1] Haibo Tao; Yan Xia; Tao Tang; Yuan Zhang*; Shi Qiu; Junkang Chen; Zhengjiang Xu; LeiLi; Jiajun Qiu; Panfeng Wang; Jiangong Wu; Xiaobing Zhao*; Shuogui Xu*; Guocheng Wang*; Selfresponsive H_2 -releasing microneedle patch temporally adapts to the sequential microenvironment requirements for optimal diabetic wound healing, *Chemical Engineering Journal*, 2024, 489:151200

[2] Ben Wu; Guofang Zhang; Jiawen Ji; Rong-Hua Luo; Junkang Chen; Feng-Liang Liu; Emerson Coy; Sergio E. Moya; Qi Li; Xiaoman Suo; Xinyue Chen; Yong-Tang Zheng; Yang Li*; Guocheng Wang*;

ZIF-67-Derived Antivirus Cobalt Hydroxide LDH Nanosheets Produced through High-Concentration Cobalt Ion-Assisted Hydration, *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(14): 2312941

[3] Minggang Yang; Yufan Zhang; Zhenhao Hou; Jianbo Wu; Fuwei Liu; Jun Wu; Kelvin W.K. Yeung; Wenhao Qian; Xuanyong Liu; Liang Kong; Yunpeng Li*; Jiajun Qiu*; Guocheng Wang*; NIR-I Light-Activated Antibiotic Delivery & PDT via TiO₂/Graphene Metastructure for Enhanced Antibacterial Activity and Osseointegration of Ti Implants, *Advanced Healthcare Materials*, 2025, 2500743

D07-37

聚柠檬酸酯的降解及改性研究

万露*¹

1. 江苏科技大学

摘要: 聚柠檬酸酯作为一类新型的生物可降解材料, 自从研发以来在医学领域获得广泛的研究, 以此为基材可制备出各种组织工程支架、生物可降解电子器件等。然而, 由于聚柠檬酸酯基材只能被动降解, 导致聚柠檬酸酯基植入物的降解速率无法迎合目标应用的需求进行及时调控, 且其力学性能较差, 从而严重阻碍了其临床转化应用。在众多聚柠檬酸酯中, 对聚(1,8-辛二醇-co-柠檬酸酯)(POC)研究最为广泛, 且其降解机理尚不明确。因此, 我们以 POC 为基材, 对其体内和体外降解行为进行系统地研究, 首次揭示了 POC 的降解机理主要为本体侵蚀[1]; 基于此降解机理, 我们对 POC 进行改性, 研发出了一种可按需调控降解速率的聚柠檬酸酯 (POCSS), 植入体内后可随时根据需求对其降解速率进行及时调控, 且不会产生副作用[2]; 基于 POCSS 调控降解机理深入探索, 研发出了一种具有优异力学性能、良好抗水性且可高效按需调控降解速率的聚柠檬酸酯, 将其应用于生物电子器件领域, 展示出巨大的应用潜力[3]; 此外, 我们通过磷酸盐缓冲溶液 (PBS) 对聚柠檬酸酯进行处理, 引入大量强氢键, 对其力学性能进行了极大的提升[4]。该策略, 无需引入任何有毒成分, 且具有高度普适性, 力学改性效果极其显著。

参考文献:

[1] Lu Wan; et al; Bulk Erosion Degradation Mechanism for Poly(1,8-octanediol-cocitrate) Elastomer: An In Vivo and In Vitro Investigation, *Biomacromolecules*, 2022, 23(10): 4268-4281

[2] Lu Wan; et al; Citrate-Based Polyester Elastomer with Artificially Regulatable Degradation Rate on Demand, *Biomacromolecules*, 2023, 24(9): 4123-4137.

[3] Lu Wan; et al; Tough and Water-Resistant Bioelastomers with Active Controllable Degradation Rates, *ACS Applied Materials Interfaces*, 2024, 16(5): 6356-6366

[4] Lu Wan, et al. A Universal and Green Strategy for Super-Tough Citrate-Based Polymers via Strong Hydrogen Bonds. *Macromolecules*. 2025. (Under review)

D07-38

生物电子的开发与临床应用

李林鹏*¹

1. 上海交通大学医学院附属第六人民医院

生物电子, 如电子耳蜗、听觉脑干植入物等, 是治疗感音神经性聋的重要手段, 因此其信号质量是影响疗效的关键。从声音源-听神经电子-听神经的传导通路入手, 专注听觉神经的功能传导修复的技术创新与高质量应用: 1) 首次实现了非言语频率的背景噪音过滤技术, 并解析了低频声音消散和高频声音过滤的机理; 2) 首创了听神经电子的神经免疫反应的被动调控策略, 从细胞-组织多层面分析潜在的分子机制; 3) 开创了无线低频电刺激的神经损伤修复方法, 实现了在体神经电子侵入后的损伤修复, 并获得英国卫报等官方媒体报道。

D07-39

基于磁控微纳米机器人集群运动行为响应的免疫检测研究

宋一诺¹, 金东东¹, 马星*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

微纳米机器人由于其自主运动优势, 弥补了传统生物检测方法中被动探针无法运动操控的局限性。然而, 当面向实际检测应用需求时, 单个微纳机器人容易受到环境的局部扰动, 导致检测结果出现重复性差、精准度低等问题。为此, 本课题提出了一种基于磁控微纳米机器人集群运动行为响应的新型免疫检测策略。在本课题中, 偶联特异性抗体的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2$ 磁性颗粒 ($\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2\text{-ANTI}$) 在旋转磁场作用下自组装形成涡旋集群, 当引入目标抗原后, 抗原与集群中单体机器人表面的抗体发生特异性识别, 进而打破原有的运动平衡, 导致集群整体运动行为发生变化, 从而实现对目标抗原的检测。具体而言, 抗原的引入会使集群直接表现为旋转速率降低和面积减小两大特征变化, 通过对相关运动行为参数的提取与分析, 可实现对抗原浓度的定量检测。相比传统方法, 该策略充分利用集群体系的协同稳定特性, 显著提高了检测过程中的抗干扰能力和重复性。进一步实验表明, 该集群检测体系可用于微滴阵列平台, 实现高通量、多通道检测, 灵敏度可达 ng 级别, 显著提高了检测效率及灵敏度。综上所述, 该微纳米机器人集群检测策略在提升检测稳定性、灵敏度及多通道能力方面具有显著优势, 为未来生物检测系统的小型化、高效化发展奠定了坚实基础。

D07-40

仿生智能神经组织工程支架用于精准动态调控再生微环境的研究

张进*¹, 张凯鑫¹, 毕轲磊¹

1. 福州大学

长距离周围神经损伤 (PNI) 通常会导致靶组织功能障碍, 且无法进行自身修复, 严重影响患者的生活质量, 其治疗是临床上面临的难题。本研究论述了在仿生智能神经再生组织工程支架方面的研究, 主要是通过物理外场调控和功能分子控释两方面来进行研究, 为实现长距离神经缺损的高效修复和功能重建提供了新方案。

物理外场调控主要包括导电电刺激, 压电电刺激以及磁刺激。(1) 构建平行排列的聚合物纤维提供了地形线索, 促进细胞迁移和引导轴突沿着纤维的方向生长, 充分加强引导效能, 促进神经组织再生 [1]。(2) 在取向结构的基础上引入电刺激, 其已被证明具有调节神经细胞行为的能力, 为避免传统电活性支架的缺点, 引入智能的压电支架, 作为无线电刺激器来促进组织修复和再生, 加速轴突生长、髓鞘再生、改善神经功能恢复 [2]。(3) 引入超顺磁性纳米颗粒, 其对旋转磁场高度敏感, 并以细胞内的机械敏感离子通道激活响应 [3]。磁场作为一种非侵入性策略, 通过超顺磁性纳米颗粒来操纵支架释放神经营养因子等, 为优化多组织再生过程提供了一种远程操控方法, 且不限于周围神经再生过程。

功能分子控释则根据神经再生阶段精准调节炎症微环境, 促进轴突再生和髓鞘化。(1) 通过调控镁单体的比例开发了一种可调节且有效的 Mg^{2+} 释放系统, 这种 $\text{MgO}/\text{MgCO}_3/\text{PCL}$ 多梯度纤维系统为 Mg^{2+} 在外周神经再生过程中对 Wnt 通路的调节作用提供了新的见解, 揭示了使用 Mg^{2+} 包裹的神经支架促进外周神经修复的分子机制 [4]。(2) 在验证单一功能分子作用的基础上, 进一步揭示组织再生不同阶段的精准动态调控作用 [5], 通过“生物标志物精准响应、动态配位键解离及渗透-扩散机制”顺序递送生物活性物质, 精准动态调控再生微环境, 最终可实现长节段神经缺损的高效率再生与功能重建。上述工作为仿生智能神经组织工程支架在长距离周围神经再生方面奠定了坚实的理论基础。

参考文献:

[1] J. Zhang, X. Zhang, C. Wang, F. Li, Z. Qiao, L. Zeng, Z. Wang, H. Liu, J. Ding, H. Yang, *Advanced Healthcare Materials*, 2020, 2000604.

[2] Y. Yang, X. Yin, H. Wang, W. Qiu, L. Li, F. Li, Y. Shan, Z. Zhao, Z. Li, J. Guo, J. Zhang, Y. Zhao, *Nano Energy*, 2022, 107, 108145.

[3] B. Xia, X. Gao, J. Qian, S. Li, B. Yu, Y. Hao, Y. Jin, Z. Luo, J. Zhang, J. Huang, *Advanced Materials*, 2023, 36, 2305374.

[4] Z. Yao, Z. Chen, X. He, Y. Wei, S. He, Q. Zong, J. Qian, L. Song, L. Ma, L. Xue, G. Li, J. Zhang, Y. Li, D. Wang, *Advanced Fiber Materials*, 2024, major revisions, (AFM-D-24-00374).

[5] J. Zhang, D. Tong, H. Song, R. Ruan, Y. Sun, Y. Lin, J. Wang, L. Hou, J. Dai, J. Ding, H. Yang, *Advanced Materials*, 2022, 34, 2202044.

D07-41

功能化纳米硒化学设计与调控及其在重大疾病防治中的应用

许利耕¹, 王滢¹, 雷思敏¹, 邓云清¹, 陈填烽*¹

1. 暨南大学化学与材料学院

重大疾病如恶性肿瘤、耐药细菌感染、急性烈性病毒性传染病等严重危害着人类和畜禽的生命健康,造成了难以估量的经济损失。值得注意的是,这些重大疾病常通过多种机制诱导免疫细胞功能障碍和免疫抑制微环境等,实现免疫逃逸。研究表明,在疫苗或病原体等外源刺激下,免疫细胞的氧化还原稳态失衡大大削弱了免疫反应质量。同时,新冠感染患者、癌症患者等的免疫功能障碍亦与氧化应激密切相关。因此,开发具有氧化还原调控、载体功能和免疫激活作用的新型纳米药物及其免疫治疗新策略,对重大疾病的有效防治具有极其重要的临床意义。

硒作为人体必需的微量元素,在维持机体正常生命活动包括免疫功能的正常进行中发挥着极其关键的作用。我们通过调控纳米硒的表面化学性质及其与蛋白质、多肽、核酸、灭活病毒等的相互作用,成功构建了一系列基于纳米硒佐剂的新冠纳米疫苗、灭活病毒纳米疫苗、黏膜纳米疫苗、肿瘤双联疫苗等,发现纳米硒佐剂既可通过调控氧化还原平衡改善免疫功能,又可通过多条 Toll 样受体信号通路激活免疫细胞,并作为载体高效促进免疫细胞对抗原的摄入,显著提高抗原的免疫原性,诱导强效的天然免疫、细胞免疫反应,且可诱导大量长效、高效的特异性中和抗体产生。本研究开发的纳米硒佐剂具有广谱性,适用于蛋白质、DNA 和灭活病毒等绝大部分疫苗的开发。上述一系列研究为解决重大疾病导致的免疫功能障碍、免疫抑制微环境等提供了新思路和新策略,具有极其重要的临床应用价值。

D07-42

压电纳米医学

董立乐*¹, 王嘉睿¹, 杨徐建¹, 钟吉霖¹

1. 中国科学院赣江创新研究院

癌症治疗主要采用手术切除,并辅之以放化疗。临床患者大多已处于中晚期,失去手术机会,化疗存在耐药和强烈的毒副作用,放疗存在黏膜损坏、溃疡等并发症。近年来,声动力疗法是一种基于超声波(US)激活声敏剂,生成高毒性活性氧自由基的治疗方法。该治疗策略具有高效、易操作、微创、毒副作用小的优点。然而,肿瘤乏氧微环境以及生成的活性氧自由基(ROS)寿命极短和作用距离有限,严重影响其治疗疗效。我们研究团队提出构建超声响应型纳米药物,一方面利用超声波提高其在肿瘤深层组织的浓度;另一方面,超声刺激原位生成 ROS 风暴,并高效消耗谷胱甘肽(GSH),从而降低 ROS 损耗。最后,发挥超声波与纳米药物的主客体效应,实现癌症的高效治疗。

基于此,我们研究团队构建了多种压电声敏剂,用于增强声动力治疗。[1-7] 我们基于压电效应提出了一种高效的能量转换策略,实现机械能-电能-化学能的转变,通过增强肿瘤部位 ROS 浓度和逆转抗氧化水平来破坏癌细胞氧化还原稳态,诱导细胞凋亡,为高效利用压电声敏剂,原位放大氧化应激增效肿瘤治疗策略提供实验参考。

参考文献

1. Lile Dong* et al. Nanoconfined heterojunctions with enhanced piezoelectricity for amplifying reactive oxygen species storms-triggered tumor ferroptosis-like/apoptosis. *Nano Today* 2025, 64, 102785.

2. Lile Dong* et al. Cascade-amplified Oxidative Stress via Bandgap-Tuned KBiO₃ Perovskite for Cancer Therapy. *Small* 2025, 2501860.
3. Lile Dong* et al. Small-Bandgap Transducers Induced Carrier Separation for In Situ Dual-Amplified Tumor Oxidative Stress. *Adv. Funct. Mater.* 2024, 34, 2401897.
4. Lile Dong* et al. Sono-blasting Triggered Cascading-amplification of Oxidative Stress for Enhanced Interventional Therapy of Hepatocellular Carcinoma. *Nano Lett.* 2024, 24, 8996.
5. Lile Dong* et al. Novel Spatially Asymmetric Copper Bismuthate-Mediated Augmentation of Energy Conversion to Realize “Three-Step” Tumor Suppression. *Adv. Sci.* 2024, 11, 2402599.
6. Lile Dong et al. Engineering Molybdenum-Assisted Tellurium Nanosensitizers for Enhanced Sonodynamic Tumor Nanotherapy. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33, 2302541.
7. Lile Dong* et al. Sonocatalytic in situ Induced Oxygen Storm Precision Enhanced Reactive Oxygen Therapy for Pancreatic Cancer. *Adv. Funct. Mater.* 2023, 33, 2303451.

D07-43

基于蝴蝶型肽类树状大分子的抗菌研究

李宁*¹

1. 福建医科大学

糖尿病足溃疡（DFU）感染一直是阻碍伤口愈合的重大难题。为此，我们开发了一种基于精氨酸修饰的蝴蝶形肽类树状大分子（C&D@Z）的纳米多药共递送系统，该系统能有效杀灭细菌并促进伤口愈合。首先，在近红外光照射下，负载的光敏剂产生活性氧（ROS），直接杀伤细菌。其次，过量的 ROS 会与我们的蝴蝶型肽类树状大分子发生反应，从而实现一氧化氮（NO）的大量持续释放。NO 不仅具有杀菌作用，还能发挥抗炎和促血管生成效应。在 NO 生成产生助推作用下，使得该系统能够深层渗透入生物膜，从而更有效地清除细菌。通过生物膜穿透实验和伤口愈合实验，我们验证了该系统在杀菌和促进愈合方面的高效性。总之，我们的系统充分利用了蝴蝶型肽类树状大分子高度支化和独特空腔结构特点，使精氨酸基团与光敏剂紧密接触，实现了高效共递送、促进一氧化氮（NO）的高效转化。其展现出卓越的 NO 生成能力、光动力疗法（PDT）利用效率以及生物膜渗透性能。这种 PDT 与 NO 疗法间的级联反应，为治疗 DFU 感染提供了一种极具前景的新策略。

D07-44

仿生拓扑工程构建智能电子界面及其生物传感应用

吴花雨*¹

1. 安徽大学

水凝胶作为重要的高分子生物材料，凭借与生物组织的高度相容性、力学适配性及可定制潜力，被视为连接生物系统与电子器件的理想界面材料。然而，传统水凝胶在动态生理环境中面临核心挑战：难以协同力学性能与电学功能、长期稳定性不足、生物分子识别精度有限，严重制约了其在实时监测与智能诊疗中的高端应用。

仿生材料的核心优势在于跨尺度拓扑结构的精确复现与功能协同，能突破传统材料性能边界。以“仿生拓扑工程”为核心，深度融合天然生物系统的智能结构-功能耦合逻辑，有望突破传统均质水凝胶设计存在局限，与自然界通过多尺度拓扑结构与分子识别的精密耦合（如病毒衣壳、细菌鞭毛）实现了性能的统一。通过“动态键网络能级匹配”与“亚微米级孔道编程”，本质是将生物识别与传感协同机制转化为可定量调控的设计参数（如水凝胶机械性能、孔径梯度、生物识别能力与电化学性质），建立创新的“拓扑生物识别-生物智能传感”模型，实现生物电子界面高强度、高导电性与高识别精度的功能平衡。仿生智能传感器生物接口材料将为下一代生物传感技术（“仿生材料-功能器件-大数据系统集成”）提供创新支撑方案。

D07-45

肽基钙纳米调节器破坏钙稳态增敏肿瘤放疗治疗研究

王佃余*¹

1. 中国医学科学院放射医学研究所

目的：基于 Ca^{2+} 在维持肿瘤细胞稳态中的重要作用，拟制备一种能够同时靶向 TRPV1 和 RyR 的非钙基 Ca^{2+} 纳米调节器，通过促进胞外 Ca^{2+} 内流和内质网 Ca^{2+} 释放破坏细胞内 Ca^{2+} 稳态，最终实现肿瘤放疗增敏。

材料与amp;方法：通过固相合成得到辣椒素 (CAP) 和一氧化氮 (NO) 偶联的自组装多肽衍生物；采用核磁、质谱和液相色谱确证化合物结构和 NO 接枝率；采用碱性磷酸酶 (ALP) 催化多肽自组装形成 Ca^{2+} 纳米调节器 CAP-P-NO；通过透射电镜、动态光散射、紫外光谱等多种表征手段对 CAP-P-NO 的微观形貌、Zeta 电位、临界组装浓度 (CAC)、体外释药行为等理化性质进行考察；通过 FLUO-8 染色、ICP-MS 等考察 CAP-P-NO 破坏细胞内 Ca^{2+} 稳态的能力。通过 JC-1 染色、生物电镜、CHOP 免疫荧光染色等对 Ca^{2+} 稳态破坏后的线粒体、内质网等亚细胞器损伤进行鉴定；通过转录组学考察 Ca^{2+} 稳态破坏后基因组水平变化；通过克隆形成、彗星实验、 γ H2AX 等实验评价 CAP-P-NO 的体外放疗增敏效果；通过胰腺癌皮下瘤模型、胰腺癌原位模型及肝癌 PDX 模型评价 CAP-P-NO 的体内放疗增敏效果。

结果与amp;讨论：目标多肽结构正确，NO 接枝率高，在 ALP 作用下可自组装形成纳米纤维 CAP-P-NO，其 CAC 低，Zeta 电位在 -46.3 mV 左右，具有灵敏的 GSH 及酸响应释药能力；CAP-P-NO 可特异性的诱导肿瘤细胞内 Ca^{2+} 紊乱；细胞内 Ca^{2+} 紊乱后线粒体膜电位显著下降，线粒体肿胀且线粒体嵴消失，CHOP 表达升高且移位至细胞核，内质网肿胀、空泡化，证明发生了较为严重的线粒体和内质网应激；转录组学结果显示，细胞内 Ca^{2+} 稳态破坏后凋亡基因显著上调，而一系列与放疗抵抗相关的基因显著下调；克隆形成等实验结果证明 CAP-P-NO 诱导 Ca^{2+} 稳态破坏后显著增强了肿瘤细胞对放疗的敏感性，放疗增敏比可达 1.93；CAP-P-NO 联合放疗在胰腺癌皮下瘤模型、胰腺癌原位模型和肝癌 PDX 模型中均取得了优异的肿瘤治疗效果并显著延长了荷瘤小鼠的生存期，且未对机体造成明显的毒副作用。

结论：成功制备了一种非钙基的 Ca^{2+} 纳米调节剂，通过内源性 Ca^{2+} 再分布特异性破坏了肿瘤细胞内 Ca^{2+} 稳态，从而极大地破坏了细胞稳态，显著增强了肿瘤细胞对放疗的敏感性。总体来说，我们提出了一种通过内源性 Ca^{2+} 再分布增强难治性肿瘤放疗敏感性的新策略。

D07-46

放射性标记松花粉微球用于肿瘤精准放疗的诊疗一体化研究

刘艺娜*¹

1. 兰州大学核科学与技术学院

目的：针对传统放射性载体在肿瘤近距离放疗中存在的标记工艺复杂、全身毒性较高等局限，本研究开发了基于天然松花粉的多功能放射性药物 —— ^{90}Y 标记聚多巴胺-双膦酸盐修饰的松花粉微球 (^{90}Y -PDA-BP+Pine Pollen, ^{90}Y -PBP)，构建“成像引导 - 精准放疗 - 免疫激活”一体化平台，探索其在原发及转移性肿瘤治疗中的应用。

方法：通过聚多巴胺 (PDA) -双膦酸盐 (BP) 涂层修饰天然松花粉，构建功能化微球，使用扫描电子显微镜 (SEM) 等表征微球性质；通过流式细胞术和酶联免疫吸附测定 (ELISA) 检测超声响应下微球的免疫激活作用；采用伽马计数器和小动物活体成像测定体内外标记效率和标记稳定性；在 4T1 乳腺肿瘤模型中评估局部放疗效果，在 CT26 结肠癌双边瘤模型中联合 Anti-PD-L1 免疫治疗评估对远端肿瘤的抑制作用。

结果：SEM 显示微球材料呈椭圆形，表面可见均匀包裹的聚多巴胺涂层；超声破壁后主要释放粗多糖 (3.3 mg/g) 和蛋白质 (0.74 mg/g) 两种物质；PBP+超声组 CD80 和 CD86 双阳性细胞占比 55.2% ($P < 0.001$)，显著高于其他组，且对促炎细胞因子分泌也有促进作用； ^{90}Y 标记的 PBP，标记效率高达 99.9% (松花粉：0.1mg, ^{90}Y :100 μCi)，3 天内的标记稳定性在 95% 以上。成像结果显示，瘤内注射 7 天后，肿瘤中放射性

核素占比 85%；4T1 单边瘤模型中，90Y-PBP+超声组的肿瘤生长完全被抑制，小鼠存活率为 80%。H&E 切片和 TUNEL 染色显示该组肿瘤细胞被严重破坏，出现严重的细胞凋亡现象。CT26 双边瘤模型中，90Y-PBP+anti-PD-L1+超声组远处肿瘤的生长受到完全抑制，小鼠存活率高达 100%。免疫组化结果显示该组肿瘤组织中 CD8+ T 细胞、颗粒酶 B+ 细胞数量显著高于其他组 ($P<0.001$)。毒性评估显示微球对心、肝、脾、肺、肾等器官无明显损伤。

结论：天然松花粉通过 PDA-BP 涂层实现核素高效装载，结合超声响应与核素成像构建“诊疗一体化”平台，与免疫检查点抑制剂联用可系统性抑制原发及转移肿瘤，安全性良好，为肿瘤精准治疗提供了创新策略，具备临床转化潜力。

D07-47

基于细菌外膜囊泡的靶向性 ^{177}Lu 递送系统

张菲菲*¹

1. 兰州大学

目的： ^{177}Lu 标记的 PSMA-11、FAPI-04 (^{177}Lu -PSMA-11、 ^{177}Lu -FAPI-04) 是目前临床用于前列腺癌、成纤维细胞高表达癌症的靶向治疗的放射性药物，但其存在依赖单一靶点、非特异性摄取高及肿瘤穿透性有限等问题。细菌外膜囊泡 (OMVs) 因其天然纳米尺寸、良好的生物相容性和易于工程化修饰的特点，成为新型放射性药物载体的理想候选。本研究旨在开发一种基于 OMVs 的新型 ^{177}Lu 递送系统，通过表面表达镧系结合蛋白 (Lanmodulin, LanM) 高效整合 ^{177}Lu ，并评估其在肿瘤靶向性和治疗效果上相较于临床药物 ^{177}Lu -PSMA-11、 ^{177}Lu -FAPI-04 的优越性。

方法：采用基因工程技术在 VNP20009 膜表面表达 LanM 蛋白，并通过诱导刺激等操作使其富集于 OMVs 表面，形成表面表达镧系结合蛋白的细菌外膜囊泡，简称 LnOMV，并在其表面修饰 PSMA/FAPI。采用透射电镜 (TEM)、动态光散射 (DLS) 和 Western blot 验证 LnOMV 的形态、粒径分布及 LanM 表达。在 pH 5 条件下，LnOMV 与 $^{177}\text{LuCl}_3$ 孵育，测定标记效率及体外稳定性 (PBS、血清中的放射性保留率)。建立 RM-1PSMA 荷瘤小鼠模型，静脉注射 ^{177}Lu @LnOMV-PSMA/FAPI 或 ^{177}Lu -PSMA-11、 ^{177}Lu -FAPI-04，通过小动物活体成像和生物分布实验评估肿瘤靶向性。监测肿瘤生长抑制、生存期及主要器官毒性 (血常规、血生化指标及组织病理学分析)。

结果：LnOMV@PSMA/FAPI 粒径约 40 nm，LanM 表达成功 (Western blot 验证)， ^{177}Lu 标记效率 >98%，体外稳定性良好 (血清中 48h 放射性保留率 >95%)。静脉注射 24 小时后， ^{177}Lu @LnOMV-PSMA 在肿瘤部位 (圆圈区域) 蓄积显著高于 ^{177}Lu @PSMA-11 (24h: 9.6% vs 5.4% ID/g; 72h: 1.2% vs 0.35% ID/g)。尽管在肝、脾、肾中有一定蓄积，但骨骼摄取较低，表明其安全性良好。生物分布数据与成像结果一致，证实了该药物的优异肿瘤靶向性。我们评估了 ^{177}Lu @LnOMV-PSMA 的抗肿瘤效果，结果显示其较 ^{177}Lu @PSMA-11 显著抑制肿瘤生长并延长小鼠生存期 (存活率达 90%)。组织学分析表明 ^{177}Lu @LnOMV-PSMA 能增强肿瘤细胞损伤，并激活 TME 中 CD8+ T 细胞和颗粒酶 B 介导的免疫反应。血液检测显示两组仅出现轻微血小板和白细胞减少，证实 ^{177}Lu @LnOMV-PSMA 具有良好的生物安全性。我们进一步比较了 ^{177}Lu @LnOMV-FAPI 与临床药物 ^{177}Lu @FAPI-04 的疗效，结果显示两者均显著抑制肿瘤生长。 ^{177}Lu @LnOMV-FAPI 表现出更优的治疗效果，使小鼠 60 天存活率达到 75%。实验证实 ^{177}Lu @LnOMV-FAPI 在延长生存期方面具有明显优势。

结论：本研究成功构建了一种基于 LnOMV@PSMA/FAPI 的新型 ^{177}Lu 递送系统，其具有高标记效率、优异肿瘤靶向性和显著的治疗效果，且安全性良好。相较于 ^{177}Lu -PSMA-11， ^{177}Lu @LnOMV-PSMA/FAPI 在肿瘤摄取、抑制生长及延长生存期方面均表现更优，为肿瘤靶向放射性核素治疗提供了创新策略。未来可进一步探索其在其他肿瘤类型 (如乳腺癌、胶质瘤) 中的应用潜力。

D07-01**植入体表面适时抗菌涂层设计及组织整合**张兰*¹

1. 西安交通大学

钛合金、Peek 等材料具有高的比强度、耐蚀性、生物相容性，被广泛应用于人体硬组织修复和替换，涉及的部位涵盖了髌关节、牙、颌面等承力及非承力部位。然而，上述材料均呈现生物惰性，既无法与宿主骨形成良好的骨性结合，又不能抵御细菌入侵，在服役过程中易出现松动、细菌感染，导致种植体失效，因此需要对其进行表面生物活化改性。近年来在植入体表面研发的生物活性涂层不胜枚举，遗憾的是，植入 3-6 个月低于 70% 的骨接触率无法满足患者对植入体尽早承载或长期稳定服役的要求，种植体表面生物功能仍有较大的提升空间。

通过开发微弧氧化、氟沉降阳极氧化技术、水热技术及氟介质热固化技术，在植入体表面构建了一系列具有光/声响应的抗菌活性涂层，包括 PDA-CuS@TiO₂ 纳米管状生物异质结、Fe₃O₄-TiO₂ 磁性异质结、BaTiO₃ 纳米管、Cu 掺杂 HA 纳米棒、PDA-CeO₂@NaTiO₃ 复合纳米管等生物多功能涂层，并对这些涂层的结构特征、光/声响应效应、压电性能、细菌/细胞和组织响应进行了系统研究，阐明了涂层的抗菌机制及组织整合机制，为提升硬组织植入体的临床服役效能奠定基础。

D07-02**糖肽水凝胶的开发与应用研究**毛宏理*¹

1. 南京工业大学

D07-03**非晶态磷酸钙纳米材料及其生物功能研究**张兴¹，赵紫濠¹，鲁梁¹，张泽平¹，黄才浩¹，杨锐¹

1. 中国科学院金属研究所

人体内存在一定量的非晶态磷酸钙[1, 2]，其相较结晶态磷酸钙具有更高的溶解度和更快的降解速率，并具有多种生物功能尤其在诱导矿化和促硬组织再生方面作用显著[3]。然而非晶态磷酸钙处于亚稳态，易晶化形成晶体材料而难以应用，构建具有良好稳定性的非晶磷酸钙材料并探究其生物功能及促组织修复作用具有重要意义。

我们采用生物矿化仿生策略制备了非晶磷酸钙（ACP）组装材料，材料内部由 2 nm 的离子团簇组装形成，常温下可稳定保存一年以上[4]。研究结果发现非晶磷酸钙纳米材料的溶解速率要远大于对照组的 HA 和 TCP 纳米材料，非晶磷酸钙纳米材料具有 pH 敏感，在进入细胞的核内体中相对稳定，随后进入溶酶体中可迅速溶解。依据上述方法构建了非晶态磷酸钙锌团簇（ACZP）组装体，体内外数据显示其具有通过上调巨噬细胞 M2 表型减少炎症反应的免疫调节功能及促骨再生作用[5]。进一步采用仿生策略构筑了一种由锌离子掺杂的无定形磷酸钙（ACZP）与几丁质（CT）构成的仿螳螂虾马鞍形支架（ACZP/CT），在结构、成分与功能层面实现多维度仿生以增强骨再生能力。研究表明，该支架成功实现了 ACZP 纳米团簇的非晶调控，并因其鞍形仿生的分级结构，展现出与皮质骨相当的优异弯曲强度（160.09 MPa）和断裂韧性（10.08 MPa·m^{1/2}），在大鼠颅骨缺损中植入 ACZP/CT 支架六个月后观察到显著增强的血管化新骨形成。上述工作实现了对非晶态磷酸钙材料组装行为与性能的精准调控，获得了长期稳定的非晶磷酸钙材料，展现了该系列材料在促组织修复与再生方面的巨大潜力。

参考文献：

[1] La Fontaine A, Zavgorodniy A, Liu H, Zheng R, Swain M, Cairney J. Atomic-scale compositional mapping reveals Mg-rich amorphous calcium phosphate in human dental enamel. *Science Advance* 2016;2(9):e1601145.

[2] Tang C, Wei Y, Gu L, Zhang Q, Li M, Yuan G, He Y, Huang L, Liu Y, Zhang Y. Biomineral precursor formation is initiated by transporting calcium and phosphorus clusters from the endoplasmic reticulum to mitochondria. *Advanced Science* 2020; 7(8): 1902536.

[3] Yao S, Lin X, Xu Y, Chen Y, Qiu P, Shao C, Jin B, Mu Z, Sommerdijk NAJM, Tang R. Osteoporotic bone recovery by a highly bone-inductive calcium phosphate polymer-induced liquid-precursor. *Advanced Science* 2019; 6: 1900683.

[4] Li N, Cui W, Cong P, Tang J, Guan Y, Huang C, Liu Y, Yu C, Yang R, Zhang X. Biomimetic inorganic-organic hybrid nanoparticles from magnesium-substituted amorphous calcium phosphate clusters and polyacrylic acid molecules. *Bioactive Materials* 2021; 6: 2303-2314.

[5] Wang S, Huang C, Zhang X, Cao L, Gao Y, Wang Q, Zhou Q, Yang R, Zhang X, Li Z. Zinc doped amorphous calcium phosphate integrated GBR module role in facilitating bone augmentation via immunostimulation of osteogenesis. *Journal of Materials Science & Technology* 2025; 226: 320 - 333.

D07-04

功能化水凝胶在快速止血及组织修复中的应用

赵鑫*¹

1. 西安交通大学

战争、意外事故、自然灾害等易导致人体大出血。全世界 30% 以上的创伤性死亡是由失血过多造成。因此，具有快速止血作用的止血剂对严重创伤性出血至关重要。虽然许多已报道或商用止血剂对体表出血有较高的止血效果，但对日常生活、战场等小口径火器和简易爆炸装置造成的深部创伤出血通常无效。因为这些伤口通常形状不规则，且常难以通过按压来止血。因此，不可按压出血的止血是该领域的一大挑战。此外，皮肤位于体表，外伤往往导致皮肤的损伤，一旦皮肤出现严重缺损，就需要伤口敷料来进行创面保护以防止感染并促进创伤修复。慢性伤口敷料的选择是基于抗菌性、促愈合效果、易于应用、成本和患者的舒适度等。传统伤口敷料的功能性单一，促进慢性伤口愈合功能不佳。因此，开发具有促愈合、高抗菌性的功能化水凝胶敷料，以应对细菌感染、伤口闭合、慢性伤口愈合是非常有前景的。

本研究设计了一系列基于没食子酸或月桂酸改性的季铵化壳聚糖和氧化葡聚糖的可注射自膨胀自驱动水凝胶粘合剂，作为止血材料。这种生物活性粘合剂具有优异的抗菌和促凝血性能、快速自膨胀和自推进性能，以及良好的湿组织粘附性，可用于快速控制大出血。采用氧化葡聚糖（OD）交联月桂酸修饰的 QCS（QCSL）和没食子酸修饰的 QCS（QCSG）形成水凝胶网络。此外，多孔碳酸钙和乙酸之间的发泡反应被引入到双组分水凝胶系统中，以提供自膨胀和自推进性能。水凝胶的高效促凝血性、自膨胀/自推进和湿组织粘附性协同发挥作用，在大鼠肝脏和股动脉出血模型、兔体积性肝脏缺损出血模型、兔腹腔盲视野部位大出血模型、猪锁骨下动静脉横断不可按压出血模型中均表现出良好的止血能力。此外，水凝胶具有生物可降解性和良好的生物相容性，可显著促进 MRSA 感染皮肤伤口的愈合。这种新型的止血粘合剂为开发用于不可按压出血止血和皮肤组织修复的自膨胀和自驱动水凝胶粘合剂开辟了新的途径。

在皮肤修复中，我们设计了一种生理条件下可注射的 DN 物理自愈水凝胶，用于治疗耐药细菌感染和全层皮肤切口/缺损修复。水凝胶胶粘剂由儿茶酚-Fe³⁺配位交联聚(癸二酸 甘油酯)-co-聚乙二醇-g-儿茶酚和四重氢键交联 UPy 改性明胶组成。它具有优异的抗氧化性、近红外/pH 响应性和形状适应性。该水凝胶还具有快速自愈、良好的组织粘附性、可降解性、光热抗菌性及近红外照射和/或酸性溶液洗涤辅助移除性能。水凝胶对皮肤创伤有良好的止血作用，对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌(MRSA)有高的杀灭率，比医用胶和手术缝合线呈现更好的皮肤切口闭合和愈合效果。特别是通过调节炎症、加速胶原沉积、促进肉芽组织形成及血管化等，显著促进全层皮肤缺损创面愈合。

此外，为了应对皮肤切口的无缝线闭合以及感染创面的治疗，我们进一步制备了基于聚(柠檬酸-co-聚乙二醇)-g-多巴胺(PCPD)和负载黄芪甲苷(AS)的氨基封端的 Pluronic F127 (APF) 胶束(AS@APF)的可注射、抗菌和抗氧化水凝胶粘合剂。H₂O₂/辣根过氧化物酶(HRP)催化氧化体系被用于催化儿茶酚基团之间的氧化偶联以及儿茶酚基团和氨基之间的化学交联以实现水凝胶网络的快速交联。该水凝胶表现出快

速的成胶过程、高机械强度、抗溶胀性能、良好的抗氧化性能、 H_2O_2 释放行为和可降解性。此外，该水凝胶还具有有良好的湿组织粘附性、高爆破压、优异的抗菌活性、AS 的长期缓释性等。该水凝胶对小鼠肝脏、大鼠肝脏和兔股静脉出血模型均具有良好的止血效果，并且比生物医用胶和手术缝线实现更好的皮肤切口闭合和愈合。此外，水凝胶敷料通过调节炎症、调节胶原蛋白 I/III 的比例、改善血管化和肉芽组织的形成，显着促进了 MRSA 感染的全皮层皮肤缺损伤口的修复。总之，该多功能水凝胶敷料具有再生医学应用潜力，有望在止血急救和促进慢性感染伤口修复研究方面提供指导策略。

D07-05

医用镁合金表面具有 NO 释放功能仿生涂层的构建与性能研究

贾倩影*¹

1. 河南省科学院材料基因工程研究所

可降解镁合金血管支架由于其可降解性、良好的生物相容性被视为永久性支架颇具前途的一种替代品。但其过快的降解速率、内皮化延迟及晚期再狭窄等是制约其在临床应用中的关键难题。为此，在镁基植入体表面构建兼具抗腐蚀性与生物活性的多功能复合涂层，对促进血管重塑及生理功能恢复具有重要意义。为应对实际复杂的血管病理微环境，如氧化应激、炎症反应、高凝状态及细胞增殖紊乱等，本研究设计了一种仿生内皮功能表面，其可通过铜离子 (Cu^{2+}) 催化释放一氧化氮 (NO) 分子，与内皮糖萜大分子透明质酸 (HA) 一起发挥协同作用调控细胞行为。将 Cu^{2+} 与表没食子儿茶素没食子酸酯 (EGCG) 配位形成金属-酚网络 (EGCG-Cu)，该结构兼具 EGCG 的抗炎与抗氧化活性，同时提高了多酚 EGCG 的生物利用度并能防止 Cu^{2+} 的爆释。将 EGCG-Cu 与 HA 负载于丝素蛋白中，通过旋涂技术在氟化后的 ZE21B 合金表面构建丝素蛋白基涂层。结果表明：该涂层均匀致密，可使腐蚀电流密度从 $84.2 \mu A/cm^2$ 降至 $0.202 \mu A/cm^2$ ；该涂层不仅能促进内皮细胞生长，还可减少巨噬细胞的浸润与活化；其持续释放 NO 的特性可抑制血小板聚集与活化，同时有效抑制平滑肌细胞的过度增殖；该涂层表现出自由基清除能力，可抑制因 H_2O_2 诱导引起的氧化应激所带来的内皮细胞损伤，在体内也展示出良好的组织学反应及生物相容性。这种多功能涂层将为当前镁基血管支架在心血管植入领域的应用提供理论依据和新思路。

D07-06

微环境响应多功能材料促进糖尿病创面修复与骨整合

薛阳^{1,2}，张兰*¹，憨勇^{1,2}

1. 西安交通大学金属材料强度全国重点实验室
2. 西安交通大学第一附属医院骨科

针对糖尿病病理微环境（高糖、易感染、持续炎症、神经血管再生障碍）导致的创面愈合与骨整合难题，构建了多功能微环境响应治疗平台。1. 靶向杀菌与免疫协同调控创面修复粒子：通过溶剂处理和静电吸附工艺设计麦芽糊精修饰的 ZIF-67@ZIF-8 核壳粒子。麦芽糊精介导细菌靶向，酸性微环境触发粒子降解，释放 Zn^{2+}/Co^{2+} 直接杀菌并增强巨噬细胞吞噬活性清除残留菌。随后， Co^{2+}/Co^{3+} 价态转换有效清除活性氧 (ROS)，并驱动巨噬细胞由促炎 (M1) 向抗炎 (M2) 表型转化。同时， Zn^{2+}/Co^{2+} 协同巨噬细胞因子，激活内皮细胞、神经细胞及成纤维细胞功能，加速软组织再生与血管神经化。2. 适时抗菌与免疫调控促骨整合涂层：采用水热、溶剂处理及旋涂、氟热固化工艺在锌基底设计 ZnO/ZIF-8@核黄素/透明质酸 (HA) 涂层。该涂层在生理条件下缓释 Zn^{2+} 避免细胞毒性，核黄素与 ZIF-8 协同清除胞内外 ROS 并促进 M1 巨噬细胞向 M2 极化； Zn^{2+} /核黄素/巨噬细胞因子联合调控间充质干细胞、内皮细胞和神经细胞功能，促进组织再生。发生细菌感染时，致病菌分泌的酶及酸触发 HA 和 ZIF-8 降解，实现 Zn^{2+} 爆释，高效杀灭细菌。

D07-07

长效免疫调控支架促进腱骨界面再生

王立人*¹

1. 上海市第六人民医院

引言：不可修复肩袖损伤（irreparable rotator cuff tear, iRCT）发生后，由于单纯外科手术修补无法使腱-骨界面恢复其天然的连续性结构，不可修复肩袖损伤修补术后失败率较高[1-4]。具有促腱-骨界面再生功能的组织工程支架可能是降低手术修补后再撕裂率的有效治疗手段。可降解聚氨酯因其具有良好的力学性能和可加工性是组织工程支架的重要组成材料。但单纯的可降解聚氨酯生物相容性和活性较低，限制了可降解聚氨酯组织工程支架的临床应用效果。因此构建具有生物活性的组织工程支架，可能有利于不可修复肩袖损伤的治疗。

材料与amp;方法：使用本体共聚的方式将阿魏酸（FA）引入聚氨酯的重复单元片段，构建具有长效维持抗炎效果的聚（阿魏酸-氨基甲酸）酯脲（poly(ester-ferulic acid-urethane) urea, PEFUU）。在体外验证 PEFUU 的抗炎功能后，通过静电纺丝和冻干脱细胞华通胶组织酶解物的方式，构建具有能够维持持续抗炎效果的仿生双向持续抗炎支架（bionic nanofibrous bipolar scaffold with anti-inflammation niche, BSAN）。将 BSAN 用于大鼠不可修复肩袖损伤修补，通过影像学、组织学和分子生物学等方法验证 BSAN 促肩袖损伤修复的效果。

结果与amp;讨论：基于主链功能化策略构建的 PEFUU 相比于单纯共混的 PEUU/FA，在体外能更好地缓释抗炎小分子。冻干的脱细胞华通胶组织的酶解物能够促进支架表面干细胞成软骨表达。体内 iRCT 修补实验证明，BSAN 能有效诱导肩袖腱-骨界面形成骨-软骨-肌腱的三项组织学分布，促进肌腱与软骨层的微观连接区恢复连续性和取向性，并维持肌腱端的抗炎效应。

结论：具有生物活性的可降解聚氨酯静电纺丝支架能够为募集干细胞提供合适的微环境，促进 iRCT 的修复效果。

D07-08

医疗导管水凝胶涂层实现人体组织温度实时传感

李亦冉¹，李丹²，王嘉诚¹，叶婷婷¹，栗乾明¹，李录河¹，高睿¹，王远贞¹，任俊焯¹，李方琰¹，卢江¹，何儿¹，焦一丁¹，王列¹，张晔*¹

1. 南京大学

2. 南京中医药大学

医用外科导管在医学领域被广泛使用，不仅可直接输送药物至特定组织，也可引流手术部位积液以防炎症物质累积。然而，与局部温度升高相关的感染常发生在导管-组织界面，导致不可逆的病理损伤、认知行为异常，甚至增加死亡风险。植入部位感染初期显著特征是原位温度升高，而临床诊断常使用体温或核心温度，具有滞后性及 2~4 °C 的误差。为解决这些问题，我们设计构建了一种实时温度感应的水凝胶涂层，原位涂覆在医用外科导管表面，可监测颅脑、腹腔和尿道等各植入部位的感染情况。该水凝胶涂层具有 2.90% °C⁻¹ 的高电阻温度系数，在可植入温度感应设备中处于领先地位，并且导管在分别经受插拔循环、90° 扭转、90° 弯曲和 10% 挤压变形 10000 个循环后，传感性能依然保持稳定。此外，水凝胶涂层与人体组织在力学性能上匹配，对比对照组、普通导管组和水凝胶涂覆导管组植入颅脑的界面组织病理结果，经过苏木精和伊红（H&E）的染色分析，以及评估活化的小胶质细胞标志物（IBA-1、CD68）及星形胶质细胞标志物（GFAP）的表达水平，发现水凝胶温度感应涂层的引入降低了普通导管引发的局部炎症，改善了导管与组织的接触界面。当应用于大鼠脑部感染模型中，传感器能够第一时间准确监测到异常的局部温度信号并及时干预治疗，将个体存活率从 60% 提高至 90%，同时还有效改善了大脑发育状况。未来可在水凝胶传感涂层中扩展集成多种生物信号的监测，将对个性化预防、诊断和智能医疗导管的应用具有重要意义。

D07-09**负载 iPSC 仿生晶状体悬韧带结构的静电纺纳米纤维支架用于晶状体脱位的治疗**陈天慧¹, 蒋永祥*¹

1. 复旦大学附属眼耳鼻喉科医院

引言: 先天性晶状体脱位是晶状体最严重的疾病之一, 也是仅次于先天性白内障的儿童接受晶状体手术病因[1-4]。由于晶状体脱位和其他眼部发育异常的复杂性, 未手术和接受手术后的并发症均可导致视力严重低下甚至失明, 部分患者晶状体手术后的视力改善不佳, 这些低视力和失明患者给家庭、社会带来了非常沉重的压力和负担。因此构建负载 iPSC 且具有仿生晶状体悬韧带结构的组织工程支架, 可能能够促进损伤的悬韧带结构恢复其定向性, 减少术后的并发症。

材料与amp;方法: 我们先取悬韧带正常患者和先天性晶状体脱位患者的囊袋组织进行 RNA sequence 测序。明确脱位致病主要因素后, 我们将聚(氨基甲酸)酯脲 (poly(ester-urethane) urea, PEUU) 与丝素蛋白共混后进行定向电纺, 构建具有仿生晶状体悬韧带结构的中心放射状的静电纺丝支架。将 iPSC 负载于仿生支架后, 先在体外与人睫状体无色素细胞共培养 14 天, 随后用于大鼠晶状体脱位的治疗, 通过组织学和分子生物学等方法验证晶状体损伤修复的效果。

结果与amp;讨论: 通过 RNA sequence 检测手段, 我们发现晶状体发生脱位后, 细胞外基质会出现显著的降解。将 iPSC 负载于仿生支架后, 先在体外与人睫状体无色素细胞共培养 14 天后, 可以观察到 iPSC 开始分泌 FBN1、MAPG1 等悬韧带细胞外基质的重要标志物。体内晶状体脱位修补实验证明, 经体外诱导的仿生支架能够恢复损伤晶状体悬韧带的连续性。

结论: 负载 iPSC 仿生晶状体悬韧带结构的静电纺纳米纤维支架能够有效促进晶状体脱位的修复。

D07-10**Highly-Oriented Polylactic Acid Fiber Reinforced Polycaprolactone Composite Produced by Resin Infused Fiber Mat Process for 3D Printed Tissue Engineering Technology**Zhipeng Deng¹, Chen Rao², Simin Han³, Qungui Wei¹, Yichen Liang¹, Jialong Liu¹, Dazhi Jiang*¹

1. Sun Yat-sen University

3D printed polycaprolactone (PCL) tissue engineering scaffolds have drawn increasing interest from the medical industry due to their excellent biocompatibility and biodegradability, yet PCL's poor mechanical performance limited their applications. This study introduces a polylactic acid (PLA) fiber reinforced PCL (PLA/PCL) composite as the filament for 3D printed scaffolds to significantly enhance their mechanical performance. PLA short fibers were used to prepare a PLA fiber mat through a dispersion and oscillation process, and the fiber mat was infused with PCL matrix and rolled into PLA/PCL filaments through a vacuum assisted resin infusion (VARI) process. The investigation revealed that the PLA fibers are highly oriented along the printing direction when using this filament for 3D printing due to the unique microstructure formed during the VARI process. At the same PLA fiber content, the percentage of fibers with orientation angles within 30° and the percentage increase in Young's modulus of the 3D printed strands using the filaments produced by the VARI process are 41% higher and 127.6% higher, respectively, than those of 3D printed strands using the filaments produced by the conventional melt blending process. The 3D printed tissue engineering scaffolds using the PLA/PCL composite filament with 11 wt% PLA fiber content also achieved an exceptional 84.2% and 143.3% increase in tensile peak load and stiffness compared to the neat PCL counterpart.

D07-11**智能水凝胶抗菌创面敷料**郭保林*¹

1. 西安交通大学

目前市售水凝胶伤口敷料缺少对活动部位（如关节）的密封能力，且无法针对细菌感染微环境变化做出有效反馈，导致创面感染控制延迟和创面愈合的持续负面效应，严重限制了其应用范围。因此，迫切需要赋予水凝胶敷料针对细菌感染微环境变化的智能识别和按需抗菌能力。针对这一问题，我们提出了一种响应细菌代谢微环境变化的程序化自激活按需抗菌水凝胶敷料。该材料能够在创面感染后识别细菌代谢过程酸性物质和酶类的产生，通过微环境变化驱动的级联一氧化氮递送和细菌产生代谢物乳酸的转化，增强了化学动力学抗菌治疗效果。这种治疗性气体联合化学动力学抗菌策略，实现有效的伤口感染控制和细菌生物膜根除。该水凝胶还集成了自愈合能力、组织粘附性、创面增殖及重塑阶段的自调节氧化应激缓解和促进血管再生能力，以改善创面再生微环境。这种新型的细菌感染微环境响应的智能水凝胶有望为全球性增长的 MRSA 感染创面患者的治疗提供新的策略和手段，为实现早期感染控制和防范提供新的途径。

D07-12**钛基植入体表面多功能生物活性涂层构建及应用**周建宏¹，憨勇*²1. 宝鸡文理学院
2. 西安交通大学

钛材料具有耐蚀性好、化学稳定性强、比强度高优点，是制作人工关节、种植牙等医用植入器械的首选材料。但是钛材料本身不具备生物活性和抗菌性能，在临床使用过程中，会出现植入器械-宿主组织界面的结合强度弱、易被细菌感染、骨愈合周期长等问题。本研究针对钛基植入体临床上存在的系列问题，基于仿生自然骨理念，通过“微弧氧化+水热处理”复合法，在钛材料表面构建了仿骨基质结构和组分的“微米级多孔 TiO₂/三维纳米构型氟锆共掺杂羟基磷灰石”分级复合涂层，实验结果显示：该涂层具有长期结构稳定性，有效促进间充质干细胞粘附、增殖、成骨分化等功能，同时抑制大肠杆菌和葡萄球菌生长，在动物感染模型中有效促进新骨形成。

本研究借助钛材料表面功能化关键技术，在钛基植入体表面构建了仿骨基质功能涂层，赋予其抗菌、促血管形成和促成骨等功能，显著提升钛基硬组织植入器械生物学性能，有效延长其体内有效使用年限。

D07-13**面向骨科医用的钛基金属表面生物改性关键技术研究**黄润*¹

1. 安徽理工大学

作为临床上使用最广泛的硬组织替代材料，医用钛及其合金近些年受到了广泛的关注，但其术后有限的骨诱导能力及弱的抗菌性能限制了其进一步使用。由于生物分子，细胞及细菌的应答行为与种植体表面的性能紧密相关，因而采用表面改性的方法对植入体表面的性质进行调控是一种应对上述问题的有效方式。通过离子注入的手段在钛基植入体表面引入了多种离子，研究了不同离子引入对钛基表层结构及生物学行为的影响规律，为临床上提高钛基植入体手术成功率及开发出长效性骨修复植入体奠定理论基础。

D07-14**溶瘤活性多肽设计与抗肿瘤免疫机制研究**李亚超*¹

1. 湖南大学

D07-15**刺激响应智能抗菌水凝胶敷料用于软组织损伤修复**梁永平¹, 郭保林¹

1. 西安交通大学

不同于硬组织, 软组织结构复杂, 血液循环不良, 恢复过程容易受到外界干扰, 治疗也相对较为困难。针对以上问题, 结合皮肤电池、多巴胺优异的湿态组织黏附性能和抗氧化性能, 以及碳基导电材料优异的光热性能, 以多巴胺为交联剂, 将导电基元引入水凝胶网络, 分别设计和制备了多种具有刺激 (pH、葡萄糖、光) 响应和物质 (抗生素、抗癌药、抗氧化剂、降糖药物等) 递送的智能抗菌水凝胶材料; 将所得水凝胶敷料成功用于促进耐药菌感染创面、糖尿病足创面和肿瘤手术创面等的修复。主要包括: (1) 通过聚合物化学接枝改性、纳米涂层增强和金属-配体配位等, 实现了黏附、止血、自愈合、抗菌及抗氧化等多功能协同的抗菌水凝胶的制备, 并发展了其作为抗菌敷料从多个愈合阶段协同促进耐药菌感染创面修复的新策略 [1]; (2) 通过天然/合成聚合物化学接枝改性和纳米复合作用, 开创了基于双动态键的 pH/葡萄糖双响应性二甲双胍控释敷料, 并发展了其作为外周特异性药物智能释放治疗慢性糖尿病足伤口的的新策略, 通过降低炎症和促进血管再生实现了 II 型糖尿病伤口的快速愈合和修复 [2]; (3) 通过复合冷冻凝胶技术和功能纳米组分复合, 实现了具有连通大孔的功能冷冻凝胶制备, 并发展了其作为肝癌肿瘤切除创面术中止血和术后防肿瘤复发一体化治疗的新策略 [3]; (4) 通过动态化学键交联和功能化纳米复合, 实现了基于双动态键的光热/光动力协同抗菌、pH/葡萄糖双响应抗炎抗瘢痕药物吡非尼酮控释的敷料制备, 并发展了其作为药物智能响应递送载体治疗慢性糖尿病足创面的新策略 [4]。(5) 综述了包括刺激响应和物质递送在内的具有抗菌、抗炎、抗氧化、黏附止血、自愈合、导电以及伤口监测等多种功能的水凝胶敷料在皮肤伤口愈合中的应用进展, 累计获得 2 千多次引用, 成为领域内具有代表性的综述文献 [5]。

参考文献:

[1] Liang Y, et al. *Small* 2019, 15 (12): 1900046.[2] Liang Y, et al. *ACS Nano* 2022, 16 (2):3194.[3] Liang Y, et al. *Small* 2019, 17 (38): 2101356.[4] Liang Y*, et al. *Adv. Funct. Mater.* 2025, 35 (9), 2416205.[5] Liang Y, et al. *ACS Nano* 2021; 15 (8):12687.**D07-16****Effect of sintering temperature on microstructure and properties of Co-Cr alloys fabricated by vat photopolymerization 3D printing technology**Huifang Yin¹

1. Qilu Medical University

In this study, dense and evenly microstructured Co-Cr alloy blocks were prepared for the first time by degreasing and sintering after vat photopolymerization three-dimensional (3D) printing, and the effect of sintering temperature on the alloy microstructure was investigated. The results showed that the Co-Cr alloy sintered at 1180°C had a low density with many pores in its microstructure. Increasing the sintering temperature from 1200 °C to 1240 °C improved the density and uniformity of the microstructure, and the grain size in the Co-Cr alloy increased with an increasing sintering temperature. Furthermore, the carbon content of the Co-Cr alloy increased after sintering because of the breakage of C-C and C-H bonds in the binder, which also changed the types of

phases formed in the Co-Cr alloy. After sintering at 1180 °C, the phases in the Co-Cr alloy were mainly γ (Co-fcc), ϵ (Co-hcp), σ , μ , and M23C6 carbides. With an increase in the temperature and carbon content, the phases in the Co-Cr alloy transformed to γ (Co-fcc), M23C6, M7C3, and M6C. Additionally, the hardness of the Co-Cr alloy after sintering at 1180 °C was 493.5 ± 19.6 HV, which is lower than that of the samples sintered at 1200 °C (549.1 ± 14.8 HV), 1220 °C (542 ± 13.5 HV), and 1240 °C (547 ± 14.3 HV), whereas it changed slightly from 1200 to 1240 °C. The results reveal that the microstructure and properties of Co-Cr alloy blocks prepared by vat photopolymerization 3D printing technology are strongly related to degreasing and sintering processes.

D07-17

智能响应性高分子材料的构建及其在组织工程中的应用

袁萍耘¹

1. 西北有色金属研究院

如何设计支架材料使其能够引导组织再生是组织工程的一个难点。通过支架材料物理模拟组织与器官的三维结构实现再生是目前组织工程研究的主要方向。然而，很少有人关注到对组织与器官的再生修复尤为重要的生物微环境。因此建立仿生的生物微环境来协助组织工程支架以实现最优的组织再生和器官重建是目前需要关注的重要研究方向。良好的生物微环境的建立通常需要一些生物分子。而生物分子的有效利用必须借助于药物递送体系。首先，针对皮肤愈合过程中不同阶段对不同生物分子的不同需求，我们利用聚乳酸羟基乙酸通过改进的双乳化法设计了两种可实现快速释放与长效释放的聚合物微球。通过具有快速释放动力学的微球负载 IL-4 在机体修复前期营造一个免疫微环境，同时通过具有快速释放动力学的微球负载褪黑素以促进细胞增殖。以凝胶作为支架与两种聚合物微球结合后，实现了良好的皮肤再生。组织工程支架植入后面临的重要问题之一就是细菌感染，细菌感染往往会导致植入失败。因此我们利用层层自组合法设计了一种基底普适性的抗菌防污双功能涂层，该涂层对革兰氏阳性/阴性细菌具有强杀灭能力。组织工程支架植入引起的组织纤维化是组织工程亟待解决的另一重要问题。因此在前期工作基础上，我们通过层层自组合法研究出了一种基底普适性的抗纤维化药物释放涂层，有效抑制了胶原沉积和组织纤维化的发生。

D07-18

负载肝素的丝素蛋白微球/细菌纤维素小口径人工血管的制备及其性能研究

李格丽¹，洪枫¹

1. 东华大学

由于小口径 (<6 mm) 人工血管易产生血栓、内膜增生、内皮化速度慢、长期通畅率低等问题，全球无临床可用的小口径人工血管产品。细菌纤维素也称为细菌纳米纤维素 (Bacterial nano-cellulose, BNC)，具有与细胞外基质相似的三维纳米纤维网络结构、良好的细胞相容性和血液相容性。为提高 BNC 管的抗凝血性，本研究以 BNC 管为结构支撑，采用液体施压注入技术结合冷冻相分离法，引入天然高分子丝素蛋白 (Silk fibroin, SF) 及抗凝药肝素 (Heparin, Hep)，管壁内原位形成了负载肝素的丝素蛋白微球，获得 Hep@SFMPs/BNC 复合管。结果显示，该复合管具有长效缓释肝素的效果 (15 d)，内表面支持人脐静脉内皮细胞的黏附和增殖；与纯 BNC 管相比，复合管的血浆复钙时间延长，全血凝固曲线中 OD 值下降缓慢，吸附的血小板数量减少，所有材料的溶血率均小于 0.3% (远低于国标要求的 5%)，并且炎症反应和钙化程度更低。血管体内移植实验表明，复合管替换大鼠腹主动脉 5 个月后，管腔保持畅通，无血栓形成，内腔原位生成近乎完整的内皮层 (内皮覆盖率 > 90%)，平滑肌细胞在内皮层和人工血管中间环形生长，胶原蛋白排列有序。该研究为 Hep@SFMPs/BNC 复合管在小口径人工血管领域的应用提供了相关动物实验证据，有作为小口径人工血管的巨大潜力。

D07-19**高取向胶原膜的制备及其对细胞黏附行为的影响**吕文静^{*1}, 罗宇¹, 罗希², 王恺阳¹, 朱晓风¹

1. 上海工程技术大学

2. 中国科学院大学过程工程研究所

胶原作为细胞外基质的主要成分, 其纤维取向显著影响细胞的生物学行为。高取向胶原材料因具有与软骨、神经等组织微环境相匹配的拓扑结构, 可促进细胞定向黏附, 增强组织修复效果。然而, 现有技术仅能实现微米级取向调控, 难以构建纳米级高取向胶原纤维, 限制了对细胞黏附机理的研究。本研究旨在开发纳米级高取向胶原膜的制备方法, 探究其通过跨膜蛋白调控细胞黏附的机制。通过对比高取向和无取向胶原膜对细胞行为的影响, 鉴定关键胶原结合跨膜蛋白, 筛选介导黏附信号转导的靶点, 揭示胶原取向影响细胞黏附的分子基础, 为阐明高取向胶原材料促组织修复的机理提供理论依据。主要研究内容包括以下三部分:

(1) 基于 Langmuir-Blodgett (LB) 膜技术的高取向胶原膜制备。通过优化表面压力、离子强度、滑障移速等因素, 探究了其对胶原取向的影响并掌握了纳米级胶原纤维取向调控的关键技术。

(2) 以小鼠上皮样成纤维细胞 (L929) 为例, 研究高取向胶原对细胞黏附的影响。将 L929 细胞分别在高取向与无取向胶原膜上培养 3 天, 利用共聚焦显微镜观察细胞的黏附状态。结果表明, 细胞在高取向胶原上定向排列, 在无取向胶原上随机排列。

(3) 利用亲和层析结合液质联用技术鉴定与胶原结合的跨膜蛋白种类, 筛选出影响细胞黏附的跨膜蛋白。通过偶联胶原的琼脂糖介质对 L929 细胞跨膜蛋白进行层析分离, 利用液质联用鉴定出 6 种与胶原相互作用的跨膜蛋白, 其中 CSPG4 和整合素 $\alpha_v\beta_5$ 与细胞黏附有关。利用酶联免疫吸附测定 (ELISA) 分析在高取向和无取向胶原膜上培养的 L929 细胞的跨膜蛋白表达。结果表明, 与无取向胶原相比, 在高取向胶原上跨膜蛋白 CSPG4 表达升高; 整合素 $\alpha_v\beta_5$ 在两种取向胶原上表达无明显差异。

本研究利用 LB 膜技术成功制备纳米级高取向胶原膜, 发现其能显著促进 L929 细胞定向黏附, 并鉴定出跨膜蛋白 CSPG4 是关键调控因子。该研究为阐明胶原取向调控细胞行为的机制提供了新见解, 建立的纳米级取向调控技术为组织工程材料设计提供了新方法, 对软骨、神经等定向组织的修复具有重要的指导意义。

D07-20**机器学习驱动的同轴静电纺丝纤维智能设计**顾卓昊¹, 李仔杰¹, 马悦宇¹, 何一燕^{*1}, 崔予文¹, 顾忠伟¹

1. 南京工业大学

本研究针对静电纺丝技术中多参数优化时间材料成本高的问题, 提出一种基于贝叶斯优化 (BO) 的机器学习框架, 用于高效筛选同轴静电纺丝工艺参数。以聚己内酯 (PCL) 为壳层、明胶/HA-PBA (GEL/HA-PBA) 为核层材料体系, 通过调控电场电压、挤出速度、针尖距离及收集器转速等关键工艺参数, 以平均纤维直径 (目标范围 225 ± 25 nm) 及纤维直径标准差 ($R < 50$) 复合目标为核心优化指标。BO 方法通过自适应采样策略, 仅经三次迭代即将平均纤维直径成功控制在 250 nm 以内, 显著减少实验次数。进一步工作聚焦于结合材料领域知识优化纤维直径分布标准差, 建立可量化直径均一性的评分系统, 最终实现对特定配方静电纺丝工艺的精确纤维结构预测。该方法为复杂材料体系的工艺优化提供了数据驱动的高效路径。

D07-21**海洋乌贼墨黑色素医用材料的开发和应用**常菁^{*1,2}, 韩宝芹^{1,2}, 吴客颖¹, 周伊¹, 宋乐阳¹

1. 中国海洋大学

2. 青岛海洋科技中心

乌贼是头足类海洋生物的典型代表，其资源丰富，年产量高。乌贼的墨囊在加工过程中通常作为废弃物而被丢弃，造成严重的浪费，对其精深加工和高质化利用是发展蓝色海洋经济的迫切需求。在乌贼的墨囊当中含有丰富的墨黑色素，它是由 5, 6-二羟基吲哚 (DHI) 及其的羧酸形式 (DHICA) 形成的一种复杂的聚集体结构。由于墨黑色素良好的安全性和独特的光热、光声、抗氧化等性质，成为一种极具潜力的生物材料。然而，由于其水溶性差，分散不均匀，严重限制了墨黑色素的广泛应用。研究团队通过对墨黑色素改性，制备了多种墨黑色素衍生物，构建了基于墨黑色素的生物材料，包括可多模态成像的诊疗一体化微纳米材料用于肿瘤和感染的诊疗，以及不同类型的光热水凝胶应用于组织修复再生领域。相关研究成果可为海洋天然高分子的开发利用和新型海洋生物材料的开发提供启发和借鉴。

D07-22

气体信使控释功能涂层

王腾蛟*¹

1. 西北工业大学

钛及其合金作为一种理想的生物医用材料，因其优异的力学性能和生物安全性，在骨植入体领域得到了广泛应用。然而，原始钛植入体本身的生物惰性却使得其无法抑制体内感染并有效促进骨整合，从而导致钛植入体在临床使用时也严重受到了细菌感染和无菌性松动的困扰。因此，在钛植入体表面抑菌、促成骨等功能涂层具有重大的研究意义。

近年来，气体信使如 H_2S 、 NO 、 CO 因其对各种内源性生理和病理过程的调节作用而受到广泛关注。其中， H_2S 可通过调控特定的信号通路来抑制成骨细胞的氧化应激损伤，并提高成骨细胞的活性，促进成骨相关基因的表达。此外， H_2S 能够调节成骨相关细胞的自我更新和成骨分化，促进其分化为成熟骨细胞，从而有助于骨组织的形成。 NO 气体信使能够激活骨细胞内的信号通路，调节骨代谢过程中的关键酶和因子的表达促进骨细胞的增殖和分化。同时，高浓度 NO 能够与细菌的 DNA、蛋白质或脂质共价结合，破坏其生物结构，从而杀灭细菌。 CO 同样具有调控免疫微环境促进骨整合功能。因此，在钛植入体表面构建气体信使控释功能涂层，通过可控释放气体信使分子，可以实现对钛植入体骨整合过程中抑菌/促成骨/免疫调控等功能的实现。

在本报告中，我将汇报课题组近期关于气体信使控释功能涂层相关工作，系统阐述气体信使控释功能涂层的理化性能和作用机制，通过体内外生物学性能表征，证明气体信使控释涂层通过刺激响应实现精准释放浓度控制手段，进而达到抑制感染、促进骨整合以及植入体界面免疫调控等目的。

D07-23

骨关节炎治疗用高分子材料

谢婧*¹

1. 四川大学

骨关节炎是一种以软骨退行性病变和滑膜炎为特征的关节疾病。开发新型润滑体系、重塑软骨润滑功能可以降低磨损和减轻疼痛，从而减缓骨关节炎和抑制骨关节坏死。基于两性离子的水化润滑特性，我们设计了一系列两性离子聚合物，包括且不限于模拟天然润滑素结构的二型胶原靶向肽接枝的 2-(甲基丙烯酰基氧基)乙基]二甲基-(3-磺酸丙基)氢氧化铵 (SBMA)，SBMA 和甲基丙烯酸二甲基氨基乙酯 (DMAEMA) 为刷，环状聚合物聚甲基丙稀酸-2-羟乙酯 (c-P(HEMA)) 为核心模板的 pH 响应性环刷两性离子聚合物 CB，以及具有良好光热成像能力的 MoS₂ 基纳米酶 (MoS₂@PDA-Mg@PSB)。该类材料均展现出良好的水合润滑能力，活性氧清除能力以及抗炎能力。对于骨关节炎 SD 大鼠，关节腔内注射两性离子聚合物，可实现软骨修复，以及较好的骨关节炎治疗效果。

D07-24**自泵 (self-pumping) 敷料**时连鑫*¹

1. 中国科学院理化技术研究所

伤口表面过量渗出液会导致伤口浸渍、粘连、愈合困难，传统亲水敷料无法有效移除。以伤口快速愈合为导向，聚焦敷料-伤口界面的渗出液输运问题，报告人取得了系列研究进展：(1) 提出了基于非对称浸润性的单向导液自泵模型，设计了基于点/面粘附、互锁结构、化学共价键结合等亲疏水层结合策略，实现了高界面稳定性的生物流体单向输运；(2) 设计了系列基于取向孔道、仿生锥孔、分形孔道、多重分形孔道的导液模型，实现快速、持续、高通量、高单向导液率的粘性生物流体的单向导出；(3) 发展了系列自泵敷料，在猪、大鼠烧烫伤、糖尿病、感染等伤口模型实现促进毛囊、血管、真皮再生，加速愈合，揭示渗出液微环境主导的伤口愈合新机制。

D07-25**钽基低熔点金属用于注射式微创骨缺损填充及促骨再生**王雪林*¹

1. 北京航空航天大学

骨骼作为人体力学支撑与保护的核心结构，虽具备自愈能力，但病理性骨折、创伤性骨缺损及老年性骨质疏松等导致的临床修复仍面临严峻挑战。现有修复材料面临诸多瓶颈：钛合金弹性模量高易产生应力屏蔽；镁/锌基可降解金属降解不可控；PMMA 骨水泥聚合放热。在此，我们创新性的将低熔点钽基合金和临床骨水泥 PMMA 融合在一起，设计了一种可注射式钽基低熔点合金复合材料 (BPCs)，抗压强度提升 252%，通过微创注射实现骨缺损精准填充，再利用交变磁场激活磁热效应，实现骨肉瘤治疗与促进骨再生。该研究攻克了传统金属内固定物需开放手术植入、及骨水泥产热损伤和功能单一等临床难题，为骨肿瘤切除术后修复提供“治疗-再生”一体化解决方案，创新了骨修复治疗模式。

D07-26**3D 打印水凝胶衍生的生物医用陶瓷**汪祎贤¹，徐昕¹，刘德胜¹，王晓龙*¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

由于陶瓷具有耐腐蚀性、高温稳定性和优异的机械性能，通过 3D 打印技术实现具有个性化形状和复杂几何结构的陶瓷部件制造，对航空航天工程、生物医学工程和催化领域有着重要的潜在价值。然而，由于其脆性和刚性，仍然具有挑战性。本文提出了一种新方法，通过成型具有独特柔性和可变形特性的 3D 打印水凝胶陶瓷前驱体骨架，实现具有无支撑和大跨度结构的陶瓷架构。本将 AP 溶胶与光敏水凝胶陶瓷前驱体物理混合，利用 DLP 打印技术和折纸/剪纸工艺开发出了一种具有复杂几何结构的新型柔性水凝胶基陶瓷前驱体。然后进行热解，实现了尺寸高精度、结构高复杂度的陶瓷功能化器件。水凝胶衍生陶瓷从 3D 打印坯体中热解后可以保持其原始形状而无裂纹，具有 7% 的超低线性尺寸收缩率和 73 wt% 的陶瓷产率。柔性水凝胶的可重构性使打印的前驱体可以被编程二次重构，实现 3D 打印无法直接制备的悬挂折叠结构，并且具有优秀的恢复性能，干燥的生坯能够重新恢复柔性重新塑形，提高了制造容错率。最后，针对生物医学，提出了多种陶瓷结构应用范例，突破了陶瓷固有脆性在复杂陶瓷器件高精度制造中的限制。

D07-27**仿生高强韧水凝胶及其粘附润滑性能调控**刘德胜*¹，王晓龙¹，刘维民¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

水凝胶是一种高吸水性、柔性和生物相容性的三维交联网络聚合物，广泛应用在生物医学、软体驱动和柔性电子等领域。然而，传统水凝胶通常存在机械强度低、韧性不足和功能结构单一等问题，限制了其实际应用。为此，利用共价交联、仿生氢键、微相分离、金属配位等微观尺度分子设计策略构筑了高性能的强韧湿滑水凝胶，赋予其高强度、超韧性、润滑性及粘附性。同时，结合宏观尺度的复杂结构化制造方法构筑了多种与人体软组织机械特性、理化微环境和仿生结构均适配的仿生湿滑水凝胶软组织器官模型；制造了几种力学性能适配水凝胶基生物医用器械，例如支架、瓣膜、光纤及承重替代物等；开发了一种具有可逆粘附功能和水下环境适应性的仿生水凝胶吸盘，这些研究成果均实现了强韧湿滑水凝胶材料的仿生结构制造和粘附润滑性能调控。这种从微观尺度分子设计、功能调控，到复杂结构化制造实现的兼具高机械性能和可控粘附润滑特性的水凝胶材料/器件在生物医学、智能材料和工程应用等领域具有广阔的前景。

D07-28

亚精胺功能化抗排异植入材料 (Spermidine-empowered anti-FBR implant materials)

刘镇宁*¹

1. 吉林大学

植入体在临床上得到日益广泛的应用，然而，外源性植入材料通常会引起宿主的异物反应 (FBR)，导致植入体失效。排异性炎症反应和纤维化包裹是异物反应的主要特征。亚精胺是一种最初从精液中分离出来的小分子多胺。它可以调节女性免疫系统，保护“异物”精子，促进受精。受亚精胺免疫调节作用的启发，我们制备了三类亚精胺功能化的植入材料：亚精胺功能化的生物大分子水凝胶，亚精胺功能化的层状合成高分子植入材料，及亚精胺功能化的金属植入材料。与用二亚乙基三胺修饰的对照相比，亚精胺赋能的植入材料具有抑制促炎细胞因子表达、上调抗炎因子表达、促进细胞迁移和成骨分化的能力。动物实验表明，亚精胺赋能的水凝胶可以在伤口愈合早期下调促炎细胞因子，促进巨噬细胞从 M1 型向 M2 型极化，加速组织重塑和血管新生，从而实现更接近天然皮肤的愈合效果。亚精胺赋能的合成高分子具有低免疫原性，植入后的排异性炎症反应和纤维化包裹被显著抑制。亚精胺赋能的金属植入材料可通过抑制排异反应显著改善骨组织再生和骨整合。这种仿生理念可能为解决外源性植入材料的异物反应提供一种简单而优雅的方法。

D07-29

WE43 镁合金表面 Mg/CaP/PDA 复合涂层设计、耐蚀性及生物相容性研究

齐福刚*¹，戴翌龙¹，唐楷为¹，余加²，黄启鸿

1. 湘潭大学

2. 重庆大学

3. 杭州师范大学

本文首先采用化学转化法通过改变 pH 值和时间参数在 WE43 镁合金上制备 Ca-Mg-P 涂层，当 pH=1.8，t=20 min 时制备出的 Ca-Mg-P 涂层具有最佳的钙磷与镁磷比例，腐蚀电流密度 $I_{corr}=4.7 \mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，相对于 WE43 合金的腐蚀电流密度降低一个量级，观察浸泡 7d 后的腐蚀形貌发现其表面形成大量的羟基磷灰石 (Hap) 层，在该参数下制备出的 Ca-Mg-P 涂层具有优秀的生物矿化能力。使用一步浸渍法制备 PDA 涂层，当缓冲液比例为无水乙醇：氨水=96：4 时制备出的 PDA 涂层具有最佳的耐蚀性能，腐蚀电流密度降低到 $0.6 \mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，相对于 Ca-Mg-P 单层涂层降低一个量级。生物相容性结果显示，人骨肉瘤细胞 (MG63) 在 50% 浓度的浸提液中培养 5d 后仅有 Ca-Mg-P/PDA 复合涂层的细胞活性在 75% 以上，说明其具有 0-1 级细胞毒性。成骨分化能力结果显示，Ca-Mg-P/PDA 复合涂层的碱性磷酸酶 (ALP) 水平和胶原蛋白 (COL) 分泌水平皆为最高。

D07-30

具有纳米刺结构的离子凝胶微型机器人用于机械突破生物屏障靶向治疗牙周炎

何冬青¹, 马星*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

牙周炎是一种由细菌生物膜引起的慢性炎症性疾病, 导致牙周组织的进行性破坏。传统的机械清创和药物治疗在去除根表面的细菌生物膜和克服生物屏障以实现靶向炎症清除方面效果不佳。我们提出了一种由金纳米刺修饰的离子液体凝胶微球组成的磁驱动 Janus 微型机器人, 作为牙周炎治疗的主动药物递送系统。微型机器人可以在不同的粘性环境中进行滚动和旋转运动, 以促进唾液中的精确目标运动, 并突破龈沟液屏障的粘性阻力, 通过下钻运动到达深牙周袋。此外, 在外部磁场操控下, 微机器人可以借助尖锐的纳米刺完成细菌生物膜的机械去除。同时, 微型机器人通过旋转运动有效地锚定在口腔上, 防止它们被唾液冲走, 从而确保有效的靶向药物输送。然后, 乙醇诱导微机器人离子凝胶结构膨胀释放的药物姜黄素可以实现杀死细菌、清除自由基和调节巨噬细胞极化的功能。体内研究表明, 微机器人治疗可以通过调节牙周微环境的稳态来缓解炎症并加速组织再生。总之, 这项工作为牙周炎的治疗提供了一种基于机器人的主动药物输送系统, 为未来的临床应用提供了有前景的策略。

D07-31

基于 BiOI-OVs@Zn-LDH S 型异质结的抗菌促成骨一体化涂层用于感染性骨缺损修复

郑富元¹, 王端¹, 李箭*¹

1. 四川大学华西医院

骨缺损修复是骨科临床的重大挑战, 尤其是承重骨(如股骨、胫骨)的缺损, 由于感染、高机械应力以及有限的骨整合能力, 使得治疗效果受限。钛基骨支架因其优异的机械性能和良好的生物相容性被广泛应用于骨修复领域, 但其惰性表面易形成细菌生物膜, 引发植入体相关感染(IAls), 进而导致骨修复失败。传统抗生素治疗虽然是主要手段, 但随着耐药菌株的出现, 其治疗效果日益受到挑战。因此, 开发兼具抗菌和促成骨整合功能的智能化钛支架表面涂层材料, 成为解决感染性骨缺损的重要研究方向。

针对这一问题, 我们设计了一种基于富氧空位碘氧化铋(BiOI-OVs)与锌镍铝层状双氢氧化物(Zn-LDH)构建的 S 型异质结(BiOI-OVs@Zn-LDH)涂层材料, 通过界面工程精准调控电子-空穴分离行为, 增强声敏剂产生活性氧(ROS)的能力, 以高效清除细菌生物膜, 实现抗菌治疗。同时, Zn-LDH 具备良好的免疫调控及成骨特性, 不仅可通过缓冲酸性环境和调节炎症反应改善局部微环境, 还能通过可控释放 Zn^{2+} 等生物活性离子促进成骨细胞的增殖与分化, 以及刺激血管新生, 从而在抗菌后的骨修复过程中发挥重要作用。该策略能够同时实现抗菌和骨修复, 突破当前抗感染骨修复材料的局限, 为感染性骨缺损的治疗提供了新的解决方案。

近年来, 声动力治疗(SDT)因其外部声场可控性强、无耐药风险, 在抗菌研究中备受关注。然而, 现有声敏剂在体内的光声转换效率较低, 活性氧(ROS)产生能力有限, 导致抗菌效果难以达到临床需求。为增强 SDT 的抗菌能力, 研究人员提出了一种氧空位调控策略, 通过在 BiOX (X=F, Cl, Br, I) 纳米材料中引入氧空位, 优化其能带结构, 提高 ROS 产生活性, 并构建 S 型异质结促进电子-空穴分离, 进一步提升 ROS 的稳定释放, 从而增强 SDT 的治疗效率。

为进一步提升异质结的综合性能, 我们引入 Zn-LDH 纳米颗粒, 利用其独特的层状结构、良好的离子交换能力和可调控的能带结构, 与 BiOI-OVs 形成 S 型异质结。该异质结结构能够有效优化电子传输路径, 提升载流子分离效率, 从而显著增强 ROS 的产生能力, 实现高效 SDT 抗菌。此外, Zn-LDH 不仅在异质结构构建中发挥关键作用, 还能够通过其层状结构的缓释特性, 持续释放生物活性金属离子, 如 Zn^{2+} , 调节感染微环境(如酸性、缺氧), 促进成骨细胞增殖和分化, 增强新生骨的矿化, 同时调控免疫反应, 抑制破骨细胞活性, 最终实现抗菌与骨修复的协同增强。

本研究通过体外细胞实验和体内动物模型验证了该异质结纳米平台的优异抗菌和成骨性能, 表明其能够有效抑制细菌感染并促进骨组织再生, 展现出在感染性骨缺损修复中的广阔应用前景。未来, 通过优化

材料的设计、提升治疗的靶向性及生物相容性，将有望进一步推动该技术的临床转化，为骨组织工程领域提供新的解决方案。

D07-32

近红外光响应性多级形状记忆支架用于复杂组织缺损修复

刘涛*¹, 陈鑫²

1. 西安交通大学第二附属医院
2. 西安交通大学化工学院

复杂的组织损伤伴随着细菌感染，给全球医疗系统带来了挑战。传统的组织工程支架通常会产生二次植入创伤、不匹配的再生和感染风险。在此，我们开发了一种具有多级形状记忆和光热-化学动力学特性的易植入支架，可根据需要调整其形态，准确匹配组织缺损各部分的修复要求，同时按需抑制细菌感染。具体而言，该研究利用甲基丙烯酸羟乙酯和聚乙二醇二丙烯酸酯制备了一种热诱导形状记忆支架，并将其与光热剂单宁酸铁（FeTA）进一步结合以产生近红外光诱导形状记忆特性。通过改变各部分的成分比例，该支架可在不同的近红外时段下逐步恢复。这一过程有利于形状固定后的植入，避免了传统方法造成的创伤，并能在近红外条件下逐渐填补不规则缺陷，实现合适的组织再生。此外，FeTA 还能在细菌感染时催化 Fenton 反应，从而产生过量的 ROS 用于化学动力学抗菌治疗。正如预期的那样，在近红外条件下进行额外的光热疗法可进一步提高抑菌率。体外和体内研究结果表明，我们的支架在抗菌、减少炎症和加速伤口愈合方面都具有很高的功效，这表明它有望用于细菌感染造成的复杂组织损伤修复。

D07-33

递送一氧化碳促进糖尿病创面再生

金欣^{1,2}、吴钰祥*^{1,2}

1. 江汉大学
2. 智能体育与主动健康研究院

糖尿病创面患者基数巨大、治疗周期漫长，临床缺乏高效的干预。一氧化碳（CO）作为具备抗菌、抗炎等功能的气体信号分子，可经 CO 供体分子治疗疾病，但存在剂量难控、常需联合治疗的问题。基于此，本报告介绍：一、构建近红外光响应的 CO 可控递送体系，在糖尿病创面前期联合光热治疗细菌感染；二、设计活性氧响应性纳米粒子交联的 CO 递送水凝胶，在创面增值重塑期激活细胞的药物摄取能力，加速创面修复。本研究构建两类 CO 响应递送材料并探索联合治疗机制，有望推动 CO 治疗的临床应用。

D07-34

等离子体治疗瘢痕疙瘩的机制研究及临床应用

党纤曦¹, 徐祥文¹, 刘丹丹*¹, 陈支通², 崔永言¹

1. 北京大学深圳医院
2. 中国科学院深圳先进技术研究院

瘢痕疙瘩是一种侵袭性皮肤纤维增生性疾病，现有的治疗方法虽多样，却往往难以达到令人满意的疗效，且常伴有高复发率。为了应对这一挑战，本项目拟采用冷大气压等离子体（CAP）技术治疗瘢痕疙瘩。作为一种创新且无创的治疗手段，CAP 技术通过产生大量活性氧（ROS）和活性氮（RNS）来促进伤口愈合并调控炎症，展现出在瘢痕疙瘩治疗领域的巨大潜力。本项目研究团队在 CAP 研究方面拥有丰富的基础，且已初步证实 CAP 抑制瘢痕疙瘩形成方面的有效性。基于这些成果，本项目提出“CAP 通过释放 ROS/RNS 治疗和改善瘢痕疙瘩”的假设，为此，研究团队致力于开发一种无创的医用 CAP 装置，将其用于治疗瘢痕疙瘩。通过一系列细胞、组织和动物模型的实验探究其治疗瘢痕疙瘩的内在机制。遵循“Benchto Bed”的转化医学理念，本项目不仅旨在探索“Plasma Aid, Keloids Fade”的实现可能性，还将全面评估 CAP

技术的临床效果和安全性，以推动从基础科学研究到临床应用的转化。

D07-35

口腔用镍钛合金镍溶出阻断技术研究

刘美霞*¹

1. 中国科学院金属研究所

中华口腔医学会口腔正畸专业委员会流行病学调查结果显示 [1]，我国人群错颌畸形的患病率为 67.82%，其中乳牙列 51.84%、混合牙列 71.21%、恒牙列 72.97%。错颌畸形的主要危害是影响牙颌面发育、口腔健康和功能、容貌外观，甚至会造成全身危害和心理精神障碍。随着生活水平的提高，人们对口腔健康及面部美观的关注度逐渐提升，及时且合理使用矫治器等医疗手段对患者错颌畸形进行矫治具有重要意义。

矫治弓丝是治疗错颌畸形的必要手段。目前临床广泛使用的矫治弓丝分别为不锈钢和镍钛合金，均含有大量的镍（不锈钢镍含量 10-14%，镍钛合金镍含量 50%左右）。有大量科学依据表明，镍离子会对人体产生致敏、致畸、致癌等风险。在医疗器械表面制备防护涂层是提高器械生物适用性的主要手段，TiN 涂层能够提高材料表面的耐蚀性、耐磨性以及生物相容性，被广泛应用于口腔、骨科等医疗领域，其中口腔科主要应用在种植、正畸、牙体牙髓病、牙周病和修复治疗中。此外，TiN 还能减少细菌粘附和早期生物膜形成，从而减少器械表面细菌菌落的附着。

针对镍离子对人体带来的损害，使用真空加压热处理炉，加入氩气和氮气，在镍钛弓丝表面采用去离子技术，用氮进行占位，在镍钛弓丝表面制备氮化钛（TiN）涂层，在不影响镍钛合金超弹记忆效应的前提下提高弓丝表面的耐蚀性及耐磨性，有效阻断镍离子溶出。

牙周炎是一种多因素引起的不可逆的慢性炎症性疾病，发病初期是由于细菌感染，随后由于白细胞的高活性及细胞因子、类花生酸和基质金属蛋白酶的增殖，引起宿主介导的牙周支持组织的破坏。与正畸牙周病相关的细胞因子包括 IL-1 β 和 TNF- α 等。动物实验结果表明，表面防护后的弓丝细菌粘附率明显降低，且炎症因子表达显著降低。验证矫治弓丝表面镍溶出阻断技术的合理性及对口腔黏膜及牙周组织保护的有效性，为无镍化口腔固定矫治系统的可行性提供科学依据和理论指导。

D07-36

(Ti-Zr-Nb-Ta)-Ga 体系中/高熵合金的力学性能及生物医用探索

王俊锋¹、王舒滨*¹、杨盛兵²、疏达¹

1. 上海交通大学

2. 上海交通大学附属第九人民医院

骨科植入材料与人体骨骼之间的力学性能失配和植入后假体关节感染是导致假体过早失效的两个主要原因。本研究发现，通过向 TiZrNb、TiZrNbTa 等原子比基体合金中添加 1~2at% 的功能元素镓（Ga），可大幅提升合金的屈服强度，同时保持超过 10% 的总延伸率和相对较低的弹性模量。Ga 元素通过其突出的模量错配而产生显著的固溶强化效果（SSS），但过量的 Ga 会与 Zr 共偏析，在晶界处形成脆性化合物，因此需要合理设计合金的成分范围。在生物学表现方面，(Ti-Zr-Nb-Ta)-Ga 体系中/高熵合金具有优异的生物相容性、无明显细胞毒性。Ga 的引入大幅降低了细菌的定植率，能够高效防止生物膜在合金表面形成。除了其出色的抗菌效果外，合金还表现出促进成骨和抑制破骨细胞生成的双重作用，充分展现了其在骨科植入应用中的巨大潜力。

D07-37

口腔硬组织修复材料

丁春梅*¹

1. 四川大学

针对当前口腔硬组织修复材料临床适应性不足引发的材料脱落及继发并发症（如继发龋、种植失败）等挑战，同时响应国家打破硬组织修复材料进口垄断的战略需求，本文 1) 提出张力调节界面受限原位矿化的思路，精确控制矿物微纳米结构，实现优异的硬组织适配性；2) 建立微环境自适应多元协同的策略，逆转细菌感染微环境，实现了原位有效防治天然龋；3) 基于界面受限原位矿化和微环境自适应多元协同，进行口腔植入材料设计、应用与转化。获 1 项国家 II 类医疗器械注册证、1 项欧盟 CE 认证及 1 项国家 I 类医疗器械备案。在 *Adv Mater*, *Angew Chem Int Ed*, *Adv Funct Mater*, *Adv Sci* 等学术期刊上发表论文 80 篇，SCI 他引 1700 余次，授权国家发明专利 12 项。

D07-38

具有肿瘤组织微环境响应特性的 BCP/OSA/GelMA 复合骨缺损修复材料的研究

颜廷亭*¹

1. 昆明理工大学

大范围骨缺损是由创伤、感染、年龄、肿瘤及其他疾病引发的临床难题，其中骨肿瘤导致的骨缺损尤为棘手。当前，骨肿瘤的临床治疗主要依赖于手术、化疗和放疗，然而，手术切除的不彻底性及肿瘤细胞的高转移性常导致肿瘤复发与转移，同时伴随的严重副作用加剧了患者的痛苦。传统骨修复材料在应对肿瘤相关骨缺损时，面临药物负载率低、释放不可控及力学适配性不足等挑战，这限制了其在该领域的广泛应用。因此，探索新型骨修复材料以克服上述缺陷，成为当前研究的重要方向。本工作以双相磷酸钙 (BCP) 为骨传导基底，复合增强力学强度的聚丙烯酰胺改性明胶 (GelMA) 水凝胶与具有 pH 敏感酰胺键的氧化海藻酸钠 (OSA) 水凝胶，实现抗肿瘤药物硼替佐米 (BTZ) 的酸性微环境触发释放。本课题的主要研究内容如下：

(1) 采用高温煅烧法制备 BCP 多孔支架，基于动态共价键交联机制构建 OSA 水凝胶，利用自由基聚合法合成聚丙烯酰胺改性明胶 (GelMA) 水凝胶；将 OSA 与 GelMA 复合形成 OSA-GelMA 双网络水凝胶，最终将硼替佐米 (BTZ) 负载体系与 BCP 支架进行多尺度复合。材料表征结果表明：XRD 证实 BCP 制备成功，FTIR 与 ¹H NMR 验证了 OSA 醛基 (1720 cm⁻¹、5.43 ppm 和 5.23 ppm) 及 GelMA 双键 (5.78 ppm) 的成功修饰，SEM/EDS 显示材料具有分级孔道系统。

(2) 对 OSA-GelMA 复合水凝胶进行热稳定性、孔隙率、流变学、溶胀、水接触角、降解、自愈合性能测试。结果表明：说明 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺 (MBA) 用量为 20 mg 时水凝胶的综合性能最佳，孔隙率为 64.9%，孔径主要分布 100-300 μm；OSA 的引入提升了复合水凝胶的热稳定性；水凝胶以弹性行为为主 ($G' > G''$)，且内部结构始终保持稳定；水凝胶的溶胀平衡率约为 400%，且在酸性环境下溶胀率高于中性环境；水凝胶具有良好的亲水性 (水接触角 47.7°)；材料初期快速降解，随后钙沉积速率与降解速率达到平衡，降解曲线逐渐平缓。此外，水凝胶还表现出优异的渗透性和自愈合性能。

(3) 对 BTZ@OSA-GelMA-BCP 支架进行 SEM、XRD 等表征并对其力学、降解、药物释放生物相容性进行评价。结果表明：水凝胶的加入使 BCP 支架力学强度从 1.920 MPa 提升至 2.515 MPa；在 98 h 时，pH 为 5.4、6.8、7.4 的药物释放分别为 96.41%、86.65%、68.33%，呈现出明显的 pH 响应性释放行为；60 day 的降解率为 30~40%，与骨生长周期相匹配。复合材料在不同 pH 条件下有一定的抗菌性，其中对金黄色葡萄球菌的抗菌效果大于大肠杆菌。细胞实验表明复合支架 72 h 内能够促进人成纤维细胞 (HFF) 细胞的生长，且无细胞毒性；体外肿瘤细胞毒性实验表明复合支架对肺癌细胞系 (H1299) 和结肠癌细胞系 (HT29) 具有良好的细胞毒性，对正常细胞 CCD841 的毒性符合标准。实验证明复合材料具有良好的力学性能、降解性能和生物相容性，为骨肿瘤修复提供了潜在的价值。

D07-39

钛基植入体电活性表界面设计及其生物学响应机制研究

李凯¹、葛少华¹、刘宏¹、李建华*¹

1. 山东大学

种植体失效是口腔种植领域常见的临床并发症，其导致的二次治疗成本给患者及医疗系统造成重大经济损失。生物医用钛种植体的临床成功率取决于骨与种植体界面的有效骨整合。尽管内源性生物电信号在骨重塑中起关键作用，但种植体-骨界面生物电微环境的重建仍面临重大挑战：传统经皮供电策略存在感染风险高、手术复杂度大及患者依从性差等固有缺陷；新型电活性涂层（如压电/光电材料）虽规避了上述问题，但需依赖光/超声等外源能量输入，显著制约其临床转化。本研究创新性地设计在钛种植体表面原位构筑钛酸锶钡热释电功能涂层，该涂层可响应口腔生理性温度波动（如饮食刺激），通过自发电势调控骨组织电微环境，特异性激活 TRPM8 离子通道介导的钙内流过程，从而显著提升骨整合效率。本研究不仅为种植体表面生物电活性改性提供新策略，突破现有钛种植体表面生物活化技术的应用瓶颈，更为解决植入物骨整合失效这一共性临床难题提供新的研究思路和技术参考。

D07-40

润滑性高分子的仿生设计与骨关节炎治疗

俞鹏^{1,2}, 王德辉¹, 谢婧², 邓旭¹, 李建树^{*2}

1. 电子科技大学 基础与前沿研究院
2. 四川大学 高分子科学与工程学院

由于老龄化、肥胖、意外伤害等因素，全球范围约 5 亿人口患有骨关节炎(OA)^[1]。OA 发展初期，关节软骨的润滑性能逐渐丧失，进而引发后续的炎症反应与氧化应激，最终造成软骨受损和骨赘增生^[2]。因此，重塑关节软骨润滑性能，有助于为受损软骨提供长效、稳定的保护功能，实现 OA 治疗。

受到软骨基质中透明质酸启迪，我们设计了一系列润滑性高分子材料（光热纳米酶、刺激-响应水凝胶等）实现 OA 时空治疗^[2-4]。为了模拟软骨表面的润滑素分子，我们通过 RAFT 聚合制备了 II 型胶原靶向肽修饰的两性离子嵌段聚合物(PSBMA-*b*-PNHSMA, PSP)。该聚合物可以模拟润滑素分子的“润滑域”和“结合域”，在软骨表面特异性形成定制化水基盔甲^[5]，其靶向治疗效果优于临床使用的药物和透明质酸制剂。进一步地，这种仿生聚合物可以与 KGN 通过超分子组装形成纳米粒子^[6]。通过病理微环境的 pH 变化，改变纳米粒子的表面电荷，可以自适应渗透至软骨深层，重塑软骨稳态。这种新型润滑性高分子的仿生设计为骨关节炎的长效治疗及临床应用提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] T. Neogi, L. Colloca* *Nat. Rev. Rheumatol.* **2023**, *19*, 613-626.
- [2] P. Yu(俞鹏), Y. Liu, J. Xie*, J. Li* *J. Control. Release* **2021**, *338*, 486-504.
- [3] P. Yu(俞鹏), Y. Li, H. Sun, X. Ke, J. Xing, Y. Zhao, X. Xu, M. Qin, J. Xie*, J. Li* *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, *14*(23), 27360-27370.
- [4] P. Yu(俞鹏), Y. Li, H. Sun, H. Zhang, H. Kang, P. Wang, Q. Xin, C. Ding, J. Xie*, J. Li* *Adv. Mater.* **2023**, *35*, 2303299.
- [5] P. Yu(俞鹏), X. Peng, H. Sun, Q. Xin, H. Kang, P. Wang, Y. Zhao, X. Xu, G. Zhou, J. Xie*, J. Li, *Mater. Horiz.* **2024**, *11*, 5352-5365
- [6] S. Ding[#], P. Yu(俞鹏)[#], X. Peng, Y. Liu, X. Xu, W. Sun, J. Xie, J. Li, *Adv. Funct. Mater.* **2025**, 2505638.

D07-41

引导骨再生 Zn/PLA 复合膜的制备及其性能研究

蔡洪*¹, 尚佳月¹, 郑一诺¹, 唐贝贝¹, 韩冰¹

1. 南京工程学院 材料科学与工程学院

Zn 箔经过微弧氧化(MAO)后，表面粗糙度 S_a 值为 $2.764 \pm 0.071 \mu\text{m}$ ，孔隙率为 $12.5 \pm 3.2\%$ ，表面氧化层主要成分为 ZnO，为后续与聚乳酸(PLA)复合提供了有利的结构和成分基础。采用热压法制备了具有三明治夹层结构的复合膜，与 Zn/PLA40 复合膜相比，MAO-Zn/PLA40 复合膜的拉伸强度提高了 $17.7 \pm 0.6\%$ 。借助 Material Studio 软件构建了氧化膜层与 PLA 之间的界面模型，计算结果表明，界面能从

Zn/PLA 的-7.074 kcal/mol 降至 ZnO/PLA 的-1433.430 kcal/mol, 态密度结果显示 ZnO/PLA 复合体系的总能级向较低方向移动。实验测试和模拟计算结果均表明, 基于机械互锁和静电吸引作用, 复合膜的界面结合效果得到改善。弯曲固定的复合膜在 37 °C人工唾液中的降解实验结果表明, 复合膜的降解性能与界面结合效果和样品厚度密切相关, 点蚀和应力腐蚀是主要腐蚀机理, 二组元降解速率的差异决定了它们之间的动态调控关系。MAO-Zn/PLA 复合膜的浸提液分别与人牙龈成纤维细胞和 MC3T3-E1 细胞共培养 1、3、5 天后, 细胞相对增殖率表明浸提液原液均显示出一定的细胞毒性, 稀释 10 倍后均无细胞毒性。复合膜对金黄色葡萄球菌和牙龈卟啉单胞菌均表现出良好的抑菌效果, 24 h 抑菌率分别达到 81.1% 和 89.9%。该研究为调控这类引导骨再生用屏障膜的力学性能、降解性能和生物相容性提供了一定的实验依据和理论指导。

D07-42

磁响应性人造成骨细胞的构建及骨修复作用研究

鲁梁¹, 张泽平¹, 赵紫濠¹, 杨锐¹, 张兴*¹

1. 中国科学院金属研究所

骨组织是人的重要结构组成, 具有良好的自我修复能力, 但在复杂病理条件下如骨缺损、骨质疏松等, 天然成骨细胞功能减弱, 严重限制骨再生效果。为此, 构建一种可替代成骨细胞功能的人造细胞成为组织工程与再生医学的重要研究方向。本研究开发了一种新型磁响应型人造成骨细胞 (artificial osteoblasts, AOs), 其外壳由天然磷脂构建, 模拟成骨细胞膜结构, 实现优异的生物相容性与结构仿生性。通过将磁性明胶微球与非晶磷酸钙 (ACP) 共同封装于 AOs 内部, 使其具备磁场驱动下的定向迁移能力及交变磁场 (AMF) 刺激下的功能物质可控释放能力。在磁场作用下, AOs 可实现最长超过 100 μm 的可控方向性移动; 在微流控-血管模型系统中, 可在最大 100 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的液流反向运动中仍保持 5.97 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的平均迁移速度, 展现出优异的磁靶向特性。AMF 作用下, AOs 内部 ACP 释放效率最高可达 44.98%, 并促进成骨细胞 (MC3T3-E1) 的增殖及成骨分化。胶原矿化实验结果显示, 在 AOs 与 AMF 协同作用下, 胶原纤维直径由 63 nm 增长至 120 nm, 弹性模量提升至 4.01 GPa, 显著优于对照组 qPCR 分析结果表明, AO-AMF 组中 ALP、Runx2 和 Colla1 等成骨相关基因表达水平平均显著上调 (相较于对照组提升 1.6–2.3 倍), 证实其对成骨分化具有明显促进作用。进一步地, 开展了离体骨组织矿化实验, 结果表明其能有效诱导局部矿化并增强骨组织再生能力。后续工作将探索结合三维骨支架材料, 构建更具力学支撑能力的人造细胞复合体系, 用于复杂骨缺损环境中的进一步验证。本研究提出了一种磁控功能型人造成骨细胞的构建思路, 展现出在骨修复与组织再生领域的应用潜力。

D07-43

具有抗氧化活性的三维异质支架在骨/软骨缺损一体化修复中的研究

黄剑浩¹, 李澜*¹

1. 南京鼓楼医院

目的: 骨关节炎 (Osteoarthritis, OA) 是一种累及关节软骨和软骨下骨的退行性疾病, 其炎性关节微环境中过量的活性氧, 会加重骨/软骨的损伤和抑制骨/软骨的再生。因此, 开发出一种既能清除活性氧又能促进软骨及软骨下骨整体再生的骨/软骨支架成为目前研究的热点。

方法: 我们设计了氧化铈/丹参酮IIA/纳米羟基磷灰石三维异质水凝胶支架 (CeO₂/TAN/nHA@DN), 用于骨关节炎环境下骨/软骨的一体化修复。使用聚乙烯醇和聚乙二醇二丙烯酸酯构建双网络水凝胶, 通过碱处理和冻融提升其力学性能并使用万能测试机验证, 通过添加 CeO₂ 用于清除自由基, 分别添加 TAN 和 nHA 促进软骨细胞和成骨细胞的增殖和分化, 通过 3D 打印技术验证水凝胶的可打印性, 通过试剂盒检测水凝胶抗氧化活性, 通过 qPCR 和免疫荧光验证水凝胶的生物活性, 通过兔骨/软骨缺损模型验证水凝胶体内骨/软骨缺损一体化修复效果。

结果: 我们成功制备了 CeO₂/TAN/nHA@DN 水凝胶, 力学实验表明其具有优异的力学性能, 最大应力极限为 0.4MPa, 3D 打印实验证明上层胶 (CeO₂/TAN@DN) 和下层胶 (CeO₂/nHA@DN) 具有可打印

性和极好的打印精度，抗氧化实验验证 CeO₂/TAN/nHA@DN 在体外具有超氧跟阴离子和过氧化氢的清除能力，体外细胞实验表明其具有良好的生物相容性及促进骨和软骨细胞的增殖和分化能力，最后动物实验证明 CeO₂/TAN/nHA@DN 能够促进体内骨/软骨一体化修复。

结论：这项工作表明，通过整合抗氧化和生物活性的方法是促进 OA 环境下骨/软骨一体化修复的有效策略，具有极大的临床应用潜力。

D07-44

二水磷酸氢钙结晶过程中的粒径形貌控制和粉体流动性研究

高鹏飞¹、何运良*¹

1. 北京石油化工学院

二水磷酸氢钙 (Dicalcium phosphate dihydrate, DCPD) 作为重要的无机功能材料，以其优异的生物相容性和稳定性广泛应用于食品、医药及饲料添加剂领域。其晶体形貌与粒径分布是决定产品粉体流动性及下游应用性能的关键因素。然而，工业结晶过程中，过饱和度、成核、搅拌、加料方式、原料配比等多因素的复杂耦合作用常导致产品形貌、粒径难以精确控制且批次重复性差，严重制约了高端药用级 DCPD 的国产化进程。

本研究系统考察了原料浓度、溶剂体系、加料策略 (正向、反向、双向)、搅拌桨构型 (锚式、涡轮式、推进式) 及喷雾方式等多工艺参数对 DCPD 晶体形貌、粒径分布、堆密度及粉体流动性的协同影响机制。通过深入分析不同形貌 (球状、片状、树莓状聚集体) 的成因，揭示了工艺条件与晶体品质的内在关联。

研究表明，通过精确调控上述工艺参数组合，可有效实现：1) 目标晶体形貌 (球状、片状、树莓状) 的可控制备；2) 粒径分布 (D₅₀: 40-220 μm) 与堆密度 (0.25-0.70 g/mL) 的宽范围精准调控；3) 粉体流动性的显著优化。特别是，创新性的加料策略被证明是实现高均匀性、窄分布及优异流动性的有效途径。

本研究阐明了多因素耦合作用下 DCPD 的结晶机理，为优化结晶工艺、提升产品批次一致性及性能提供了坚实的理论基础与关键技术支撑，对推动高端药用辅料 DCPD 的国产化与产业化具有重要的理论和工程意义。

D07-45

金属骨植入体局部腐蚀的骨免疫效应

吴静*¹、李孟¹、蔡开勇¹

1. 重庆大学

局部腐蚀是导致骨科金属植入体性能失效和不良组织反应的一个重要原因。金属局部腐蚀发生时，表面过电位和金属离子过载会在腐蚀部位自发形成，调节植入体周围的细胞行为。然而，局部腐蚀介导的骨免疫和细胞内铁稳态影响细胞成骨的机制尚不清楚。本工作研究了局部腐蚀对巨噬细胞的免疫功能和骨髓间充质干细胞 (BMSCs) 的胞内铁稳态的调控，并探讨了骨免疫反应协同细胞铁稳态对 BMSCs 成骨分化的影响。结果表明，局部腐蚀诱导巨噬细胞向 M1 促炎表型极化，增加促炎因子 TNF-α 和 IL-6 的表达，形成不利于成骨的免疫微环境。局部腐蚀引起的表面过电位激活了 BMSCs 细胞膜上的 Piezo1 通道促进铁内流。细胞内铁过载上调 ACSL4、LPCAT3 的表达，进一步加剧了细胞膜脂质过氧化，诱导线粒体功能障碍，促进活性氧的产生，最终导致 BMSCs 成骨分化功能的退化。这项工作为局部腐蚀介导的骨免疫反应和铁稳态失衡引起的骨科疾病提供了理论依据。

D07-46

多功能钛基植入物表面改性策略在抗感染与骨整合中的协同应用研究

徐琨*¹、徐立群¹、刘鹏²、蔡开勇²

1. 西南大学材料与能源学院
2. 重庆大学生物工程学院

随着全球人口老龄化、糖尿病等健康问题的加剧，越来越多的患者因骨质疏松症、运动损伤或意外事故而导致骨缺损，进而极大地增加了对植入手术的需求。医用钛（Ti）及其合金由于具有卓越的机械性能、良好的耐腐蚀性和生物相容性，成为常见的植入材料，被广泛应用到骨融合、骨固定和关节置换等外科手术中。然而，钛基植入物因其本身缺乏抗菌性及其固有的生物惰性，常常导致植入物相关感染和骨整合不足，成为临床骨科手术后失败的常见原因，给患者和公共医疗体系带来了巨大负担。传统的抗生素治疗和外科手术清创等手段容易导致耐药性细菌的出现，且仅对感染初期有效，无法避免二次手术。因此，通过表面改性策略开发兼具抗菌和促成骨功能的骨科植入物已成为研究热点。现有的表面改性方法策略多聚焦于直接赋予植入体抗菌和促成骨功能，对于宿主免疫系统在感染治疗和组织修复中的作用关注度仍有待提高。基于此，本文尝试采用多种表面改性策略，构建具有抗菌、促成骨以及免疫调控等多重功能的新型 Ti 基植入体，旨在满足骨科植入物感染治疗的临床需求。

D07-47

材料仿生学驱动的承重部位大段骨缺损修复与功能重建研究

袁波*¹

1. 四川大学

引言：骨缺损，特别是承重部位大段骨缺损的修复与功能重建是临床骨科长期面临的重大难题，其修复过程极为复杂，涉及材料、结构、力学和生物学等不同组元在植入界面和三维空间层面的时序交互作用，现有修复体服役后难以产生较为理想的治疗效果。如何通过材料设计精细调控骨再生过程中的复杂交互作用，从而实现植入体对承重部位大段骨缺损的良好修复与功能重建，是当前骨再生材料领域亟待解决的关键科学问题之一，突破难度极大。

材料与方法：基于材料仿生学思想，通过随机晶格设计模拟自然骨宏观结构特性，结合 3D 打印制备具异质结构和力学性能的修复体支架。利用缺陷控制、液相刻蚀和纳米粒子自组装等技术对支架表面显微特性进行调控，实现对宿主骨的多尺度仿生适配。构建体外细胞共培养模型和比格犬股骨中段大段骨缺损模型等体内模型，对修复体的体外细胞生物学效应及体内修复大段骨缺损效果进行系统评价，并揭示其调控细胞效应和诱导骨再生的潜在机制。

结果与讨论：所制备的仿生支架具有类似自然骨小梁宏/微结构、表面组分和力学强度的理化性能特征，且相比常规修复体而言，仿生修复体呈现了明显更高的界面应力传递能力，能够有效降低植入体服役后的应力集中发生率。在体外细胞共培养中，经过表面改性处理后的修复体能够通过 EGFR 介导的 Ras/Raf/MAPK 信号级联通路调控细胞成骨和成血管分化。同时，小动物股骨缺损修复实验显示，该仿生修复体能够快速适配自然骨组织结构特征，实现植入初期的良好界面整合。更为重要的是，在大动物大段骨缺损修复中，仿生修复体的修复速度和效果远高于商业对照材料，呈现了巨大的临床应用潜力。

结论：基于材料多晶微结构设计理念，结合增材制造技术，可以制备出具有异质仿生特性的骨修复体。服役后，可以有效传递界面应力，降低应力集中，且通过介导 EGFR 级联通路诱导细胞成骨和成血管分化，最终实现对承重部位大段骨缺损的良好修复和功能重建。

D07-48

磁控杂化纳米马达促进糖尿病慢性伤口修复

牛冉*¹

1. 华中科技大学

糖尿病创面是糖尿病最严重的并发症之一，目前尚缺乏十分有效的治疗方法。外泌体作为新兴药物载体，是治疗糖尿病创面的潜在手段，但在应用中面临难渗透和难吸收等限制。在本工作中，我们通过静电自组装的方式构建了负载抗氧化多酚的工程化外泌体与磁性纳米粒子的磁控杂化纳米马达，利用其对外磁场的感应和磁驱动强劲的驱动力，向伤口周边及深层递送工程化外泌体。通过增强递送和细胞内吞的双增强作用逆转创面氧化应激、促进内皮细胞和成纤维细胞再生以及胶原沉积，并清除细菌生物膜，促进糖尿病慢性伤口愈合。在细菌感染的糖尿病小鼠上表现出优异的综合治疗效果。该工作为慢性伤口愈合用药物载体的设计提供了新思路。

D07-49

可降解水凝胶中空导管及支架

张利东*¹

1. East China Normal University

水凝胶是最接近人体组织特性的生物材料，在介入及植入型医疗器械中起着关键作用，但其亲水性弱化了网络骨架刚性，导致其机械强度非常弱，因此难以直接加工成型。我们通过间接的“膜到管”的化学转化策略诱导水凝胶成型，发展金属离子梯度超交联策略，提升分子网络骨架刚性；发展溶剂交换策略，优化分子骨架柔韧性，并诱导高分子薄膜进入水凝胶管结构。这种非传统的结构微加工策略，有效解决了水凝胶成型后机械强度弱和结构不稳定的问题。我们通过调控化学反应参数及测试分析，探索了高分子薄膜转化为水凝胶中空结构的化学机制，揭示金属离子梯度超交联策略应用普适性及反应规律，为可降解水凝胶医疗器械的发展及临床功能模拟奠定重要的理论基础。

D07-50

受晶格点阵防御策略启发的功能化骨植入物：网格化管理，精准有效预防骨髓炎复发并促进骨再生

汤玉斐*¹，张博¹，张豪¹，孙雅妮¹，陈磊¹，孙凯鑫¹，张育铭²，胡晓帆²，赵康¹，吴子祥²

1. 西安理工大学

2. 第四军医大学西京医院骨科研究所

骨髓炎，一种严重的高复发率骨髓组织感染性疾病。及时采取预防措施可避免严重骨质破坏、全身器官衰竭甚至避免死亡。然而，传统的局部药物刺激响应控制释放技术存在不必要的药物释放和浪费缺点，导致预防失效。到目前为止，临床仍然缺乏有效预防策略。骨髓炎复发具有时空随机性，受“点阵防御技术”启发，将病变区域网格化并针对性构建“精准刺激响应控释系统”是一种有前景的多重预防方法。本研究中，创新性地提出了基于 H^+ 参与干扰破坏离子间原有静电吸附平衡机制介导的绝对精准的 pH 刺激响应抗菌剂控释新颖策略，并依靠该策略在常规高分子骨植入物中构建了“触发式精准响应 Ce^{3+} 控释系统”，最终成功开发出能够网格化管理，精准有效预防骨髓炎复发和促进骨再生的功能性骨植入物。研究通过溶液自由基聚合同步原位水化反应制备搭载“ PO_4^{3-} 机械爪”的精准 pH 刺激响应控释微球并均匀分散于骨植入物中，实现在病变部位构建“点阵防御场”。这种分散点阵系统仅选择性针对微观界面接触区域，实现对病变部位的网格化管理。正常生理条件下，植入物中的 Ce^{3+} 可被“ PO_4^{3-} 机械爪”原位捕获并维持静电吸附平衡，确保 Ce^{3+} 零浓度释放。一旦骨髓炎复发且病灶部位 pH 下降，界面处的 H^+ 在静电驱动下与 PO_4^{3-} 结合，打破吸附平衡，导致 PO_4^{3-} 与 Ce^{3+} 之间的静电吸附转变为排斥，继而实现在感染复发时的 Ce^{3+} 刺激响应解离和精准释放。体内实验已经证实了这种方法在预防相关并发症和促进优异的骨再生方面的有效性。“点阵防御技术”的应用实现了对复发区域的网格化靶向管理，并在药物刺激响应控释方面达到了绝对的时空精准性。所开发的具有独特 pH 刺激响应控释机制的功能化骨植入物有望在预防骨髓炎甚至骨肿瘤疾病方面展现出巨大潜力。

D07-51**清除活性氧生成促增殖降解产物的新型伤口敷料**程亮慧^{1,2}, 吴钰祥¹, 罗亮*²

1. 江汉大学, 智能体育与主动健康研究院
2. 华中科技大学, 生命科学与技术学院

与急性伤口的有序线性愈合过程不同, 糖尿病伤口由于其创面异步愈合的特点, 常陷入无序且反复的炎症阶段, 这种持续性炎症通常表现为局部炎症反应的反复发作以及组织修复的延迟, 破坏了伤口的微环境, 阻碍了组织的修复, 导致愈合过程的严重延迟。因此, 如何长期有效地调节异常的局部炎症微环境, 并根据微环境的动态变化协调组织的生长与修复, 成为糖尿病伤口治疗中的一大挑战。

我们在此报告了一种基于壳聚糖和可降解共轭聚合物聚二乙炔(聚(癸-4,6-二炔二酸), PDDA)的双层敷料设计, 能够满足这一复杂要求。PDDA 具有交替的烯-炔主链, 可以与各种活性氧(ROS)反应时降解, 更重要的是, 它可以同时生成促增殖降解产物琥珀酸。利用 PDDA 的特性, 我们开发的 PDDA-壳聚糖敷料(PCD)能够清除糖尿病创面微环境中的 ROS, 缓解炎症, 并下调先天免疫受体的基因表达。PCD 的缓慢降解还触发了琥珀酸的持续释放, 从而长期促进组织再生。我们已经验证了 PCD 在加速糖尿病小鼠和猪模型创面愈合中的生物相容性和优异性能, 突显了这种调节微环境、促进生长的创面敷料在糖尿病创面护理中的显著转化潜力。

D07-52**医用可降解不混溶 Mo-Cu 合金的制备及其性能研究**李坤*¹、常乐兵¹

1. 山东理工大学

钼合金因其优异的生物相容性、力学性能及耐蚀特性, 已成为当前生物可降解金属材料领域的研究热点。然而, 较慢的降解速率及较低的韧性转变温度显著制约其临床应用。本研究通过元素优选策略, 选定具有良好延展性、高自腐蚀电位及优异抗菌性能的铜元素, 采用机械合金化结合粉末冶金技术制备钼-铜(Mo-Cu)合金体系。针对 Mo-Cu 二元不混溶体系特性, 通过高能球磨工艺克服原子扩散势垒, 实现界面结合方式由物理结合向冶金结合的转变, 并基于第一性原理计算从原子尺度验证合金形成的热力学可行性。系统表征了合金的微观组织结构, 评估其力学性能、电化学腐蚀行为及生物相容性。实验结果表明: 经合金化处理后, 材料抗拉强度提升约 150 MPa, 断后伸长率增加逾 50%; 铜元素的引入显著加速降解过程, 腐蚀速率由纯钼的 2.553×10^{-2} mm/y 提高到 4.765×10^{-2} mm/y; 体外细胞毒性实验及体内皮下植入模型评估证实, 合金在保持钼基体生物安全性的同时, 展现出显著的抗菌性能提升(抗菌率>90%)。通过透射电镜、电化学阻抗谱等表征手段, 系统阐明力学性能与腐蚀行为的增强机制。本研究为开发降解速率可控、力学适配的新一代可降解生物医用植入材料提供了理论依据和技术路径。

D07-53**生物医用 TLM 钛合金脱合金化功能表面构筑及生物学机制研究**王岚¹、周文昊¹、余森*¹

1. 西北有色金属研究院

引言: 生物医用近 β 型 Ti-3Zr-2Sn-3Mo-25Nb (TLM) 钛合金因其较低的弹性模量, 高强度及优良的塑性, 有望在硬组织修复及替换植入体中得到广泛应用。然而 TLM 钛合金缺乏必要的生物活性及抗菌性能, 限制其临床治疗效果, 因此需要对 TLM 钛合金进行表面改性, 通过调控表面形貌并负载生物活性离子及抗菌剂, 赋予 TLM 钛合金时序抗菌及促成骨性能, 满足骨科植入物快速骨整合的临床需求。

材料与方法: 本课题选用表面去合金化技术, 以 TLM 基体中各组元间的电势差为驱动力, 通过腐蚀基体中的活泼组元在钛合金表面原位制备出分级微纳多孔表面结构。此外, 采用浸涂法在去合金化

多孔表面掺入金属活性离子锶并负载聚赖氨酸分子。

结果与讨论：去合金化时序功能表面中聚赖氨酸分子通过静电吸附作用对细菌膜层产生损伤，从而杀灭表面黏附细菌，功能复合表面对抗黏附 *S.aureus* 及 *E.coli* 的抑制率高达 98.60% 及 99.64%，此外，表面分级微纳多孔结构具有辅助机械杀菌性能，其对 *E.coli* 抑制率达到 52%，去合金化时序功能表面通过聚赖氨酸及多孔结构的协同作用表现出广谱抗菌性能。随后，聚赖氨酸层降解，单宁酸调控锶离子释放量，pH 响应释放机制调控锶离子在生理环境中缓慢持续释放，提升基体材料体外成骨分化性能及促血管生成能力，成骨相关基因（ALP、RUNX-2、OCN、COL-1）表达显著提升。在大鼠股骨缺损模型中，去合金化时序功能植入体周围新生骨量大幅度提升，植入体具有良好的骨诱导性，植入体中的分级多孔结构具有接触成骨的特性，植入 8 周后植入体周围已经完全被新生骨包裹，极大的改善了 TLM 植入材料的骨整合性能。

结论：去合金化时序功能表面具有短期抗菌、中长期促成骨分化及血管化并最终实现快速骨整合的时序表达特性，极大的改善了 TLM 钛合金的生物活性，满足骨修复过程中的临床需求。

D07-54

骨植入用高强韧可降解 Zn-Mn-Li 合金的微观结构及性能研究

朱兴隆¹、杨丽景*¹、宋振纶¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

生物可降解锌合金在承重骨植入物的临床应用中一直受到其力学性能不足和锌离子浓度依赖细胞毒性的限制。合金化和变形加工可以通过改变锌合金的微观结构来有效改善这些问题。本研究基于晶粒细化及第二相强化的设计思路，开发了一种具有 Li(Mn,Zn)₄ 三元相的锌合金，并结合挤压、旋锻和轧制工艺有效控制第二相的尺寸、数量和分布，获得了具有多尺度非均匀片层结构的“强韧性-降解可控-生物活性”的新型生物可降解 Zn-Mn-Li 合金。在新的高强韧第二相的作用下挤压态 Zn-0.45Mn-0.8Li 合金的极限抗拉强度和延伸率可达 538MPa 和 65.7%；在晶粒细化、异质变形诱导强化和塑性应变梯度的共同作用下，随着变形量的增加合金的强度-协同作用增加。旋锻和轧制态合金的延伸率进一步提升，最高可到 114.9%。生物安全性方面我们也做了体内体外一系列的验证。Zn-Mn-Li 合金体外具有良好的促成骨性能和促 M2 巨噬细胞极化能力。动物实验表明 Zn-Mn-Li 合金能有效抑制脂肪浸润，促进骨质形成，治疗骨质疏松；比格犬和猴子体内的骨修复实验表明 Zn-Mn-Li 合金具有与 Ti-6Al-4V 合金相当的成骨性能，没有严重的炎症反应。以上结果表明 Zn-Mn-Li 合金弥补了纯锌在生物力学需求和生物活性功能之间的差距，可以有效提这项工作确立了 Zn-0.45Mn-0.8Li 作为承重植入物的有前途的候选材料，是一种具有广阔应用前景的新型可降解骨种植体材料。

D07-55

轧制变形量对 Zn-0.4Mn-0.8Li 合金组织和性能的影响

杨欣欣*¹

1. 哈尔滨工业大学（深圳）

锌基合金凭借其良好的生物相容性、适中的腐蚀速率和优异的机械性能，被认为是最有前途的可生物降解金属材料之一。该工作制备了一种无生物毒性的 Zn-0.8Li-0.4Mn 合金，并通过热轧工艺优化了其微观结构和性能，增强合金的机械强度。轧制变形有效细化合金晶粒，促进基体析出物 β -LiZn₄ 相和 MnZn₁₃ 相的析出；随着轧制变形量的增加，析出相逐渐破裂，转变为基体内均匀分布的粒状组织。轧制变形量 90% 的 Zn-0.8Li-0.4Mn 合金表现出最优的力学性能，峰值屈服强度和抗拉强度分别为 406.0 MPa 和 449.1 MPa，延伸率达 75%。

墙报

D07-P01

冷大气压等离子体：瘢痕疙瘩的新型治疗方式 —— 机制、进展与未来展望

刘卓琳*¹

1. 北京大学深圳医院

瘢痕疙瘩作为皮肤愈合异常引发的病理性瘢痕，以成纤维细胞过度增殖和I/III型胶原异常沉积为特征，常常会导致疼痛、瘙痒、甚至瘢痕挛缩，严重影响患者生活，现有的临床治疗面临易复发、疗效不统一等挑战。常用的临床疗法包括局部注射糖皮质激素、手术切除、放疗、激光治疗、冷冻治疗、光动力疗法、局部加压、药物治疗等，但尚无最佳方案。冷大气压等离子体（CAP）作为新兴非侵入性疗法，通过室温下产生的活性氧氮（RONS）介导多重生物学效应，为瘢痕疙瘩治疗提供了创新路径。动物实验证实，CAP可显著缩减瘢痕体积，改善胶原纤维排列并减轻局部炎症反应。早期临床研究显示，CAP治疗能有效降低瘢痕厚度，缓解瘙痒、疼痛等症状，且安全性优于皮质类固醇注射，复发率更低。其非侵入性特点避免了手术创伤与放疗风险，为临床应用提供了安全保障。在联合治疗方面，CAP通过增加皮肤渗透性来增强皮质类固醇等药物的透皮输送，结合激光治疗，可减少术后炎症并加速修复，从而提升疗效。目前正在探索与微针或间充质干细胞（MSC）疗法的整合，以增强治疗的作用深度和组织再生能力。CAP具备多靶点调控、无创安全、适配联合治疗等显著优势。然而，挑战依然存在：缺乏标准化的治疗参数、RONS双重效应的不确定性、个体患者的差异性以及缺乏用于长期验证的大型多中心 RCT。未来的研究应考虑标准化方案、更深入的机制研究以及优化联合疗法。总而言之，CAP在瘢痕疙瘩的非侵入性治疗中有着巨大潜力，克服当前的局限性并推进深入研究，可以使CAP成为治疗瘢痕疙瘩的关键方法，为患者提供有效且非侵入性的治疗选择。

D07-P02

基于鱼鳞提取物的多孔支架制备及矿化研究

黄志海*¹, 石炜之¹, 陈露¹, 徐敢¹, 赵一帆¹, 李绍嘉¹, 朱夏龙¹

1. 东南大学材料学院

鱼鳞有效成分主要包括鱼鳞胶原、羟基磷灰石和卵磷脂等，其有机成分为主，主要由板片状结构的蛋白质纤维叠合而成，无机成分羟基磷灰石具有良好的生物相容性、骨传导性、不引起炎症和机体免疫等特性，目前广泛应用于骨组织工程。与陆生动物相比，虽然鱼类胶原中脯氨酸和羟脯氨酸的含量低，但蛋氨酸含量明显高于动物胶原中的含量，为鱼鳞胶原抗炎性提供了成分来源，使鱼鳞胶原用于组织工程所引起的炎症较陆生动物胶原弱。另外，鱼鳞在水产养殖和食品行业通常作为生物废料或低附加值原料，利用率和经济效益不高。基于此，我们希望提取鱼鳞胶用于组织工程领域，提高其作为生物废弃物的利用率和附加效益。

在本研究中，我们采用赤水鲮鱼的鱼鳞为原料，从中提取鱼鳞胶制成多孔支架，并进一步研究了基于鱼鳞胶制备多孔支架的仿生矿化性能。

具体地，首先称取一定量的赤水鲮鱼鱼鳞，去离子水洗净，干燥后将鱼鳞浸入液氮中预冷处理，使其脆性增加。随后，使用破壁机将鱼鳞尽可能地打碎为较小块。将破壁后的材料过筛（30目），称取20g过筛后的鱼鳞装入烧杯后，加入200ml去离子水。在90℃条件下加热3h，随后通过两层纱布滤除不溶物。然后，继续在90℃条件下加热浓缩至100ml。将上述提取液均分为4份25ml转入烧杯中，边搅拌边加入预先配制好的交联剂EDC/NHS溶液（EDC:NHS=4:1）。搅拌1min后即可浇入圆柱形模具中。待常温交联30min后转入-50℃冷冻4h。然后转入冻干机中-50℃冻干24h，脱模后继续冻干24h后，即得鱼鳞胶多孔支架。参考我们先前发表研究中的方法[1]，我们对制备的支架进行了12h的仿生矿化沉积。

我们通过SEM、EDX和XRD对鱼鳞原料的内外侧和横断面结构进行了观察，发现赤水鲮鱼鱼鳞也是以胶原蛋白有序排列成的板片状结构，外表面规律性分布有羟基磷灰石颗粒，使鱼鳞外表面具有较高的强

度。SEM 表征制备的支架证明其具有高度联通的多孔结构, 红外光谱分析表明交联剂使支架的结构更牢固, 而压缩强度结果进一步表明支架强度随交联程度增加而增加。我们也通过 SEM、EDX、FTIR、TGA 和力学性能测试对矿化的鱼鳞胶多孔支架进行了表征分析, 发现经过 12 h 的矿化, 支架沉积了超过 30% 质量的无机成分, 支架的孔壁上可见无机矿物沉积, 部分小孔被沉积物完全覆盖。支架的压缩强度比矿化前提高 70%-80%。以上结果表明鱼鳞胶制备的多孔支架具有比较优异的矿化能力, 可通过矿化处理, 使支架获得更好的骨诱导性和强度提升。

综上, 我们采用生物废弃物鱼鳞为原料, 通过热力抽提的方法获得了鱼鳞胶, 并将其制成孔隙联通的多孔支架材料, 并通过矿化改性使其获得了更好的性能。有利于提升鱼鳞的利用率和原料附加值。

Ref: [1] Huang Zhihai; Dong Yinsheng; Chu Chenglin; Lin Pinghua ; Electrochemistry assisted reacting deposition of hydroxyapatite in porous chitosan scaffolds, Materials Letters, 2008, 62(19): 3376-3378

D07-P03

透明质酸基凝胶化细胞设计及其在肠胃炎的应用探究

周印¹, 陈彦铭¹, 王嘉怡¹, 李仔杰¹, 何一燕*¹, 顾忠伟¹

1. 南京工业大学

本研究构建了一种可在细胞内部原位合成水凝胶的细胞内凝胶材料。通过一次冻融处理, 将侧链氧化的透明质酸成功引入细胞内部, 其醛基可与细胞内蛋白质上的氨基及半胱氨酸残基发生特异性反应, 从而在胞内形成稳定的水凝胶网络结构。该水凝胶作为细胞骨架, 有效支撑并维持了细胞膜的完整性以及膜蛋白的生物活性。我们系统评估了该凝胶材料的细胞膜完整性、在体内的稳定性、药物负载能力及控释性能。进一步验证了经内部凝胶化处理的巨噬细胞在胃肠道慢性炎症部位的良好靶向性与滞留能力, 证实了细胞膜上特异性蛋白的有效保留。综上所述, 本研究成功构建了一种兼具完整细胞膜结构和膜蛋白活性的细胞内凝胶材料, 展现出其在慢性炎症中的广阔应用前景。

D07-P04

具有级联微环境响应性的自适应水凝胶用于抑制骨肉瘤并促进骨重建

林海榕¹, 朱明智¹, 张进*¹

1. 福州大学

骨肉瘤 (Osteosarcoma, OS) 是一种高度侵袭性和致命性的恶性肿瘤, 其 5 年总体生存率不足 20%。而术后恢复效果仍不理想, 主要归因于持续的炎症反应、残余肿瘤细胞未被完全清除以及肿瘤诱导的大段骨缺损修复不足。在本研究中, 我们成功制备了一种自适应多功能 RPSH 水凝胶, 该水凝胶通过将自组装的 1-溴乙酰-3,3-二硝基氮杂环丁烷 (RRx-001) /吲哚菁绿 (ICG) @二硒化物纳米颗粒 (R/I@SeNP) 引入双网络聚丙烯酰胺/海藻酸钠/透明质酸 (PAAm/SA/HA) 水凝胶基质中构建而成。

首先, 高分子量透明质酸在术后 24 小时内可有效抑制 NF- κ B 信号通路, 并诱导巨噬细胞向 M2 表型极化, 从而逆转骨肉瘤切除后的炎性微环境。随后, 双重响应的 R/I@SeNP 可通过上调活性氧/氮种 (ROS/RNS) 水平并生成 RSeH 或免疫检查点抑制剂 RSeO(OH), 实现多模式的抗癌治疗, 其术后三周的肿瘤生长抑制率达到 72.84% \pm 6.75%。

值得注意的是, RPSH 水凝胶通过调控成骨-破骨平衡, 显著促进新骨形成, 在植入 8 周后实现骨体积/总组织体积 (BV/TV) 比值为 59.03% \pm 9.41%, 展示出其在长期构建有利于骨再生微环境方面的能力。这种基于自适应水凝胶的策略为改善骨肉瘤术后治疗提供了有前景的思路与潜在的临床益处。

D07-P05

支气管内微病灶靶向取样磁控微型机器人

李姗姗*¹

1. 哈尔滨工业大学 (深圳)

基于目前大多研究主要采用外部刺激来实现单次操控抓取动作，无法高效地进行多次取样，并且取样机构单一，存在取样精度差和效率低等瓶颈，为了面向肺癌早期诊断对微小病症的靶向取样需求，拟采用微纳打印技术构建磁控取样微型机器人，通过材料结构设计与表界面修饰策略实现气管粘液界面的高效驱动控制，在医学影像介导下完成在肺部气管环境中对微病症的可控靶向和取样。

D07-P06

具有双模式抗凝和自适应免疫调节功能的血管内膜仿生中心静脉导管双层水凝胶涂层

潘高星¹，韦苏棋¹，毕轲磊¹，张进*¹

1. 福州大学

尽管中心静脉导管（CVC）具有良好的血液相容性与界面稳定性，其临床应用仍受限于无法有效抵抗血栓形成与急性炎症反应的问题。为此，本研究设计了一种新型仿血管内膜双层结构水凝胶涂层，旨在缓解临床常见的血栓性及炎症性并发症。该涂层首先通过亲水基团构建被动抗凝屏障，形成稳定的水合层，从而实现血液成分的非特异性黏附抑制；同时，活性抗凝机制通过巯基/磺酸基的动态氧化还原结构实现，对凝血因子活性及凝血级联反应的自激活过程产生协同抑制效应。其次，该水凝胶展现出 $79.42\% \pm 1.34\%$ 的自由基清除率，并可诱导巨噬细胞表型重塑，从而有效构建有利于氧化应激损伤修复的抗菌微环境。更为重要的是，该仿生双层水凝胶涂层在导管表面表现出优异的粘附稳定性，其类血管内膜的弹性模量有效缓解导管与内皮组织间的力学不匹配，进而保障长期界面完整性与植入安全性。动物实验证据表明，在大鼠皮下植入模型及兔动静脉分流模型中，该涂层显著降低导管堵塞率（ $0.90\% \pm 0.64\%$ ），抑制 F1+2 的积累以及 TNF- α 的表达水平。综上，该水凝胶涂层通过协同的抗凝与抗炎功能构建了稳定高效的生物界面，展现出在临床留置器械领域的广阔应用前景。

D07-P07

DLL4/VEGF 双特异性分子印迹纳米导弹实现增强肿瘤治疗

金芳¹，官佩鑫¹，黄凌睿¹，张安琪¹，高嵩¹，Lisheng Wang²，刘震*¹

1. 南京大学

2. 渥太华大学

抗血管生成治疗是肿瘤治疗领域的重要策略。尽管以 VEGF/VEGFR 通路为靶点的抗血管生成药物已在多种实体瘤治疗中取得临床成功，但由于肿瘤血管生成涉及复杂的多通路调控网络，单一靶点治疗往往引发代偿性信号通路的激活，最终导致耐药问题产生，治疗效果受限。为突破这一瓶颈，开发基于多靶点协同作用的抗血管生成策略已成为迫切需求。其中双特异性抗体因其可同时靶向多个血管生成相关分子而具有很大潜力。然而，抗体固有的如高昂的成本、潜在的免疫原性、脱靶现象、渗透性低等缺点，迫使我们进一步开发其他药物。纳米治疗已成为一种潜在的策略。在此，我们报道了双特异性分子印迹纳米导弹（bsMINM），通过“双打击”策略实现协同抗肿瘤血管生成治疗。通过先进的硼亲和和锚定表位定向表面印迹及包覆技术制备，bsMINM 具有针对血管内皮生长因子（VEGF）和 Delta 样蛋白 4（DLL4）的 N 端表位的定制结合空腔。通过结合肿瘤部位高表达的 VEGF 和 DLL4，bsMINM 表现出了对肿瘤部位的良好靶向能力。结合 VEGF 以及 DLL4 后，bsMINM 有效阻断了血管内皮细胞上的 VEGF-VEGFR 信号通路和血管内皮细胞以及肿瘤细胞上的 DLL4-Notch 信号通路，协同抗肿瘤血管生成，从而实现抑制肿瘤生长目的。在 MCF-7 异种移植肿瘤模型中，bsMINM 治疗对肿瘤生长的抑制作用显著，此外还降低了癌细胞的自我更新能力。这项工作创新性地针对肿瘤血管生成中关键串扰信号分子 VEGF 和 DLL4，首次设计并构建了具有多靶点识别能力增强抗血管生成的纳米平台。这种通过多识别能力同时阻断串扰信号通路的策略，也为解决由信号通路串扰引起的耐药问题提出新的可能。

D07-P08**基于微纳 3D 打印的活细胞跨膜通道的构建和微纳米机器人穿梭行为的研究**王嘉禄¹, 马星*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

精密医学为癌症治疗及遗传性疾病的诊疗提供了一种新的治疗途径。其核心之一在于在细胞、亚细胞及分子层面进行深入研究和操作, 以实现单细胞操作, 从而能够无损地突破细胞膜屏障, 完成跨膜物质传输与提取。现有方法如微/纳米载体和细胞穿孔技术, 在效率或细胞损伤方面存在明显不足。人工跨膜通道因其温和和无害的特性而受到关注, 但仍存在制备繁琐、建立缓慢等缺陷。近年来, 微纳米机器人作为一种新兴技术, 通过外场驱动实现灵活运动, 为穿越细胞膜提供了新的可能, 但其可控性与作用力仍是亟待解决的问题。

为应对上述挑战, 本研究提出结合人工跨膜通道的温和性与微纳米机器人的灵活性, 设计一种人工介导的细胞物质交换新方法, 使其兼具高效、主动可控且低细胞损伤的优势。利用双光子聚合微纳三维打印技术, 制备了尺寸与形状可调的微管状结构(以下简称微管), 并探究其作为活细胞跨膜通道用于主动跨膜递送纳米机器人的潜力。

为制备可用于磁驱纳米机器人穿梭并与细胞共培养的微管阵列, 本研究制备了多种尺寸与形状的微管阵列, 证实了微管结构具有中空特性, 具备作为跨膜通道的应用潜力。为探索微管作为磁驱纳米机器人穿梭通道的应用潜力, 制备了多种不同形状的磁驱纳米机器人, 并选用 Fe₃O₄@SiO₂-COOH 纳米机器人作为实验用磁驱纳米机器人。在三维磁场发生器产生的可变旋转磁场下, 研究了磁驱纳米机器人集群的运动规律与控制参数, 并实现了磁驱纳米机器人集群在微管通道内的运动。

为探索微管作为活细胞跨膜通道的应用价值, 完成了细胞与微管的共培养实验, 并利用磁场控制实现了磁驱纳米机器人通过微管通道精确递送至细胞内, 进一步验证了微管作为人工跨膜通道的潜力。

D07-P09**基于活细胞机器人集群的骨关节炎靶向治疗研究**李浩玮¹, 马星¹, 陈文君*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

本课题提出一种基于磁控微纳米机器人集群运动的细胞递送策略。在本课题中, 将骨髓间充质干细胞与具有核壳结构的载药 Fe₃O₄@SiO₂ 纳米磁颗粒共培养制备成球形细胞机器人。Fe₃O₄ 作为磁性纳米引擎使细胞机器人能够在磁场的控制下进行有效运动, 包裹的介孔二氧化硅一方面降低磁颗粒对细胞活性的影响, 一方面负载促进干细胞分化的药物提高细胞疗法的治疗效果。细胞机器人以集群的形式在关节腔内运动, 能够有效的抵抗关节腔内高粘度生物屏障的阻碍, 使其更加精准的靶向损伤软骨, 同时满足细胞疗法所需的细胞数目。综上本课题在干细胞精准递送方面具有显著优势, 并且具有较高的递送效率, 为细胞疗法在骨关节炎中的应用奠定了基础。

D07-P10**调控氧化应激和炎症微环境的钴基纳米酶的可控制备及心肌损伤治疗研究**古丽扎尔·艾尼瓦*¹, 罗宇¹, 王恺阳¹

1. 上海工程技术大学

心肌梗死(myocardial infarction, MI)是心血管疾病领域中一项严重的临床挑战, 不仅发病率高, 也是引致残疾和死亡的主要原因。心肌细胞凋亡、炎症和纤维化是MI发病机制中的三个重要因素。靶向这三种因素已被证明可以改善MI和挽救心脏功能。目前可用的治疗心肌梗死的药物面临着治疗效果弱和心脏蓄积差等弊端。研究显示, 姜黄素具有抗炎、抗肿瘤、抗纤维化、器官保护等诸多功效。虽然姜黄素的药效得到了国内外的普遍认可, 但是其溶解性低、稳定性低和生物利用率低等缺点, 限制了其临床应用。

钴基催化剂得益于过渡金属钴 (Co) 的高活性、可变化合价 (CoII/CoIII) 以及与有机物的高络合亲和力, 在催化和抗生素降解等领域颇有研究。基于以上, 我们开发了一种新型的 CC@TA 纳米酶用于 MI 的多策略治疗, 该纳米酶由 Co^{2+} 和姜黄素配位以达到最佳抗氧化、抗炎活性, 并进一步修饰单宁酸(TA), 通过单宁酸的胶原蛋白亲和能力提高其心脏组织中的蓄积。物理化学表征显示, CC@TA 纳米酶具有良好的稳定性和生物相容性, 能够有效模拟 CAT、SOD 活性, 可以有效地清除自由基。体外实验表明, 在氧化损伤环境下, CC@TA 纳米酶处理的细胞存活率增加, ROS 和线粒体损伤降低, 同时得以维持细胞迁移、成管功能。此外, CC@TA 纳米酶通过调控 Caspase1-GSDMD 信号通路抑制心肌细胞因自由基损伤引起的焦亡。在 MI 动物模型上, 该纳米酶亦发挥了其生物活性。综上所述, 我们期待 CC@TA 纳米酶的设计方法可为未来治疗心肌梗死提供新的思路。

D07-P11

用于肺部取样的 3D 打印磁控微型机器人

谭悦颖*¹

1. 哈尔滨工业大学 (深圳)

为解决肺癌早期诊断中组织取样过程侵入性强、定位不准的问题, 本文提出一种 3D 打印磁控微型机器人, 具备滚动驱动、原位旋转取样和定向回收三种运动模态。研究开发了一种复合磁性及医学成像功能的光敏树脂材料, 利用紫外线立体光刻和双光子打印技术制造高精度多功能磁性微机器人。通过高精度模拟优化微机器人几何结构, 设计不同疏水性和表面电荷的功能涂层, 增强运动时的抗黏附性能。建立了磁场驱动控制系统, 与支气管镜结合, 实现在气道环境的精准控制和靶向取样。机器人的驱动和取样能力在类黏液环境、肺部模型及离体组织中都得到了验证, 展现出良好的运动稳定性与取样效率, 为微创肺部诊疗提供了新技术路径。

D07-P12

磁控管状微纳机器用于肿瘤细胞跨膜药物递送与机械杀伤

王海力*¹

1. 哈尔滨工业大学 (深圳)

磁驱动管状微/纳米机器是一类新型智能材料, 具有优异的磁响应性与可控性, 在肿瘤精准治疗领域展现出巨大潜力。本研究设计并制备了 Fe_3O_4 功能化的二氧化硅微管 $\text{SMT}@\text{Fe}_3\text{O}_4$, 系统探究其在细胞与肿瘤组织中的靶向运动能力及药物递送性能。磁性微管通过将 Fe_3O_4 磁性纳米颗粒均匀附着于二氧化硅微管内壁而制备而成。在不同磁场模式下, 分析其典型运动行为, 并研究速度与磁场强度、频率之间的关系, 以优化运动控制能力。

在细胞实验中, 磁性微管在外部磁场的引导下, 可靶向肿瘤细胞表面, 并通过自然内吞形成跨膜通道, 从而实现高效药物递送。利用激光共聚焦显微镜结合细胞器染色与活/死细胞染色方法, 对药物递送效率和微管的细胞毒性进行了分析, 对微管进入细胞后与不同亚细胞结构的共定位情况进行评估。此外, 采用流式细胞术定量评估肿瘤细胞凋亡情况, 进一步验证磁性微管在单细胞层面的功能表现。

本研究系统展示了磁驱动管状微/纳米机器的功能特性及其在肿瘤精准治疗中的应用潜力, 为磁响应材料在生物医学领域的发展提供了坚实的基础。

D07-P13

多模态诊断试剂在体内高效靶向递送与影像诊断应用研究

叶欣然*¹

1. 哈尔滨工业大学 (深圳)

开发多模态诊断试剂以应对动脉粥样硬化精准诊断的关键需求。通过融合多学科手段与技术创新, 突

破了现有诊断试剂功能单一、靶向效率低、成像分辨率不足等局限。基于多层级纳米探针设计，构建了同时具备荧光成像、磁共振成像（MRI）和光声成像（PAI）功能的诊断试剂，实现了对病灶区域的高效靶向递送与精准富集。研究结合磁场驱动与簇团控制等策略，有效提升诊断试剂在复杂生理环境中的递送效率，显著增强了诊断灵敏度与特异性。提出了一种新型的光声-磁共振融合诊断策略，优化多模态成像数据的互补与集成利用，从而提升深部病灶的成像分辨率与可视化能力。针对当前制造工艺复杂、缺乏质量标准等问题，研究建立了多功能探针的按需组装平台，并完善了诊断试剂性能的标准化评价体系。最终，成功开发出兼容多模态成像的高性能诊断试剂，并在动脉粥样硬化模型中验证其体内诊断效果。本研究为重大疾病的早期诊断与精准医疗提供了创新性的技术工具，为诊断试剂的标准化、产业化与临床转化奠定了坚实基础。

D07-P14

Metallic nanomedicine innovations in cGAS-STING pathway modulation for enhanced cancer immunotherapy

Dian Chen¹, Chunting Wang¹, Yuelin Huang¹, Defan Yao^{*2}

1. Shanghai University of Sport

2. Department of Radiology, Xinhua Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, China, Shanghai

Abstract: [Purpose] Tumor immunotherapy aims to activate the host's anti-tumor immune response to eliminate cancer cells, representing a breakthrough in cancer treatment. However, its efficacy is constrained by the specificity and immunosuppressive nature of the tumor microenvironment (TME). The cGAS-STING pathway, a core regulatory mechanism of innate immunity, plays a pivotal role in tumor immune responses. Yet, the clinical application of natural agonists like cGAMP is hampered by enzymatic degradation and low bioavailability. Combining nanomedicine with cancer therapeutics overcomes the limitations of conventional approaches. Metal-based nanodrugs offer a transformative strategy for targeted delivery, enzymatic protection, and microenvironment-responsive release of immunomodulators to address these challenges.

[Methods] Metal nanodrugs activate the cGAS-STING pathway through multiple mechanisms, demonstrating significant promise. Metal ions (e.g., Mn, Fe, Cu) can directly bind to the catalytic pocket of cGAS, enhancing its affinity for double-stranded DNA, promoting cGAMP synthesis, and activating the downstream STING signaling cascade. Metal nanomaterials enable tumor microenvironment-responsive release of these ions, amplifying signal activation. Furthermore, metal nanodrugs can be synergistically combined with other therapeutic modalities such as chemotherapy, radiotherapy, photothermal therapy (PTT), and photodynamic therapy (PDT). This review specifically explores the mechanisms of metal nanodrug-mediated cGAS-STING activation, including the enhancement of cGAS enzymatic activity, stabilization of STING protein dimerization, and modulation of downstream immune signaling.

[Results] The integration of metal nanodrugs with various treatment modalities yields potent synergistic effects: 1) In chemodynamic therapy (CDT), Fenton reactions induce immunogenic cell death (ICD) and activate the cGAS-STING pathway; 2) Chemotherapy benefits from the synergy between drug delivery and immune activation; 3) Radiotherapy is enhanced through radiosensitization and promotion of ICD; 4) PTT/PDT leverages localized hyperthermia or reactive oxygen species to synergistically enhance tumor antigen release and immune activation. Additionally, the application potential of cGAS-STING-activating metal nanodrugs in imaging-guided tumor immunotherapy is analyzed, exploring fusion strategies with multi-modal imaging techniques.

[Conclusion] Metal-based nanomedicines represent a highly promising strategy for precise and efficient cGAS-STING pathway activation in tumor immunotherapy. Their unique properties enable targeted delivery, overcome bioavailability issues, and provide potent synergy with multiple established therapeutic modalities, significantly enhancing antitumor efficacy. Overcoming current challenges in the development of these nanodrugs

is crucial for advancing their clinical translation and realizing their full potential in cancer treatment.

D07-P15

钼酸铜超声增强铜死亡治疗膀胱癌

黄海燕¹, 王恺阳*¹, 罗宇¹, 朱晓风¹

1. 上海工程技术大学

膀胱癌作为泌尿系统常见的恶性肿瘤，其生物学行为具有显著异质性，部分亚型表现出较强的侵袭性和复发倾向。目前临床治疗体系涵盖手术切除、腔内治疗、放疗、化疗及生物治疗等多种模式，但各阶段患者仍面临严峻的治疗挑战。目前新型的膀胱癌治疗正从“一刀切”模式转向分子分型驱动的精准化时代，传统手段的局限性倒逼新型疗法加速落地，但耐药、异质性和个体化方案优化仍是攻克生存率瓶颈的关键突破口。

细胞焦亡作为一种高免疫原性细胞死亡方式，在肿瘤治疗领域展现出重要应用前景。本研究通过水热法成功制备了钼酸根均匀分散的钼酸铜纳米粒子(HCMO)，揭示了金属氧阴离子诱导细胞焦亡的双重机制：在肿瘤微环境中，HCMO释放的钼酸根离子通过产生活性氧(ROS)直接诱导细胞焦亡，同时上调GSDME表达，将传统凋亡转化为Caspase-3/GSDME介导的焦亡通路。该过程通过质膜孔道释放IL-1 β 、IL-18等促炎因子及损伤相关分子模式(DAMPs)，有效激活树突状细胞并招募细胞毒性T淋巴细胞，实现免疫抑制微环境的重编程。值得注意的是，膀胱癌细胞因其独特的代谢特征--活跃的糖酵解代谢与铜转运蛋白CTR1的高表达--对铜离子诱导的细胞死亡表现出高度敏感性。这为铜死亡机制的研究提供了理想模型。铜死亡作为新发现的铜依赖性死亡方式，其核心在于过量铜离子靶向线粒体三羧酸循环中的脂酰化蛋白，引发毒性蛋白聚集及线粒体代谢崩溃。本研究通过两种死亡模式协同作用：通过铜死亡破坏肿瘤代谢稳态实现直接杀伤，并通过焦亡诱导免疫信号释放高效激活系统性抗肿瘤应答，形成“代谢破坏-免疫激活”的双重抗肿瘤机制，助力肿瘤治疗从“简单杀伤”向“免疫调控”的升级。

D07-P16

含Ca²⁺和cGAMP的半导体聚合物纳米支架用于放射动力学激活的钙超载和免疫治疗

程丹玲*¹

1. 东华大学

各种第二信使在生物系统中发挥着重要的作用，包括癌症治疗，但其治疗效果往往需要进一步提高。(TCa/SPN/a)，其由两种第二信使，钙离子(Ca²⁺)和环鸟苷酸-腺苷酸(cGAMP)组成，用于转移性乳腺癌治疗，这样的TCa/SPN/a被构建为对线粒体靶向Ca化合物和cGAMP作为干扰素基因刺激剂(STING)激动剂的可激活递送表现出X射线响应。在X射线照射下，TCa/SPN/a可通过放射动力学效应产生单线态氧(¹O₂)消融实体瘤，并通过诱导免疫原性细胞死亡(ICD)提高肿瘤免疫原性。此外，释放的靶向线粒体的Ca化合物对线粒体表现出高度的结合作用，通过钙超载导致活性氧(ROS)的产生和线粒体损伤，而cGAMP通过激活STING途径增强免疫作用。这样，在转移性乳腺癌小鼠模型中，TCa/SPN/a使放射动力学激活的钙超载和免疫治疗能够明显抑制双侧肿瘤的生长并消除肿瘤转移。这篇文章将展示第一种智能双功能纳米疗法，它包含两个第二信使，用于精确和特异性的癌症治疗。

D07-P17

X射线激活的搭便车聚合物纳米药物能够实现可控的铁死亡，并诱导原位胶质瘤的排斥免疫反应

朱安妮*¹

1. 东华大学

虽然已经采取了各种策略来治疗神经胶质瘤，但由于其侵袭性、血脑屏障(BBB)、耐药性和高度免疫抑制的微环境，神经胶质瘤的临床治疗效果仍然很差。我们在此提出X射线可激活的搭便车聚合物纳

米药物 (HPNFCN), 它可以实现受控的铁死亡和免疫以排斥原位神经胶质瘤。HPNFCN 是通过将新合成的铁死亡诱导二茂铁前药和免疫治疗药物 (NLG919) 加载到活性氧 (ROS) 响应性半导体聚合物纳米系统中形成的, 表面修饰了嗜中性粒细胞靶向配体。我们发现中性粒细胞靶向 HPNFCN 可以通过跨 BBB 实现有效递送到原位胶质瘤部位。HPNFCN 的低剂量 X 射线照射导致半导体聚合物产生 ROS, 这不仅激活了二茂铁前药导致铁死亡, 还破坏了 ROS 响应纳米系统以按需递送 NLG919。此外, 铁死亡效应触发免疫原性细胞死亡 (ICD) 以促进免疫, 这与基于 NLG919 的阻断协同作用以增强抗肿瘤免疫反应。这种精确有效的治疗策略可以观察到排斥原位胶质瘤, 而没有明显的副作用。本研究证明了 HPNFCN 通过中性粒细胞介导的有效递送和 X 射线激活的铁死亡和免疫治疗作用治疗神经胶质瘤的优越性

D07-P18

用于干细胞精准递送的新型智能水凝胶微型机器人

熊小燕¹, 刘禹州¹, 陈文君¹, 马星*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

本项目针对干细胞治疗中传统微纳机器人技术存在的递送效率低、靶向性差等核心问题, 创新性地开发了基于温敏响应型双层水凝胶的磁控细胞递送微型机器人。其结构是采用聚异丙基丙烯酰胺(PNIPAm)/聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)复合水凝胶构建的双层薄膜结构。该微型机器人具有温敏的可逆形变性能, 通过精准调控相变温度实现 37°C 自卷曲形成三维管状保护腔体, 将干细胞包裹于动态屏障内避免外界机械损伤, 显著提升细胞存活率; 当温度升至 40°C 时可控展开实现靶向释放。通过掺杂磁性纳米颗粒与可编程磁场驱动系统集成, 在离体猪小肠、活体大鼠肠道及兔胃模型中展现出毫米级运动精度, 突破传统被动递送技术瓶颈。模块化材料体系支持生物功能的定制化调整, 例如应用于子宫内修复的干细胞递送治疗。平台具备优异的磁控导航性能, 并与内窥镜等临床设备高度兼容, 为退行性疾病微创治疗提供了新型解决方案。

D07-P19

面向快速局部麻醉应用的超分子可溶性微针

何静怡¹, 张连斌*¹

1. 华中科技大学

局部麻醉广泛应用于小手术、牙科治疗、疼痛管理以及美容医学等医疗操作。局部麻醉的主要方法包括浸润注射和表面麻醉。然而, 如何实现局部麻醉剂的无痛递送和快速起效仍是一个挑战。微针是一种高效且无痛的透皮给药工具, 如何提高微针贴片的载药率并实现快速局部麻醉是亟待解决的问题。本工作中, 我们设计了一种超分子可溶微针, 具有高载药率和快速释药的特性, 以实现麻醉药物分子的快速起效。通过利用具有空腔结构的甲基-β-环糊精对麻醉剂分子利多卡因进行超分子负载, 构筑基于全小分子的超分子可溶微针。该微针贴片载药率达到了 90%, 在给药 5 min 内展现最佳麻醉效果, 展现了超分子可溶性麻醉微针在临床中的实用性。

D07-P20

光学免疫磁控微纳机器人

苗俊丰¹, 金东东*¹

1. 哈尔滨工业大学(深圳)

随着《“健康中国 2030”规划纲要》等政策发布出台, 生物检测的发展对响应政策有着重要的意义。随着计算机等信息化技术的不断成熟, 1990 年人们提出了将免疫检测与传感器相结合, 使其能够实现免疫检测的实时监控、快速定量测定等, 其中光学免疫传感器具有无损操作模式、高灵敏度、快速检测等优点, 而光激化学发光又具有均相免洗的优势。本研究旨在制备可磁控的光激化学发光磁性微纳机器人以及

受体球。利用水热法合成四氧化三铁磁性颗粒，进一步包硅后修饰光敏剂、抗体，制备成磁性微纳机器人；利用乳液聚合法，制备单分散性良好的 PS 纳米球，通过溶胀法负载化学发光物质和荧光物质，修饰抗体后制得受体球。将磁性微纳机器人、受体球与对应抗原相混合孵育，在 680 nm 激光的照射后，能够产生余晖发光，其峰值波长为 615 nm。进一步搭建三维亥姆霍兹线圈磁控平台，达到加速孵育以及减少非特异性信号的目的。通过设计不同的磁场参数，使得磁性微纳机器人能在微量的测试体系中形成集群并受控运动。由于磁场的主动操控运动，可以使得孵育的时间大大减少并且对于检测所需的样本量需求更少。最终整合磁控系统以及光学检测部件形成小型便携的一体化检测设备，使得检测的经济成本和时间成本得到有效降低，助力于免疫检测的快速便捷化。

D07-P21

生物医用磁性微型软体机器人的制备及其磁编程策略研究

孙栋栋¹，金东东¹，马星*¹

1. 哈尔滨工业大学（深圳）

随着机器人技术的不断发展，传统刚性机器人的环境适应性和安全性问题逐渐暴露，尤其在医疗等需要高柔性和高生物兼容性的领域中显得尤为突出。软体机器人因其柔软材料构成和优异的变形能力，在人机交互、安全性和适应性方面展现出显著优势，尤其是在尺寸微型化后，具备进入复杂体内环境执行精准任务的潜力。然而，现有软体机器人在驱动方式、结构控制和小尺度制造方面仍面临诸多挑战。智能材料的发展，特别是具备磁响应能力的软材料，为软体机器人的无缆远程控制提供了新路径。磁场具有快速响应、无创穿透和可编程特性，使磁驱动软体机器人在生物医学应用中表现出广阔前景。本研究旨在设计一种基于铁磁性颗粒与刺激响应性水凝胶复合的磁性可编程微型软体机器人，并采用高精度双光子聚合打印技术进行微纳尺度制造。通过外部刺激诱导结构变形后进行磁化处理，实现对其运动行为的可编程控制。本研究为解决当前微型软体机器人在驱动、控制及制造等方面的关键问题提供了新思路，对生物医学微操作、靶向治疗等应用具有重要意义。

D07-P22

磁性可变形液态金属机器人用于肿瘤栓塞治疗

陈艺¹，金东东¹，马星*¹

1. 哈尔滨工业大学（深圳）

肿瘤饥饿疗法是治疗恶性肿瘤的有效手段，常用的方法为介入式栓塞治疗。然而现有栓塞材料存在靶向性不足，副作用大，栓塞效率低等问题。本文提出了一种高靶向性，高封堵率的液态金属栓塞机器人。在磁场的操纵下磁性液态金属机器人能沿血管靶向运动到栓塞部位，之后在聚焦超声的高剪切力作用下液态金属机器人发生变形并堵塞血管，从而切断下游肿瘤的营养供给并使得肿瘤坏死。该方法有望为肿瘤栓塞治疗提供新的解决思路。

D07-P23

A supramolecular hydrogel integrating anti-oxidant, homogenous conductivity and pro-angiogenesis for synergistic modulation of acute myocardial infarction

Rui Yu¹, Dong Guo¹, Ran Zhao¹, Baolin Guo², Yan Li*¹

1. Tangdu Hospital, Fourth Military Medical University

2. Xi'an Jiaotong University

Currently, injectable hydrogels with multiple desired merits that could modulate specific pathological events have been regarded as a promising alternative for myocardial infarction (MI) treatment. Despite the great outcomes of injectable hydrogels with anti-oxidant, conductivity, and pro-angiogenesis therapeutic efficacy, there

are few reports on the fabrication of injectable hydrogel integrating above merits, particularly in a facile strategy, that could effectively target such comprehensive aspects of MI treatment. Anti-oxidant and pro-angiogenesis injectable hydrogels are fabricated either through the graft of multiple drugs onto polymer backbone or loaded into the network, which need complex manufacture and additional delivery systems. Conductive hydrogels are also impeded by the intrinsic nature of conductive components as poor biodegradability and rigid architectures, thus leading to potential biocompatibility risks, and inhomogeneous electrical and mechanical properties. Therefore, designing a novel biodegradable injectable hydrogel that integrates aforementioned regenerative functionalities without introduction of multiple drugs, complex delivery systems and exhibit long-term homogenous conductivity through a much simple and mild method represents a highly promising yet challenging endeavor.

We proposed a novel injectable hydrogel (AT-g-GA/AHA/THA@Fe/Arg) through a simple strategy that can modulate excessive ROS, enhance electrical conduction and promote angiogenesis for the treatment of MI. The hydrogel was fabricated by mixing aniline tetramer (AT) grafting gelatin (GA) (AT-g-GA), adipic dihydrazide modified hyaluronic acid (AHA), 2,3,4-trihydroxybenzaldehyde (THA) and ferric iron coordination compound (THA@Fe) and L-arginine (Arg). The hydrogels consisting of two natural polymers as hyaluronic acid and gelatin enabled the hydrogels with ECM-like physicochemical and biological properties and facilitated cell adhesion, grating aniline tetramer onto gelatin guaranteed the hydrogels with homogeneous conductivity, while THA and LA contributing to anti-oxidant and pro-angiogenesis capabilities, respectively. THA@Fe worked as the crosslinker and established the hydrogel networks through dynamic Schiff base and coordinate bonding, which enhanced the hydrogels with injectable and adaptive yet stable mechanical properties for continuous diastolic-systolic behaviors. LA could be loaded through a dual mechanism, utilizing both dynamic covalent grating and physical mixing and therefore enabling a long-term release profile.

The THA@Fe coordination compound did not only contribute to the injectability, self-healing, stability and mechanical adaptivity to the dynamic environments, but also endowed the hydrogel with excellent scavenging capabilities to DPPH•, ABTS•+, O₂•- and •OH. Besides, THA@Fe facilitated the loading of pro-angiogenesis Arg through dynamic Schiff base and physical mixing, achieving a controlled long-term release profile and improved HUVECs migration behavior. Conductive oligomer AT was grafted onto gelatin to impart the hydrogel with electrophysiological therapeutic properties, effectively addressing challenges of traditional hybrid conductive hydrogels. In a rat MI model, the injectable hydrogels demonstrated enhanced therapeutic efficacy, as evidenced by significantly improved cardiac function and preserved cardiac structure, including increased left ventricular wall thickness, reduced infarcted area and collagen deposition, enhanced myocardium viability and electrical coupling, as well as improved vascular network.

Collectively, the results demonstrated that our novel facile strategy is effective in developing a multifunctional hydrogel which could modulate the MI repair process through synergistic effects. The study reports, for the first time, an injectable hydrogel integrating antioxidant, homogeneous conductivity and pro-angiogenesis via a facile method could comprehensively target key pathologic events in MI and demonstrate appreciable therapeutic efficacy in MI treatment.

D07-P24

通过用 TaH₂ 替代 Ta 来提高增材制造生物医用 Ti-Ta 合金的微观结构均匀性

吴炼*¹

1. 华中科技大学材料科学与工程学院

由于 Ti 和 Ta 在熔点和密度上的显著差异, 在制备 Ti-Ta 合金过程中, Ta 的难熔性和易元素偏析问题一直是难以解决的问题, 严重阻碍了 Ti-Ta 合金的发展。在本研究中, 我们克服了这些挑战, 用氢化钽 (TaH₂ 晶体结构相对不稳定) 取代纯钽 (Ta 晶体结构稳定), 利用激光增材制造技术制备 Ti-Ta 合金。这种方法

不仅减少了 Ta 难熔颗粒，而且提高了 Ta 元素在 Ti 中的扩散能力。通过优化组织，这些合金的抗拉强度提高了约 25%，磨损体积减小，耐磨性得到改善，并且具有较好的耐腐蚀性能，腐蚀电流为 0.032 $\mu\text{A}/\text{cm}$ 。与纯 Ta 相比，添加物具有更好的综合性能和实用性，为实现 Ti-Ta 合金微观组织结构的均匀化提供了新的思路。

D07-P25

基于产氢益生菌微球的结肠靶向递药体系：氢气介导的 5-ASA 吸收增强 与炎症性肠病治疗

黄佳盼*¹

1. 中国医学科学院北京协和医学院放射医学研究所

炎症性肠病 (IBD) 和放射性肠损伤是肠道慢性炎症性疾病，现有疗法如 5-氨基水杨酸 (5-ASA) 存在结肠靶向性差、生物利用度低等问题。本研究创新性地构建了一种兼具产氢抗炎与药物递送功能的复合益生菌微球体系，旨在通过多机制协同增效改善肠道微环境。研究以加硒丁酸梭菌 (*Clostridium butyricum*) 和枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 为功能菌株，采用海藻酸钠 (SA)-氯化钙 (CaCl_2) 离子交联法包覆益生菌及 5-ASA，制备 pH 响应性结肠靶向微球 (SA@Se@CB/BS)。通过优化菌种比例 (1:1) 与硒掺杂工艺 (1.5 μM 亚硒酸钠)，提升菌株产氢能力。体外实验证实，微球在结肠 pH 环境 (6.8) 中缓释活性益生菌 (12 小时累计释放率 68%)，通过代谢产生的氢气介导药物增效与抗炎协同。动物实验表明，该体系可使 5-ASA 结肠局部浓度提高，显著缓解 DSS 诱导的 IBD 小鼠症状，并修复放射性肠损伤模型肠屏障完整性，重塑健康的免疫系统和肠道微生物群。微球通过 H_2 介导的 Nrf2 通路激活、益生菌免疫调节及 5-ASA 局部增效形成三重治疗网络。该研究为开发智能响应型肠道靶向递药系统提供了新策略，具有重要转化潜力。

D07-P26

智能响应纳米复合水凝胶用于清除瘤内菌以增强肿瘤治疗

王嘉怡¹, Abdus Samad¹, 何一燕*¹

1. 南京工业大学

细菌作为肿瘤微环境的重要组成部分，可通过多种途径影响肿瘤的发生、发展以及治疗反应。抗菌治疗被认为是促进肿瘤免疫治疗的增强策略。基于此，本研究开发了一种可注射的 ROS/pH 双响应纳米复合水凝胶 (Gel&HA-Dop@GaPP)，作为肿瘤局部植入递送载体，以对抗口腔致病菌定植的口腔鳞状细胞癌 (OSCC)。其中，负载的抗菌纳米颗粒 (HA-Dop@GaPP) 可在激光照射下产生活性氧 (ROS)，展现出抗菌活性的同时，显著增强了肿瘤细胞的凋亡。该体系成功实现了光动力抗菌疗法和免疫检查点阻断疗法对口腔鳞状细胞癌的有效协同治疗和肿瘤原位精准治疗。

D07-P27

重探噻唑烷化学构建的透明质酸水凝胶：醛基化底物调节其动态性与稳定性

李仔杰¹, 王佳凤¹, 何一燕*¹

1. 南京工业大学

本研究探讨了采用不同氧化 (醛基化) 方式修饰的透明质酸 (HA) 制备的水凝胶及其稳定性，具体包括主链氧化透明质酸 (OHA) 和侧链氧化透明质酸 (SA-HA) 与己二酰肼修饰的透明质酸 (HA-ADH) 和二聚半胱氨酸衍生物 (DI-Cys) 反应形成的水凝胶。我们发现，与 OHA 形成的水凝胶相比，含有 SA-HA 的水凝胶表现出显著更高的稳定性和更缓慢的降解速率。通过进一步研究表明，SA-HA 的单醛基修饰抑制了主链的开环氧化反应，且与 SA-HA 反应形成的水凝胶具有更高的储能模量和更好的体内稳定性，因此在不同介质溶液中，与 SA-HA 反应形成的水凝胶降解速率远低于与 OHA 反应形成的水凝胶。此外，通过对席夫碱反应和噻唑烷反应的分析，证明了水凝胶力学性能的改善并非偶然。

综上所述, 我们的研究表明, HA 的侧链氧化在制备高稳定性水凝胶方面具有巨大潜力, 并提供了一种简单可行的方法来显著提高水凝胶的稳定性, 此外侧链氧化的 HA 在构建稳健水凝胶方面具有良好的应用潜力, 适用于多种生物医学领域。

D07-P28

用于治疗急性肾损伤的靶向前药胆红素纳米粒

宋承浩¹, 林佳义¹, 何一燕*¹, 丁洁¹

1. 南京工业大学

急性肾损伤 (Acute Kidney Injury, AKI) 是一种常见且临床负担沉重的疾病, 具有较高的发病率和病死率。AKI 的发生通常伴随着肾组织中活性氧 (ROS) 水平的显著升高, 过量的 ROS 可导致氧化应激和细胞损伤, 进而加剧肾功能障碍。因此有效清除 ROS 被认为是 AKI 治疗中的关键策略之一。RTA408 是一种新型齐墩果烷型三萜类化合物, 能够通过促进细胞质内的 Nrf2 因子向细胞核的易位, 激活下游抗氧化基因的表达, 从而显著增强机体的抗氧化能力。然而, RTA408 存在水溶性差、生物利用度低等缺点, 严重限制了其在临床中的进一步应用。

为克服上述问题, 本研究设计了一种高效递送 RTA408 的纳米递送系统。以 ROS 敏感性强抗氧化剂胆红素 (Br) 为基础, 通过引入 ROS 敏感的缩硫酮键 (TK), 在赖氨酸树状大分子聚合物 (G2K) 上进行共价修饰, 从而构建两亲性共轭物。基于肾损伤标志分子 (Kim-1) 与丝氨酸 (L-serine) 之间的特异性结合作用, 进一步地通过丝氨酸修饰该共轭物, 实现纳米材料对 AKI 肾组织的靶向递送。该系统可通过响应病理水平的 ROS, 促使两种抗氧化剂 RTA408 与 Br 自发释放。多步 ROS 清除策略与精准靶向能力的结合, 使该纳米组装体能够有效减轻氧化应激, 缓解肾组织的急性炎症。

D07-P29

通过控释药物实现协同化-光动力肿瘤治疗与促进伤口愈合的可注射型 ROS/pH 响应水凝胶

王仲昊¹, 韩小宝¹, 何一燕*¹, 顾忠伟¹

1. 南京工业大学

癌症的传统治疗方法包括手术、化疗和放疗, 常常会出现损伤皮肤、肿瘤切除不完全、术后感染及全身毒性反应等不良后果, 这严重影响了患者的预后及康复。为解决这些问题, 本研究开发了一种活性氧 (ROS)/pH 响应型水凝胶, 可以将局部肿瘤治疗与伤口愈合相结合。该水凝胶以席夫碱化学反应为机理, 通过将硫酮基 ROS 清除剂与醛基功能化透明质酸交联, 使其能在肿瘤和慢性伤口微环境中常见的氧化应激和酸性条件下降解。该水凝胶展现出优秀的机械强度、生物相容性, 并可以通过刺激触发, 完成药物控释。在乳腺肿瘤模型中, 载药水凝胶可实现化疗药物 5-氟尿嘧啶 (5-FU) 与光敏剂前体 5-氨基乙酰丙酸 (ALA) 的协同递送, 实现化疗-光动力疗法协同作用。与无载体对照组相比, 该水凝胶展现出优异的肿瘤抑制效果。双重 ROS/pH 响应性确保了精准、持续的药物释放, 克服了单一响应系统和快速药物清除的局限性。在二度烧伤创面模型中, 它实现了局部抗氧化药物 N-乙酰-L-半胱氨酸 (NAC) 的递送和非机械去除。这些发现突显了这种多功能水凝胶作为一种微创治疗策略的潜力, 以克服传统癌症治疗的并发症并促进术后恢复。

D07-P30

基于 CBT-Cys 点击反应制备可注射抗溶胀水凝胶

张雨薰¹, 易丹颖¹, 何一燕*¹, 顾忠伟¹

1. 南京工业大学

水凝胶是由亲水性聚合物通过共价键或物理作用交联形成的三维网络结构, 凭借其亲水性、生物相容性及类组织特性, 已成为生物工程领域不可或缺的一部分。然而, 其易溶胀特性常导致尺寸、形状及力学性能的不稳定, 尤其在对机械强度和体积保持要求较高的组织工程场景中, 严重限制其应用。本研究受炎

光素化学启发，提出了一种基于氰基苯并噻唑（CBT）与半胱氨酸（Cys）点击反应的新型抗膨胀水凝胶策略。通过合成 CBT 修饰的四臂聚乙二醇（4-Arm PEG-CBT）与 N 端半胱氨酸封端的乙二醇（DI-Cys）前体，在温和的条件下形成凝胶，并确保了与生理环境的兼容性。

该水凝胶利用分子间氢键与 π - π 堆积作用增强网络交联密度与弹性回缩力，从而有效地抑制聚合物与水的相互作用。因此，CBT-Cys PEG 水凝胶在水、PBS 和极端 pH 环境中表现出优异的抗溶胀性能。此外，所制备的水凝胶还具备良好的机械强度、自修复能力及生物相容性。这一创新方法，为构建高性能抗膨胀水凝胶提供了一个通用的平台，展现出在生物医学工程领域，尤其是在组织工程、药物控释及软组织修复等方向的巨大应用潜力。

仅发表论文

D07-PO01

水凝胶在促进牙周组织再生及骨缺损修复中的研究进展

郭文迪¹，王星*¹

1. 新疆医科大学第一附属医院(附属口腔医院)

牙周疾病是最常见的一类口腔疾病。牙周骨缺损是牙周疾病进展至终末期的临床结局，严重影响患者的生活质量。促进牙周组织再生、修复牙周骨缺损是牙周疾病的最终治疗目标，但其手段及方法十分有限。水凝胶是一类亲水性高分子聚合物网络，其良好的生物相容性使其成为近年来口腔领域的热门研究材料。本文回顾近年来水凝胶在牙周组织再生及骨缺损修复领域的基础与临床研究进展，重点讨论其可能的分子机制以及疗效评价，并展望其应用前景。

D07-PO02

透明质酸/间充质干细胞复合凝胶体系构建及其软组织长效填充研究

陈虹坚¹，江婷¹，杨建民*¹，陈小松²

1. 福州大学

2. 福建医科大学附属协和医院

衰老引起的真皮层胶原蛋白和脂肪的流失会导致面部软组织缺失，进而引发组织弹性下降、面部协调性减弱及美学问题。可注射软组织填充剂已成为传统外科手术的有效替代方案。其中，透明质酸因其良好的生物相容性、生物降解性和低免疫原性是目前应用最广泛的填充剂。然而，虽然单纯注射填充材料能暂时恢复面部外观和结构，但其作用效果短暂且无法促进组织再生。本研究基于透明质酸构建了一种动态双网络水凝胶（HASH/HAMA）并联合脂肪源间充质干细胞（ADSCs）用于软组织填充。首先，通过化学改性分别制备了甲基丙烯酰化透明质酸（HAMA）和巯基改性透明质酸（HASH），然后通过 HAMA 的光交联和 HASH 的氧化交联，成功制备了具有良好可注射性、机械强度和结构稳定性的 HASH/HAMA 双网络水凝胶。随后，将水凝胶物理破碎后，混合 ADSCs 构建复合填充剂。基于细胞水平及转录组学的研究表明，该复合型填充材料具有促进细胞增殖、诱导血管新生和促进胶原合成的能力，从而增强软组织修复功能。最后，通过光老化皱纹模型实验证实，该填充剂能够显著改善皱纹程度，促进胶原蛋白和弹性纤维的有序沉积，有效抑制衰老因子的表达，增强皮肤附属物、血管和脂肪的形成，减轻皮肤炎症反应。本研究所构建的透明质酸/间充质干细胞复合凝胶体系克服了传统填充剂的短期性局限，实现了软组织的长效填充与再生。

D07-PO03

具有软骨粘附、抗炎和干细胞募集的多功能水凝胶微球用于骨关节炎治疗

林舒薇¹，陈龙辉¹，石贤爱¹，杨建民*¹

1. 福州大学

骨关节炎(OA)是一种以关节软骨进行性磨损、滑膜炎及软骨下骨硬化为主要特征的慢性退行性关节疾病,其发病机制主要包括关节软骨退化以及关节腔炎症因子过度表达。传统治疗手段,包括口服镇痛药(双氯芬酸、塞来昔布)、关节腔注射糖皮质激素及终末期手术疗法(如关节置换),虽能短期缓解症状,但无法逆转软骨损伤。水凝胶微球因其具有优异的可注射性、结构稳定性及可控的药物释放性能,成为OA治疗的一种有效策略。然而,目前用于OA治疗的水凝胶微球表面粘附性能不足导致其在关节腔内与软骨组织难以实现紧密结合,从而影响了活性成分的有效递送。此外,传统单网络结构的水凝胶微球在机械性能和调控细胞定向分化等方面仍存在不足。本文采用微流控技术制备了一种新型复合水凝胶微球体系。首先,选择甲基丙烯酰化明胶(GelMA)、海藻酸钠(SA)为水凝胶微球的材料,并与血小板衍生生长因子(PDGF-BB)共混作为微流控装置的水相,在紫外灯照射和氯化钙溶液浸泡下,成功构建了具有互穿网络结构的水凝胶微球(GM/SA@GF)。之后,将GM/SA@GF浸泡于多巴胺-双氯芬酸钠(DS)混合溶液中,成功将DS负载于聚多巴胺(PDA)涂层表面,从而形成核壳结构水凝胶微球(P@DS-GM/SA@GF)。通过体内外实验证实,所制备的P@DS-GM/SA@GF微球整合了软骨粘附、抗炎和干细胞募集等多重功能,研究成果为OA的治疗提供了新的解决思路。

D07-PO04

Bacterial Cellulose Nanocrystals as Reinforcing Agents for Improving Mechanical Performance of Collagen-Based Corneal Repair Materials

Yang Liu*¹, Wenyu Gao¹, Xin Wang¹

1. Changzhou University

Visual impairment caused by corneal injury is a common clinical ophthalmic condition. For severe cases, allogeneic corneal transplantation remains the gold standard for treatment. However, the global shortage of high-quality donor corneas severely limits timely and effective therapy for many patients. Therefore, developing clinically viable corneal tissue substitutes is of great significance. Collagen, a major component of the corneal extracellular matrix, is considered an ideal material for corneal repair. In recent years, collagen-based materials have shown promising progress in corneal tissue regeneration. Nevertheless, their application is still hindered by poor suture resistance and inadequate mechanical stability. While the incorporation of functional materials into collagen scaffolds has been explored to enhance mechanical properties, such modifications often compromise the optical clarity and biocompatibility of the resulting materials. Thus, achieving a balance between mechanical reinforcement and optical performance remains a key challenge. In this study, we aimed to reinforce collagen-based corneal repair materials using modified natural fiber polymers. Bacterial cellulose was subjected to acid hydrolysis to obtain bacterial cellulose nanocrystals (BCNWS), which were subsequently incorporated into a collagen gel matrix to fabricate a Col-BCNWS composite material. The resulting films demonstrated significantly improved mechanical properties compared to pure collagen materials, while maintaining excellent optical transparency, moisture retention, and thermal stability. Furthermore, in vitro experiments revealed that Col-BCNWS supports the adhesion and proliferation of human corneal epithelial cells, indicating superior biocompatibility. These findings suggest that Col-BCNWS is a promising candidate for the development of suture-resistant, collagen-based corneal repair scaffolds.

D07-PO05

β -磷酸三钙纤维的制备及其增强聚乳酸复合材料性能

饶晨¹, 韩思敏¹, 邓智鹏¹, 刘家龙¹, 江大志*¹

1. 中山大学材料学院

骨缺损修复材料是骨组织工程领域的研发重点,利用多种生物活性材料构建骨组织工程支架是骨缺损修复和再生的一种重要策略。针对不同骨缺损的修复需求,本研究旨在制备 β -磷酸三钙(β -TCP)短纤维,

并将其与聚乳酸 (PLA) 基体复合, 制备出力学性能可调、可生物降解和生物相容性的骨修复材料。通过水热反应制备磷酸八钙 (OCP) 与缺钙羟基磷灰石 (CDHA) 前体, 并通过煅烧得到纯 β -TCP 短纤维; 进一步将 β -TCP 纤维与 PLA 基体复合, 以调控和提高复合材料的力学性能和骨诱导活性。

通过对 β -TCP 纤维制备条件的优化, 获得长径比可控、结晶度高的短纤维; 采用溶剂浇筑法制备 β -TCP 纤维增强 PLA 复合材料; 采用扫描电子显微镜、X 射线衍射、傅里叶红外光谱等方法对纤维及复合材料的微观结构、化学组成及界面相互作用进行表征; 采用拉伸、压缩等测试表征其力学性能; 重点研究了 β -TCP 纤维长径比及含量对 β -TCP/PLA 复合材料力学性能的影响规律。

本研究通过优化合成工艺参数, 成功制备长径比可调的 β -TCP 纤维, 并制备了 β -TCP 纤维增强 PLA 复合材料。该复合材料具有优异的力学性能可调控性、生物可降解性和生物相容性, 为进一步开发高性能骨组织工程支架提供了科学依据和技术支持。

D07-PO06

壳聚糖基形状记忆海绵的制备及其在多组织缺损止血中的应用研究

杜欣辰¹, 刘亚东*¹

1. 河套学院

在战场、交通事故和自然灾害中, 组织缺损的不可控出血及严重的细菌感染是导致伤员产生多种并发症或致其死亡的主要原因。因此, 开发具有优异止血和抗感染活性的形状记忆海绵是十分必要的。本研究基于季铵化和磷酸化壳聚 (QPC)、活性酯修饰聚乙二醇 (DMP) 和凹凸棒石 (A), 采用低温凝胶、冷冻干燥和物理吸附相结合的方法, 制备 A/QPC/DMP 海绵。A/QPC/DMP 海绵具有大孔结构、足够的力学强度、高的水/血液亲和力, 以及血液驱动的形状恢复能力。A/QPC/DMP 海绵能够促进血细胞的粘附、聚集和激活, 以及激活机体内源性和外源性凝血途径。A/QPC/DMP 海绵对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有强的抗菌活性。A/QPC/DMP 海绵在大鼠股动脉、大鼠肝脏缺损及新西兰兔股骨缺损模型中展现出比商品化纱布和明胶海绵更强的止血能力。综上所述, A/QPC/DMP 海绵在多组织缺损止血和抗感中显示出巨大的应用潜力。本研究为新型抗感染止血海绵的开发提供了新思路。

D07-PO07

用于 3D 打印钛合金植入涂层的混合价态 MOFs 的构象转变及细胞毒性研究

何星霖¹, 罗霞*¹

1. 西南石油大学

目前, 选择性激光熔化 (SLM) 钛合金能够满足个性化医疗的需求, 但其较差的表面粗糙度和过量的金属离子释放导致植入物的表面生物相容性欠佳。一种低成本、高效率的 3D 打印方法——粘结剂喷射增材制造 (BJAM) 能够有效解决这些问题。此外, 将含锰的金属-有机框架 (MOFs) 应用于 BJAM 打印的钛合金植入物上制备功能性涂层, 可以进一步增强其表面生物惰性。本研究通过溶剂热法合成了基于锰的 MOFs (Mn-BTC), 并系统研究了合成温度对 Mn-BTC 的形貌、结构和细胞毒性的影响。结果表明, 合成温度的升高促使 Mn^{3+} 还原为 Mn^{2+} , 推动 Mn-BTC 的形貌从不对称多面体向均匀球体转变。这种价态-形貌协同作用显著降低了 Mn-BTC 的细胞毒性, 在 170 °C 合成的 Mn-BTC 在 25 μ g/mL 时对大鼠骨髓间充质干细胞 (BMSCs) 的相对增殖率 (RGR) 达到 110.1 \pm 5.1%, 优于其他温度合成的 Mn-BTC。随后, 通过微弧氧化 (MAO) 将 170 °C 合成的 Mn-BTC 涂覆在 BJAM-TC4 钛合金植入物上, 制备了 Mn-BTC/MAO-TC4 涂层。该涂层不仅有效阻断了钛合金中有害离子的释放 (与 BJAM-TC4 相比, RGR 提高了 12.1%), 还显著促进了 BMSC 的粘附性能。共培养 5 天后, 复合涂层的 RGR 达到 95.7 \pm 0.87%, 比不含 Mn-BTC 的涂层提高了 8%, 且与 MAO 组相比, 具有更优的细胞粘附面积和伪足伸展。本研究揭示了 Mn-BTC 中温度与形貌之间的构效关系, 为 BJAM 钛合金植入物的表面功能化提供了一种新策略, 具有重要的理论创新和实际应用价值。

D07-PO08**静电纺丝纳米纤维支架用于细胞行为调控和组织修复**王元非*¹

1. 青岛市口腔医院

组织修复或再生涉及到支架材料、细胞和生物因子的整合，通过向细胞提供适当的力学支撑、拓扑结构和生化信号，可以有效促进组织的生长。因此，为了能够有效调控细胞行为，促进组织再生，在构筑支架材料时，支架的成分、结构和其他特性应尽可能地模仿天然细胞外基质，同时还应考虑支架的拓扑结构、生化信号等因素。静电纺丝是一种能够制备超薄纤维和纳米纤维纱线的通用技术，通过控制电纺的材料和参数，纳米纤维的组成、结构和性能，可以设计出具有特定拓扑结构和生物功能的纳米纤维材料。例如，通过在有序排列的电纺纳米纤维上，我们制备了具有浓度梯度的生活性蛋白或聚合物微粒子涂层。通过将生长因子的控制释放与电纺纳米纤维相结合，整合拓扑结构和生化信号，我们制备了基于纳米纤维的支架。将上述纳米纤维支架用于不同细胞行为调控的研究，包括细胞粘附、增殖、渗透和迁移，神经轴突生长和延伸以及干细胞分化等。进一步探索静电纺丝纳米纤维支架经过特定的拓扑结构调控和生物功能化之后，在神经修复、伤口愈合、血管再生、腱骨愈合等方面的作用。

D07-PO09**掺杂高收率微孔碳纳米球的壳聚糖海绵用于快速止血**石有静¹，丁晟*¹，李钊¹，杨焜¹

1. 系统工程研究院卫勤保障技术研究所

快速有效的止血可以立即控制失血，防止致命的并发症。首次报道了负载碳纳米球 PC-800 的壳聚糖海绵用于快速止血。制备过程简单、绿色、低成本。具体而言，通过水热法合成高收率微孔碳纳米球(PC-800)。然后，将 PC-800 均匀分散在壳聚糖溶液中，并冻干以获得复合海绵。本研究旨在探讨壳聚糖和 PC-800 的协同止血作用，并验证其在创伤治疗中的可行性。该复合海绵具有多孔结构、合适的力学性能、强吸水能力、良好的血液相容性和低细胞毒性。体外凝血实验证明，PC-800 浓度为 1.0 mg/mL (CS-1.0) 的复合海绵具有优异的止血能力。在应用于伤口时，CS-1.0 海绵迅速形成伤口密封，通过壳聚糖和 PC-800 的协同作用实现有效止血。在大鼠尾部截肢和肝脏损伤模型中，与 Celox Rapid 相比止血时间更短，失血量更少。这种复合海绵有望成为一种安全、快速的止血敷料，用于紧急情况下无法控制的出血。