

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

D37-运动健康新材料

D37-Advanced Materials in Sports and Health

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



D37. 运动健康新材料

分会主席：陈煜、安全福、郑子剑、李祥晨、王丽珍、李风煜

报告

D37-01

运动健康监测基础设施-透气柔性电子

郑子剑*¹

1. 香港理工大学

D37-02

软物质界面电荷转移及离子传感

牛利*¹

1. 中山大学

提出了液液界面上电子转移的 Frumkin 热力学因子, 认为液液界面上电势仅改变物种界面的浓度, 而引起双电层浓度效应, 该理论统一了多种差异化的电子转移速率和相间电势关系结果。从传统四电极系统的单极化液液界面, 发展到双极化液/液界面系统, 利用电子耦合离子转移机制(ET-IT) 克服了电位窗限制的难题, 极大地拓展了离子伏安分析的应用体系。在软物质界面上不仅实现了微纳材料的设计构造及生长, 同时赋予其剪裁修饰的软物质界面多种离子敏感功能。利用多种纳米复合组分, 构造了多种固接离子电位传感体系, 发展了简便的无膜固态离子传感技术。引入了多种离子敏感技术测量方法, 综合多种构造离子传感的工程技术, 探索了离子敏感的多场景应用。

Reference

- [1] L. Niu*, et al., PhysChemChemPhys 2011, 13, 2774; 2012, 14, 3659.
- [2] L Niu*, et al., Anal Chem 2010, 82, 7857; 2012, 84, 3480; 2021, 93, 7588; 2022, 94, 10487; 2022, 94, 7319.
- [3] L Niu*, et al., Angew Chem Int Ed 2006, 45, 5867-5870.
- [4] L Niu*, et al., Adv Mater 2012, 24(29), 3958.
- [5] L Niu*, et al., J Am Chem Soc 2016, 138, 1490-1493.
- [6] L. Niu, et al., Adv Funct Mater 2021, 32, 2107653.

D37-03

电流变智能材料及其智能运动装备的应用

巫金波*¹

1. 深圳北理莫斯科大学

为适应乒乓球运动中不同的打法风格以及非常规技术训练的需求, 我们研发了基于电流变弹性体(ERE) 智能感知材料的刚度可调的智能乒乓球拍。首先以聚二甲基硅氧烷(PDMS) 为连续相、尿素层包裹的钛氧基草酸钡(BTRU) 微纳米颗粒为分散相、硅油为添加剂制备了高性能稳定的各向异性巨电流变弹性体。巨电流变弹性体使用定制的模具中在外加电场的环境下固化, 以得到各向异性结构, 其相对电流变效应高达 17,160%, 远远高于现有的其他电流变弹性体。其剪切储能模量增量和压缩模量增量分别为 5.2 MPa 和 6.4 MPa, 表明其在剪切和压缩模式下均有很好的表现。

在此基础上, 使用电流变智能感知材料取代海绵层研发了智能乒乓球拍。智能乒乓球拍的拍面由橡胶、碳柔性电极、巨电流变弹性体、铜电极和木板构成, 两电极连接到由电池和微型变压器组成的电源。通过控制智能乒乓球拍复合胶皮中巨电流变弹性体的电场, 调节拍面刚度, 智能乒乓球拍成功地改变了乒乓球的运动轨迹, 降低了 11% 的出射角, 提高了 2% 的出射速度, 证明了器件的有效性, 实现了可以在不同模

式间实时切换的“一拍多用”。本研究将在比赛、娱乐以及专业训练尤其是非常规技术训练中有较为广泛的应用前景。

D37-04

可穿戴化学传感织物用于健康监测

何思斯*¹

1. 哈尔滨工业大学（深圳）

可穿戴织物化学传感器融合了化学传感技术与电子织物，可无创、原位检测人体汗液中的靶标分子，实现多模态化学状态信息的获取，展现出巨大的日常健康监测潜力。然而，在实际应用中，由于受力学作用、溶液环境及电场等复杂因素的影响，传统生物功能材料及多重复合界面在复杂环境下易发生不稳定性，导致信号漂移甚至失效，影响传感器的检测准确性。围绕上述挑战，开展了以下系统研究工作：建立了原位共聚合的普适性合成方法，合成出兼具分子识别能力和高结构稳定性的聚合物材料，有效克服了传统酶和抗体作为功能材料时存在的稳定性差、成本高和检测环境要求严苛等难题[1, 2]；制备了具有互渗稳定结构的分子识别聚合物复合纤维电极，阐明了电极/溶液界面电荷传输稳定机制，实现了高灵敏度和高界面稳定性，突破了功能材料在微米尺度纤维基底上动态形变下稳固负载的瓶颈[3, 4]；构建了基于三电极体系的纤维状化学传感器，初步制备了柔性可穿戴织物化学传感器；此外，利用复合纤维材料制备了安全纤维状水系电池作为能源供给[5]。相关研究作为新型智能织物在用于健康监测方面提供了可借鉴的研究思路[6, 7]。

参考文献：

- [1] L. Zhou, C. Li, Y. Luo*, Q. Liang, Y. Chen, Z. Yan, L. Qiu*, S. He*. National Science Review, 2025, nwaf155, <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf155>
- [2] S. Li; X. Xu; N. Huang; J. Fang; D. Lin; Y. Shao; J. Zhou; A. K. K. Kyaw*; S. He*, Angew. Chem. Int. Ed., 2025, 64, e202421174.
- [3] X. Chen; Y. Cheng; B. Zhang; J. Zhou*; S. He*, Nature Commun., 2024, 15, 6287.
- [4] G. Xie; H. Li; J. Fang; X. Wang; H. Peng; D. Lin; N. Huang; L. Gan; W. Li; R. Jiang; T. Bu*; F. Huang; S. He*; L. Qiu*. Angew. Chem. Int. Ed. 2025, 64, e202501764.
- [5] Y. Hong; K. Jia; Y. Zhang; Z. Li; J. Jia; J. Chen; Q. Liang; H. Sun; Q. Gao; D. Zhou; R. Li; X. Dong; X. Fan*; S. He*, Nature Commun., 2024, 15, 9539
- [6] Y. Chen; X. Hu; Q. Liang; X. Wang; H. Zhang; K. Jia; Y. Li; A. Zhang; P. Chen; M. Lin; L. Qiu; H. Peng; S. He*, Adv. Funct. Mater., 2024, 34(36), 2401270.
- [7] X. Hu; Y. Chen; X. Wang; K. Jia; H. Zhang; Y. Wang; H. Chu; X. Zhong; M. Lin; P. Chen; L. Qiu*; H. Peng*; S. He*, Adv. Funct. Mater., 2024, 34(14), 2312897.

D37-05

碳基生物电子界面材料

刘楠*¹

1. 北京师范大学

机体在生理活动中受到刺激产生的电生理和电化学信号的采集监测，为健康医疗、康复训练、神经医学和人机交互等提供了重要依据，是先进医用诊疗的基础。碳基材料具有电化学电压窗口大、良好的生物相容性和极强的环境稳定性。与聚合物相互作用后，碳基材料具有可调的力学性能和出色的加工性能，同时也有利于特异性酶的固定和负载。因此，碳基材料有望实现电生理和电化学信号的同时检测，成为优秀的生物电子界面材料用于神经诊疗。针对电生理和电化学信号的微弱性和易干扰特征，为实现长时程、高分辨、多场景的信号传感与调制，以发展先进医用诊疗器件为核心，阐释了电子材料/皮肤组织界面的耦合规律，利用碳材料与聚合物间的协同效应提高导电性和稳定性，设计制备了基于低维碳材料的高性能生物

电子界面材料；利用超薄尺寸和修饰改性的聚合物降低基底材料的界面自由能，设计制备了多种高性能生物电子器件，实现了长时程、高分辨、多场景的生物电信号传感。

D37-06

兼具自润滑与自修复聚氨酯弹性体用于半月板替代

付维力^{*1}

1. 四川大学华西医院

目的：半月板切除术后将导致关节软骨加速退变，引发膝关节骨性关节炎 (OA),目前临床上尚缺乏能完全满足膝关节复杂运动需求的半月板替代材料。本研究旨在开发一种兼具自修复与自润滑性能的新型聚氨酯弹性体以作为理想的半月板置换物。

方法：本研究首先合成了一种具有动态二甲基二肼-氨基甲酸酯结构的聚氨酯弹性体 (DPU-CD)，并利用环糊精与金刚烷的超分子主客体相互作用引入了金刚烷修饰透明质酸 (HA-Ad)，制备出兼具自润滑与自修复性能的 DPU@HA 材料。随后，利用聚氨酯溶胶转换特性，将 DPU@HA 材料制备成半月板置换物，通过拉伸、压缩、循环压缩、摩擦系数测定等方法评价 DPU@HA 半月板置换物的自修复、自润滑及力学性能，并利用有限元分析模拟 DPU@HA 植入后膝关节软骨的应力分布情况。此外，通过活死染色、CCK-8 增殖及 EDU 测试评价了 DPU@HA 半月板置换物对大鼠软骨细胞的生物相容性，并通过兔半月板切除模型进一步评估了 DPU@HA 半月板置换物对膝关节软骨的保护效果。

结果：自修复材料表征显示，DPU@HA 具有显著的自修复性能，在 37℃ 生理条件下，10 分钟内表现出超过 80% 的自愈合效率，且其自润滑性能良好，摩擦系数相比普通聚氨酯弹性体降低 75%。力学测试表明 DPU@HA 具有出色的抗拉、抗压强度和疲劳耐受性，能满足膝关节运动对半月板材料的力学要求。有限元分析结果表明，DPU@HA 植入后显著改善了膝关节软骨表面的应力分布，减轻了关节软骨的机械应力负荷。体外细胞实验表明 DPU@HA 具有良好的生物相容性。体内影像学和组织学实验进一步证实，DPU@HA 显著抑制了半月板切除术后膝关节软骨细胞凋亡和以及力学感知蛋白 Piezo 1 的过度激活，实现了对膝关节软骨的保护作用，延缓了骨关节炎的进展。

结论：本研究开发的兼具自润滑与自修复的新型聚氨酯弹性体 DPU@HA，可作为一种理想的半月板置换物，在半月板切除术后能保护关节软骨，延缓骨性关节炎进展，具有较大的临床转化价值。

D37-07

面向人机交互的电容式离子二极管

兰伟^{*1}

1. 兰州大学

人机交互面临的主要挑战是生物系统和电子设备分别采用两种不同的信息载体，即离子和电子。为了弥合这两个系统之间的差距，开发用于逻辑运算的离子/电子耦合器件是一种可行而有效的方法。我们将报告最近开发的一种基于超级电容器结构的离子二极管 (CAPode)，得益于其独特的尺寸和电荷双离子筛分效应，电极表现出创纪录的高整流比，并且在 AND 和 OR 逻辑门电路中进行了验证，表明离子/电子耦合逻辑操作具有很大应用潜力。由于所用材料优异的生物相容性，为实现人机交互提供了新的可能技术路线。

D37-08

生物芯片快速灵敏监测运动诱导的唾液、尿液中的心肌肌钙蛋白

吴学连¹，谭芷钰²，任瞳¹，申华¹，苏萌²，成楠^{*1}

1. 中国人民解放军总医院

2. 中国科学院化学研究所

目的：目前用于检测心肌损伤的标志物需要采血，并且操作时间长、设备专用、程序专业，这限制了

检测的可及性和频率,尤其是在运动条件下。因此,开发能够实现心脏损伤早期无创检测的新方法和技术势在必行。我们的目的是探讨基于光子晶体(PC)的生物芯片,作为一种快速、便捷的替代诊断,PC的荧光增强作用放大了标记探针的荧光强度,实现了对室温下 $<10\mu\text{L}$ 体液中的最低检出限为 0.25 pg/mL 的心肌肌钙蛋白 T(cTnT)的检测。一种便携式荧光强度测量仪,插入反应的PC微阵列测试卡后,根据指示剂的颜色在10分钟内给出结果(阴性或阳性),监测运动员唾液、尿液中生物标志物cTnT水平。

材料与方法:采用双抗体夹心酶联免疫吸附试验(ELISA)法和光子晶体(PC)的生物芯片方法对120例跑步前、跑步后和跑步后两周内的血清、唾液和尿液中的cTnT进行检测。采用Shapiro-Wilk方法进行正态分布分析。符合正态分布的数据用均值 $\pm$ 标准差表示,并用t检验或方差分析进一步分析。不符合正态分布的定量数据用中位数和四分位数间距表示,并用Kruskal-Wallis检验进一步分析, $p<0.05$ 被认为具有统计学意义。

结果:

ELISA法和生物芯片检测出的血清cTnT水平呈显著正相关。

ELISA法和生物芯片检测出的唾液cTnT水平呈显著正相关。

ELISA法和生物芯片检测出的尿液cTnT水平呈显著正相关。

相同样本中,生物芯片检测出的唾液与血清cTnT水平呈显著正相关。

相同样本中,生物芯片检测出的尿液与血清cTnT水平呈显著正相关。

跑步后,cTnT水平显著升高,两周后恢复到基线cTnT水平。

结论:生物芯片使用样本微量、采样便捷,检测时间短,可以为运动员早期、长期地监测心脏情况提供一种方便和快速的检查方法。唾液、尿液分别与血清cTnT水平呈高度显著正相关,证实了唾液、尿液的cTnT检测的诊断能力。基于血液、唾液和尿液的生物芯片检测,因其安全、无压力和非侵入性的采样,可作为一种有前途的诊断介质。

关键词:光子晶体,生物芯片,心肌肌钙蛋白T,唾液,尿液

D37-09

壳聚糖不对称水凝胶的构建及其在羽毛球运动检测中的应用

彭克林¹, 甄思成², 陈煜*²

1. 首都体育学院

2. 北京理工大学

水凝胶柔性传感材料具有良好的柔韧性和导电性,能够在完美贴合人体皮肤的同时,通过自身电信号的变化实现对人体运动信号的有效感知,因此在柔性可穿戴传感领域备受关注。然而,现有水凝胶传感材料存在内聚力与粘附力平衡难以调控、机械性能迟滞等问题。本研究以天然壳聚糖(CTS)为粘附调控组分,化学交联聚丙烯酰胺(PAM)网络为模板,引入银离子(Ag^+)同时作为导电介质和室温催化剂、交联剂,利用碱性氛围下的二维界面相转变作用,通过调控CTS氨基与 Ag^+ 的配位络合,构建了兼具高粘附性(126.86 kPa)、强韧力学性能(拉伸强度 0.30 MPa ,延伸率 1558.2%)及低迟滞性($\leq 4\%$)的具有不对称结构的PAM/CTS/ Ag^+ / NH_3 水凝胶,实现对水凝胶内聚力与粘附力平衡的有效及传感性能、稳定性能的显著提升。将其作为压力传感电极,贴附于羽毛球拍拍柄处,通过监测羽毛球运动员不同挥拍、击球的动作所引起的应力-电阻变化曲线,有望实现对羽毛球运动员动作技能的智能化评估和指导。

D37-10

损伤防护及修复材料

王丽珍*¹

1. 北京航空航天大学

D37-11

面向运动健康的印刷柔性太阳能电池新材料研究

胡笑添*¹

1. 南昌大学

随着智能可穿戴设备在运动健康监测与能量管理中的广泛应用,发展轻质、柔性的能源供给技术成为关键。薄膜太阳能电池因其低质量、可弯曲和适配复杂曲面等优点,在运动健康系统中展现出良好的应用前景。然而,传统材料体系存在易脆性、结晶控制难及透明电极性能受限等问题,制约了其实际应用。本研究围绕面向运动健康场景的柔性光伏器件开展工作,基于新型光电功能材料与刺激响应型墨水体系,结合印刷工艺与仿生结构设计,实现了多种材料在柔性基底上的一致性高精度印刷。通过剪切调控与界面优化策略,提升了大面积柔性透明电极与光伏模组的稳定性与适形性,推动了可穿戴能源器件在动态运动环境下的实用化进程。

D37-12

老年髌部骨折创新止血方案的探索

李波^{*1}, 袁晶晶², 杨明辉¹, 陈煜²

1. 首都医科大学附属北京积水潭医院

2. 北京理工大学

髌部骨折是老年骨质疏松性骨折的常见类型,我国每年新发病例约 100 万例,其中约一半为股骨粗隆间骨折,髓内钉内固定是目前首选的治疗方案,但是存在着隐性失血量大的问题,研究显示髓内钉内固定后隐性失血量超过 1000ml,显著增加了老年髌部骨折患者的安全隐患。因此,我们探索了不同创新止血方案的治疗效果,研究采用新西兰大白兔股骨逆行性髓内钉固定模型模拟股骨髓腔出血的情况。研究分为两个部分:

(1) 对比了可注射止血明胶(Surgiflo)与氨甲环酸髓内应用的止血效果,结果显示可注射止血明胶(Surgiflo)的髓内应用显著减少了髓内钉植入后髓腔出血的情况;

(2) 探索制备了仿蜗牛粘液的强粘附性水凝胶止血涂层,动物实验结果显示,与无涂层的钛合金髓内针相比,具有该止血涂层的髓内针植入后,达到了即可止血的效果。

上述研究的开展为老年股骨粗隆间骨折髓内钉治疗后降低隐性失血量提供了新的参考和思路。

D37-13

经皮微针在药物递送中的应用

杜丽娜^{*1}

1. 军事医学研究院

D37-14

具有血管神经化的可注射光固化 GelMA-SF-PAA 骨材料的制备及其有效性研究

荆哲¹, 易佳峰¹, 刘钟阳^{*1}

1. 中国人民解放军总医院

目的: 由于血管生成及灌注能力有限,传统膜内成骨(IMO)无法再现长骨和颅面骨的自然再生过程,相比之下,软骨内骨化(ECO)通过形成最初的软骨模板,随后肥大与矿化,随着软骨细胞的成熟,多种细胞因子促进成骨及血管生成,有效规避 IMO 中的缺点。本研究旨设计一种可注射铁离子螯合水凝胶,以诱导早期缺氧环境,通过软骨内骨化途径促进骨再生。这种无细胞及生长因子的纯生物材料方法有利于降低添加物的高成本及潜在并发症,最终实现促进骨缺损修复的目的。

方法: 本研究使用甲基丙烯酰化明胶(GelMA)、丝素蛋白(SF)与羧基化的聚丙烯酸(PAA)构建一种具有血管神经化的可注射光固化 GelMA-SF-PAA 骨材料。加入 PAA 后水凝胶呈现较好的铁离子螯合能力,氨基化的 GelMA 与羧基化的 PAA 通过双键进行化学交联后再与丝素蛋白进行物理交联,形成了具有化学-物理交联的双网络可注射水凝胶,结构稳定,力学性能优越。通过体外与骨髓间充质干细胞、HUVEC

细胞、雪旺细胞共培养探究探究水凝胶的成软骨、成血管、成神经性能。体内构建 SD 大鼠股骨髁模型探究低氧诱导水凝胶的骨缺损修复能力及机制。

结果：制备的 GelMA-SF-PAA 水凝胶具有良好的生物相容性与低氧诱导能力，其通过螯合铁离子构建低氧环境，实现早期成软骨能力。SD 大鼠体内实验表明，通过 GelMA-SF-PAA 水凝胶在整个再生过程中对于 HIF- α 的调控，可以实现和谐的成软骨/成骨平衡，通过 HIF- α 及 VEGF 通路有效促进骨再生。

结论：具有血管神经化的可注射光固化 GelMA-SF-PAA 水凝胶，实现了以生物材料为基础的铁离子螯合和低氧模拟，诱导原位 ECO，代表了一个新的和有前途的概念，为未来骨再生修复提供了新思路。

D37-15

多功能自适应水凝胶生物粘合剂用于皮肤创伤修复的研究

孔明*¹, 吴萌¹, 李金芮¹

1. 中国海洋大学

创伤修复技术是外科治疗的重要组成部分，生物粘合剂可快速闭合皮肤伤口，相比传统手术缝合线、缝合钉等，具有减小组织损伤、使用便捷的优势。生物粘合剂往往注重提升组织粘合性能，材料韧性差，材料-组织接触不完全，无法适应皮肤组织动态力学变化及界面不规则的特点，导致粘合失败。此外，生物粘合剂还需适应创面微环境演变特点，调节炎症反应，避免感染，促进创面愈合。针对以上问题，本研究采用聚丙烯酰胺（PAM）、海藻酸钠（Alg）、单宁酸（TA）和三氯化铁（FeCl₃）为主要成分，通过分子功能编程，设计制备了 PAM/Alg/TA/Fe³⁺ 水凝胶生物粘合剂（PATF）。其中，PAM 共价骨架提供应力传导基质，Alg 与 PAM 形成分子互穿网络提升力学性能，组分分子间非共价相互作用可耗散应力积累，增强水凝胶韧性，可仿生皮肤模量实现界面保形贴附，抵御 23 倍超长拉伸形变不断裂；TA 赋予水凝胶抗氧化性能和生物粘附性能，Fe 与 TA 络合具有光热杀菌效应，并赋予水凝胶导电性能，形成兼具高韧、降炎、抗菌、导电功效的多功能自适应水凝胶生物粘合剂，增强皮肤顺应性，促进皮肤伤口快速愈合和组织再生。PATF 水凝胶生物粘合剂，表现出高韧、降炎、抗菌、导电水凝胶等特性，在运动健康和伤口快速修复上显示出良好的应用潜力。

D37-16

在 Cell Press 发表材料研究论文

林宇卿*¹

1. Cell Press

本讲座旨在向大家介绍 Cell Press 细胞出版社的物质科学期刊阵容，尤其是材料学科刊物 Matter 的期刊宗旨与定位，并向大家介绍 Matter 的文章发表现状与遴选过程，让投审稿流程更清晰透明。同时简单介绍 Matter 最近主办和参与的一些学术活动，期望有机会和老师同学们多多交流。

D37-17

荧光凝胶多功能可穿戴材料

黎朝*¹

1. 北京理工大学

作为荧光和凝胶的融合，荧光凝胶兼具两者的优势，在可穿戴信息存储/显示等领域具有光明的应用前景，荧光功能的精准调控、发光信息的高效录入/存储/变换、以及凝胶高力学性能和多功能的集成，是该材料开发的关键问题。针对此，提出分子内-分子间-材料动态过程控制思路，引入分子内运动位点于荧光基元中，以凝胶网络通过非共价和配位等作用控制荧光基元，实现荧光功能调控和荧光信号的高效可控录入，通过动态共价和材料宏观动态过程控制，结合符号图案信息特点，实现荧光信息的动态变换，提出单

组分多功能策略,实现凝胶高力学性能和多功能集成,开发荧光凝胶多功能可穿戴材料,实现交互式荧光信息-电传感监测,为可穿戴柔性传感器提供候选材料支持。

D37-18

靶向与渗透: 润滑素启发的医用高分子重塑关节稳态

俞鹏¹, 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

天然软骨是一种近乎完美的润滑材料,其高承载、低摩擦特性保证了关节的运动功能[1]。然而,受骨关节炎(OA)、骨质疏松症(OP)等疾病的影响,关节内的软骨和骨组织逐渐受到破坏,关节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,最终造成关节稳态失衡[2]。因此,重塑关节润滑性能,有助于为受损关节提供长效、稳定的保护功能,实现关节疾病治疗。

受到软骨基质中透明质酸启发,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)实现时空治疗[3-5]。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,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。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关节疾病的长效治疗及临床应用提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] Neogi T.; Colloca L.* Nat. Rev. Rheumatol. 2023, 19, 613-626.
- [2] Yuan, H.; Cui, W.* Prog. Mater. Sci. 2024, 146, 101334.
- [3] Yu, P.(俞鹏); Liu, Y.; Xie, J.*; Li, J.* J. Control. Release 2021, 338, 486-504.
- [4] Yu, P.(俞鹏); Li, Y.; Sun, H.; Ke, X.; Xing, J.; Zhao, Y.; Xu, X.; Qin, M.; Xie, J.*; Li, J.* ACS Appl. Mater. Interfaces 2022, 14(23), 27360-27370.
- [5] Yu, P.(俞鹏); Li, Y., Sun, H.; Zhang, H.; Kang, H.; Wang, P.; Xin, Q.; Ding, C.; Xie, J.*; Li, J.* Adv. Mater. 2023, 35, 2303299.

D37-19

微环境响应型 CS/nHA 可注射水凝胶时序递送系统用于半月板粘附修复与再生

王慧¹, 徐硕², 李子豪¹, 陈煜^{*2}

1. 首都体育学院
2. 北京理工大学

针对半月板损伤修复中药物递送时效性与组织再生微环境调控的挑战,本研究开发了一种基于壳聚糖(CS)/纳米羟基磷灰石(nHA)复合的可注射水凝胶,通过负载亲水化合物衣康酸与负载疏水化合物的Kartogenin(KNG)外泌体载药系统,构建时序响应性序贯递送平台,用于运动损伤相关半月板撕裂的粘附修复与再生促进。该水凝胶利用壳聚糖的温敏性溶胶-凝胶转变特性实现可注射成型(注射力<5 N,凝胶时间 $\approx$ 30 s),并通过 nHA 的掺入调控力学强度与降解速率,同时借助 CS 的氨基与 nHA 表面磷酸根离子的静电相互作用,形成稳定的三维网络结构。亲水药物通过物理包埋实现早期快速释放,有效抑制急性期炎症反应;而 KNG 经外泌体封装后嵌入水凝胶,通过外泌体-凝胶基质电荷作用的协同调控,实现缓释递送,持续激活半月板纤维软骨细胞的迁移、增殖及基质分泌。体外实验表明,该水凝胶可紧密粘附于湿润半月板组织,并响应损伤微环境 pH 变化动态调节药物释放行为。在大鼠半月板撕裂模型中,该材料通过序贯释放抗炎药物与外泌体,显著降低促炎因子 IL-1 β /TNF- α 水平,促进血管化抑制型 ECM 再生,术后 8 周生物力学性能恢复至正常组织的 80%。本研究为运动医学中复杂组织损伤的时序治疗提供了新型多功

能一体化解决方案。

D37-20

奥运备战若干体育高新材料攻关研究

李祥晨^{*1}

1. 国家体育总局体育科学研究所

D37-21

离子液体介导功能凝胶设计与应用

孙剑^{*1}, 肖文哲¹, 罗欣¹, 罗志鸿¹, 王啟刚¹

1. 北京理工大学

随着全球可持续发展理念的深化与生命健康战略的推进,新型多功能材料的研发已成为材料科学与工程领域的热点研究方向。该领域聚焦于原料可再生替代技术、绿色溶剂体系构建以及材料功能性创新等三大研究维度,旨在突破传统材料制备过程中的环境瓶颈与性能局限。在此需求下,离子液体作为一类兼具绿色化学属性与独特调控特性的功能介质,凭借其可设计性强、蒸汽压低、热稳定性高等优势,在材料合成、结构调控及功能化应用中展现出巨大潜力。

离子液体的特殊性能源于其有机阳离子与无机/有机阴离子构建的独特离子微环境。这种微环境不仅包含氢键、静电作用、配位效应及 π - π 共轭等多重动态相互作用,还能通过阴阳离子的结构设计实现对主客体相互作用的精准调控,从而显著区别于传统有机溶剂与金属盐体系。这种特性使其在材料制备过程中可作为反应介质、模板剂或功能添加剂,有效促进分子自组装、调控晶体生长、提升材料界面性能。

为系统揭示离子液体在材料研究中的作用机制与应用前景,本文以运动监测需求为切入点,选取离子液体介导的功能凝胶体系进行案例分析。尝试通过解析离子液体在凝胶结构构建、性能调控及促进应用中的作用模式,探讨其在多尺度层面上的微观作用机理,完善离子液体介导的材料制备过程强化机制,希望为研究人员在绿色功能材料的研发方面提供一定的理论依据与实践参考。

D37-22

导电聚合物膜微结构调控及其可穿戴传感应用

殷明杰^{*1}

1. 北京工业大学

D37-23

仿生结构提升人体运动能力的探索

谢晨斌^{*1}

1. 三六一度(中国)有限公司

D37-24

柔性监测界面: 运动监测与分析

李风煜^{*1}

1. 暨南大学

百米短跑被誉为竞技体育“皇冠上的宝石”,是国家在体育发展水平的核心竞争力。发达国家通过高科技仪器和设备对运动员体能、技术、恢复等各个环节进行全方位监控,对运动员的体能和技术状况进行全面的诊断和分析,制订个性化的训练方案。从“运动监测与分析”的实际需求与挑战出发,针对运动监测与分析中的“动态环境”与“多靶标物”特征,设计“柔性光子晶体”与“柔性电极界面”,构建调节柔性界面的 Hofmeister 效应模型;有机结合人工智能算法,发展“可解释深度学习”辅助动态过程的传感

机理分析与器件效能评估，实现对运动过程中身体肌电信号的多位点实时监测，完成运动过程中身体生理环境、代谢状况的监测与全面分析。

针对运动监测的动态测试环境，建立调节柔性界面的 Hofmeister 效应科学模型，1) 首次报道了柔性光子晶体荧光增强现象在弹性形变过程中的定量构效关系，利用光子晶体芯片选择性的荧光放大，构建系列光子晶体微阵列芯片，实现简单染料对复杂体系多元检测物的高灵敏检测与分析；2) 完成柔性电极界面的可穿戴器件集成，探索微米/纳米柔性电极结构与导电水凝胶弹性界面，设计可穿戴传感器进行人体汗液代谢与肌电的多靶标物、多位点的监测与分析；针对运动分析的多靶标物分析，3) 首次提出深度学习辅助的传感器效能与机制研究方法，实现算法反馈的传感器设计，对人体汗液中的离子、葡萄糖、乳酸、蛋白、抗生素等代谢物的监测与分析，推动运动代谢机制的应用分析；4) 开发的“可穿戴多体征运动监测器件”获得了国家体育总局、广东省体育局的专业运动队的竞技体育训练验证，产品进入华为鸿蒙生态、OPPO 供应链，推进产品开发与产业市场化应用。

D37-25

运动健康感知技术研究及展望

彭玉鑫*¹

1. 浙江大学

D37-26

纳米绿色印刷可穿戴传感器件

苏萌*¹

1. 中国科学院化学研究所

随着柔性电子和可穿戴技术的快速发展，绿色环保、低成本的纳米印刷技术为可穿戴传感器的制备提供了新的解决方案。本研究提出了一种基于纳米绿色印刷工艺的可穿戴传感器件，利用纳米材料自组装和可持续印刷技术，实现了高灵敏度、低能耗且环境友好的传感器制造。利用微模板精确控制液滴成型及功能材料的组装和图案化，通过优化纳米功能材料墨水配方（如银纳米颗粒、石墨烯、钙钛矿等），实现超高精度三维微纳结构和器件的印刷制造，精度达 100 nm。基于仿生矿化策略，在玻璃基底上成功制备了大晶粒钙钛矿薄膜，并构建了集成钙钛矿光电探测器的智能眼镜系统，实现了眼球的精准追踪；采用多层印刷制备的具有密度梯度的石墨烯气凝胶三维结构用于柔性传感，能够同时满足微小形变和大应变条件下的高灵敏压力检测。

D37-27

具有快速光热激发和离子电子双电导的智能水凝胶材料

陈磊¹，蒋紫楠¹，王彩旗*¹

1. 中国科学院大学

水凝胶因其保形特性和在智能设备中的可调多功能性而受到广泛关注。然而，许多水凝胶器件在同时集成导电和驱动特性方面遇到了困难。这对水凝胶器件的智能化及其在复杂环境中的应用构成了重大挑战。在这项研究中，我们通过酰胺化反应成功合成了具有超支化结构（H-PIL）的聚离子液体，并将其用作非共价交联剂。利用二维材料 MXene 作为光热转化剂，选择聚异丙基丙酰胺（PNIPAM）水凝胶作为基质，在 2-8 ℃ 的温度范围内通过自由基聚合制备了复合水凝胶。随着 H-PIL 含量的增加，复合水凝胶的导电性及其对光和热刺激的驱动响应显著增强。当作为可穿戴设备应用时，它可以准确监测人体运动。值得注意的是，与对照组相比，由复合水凝胶制成的热抓手的抓取速度大约高 15 倍。在电路切换实验中，电路可以在 5 s 内成功闭合，实现了光控传感和驱动的集成。这些结果表明，该算法在水下抓取重物 and 智能电路切换应用中具有巨大潜力。该研究对多刺激多功能柔性器件的应用和智能柔性器件技术的进步具有深远的意义。

D37-28

智能复合凝胶的构筑及其可视化可穿戴传感应用

李洁^{*1}, 刘晶¹, 穆勇昌¹, 董艺玮¹, 刘云兰¹

1. 中北大学

近年来新材料在运动监测领域的应用主要集中在柔性传感器和智能穿戴设备的开发上。柔性可穿戴传感器除了具有轻质、共形性好和生物安全性高等特点, 对便携性也提出了更高要求, 通常难以搭载数据处理与显示模块, 因此基于发光或变色进行传感结果的可视化研究对于丰富传感器功能和扩展其应用领域具有重要意义。

智能复合凝胶结合了优异的仿生和光电特性, 近年来成为构筑可视化可穿戴传感器件的理想材料。本文通过优化结构设计, 采用物理、化学交联方法构建智能复合凝胶, 一方面, 聚合物骨架材料优异的生物相容性、环境友好性, 且包含丰富的羟基、羧基、羧酸和氨基等, 提供了足够的分子设计空间来构建三维交联网络; 另一方面, 将感测元件引入碳点、硫化锌等可调发光功能材料, 从而赋予复合凝胶优异的可视化传感能力, 因此有望满足柔性传感材料及其器件的多功能集成需求。本文为获得高灵敏可视化凝胶基传感器提供了新思路, 同时在人体运动和细微动作监测、手势和物体轮廓识别、人机交互等可穿戴传感领域展示了应用潜力。

D37-29

广东省速度能力研究重点实验室“体育+”项目科技赋能训练竞赛的实践探索

潘冬¹, 束洋^{*1}

1. 暨南大学速度能力研究重点实验室

为深入贯彻“科技助力奥运”与“体育强国”战略, 广东省速度能力研究重点实验室依托暨南大学苏炳添速度研究与训练中心, 聚焦我国速度类项目竞技水平提升的核心需求, 牵头实施“体育+”交叉培育项目, 系统构建了以“科技赋能训练竞赛”为目标的多学科融合研究平台。项目围绕“后程速度衰减”、“神经肌肉调控”、“疲劳快速恢复”等速度专项瓶颈问题, 整合运动科学、人工智能、生物材料、脑成像、环境健康等前沿领域, 形成“科学问题—关键技术—应用转化”的纵向集成路径。核心研究方向包括:

一是速度能力的生物基础研究, 研究神经肌肉控制与能量代谢机制, 利用蛋白质组学、尿代谢组等技术筛选高潜力速度标志物, 为人才识别和训练反馈提供生物依据;

二是训练负荷与效能的量化诊断, 开发如光纤数字跑道、肌电疲劳预警系统、呼气代谢组无创监测等智能系统, 实现对运动状态的实时感知与反馈干预;

三是青少年选材与速度潜能评价, 构建跨年龄段训练数据库与 AI 评估模型, 探索“训练响应-潜能预测”的数据闭环;

四是新型功能装备开发, 开发智能电子皮肤、压力响应鞋垫、运动感知服等装备, 提升训练中的数据集成效率与穿戴舒适性。

上述技术方案已在国家短跑集训队、广东省田径队及青少年基地中开展实际部署, 覆盖训练监控、状态识别、个性反馈与装备支撑四个关键维度, 支撑运动员备战成都大运会、全国锦标赛及巴黎奥运会。项目成果已应用于百余例专项训练、十余例伤病预警及状态调控, 显著提升训练效率与赛时稳定性。

通过“体育+”交叉项目实践, 实验室初步构建起“训练-测试-评估-干预”一体化技术链, 实现从精英竞技到青少年培养的全周期赋能。未来, 实验室将以国家任务为牵引, 持续拓展体育与人工智能、脑科学、传感材料等领域深度融合, 着力打造科技赋能训练竞赛的广东样板与高校范式。

D37-30

表面肌电技术在军事训练中的应用研究

刘钟阳*¹

1. 中国人民解放军总医院

【背景】随着军事训练强度和实战化要求的不断提高，军事训练伤的发生率也在不断上升，尤其是肌肉疲劳度和心脏负荷的增加，显著影响新兵的训练效果和健康。

【目的】本研究探讨了表面肌电在军事训练中的应用，通过前期研发的柔性肌电监测产品，在陆、海、空、火箭军等不同军兵种各选取一个试点单位进行试点。

【方法】2020年9月新兵入伍训练开始阶段，每个试点单位随机抽取50名新兵和50名新训骨干，监测其在训练各阶段的肌电数据。根据不同训练场景，新兵佩戴柔性肌电监测设备，通过局域网关传输的方式，将每次训练的肌电数据上传至本地服务器。

【结果】结果表明，柔性肌电监测系统能够实时、准确地监测训练过程中肌肉的生物电信号，有效识别肌肉疲劳度和负荷情况。通过数据反馈，可以制定合理的训练模式，提高训练效果，减少训练伤的发生。

【结论】综上，表面肌电监测技术在军事训练中具有重要应用价值，能够辅助部队开展科学训练，提高新兵训练及备战效果，增强部队的战斗力。

D37-31

复合材料驱动的健康功能织物设计：融合技术路径与未来展望

姚云峰*¹, 姜绶祥²

1. 香港理工大学

随着健康意识的日益提升，健康织物在运动辅助和医疗康复领域的需求持续增长。作为融合了材料科学与人本设计的复合产品，健康织物有效改善了用户的舒适性与生理机能表现，除了在医疗康复领域的传统应用之外，以运动为导向的健康纺织品正迅速发展，以通过改善人体力学结构、调节体温以及进行实时生理监测等方式来为运动员提供支持。本文围绕健康织物的运动辅助设计创新及未来趋势展开探讨，重点关注以下三方面：

运动辅助织物的舒适性与效能优化设计：通过采用柔性复合材料（如热塑性聚氨酯 TPU 复合织物）与仿生结构设计，能够有效实现对人体关节活动的辅助支持及动态贴合，从而提高穿戴的舒适性与运动表现。

运动辅助的个性化适配分析：本文分析了形状记忆合金针织结构在康复手套中的应用，该设计能够动态适应用户在不同康复阶段的运动动作需求，实现精准且个性化的康复支持。

非药物健康干预的智能交互界面设计：结合柔性传感技术与机器学习算法的智能交互界面设计，例如智能鞋垫与姿态监测系统，能为用户提供实时的运动反馈和健康管理建议，进一步提高健康干预的有效性与用户参与感。

本文还进一步探讨了健康织物设计的跨学科协同模式，包括与人工智能、可穿戴电子、环境感知系统的融合路径，强调设计在技术与人文之间的媒介价值。

展望未来，首先在运动辅助织物方面，未来设计趋势将朝向“动态响应”与“结构舒适性”并重的方向演进，强调基于生理数据反馈的织物弹性分布设计与压力调节方案。其次，针对医疗康复场景，个性化定制成为核心趋势，设计策略趋于结合人体工学建模与数据驱动的织物裁剪工艺，实现“柔性康养辅具”的可持续发展。第三，在智能健康干预方面，交互界面的设计由传统被动穿戴转向主动反馈系统，如集成多模态传感器与柔性驱动单元的织物平台，不仅提升用户使用体验，也实现对疼痛、姿态等指标的智能调控。

综上所述，文章展望了以“可持续性、个性化与系统智能”为特征的下一代健康织物产品形态，健康纺织品在应用层面，逐渐成为体育活动和日常生活中主动健康管理的重要组成部分。未来的发展将侧重于实时响应能力、生理适应性和环保智能性。这些纺织品不仅被视为服装，更被定位为用于生物反馈、恢复和持续性能优化的动态平台——通过设计将健康、材料创新和以人为本的交互融合在一起。

D37-32

石墨烯远红外加热材料促进运动疲劳恢复的非热效应机制研究

刘文明^{*1}, 陈丹妮¹, 庞翔升¹

1. 浙江大学

研究目的: 本研究旨在探讨新型石墨烯远红外 (FIR) 功能材料在运动疲劳恢复中的应用效果, 重点评估其在不显著升温条件下的非热效应机制, 揭示其在促进代谢产物清除、加速心率恢复和缓解主观疲劳感等方面的潜在作用, 为材料在运动康复装备中的工程化应用提供理论依据。

研究方法: 本研究采用随机交叉双盲对照设计, 招募 14 名国家级精英田径男运动员, 所有受试者均完成 Bruce 递增负荷运动协议以诱导全身性力竭。恢复阶段分别接受两种温控一致 (35° C) 的干预: 实验组使用基于宏观石墨烯膜的远红外加热毯 (由 GaoxiTech 提供), 对照组使用传统电热毯 (AUX 品牌)。恢复过程中分别在 0、4、13 和 22 分钟时间点采集血乳酸、心率、血糖、RPE (主观疲劳评分) 等指标, 利用双因素重复测量方差分析进行统计学处理。

研究结果: 实验结果显示, 石墨烯 FIR 组在第 4 分钟即表现出显著更快的血乳酸清除率 (10.4 ± 1.8 mmol/L vs 12.9 ± 1.8 mmol/L, $p < 0.001$), 并在 13 和 22 分钟持续保持显著优势。心率恢复方面, FIR 组在多个时间点 (4min, 13min, 22min) 均低于对照组, 差异显著 ($p < 0.05$)。主观疲劳评分在第 22 分钟时显著低于对照组 (7 ± 0.9 vs 8 ± 1 , $p < 0.05$)。血糖指标受个体差异影响较大, 未观察到显著差异。上述结果验证了石墨烯 FIR 材料在恒温条件下通过非热效应改善血液循环、加速代谢废物清除、降低心血管负荷与主观疲劳感的能力。

研究结论: 石墨烯远红外加热材料通过增强皮肤与肌肉微循环、激活一氧化氮合酶 (eNOS) 活性、提升 NO 生物利用度等非热机制, 有效促进高强度运动后的快速恢复。其优异的材料性能 (高辐射率、柔性、稳定性) 使其在高性能运动康复产品开发中具有显著的工程应用前景。该研究结果为石墨烯功能材料在竞技体育与运动康复领域的推广应用提供了实证依据和技术支撑。

关键词: 石墨烯材料; 远红外加热; 运动疲劳; 微循环; 非热效应

D37-33

不同晶格鞋底对足部承重骨骼的力学影响分析

贾云龙¹, 郭洋雨¹, 朱晓兰^{*1}

1. 北京体育大学

背景和目的: 晶格结构材料具有轻量化且优异力学性能, 相比于传统的实心鞋底材料, 晶格结构材料在相同体积下能够显著降低重量, 提供优异的能量吸收与负载分散能力。跖骨和跟骨作为支撑人体重量和缓冲地面反作用力的关键结构, 长期承受异常力学负荷会引发跖骨应力性骨折和跟骨骨刺等病症, 鞋子作为人类与地面接触最直接的媒介, 晶格结构材料鞋底可以通过衰减垂直地面反作用力和改变下肢的负荷率来提供缓冲能力, 保护人体免受地面撞击伤害。本研究通过建立多尺度足部有限元模型, 对比分析在静止站立下不同晶格结构鞋底对跖骨和跟骨的力学影响, 为鞋底的创新设计提供理论依据和技术参考。

方法: 本研究招募 1 名男性大学生 (年龄: 24 岁; 身高: 180cm; 体重: 82kg) 作为运动生物力学实验以及足模型扫描的受试者。研究方案已通过作者所在单位的实验伦理委员会审批 (编号为 2025025H, 日期为 2025 年 1 月 17 日)。使用计算机断层扫描仪 (西门子 SOMATOMgo.top64 排 128 层螺旋 CT 机) 获取受试者右脚裸足的影像数据。在 Mimics21.0 (Materialise 公司, 比利时) 中对足部软组织和足骨模型进行重建, 在 GeomagicStudio2013 (3DSystems 公司, 美国) 中完成模型的提取修复, 导入 ANSYS 2019R1 (ANSYS 公司, 美国) 中, 绘制软骨以模拟实际的软骨接触。将软组织模型导入 Rhino7.28 (RobertMcNeel&Associates, 美国) 中, 根据足形进行鞋曲面模型的设计, 导入 Ntopology (nTopology Inc., 美国) 进行晶格设计。使用 3D 打印机制造出晶格鞋。将鞋内底和鞋外底的曲面模型导入 Design Modeler, 形成实体模型。在 Design Modeler 中绘制足底压力鞋垫和地板的实体模型, 按照实际位置将足部软组织、骨骼、软骨、鞋底晶格、鞋内底、鞋外底、压力鞋垫和地板模型进行耦合。本研究涉及六种典型的晶格结构类型, 分别为实验测试所使用的 Body Centered Cubic 晶格, 以及 Diamond 晶格、Face Centered Cubic 晶格、Truncated 晶格、Kelvin Cell 晶格和 Octet 晶格。模型的材料均假设为均质

各向同性的线弹性材料,根据 ASTM D638 的拉伸试验标准,对 3D 打印所用的 TPU95A 材料进行拉伸测试获取晶格鞋的材料参数。受试者穿着一双根据受试者足模型定制使用 3D 打印技术(FDM)一体化制造的晶格鞋,使用 Kistler 测力台(Kistler, 瑞士)和 X-sensor(Xsensor 公司, 加拿大)足底压力鞋垫采集受试者静止站立的数据,测力台的采集频率为 1000Hz,压力鞋垫的采集频率为 100Hz。采集的数据包括地面反作用力和足底压力。对采集到的足底压力数据进行手动分区,共分为 15 个分区,将鞋垫总面积作为第 16 个分区。参考实验所用足底压力鞋垫的传感器分布,在模型中建立相同分区的压力鞋垫模型,以便于将实测足底压力数据和仿真足底压力数据进行组内相关性分析(ICC)。本研究采用双向随机效应模型,对比实测足底压力和仿真足底应力的 16 个分区数据。为进一步评估仿真与实验数据之间的一致性,采用 Bland-Altman 分析绘制差值图。在跟骨模拟踝关节屈伸运动,同时约束其余五个自由度,施加四分之一体重的跟腱力。对地面的运动进行约束,仅允许地面沿着 Z 轴位移。足底与鞋底充分接触,施加二分之一体重的地面反作用力。

结果:静止站立的实测和仿真数据的组内相关性分析结果显示, ICC 为 0.92,表明仿真结果与实验测量值之间具有很好的一致性。回归分析显示,决定系数 R^2 为 0.84, $P < 0.001$,实测和仿真数据之间存在显著的线性相关关系,具有良好的拟合效果和统计学显著性。Bland - Altman 方法分析实测值与仿真值之间的差异,两者差值的平均偏差存在明显负值。跟骨应力值在不同晶格结构下的波动范围为 2.52MPa(Dia)至 2.98MPa(Trun),平均应力为 2.72MPa。Truncated 晶格结构下跟骨应力相对较高,长期作用下可能使跟骨受损。Body Centered 晶格结构的跖骨应力最低,这有利于保护跖骨免受过度应力。Truncated 晶格结构的跖骨应力最高,比平均值高出约 21.9%,尤其第 1-3 跖骨头和跖骨颈部位是应力集中的区域。

结论: Body Centered 晶格结构表现最为突出,在降低应力方面优势明显,且应力分布均匀,能有效减少局部应力集中,对足骨健康保护更有利。而 Truncated 晶格结构相对较高的跖骨和跟骨应力及不合理分布可能增加足骨损伤风险。本研究成果为鞋底晶格材料设计提供了关键参考,后续可结合个体足部差异与鞋底材料特性,进一步开展个性化、高性能的鞋底设计研究,以更好地打造符合足部结构和运动特征的鞋底。

D37-34

运动健康新材料-交叉背景下材料学科发展的新机遇

陈煜*¹

1. 北京理工大学

运动健康领域正面临竞技极限突破、全民健身科学化与损伤精准康复三大关键需求。传统材料在支撑高精度生理监测、智能反馈及个性化防护等新兴需求上面临重大挑战,亟需突破性多功能新材料驱动“体医工融合”战略的落地。

材料学科正向深度交叉与融合创新演进。整合材料学、体育科学、医学,催生“材料-体育-医学”交叉新范式,是拓展学科边界的核心路径。需求驱动材料多功能化,强力促进智能响应材料、柔性传感材料等合成技术的创新。新材料的突破,为产业开辟全新场景:赋能智能体育装备、数字化场馆、可穿戴医疗设备等前沿领域,大幅提升材料学科的应用价值与产业牵引力。

运动健康新材料学科通过解决运动效能提升、安全防护强化及康复医学优化中的核心问题,已成为材料学科在交叉融合背景下突破技术瓶颈、服务国家“主动健康”战略的关键增长点。其创新成果将深刻重塑运动与健康产业生态。

D37-35

基于电触觉刺激的运动疲劳干预

韩腾*¹

1. 中国科学院软件研究所

运动控制依赖感觉反馈来实时调整运动,当感觉输入受损(例如由于缺血性神经阻滞或神经疲劳),

大脑难以预测运动结果,导致运动精度下降。这表明,疲劳不仅影响肌肉本身,还会削弱运动控制系统对感觉反馈的利用,最终导致运动不精确。近些年电刺激技术成为运动疲劳干预的重要技术路线,不同于神经电刺激,电极阵列式电触觉刺激技术通过与人体皮肤接触的电极施加电场,刺激皮肤内的多种触觉感受器和传入神经纤维,实现丰富、可控的触觉感受,从而进一步通过电触觉刺激进行感觉补偿,对运动疲劳进行干预。

D37-36

高性能倍增型有机光电探测器的研究

王建彬^{1,2}, 尹志刚^{*2}

1. 闽江学院 物理与电子信息工程学院
2. 重庆大学 电气工程学院/输变电装备技术全国重点实验室

有机光电探测器(OPDs)由于可大面积溶液加工、柔韧性好以及光谱响应可调谐等优点受到广泛关注,在弱光探测、高性能传感以及柔性可穿戴设备等领域展现出广阔前景。但是,传统OPDs的光电流较弱、外量子效率(EQEs)偏低(<100%),易受噪声信号干扰,需要通过前置放大电路对弱光电流信号放大和减噪,从而显著增加了系统集成成本与设计难度。作为新兴探测技术,倍增型有机光电探测器(PMOPDs)可通过光敏活性层给体/受体的带隙调控、能级匹配和组分设计以及界面层的优化,在偏压与光照下实现对光电流信号的自放大功能(无需信号放大电路),获得远超100%的EQEs,有利于探测弱光信号。同时,PMOPDs可通过界面工程解决器件EQEs增大和暗电流密度降低之间的矛盾,进一步提升器件弱光信号探测能力。本次重点介绍PMOPDs的光敏活性层材料(包含二元、三元、多元本体异质结结构与叠层结构)和电极界面层材料的调控设计策略以及对器件性能的影响,系统探究这些方法在提升器件EQEs、降低器件暗电流密度、优化光谱响应能力等方面的作用。同时,进一步探讨了PMOPDs在弱光探测、单像素成像、人体健康监测以及柔性可穿戴设备等方面的应用进展。最后,总结并展望了PMOPDs面临的挑战与发展前景。

D37-37

跑步中不同碳板设计对足底软组织应力的影响

郭洋雨¹, 贾云龙¹, 王海春¹, 杨翊¹, 朱晓兰^{*1}

1. 北京体育大学

背景和目的 鞋底纵向弯曲刚度的改变会影响踝关节和跖趾关节的运动学和动力学。改变堆叠厚度、弯曲程度或编织方法、铺设角度等可以调整碳纤维板在纵向弯折方面的力学性能。碳板堆叠厚度对刚度的影响最大。虽然前人研究证明前掌具有一定弯曲的碳纤维板可能有助于改善跑步经济性,但由弯曲引起的刚度变化可能并不是跑步经济性改善的主要原因,因为碳板前掌弯曲可能产生“跷跷板效应”减少跖趾关节的能量损失,且改变前掌弯曲只会在较小程度上影响鞋底刚度。而编织方法和铺设角度作为碳纤维板的微观构造,其参数的改变对刚度的影响尚未被探讨。此外,刚度的改变会影响足底软组织和足骨的应力应变。有研究使用“足-跑鞋-碳板”模型对前足跑的着地缓冲时刻进行仿真,认为碳板厚度、嵌入位置以及碳板的弯曲程度都会对足底软组织、足骨的应力应变以及载荷传导路径产生影响。但上述研究假设碳板为均质各向同性材料,而实际碳纤维复合材料具有各向异性。因此,本研究针对现有碳板跑鞋仿真中材料属性简化的问题,结合碳纤维复合材料的各向异性,通过调控碳纤维板的编织方法、铺层角度和堆叠厚度,模拟跑步的垂直地面反作用力峰值时刻,分析足底应力峰值和平均值的变化特征。

方法 运动生物力学数据引自跑步测试数据集。使用受试者(男性,年龄28岁,身高180cm,体重61.5kg,脚长26.4cm,鞋前掌厚2cm,鞋后跟厚3.4cm)在水平角度的跑步机上以3m/s的速度跑步所采集的数据。使用OpenSim 4.5处理数据,包括模型缩放、逆运动学、逆动力学、残差计算和肌肉控制计算。获得垂直地面反作用力峰值时刻踝关节跖屈肌群的肌力(比目鱼肌2572.4N、内侧腓肠肌628.5N、外侧腓肠肌475.7N、胫骨后肌889.3N、腓骨短肌250N和腓骨长肌632N)。通过足跟和第二跖趾关节标记点获取足鞋和地面之

间的矢状角。

在 ANSYS 中绘制碳板曲面模型，在材料数据库中选择复合材料中的二维单轴编织铺层碳纤维预浸料（UD）和二维二轴编织铺层碳纤维预浸料（WO）。在 Ansys Composite Prep (ACP) 中设置碳纤维的织物层厚度为 0.125mm，设置两层织物层的纤维方向与基准轴的铺层角度分别为 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$ 、 $\pm 60^\circ$ 。两层织物层组合形成一层堆叠结构，厚度为 0.25mm。按照所需碳板厚度 1mm、1.25mm 和 1.5mm 分别铺设 4 层、5 层和 6 层的堆叠结构，进而形成完整的复合材料碳纤维板。

本研究使用的足部模型包括 1 块软组织、29 块骨、1 块足底筋膜。跑鞋模型包括鞋面、鞋中底和鞋外底。材料假设为均质各向同性材料。使用 ANSYS 进行垂直地面反作用力峰值时刻的非线性准静态仿真。所有接触均采用“面-面”接触，其中软组织和鞋面、软组织和鞋中底、鞋外底和地面三个接触对均设置为摩擦接触，摩擦系数为 0.6，其余接触对之间均设置为绑定接触。单元类型为 Solid 187 实体结构单元，采用四面体补丁适形法划分网格，对足-跑鞋-地面模型的软组织和鞋中底的接触区域进行局部网格细化和敏感性分析。基于距骨质心建立踝关节局部坐标系，设置该坐标系仅允许绕 X 轴旋转以模拟踝关节屈伸运动。施加踝关节跖屈肌群的肌肉力，构建踝关节跖屈力矩。设置地面向上的位移载荷，该载荷与踝关节跖屈力矩形成力学平衡。

结果 相对于无碳板鞋底，所有碳板参数均显著提升了足底软组织的应力峰值，提升幅度为 23.82%至 28.18%。其中，1.25 mm 厚度碳板的提升效果最为显著，峰值增加幅度为 27.73%至 28.18%，明显高于 1 mm（23.86%~24.47%）和 1.5 mm（23.82%~24.47%）厚度碳板。与应力峰值表现不同，足底软组织的压力平均值出现不同程度下降。其中，1mm（下降 4.17%~4.37%）和 1.25mm（下降 4.00%~4.26%）的降低效果最为显著，明显大于 1.5mm（下降 0.95%~1.16%）。当铺层角度和编织方法不变时，相对于 1mm 的铺层厚度，1.25mm 和 1.5mm 下的足底软组织应力峰值和应力平均值变化范围很大（-77.19%~17.44%）。在相同厚度与铺层角度条件下，相对于 UD 编织，WO 编织对足底软组织应力峰值和平均值的影响差异较小（-10.31%~8.93%）。当厚度和编织方法相同时，相对于 $\pm 30^\circ$ ， $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 60^\circ$ 的铺层角度变化对应力指标的影响也较为有限（-0.59%~21.65%）。

结论 厚度是影响足底软组织应力的主要因素。虽然在相同厚度下，铺层角度和编织方式的改变对足底软组织应力的影响较小。但可以在一定范围内对实现应力的降低或者增加。在碳板跑鞋的制造中，可通过搭配不同碳板材料的设计参数，降低足底软组织的局部应力和优化载荷分布，可能对降低足部损伤具有积极意义。

墙报

D37- P01

二维材料在摩擦纳米发电机中的结构设计与体育运动领域应用的研究

司惠楠¹，陈煜*²

1. 首都体育学院

2. 北京理工大学

随着运动健康监测与可穿戴传感技术的快速发展，摩擦纳米发电机（TENGs）因其生物兼容性、环境友好性和低频机械能采集等优势，成为实现自供能传感系统的关键技术。然而，目前 TENGs 仍面临输出功率受限、功能涂层耐久性不足等瓶颈问题，严重制约其在体育运动领域的应用。二维（2D）材料（如石墨烯、MXenes 等）独特的原子尺寸、柔韧性及可调控的电子特性，为解决上述问题提供了新思路。

本文聚焦于 2D 材料改性策略与 TENGs 器件结构设计，系统综述了其在体育运动领域的应用情况。结果表明 2D 材料的高比表面积与层间电子转移特性增强 TENGs 能量收集效率，同时通过多层结构设计能改善 TENGs 抗磨损性能；2D 材料的高导电性与离子吸附能力，能提升 TENGs 器件的能量密度。针对体育运动中的特殊需求，本文从能量转化-存储协同设计、健康安全监测、康复辅助及运动损伤四个维度，构建了 2D 材料基 TENGs 的性能评价体系，提出“材料-结构-功能”一体化设计准则。

综上，2D 材料通过结构与性能调控，能有效解决 TENGs 的瓶颈问题，在体育运动领域展现出广

阔应用前景。后续研究应协同优化材料改性、器件集成与场景适配，重点突破界面匹配稳定性与规模化制备工艺，推动 2D 材料基 TENGs 在智能运动装备中的产业化进程。

D37-P02

非对称粘附生物电子接口用于生物电生理信号监测

林浩文¹，李风煜*¹

1. 暨南大学

采集高保真度的生物电生理信号需要设备长时间保持相对静止，但是来自其他组织产生的动态噪声仍然难以避免。目前常见的生物电子接口往往表现出各向同性粘附的特点，但这在采集信号过程中往往会与其他组织产生不必要的过度粘附，从而降低了采集信号的准确性。我们提出了一种具有均匀机械弹性和电子性能的非对称粘附水凝胶作为生物电子接口的电子界面，这种水凝胶的强粘附面与弱粘附面的粘附强度差异高达 4 倍，强粘附面与监测组织形成稳定的共形粘附，弱粘附面降低其他干扰组织产生的动态噪声，在老鼠体内的肌电测试结果验证了具有非对称粘附的凝胶界面比各向同性粘附的凝胶界面采集得到的肌电信号具有更低的噪音以及更少的干扰信号，信噪比差异高达 3 倍。此外非对称粘附生物电子接口可用于监测心脏跳动，采集精确的心电信号，有助于快速诊断疾病。

D37-P03

Hofmeister effect regulated gel iontronic sensors for wide-range pressure perception

Zilong He¹，Fengyu Li*¹

1. Jinan Unniversity

This study presents a biomimetic gradient gel iontronic sensor (BGGITS) regulated by the *Hofmeister effect*, enabling high sensitivity, linear response, and wide-range pressure perception. The sensor is constructed using a composite hydrogel composed of polyvinyl alcohol (PVA) and aminotris(methylenephosphonic acid) (ATMP), synthesized via a freeze-thaw process. By leveraging the *Hofmeister effect* of specific ions (e.g., SO_4^{2-} , Acetate⁻, and I⁻), the elastic modulus of the hydrogel is precisely tuned to form a layered gradient structure. This gradient hydrogel is integrated with gold-coated polydimethylsiloxane (Au-PDMS) electrodes featuring hierarchical micro-pyramidal architectures, forming electrochemical double layers (EDLs) at the interface to amplify capacitive response.

Finite element simulations and compression tests confirm that the synergy between the gradient hydrogel and dual microstructured electrodes enables the BGGITS to achieve a linear, ultra-sensitive response with a sensitivity of up to 700 kPa^{-1} across a wide pressure range of up to 800 kPa. The sensor demonstrates a rapid response time of 30 ms under low pressure ($\sim 50 \text{ Pa}$), along with excellent repeatability and mechanical durability over 250 load-unload cycles. Furthermore, the BGGITS enables object recognition and pressure mapping, as demonstrated in an experimental recreation of scenes from *Journey to the West*, where distinct capacitance changes correspond to different object weights and interactions.

In summary, this work establishes a versatile strategy for regulating hydrogel elasticity via the *Hofmeister effect* and integrates it with biomimetic microstructures to create flexible pressure sensors with outstanding performance. The BGGITS holds promise for a wide range of applications in electronic skin, health monitoring, and human-machine interfaces.

D37-P04

具有自愈和抗冻性水凝胶触觉传感器用于运动健康监测

薛逸涵¹，殷明杰*¹，安全福¹

1. 北京工业大学

在运动过程中，人们可能遭遇突发性伤害（如韧带扭伤、肌肉拉伤、骨折和关节脱臼等），也可能因过度运动而产生慢性损伤（如肌腱炎、滑囊炎和疲劳性骨折等）。这些损伤不仅会导致运动功能的暂时性丧失，严重时甚至可能造成永久性运动障碍。因此，若能实现对人体运动状态的实时监测，将有助于科学指导运动行为，有效预防运动损伤的发生。可穿戴水凝胶压力传感器通过监测运动过程中人体不同部位的应力变化，能够动态获取关节等关键部位的生理状态信息，从而为健康运动提供有效保障，降低运动相关疾病的发生风险。然而，水凝胶‘软’特性使其在低压力下形变达到饱和，导致压力传感器检测压力范围窄，限制了其应用。针对这一问题，本研究采用“离子交联增强韧性”的策略，提出用金属离子交联水凝胶，以同时扩大传感器的检测范围并提高其灵敏度。离子交联增加了水凝胶的韧性，使其能够承受更高的压力，并显著扩大其压力检测范围。此外，压力引起的水凝胶中金属离子的释放通过电双层机制提高了其电容。因此，优化后的水凝胶可用于电容式压力传感器，实现高达 750 kPa 的超宽检测范围和 384 nF kPa^{-1} 的高灵敏度。此外，离子交联的动态和可逆性质赋予了传感器自愈和抗冻特性，进一步提高了其在运动健康诊断中的应用潜力。

D37-P05

构筑内建电场增强生物传感器电子传递，用于精确的数字健康评估

吕天润¹，殷明杰*¹，安全福¹

1. 北京工业大学

在人体运动过程中，一些关键生物分子（如葡萄糖、尿酸等）的浓度变化可有效反映个体的运动健康状态，为运动策略的动态调整提供数据支持。研究表明，这些分子在汗液中的浓度与其在血液中的浓度具有良好的相关性，从而为无创替代传统血样检测提供了可能。这种方式不仅显著降低了因采血带来的感染风险，还能够实现连续、动态的汗液监测。然而，目前传感器中催化剂与导电基质之间的电子转移效率较低，严重制约了传感性能的提升。为解决这一问题，我们提出通过构建内建电场来增强传感器内部电子传输效率，从而显著提升其灵敏度，提高检测精度。在本研究中，通过向聚(3,4-乙撑二氧噻吩):聚苯乙烯磺酸 (PEDOT:PSS) 溶液中掺杂六氯铂酸 (H_2PtCl_6)，并对其进行热退火处理，诱导氧化还原反应。在该过程中， H_2PtCl_6 被还原生成带负电荷的催化活性 PtCl_2 纳米颗粒，同时 PEDOT 部分氧化，产生额外的正电荷（空穴载流子），从而在 PtCl_2 与 PEDOT 之间形成稳定的分子内建电场。该电场显著加速了电子从催化剂向 PEDOT 导电链的转移，增强了电子传输效率。

根据这一机制，所构建的传感器在检测酶催化反应关键中间产物—过氧化氢 (H_2O_2) 时，实现了从“无响应”到“有响应”的性能跃迁，并展现出良好的稳定性。进一步通过化学交联方式修饰不同的生物酶，该传感器在葡萄糖与尿酸的检测中均表现出优异的响应性能。该成果实现了对汗液中葡萄糖与尿酸浓度变化的高灵敏、实时监测，为构建高效无创健康评估体系奠定了坚实基础。

D37-P06

智能感知型水凝胶传感器的构建及其在运动损伤实时监测-防护中的应用

徐硕¹，王慧²，陈煜*¹

1. 北京理工大学

2. 首都体育学院

针对传统运动行为缺乏实时监测与主动防护功能的局限性，本研究创新性地设计并制备了一种基于壳聚糖/聚丙烯酰胺双网络水凝胶复合镓离子 (Ga^{3+}) 的智能水凝胶传感器，集成了运动损伤预警与肌肉保护双重功能。该水凝胶通过动态配位交联策略构建，其中壳聚糖通过其丰富的氨基和羟基基团提供强组织粘附性（粘附强度达 $35.4 \pm 1.6 \text{ kPa}$ ）和生物相容性；PAAm 网络赋予水凝胶网络优异的拉伸性 ($>1000\%$ 应变) 可适应肌肉大幅形变； Ga^{3+} 作为动态交联剂，与壳聚糖分子链形成可逆配位键，同时通过离子-偶极作用与 PAAm 的酰胺基团结合，构建了应变响应性导电通路，并赋予材料快速自修复特性。实验表明，该水凝胶电导率与拉伸应变呈现线性负相关（灵敏度系数 $\text{GF}=2.6$ ），能够实时将肌肉形变转化为电阻变化信号。通

过建立电阻-应变标定曲线,结合机器学习算法对信号进行模式识别,成功实现了对肌肉异常收缩的精准监测,并在人体模型中验证了其通过预设电信号阈值触发预警的可靠性。此外,水凝胶的粘弹性能(损耗因子 $\tan\delta\approx 0.32$)可有效吸收运动冲击能量,配合其力学支撑作用使肌肉损伤发生率降低。本研究通过“材料-结构-功能”协同设计策略,为智能可穿戴运动防护器材的设计提供了新材料策略,在运动医学领域具有重要应用潜力。

D37-P07

高电容转导膜耦合疏水层构建稳定汗液离子传感器用于运动监测

杨亚琼¹, 殷明杰*¹, 安全福¹

1. 北京工业大学

在运动过程中,电解质平衡对机体功能至关重要。汗液和间质液中离子的动态变化能够直接反映运动强度、脱水状态、肌肉疲劳程度,甚至提示潜在的健康风险,如低钠血症或电解质紊乱。因此,开发能够实时监测人体汗液中离子浓度的传感器,对于保障运动健康具有重要意义。然而,传统固态接触层(SC)普遍存在电容低、电荷传输效率差以及容易形成水层等问题,严重限制了传感器在低浓度离子检测中的灵敏度和稳定性 [1-2]。为此,本研究提出一种创新设计方案:采用石墨烯量子点(GQD)掺杂的聚吡咯(PPy)纳米枝晶膜作为固态接触层,并结合疏水性 Nafion 膜构建汗液离子传感器。其中, GQD 的引入显著提升了界面电容,而纳米枝晶结构优化了离子-电子转导效率;疏水 Nafion 膜则有效阻隔水层形成,确保传感器长期稳定工作。该设计使传感器灵敏度从 49 mV/decade 提升至 70 mV/decade,同时将电位漂移从 1.3 mV/h 大幅降低至 18.7 μ V/h。基于此,研究进一步采用分配耦合式喷墨打印技术,在柔性电极上集成 Na⁺与 K⁺双传感器,实现了汗液中两种离子浓度的实时同步连续监测。该新型传感装置凭借其优异的无创汗液检测能力,展示出在运动健康监测领域的广阔应用前景,为实现个性化、智能化运动管理提供了切实可行的技术路径。

D37-P08

Sub-femtomolar drug monitoring via co-calibration mechanism with nanoconfined DNA probes

Yonghuan Chen, Fengyu Li*¹

1. Jinan University

Synthetic drugs fundamentally reshape the illicit drug market due to their low cost, ease of production, and rapid manufacturing processes. However, current drug detection methods, which rely on complex instruments, have limited applicability and often neglect the influence of pH fluctuations, leading to potential bias and unreliable results. Herein, we propose co-calibration DNA probes on a nanoconfined biosensor (NCBS), covering the range of sweat pH 3 – 8 to achieve significantly enhanced target signal recognition. The NCBS exhibits a linear response range of 103-108 fM with a low limit of detection (LOD) of 3.58 fM in artificial sweat. Compared to the single-aptamer NCBS, the dual-aptamer NCBS offers a broader linear response range, primarily due to the synergistic effects of changes in surface wettability and the capture of hydron, which together reduce signal interference in proton transport. The linear response range doubles, and its detection sensitivity improves by 4 – 5 orders of magnitude compared to existing drug detection methods. This sensing strategy expands the application scope of aptamer-based composite probes, offering an approach for ultra-sensitive drug detection and demonstrating significant potential in sweat sensing and drug monitoring fields.

D37-P09

基于 Argonaute 核酸酶的新型功能材料体系及其在运动现场无污染核酸检测中的应用研究

吴琳霄¹, 陈燕旌¹, 张岩*¹

1. 首都体育学院

背景与目的：竞技体育对精准化训练与健康管理需求迫切，运动员呼吸道感染（RVIs）已成关键挑战，严重影响训练与竞技表现。传统 qPCR 检测虽为金标准，但因实验室依赖、专业要求及扩增产物易致污染等局限，难以满足运动现场即时需求。本研究旨在突破传统核酸检测材料的限制，构建以石蜡包埋 Argonaute（Ago）-引导 DNA（gDNA）复合物为核心的新型功能材料体系，利用其独特分子识别与作用机制，开发一种“无污染”核酸检测方法，为体医融合场景下的即时分子诊断提供材料学解决方案。

研究方法：利用 Ago 对靶标核酸的精确识别及高效级联剪切特性，创新性地将 Ago-引导 DNA（gDNA）复合物通过 95°C 高熔点石蜡包埋，以提升其在运动现场等复杂环境中的稳定性与实用性。针对多种运动员常见呼吸道病原体，优化设计了高特异性 gDNA 序列。检测流程整合 LAMP 技术进行初步放大，随后依赖 Ago-gDNA 复合物功能材料对扩增产物的特异性识别与剪切，并结合荧光探针实现信号检测。此设计利用 Ago 材料独特的分子作用机制，从源头避免了传统核酸扩增所致的污染性扩增产物，为实现“无污染”检测奠定了材料学基础。该方法无需热循环，仅需恒温反应，反应体系因 Ago-gDNA 复合物功能材料的高效性而简化，可由便携式自动化移液工作站（<5kg，电池供电）完成。通过毛细管电泳对比评估了该材料体系的防污染性能。

研究结果：Ago-gDNA 复合物功能材料体系表现出优异的检测性能，多轮重复检测无假阳性，准确性与 qPCR 金标准一致。毛细管电泳分析证实，该体系最终检测产物中无传统扩增产物残留，而 PCR 对照组则有明显条带，验证了其“无污染”特性。该功能材料体系对标准品的最低检测限达 10 拷贝/检测，特异性优于 95%。在国家运动队实地测试中，结合便携式自动化移液工作站的解决方案，可在 45 分钟内完成从样本处理至结果获取的全流程，效率较传统 PCR（2-3 小时）提升 4 倍以上，电池续航超 6 小时。成功检出 5 例隐匿性 RVI，结果与金标准测序 100% 符合，展示了该体系在复杂现场环境下的可靠性，非专业人员经简单培训即可掌握。

研究结论：本研究成功构建并验证了一种以石蜡包埋 Ago-gDNA 复合物为核心的新型功能材料体系，为体医融合场景下运动现场的即时、无污染核酸检测提供了创新的材料学解决方案。该体系凭借其源于 Ago 酶独特作用机制的“无污染”特性，有效克服了传统核酸扩增技术在开放环境中易产生污染的瓶颈。高熔点石蜡包埋技术显著增强了核心 Ago-gDNA 功能材料的稳定性与环境耐受性。相较于传统技术，该新型功能材料体系展现出无污染、高灵敏度、高特异性及快速高效的综合优势。对提升我国竞技体育科学化管理水平及推动体医融合背景下现场快速诊断具有理论与应用价值。

D37-P10

中国人骨生物力学性能多尺度表征与本构参数优化方法研究

田腾飞^{1,2}，徐鹏^{1,2}，王丽珍*^{1,2}，樊瑜波^{1,2}

1. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）医工交叉科创中心
2. 北京航空航天大学生物力学与力生物学教育部重点实验室, 北京市生物医学工程高精尖创新中心

目的：骨骼生物力学性能是理解人体损伤机制与指导防护设计的核心依据。研究旨在系统表征中国人群骨骼力学特性，并基于损伤仿真需求优化关键本构参数。

方法：采用纳米压痕、准静态压缩及分离式霍普金森压杆实验，获取主要人骨跨尺度与多应变率下力学响应，建立考虑应变率效应的基准本构模型。进而，基于 microCT 图像与基准本构模型建立颅骨节段有限元模型。最后，以多轴载荷及多应变率的宏观力学响应为目标，应用自适应响应面法对颅骨节段弹性模量、屈服强度及失效应变等参数进行多工况多目标联合优化。

结果：中国人群骨骼力学性能存在群体特征，扁平骨及不规则骨（脊椎、骶骨及胸骨等）的皮质骨弹性模量显著低于欧美人群数据。基于多尺度测试的本构参数存在系统性偏差不能直接用于生物力学仿真，统计区间内参数优化可显著提高有限元模型的生物逼真度。

结论：本研究为面向中国人群的人体数字模型提供骨骼生物力学数据支持，对提升损伤生物力学分析精度与防护设计效能具有重要意义。

D37-P11

水介导的低滞后高韧离子水凝胶及其运动健康监测研究

肖文哲¹, 何婷², 孙剑*¹

1. 北京理工大学

聚合物凝胶材料的低迟滞特性可以显著提高其在智能可穿戴设备等新兴应用中的运行可靠性和使用寿命。然而,高韧性和低迟滞是传统凝胶材料固有的矛盾属性,这在离子液体(IL)基体系中尤为明显[1]。在此,我们提出了一种水介导的聚合物网络重组策略,用于开发含有IL的坚韧和低滞后的离子水凝胶(IHG),其中共价交联和动态界面润滑之间的协同效应决定了它们的卓越性能[2]。水可以作为一种润滑介质,适度减弱IL和聚合物链之间的相互作用,从而形成动态适应的网络,促进链的迁移和应力重新分配。因此,通过调控含水量制备的IHGs实现了高韧性(2.2 MJ m⁻³)和低迟滞(400%应变时8.1%)的良好平衡,此外还具有高应变、强应力、优导电、生物相容性、透明性等综合特性。最后,IHG可以作为高性能可穿戴传感器对人体进行实时健康监测,如呼吸、吞咽、发音等运动。此外,还可捕获高质量肌电信号并有效分析肌肉疲劳现象。这种简单的策略克服了传统的低迟滞和高韧性之间的权衡,在实际应用中表现出了非凡的潜力。

D37-P11

胞元尺寸与结构半径对结构抗冲击性能影响研究

宋浩宇^{1,2}, 徐鹏^{1,2}, 王丽珍*^{1,2}, 樊瑜波^{1,2}

1. 杭州市北京航空航天大学国际创新研究院(北京航空航天大学国际创新学院)医工交叉科创中心
2. 北京航空航天大学生物力学与力生物学教育部重点实验室,北京市生物医学工程高精尖创新中心

当前吸能结构的研究多聚焦于胞元结构的抗冲击性能及其在平面场景下的冲击响应,与实际应用中较为常见的曲面场景仍有一定的差别。头盔作为一种典型曲面抗冲击场景,其对吸能结构的质量与体积提出了严苛要求。圆环作为一种结构简单、质量轻盈的吸能结构,在头盔的吸能结构应用中具有一定的优势。本研究旨在分析不同胞元尺寸与曲面半径对结构抗冲击性能的影响,优化吸能结构的整体设计。以等厚度圆环为胞元结构,建立不同圆环半径(胞元尺寸)与曲面半径的曲面结构,使用有限元仿真模拟平面冲击载荷下结构的动态响应行为。实验结果表明,过大或过小的胞元结构有更大的力峰值,过小的胞元结构会造成更波动的力-位移曲线;曲面结构的响应行为与平面结构存在一定的差别,更小的结构曲面半径拥有更低的力峰值与更平缓的力-位移曲线。本研究评价了不同胞元尺寸与曲面半径结构的抗冲击性能,结果表明改变胞元尺寸会对结构抗冲击性能效果产生明显影响,更小的曲面半径拥有更优的抗冲击性能,胞元尺寸与结构曲面半径匹配会有更佳的吸能效果。

仅发表论文

D37-PO01

用于加速烧伤伤口愈合和实时监测的自愈海藻酸钠-PEDOT:PSS 导电水凝胶

刘新硕¹, 李立华*¹

1. 暨南大学番禺校区

本研究开发了一种兼具离子/电子双导电特性的海藻酸钠-钙-PEDOT:PSS 水凝胶敷料,旨在解决深度烧伤治疗中组织再生受损、创面过度渗出及感染风险等关键问题。通过动态离子交联技术,该水凝胶实现了类皮肤导电性(0.0026 S · cm⁻¹),同时展现出优异的可注射性和对不规则创面的保形适应性。经优化的配方表现出增强的机械稳定性(压缩应力:21.3±1.5 kPa,模量:20.8±1.8 kPa)和动态粘弹性,能够在承受生理应力的同时保持自修复特性(应变后恢复率达90%)。水凝胶敷料通过促进细胞再生和控制渗液,在10天内实现了96.46±0.14%的创面闭合率,展现出卓越的治疗效果。此外,水凝胶的普适性粘附与保形适应性,结合其集成的结构稳定性、生物电活性、生物活性及环境适应性,确立了SCPPC在复杂创

面治疗和监测中的临床应用潜力。

D37-PO02

基于药食两用物质的抗疲劳功能性食品研究

谭遥敏^{1,2}, 杜丽娜^{*1,2}, 金义光^{1,2}

1. 河南大学药学院
2. 军事医学研究院

运动性疲劳是由于机体超负荷运动而引起的生理功能减退的现象。现代社会, 大部分人都会感到疲劳, 尤其是经常进行运动训练的某些特殊人群。运动训练导致的疲劳主要为外周性疲劳, 是肌肉或神经肌肉接头功能下降导致的肌肉酸痛、运动耐力下降等表现。其主要发生机制与体内 ATP 消耗过多, 乳酸、尿素氮等代谢物堆积有关。

本研究中, 我们以胆碱作为阳离子, 在其烷基链上引入了牛磺酸作为阴离子, 制备了牛磺酸胆碱离子液体的稳定体系。离子液体在食品工业的应用中具有很多优点, 如良好的水溶性、更好的生物利用度, 且大分子物质分散在离子液体中可以使其更好的进行通过细胞膜转运。因此我们选择搭配药食同源物质与牛磺酸胆碱离子液体联合使用, 通过建立小鼠力竭模型, 考察不同组分对小鼠运动耐力、代谢物堆积及相关抗氧化指标的影响, 评估药食同源物质与牛磺酸胆碱离子液体联合使用是否具有协同抗疲劳作用。

结果表明, 复合制剂组可明显提高小鼠运动耐力、降低其体内乳酸等代谢物堆积, 提高超氧化物歧化酶、谷胱甘肽过氧化物酶等抗氧化酶活性, 牛磺酸胆碱离子液体具有显著的抗疲劳作用。

D37-PO03

负载海洋寡肽纳米颗粒凝胶微针的构建及促进胞内菌感染创面愈合的作用

屈洪娇¹, 唐永楷¹, 权维燕¹, 吴科锋¹, 欧阳茜茜^{*1}

1. 广东医科大学

胞内滞留菌诱发的慢性感染伤口愈合仍然是一个艰巨的挑战。本研究根据创面的生理特点, 以富含精氨酸海洋寡肽群、血红素、甘露糖修饰的细菌膜囊泡等作为基本结构单元, 通过静电作用、冻融策略的微流控芯片技术制备海洋寡肽活性纳米体系 (M-MVs@GH NPs), 将 M-MVs@GH NPs 负载在马尾藻多糖凝胶制备感染创面修复微针 (M@GH@SPH MNs)。该微针根据伤口需要智能释放抗菌纳米粒子, 具有优异的抗菌、抗炎和感染创面修复的功效。负载 M-MVs@GH NPs 的多糖微针贴片对细胞增殖和血管生成有显著的诱导作用, 能够稳定地粘附在伤口上, 并提供足够的强度来穿透生物膜并诱导分散。该微针能够调控感染创面中巨噬细胞的能量代谢发挥抗胞内滞留菌的作用。因此, 该海洋寡肽活性纳米体复合海洋多糖多功能微针贴片, 为抗胞内菌感染的临床治疗提供新的策略, 具有潜在的医学价值。

D37-PO04

Optimize of Wearable Health Monitoring Based on CS-BP Network

Long Xu¹, Yan Jiang^{*1}

1. Beijing Institute of Fashion Technology

Research of flexible sensors for human wearable health monitoring are of crucial importance. Flexible sensor based on textile has been widely applied in monitoring human body movements due to its accuracy and operational advantages. However, the current accuracy of sensor is low due to the improper data processing programme. Here, we report a prediction method based on CS-BP neural network. The Cuckoo search algorithm is used to optimize the weight and threshold of BP neural network in order to obtain the most excellent neural network structure. The experimental results show that the prediction is much more closer to the actual hand gestures than regular classification method. Based on 300 sensor simulations of human hand movements, we

proposes a method to extract human gestures recognition from sensor angle data. The accuracy rate between the output and the actual result after compensation by CS-BP neural network can be maintained at about 99.6%. The prediction method is feasible and can effectively alleviate the problem that the sensor data processing deviates from the real situation, which indicating good prediction performance and applicability for practical production.