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

C06-金属基复合材料
C06-Metal Matrix Composites

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: https://cmc2025.scimeeting.cn

C06.金属基复合材料

分会主席：张荻、马宗义、武高辉、欧阳求保、赵乃勤

C06-01

钛基复合材料粉体基元研制与双异质结构构筑研究

吕维洁*，陈福，张荻，韩远飞
上海交通大学材料科学与工程学院，金属基复合材料全国重点实验室

面向航空、航天等国家重大工程领域对轻质、高强钛基复合材料迫切需求，通过创新复材粉体基元设计与构型化复合调控途径，有效提升强度-塑韧性匹配。启迪于原位自生的设计理念，通过真空熔炼与雾化制粉技术，从复材粉体源头实现增强体纳米化调控和微细网状结构构筑，研制系列内嵌超细纳米网状结构的钛基复材粉末。采用“基元组装-分级建构”的策略制备了具有双峰晶粒基体和增强体限域分布的双异质结构钛基复合材料，其室温抗拉强度达到了 1240 MPa，延伸率超过 13%，强度与塑性均优于同类锻态合金，在空天装备中具有广阔应用前景。

C06-02

高熵合金与中熵合金增强的钛合金基复合材料的研究进展

张法明*
东南大学

国内外对于高熵合金增强的钛合金已经有相关的报道，而对于中熵合金增强钛基复合材料报道很少，并且对中熵合金增强钛基复合材料的强韧化机理未见报道。中熵合金在某些性能方面能媲美甚至优于高熵合金，将中熵合金作为钛基复合材料的增强相具有重要的研究价值。本报告综述了东南大学的研究团队在高熵合金、中熵合金增强 TC4 基复合材料的制备工艺，包括 SLM 和 SPS，研究了制备工艺的影响规律，以及复合材料的组织结构，界面结构与力学性能及动态力学性能，分析了其强韧化机理，并对其应用进行探索性研究。

C06-03

超高强韧钛合金纳米分级异质结构设计与调控

崔喜平*，丁浩，黄陆军，耿林
哈尔滨工业大学

针对航空航天结构减重与性能提升对钛合金更高强度-塑（韧）性匹配的双重需求，创新性提出在 beta 钛合金中引入高含量 Si 元素，通过对增强相构型和基体序构的双重调控，构建了包含均匀分布的亚微米 Ti5Si3 颗粒、回复层和再结晶层的异质层片结构钛基复合材料，实现抗拉强度提升 10%的同时，均匀延伸率提升 8 倍。进一步基于晶界工程（GBE）思想，通过调控双级时效工艺进一步构建出由晶界纳米魏氏组织 α 相和晶内分级纳米 α 相组成的胞状结构复合材料，获得了 1850MPa 的超高强度和大于 5%的均匀延伸率。晶内的高固溶 Si 抑制 ω 相均匀析出，使时效后晶内产生粗细混合的纳米分级 α（αHS），而(亚)晶界存在的高密度位错诱发析出超细纳米魏氏组织 α（αWGB），避免了脆性连续晶界 α 相。通过原位 SEM-DIC 结合原位 TEM 技术发现：胞状结构复合材料的胞状晶界强且可变形，αWGB 避免了大量的晶界失效，提供了强化基础，而晶内 αHS 承担主要的变形，通过不同尺度 α 相的异质变形行为产生了强的异质变形诱导（HDI）强化和加工硬化，显著提高了钛基复合材料强度和塑性。利用反常超高 Si 含量诱导的异质结构调控和晶界工程调控策略可为设计高强高韧钛合金提供一种可行途径。

C06-04

异质结构 TA15-Si-TiB 复合材料强韧化与高温抗软化机理

李树丰*，李少龙
西安理工大学

钛基复合材料（TMCs）因其优异的高强度和耐热性能，同时其还能保持先进轻质钛合金的低密度，

在高温应用中具有广阔前景。然而，超高强度的高温 TMCs 在室温下通常表现出较大的脆性，导致其可加工性差，限制了工程应用。本文提出了一种新型分层异质结构设计，突破了该瓶颈，使材料在室温下实现了 9.5%的延伸率，超过了基体合金 TA15，同时具有近 1.4 GPa 的抗拉强度，并在 600 ℃ 下仍保持 700 MPa 的强度。该材料采用粉末冶金工艺构筑多尺度陶瓷颗粒结构：纳米级$(Ti,Zr)_5Si_3$颗粒沿晶界和相界析出，提升高温稳定性并增强位错强化效应；微米尺度的 TiB 晶须自组装成百微米级球状结构，形成硬质细晶区，均匀嵌入于软质粗晶基体中。异质区域之间的协同变形引发异质变形诱导（HDI）应力与应变分配，显著提升应变硬化能力并激发广泛位错活动。该设计策略不仅实现了室温强韧性的最优协同，还展现出卓越的高温力学性能，为异质结构钛基复合材料的高性能化设计提供了新路径。

C06-05

高强韧双峰异构 TiBw/TC4 复合材料的制备及力学性能研究

张成林，罗贤*，武泽阳，邹航，胡锐

西北工业大学 凝固技术国家重点实验室

优化异质结构设计有助于提升材料综合力学性能。本研究采用两步低能球磨和真空热压烧结工艺，成功制备了以细晶 TC4 为主要基体、存在不同含量的相对弥散分布的粗晶 TC4 区的双峰异构 TiB_w/TC4 复合材料。TiB_w 增强相在细晶区弥散分布，在粗晶区边界呈近圆形分布。同时，与传统均质复合材料（TMC0）相比，粗晶的引入可进一步细化基体晶粒，有助于提升材料的综合力学性能。经优化设计的异构复合材料（粗晶含量 10 wt.%）抗拉强度达 1129.5 ±8.2 MPa，延伸率为 4.3 ±0.3 %。与相同工艺下制备的 TC4 基体合金相比，分别提高 17.2 %和 38.7 %。与 TMC0 相比，在保持抗拉强度不降低的同时，延伸率提高了 377.8 %。此外，其断裂韧性达 37.9 ±1.7 MPa $m^{1/2}$，较 TMC0 提升 67.0 %。相关机制研究表明，背应力强化、粗晶区的塑性变形以及 TiBw 的失效是延缓异构复合材料开裂、提升力学性能的关键。

C06-06

高强韧 TiN/Ti2AlNb 复合材料的微观组织调控及强韧化机制研究

张科委，邹航，罗贤，胡锐*

西北工业大学

Ti_2AlNb 基合金凭借其低密度、高比强度、良好的室温塑性与断裂韧性、以及优异抗蠕变性能等优势，成为航空航天领域极具发展潜力的新一代轻质高温结构材料。传统陶瓷增强复合材料虽可显著提升材料的高温强度、抗蠕变性和疲劳性能等，但往往以牺牲塑性为代价。研究表明，除本征力学性能和热匹配性外，增强体的几何形貌对调控复合材料塑性变形行为具有关键作用。氮化钛（TiN）不仅具有与 TiB、TiB_2、Al_2O_3 等传统陶瓷增强体相当的力学特性，以及与基体 Ti_2AlNb 基合金相匹配的热膨胀系数，但更重要的是其钝化的几何形貌特征可有效缓解基体-增强体界面处的应力集中效应，因此 TiN 是理想的增强体候选材料之一。本研究采用氩气保护下的真空非自耗电弧熔炼技术成功制备了 TiN/Ti_2AlNb 复合材料，微观结构特征表明，复合材料的晶粒尺寸较基体合金显著细化。相较于基体 Ti_2AlNb 合金，复合材料的屈服强度、硬度以及延伸率实现协同提升，从而表现出优异的强塑性结合。断口分析证实材料断裂模式由基体合金的脆性解理转变为复合材料的韧-脆混合断裂。该研究成果为设计兼具高强度和良好塑性的 Ti_2AlNb 基复合材料提供了新思路，凸显了 TiN 在先进结构材料设计中的独特优势。

C06-07

Enhancing the strength and ductility of network titanium matrix composites by utilizing nano-sized TiB and La2O3 distributed at grain boundaries and within grains

Yu Wang,Hongmei Zhang,Xingwang Cheng*

Beijing Institute of Technology, School of Materials Science and Engineering

Nano-sized TiB_w and La_2O_{3p} were utilized as reinforcements in titanium matrix composites (TMCs), prepared via Rapid Hot Pressure Sintering (RHPS) and Hot Rolling (HR), significantly enhancing the mechanical properties. The nano TiB_w and La_2O_{3p} in situ formed a three-dimensional (3D) network architecture distributed on

grain boundaries and within grains. Results showed that after HR at 1123 K, the pores were largely eliminated and the grains were refined. The tensile strength of the (TiB_w + La_2O_{3p})/Ti composites increased from 580 MPa to 840 MPa, which exhibited excellent hetero-deformation-induced (HDI) hardening and achieved an elongation of 24.9%. The key factors contributing to the enhanced strength and plasticity of TMCs include grain refinement, oxygen absorption by La_2O_{3p} that mitigates embrittlement, and effective load transfer that inhibits crack propagation. This novel strategy offers a convenient and controllable approach for refining the microstructure and enhancing the plasticity of TMCs.

C06-08

连续碳化硅纤维增强的 Ti2AlNb 基复合材料蠕变行为研究

秦松，宋曰海，卢爱琪，张尚洲*

烟台大学

本研究基于 EBSD 和 TEM 等表征技术，研究了连续 SiC 纤维增强的 Ti_2AlNb（包含 B_2 相、有序正交 O 相及 α_2 相）基复合材料在 800-900 ℃ 温度区间及 320-580MPa 应力水平下的蠕变行为。实验结果表明，在热力耦合作用下，材料经历显著的 B_2/O/α_2 三相动态演化：在 800 ℃ 高温时展现出优异的抗蠕变性能（低蠕变速率：$10^{-7}s^{-1}$），此时的失效源于基体晶界脆性 O 相及 α_2 周围的 RimO 相，断口呈沿晶断裂与解理断裂混合的特征，蠕变受位错滑移与扩散机制竞争控制，且层错通过钉扎滑移位错与提供位错管扩散通道的双重机制，协同优化材料的蠕变抗力。温度升至 900 ℃ 时，层错热失稳、O 相溶解等导致基体协调变形能力丧失及空位扩散受阻，引发应力重分布和界面应力集中，叠加高温界面弱化效应，主导失效模式转变为界面脱粘，表现出高应力指数（n≈9 界面失稳）。阐明了层错在蠕变中的双重作用以及由 O 相溶解触发的，从基体塑性控制到界面失稳控制的蠕变机制根本性转变，为设计高服役可靠性的 SiC 纤维增强 Ti_2AlNb 基复合材料，特别是在高温部件选材与界面优化设计方面提供了关键的理论依据。

C06-09

烧结态 TiBw/TA15 复合材料增强相形貌调控及热轧制态组织演变研究

田思宇[1,2]，张宇*[1,2]，黄陆军[1,2]，耿林[1,2,3]

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

2. 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

3. 哈尔滨工业大学苏州研究院

本研究采用低能球磨的方法在原始 TA15 合金粉表面分别嵌入不同尺寸 TiB_2 颗粒（5 μm、0.5 μm 和 100 nm），通过热压烧结工艺制备得到烧结态 TiBw/TA15 复合材料。当原始 TiB_2 尺寸为 5 μm 或 0.5 μm 时，原位反应的 TiBw 呈现长径比为 7.8 或 7.5 的棒状结构。其室温强度和塑形分别为 890 MPa 和 7.7%、896 MPa 和 8.2%，在 650 ℃ 下的高温强度分别为 429 MPa 和 445 MPa。当 TiB_2 尺寸减小至 100 nm 时，TiBw 直径显著减小，平均长径比提高至 16.2，形成针状形貌。TiBw 的形貌转变是因为 TiB_2 粒径减小，TiBw 的异质形核位点数量大幅提升，B 原子从晶核扩散至 TiBw 尖端的距离仅为几纳米。这导致大量晶核沿[010]方向同时生长消耗有限的 B 元素，使 B 原子沿[010]与[100]的扩散在达到热力学稳定的尺寸前就停止，TiBw 的长度及直径降低。纳米晶须带来更强的载荷传递强化效果，同时促进等轴状的初生 α 形成带来更强的细晶强化。针状 TiBw 增强的 TA15 复合材料表现出优异的室温屈服强度（1135 MPa）和高温强塑性（650 ℃ 下强度 487 MPa，延伸率 16.4%）。对烧结态纳米针状 TiBw/TA15 复合材料进行热轧研究。热轧制后针状 TiBw 沿轧向高度定向排列，形成{100}<010>织构。基体组织中形成 c 轴平行于 TD 方向的{11-20}<10-10>织构，进一步增强载荷传递强化效率。由于 TiBw 与基体组织的变形能力不同，在界面处形成大量几何必须位错（GND）有效地发挥了背应力强化。同时观察到具有高临界分切应力的<c+a>位错的开动。

C06-10

层状复合材料中组元间的协同强韧化

郑士建*

天津市材料层状复合与界面控制技术重点实验室，材料科学与工程学院，河北工业大学

金属材料的力学性能具有显著的尺寸效应。自上世纪 50 年代起，大量实验证据表明，金属材料的强度随着晶粒尺寸的减小而增加，遵循 Hall-Petch 关系。然而，塑性变形能力对尺寸的依赖性却很复杂。例如，通常由粗晶到细晶转变时，金属材料的拉伸强度和延伸率均可以得到提升。此外，一系列实验结果表明，尺寸效应对金属材料塑性变形能力的影响还与其自身的晶体结构有关。FCC 和 BCC 金属由均匀变形到颈缩的临界晶粒尺寸不同。本研究利用 FCC 和 BCC 中的尺寸互补效应，实现了在异质 FCC/BCC 多层复合金属中的高强度和高塑性，并阐明了 FCC/BCC 多层金属的塑性变形行为、断裂特性与层厚尺寸效应之间的关系。

通常在微米尺度范围内，SUS304 的强度随着层厚尺寸的降低而显著增加，但是变形时会产生剪切带，进而导致其塑性降低。与之相反，Q235 会随着层厚尺寸的降低，单层呈现单晶特征，而且整体产生高塑性织构，从而为多层复合材料强塑性协同提升。层状复合之后，在强界面的作用下，FCC 和 BCC 金属会发生明显的强韧性互补行为。其中，SUS304 在层厚尺寸效应的影响下，由于应变硬化率高而快速强化，为多层复合钢提供了较高的强度。而 Q235 层产生的 γ 纤维织构（<111>//ND）显著提升了该层的均匀应变能力，从而缓解 SUS304 层的应力集中现象，使其由单一颈缩转变为周期性颈缩。因此，随着层厚的降低，SUS304/Q235 多层复合钢的强韧性都得到了显著提升。但是，随着层厚尺寸的进一步降低，SUS304 层产生严重应变集中，从而严重影响多层复合钢的塑性，导致复合钢均匀延伸率在层厚为 20 μm 时达到峰值。

C06-11

双异质构型钛基复合材料增材制造与强塑性机制

韩远飞*，冯姝慧，刘化强，吕维洁

上海交通大学

传统热加工技术制备的均匀微米增强钛基复合材料，易于造成基体与微米增强体之间变形失配，大幅度降低塑性变形能力，使复合材料存在严重“强-塑性”倒置问题，无法充分发挥基体与增强体之间的协同强化作用。为此，本研究聚焦纳米增强钛基复合材料的异质构型设计，基于植入微细网状增强体的自组装钛基复合材料粉体，利用激光直接沉积原位制备出具有双异质结构的 TiB-TiC/Ti6Al4V 复合材料。结果发现，该双异质结构复合材料展现出优异的强度-塑性协同，应变硬化行为更稳定，其均匀延伸率较沉积基体合金高 32%；通过原位拉伸表征、第一性原理计算等方法，研究了双异质结构钛基复合材料的组织演变规律、位错运动行为、强韧化机制等，确定了 TiBw 和相邻的 α-Ti 两者之间的最优取向关系（OR）（58.91◦/ [010]TiB），其计算界面结合强度超过 0 ?[010]TiB 取向关系，有效提升了 TiB 的承载能力，为原位合成具有良好力学性能的钛基复合材料的双异质结构提供了科学指导。

C06-12

级配分级构型 TiCp/高锰钢复合材料的力学性能和耐磨性

卢德宏*，何涛，蒋业华

昆明理工大学

陶瓷颗粒增强铁基复合材料已经广泛应用于耐磨材料领域。为了进一步提高其在高冲击和和高应力磨料磨损工况下的耐磨性，本研究开发了球形级配分级构型复合材料，其中同时采用多种直径的复合球组成级配增强体。采用挤压铸造浸渗技术制备了 TiCp/高锰钢二级（2mm+4mm）级配分级构型复合材料，对比单级构型复合材料，研究了其力学性能和在宽域冲击功下的磨料磨损性能。研究详情及结果如下：（1）压缩力学性能检测表明，双级级配构型的抗压强度（1308.6 MPa）和屈服强度（834.3 MPa）均比单级级配复合材料更高，较均匀分布复合材料分别提升了 23.9%和 40.5%。（2）通过预制体中添加活化微粉（FeV、FeTi 粉），以研究复合区基体对复合材料力学性能的影响。FeV 添加量对复合材料的抗压强度呈现先增加后减小的趋势，最佳抗压强度为 1462.1 MPa（添加量为 2.5%），较未添加 FeV 的复合材料提升了约 11%。FeTi 添加量增加时，抗压强度逐渐增加，最佳值为 1261.1 MPa（添加量为 5%）。屈服强度随 FeTi 添加量增加而提升，最大值为 1091.2 MPa，较未添加 FeTi 的复合材料增幅约为 30.8%。（3）不同冲击功下磨料磨损实验结果表明，冲击功显著影响复合材料的磨损形式和性能。1 J 低冲击功下，磨损以微切削为主；3 J

冲击功下，磨损转变为深切削为主；5 J 高冲击功下，磨损则以凿削为主。在不同冲击功下，双级级配构型复合材料都展现出最佳的综合耐磨性能，较基体材料的耐磨性分别提升了 1.45 倍、1.91 倍和 1.40 倍，在不同冲击功下都显示了良好的耐磨性能。

C06-13

陶瓷相增强近 α 钛基复合材料的构型与组织调控研究

李莲*，马盼盼，张凌，杜志远，李淼泉

西北工业大学

近 α 钛合金在 500-650℃下保持高强度、优异的抗蠕变和抗氧化性，在航空发动机与飞机结构件中应用广泛。在近 α 钛合金中添加陶瓷相制备的钛基复合材料相较于其基体钛合金使用温度可提高 100℃以上，是航空航天领域关键构件必选的耐热轻质金属结构材料之一。本研究通过调控增强体组分与工艺参数，在近 α 钛基复合材料中实现了陶瓷相的非连续网状与随机分布构型；通过优化工艺参数，在近 α 钛基复合材料中实现了钛合金基体的双峰晶粒尺寸分布；在此基础上，阐明了陶瓷相增强近 α 钛基复合材料中陶瓷相构型演化与基体组织演变机理及其力学性能提升的内在机理，为高性能陶瓷相增强钛基复合材料制备及应用提供了理论借鉴。

C06-14

以复合材料为媒介的微量纳米颗粒强化高铬模具钢热疲劳行为

杨宏宇，董柏欣，李传德，邱丰*，姜启川

吉林大学

简单、高效、低成本手段提高模具钢高温服役寿命具有重要学术及应用价值。本工作以含有原位内生自分散纳米颗粒的复合材料为媒介，突破纳米颗粒强化金属材料难引入、难分散、易污染瓶颈，通过微量纳米颗粒调控及高 Cr 元素协同提高模具钢 Cr2O3 层致密度和高温抗氧化能力，同时抑制元素偏析、降低热裂倾向。纳米颗粒强化高铬模具钢具有更细的板条马氏体和碳化物以及更高的位错密度，提高室温性能的同时，有助于钉扎晶界和相界面以阻碍晶界滑移，提升高温强度、提高马氏体高温稳定性和抑制马氏体脱溶，改善热疲劳循环过程中微观组织粗化现象，提高了抗循环热老化能力。进一步研究了纳米颗粒强化高 Cr 模具钢的热疲劳裂纹萌生和扩展、微观组织演变及热疲劳前后室温、高温力学性能变化规律，揭示了微量纳米颗粒强化高铬模具钢热疲劳后使役性能演变规律及抗热疲劳机制，为开发高品质、高寿命、低成本模具钢提供新途径。

C06-15

三维结构预制体与基体成分对 WC/钢铁基复合材料的微观组织与磨损性能的影响

吴迪，李祖来*，张飞，石一凡，杨林

昆明理工大学

陶瓷颗粒增强金属基复合材料常因复合层薄、颗粒易剥落和磨损过程不稳定等问题而降低综合应用性能。本研究采用铸渗工艺制备了具有不同三维结构预制体及不同基体成分的 WC 钢铁基复合材料，并探讨了预制体三维结构以及高铬铸铁与铸钢等基体对复合材料微观组织与磨损性能的影响机制。通过实验分析以及第一性原理计算，发现 WC 钢铁基复合材料的微观组织主要由 WC、W2C、Fe6W6C、和 M7C3 型碳化物组成，同时在复合层观察到未完全溶解的 WC 颗粒以及絮状分布的 Fe6W6C 过渡层，其与 Fe 基体的半共格界面（N-W 类型）显著提升了结合强度，界面处 W-W 键的平均键合强度最高（0.53 键合强度，键长 2.83 Å）。在不同基体条件下，高铬铸铁基体的复合材料在三体磨料磨损中表现出最低磨损失重量（0.0753g，较高锰钢、高碳钢分别降低 32.90%和 17.76%）和表面粗糙度（3.33667 μm），磨损机制以微切削-塑性变形为主，主要由于其 WC 颗粒的高硬度以及与高铬铸铁基体良好的结合界面。在此基础上，预制体为六边形结构时的 WC/高铬铸铁基复合材料在硬度（基体 921.7 HV，复合层 1450.4 HV）、摩擦系数（0.51）及磨损失重量（0.21g）方面表现最优，结合有限元模拟分析进一步验证 WC 颗粒与 Fe 基体形成了良好的冶金结合。该项研究为金属基复合材料的三维预制体设计和基体选择提供了理论依据与优化方向。

C06-16

原位制备碳纳米增强金属基复合材料研究

张楷浩*

香港科技大学（广州）

高性能金属基复合材料（MMCs）的研发面临重大挑战，尤其在高品质增强体的引入与多尺度复杂异质结构制备方面。本研究以石墨烯-MMCs 为例提出两种原位自生碳纳米增强 MMCs 的新方法：第一种针对柔性电子用薄膜纳米复合材料。传统超薄金属膜因断裂韧性差，在大变形下导电性急剧劣化。我们开发了化学气相沉积（CVD）在微纳尺度金属种子表面原位合成少层石墨烯包裹层的技术。以预先设计马蹄形图案的超薄钯膜为例，CVD 生长的钯-石墨烯薄膜展现出显著优化的机电性能：当拉伸应变超过 60%时，其电导率上升速率远低于裸钯膜在 30%应变下的骤增现象，且在 20%应变幅度的循环拉伸下疲劳寿命延长 2-10 倍。

第二种方法面向碳纳米增强 MMCs 的宏量化制备，开发了基于激光粉末床熔融（L-PBF）增材制造的 MMCs 原位自生复合技术。以镍为基体，在粉末床中引入固态碳前驱体，通过精确控制打印过程温度分布及其调控的碳扩散与析出过程，实现了每层打印层（包括复杂外表面）上均匀连续的多层石墨烯生长。同样的方法在铜、铝、不锈钢、钛等基体上得到了验证。初步力学测试表明，石墨烯-镍复合材料的极限抗拉强度和均匀延伸率较纯镍分别提升>100%和>50%。本研究发展的原位石墨烯合成技术显著提升了 MMCs 的力学与电学性能，有望在柔性电子器件和先进结构部件领域展现实际应用前景。

C06-17

WC 陶瓷颗粒增强金属基复合材料的微观组织、强度及磨损性能研究

张飞*，李祖来，韦贺，种晓宇，山泉

昆明理工大学

以 WC 陶瓷颗粒增强金属基复合材料为研究对象，通过粉末冶金和铸造工艺制备了不同金属基体的复合材料，对复合材料的微观组织进行表征，测试了复合材料的硬度、强度等力学性能和磨损性能。结果表明：WC 陶瓷颗粒增强 CoNi 基复合材料的物相组成主要为 WC、W2C、Co3W3C 和 Ni2W4C。TEM 显示 W2C 晶面（0111）间距为 0.2276nm，Co3W3C 晶面（311）间距为 0.3355nm，第一性原理计算表明在 W2C/Co3W3C 界面上形成了强烈的 C-Co 共价键和 W-W 金属键。随着 Ni/Co 含量从 10%增加到 30%，WC-NiCo 合金的抗压强度和应变逐渐增加，屈服强度降低。最大强度为 1116 MPa，最大应变为 25.9%。WC 合金的摩擦磨损性能随 Ni/Co 含量的增加呈先增加后减少的趋势，最佳摩擦磨损性能表现为摩擦系数为 0.178，磨损率为 0.95· 10-5mm3/N ₥。当 WC 合金与钢铁基体铸造后形成的复合材料物相主要包含 WC、Fe3W3C、M7C3，不同工艺下复合材料的磨料磨损性能也不同，磨损形貌主要为犁沟、剥落、粘着等特征。相关研究为陶瓷颗粒增强金属基复合材料奠定理论基础。

C06-18

极端服役环境 X 射线显微 CT 在金属基复合材料领域的开发与应用

李仁庚*，戴峰

南京工业大学

随着轻质合金材料在航空、航天、军工等关键领域的应用，在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、定量化、数字化原位研究，成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描（CT）技术，结合亚微米级精密控制转台和机械控制，可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块（拉伸/压缩/弯曲/疲劳），构建热-力耦合系统，实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下轻合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 CT 设备的成功研发，将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C06-19

碳纳米管增强高温合金基复合材料制备及性能研究

韩子健*，马立勇，陈佳俊，张一欣，孟宝，万敏
北京航空航天大学

随着飞机马赫数的提升，传统高温合金逐渐难以满足航空发动机对材料高温力学性能的需求。在金属材料中加入纳米增强相可以显著提升材料的力学性能、耐磨性能及热稳定性。本研究选用多壁碳纳米管和GH4169 材料作为增强相和基体，采用放电等离子烧结工艺，制备不同增强相含量的碳纳米管增强高温合金基复合材料，通过压缩实验、弯曲实验、微观分析实验研究其宏微性能，以及多壁碳纳米管含量对材料致密化的影响。结果表明当含量为 1%时会降低复材相当密度，当碳纳米管含量为 0.5%时对复合材料相对密度的影响可以忽略不计，此时制备的材料也表现出优异的力学性能，其抗折强度为 1090 MPa，抗压强度为 1523 MPa。最后基于本工艺参数提出一种叶片放电等离子烧结成形模具设计及成形工艺方法，实现复合材料叶片的近净成形。

C06-20

MAX 蜕变原位自生 TiC-Ni3(Al,Ti)跨尺度协同强化 Ni 基复合材料结构及性能研究

胡文强*，黄振莺，于文波，周洋
北京交通大学

随着航空航天技术的快速发展，传统的镍基合金已无法满足日益严苛的服役要求，因而急需发展一种集轻质、高强韧、耐高温、抗烧蚀、长寿命于一体的镍基高温复合材料。基于此，本文探索以三元层状化合物 MAX 陶瓷为前驱体，利用粉末冶金结合原位反应烧结技术，成功制备原位自生亚微米二元碳化物（TiC/Cr3C2）陶瓷和纳米 L12 型金属间化合物(Ni3(Al,Ti)，Ni3(Al,Cr))复相协同增强的镍基复合材料；研究了 Ti2AlC 先驱体含量对复合材料微观组织的影响规律；揭示了 TiC 和 Ni3(Al,Ti)增强体与 Ni 基体之间的界面取向关系和强化机理；阐明了热处理工艺对复合材料组织和性能的影响机制；最后，利用原位自生超细 TiC 颗粒增强作用，进一步提高了镍基高温合金 Inconel718 的高温力学性能。研究结果表明：

(1) 原位自生的 TiC 与 Ni 基体之间的晶格错配度为 6%，为半共格界面，Ni3(Al,Ti)纳米析出相与 Ni 基体界面之间为共格界面；TiC 和 Ni3(Al,Ti)与 Ni 基体的界面取向关系可以表示为：[001]TiC//[011]Ni、(020)TiC//(111)Ni 以及[100]γ′//[100]γ、(010)γ′//(010)γ。

(2) 复合材料中 Ni3(Al,Ti)的形貌和尺寸可以通过后续的固溶和时效处理进行 调控。对于热压烧结 30 vol.% Ti2AlC/Ni 制备的 TiC-Ni3(Al,Ti)/Ni 复合材料，经过 1200 oC 固溶处理 1 h 以及 750 oC 时效 20-100 h 之后，纳米级的 Ni3(Al,Ti)不断从基体中析出并逐渐长大。随着时效时间从 20 h 增加到 100 h，Ni3(Al,Ti) 颗粒从 43 nm 长大至 75 nm。共格的 Ni3(Al,Ti)作为 Ni 基体的沉淀强化相，有效提高了基体的高温强度和热稳定性。

C06-21

电磁冲击处理对 M50 轴承钢表面氧化锆涂层复合材料微结构与性能影响研究

许云哲[1,2]，胡泽启[1,2]，谢乐春[1,2]
1. 高温轻合金与应用技术全国重点实验室
2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室

M50 (8Cr4Mo4V) 轴承钢作为高性能航空发动机主轴轴承的关键材料，其表面性能（如硬度、耐磨性）对轴承的服役寿命和可靠性至关重要。表面涂层是提升其性能的有效途径，氧化钇稳定氧化锆（YSZ）陶瓷涂层因其优异隔热性能备受关注。本研究是探讨电磁冲击处理技术对 M50 钢表面氧化锆涂层复合材料微结构与性能的影响规律。采用等离子喷涂方法在 M50 轴承钢基体表面制备氧化钇稳定氧化锆涂层，由于 YSZ 涂层和 M50 基体差异性较大，加入 CrNiAlY 作为过渡层。改变喷涂电流和距离，优化最佳工艺参数。研究结果表明，当电流为 650 A，喷涂距离 130 mm 时，YSZ 涂层与基体结合良好，表现为涂层厚度均匀（410.6±4.2 μm），无明显缺陷。为了优化复合涂层与基体的结合性能、采用电磁冲击处理，通过改变电磁冲击时间，研究涂层和界面微观组织和性能的变化。该方法为轴承表面强化和改善热障性能提供一种优化途径。

C06-22

金属基复合材料压力浸渗技术创新与展望

武高辉

哈尔滨工业大学

制造技术是材料研究的基础和前提，压力浸渗方法相比于粉末冶金法、搅拌铸造法，适用于长纤维、点纤维、颗粒增强体，因此更容易实现材料的可设计性。作者研究压力浸渗技术近 40 年，本文介绍作者发明的大气环境下的压力浸渗与成型技术和真空环境下的压力浸渗与净成形技术，介绍发明过程的体会和收获，与大家共同学习提高。

C06-23

空间高精度指向机构用可调热膨胀系数硅铝复合材料研究

虞红*

宇航空间机构全国重点实验室

对硅铝复合材料用于空间高精度指向机构进行了研究，利用其低热膨胀系数、密度小等优点，用于高低温环境下精度要求较高的指向机构。通过仿真分析、产品研制和试验，确定硅铝复合材料可用于空间指向机构，能减轻产品重量，提高了产品的指向精度和可靠性。

C06-24

原位反应铝基复合材料组织与性能调控研究

赵冬冬*，戎旭东，张翔，何春年，赵乃勤

天津大学

金属基复合材料具备高比刚度、高比强度、耐热等不可替代的优势，是支撑我国经济腾飞和国防发展不可缺少的关键基础材料。其中，铝基复合材料以其显著的轻量化优势和优异的力学性能，在空天/武器装备、交通运输等重大战略和工程领域发挥着至关重要的作用。铝基复合材料增强相及增强相-基体界面特性是其高性能化的关键，然而目前其强度、塑韧性等性能渐趋瓶颈，组织设计也面临新的挑战。本研究立足原位反应，围绕铝基复合材料中纳米增强相的原位构筑、组织构型化、界面特性调控、强韧化机理等关键科学问题展开研究，实现了增强相特性、组织构型以及增强相-基体界面等复材组织的精细调控，提升了铝基复合材料综合力学性能，并发展了相应的强韧化机制。本研究为高强韧铝基复合材料的组织设计与性能调控提供了理论基础

C06-25

MAX 驱动铝基复合材料多尺度构型设计、显微组织调控及强韧化机制

黄振莺*，庄慰慈，吴友波，胡文强

北京交通大学

针对轨道交通与汽车工业对高强韧、轻量化材料的迫切需求，提出基于 MAX 陶瓷驱动的铝基复合材料多尺度构型化设计方法，构建三维准连续网状结构的多相增强体系。通过第一性原理计算深入揭示MAX(Ti3AlC2、Ti2AlN)与铝基体原子尺度的反应机理与界面结构演化特征；利用有限元模拟研究不同结构参数及近界面微区的力学响应，建立结构-性能预测模型；同时采用先进的跨尺度精细表征手段，系统阐明多相增强体之间的协同强化机制，提出显微组织调控策略。并优化相关制备方法和热处理、热加工工艺，实现高强韧准连续网状结构(MAX-Al3Ti)/铝基复合材料的可设计与可调控。

C06-26

多模态晶粒构型与纳米相晶内化：Al-Mg 基复合材料高强与高塑的调控策略探索

谭占秋，郭峙岐，范根莲，李志强，张荻

上海交通大学金属基复合材料全国重点实验室

针对铝基纳米复合材料的强塑性失配问题，基于粗-细晶微区匹配设计与界面应变梯度调控的异构强韧

化研究，近年来成为该领域的研究热点之一。然而，为了获得粗晶与细晶微区之间大的强度、塑性差异，以发挥非均质塑性变形诱导的（HDI）强化与硬化效应，现有研究均聚焦于 2 系、7 系等高强铝合金体系。针对 5 系、6 系中强铝合金，该如何设计构筑多模态晶粒构型、实现有效的异构强韧化？本研究以不能热处理强化的 Al-Mg 合金体系为对象，通过控制超细晶微区弥散分布高数密度晶内纳米颗粒，诱导形成高数密度 Al-Mg 相实现析出强化，并与粗晶微区序构形成双模态晶粒构型获得高塑性；制备的 1.5%CNT/Al-5Mg 复合材料的屈服强度可达 653 MPa，并保持了 9%的均匀延伸率。本研究将为高比模量、高强塑性匹配的铝基纳米复合材料研究提供一种新思路。

C06-27

互扩散构筑 Ti@Ti5Si3 核壳结构增强铝基复合材料及其组织演变对性能的影响

张鑫*，李鑫，王渊博，王军，李波，李树丰

西安理工大学

钛硅金属间化合物增强铝基复合材料（AMCs）因具有轻质、高比强度比模量以及优异的耐热和尺寸稳定等特性在关键装备轻量化领域展现出广阔的应用前景，近年来受到广泛关注。针对铝基复合材料中原位自生钛硅金属间化合物因成分及结构不易控制以及与基体变形不协调而导致强化效果不理想的瓶颈难题，本研究通过合金成分与工艺设计，利用粉末冶金过程中增强相形成元素在基体中的固溶和偏析，通过界面浓度梯度诱导 Ti-Si 互扩散反应，实现了 $Ti@Ti_5Si_3$ 核壳结构增强相的原位构筑，系统阐明了 Al-Si-Ti 原位复合体系中强化相的转变规律，为其微观结构的精确调控提供了理论参考。随着 TiSi 过渡层的形成，复合材料的界面结构由 Al/Ti_5Si_3 非共格界面转变为 $Al/TiSi/Ti_5Si_3$ 共格/半共格梯度界面，有效提升了界面结合，为载荷传递与应力再分配提供通道，有效抑制了界面微裂纹的萌生与扩展从而改善了 AMCs 协调变形能力，因此赋予了 AMCs 良好的强韧性匹配效果。本研究为原位自生钛硅金属间化合物增强 AMCs 组织与性能调控提供了坚实的实验和理论基础。

C06-28

增强相晶内分布型金属基复合材料制备与强化行为

陈彪*，曹遴，杨经纶，周鑫毅，李金山

西北工业大学

细小增强相易在金属晶界甚至是一次粉末边界团聚，导致材料组织性能恶化，是制约金属基复合材料发展与应用的重要难题。本报告梳理了作者进十年来在粉末冶金铝基与钛基纳米复合材料制备与强韧化行为的研究结果，提出了大塑性变形和原位反应两种方法制备超细增强相晶内分布的金属基复合材料，对比研究了晶内分布主导和晶界分布主导的碳纳米管增强铝基复合材料的宏/微观力学行为，实现了优异强塑性匹配铝基、钛基复合材料的制备，分析了新型晶内原位 TiC 增强钛基复合材料的形成机理，探讨了新型增强相晶内分布金属基复合材料的强化机制。

C06-29

铝基碳纳米管复合材料激光复合焊接工艺及焊缝力学性能调控研究

刘福运*，檀财旺，宋晓国，冯吉才

哈尔滨工业大学（威海）

在我国“双碳”战略目标背景下，铝基碳纳米管复合材料被认为是理想的轻量化结构材料，在航空航天、轨道交通等领域具有重要应用前景。然而，铝基碳纳米管复合材料在熔化焊接时易于出现焊缝脆化、气孔缺陷等问题，严重制约了该材料的应用推广。因此，如何利用工艺+冶金进行焊缝微观组织调控，抑制焊缝脆性相和气孔缺陷的生成，有效提升熔化焊接头强韧性成为目前研究热点。本研究系统阐述了针对铝基碳纳米管复合材料焊缝的工艺及冶金调控结果，为进一步推动铝基碳纳米管复合材料的可靠应用提供理论和技术支持。

C06-30

颗粒增强金属基复合材料构效关联与机器学习研究

苏益士*，柴绪顺，刘旭阳，张鑫，李明宇，欧阳求保，张荻
上海交通大学

为满足不同领域对颗粒增强金属基复合材料的应用需求，深入刻画其构效关联成为关键挑战。传统多尺度模拟方法在解析复杂构效关联时面临困难，而机器学习方法凭借其强大的数据挖掘和模式识别能力，能够深入地发掘复杂构效关联。本研究采用有限元方法对颗粒增强金属基复合材料进行建模拟实，构建基于卷积神经网络与长短期记忆网络结合的深度学习模型，预测宏观力学性能并解析复合构效关联；采用粒子群优化算法，进行复合材料目标性能逆向设计，深化对复合构型强韧化效应的理解，为高性能金属基复合材料的研发提供指导。

C06-31

SiCp/Al-Cu-Mg 复合材料的界面特性研究

郝世明*，刘鹏茹，吴浩展，潘爱琼，王爱琴，谢敬佩
河南科技大学

提升铝基复合材料的强韧性，破解强度-塑性、韧性以及热学性能之间的矛盾是复合材料开发的关键科学问题。本工作以粉末冶金法制备中高体积分数 SiCp/Al-Cu-Mg 复合材料为研究对象，重点介绍了铝基复合材料的界面调控策略及特性，提出了 SiC 颗粒高温氧化+镁含量适量调控的界面反应层原位制备技术，制备出了具有核壳包覆结构的 SiC@ MgAl2O4 增强铝基复合材料，实现了 SiC/Al 复合材料强度和塑性的同时提高。本研究探明了增强体体积分数、铝合金基体以及热处理工艺等因素对界面结构的调控方式及影响规律，揭示了复合材料的界面结构、界面结合、基体微观结构对材料微观变形行为的影响机制。本研究为轻质、低膨胀、高强度铝基复合材料的工程应用提供了理论依据和技术支撑。

C06-32

铝基体中 Mg 诱导的 AlB2 颗粒向 MgAlB4 晶须转变的热力学与动力学机制

王夫成*[1]，师春生 [2]，赵乃勤 [2]，郑士建 [1]
1. 河北工业大学
2. 天津大学

晶须增强金属复合材料因其优异综合性能成为当前金属基复合材料领域的研究热点。本研究针对传统复合材料中晶须分散及界面结合难题，提出通过原位相变策略实现 AlB2 颗粒向 MgAlB4 晶须转变。通过创新性地在 Al-B 二元体系中引入镁元素，成功调控了硼化物的形态演变过程。采用 SEM、TEM、显微 CT 及第一性原理计算等多尺度分析方法，系统揭示了硼化物晶须化转变的微观机理及其对材料力学性能的影响规律。研究发现，尽管 AlB2 与 MgAlB4 均与铝基体保持[1-100]B//[011]Al，(0001)B//(1-11)Al 的取向关系，但晶格错配度差异引发的界面应变能变化是驱动晶须形态转变的关键因素，在应变能和扩散动力学共同作用下硼化物形貌实现了由颗粒到晶须的转变。晶体本征生长特性与界面化学能的作用相对有限。硼化物晶须化转变虽然会促使复合材料强度大幅提升，但导致断裂方式改变，裂纹容忍度降低，最终导致塑性损失。以上研究结果对高性能金属基复合材料设计具有重要指导意义。

C06-33

冷变形诱导 Al/Gd_2O_3(M)复合材料界面优化与强塑性协同机制研究

刘宇飞，王健*
有研工程技术研究院有限公司

本研究通过高温煅烧将Gd_2O_3由立方相转化为单斜相（M），结合热等静压烧结制备含 5–15wt%Gd_2O_3(M)的 6063Al 复合材料，并利用多道次冷轧优化其性能。结果表明，含 10 wt%单斜相 Gd_2O_3的材料热中子屏蔽性能与 Al/30wt%B_4C 常规材料相当；热等静压态中，Gd_2O_3颗粒沿晶界形成网状结构，其富集区提升应力承载能力，贫化区维持延展性，使 15 wt%样品仍保有 25%以上的延伸率；冷轧后单斜相颗粒通过硬质颗粒的钉扎效应促进几何必要位错增殖，同时 Mg/Si 元素在增强相附近的偏析实现了位错存储密度的上升

（位错密度提升 40%），实现抗拉强度 289 MPa、屈服强度 234 MPa 与延伸率 8.0%；大变形量诱发晶面偏转形成半共格界面（错配度 4.7%），并显著抑制织构强度（较文献值降低 26%），协同优化塑性与各向异性。该工作通过相变-轧制协同策略优化了 Al-Gd 复合材料的强塑性匹配，为核屏蔽结构部件开发提供新途径。

C06-34

复合增强结构优化辅助开发高强韧耐热铝基复合材料

尹海龙，赵冬冬，何春年*，赵乃勤

天津大学

高强韧铝合金及其复合材料具有高比强度、比模量、可设计性好等优点作为关键轻质结构材料广泛应用于空天国防、汽车电子和海洋装备等重点领域，而在面临高温、高辐照等极端服役条件下强度低、易高温软化而无法满足日益严苛的性能需求。纳米颗粒因其超高热稳定性可成为开发具有优异耐热耐辐照性能的核心铝材构件的有效策略之一。本研究立足于多种纳米复合结构的制备和优化，辅以粉末冶金技术协同调控空间分布，优化多尺度纳米颗粒在基体中均匀弥散分布，实现室温高强和高温耐热性能的同步提升。通过这种策略成功开发了性能优异的高强耐热铝基复合材料，室温极限抗拉强度可超过 700MPa，相比于纯 Al 基体提升 250%以上，同时 300℃高温条件下极限抗拉强度超过 360MPa。本工作的初步探索为超高强韧、耐热铝合金及其复合材料的设计、突破性能上限提供了理论指导和新思路。

C06-35

FSP 工艺制备 VGCF/7075Al 基复合材料的性能评价

董嘉润[1]，许哲峰*[1,3]，贾子钖[1]，李艺君[1]，吕宏研[1]，孙浩[1]，王妍[1]，祝萌莹[1]，付瑞东[1]，佐佐木元[2]，于金库[1]

1. 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

2. 广岛大学先进理工系科学研究科

3. 燕山大学河北省金属产品工艺与性能综合优化实验室

随着航空航天、汽车制造等领域的迅速发展，传统的 7075Al 合金无法满足越来越高的强度、耐磨性等方面要求。本研究采用搅拌摩擦加工（FSP）工艺制备了气相生长碳纤维(VGCF)增强 7075Al 基复合材料(VGCF/7075Al)。通过改变 FSP 工艺参数，探究旋转速度和行进速度对 VGCF/7075Al 基复合材料的微观组织及力学性能的影响，同时也进行了 VGCF/7075Al 基复合材料的摩擦磨损性能的测试。研究结果表明，当搅拌头旋转速度为 600 rpm、行进速度为 25 mm/min 时，得到的复合材料成型较好，无宏观缺陷，机械性能优良。其极限抗拉强度、断裂应变、维氏硬度分别为 579.0 MPa、10.2%、185.9 HV。相较于 7075Al 合金的极限抗拉强度、维氏硬度分别提升了 6.2%、16.1%。VGCF/7075Al 基复合材料的平均摩擦系数为 0.62，比磨损率为 $6.3\times10^{-6}cm^3/N\times m$，相较于 7075Al 合金平均摩擦系数降低约 16.2%，比磨损率降低 4.5%，磨痕宽度及深度减少 9.4%和 26.3%，其磨损机制在 15N 载荷下以磨粒磨损为主。

C06-36

高强韧层状铝基复合材料的制备与性能

张纪东，张学习*，钱明芳，耿林

哈尔滨工业大学

构型化设计，尤其是层状结构，可实现多种强化和韧化的多机制协调，从而提高金属基复合材料（MMC）的综合力学性能。在这里，通过冰模板法结合挤压铸造制备了具有层状结构的 20vol.%(TiBw-TiB2p)/2024Al 复合材料，通过 Ti 和 TiB2 之间的原位反应(Ti+TiB2→2TiBw)将 TiB 晶须（TiBw）引入复合材料，从而显著降低了（TiB2p-TiBw）预制体的烧结温度，并提高了预制体的压缩强度。研究发现，富陶瓷层的引入抑制了富铜相的固溶，加速了铝基体的时效行为。最佳固溶和时效条件分别被确定为 510 ℃-2h 和 160 ℃-16h，最佳压缩强度、弯曲强度和裂纹扩展韧性，分别为 886.5MPa、709.8MPa 的和 36.1MPa.m1/2。优异的力学性能得益于互穿的层状结构，其提高了 Al 基体的抗变形能力，改善了 Al 基体和富陶瓷层之间的变形协调。

高断裂韧性归因于多种外在增韧机制，如界面分层、裂纹偏转、裂纹钝化、多裂纹扩展和 TiBw 拔出。

C06-37

高强韧可焊原位纳米强化稀土铝合金研究

赵玉涛*

江苏大学

B4C/Al 复合材料以其低密度、高强度、高中子吸收能力等特性，是理想的轻质结构材料和中子吸收材料。然而，陶瓷增强体和基体之间的热膨胀系数失配和弹性模量失配，不可避免的将基体分割为近界面的位错强化区和远界面的未强化区，造成受力变形过程中基体微区协同变形难而产生应变局域化、大幅降低塑韧性。此外，由于陶瓷增强体润湿性差、Al 熔体表面氧化膜阻碍增强体引入、以及陶瓷增强体易与 Al 反应生成有害相，制约了低成本“熔体搅拌法”制备 B4C/Al 复合材料的推广应用。研究提出通过原位自生的方法，在复合材料基体中未强化微区引入纳米 ZrB2 颗粒，实现近界面的位错强化区和远界面的纳米颗粒强化区协同变形，来制备高强韧的(ZrB2+B4C)/Al 复合材料。

C06-38

高防护高耐候性铝基复合装甲防护材料设计及应用

姜龙涛*，晁振龙，陈国钦，武高辉

哈尔滨工业大学

随着反装甲武器技术的高速发展，武器装备的战场生存能力对装甲结构材料性能提出了更高的要求。在车辆基体装甲大幅减薄、抗冲击毁伤能力显著降低的不利条件下，装甲车辆的防护指标要求进一步提升。由陶瓷、纤维和金属等多组元材料组合形成的陶瓷复合装甲结构由于各层材料性质差别大、层间声阻抗失配严重以及高分子材料的存在，使得其抗多发弹性能和耐候性难以满足未来战场的发展需求。本研究以多尺度陶瓷相为增强体，设计并制备了仿生阵列梯度铝基装甲结构材料，突破了材料的大尺寸、高品质和低成本模块化制备技术。抗弹性能结果表明，仿生阵列梯度 B4C/Al 复合材料在实现减重 20%、损伤面积降低 80%的同时，还提升了装甲结构的耐候性，使得装甲结构服役温度提升至 105℃以上。该研究为极端温度环境下装甲防护材料的设计和应用提供了技术和材料支撑。

C06-39

Miura 折纸状石墨烯/铝纳米复合材料的纳米压痕力学性能

李多生[1,2,3], 余欣秀[1]，李如峰[1], 秦庆华[4]

1. 南昌航空大学材料科学与工程学院

2. 轻质航空先进材料研究所

3. 航空用构建热加工与表面技术教育部重点实验室

4.深圳北理莫斯科大学

石墨烯/金属基复合材料的力学性能存在强度与韧性的失配关系。本研究通过构建 Miura 形折纸状石墨烯/铝纳米复合材料(GOri/HEA nanocomposites)来实现强度与韧性的协同效应。对复合材料在纳米压痕载荷作用下的力学行为展开模拟研究。分析对比单晶铝、石墨烯/铝复合材料、折纸状石墨烯/铝复合材料以及折纸状石墨烯与平整石墨烯协同的铝基复合材料的载荷-位移曲线、原子微观结构演变等情况，揭示 GOri/Al nanocomposites 的强化增韧机理。探讨了压头速度和压头半径对 GOri/Al nanocomposites 力学性能的影响。结果表明：与石墨烯/铝基复合材料（Gra/Al nanocomposites）相比，GOri/Al nanocomposites 的断裂韧性提升了 35%，承载能力提高了 22%。在 Gra/Al nanocomposites 中，石墨烯在压入深度 49.8Å 时发生断裂失效，导致增强相失效；而 GOri/Al nanocomposites 中的折纸状石墨烯在压入深度 55Å 时仍保持完整，并呈现独特的展开过程。折纸状石墨烯依靠固有属性和妨碍位错运动提高了材料的强度，其应力沿四周分布，山脊折痕部分承受更多的应力，能更好的分散应力集中，提高了材料的韧性。较大半径的压头会与更多折纸状石墨烯相互作用，致使载荷承载能力提高，而压头半径小能造成高原子应变和高的应力集中，表现出“几何尺寸效应”，从而硬度显著提高。较高的压入速度时，增强了 GOri/Al nanocomposites 的抗变形

能力。增加压头速度会导致 GOri/Al nanocomposites 体系产生加工硬化，复合材料的硬度进一步的增加。本研究为新型铝基纳米复合材料的设计与开发提供了新的理论分析与设计思路。

C06-40

SiC 颗粒与原位纳米 Al_2O_3 颗粒混杂增强铝基复合材料的制备与力学性能

陈刚，李蒙蒙，赵玉涛，怯喜周

江苏大学

原位纳米 Al_2O_3 颗粒对铝基复合材料的力学性能有重要影响。本文将熔体反应生成的纳米 Al_2O_3 颗粒引入 SiC_p/A356 复合材料中，成功制备了 SiC 颗粒与原位纳米 Al_2O_3 颗粒混杂增强铝基复合材料，并对其室温和高温力学性能进行了研究。结果表明，通过熔体分散技术，可以将反应物煅烧高岭土均匀分散于铝熔体中，并通过熔体高温反应获得约 30 nm 的 α- Al_2O_3 颗粒；当 α-Al_2O_3 颗粒体积分数为 1.5vol.%时，A356 基体的 α-Al 晶粒尺寸从 70.4μm 减小到 49.7μm；在 α-Al_2O_3 颗粒体积分数为 1vol.%时，$(Al_2O_3+SiC)_p$/A356 复合材料的常温和 250℃高温抗拉强度达到最高，分别比相应的 SiC_p/A356 复合材料提高 29.3%和 62.7%。

C06-41

纳米碳构型主导的铝基复合材料强化和变形行为研究

陈小丰*，陶静梅，徐尊严，陆琼，付丽，易健宏

昆明理工大学

由于碳纳米管（CNT）内壁间较弱的层间剪切强度限制了有效的承载传递强化能力，使得内壁优异的力学性能难以充分发挥。为解决这一关键问题，本研究创新性地提出纳米碳构型工程，通过将纵向切割将多壁 CNT 制备成石墨烯纳米带（GNR），并将其用于增强纯铝（Al）基体。实验结果表明：应力松弛实验证实，随着增强体从 CNT 转变为 GNR，复合材料在宏观屈服点的活化体积呈现单调递减趋势，由 CNT 到 GNR 结构演变导致位错发射所需的临界分辨剪切应力（CRSS）持续增加。结合剪切滞后模型和数值模拟，证实 GNR/Al 体系具有更显著的载荷传递效应。结合加载-卸载-再加载试验和基于位错理论的应变硬化模型发现：塑性变形过程中，纳米碳/Al 复合材料中各向同性硬化均强于动态硬化，有效应力始终高于背应力，由 CNT 向 GNR 的结构转变促进了纳米碳/Al 界面位错积累，显著增强了背应力强化能力。原位 SEM 拉伸试验表明，随着 CNT 向 GNR 的结构转变，复合材料中增强体的主要失效模式由拔出转变为断裂。

C06-42

隧道成形辅助静轴肩搅拌摩擦加工制备 SiCp/2024Al 复合材料的显微组织、力学与摩檫学性能

夏传超[1]，李瑞茹[1]，刘小超*[1]，孙文文[2]，金学诚[2]，陈彪[3]

1. 东南大学机械工程学院

2. 东南大学材料科学与工程学院

3. 西北工业大学材料学院

针对常规搅拌摩擦加工技术制备非连续增强金属基复合材料存在的颗粒溢出、分布不均等问题，提出了一种隧道成形辅助静轴肩搅拌摩擦加工新技术。本研究以 10vol%的 SiC 颗粒增强 2024 铝基复合材料为目标，分别采用隧道成形辅助静轴肩搅拌摩擦加工与常规搅拌摩擦加工制备复合材料并对比。同时，研究了新技术制备的复合材料在 T6 热处理前后的微观结构、力学性能和摩擦学性能。结果表明，静轴肩搅拌摩擦加工制备的复合材料中 SiC 颗粒分布更为均匀，无颗粒团聚，加工过程无颗粒溢出，制备完成后工件无减薄。T6 热处理前，在 SiC 颗粒周围检测到 Si 元素与 Al 元素的扩散，结合 XRD 结果，认为界面处有 Al_4C_3 生成。同时，在复合材料中观测到粗大的 Al_2CuMg（S 相），这与加工过程中反复的热循环有关。粗大 S 相的形成消耗了基体中的合金元素，导致复合材料的硬度、屈服强度及抗拉强度降低，分别为母材的 73.3%、68.4%及 76.4%。T6 热处理后，复合材料的硬度、屈服强度、抗拉强度与母材处于同一水平，弹性模量达到 92.7GPa，较母材提高了 23.9%。摩擦磨损实验表明，与母材相比，复合材料的磨损率降低了 35%以上。其中，力学性能的恢复主要归因于粗大的 S 相重新溶解并弥散析出，而摩擦磨损性能的提高主要归

因于磨损机制的改变以及机械混合层的形成。

C06-43

通过构筑强过渡界面制备高强、韧铝基复合材料

杨寿奎，何春年*

天津大学

复合材料因其具有高比强度、比刚度、低热膨胀系数，良好的热稳定性的性能优势，广泛应用于航空航天、汽车制造、电子信息等领域。随着工业的快速发展，对铝基复合材料的性能提出了更高的要求。然而，制备高性能铝基复合材料的关键是增强相的选择以及调控增强相与基体之间的界面结合。本文采用高抗氧化性和化学结构稳定性的氮化硼纳米片（BNNSs）作为增强相，设计了一种具有镁偏聚特征的氮化硼纳米片（BNNSs）-氮化铝（AlN）-铝（Al）过渡界面，大幅提升复合材料的强化效果。实验和理论计算均表明，镁溶质倾向于在 BNNS/Al 界面处偏聚。镁偏聚能够增强界面的结合力和内聚力，从而提高载荷传递效率，进而有助于复合材料获得卓越的强度。具有 AlN 过渡纳米层和镁偏析特征的过渡界面能够通过减轻 BNNSs 与铝基体之间的变形不协调性，以缓解界面附近的应力集中。同时，镁偏聚可促进位错平面滑移，有利于界面处的应变/应力传递和分散。此外，断裂形貌表明，BNNSs-AlN-Al 过渡界面能够有效钝化裂纹扩展并改变裂纹扩展路径，这对 BNNSs/Al–4Mg 复合材料实现卓越的强度-韧性组合具有重要贡献。

C06-44

复合工艺对 Cu/Al 复合材料界面显微组织及性能的影响

崔新帅*

北京航空航天大学

铜铝复合材料由于其良好的导电性、导热性和较好的力学性能，能满足各种 电气设备对导电性能的要求。同时，铜铝复合材料的推广应用能够大幅度减少资 源较少的铜使用量。通过传统轧制或焊接工艺得到的 Cu/Al 复合材料在界面处具 有较厚的铜铝金属间化合物(Cu/Al IMC)，如 Al4Cu9、Al2Cu、AlCu 等，研究表 明，脆性的 Cu/Al IMC 对铜铝复合材料的力学性能及导电性有较大影响。因此， 探明加工与后处理工艺对 IMC 的影响规律与机制具有重要意义。 最近，我们研究了改变轧制复合的工艺条件对 Cu/Al IMC 的影响。发现轧制 速度为 1000mm/min、热处理条件为 200℃下保温 2h，Cu/Al IMC 的厚度仅为 3.39 μm，剪切强度可达 85MPa。为进一步优化 Cu/Al IMC 结构，选用 Al-10Si-xGe(x=2、 4、6、8、10)钎料进行固固复合，研究发现，当加入 Ge 含量为 6%时，钎料合金 的熔点为 523.28℃，抗拉强度为 253MPa，Cu/Al IMC 的厚度为 5.16μm，剪切强 度可达最大值 100MPa。结果表明，通过加入合适的第三组元改变 Cu/Al IMC 的 结构可提高铜铝复合材料的力学性能。

C06-45

分级结构(ZrB2+B4C)/Al 复合材料的声磁场调控制备与组织性能研究

怯喜周*

江苏大学

B4C/Al 复合材料以其低密度、高强度、高中子吸收能力等特性，是理想的轻质结构材料和中子吸收材料。然而，陶瓷增强体和基体之间的热膨胀系数失配和弹性模量失配，不可避免的将基体分割为近界面的位错强化区和远界面的未强化区，造成受力变形过程中基体微区协同变形难而产生应变局域化、大幅降低塑韧性。此外，由于陶瓷增强体润湿性差、Al 熔体表面氧化膜阻碍增强体引入、以及陶瓷增强体易与 Al 反应生成有害相，制约了低成本“熔体搅拌法”制备 B4C/Al 复合材料的推广应用。研究提出通过原位自生的方法，在复合材料基体中未强化微区引入纳米 ZrB2 颗粒，实现近界面的位错强化区和远界面的纳米颗粒强化区协同变形，来制备高强韧的(ZrB2+B4C)/Al 复合材料。

C06-46

SiC/Al 界面微区多尺度调控的微纳力学研究

郭晓雷*[1]，郭强[2]，张荻[2]
1. 黄淮学院
2. 上海交通大学

结构调控是材料发展的一贯趋势。金属基复合材料（MMCs）以其轻质高强及功能特性受到广泛关注。界面在 MMCs 形变中扮演着重要角色，但由于其微观性和复杂性给定量研究“界面结构-力学性能”之间的耦合关系带来困难。启迪于聚焦离子束技术的微区刻蚀及微纳力学的微尺度力学表征功能，本团队长期致力于 MMCs 界面结构及其力学特性的微纳力学研究。利用单轴压缩具有单一倾角界面复合微柱，表征了 SiC/Al 界面微区结构演化-力学特性的耦合关系，获得模型用搅拌铸造态 SiC/Al 的界面剪切强度 133±26 MPa 和工程用粉末冶金态 15% vol. SiCp/2009Al 界面剪切强度 200.3 ±14.2 MPa。凭借磁控溅射的原子级沉积功能在 SiC/Al 界面微区内构筑出了 Al 非晶、纳米晶、超细晶的多尺度结构，这在实际的工程材料制备中是难以实现的，且更为关键的是以该多尺度结构 FIB 刻蚀的 SiC/Al 复合微柱的单轴压缩显示，30%塑性变形中最大抗压强度高达 1.7 GPa，实现了了 SiC/Al 界面微区多尺度化的结构调控，为高性能 MMCs 提供了模型和理论参考。

C06-47

原位合成铝基复合材料的制备与性能研究

庄伟彬*
辽宁工程技术大学

采用氟盐法制备了原位合成 1wt.%、3wt.%、5wt.%TiB2 增强 6061 铝基复合材料，研究了增强体含量、合金元素和快速凝固对复合材料组织及性能的影响。结果表明，3wt.%TiB2/6061 铝基复合材料力学性能最佳。复合材料中加入 Ce 可以显著缓解增强体颗粒的团聚。超声可以消除粒子的块状团聚，形成粒子单体存在形态，提高粒子的分散均匀性。快冷可以有效阻止凝固过程中 TiB2 粒子向晶界的迁移，避免粒子在晶界处团聚 。

C06-48

颗粒增强铝基复合材料挤压型材微观组织演变与强化机制研究

李志刚，陈良*，唐建伟，张存生，赵国群
山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室

基于热挤压技术实现颗粒增强铝基复合材料的高性能、近净成形，能够极大程度的减轻结构件重量并提高生产效率。目前，关于颗粒增强铝基复合材料挤压成形的研究，多聚焦于挤压对致密度的提升作用，而对于挤压型材微观组织演变与强化机制的研究较少。为此，本研究采用挤压实验、数值模拟和理论分析等方法，围绕颗粒增强铝基复合材料挤压型材微观组织演变与强化机制开展了研究，揭示了增强颗粒作用下铝基体的动态回复、动态再结晶和固态焊合机制，分析了热处理制度、增强颗粒对微观组织、力学性能及耐腐蚀性能的影响规律，明确了增强颗粒与时效析出相的协同强化机制，阐明了异质结构及混杂颗粒尺寸对强化机制的影响规律，为颗粒增强铝基复合材料型材挤压及形性协同调控提供了理论指导和技术支撑。

C06-49

碳纳米管和石墨烯在铝基复合材料中强化行为的对比研究

舒巧囡，贾振东，曹遴，李金山，陈彪*
西北工业大学

作为典型的一维和二维碳纳米材料，碳纳米管（CNTs）和石墨烯（Gr）在金属基复合材料（MMCs）中展现出显著的强化潜力，但其增强机制的差异仍待阐明。本研究结合分子动力学（MD）模拟与实验拉伸测试，系统对比了 CNT/Al 和 Gr/Al 复合材料的力学行为。MD 模拟结果表明，Gr/Al 界面处形成的周期性共格结构显著提升了载荷传递效率，并促进了更均匀的应力-应变分布。微观结构分析揭示，Gr/Al 复合材料中形成的位错缠结网络可协同提高强度和延展性，而 CNT/Al 则主要依赖 Orowan 强化和位错胞结构，导致应变局部化及性能劣化。拉伸实验进一步证实，Gr/Al 的屈服强度（196 MPa）较 CNT/Al（144 MPa）

提升 36.1%，同时延伸率增加 32%，与模拟结果高度吻合。本研究阐明了二维纳米材料在界面优化和位错调控方面的独特优势，为高性能 MMCs 在航空航天及汽车领域的应用提供了重要指导。

C06-50

高含量碳纳米管增强铝基复合材料中的自组装三模态晶粒

周鑫毅，陈彪*，万杰，李金山

西北工业大学

在碳纳米管（CNTs）增强铝基复合材料领域，如何实现强度和韧性的同时提升是一个亟需解决的难题。为解决这一问题，我们采用粉末冶金方法制备了一种由超细晶粒（UFG）、细晶粒（FG）和粗晶粒（CG）组成的异质结构材料。通过全面的微观结构表征，我们确定这种异质结构是在高能球磨和放电等离子烧结（SPS）工艺过程中形成的，并探讨了其形成机制。细晶粒是球磨过程中金属粉末再结晶形成的，而粗晶粒是烧结过程中粉末部分熔化以填充粉末间隙形成的。拉伸试验结果表明，该三模态异质结构复合材料的抗拉强度为 619 MPa，延伸率为 9.1%。本研究为开发高强度、高延展性碳纳米管增强铝基复合材料提供了指导。

C06-51

TiCp /7075 铝合金热变形行为及其微观组织演变

武晓慧[1]，苏珩[1]，邵斌*[1,2]，刘佳斌[1]，宗影影[1,2]

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

2. 哈尔滨工业大学金属精密热加工国家级重点实验室

围绕 TiCp /7075 铝合金热变形行为及其微观组织演变开展，主要研究了铸态含量为 3wt.%的 TiCp/7075 铝合金热压缩变形行为及其微观组织演变过程，其中热压缩变形温度区间选择为 350~550℃，固溶温度为 510℃。研究发现，铸态 TiCp/7075 铝合金晶粒尺寸为 50~150μm，TiCp 宏观分布均匀，而微观上大部分 TiCp 主要与析出相共存，沿晶界分布，少量的 TiCp 发生团聚。在 350℃~500℃热压缩变形能力较好，550℃发生过烧并导致变形开裂。随着温度升高金属流动越剧烈，促进 η 相发生破碎和溶解，利于 TiC 颗粒的破碎和分散，500℃时 η 相明显固溶。在 350℃~450℃温度区间内，动态回复较弱导致变形储能较大，在固溶处理时能够提供充足的静态再结晶驱动力，同时 TiC 颗粒可以作为形核点降低形核能，因此产生了明显的局部静态再结晶。450℃以上温度因变形储能较低，在固溶时未产生明显静态再结晶。

C06-52

微量纳米调控 LDED 高强铝合金多级组织构型机制

刘天舒*[1]，谭超林[1]，邱丰[2]

1. 苏州大学

2. 吉林大学

增材制造（AM）高强度 7075 铝合金是具有挑战性的，其可打印性较差。变质剂调控是一种改善 AM 高强铝合金可打印性和提高其力学性能的可行方法。与现有文献中添加非原位陶瓷增强的 AM 加工铝基复合材料不同，本研究采用原位形成的微量 TiC-TiB2 纳米颗粒包覆在 Al 粉末原料中，接种 AA7075 的激光定向能沉积（LDED） AM。利用 3Ti+B4C→2TiB2+TiC 化学反应，采用中间合金法制备 AA7075 复合粉末，然后进行超声雾化。研究了微量纳米颗粒对合金成形性、凝固行为、固相转变、晶粒再结晶、析出动力学和力学性能的影响。微量纳米颗粒可以显著提高打印性能（具有宽的工艺窗口）并消除热裂纹，达到 99%以上的相对密度。在凝固过程中，微量纳米颗粒显著细化晶粒，使晶粒更加等轴化，同时减弱偏析，促进动态再结晶。热处理后，颗粒增强的 AA7075 实现了 GP 区、η′和 T′相的共析出，表现出良好的强度-塑性协同效应，抗拉强度达到 480 MPa，延伸率达到 10.5%。本研究解决了增材制造中增强颗粒面临的分散性差、基粒界面差等多重限制。此外，微量纳米颗粒的应用在提高效率和成本效益方面具有显著的优势。研究结果对 AM 铝合金的多级组织调谐和性能增强具有重要的指导意义。

C06-53

原位固相反应 Al-Mg-ZnO 铝基复合材料时效行为及强韧化机制研究

戎泽浩，王朔，戎旭东，张翔，赵冬冬*，何春年，赵乃勤

天津大学

传统铸造法反应温度过高以及增强相基体界面能失配，往往诱发复合材料组织粗化，严重限制铝基复合材料性能提升。复合化和合金化是制备多组元协同强化铝基复合材料（AMCs）的有效策略。本研究以 Al、Mg 以及 ZnO 粉末为原料，通过粉末冶金结合反应烧结工艺，制备了多组元增强相和析出相协同强化的 Al-Mg-ZnO 铝基复合材料，研究了 Mg 含量对 Al-Mg-ZnO 体系反应路径的影响机制，分析了增强相和析出相界面关系，阐明了 Mg 含量对复合材料析出行为作用机理。

（1）系统研究了不同 Mg 含量下的原位反应机制。Mg 与 Al 分别与 ZnO 反应形成 MgO 和 Al_2O_3 中间相。随着温度提高，中间相与 Mg、Al 进一步反应形成 $MgAl_2O_4$ 增强相。高 Mg 含量复合材料中剩余 Mg 原子与 $MgAl_2O_4$ 增强相反应形成 MgO 增强相。增强相/Al 界面显示出良好的界面结合。

（2）研究了热处理工艺对复合材料性能的影响。经过固溶和峰时效处理的复合材料展示出优异的力学性能：抗拉强度 760 MPa，延伸率 3.5%。复合材料的主要强化贡献来源于析出强化、载荷传递、位错强化以及晶粒细化。

（3）阐明了 Mg 含量对复合材料时效析出的影响机制。低 Mg 含量下复合材料内部空位浓度较低，空位与 Mg 结合形成 Mg-空位团簇，随后与 Zn 结合形成溶质富集 GP 区，后续转变形成 η'相。高 Mg 含量下导致空位浓度远大于剩余 Mg 的浓度，使得材料内部同时存在 Mg-空位团簇以及空位富集 GP 区，空位富集 GP 区由于溶质原子浓度低后续转变形成 T'相。

C06-54

Unveiling anomalous hot deformation mechanisms in synergistically strengthened (Al2O3+Al3Ti)/Al nanocomposites for high-temperature applications

Yin Liu,yuning zan*,bolv xiao

Institute of metal research

The development of heat-resistant aluminum matrix composites (AMCs) has been a long-standing aspiration. To overcome the strength limitations of conventional AMCs at high temperatures, we developed a novel (Al2O3+Al3Ti)/Al composite featuring synergistic strengthening through intragranular and intergranular nanoparticles. While demonstrating exceptional high-temperature resistance, this composite presents significant challenges in plastic processing. This study systematically investigates the hot deformation behavior of the heat-resistant (Al2O3+Al3Ti)/Al composite, revealing three key distinctions from conventional AMCs: (1) An exceptionally high mean activation energy (Q) of 481.7 kJ/mol, surpassing most Al matrix materials; (2) A significant increase in power dissipation efficiency at 600 ℃ due to extensive dynamic recrystallization, contrasting with relatively low efficiency below this threshold; (3) A unique deformation window where defect-free processing occurs at both lower temperatures (< 450 ℃) and higher temperatures (> 500 ℃), while intermediate temperatures (~ 500 ℃) commonly used for Al alloys and AMCs exhibit compromised deformability due to nano-Al2O3 restricting grain boundary sliding and abnormal grain growth promoting crack formation. These findings provide critical insights for optimizing hot-working parameters in nanoparticle-strengthened AMCs.

C06-55

快速粉末包套轧制工艺制备 Al/W/Ce 复合材料的工艺、微观结构与力学性能研究

唐文涛*

北京有色金属研究总院

本研究开发了一种基于包套技术的粉末快速轧制工艺，采用 2024 铝合金粉末、钨粉和铝-铈共晶粉末作为原料，成功制备了 Al/W/Ce 复合材料，并实现了高达 99%的相对密度，展现出优异的致密化效果。然

而，复合材料的显微组织表征和元素分布分析结果表明，材料在高温加工过程中发生了意外的固态相变，并伴随了合金元素（特别是强化元素铜）的显著偏聚现象，这直接导致了材料力学性能的劣化。为解决这一问题，本研究创新性地引入淬火辅助的快速轧制工艺。实验结果表明，该工艺能显著抑制 490~550℃高温制备环境下材料中的扩散反应，有效控制相变行为。这使得复合材料的抗拉强度由原本的 326.5MPa 提升至 408 MPa，其延伸率则仅由 9.5%略微下降至 7.3%，显著改善了材料在高温制备环境下的性能稳定性。本研究证明了该淬火辅助快速轧制工艺在克服高温相不稳定性方面的独特优势，这为高性能辐射屏蔽复合材料的高效制备提供了新的技术途径。

C06-56

碳纳米管增强铝基复合泡沫的疲劳性能及其失效机理研究

王斯冉[1]，沙军威*[1]，杨旭东[2]

1. 天津大学

2. 中国民航大学

泡沫铝作为新型结构、功能一体轻量化材料，由于其良好的能量吸收特性、低密度以及高比强度等优点已逐步被应用于航空航天、交通运输和汽车制造等领域。在使役过程中，泡沫铝容易受到循环压缩载荷的作用，因此开发具有良好疲劳性能的泡沫铝对工程需求显得尤为重要。本工作采用“预分散+短流程粉体发泡法”制备得到碳纳米管（CNTs）增强铝基复合泡沫，研究了 CNTs 对复合泡沫宏观结构、微观组织、准静态压缩和压缩疲劳性能的影响，进而阐明其增强机理和断裂机制，并结合机器学习建立泡沫金属疲劳寿命评估体系。

C06-57

高能活化辅助自蔓延高温合成法制备纳米 TiB2 颗粒增强铝基复合材料

李继豪，相志磊，孙文超，杨子安，韩杨，谷欣硕，陈子勇*

北京工业大学

采用高能活化辅助自蔓延高温合成法（MASHS）成功制备出粒径均匀、分散性良好的纳米 TiB2 颗粒增强铝基复合材料。该新型合成工艺将反应物（Ti、B）的短时球磨预活化（MA）与铝熔体中的自持燃烧反应相结合。本研究系统考察了球磨转速和球磨时间对反应物活性的影响，并通过 XRD、SEM、TEM 和 DSC 分析对机械活化过程及最终产物进行了表征。结果表明，在 300rpm 转速下球磨 27 小时后，原始反应物（Ti、B）成功实现活化，这归因于机械球磨过程中反应物界面能和内部畸变能的增加。机械活化提高了球磨后粉末的反应活性，促进 SHS 反应速率，并抑制了 SHS 反应副产物的产生。Al、Ti、B 粉末摩尔比为 3:1:3 时，成功合成了近球形纳米 TiB2 颗粒（粒径范围：150-200nm），并详细探讨了机械活化对 SHS 的作用机制。该研究为制备纳米颗粒增强铝基复合材料提供了新思路。

C06-58

仿生结构 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料的微观特征与性能研究

蒋小松*

西南交通大学

Cu 基复合材料是以 Cu 或其合金为基体，通过引入陶瓷颗粒、纤维或金属/非金属增强相构筑的新型功能材料[1-3]。这类材料不仅继承了 Cu 基体优异的导电性和加工性能，还通过增强相的协同作用显著提升强度、硬度、耐磨性及耐腐蚀性等关键性能指标，在电力传输、轨道交通、电子封装等高新技术领域展现出广阔应用前景。然而，传统纯 Cu 及 Cu/Ag 合金等因强度-导电性倒置关系及界面结合缺陷，已难以满足高新技术领域对其轻量化、耐电弧侵蚀和长寿命的严苛需求。

针对上述挑战，以 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料为代表的铜基材料，通过多尺度增强相协同作用实现了性能突破。石墨相的层间滑移机制赋予材料自润滑特性，其 sp^2 杂化碳层的离域电子体系保障了导电网络连续性；Ti3SiC2 与 Cu 基体在高温烧结过程中形成的 TiC-Cu9Si 界面反应层，通过“砖-砂浆”显著提升材料硬度和抗塑性变形能力。然而，传统 Cu 基复合材料的性能提升任然遭遇多重瓶颈：首先，石墨-Cu 界面因润

湿性差形成微米级孔隙，导致致密度下降]；其次，增强相团聚引发局部应力集中和电子散射增强；最后，材料强塑性矛盾突出，当抗拉强度提升至 500 MPa 时，延伸率往往骤降至 5 %以下。这些本质缺陷促使研究者转向仿生结构设计寻求突破。

本文采用片状粉末冶金工艺制备出 GNPs/GFs 双峰增强类层状 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料,采用片状粉末冶金和累积堆叠复合工艺制备出异质层状 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料和梯度晶粒层状 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料。分别探究了 GNPs 含量和类层状结构对 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料的影响；基体粉末形态和异质层状结构对 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料的影响；晶粒形态和梯度晶粒层状结构对 Cu/Ti3SiC2/C 复合材料的影响。结合实验设计和理论分析，解决铜基复合材料结构设计、性能要求和实际应用之间的一些问题，为后续新型 Cu 基复合材料的设计和性能优化提供了一些参考与理论指导。

C06-59

强磁场定向排列制备纳米管/石墨烯增强 Cu 基复合材料

战再吉*，曹海要，田锭坤

燕山大学亚稳材料全国重点实验室

碳纳米管和石墨烯都是典型的具有方向性的材料，所制备的复合材料也往往具有各向同性的性能，难以发挥其各向异性的优势。在纳米管/石墨烯表面化学镀覆可磁化材料，使之可以在强磁场中磁化，同时解决纳米相的团聚问题；随后在强磁场中对原始粉末进行混合，制备出具有磁场取向的压胚；使用热压烧结的工艺分别制备出纳米管或石墨烯增强铜合金复合材料。试验表明：磁场取向复合材料的电学性能与力学性能较未经磁场处理复合材料均有所提高，并且电学性能与力学性能呈各向异性，即沿碳纳米相定向排列方向最优。Ni@CNTs/Cu 复合材料在磁场强度为 1.5T 时，Ni@CNTs 的取向性与分散性综合最佳，取向指数达 0.97145，导电率为 76.3%IACS，拉伸强度为 336MPa。Ni@Gr/Cu 复合材料在磁场强度为 2T 时，Ni@Gr 的取向性与分散性综合最佳，取向指数为 0.97787，导电率为 86.6%IACS，拉伸强度为 368MPa。复合材料中的主要强化机制包括细晶强化机制、载荷转移机制、Orowan 强化机制和热错配强化机制。

C06-60

多功能铬元素协同提高钨铜复合材料的强度与抗氧化性

侯超*，魏贤能，宋晓艳

北京工业大学 材料循环低碳再生全国重点实验室，新型功能材料教育部重点实验室，材料科学与工程学院

高温服役条件下的钨铜（W-Cu）复合材料需要兼具优异力学性能与抗氧化性。本研究利用铬（Cr）元素的多功能性提升 W-Cu 复合材料的抗拉强度与抗氧化性。研究发现，经液相烧结后 Cr 元素呈现出从原子到亚微米的多尺度分布特征。利用原子尺度表征与第一性元素计算，阐明了含 Cr 的 W-Cu 复合材料高抗拉强度的多种强化因素，包括弥散分布的氧化物颗粒、超细晶组织、晶内共格纳米相以及增强的晶界结合，揭示了 Cr 原子强化 W 晶界的电子耦合作用机理。此外，还研究了 Cr 元素对 W-Cu 复合材料高温氧化行为的影响，发现在特定温度条件下 Cr 元素使 W-Cu 复合材料表现出自钝化效应。通过对氧化初期氧化层的表征结合热力学计算与分析，阐明了表面氧化层形成过程中不同成分的氧化与扩散行为以及其对 W-Cu 复合材料抗氧化性提升的作用机理。本研究可为开发兼具高温力学性能与抗氧化性的 W-Cu 基复合材料提供科学指导。

C06-61

碳纳米管与晶内原位 TiC 协同强化实现铜基复合材料强度-塑性平衡

陶静梅*，俸俊芹，陈小丰，易健宏

昆明理工大学

采用具有不同特性的纳米相协同增强金属基复合材料（MMCs），是充分发挥各组成相优势、实现复合材料优异性能的有效途径。本研究通过结合分子级共混（MLM）、分段球磨（SBM）和原位固相反应，制备了由 TiC 修饰碳纳米管（TiC@CNT）和原位纳米 TiC 颗粒协同增强的铜基复合材料（TiC-CNT/Cu）。

HRTEM 结果表明，碳纳米管表面外延生长了界面 TiC（CNT(0002) // TiC(200)），且 TiC 与铜基体之间形成半共格界面，有效增强了碳纳米管与基体的界面结合强度并优化了载荷传递效率。独立的原位 TiC 纳米颗粒通过晶界迁移进入晶粒内部，从而充分利用奥罗万强化机制，显著提高了复合材料的应变硬化能力和强度。界面结合强度的增加有效抑制了裂纹的萌生和扩展，从而提高了复合材料的断裂韧性。含 1.2 wt% CNT 的 TiC-CNT/Cu 复合材料的抗拉强度达到 372 MPa，实现了高达 270 的强化效率，同时保持了 21.2%的良好延伸率。此外，该复合材料的冲击韧性较 CNT/Cu 复合材料显著提高了 70.7%，达到 251 kJ/m³，展现出卓越的断裂韧性。充分利用不同纳米相的协同强化效应是提高金属基复合材料综合性能的有效途径。

C06-62

晶内化纳米氧化铝增强铝基复合材料制备加工与强塑化机理

陈世贤[1,2]，马凯[1,2]，刘振宇[1,2]，肖伯律[1,2]，马宗义[1,2]

1.中国科学技术大学材料科学与工程学院

2. 中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心

通过采用纳米增强相晶内分布策略，成功制备了具有超强塑性的纳米 Al_2O_3/Al 复合材料。研究表明，热压复合材料中的纳米 Al_2O_3 颗粒主要分布在晶界处，热挤压工艺促进了晶界迁移，纳米 Al_2O_3 颗粒实现了晶内化。提出了一个与材料（包括增强相含量、尺寸和界面能）及热变形参数相关的模型，用于描述晶界迁移和纳米增强相的晶内化行为，为调控晶内分布提供了判据。拉伸测试表明，晶内纳米 Al_2O_3 颗粒触发了更高效的 Orowan 强化效应，提升了材料强度。同时，晶内纳米 Al_2O_3 颗粒诱导了更均匀的位错扩散，有效促进了晶界与晶内的协同变形，改善了材料塑性。最终制备的 3 vol.% Al_2O_3/2009Al 复合材料展现出超过 700 MPa 的屈服强度和高达 9%的延伸率，突破了传统金属基纳米复合材料中强度与塑性之间的权衡问题。通过采用纳米增强相晶内分布策略，成功制备了高强塑性纳米 Al_2O_3/Al 复合材料。研究表明，热压复合材料中的纳米 Al_2O_3 颗粒主要分布在晶界处，热挤压工艺促进了晶界迁移，纳米 Al_2O_3 颗粒实现了晶内化。提出了一个与材料参数（增强相含量、尺寸和界面能）及热变形参数相关的模型，用于描述晶界迁移和纳米增强相的晶内化行为，为调控晶内分布提供了判据。拉伸测试表明，晶内纳米 Al_2O_3 颗粒触发了更高效的 Orowan 强化效应，提升了材料强度。同时，晶内纳米 Al_2O_3 颗粒诱导了更均匀的位错扩散，有效促进了晶界与晶内的协同变形，改善了材料塑性。最终制备的 3 vol.% Al_2O_3/2009Al 复合材料展现出超过 700 MPa 的屈服强度和高达 9%的延伸率，突破了传统金属基纳米复合材料中强度与塑性之间的权衡问题。

C06-63

原位石墨烯生长调控与石墨烯/铜复合箔电学性能研究

黄俊睿[1,2]，张宇博*[1,2]，刘嘉靖[1,2]，李廷举[1,2]，王同敏[1,2]

1. 大连理工大学材料科学与工程学院

2. 大连理工大学宁波研究院

石墨烯增强金属基复合材料（MMCs）的界面结合显著影响界面电子传输效率。采用化学气相沉积（CVD）工艺，可以在铜衬底表面外延生长石墨烯，加强两相界面相干性，减少传统的外加石墨烯/铜界面无序层对电子传输的影响。本文报道了石墨烯/铜复合箔的制备工艺，结合导电原子力显微镜（C-AFM）表征手段，对高质量石墨烯/铜界面构建进行了研究。研究发现：（1）提高 H2 流量可以在石墨烯生长初期抑制多层石墨烯形成，但过量 H2 易刻蚀已生长石墨烯，产生缺陷；（2）石墨烯与铜衬底热膨胀系数存在差异，生长结束后石墨烯易出现褶皱；（3）石墨烯褶皱导致石墨烯/铜界面结合减弱，电子传输受阻，复合箔电学性能下降。以上发现为制备高导电 MMCs 提供依据，也间接证明了调控复合材料界面结合的优势与必要性。

C06-64

三维网络石墨烯增强铜/铜银复合材料的显微组织与性能分析

吴博达，康建立*，张翔，赵乃勤

天津大学

本研究针对传统铜基材料强度-导电性难以协同提升的难题，提出基于三维网络石墨烯的复合结构设计策略，开发了铜及铜银合金两类高性能复合材料体系。采用氧化铜还原模板法结合低温化学气相沉积技术，通过孔隙结构调控实现石墨烯的原位均匀生长，构建了"晶内-晶界"石墨烯网络与异质晶粒复合结构。系统研究表明：在纯铜体系中，热轧诱导的石墨烯薄片晶内渗透有效调控位错运动，完整的石墨烯网络传输通路使材料保持 **98.6% IACS** 的高导电性，异质晶粒结构与石墨烯网络协同强化使材料的屈服强度达 **315 MPa**，较纯铜提升 **156%**；在 Cu-0.12 wt% Ag 合金体系中，三维网络石墨烯与银的协同作用使复合材料屈服强度提升至 **374 MPa**，并展现出优异的耐磨性（磨损率降低 **79.5%**，摩擦系数减少 **50%**，归因于石墨烯的界面润滑和载荷传递效应）和电接触性能（在模拟工况下，电接触寿命达 **332 次**循环，是商用铜银材料的 **3 倍**，石墨烯的高热稳定性和抗电弧侵蚀能力有效抑制材料熔损和氧化），同时，较低银含量（0.12 wt%）显著降低成本，简便的工艺有利于工业化生产。该研究为开发新一代高强高导金属基复合材料提供了理论依据，在电力传输、轨道交通等领域展现出重要应用前景。

C06-65

高强高导三维纳米网络/铜复合材料的高应变速率变形行为研究

刘浩，张翔，何春年*

天津大学

金属材料在加工和应用中会遇到高应变速率变形，往往发生绝热剪切而提前失效。深入了解增强相构型及其对动态变形的基本影响，对设计抗冲击金属结构具有重要意义。由三维互锁石墨烯网络（3D-IGN）增强的铜基复合材料，具有独特的仿生“砖-桥-砂浆”结构，不仅可以阻断位错运动，限制晶界滑动，还可以协调基体组织变形，通过提高水平方向的导热性来缓解热致软化。有限元模拟结果进一步证实了石墨烯网络对应变离域的重要作用，从而实现了动态塑性、动态强度的协同提升。这项工作提供了一种有前途的自下而上的策略来制造具有网络结构和优越动态特性的金属基复合材料。

C06-66

钨铜双金属复合材料的多构型调控及对综合性能的影响

韩铁龙*，王艺静，杜怡，侯超，李昱嵘，宋晓艳

北京工业大学材料科学与工程学院

钨铜复合材料在高压电触头、电子封装、武器装备等前沿领域得到了广泛应用，科技发展对其力学-物理综合性能提出了更高的要求。近年来，因在改善材料性能权衡方面的突出效果，构型或异构设计的理念得到了持续关注。然而，如何在钨铜体系中实现多种构型-结构的设计调控，以及不同构型对钨铜复合材料综合性能的影响规律和机制有待深入开展。本报告将分别介绍具有铜网络构型、层状构型、异质层状构型、均匀纳米相构型和核壳构型的钨铜复合材料的结构设计调控方法及综合性能。结果表明，铜网络构型有利于钨铜复合材料电导率的提高，具有超细钨相弥散分布的铜网络构型钨铜复合材料表现出优越的硬度-电导综合性能。层状构型更加有利于钨铜复合材料传导性能和钨相载荷配分能力的提高，同时能够抑制裂纹的扩展，但层厚较大时复合材料的力学性能提高有限，结合液相球磨和化学镀等技术制备的自组装超细层状钨铜复合材料则能表现出协同提高的强度、塑性和传导性能。通过冻干氢还原制粉工艺调控和快速热压烧结，分别可实现钨相尺寸小于 100 nm 且内部含有铜颗粒的纳米钨铜复合材料和具有钨包铜核壳构型的钨铜复合材料的制备。由于相尺寸的细化和晶内铜纳米颗粒的存在，均匀纳米相钨铜复合材料表现出接近 2 GPa 的超高抗压强度，而核壳构型的钨铜复合材料则表现出优异的抗拉-电导综合性能。因此，通过构型设计提高钨相的应力配分能力，并通过微观结构调控提高钨铜两相的协调变形能力，是制备高综合性能钨铜复合材料的关键。本研究将为钨铜复合材料乃至其他金属基复合材料的构型设计提供新的思路和见解。

C06-67

MAX 相增强 Cu 基复合材料及其组织和性能研究

秦永强[1, 2, 3]，韦国宣[1]，侯泽浩[1]，黄轩[1]，罗来马[1, 2, 3]，吴玉程[1, 2, 3]

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院

2. 有色金属与加工技术国家地方联合工程研究中心
3. 高性能铜合金及加工成形教育部工程研究中心

摘要：弥散强化铜基复合材料作为一种性能卓越的复合材料，在各种工业应用中都有用武之地，特别是在需要兼具导电性和力学性能的领域，比如在电力电子、电气工程、航空航天、通讯、人工智能、机械加工等领域发挥着重要的作用。采用固液混合、机械合金化和放电等离子烧结技术制备了 Ti_3SiC_2 弥散强化铜基复合材料，分别对其关键参数进行探究，并通过性能测试、微观组织表征等一系列手段详细对比两种制备工艺优劣，然后评估性能较优异的方案在高温服役环境条件下的性能变化。并探究 Zr、Ti、CNT 和 Y_2O_3 的协同强化机制，研究了各组元之间的原位反应对铜合金组织与性能影响，结合原位反应产生的组织结构转变分析铜合金性能变化的原因。最后对复合材料进行固溶处理和不同温度时效处理，研究处理后复合材料的组织和性能变化，以期为获得具有优异综合性能的铜合金提供参考。

关键词：铜基复合材料，机械合金化，原位反应，弥散强化

C06-68

实用化高强高导铜基复合线材的制备技术开发

王鹏飞
西北有色金属研究院

80T（特斯拉）以上高场脉冲磁体为凝聚态物理、材料、化学、生命科学等前沿基础研究提供极端实验条件，提升基础研究领域的原创新动力，是国家科技发展的一大利器。国际上，以美国、德国为代表的西方国家正致力于建设国际一流的强磁场科学中心，同时不断发展脉冲强磁场新技术及其应用，挑战电磁极限、拓展强磁场应用领域，推动世界脉冲强磁场技术的快速发展。高强度高电导铜基复合材料是集优良物理性能和力学性能为一体的有色金属材料，能够同时具备高强度、高电导率等优势，被广泛用于脉冲强磁场、电磁弹射、转换开关、电接触器、引线框架及电车和电力火车导线等领域。

理论和大量实验研究表明，Cu 基复合材料（Nb、Ag、Ta）作为抗拉强度和导电率匹配较好的材料，是强磁场体绕组材料的首选。其中 Cu-Nb 复合材料因其典型的面心立方金属和体心立方金属变形机制及规律排列的界面结构，在界面强化提高力学性能的同时保持铜基体良好的导电性能，可在脉冲磁场运行中，抵抗更高洛伦兹力，同时降低绕组大电流传输产生的焦耳热，避免磁体损坏。目前，俄罗斯无机所（Bochvar）采用原位拉拔法（电弧熔炼+集束法）成功制备出 Cu-18%Nb 复合线材，室温抗拉强度达到 1.12 GPa，匹配电导率为 70 %IACS，性能达到国际领先水平，成为欧美国家脉冲强磁体的首选导体材料。西北有色金属研究院采用集束拉拔技术制备出的 Cu-Nb 和 Cu-Ag 复合线材已被成功应用于国家脉冲磁磁体上，室温抗拉强度突破 1GPa，匹配室温电导率大于 60% IACS，芯丝尺寸约为几十纳米，产生了高达 94.8T 的脉冲强磁场，使我国成为仅次于美国的世界第二大脉冲强磁场中心。

本文以国家脉冲磁体重大设施和电磁弹射线圈材料发展为导向，在长期研究的基础上，拟通过改变增强相组态，从调控复合材料界面结构、细化芯丝尺寸、以及改善加工硬化等方面入手，进一步发掘 Cu 基微观复合材料的强度潜能，改善 Cu 基复合材料电导，成功获得了实用化铜基复合线材制备技术，为国家脉冲强磁场突破 110T 提供强有力的导体材料支撑，推动我国脉冲磁体技术及电磁弹射技术快速发展。

C06-69

微观三维互穿镁基仿生复合材料设计、制备与力学性能研究

刘艳艳*[1]，刘增乾 [2]，张哲峰 [2]
1. 西北有色金属研究院
2. 中国科学院金属研究所

金属结构材料轻量化与强韧化既符合国际科学研究前沿，也是我国国防、国民经济等重要领域关键需求。但是强度与韧性、阻尼等性能在现有材料中往往相互制约，并且传统结构和性能优化方法可设计与调控空间日益受限。镁是极具潜力的轻质金属，但相较于常用金属结构材料（比如铝合金）而言，其绝对强度值偏低且韧性差。制备包含两种或多种高性能组元的复合材料是获得提升力学性能的有效途径；而天然生物材料具有复杂巧妙的组织结构和优异力学性能，可为人造材料强韧化设计提供重要启示。本工作模仿

典型天然铠甲材料（比如鱼鳞和贝壳）的微观组织结构，基于多孔骨架构筑与熔体浸渗两步法工艺研制了多种新型镁基仿生复合材料，实现了强度、韧性与阻尼等性能的良好组合，并探索了材料综合力学性能的多重优化策略，有望为高性能镁基复合材料开发提供有益启示。

C06-70

基于增强相特征设计的镁基复合材料强韧化及电磁屏蔽性能研究

徐尊严*

昆明理工大学

信息技术的飞速发展和 5G 时代的到来给人们的生活带来了极大的便利，但同时也带了电磁污染等问题，电磁屏蔽材料的开发就显得尤其重要。镁及其合金是目前应用最轻的结构材料，同时具有一定的电磁屏蔽能力，是结构/屏蔽一体化理想的候选材料。目前镁及其合金仍存在着绝对强度低、塑性差、电磁屏蔽能力不足以及力学与电磁屏蔽性能难以兼顾的问题，复合化是改善镁及其合金性能的重要途径。

复合材料的性能由基体和增强体共同决定，其中增强体的分布、物理性质及其与基体之间的界面会对复合材料的性能产生显著的影响。基于此，本论文以 AZ 系镁合金为基体，主要通过对上述增强体特征设计来调节镁基复合材料的力学及电磁屏蔽的综合性能，探究增强体的分布、相间界面及物理特性对镁基复合材料的力学及电磁屏蔽性能的影响规律。具体研究内容和结果如下：

(1) 通过搅拌铸造结合交叉热轧的工艺制备了类纤维状分布的 TiB_2 颗粒增强 AZ80 复合材料，研究了增强体的非均匀分布对镁基复合材料轧制过程中组织演变，强韧化行为及电磁屏蔽性能的影响。结果表明铸态样品中的 TiB_2 颗粒团簇会随着轧制变形量的提高，逐渐演变为类纤维状分布的结构，并通过粒子激发形核(particle stimulated nucleation, PSN)效应促进轧制过程中的动态再结晶，抑制粗大剪切带的产生。室温拉伸测试结果表明，与基体合金相比，在细晶及热失配主导的强化机制下，复合材料的屈服强度、抗拉强度及断后伸长率分别提高了 16%、24%和 98%。弱化的基面织构、高的施密特因子以及均匀的应变分布是复合材料的主要的内禀增韧机制；而类纤维状分布 TiB2 团簇造成的裂纹偏转及挠曲变形是复合材料的外禀增韧机制。复合材料颗粒富集区形成的 TiB_2-AZ80 逾渗结构，在镁基复合材料中引入了一种新的电磁波吸收机制，即：X 波段的等离子体振荡；与此同时，基体织构差异造成的电磁波多重内部反射和 TiB_2/Mg 的界面极化也有利于提高复合材料对电磁波的吸收能力。多种电磁波损耗机制协同作用显著改善了 AZ80 合金的电磁屏蔽性能，尤其是，吸收屏蔽效能占总屏蔽效能的比例(SEA/SET)从 AZ80 合金的 24%增加到 TiB_2/AZ80 复合材料的 70%以上。

(2) 以氧化石墨烯(GO)增强镁基复合材料为研究对象，研究了复合材料的相间界面结构对力学及电磁屏蔽性能的影响。采用 SnO_2 纳米颗粒对 GO 进行表面改性，然后利用镁熔炼过程中 SnO_2→MgO 原位转变，调控形成 GO/MgO/Mg 界面结构。原位界面反应的发生显著改善了 GO 与 Mg 基体的界面结合，更加充分的发挥了 GO 的载荷强化作用，具体的，GO 载荷传递对强度的贡献值由 GO/AZ31 复合材料的 5 MPa 增加到 GO-SnO_2/AZ31 复合材料的 43 MPa。同时得益于 GO 对位错的阻碍、变形过程中高密度层错的产生以及更为普遍的大角度晶界，与 AZ31 合金相比，复合材料具有更强的应变硬化能力。较高的应变硬化率使得复合材料在强度提高的同时还保持了良好的塑性。同时，GO/MgO/Mg 界面结构的形成提高了复合材料内部的相界数量，进而通过界面极化提高复合材料对电磁波的吸收能力。与 AZ31 合金相比，GO-SnO_2/AZ31 复合材料 200-1400 MHz 频段的平均 SET 由 48 dB 提高到 81 dB，X 波段的平均 SET 由 23 dB 提高到 30 dB。此外，从屏蔽效能的角度看，复合材料表现出以电磁波吸收为主的电磁屏蔽机制。

(3) 在镁基体中引入具有磁性且可塑性变形的 Fe 颗粒，探究增强体物理特性对复合材料力学及电磁屏蔽性能的影响。纳米 Fe 颗粒会与 AZ31 合金中 Al 元素反应，完全转变成 Al_3Fe，这牺牲了纳米 Fe 颗粒良好的磁性，因此所制备的复合材料的电磁屏蔽性能与 AZ31 合金相比没有显著差异。但原位生成的 Al_3Fe 纳米颗粒具有高的强化效率，并通过提高变形流变应力激活<c+a>位错，这使得复合材料在提高强度的同时还兼顾了良好塑性。采用微米 Fe 颗粒作为增强相时，依据 Fe+3Al→Al_3Fe 转变，调控形成 Al_3Fe@Fe 类“核壳”结构，在变形过程中 Mg 基体、Al_3Fe“壳”及 Fe“核”的变形能力存在差别，在复合材料中诱发了“背应力”强化作用，同时提高了复合材料的应变硬化能力，使得复合材料的强度和塑性同步提高。此外，Al_3Fe@Fe 类“核壳”结构的增强体赋予复合材料一定的磁性，在介电损耗的基础上引入磁损耗，显著提高了

复合材料的电磁屏蔽效能。其中 15Fe/AZ31 复合材料 X 波段的平均 SET 达到 55 dB 与 AZ31 合金和 Mg-1Zn 合金相比分别提高了 111.5%和 77.4%。

C06-71

高温应用的石墨烯增强 Cu - 0.5La 复合线材的增强抗应力松弛性能及强度-电导率组合

蒋宇乾，张翔，何春年*

天津大学

通信和运输领域高功率设备的蓬勃发展所带来的升温效应，给铜导线在高温下的抗应力松弛性能和拉伸性能带来了新的挑战。为满足更高的性能要求，本文引入了一种通过原位合成和粉末冶金方法制备的石墨烯增强 Cu - 0.5La 合金（Gr/Cu - 0.5La）复合导线。由于原位生成的石墨烯和 Gr - La_2O_3混合增强相在晶界处的分布，复合导线的力学性能得到了提升。均匀分散在晶界处的石墨烯产生了强大的钉扎力，限制了晶界的迁移率，最终提高了其热稳定性。值得注意的是，该复合导线的抗应力松弛性能显著增强，相较于元素掺杂策略展现出优势。同时，Gr/Cu - 0.5La 复合导线的电导率达到 89.3%IACS，且电阻温度系数降低。循环应力松弛测试表明，其优异的高温力学性能主要源于位错控制的强化和变形机制。所实现的优异综合性能表明，Gr/Cu - 0.5La 复合导线在宽温度范围内具有良好的应用前景。

C06-72

铝元素对激光增材制造钨铜复合材料组织与力学性能的影响

李庆杰，侯超，宋晓艳*

北京工业大学 材料循环低碳再生全国重点实验室 新型功能材料教育部重点实验室 材料科学与工程学院

钨铜复合材料在航空航天、核工业等领域具有重要应用。激光增材制造技术不仅在构造复杂结构方面具有独特优势，而且其快速熔化凝固的成形特点扩展了调控钨铜复合材料组织与力学性能的空间。本研究采用铝作为合金元素，通过激光增材制造技术制备出了新型钨铜基复合材料。系统研究了铝元素在复合材料中的多种分布形式及其对两相应力分布、W 相晶粒组织、相界结构的作用规律。制备出的多级异质结构钨铜基复合材料具有~1063 MPa 的高抗压强度、塑性变形大于 25%、与钨铜二元复合材料相比在室温和 893 K 下均明显更高的抗压强度。通过对不同变形阶段复合材料微观组织结构的分析，阐明了铝元素对钨、铜两相变形行为的影响，揭示了显著加工硬化效应的内在机理。此外，发现了铝元素促进形成的相界面过渡区可有效协调两相变形，避免由于界面应力集中而引发的局部失效。该研究为激光增材制造钨铜复合材料的多级结构优化与力学性能提升提供了创新途径和科学指导。

C06-73

电冲击处理对激光熔覆（TiC+TC4）/CuCrZr 复合材料导热性能的影响研究

郭雨[1,2]，谢乐春*[1,2]，华林[1,2]，高伟[1,2]

1. 高温轻合金与应用技术全国重点实验室

2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室

电磁炮轨道在长期发射过程中面临高温烧蚀与磨损等严苛工况，严重影响其服役寿命与稳定性。为提升其表面性能，本文采用激光熔覆，在 CuCrZr 基体表面沉积（TiC+TC4）复合涂层。研究结果表明，激光功率 1500 W，扫描速度 150 mm/min，送粉速度 0.35 r/min 时，涂层结构致密。经过硬度和磨损性能测试，材料表面的硬度与耐磨性能得到提高。其中，CuCrZr 基体表面平均硬度 131 $HV_{0.2}$，而（TiC+TC4）/CuCrZr 材料表面平均硬度为 489 $HV_{0.2}$，硬度相较 CuCrZr 基体增加了 3.7 倍。因电磁炮轨道在发射时会经历大电流，故采用电冲击处理对成型材料进行测试，探究不同电流密度下，（TiC+TC4）/CuCrZr 材料的导热性能变化。通过热导率测试及对比分析，揭示 EST 对材料导热性能的影响。研究结果为铜基轨道的表面强化提供参考。

C06-74

基于增材制造的梯度异质金属–陶瓷复合材料设计与构筑：突破强韧权衡的新策略

沈平*，徐恬昊，蒋明月，胡羽白
吉林大学材料科学与工程学院

为应对金属–陶瓷复合材料在强度与韧性之间难以兼顾的固有限制，本研究融合仿生结构设计与先进增材制造技术，提出两种具有梯度异质结构的铝基复合材料制备策略。首先，采用高分辨率数字光处理（DLP）3D 打印构建多尺度 Al_2O_3 陶瓷支架，通过多孔性和壁厚的梯度调控及蜂窝、层状、管状等仿生单元设计，实现了熔融铝的完全浸渗并形成强界面结合的 Al/Al_2O_3 互穿网络结构复合材料。该结构在实现高达 634 MPa 表层强度的同时，中心区吸能能力达 14.36 MJ/cm^3，展现出优异的强韧协同性能。其次，结合材料挤出打印与压力浸渗技术，开发出具有连续成分梯度的 Al_2O_3–B_4C/Al 层状复合材料，通过精准调控 B_4C/Al_2O_3 比例及层间距，实现了从高强度到高韧性的性能调节，同时表现出显著的各向异性力学响应和优异的耐磨性能。两个体系均通过构筑多尺度、可编程的梯度微结构，激发出裂纹偏转、多裂纹扩展、塑性耗能等多重增韧机制，成功突破传统金属–陶瓷复合材料中性能权衡的瓶颈。该研究展示了 3D 打印在构建高性能结构材料中的巨大潜力，为复杂服役环境下对强度、韧性与耐磨性兼具的复合材料设计提供了新范式。

C06-75

高 TiC 含量的 CoCrNi 基复合材料的增材制造及其宽温域力学性能

马军*
西北有色金属研究院

本研究通过激光粉末床熔融（LPBF）技术成功获得高纳米 TiC 含量（4-5wt%)的 CoCrNi-TiC 复合材料。由于高比例纳米 TiC 颗粒的加入，该复合材料在不同温度下均表现出显著的强度提升：77K 时抗拉强度达 2222 MPa，298K 时为 1754MPa，873K 时为 1621MPa，1073K 时为 987MPa。研究表明采用高扫描速度与高激光功率相结合的激光扫描策略或原位析出纳米 TiC 颗粒的策略，能有效防止纳米 TiC 颗粒团聚。表征发现纳米碳化物呈非均匀分布特征，在熔池底部呈现更高数密度和更细小的粒径，本文对其形成机制进行了探讨。与 CoCrNi 基合金相比，在低温或高温条件下，高密度纳米碳化物的第二相强化分别与位错强化、晶界强化协同作用，共同提升了复合材料的屈服强度。高密度纳米碳化物的引入结合变形诱导的纳米层错/孪晶塑性机制以及非均匀分布诱导（HDI）强化效应，使得复合材料在宽温域内同时具备高抗拉强度和良好塑性。

C06-76

3D 打印医用植入物的茨烯基 Ti 金属墨水：多级孔结构对机械和生物性能的影响

郭瑞芬*，莫国超，沈平
吉林大学

临界尺寸骨缺损的功能性重建是整形外科面临的一项重大挑战。传统制造技术往往难以制造出具有分层多孔性和精确定制机械性能的植入体，从而模仿天然骨骼。本研究开发了一种新型茨烯基 Ti 金属直接墨水书写(DIW)油墨，实现了易氧化医用可调分级多孔纯 Ti 支架的打印。其中，DIW 工艺决定了宏观尺度的孔隙，而茨烯树枝晶粗化、有机添加剂去除和不完全烧结导致微观尺度和纳米尺度的孔隙形成。最终制成的三维打印支架的孔隙率为 53-75%，抗压强度为 68-289 MPa，弹性模量为 3.8-11.9 GPa，与皮质骨的力学性能非常接近，并能有效减轻应力屏蔽。分层多孔结构通过柱状塌陷和塑性微屈曲促进能量耗散，从而实现出色的能量吸收。此外，孔隙网络还为细胞粘附、增殖和磷灰石成核提供了有利环境，增强了生物相容性和生物功能化。本工作提出的分层多孔钛支架的制备方法为骨组织工程应用带来了巨大前景，为开发具有卓越机械和生物特性的仿生植入物提供了途径。

C06-77

搅拌摩擦增材制造 TiB2/AlSi10Mg 组织及力学性能研究

李雅婷，李险峰*
上海交通大学

陶瓷颗粒增强铝基复合材料具有高强度、高刚度等优点，故被广泛应用及研究。本研究以质量分数为

8%的 TiB_2 颗粒增强 AlSi10Mg 合金为研究对象，采用新型增材制造技术-搅拌摩擦增材技术（AFSD）对合金进行制造，随后开展了合金微观组织及力学性能研究，对比分析了 TiB_2 颗粒在 AFSD 制造及后续热处理过程中对合金组织的影响。结果显示，TiB_2 颗粒在 AFSD 过程中具有细化晶粒的作用，并且在热处理过程中提高 Si 颗粒以及晶界的稳定性，阻碍晶粒的长大。拉伸结果表明，TiB_2/AlSi10Mg 合金在欠时效（170 ℃-1h）后具有良好的强塑性匹配，其抗拉强度和塑性分别达到 353 MPa 和 7.7%。本研究为增材制造陶瓷颗粒增强铝基复合材料的高性能设计提供了新的见解。

C06-78

电子束增材制造钛基复合材料组织及力学性能研究进展

刘慧颖，李树丰*，李少龙，张鑫，李波

西安理工大学

针对增材制造钛基复合材料(TMCs) 采用预混合粉末为原料所引起的流动性差、混合均匀性不佳、成型性低等典型问题。本文提出采用自主研发的 Ti-TiBw 和 Ti-TiCp 复合粉末为原料，结合电子束粉末床熔融(EBM)技术，制备含不同比例纳米 TiBw 及 TiCp 增强相的 TMCs。结果表明，通过对增强相比例的调控，阐明了打印过程中增强相析出路径机制，揭示了增强相分布状态对材料微观结构及力学性能的影响规律。其中，Ti-(2TiC+1TiB)复合材料屈服强度为 627 MPa，抗拉强度为 820 MPa，伸长率保持 18%。该结果表明通过本文提出的增强相分布调控策略能够有效改善 TMCs 强塑性倒置的瓶颈问题，本文提出的思路和策略为发展增材制造 TMCs 提供了有益的实验参考和理论依据。

C06-79

激光粉末床熔融制备 B4C 增强 WMoTaTi 复合材料及力学性能

张晓青[1]，刘恺悦[1]，万宏远[2]，陈玮[2]，陈彪*[1]，李金山[1]

1. 西北工业大学

2. 中国航空制造技术研究院

难熔高熵合金（RHEAs）在高温极端环境下具有重要应用潜力，但其复杂形状零部件的制备仍面临挑战。激光粉末床熔融（LPBF）技术为 RHEAs 的成形提供了新途径，但现有材料的力学性能仍有待提高。本研究采用 LPBF 技术，通过引入 B_4C 纳米陶瓷颗粒强化 WMoTaTi 难熔高熵合金，系统研究了 B_4C 含量对合金微观结构和力学性能的影响。结果表明，添加 1.0 wt.% B_4C 后，合金的室温屈服强度从 1080 MPa 显著提升至 1554 MPa；在 1200 ℃ 高温下仍保持 536 MPa 的高强度，展现出优异的高温性能。微观结构分析揭示了细晶强化、Orowan 强化及析出强化等多重强化机制的协同作用。本研究不仅为纳米陶瓷颗粒强化 RHEAs 提供了实验依据，同时拓展了 LPBF 技术在极端环境材料制备中的应用前景。

C06-80

同步超声辅助激光增材制造 TiB/Ti6Al4V 复合材料的组织细化与解聚机制

刘玉洋，安琦，黄陆军*

哈尔滨工业大学

细化微观组织并促进柱状晶向等轴晶的转变是激光增材制造钛基复合材料微观组织调控面对的关键技术挑战。尽管 TiB 增强体能够显著改善钛基复合材料的微观组织，但凝固过程中在晶界上聚集的簇状 TiB 显著恶化了钛基复合材料的力学性能。这里，我们提出一种利用同步的超声振动有效解决激光增材制造 3.5 vol.% TiB/Ti6Al4V 复合材料增强体团簇的策略。我们发现超声振动有效阻止了晶界 TiB 的聚集，不仅 TiB 晶须的长度、厚度和长径比被细化，同时 TiB 的形核率被提高，使钛基复合材料的网状结构更加均匀。超声诱导空化效应激活了 TiB 团聚体的解体，声流加速了 B 的传质，有助于细化 TiB 晶须并增强形核。B 诱导的 CET 与 TiB 析出相贡献了原始 β-Ti 晶粒的改善，细化的原始 β-Ti 晶粒尺寸达到 15.78 μm，然而超声振动不能进一步细化晶粒，推测的主要原因是晶界分布的坚硬 TiB 晶须为柔软的 β-Ti 枝晶贡献了空化屏蔽作用，使 β-Ti 枝晶避免了被空化泡损毁。此外，超声振动显著降低了钛基复合材料的孔隙率，孔隙直径与数量密度都大幅下降，尤其是消除了几十微米级的孔隙，提高了 LDED 复合材料的成形态致密性。复合材

料的室温强度与塑性被超声振动协同提高，屈服强度与抗拉强度分别达到 1104.8 MPa 和 1293.0 MPa，同时延伸率达到 6.0%。断裂机制分析表明，大尺寸孔隙缺陷诱发的解理断裂被替换为韧窝数量增加的准解理断裂机制，同时被超声振动通过解除 TiB 在网状边界上的聚集抑制了微裂纹在晶须之间的拓展，从而提高了复合材料塑性。这篇文章提出了一种通过同步超声振动在线调控增材制造钛基复合材料微观组织与力学性能的新思路，而无需昂贵的粉末预合金化或离线的热处理。

C06-81

激光熔化沉积 TiB/TiC 增强 Ti-6Al-4V 复合材料组织与力学性能研究

袁健强[1,2]，谢乐春*[1,2]，邬娅娅[1,2]

1. 高温轻合金与应用技术全国重点实验室

2. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室

摘要：钛基复合材料因其高比强度与良好耐蚀性广泛应用于航空航天与高端制造领域，但其力学性能与耐磨性仍难以满足极端工况需求。激光增材制造结合增强相颗粒增强技术是提升钛基复合材料性能的有效手段。本研究采用激光熔化沉积制备了 5vol%TiB/Ti-6Al-4V 与 5vol%TiC/Ti-6Al-4V 复合材料，分别优化了各自的工艺参数以获得最佳成形质量。研究结果显示，由于 TiC 熔点高于 TiB，其激光沉积过程需更大热输入，激光功率设为 1200 W，而 TiB 为 1000 W。两者扫描速度均为 450 mm/min，TiC 送粉速率为 1.0 r/min，略高于 TiB 的 0.9 r/min，以匹配工艺需求。TiC 以等轴颗粒均匀分布于基体中，TiB 则以针状骨架结构存在且分布较不均匀。TiC 增强材料的显微硬度平均为 393 HV，显著高于 TiB 的 334 HV，且 TiC 复合材料表现出更优的拉伸性能，综合力学性能更佳。本研究结果有助于促进激光增材制造钛基复合材料中增强相的设计与优化，并为高性能钛基复合材料的制备提供参考。

C06-82

选区激光熔化成形 TiB/(TA15-Si) 复合材料组织与力学性能

徐言恺*

哈尔滨工业大学

以粒径为 15~53μm 的球形 TA15 合金粉末与粒径为 0.5~1μm 的 TiB_2 粉末、粒径为 3μm 的 Si 粉末为原料，通过低能球磨混粉和选区激光熔化技术，成功制备出 0.85vol.%TiB/(TA15-Si)复合材料，对复合材料的显微组织和力学性能进行了研究。结果表明，复合材料中 TA15 基体形貌主要为马氏体，TiB 呈晶须状弥散分布，Si 元素以固溶形式分布于 TiB/(TA15-Si)复合材料中。力学性能测试结果表明，随着 Si 含量从 0.1 wt.%增加到 0.4 wt.%，TiB/(TA15-Si)复合材料的室温抗拉强度逐渐增加，断后延伸率逐渐降低。当 Si 含量为 0.3 wt.%时，TiB/(TA15-Si)复合材料的室温抗拉强度达到 1489MPa，断后延伸率达到 2.5%，700℃抗拉强度达到 375MPa，强化机制主要为载荷传递强化、细晶强化与固溶强化。TiB/(TA15-Si)复合材料经过 900℃/4h 退火热处理后，基体发生粗化，有硅化物析出，室温抗拉强度降至 1197MPa，断后延伸率显著提升至 12.0%。

C06-83

电爆炸喷涂金属自润滑耐磨复合涂层技术研究

黄坤

北京理工大学，爆炸科学与技术实验室

电爆炸喷涂技术是一种利用高能量密度电流瞬间通过金属丝产生爆炸现象的喷涂技术。电爆炸产生的冲击波能够将熔融态金属液滴以极高速度喷射至基体表面，并迅速冷凝形成涂层。这种极快的冷凝速度有助于材料形成微纳米晶体和非晶体结构，显著提升涂层材料的力学性能。

研究探讨了目前多种自润滑耐磨涂层的制备工艺，提出了基于电爆炸喷涂技术制备具有交错空间复合结构的多金属自润滑耐磨复合功能涂层的构想。通过研究电爆炸喷涂液滴在基体表面的铺展过程和形貌特征，结合优化调整喷涂参数和工艺设计，成功制备出符合预期的涂层结构模式。利用电爆炸喷涂技术制备了三种不同配比的交错空间结构复合涂层和两种叠层结构复合涂层（包括耐磨涂层和润滑涂层），并对交

错空间结构复合涂层进行了性能表征分析。此外，对比分析了五种复合涂层在干摩擦条件下的摩擦性能，并总结了复合涂层的摩擦学特性、涂层耐磨机理和自润滑机理。

研究表明，电爆炸喷涂技术制备的多金属自润滑耐磨复合功能涂层具有工艺简便、涂层质量稳定、涂层结合强度高、致密性好和孔隙率低等优点。摩擦磨损试验结果表明，相较于叠层状复合结构的金属涂层，交错复合结构具有更高的结合强度、更优的力学性能、更低的摩擦系数、更短的磨合周期和更宽的适用工况范围，能有效改善摩擦副之间的磨损状况，为电爆炸喷涂技术在开发其他功能复合涂层方面提供了新的思路。

C06-84

金属基复合材料的纳米构型化复合

李赞，张荻

上海交通大学，金属基复合材料全国重点实验室

金属基复合材料能够显著提升金属的杨氏模量、强度等力学性能与热稳定性等功能特性，已广泛应用于空天国防、交通电子等关键领域。然而其强度-塑性矛盾显著，限制了其进一步发展与应用。报告从制约金属基复合材料塑性提高的基本原理出发，提出纳米构型复合强塑化新途径，通过构型设计、晶内纳米复合、晶内纳米非晶复合，促进了金属基复合材料相较金属基体的传统强塑性矛盾至强塑性匹配、再至强塑性超越的发展。报告旨在为高强塑金属基复合材料的设计与创制提供新思路。

墙报

C06-P01

亚微米 TiB2 颗粒增强 Al-Mg 合金的组织调控与强韧化机理研究

袁旭[1]，王志平*[1]，沙刚[1]，陈东[2]，王浩伟[2]

1. 南京理工大学

2. 上海交通大学

高性能锻造 Al-Mg 合金具有高比强度，耐蚀性、导电导热以及可加工性好，在轻量化发展的轨道交通建筑电力等行业成为关键材料。高固溶 Mg 可以降低铝合金的层错能，通过合适的机械热处理方法可以细化晶粒，提升材料强度。但在热处理过程中，高固溶 Al-Mg 合金组织稳定性较差。均匀的亚微米 TiB_2 颗粒与铝基体有更好的结合力以及高温稳定性，在退火过程中对再结晶形核及晶粒长大起到作用。本作品针对锻造 Al-Mg 合金在高温下组织稳定性差的问题，通过添加陶瓷颗粒并调控热处理过程中的再结晶组织，提升材料性能。首先探究了颗粒促进再结晶形核(PSN)和匀质再结晶的温度效应及晶粒长大行为，提升了合金的高温组织稳定性，其次开发了在接近再结晶温度的低温退火+等温退火方式，揭示了温度对颗粒促进再结晶形核的影响机制，对高性能锻造铝合金的开发应用具有重要意义。

C06-P02

Al-Ti-Nb-B 中间合金成分设计及工艺制备对 Al-10SiMnMg 合金晶粒细化影响

陈旭，陈宗宁*

大连理工大学

Al-Si 铸造合金因其优异的铸造性能和高强度重量比，在汽车和航空航天工业中一直备受关注。晶粒细化是提高 Al-Si 铸造合金综合性能的有效方法，因为它可以产生更多的等轴晶粒结构，从而减少铸造缺陷。到目前为止，使用晶粒细化剂进行化学接种是实现晶粒细化的最常见方法之一。Al-Ti-B 系列中间合金（如 Al-5Ti-1B）已被公认为使用最广泛的晶粒细化剂，但是在高 Si 含量铝合金中 Al-Ti-B 系列中间合金会发生 Si 毒化现象使细化剂不能发挥作用，具体表现为 TiB_2颗粒表面被硅化物包裹，丧失作为 α-Al 有效形核基底的能力。，因此本研究旨在设计一款可避免被 Si 毒化的新款 Al-Ti-Nb-B 细化剂，通过多组元合金成分设计与熔体处理工艺优化，构建抗硅包覆的稳定形核相。重点探究细化剂微观组织演化规律（包括

第二相形貌、尺寸分布及界面特性）与异质形核效率的构效关系，最终实现高硅铝合金凝固过程中等轴晶比率提升、晶粒尺寸梯度调控及综合力学性能强化。

C06-P03

原位生长氮化硼薄膜提高铜基体表面耐腐蚀性能研究

柴梓恒，张翔，何春年*

天津大学

金属铜作为应用最广泛的有色金属之一，被应用于精密仪器和航空航天等高新领域。然而随着高新装备不断向集成化、微型化发展，对内部系统中的铜材料提出了更高的抗氧化和耐蚀要求，传统的涂层防护手段难以达到其应用需求。因此，本研究通过在铜箔表面原位合成氮化硼纳米涂层（BN-Cu），以期在几乎不改变其尺寸的前提下实现优异的抗蚀、抗氧化性能。本研究初步探明了 BN-Cu 原位生长机制，同时对其高界面结合能力在高温环境的抗氧化性与含硫条件下的抗腐蚀性进行研究，可以在 200℃氧化 24 h 条件下保持表面结构稳定，阻抗为纯铜的 6.5 倍；在 Na_2S 溶液中可以保持 4 h 的表面结构稳定，硫化增重几乎为 0。该研究初步揭示了不同环境下 BN 薄膜的防护机制，为发展新型微纳电子器件与 PCB 防护材料提供了技术支持。

C06-P04

C 含量对 Cu-Ni-Al 复合材料组织结构及力学性能的影响

陈一萱，邹存磊*

大连交通大学

Cu-Ni 合金因其优良的导电/导热性、耐蚀性、成型加工性及自润滑特性，长期作为电力传输、化工装备及航空航天领域的关键基础材料。随着高端装备向航空航天发动机高温滑动部件、核反应堆热交换器等极端工况发展，传统铜合金需突破高温强度与服役稳定性瓶颈。借鉴镍基高温合金中立方状 γ'-Ni3Al 相的共格强化机制，基于 Cu-Ni 面心立方结构的晶格匹配特性，研究人员开发了 Cu-Ni-Al 合金体系，通过立方状 γ'相共格析出有效提升铜基体高温性能。然而，CuO 润滑相仅在 600℃以上显现显著润滑优势，为拓展材料在室温至高温全温域的自润滑能力，本研究引入碳元素进行微合金化改性，构建覆盖全温度区间的自适应润滑体系。为了保证合金的强度和均匀性，采用真空磁力悬浮熔炼结合磁力搅拌的方法制备了一种石墨相颗粒分布均匀、组织致密的 Cu-Ni-Al-C 自润滑复合材料。结果表明，合金中具有大量弥散分布的大尺寸球状及片层状石墨相，其中球状石墨相尺寸达 10μm 及以上，石墨具有典型的六方层状晶体结构，层间通过弱范德华力结合。当石墨相尺寸增大时，其晶体完整性提高，层间滑移更容易发生，在摩擦界面可形成稳定的固体润滑膜。数量增多则意味着单位面积内可参与润滑的层状结构数量增加，显著降低摩擦副间的直接金属接触概率。微量碳的加入可以在保持材料强度的前提下作为润滑相增强复合材料的耐磨性能。随着 C 含量从 0at.%升高到 1.54at.%，合金的摩擦系数从 0.4731 降低到 0.1285。这些发现为优化 Cu-C 合金的显微组织和摩擦磨损性能提供了启发。

C06-P05

TiB2 颗粒增强铝基复合材料氢脆机制研究

唐毅铭*，耿继伟，陈东，王浩伟

上海交通大学

原位自生 TiB2 颗粒增强 7075 铝基复合材料因具有高强度、高模量等特性，在航空支撑梁结构领域具有重要应用前景。然而，在高温高湿环境下由于氢从材料表面扩散到内部，会造成力学性能的降低，严重威胁飞行安全。尽管铝基体中位错、晶界及第二相与氢的相互作用已有系统研究，但增强相颗粒与氢的作用机制仍处于空白阶段。本研究在电解充氢的条件下，采用氢微印技术（HMT）观察到了银颗粒大量聚集在 TiB2 颗粒表面，证明了 TiB2 颗粒在铝基体中显著吸附氢。并结合飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS) 、扫描开尔文探针显微镜(SKPFM)等方法进一步研究了 TiB2 增强相颗粒吸附氢的作用机制，以及如何作为氢陷阱影响铝基复合材料的力学性能，为设计抗氢脆铝基复合材料提供指导意义。

C06-P06

颗粒增强金属基复合材料构型效应与晶体塑性研究

张鑫，苏益士*，刘旭阳，柴绪顺，李明宇，欧阳求保，张荻
上海交通大学

颗粒增强金属基复合材料具有高强度、高模量和轻量化优势，展现出广阔的应用前景。针对构型化复合材料，研究微观组织特征与宏观力学性能的影响规律，能够挖掘复杂的构型效应。本文采用晶体塑性有限元建模仿真方法，建立双峰构型和层状构型的铝基体模型和复合材料模型，研究晶粒和增强体的形状、尺寸、含量、分布等特征对拉伸力学性能的影响，揭示相关的微观变形机理与复合构效效应，为提升构型化颗粒增强金属基复合材料的力学性能提供指导。

C06-P07

原位合成石墨烯/铜复合材料的制备与疲劳性能研究

强伟杰，张翔，赵乃勤*
天津大学

石墨烯因其独特的微观结构与优异的力学性能被视为铜合金理想的增强体，在航空航天、电子封装等领域具有广阔的应用前景，然而在变幅载荷服役环境下对其抗疲劳性能提出了更高的要求。本课题聚焦于复合材料的疲劳性能，研究不同石墨烯含量对复合材料疲劳性能的影响，通过循环加载试验评价其疲劳性能并分析其在不同应力水平下的疲劳寿命、裂纹扩展速率及断口形貌。结果表明，适量石墨烯的加入可显著提高铜基体的疲劳强度，其强化机制主要包括石墨烯与铜基体之间的载荷转移强化，以及三维网络构型对裂纹扩展的空间限域作用。本研究为开发具有优异抗疲劳性能的石墨烯/铜复合材料提供了重要的理论依据。

C06-P08

缺口半径对原位自生 TiB2 颗粒增强铝基复合材料拉伸缺口敏感性的影响

陈雨箬，陈东*，李险峰，王浩伟
上海交通大学

原位自生 TiB_2 颗粒增强铝基复合材料因高强度、高模量等优异性能，在航空航天领域具有重要应用潜力。然而，其成型加工过程中表面缺口与裂纹会显著降低力学性能，严重制约了实际应用。本研究以 3.5wt%TiB_2/7075Al（T6 态）型材为对象，制备了缺口半径分别为 0.5 mm（$R_{0.5}$）、0.2 mm（$R_{0.2}$）、无限尖锐裂纹（R）的三种拉伸样品，结合实验与模拟方法，系统探究缺口尺寸、应力状态与材料断裂行为的关联。

通过数字图像相关法（DIC）分析发现，复合材料三种有缺口样品均在无明显塑性变形的弹性阶段断裂；缺口越小，局部总应变的最大值越小，应力越集中。

Abaqus 模拟表明，有临界缺口半径（r_c）存在：当缺口半径小于 r_c 时，极高的应力三轴度抑制局部塑性流动，促使材料更早进入脆性断裂模式，但尖锐缺口会导致更大范围的应力场扰动，使得更大面积的区域达到塑性应变阈值。材料的断裂或取决于两者的协同作用。

SEM 微观分析揭示，随缺口尺寸减小，断口附近颗粒周围基体塑性变形形成的空腔占比减少，颗粒团聚断裂数目增多、断裂的程度增大，表明应力集中使失效更易从颗粒团聚开始。

C06-P09

粉末冶金制备碳纳米管增强铝基复合材料的高温拉伸性能研究

李明宇，苏益士*，刘侃，蔡云鹏，董艺伟，管理超然，张鑫，欧阳求保
上海交通大学

铝合金及其复合材料的高比强度优势在 200~400℃的高温下明显减弱，极大地限制了其在航天和交通领域的应用。本文采用变速球磨与粉末冶金工艺，制备了碳纳米管（CNTs）增强铝基复合材料，进行了300℃下的拉伸力学性能测试。结果表明，与同工艺制备的纯铝基体相比，6 vol.%的 CNT/Al 复合材料的

抗拉强度提升了 19.3%，表现出 192 MPa 的抗拉强度与 7.1%的延伸率的良好强塑性协同增强效果。分析了 CNT/Al 复合材料和基体材料在高温下的变形机理，讨论了晶粒尺寸、界面反应和 CNTs 含量对复合材料性能的强化机制。

C06P10

原位 TiC-γ'双相强化 CoNiAlTi 中熵合金

杨威，王培生，刘树红*

中南大学

To develop Co-based superalloys with reduced density and exceptional high-temperature performance, this study designed a novel TiC-γ' dual-phase reinforced Co-based composite with excellent mechanical properties based on the in-situ TiC formation mechanism of Ti2AlC. The optimal sintering process was determined via differential scanning calorimetry (DSC), clarifying the decomposition pathways of Ti2AlC in the matrix (Al/Ti, Ti/C). The decomposition of Ti2AlC not only generates TiC particles in situ but also releases Al and Ti atoms, promoting the formation of the γ' phase in the matrix. The introduction of Ni element based on CALPHAD calculations expands the γ-γ' two-phase region and inhibits the formation of brittle phases, thereby further enhancing the performance of the composite. TEM and SEM-EDS analyses revealed semi-coherent TiC/γ' interfaces and coherent γ/γ' boundaries, contributing to exceptional high-temperature stability. Experiments indicate that the 25 wt.% Ti2AlC/CoNi40 composite showed an enhanced specific 0.2% yield strength (124.5 MPa/g·cm−3 at 800 °C and 74.8 MPa/g·cm−3 at 900 °C) due to its extremely low density of 6.66 g/cm3, surpassing Co-based superalloys and conventional Ni-based superalloys. The dislocation strengthening mechanism of coordinated deformation and the nucleation growth of TiC-γ' dual-phases was analyzed. This study offers a novel strategy for developing high-performance Co-based superalloys with superior high-temperature performance.

仅发表论文

C06-PO01

SiCf/Ti60 薄板致密化过程模拟研究

王敏涓[1]，孙光耀[1]，王浩[1]，黄浩*[1]，庄新翠[2]，孟庆坤[2]

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 中国矿业大学材料与物理学院

SiC 纤维增强钛基复合材料结合了 SiC 纤维的高强度和高模量与钛基体的韧性及加工性能，成为航空航天等领域的理想选择。相较于传统的复合材料制备方法，箔-基体涂层纤维-箔法结合了箔压法和基体涂层法，通过在 SiC 纤维上涂覆钛合金基体涂层以改善界面结合，再通过箔压法制备 SiCf/Ti60 复合材料薄板构件，进一步提高了复合材料的整体性能。本研究通过使用有限元分析方法对 F-MCF-F 法制备（SiCf/Ti60）薄板致密化过程进行了仿真重点分析了先驱丝排布方式（四方和六方）和纤维体积分数（40%和 60%）对致密化效果的影响。结果显示，相较于四方先驱丝排布方式，六方排布能够实现更高的致密度，且当 Ti60 基体体积分数增加至 60%时，可获得更佳的致密化效果。