

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

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

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C06. 金属基复合材料分会

分会主席：张荻、马宗义、耿林、欧阳求保、赵乃勤

C06-01**高性能钛基复合材料热等静压近净成形**

耿林*

哈尔滨工业大学

钛基复合材料具有轻质耐热高强韧的特性，可作为航空航天飞行器热端部件使用。但其加工困难，材料利用率低。热等静压技术可以实现金属材料的制备成形一体化，且得到的材料组织均匀、性能优异，材料利用率大幅提高，十分适用于钛基复合材料构件的制备。但热等静压制备钛基复合材料存在问题：即钛与铁包套在 1086℃会发生共晶反应，但需要在高于 1100℃的温度下烧结才能使 TiB 增强相充分反应生成。为解决这一矛盾，本研究采用钛基复合粉末+低温热等静压的制备方式，以等离子旋转电极法预先制备含纳米 TiB 的复合粉末，再通过低于铁钛共晶反应的温度进行热等静压。制备的材料拉伸强度超过 1000MPa，均匀变形能力大于 10%。进一步对材料的变形过程进行晶体塑性有限元模拟，发现纳米 TiB 的引入促进了晶粒细化，并使得变形时应变分布更加均匀。

C06-02**颗粒增强耐热高强钛基复合材料超塑性变形行为与组织演变机理**

吕维洁*, 邱培坤, 韩远飞, 张荻

上海交通大学

针对空天、国防等国家重大工程领域对耐热高强钛基复合材料复杂构件迫切需求，系统研究了增强体类型、变形参数对复合材料超塑性变形行为和组织演变影响规律，并深入探索了复合材料的超塑性变形机理及多元多尺度增强体的超塑性变形协调机制。通过超塑性拉伸试验，发现轧制态 TiB/IMI834、TiC/IMI834、(TiB+TiC)/IMI834 和 (TiB+La₂O₃)/IMI834 耐热钛基复合材料均表现出具有优异超塑性，其最佳超塑性断后延伸率分别达到 682%、551%、483% 和 501%。对钛基复合材料超塑性变形前后的微观组织结构进行详细表征，揭示了钛基复合材料超塑性变形主要机理为位错蠕变、动态再结晶和晶界转动协调 Rachinger 晶界滑移。建立了评估基体晶粒尺寸演化的“平衡亚晶尺寸”模型。阐明了增强体对超塑性变形协调机制，TiB 晶须可钉扎晶界使周围晶粒协同变形，同时诱发和促进动态球化和非连续动态再结晶形核；TiC 颗粒主要以诱发非连续动态再结晶形核为主；纳米 La₂O₃ 和 (Ti,Zr)₆Si₃ 颗粒钉扎位错，促进动态球化过程。基于基础科学问题研究，开发钛基复合材料等温精密成形技术，解决了变截面异型构件“形/性一体化”控制难题，研制了空天装备用耐热高强钛基复合材料构件，支撑了国家重大战略需求。

C06-03**高熵合金/钛合金复合材料的组织结构与性能：SPS 与 SLM 工艺对比**

张法明*, 熊义峰, 黄宜诺, 冯慧雅, 汤屹洲

东南大学

高熵合金元素含量的多样性和更高的混合熵使其在力学上优于传统金属和合金，由于其在较高温度和较长时间内具有先进的微观结构稳定性，在环境温度、低温和高温下表现出优异的力学性能，同时具有出色的抗侵蚀和耐腐蚀性，硬度高，比强度高。目前高熵合金/金属基复合材料体系因其良好的界面润湿性和键合性而成为金属基复合材料领域的新研究方向，高熵合金做为金属基复合材料的增强相有大量的报道，但报道大多数以铝基和铜基为主，钛基体报道较少。本报告总结了课题组近两年在高熵合金增强钛合金基复合材料领域的新进展，主要对比研究了放电等离子烧结工艺（SPS）与激光选区熔化（SLM）工艺制备的复合材料的微观组织结构与力学性能及强化机理的差异，结果表明 SLM 制备的高熵合金增强 TC4 基

复合材料可以实现强度与塑性的同时提升，报告分析了机理，并展望了其应用。

C06-04

PVD+ALD 原位制备最强铝合金及其他复合材料技术

郝文堂

瑞士 EMPA-Swiss Cluster 中国代表处

传统合成创新复合材料及薄膜需不同腔室及昂贵真空互联，成本高占地大工艺繁琐且无法原位制备；而 Swiss Cluster 突破常规，无需多腔室，需真空互联，无需高预算和大空间即可一个腔室内 PVD+ALD+CVD 原位复合，且样品原位无需移动无二次污染，可高效低成本原位制备超高质量数百层 ALD+PVD+CVD 复合材料及纳米薄膜。

C06-05

利用短纤维标记物揭示金属基复合材料局部塑性应变状态

张芮^{*1}，黄陆军¹，杨非³，耿林^{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，材料结构精密焊接与连接全国重点实验室
3. 怀卡托大学

塑性应变状态可以极大地影响通过塑性成形生产的金属产品的微观结构和机械性能。然而，使用低成本的离位方法几乎不可能定量识别块体材料内部的塑性应变，这极大地限制了材料加工参数—微观结构—性能关系的准确建立。本研究提出了一种利用短纤维在塑性变形过程中的取向改变以揭示金属基复合材料块体中塑性应变状态的方法。首先，推导了塑性应变张量与短纤维取向分布之间的定量关系，并针对增强体初始取向随机性对计算结果的影响进行了误差分析。误差分析表明，该方法在 20%至 80%压缩变形量下具有良好的准确性，在 80%的情况下计算误差小于 $\pm 10\%$ 。之后，以网状结构 TiB/Ti 复合材料为例，重构了轧制态及热压态 TiB/Ti 样品中的应变状态。通过与网状结构的变形进行对比，发现计算结果与网格结构变形吻合良好。该方法步骤简单，准确性良好，成本低廉，具有广泛的应用与拓展空间。

C06-06

网状 TiBw/Ti₂AlNb 基复合材料构型设计与组织性能调控

张宇^{*1,2}，贾自远¹，喻启元¹，黄陆军^{1,2}，耿林^{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，材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

随着航空、航天技术的快速发展对发动机减重、飞行器的飞行速度和续航能力提出了更高的要求，现有的材料已难以满足新的挑战。传统的钛合金难以突破 600°C 的使用温度，高温服役性能亟待提升，而钛铝合金室温脆性大、热加工窗口窄、可焊性差等缺点，势必带来较高的加工难度和制造成本，Ti₂AlNb 合金虽比 TiAl 合金具有更高韧性，但存在室温强塑性匹配和高温耐热性能差的问题，因此亟需开发以一种同时兼具低密度和优异热强性的新型耐热高温结构材料，在中高温零部件（600-800°C）部分替代 Ni 基高温合金。针对上述问题，本项目采用“低能球磨+真空热压烧结”制备方法开发出网状结构 Ti₂AlNb 基复合材料，充分发挥基体合金的塑性和第二相的钉扎强化效果，本研究所制备的网状 TiBw/Ti₂AlNb 基复合材料的室温强度可以达到 1055MPa，塑性可以达到 14.7%，相对于粉末冶金制备的 Ti₂AlNb 合金强塑性得到了大幅度地提升，本研究可为新一代航空飞行器的设计需求提供材料制备基础和技术支撑。

C06-07

Al-Si-Ti 复合体系中的原位反应机理及其强化效果

张鑫*, 李鑫, 王军, 刘磊, 李波, 李树丰

西安理工大学

铝基复合材料 (AMCs) 因具有轻质、高比强度比模量以及优异的导电导热性能而成为航空航天、轨道交通等领域关键装备轻量化的一类重要基础材料。钛硅金属间化合物因其优异的力学和物理性能当其作为增强相时有望赋予 AMCs 结构功能一体化以及耐热和尺寸稳定等特性近年来引起了人们的广泛关注。针对其增强相成分及结构不易控制以及因变形不协调而导致 AMCs 强化效果不理想的瓶颈难题, 本研究采用粉末冶金工艺, 通过增强相形成元素 Ti、Si 在基体中的固溶和偏析, 以低扩散速率 Ti 颗粒为模板, 利用界面处的浓度梯度诱导 Ti-Si 互扩散反应的进行, 在 Al-Si-Ti 复合体系中原位合成了 Ti_5Si_3 增强相颗粒。随着 TiSi 过渡层的形成, 复合材料的界面结构由 Al/ Ti_5Si_3 非共格界面逐渐转变为 Al/TiSi/ Ti_5Si_3 共格/半共格界面, 有效提升了 Ti_5Si_3 颗粒与 Al 基体之间的界面结合, 缩小了二者之间的性能差异, 从而改善了 AMCs 协调变形能力。与此同时, 两级界面结构的形成抑制了脆性增强相中裂纹的快速扩展, 因此使得 AMCs 表现出高模量 (96.1 GPa)、高抗拉强度 (327 MPa) 和良好的断裂伸长率 (6.5%)。本研究为原位自生钛硅金属间化合物增强 AMCs 的研发提供了可行性解决思路。

C06-08**钛基复合材料中基体织构形成机理及 TiB 晶须的 α 变体选择作用**

乐建温*, 韩远飞, 吕维洁, 张荻

上海交通大学, 金属基复合材料国家重点实验室

针对航空、航天领域重大工程对轻质、耐热钛基复合材料薄板的迫切需求, 开展了 TiB/IMI834 复合材料两相区热轧变形, 重点研究了双态基体织构形成机理和 TiB 晶须对基体晶体取向及形貌的影响规律。利用 EBSD/EDS 耦合技术实现了双态基体中初生 α 相及次生 α 相分离。发现随着变形量增大, 初生 α 相形成了 B/T 型织构, 其是基面滑移和棱锥 $\langle c+a \rangle$ 滑移共同作用的结果; 而次生 α 相则为强 T 型织构, 其受母相 β 的变形行为与相变过程中变体选择作用共同影响。初生 α 相对次生 α 相变体具有选择作用, 次生 α 变体倾向于与初生 α 相保持相同或相近晶体取向。热轧过程中板条状 TiB 晶须形成强 $\{100\}\{010\}$ 板织构。TiB 晶须通过促进初生 α 相发生动态再结晶以及对次生 α 相的变体选择作用从而弱化相邻基体织构强度。进一步通过取向差分析法证实了 TiB 晶须对 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变过程中 α 变体具有选择作用。TiB 晶须变体选择作用可以促进被选择 α 变体发生晶粒细化及等轴化, 并且由于 TiB 晶须沿着轧向排布, 被选择 α 变体呈现强 $\langle 11-20 \rangle // \text{RD}$ 丝织构。

C06-09**激光选区熔化铝基复合材料的成分设计和组织演化**

冷金凤*

南京工业大学先进轻质高性能材料研究中心

以铝为代表的轻合金材料的增材制造精密近净成型, 既体现了增材制造本身的致密化、近净成型的发展趋势, 又凸显了在选材上的轻量化、高性能的发展方向。目前铝合金的 3D 打印的市场份额不断增长, 追赶镍、钢以及钛成为支持增材制造下一代发展的重要方向。美国和欧洲已针对增材制造领域的铝基材料进行大的研发投入, 而我国在增材制造用铝基材料研究基础薄弱, 主要体现在可用于增材制造的铝基粉体体系缺乏、无自主知识产权、强塑性不足且产生应力开裂等问题, 同时上游母锭成分设计、中游的粉体制备、下游增材制造及终端应用结合不足, 成为限制增材铝基材料应用开发的瓶颈问题。本团队以增材制造用铝基复合材料为研究对象, 建立 SLM 成型用高性能铝基复合材料的成分设计准则, 研制出高强高韧增材制造铝基复合材料; 进一步揭示了纳米相添加对铝基复合材料微观机构演变的影响机制, 形成可工程化的增材制造系统化原型, 为增材制造的高性能铝基复合材料提供理论和实验基础。

C06-10

粉末冶金与增材制造高强韧钛基复合材料的研究进展

李树丰*, 刘磊, 李少龙, 张鑫, 李波

西安理工大学

针对传统粉末冶金法和熔铸法通过原位反应制备非连续增强钛基复合材料(DRTMCs)中增强相尺寸、分布不易调控,导致该材料强韧性倒置严重的典型问题,本文提出从粉末原料的设计和制备入手,利用电极感应熔融雾化法(EIGA)制备了含纳米 TiBw 的球形钛基复合粉末,并以之为原料采用粉末冶金互扩散-自组组织法制备异质结构钛基复合材料。研究通过将增强相非均匀构型和基体本征异质结构相结合,以提高异变诱导硬化(HDI)作用为 PRTMCs 的强韧性倒置严重的瓶颈问题提供全新解决方案。其次本文还以所制备的球形钛基复合粉末为原料,采用粉末床熔融法(EBM)制备了钛基复合材料。通过微观组织和室/高温性能表征发现纳米 TiBw 呈非连续分布于晶界和晶内起到了良好的晶界钉扎作用,从而使其具备优良的室温强化和高温抗软化作用。

C06-11

钛基复合材料增材制造

安琦*, 黄陆军, 耿林

哈尔滨工业大学

钛合金具有密度低、比强度较高、耐腐蚀与耐热性能较为优异的特点,在航空航天领域应用广泛,但其硬度较低,耐磨性差,并且比强度有待进一步提升,限制了钛合金在磨损或者高承载等极端环境中的应用,不利于该领域装备与构件的轻量化设计。在钛合金中引入陶瓷增强体有望提升强度、硬度与耐磨性,采用 TIG 电弧熔敷方法在钛合金表面制备了高体积分数 TiB、TiC 增强钛基复合耐磨层。结果表明涂层顶部经溶解析出机制生成了两级尺度的 TiB 与 TiC 强化相及二者的共生结构,基底与涂层之间形成冶金结合界面。热输入的增加使得涂层中陶瓷硬质相尺寸减小、实际含量降低,导致硬度下降,最优热输入为 162.7J/mm,硬度可达 HRC62.1,明显高于基体材料的 HRC33.3。复合涂层磨损速率较基底材料降低了 89.2%,并揭示了耐磨机理。为进一步提升钛合金合金强度,以球形 TA15 粉末与细小 TiB2 粉为原料,通过低能球磨混粉和激光选区熔化技术,成功制备出 0.85vol.%原位自生 TiBw 增强 TA15 复合材料。其中 TiB 晶须均匀弥散分布,可有效细化基体晶粒尺寸,使得室温抗拉强度达到 1446MPa,与打印态 TA15 合金相比提高 217MPa,断后延伸率为 4.1%,其强化机制主要为载荷传递强化与细晶强化。经 800°C 保温 2h 炉冷处理后,基体组织由马氏体分解为 $\alpha+\beta$ 相,晶须长度显著增长,平均长径比可达 46.2,其室温抗拉强度降至 1227MPa,延伸率显著提升至 9.4%,具有高强韧特性。

C06-12

高性能金属基复合材料粉末冶金与增材制造技术

陈彪*, 晏琪, 曹遆, 刘恺悦, 万杰, 周鑫毅, 李金山

西北工业大学

铝基、钛基复合材料结合了基体低密度、高塑韧性与增强相高强度、高模量、耐摩擦、抗高温的特性,其优异综合性能在航空航天等领域具有广阔应用前景。本报告介绍了作者近十年来围金属基复合材料粉末冶金与增材制造制备技术开展的相关研究,梳理了作者粉末冶金纳米碳增强金属基复合材料强韧化行为、界面调控与宏量制备的研究结果,介绍了近年来围绕增材制造陶瓷颗粒增强铝合金与钛合金的最新进展,突破了与航空航天用铝合金、钛合金强塑性相当的高性能金属基复合材料制备技术。最后分析了当前金属复合材料制备研究中急需解决的问题和发展方向。

C06-13

基于金属液滴喷射沉积的金属基复合材料 3D 打印技术

张楷浩*

香港科技大学（广州）

在已成型表面上高精度、高成型效率的 3D 打印金属基复合材料是金属材料和增材制造领域发展的重要方向。本文基于金属液滴定向沉积成型可实现多材料高精度打印的思路开展了系列研究，提出了一种新型的均匀金属微液滴生成和定向沉积打印的方法，有望实现多种金属基复合材料在不同基底上直接数字化打印。本报告将主要介绍：（1）利用电流体动力学喷射在常温下将金属固体颗粒逐一喷出，同时在金属颗粒沉积前通过激光拦截并快速加热熔化形成熔融金属液滴，这样实现了熔融金属液滴逐滴喷射沉积。由于金属颗粒喷射与激光熔化过程的解耦，新方法可实现包括难熔金属在内的多金属材料液滴喷射沉积；并且液滴尺度主要由金属颗粒大小控制，易实现微液滴高精度沉积成型。本文实验验证了 30-150 μm 锡和铂液滴的定向沉积打印，并深入探索了相关的液滴铺展、快速凝固成型过程。（2）为实现高成型效率金属液滴打印，本文进一步提出了基于快速送丝结合激光熔化的均匀熔融金属液滴生成方法。理论结合实验探索了通过脉冲激光熔化高速运动（ $\sim 1\text{ m/s}$ ）的 $\Phi 50\text{ }\mu\text{m}$ 304L 不锈钢丝顶端，实现 $\sim \Phi 150\text{ }\mu\text{m}$ 熔融不锈钢液滴的连续均匀喷射，讨论了受热金属微丝的不同熔断模态转换。（3）以原位生长石墨烯增强镍基金属复合材料体系为例，讨论耦合了金属液滴沉积成型与凝固液滴表面石墨烯偏析生长过程，以及石墨烯-金属原位自生复合材料的液滴沉积打印工艺。

C06-14**网状 Ti₂AlC/TiAl 复合材料的多尺度组织调控及强韧化机制研究**柳培*^{1,2}, 王振博¹, 王爱琴^{1,2}, 谢敬佩^{1,2}

1. 河南科技大学, 材料科学与工程学院

2. 有色金属新材料与先进加工技术省部共建协同创新中心

TiAl 合金是使用温度 600°C 以上理想的轻质高温结构材料，在“克克计较”的航空发动机领域展现出令人瞩目的应用前景，但 TiAl 合金的室温塑性差和高温强度不足两大瓶颈性难题制约了其更广泛应用。为解决该问题，本研究提出在 TiAl 合金中原位引入柔性陶瓷 Ti₂AlC，并对其网状构型设计与多尺度组织调控的策略。通过两步烧结法在 TiAl 晶界处原位自生形成微米 Ti₂AlC 网状结构，并将 TiAl 基体调控为 γ -TiAl/ α 2-Ti₃Al 全片层组织，进一步通过热处理实现高密度 Ti₂AlC 纳米析出相在 γ -TiAl 晶内的定向分布。该复合材料兼具优异的室温应变硬化能力和高温强化效果来源于纳米 Ti₂AlC、微米 Ti₂AlC、网状结构和 TiAl 基体的协同作用。结果表明：室温压缩条件下纳米 Ti₂AlC 能够诱导 γ -TiAl 形成一级纳米孪晶并随后产生二级孪晶，为 γ -TiAl 室温变形提供了额外的滑移系；高温压缩条件下纳米 Ti₂AlC 能够阻碍 γ -TiAl 晶内变形孪晶的扩展路径，提升了高温强化效果。此外，室温压缩条件下微米 Ti₂AlC 可以形成基面位错、锥面位错和位错胞，Ti₂AlC 网状结构能够阻碍裂纹的扩展，促进协调变形和应变离域化；高温压缩条件下微米 Ti₂AlC 能够形成高密度的位错缠结，Ti₂AlC 网状结构能够抑制晶界的软化，促进高温强度提升。本研究为开发新一代航空发动机用轻质高强韧及耐高温 TiAl 基复合材料的制备和应用提供理论依据和技术支撑。

C06-15**The role of TiB₂ particles on promoting homogeneous deformation in aluminum alloy studied via in situ micropillar compression**

Hengfu Li*

Shanghai Jiao Tong University

Incorporating ceramic particles has long been recognized as an effective method to enhance metallic materials' strength and elastic modulus. However, this often comes at the expense of ductility due to induced strain localization.

This study focuses on TiB₂/7075 composite single-crystal micropillars to investigate how uniformly distributed TiB₂ particles can enhance the material's strength and work hardening ability. Our findings reveal that nano-sized TiB₂ particles primarily contribute to strength through the Orowan strengthening mechanism, while submicron-sized TiB₂ particles significantly increase the dislocation density, thereby improving work hardening ability and plasticity. As deformation progresses, dislocations accumulate around submicron-sized particles, leading to stress concentration and various stress relaxation mechanisms such as dislocation cross-slip or climb, activation of secondary slip systems, and lattice rotation around particles to form sub-grains in the matrix. This progressive interaction results in a uniform deformation mode with cellular substructures in the composite, contrasting with the strain localization deformation mode observed in 7075 Al single crystals with the formation of deformation bands. These findings highlight the intricate interplay between particle size, dislocation behavior, and material deformation mechanisms in composite materials, providing valuable insights for designing high-strength and ductile materials.

C06-16

激光增材制备原位亚微米 TiC/Ti 复合材料及其强化行为

刘恺悦, 陈彪*, 李金山

西北工业大学

TiC 陶瓷颗粒是非连续增强钛 (Ti) 基复合材料的一种理想增强体, 获得其均匀分散、尺寸细小等特性对制备高性能 TiC/Ti 起到至关重要的作用。现有的 TiC/Ti 复合材料增强相尺寸多集中在微米尺度, 鲜有报道亚微米、纳米尺度等超细 TiC 增强 Ti 基复合材料的制备方法。本研究提出基于激光熔化金属成形时独有的快速凝固等技术特征, 制备均匀分散的原位超细 TiC/Ti 复合材料, 并研究增强相尺寸对强化行为的影响。研究表明, 细化亚微米 TiC 尺寸有利于进一步提升增强相强化效果, 其中载荷传递、热失配强化机制为主要强化因素, 提高复合材料力学性能。研究结果为建立增强相本征结构与力学性能关系, 优化复合材料结构, 改进制备工艺参数提供参考与指导。

C06-17

激光熔化沉积 TiB/Ti-6Al-4V 钛基复合材料的微观结构和力学性能研究

郭娅娅^{1,2}, 温艳^{1,2}, 王立强³, 吕维洁³, 谢乐春^{*1,2}

1. 武汉理工大学, 湖北省汽车零部件先进技术重点实验室

2. 湖北省汽车零部件技术协同创新中心

3. 上海交通大学, 金属基复合材料国家重点实验室

激光熔化沉积 (LMD) 是一种快速、先进的制造技术, 可以有效地制造复合材料。本文采用 LMD 方法利用 TiB₂ 和 Ti-6Al-4V 粉末制备了 TiB/Ti-6Al-4V 钛基复合材料。研究发现不同的 LMD 参数会影响 TiB/Ti-6Al-4V 的微观结构和缺陷的产生。通过改变激光功率和送粉速率发现 TiB/Ti-6Al-4V 电阻率先减小后增大, 这与缺陷孔隙形成有关。SEM 微观结构结果表明, LMD 过程中获得了网状分布的 TiB, 基体为网篮状, 且 TEM 观察到基体中含有 TiB, 表明 TiB₂ 在 LMD 中发生原位反应, 生成了 TiB。通过比较不同参数下 LMD TiB/Ti-6Al-4V 的力学性能, 发现 LMD TiB/Ti-6Al-4V 的拉伸强度和伸长率分别为 1175.0MPa 和 6.16%。这些结果表明 LMD 有望为钛基复合材料提供新的制备方法。

C06-18

耐磨蚀高强韧钛基复合涂层设计及耦合损伤行为

张宏伟, 崔洪芝*

中国海洋大学

为了提高石油钻杆用钛合金的耐磨损腐蚀性能, 采用激光直接能量沉积技术在 TC4 钛合金表面制备

了 Ti 基复合涂层。显微组织分析表明,在 β 基体上形成了多级强化相(微米级 TiN 相和纳米级 TiB 相)的非均质结构。当 Cu 含量大于 12 wt.% 时, β 晶粒细化至 $2\mu\text{m}$ 。由于 Mo 元素的固溶强化和 TiN 相的形成,复合材料的显微硬度提高到 $700\text{HV}_{0.2}$ 以上。同时, 12Cu 复合材料的断裂韧性显著提高至 $8.21\text{MPa}\cdot\text{m}_{1/2}$, 这是晶粒细化、富 Cu 相高密度位错和纳米 TiB 相共同作用的结果。12Cu 复合涂层硬度和韧性的协同增强促进了磨损表面钛钼铜复合氧化膜的生成,耐摩擦腐蚀性能比 TC4 提高了 7 倍以上。

C06-19

激光熔融沉积钛基复合材料的高应变率压缩响应行为研究

李政¹, 任宇², 谭成文^{*1}

1.北京理工大学材料学院

2.北京理工大学机电学院

钛基复合材料 (Titanium matrix composite, TMC) 因其高比强度、比刚度而逐渐被选用于承载高应变率载荷的结构材料。激光熔融沉积 (Laser Melting Deposition, LMD) 技术是一种适用于复杂结构和功能梯度快速成型的低成本增材制造技术,在 TMC 材料的结构-功能一体化成型方面具有显著的技术优势。本研究以 TiC 和 TiB 作为增强体,以 TA15 钛合金作为基体,利用 LMD 技术制备了 TiC/TA15 和 TiB/TA15 两种复合材料,通过对比加载前后微观组织演化情况,分析了材料在高应变率加载下力学性能和绝热剪切行为差异的内在机理,为服役于高应变率载荷条件下 TMC 的设计制备提供借鉴。

C06-20

3D 打印-熔体浸渗构建结构/成分梯度层状 Al/陶瓷复合材料

蒋明月, 胡羽白, 沈平*

吉林大学

本研究通过定制的结构和成分设计,开发了高性能的金属-陶瓷层状梯度复合材料,以满足高端工程领域对特定性能或功能的需求。利用数字光处理 (DLP) 和直接墨水书写 (DIW) 技术,结合磁力辅助压力浸渗工艺,我们成功制备了具有结构梯度和成分梯度的 Al/Al₂O₃ 和 Al/(Al₂O₃-B₄C) 复合材料。通过精确控制 DLP 打印浆料的流变特性和层间距,改变金属与陶瓷的层厚比,赋予了复合材料独特的力学性能梯度变化。成分梯度设计通过调整 B₄C 和 Al₂O₃ 的比例,实现了从高强度到高韧性的连续调控,为材料性能的定制化提供了新途径。研究不仅揭示了 3D 打印技术在制备复杂梯度结构材料方面的潜力,还通过实验与模拟相结合的方法,理解了复合材料的裂纹萌生、扩展和增韧机制。这些发现为金属/陶瓷复合材料的设计和制备提供了关键技术支持,同时为特定应用领域定制化理想性能材料,拓展了复合材料的应用范围和市场前景。

C06-21

增材制造难熔高熵合金的晶胞结构作用和变形机理

刘畅熙, 王立强*

上海交通大学

增材制造难熔高熵合金 (RHEA) 被认为是一个具有挑战性的研究,缺少关于增材制造难熔高熵合金的微观结构和力学性能的研究。在本次工作中,通过测试了 72 组工艺参数,成功地使用增材制造技术制备了 Ti_{1.5}Nb₁Ta_{0.5}Zr₁Mo_{0.5} 难熔高熵合金。并且,这种增材制造难熔高熵合金具有独特的晶胞结构。这种晶胞结构阻碍了相邻晶胞间的位错转移,限制了晶胞内的位错滑移,从而显著提高了强度和并且让变形更均匀。此外,晶胞结构促进了后期变形过程中位错的重新分配,以避免晶粒内的应变集中。同时,增材制造难熔高熵合金的主要变形机制是位错滑移,即滑移发生在单个晶胞或多个晶胞内。晶胞结构使位错更均匀的在单个晶粒内滑移。这个工作提出了在不同变形阶段的晶胞结构演化过程以及位错的运动,为提高增

材制造难熔高熵合金的力学性能提供了新的见解。

C06-22

压力浸渗制备高强韧性钛纤维-碳化硅晶须双相增强铝基复合材料摩擦学行为及机理研究

杜亭亭*

哈尔滨工业大学

本工作为提升铝基复合材料的摩擦磨损性能,提供一种获得高强韧性且耐磨铝基复合材料的策略。基于双相强化机制,采用压力浸渗工艺制备 Ti-6Al-4V 纤维(Ti_f)和 SiC 晶须(SiC_w)双相增强 5056Al 复合材料($(Ti_f+SiC_w)/5056Al$)。系统研究 SiC_w 含量为 0~10wt.% 的 $(Ti_f+SiC_w)/5056Al$ 复合材料的显微组织、力学性能和摩擦学行为,并阐述其磨损机理。结果表明, SiC_w 和钛纤维混合增强的最佳配比为 3wt.%。此条件下混合增强复合材料($Ti_f+3SiC_w/5056Al$)较单一纤维增强的($Ti_f/5056Al$)抗弯强度提高 11.5%, 达到 533 MPa, 断裂韧性提高 5.4%, 达到 $29.1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; 硬度提高 13.1%, 达到 104HB。在 40N 的恒定载荷和 0.2m/s 的滑动速度下, 磨损率和摩擦系数分别降低 80.7%和 62.9%。磨损机理表明, SiC_w 有助于在滑动过程中形成机械混合层(MML), 磨损机制主要为轻微的粘着磨损和磨粒磨损。当含量超过 3wt.%时, SiC 晶须会聚集, 在摩擦过程中易脱落, 导致磨损加剧, 产生剧烈的粘着磨损和疲劳磨损。本研究为延长铝合金的使用寿命, 提高铝基复合材料的耐磨性提供新的指导策略。

C06-23

纳米混杂增强铝基复合材料的组织与力学性能

张学习*, 张佳佳, 耿林

哈尔滨工业大学

高含量石墨烯纳米片(GNS)的均匀分散是获得 GNS/Al 复合材料的良好综合性能的关键挑战。在传统方法中, 通常通过延长球磨时间或增加球磨能量来实现 GNS 的均匀分散, 但这往往会严重破坏 GNS 结构。本工作采用两步球磨工艺在 GNS/Al 复合材料中引入碳化硅纳米颗粒(SiC_{np}), 在促进 GNS 均匀分散的同时, 又作为第二增强相提供了额外的强化作用。首先 SiC_{np} 和 Al 粉进行第一步球磨, 获得具有大比表面积的 Al 片, 为后续加入的 GNS 提供了充足的分散面积, 有效提高了 GNS 的分散效率并减少了 GNS 结构的损坏。最终, 在热挤压后得到的 $(GNS+SiC_{np})/Al$ 复合材料中 SiC_{np} 和 GNS 均匀分散并与铝基体良好结合, 并获得了有效的晶粒细化, 得到纳米晶。得益于 GNS 的均匀分散以及 SiC_{np} 与 GNS 之间的混杂增强作用, 挤压态 $(GNS+SiC_{np})/Al$ 复合材料的极限抗拉强度(UTS)和延伸率分别比 GNS/Al 复合材料提高了 41.0%和 47.6%, 获得了良好的综合性能。

C06-24

仿生结构设计在高强韧金属基复合材料研制中的应用

刘增乾*, 张哲峰

中国科学院金属研究所

金属结构材料是现代科技发展的重要物质基础, 然而其强度、断裂韧性、阻尼、电导等不同性能之间存在严重的相互制约关系, 基于成分和组织调控的传统方法难以突破这一瓶颈, 亟需探索协同强韧化新方法。自然界中的生物材料经亿万年的竞争与选择, 进化出巧妙的结构而表现出优异的强韧性能, 可为金属材料强韧化设计提供重要启示。本报告针对装甲与空间防护等重大需求, 通过模仿生物材料空间取向结构, 以生物力学效应指导结构设计, 研制出高强韧高阻尼镁基仿生复合材料, 实现了强度、阻尼与吸能效率的更优匹配, 且兼具优异的断裂韧性与形状记忆功能, 进而发展出仿生金属材料力学模型, 建立了仿生结构与力学性能之间定量关系, 并以此指导仿生结构优化设计, 进一步实现了材料协同强韧化。在此基础上, 将相关仿生设计思路与制备策略扩展应用于其他金属体系, 研制出轻质高强高阻尼镁-MAX 相仿生金属陶

瓷、高弹高强高导银-镍钛仿生材料、高强韧高耐磨银基电接触材料等一系列新型高性能金属基仿生复合材料，克服了强度、韧性、阻尼、电导等不同性能之间的制约关系，突破了现有材料性能的诸多极限。

C06-25

颗粒增强金属基复合材料的构效关联与机器学习研究

苏益士*, 林子畅, 柴绪顺, 刘旭阳, 张鑫, 欧阳求保, 张荻
上海交通大学

颗粒增强金属基体复合材料是空天、国防领域的战略性基础材料，通过复合构型调控可以有效缓解复合材料变形失配，进而协同提升复合材料的强韧性匹配。目前，复合构型的复杂性和多样性导致传统的、耗时的实验和模拟，难以快速建立颗粒增强复合材料的构效关系，相关的数据驱动研究也较为缺乏。本研究将颗粒增强（SiCp/Al）复合材料的构效拟实、优化算法与机器学习等相结合，筛选出具有优异力学性能的复合材料构型。提出了颗粒团聚来量化颗粒团聚效应，优化出颗粒团聚和粒径级配等参数，定量分析复合构型对强韧性匹配的影响。基于有限元计算获得的复合材料构效关系数据集，应用机器学习预测复合材料的力学性能，结合粒子群优化算法搜索具有极端力学性能的复合构型特征。建立深度学习模型并预测复合材料的应力-应变关系，快速筛选具有优异强韧性匹配的复合构型，确定不同构型区域在整个拉伸阶段的贡献。

C06-26

仿贝壳结构颗粒晶须混杂增强(TiBw-TiB₂)/2024Al 复合材料热变形及性能优化

钱明芳, 张纪东, 张学习*, 耿林
哈尔滨工业大学

自然生物材料往往具有特殊的结构，表现出优异的力学性能，为设计和制备先进结构材料提供了思路。师法自然，在诸多生物材料中，贝壳较高强韧性及优异耐磨性吸引了众多学者的注意。其优异性能源于软硬相交替排列的纳米级“砖-泥”(brick-and-mortar)结构。冷冻铸造结合金属浸渗，因其工艺简单灵活被广泛应用于制备具有仿贝壳结构的金属基复合材料。本文通过冷冻铸造结合挤压铸造制备了具有仿贝壳结构的颗粒晶须混杂增强的(TiBw-TiB₂)/2024Al 复合材料，随后利用热挤压进一步的提高了复合材料力学性能。研究了热挤压温度对复合材料微观组织及力学性能的影响。结果表明：随着挤压温度的升高，复合材料中的气孔缺陷逐渐减少，致密度从 98.1%分别提升到 99.4% (475 °C)，99.7% (500 °C)，和 99.9% (520 °C)。此外，陶瓷层的厚度随着挤压温度的升高而逐渐减少，对于 475 °C，500 °C，和 520 °C 挤压的样品层厚分别为 21.5 μm，18.6 μm 以及 12.8 μm。值得注意的是不同挤压温度下的复合材料的晶粒尺寸相差不大，分别为 2.6 μm，2.5 μm 及 2.7 μm。在 520 °C 挤压的样品经 T6 热处理后表现出最佳的力学性能，相较于铸态材料，复合材料的抗拉强度和延伸率分别提高了 21%和 6.6 倍。压缩循环加载-卸载试验表明层状结构起到了显著的强化效果，产生背应力强化约为 310 MPa。

C06-27

三维结构的原位可控构筑——从结构材料到功能材料

沙军威, 赵冬冬, 何春年, 赵乃勤
天津大学

随着科技和社会的发展，能源和环境问题逐步成为人类面临的两个亟需解决的重大问题。尤其航空航天、新能源汽车等领域对于材料轻量化和高效储能的需求日益增大。然而，传统的零维、一维和二维材料因其本征性能的不足，已难以满足需求。因此，本课题组通过自下而上和原位合成的思路，面向结构材料领域和功能材料领域，可控构筑三维构型复合材料，并系统研究材料的力学和电化学性能，及其对于力学和电化学性能的增强机理。通过选区激光熔化的方式，可控构筑新型铝基复合材料，通过一维、二维增强

相显著提高铝合金基体的力学性能。结果显示,该铝基复合材料可实现室温抗拉强度 $>600\text{ MPa}$ 和延伸率 $>8\%$ 的优异性能,并且显示出优异的高温和疲劳特性。受此启发,利用激光 3D 打印的方式可控构筑三维网络构型石墨烯,并以此为基础,开发了三维石墨烯、N,S 共掺杂的三维石墨烯/碳纳米管阵列等三维构型碳纳米复合材料。以该材料作为 Li 金属电池、K 离子电池、Li-O₂ 电池和 Li-CO₂ 电池电极材料,获得了优化的温度场、应力场和电子传输路径,显示出优异的电化学储能性能,并揭示了该三维结构的储能机理。

C06-28

基于转录组学的高结强度复合涂层镁基支架成骨机制研究

施泽文^{1,2}, 杨放³, 庞清江^{*1}

1.宁波市第二医院

2.华中科技大学同济医学院附属同济医院

3.宁波大学医学部

目的: 镁基支架由于其生物可降解性以及天然骨相似的力学特性,逐渐成为了一种具有潜力的骨修复材料。通过在镁支架表面添加涂层,可以提高其降解速度,提升临床应用效果。然而,这些涂层与镁基底结合强度不足以及作用机制不明确,阻碍了镁基支架的临床应用。

方法: 本研究通过微弧氧化和浸涂法,在镁基支架表面开发了一种具有高粘结强度的复合涂层,称为 PDA-MHA/Mg,包含微弧氧化(MAO)层、纳米羟基磷灰石(nHA)和聚多巴胺(PDA)。通过体内外实验对 PDA-MHA/Mg 的降解性、生物相容性和促骨修复性能进行了检测。然后采用转录组学对 PDA-MHA/Mg 促骨修复机制进行了探索,并结合 RNAi 技术、qPCR、IF 和 WB 技术对转录组学结果进行了验证。

结果: 研究表明, PDA-MHA 涂层与镁支架表面的结合强度达到 $40.56 \pm 1.426\text{ MPa}$,不仅提高了表面亲水性并有效控制了降解速率。此外,该支架通过影响 RUNX-2、OPN、OCN 和 VEGF 等骨形成标记物,促进了骨再生。转录组学研究进一步证明, PDA-MHA/Mg 支架能提高羧肽酶 Z(CPZ)的表达,激活 Wnt-4/ β -catenin 信号通路,从而促进骨再生。

结论: 本研究制备的 PDA-MHA/Mg 支架,具有高结合强度的复合涂层,能激活 CPZ 并启动 Wnt-4/ β -catenin 信号通路,最终促进骨再生。这一发现对于深入理解镁基支架如何促进骨再生,以及为创造更好的镁基骨修复材料提供理论基础至关重要。

C06-29

构型化复合材料热变形过程中的组织与性能调控

马凯*, 刘振宇, 肖伯律, 马宗义

中国科学院金属研究所

对金属基复合材料的多相、跨尺度组织进行构型化设计,有望突破传统金属基复合材料长期以来一直存在的塑韧性过低的瓶颈。然而,构型化复合材料在成形加工过程中会发生复杂的组织变化,从而影响力学性能。构型组织可控化变形加工难,不利于其工程应用发展。本研究以典型构型化碳纳米管增强铝基复合材料为研究对象,通过开展热变形物理模拟、热挤压等工艺实验,结合精细化微观组织表征,揭示了构型组织在热变形过程中演变规律,并对构型组织的调控机理进行了深入探讨。

C06-30

冷冻铸造-压力渗透构建具有"砖-泥"结构的仿珍珠陶瓷-金属复合材料

郭瑞芬*, 胡志杰, 李云亮, 沈平

吉林大学

如何在人工合成材料中获得分级有序的“砖-泥”结构并接近其组分特征是当前仿珍珠贝材料研究中的关键难点。在此,我们受水基陶瓷浆料定向冷冻时冰晶在失稳界面二次形核造成陶瓷片层横向裂纹的启发,

提出巧妙利用这些裂纹构建“砖-泥”结构的新思想。通过双向冷冻铸造技术制备了具有“砖-泥”结构雏形的层状 Al_2O_3 或 TiO_2 陶瓷骨架；采用浸渗技术向这一陶瓷骨架中渗入 Al 合金熔体，随后选择性地进行热处理或者热压工艺获得轻质、高强韧的仿珍珠贝结构复合材料。研究发现复合材料的机械性能受陶瓷组分和含量，金属片层厚度以及界面反应共同作用。陶瓷含量的提高以及金属片层厚度的减小往往会导致复合材料的韧性降低，而弯曲和压缩强度增加。具有砖-泥结构复合材料的断裂机制包括裂纹偏转、合金层塑性变形、未开裂韧带的桥接、多裂纹的产生以及砖拉拔。研究获得了在组分、结构和性能上均可与自然珍珠层材料相媲美的高性能、大尺寸仿生结构材料，并发展一种经济、灵活的材料制备新技术，为研发其他轻质高强韧仿生材料提供重要参考。

C06-31

界面植入锰粉对 1060 Al/AZ31B Mg 复合板组织和性能的影响

张睿豪¹，陈浩然²，杨娜^{1,3}，蒲璐¹，蒋显全^{*1}

1. 西南大学

2. 川仪自动化股份有限公司金属功能材料分公司

3. 贵州工程应用技术学院

铝镁复合板在退火过程中极易在界面生成连续脆性的金属间化合物层，大幅度降低复合板的力学性能，而植入中间层是调控铝镁界面的常见方式，但目前的研究一般以植入箔材或镀层为主，植入粉末中间层的相关研究很少。理论上，植入粉末中间层不仅可以抑制金属间化合物的连续生长，还可以实现颗粒增强界面的效果。本文通过在热轧 1060/AZ31 复合板界面植入锰粉，研究了轧制变形量、轧制中间退火和轧后退火工艺对 1060/AZ31 复合板的组织和性能影响。通过对复合板进行剥离和拉伸试验表征，发现界面植入锰粉的复合板剥离强度和抗拉强度始终大于未植入锰粉的复合板，在总变形量 55% 中间退火 20min 时最高，达 8.15N/mm；对复合板界面形貌进行 SEM 和 EBSD 表征，发现锰粉与铝镁基体结合良好，且会引起附近界面发生波动，增加界面结合面积，结合剥离断面形貌分析，得出了锰粉在界面处起到颗粒增强效果的结论。中间退火使得铝镁复合板界面形成铝镁金属间化合物层，退火时间越长层厚越厚，在二道次轧制时金属间化合物层破碎，破碎金属间化合物在界面同样可以起到颗粒增强效果，提高了界面剥离强度。植入锰粉的铝镁复合板在中间退火时同样会产生铝镁金属间化合物，但锰粉物理隔断了其连续生长，再结合二道次轧制使得金属间化合物破碎程度增加，颗粒增强效果更好，界面剥离强度更高。轧后退火过程中破碎的金属间化合物逐渐连成层状，复合板界面剥离强度持续下降。中间退火和轧后退火过程中都有发现锰粉被铝镁金属间化合物完全包裹成为 AlMn 相，可见锰粉不仅可以通过物理隔断的方式抑制铝镁中间相生长，还可通过与铝结合形成 AlMn 相的化学方式抑制铝镁中间相生长。

C06-32

多层金属复合材料的应变局部化延迟和抗断裂失稳机理

刘宝玺*

河北工业大学

多层金属复合材料在航天航空、汽车造船、核能电力系统中起着非常重要的作用。相比于传统单一金属，多层金属复合材料具有超高的塑性变形能力和断裂韧性指标。本文综述介绍多层金属复合材料在塑性变形过程中的应变局域化延迟和抗断裂特征和机理，归纳出周期性颈缩、脱层断裂、隧道裂纹、弥散剪切带对抑制多层金属塑性失稳的作用机理，并阐明脱层断裂、裂纹分叉、隧道裂纹对多层金属的增韧机理和韧脆转变行为的作用规律，可为金属材料强韧化提供新的设计思路和技术支撑。

C06-33

高强韧分级结构($\text{ZrB}_2+\text{B}_4\text{C}$)/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。

C06-34

镁基复合材料液固高压成形工艺及性能研究

齐乐华*, 周计明, 陈宝林

西北工业大学

碳纤维增强镁基复合材料(Cf/Mg)具有轻质、高比强度、高比模量、优异的阻尼性能和热稳定性等优点，可以弥补传统镁合金材料的不足，被视为新一代结构材料，在航空航天、武器装备及轨道交通等领域有着广阔的应用前景。然而，镁易高温氧化燃烧、碳纤维与镁合金之间润湿性差，这给 Cf/Mg 复合材料异形零件的制备和成形质量控制带来更大挑战。真空吸渗挤压工艺是一体化制备金属基复合材料新工艺，它利用真空负压使熔融金属液浸渗至预制体中，随即在机械压力作用下充分浸渗，并在其处于液固态时施加高压使其进一步强制补缩以实现致密化，从而消除复合材料的内部缺陷，提高制件整体性能。本报告对本团队近年来在 Cf/Mg 复合材料构件制备工艺、微观形貌分析和复合材料构件性能等方面的研究成果进行简要介绍。针对短切碳纤维、整体碳毡、2D 针刺碳毡和连续碳纤维及其构成的支架件、散热翅片、筒形件和薄板异形件等，重点阐述真空吸渗挤压制备 Cf/Mg 复合材料构件的成形方案、镁液浸渗规律、缺陷控制策略和构件成形质量控制。依据构件的不同使用需求，开展相应的构件力学性能、尺寸稳定性和导热性能等研究。最后对 Cf/Mg 复合材料的发展趋势进行分析和展望。

C06-35

基于相变工程的金属基复合材料强韧化

郑王树^{1,2}, 赵蕾¹, 郭强*¹, 张荻¹

1.上海交通大学, 金属基复合材料国家重点实验室

2.新加坡南洋理工大学

强度和韧性的“倒置关系”是长期以来制约金属基复合材料发展的瓶颈难题。相变陶瓷作为一类兼具优异本征力学性能和可变形能力的新兴增强体，在温度场或力场作用下能够发生奥氏体(四方相)↔马氏体(单斜相)的可逆相变，由此产生约 10%的晶格应变，有望缓解应变局域化和应力集中，实现复合材料的强度与韧性协同提升。基于此，本文制备了奥氏体含量可控的铈掺杂氧化锆-纯铝复合材料(CZ-Al)，通过聚焦离子束与微纳热/力学测试手段，实现了在复合材料微柱中陶瓷增强体的可逆马氏体相变与强韧性的协同提升(强度与韧性均比纯铝提高 1 倍以上)；结合高分辨 X 射线、电子透射/衍射技术，揭示了其可逆相变与强韧化机制来源于金属基体束缚对陶瓷的亚稳化、陶瓷的三维网状/力链构型、陶瓷与金属基体良好的界面结合与协同变形能力。以上发现表明，从结构承载的角度，相比于传统不可变形的增强体，陶瓷相变引起的晶格应变能够协调增强体-基体的变形，避免应力集中；同时，陶瓷相变将进一步耗散弹性应变能，在强化复合材料的同时实现相变增韧。在轻质金属基复合材料中实现陶瓷的可逆相变，将进一步拓宽这类材料在智能传感、驱动等领域的应用前景。

C06-36

取向冷冻-熔体浸渗制造复杂异质结构金属基复合材料及其性能研究杨立凯^{*1}, 沈平²

1. 兰州理工大学

2. 吉林大学

自然界孕育了众多既坚韧又高效的生物材料, 它们的卓越性能源自复杂的异质结构设计。模拟自然界的这种精妙构造, 成为研发新一代合成材料的重要灵感来源, 尽管在人工材料中复制这种精细的仿生结构面临着显著的技术障碍。在此, 我们创新性地发展了一种取向冷冻-乳液/离心-熔体浸渗的新策略, 以铝-氧化铝 (Al-Al₂O₃) 材料为模型案例, 成功制造出一系列集生物启发异质结构与人为优化性能功能于一体的新型金属基复合材料, 并实现了对材料微观结构的精确调控。该制造策略分为两步: 首先, 利用取向冷冻技术来构建具有复杂异质性的陶瓷骨架; 随后, 借助压力浸渗技术, 将金属相填充到多孔陶瓷骨架中, 得到复合材料。具体来说: (1) 取向冷冻-乳液-压力浸渗技术被用于构建具有层状/管状结构的复合材料, 这一过程突破了传统冷冻技术仅能生成单一结构类型的限制。通过调整溶剂混合比 (水与环己烷体积比), 构建了高度复杂且精细的层状/管状异质结构。进一步分析了微观结构与材料力学性能之间的关联, 结果表明, 层状/管状结构的相互作用显著增强了材料的能量吸收能力, 赋予了复合材料卓越的力学性能和能量吸收特性。(2) 取向冷冻-离心-压力浸渗技术则用于制备具有层状/梯度结构的复合材料。离心处理可使陶瓷颗粒呈梯度分布, 增加离心速度或持续时间可增强此梯度效应。水取向凝固则形成层状结构, 同时保留骨架的梯度特征。压力浸渗铝合金后, 获得了具有层状/梯度结构的复合材料。该材料具有外强硬内柔韧的梯度特性, 其强度、硬度和耐磨性的提升与陶瓷相含量的增加正相关, 而其断裂韧性得益于金属相比例的提升及层状结构诱发的外增韧行为。综上所述, 本研究不仅提出了一种灵活、高效且成本效益显著的复合材料制备策略, 还成功合成了多种具有复杂异质结构的金属基复合材料, 为推动轻量化、高性能复合材料及其先进制造技术的发展提供了新颖的理论与实践基础。

C06-37**三维联通碳/镁复合材料的镁化学可逆性研究**王琳^{1,2}, 卫增岩^{1,2}, 武高辉^{*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, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

可充电镁离子电池有望成为锂离子电池的潜在替代品。然而, 与锂离子电池中 Li⁺导电固体电解质界面相的形成不同, 解决镁金属电池易在普通有机电解液中形成离子阻挡界面层的问题仍然是具有挑战性的。本文设计制备了一种三维联通碳/镁复合材料, 其中碳结构作为镁金属负极表面的 Mg²⁺导电界面相, 防止镁金属直接接触电解液, 在抗氧化的 Mg(TFSI)₂/乙腈电解液中展示可逆的镁化学。同时, 这种人造的界面使 Mg/V₂O₅ 全电池能够在含水的乙腈基电解质中实现可逆循环, 这项研究为常见的有机电解液与镁金属电极的兼容提供了新的思路。

C06-38**高强韧耐腐蚀原位纳米强化稀土铝合金研究**

赵玉涛*, 怯喜周, 陈刚

江苏大学

针对航空航天、轨道交通、汽车等领域关键结构部件对铝合金高强韧、抗疲劳、可焊接、耐腐蚀等综合性能要求的不断提高, 项目组提出稀土和原位纳米颗粒耦合强化铝合金新方法, 研究了稀土与纳米颗粒耦合作用铝合金的微观组织演变规律, 并探索其对力学性能、耐腐蚀性、可焊接性、抗疲劳等性能的影响行为及协同强化机理, 开发了电磁/超声场调控纳米强化稀土铝合金的制备和组织性能优化技术, 实现在航空、高铁和新能源汽车上的规模应用。

C06-39

纳米氧化物弥散强化铝合金的设计与耐热机制

何春年*

天津大学

航空航天领域提速减重的重大需求对轻质材料的耐热性能提出了更高要求,传统铝合金材料由于高温下析出相粗化力学性能急剧下降,300°C以上服役性能已达瓶颈。针对实现铝合金材料高热稳定性和高温力学性能突破这一关键科学问题,本课题组提出“界面置换”分散策略制备了亚10 nm氧化镁弥散强化铝合金,并实现了高温下稳定共格界面控制,探明了该材料的高温强化机理与蠕变机制,最终获得了具有突出高温稳定性、高温强度与高温蠕变性能的铝合金材料,也为发展新一代高强耐热铝合金材料提供了新思路。

C06-40

复合材料弹性模量精确预测

张振军*

中国科学院金属研究所

基于组元相的性能来预测双相材料的性能对材料设计开发及优化具有重要意义。基于传统的并联与串联模型及微积分思想,推导出了如下含离散型第二相双相材料弹性(剪切)模量的统一表达式,实现了混合弹性(剪切)模量的精确预测。一方面,该模型首次将微积分思想应用于混合模量计算中,不但得到了传统模型不能得到的混合模量的精确值,而且给出了含不同尺寸、形状与分布离散型第二相的双相材料混合模量的统一表达式,因而具有重要理论意义。另一方面,该模型所需要参数简单易得(只需平均等效单元体的各轴长),计算公式简便,因而也具有极高的实际应用价值。此外,鉴于导电问题与模量问题相似性,该模型同样也适用于预测双相材料的混合导电率。

C06-41

碳纳米管/铝复合材料研究探索及未来展望

刘振宇*, 肖伯律, 马宗义

碳纳米管作为超高性能的先进碳材料,被视为复合材料的一种理想增强体,近年来伴随成本指数级下降,为其工程应用提供了便利条件。然而,碳纳米管易团聚、难分散且易与铝高温反应生成易潮解的界面相,此外大量碳纳米管分布在晶界还容易引起晶粒超细化、变形局域化等加剧塑性恶化等不利影响,成为制约碳纳米管/铝基复合材料工程应用的关键难题。本报告总结了申请人近些年来在碳纳米管/铝复合材料宏量制备基础、塑韧化方面所开展的研究探索工作,并对碳纳米管/铝复合材料未来进一步的发展方向进行探讨。

C06-42

石墨烯增强铝纳米复合材料微结构及力学性能

李多生*¹, 叶寅¹, 叶志国¹, Qinghua Qin², 吴文政¹

1.南昌航空大学

2.深圳北理莫斯科大学

研发两步法制备石墨烯增强铝纳米复合材料。对低体积分数(0.5-2)%石墨烯纳米片(GNP)增强铝纳米复合材料的微结构及力学性能开展了实验及仿真研究。结果表明,石墨烯在纳米复合材料的基体中均匀分散,具有良好的界面行为和微观结构特征。在纳米复合材料中没有显著观察到有害相的碳化铝(Al_4C_3)。与纯铝相比,含有低体积分数石墨烯的纳米复合材料的力学性能显著提高。当在铝基体中加入0.5、1、2vol%

石墨烯时, 石墨烯增强纳米复合材料的平均抗压强度分别为 297MPa、345MPa 和 527MPa, 从 330%显著提高 586%。同时, 为研究石墨烯增强铝纳米复合材料典型缺陷如孔隙对其力学行为的影响, 开展了仿真研究。模拟研究了孔隙度、孔隙尺寸及孔隙形状三个重要因素与 2vol%石墨烯/Al 复合材料内部微观应力、应变分布的关系。结果表明, 孔隙沿着拉伸方向的基体应力较小, 而孔隙两侧出现较大的应力, 是潜在的裂纹源。孔隙度越高、孔隙孔径越大, 材料失效危险性增高。圆孔复合材料失效方式可能是孔隙开裂, 其它形状孔隙复合材料则更倾向于界面脱离。

C06-43

SiC 颗粒增强铝基复合材料的界面层调控及界面特性

郝世明*, 刘鹏茹, 潘爱琼, 刘瑛, 王爱琴, 王文焱, 谢敬佩
河南科技大学

轻质低膨胀 SiCp/Al-Cu-Mg 复合材料作为一种新型结构-功能一体化材料, 在卫星、空间实验室、深空探测等航天领域, 以及大飞机、新一代军机、无人机等航空领域具有重要的应用价值。硬质 SiC 颗粒加入铝基体提高了强度和硬度, 也导致其塑性和断裂韧性显著下降。强度和塑韧性的“倒置关系”是长期以来制约金属基复合材料发展的瓶颈难题。界面微结构调控是提高复合材料强韧性的有效途径。本文基于 Mg 元素偏聚特性, 通过基体中 Mg 含量调控和制备工艺设计, 在 SiC 颗粒表面原位生成界面包覆层, 通过界面层结构和成分综合调控提高材料的强韧性。研究发现通过 SiC 的氧化以及改变铝合金基体中 Mg 的含量, SiC 与 Al 之间出现不同厚度的 MgAl₂O₄ 反应层, 随 Mg 含量改变其存在明显变化, 氧化 SiCp/Al-4.2Cu-1.6Mg 复合材料中既存在 SiC/Al 界面, 也存在 SiC/ MgAl₂O₄/Al, MgAl₂O₄ 反应层不均匀, 厚度大约为 27 nm; 在氧化 SiCp/Al-4.2Cu-4.0Mg 复合材料中形成了 MgAl₂O₄@SiC 结构, MgAl₂O₄ 壳层大约 300 nm; Mg 含量增加至 6.0 wt%, MgAl₂O₄ 层没有继续增厚, 比较发现氧化 SiCp/Al-4.2Cu-4.0Mg 复合材料力学性能最优, 可实现强度和塑韧性的综合提升。适度 MgAl₂O₄ 层可以提高增强体 SiC 与基体 Al 之间的界面结合, 且 SiC/MgAl₂O₄ 界面结合强度高于 MgAl₂O₄/Al 界面。

C06-44

双峰晶粒结构纳米 TiC/AZ61 镁基复合材料的显微组织调控与强韧化机理研究

范玲玲¹, 任凌宝³, 曾迎², 尹冬弟², 权高峰²

1. 成都大学机械学院
2. 西南交通大学材料学院
3. 西安交通大学材料学院

为解决强度-塑性倒置问题, 本文以“构型强韧化”为设计思路, 通过对复合材料进行异质结构设计来实现强度和塑性的协同。采用粉末冶金结合热挤压法成功制备了双峰晶粒结构纳米 TiC 颗粒增强镁基复合材料, 本研究中双峰晶粒结构指基体中晶粒尺寸呈现双峰分布, 同时耦合了纳米增强体的非均匀分布, 所以该异构复合材料由 TiC 颗粒稀疏的粗晶区和 TiC 颗粒富集的细晶区组成。本文系统研究了: 1) 不同粗晶带内部特征(晶粒大小和位错密度)对复合材料力学性能的影响以及双峰晶粒结构的增塑机制; 2) 粗晶带体积分对异质结构复合材料力学性能的影响及其对抗拉强度强化和背应力强化的影响规律; 3) 均匀结构和优化异构复合材料在塑性变形过程中的应变演变和几何必要位错密度变化, 并结合位错形貌及激活分析阐明了异质结构提升材料应变硬化的机理, 异构复合材料的强度-塑性协同机制, 以及两种复合材料的断裂机制。

本论文的主要研究结果如下: 1) 当挤压速度由 0.75 mm/s 增加至 2.5 mm/s 时, 镁基复合材料的显微组织由均匀转变为双峰晶粒结构, 且随挤压速度进一步增加至 3.5 mm/s 时, 粗晶带中晶粒尺寸变大且位错密度降低。与均匀结构复合材料相比, 高速挤压(3.5 mm/s)制备的双峰晶粒结构复合材料的增塑增韧效果更佳, 可以在保证抗拉强度几乎没有降低的同时塑性延伸率提升 116.7%且强塑积提升 97.7%。

2) 双峰晶粒结构复合材料具有最合适的粗晶带体积分(约 25 vol.%), 可实现最佳的背应力强化效

果, 从而获得明显的抗拉强度强化, 这有助于镁基复合材料实现最佳强塑性匹配。

3) 与均匀复合材料相比, 构型优化后 (25vol.%粗晶体积分数) 的双峰晶粒结构复合材料在保持高强度 (抗拉强度 417 ± 4 MPa, 屈服强度 323 ± 5 MPa) 的同时, 塑性应变提升 143%且强塑积增加 165%。该异构镁基复合材料可实现强度-塑性协同, 其原因在于以下两点。一方面, 异质结构在宏观样品尺度上呈现出应变局域化的松弛现象。另一方面, 异构复合材料在变形过程中可引发更多 GND 堆积, 产生额外的 HDI 硬化, 从而提升材料的应变硬化。在异构镁基复合材料塑性变形的后期, 粗晶区 GND 密度快速增加且远超细晶区, 其 GND 储存率是细晶区的两倍多, 这主要是由于以下三个方面原因。首先, 粗晶区的大晶粒尺寸和低位错密度为新产生位错的存储提供更多空间。第二, 变形不均匀性加剧导致在异质界面附近产生更多 GND, 从而提高粗晶区的应变硬化。第三, 粗晶区经历更复杂的局部应力状态变化, 有利于激活更多的滑移系。在异构复合材料的早期塑性变形阶段时, GNDs 倾向于在 FG 形成亚结构, 而在 CG 中堆积在晶界附近, 从而导致 CG 区域的背应力增大。随着塑性应变升高, HDI 应力增加引发新的 $\langle c+a \rangle$ 位错产生, 导致粗晶中位错缠结, 甚至形成亚结构。在异质结构镁基复合材料中, 微裂纹先萌生于细晶区, 当微裂纹扩展至粗晶区附近处会被钝化, 从而延缓了裂纹扩展的速度。相比之下, 在均匀镁基复合材料中, 微裂纹萌生后容易扩展至相互连接从而形成大尺度裂纹。

C06-45

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

轻质铝合金及其复合材料由于高比强度、比模量等优异力学性能已成为航空航天、军工国防等领域的关键轻金属结构和功能材料, 而在面临高温、高辐照等极端服役条件下铝合金强度低、易高温软化而无法满足日益严苛的性能需求。氧化物弥散增强 (ODS) 因其热稳定性好可成为开发具有优异耐热耐辐照性能的核心结构铝材的有效策略之一。本研究立足于纳米氧化物复合结构的制备和优化提升分散性, 通过后续冷压烧结成型和热挤压的粉末冶金技术将增强相引入到不可化学还原的 Al 基体中, 优化了多尺度的纳米颗粒在基体中的均匀分散状态, 实现了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达 700MPa, 相比于纯 Al 基体提升 250%, 并且 300°C 高温条件下极限抗拉强度超过 350MPa。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。

C06-46

碳纳米管增强高温合金基复合材料制备及构件成形

韩子健^{1,2}, 马立勇^{1,2}, 冯秋硕^{1,2}, 张一欣¹, 孟宝*^{1,2}, 万敏^{1,2}

1.北京航空航天大学

2.北京航空航天大学宁波创新研究院

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。

C06-47

Metal oxide-based planar miniature supercapacitors manufactured by electric discharge machiningRi Chen¹, Jie Qin¹, Zehan Xu¹, Siqi Lv¹, Kaiyuan Shi², Igor Zhitomirsky^{*3}

1. Guangdong Polytechnic Normal University

2. Sun Yat-sen University

3. McMaster University

Micro-Supercapacitors (MSCs) have attracted widespread attention due to their ability to charge and discharge quickly, long life and efficient storage of energy. The electrode material is one of the important parameters affecting its electrochemical performance and industrialization prospect, and it is crucial to develop low-cost, high specific capacitance, high energy density and high-power density electrode materials. Vanadium oxide-based compounds are esteemed as an enabling material for MSCs due to their variable valence, high theoretical capacity and cost-effectiveness. Herein, a new and simple strategy, Electric Discharge Machining (EDM) with computer-aided control was developed to fabricate vanadium oxide-based electrodes and devices. The vanadium sheet was machined using a wire EDM machine. The positive and negative terminals of the power supply were connected to the molybdenum wire and vanadium sheet, respectively, by computer-assisted control cutting completed in deionized water. The maximum capacitance value of 32 mF cm⁻² of Mo@VO_{0.2} at 1 mV s⁻¹ with an electrode distance of 300 μm. Similarly, copper oxides have great potential for MSCs applications due to their natural abundance, high theoretical capacitance, and environmental friendliness. Recently, 3D Cu-Cu₂O MSCs (CuMSCs) consisting of binderless Cu-Cu₂O integrated electrodes have been successfully fabricated by EDM with excellent electrochemical properties. The manufactured 3D CuMSCs exhibits a capacitance of 65.7 mF cm⁻² at 1 mV s⁻¹, and it retained 6.5 mF cm⁻² at super-high charging/discharging rate of 10,000 mV s⁻¹, and possessed a good cycling stability of 94. 29% (1000 cycles). In addition, we extended the material system to other metal oxides and prepared high-performance MoO_x and Fe-Fe_{1-x}O MSCs in a single step by EDM method. This research results of this project presents a streamlined, secure, and cost-effective fabrication technique to formulate MSCs. This innovative approach holds considerable promise for the manufacturing of other electronic devices such as micro-batteries and microsensors.

C06-48**固相原位反应晶内纳米相增强铝基复合材料强韧化机制研究**

戎旭东, 赵冬冬, 何春年, 赵乃勤*

天津大学

纳米增强相的晶内分布构型设计因其可实现复合材料强度-延展性协同, 是发展具有优异力学性能的铝基复合材料 (AMCs) 研究重点之一。本研究基于 Al-CuO 固相原位反应体系, 制备了晶内纳米 δ*-Al₂O₃ 颗粒和 γ-Al₂O₃ 晶须多组元协同增强铝基复合材料。通过建立 Al₂O₃ 等效分布理论模型, 提出纳米增强相晶内分布是复合材料获取高强度的主要途径。晶内 Al₂O₃ 的引入使复合材料变形过程中 GND 表现出显著的晶内分布特征。基于修饰的应变硬化模型, 揭示了 Al₂O₃ 对于复合材料动态硬化和各向同性硬化的显著贡献, 证实了晶内 Al₂O₃ 在改善复合材料应变分配、应变/应力传递和强度匹配方面的重要作用。基于裂纹尖端塑性区和位错缠结区理论, 揭示了 Al₂O₃“富集区”——“贫化区”交替分布的非均匀结构是原位反应 Al-CuO 铝基复合材料高韧性的主控因素。本研究结果对理解复合材料中晶内纳米增强相强韧化行为具有重要理论意义。

C06-49**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和实现途径。

C06-50

基于 SiC-Al 界面构筑多尺度结构的微纳力学研究

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，而合适的结构调控空间是获得高性能的关键。异质界面这个集合了应力场、原子力场、热场、电场、磁场的区域可以为材料的结构调控提供多场耦合的“奇异的空间”。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，本团队长期致力于金属基复合材料界面结构及其力学特性研究工作，创新性地提出了利用单轴压缩具有单一倾角界面复合（SiC/Al）微柱来表征界面微区结构演化-力学特性的耦合关系，并成功获得模型用搅拌铸造态 SiC/纯-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。该方法剥离了一个单独的界面和界面微区排除了多组界面同时存在时的复杂耦合效应，为直观、准确地定量研究界面和界面微区的形变特性提供了一个绝佳的“空间”。通过这个独特的空间不但获得了界面强度还观察到了独特的界面微区形变特性，例如，Al 单晶微柱在单轴压缩下鲜有晶粒细化出现，但异质界面微区的 Al 单晶则会在室温下紧凭单轴压缩即可诱导其晶粒细化，并且伴随着应力-应变曲线强度和加工硬化率的显著提高，而即使纳米厚度的 Mg 界面偏析也可显著增强 SiCp/2009Al 的界面强度和提升界面微区的抗性变能力。此外，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（直径~3 μm ）的单轴压缩显示，30%塑性变形中最大抗压强度高达 1.7 GPa，为 Al 的纳米化及高性能化研究提供了相应参考。

C06-51

构型化碳纳米管/金属复合材料界面控制与力学性能研究

陈小丰*, 陶静梅, 李才巨, 杨唯一, 易健宏

昆明理工大学

针对碳纳米管（CNT）-金属体系中，界面反应易导致生成大尺寸脆性碳化物和由此产生的 CNT 结构完整性严重破坏的瓶颈问题，本研究提出了一种基于 CNT 构型设计的界面反应控制新策略。采用氧化剥离法对 CNT 进行纵向切割，获得了具有“树叶状”结构和“丝带状”结构的纵向剥离碳纳米管（UZCNT），并将此应用于调控在 Al 基和 CuCr 微合金基体中的界面碳化物数量、尺寸、晶体学位向关系。研究发现，分别在 UZCNT/Al 和 UZCNT/CuCr 复合材料中界面处分别形成高数密度的纳米尺寸 Al_4C_3 和 Cr_7C_3 ，而在原始 CNT/Al 和 CNT/CuCr 复合材料界面处易形成低密度的大尺寸碳化物。系统分析表明，UZCNT/Al 和 UZCNT/CuCr 复合材料中界面碳化物的主导形成机制为“形核-生长”，而 CNT/Al 和 CNT/CuCr 中碳化物以外延生长为主；形核生长的碳化物与基体具有特定的共格/半共格界面取向关系，而外延形成的界面碳化物与基体难以形成良好的晶体学取向。力学测试结果表明构型化 CNT 控制的界面能够有效提高载荷传递效率，钝化裂纹和减缓裂纹传播，促进复合材料强度-塑性协同。该策略将为界面反应精确控制提供新思路 and

有效途径。

C06-52

碳纳米相增强铝基复合材料界面及构型设计

林晓彬, 戎旭东, 赵冬冬, 何春年, 赵乃勤*

天津大学

调控碳纳米相（碳纳米管、石墨烯等）分布特征及其与基体的界面结构是发展高强韧碳纳米相增强金属基复合材料的关键。本研究通过原位合成和表面改性等方法，实现了铝基体中碳纳米相构型化设计，发展了晶间碳纳米管（CNTs）、晶内石墨烯纳米片（GNS）和三维连续碳网络（3D-C）增强铝基复合材料，并通过原位反应优化了碳纳米相-铝基体界面结构。研究表明，原位形成的“C-Al₂O₃/CuAl₂-Al”界面可促进碳纳米相和铝基体之间的晶格匹配，提高了界面结合强度和界面稳定性，从而实现高效的载荷传递。与晶间分布的非连续 CNTs 相比，3D-C 可有效细化晶粒并约束晶粒变形，通过阻碍位错运动和改变裂纹扩展路径提高了复合材料的强韧性。进一步调控碳纳米相至晶粒内部促进了位错在晶内的增殖和累积，显著的 Orowan 强化使复合材料表现出优异的加工硬化能力。这种碳纳米相构型及界面设计充分发挥了碳纳米相优异的本征性能并改变了与位错的交互作用行为，有望为实现碳纳米相增强铝基复合材料强度-延展性协同提供新视角。

C06-53

Surface modification of CNTs through the SiO₂ coating to increase the intragranular reinforcement content in Al matrix composites

Hossein Ziaei

Shanghai Jiao Tong University

Surface modification of CNTs with SiO₂ coating was proposed to fabricate Al matrix composites with high-content intragranular reinforcements. The deposition of SiO₂ nanoparticles on the surface of CNTs improved their compatibility with the Al matrix and thus increased the penetration of CNT@SiO₂ reinforcements into Al grain interiors during powder processing. The intragranular reaction during the sintering process converted the CNT@SiO₂ hybrid reinforcements into Al₄O₄C nanoparticles, leading to a remarkable increment in reinforcement content. As a result, incorporating CNT@SiO₂ reinforcements (0.5 wt% CNT coated with 2 wt% SiO₂) into Al resulted in a final composite with 9 vol.% nanoreinforcement, of which 85% were located in the grain interiors. The high-content intragranular reinforcements greatly improved dislocation storage capability and strain hardening rate, resulting in a significant increase in strength while retaining good ductility. The composite's yield strength and tensile strength increased to 370 MPa and 472 MPa, respectively, which were about 66% and 67% higher than those of the CNT-Al composite with the same CNT content.

C06-54

循环球磨法制备高性能晶内 CNTs/Al 复合材料

曹遹, 陈彪*, 李金山

西北工业大学

以碳纳米管（CNTs）增强的轻质高强铝基复合材料在航空航天领域具有重要应用前景。在长时高能球磨制备高性能 CNTs/Al 复合材料粉末过程中，Al 粉末易冷焊的特性将阻碍粉末的大塑性变形过程，从而抑制了 CNTs 的均匀分散。本研究中提出了一种循环球磨法（RDBM）来抑制粉末的冷焊过程，使得 CNTs/Al 复合材料粉末能够在长时球磨过程中持续变形，从而进一步提升 CNTs 的分散性。结果表明，CNTs 在经历

两次球磨循环变形后逐渐进入到铝基体晶粒内部，同时与基体间存在良好的物理结合界面，挤压后组织具有明显的异质结构特征。对于 2 wt.% CNTs/Al 复合材料，其抗拉强度达 410.1 MPa，断裂延伸率达 12.3%，CNTs 增强效率达 285%。通过对比同含量下 CNTs/Al 复合材料的强塑积，本研究具有明显的性能优势。此外从组织结构、界面表征和强化机制等方面对潜在增强机制进行了深入讨论，结果揭示了采用循环球磨法制备 CNTs/Al 复合材料具有优异的力学性能及在航空航天领域具有良好的应用前景。

C06-55

压力浸渗法制备一体化高强度玻璃微珠/Al 为芯层的夹芯板结构

孙凯^{1,2}, 张强^{*1,2}, 武高辉^{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, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

铝基多孔复合材料常被作为夹芯板的芯层材料用于各种应用的结构组件，例如汽车、铁路和航空航天等领域。铝基多孔复合材料与金属面板的界面粘接方式主要是胶粘或冶金结合，而界面粘接状态可能直接或间接影响其力学性能。本研究采用压力浸渗法一体化制备了玻璃微珠/铝为芯层的夹芯板结构。与传统的胶粘剂粘接界面相比，冶金结合的界面平直、光滑，玻璃微珠/Al 多孔复合材料与面板之间的压缩剪切应力为 80.4 MPa。有限元和 DIC 分析结果表明，夹芯板在压缩剪切过程中失效主要是在界面处首先产生裂纹，随后扩展到夹层结构中强度较弱的邻近层，避免由于弱的界面结合强度而导致夹芯板结构快速破坏。

C06-56

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

杨浩然, 王朔, 赵冬冬*, 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 Al₂O₃ 中间相。随着温度提高，中间相与 Mg、Al 进一步反应形成 MgAl₂O₄ 增强相。高 Mg 含量复合材料中剩余 Mg 原子与 MgAl₂O₄ 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。

C06-57

氮化硼纳米片增强铝基复合材料的力学性能研究

杨寿奎, 赵冬冬, 何春年*

天津大学

近年来，工业的快速发展对铝基复合材料的性能提出了更加严苛的要求，使复合材料具有高比强度、

比刚度、低热膨胀系数的同时兼具良好的热稳定性。以石墨烯为代表的二维材料作为增强相具有良好的强化效果,但容易形成脆性 Al_4C_3 相,在界面处引起应力/应变局域化。六方氮化硼纳米片为一种类石墨烯的二维材料,具有更高的抗氧化性和化学结构稳定性,是制备新一代铝基复合材料理想的增强相。本文采用 CVD 方法,合成了较薄的 BN 纳米片,通过球磨将其与铝(铝合金)基体进行复合,冷压烧结后制备得到铝基复合材料。结果表明,纳米 BN 片具有更高的比表面积,在基体内均匀分布,烧结过程中,BN 与铝基体发生界面反应形成过渡相,进而改善了 BN 与基体之间的界面结合,提高复合材料的力学性能。增强相的强化效果显著,4wt.%BN 增强 Al 和 Al-Cu 合金基复合材料的屈服强度和延伸率分别为 624MPa, 6.5% 和 780MPa, 4.5%, 相比于纯基体 (140MPa, 14%) 的性能有大幅提升。

C06-58

金刚石/铝复合材料的导热性能及力学性能研究

祝平¹, 张强^{*1,2}, 马一夫¹, 苟华松¹, 武高辉^{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, 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

随着 5G 时代的到来,高功率、高频率电子设备的应用需求增加,散热问题已经成为制约电子信息产业进一步发展的瓶颈问题。金刚石/铝复合材料结合了金刚石高导热与铝低密度的特点,作为新型热管理材料具有显著优势。为了制备高导热、高力学性能的金刚石/铝复合材料,对复合材料进行界面改性,实现了在有效地改善界面结合的同时,抑制有害界面产物 Al_4C_3 的生成。系统地阐述了界面结构对金刚石/铝复合材料导热性能和力学性能的影响。

C06-59

铍/铝复合材料热变形行为研究

夏一骁¹, 杨文澍^{*1,2,3}, 武高辉^{1,3}

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, 郑州研究院
3. 哈尔滨工业大学 材料结构精密焊接与连接全国重点实验室

随着航空航天事业的发展,其对轻质高强的材料的需求越来越高。铍/铝复合材料结合了铝合金可加工、可变形与铍金属高强度、低密度的特点,具有高比强度、高比刚度的优异性能,在航空航天领域备受关注。对铍/铝复合材料进行热加工可以进一步提高其性能。为了确定合适的热加工参数,对铍/铝复合材料的热变形行为进行了研究,建立了本构方程,绘制了热加工图。研究了热挤压对铍/铝复合材料微观组织与力学性能的影响。

C06-60

多相协同增强 Cu 基复合材料的制备与性能研究

战再吉*, 曹海要

燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

Gd_2O_3 具有良好的热稳定性和灭弧抗烧蚀的性能, Ti_3AlC_2 兼具陶瓷和金属的特性,它们是制备高强和抗烧蚀 Cu 基复合材料理想的增强相。原位合成法制备的增强相颗粒主要分布在 Cu 晶粒中,且与 Cu 基体的润湿性好、界面结合强度高,能有效增强 Cu 基体的强度;然而受限于原位合成法自身特性,原位合成的增强相含量相对较低,因此,通过外加 Gd_2O_3 或 Ti_3AlC_2 等强化相可以进一步提高复合材料的性能。

通过原位合成法制备了制备了 $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料和 $\text{Cu}@\text{Ti}_3\text{AlC}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料,通过优化内氧化工艺和热压烧结工艺,系统分析了增强相尺寸、数量和表面改性等因素对复合材料的微观组织结构、力学性能、物理性能和烧蚀性能的影响,研究了多相颗粒协同增强 Cu 基复合材料的强化机制。研究结果表

明：通过改变内氧化和热压烧结工艺，可以优化原位增强相 Gd_2O_3 颗粒的尺寸与数量，进而影响复合材料的抗拉强度和导电率。本试验优选的工艺为：925 °C内氧化 60 min，在 900 °C下热压烧结 30 min；显微组织分析发现内氧化原位合成的 Gd_2O_3 分布在 Cu 晶粒内部，通过细晶强化、Orowan 强化、热错配强化和载荷传递强化等机制提高了复合材料的抗拉强度；而外加的 Gd_2O_3 或 Ti_3AlC_2 主要分布在 Cu 晶粒晶界处，主要通过热错配强化和载荷传递强化提高了复合材料的抗拉强度；多种强化相的协同作用进一步提高了复合材料的强度。增强相 Ti_3AlC_2 颗粒经过表面处理后可以提高与 Cu 基体之间的界面强度，进一步提高了复合材料的性能。提出了一种利用原位合成增强相、外加 Ti_3AlC_2 或者 Gd_2O_3 增强相强化复合材料的途径，通过各种增强相协同增强的作用，有效提高了 Cu 基复合材料的力学性能，同时增加了抗烧蚀特性。

C06-61

石墨烯增强 CuAl 基层状复合材料强韧化和阻尼机理研究

蒋小松*

西南交通大学

CuAl 基合金在热弹性马氏体相变区域内具有优异的阻尼能力，这源于马氏体内部大量可移动孪晶、马氏体和奥氏体以及马氏体变体之间的可移动界面，然而在室温条件下相变阻尼的缺乏使得合金的阻尼性能大打折扣，需要充分发挥其他(如界面阻尼和位错阻尼)机制来提高 CuAl 基合金的阻尼能力。向 CuAl 基合金中添加石墨烯引入大量的微观界面，同时界面周围产生的热失配位错提高基体内可移动位错数量，位错的运动以及石墨烯/基体界面的滑动摩擦带来大量的能量耗散，从而提高材料的阻尼性能；同时界面处产生的内应力有利于马氏体的形核和形成更精细的马氏体结构，从而提高其本征阻尼；以解决航空航天与军工等减振降噪材料中强韧性和高阻尼多功能优化问题。

C06-62

超高导电和高强度的石墨烯增强铜基复合材料

陈全芳*, 黄亚玲, 罗友明

西南交通大学

对石墨烯提高铜导电性和强度进行了系统性研究，通过对石墨烯包裹纳米同颗粒改性，实现对石墨烯的参杂，同时也提高铜与石墨烯的界面结合并且防止石墨烯的团聚。采用球磨混合和高温高压烧结的方法制得铜石墨烯复合材料，并对复合材料的导电性和抗拉强度进行了系统性表征研究。结果表明铜的导电性和强度都随着石墨烯加入量的增加而同步提高，在 0.4wt.%石墨烯加入量时达到峰值，铜的抗拉强度为 624MPa，是退火铜的 300%以上，也比同样制得的纯铜提高 120%。铜的导电性更是提高到 147.5%IACS，比退火纯铜提高将近 50%。铜纳米颗粒的作用包括降低了石墨烯的功函数，使得电子易于从铜扩散到石墨烯，如此石墨烯的超长平均自由程结合铜的丰富自由电子密度导致了导电性的显著提高。铜纳米颗粒与石墨烯的紧密结合不仅提高了二者的界面结合，同时也由于纳米颗粒的钉扎效应发挥了石墨烯固有高强度的潜能，使铜的强度也得到显著提高。

C06-63

高性能碳纳米管增强铜基复合材料开发及强韧化机理研究

郭柏松*

暨南大学

碳纳米管/铜(CNTs/Cu)复合材料在航空航天、高速铁路等高科技领域极具应用前景，但 CNTs 难分散、Cu-CNTs 界面结合弱等问题限制了其应用和发展。研究发现，对 CNTs 进行表面功能性涂层包覆，不仅可以利用包覆 Cu 层降低 CNTs 团聚趋势，还可以在 CNTs/Cu 复合材料中构筑复合界面，进而同步解决上述关键问题和制备出具有高强度和高韧性的 CNTs/Cu 复合材料。研究结果可为低维碳材料增强金属基复合材

料的结构设计和性能调控提供实验参考和理论指导。

C06-64

液态外加纳米 SiC 增强 Al-Cu 基体复合材料的制备及其高性能化研究

李建宇, 吕书林, 吴树森*, 郭威

华中科技大学

纳米颗粒增强铝基复合材料兼具优良的强度和塑性, 在航空航天、汽车、电子、军工等领域具有广泛的应用前景。然而, 因润湿性差且纳米颗粒表面积大, 其制备十分困难。本文创新性地提出一种将高能球磨制备 nano-SiC_p/Al 复合颗粒+熔炼铸造法+超声辅助分散 nano-SiC_p 颗粒+挤压成形技术相结合的 nano-SiC_p/Al-Cu 复合材料制备新方法, 有效解决了纳米增强颗粒难以加入熔体、分散效果差等难题, 从而大幅度提高材料的综合性能。本研究成果对于金属基纳米复合材料的工业应用具有重要的理论价值和实际意义。

C06-65

兼具优异强塑性能和高耐烧蚀性能的 Cu-RHEAs 双连续相材料

邵军超*, 金海军

中国科学院金属研究所

钨铜合金是目前高功率气体开关常用的耐烧蚀电极材料。但是随着脉冲功率技术水平的不断提升, 其耐烧蚀能力受限于钨铜合金本身的物化性能, 其已经难以满足长寿命大功率气体开关的使用需求。研制烧蚀性能更加优异的电极材料已成为突破开关寿命瓶颈的主要手段。我们采用液态金属脱合金的方法成功制备出高质量的大块 Cu-RHEAs 双连续相材料。同传统的钨铜合金相比, 该材料不仅具有更加优异的强塑性能, 而且电弧烧蚀性能测试结果显示, 该材料的耐电弧烧蚀能力相比 W90 钨铜合金也有大幅提升。通过对比分析两种电极材料烧蚀后的表面形貌和微观结构演变, 我们也初步探讨了 Cu-RHEAs 双连续相材料相比钨铜

C06-66

三维连续石墨烯增强铜基复合材料的拉拔变形研究

夏宇航, 张翔, 赵乃勤*

天津大学

随着电动汽车、无人驾驶飞机、便携式设备和可部署军事应用的迅猛发展, 对电力传输线材提出了高度集成化和大功率输送的新要求。然而, 传统的金属导线往往存在着强度-塑韧性和强度-电导率的倒置关系, 极大地限制其工业应用。本实验以三维石墨烯网络 (3DGN) 作为增强相, 通过热轧和拉拔的工艺成功制备了具有连续 GN 构型的 GN/Cu 复合线材, 并结合 FIB-三维重构技术直观地证明了复合线材中 GN 连续分布的空间组态。力学和电学测试表明, 与 Cu 线相比, GN/Cu 复合线材实现了强度 (36.5%)、退火后断裂延伸率 (179%)、热稳定性 (600°C) 和室温 (3.4%) 以及高温 (11.5%) 电导率的协同提升。研究表明, 在变形过程中, 构型化 GN 具有的界面效应引起了基体的非均匀变形, 导致了强烈的 HDI 强化。同时, 结合实验观察和分子动力学模拟, 证实了构型化 GN 可以通过协调位错运动和在高应变条件下的自身层间滑移与基体共变形, 协调基体的塑性变形。此外, 构型化 GN 对裂纹的偏转和桥接进一步提升了材料的韧性。本工作为制备具有高综合性能的铜材料提供了实现途径, 对构型化复合材料的变形机理研究提供了理论指导。

C06-67

二维纳米相增强铜基复合材料的变形机理及高性能化制备策略

张翔*, 何春年, 赵乃勤

天津大学

近年来,具有优异力学和物理性能的新型二维材料,如石墨烯(Graphene, GN)、六方氮化硼(h-BN)、MAX 相纳米片的出现为传统铜基复合材料(CMCs)的发展带来了新的机遇。然而,二维材料与铜基体物理性质差异大、界面浸润性较差,其作为增强体以传统外加方式掺入铜基体存在 ① 常规制备易造成结构损伤,致使其优异理化性能难以发挥;② 二维材料的维度限制使界面结构优化困难,应力传递、界面处电子传导效果较理论值差距巨大;③ 空间分布难以调控,力学与导电导热性能难有突破性改善。探寻新的有效复合途径与强化理论以实现铜基体和二维增强体优异性能的协同发挥仍是一大难题。针对上述问题,申请人提出在铜基体中通过二维材料原位生长或界面原位反应的新思路来制备 CMCs。以研制高性能 CMCs 为目标,以金属铜和二维材料的结构与界面调控为核心,紧密围绕解决复合材料的界面结合、二维材料空间分布及其结构设计等制约复合效应发挥的关键科学问题,系统研究了二维材料(GN、h-BN、MAX 相纳米片)的原位生长或界面反应机制及其增强 CMCs 的微观组织结构与力学、导电导热等功能性质之间的内在联系和作用机制,并探索了其应用。

C06-68

Cu-Y₂O₃ 复合材料的制备及组织性能研究

秦永强^{1,2}, 韦国宣^{1,2}, 田宇^{1,2}, 庄翌^{1,2}, 邓晨宇^{1,2}, 罗来马^{1,2}, 马冰^{1,2},
张一帆^{1,2}, 吴玉程^{1,2}

¹ 合肥工业大学

² 高性能铜合金及加工成形教育部工程研究中心

铜及其合金由于其优异的导电导热及力学性能被广泛应用于传导元件中,日新月异的科学技术发展,各类产业均对铜基材料提出了更高的要求,弥散强化铜合金由于其高强高导及优异的抗辐照性能被人们寄予厚望。采用雾化法结合内氧化法或机械合金化法通过原位合成 Y₂O₃ 弥散相的方法制备 Cu-Y₂O₃ 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 Y₂O₃ 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,以期获得具有优异综合性能的铜合金提供参考。

C06-69

构建低能相界以突破不互溶 W-Cu 基复合材料的强度-塑性权衡困境

李昱嵘*, 侯超, 宋晓艳

北京工业大学

不互溶复合材料由于其独特的双金属性能优势以及在成分、结构等方面的可设计性,在航空航天、国防工业、电力工程等领域具有无可替代的重要作用。随着相关领域的迅速发展,以传统粗晶 W-Cu 基复合材料为例,其性能已经难以满足高端应用领域日益严苛的使用需求,亟待开发能在高温、应力等复杂条件下服役的具有优异力学性能的新型 W-Cu 基复合材料。对于 W-Cu 体系,W、Cu 之间的不互溶性导致 W/Cu 界面结合较弱,成为制约其在极端条件下应用的核心问题。改善 W/Cu 界面结合特性,提高 W-Cu 基复合材料的高温力学性能对提升关键高温结构部件的使用寿命和可靠性具有重要意义。

已有研究表明细化微观结构和添加第三组分可提高 W-Cu 基金属复合材料强度,但鲜有关于通过改善 W/Cu 界面提高 W-Cu 基复合材料力学性能的报道。为此,本研究以同步提升 W-Cu 基复合材料强韧性为目标,提出利用原位固相反应构造低能界面新策略。充分考虑界面能受化学键能和错配能两方面决定,独创发展利用原位固相反应技术引入 WC 纳米颗粒作为界面粘合剂,一方面形成比 W/Cu 界面结合强度更高

的 WC//W 和 WC/Cu 界面；另一方面利用反应过程原子自由排列，形成低能量的低错配结构。

本研究提出了一种创新的策略，即在不互溶金属基复合材料中构建低能界面，目标获得获得优异的高温力学性能。结合原位固相反应和放电等离子烧结技术，成功获得具有高比例、稳定的低能 WC/W 和 WC/Cu 界面的块体复合材料。其再高温下兼具高强度和高塑性，突破了传统 W-Cu 基复合材料体系的强度-塑性权衡悖论。此外，高强度低能界面可诱发 W、Cu 两相产生除位错主导外的其他塑性变形方式(如 bcc-fcc 相变)，进一步延缓裂纹的产生和扩展，实现 W-WC-Cu 复合材料的高温强韧化。该研究为优异力学性能的不互溶金属复合材料设计与制备提供了新的思路和途径。

C06-70

电冲击作用对激光熔化沉积铜基复合材料微观组织的影响研究

谢世强，黄长林，郭雨，龚佳伟，温艳，谢乐春*

武汉理工大学

本文利用激光熔化沉积技术在高性能铜合金材料 Cu-Cr-Zr 上熔覆钛合金 Ti-6Al-4V 强化层，在保持高导电率下，提高铜合金表面硬度和耐磨性。同时研究了电冲击作用下高能电流对钛合金沉积层界面组织结构和界面稳定性的影响，发现在电冲击作用能降低合金平均晶粒尺寸，提升再结晶百分比，改变晶粒取向。采用扫描电子显微镜对电冲击处理前后复合层沉积界面微结构进行表征分析，同时测试样品界面硬度与物性参数变化，结果表明在高能电流作用下界面稳定性良好，未出现沉积强化层界面脱离情况。上述结果表明该激光熔化沉积钛合金强化层在电磁炮用高性能铜基轨道材料上具有潜在应用价值。

C06-71

Study on the dissolution behavior of hot tin plating for copper materials

Jinhan Zhang*

Jiangxi University of Science and Technology

This paper explores the continuous hot tin plating technology and its application in industrial production. As a solder additive, P can enhance the oxidation resistance; adding a small amount of Ge can improve the oxidation resistance of the alloy without affecting the melting point. Ni can slow down the reaction rate at the Cu/Sn interface. The addition of RE elements to the solder can improve the surface activity, etc. The Sn-Ce alloy is oxidation-resistant and has good chemical stability, and can improve the solderability of the coating; the Sn-Ag alloy coating has excellent performance but a relatively high melting point and high cost; the Sn-Cu alloy has the characteristics of low cost but poor creep resistance and wettability; the Sn-Zn alloy has good corrosion resistance but poor solder wettability and oxidation resistance; the Sn-Bi alloy has advantages, but Bi is a brittle metal, and there are some limitations in its coating.

C06-72

铜表面激光熔覆铜基金刚石复合涂层

黄浩真

重庆理工大学

铜及其合金具有良好的导电导热性能，但其强度和耐磨性较差。本研究通过激光熔覆在纯铜表面制备了与基体之间形成良好的冶金结合，无裂纹和气孔等缺陷 CuSn19Ti10/金刚石复合涂层。激光熔覆功率为 3000W，扫描速率 15mm/s，光斑直径 2.5mm，搭接率 30%。通过扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)和白光干涉仪等设备分析金刚石含量为 2.5wt.%、5wt.%、10wt.%涂层的微观组织、耐磨性能和磨损机理。结果表明，涂层的物相主要有低百分比 Sn 的 α -(Cu)，CuSn0.5Ti0.5、TiC 和金刚石物相。钛的扩散能力强，在金刚石周围偏析形成钛的碳化物。复合涂层硬度和耐磨性相较于基体和 CuSn19Ti10 涂

层的硬度与耐磨性显著提升。随着金刚石含量增加,复合涂层硬度也随之增加。其中当金刚石含量为 10%wt.% 时,由于涂层金刚石含量增多,金属基 CuSn19Ti10 含量减少,加剧了显微组织的不均匀性和脆性,以及金属基 CuSn19Ti10 对金刚石把持力减弱,导致金刚石剥落几率增大。脱落金刚石、摩擦副和涂层形成三体磨损,加剧了磨损程度,形成更多的犁沟,剥落坑以及磨屑,所以金刚石含量为 5wt.%的复合涂层的磨损率最低。

C06-73

铌类变质强化相形貌及尺寸的可控制备

钟鑫淼, 董柏欣, 杨宏宇, 邱丰*, 姜启川

吉林大学

广泛应用于金属强韧化的 Ti 类变质强化相由于面临着 Ti-Si 毒化作用,大大降低了其强化效果。本工作提出了一种设计及调控性质相似 Ti 类变质强化相且无毒化作用的 Nb 类变质强化相的合成方法,基于原位内生燃烧合成方法可以广泛的应用于不同金属复合材料。通过控制反应物含量以及生成物的摩尔计量比,研究了 Al-Nb-B 反应体系中 NbB₂ 颗粒尺寸和形貌的调节机制。随着铌类反应物含量的增加,燃烧合成反应更加充分,反应合成的 Nb 类异质形核相的尺寸略有增大均保持在亚微米水平,形貌为典型的六棱柱形貌。当生成物的摩尔计量比由传统的 B/Nb=2.0 过渡到 B/Nb=2.4 时, Nb 类异质形核相的尺寸会发生大幅转变由微米级 (1.5 μ m) 转化为纳米级 (300nm),且形貌上由典型的六棱柱结构转变为近球状多面体。这种原位内生形貌尺寸可控的异质形核相制备技术有望应用于不同类金属复合材料,为金属复合材料的组织调控及强韧化提供了有效途径。

C06-74

基于等离子体电解氧化的陶瓷绝缘电磁线制备与绝缘特性研究

张萌¹, 李昊旻*^{1,2}, 耿英三¹, 雷厉²

1.西安交通大学电气工程学院

2.诸暨市中俄联合材料实验室

等离子体电解氧化技术 (Plasma Electrolytic Oxidation, PEO) 是一种通过在金属基材上施加高电压、大电流使金属表面发生氧化反应并形成陶瓷膜层的表面改性技术。对铝导线进行等离子体电解氧化技术处理生成的高导热耐热陶瓷电磁线可应用于轻量化设备和特种环境中。现有研究主要聚焦于有机绝缘电磁线,但有机绝缘材料在导热和耐热性能的不足已成为其应用瓶颈。鉴于此,本文采用等离子体电解氧化技术处理生成陶瓷绝缘电磁线,提出了可连续处理陶瓷绝缘电磁线的制备方法,研究得到陶瓷电磁线的绝缘特性,并进一步探究机械拉伸对于绝缘性能的影响。结果表明, PEO 连续处理装置可连续制备陶瓷绝缘电磁线。陶瓷电磁线的工频击穿电压随氧化时间的增加呈现非线性上升趋势,工频击穿场强呈现指数下降趋势。经过 PEO 处理后,陶瓷电磁线的机械性能均有不同程度的降低。陶瓷电磁线在拉伸状态下的击穿电压低于原始击穿电压。当氧化时间较大时,不同拉伸比例下陶瓷电磁线的击穿电压维持在 200V 左右,主要是由陶瓷膜断裂后的窄空气间隙决定陶瓷导线的绝缘性能。深入研究陶瓷电磁线的制备方法和绝缘特性,对提升陶瓷绝缘电磁线的整体性能和促进工程化应用提供了坚实的理论基础和技术支持。

C06-75

可视化高温接触角测试技术在金属润湿行为研究中的应用

张海媛 天津中环电炉股份有限公司

钢铁冶金、航空航天、焊接、复合材料制造等领域的很多现象都与界面润湿行为相关,尤其是高温金属基复合材料固-液之间的润湿行为和界面反应的解析研究十分重要。本工作采用高温原位座滴法,将熔融金属/合金-基板的高温润湿行为可视化,研究了高温高真空条件下几种金属/合金的表面润湿性、界面反应

以及侵蚀过程。

C06-76

石墨烯增强高熵合金基复合材料的摩擦学性能研究

叶雯婷, 周青*

西北工业大学

高熵合金 (HEAs) 其表面自润滑性能的不足严重限制了其在摩擦磨损条件下的应用。特别是对于具有面心立方 (FCC) 结构的 HEAs, 在干滑动条件下其屈服强度相对较低, 这一挑战显得尤为严峻。添加传统软固体润滑剂虽然能够显著提升润滑性能, 但会牺牲复合材料的力学性能从而导致基体软化。本研究提出了一种新策略, 通过适当地将少层石墨烯作为增强体掺入 CoCrFeNiMn HEA 中, 以显著提升其表面强化和润滑性能。通过石墨烯与 HEA 基体之间的部分界面化学反应和精细调控的制造工艺使磨损率和摩擦系数有效降低了 86.03% 和 23.87%。得益于界面处原位碳化物的强化作用以及石墨烯的自润滑特性, 这种定制的复合材料结构展现出了优于大多数 HEA 基自润滑复合材料的摩擦学性能。此外, 通过微观结构探索和原子尺度模拟, 详细阐述了影响耐磨性的亚表层组织演变和变形机制。本研究为开发适用于安全关键应用的创新 HEAs 复合材料提供了一种有效策略, 它成功克服了 HEAs 固有的“自润滑-高耐磨”妥协关系, 同时实现了出色的摩擦学性能, 即自润滑和耐磨性。(mini-oral)

C06-77

TiB₂/7XXX 铝基复合材料的搅拌摩擦增材制备、组织及性能

孙高秋, 李险峰*

上海交通大学

通过搅拌摩擦沉积 (AFSD) 成功制备了高性能 TiB₂ 颗粒增强 7050 Al 基复合材料, 并对原材料和沉积件的微观结构和力学性能进行了研究。结果表明, AFSD 工艺可以改善 TiB₂ 颗粒的分散性, 细化微观结构, 从而提高其力学性能。沉积态 TiB₂/7050 复合材料的平均粒径和长径比分别降低到 2.17 μm 和 1.78。经过 T6 热处理后, 沉积件的抗拉强度 (UTS)、屈服强度 (YS) 和伸长率 (EL) 分别为 653 MPa、576 MPa 和 11.6%。与原料杆相比较, 在维持 EL 基本不变的情况下, UTS 和 YS 分别增加了 112.7% 和 96.6%。

C06-78

Al-TiO₂ 原位复合材料微观组织和力学性能研究

刘崑, 咎宇宁*

中国科学院金属研究所

Al-TiO₂ 作为一种经典的原位反应, 有望制备高热稳定性的铝基复合材料。本研究发现, 以往研究中采用较高温度以保证原位反应充分的制备方法不利于获得更高的高温强度。随着热压温度的升高和保温时间的延长, 原位反应更加彻底, 但复合材料的强度先升高后降低。高温下组织粗化会导致强度的下降, 通过改变热压参数控制原位反应的过程可以提高材料的机械性能。通过对室温和高温下的强化机制进行研究, 发现室温下的强化机制主要是载荷传递和 Orowan 强化机制, 而高温下细小颗粒的钉扎作用更为关键。

C06-79

TiNiP /Al 复合材料的界面调控与阻尼性能及机理研究

孙宇*

哈尔滨工业大学

采用压力浸渗法制备了含 60vol % TiNi 颗粒的 TiNi/Al 复合材料。研究了 TiNi 颗粒预氧化行为对复合材料界面的调控以及力学性能和阻尼性能的影响。复合材料中 TiNi 颗粒的预氧化温度分别为 300°C、500°C、600°C 和 700°C。采用 SEM、TEM 和 DMA 对复合材料的微观结构和阻尼性能进行了研究。TiNi 颗粒的预氧化有效避免了 TiNi 合金与 Al 基体的界面反应。界面处氧化膜厚度随 TiNi 颗粒预氧化温度提高而增加，界面结合强度因此下降，导致复合材料的抗弯强度降低，而阻尼性能随预氧化温度提高有所上升，在 600°C 预氧化 1h 下复合材料的阻尼峰值 ($\tan\theta$) 达到 0.0688。值得一提的是在高温下单一 TiNi 合金阻尼性能较低由于界面阻尼的引入，复合材料仍具有较高的阻尼性能，实现了宽温域高阻尼的特性。

C06-80

TiB₂/Al 界面电子结构及 Mg 原子偏聚行为的第一性原理研究

李志刚, 陈良*, 赵宇辉, 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

基于第一性原理计算，研究揭示了实验中出现的 TiB₂/6061Al 界面 Mg 元素偏聚现象，阐明了 TiB₂(0001)/Al(111)界面原子间电荷的相互作用及成键机制，为其界面调控提供了理论指导。研究表明，对于未掺杂 O 原子的界面，Mg 原子容易向 Ti 端界面的 Al 侧第三层以及 B 端界面的 Al 侧第一层偏聚，O 原子的掺杂使 Mg 原子的偏聚更容易发生。对于掺杂 O 原子的 B 端界面，1 个 Mg 原子的偏聚使界面的粘附功略有下降，而继续增加 Mg 原子的个数将提高粘附功，除此之外，其他界面模型的粘附功均随 Mg 原子偏聚个数的增加而持续增加。Ti 端界面中界面处的 Al 原子和 Ti 原子形成 Al-Ti 金属键，B 端界面中界面处的 Al 原子和 B 原子形成 Al-B 共价键。O 原子的掺杂使 Al 原子与界面 Ti/B 原子间电荷的相互作用被削弱，导致了界面模型粘附功的降低。Mg 原子的掺杂使界面处电荷富集程度提高，原子间化学成键能力增强，界面模型在性能上表现出了粘附功的提高。

C06-81

新型碳纳米管-高熵合金颗粒增强铝基复合材料的强度-延展性协同

彭言之, 李才巨*, 徐尊严, 杨晨茂月, 易健宏

昆明理工大学

在这项工作中，我们报告了一种新的设计策略，用于制造具有非均相结构的碳纳米管 (CNT)-高熵合金 (HEA) 颗粒共增强铝基复合材料。该策略涉及 CNTs@HEA 混杂增强体的制备，该混杂增强体是通过化学气相沉积方法在高熵合金颗粒表面生长碳纳米管获得的。结果表明：制备的 CNTs@HEA/Al 复合材料具有双峰型晶粒结构和纳米增强体颗粒的空间分布；通过微米级 HEA 颗粒的传输，CNTs 均匀地分散到 Al 基体中。同时，HEA/CNTs/Al 界面处生成 Al₄C₃ 和 Cr₇C₃，增强了 CNTs 内壁的承载能力。CNTs@HEA/Al 复合材料较高的力学响应是载荷传递效应、背应力强化、Orowan 强化、晶粒细化和层错强化共同作用的结果。此外，复合材料的双峰晶粒和单峰纤维有助于持续的应变硬化，从而获得令人满意的拉伸延展性。

墙报

C06-P01

颗粒增强铝基复合材料的拉伸失效与能量耗散研究

刘旭阳, 苏益士*, 柴绪顺, 张鑫, 欧阳求保, 张荻

上海交通大学

颗粒增强金属基复合材料的强度-韧性倒置关系是金属基复合材料中广泛存在的难题。通过配置复合构型最大化耗散外场载荷的能量，是优化复合材料构型设计，解决金属基复合材料强韧性倒置难题的重要

思路。本研究基于有限元计算,以 SiCp/Al 复合材料为研究对象,将结构建模、性能拟实与复合材料构型当中的能量耗散问题相结合,分析了 SiCp/Al 复合材料在单轴拉伸工况下微观两相结构的能量耗散过程。对比分析了纯基体与复合材料在拉伸过程中(弹性阶段、塑性阶段、裂纹扩展过程)的能量耗散过程。在裂纹扩展阶段,通过裂纹扩展信息及能量耗散信息的提取(裂纹面积及消失单元能耗)对裂纹扩展过程中的能量耗散情况进行了定量分析。改变复合构型参数(体积分数、颗粒形状、颗粒粒径)生成含不同复合构型的复合材料模型进行计算,分析了不同参数对能量耗散过程的影响。

C06-P02

异构 CNTs/2009Al 复合材料塑性变形行为研究

康庆宇^{1,2}, 杨沐鑫^{*1,2}, 刘振宇³, 袁福平^{1,2}

1. 中国科学院力学研究所, 超常环境非线性力学全国重点实验室
2. 中国科学院大学, 工程科学学院
3. 中国科学院金属研究所, 师昌绪先进材料创新中心

旨在利用异构强韧化思路提高碳纳米管增强铝基(CNTs/2009Al)复合材料的强-塑性匹配,本文采用传统粉末冶金和热等静压、热挤压/热轧等方法,分别制备了具有均质、双模态、层状异构基体的三种 CNTs/2009Al 复合材料。通过准静态拉伸、拉伸加卸载,以及数字图像相关(DIC)等测试表征方法,对三种异构复合材料样品的力学性能和塑性变形行为进行了对比研究。实验结果表明,与均质样品相比,双模态、层状异构等两种样品在保持可观均匀拉伸塑性的同时,强度获得显著提高。其中,层状异构样品的强-塑性匹配略优于双模态异构样品。微结构观测结果表明,变形过程中基体内位错硬化、不同微区之间异质变形诱导(HDI)硬化、以及 CNTs/2009Al 界面对位错增殖的容纳和积累,共同为异构复合材料样品提供高的宏观加工硬化率,是其获得优异强塑性的主要原因。此外,通过 DIC 和加卸载测试表征手段,对异构复合材料样品的 Lüders 变形、去应变局域化等局部非均匀变形行为,及其微观机制进行了分析和讨论。

C06-P03

基于可解释深度学习方法颗粒增强金属基复合材料力学性能预测和构型效应探索

柴绪顺, 苏益士*, 林子畅, 邱蔡豪, 刘旭阳, 张鑫, 羊镜宇, 欧阳求保, 张荻
上海交通大学

颗粒增强金属基复合材料(PRMMCs)的性能与复合构型密切相关,对 PRMMCs 的构效关系的进一步研究对充分发挥 PRMMCs 的性能优势至关重要。然而,传统的实验和模拟方法在庞大的构型空间面前局限性愈发突出。在本研究中,我们提出了一种可解释的深度学习方法,该方法能够有效地预测 PRMMCs 的结构-性能关系并有效地探索构型效应。我们建立了一个时空深度学习模型,以准确和端到端地预测不同微观结构特征的碳化硅颗粒增强铝基(SiCp/Al)复合材料的应力-应变关系。仅通过一轮的大规模配置筛选,我们实现了与原始数据集相比,在强度-韧性匹配(STM)上的 25%的改进。随后,我们采用基于梯度的可解释深度学习技术来研究我们深度学习模型的决策标准,能够识别局部复合构型对目标性能的影响程度。我们再次基础上进一步提出了一个基于局部配置熵的特征描述符,与强韧性匹配性能的相关性比以往基于专家知识的描述符更强。我们的工作为研究 PRMMCs 的结构-性能关系提供了一种可解释的、数据驱动的方法,并且有可能推广到其他多组分材料。

C06-P04

高导热金刚石/铜复合材料机理研究

冯劲松¹, 王冰^{*1}, 彭博¹, 蒋云振^{2,3}, 刘张慧⁴, 李丹丹^{1,4}, 王长昊¹, 王如志¹

1. 北京工业大学
2. 桂林特邦新材料股份有限公司
3. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司

4. 中国创新研究院（天津）有限公司

高导热金属基复合材料（MMCs）由性能优异的金属或金属合金作为基体，高导热、低膨胀的颗粒作为增强体复合而成。这种复合材料兼具两种材料的优势，且材料性能可调。金刚石/铜复合材料（DCC）具有高导热率、低膨胀系数（CTE）、低密度等优点，散热性能良好且能满足轻量化、微型化的社会需求，目前已逐步替代传统电子封装材料，成为新一代的封装材料。但金刚石和铜的界面结合能力较差，主要由于两种材料间无化学反应，界面润湿性差，这也限制了其广泛应用。本研究提出金刚石表面合金化界面改性方法，通过在金刚石颗粒表面引入金属碳化物层来增强材料的界面结合性能。利用有限元模拟仿真方法建立了金刚石/铜复合材料的传热模型，研究了界面碳化物层厚度、金刚石粒径、体积比等材料热导率的影响。通过磁控溅射方法在金刚石颗粒表面溅射了 ZrC 金属碳化物层，并利用高温压制法制备了金刚石/铜复合材料，对模型进行了验证，结果表明模型与实验结果具有较高的一致性。

C06-P05

添加 Co 与 C 元素对增材制造 Ti6Al4V 合金组织调控与性能研究

宋达*

天津大学

增材制造 Ti6Al4V 合金及复合材料由于其轻质高强的特点在航空航天、智能制造等领域有无可替代的应用，但随着对其性能要求的逐步提升，其粗大的先 β 柱状晶以及粗大 α' 板条马氏体限制了其性能的进一步提升。本课题基于增材制造过程中具有瞬时高温与熔体流动的特点，研究外加 Co 与 C 元素及其粒径对其组织与性能的影响，通过添加不同粒径的 Co 粉末来改变熔池内元素聚集状态，实现组织结构的不均匀，利用引入 Co 元素带来的高生长限制因子实现晶粒细化，同时 Co 原子与 C 原子进入晶粒内部起到固溶强化作用，显著提升材料强度，获得良好强度-塑性匹配，为设计高强韧钛合金材料积累了经验。

C06-P06

热管理复合材料的构型设计与机器学习研究

张鑫，苏益士*，刘旭阳，柴绪顺，欧阳求保，张荻

上海交通大学

基于第三代半导体材料的电子器件的广泛应用对热管理材料提出了兼顾高导热、低热膨与高机械性能的要求，不同于传统材料，金属基复合材料（MMCs）可发挥金属基体和增强体各自的优异特性，是高性能散热器发展的方向。面对材料界面热阻高、缺乏高效的设计准则等难题，本研究通过将不同构型的铝基复合材料的有限元建模与分析材料特征参数的机器学习算法相结合，建立材料的构型参数与热物性能之间的关系，并结合粒子群优化算法，进行基于构建关系的模型的材料构型逆向设计，实现一定程度上的数据驱动复合材料热管理性能匹配设计。

C06-P07

纳米 TiN 颗粒增强 A356 铝合金的制备及作用机理研究

董德¹，荆子豪¹，相立新¹，郑洪亮*¹，王文浩²，张莹¹，李恩发¹

1. 山东大学

2. 山东建筑大学

由于纳米颗粒增强复合材料具有优异的综合力学性能，在航空、航天、汽车等领域有着广阔的应用前景。本文采用含有 10%wt 纳米 TiN 颗粒预制体，制备了分别制备了在质量分数为 0%、0.5%、1.0%、1.5% 纳米颗粒 TiN 增强 A356 合金，并通过金相显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)电子探针(EMPA)分析,对不同 TiN 纳米颗粒添加后 A356 合金微观组织如晶粒尺寸、二次枝晶间臂(SDAS)以及

富铁相的作用以及 TiN 的分布进行了定量分析。利用维氏硬度计和万能实验机测试了不同纳米 TiN 颗粒添加量的 A356 合金常温力学性能。同时, 对 TiN 颗粒对 A356 合金的作用机理进行了讨论和分析。实验结果表明: 预制体可以实现纳米 TiN 颗粒的均匀添加, 随着 TiN 颗粒添加量的增加, 晶粒尺寸和二次枝晶间臂呈现铸件减小的趋势。纳米 TiN 颗粒的添加对于 A356 合金的硬度和强度作用较小, 断裂延伸率(铸态)从 10.1%提升至 15.6%, 提升超过 50%。纳米 TiN 颗粒的添加有效实现了初生铝相的细化, 并且均匀分布在晶界处, 细晶强化和第二相强化的协同作用是纳米 TiN 颗粒增强 A356 合金的强化机制。

C06-P08

Study of tissue structure evolution and slat martensite precipitation behavior of Co@GNPs/CoCrMo composites fabricated by selective laser melting

Rongxia Zhao*

Ningbo College of Materials Science and Engineering, Chinese Academy of Sciences

Spherical Co nanoparticles were reduced and deposited in situ onto graphene (GNP) surfaces using a hydrothermal method, and the prepared Co@GNPs reinforcing phase was uniformly dispersed in the alloy matrix. The fine equiaxed grains, elongated columnar grains, and $\epsilon + \gamma$ dual-phase dense microstructure were observed in the organization of Co@GNPs/CoCrMo complex fabricated by selective laser melting (SLM). The successful introduction of the Co@GNPs reinforcing phase reduces the hole defects of the composites and thus serves to improve the microstructure. Meanwhile, a high density of dislocations and nanoscale and atomic-scale stacked layer dislocations along the cellular equiaxial crystal boundary region are observed; furthermore, the successful introduction of the nano-strengthened phases leads to the susceptibility of ϵ -Co to heterogeneous nucleation growth on the GNPs, which facilitates the transformation of the face-centered cubic γ -Co (FCC) austenite phase to the densely-arranged hexagonal ϵ -Co (HCP) martensite phase. Their joint action promotes the precipitation of nanoscale lath martensite, leading to the formation of a unique characteristic structure of parallel rows of lath martensite on the surface of GNPs. And a co-lattice structure is formed between ϵ -Co and γ -Co, both of which show a specific orientation relationship of crystallographic plane $(111) \gamma\text{-Co} // (0002) \epsilon\text{-Co}$, and the crystallographic zone axis $[110] \gamma\text{-Co} // [11\text{-}20] \epsilon\text{-Co}$.

C06-P09

Significantly improved strength of TiC/TA19 composite via grain boundary engineering and their strenthening mechanisms

Zekun Zheng^{1,2}, Zhaohui Zhang^{*2}, Xiang Li³, xuezhe Zhang³, Guodong Sun¹, Linbo Li², Yongqing Fu⁴, Ahmed Elmarakbi⁴, Longlong Dong³

1. Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd.

2. School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology

3. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research

4. Faculty of Engineering and Environment, Northumbria University

Interfacial structure and their bond strength are critical for regulating microstructure, and unique chemical interfacial engineering enables good interface bonding TMCs with enhanced mechanical properties. Herein, TiC/TA19 matrix composites with super-high strength was fabricated using spark plasma sintering (SPS) and multi-pass cumulative rolling (MPCR). After MPCR, TiC particles with discontinuous network structure distributed at grain boundary and formed $[100]\text{TiC} // [112(_)0]\alpha\text{-Ti}$ semi-coherent interface. A large number of nanoscale secondary α -phases (α_s) precipitated within the β -phase with typical Burgers orientation relationship of $(0001)\alpha_s // (110)\beta$ & $[112(_)0]\alpha_s // [1(_)11]\beta$ and $(0001)\alpha_s // (011(_))\beta$ & $[112(_)0]\alpha_s // [1(_)11]\beta$, respectively. When the rolling reduction is 75%, the ultimate tensile strength of TiC/TA19 composite reaches 1571 MPa, which is 41.6%

higher than that of sintered, while the elongation is only 0.7% lower than that of sintered composites. The enhanced strength is mainly attributed to the α s precipitation for α s/ β interface strengthening and dislocation strengthening derived from the TiC and nanoscale α s precipitates. The volume fraction of dynamic recrystallization grains in TiC/TA19 composites increased with the rolling reduction, and more pyramidal $\langle c+a \rangle$ slip systems were activated to coordinate the plastic deformation of the composites.

C06-P10

Nb 和 Ag₂MoO₄ 的复配对 NiAl 金属间化合物摩擦学性能的影响

丰晓春*, 赵吉成, 朱耀祖

甘肃农业大学

针对航空、航天、核工程等战略高技术产业的高速发展对高温等极端苛刻工况中服役的固体润滑材料的强度和宽温域润滑性能要求的不断提高, 本论文以 NiAl 为基体材料, 选择合金元素 Nb 和原位生成的碳化物陶瓷为增强相, 以三元金属氧化物 Ag₂MoO₄ 为固体润滑剂, 采用高能球磨和真空热压烧结技术制备 NiAl 基复合材料, 考察合金元素 Nb 和 Ag₂MoO₄ 的复配对 NiAl 基高温自润滑复合材料的组织结构、机械性能和摩擦学性能的影响。结果表明: 合金元素 Nb 在烧结过程中完全形成了 NbC 硬质陶瓷相, 而三元金属氧化物 Ag₂MoO₄ 完全分解, 形成了 Mo₂C 和 Ag。同时摩擦过程中, 在整个温度范围内, 由于硬质相碳化物的形成, 造成 NAB (NiAl-Nb) 和 NABM (NiAl-Nb-Ag₂MoO₄) 摩擦系数的升高, 而在 800 °C 下, NABM 复合材料的摩擦系数最低 (0.28), 磨损率约为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 这归因于 NiAl-Nb-Ag₂MoO₄ 复合材料的磨损表面通过摩擦化学反应形成润滑釉质层, 起到了润滑的作用, 润滑的组成成分为高温润滑剂 Ag₂MoO₄ 和 Nb₂O₅。

C06-P11

Strategy of Introducing β -Ti Ductile-Zones for Ameliorating both Strength and Ductility in Heterostructured Titanium Alloy Composites

Xiaoqi Mao*

Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd.

Breaking trade-off barriers of strength-ductility in Ti alloys and their composites has been a key challenge for their engineering applications. Herein, we developed a new strategy of introducing β -Ti ductile zones in heterostructured (Cu@CNTs/TC4)+TC18 composites, which were synthesized using two-stage ball milling, spark plasma sintering and hot rolling processes. Such the heterostructured composites are composed of TC18-coarse grain zones (CGZ) and TiC+ α reinforced TC4-fine grain zones (FGZ), achieving a high ultimate tensile strength (UTS) of 1459 MPa and uniform elongation (UE) of 5.1%, which are superior to those of TC4 alloy (with its UTS of 1160 MPa and UE of 4.5%) and homogeneous Cu@CNTs/TC4 composite (with its UTS of 1461 MPa and UE of 2.4%). The enhanced strength of (Cu@CNTs/TC4)+TC18 composite is mainly attributed to the heterogeneously interfacial strengthening achieved by the geometrically formed dislocations at the TC4-FGZ/TC18-CGZ interfaces. The grain-coordinated deformation between TC18-CGZ and TC4-FGZ has been demonstrated as the key reason for achieving the exceptional ductility. This study provides a new structural design methodology for the amelioration of both strength-ductility in Ti matrix composites.

仅发表论文

C06-PO01

放电等离子烧结制备 Cu-B/Dia 复合材料及导热性能

张一欣*

金刚石/铜复合材料综合了金刚石的高热导率、低热膨胀系数以及铜基体的较低生产成本等优点，是目前最具前景的热管理材料。但铜基体与金刚石之间存在界面湿润性低的问题。采用放电等离子烧结制备了 Cu-xB/Dia 复合材料，并选择不同粒径金刚石作为原材料，研究了金刚石粒径大小和 B 含量对热导率的影响。结果表明在 Cu-xB/Dia 复合材料中，B 元素通过扩散与金刚石颗粒反应生成了 B₄C 过渡层，改善了铜基体和金刚石颗粒之间的结合状态。B 含量在一定范围内变化时（0~1 wt%），Cu-xB/Dia 复合材料的热导率先增大后减小。并且在 Cu 基体中合金含量一定的情况下，随着金刚石粒度的增加，Cu-B/Dia 复合材料的热导率增加。这是由于随着金刚石粒度的增大，Cu-B/Dia 复合材料形成的 B₄C 过渡层增加。当金刚石粒度为 701 μm，Cu-0.5B/Dia 复合材料的热导率最高，达到了 904 W/(m·K)。