

C06.金属基复合材料

分会主席：张荻、马宗义、武高辉、耿林、樊建中

C06-01

金属基复合材料国家重点实验室近年来的研究进展

张荻

上海交通大学

随着现代科学技术的发展，对金属材料的使用要求不再局限于单一的机械性能，而是要求金属材料在多场服役条件下，具有结构功能复合化和多功能的响应特性。金属复合化成为金属材料实现高性能化和功能化的有效途径。通过在金属基体中人为引入颗粒、晶须、纤维等异质材料，既可以作为增强体提高金属材料的机械性能，也可以作为功能体赋予金属材料本身不具备的物理和功能特性。因此，金属基复合材料将金属良好的韧性、可成型性和导电导热等优点与增强体的高硬度、高弹性模量和剪切强度及屏蔽吸波等优点结合在一起，形成一种兼具金属与增强体独特性能的崭新材料。金属基复合材料国家重点实验室自八十年代末期筹建成立以来，一直致力于先进金属基复合材料的基础和应用研究，特别是铝基、钛基、镁基等轻质高性能金属基复合材料的制备技术和基础科学研究。实验室所研制的 SiC/Al、CNT/Al、原位自生 TiC/Ti、TiB/Ti 等复合材料和构件广泛应用于航天、航空、高铁等领域，有力支撑了国家重大工程对轻质高性能金属材料的使用需求。本文将汇报近年来金属基复合材料国家重点实验室的研究现状和所取得的主要研究进展，同时还将对重点实验室在聚合物和功能复合材料方面的研究进展进行简述。

C06-02

复合材料尺寸稳定性设计原理与应用

武高辉，姜龙涛，张强，乔菁

哈尔滨工业大学

尺寸稳定性 (Dimensional Stability) 是指材料在长期贮存或者服役环境下保持原始尺寸不变的能力。材料尺寸的经时变化是无时不在、无时不有的自然现象，是材料本身的一种内禀特性。尺寸稳定性与热膨胀特性不同，热膨胀引起的尺寸变化可以依据物理模型给以预测和补偿；尺寸稳定性与残余应力也并非必然相关，因为退火试样仍然存在严重的尺寸稳定性问题。材料尺寸稳定性是与显微组织、成分、析出相等因素相关的材料内禀特性，难以预测。陀螺仪、加速度计、光学反射镜等高精度仪器仪表对结构材料的尺寸稳定性十分敏感，然而长期以来我国学者在这方面的研究报道十分稀少。本文介绍了作者持续二十余年研究结果，包括尺寸稳定性的评价方法、铝及其复合材料的尺寸稳定性现象、提高尺寸稳定性的技术方法，仪表级、光学级复合材料的尺寸稳定性设计原理与应用。与同仁共同研讨。

关键词：尺寸稳定性，热膨胀系数，仪表级复合材料

C06-03

颗粒增强铝基复合材料的 3D 打印制备及其微观组织分析

倪丁瑞¹，于菁^{1,2}

1.中国科学院金属研究所

2.沈阳航空航天大学

近年来，金属材料增材制造技术 (3D 打印) 快速发展，成为一种可实现快速成型、少加工或无加工的理想加工方式。3D 打印采用金属粉末或丝材为原料，通过计算机设计数字化模型及智能控制，将材料逐层累加成型，最终实现具有三维复杂结构的实体零部件制造，具有高精度、高效率和高性能等优点。已在钛合金、高温合金、不锈钢、铝合金等金属材料中得到快速发展。相比之下，由于陶瓷颗粒容易吸热、反射能量、阻碍金属流动、界面反应等问题，因此颗粒增强铝基复合材料 (Particle-reinforced aluminum matrix composite, PRAMC) 的增材制造受到了一定限制，相关技术亟待突破。

本文采用电子束熔丝沉积快速成形 (Electron beam freeform fabrication, EBF³) 与激光选区熔融技术 (Laser selective melting, LSM) 激光铺粉两种增材制造工艺，制备了 TiB₂ 颗粒增强铝基复合材料 (TiB₂/Al)，对其致密度、微观组织和力学性能进行了研究。对 TiB₂p/AlSi10 丝材，用 EBF³ 方法在合适的参数下打印出了质量良好的打印件，经测试打印件的强度为 135MPa，与热压态复合材料相当。对于 LSM 方法制备的 TiB₂p/AlSi10Mg 复合材料，重点分析了界面结合状况。

关键词：3D 打印，铝基复合材料，微观组织，力学性能

C06-04

SiC/Al 纳米复合材料粉末冶金制备及组织性能研究

梁加淼¹, 姚勋¹, 张震¹, 张德良², 王俊¹

1.上海交通大学

2.东北大学

颗粒增强铝基复合材料由于具有高比模量、高比强度、低膨胀、高导热、耐磨性好、高阻尼且成本较低等多方面优良特性,在航空航天、军事、交通运输及电子等行业展现出广阔应用前景。然而,传统颗粒增强铝基复合材料中陶瓷颗粒尺寸较大(通常在几个到几百微米之间),在机械载荷下容易产生应力集中,促使裂纹在界面处形核扩展,导致复合材料过早失效和较低塑性。相关研究结果显示,降低陶瓷颗粒尺寸有利于复合材料力学性能提高,尤其是当增强体颗粒尺寸为纳米数量级时,复合材料强度、塑性、耐磨性、导电及导热等性能较之传统颗粒增强铝基复合材料均有明显提高,引起国内外学者广泛兴趣。本研究利用高能球磨结合先进放电等离子体烧结和热挤压工艺,制备出几种纳米 SiC 颗粒增强铝基复合材料,研究 SiC 纳米颗粒含量对复合材料微观组织演变及力学性能影响,揭示热机械过程中纳米颗粒与溶质原子晶界偏聚及晶内析出之间关系,对纳米复合材料时效析出进行初步研究和探讨。

C06-05

冰模板-压力浸渗技术制备仿生结构 (B₄C-TiB₂)/Al 层状复合材料及其力学性能

杨立凯, 沈平

吉林大学材料科学与工程学院 130022

基于自然界中生物材料如珍珠贝、骨头等的高性能得益于其特有分级结构的认识,结合仿生学思想,我们利用冰模板-压力浸渗技术制备了陶瓷体积分数为 20% 的 (B₄C-TiB₂)/Al 层状复合材料。首先,采用冰模板法构筑了具有定向层状孔隙的 B₄C-TiO₂ 陶瓷坯体,经 1550 °C 反应烧结后得到了具有微米级层状内连通孔隙结构的复相 (B₄C-TiB₂) 陶瓷骨架。随后,利用真空-压力浸渗技术向多孔陶瓷骨架中注入熔融 Al,制备出具有精细结构的(B₄C-TiB₂)/Al 复合材料。通过 XRD、SEM 和 TEM 等表征分析了复合材料的物相组成以及微观结构。结果表明,原位反应生成的 TiB₂ 与部分 B₄C 颗粒形成了粘结颈,有助于提高陶瓷骨架的强度,但 TiO₂ 初始加入量高于 20 wt.% (占陶瓷粉体的质量分数) 的多孔陶瓷骨架中由气体释放和体积收缩引起的微裂纹显著增多。此外,反应生成的 TiB₂ 和 Al 具有优良的界面结合能力,不仅改善了 B₄C/Al 的润湿性,而且削弱了 Al₄C₃ 等有害反应产物的生成。随 TiO₂ 初始加入量 (0-40 wt.%) 的增加,复合材料的三点弯曲强度和断裂韧性先增大后减小,当 TiO₂ 初始加入量为 20 wt.% 时均达到最大值,三点弯曲强度为 420±20 MPa,裂纹萌生韧性为 8.9±0.1 MPa·m^{1/2},裂纹扩展韧性为 44±2 MPa·m^{1/2},断裂功为 5002±175 J·m⁻²,相比纯 B₄C/Al 复合材料分别提高了 18%, 19%, 42% 和 190%。复合材料的比强度和比韧性达到钛合金水平。对复合材料的裂纹扩展路径和断口形貌进行了分析,发现在复合材料断裂过程中存在裂纹偏转和金属桥接的增韧行为。

关键词: 金属基复合材料, 冰模板, 真空-压力浸渗, 复相陶瓷骨架, 仿生层状结构

C06-06

耐热高性能铝合金复合材料的研究

刘相法, 马霞, 赵永峰, 许庆飞, 孙谦谦, 刘桂亮

山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室, 济南 250061

借助粒子网骨架原位构筑及纳米晶种技术研制了系列耐热高强铝合金复合材料,包括:耐热高强、超强高模、高强高韧、耐热耐磨和耐热高导铝合金五大系列。其中,耐热高强铝合金新材料 350 °C 条件下的高温瞬时拉伸强度达 218 MPa, 500 °C 时达到 96 MPa; 超强铝合金复合材料,其室温抗压强度达 2163 MPa; 高强高韧铝合金复合材料的室温拉伸强度和延伸率分别为 425 MPa 和 15.5%, 强塑性匹配良好。上述耐热高强铝合金新材料在交通运输、航空航天、电力工程和国防军工领域都具有重要的应用前景。

关键词: 耐热铝合金, 原位构筑, 纳米晶种, 高温力学性能

C06-07

高强韧颗粒增强铝基复合材料的设计制备与性能研究

怯喜周¹, 赵玉涛¹, 李志强², 张荻²

1.江苏大学

2.上海交通大学

颗粒增强铝基复合材料 (PRAMCs) 以其高比强度、比模量和多功能的特点, 在国民安全和国民经济中具有不可替代的重要作用。然而, 由于陶瓷增强体与金属基体热膨胀系数和模量的不同, 陶瓷增强体在强化基体的同时不可避免地引起基体局部硬化和应力集中, 使传统 PRAMCs 在受力或变形过程中极易产生裂纹并在硬化的基体中快速扩展、大幅降低强韧性, 难以满足当今社会和科技发展对 PRAMCs 日益增长的高性能要求。

本研究通过片状粉末冶金的方法或者大塑性变形的的方法, 制备超细晶(UFG) Al 基体中包含纳米弥散相 (Al_2O_3 , ZrB_2 , rGO) 的 $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$ 复合材料。一方面, UFG 基体在显著提高复合材料强度的同时, 利于降低 B_4C 增强体对 Al 基体的硬化; 另一方面, 基体晶粒内部的纳米弥散相可显著提高 UFG 基体的应变硬化能力和裂纹钝化能力, 提高复合材料的塑韧性; 从而获得高强韧的 $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$ 复合材料。

关键词: 颗粒增强铝基复合材料, 均匀性, 结构设计, 高强韧

C06-08

纳米碳增强铝基复合材料

马宗义, 肖伯律, 刘振宇

中科院金属研究所

与传统陶瓷相相比, 纳米碳材料 (碳纳米管、石墨烯) 具有更优异的力学与物理性能。少量添加纳米碳材料替代传统的陶瓷增强相, 不仅有望提高复合材料的综合性能, 而且可以大大改善传统复合材料的机加工性能, 因而被认为是金属基复合材料的理想增强相。然而, 无论是一维碳纳米管还是二维石墨烯, 由于大的长径比或比表面积以及强的范德华力, 纳米碳材料极易团聚, 难以分散, 在机械分散过程中极易造成纳米碳材料的损伤。因而如何实现纳米碳材料在金属基体中的高效低损伤分散是制备纳米碳材料增强金属基复合材料遇到的主要挑战。

本研究采用基于搅拌摩擦焊技术发展的新型塑性加工技术——搅拌摩擦加工, 成功实现了碳纳米管与石墨烯在铝合金中的均匀分散, 从而制备出高性能的碳纳米管与石墨烯增强铝基复合材料。研究表明, 经过 2~3 道次的搅拌摩擦加工, 可以实现碳纳米管与石墨烯在铝合金中的均匀分散。搅拌摩擦加工虽然降低了碳纳米管的长度与石墨烯的二维尺寸, 但其管状与层状结构完好保留。由于低的复合制备温度, 界面反应得到抑制, 界面结合良好, 因而获得高的强度与较好的塑性。基于微观结构分析, 建立了纳米碳损伤与强化机制模型。

关键词: 纳米碳材料, 铝基复合材料, 搅拌摩擦加工, 微观结构, 力学性能

C06-09

纳米碳增强铝基复合材料的仿生与智能制备

李志强, 谭占秋, 范根莲, 熊定邦, 郭强, 苏益士, 张荻

上海交通大学 金属基复合材料国家重点实验室

碳纳米管 (CNTs) 和石墨烯纳米片 (GNSs) 等纳米碳材料是理想的复合材料增强体。然而, 其尺寸、形貌及表面性质等方面均与球形金属微粉不相容, 传统的粉末冶金技术借助高能球磨实现均匀复合, 无法实现纳米碳增强体与基体在空间上的最优化配置 (即构型效应), 使其增强效率无法得到充分发挥。为此, 启迪于贝壳珍珠层高强超韧的“砖砌式”纳米叠层复合构型, 以表面预先复合碳纳米管或石墨烯的微纳铝片为结构单元, 通过自组装堆砌, 仿生制备出了具有类似结构的 CNT/Al、GNS/Al 复合材料, 相比均匀构型的同类材料展现出更好的模量、强度以及塑性, 这为金属材料仿生复合化研究提供了成功的案例, 也为推动高性能纳米碳/铝复合材料的实际应用提供了可行的技术途径。

关键词: 仿生复合, 纳米碳/铝基复合材料, 纳米叠层

C06-10

仿生叠层单壁碳纳米管增强铝基复合材料微柱的强化机理研究

时岩, 郭强, 李志强, 张荻

上海交通大学

向结构精细、强韧匹配的贝壳珍珠层学习, 利用片状粉末冶金法制备了具有仿生叠层结构的单壁碳纳米管增强铝基复合材料。使用聚焦离子束和纳米压痕仪, 沿着与叠层平行或垂直的方向, 对含 0.5 wt% 单壁碳管的复合材料进行微柱压缩实

验, 并选用相同工艺制备的纯铝, 进行对比实验。研究表明, 在 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率下, 当力的方向与叠层方向平行时, 复合微柱的 5 % 流变应力相对于纯铝提高了 79 MPa; 当力的方向与叠层方向垂直时, 复合微柱的 5 % 流变应力相对于纯铝提高了 48 MPa。结合应变变速率实验和透射电镜分析, 发现复合材料相对于纯铝, 强化主要来源于晶粒细化, 单壁碳管的承载以及位错与复合界面的相互作用。

关键词: 单壁碳纳米管, 铝基复合材料, 纳米叠层结构, 微柱压缩实验, 应变变速率, 强化机制

C06-11

原位合成碳纳米管增强泡沫铝基复合材料及其压缩吸能性能

杨旭东¹, 何春年², 赵乃勤²

1. 中国民航大学

2. 天津大学

泡沫铝因具有优异的能量吸收、热学、电磁学、声学 and 阻尼等性能, 已广泛应用在建筑、轨道交通和航空航天领域。然而, 泡沫铝在单独作为结构材料服役时, 机械强度相对较低, 这严重制约了其应用范围, 因此通过复合化提高泡沫铝的综合性能是发展高性能泡沫材料的必由之路。碳纳米管 (CNTs) 具有优异的力学、物理和化学性能而被认为是泡沫铝基复合材料理想的增强体。但 CNTs 在金属基体中极易团聚, 阻碍了高性能 CNTs/Al 复合泡沫的发展。此外, 关于 CNTs/Al 复合泡沫在高温、高应变率载荷下的压缩性能的研究还鲜有报道。针对上述问题, 本文的研究团队采用原位化学气相沉积、短时球磨和填加造孔剂的工艺制备了均匀分散的 CNTs 增强铝基复合泡沫。着重研究了球磨工艺、环境温度和加载应变率对 CNTs/Al 复合泡沫的压缩吸能性能的影响规律。

针对原位合成的复合粉末, 研究表明: 随着球磨时间的延长, CNTs 的分散性提高并逐步嵌入铝基体中, 使复合泡沫铝的组织均匀性得到改善。相对于未球磨的含 3.0 % CNTs 的复合泡沫, 当球磨时间增加至 90 min 时, 复合泡沫的硬度、屈服强度和吸能能力分别提高了 67 %、126 % 和 343 %。继续延长球磨时间至 120 min 时, 铝粉发生严重的冷焊, 导致复合泡沫孔壁致密性降低, 强度明显下降。

研究了高温条件下 CNTs/Al 复合泡沫的压缩与吸能性能, 结果表明: CNTs 显著提高了泡沫铝的高温压缩强度和吸能能力, 并且随着 CNTs 含量的增加而增加。在 150 °C 时, 3 % CNTs/Al 复合泡沫的屈服强度和吸能能力分别达到了 16.8 MPa 和 19.8 MJ/m³, 分别为泡沫铝基体的 2.9 倍和 3.5 倍。同时, 温度的升高使复合泡沫的变形模式从兼有塑性和脆性的模式转变为塑性变形模式。

采用分离式霍普金森压杆和数字图像相关摄影技术研究了高应变率载荷条件下 CNTs/Al 复合泡沫的压缩性能和变形行为, 结果表明: 复合泡沫的压缩强度随着 CNTs 含量的增加而增加, 并随着应变率的增加而升高, 显示出明显的应变敏感性。当应变率为 2130 s⁻¹ 时, 峰值应力达到 52.5 MPa, 是相同条件下泡沫铝基体的 1.9 倍。与纯泡沫铝的变形失效行为显著受应变率影响不同, 复合泡沫的失效模式对应变率不敏感, 在准静态和高应变率条件下均表现为剪切失效。

关键词: 泡沫铝, 碳纳米管, 复合材料, 压缩吸能

C06-12

碳纳米管/铝基复合材料的智能粉末冶金制备与性能

范根莲, 陈马林, 谭占秋, 李志强, 郭强, 熊定邦, 张荻

上海交通大学

碳纳米管在铝基体的均匀分散、碳纳米管结构完整性、碳纳米管与铝的界面反应程度是影响碳纳米管/铝基复合材料性能的关键因素。如何实现上述因素间的平衡是制备碳纳米管/铝基复合材料的核心问题。球磨法是碳纳米管/铝基复合材料制备的最常用方法, 也是最适合规模化生产的制备路线。近期我们提出了变速球磨-片状粉末冶金的制备路线 (Composites Part A 2017;96:57-66.), 即先通过长时间慢速球磨使得球形铝粉片化的同时将碳纳米管均匀分散到铝片表面, 继而通过短时高速球磨焊合改善界面结合。实验结果表明, 采用变速球磨法制备的复合材料具有更好的强塑平衡。为了进一步提高碳纳米管在慢速球磨过程中的分散效率, 本论文在变速球磨片状粉末冶金工艺的基础之上, 引入一种高速剪切预分散处理工艺, 即通过粉末机械融合原理将碳纳米管均匀包覆到球形铝粉表面, 从而实现了碳纳米管在铝球表面的快速 (数分钟内) 均分复合。对比实验结果表明, 该预分散工艺不仅提升了碳纳米管的分散效率和效果, 减轻了球磨过程对于碳纳米管结构的破坏, 同时改善了碳纳米管与铝基体间的界面结合, 从而使得复合材料的强度、模量、延伸率得到了同步提升 (Materials & Design 2018, 142:288-296)。上述高速剪切预分散和变速球磨相结合的智能粉末冶金工艺路线, 可以使得碳纳米管的增强效果得已充分发挥。这种高效、可控、普适性的制备方法为碳纳米管/铝基复合材料规模化生产及商业应用奠定了坚实基础, 并且为其他纳

米增强相的金属基复合材料提供了启发与指导。

关键词：碳纳米管/铝基复合材料，片状粉末冶金，球磨，界面，预分散

C06-13

C/C-SiC-AlSi 复合材料制备及性能研究

刘磊

西安工业大学

C/C-SiC-AlSi 复合材料是一类有望用于高性能柴油机和速射武器等热端关键件的优良材料，本课题通过化学气相渗透结合前驱体浸渗裂解工艺制备了不同织物结构和基体 SiC 的 C/C-SiC 多孔预制体，使用真空挤压浸渗将熔融 AlSi 合金与上述多孔碳陶预制体进行复合，采用气固两相流沙尘冲蚀和高温热冲击对材料的耐冲蚀及抗热震能力开展了研究，结果表明 2D 碳布叠层织物的复合效果与性能均劣于 2.5D 针刺碳毡，SiC 引入工艺、基体 AlSi 合金配比及基体合金变质、细化处理等均对复合材料耐冲蚀、抗热震性能存在影响明显。

关键词：C/C，SiC，AlSi，冲蚀，热冲击

C06-14

7XXX 铝合金 (QC-10) 的 (TiB₂+Si) 复合增韧：选区激光熔化成形及其微观组织&力学性能

苏阳^{1,2}，周溯源²，严明²，汪浩¹

1.深圳大学

2.南方科技大学

激光选区熔化技术 (Selective Laser Melting, SLM) 作为增材制造的一种，能够制造形状复杂的零件，并基本实现 100% 原料利用率。迄今为止，研究发现 SLM 能够稳定加工 Al-Si 系铝合金，如 AlSi10Mg、Al-12Si 等，但对于性能优异的 7 系铝合金而言，其 SLM 成形依然存在很多问题，特别是成形件中经常存在难以消除的大量热裂纹。其主要原因是 7 系铝合金的高热导率、高激光反射率，以及合金的韧性较差。

我们最近的系统研究表明，虽然激光功率、扫描速度、扫描间距、基板预热温度等都是影响 7 系铝合金 SLM 成型的重要参数，但无论如何进行加工参数优化，都无法明显消除 7 系铝合金的热裂纹。本研究另从合金增韧&合金化角度出发，向 7 系铝合金 QC-10 原料中添加微米级 4 wt.%Si 粉末和微米级 2 wt.%TiB₂ 陶瓷颗粒，以期综合改善其韧性以及激光加工性能。实验通过机械混粉的方式均匀混合；在激光功率为 300 W、扫描间距 0.12 mm，通过 SLM 制备了 TiB₂/QC-10 复合基材料。经测试，其致密度达到 97% 以上，室温抗拉强度为 460±5 MPa，硬度为 190±8 HV，弹性模量为 68±3 GPa。研究表明，这种方法制备的 QC-10 铝合金微观组织得到细化，裂纹几乎得到全部消除，而且其力学性能得到了显著加强。

关键词：选区激光熔化 (SLM)，7 系铝合金，复合材料，热裂纹

C06-15

纳米碳增强钛基复合材料的微观组织调控与性能

张法明，刘腾飞，刘苏丽，王娟

东南大学

钛基复合材料在航空航天、国防军工以及生物医学等领域具有广阔的应用前景。本报告总结了课题组近几年在此领域的研究成果，文中采用纳米碳：包括碳纳米管、石墨烯与纳米金刚石颗粒非连续增强的纯钛与 TC4 钛合金基复合材料的制备工艺，均匀分布与非均匀网络状分布的调控机制，放电等离子烧结工艺，复合材料的组织结构与界面结构特征，复合材料的力学性能包括硬度、压缩强度、拉伸强度、塑形等，复合材料的摩擦磨损性能，导热性能以及耐腐蚀性能等。报告中分析了不同纳米碳材料的增强效果和强韧化机理，以及如何调和钛基复合材料的强度-塑形之间的矛盾的方法及实践，以及将复合材料制备成多孔金属，探索了多孔钛基复合材料的力学性能及问题和挑战。最后讨论了纳米碳增强的复合材料推荐的应用领域。

关键词：钛基复合材料，碳纳米管，石墨烯，纳米金刚石，放电等离子烧结，力学性能

C06-16

On the interactive effects of cyclic oxidation and structural evolution for Ti-6Al-4V/(TiC+TiB) alloy composites

黄陆军¹，魏绍楼^{1,2}，耿林¹

1.哈尔滨工业大学

2. 麻省理工学院

We conceived and actually prepared a kind of Ti-6Al-4V alloy matrix composite with coupled (TiC+TiB) networks as reinforcements by an *in-situ* synthetic technique. With an effort to enhance its high-temperature oxidation resistance, we experimentally investigated and thermodynamically elucidated the cyclic oxidation kinetics and concomitant structural evolution in the 873-1073 K temperature range. Our results proved that the specially designed network configuration of hybrid reinforcements can improve the oxidation resistance to a remarkable extent. With the aids of kinetic and elastodynamic computations, we proposed a phonological model to clarify the kinetics transition of cyclic oxidation process. Detailed mechanisms toward the role of network-structured reinforcements in cyclic oxidation will be covered in this presentation.

Key words: Titanium matrix composites; Powder metallurgy; High-temperature oxidation; Microstructural evolution

C06-17

电子束重熔及时效处理对 TiB 增强钛基复合材料的组织及表面性能影响

陶学伟, 姚正军, 张莎莎, 王晗, 胥栋衡

南京航空航天大学

采用电子束工艺对 TiB 增强钛基复合材料进行了表面重熔处理, 并随后对重熔层进行了时效处理。利用金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、显微硬度计、摩擦磨损试验机测试手段, 研究了重熔与时效过程中 TiB 晶须的演变行为, 并比较了处理前后钛基复合材料表面显微硬度及耐磨性能。研究表明: 电子束重熔后, TiB 晶须显著细化, 其中在重熔层顶部重新分布形成新颖的网状结构, 而在重熔层底部呈弥散分布; 通过 500 °C, 8 h 时效处理后, 弥散分布的细小 TiB 晶须向晶界处聚集, 形成网状结构。经电子束重熔与时效处理后的 TiB/Ti 复合材料的表面显微硬度与耐磨性得到显著提高。与基体相比, 改性后的钛基复合材料的表面硬度提高了约 60%, 磨损率降低了约 40%。

关键词: 钛基复合材料, 电子束重熔, 时效处理, TiB, 表面性能

C06-18

稀土元素对 TB2 钛合金渗硼层性质的影响

李平, 段永华

昆明理工大学材料科学与工程学院

由于钛及其合金具有良好的力学性能和机械性能, 比如强度高、低密度、耐高温、对生物惰性, 冷成型好等, 已经在航空航天、石油化工、医疗、体育等诸多重要领域都有广泛应用。但钛及钛合金材料的一些固有缺陷制约着其进一步应用, 如硬度低(钛及钛合金的纳米硬度在 2-3 GPa)、耐磨性差、导热导电性差以及易咬死等。钛及钛合金材料化学性能活泼, 表面的氧化膜可以起到防护作用, 但其表面氧化膜很薄, 若受到损伤或发生缝隙腐蚀, 其耐蚀性会大大降低。因此, 为提高钛及钛合金材料的综合性能, 对基体材料进行表面处理和改性已经成为该领域内一个新的研究热点。

本文通过固体单一渗硼和添加稀土的复合渗硼对 TB2 型钛合金进行表面改性, 渗硼剂主要由硼粉、无水硼砂、铝粉和氯化钾组成。采用 X 射线衍射仪、扫描电镜、电子探针、纳米压痕仪、微划痕测试仪、微振动摩擦磨损试验机对单一渗硼和复合渗硼试样进行了表面综合性能分析, 结果如下: 渗硼层由表层 TiB₂ 相和次外层 TiB 晶须相组成, 单一渗硼在不同温度(950 °C、1000 °C、1050 °C、1100 °C)、不同保温时间(5 h、10 h、20 h、30 h)条件下的渗硼层厚度范围为 10-35 μm, 渗硼后试样的纳米硬度也得到大幅提高, 耐磨性和耐蚀性都得到增强。但单渗硼层与基体的结合力仅为 32N。渗硼层的生长动力学研究表明, 渗硼温度较低时(1000 °C) TiB 晶须生长较快, 温度较高时(1050 °C) 转变为 TiB₂ 层的生长, 但单一渗硼的总的扩散系数数量级为 10⁻¹⁵, 扩散速率较小, 说明 B 原子在 TB2 基体中扩散较难。

复合渗硼的正交试验结果表明, 添加稀土复合渗硼的最佳工艺参数为 1100 °C-30h-CeO₂-10%。CeO₂ 的添加促进 TiB 晶须的生长, 使渗硼层更加致密, 摩擦系数大幅降低至 0.14, 且复合渗硼的渗硼层与基体结合力达到 59N, 结合良好。从电化学测试结果得出, 复合渗硼试样在 H₂SO₄ 和 NaCl 溶液中的抗腐蚀性能较单一渗硼均有所增强。

关键词: TB2 钛合金, 渗硼, 渗硼层, 稀土

C06-19

Ti-TiBw 复合材料的原位法制备及其钉扎效应

李树丰, 南盈盈, 潘登, 张鑫

西安理工大学

本文采用粉末冶金法 (P/M) 通过 Ti 粉与 BN 粉原位反应制备 TiBw 增强和 N 原子固溶增强的复合强化钛基复合材料 (TMCs)。实验对所制备的 TMCs 进行退火热处理, 研究在不同退火温度和时间条件下增强相 TiBw 含量对 TMCs 晶粒尺寸的影响, 通过对晶粒尺寸, 微观形貌以及力学性能测试和分析, 研究晶粒长大动力学, 阐明 TiBw 对 TMCs 显微结构和力学性能的影响以及晶粒尺寸的钉扎作用机制。结果表明: Ti 与 BN 混合粉末在 1000 °C 进行烧结时发生原位反应生成致密的 TiBw 增强和 N 原子固溶增强 TMCs。TiBw 呈细长晶须状集中分布于晶界处。与纯 Ti 相比, 经过 900~1200 °C 热处理, TiBw 明显提升了基体晶粒粗化温度。在粗化温度前, 随着热处理温度和时间增加, 晶粒尺寸无明显变化, 此时生成的 TiBw 有效抑制了晶粒长大; 达到粗化温度后, TiBw 长径比和形貌发生显著变化, 晶粒长大抑制作用减弱。随温度持续升高, TiBw 明显粗化, 钉扎作用减弱, 此时晶粒粗化严重, 导致试样强度下降。与纯 Ti 比较, 随着 BN 添加量的增加, 生成 TiBw 含量逐渐增多, 分布在晶界处, 阻碍晶界迁移, 部分晶界被 TiBw 占据, 降低了系统的界面能, 而晶界与 TiBw 分离将导致界面能的上升, 此时晶界迁移速率将逐渐减小, 晶界迁移所需激活能逐渐增大。TiBw 长轴平行于晶界时, 随着其长径比和含量的增加, TiBw 对晶界的钉扎作用越明显, 处于晶界的 TiBw 倾向于平行于晶界分布。

关键词: TMCs, TiBw, 热处理, 钉扎效应, 力学性能

C06-20

镁/铝基有序结构复合材料的制备及其压缩性能研究

王晗, 付玉, 苏明明, 郝海

大连理工大学

多孔金属作为一类特殊的气体/金属基复合材料, 具有较高的比强度, 同时集成特殊的功能特性, 具备广阔的应用前景, 然而其绝对力学性能仍有待提高。考虑到气孔部分对多孔金属的绝对力学性能贡献较小, 因此本文以工业纯镁为原料, 针对方形孔有序多孔铝, 对其气相进行渗流填充, 成功制备镁/铝基有序结构复合材料, 并对其进行准静态压缩试验。利用有限元软件 ProCAST 模拟镁/铝基有序结构复合材料的渗流铸造过程, 以减少渗流缺陷为目标, 优化渗流温度和预热温度等工艺参数。准静态压缩实验结果表明, 镁/铝基有序复合材料的压缩曲线与多孔金属相似, 依然具有应力平台区, 同时压缩强度及平台应力显著提升。准静态压缩变形过程中, 纯铝基体作为骨架主要表现出塑性及韧性, 纯镁作为填充相主要表现出轻质高强及脆性, 镁/铝两相在结构上的有序复合, 共同导致镁/铝基有序结构复合材料压缩性能的提升。

关键词: 多孔金属, 有序结构, 填充相, 金属基复合材料, 工艺优化, 压缩性能

C06-21

碳纳米管增强铝基复合材料的制备、界面与增强机理的研究进展

陈彪¹, Katsuyoshi Kondoh², 李金山¹

1. 西北工业大学

2. 日本大阪大学

使用具有诸多优异特性的碳纳米管作为金属基复合材料的增强材料是复合材料领域中一个方兴未艾的重要方向。本文综述了近年来碳纳米管增强铝基复合材料的研究进展, 包括从制备加工工艺、微观组织结构和力学性能等方面的重要问题。介绍了纳米碳增强相分散、碳纳米管-铝界面微结构和增强机制相关的主要研究成果。分析了目前碳纳米管-铝体系亟待解决的几个重要问题。

关键词: 金属基复合材料, 碳纳米管, 粉末冶金, 界面, 增强机理

C06-22

基于元素合金化的高强韧碳纳米管/铝合金复合材料制备

谭占秋, 徐润, 付晓文, 范根莲, 袁超, 李志强, 张荻

上海交通大学

针对碳纳米管 (CNT) 与超细晶铝合金 (UFG Al-X) 复合制备难点, 开发基于元素粉末合金化的叠片粉末冶金技术, 通过将制备的 CNT/Al 复合粉末与合金元素粉末的复合、烧结致密化及原位合金化反应, 获得碳纳米管/超细晶铝合金 (CNT/UFG Al-X) 复合材料。以 1.5CNT/Al-Cu-Mg、1.5CNT/Al-Zn-Mg-Cu 高强铝合金材料体系为例, 研究了元素粉末合金化行为: 合金元素扩散、基体晶粒尺寸/形态以及合金固溶析出行为规律, 对比分析了采用合金元素粉末与预合金粉末制备 CNT/UFG Al-X 复合材料的微观组织与力学性能特点。结果表明, 元素粉末合金化与直接采用预合金粉末相比, 可促进 CNT

的均匀分散、减少结构损伤，铝合金基体平均晶粒尺寸较大且呈拉长晶形态，从而可提高位错存储能力、有利于实现高强塑性。制备的 1.5CNT/Al-Cu-Mg、1.5CNT/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料力学性能优异，强度、模量与塑性较同类材料具有更好的匹配性。该方法通过元素粉末调控合金组分与微观组织，具有更高的设计灵活性，为纳米复合铝合金研究提供了有效途径。
关键词：碳纳米管/铝合金，叠片粉末冶金，合金化行为，微观结构，强塑性

C06-23

应变率对 GNPs/Al 复合材料动态压缩行为和显微组织演变的影响

孙婷婷，姜龙涛

哈尔滨工业大学

本文通过放电等离子烧结技术(Spark Plasma Sintering, 简称 SPS)制备了 0.5wt.% GNPs/Al 复合材料，并研究了不同轧制比(0.20%和 33%)和不同轧制方向下材料的准静态和动态压缩性能。其中准静态应变速率为 10^{-3} s^{-1} ，动态压缩性能通过 Hopkinson 压杆实验，应变速率范围为 200~1800 s^{-1} 。利用扫描电镜 (SEM) 对准静态和动态压缩前后 GNPs/Al 复合材料的显微组织进行观察。结果表明，在相同轧制方向下，材料的流变应力随着轧制比的增加而增加；在应变速率 200~1800 s^{-1} 范围内，不同轧制比和轧制方向材料的流变应力均显示先增加后降低的特点。这种变化趋势是应变率硬化和动态压缩过程中的温升导致基体材料软化相互竞争的结果。

关键词：GNPs/Al 复合材料，应变率敏感性，动态压缩行为，显微组织

C06-24

基于 Al-CuO 体系粉末冶金法原位合成超高强度铝（铝合金）基复合材料

戎旭东，赵乃勤

天津大学 材料科学与工程学院，天津 300350

大多数金属间化合物由于具有“硬而脆”本征特性，因此往往不会被当作增强相引入复合材料体系之中。但是如果能够将金属间化合物与铝基体“韧而软”的特性相结合，则有望获得具有较高韧性模量的铝基复合材料。若在铝基体中原位形成金属间化合物，一种方法是向铝中添加合金元素，另一种方法是在高温下使铝与金属氧化物发生铝热反应。铝热反应过程中不仅可以得到金属氧化物，同时还可以原位得到纳米氧化铝，进一步提升材料的力学性能。液相铸造法被认为是实现铝与金属氧化物 (CuO、Fe₃O₄、ZnO、TiO₂) 发生铝热反应的传统制备技术，但是液相铸造过程中温度较高（普遍高于 900 °C），铝热反应放热严重，因此常会发生热爆现象，并且冷却过程中合金元素优先在晶界形核析出，导致合金元素偏析，限制了复合材料力学性能的提升。本课题组近期采用变速球磨结合粉末冶金的方式，在铝熔点以下原位合成纳米 CuAl₂ 金属间化合物和纳米 Al₂O₃ 复合增强铝基复合材料。Al—7wt.% CuO 复合材料经 T6 热处理后抗拉强度可达 570 Mpa，较纯铝提高了 373%，断裂延伸率仍可保持 12.6%。透射分析表明，烧结后 CuAl₂ 和 Al₂O₃ 在基体内均匀分布，Al₂O₃ 纳米颗粒的尺寸约为 150 nm，晶内析出的 θ' -CuAl₂ 相直径约为 700~900 nm，厚度约为 80-100 nm。T6 处理后，经固溶再析出的 θ' -CuAl₂ 沉淀相具有更大的形状因子，其直径约为 300~500 nm，而厚度仅约为 8-15 nm。纳米增强相的尺寸效应、分布形式，与基体间良好的界面结合均有利于复合材料保持良好的强韧性。

关键词：铝基复合材料，粉末冶金， θ -CuAl₂，力学性能

C06-25

高强高导 CNTs-SiC_p/Al₂O₃w 混杂增强铝基复合材料的研究进展

张鑫，李树丰，潘登

西安理工大学

碳纳米管 (Carbon nanotubes, CNTs) 增强铝基复合材料 (Aluminum matrix composites, AMCs) 因集成铝和 CNTs 各自的优异性能而得到广泛关注。针对 CNTs 增强 AMCs 研究中所面临的 CNTs 分散困难、CNTs/Al 界面结合及界面反应等制约 CNTs 在 AMCs 中复合效应发挥的问题，本研究提出通过片状粉末冶金法引入纳米 SiC_p 或原位生成纳米 Al₂O₃w 作为第二增强相与 CNTs 混杂增强 AMCs 的研究思路。结果表明由于良好的分散性和界面结合，CNTs-SiC_p 和 CNTs-Al₂O₃w 混杂增强对 AMCs 力学性能的提升效果明显优于单相 CNTs 增强 AMCs，进一步缩小了实验值与理论值的偏差。0.5CNTs-0.5SiC_p 增强 AMCs 的抗拉强度达到 247 MPa，相比于纯 Al ($\sigma_b=127 \text{ MPa}$) 提升了 94%，而相比于 1.0 CNTs-Al ($\sigma_b=217 \text{ MPa}$) 和 1.0SiC_p-Al ($\sigma_b=158 \text{ MPa}$) 也分别有 14%和 56%的提升；0.5CNTs-2.0Al₂O₃w 增强 AMCs 的抗拉强度达到 228 MPa，相比于纯铝也有

79.5 % 的提升。SiC_p 和 Al₂O_{3w} 的存在抑制了 CNTs/Al 界面层的过度反应,使得 AMC_s 强度提升的同时,能够保持和纯 Al 相近的延伸率 (20 %) 和电导率 (50 % IACS)。纳米强化粒子可以有效抑制 Al 晶粒的长大并阻碍位错的运动,提高 AMC_s 力学性能的同时保持了良好的导电导热性能,其强化机理可总结为:载荷传递、细晶强化、热错配以及 Orowan 强化。本文为 CNTs 在 AMC_s 中优异性能的发挥提供了一种切实可行的研究思路。

关键词: 铝基复合材料 (AMCs), 碳纳米管 (CNTs), 纳米碳化硅颗粒 (SiC_p), 纳米氧化铝晶须 (Al₂O_{3w}), 力学性能, 混杂增强

C06-26

Ti_{55.5}Cu_{18.5}Ni_{17.5}Al_{8.5} 金属玻璃颗粒增强 7075 铝基复合材料的高温力学行为

王智, 谢美桑, 张冠群, 张卫文, 李元元

华南理工大学

铝基复合材料由于加入了不少硬质颗粒第二相,导致热加工性能严重恶化,限制了其广泛应用。金属玻璃颗粒是近年来研发的新型铝基复合材料增强体,在一定温度范围内黏度急剧下降几个数量级,这将有利于改善铝基复合材料的热加工性能。同时因为金属玻璃是一种亚稳态结构,达到一定温度下会发生晶化,这些是否会显著影响复合材料的高温力学性能尚不清楚,因此研究金属玻璃颗粒增强铝基复合材料的高温力学性能和变形行为具有重要的工程应用价值和科学意义。本工作研究了热挤压制备的 Ti_{55.5}Cu_{18.5}Ni_{17.5}Al_{8.5} 颗粒增强铝基复合材料的高温力学行为。

结果表明复合材料在室温下强度相比于 7075Al 铝合金有所提高,高温下却出现相反的结果,复合材料的流变应力显著低于基体铝合金,而且随着增强体含量越高,流变应力越低,表明 Ti_{55.5}Cu_{18.5}Ni_{17.5}Al_{8.5} 增强体可以改善复合材料的热加工性能,有利于热加工和二次塑性变形。复合材料高温变形后晶粒发生粗化,位错密度减少,基体与增强体之间的界面反应层增厚,此外还析出了 MgZn₂ 纳米相。高温下 Ti_{55.5}Cu_{18.5}Ni_{17.5}Al_{8.5} 增强体黏度和基体流变应力的降低,缓解了界面处的应力集中,有助于减少增强体在变形过程中萌生裂纹,进一步改善复合材料的热加工性能。在高温下的软化机制包括基体的动态回复和/或动态再结晶以及增强体颗粒由于粘度下降引起的软化行为。

关键词: 铝基复合材料, 金属玻璃, 高温力学性能, 高温变形机制

C06-27

乏燃料贮存容器用 B₄C/Al 中子吸收材料的高温老化、加速腐蚀及加速辐照研究

王全兆^{1,2}, 马宗义¹, 肖伯律¹

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学院核用材料与评价重点实验室

对乏燃料贮存和运输容器用粉末冶金法制备的 B₄C/Al 中子吸收材料进行了高温老化 (485 °C 短时高温、400 °C 长时高温)、加速腐蚀 (90 °C 去离子水、硼酸水) 及加速辐照 (快中子、γ) 试验研究。结果表明:高温老化实验中,复合材料尺寸、密度、质量、力学性能无明显变化,TEM 分析表明界面也无明显变化,铝基体中的 MgB₂ 纳米棒状析出物是阻碍老化过程中基体晶粒长大的主要原因。加速腐蚀试验中,酸洗、喷丸、阳极化三种表面处理形式对试样的耐蚀性能无明显影响;划痕试样,缝隙试样、电偶试样、包覆试样的浸泡腐蚀试验均未出现明显的腐蚀坑或严重加速腐蚀现象。水环境的加速辐照试验中,试样表面发生了轻微腐蚀,样品略有增重;辐照后材料硬度、屈服强度、抗拉强度均稍有提高,延伸率稍有下降。上述实验结果表明粉末冶金法制备的 B₄C/6061Al 中子吸收材料满足乏燃料贮存和运输容器服役环境。

关键词: B₄C/Al 中子吸收材料, 高温老化, 加速腐蚀, 加速辐照

C06-28

非连续增强铝基复合材料的重构建模与性能拟实

苏益士, Yann Berthelot, 王杰, 王重阳, 郭强, 熊定邦, 李志强, 张荻

上海交通大学

在颗粒增强金属基复合材料中,颗粒增强体具有种类繁多、尺寸差异大、形貌不规则、分布随机性等特点,如何建立能够有效描述复合材料复杂微观结构的重构模型,籍此研究其在多场载荷下的“结构-界面-性能”耦合响应规律,是颗粒增强金属基复合材料构-效关系研究的难点所在。本研究采用高通量统计表征颗粒增强体形貌信息,进而建立颗粒增强铝基复合材料微观结构重构模型,可实现颗粒增强体种类、形貌、尺寸、含量及取向等可控分布。通过典型铝基复合材料的实验与计算结果对比,验证了铝基复合材料的重构建模与性能预测研究方法的有效性,揭示了颗粒含量、界面行为、复合构型与材料失

效等因素对铝基复合材料力学特性的影响规律。所构建的颗粒增强金属基复合材料参数化建模与可视化研究,对铝基复合材料的设计、制备、加工及服役等具有积极的指导意义,对研究其它类型的金属基复合材料具有广泛的普适性。

关键词: 铝基复合材料, 重构建模, 界面行为, 性能拟实

C06-29

纳米压痕法测定 Cu/Ru 金属纳米多层膜的附着能及其相关变形机制研究

周青

西北工业大学

金属多层膜在电子器件中的潜在应用需要对这些材料系统的界面附着能进行评价。基于 Evans 模型,压痕法一般较好地评价薄膜的附着能。然而,对于塑性较好的金属薄膜来说,压入过程中薄膜和基体较难分离使得压痕法不再适用。在本文中,我们报道了可以利用纳米压痕测定金属纳米多层膜附着能的有效方法。采用纳米压痕探测技术,对单层厚度为 1.5 nm 磁控溅射沉积的 Cu/Ru 纳米多层膜的进行了研究。聚焦离子束(FIB)观测表明,由于层界面对塑性变形的限制,在多层膜和基体之间产生了由层弯曲引起的径向裂纹。基于径向裂纹的尺寸,采用改进的 Evans 模型,我们计算获得了 Cu/Ru 多层膜的附着能,这与用其他方法测定的 Cu 膜在 Si 基体上的附着能一致。这为测定金属纳米多层膜的附着能提供了一种有效的方法,同时为揭示多层膜特殊的变形机制提供了理论支撑。

关键词: 金属纳米多层膜, 附着能, 纳米压入, 变形机制

C06-30

Cu/Al 纳米多层膜界面合金化的强化机制

王飞^{1,2,3}, 黄平^{4,5}

- 1.西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室
- 2.西安交通大学力学国家级实验教学示范中心
- 3.西安交通大学航天航空学院
- 4.西安交通大学金属材料强度国家重点实验室
- 5.西安交通大学材料科学与工程学院

随着新型功能材料及器件向小型化,集成化和复合化的发展,电子器件逐步从单一薄膜结构向尺寸在纳米尺度的层状堆垛结构发展,使得纳米多层薄膜材料被广泛应用于纳米传感器、光学器件、材料制造、微电子机械系统(MEMS)等材料新兴产业。纳米多层膜的诸多优异性能都源自于其内部的大量界面。实验结果表明多层膜界面形貌结构具有亚层厚度依赖性和组元混合焓依赖性:两组元之间呈现正的混合焓的 Cu/W 多层膜, Cu 和 W 不互溶,其界面清晰平整。而两组元之间呈现负的混合焓的 Cu/Al 多层膜,在随着单层厚度减小的过程中, Cu 和 Al 之间充分扩散互混形成 Al₂Cu 等合金,使得原本的 Cu/Al 层界面不复存在。虽然没有了层界面对材料的强化, Cu/Al 多层膜的强度却随着层厚的减小显著升高。Al₂Cu 合金作为第二项强化材料,在多层膜强度的尺寸效应中起到重要作用。同时,多层膜中大量存在金属/合金界面的存在可以稳定临近金属的层错结构。合金和层错的出现显著强化了材料,使得含有负的混合焓的 Cu/Al 多层膜的硬度显著高于其它 fcc/fcc 组合的多层膜材料。这项研究也提出了通过将含有负的混合焓组元以多层膜的方式得到细小的合金结构的制备方法。

关键词: 纳米多层膜, 界面合金化, 混合焓, 尺寸效应

C06-31

冷冻铸造和浸渗法制备仿珍珠贝层状结构 ZL205A/SiC 复合材料及其强韧性研究

阿拉腾沙嘎^{1,2}, 沈平²

- 1.吉林建筑大学材料科学与工程学院
- 2.吉林大学

随着航天、交通等领域的快速发展,迫切需要新型高性能结构材料,即低密度、高刚度、高强度和高韧性等特点集于一身。本研究通过制备仿珍珠贝层状结构金属-陶瓷复合材料,为解决具有中高陶瓷体积分金属基复合材料的断裂韧性较低的瓶颈难题。本研究选取 ZL205A 铝合金为基体,以微米 SiC 颗粒作为主要增强相。首先,制备环境友好的 SiC 水基陶瓷浆料,利用冷冻铸造法制备出层状多孔 SiC 预制坯,随后采用真空-气压浸渗法将熔融 ZL205A 合金向这一多孔 SiC 坯体中填充,最终获得仿珍珠贝层状结构 ZL205A/SiC 复合材料。在冻铸造过程中,通过调节冷冻方式,浆料浓度和冷冻温度等制备工艺,对复合材料微观结构进行有效控制,揭示工艺参数-微观结构-宏观力学性能之间的内在联系和影响规律。在研究

过程中, 采用快速冷冻和单向冷冻法分别制备出均匀分布和层状分布的 ZL205A/30 vol% SiC 复合材料。与均匀结构相比, 层状结构复合材料显示出更高的抗弯强度和断裂韧性, 尤其裂纹扩展韧性(K_{Jc})提高了 2 倍多。均匀分布的复合材料断裂时裂纹几乎直线扩展, 而层状复合材料在断裂过程中显示出裂纹偏转、裂纹分叉和合金层的塑性变形以及未开裂韧带的桥接等多重增韧机制。通过对比含不同陶瓷含量的层状 ZL205A/SiC 复合材料正交性能后发现, 随着初始固相含量的增加(20-40 vol%), 强韧性降低; 同时, 纵向(即平行于片层方向)样品强韧性明显高于横向(即垂直于片层方向)样品。ZL205A/20 vol% SiC 的复合材料纵向样品最高抗弯强度、裂纹萌生韧性(K_{Ic})和裂纹扩展韧性(K_{Jc})分别达到了 760 ± 10 MPa、 14.7 ± 0.6 MPa \times m^{1/2} 和 33.0 ± 0.8 MPa \times m^{1/2}。该复合材料最高抗弯强度比基体合金和 SiC 陶瓷的强度分别提高了 25%和 148%; 其裂纹萌生韧性(K_{Ic})与基体合金的韧性相近; 而其裂纹扩展韧性(K_{Jc})比纯 SiC 的性能提高了约一个数量级。纵向样品在断裂过程中显示出以上多重增韧机制, 然而横向样品在断裂时裂纹在陶瓷层中扩展, 金属层的裂纹扩展阻力减少。随着陶瓷含量的增加, 复合材料的弹性模量提高(102-138 GPa), 在正交方向上其弹性模量显示为各向同性。随着冷冻温度的降低, 层状复合材料中陶瓷片层及金属片层厚度减少, 复合材料抗弯强度、断裂韧性均减少。这是因为随着片层结构的变细, 复合材料的多重增韧效果减弱。

关键词: 金属基复合材料, 冰模板, 真空-压力浸渗, 仿生层状结构, 强韧性

C06-32

高强韧仿贝壳层状纯 Al/Al₂O₃-TiC 复合材料的制备及性能表征

胡志杰, 沈平

吉林大学材料科学与工程学院

贝壳珍珠层因其独特的“砖-泥”层状结构而兼具高强度和高韧性, 模仿这一结构特征制备软硬相间排列的高强韧层状复合材料已成为研究热点。纯 Al/Al₂O₃ 是理想的复合材料体系, 其原材料价格低廉、来源广泛, 具有大规模应用前景。然而, Al₂O₃ 层片通常难以烧结致密, 层内易形成闭孔或残留微细开孔, 即使在压力作用下 Al 熔体也难以完全填充其中, 导致复合材料力学性能差。

本研究利用 TiC 与 Al 润湿性良好这一特点, 通过掺杂 TiC 来改善 Al/Al₂O₃ 复合材料的力学性能。我们首先采用双向冷冻铸造工艺制备了层片排列高度有序的 20 vol.%Al₂O₃(-TiC)陶瓷坯体, 然后结合真空压力浸渗工艺制备出纯 Al/Al₂O₃(-TiC)层状复合材料, 通过调控 TiC 的加入比例来研究 TiC 的加入对复合材料力学性能的影响规律。研究发现, Al₂O₃ 坯体中加入 TiC 后, Al 熔体成功浸渗到陶瓷层内, 并在陶瓷层内形成一种三维网状互连的结构, 复合材料沿平行于片层和垂直于片层方向的力学性能均得到了显著提高。以总陶瓷含量 20 vol.%, Al₂O₃:TiC=9:1 的 Al/Al₂O₃-TiC 复合材料为例, 相比于 Al/Al₂O₃ 复合材料而言, 其沿平行于片层方向, 弯曲强度由 232 ± 1 MPa 增加到 342 ± 2 MPa, 延伸率由 1.5 ± 0.2 %增加到 2.7 ± 0.2 %, 沿垂直于片层方向, 弯曲强度由 211 ± 4 MPa 增加到 302 ± 9 MPa, 延伸率由 1.3 ± 0.2 %增加到 2.0 ± 0.1 %。断口微观结构显示, Al/Al₂O₃ 复合材料陶瓷层内的陶瓷颗粒均为松散堆积, Al 熔体很少浸渗到层内间隙中, 且陶瓷层多处开裂。而 Al/Al₂O₃-TiC 复合材料陶瓷层内的颗粒间隙已被 Al 熔体填充, 陶瓷层断口处存在大量微小的网状撕裂棱。上述结果表明, 该复合材料中陶瓷层的强韧性对其整体性能具有至关重要的作用, TiC 的加入可有效改善 Al 熔体和 Al₂O₃ 坯体的润湿性, 促进 Al 熔体向陶瓷层内颗粒间隙中填充, 显著提高陶瓷层的强韧性, 进而大幅改善其整体性能。

关键词: Al/Al₂O₃-TiC, 层状复合材料, 双向冷冻铸造, 弯曲强度

C06-33

Sc、Zr 元素添加对 SiC/Al 复合材料微屈服行为的影响研究

宫灯, 姜龙涛

哈尔滨工业大学

SiCp/Al 复合材料是理想的惯性仪表材料, 具有广泛的应用前景。在 Al 基体中添加 Sc 和 Zr 元素可以获得细化的晶粒以及纳米尺度的析出相, 这对提高材料微屈服特性有重要作用。本文采用压力浸渗工艺制备 SiCp/Al-0.3wt%Sc-0.2wt%Zr 复合材料, 同时对比分析了 SiCp/pure Al 和 Al-Sc-Zr 合金的显微组织和微屈服行为。结果表明, 材料在发生 10^{-4} 残余应变下, 两者的微屈服相近。而当微塑性变形量小至 5×10^{-6} 残余变形时, SiCp/Al-Sc-Zr 的微屈服强度为 52 MPa, 比同等微塑性变形量下的传统 SiCp/Al 复合材料提升了 30%以上。分析认为, 不同于传统 SiCp/Al 复合材料高密度位错缠结的界面组织, SiCp/Al-Sc-Zr 表现出的是界面处近无位错的超细晶(200-300 nm)组织。此显微组织对于提高微塑性变形抗力更有效。

关键词: 金属基复合材料, Al-Sc-Zr 合金, 显微组织, 细晶强化, 微屈服

C06-34

B4C 颗粒增强铝基复合材料的析出行为分析

吴传栋^{1,2}, 甘章华¹, 刘静¹, 罗国强², 沈强², 张联盟²

1. 武汉科技大学 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室

2. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室

复合材料是先进结构材料的发展方向之一, 轻质高强铝基复合材料具有高比强度、高比模量以及良好耐磨性等优异的综合机械性能, 是复合材料领域中备受关注的研究方向之一。本研究以 B_4C 颗粒增强 AA7075 合金为研究对象, 重点考察 $B_4C/AA7075$ 复合材料的析出行为, B_4C 与基体热膨胀系数的差异导致 B_4C 颗粒周围存在高密度位错结构, 我们将 B_4C 颗粒周围的区域定义为基体塑性区(MPZ), 远离 B_4C 颗粒的区域定义为基体区(M), 透射电子显微镜的观察结果表明 M 和 MPZ 中析出相的形貌、种类、尺寸和数量密度等存在较大差异, M 中的析出相以片状 η' 相和 GP 区为主, 而 MPZ 中的析出相以片状 η' 相、薄片状 η' 和 GP 区为主。MPZ 由于高密度位错结构和 Al/ B_4C 界面的共同作用导致空位的湮灭, 从而影响了 GP 区的均匀形核并导致其数量密度降低。通过计算结果表明 η' 相在位错上非均匀形核的激活能远低于在晶粒内均匀形核的激活能, 因此, η' 相易于在位错上发生非均匀形核, 高密度的位错结构为片状 η' 相提供了更多形核核心从而导致其数量密度增大, 值得关注的是薄片状 η' 相仅在 MPZ 中发现。

关键词: 铝基复合材料, 析出相, 显微结构

C06-35

热压法制备高体积分数($B_4C+W+Al$)复合材料的致密化行为研究

国天天, 毛昌辉, 马书旺, 吕政, 梁秋实, 王健

有研科技集团有限公司

采用真空热压法在不同铝基体下制备了高体积分数 B_4C 、W 含量的铝基复合屏蔽材料。利用 SEM、EDS、XRD 以及维氏显微硬度计对复合材料的微观结构进行了分析评价。结果表明, 相同增强相含量下, 基体为 2024Al 的材料与增强相 W 发生反应, 生成了新相 WAl_{12} , 材料硬度、致密度均大于基体为纯 Al 的材料; 基体相同时, B_4C 含量越高, 材料致密度越小; W 含量对材料的致密度影响不大。

关键词: 真空热压, 铝基复合材料, 致密度

C06-36

耐高温 $Al_2O_3/B_4C/Al$ 复合材料的制备

咎宇宁^{1,2}, 周阳韬¹, 王全兆¹, 肖伯律¹, 马宗义¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学

乏燃料是燃烧后的核燃料, 其具有高放射性, 射线主要为热中子。乏燃料的安全贮运需要含硼的中子吸收材料, 发展新一代具有高温强度的结构功能一体化 B_4C/Al 复合材料是新型贮存技术的基础。上世纪 50 年代发明的烧结铝显现出优异的高温性能, 有望应用于制备耐高温 B_4C/Al 复合材料。该工艺通过将铝粉机械研磨成片状, 经热压烧结, 利用表面原位生成的氧化铝提高材料的高温强度, 然而, 由于当时表征手段有限, 难以观察到对材料性能起决定性作用的氧化铝, 导致强化机制的理解和材料性能的优化缺乏实验依据。

本研究使用纯度为 99% 的工业纯铝粉作为原料, 通过高能球磨 (300 r/min 主轴转速球磨 3 h, 球料比为 15:1) 制备片状铝粉, 并在 400 °C 和空气下预氧化 2 h, 增厚氧化膜, 冷却后向其中均匀混合入质量分数为 10%、纯度为 96.5% 的 B_4C 颗粒。通过真空热压获得 $Al_2O_3/B_4C/Al$ 复合材料坯锭, 并经过挤压、锻压制备出具有不同氧化铝分布状态的复合材料。

微观结构表征发现, 锻饼中的氧化铝主要分布在晶界, 而挤压棒中的氧化铝分散于晶粒内部。通过拉伸实验发现, 挤压和大锻压比下复合材料的室温强度和延伸率都较高, 但在高温下 (375 °C), 挤压态材料强度远低于锻压态材料。锻压比 8:1 的材料高温强度最高, 在 375 °C 可以达到 96 MPa, 满足实际服役要求。高温下, 锻压态材料中晶界处氧化铝对晶界的强化作用是主要高温强化机制。由此, 在较低氧化铝含量 (5%) 下达到了与氧化铝含量较高 (10% 以上) 的传统烧结铝 (牌号为 SAP895) 相近的高温强度。

关键词: 中子吸收材料, 铝基复合材料, 粉末冶金, 高温强度

C06-37

原位自生 TiC 对钛基复合材料热加工性能的影响

马凤仓, 刘平, 李伟, 刘新宽

本文制备了原位自生 5 vol.% TiC 颗粒增强钛基复合材料, 研究了原位法制备 TiC 对钛基复合材料相变温度和热变形行为的影响, 主要包括采用金相法测定了复合材料 β 相变温度, 通过等温热压模拟实验研究了在 1000 °C 到 1150 °C 的热变形行为, 在不同的温度区间内计算了原位自生 5 vol.% TiC/Ti-1100 复合材料的塑形变形激活能。结果发现, 原位 TiC 的加入提高了钛基复合材料 β 转变温度, 而且 TiC 颗粒对钛基材料的热变形行为有明显影响。计算出的复合材料的塑形变形激活能在不同的温度区间内变化。在 1000 °C, 复合材料的表观塑形变形激活能为 536 kJ/mol, 显著高于纯钛合金的激活能; 在 1150 °C, 计算出的复合材料的表观塑形变形激活能为 245.2 kJ/mol, 略大于纯钛合金的激活能。变形激活能的显著差别显示复合材料的变形机制发生了变化。在此温度区间内, TiC/Ti 复合材料的变形机制受到 TiC 颗粒以及基体中 α/β 相比例的影响。

C06-38

15 vol.% B₄Cp/2024Al 复合材料的本构方程与加工图构建

薛威, 姜龙涛

哈尔滨工业大学

本文使用 Gleeble 3500 动态热模拟试验机研究了 15 vol.% B₄Cp/2024Al 复合材料热变形过程中的流变行为, 变形温度为 300-500 °C、应变速率为 0.001-1 s⁻¹。结果显示低应变速率下(0.001-0.1 s⁻¹), 真应力-真应变曲线分为弹性阶段、应力峰值阶段和平稳阶段, 而高应变速率(1 s⁻¹)时, 真应力-真应变曲线出现第四阶段: 应力随应变下降。流变应力随变形温度的降低而增加, 随应变速率的增加而增加。构建了 B₄Cp/2024Al 复合材料的本构方程, 与双曲正弦模型符合很好, 同时可以很好的描述复合材料的热变形行为。根据加工图可以得到最佳变形条件, 低应变($\epsilon < 30\%$)下变形温度为 400-500 °C, 应变速率为 0.05-0.17; 高应变下变形温度为 425-475 °C, 应变速率为 0.05-0.14。

关键词: B₄Cp/2024Al 复合材料, 热压缩, 本构方程, 加工图

C06-39

Si₃N₄ 和 AlN 粒子协同增强铝基复合材料的研究

许庆飞, 胡恺琪, 马霞, 高通, 刘相法

山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 山东济南 250061

针对铝基复合材料强塑性难匹配的难题, 本文制备了一种 Si₃N₄ 和 AlN 颗粒协同增强的铝基复合材料。SEM 和 TEM 结果表明, AlN 和 Si₃N₄ 颗粒的平均粒径分别为 50 nm 和 0.5 μ m, 且较均匀地分布在 α -Al 基体上。该复合材料经挤压成型后, 其横纵截面上有明显的择优取向, 呈现出 $\{110\} < 111 \rangle$ Al 的板织构。经固溶时间 (T4) 热处理后, 由于发生了再结晶, α -Al 晶粒的取向程度、平均晶粒尺寸、晶界取向差分布以及位错密度等均发生了显著变化, 从而显著影响了其力学性能。研究结果表明, 经 540 °C 固溶处理 3 h 后, 该复合材料不仅在室温下具有最佳的强塑性匹配, 强度和延伸率分别达到 425 MPa 和 15.5 %, 350 °C 条件下的瞬时拉伸强度达到 143 MPa。

关键词: 铝基复合材料, Si₃N₄ 和 AlN 粒子, T4 热处理, 力学性能

C06-40

纳米 AlN_p 微骨架协同富 Ni 相高温强化铝合金的研究

胡恺琪, 许庆飞, 马霞, 孙谦谦, 高通, 刘相法

山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室 山东济南 250061

为了改善 Al-Si-Cu-Ni-Mg 合金的室温及高温力学性能, 本文采用铸造法通过 Al-8AlN 晶种合金的方式向合金中引入纳米 AlN_p 微骨架。通过调控铸造工艺参数, 使加入到 Al-Si-Cu-Ni-Mg 合金中的纳米 AlN_p 主要分布在 Al-Si 二元共晶区, 呈现为 20-50 μ m 的微骨架形态, 其与富 Ni 相组成的半连续网相互补充、协同增强, 而且对共晶 Si 相产生明显的变质作用, 使其形貌由板片状转变为颗粒状。合金的室温和高温拉伸性能、高温显微硬度明显提升, 如合金 350 °C 条件下的瞬时抗拉强度由 85 MPa 提高至 110 MPa, 提高了 29.4 %。分析认为, 纳米 AlN_p 微骨架辅助富 Ni 相起到良好的载荷传递作用, 共晶 Si 形貌改善也减轻应力集中倾向。

关键词: Al-Si 合金, 耐热铝合金, 高温力学性能, 纳米 AlN_p 微骨架

C06-41

原位制备镍纳米颗粒修饰石墨烯增强铝基复合材料

杨立壮, 何春年, 赵乃勤, 沙军威, 师春生, 刘恩佐
天津大学材料科学与工程学院 天津市材料复合与功能化重点实验室

石墨烯由于其特殊的单原子层结构, 因而具有超高的力学性能, 同时具有良好的延展性以及优异的硬度, 使其成为金属基复合材料理想的纳米增强相。而 Al 因其良好的延展性以及耐高温耐腐蚀性能等, 具有广泛的应用前景, 但由于其较低的力学性能, 使得 Al 的应用受到了一定的限制。因此, 石墨烯增强 Al 基复合材料是目前研究的重点。但由于石墨烯容易团聚并且与 Al 很难浸润, 使得增强效果减弱。针对以上问题, 本文采用了简单而有效的方式进行一步合成了 Ni 纳米颗粒修饰的石墨烯, 使其在 Al 基体中均匀分布并获得良好的浸润效果。首先, 采用冷冻干燥技术获得石墨烯负载 Ni 颗粒前驱体, 再通过高温煅烧过程获得负载 Ni 纳米颗粒修饰的石墨烯, 再通过球磨和放电等离子烧结(SPS)烧结技术获得块体复合材料。结果表面, 通过 0.5wt.%负载 Ni 纳米颗粒的石墨烯的加入, 复合材料拉伸强度较纯 Al 提高了 70.6%, 同时延伸率也有达到 27%, 获得了良好的增强效果。

关键词: 石墨烯, 铝基复合材料, 原位合成, SPS 烧结

C06-42

镁熔体与陶瓷的润湿及其在复合材料制备中的应用

沈平, 张丹, 毛海荣, 张恒, 刘艳

吉林大学材料科学与工程学院, 长春市南关区人民大街 5988 号, 130025

利用铸造或熔体浸渗等液相工艺制备金属基复合材料时, 金属熔体与陶瓷增强体的润湿性好坏在很大程度上决定了复合材料制备的难易程度及其界面结合质量和最终性能的优劣。因此, 充分理解和控制基体与增强体之间的润湿性是制备理想复合材料的必要前提。然而, 由于 Mg 低温易氧化、高温易蒸发的特性给润湿性的精确测定带来了极大的困难。目前有关 Mg 熔体与陶瓷的润湿性数据十分缺乏。在本工作中, 我们采用挤压滴落法测定了 Mg 熔体在各种氧化物、碳化物和氮化物基板上的润湿性, 揭示出伴随蒸发的润湿过程中存在的典型模式和遵循的一些共性规律。同时基于润湿动力学和蒸发动力学之间的耦合关系, 提出了复杂情况下润湿性及其动力学行为的评价方法。进一步, 基于获得的润湿性结果, 利用无压浸渗技术制备了层状结构的 AZ91D/SiC、AZ91D/Al₂O₃、AZ91D/Mg₂B₂O_{5w} 复合材料, 考察了 AZ91D 合金在定向排列多孔陶瓷骨架上的自发浸渗动力学, 并测试了复合材料的力学性能。这些结果为开发短流程低成本制备轻质高强韧镁基复合材料提供了重要指导或参考。

关键词: 润湿性, 金属基复合材料, 无压浸渗, 力学性能

C06-43

团簇型(SiCp/Al)p/Al 复合材料的多元强化性能研究

谭鑫, 刘凯, 武高辉

哈尔滨工业大学 150001

本文利用 SiCp/2024Al 作为增强体, 采用压力浸渗法制备了不同基体 (7A60、1050、2024) 的(SiCp/2024Al)p/Al 复合材料(将其描述为“团簇型”), 并采用热挤压的方式改变了复合材料的微观结构, 对该材料的微观结构和拉伸性能进行了研究, 并采用有限元分析对材料进行了仿真模拟, 计算了复合材料在受载时的 Mises 应力分布和应变分布情况。

结果表明: SiCp 的团簇型分布可以有效的提高复合材料的塑性韧性, 制备出的团簇型复合材料较增强体均匀分布的复合材料分别提升了 21 %和 52 %。仿真结果与实验结果吻合良好。随着渗入的基体刚度的提升, 复合材料中的应力集中现象减弱, 断裂形式由(SiCp/2024Al)p 的拔出转变为(SiCp/2024Al)p 的断裂。

关键词: 铝基复合材料, SiCp, 结构设计, 有限元分析, 压力浸渗

C06-44

SiC_p/2024Al 恒温保持条件下尺寸稳定性机理

曹义方, 姜龙涛

哈尔滨工业大学

为了研究 SiCp/Al 复合材料在恒温保持过程中各因素对其尺寸稳定性的影响, 制备了体积分数为 45 %的 SiCp/2024Al 和 SiCp/1199Al 两种复合材料。用热膨胀仪测定了其在经退火和淬火两种热处理工艺后在 160 °C 恒温保持过程中的尺寸变化规律, 分析了微观残余应力、宏观残余应力和时效析出三个因素对 SiCp/2024Al 尺寸稳定性的影响。结果表明, 退火处理后

的试样在 160 °C 恒温保持过程中尺寸变化几乎为零, 说明微观残余应力在 160 °C 时松弛的驱动力很小。淬火处理后的试样在 160 °C 时效过程中尺寸均增加, 说明时效析出与残余应力的松弛都使复合材料尺寸增大, 且应力松弛使试样尺寸增加大约在 1.4×10^{-4} 量级, 时效引起 SiC/2024Al 复合材料的尺寸增加约为 2.3×10^{-4} 量级。

关键词: 金属基复合材料, 热处理, 微观结构

C06-45

重熔稀释法制备 TiB₂p 增强铸造铝合金基复合材料

陈宗宁, 吴一弘, 郭恩宇, 康慧君, 王同敏

大连理工大学

采用改良的混合盐反应法制备出一种优质 Al-5TiB₂ 中间合金, 其 TiB₂ 尺寸细小 (平均尺寸 357 nm)、分布较为弥散。通过重熔稀释法制备了一系列 AlSi7Mg0.3-xTiB₂、AlCu4.5Si1.1-xTiB₂、AlZn6Mg0.5-xTiB₂ (x = 0-4) 铸造铝合金基复合材料, 解决了传统原位合成反应法的复合材料成分难以控制的问题。复合材料的拉伸性能测试结果表明, 重熔稀释法尤为适用于强化 AlCu4.5Si1.1 合金, 其铸态和热处理态的材料强度和塑性可以同时得到提高; 而对 AlSi7Mg0.3 和 AlZn6Mg0.5 来说, 则分别适用于强化热处理态性能和铸态性能。本文通过引入颗粒分散度系数 ϵT , 建立了描述 TiB₂ 颗粒强化机制的数学分析模型, 将不同强化机制与 ϵT 联系起来, 并通过同步辐射显微 CT 对分析结果进行了验证。研究表明: 由于 TiB₂ 在 AlCu4.5Si1.1 中分布最为弥散, 促进了细晶强化、Orowan 强化以及 CTE 强化的共同作用; 而 AlSi7Mg0.3-xTiB₂ 中的 TiB₂ 分布较为弥散, 因此 TiB₂ 对 AlSi7Mg0.3-xTiB₂ 复合材料铸态性能的改善效果较 AlCu4.5Si1.1 要差; AlZn6Mg0.5-xTiB₂ 中的 TiB₂ 团聚现象最为严重, 因此其 Orowan 强化机制和 CTE 强化机制作用最弱, 强度的提高则主要源于细晶强化。

关键词: 铝基复合材料, TiB₂, 原位自生

C06-46

纳米孪晶增强铝基复合材料的制备与性能研究

朱欣欣¹, 刘金铃²

1. 西南交通大学材料科学与工程学院
2. 西南交通大学力学与工程学院

研究表明, 在金属材料中引入纳米孪晶既可以提高其强度又不损失其韧性。然而, 对于具有高层错能的金属铝而言, 纳米孪晶十分罕见。本文采用粉末冶金的方法制备了高体积分数纳米氧化铝增强铝基复合材料, 通过 TEM 表征其微观结构发现存在大量的纳米孪晶及宽层错。室温下准静态压缩测试及微柱压缩测试表明该材料具有高强度的同时仍具有良好的韧性。进一步研究表明, 通过调控制备工艺可以控制纳米孪晶及宽层错的产生及其密度, 进而调控材料的力学性能。

关键词: 铝基复合材料, 纳米孪晶, 宽层错, 压缩性能

C06-47

不同工况 SiC/Al 基复合材料的磨损行为研究

刘萌萌, 白亚平

西安工业大学

采用机械合金化和热压烧结相结合的方法分别制备了 3wt.%、5wt.%、7wt.%SiC/Al 复合材料。研究了 SiC/Al 基复合材料的显微组织、密度和硬度, 结果表明: 当 SiC 含量为 5wt.% 时, 材料显微组织最为细小、均匀, 随着 SiC 含量的升高, 材料密度和硬度均呈现先增加后减小趋势, 且当 SiC 含量为 5wt.% 时, 密度和硬度均达到最大值, 分别为 2.7178g/cm^3 和 57.75HB。同时, 研究了不同 SiC 含量 Al 基复合材料在室温干摩擦和边界润滑两种工况中的摩擦磨损性能, 结果表明: 两种工况中, 随着 SiC 含量的升高, 材料磨损率和摩擦系数均呈先减少后增加的趋势, 5wt.%/Al 基复合材料磨损率和摩擦系数均最小, 且边界润滑工况中材料磨损率和摩擦系数均小于干摩擦工况; 观察不同 SiC 含量材料的磨损面及其磨屑形貌, 可以看出: 干摩擦工况中, 材料主要磨损机制为磨粒磨损和粘着磨损, 而在边界润滑工况中, 其主要磨损机制为磨粒磨损和轻微氧化磨损。

关键词: 铝基复合材料, 热压烧结, 显微组织, 磨损行为, 磨损机制

C06-48

铝基多孔复合材料单轴压缩微观结构和强度相关性研究

林颖菲^{1,2}, 张强², 王娟¹, 郑开宏¹, 武高辉²

1.广东省材料与加工研究所

2.哈尔滨工业大学

通过调整玻璃空心微珠壁厚/半径比 (t/R 比) 与铝基体中镁元素含量, 研究铝基多孔复合材料微观组织结构与准静态压缩性能关联性。研究表明, 多孔复合材料压缩性能随空心微珠 t/R 比的增大和 Mg 含量的增加而提高, 基体中 Mg 与玻璃微珠壁界面反应生成高强 $MgAl_2O_4$ 界面层进一步提高微珠承载能力。基于铝基多孔复合材料组织结构特征与压缩性能结果, 建立相应压缩特性预测模型, 预测结果与实验数据吻合。

关键词: 铝基多孔复合材料, 微观组织, 压缩性能, 预测模型

C06-49

SiCp/2A14 铝基复合材料热锻成型工艺研究

郑瀚森, 白月龙, 张志峰

有研科技集团有限公司国家有色金属复合材料工程技术研究中心

碳化硅颗粒增强铝基复合材料具有比强度高、比刚度、耐磨性好、热膨胀系数低等优点, 在轨道交通、航空航天、及电器电子等领域具有广泛应用前景。采用搅拌熔铸法直接成型的复合材料零件虽然成本低, 但是其塑性往往较低, 需要通过热变形强化来满足使用要求。因此, 本文以坦克履带板体为研究对象, 采用数值模拟和试验研究相结合的方法, 研究了搅拌熔铸法制备的 SiCp/2A14 复合材料铸坯热锻成型工艺, 考察了坯料的增强体含量、坯料尺寸、热锻压力、热锻道次以及热处理工艺制度对产品的成形性和力学性能的影响规律。研究表明, 随着增强体颗粒含量提高, 成型变得更加困难; 同样体积的坯料形状变化对零件成形性影响很大, 过厚过薄都会导致充型不满; 热锻压力越大、次数越多成形性越好; 500°C 固溶 6 h 后, 时效 8 h 和 12 h 都获得了力学性能满足要求的成型件, 但发现随着时效时间的增加, 复合材料的抗拉强度提高, 延伸率降低。

关键词: SiCp/2A14 铝基复合材料, 热锻成型, 热处理, 力学性能

C06-50

基体合金化对 Ti₃SiC₂/Cu 复合材料 微结构和性能的影响

张治国, 杨秉霖, 李卫

暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院

MAX 相的 Ti₃SiC₂ 具有片层结构, 从而拥有良好的导电性和润滑效果, Ti₃SiC₂ 增强铜基复合材料整合了铜的优良导电导热性和 Ti₃SiC₂ 的优异性能, 有望在高强高导的应用场合发挥重要作用。本文采用粉末冶金热压烧结法制备了 Ti₃SiC₂/Cu 复合材料, 研究了基体合金化 (添加 Zn、Cr、Al、Ni) 对复合材料微结构和性能的影响, 并着重考察了复合材料界面上的反应和形成的界面状态。

实验结果表明: 基体合金化对 Ti₃SiC₂/Cu 复合材料中增强相的作用不同, 其中 Cr 的添加提高了 Ti₃SiC₂ 的分解温度, 而其它元素则影响不大。选择 840 °C 作为烧结温度, 制备成 Ti₃SiC₂/Cu (X) 复合材料。SEM 表面形貌观察结果显示, Ti₃SiC₂ 能均匀分布到各种铜合金基体中。基体合金化会导致材料致密化程度不一样, 其中, Zn 的添加可获得最高的致密度。XRD 结果表明, 各种合金元素主要以固溶的形式存在于铜基体中。基体合金化导致 Ti₃SiC₂/Cu 复合材料电导率有所下降。

关键词: Ti₃SiC₂ 颗粒增强铜, 电导率, 硬度, 微结构

C06-51

无压浸渗法制备 TiC_x/Cu 复合材料及其性能研究

雷聪, 翟洪祥, 黄振莺, 胡文强, 蔡乐平

北京交通大学

以钛粉和乙炔炭黑为初始原料, 以 PVB 为成型剂和造孔剂, 原位烧结制备气孔可调的多孔 TiC_{0.5} 预制体。将熔融的铜在无压条件下浸渗多孔预制体制备 TiC_x/Cu 复合材料。通过 SEM, XRD, EDS, TEM 等表征手段观察了预制体和复合材料的微观结构, 结果表明, 陶瓷相与金属相具有牢固的界面结合力, 同时形成了金属相以根须状结构深入陶瓷颗粒内部的结构。实验还检测了复合材料的相关力学性能, 当陶瓷相 TiC_x 的体积含量高达 71.22 vol% 时, 复合材料的能到达 948.2 MPa 的弯曲强度和 12.62 MNm^{-3/2} 的断裂韧性。这优异的力学性能得益于陶瓷 TiC_{0.5} 与金属 Cu 良好的界面润湿性和材料独特的微观结构。该方法对于解决 TiC-metal 复合材料具有一定的借鉴意义。

关键词: 预制体, 复合材料, 浸渗, 润湿性

C06-52

多级镁基纳米复合材料的微结构调控与性能研究

罗茜, 刘金铃

西南交通大学

为了打破传统金属基复合材料的强韧困境, 本文采用粉末冶金法制备了具有仿生结构特征的非均匀镁基纳米复合材料, 其中硬相是连续分布的具有高体积分数的 SiC 颗粒增强的 Mg 基复合材料, 而软相是呈弥散分布的纯镁。通过调控其软相尺寸、体积分数的可实现材料性能的优化, 获得强韧匹配良好的 SiCp/Mg 纳米复合材料。三点弯实验结果表明: 这种软硬相结合微观特征能够有效地抑制裂纹扩展, 提高材料的损伤容限。此外, 通过热挤压成型工艺进一步实现了对软相形状因子的调控, 实验表明软相形状因子的变化对多级 SiC/Mg 材料的拉伸性能和断裂形式有显著影响。

关键词: 镁基纳米复合材料, 微结构调控, 拉伸性能, 断裂特征

C06-53

原位添加 WC 强化相的 W-Cu 基复合粉末的制备

李昱嵘, 宋晓艳, 侯超, 王海滨

北京工业大学

W-Cu 类复合材料具有优良的电导率、热导率、强度、韧性及耐磨损、耐电弧烧蚀等综合性能, 被广泛应用于集成电路、触头材料、电火花加工等领域。为满足军工领域和极端工况条件的需求, 已有大量研究工作通过组织结构细化、元素掺杂或添加第二相颗粒等方法进一步提升 W-Cu 基复合材料的性能。WC 作为一种重要的高硬度、强耐磨的陶瓷相, 可添加到 W-Cu 合金中以提高复合材料的高温硬度、耐磨性和高温强度。然而, 纳米 WC 颗粒作为添加相时, 非常容易发生团聚, 造成强化相在基体中分布不均匀, 从而导致 W-Cu 基复合材料综合性能不高。为此, 本文在有效减小初始粉末粒径的同时, 发明了一种新的 WC 引入方法, 使得 WC 纳米相均匀分布并且与 W 基体结合良好, 由此有效提高 W-Cu 基复合材料的综合性能。本研究建立的一种可原位引入 WC 强化相的 W-Cu-WC 纳米复合粉末的批量合成方法, 可适用于制备多种复合材料体系。结合热力学模型计算与原位反应实验, 于较低温度下合成成分分布均匀、平均粒径约 60 nm、WC 弥散分布的 W-Cu-WC 纳米复合粉末。该复合粉末烧结块体的显微组织结构分析表明, W 与 WC 间和 W 与 Cu 间均存在一定比例的半共格关系, 利于增强 W-Cu 基复合材料的相界面稳定性和力学性能。

关键词: W-Cu 基复合材料, 原位合成方法, 纳米复合粉, 反应热力学

C06-54

具有高抗氧化和高导电性能的 TiN-Ni 金属陶瓷应用于中温固体氧化物燃料电池连接体

段航^{1,2}, 刘岩¹

1.中国科学院上海硅酸盐研究所

2.上海科技大学

新型 TiN-Ni 金属陶瓷作为中温固体氧化物燃料电池 (IT-SOFCs) 的潜在连接体在本研究中被提出。通过优化热压烧结法的工艺参数, 分别制备出含有 30%, 50% 和 70% (体积) Ni 的金属陶瓷。随着金属陶瓷中 Ni 含量的增加, 相对密度, 导电率和热导率显著提高, 最大值达到 99.6%, $1.7 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。另外, TiN-Ni 金属陶瓷的热膨胀系数 (CTE) 在 $(9.7-13.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 之间显示出与 IT-SOFCs 的其他组件的优越匹配。此外, 具有体积比 70% Ni 的金属陶瓷展现出具有优异的抗氧化性和稳定的导电性能, 高温氧化重量增加仅为 0.7%, 在 800 °C 下氧化 100 h 后电导率依旧高达 $1.6 \times 10^4 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。我们的工作表明, TiN-Ni 金属陶瓷可以作为有前景的连接体材料用于中温固体氧化物燃料电池的实际应用。

本文原材料为粒径 1 μm (纯度 99.9%) 的 TiN 粉体和粒径为 1 μm (纯度 99.9%) 的 Ni 粉。首先研究了热压烧结制备 TiN-Ni 金属陶瓷的工艺参数与性能关系, 着重分析了烧结压力和烧结温度对样品致密度的影响, 30Ni、50Ni、70Ni 的最优烧结工艺参数分别为: 69MPa/1400 °C、57MPa/1250 °C、32MPa/1200 °C, 其中 70Ni 致密度最高, 也对样品的弯曲强度、硬度以及热导率等物理性能进行了测试。其次对烧结后样品相结构分析, 结果表明两相之间无化学反应, 无新相产生。接着研究了样品在模拟 IT-SOFCs 工作温度 600 °C-800 °C 等温氧化 500 h 下的氧化动力学和相演变, 也着重分析了 70Ni 的氧化物形貌以及氧化层厚度变化。最后对三种样品 600 °C-800 °C 等温氧化 500 h 的电导率进行了分析, 电导率在氧化 500 h 后依旧高达 $10^4 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$, 并且有趋于稳定的趋势。

关键词: TiN-Ni 金属陶瓷, 中温固体氧化物燃料电池, 连接体, 高抗氧化性能, 电导率

C06-55

石墨烯增强镁基复合材料的制备与性能研究

王朝辉, 刘飞翔, 杜宪, 李淑波, 刘轲, 杜文博

北京工业大学材料科学与工程学院

以 AZ91 为基体, 石墨烯纳米片为增强相, 采用熔铸法制备了石墨烯增强镁基复合材料, 并研究了石墨烯对复合材料微观组织与力学性能的影响规律。结果表明, 复合材料中石墨烯与镁基体之间的界面结合情况良好, 石墨烯能有效改善复合材料的组织, 复合材料的晶粒得到细化, 且第二相得到更加弥散地分布; 复合材料的力学性能得到提高, 仅添加 0.05wt.% 的石墨烯, 复合材料的屈服强度、抗拉强度和显微硬度即可较基体合金分别提高 20.1%、4.2% 和 9.4%。实验结果与理论分析表明, 石墨烯在镁基复合材料中的主要强化机制为热错配强化、载荷传递强化和细晶强化。

关键词: 石墨烯, 镁基复合材料, 组织性能, 强化机制

C06-56

石墨烯结构缺陷在镁合金基体中的力学增强作用

杜宪, 杜文博, 王朝辉, 刘轲, 李淑波

北京工业大学

化学剥离法制备的石墨烯 (Graphene nanoplatelets, GNPs) 存在碳原子缺失、悬挂碳键、含氧官能团等结构缺陷, 将其作为镁合金 (Mg-Zn-Zr) 的增强体, 采用搅拌铸造方法制得了石墨烯增强镁合金复合材料 (GNP/ZK60), 研究了石墨烯结构缺陷对镁基体力学性能的作用机制。结果表明, 当添加质量分数为 0.05% 的石墨烯时, 复合材料的屈服强度和延伸率较基体分别提高了 60% 和 40%, 产生了超高的增强效率 (~1500)。结合对石墨烯及复合材料的微观形貌、结构及组织分析, 石墨烯的结构缺陷不仅增强了与镁基体的界面结合, 而且在界面处诱发了镁纳米晶生成, 在强度和韧性方面大大优化了镁合金的力学性能。

关键词: 石墨烯, 缺陷, 镁合金, 界面结合, 力学性能

C06-57

Ti 和 ZrC 复合添加的 W-Cu 基复合材料的制备

王杰, 宋晓艳, 侯超, 王海滨

北京工业大学材料学院

W-Cu 复合材料具有高导热电率、低热膨胀系数、高抗电弧侵蚀性和高温自冷却特性等。为进一步拓宽其在航天、军工材料等领域的应用, 大量研究表明通过元素掺杂或添加第二相等方法可有效提高钨铜复合材料的高温性能。ZrC 作为一种高硬相, 分散到 W-Cu 基体中, 可以提高复合材料的高温下的强度、导热性等性能; 添加元素 Ti 使其均匀分布在 W-Cu 基体内, 可抑制高温下晶粒生长, 提高其高温力学性能。基于此, 本研究建立了一种通过加入硬质相 ZrC 和元素 Ti, 从而有效有效的控制了 W-Cu 复合材料高温下晶粒尺寸增长的方法。实验结果表明 W-Cu 复合材料高温稳定性及其力学性能均可显著提高, 且适用于多种复合材料体系。此外, 本研究还通过制备多孔钨, 采用化学方法包附铜的方式, 得到了一种高纯且粒径均匀的纳米 W-Cu 复合粉末, 平均粒径达到了 60 nm, 为高性能钨铜复合基材料的制备提供了新的设计思路。

关键词: W-Cu 基复合材料, 高温稳定性, 纳米复合粉

C06-58

WC 含量对冷喷 FeAl 基金属陶瓷涂层结构及性能的影响

张思织¹, 王洪涛^{1,2}, 姚海龙^{1,2}, 白小波¹, 杨超¹, 陈清宇¹

1.九江学院

2.江西省材料表面再制造工程技术研究中心

本文以提高 FeAl 高温强度为目的, 通过机械合金化制备纳米结构 Fe(Al)/WC 固溶体复合粉末, 采用冷喷涂沉积涂层并结合后热处理原位制备 FeAl 基金属陶瓷涂层。研究了 WC 体积分数 (10%、20%、40%) 对机械合金化复合粉末相结构、晶粒尺寸及冷喷 FeAl 基金属陶瓷涂层结构和性能的影响规律。结果表明, 随着 WC 含量增加, 复合粉末机械合金化效果提高, 粉末粒度显著减小, Fe (Al) 基体相晶粒细化加剧; 冷喷涂可将球磨粉末的结构完全移植到涂层之中, 所得涂层 W 组织致密、WC 弥散分布, 在 650 °C 热处理后发生 Fe(Al)固溶体向 FeAl 金属间化合物的原位转变, 制备出了 FeAl 基金属陶瓷

涂层；WC 含量对 FeAl 基金属陶瓷涂层硬度和磨损性能影响显著，随着 WC 含量增加，冷喷 FeAl 基金属陶瓷涂层的硬度和耐磨损性能显著提高。

C06-59

Co 含量对 Co-Ni 合金镀层组织结构和性能的影响

刘健健, 朱诚意

武汉科技大学

本文研究了 Co 含量对 Cu 基体上 Co-Ni 合金镀层组织结构及性能的影响，利用 FE-SEM/EDS、XRD、LSCM 研究了镀态及热处理后镀层的组织结构，采用显微硬度计、电化学综合测试仪研究了镀层的硬度及耐腐蚀性能。研究表明：本实验条件下镀层中 Co 含量高出镀液中 Co^{2+} 浓度相近的数值。镀层的表面硬度和截面硬度具有不同的变化趋势，在 Co 含量为 49.84 wt% 时，表面硬度最低为 430.43 $\text{HV}_{1\text{N}}$ ；而截面硬度达到最大值，为 463.2 $\text{HV}_{1\text{N}}$ 。镀层主要为 Co-Ni 置换固溶体形式存在的立方晶体结构 (fcc)，不存在密排六方晶体结构 (hcp)，热处理促进了镀层的晶粒长大。900 °C 热处理后镀层出现了再结晶现象，出现以立方结构 (fcc) 为主，和密排六方结构 (hcp) 共存的晶体结构。镀态 Co 含量超过 34.8 wt% 后会使镀层的耐蚀性变差，300 °C 热处理后 Co 含量为 66.9 wt% 时镀层耐蚀性能最好。

关键词：Co-Ni 合金镀层，热处理，组织结构，显微硬度，耐蚀性

C06-60

MAX 相蜕变原位自生 TiC 与 γ' -Ni₃(Al,Ti) 协同强化 Ni 基复合材料的结构表征及力学性能分析

胡文强, 黄振莺

北京交通大学

利用三元层状碳化物 (MAX 相陶瓷) 的原位解离，本研究采用反应热压烧结的方法制备了一种新型原位自生 TiC 与 γ' -Ni₃(Al, Ti) 复相协同强化 Ni 基复合材料。利用高分辨透射电镜分析得出，拓扑转变的 TiC 与 Ni 基体界面结合牢固，呈现半共格的界面关系，且取向关系为： $\langle 1\ 0\ 0 \rangle$ TiC // $\langle 1\ 1\ 0 \rangle$ Ni 以及 (020) TiC // $(\bar{1}\ 1\ \bar{1})$ Ni。共格的纳米 γ' -Ni₃(Al, Ti) 晶粒在 Ni 基体中原位析出。原位自生的 TiC- γ' 不仅与基体结合牢固而且还细化了 Ni 基体的晶粒，使得复合材料表现出非常优异的力学性能。例如：以体积分数为 30 % 的 Ti₂AlC 为先驱体制备的 TiC- γ' /Ni 基复合材料的屈服强度、压缩强度、断裂应变、弯曲强度、硬度、断裂韧性可以分别达到 1056 ± 29 MPa、 1776 ± 33 MPa、 $19.37 \pm 0.75\%$ 、 1284 ± 59 MPa、 26.31 ± 2 MPa·m^{1/2}。如此优异的力学性能归因于细晶强化、固溶强化和弥散强化等多重强化机制。

关键词：Ni 基复合材料，协同强化，界面分析，力学性能

C06-61

Al₁₂Mg₁₇ 组元添加对冷喷涂 Ni-Al 活性金属复合材料反应特性的影响

赵慧林, 谭成文, 于晓东, 宁先进, 聂志华, 王富耻, 才鸿年

北京理工大学材料学院

Ni-Al 基金属活性复合材料具有优异的力学性能和冲击释能特性，在军事领域具有良好的应用前景。为进一步提高 Ni-Al 基活性材料反应特性，本文采用冷喷涂工艺，通过添加 Al₁₂Mg₁₇ 组元的方法制备出致密度较高 (>95%) 的块体 Ni-Al-Al₁₂Mg₁₇ 活性复合材料。采用分离式霍普金森压杆测试了材料在高应变率加载条件下的力学性能；采用差示扫描量热法结合特征点分析法分析了 Al₁₂Mg₁₇ 组元对 Ni-Al 基活性材料在热爆模式下的反应特性影响；利用高速摄影技术测量了材料在自蔓延反应模式下燃烧波的传播速度。结果表明，添加 Al₁₂Mg₁₇ 后，材料在 3×10^3 s⁻¹ 应变率条件下，动态压缩强度提高了 15 %，达到 380 MPa，同时 Al 基体的存在保证了材料在动态压缩过程中的完整性。Ni-Al-Al₁₂Mg₁₇ 材料发生热爆反应的阈值温度为 480 °C，相较于 Ni-Al 二元材料下降约 160 °C，材料的自蔓延燃烧速率由 Ni-Al 的 100 mm/s 提高到约 150 mm/s。Al₁₂Mg₁₇ 组元的低熔点特性及 Mg 元素的氧化燃烧对 Ni-Al 基体的热爆及自蔓延反应的触发起到了重要作用。在自蔓延反应过程中，Mg 元素的燃烧与 Ni-Al 金属间化合反应相互促进，提高了燃烧波的传播速度。采用添加 Al₁₂Mg₁₇ 组元的方法可以直接有效地实现冷喷涂 Ni-Al 基金属活性复合材料反应性能的提高。

C06-62

非晶 Ni-P/晶体 Ni 结构层状材料拉伸性能的研究

炊晓毅^{1,2}, 潘杰¹, 李毅^{1,2}

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学

近年来,层状材料以其独特的变形机制引起了众多学者的研究兴趣。本工作应用电沉积的方法,实现了厚度可达毫米级的非晶 Ni-P/晶体 Ni 的层状块体材料的可控制备。通过精确调控晶体 Ni 层(20 μm)和非晶 Ni-P 层(0.1-6 μm)的厚度,可系统研究非晶 Ni-P 层厚度对块体 Ni-P/Ni 层状材料拉伸性能的影响。X 射线衍射、扫描电子显微镜及透射电子显微镜等观察发现, Ni-P 层为完全非晶结构,而 Ni 层则是晶粒尺寸约为 500nm 的柱状晶。室温单向拉伸实验结果表明,块体 Ni-P/Ni 层状材料的拉伸性能取决于非晶 Ni-P 层的厚度,其强度遵循混合法则,而均匀延伸率随着 Ni-P 层的厚度的增加,先增大后减小。当非晶 Ni-P 层厚度小于 1 μm 时, Ni-P 层的剪切变形能被 Ni 层有效抑制从而表现出高达 20 % 的均匀变形,使整体样品最终呈现延性断裂。特别的是当 Ni-P 厚度为 0.5 μm 时,层状样品的强度和延伸率相比于均质晶体 Ni 样品分别提高了 13 % 和 25 %,即实现材料强塑性的同时提升。随着非晶层厚度的增大,层状样品的塑性急剧降低,变形机制也逐渐由晶体层与非晶层之间的协调变形转为由非晶层主导的剪切变形。裂纹在 Ni-P 层形成后迅速扩展至整个样品,从而使整体样品表现为脆性断裂。本工作不仅拓展了块体层状材料的可控制备方法,也为层状及梯度结构材料的设计和变形研究提供了新的视角。

关键词: 非晶/晶体层状材料, 电沉积, 变形及断裂机制, 层厚效应

C06-63

SiCf/Ni-Cr-Al 复合材料的制备

张浩强, 牛西茜, 裴志亮, 石南林, 孙超, 宫骏

中国科学院金属研究所

采用对靶设计的磁控溅射法在 SiC 纤维表面先后沉积了 (Al+Al₂O₃) 扩散阻挡层和 Ni-Cr-Al 合金先驱层,制备得到 SiC_f/Ni-Cr-Al 先驱丝;采用真空热压法制备了 SiC_f/Ni-Cr-Al 复合材料。研究了涂层的形貌、成分和相组成,以及涂层对 SiC 纤维抗拉强度的影响。对比了不同厚度 (Al+Al₂O₃) 扩散阻挡层对复合材料界面反应的阻挡作用。结果表明: Al₂O₃ 涂层均匀致密,呈非晶态, Ni-Cr-Al 先驱层成分分布均匀,与靶材成分相当;涂层与 SiC 纤维结合良好,且对 SiC 纤维抗拉强度影响较小; (Al+Al₂O₃) 涂层改善了复合材料界面的相容性, 2 μm 左右厚的 Al₂O₃ 涂层在复合材料成型温度下,可以抑制过度的界面反应,实现复合材料良好的界面结合。

关键词: SiC 纤维, 磁控溅射, 复合材料, Al₂O₃ 涂层

C06-64

自由落体条件下二元 Ni-Nb 共晶合金的凝固机制研究

朱先念, 周凯, 吕鹏, 魏炳波

西北工业大学

自由落体技术是实现液态金属深过冷和快速凝固的有效方法之一。本文采用落管无容器技术实现二元 Ni-Nb 共晶合金系(Ni-37%Nb、Ni-41.5%Nb、Ni-44%Nb)在微重力条件下的深过冷与快速凝固,研究过冷度与冷却速率在合金凝固过程中的影响机制。结果表明:随着液滴直径的减小,合金熔体的过冷度和冷却速率逐渐增大,实验获得的最大过冷度分别达到 348 K(0.23 T_L)、342 K(0.24 T_L)、352 K(0.24 T_L)。三种合金凝固组织由枝晶状初生相(Ni₃Nb 或 Ni₆Nb₇)和共晶组成,共晶组织层片间距随着液滴直径的减小而减小。当过冷度与冷却速率增大时, Ni-37%Nb 亚共晶合金中的 Ni₃Nb 相枝晶尺寸发生明显细化,且体积分数随之增加。当过冷度超过 180 K 时, Ni-41.5%Nb 共晶合金中出现 Ni₆Nb₇ 初生相并取代层片共晶率先形核生长。Ni-44%Nb 过共晶合金相组织形貌发生小过冷下的“等轴枝晶+层片共晶”向大过冷下的“细小等轴晶+不规则共晶”转变。计算形核率与生长速度随过冷度的变化趋势,阐明 Ni₃Nb 和 Ni₆Nb₇ 初生相枝晶与其共晶的竞争生长机制。此外,揭示了 Ni-Nb 共晶合金系凝固组织的显微硬度随着液滴直径的变化规律。

关键词: 自由落体, 深过冷, 快速凝固, 共晶凝固

C06-65

新型高导电材料研究

左婷婷, 高召顺, 肖立业

中国科学院电工研究所

能源和电力工业是国家经济发展战略中的重点和先行产业。我国电能输送具有跨区域、远距离和大规模的特点。当前,

我国电网的损耗每年高达 4 千亿千瓦时，相当于 4 座三峡电站的发电量！因此，开发新型导线和技术实现大容量、远距离、高效率的电力输配和应用成为十分迫切的任务。

铜由于具有优异的导电、导热性能以及良好的塑性，是当前电力系统中应用最为广泛的导线材料。然而，传统提高铜合金强度的途径均对电导率有所降低。近年来，随着新材料技术突飞猛进，借助于碳纳米材料的发展来解决传统铜导线中的瓶颈问题，成为当今新型导电材料的重要研究方向。碳纳米管（Carbon Nanotube）具有优异的电学性质：电子在碳纳米管轴向的运动为弹道输运，其载流能力比金属导线高几个数量级。因而通过碳纳米管与铜、铝等良导体复合制备高性能导线已经成为目前研究的一个新的热点。碳纳米管的加入使得石墨烯-铜复合材料不仅可以获得高导电导热的性能，还能很好地弥补传统铜及铜合金强度较低的缺点。但是，碳纳米管/铜复合材料的研究仍面临诸多挑战，例如：碳纳米管在铜中的分散、碳纳米管的结构完整性、基体与碳纳米管的界面结合、碳纳米管的取向排列。该类问题一旦得以解决，将给电工与能源领域带来深远影响。本文将对近年来新型高导电材料的研究进展进行详细的论述，并指出未来有可能取得重要突破的研究方向。

关键词：铜基复合材料，碳纳米管，电导率

C06-66

镀钨金刚石热处理工艺研究

张震，郭宏

有色金属研究总院

本文针对磁控溅射法镀钨镀层与碳材料结合力不强的问题，提出了一种对于镀钨金刚石粉的热处理工艺，详细研究对比了在不同升温速率，加热时间，保温温度下的热处理工艺，并使用扫描电镜、能谱、X 射线衍射等检测方法，对金刚石粉镀钨层的微观形貌、成分与组织结构进行了分析从而对热处理工艺进行了优化。实验发现，优化后的热处理工艺显著降低了金刚石在高温下的石墨化程度，且将表面钨镀层转化为了与金刚石结合力强且热导率较高的碳化钨，避免了有害相碳化二钨的形成。最终通过制备金刚石铜复合材料得出结论，真空度为 1×10^{-3} 时，在 1150°C 下保温 15min 所对应的热处理工艺最优。

关键词：金刚石，镀钨，热处理工艺，复合材料

C06-67

梯度结构 SiO_2 涂层及其结合特性

高培虎¹，贾涵¹，陈白杨¹，杨忠¹，郭永春¹，秦新锋²，王建东³

1. 西安工业大学
2. 中国人民解放军驻 616 厂代表室
3. 中国人民解放军陆军装甲兵军事代表局驻西安地区军事代表室

本研究采用等离子喷涂的方法制备不同体积分数的 Al/SiO_2 (Al 和 SiO_2 的体积比为 0:100、80:20、60:40、40:60、20:80) 复合涂层，通过对不同体积分数的 Al/SiO_2 复合涂层的组织结构、结合特性的研究，为 Al/SiO_2 梯度结构涂层设计提供依据，并制备梯度结构 Al/SiO_2 复合涂层。研究发现， Al/SiO_2 (0:100、80:20、60:40、40:60、20:80) 复合涂层制备过程中，基体与涂层之间易发生开裂裂纹，在 100% SiO_2 和 Al/SiO_2 (20:80) 涂层中最为明显。涂层结合强度随着 SiO_2 含量的增加，逐渐降低，纯 SiO_2 结合强度为 15 MPa，20% 含量 SiO_2 结合强度为 35 MPa。在等离子喷涂 Al/SiO_2 复合涂层过程中， Al 和 SiO_2 颗粒界面发生反应，生成 Al_2SiO_5 ，有利于 Al 和 SiO_2 颗粒间的结合。涂层采用基体—粘结层— Al/SiO_2 (80:20)— Al/SiO_2 (60:40)— Al/SiO_2 (40:80)— Al/SiO_2 (20:80)—100% SiO_2 的梯度结构设计，制备的梯度结构涂层组织结构过渡良好，涂层与基体间、各梯度层间无明显的分层界面。梯度结构 Al/SiO_2 复合涂层的结合强度达到 30MPa，并且梯度结构 Al/SiO_2 复合涂层的表层经过 XRD 分析为 SiO_2 。

关键词：梯度结构， SiO_2 ，涂层，结合

C06-68

金属硫化物碳复合材料在室温钠离子电池负极材料的应用研究

瞿佰华，李胜洋，邓攀

厦门大学萨本栋微米纳米科学技术研究院

最近几年相关科研工作者研究发现，室温钠离子电池展现出与锂离子电池接近的性能，相对于传统钠硫电池又具有比较高的能量密度，价格远低于锂离子电池，因此开展室温钠离子电池相关工作对绿色电网存储的发展具有重要的意义。近几年，我们课题组研究了一系列金属硫化物碳复合材料在室温钠离子电池负极材料方面的工作，展现出较好的储钠性能。比如，我

们设计了一种层状二硫化锡石墨烯 ($\text{SnS}_2\text{-RGO}$) 复合材料表现出极好的储钠性能, 半电池充放电测试中, 电流密度为 200 mA g^{-1} 时, 首次充电容量为 630 mAh g^{-1} ; 并且在电流密度为 1000 mAh g^{-1} 时, 400 次循环过程中, 比容量能稳定在 500 mAh g^{-1} , 也具有极好的倍率性能, 电流密度为 2000 mA g^{-1} 时, 储钠容量高达 544 mAh g^{-1} 。

C06-69

原位自生 TiC 颗粒增强 TiNb 基复合材料的制备及力学性能研究

林建国, 张德闯, 刘喆

湘潭大学

本文以 Ti-20Nb 和 Ti-26Nb 二元合金为研究对象, 首先采用机械合金化的方法, 以硬脂酸作为碳源, 原位生成了 TiC 颗粒增强的 TiNb 合金粉末, 并采用重熔稀释的方法, 制备出了具有较高强度和超弹性的 TiC 颗粒增强的 Ti-26Nb 基复合材料。研究表明, 随着球磨时间的增加, 金属粉末不断细化, Nb 原子逐渐固溶于钛晶体中, 在经过 10 h 高能球磨后, 可达到完全合金化, 生成 bcc 结构的 $\beta\text{-TiNb}$ 合金, 其晶粒尺寸约为 19.2 nm 。经过经 $450\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火后, 可原位生成纳米尺寸的 TiC 颗粒; 经过不同方法制备的复合材料, 其显微组织主要由 β 相与弥散分布、细小的 TiC 颗粒组成, 其中真空常压烧结的合金, 其晶粒度较大, 致密度较低, 而经过高压 (3 GPa) 烧结制得的 TiC/ $\beta\text{-TiNb}$ 复合材料, 晶粒细小 (小于 $1 \mu\text{m}$), 且组织致密 (致密度为 99%), 因而表现出较为优异的力学性能; 高压烧结制备的 45 vol. \%TiC 颗粒增强的 $\beta\text{-TiNb}$ 复合材料在重熔凝固过程中, 可通过共晶反应的析出条状的 TiC。分布于晶界的 TiC 颗粒可以有效抑制退火过程中晶粒的长大, 其退火后组织细小, TiC 颗粒分布均匀。该复合材料在室温下可表现出超弹性, 而且 TiC 颗粒能显著提高 Ti-26Nb 的马氏体相变诱发应力, 进而改善了 Ti-26Nb 的超弹性性能。

关键词: TiNb, 复合材料, 显微组织, 力学性能

墙展

C06-P01

颗粒增强铝基复合焊丝材料的制备及焊缝的力学性能

胡清华^{1,2}, 唐鑫^{1,2}, 熊斯^{1,2}, 何柔月¹, 黄启波¹, 孔敏¹

1. 桂林理工大学

2. 广西有色金属及有色材料加工国家重点实验室培育基地

颗粒增强金属基复合材料因其具有潜在的物理性能和优异的力学性能, 在近几十年发展十分的迅速, 广泛的被应用在航空、航天、交通和舰船等重要领域。本文以铝镁合金 (Al-5Mg) 作为基体, 添加硬质陶瓷颗粒 (WC 粒径为 $1 \mu\text{m}$ 、TiCN 粒径为 $2\text{-}3 \mu\text{m}$) 作为增强粒子, 采用半固态辅助超声铸造法金属压铸模制备直径为 10 mm 增强颗粒含量为 3 wt\% 的铝基复合材料, 再经多道次轧制从而得到大约直径为 3 mm 的铝基复合材料焊丝。分别对铸件和焊丝进行 OM、XRD 和 SEM 进行表征, 其结果表明: 增强颗粒沿着基体晶界分散, 在颗粒附近存在部分颗粒分别反应生成 Al₅W、Al₃Ti 两种中间相, 从而增强了颗粒与基体的结合。

通过将制备得到的复合材料进行 TIG 焊接, 焊接试样母材为 7075-T651 铝合金板材, 其尺寸为 $150\times 75\times 4 \text{ mm}^3$, 对接焊试样采用开 60° 的 V 型坡口, 将得到的焊接件根据相关标准制备相应的焊接拉伸和金相试样, 其中 WC/Al-5Mg 焊丝焊接 7075 的焊缝抗拉强度焊接态为 301.58 MPa , 时效态为 338.42 MPa ; TiCN/Al-5Mg 焊丝焊接 7075 的焊缝抗拉强度焊接态为 305.40 MPa , 时效态为 329.31 MPa ; Al-5Mg 焊丝焊接 7075 的焊缝强度焊接态为 292.08 MPa , 时效态为 302.62 MPa 。其结果表明: 颗粒增强铝基复合焊丝作为焊接填充材料的焊件其抗拉强度高于 Al-5Mg 焊接材料, 伸长率基本保持不变。通过显微分析, 在焊缝中存在较多增强颗粒较为均匀的分布在焊缝中, 通过颗粒的载荷传递和对裂纹扩展的阻碍作用, 从而使得焊缝的抗拉强度得到提升。但是在经过 78 天的自然时效后, 焊缝强度明显高于焊接态, 添加增强颗粒的焊件在经过自然长时间的时效后较焊接态下其抗拉强度提升大约 10% , 但是伸长率下降了 10% 。通过显微分析可知, 这主要是因为七系铝合金中的 T 相和 S 相在经过一段时间的时效后发生的脱溶, 因增强颗粒作为异质点的存在使得析出相成弥散分布并阻碍其长大。

通过试验结果可知, 增强颗粒与基体材料结合稳定, 分散均匀, 且加工性能良好; 颗粒增强铝基复合材料焊丝与纯焊丝相比, 可以在一定程度上增加焊缝抗拉强度, 且颗粒增强焊缝强度可通过自然时效在很大程度上提升; 颗粒增强铝基复合焊丝可作特种材料的填充金属, 从而避免焊接材料与基体材料的不匹配。

关键词: 铝基复合材料, 增强颗粒, WC, TiCN, 填充金属, 焊接

C06-P02

不同晶态硼对 B_p/Al 复合材料的组织和力学性能的影响研究

王丽雪, 乔菁, 武高辉

哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

与传统的中子吸收材料 B₄C 相比, 单质硼由于含有更多的 B 元素而具有更有效的中子吸收性能, 因此将单质硼与铝基体复合制备而成的铝基复合材料在核领域将具有广阔的应用前景。本文以晶态和非晶态单质硼为中子吸收体, 以 AlSi10 合金为基体, 采用压力浸渗的方法制备了不同体积含量 (20 vol%、30 vol% 和 40 vol%) 的 B_p/Al 复合材料, 对复合材料的显微组织和力学性能进行分析和测试, 并对不同晶态单质硼与铝基体的界面反应和界面产物进行研究。结果表明: B_p/Al 复合材料中单质硼均能均匀分散于基体中, 并与基体结合良好, 但当体积分数较高时非晶态硼表现出较大的聚集倾向, 内部出现少量的微孔洞; 复合材料的弯曲强度随着体积分数的增加而升高, 当体积分数达到 40 % 时, 由于微孔洞的存在而使复合材料的弯曲强度有所降低; 非晶态单质硼更易于与铝基体反应, 其反应产物主要有 AlB₂ 和 AlB₁₂, 而晶态硼与铝基体的界面处只有 AlB₁₂ 生成。

关键词: 单质硼, 铝基复合材料, 显微组织, 弯曲强度, 界面反应

C06-P03

Pb-30Mg-9Al-1B 合金热压缩过程中的动态再结晶和热加工图

包伟宗, 段永华

昆明理工大学材料学院

Pb-Mg-Al-B 系列合金具有优异的力学性能及屏蔽性能, 20 毫米厚度的 Pb-Mg-Al-B 系列合金对能量为 250 keV、118 keV 和 65keV 的 X 射线屏蔽率分别为 90.29 %, 99.22 % 和 97.9 %, 对 γ 射线屏蔽率为 49.75 % (¹³⁷Cs) 和 34.21 % (⁶⁰Co), 对中子射线的屏蔽率为 92.7 %。Pb-Mg-Al-B 系列合金中存在两种硬脆金属间化合物 Mg₂Pb 和 Mg₁₇Al₁₂, 导致其室温下的可加工性差, 限制了 Pb-Mg-Al-B 合金的应用。为了描述 Pb-Mg-Al-B 合金塑性变形行为, 本文利用 Gleeble-3500D 热模拟实验机对 Pb-30Mg-9Al-1B 合金在温度为 513 K 至 693 K 和应变速率为 0.01 s⁻¹ 至 10 s⁻¹ 的条件下进行热压缩试验, 研究 Pb-30Mg-9Al-1B 合金的动态再结晶 (DRX) 行为。实验结果表明, 应力-应变曲线具有明显的 DRX 特征, 即在低应变下达到峰值流变应力, 然后在高应变下达到稳态。根据双曲正弦模型, 建立了合金的峰值应力本构模型, 并验证了其准确性。获得了 Pb-30Mg-9Al-1B 合金的热加工图, 结合试样的显微组织观察, 确定了 Pb-30Mg-9Al-1B 合金最佳工艺参数范围为变形温度 603 K-693 K 和应变速率 0.01 s⁻¹-0.1 s⁻¹。

关键词: Pb-30Mg-9Al-1B 合金, 热压缩试验, 动态再结晶, 热加工图

C06-P04

Al-15TiB₂ 及 Al-5Ti-1B 细化剂显微组织及细化效果评定

何梦珂, 柴丽华, 王洪达, 陈子勇, 崔亚鹏

北京工业大学

采用熔体自蔓延高温合成法, 制备 Al-15TiB₂ 和 Al-5Ti-1B 中间合金细化剂, 对两种细化剂的微观组织及细化效果进行观察评定, 得到 Al-15TiB₂ 中间合金由平均颗粒尺寸为 1.86 μ m 的 TiB₂ 颗粒和 α -Al 组成, Al-5Ti-1B 中间合金中由平均尺寸为 18.75 μ m 的 TiAl₃ 相和平均尺寸为 1.33 μ m 的 TiB₂ 颗粒以及 α -Al 组成。将两种中间合金挤压成杆材制成细化剂并将两种细化剂对普铝进行细化评定, Al-15TiB₂ 中间合金细化剂和 Al-5Ti-1B 中间合金细化剂分别在添加 0.1 % 和 0.15 % 后可将普铝晶粒细化到 1 mm 左右。这主要是由于大量的 TiB₂ 颗粒不仅可以作为 α -Al 的异质形核核心, 而且大量的 TiB₂ 颗粒会对元素扩散有一定的阻碍作用, 促进了细化进程, 最终导致在相同评定条件下, 添加较少量的 Al-15TiB₂ 中间合金细化剂即可达到明显的细化效果。

关键词: 铝合金, 细化剂, 微观组织, 细化效果

C06-P05

SiC_f/TB8 复合材料制备技术研究

刘文祎, 侯红亮, 曲海涛, 赵冰, 王耀奇

中国航空制造技术研究院

本文采用箔-纤维-箔法制备出不同纤维间距的 SiC_f/TB8 复合材料 (0.15 mm, 0.2 mm, 0.25 mm)。利用光学电子显微镜

(OM) 观察了 SiC_f/TB8 复合材料纤维排布及 TB8 基体塑性变形与扩散连接情况, 利用扫描电子显微镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 观察了 SiC 纤维与 TB8 基体的界面结合情况。文中探究了高纤维密度的纤维布编织技术及纤维布与 TB8 箔材的复合工艺。观察了 SiC_f/TB8 复合材料复合过程中 TB8 箔材的塑性变形扩散连接过程, 并对不同纤维间距的 SiC_f/TB8 复合材料复合过程中的 TB8 箔材塑性变形过程进行了有限元模拟, 探究纤维间距对 SiC_f/TB8 复合材料复合过程中的 TB8 箔材塑性变形过程的影响规律。实验结果表明: 对于直径 0.1 mm 的 SiC 纤维的纤维布, 纤维间距不宜小于 0.15 mm, 纤维间距的进一步减小虽然可以增加复合材料的纤维体积分数从而提高力学性能, 但纤维间距较小的地方相邻纤维的接触不可避免; 3 °C/min 升至 400 °C 保温 2 小时, 同时保持 5 MPa 压力的除胶工艺可以使复合材料无粘合剂残留并保持纤维不移动; 复合材料复合过程中, TB8 箔材的塑性变形扩散连接过程受箔材材料性质, 纤维和基体几何参数及热压工艺参数的共同影响。更小的纤维间距需要更高的复合压力。通过本文的研究, 获得了箔-纤维-箔法制备 SiC_f/TB8 复合材料的适宜纤维间距及对应的复合工艺参数, 并获得纤维间距对 SiC_f/TB8 复合材料复合过程中的 TB8 箔材塑性变形过程的影响规律。

关键词: 钛基复合材料, SiC 长纤维, 箔纤维箔法, 有限元模拟, 塑性变形扩散连接

C06-P06

内生 TiB₂ 颗粒含量对铸造铝硅合金组织和性能的影响

王洪达, 柴丽华, 何梦珂, 陈子勇, 崔亚鹏

北京工业大学

本文以 H₃BO₃ 和 TiO₂ 作为原材料, 采用原位生成的方法制备出了不同质量分数的 TiB₂/Al-Si 复合材料, 并研究了 TiB₂ 颗粒含量对合金微观组织和性能的影响。结果表明, 基体合金微观组织主要由粗大的初生 α -Al 树枝晶和长条状的共晶 Si 相组成, TiB₂ 颗粒的加入, 粗大的初生 α -Al 得到了明显细化, 针状共晶 Si 边缘圆整化。TiB₂ 颗粒含量较低时, 颗粒分布弥散, 大量位于晶界内, 颗粒含量较高时, 颗粒产生团聚, 并聚集在晶界处。随着颗粒含量的增加, 材料的力学性能得到明显增强, 当 TiB₂ 颗粒含量为 5 wt.%, TiB₂/Al-Si 复合材料抗拉强度和屈服强度分别达到 200 MPa 和 160 MPa, 较基体分别提高 22.8 % 和 34 %。

关键词: TiB₂ 颗粒, 铸造铝硅合金, 微观组织, 力学性能

C06-P07

碳纳米管增强 Mg-9Al 基复合材料的微观组织及力学性能研究

侯江涛, 杜文博, 杜宪, 王朝辉, 李淑波, 刘轲

北京工业大学

本文采用 Gemini 型磺酸盐作为分散剂分散多壁碳纳米管(Multi-walled carbon nanotubes, MWCNTs), 并通过粉末冶金法制备了不同 MWCNTs 含量的 Mg-9Al 基复合材料, 研究了 MWCNTs 的分散性、结构完整性, 以及 MWCNTs 对复合材料显微组织和力学性能的影响。MWCNTs 的拉曼光谱和透射电子显微表征结果表明, 本研究采用的分散剂可在保证 MWCNTs 结构完整性的同时, 对其进行有效地分散。当 MWCNTs 含量为 0.2 wt. % 时, 复合材料的抗拉强度和延伸率分别达到 342.4 MPa 和 15.9 %, 相比无 MWCNTs 添加的 Mg-9Al 分别提高了 12.7 % 和 148.4 %。复合材料微观组织表明, 性能的提升尤其是延伸率的提升, 主要归因于 MWCNTs 与基体间良好的界面结合以及 MWCNTs 对材料中 Mg₁₇Al₁₂ 长大的抑制作用。

关键词: 多壁碳纳米管, 分散, 镁基复合材料, 界面结合, 力学性能

C06-P08

一种高比容量四氧化三钴-氮掺杂碳纳米管复合材料的制备及其在超级电容器中的应用

米睿, 付志兵, 王朝阳

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

电极材料是决定超级电容器性能的一个主要方面, 研究与开发高性能的电极材料是人们的研究重点之一。碳电极材料比容量较小; 钌等贵金属氧化物电极材料比容量虽然高, 但昂贵的价格限制了其实际应用。因此价格低廉、环境友好、同样具有较高容量的过渡金属氧化物成为目前超级电容器的研究热点之一。本研究以硝酸钴为原料, 以氮掺杂碳纳米管为骨架, 电化学沉积合成了前驱体, 200 °C 热处理后得到了四氧化三钴-氮掺杂碳纳米管复合材料。循环伏安、恒电流放电等电化学测试均表明, 所得复合材料在 6 mol/L 氢氧化钾溶液中和 0~0.5 V (vs. SCE) 电位范围内, 具有良好的循环稳定性, 在 40 A/g 的大电流密度下, 单电极比电容达到 2256 F/g。为开发高性能的超级电容器电极材料提供了参考。

关键词: 四氧化三钴, 碳纳米管, 超级电容器

C06-P09

钨颗粒增强钛基复合材料的制备及力学性能研究

任宇

华北电力大学

本研究以纯 Ti / W 复合粉体为原料, 通过热压烧结法制备了钨颗粒(质量百分数为 10 %)增强的钛基复合材料(Ti-10W), 并利用材料试验机和霍普金森压杆装置在 10^{-3} ~ 10^3 s^{-1} 应变率范围内测试了该复合材料的力学性能。研究表明, Ti-10W 内部组织致密, 无微孔洞微裂纹等缺陷, Ti/W 界面结合良好; 钨颗粒增强相均匀分布在具有层片组织特征的纯钛基体中。该复合材料的准静态(应变率 10^{-3} s^{-1})压缩屈服强度为 944 MPa, 较轧制态工业纯钛提高 88 %; 压缩强度极限和断裂应变分别为 1375 MPa 和 0.44, 达到或优于锻造态 Ti-6Al-4V 合金的力学性能。在高应变率(1000 ~ 4000 s^{-1})加载条件下, Ti-10W 的压缩应变应力显著高于准静态加载条件下的应力水平, 且随应变率的增加而提高, 但断裂应变有所下降, 表现出应变率硬化效应。当应变率为 3800 /s 时, 复合材料的最大应力达到 1825 MPa, 较 Ti-6Al-4V 合金显著提高。该复合材料力学性能优异, 在航空航天、国防等领域具有广阔的应用前景。

关键词: 钛基复合材料, 热压烧结, 力学性能, 应变率硬化

C06-P10

B 添加及热处理工艺对近 α 高温钛合金微观组织及力学性能的影响

马小昭, 柴丽华, 刘莹莹, 崔亚鹏, 任伟敏, 陈子勇, 相志磊, 金头男

北京工业大学

采用水冷铜坩埚真空感应悬浮熔炼 (ISM) 法制备了质量分数为 0.2 % 含硼高温钛合金铸锭, 并在 β 相转变温度之上进行了 β 锻造。研究了少量的硼添加对铸态近 α 高温钛合金基体晶粒的细化作用, 并研究了热处理工艺对锻态含硼钛合金的微观组织和力学性能的影响。结果表明, 硼添加量为 0.2 wt% 时, 铸态合金的晶粒尺寸显著减小, 细化作用明显。固溶温度对锻态基体组织的形貌具有显著的影响, 在两相区进行固溶时得到等轴和片层共存的双态组织, 其中片层为 β 相转变组织。随着固溶温度的升高, 等轴组织逐渐减少, 片层组织逐渐增多, 当固溶温度超过 β 相转变温度时, 基体完全变成片层组成的网篮组织。增强相 TiB 形态较稳定, 随固溶温度的改变形貌并未发生明显的变化。通过对力学性能的分析发现, 未热处理的锻态含硼钛合金的抗拉强度为 712 MPa, 延伸率为 16.91 %。相比锻态基体合金塑性明显降低但抗拉强度提升了 6 %。固溶时效后, 相比锻态含硼钛合金塑性降低, 而抗拉强度明显提高。并且随固溶温度的升高, 复合材料的高温抗拉强度持续升高, 塑性不断降低。复合材料经 980 °C / 1 h / AC + 700 °C / 4 h / AC 处理后综合性能最好, 650 °C 下抗拉强度为 790 MPa, 延伸率为 16 %。相比锻态合金的塑性并未发生明显降低, 而抗拉强度提高了将近 10 %。固溶时效之后的含硼钛合金相比锻态基体合金抗拉强度提升 17 %。分析认为含硼钛合金的强化机制为晶粒细化强化和 TiB 晶须的载荷承载机制共同作用的结果。

关键词: 近 α 含硼高温钛合金, 晶粒细化, 热处理工艺, 微观组织, 力学性能

C06-P11

碳纳米管增强铜基复合材料的界面与基体优化研究

姜伊辉, 王丹, 高澜星, 肖鹏, 梁淑华

西安理工大学

对金属基复合材料进行结构设计可显著改善其综合性能。特别地, 近年来设计出具有“砖砌结构”的仿生金属基复合材料突破了强度与塑性倒置关系而受到广泛关注, 该结构在碳纳米管 (CNTs) 增强铜基复合材料也得到了一定的应用。然而, CNTs 与铜基体间界面结合较弱, 铜基体自身强度较低等因素限制了 CNTs/Cu 复合材料综合性能的进一步提升。本研究采用物理吸附与粉末冶金相结合的方法, 在不破坏 CNTs 结构的条件下获得了分散良好且具有砖砌结构的 CNTs/Cu 复合材料。首先, 通过 Ti 与 CNTs 间的原位反应在 CNTs 表层形成 TiC 纳米颗粒过渡层, 改善了 CNTs 与基体间的界面结合。一方面, 良好的界面结合提高了复合材料载荷传递能力, 其力学性能显著优于未添加 Ti 元素的复合材料。另一方面, 添加 Ti 元素后复合材料致密度有所提升, 且 Ti 元素以增强颗粒的方式存在, 因此复合材料导电率相对较高。其次, 在铜基体中引入原位自生增强体颗粒后, 通过结构与增强颗粒的协同作用, 使得 CNTs/Cu 复合材料强度和塑性同时提高。

C06-P12

溶胶凝胶法制备 Ca-Al 复合金属氧化物气凝胶

王鹏飞, 罗炫

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

本文通过溶胶凝胶法制备 Ca-Al 复合金属氧化物气凝胶, 并通过 SEM、XRD 和 BET 来表征材料结构。利用 Ca-Al 复合金属氧化物气凝胶焙烧产物对水中氯离子进行一定条件的吸附去除。结果表明 Ca-Al 复合金属氧化物气凝胶形成了以 LDHs 为骨架结构的“小晶粒大网络气凝胶结构”, 且结晶效果较好。焙烧后 Ca-Al 类水滑石气凝胶在 pH=6-8, 对氯离子溶液具有较好的吸附能力, 180 min 便可达到吸附平衡。在室温下, 对初始浓度为 500 mg/L 的氯离子溶液最大单位吸附量可达 35.63 mg/g, 比传统水热法合成的 LDHs 有 15 % 的性能提升(30.98 mg/g)。

关键词: Ca-Al 类水滑石, 溶胶凝胶法, 气凝胶, 吸附, 氯离子

C06-P13

热还原氧化石墨烯增强 ZK61 镁基复合材料的组织性能

刘飞翔, 王朝辉, 杜宪, 李淑波, 刘轲, 杜文博

北京工业大学材料科学与工程学院

以氧化石墨烯(GO)为前驱体, 利用粉末冶金法制备了石墨烯增强 ZK61 镁基复合材料, 分析了石墨烯对镁基体微观组织影响, 测试了复合材料的力学性能。研究表明, 经过 500℃ 的热还原, 氧化石墨烯(GO)可还原为石墨烯(RGO), 且保留了其结构完整性。ZK61 镁合金基体中加入石墨烯后, 复合材料的晶粒得到细化, 第二相形貌趋向细小弥散, 复合材料的力学性能得到提高。添加 0.6 wt.% 的石墨烯后, 复合材料的屈服强度、延伸率和显微硬度即可较基体分别提高 8.5 %、7.3 % 和 20.8 %。石墨烯在复合材料中的主要强化机制是热错配强化、载荷传递强化和细晶强化。

关键词: 氧化石墨烯, 镁基复合材料, 组织性能, 强化机制

C06-P14

热处理工艺对铜/铝复合导线弯曲行为的影响

杨振, 彭丽军, 解浩峰, 黄国杰, 冯雪, 尹向前, 米绪军

有研工程技术研究院有限公司

铜/铝复合导线广泛地应用于电线电缆行业, 特别是在航空航天领域, 复合线质量轻的特性使其具有良好的应用前景。针对复合线应用的性能要求, 本文研究了不同热处理条件下铜/铝复合导线的力学、电学和弯曲性能。结果表明: 在 300 °C 退火 1 小时后, 铜/铝复合线获得最优的综合性能, 抗拉强度为 115.7 MPa, 断后伸长率为 13.1 %, 导电率为 69.2 % IACS, 反复弯曲次数达到最大值, 弯曲断口的界面处没有出现裂纹或断层。而随着热处理温度的提高, 过厚的金属间化合物将降低复合线界面的结合强度, 导致弯曲性能的恶化。

关键词: 铜/铝复合导线, 断口, 弯曲, 金属间化合物, 力学性能

C06-P15

石墨烯、C 粉/铝基复合材料的制备及其性能研究

仇法文, 蔡武豪, 侯兆乾, 华明昊, 田学雷, 郑洪亮

山东大学

由于特高压输电线跨度大, 使用环境复杂对其材料的力学性能和导电性有更高的要求。石墨烯具有优异的力学和物理性能, 用其增强铝可获得高强, 高导电的复合材料, 这对于电力传输技术会产生巨大的技术推动。本文选择了石墨烯、不同粒度的碳粉和纯铝粉通过热压烧结和搅拌熔铸相结合的方法制备了碳铝复合材料, 主要包括以下几个方面的内容: 铝碳中间待加物的制备, 中间待加物向熔体中添加的方法, 材料的力学性能、导电性能、微观结构的表征等, 使材料的力学性能和导电性得到较大幅度的提高。

关键词: 金属基复合材料, 石墨烯, 铝, 碳粉

C06-P16

多晶硅提纯用爆炸焊接银钢复合板性能与微观组织研究

赵惠, 朱磊, 樊科社, 李平仓

西安天力金属复合材料有限公司

多晶硅是生产单晶硅的直接原料, 是当代人工智能、自动控制、信息处理、光电转换等半导体器件的电子信息基础材料, 被称

为“微电子大厦的基石”，在未来的 50 年里，还不可能有其他材料能够替代硅材料而成为电子和光伏产业主要原材料。中国多晶硅工业起步于 20 世纪 50 年代，但由于工艺技术落后，环境污染严重，消耗大，成本高等原因，绝大部分企业因亏损而相继停产或转产。作为高科技产业，利用硅矿开发多晶硅，产业耗能大，电力需求高，电价已成为中国大多数硅矿企业亟待突破的瓶颈之一。因此降低能耗成本是大力发展多晶硅产业重要途径之一。目前国内多晶硅提纯设备以奥氏体不锈钢复合材为主，其反射率约为 60%，是能耗高的主要因素，因此如果想降低能耗就必须找到反射率比不锈钢更好的材料。经调查发现，纯银质软塑性良好，反射率高达 90%，因此银钢复合板可作为多晶硅提纯设备用不锈钢复合板的替代品。

本文选用复层材质为 Ag1，基层材质为 316L，采用爆炸焊接方法制备出规格为 2/22×1800×5100 mm 的银钢复合板。复合后，复合板外观质量良好，复层表面仍保留银材的金属光泽。UT 检验结果显示复合板为 100% 结合。从金相检验结果来看，复合板界面呈现爆炸焊接的特征波形界面，无熔化块、分层和孔洞等缺陷。力学性能检验结果表明复合板的剪切强度在 140 MPa 以上，抗拉强度在 580 MPa 以上，弯曲后试样表面和界面无裂纹。上述检验指标均满足用户提出的技术要求，即银钢复合板的质量满足工程需求。银钢复合板的制备技术弥补了国内相关领域的空白，打破国外产品对市场的垄断，产品质量得到用户好评。

关键词：爆炸焊接，银钢复合板，性能，微观组织

仅发表论文

C06-PO-01

生物医用 TiNbZr 合金的制备及性能研究

王欢欢，许莹，蔡艳青

华北理工大学

医用 TiNbZr 合金具有强度高、可加工性好、生物活性优异的特点，在骨移植领域得到广泛的应用。采用元素混合粉末冶金法，分别在 1250 °C ~1400 °C 烧结 2 h，制备 Ti-20Nb-xZr (x=0, 2, 4, 6, 8, 10 wt%) 合金。通过 X 射线衍射、金相显微镜、扫描电镜、力学性能及动电位极化曲线等测试，研究 Zr 添加量及烧结温度对 TiNbZr 合金的物相组成、显微结构、抗压强度及电化学腐蚀性的影响。结果表明：当烧结温度为 1350 °C，Zr 含量为 6 wt% 时，β 相的衍射峰明显增强，α 相的衍射峰明显减弱，在白色的 β 相基体上出现黑色针状组织 α 相，合金相组成为 α+β；强度明显提高为 723 MPa；电化学腐蚀测试发现自腐蚀电压明显增大，耐腐蚀性增强。

关键词：钛合金，烧结，元素混合粉末冶金法，力学性能，电化学腐蚀性

C06-PO-02

稀土改性 B₄C/Cu 复合材料组织性能研究

李岩，宋美慧，张煜，李艳春，张晓臣

黑龙江省科学院高技术研究院

采用粉末冶金法制备 B₄C/Cu 复合材料。采用扫描电子显微镜、透射电子显微镜、硬度计、电导率仪等分析测试手段，研究合金元素和稀土改性工艺对复合材料组织和性能的影响。结果表明，采用粉末冶金法制备的 B₄C/Cu 复合材料组织致密，Y₂O₃ 改性层均匀包覆在 B₄C 颗粒表面；经过改性的 B₄C 颗粒与 Cu 界面结合良好，不发生界面反应。

添加低熔点合金元素 Bi，可以提高 B₄C/Cu 复合材料的硬度和电导率，但对热导率的影响不大。采用稀土盐对 B₄C 进行表面改性，可以有效增加 B₄C 颗粒与 Cu 之间的结合能力，使 B₄C/Cu 复合材料具有优异的物理及力学性能。B₄C 颗粒 2 wt%，金属铋颗粒 2 wt%，铜粉 96 wt% 的 B₄C/Cu 复合材料具有良好的力学及物理性能，其中硬度为 179 HB；致密度达到 99.6%；电导率为 66 % IACS；热导率可以达到 262 W/m·°C，可以满足电接触材料的使用要求。

关键词：B₄C/Cu，稀土元素，组织，性能

C06-PO-03

石墨烯增强铝基复合材料的组织演化与力学性能探究

李敏，高海燕，康茂东，王俊

上海交通大学

本文将石墨烯粉和铝粉混合球磨后经放电等离子烧结的复合材料进行热挤压，最终获得直径为 10 mm 的杆材，未加石

石墨烯的纯铝杆也进行同样的工艺制备。球磨后的石墨烯结构信息通过拉曼光谱表征,除原始石墨烯的 D 峰和 G 峰外,复合材料内的石墨烯出现 D'峰,SPS 烧结和挤压后纵截面的形貌通过扫描电子显微镜观察,石墨烯主要分布在颗粒界面,沿挤压方向的复合材料界面结构采用透射电子显微镜进行表征,界面处为铝/铝-石墨烯的交替结构。石墨烯的添加量为 0.5 wt%,抗拉强度相对于纯铝提升的 20%,延伸率略有下降。

关键词: 石墨烯, 铝基, 挤压, 力学性能, 界面

C06-PO-04

Ti₄₆Zr₂₀V₁₂Cu₅Be₁₇ 内生非晶复合材料在 HCl 溶液中腐蚀行为研究

杨帆

北京北冶功能材料有限公司

本文对 Ti₄₆Zr₂₀V₁₂Cu₅Be₁₇ 非晶复合材料在不同浓度的 HCl 溶液中电化学腐蚀行为进行了研究,并利用扫描电镜(SEM)和电子能谱分析仪(EDS)等设备对腐蚀后的试样组织微观形貌和成分进行了观察、分析。实验结果表明,随着 HCl 溶液浓度的提高,该材料的抗腐蚀性能表现出逐渐下降的趋势。利用 EDS 对在不同浓度 HCl 溶液中进行电化学腐蚀实验后的试样表面钝化膜进行成分分析,发现随着 HCl 浓度的提高,试样表面钝化膜中的 Ti 和 Zr 元素含量逐渐减少,导致材料表面钝化膜保护性下降,从而加快溶液对材料腐蚀速度。利用 SEM 对腐蚀后的试样微观组织形貌进行观察,发现非晶基体被优先溶解而枝晶第二相被保留,且随着 HCl 溶液浓度的增加,非晶基体被破坏的程度逐渐加大,其原因在于非晶基体属于非稳定相,抗腐蚀性能较差,易被优先腐蚀,当 HCl 溶液中 Cl 离子吸附在非晶基体和枝晶第二相交界面处时,将导致腐蚀破坏沿着抗腐蚀性能较差的非晶基体方向进行,进而导致非晶基体和枝晶第二相分离。

C06-PO-05

B 对新型耐 650℃ 高温钛合金微观组织及性能影响

刘莹莹, 柴丽华, 马小昭, 崔亚鹏, 任伟敏, 相志磊, 金头男, 陈子勇

北京工业大学

本文以本课题组自主研发的新型耐 650℃ 高温钛合金为基,通过添加一定质量分数的硼,引入了晶须状 TiB 增强相。采用 OM、SEM、EBSD、TEM 和万能拉伸试验机研究了铸态以及锻造条件下含硼合金的微观组织演变和拉伸性能。结果表明,硼的添加导致基体合金显微组织显著细化,并且 0.1 wt.% 为最佳硼添加量。铸态下微量硼引入的硼化物晶须均匀分布于原始 β 晶界处,3D 锻造过程中晶须破碎充分,显著促进了基体合金中初生 α 相的动态再结晶,导致锻态组织的细化。相比于铸态,3D 锻造后含硼合金的机械性能提升显著。通过对合金拉伸断裂行为的研究发现,外加应力作用下硼化物晶须的承载能力随着硼添加量的增加而增加。3D 锻造后合金综合性能的提高可归因于基体显微组织的转变和晶须承载的共同作用。

C06-PO-06

原位生成 Ta-10W 合金表面 TaC 涂层的微观组织表征及力学性能研究

白海强^{1,2}, 钟黎声¹, 商昭¹, 许云华^{1,2}, 曹保卫², 魏俊哲¹, 丁迎春¹

1. 西安理工大学材料科学与工程学院 西安 710048

2. 榆林学院化学与化工学院 榆林 719000

以灰口铸铁(HT300)和 Ta-10W 合金为原料,通过原位固相扩散反应法在 Ta-10W 合金表面原位生成 TaC 涂层。借助扫描电子显微镜、能谱分析仪、电子背散射衍射技术、X-射线衍射分析仪对涂层的微观组织及物相组成进行表征;通过热力学理论和扩散动力学理论对 TaC 层的形成机理进行分析;利用纳米压痕仪对涂层的硬度和弹性模量进行研究。结果表明:1130℃ 等温退火 10 h 后,通过原位固相扩散反应法在 Ta-10W 合金表面原位制备了厚度约为 15 μm 的 TaC 涂层。结合 XRD 和 EBSD 分析,涂层的物相组成主要为 TaC 相。TaC 的平均晶粒尺寸约为 438 nm,且主要沿{100}方向生长。涂层完全致密(无孔隙)、均匀,且与基体之间呈现良好的冶金结合。热力学计算表明,当铸铁和 Ta-10W 合金以原子尺度接触时,铸铁中的间隙碳原子扩散到 Ta-10W 合金中与 Ta 原子优先反应形成 TaC 层,而金属 W 则主要以单质 W 的形式存在于涂层中。TaC 涂层的内生生长受碳原子的扩散控制。TaC 涂层的平均硬度和弹性模量的值分别为 26.8 GPa 和 514.9 GPa,分别是 Ta-10W 基体硬度和弹性模量(4.4 GPa, 238.3 GPa)的 6 倍和 2 倍。由于微纳米 TaC 晶粒的形成,所以 Ta-10W 合金表面的综合性能得到了显著的改善。

关键词: Ta-10W 合金, TaC 涂层, 原位反应, 微观组织, 力学性能

C06-PO-07

钛/钢异种金属 CMT 搭接接头连接机理和力学性能

常敬欢, 曹睿, 张晓波, 闫英杰, 陈剑虹

兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 兰州 730050

本研究通过引入铜填充金属, 使用冷金属过渡技术进行钛/钢焊接。主要通过扫描电镜、能谱分析、显微硬度实验和拉伸实验研究接头的连接机理和力学性能。研究表明, 母材的搭接顺序影响了接头的连接机理和强度。在焊接速度为 8.53 mm/s, 送丝速度为 6 m/min 下使用 CMT 搭接焊钛/钢, 两种搭接顺序(钛上钢下和钛下钢上)焊后的焊缝成形良好, 焊缝表面未观察到裂纹、孔洞等焊接缺陷。对于钛上钢下搭接接头, 接头主要由钢母材、钛母材、界面 I (钛母材-焊缝)、界面 II (焊缝-钢母材) 和焊缝五部分组成。结合相图和能谱分析, 界面 I 主要由一系列的 Ti-Cu 金属间化合物组成, 界面 II 无明显的界面反应层。由于大量的 Ti-Cu 金属间化合物的存在使得接头强度明显降低, 并且接头首先在焊缝-钛母材界面萌生, 然后扩展至焊缝, 最后断裂, 断裂方式呈解理断裂, 断口主要由 $AlCu_2Ti$ 组成。而对于钛下钢上搭接接头, 接头主要由钢母材、钛母材、界面 I (钢母材-焊缝)、界面 II (焊缝-钛母材) 和焊缝五部分组成。界面 I 主要由 (Cu) 和 Al_3Ti 、Fe-Al-Cu、 $TiFe_2$ 组成, 界面 II 主要由 $CuTi_2$ 和 $\alpha-Ti$ 、(Ti) (HT)、 $CuTi_2$ 、Fe-Ti-Cu 组成。接头的最大强度为 330 MPa, 可达同样焊接参数下钢/钢接头强度(350 MPa)的 94%, 主要由于 $TiFe_2$ 金属间化合物的弥散强化作用, 接头沿钢母材的热影响区呈初窝断裂。

关键词: 熔钎焊, 冷金属过渡, 连接机理, 强度

C06-PO-08

搅拌摩擦加工制备 Mg/HA 复合材料及其组织与性能的研究

张璐, 张大童

华南理工大学

通过搅拌摩擦加工技术成功制备了 Mg/HA 复合材料。使用金相显微镜和扫描电子显微镜对制得的样品进行了组织观察, 结果表明, 经过两道次的搅拌摩擦加工, HA 颗粒均匀地分布在 Mg 基体上, 没有发生严重的团聚现象, 搅拌区晶粒相比于母材细化明显, 组织得到改善。力学性能测试结果表明, 在晶粒细化和 HA 颗粒的共同影响下, Mg/HA 复合材料的硬度相较于母材有较大提升。由于部分团聚的 HA 颗粒在拉伸过程中结合较差, 相当于内部缺陷, 强度提升幅度稍小。电化学测试结果表明, 制得的 Mg/HA 复合材料相较于母材腐蚀性能有所提升, 具有一定的生物医用应用潜力。

C06-PO-09

电弧增材制造 TiB₂ 颗粒增强铝硅基复合材料的微观组织演化和性能初探

邓亚琪, 李险峰, 吴量, 杨青峰, 陈砚池

上海交通大学

目前国内的电弧增材制造技术正在逐步发展, 与成形精度更高的激光 AM 相比, 成本低, 材料利用率高、生产效率高且熔敷速度快。辅助以机加工、热处理等后处理工艺, 未来具有广泛的应用前景。

本文对比了铸造和电弧增材制造的 $TiB_2/Al-7Si-Cu-Mg$ 复合材料, 从材料的微观组织和性能上对比了两种不同工艺。经过 SEM 及 EDS 等微观组织分析技术对比可知, 电弧增材制造的 TiB_2 增强铝硅基复合材料中合金元素的分布更加弥散, 固溶度提升。增强颗粒的尺寸下降, 分布更加均匀。硬度在未经任何处理状态下相比铸态提升至 96.7 HV10。铸态组织的硅相粗大且连续分布在晶界处, 沉积态组织中硅相细小弥散, 尺寸降至 2 μm 附近。同时对 WAAM 成型的铝硅基复合材料进行热处理, 并对比了两组热处理机制: 时效和固溶后时效。材料的硬度在单时效后提升到 127 HV10, 固溶后时效提升至 141 HV10, 并进一步验证 TiB_2 增强铝硅基复合材料经过电弧增材制造有一定的固溶强化效果。

关键词: 电弧增材制造, 铝基复合材料

C06-PO-10

基于正交实验的高强银铜镍合金加工工艺优化设计

户赫龙¹, 李海滨^{1,2}, 于文军¹, 焦永振¹, 董亭义^{1,2}, 吕保国^{1,2}

1.北京翠铂林有色金属技术开发中心有限公司

2.有研亿金新材料有限公司

银铜镍合金以其优良的导电性能和较高的机械强度被广泛应用于制造军事装备信号传输和能量传送部件。轧制和热处理

的工艺参数对银铜镍合金的性能有较大的影响。但目前文献中缺少关于轧制和热处理的工艺参数对其性能和微观结构影响的系统研究。本文通过正交实验设计系统研究了变形量、热处理温度、冷却方式等因素对合金性能和微观结构的影响,结果表明:银铜镍合金的硬度随着变形量的增大和固溶温度的升高而变大,随着时效时间延长而变小,固溶处理冷却方式对其硬度影响不大。银铜镍合金经 720 °C 固溶处理,冷轧变形量为 65 % 时,硬度最大,可达 155 HV, 电导率为 $2.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。通过该工艺制备的合金材料呈现均匀的共晶组织,沿变形方向的纤维状分布。

关键词: 高强度, 银铜镍, 正交实验, 加工工艺

C06-PO-11

SiCP/Al 复合材料的动态再结晶行为及预测模型

郝世明

河南科技大学

本论文主要研究在不同温度 (350 °C、400 °C、450 °C、500 °C) 以及压缩速率 (10 s^{-1} 、 1 s^{-1} 、 0.1 s^{-1} 、 0.01 s^{-1}) 下 30 %SiCP/Al 复合材料的动态再结晶行为。研究发现热压缩过程中应力 (σ) 总是随着应变 (ϵ) 的增加先急剧的增加,达到峰值应力 (σ_p) 后缓慢下降,表现出典型的动态再结晶行为。为了准确确定动态再结晶临界应变 (ϵ_c) 和临界应力 (σ_c), 论文分别用了两种不同的方法。一种方法是用加工硬化率 (θ) - 应力 (σ) 曲线来确定动态再结晶的临界应变 (ϵ_c) 和应力 (σ_c); 另外一种方法是用 $\ln\theta$ - ϵ 曲线来确定。两种方法在数学上虽然是等价的, 但是通过实验发现, 利用 $\ln\theta$ - ϵ 曲线确定 30 %SiCP(40 μm)/Al 复合材料动态再结晶临界应变 (ϵ_c) 和应力 (σ_c) 是更好的方法。最后采用加工硬化率结合 $\ln\theta$ - ϵ 曲线的拐点和 $(-\frac{1}{\theta}(\ln q)/\frac{1}{\theta}e)-e$ 曲线最小值的判据, 确定了 30 %SiCP/Al 复合材料的动态再结晶的临界应变 (ϵ_c) 和峰值应变 (ϵ_p)、临界应力 (σ_c) 和峰值应力 (σ_p) 的比值分别是: $\epsilon_c/\epsilon_p=0.457$, $\sigma_c/\sigma_p=0.93$ 。

C06-PO-12

叠层法制备石墨烯/Cu 复合材料及其基本性能研究

王旭东^{1,2,3}, 张海平^{1,2,3}, 李炯利^{1,2,3}, 李娜^{1,3}

1.中国航发北京航空材料研究院

2.北京石墨烯技术研究院有限公司

3.北京市石墨烯及应用工程技术研究中心

石墨烯具有极其优异的物理性能,是理想的金属基复合材料增强体,粉末冶金是常规的石墨烯改性金属基复合材料的制备方法。但是由于高品质的石墨烯难以在金属基体中均匀分散,粉末冶金的方法通常采用部分氧化的石墨烯作为原材料,难以发挥出石墨烯本征的高强度、高导热等性能。

本文采用 CVD 的方法在铜箔表面生长出石墨烯薄膜,将其裁剪至 $\phi 30 \text{ mm}$ 后,按照相同取向叠层,采用放电等离子烧结的方式获得了石墨烯/Cu 复合材料,未生长石墨烯的铜箔也采用相同方法制备了对比样品。采用拉曼光谱分析了生长的石墨烯的结构完整性,采用原子力显微镜 (AFM)、扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM) 等方法分析了生长有石墨烯的铜箔和烧结后复合材料的微观结构,通过对制备石墨烯/Cu 复合材料的显微硬度,电导率、热导率等分析,评价了材料的基本物理性能。拉曼光谱分析结果表明,采用 CVD 的方法制备出了高品质的石墨烯薄膜。密度分析结果表明,经 SPS 烧结后,石墨烯/Cu 复合材料的致密度达到 99 % 以上,无明显孔隙。SEM 和 TEM 分析结果表明,石墨烯能阻碍铜原子扩散,在复合材料微观组织中存在明显分层,材料呈微叠层状。物理性能分析结果表明,相对于空白样品,复合材料的电导率和热导率均相当,而材料的显微硬度提高 9 %。说明石墨烯的加入能在不降低基体材料电学、热学性能的前提下,提高材料的力学性能。

关键词: 石墨烯, 铜基复合材料, 叠层法, SPS 烧结

C06-PO-13

石墨鳞片表面镀 Cr 对石墨鳞片/铜复合材料组织和性能的影响

张忍, 何新波, 曲选辉

北京科技大学

石墨鳞片/铜复合材料由于其高的平面热导率、良好的机械加工性能,是一种具有广泛应用前景的散热材料。但由于石墨和铜之间的润湿性较差,从而导致所制备的复合材料力学性能较低。针对这一问题,本文通过在石墨鳞片表面镀 Cr, 有效地改善了石墨鳞片和铜之间的润湿性能,提高了复合材料的抗弯强度。研究结果表明,采用盐浴镀的方法,以 NaCl-KCl

为熔盐介质,以 Cr 粉和天然石墨鳞片为原料,在高纯氩气保护下,950 °C 保温镀覆 60 min,可得到镀 Cr 石墨鳞片,其镀层主要由 Cr₇C₃ 组成。通过调节 Cr 粉和石墨鳞片的比例,可得到不同厚度的镀层。选取其中镀层厚度为 0.8 μm 左右的镀 Cr 石墨鳞片和铜粉复合,采用真空热压烧结技术,制备出了石墨鳞片体积分数 60 % 的镀 Cr 石墨鳞片/铜复合材料,其抗弯强度比未镀 Cr 的复合材料提高了 58 %。

关键词:石墨鳞片,复合材料,盐浴镀,抗弯强度

C06-PO-14

WC 颗粒增强钢基复合材料的二体和三体摩擦磨损性能

张宁¹,张春红²,童亚星¹,倪琪¹

1.徐州工程学院

2.徐州生物工程职业技术学院

颗粒增强钢基复合材料常服役于强烈磨损工况条件下,这就要求其具有优异的耐磨性能。通过调整 WC 颗粒尺寸(50 μm 和 100 μm)和质量含量(25 %、35 %和 45 %),采用新型的复合电冶熔铸工艺制备四种以 WC 颗粒为增强相、5CrNiMo 钢为基体的颗粒增强钢基复合材料,以及 5CrNiMo 钢。铸造后的材料经退火、锻造处理。选择 950 °C 淬火+220 °C /180 °C 回火、1000 °C 淬火+220 °C /180 °C 回火、1050 °C 淬火+220 °C /300 °C 回火,共计六种工艺对复合材料进行热处理。采用磨损试验机对复合材料进行二体和三体摩擦磨损试验,研究各试样的摩擦系数和磨损量,并利用扫描电子显微镜对磨损形貌进行分析,根据磨损面损伤状况研究磨损机理。

结果表明:复合材料中,随着 WC 含量或颗粒度在一定范围内增大,摩擦系数呈提高的态势。二体磨损时,在 1000 °C 淬火+180 °C 回火时,45 %粗颗粒 WC 复合材料的耐磨性最好。磨损机制为磨粒磨损和氧化磨损。三体磨粒磨损时,摩擦系数在磨合期内呈现出更大的跳跃性,且磨合期比二体磨损更长。在 950 °C 淬火+180 °C 回火时,45 %粗 WC 复合材料的耐磨性最好。在二体磨损的环境下服役使用将发挥该复合材料的最佳耐磨性能。三体磨损的主要磨损机制为多次塑变或微观压入导致的变形层的疲劳断裂机制。

关键词:WC 颗粒增强钢基复合材料,热处理,二体摩擦磨损,三体摩擦磨损

C06-PO-15

石墨烯增强 A356.2 铝基复合材料的微观组织和腐蚀性能的研究

王康,冷金凤,王冉,张少辰

济南大学材料科学与工程学院,南辛庄西路336号,济南 250022

A356.2 铝合金由于其优越的铸造能力,高的比强度和耐腐蚀性而广泛应用于航空航天和汽车行业,石墨烯以其优异的力学性能和独特的二维结构被用于铝基复合材料。本文将石墨烯和铝粉混合均匀后采用常压铸造法制备石墨烯增强 A356.2 铝基复合材料,并系统的研究了复合材料的时效析出过程和腐蚀性能。结果表明,石墨烯的添加使得硅相由板条状转变为球状,并且由于石墨烯与铝基体的热膨胀系数的差异,增加了原子通道使得 A356.2 铝基复合材料到达峰时效的时间缩短,加快了时效硬化的速率。时效硬化曲线表明,随着时效时间的延长由于强化相的析出,A356.2 铝基复合材料的硬度先增加后降低,最佳的时效工艺是 180 °C/3 h,硬度达到 124.6 HB,与未添加石墨烯的复合材料相比,提高了 14.6 %。石墨烯的加入使得 A356.2 铝基复合材料在 3.5 % NaCl 溶液中的耐点蚀性下降,石墨烯与铝基体存在着电位差,腐蚀会首先发生在石墨烯与铝的界面结合处,主要表现腐蚀电位的负移以及腐蚀电流密度的增加。浸泡腐蚀表明,随着浸泡时间的增加,复合材料的重量随之下降,在腐蚀表面出现腐蚀坑和氧化铝腐蚀产物。

关键词:A356.2,石墨烯,腐蚀性能,时效硬化

C06-PO-16

石墨烯增强铜铬复合材料的制备与性能研究

夏昌鹏,王康,冷金凤,张少辰

济南大学材料科学与工程学院,南辛庄西路336号,济南 250022

电接触材料承担着电流接通和分断的作用,同时它也是电气工业的核心要素,而且电触头材料性能的优劣直接影响整台装备的通断容量、寿命长短等重要性能。铜铬合金是中高压电气领域首选的触头材料,本文采用粉末冶金法制备石墨烯增强铜铬复合材料,实验结果表明石墨烯以弥散强化的方式分布于铜晶粒晶界处。随着石墨烯添加量(0.1 wt.%~0.7 wt.%)的增

多，铜基体的晶粒得到细化，弥散相铬的分布更加均匀，枝晶密度减小。后经过 960 °C 固溶和不同时效处理后，材料的致密度提高，杂质和缺陷的质量减少，材料的硬度值有了 14 %~23 % 的提高幅度，450 °C 保温 2 h 时效后的石墨烯增强铜铬复合材料的布氏硬度最高为 117.8；热处理后的电导率较铸态的石墨烯增强铜铬复合材料有 9 %-35 % 的提高幅度，经过 450 °C 保温 2 小时后的电导率提高最显著，达到了 79.3 % IACS。耐电弧侵蚀性能方面，石墨烯的添加对于触头材料的电侵蚀形貌、韧窝数量和铜的蒸发都有明显的改善。

关键词：铜铬/石墨烯复合材料，电导率，抗电弧侵蚀性能，粉末冶金