

MgO/Cu 基复合材料耐电弧侵蚀行为研究

周志红¹ 国秀花^{1,2} 李韶林^{1,2} 冯江¹ 杨豫博¹

(1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.河南省有色金属材料科学与工程重点实验室)

摘要 采用放电等离子烧结法 (SPS) 制备了纳米级 MgO 陶瓷颗粒增强铜基复合材料 (MgO/Cu 复合材料), 重点研究了 MgO 颗粒含量对其耐电弧侵蚀性能的影响, 阐述了 MgO 颗粒在电接触过程中的耐电弧侵蚀机理。结果表明, 随着 MgO 颗粒体积分数增加, MgO/Cu 复合材料的耐电弧侵蚀性能逐渐提高, 当 MgO 颗粒体积分数为 5% 时, MgO/Cu 复合材料的总体质量损耗和燃弧能量均达到最低值。研究分析表明, 高熔点的 MgO 颗粒有助于改善 MgO/Cu 复合材料的力学性能和耐电弧侵蚀性能。电弧侵蚀过程中, 高熔点 MgO 颗粒的存在提高了液相铜基体的熔池粘度, 减少了电弧喷溅, 从而提高了 MgO/Cu 复合材料的耐电弧侵蚀性能。

关键词 MgO/Cu 复合材料; 电弧侵蚀; 燃弧能量; 质量损耗

中图分类号 TB331; TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI: 10.15980/j.tzzz.2021.02.017

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



Arc Erosion Behavior of MgO/Cu Composite

Zhou Zhihong, Guo Xiuhua, Li Shaolin, Feng Jiang, Yang Yubo

(1.School of Material Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;

2.Key Laboratory of Materials Science & Processing Technology for Non-ferrous Metals of Henan)

Abstract: MgO/Cu composites with different MgO contents were prepared by spark plasma sintering (SPS) with nano MgO particles as reinforcing phase. The effects of MgO particles content on arc erosion resistance of MgO/Cu composites were emphatically investigated, of which the arc erosion resistance mechanism was analyzed. Experimental results reveal that the arc erosion resistance of MgO/Cu composites is enhanced with the increase of volume fraction of MgO particles. When volume fraction of MgO particles is 5%, the total mass loss and arc energy of MgO/Cu composites reach the minimum value. The analysis indicates that MgO particles with high melting point is contributed to enhancing the mechanical properties and arc erosion resistance of MgO/Cu composites. During the process of arc erosion, the existence of MgO particles with high melting point can improve the molten pool viscosity of liquid copper matrix and reduce arc splashing, thus improving the arc erosion resistance of MgO/Cu composites.

Key Words: MgO/Cu Composite, Arc Erosion, Arc Energy, Mass Loss

颗粒增强铜基复合材料因兼具优良的传导性能与力学性能, 是新型汽车装备、电子信息、轨道交通、高压电器等领域研究的热点材料^[1~8]。常用的陶瓷颗粒有 TiB₂、Al₂O₃、SiC、MgO、SiO₂ 等, 其中 MgO 颗粒晶格类型与铜基体均为面心立方结构, 热膨胀系数与铜基体差值较小, 易与铜基体形成良好的界面结合, 熔点为 3 125 K, 是一种在电接触领域具有潜在应用价值的复合材料增强体^[4,9,10]。王庆福等^[10]采用内氧化法制备了表层 MgO/Cu 复合材料, 并研究了内氧化工艺参数对其组织和性能的影响。WANG Y G 等^[11]、MIZUU-

CHI K 等^[12]、JIANG Y 等^[13]研究了内氧化制备的 MgO/Cu 复合材料颗粒/基体界面关系及位错分布情况。GUO X H 等^[9]研究了粉末冶金工艺制备的低 MgO 含量 MgO/Cu 复合材料的热膨胀行为。目前关于 MgO/Cu 复合材料的研究主要集中在制备工艺、物理性能和微观表征分析方面, 而对于 MgO 颗粒在耐电弧侵蚀方面的研究报道较少。本课题采用放电等离子烧结法 (SPS) 制备了纳米级 MgO 陶瓷颗粒增强铜基复合材料 (MgO/Cu 复合材料), 重点研究了 MgO 颗粒含量对其耐电弧侵蚀性能的影响, 阐述了 MgO 颗粒在电

收稿日期: 2020-09-15; 修改稿收到日期: 2020-12-05
基金项目: 中国博士后科学基金资助项目 (2018M632769, 2020T130172); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划资助项目 (2018GGJS045)
第一作者简介: 周志红, 女, 1971 年出生, 工程师, 河南洛阳 (471023), E-mail: nmzhou@haust.edu.cn
通信作者: 国秀花, 女, 1981 年出生, 副教授, 河南洛阳 (471023), E-mail: guoxiuhua@haust.edu.cn
引用格式: 周志红, 国秀花, 李韶林, 等. MgO/Cu 基复合材料耐电弧侵蚀行为研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 210-214.
ZHOU Z H, GUO X H, LI S L, et al. Arc erosion behavior of MgO/Cu composite[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2): 210-214.

接触过程中的耐电弧侵蚀机理, 以期为 MgO/Cu 复合材料的研究和拓展应用提供参考。

1 试验方法

1.1 MgO/Cu 复合材料的制备及物理性能检测

以电解铜粉和 MgO 纳米粉体为原料(铜粉和 TiB₂ 纳米粉体的粒径分别为 75 μm 和 50 nm), 将 MgO 纳米粉体积分数分别按 1.0%、3.0%、5.0% 和 8% 与电解铜粉进行配料, 在变频行星式球磨机中球磨 8 h, 球料比为 10 : 1, 转速为 300 r/min。随后对球磨后的混合粉末在 SPS-30 型放电等离子烧结设备中进行快速烧结, 在 40 MPa 压力下, 升温至 1 073 K 保温 5 min。硬度和电导率测试分别使用 HV-50 型维氏硬度计和 D60K 数字金属电导率测量仪, 金相显微组织观察和分析使用 Axio Vert. A1 型光学显微镜。

1.2 MgO/Cu 复合材料的耐电蚀性能检测

耐电蚀性能检测在 JF04C 电接触触点材料测试系统上进行, 对每组试样在电压为 25 V、电流为 15 A 条件下进行了 5 000 次开合试验, 频率为 60 次/min, 闭合

压力为 0.4~0.6 N, 上触头为动触头, 作为阳极, 下触头为静触头, 作为阴极, 测试不同 MgO 含量的 MgO/Cu 复合材料的燃弧能量以及质量变化, 并在 JMS-5610LV 扫描电镜下观察并分析其电弧侵蚀形貌。

2 试验结果及讨论

2.1 MgO/Cu 复合材料微观组织和基本性能测试

图 1 为 MgO 颗粒体积分数分别为 1.0%、3.0%、5.0% 和 8.0% 的 MgO/Cu 复合材料的金相组织。从图 1a 和图 1b 可以看出, 当 MgO 颗粒体积分数为 1.0% 和 3.0% 时, 其内部晶粒均匀细小, 组织致密, 无明显团聚现象。当 MgO 颗粒体积分数超过 5.0% 时, 组织中 MgO 颗粒团聚较明显(白色为铜基体, 黑色为增强相), 铜基体晶粒呈不规则形状分布, 且晶粒明显增大。此外, 可以看出, 铜基复合材料的晶粒非常细小致密。这是由于 SPS 烧结过程是在脉冲电流的作用下进行, 颗粒之间瞬间产生高温, 之后又瞬间得到冷却, 烧结过程往往仅持续几 min 便使材料致密化, 从而缩短了晶粒长大的时间^[12]。

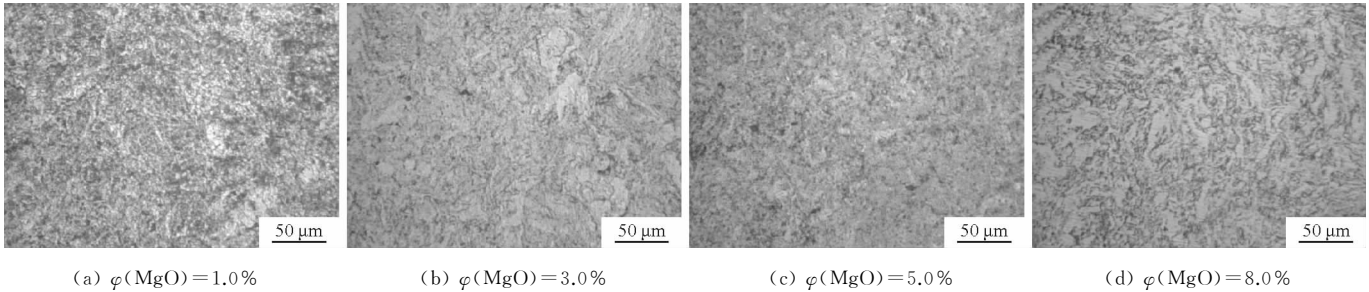


图 1 不同 MgO 体积分数的 MgO/Cu 复合材料的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of MgO/Cu composites with various volume fraction of MgO

图 2 为 MgO/Cu 复合材料的电导率和硬度随 MgO 颗粒体积分数的变化曲线。可以看出, MgO 体积分数为 1.0% 的复合材料的硬度相比纯铜提高了 11.5%, 说明 MgO 颗粒的加入可大幅度提高铜基体的硬度。随着 MgO 颗粒体积分数的增加, MgO/Cu 复合材料的硬度先升高后降低, 而电导率呈逐步下降趋势。当 MgO 颗粒体积分数为 5.0% 时, MgO/Cu 复合材料的电导率和硬度(HV)分别为 45.24 MS/m 和 110, 相对于 MgO 体积分数为 1.0% 的复合材料电导率下降了 11.3%, 而硬度值提高了 15.8%。研究表明, 金属基复合材料的导电性能主要受金属基体和增强相本身的导电性能、增强相体积分数及其与基体界面完整性等因素的影响^[7]。对于 MgO/Cu 复合材料而言, MgO 陶瓷颗粒的引入破坏了铜基体本身晶格的完整性, 随着 MgO 颗粒体积分数的增加, 其电子散射作用愈加强烈, 使得复合材料的电阻率增大, 电导率下降。其次, MgO 颗粒

体积分数的增加同时降低了 MgO/Cu 复合材料的相对密度, 增加了材料孔隙, 降低了复合材料的电导率; 另外, MgO 颗粒体积分数的增加, 使得颗粒/基体界面、孔隙等晶界增多, 同时加大了电子的散射作用。综上, MgO 颗粒的引入明显降低了铜基体的电导率, 且随着 MgO 颗粒体积分数的增加, MgO/Cu 复合材料的电导

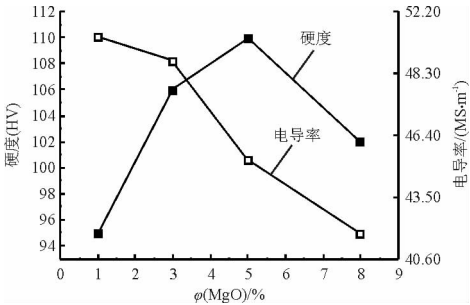


图 2 MgO 体积分数对 MgO/Cu 复合材料电导率和硬度的影响
Fig.2 The effects of volume fraction of MgO on the electric conductivity and hardness of MgO/Cu composites

率逐步降低。

在铜基体中引入少量热稳定和化学稳定性较好的陶瓷颗粒,可在基本保持铜基高导电性能的同时大幅提高铜基体的力学性能^[13,14]。MgO 颗粒熔点高达 3 346 K,且晶格类型与铜基体相同,热膨胀系数与铜基体差别较小(MgO: $12.8 \times 10^{-6}/\text{K}$, Cu: $16.4 \times 10^{-6}/\text{K}$),烧结过程中与铜基体易形成良好的界面结合。同时,纳米级 MgO 颗粒的引入能够阻碍铜基复合材料变形过程中位错及亚晶界移动的阻力,从而提高铜基体的硬度^[15]。当 MgO 颗粒含量较少时, MgO 颗粒之间的间距较大,位错容易绕过 MgO 颗粒,因此 MgO 颗粒的弥散强化效果明显。随着 MgO 颗粒体积分数增加,铜基体晶界上的 MgO 颗粒分布增多,位错纠缠更加明显,位错密度更加聚集, MgO/Cu 复合材料的硬度随之升高。然而当 MgO 颗粒体积分数超过 5% 时,由于 MgO 颗粒的团聚,使得烧结过程中晶界移动的阻碍增强,使得 MgO/Cu 复合材料硬度逐渐下降。

2.2 MgO 含量对 Cu 基复合材料耐电弧侵蚀性能

2.2.1 MgO/Cu 复合材料的电蚀质量损耗

图 3 是电压为 25 V、电流为 15 A 条件下不同 MgO 体积分数下 MgO/Cu 复合材料在 5 000 次开合试验后的质量变化。可以看出,随着 MgO 颗粒体积分数的增加, MgO/Cu 复合材料阳极触头的质量损耗呈先增大后降低的趋势,而阴极触头材料的质量损耗则呈逐渐降低的趋势, MgO/Cu 复合材料触头总质量损耗(阴极触头和阳极触头质量之和)呈现逐渐降低并趋于稳定的趋势。值得注意的是,当 MgO 颗粒体积分数超

过 1% 时, MgO/Cu 复合材料阳极触头材料由负值转变为正值,而阴极触头材料损耗均为负值,说明当 MgO 颗粒体积分数超过 1.0% 时,阴极触头材料向阳极触头材料发生转移而使阳极触头材料发生增重现象。MgO/Cu 复合材料的耐电蚀性能与其力学性能密切相关,当 MgO 颗粒体积分数超过 5% 时, MgO/Cu 复合材料的质量损耗最低,随着 MgO 颗粒体积分数的增加, MgO/Cu 复合材料耐电蚀性能因 MgO 颗粒的团聚而无法继续提高,呈稳定趋势。

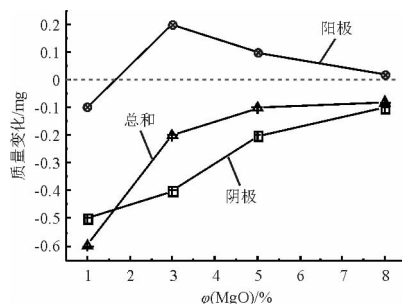


图 3 不同 MgO 颗粒体积分数的 MgO/Cu 复合材料的质量变化
Fig.3 The mass variation of MgO/Cu composites with various volume fraction of MgO particles

2.2.2 MgO/Cu 复合材料的电蚀形貌

图 4 是不同 MgO 体积分数下 MgO/Cu 复合材料阴极触头的电蚀形貌。可以看出,当 MgO 颗粒的体积分数小于 5% 时, MgO/Cu 复合材料的抗电蚀性能随着 MgO 体积分数的增加而提高,复合材料试样表面的电弧侵蚀区域呈现逐步减小的趋势,而当 MgO 颗粒的体积分数高于 5% 时, MgO/Cu 复合材料试样表面的电蚀侵蚀区域呈增大趋势。

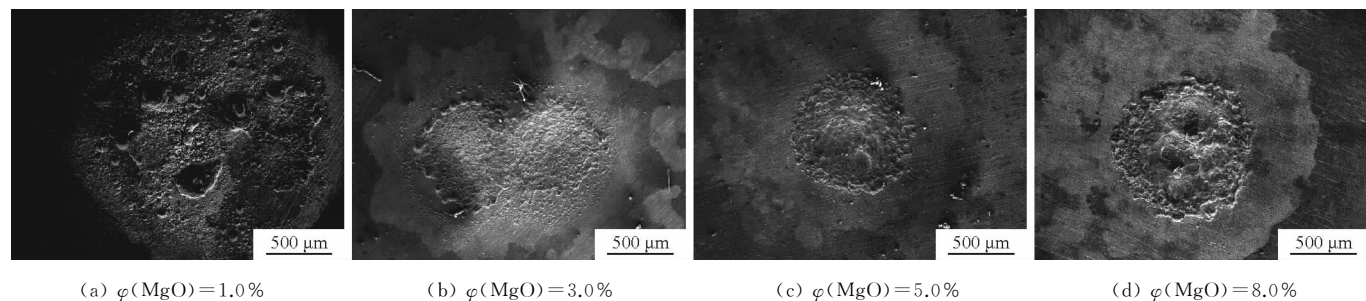


图 4 不同 MgO 体积分数的 MgO/Cu 基复合材料触头侵蚀形貌

Fig.4 The erosion morphology of moving and fixed contact of MgO/Cu composites with various volume fraction of MgO particles

在电弧侵蚀过程中,上下触头间可形成一个温度可达 10 000 ℃ 的瞬时热源,这一热源使参与放电的 MgO/Cu 复合材料试样表面局部的一些材料发生熔化和气化。因此, MgO/Cu 复合材料的侵蚀形貌与电弧侵蚀过程中的等离子体冲击、热对流、洛伦兹力及其表面张力密切相关^[15]。由于电场对阳离子的加速作用,在阴极触头表面由于阳离子的冲击会形成熔池。随着大量的等离子冲击,阴极熔池液体在洛伦兹力的作用下

逐渐向外流动扩展。同时在阳极和阴极的接触碰撞过程中,熔池发生飞溅,阳离子快速轰击阴极熔池。这种快速且大量的等离子冲击会使阴极熔池中心区域发生流动,此外,电流作用下产生的洛伦兹力驱动熔液向熔池侧壁的两侧外流动。在阳极和阴极的碰撞过程中,阴极熔池发生飞溅。因此,在阴极触头表面形成了侵蚀凹坑,侵蚀坑面积与 MgO/Cu 复合本身的物理性能密切,见图 4。当 MgO 颗粒体积分数小于 5% 时,复合材料

燃弧能量随着 MgO 含量的增加逐渐降低,熔化程度逐渐减轻,MgO/Cu 复合材料表面的熔融液滴逐渐变得均匀细小。而当 MgO 体积分数为 8.0% 时,MgO/Cu 复合材料的抗电蚀性能降低,熔化程度加剧,使得 8.0% MgO/Cu 复合材料表面的侵蚀坑逐渐增大,见图 4d。

2.2.3 MgO 含量对复合材料燃弧能量的影响

图 5 为不同 MgO 颗粒体积分数的 MgO/Cu 基复合材料的燃弧能量。可以看出,MgO/Cu 复合材料燃弧能量随着 MgO 颗粒体积分数的增加呈先下降后上升的趋势,当 MgO 颗粒体积分数为 5.0% 时,MgO/Cu 复合材料的燃弧能量出现拐点。电接触材料除了良好的电导率、热导率、化学稳定性、高硬度和高熔点外,还应具有良好的抗电弧侵蚀性^[16,17]。由于 MgO 颗粒具有高熔点、高热容量和良好的化学稳定性等特点,使其具有一定的储热和良好的抗电蚀性能,从而使得 MgO/Cu 复合材料的耐电蚀性能得到提升。电蚀过程中,易烧蚀损耗的铜被熔化或气化后,露出的 MgO 颗粒起到了“骨架作用”,减少了铜液的飞溅^[4]。同时,MgO 颗粒加入增加了铜基体的熔池粘度,电蚀过程中部分 Cu 发生熔化,MgO 颗粒与液态 Cu 之间存在摩擦阻力,其摩擦阻力 F_d 可用 Stokes 公式表示^[14,18]:

$$F_d = 3\pi\mu d v_\infty \quad (1)$$

式中, μ 为流体粘度; d 为颗粒直径; v_∞ 为流度。摩擦阻力是导致熔池粘度增加的直接原因^[15,19]。这是由于液态铜在熔池中的喷溅是在紊流状态下进行,MgO 颗粒的引入可提高熔池中液态铜基体的粘度,抑制电弧侵蚀过程中铜基体的喷溅侵蚀。当 MgO 颗粒体积分数超过 8% 时,由于 MgO 颗粒在铜基体中的团聚作用导致了 MgO/Cu 复合材料的硬度降低(见图 1 和图 2),使得 MgO/Cu 复合材料抗电蚀性能降低,当 MgO 体积分数为 8.0% 时,MgO 复合材料的燃弧能量呈上升趋势。

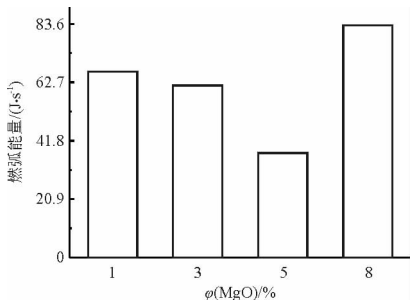


图 5 不同 MgO 体积分数的 MgO/Cu 复合材料的燃弧能量

Fig.5 The arc energy histogram of MgO/Cu composites with various volume fraction of MgO particles

3 结 论

(1) 试验范围内,随着 MgO 颗粒体积分数增加,

MgO/Cu 复合材料的总体质量损耗逐渐减小并趋于稳定。MgO/Cu 复合材料的耐电弧侵蚀性能与其力学性能密切相关。当 MgO 颗粒的体积分数为 5.0% 时,MgO/Cu 复合材料的硬度(HV)达到最大值 110,同时试样表面的电弧侵蚀区域的侵蚀坑面积最小。

(2) 由于高熔点的 MgO 颗粒的存在,有助于改善 MgO/Cu 复合材料的耐电弧侵蚀性能。电弧侵蚀过程中,MgO 颗粒以粒子形式分散于铜液中,增加了复合材料的粘度,减少了电弧喷溅,提高了 MgO/Cu 复合材料耐电弧侵蚀性能。

参 考 文 献

- [1] FENG J, SONG K X, LIANGS H, et al. Electrical wear of TiB₂ particle-reinforced Cu and Cu-Cr composites prepared by vacuum arc melting[J]. Vacuum, 2020, 175: 109 295-109 300.
- [2] 李国辉, 刘勇, 国秀花, 等. TiB₂/Cu 复合材料的电弧侵蚀行为[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3): 616-622.
- [3] 国秀花, 龙飞, 周延军, 等. 粉末冶金法制备氧化物颗粒增强 Cu 基复合材料[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(2): 205-209.
- [4] GUO X H, SONG K X, LIANG S, et al. Relationship between the MgO_p/Cu interfacial bonding state and the arc erosion resistance of MgO/Cu composites[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32(19): 3 753-3 760.
- [5] DINAHARAN I, SARAVANAKUMAR S, KALAISELVAN K, et al. Microstructure and sliding wear characterization of Cu/TiB₂ copper matrix composites fabricated via friction stir processing[J]. Journal of Asian Ceramic Societies, 2017, 5(3): 295-303.
- [6] GUO X H, SONG K X, LIANG S H, et al. Effect of Al₂O₃ particle size on electrical wear performance of Al₂O₃/Cu composites[J]. Tribology Transactions, 2016, 59(1): 170-177.
- [7] 国秀花, 宋克兴, 王旭, 等. 颗粒增强 Cu 基复合材料的导电性[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(11): 992-995.
- [8] 郑翠华, 宋克兴, 国秀花, 等. 粉末冶金法制备纳米 MgO 颗粒增强铜基复合材料[J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31(10): 955-958.
- [9] GUO X H, SONG K X, LIANG S, et al. Thermal expansion behavior of MgO/Cu composite with lower MgO volume fraction[J]. Materials Research Bulletin, 2012, 47(11): 3 211-3 215.
- [10] 王庆福, 张彦敏, 国秀花, 等. 在铜镁合金表面制备 MgO/Cu 复合材料内氧化层的组织和性能[J]. 机械工程材料, 2015, 39(1): 58-62.
- [11] WANG Y G, ZHANG Z, YANG H, et al. Determination of near coincident site lattice orientations in MgO/Cu composite[J]. Journal of Materials Science, 2002, 37(12): 2 511-2 518.
- [12] MIZUUCHI K, INOUE K, AGARI Y, et al. Processing of Al/SiC composites in continuous solid-liquid co-existent state by SPS and their thermal properties[J]. Composites, 2012, B43(4): 2 012-2 019.
- [13] JIANG Y, WANG D, XU Y, et al. Fabrication and properties of in situ heterogeneous Cu/TiB₂ composites with a harmonic structure[J]. Materials Letters, 2020, 263: 127 032.
- [14] 张胜利, 国秀花, 宋克兴, 等. 多粒径 TiB₂ 颗粒增强铜基复合材料的制备与载流摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2 348-2 356.

BN 与 LPSO 相混杂增强的镁基复合材料制备及性能

夏岚清 吴树森 吕书林 郭 威 李建宇 李 成
(华中科技大学材料科学与工程学院,材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘 要 研究了六方氮化硼(h-BN)颗粒增强镁基复合材料的制备工艺及其性能。通过化学镀法在 h-BN 颗粒表面包覆一层纯镍,镀镍处理能显著改善 h-BN 与镁合金熔体的润湿性,改善其与基体的界面结合。通过向基体合金中加入 Y 元素,利用镀镍层熔入熔体中的 Ni 获得了由 Mg-Ni-Y 组成的 LPSO 结构(长周期堆垛有序结构),制得了 h-BN+LPSO 混杂增强的镁基复合材料。超声处理后,h-BN 增强相体积分数为 3% 的镁基复合材料热导率为 99.92 W/(m·K),室温(RT)至 100 ℃ 的平均热膨胀系数为 $18.36\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$,抗拉强度为 171 MPa,伸长率为 3.9%,获得了兼具较高力学性能和优异热物性能的镁合金材料。

关键词 镁基复合材料;h-BN;LPSO 结构;热物性能;力学性能

中图分类号 TB331;TG146.22 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Preparation and Properties of BN and LPSO Hybrid Reinforced Magnesium Matrix Composite

Xia Lanqing, Wu Shusen, Lü Shulin, Guo Wei, Li Jianyu, Li Cheng
(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: The preparation process and properties of hexagonal boron nitride (h-BN) particle reinforced magnesium matrix composites were investigated. A thin layer of pure nickel was coated on the surface of h-BN particles by electroless plating, which can significantly improve the wettability between h-BN and magnesium alloy melt and strengthen the interface bonding with the matrix. By adding Y element to magnesium alloy and consume Ni element fused with the nickel-plating layer, the long period stacking ordered (LPSO) structure composed of Mg-Ni-Y can be successfully formed, and the magnesium matrix composite reinforced by hybrid h-BN and LPSO structure is obtained. After ultrasonic treatment (UT), the thermal conductivity (TC) of the magnesium composite containing 3% h-BN reaches 99.92 W/(m·℃), and the average coefficient of thermal expansion (CTE) of the composite from room temperature (RT) to 100 ℃ is $18.36\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$. The tensile strength and elongation of the composites reach 171 MPa and 3.9%, respectively. The magnesium alloy material with both high mechanical properties and excellent thermal properties was obtained.

Key Words: Magnesium Matrix Composites, h-BN, LPSO Structure, Thermal Properties, Mechanical Properties

随着电子技术的迅速发展,电子器件向小型化、集成化、多功能化方向发展,功率密度也大幅增加,由此产生大量的热量。如果产生的热量没有及时散发,将严重影响电子设备的工作效率和使用寿命^[1,2]。然而,为实

收稿日期:2020-10-15;修改稿收到日期:2020-11-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771080);基础科研计划资助项目(JCKY2016209A001)
第一作者简介:夏岚清,男,1995 年出生,硕士研究生,武汉(430074),E-mail:15735182443@163.com
通信作者:吴树森,男,1961 年出生,教授,武汉(430074),E-mail:ssw636@hust.edu.cn
引用格式:夏岚清,吴树森,吕书林,等. BN 与 LPSO 相混杂增强的镁基复合材料制备及性能[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(2):214-218.
XIA L Q, WU S S, LÜ S L, et al. Preparation and properties of BN and LPSO hybrid reinforced magnesium matrix composite[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(2):214-218.

[15] 王庆福. MgO/Cu 复合材料抗电蚀特性研究[D]. 河南洛阳: 河南科技大学, 2014.

[16] 田磊. 滑动摩擦条件下电弧的产生及其对载流摩擦磨损性能的影响[D]. 河南洛阳:河南科技大学, 2012.

[17] 柏小平,林万焕,张明江. 低压电器用电触头材料[J]. 电工材料, 2007(3):12-16.

[18] 国秀花,宋克兴,李国辉,等. 不同 TiB₂颗粒粒径的 TiB₂/Cu 复合材料耐电弧侵蚀行为[J]. 复合材料学报, 2019, 36(7):1 684-1 690.

[19] 李桂景,王献辉,邹军涛,等. AgTiB₂ 复合材料电弧侵蚀行为研究[J]. 贵金属, 2011(3):36-41.

(编辑:刘卫)