

稀土元素 Ce 对 Cu-Al₂O₃ 复合材料组织及性能的影响

刘贵民[✉], 杜林飞, 闫 涛, 朱 硕, 惠 阳

陆军装甲兵学院装备保障与再制造系, 北京 100072

[✉]通信作者, E-mail: lgm1971@sina.com

摘要 采用机械合金化与放电等离子烧结的方法制备了不同质量分数的 Cu-Al₂O₃-Ce 复合材料, 研究了稀土元素 Ce 对 Cu-Al₂O₃ 复合材料显微组织形貌及硬度、抗拉强度、导电率、摩擦磨损等物理性能的影响。结果表明: Cu-Al₂O₃-Ce 复合材料中的陶瓷颗粒更加均匀弥散的分布在基体中; 加入稀土元素 Ce 后的 Cu-Al₂O₃-Ce 复合材料硬度为 HV 108.2、拉伸强度为 301 MPa、断面伸长率为 19.6%、导电率为 54.51 MS·m⁻¹, 与 Cu-Al₂O₃ 相比有明显提升; Cu-Al₂O₃ 的磨损机理主要为磨粒磨损, Cu-Al₂O₃-Ce 主要为黏着磨损, 当摩擦速率较大时, Cu-Al₂O₃-Ce 的摩擦系数和体积磨损率更小, 耐磨性能优于 Cu-Al₂O₃。

关键词 复合材料; 稀土元素; 显微组织; 物理性能

分类号 TB333

Effect of rare earth Ce on the microstructure and properties of Cu-Al₂O₃ composites

LIU Gui-min[✉], DU Lin-fei, YAN Tao, ZHU Shuo, HUI Yang

Department of Equipment Support and Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China

[✉]Corresponding author, E-mail: lgm1971@sina.com

ABSTRACT The Cu-Al₂O₃-Ce composites doped with rare earth Ce in different mass fractions were fabricated by mechanical alloying and spark plasma sintering. The effect of Ce content on the microstructure and physical properties of Cu-Al₂O₃ composites were studied. The results show that, the ceramic particles are uniformly dispersed in Cu-Al₂O₃-Ce composites. Compared with Cu-Al₂O₃ composites, the Cu-Al₂O₃-Ce composites performances are significantly improved, having the hardness of HV 108.2, the tensile strength of 301 MPa, the elongation of 19.6%, and the conductivity of 54.51 MS·m⁻¹. The wear mechanism of Cu-Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃-Ce is abrasive wear and adhesive wear, respectively. Compared with Cu-Al₂O₃ composites, Cu-Al₂O₃-Ce composites have the smaller friction coefficient and volume abrasion rate at high friction rate. Thus, the wear resistance of Cu-Al₂O₃-Ce composites is highly improved by doped with rare earth Ce.

KEY WORDS composite materials; rare earth; microstructure; physical properties

收稿日期: 2017-11-08

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目 (2152031)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2018.03.006; <http://journals.ustb.edu.cn>

Cu-Al₂O₃ 是一种具有优异性能的弥散强化型复合材料, 在电工、电子、汽车、航空航天及军事等领域得到广泛应用^[1-3]。特别是在军事领域, 随着我国国防事业的发展与进步, 制备出具有高强度、高硬度、高导电、优异耐高温性能、良好摩擦磨损性能的弥散强化铜合金, 为解决电磁弹射器、电磁轨道炮等新型武器的导轨失效问题提供了思路^[4-5]。

稀土及其氧化物是十分理想的增强相, 添加适量稀土元素不但可以细化组织、净化组织, 还可以改变杂质的形态和分布, 从而改善材料的综合性能。目前关于稀土及氧化物对材料组织与性能影响的研究已经较为成熟。陈大军等^[6]向铝合金中添加 La₂O₃ 与 Y₂O₃, 发现随着稀土氧化物含量的增加, 铝合金晶粒尺寸逐渐减小, 力学性能显著增强, 抗弯强度最高达到 1133 MPa, 弯曲角最大可达 38°。Guo 等^[7]研究发现添加质量分数 0.288% 的稀土氧化物纳米颗粒后, Fe-Cr-C-B 合金的结合强度增加了 46.4%, 耐磨性也得到了显著提升。还有研究表明稀土元素有助于提高合金的导电性能^[8]。与添加单颗粒相比, 在金属基体中添加两种增强相更能提高复合材料的综合性能, 特别是材料的硬度、强度及摩擦磨损性能^[9-11]。目前关于稀土-氧化铝弥散强化铜基复合材料的研究还并不多见, 这种复合材料的组织与各项性能间的关系有待进一步探究。

放电等离子体烧结具有烧结温度低、效率高、产品质量好、致密度高的优点, 被广泛用于粉末的烧结成形^[12]。本实验采用机械合金化与放电等离子烧结的方法, 制备了 Cu-Al₂O₃-Ce 复合材料, 研究了稀土 Ce 对复合材料微观结构、力学性能以及摩擦磨损性能的影响, 并探讨稀土元素的影响机制。

1 实验材料及方法

以 Cu 粉(纯度>99.97%, 粒径 30 μm)、α-Al₂O₃ 粉(纯度>99.97%, 粒径 70 nm) 和 Ce 粉(纯度>99.7%, 粒径 60 μm) 为实验原料粉末, 按 Cu-Al₂O₃、Cu-Al₂O₃-0.01%Ce、Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 和 Cu-Al₂O₃-0.03%Ce(质量分数)称量、配制混合粉末, 其中 Al₂O₃ 粉末的质量分数为 0.5%, 余量为 Cu 粉。

采用 QM-3SP2 型行星球磨机制备粉末。将粉末放入不锈钢球磨罐中, 加入质量分数为 1% 的硬脂酸为过程控制剂, 球料比为 5:1, 球磨转速为 600 r/min。采用日本助友石炭公司生产的 SPS-1050 型放电等离子烧结系统进行粉末的烧结成型。烧结

工艺参数: 烧结温度 850 °C, 烧结初始压力 5 MPa, 保压压力为 40 MPa, 真空度小于 10 Pa, 烧结结束后随炉冷却, 得到厚度为 5~7 mm、直径为 30 mm 的片状材料。

采用 Quanta-200 型扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM) 观察复合材料微观结构; 使用 WOLPERT 430SVD 维氏硬度计测量显微硬度; 采用 CMT4304 型微机控制电子万能试验机对烧结体的抗拉强度进行测试; 采用 Sigma2008A1 型涡流电导仪测定导电率, 为保证测量结果的稳定性, 选取不同区域测量, 取 5~8 次测量的平均值; 采用 CETR-3 型摩擦磨损试验机对复合材料进行摩擦磨损试验, 选用直径为 4 mm 的 GCr15 钢球作为对磨件。

2 结果与讨论

2.1 稀土 Ce 对 Cu-Al₂O₃ 复合材料微观组织与形貌的影响

图 1 与图 2 分别为 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料的扫描电子显微形貌图与背散射

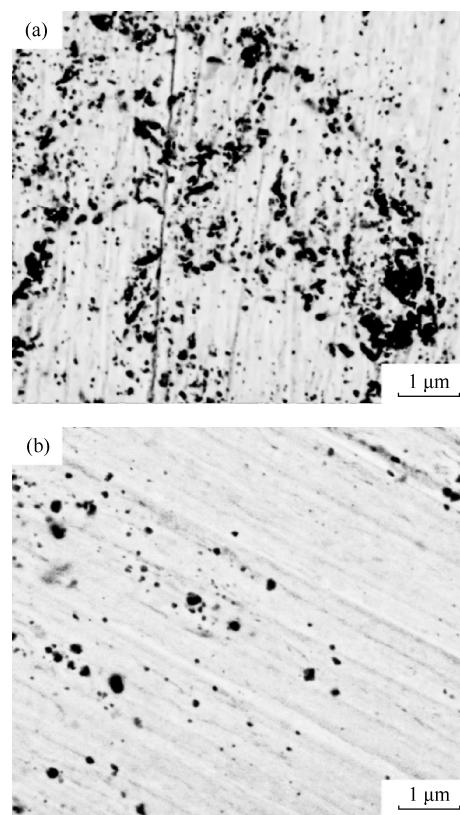


图 1 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料扫描电子显微形貌: (a) Cu-Al₂O₃; (b) Cu-Al₂O₃-0.02%Ce

Fig.1 SEM images of Cu-Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃-0.02%Ce composites: (a) Cu-Al₂O₃; (b) Cu-Al₂O₃-0.02%Ce

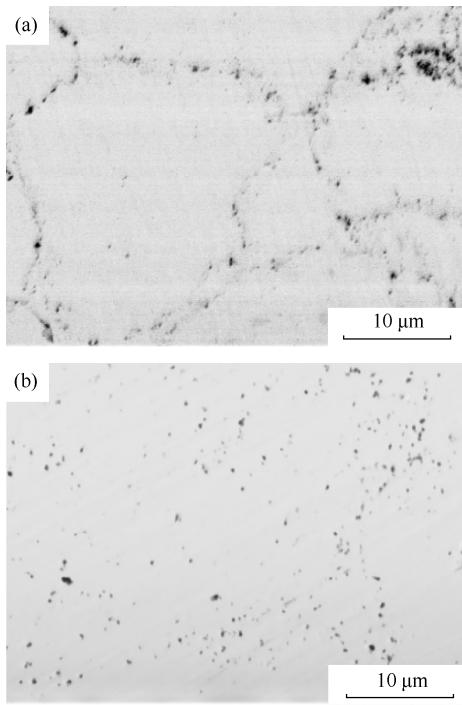


图2 Cu-Al₂O₃和Cu-Al₂O₃-0.02%Ce复合材料背散射SEM形貌: (a) Cu-Al₂O₃; (b) Cu-Al₂O₃-0.02%Ce

Fig.2 Backscattered electron images of Cu-Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃-0.02%Ce composites: (a) Cu-Al₂O₃; (b) Cu-Al₂O₃-0.02%Ce

电子显微形貌图。图中白色部分为Cu基体，黑色部分为Al₂O₃颗粒。由图可知，Al₂O₃颗粒集中分布在Cu颗粒边界处，团聚现象明显；向复合材料中添加稀土Ce后，Al₂O₃颗粒的分布变得更加均匀而弥散，颗粒团聚现象明显减轻。

2.2 稀土Ce对Cu-Al₂O₃复合材料力学性能的影响

添加不同质量分数Ce的Cu-Al₂O₃复合材料的硬度、抗拉强度、断面伸长率及导电率等力学性能如表1所示。可以看出，在Cu-Al₂O₃复合材料中添加微量稀土Ce后，复合材料的硬度与抗拉强度明显提高。在弥散强化复合材料中，强化机制主要为弥散强化与细晶强化，稀土Ce加入后，Al₂O₃陶瓷颗粒细小而均匀的分布在基体中，团聚现象减弱，颗

粒数量增加。根据Orowan机制，位错环数量与弥散颗粒数量呈正相关，位错环数量的增加引起弥散强化，促使复合材料力学性能显著提高。向复合材料中继续添加稀土Ce，材料的硬度与抗拉强度并未像之前一样有明显提高，这说明复合材料的弥散强化并不取决于稀土Ce的含量，而是在于稀土元素是否存在。李斌等^[2]发现在复合材料中稀土含量的增加甚至会造成功能性的下降。这是因为稀土Ce并未直接参与强化过程，而是改善了Cu-Al₂O₃的结合情况。其原因如下，Al₂O₃颗粒团聚过程的吉布斯自由能变(ΔG)可以用式(1)表示。

$$\Delta G = \gamma dA \quad (1)$$

式中： A 为Cu与Al₂O₃的界面面积， γ 为Cu与Al₂O₃界面单位面积上的界面能。假设Al₂O₃颗粒是具有相似尺寸的球形，则 A 可以用式(2)表示。

$$A = N \cdot \pi \cdot D^2 \quad (2)$$

式中： N 为单位体积内Al₂O₃颗粒的数量，根据物料守恒可用式(3)计算得到； D 为Al₂O₃颗粒的直径。

$$N = \frac{6V_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{\pi D^3} \quad (3)$$

式中： $V_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 表示Al₂O₃颗粒体积。

综上所述，Al₂O₃颗粒团聚过程的吉布斯自由能变可以由式(4)表示。当复合材料中Al₂O₃含量不变时，加入稀土Ce可以抑制Al₂O₃的团聚现象，这间接说明稀土元素的添加减弱了团聚驱动力(ΔG)，降低了单位面积Cu-Al₂O₃界面的界面能，使Cu与Al₂O₃之间的结合更加牢固。

$$\Delta G = -\frac{6V_{\text{Al}_2\text{O}_3}\gamma}{D^2} dD \quad (4)$$

此外，对比Cu-Al₂O₃和Cu-Al₂O₃-Ce复合材料的断面伸长率，稀土Ce的加入还提升了复合材料的塑性，这可能是由于稀土元素的细化晶粒作用，增加了复合材料中晶界的数量，实现了细晶强化，提高了塑性。但随着稀土Ce含量的增加，复合材料强度增加，断面伸长率却有所下降，这表明复合材料中弥散强化的作用更强，细晶强化并不起主导作用。

表1 添加不同质量分数Ce的Cu-Al₂O₃复合材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of Cu-Al₂O₃ composites doped with rare earth Ce in different mass fractions

材料	硬度, HV	抗拉强度 / MPa	断面伸长率 / %	电导率 / (MS·m ⁻¹)
Cu-Al ₂ O ₃	101.8	264	10.6	48.37
Cu-Al ₂ O ₃ -0.01%Ce	108.2	301	19.6	54.51
Cu-Al ₂ O ₃ -0.02%Ce	111.6	306	17.7	53.61
Cu-Al ₂ O ₃ -0.03%Ce	113.6	307	16.1	53.22

如表 1 所示, 稀土 Ce 对 Cu-Al₂O₃ 复合材料导电性能的提升起到了重要作用, 但随着稀土含量进一步增加, 电导率反而呈下降趋势。这是由于少量稀土元素的添加可以有效减少材料界面的杂质, 同时可以减少杂质元素在复合材料中的固溶度, 降低如机械合金化过程中引入的杂质(Fe)对导电性能的影响^[13]。此外, 弥散强化铜基复合材料的导电性还要受晶界、第二相颗粒、位错等因素的影响^[14]。晶界对电子具有十分强烈的散射作用, 晶界面积越大散射作用则越强, 而在 Cu-Al₂O₃-Ce 复合材料中细晶强化并不占主导作用, 晶界对 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-Ce 两种材料的影响近似相等。第二相颗粒与位错环的数量对材料的电导率影响较大, 一方面复合材料中形成的稀土化合物基本不导电, 稀土 Ce 含量增加会降低复合材料的导电率; 另一方面复合材料中位错与电阻率变化的关系可以用式(5)表示^[15], 可以看出, 电阻率变化与位错的数量呈正相关, 稀土元素的添加会提高位错数量, 增加复合材料电阻率。

$$\Delta\rho_{\text{dis}} = N_l r_{\text{dis}} \quad (5)$$

式中: $\Delta\rho_{\text{dis}}$ 表示因位错引起的电阻率变化, N_l 表示位错密度, r_{dis} 是一个定值, 代表位错电阻率。

2.3 稀土 Ce 对 Cu-Al₂O₃ 复合材料摩擦磨损性能的影响

载荷为 2 N 时, 比较 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料在不同摩擦速率下的摩擦系数, 结果如图 3 所示。在摩擦速率较低时, Cu-Al₂O₃ 复合材料具有更小的摩擦系数, 随着摩擦速率的不断提高, Cu-Al₂O₃ 复合材料的摩擦系数随之增大, Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料的摩擦系数则不断减小。Cu-Al₂O₃ 复合材料磨痕形貌如图 4(a) 所示, 材料表面存在大量沿磨损方向的划痕, 局部有不规则的凹坑, 还存在磨粒的脱落现象, 属于磨粒磨损特征。当摩擦速率较低时, Al₂O₃ 的存在减弱了复合材料与对磨材料间的粘着作用, 使 Cu-Al₂O₃ 复合材料具有较小的摩擦系数。摩擦速率提高以后, 团聚的较大 Al₂O₃ 陶瓷颗粒会不断从铜基体中脱落, 磨粒磨损现象加剧, 导致 Cu-Al₂O₃ 复合材料摩擦系数不断增大。图 4(b) 为 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料的磨损形貌图, 磨痕表面相对光滑, 不存在磨粒磨损现象, 图中深色斑点为 Al 元素, 由此可见, Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料中 Al 元素分布更加均匀。复合材料添加稀土 Ce 后, 复合材料中分布的 Al₂O₃ 陶瓷颗粒变得更加弥散而细小, 团聚现象不明

显, 复合材料的摩擦系数不断降低, 此时磨损方式主要以粘着磨损为主。

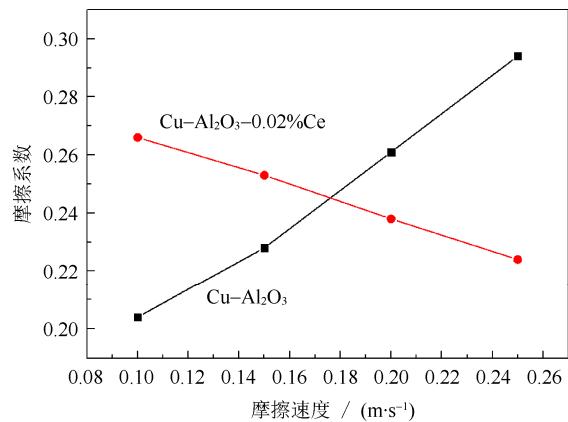


图 3 摩擦速率对 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料摩擦系数的影响

Fig.3 Effect of friction speed on the friction coefficient of Cu-Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃-0.02%Ce composites

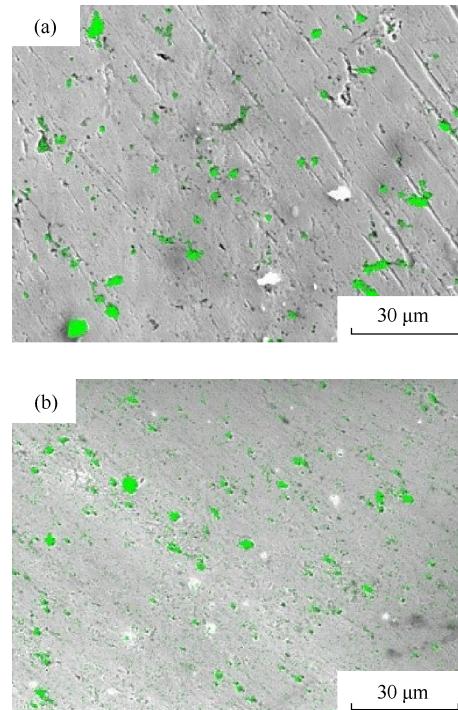


图 4 Cu-Al₂O₃ (a) 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce (b) 复合材料的磨痕形貌和元素分布

Fig.4 Wearing surface and element distribution of Cu-Al₂O₃ (a) and Cu-Al₂O₃-0.02%Ce (b) composites

图 5 为载荷 2 N 时, 不同摩擦速率下 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料的体积磨损率。两

种材料的体积磨损率都随着摩擦速率的增大而增大。摩擦速率较低时, Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 的磨损率更高, 当摩擦速率较大时, Cu-Al₂O₃ 的磨损率超过了 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料, 其磨损率增大的趋势更为明显。这是因为在磨损过程中, Cu-Al₂O₃ 材料中部分脱落的 Al₂O₃ 颗粒重新嵌入基体, 致使材料表面的 Al₂O₃ 含量增加, 提高了材料的表面硬度与强度, 降低了磨损率。当摩擦速率增大时, 脱落的颗粒会加剧材料磨损。添加稀土 Ce 后, 复合材料的磨损失效形式主要为粘着磨损, Al₂O₃ 与基体结合良好不易脱落。因此在摩擦速率较高时, 加入稀土 Ce 后的 Cu-Al₂O₃ 材料具有更优良的耐磨性。

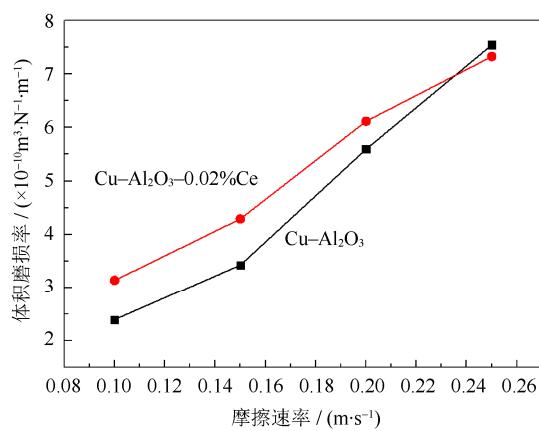


图 5 摩擦速率对 Cu-Al₂O₃ 和 Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 复合材料磨损量的影响

Fig.5 Effect of friction speed on the wear rate of Cu-Al₂O₃ and Cu-Al₂O₃-0.02%Ce composites

3 结论

(1) Cu-Al₂O₃ 复合材料中添加稀土 Ce 元素, 可以起到细化组织、促使 Al₂O₃ 颗粒均匀弥散分布的作用。

(2) Cu-Al₂O₃-Ce 复合材料具有更加优良的力学性能与导电性能, 硬度、拉伸强度、断面伸长率与导电率分别为 HV 108.2、301 MPa、19.6% 和 54.51 MS·m⁻¹, 与 Cu-Al₂O₃ 复合材料相比有明显提升。

(3) 摩擦磨损试验中, Cu-Al₂O₃ 随摩擦速率的增加摩擦系数变大, 体积磨损率不断升高, 为磨粒磨损机理; Cu-Al₂O₃-0.02%Ce 符合粘着磨损机理, 随着摩擦速率的增加摩擦系数减小, 体积磨损率升高。当摩擦速率较大时, Cu-Al₂O₃-0.02%Ce

的摩擦系数与体积磨损率更小, 具有更优良的耐磨性能。

参 考 文 献

- [1] Li M X, Guo Z M, Zhao Q T. Progress in and applications of copper-based alloys. *Powder Metall Ind*, 2008, 18(1): 36
(李美霞, 郭志猛, 赵奇特. 氧化铝弥散强化铜的研究进展及其应用. 粉末冶金工业, 2008, 18(1): 36)
- [2] Li B, Liu G M, Ding H D, et al. Effect of rare earth La on microstructure and properties of Al₂O₃/Cu composites. *Rare Met Mater Eng*, 2014, 43(5): 1272
(李斌, 刘贵民, 丁华东, 等. 稀土 La 对 Al₂O₃/Cu 复合材料组织与性能的影响. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(5): 1272)
- [3] Zhang Y F, Ji Z, Liu G M, et al. Manufacturing process and properties of Al₂O₃ dispersion strengthened copper-based composite with high electrical conductivity. *Powder Metall Technol*, 2016, 34(5): 346
(张一帆, 纪箴, 刘贵民, 等. Al₂O₃ 弥散增强 Cu 基高导电率复合材料的制备及性能研究. 粉末冶金技术, 2016, 34(5): 346)
- [4] Lv Q A, Lei B, Li Z Y, et al. Summary of electromagnetic railgun military applications. *J Gun Launch Control*, 2009(1): 92
(吕庆敖, 雷彬, 李治源, 等. 电磁轨道炮军事应用综述. 火炮发射与控制学报, 2009(1): 92)
- [5] Liu G M, Yang Z X, Yan T, et al. Current status and prospect on rail failures of electromagnetic railgun. *Mater Rev*, 2015, 29(4): 63
(刘贵民, 杨忠须, 闫涛, 等. 电磁轨道炮导轨失效研究现状及展望. 材料导报, 2015, 29(4): 63)
- [6] Chen D J, Wu H L, Li Z S, et al. Effects of the high content La₂O₃/Y₂O₃ on microstructure and mechanical properties of Mo-alloy. *Powder Metall Technol*, 2016, 34(1): 26
(陈大军, 吴护林, 李忠盛, 等. 高含量 La₂O₃/Y₂O₃ 对钼合金微观组织与性能的影响. 粉末冶金技术, 2016, 34(1): 26)
- [7] Gou J F, Wang Y, Sun J P, et al. Bending strength and wear behavior of Fe-Cr-C-B hardfacing alloys with and without rare earth oxide nanoparticles. *Surf Coat Technol*, 2017, 311: 113

(下转第 216 页)

- (黄培云. 粉末冶金原理. 北京: 冶金工业出版社, 2008)
- [8] Qian H J. *Effect of Sintering Process and Alloy Element on Microstructure and Mechanical Properties of Cu-based Oil-impregnated Bearing* [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016
(钱杭君. 烧结工艺及合金元素对铜基含油轴承组织与性能的影响[学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2016)
- [9] Hu S L, Zha W S, Jia Y C. Effect of the copper content on Al-Cu sintered materials. *Sichuan Nonferrous Met*, 2010(4): 24
(胡绍磊, 查五生, 贾永灿. 铜含量对铝铜烧结材料性能影响. 四川有色金属, 2010(4): 24)
- [10] Xu J J, Deng Z Y, Zhang T J. *Analyses of Physical Properties of Metals*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1988
(徐京娟, 邓志煜, 张同俊. 金属物理性能分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1988)
- [11] Lin Y, Chai D L, Zhang W X. Study on sintering process of alloys of Al-Zn and Al-Cu binary systems. *Powder Metall Ind*, 2007, 17(4): 10
(林芸, 柴东朗, 张文兴. Al-Zn、Al-Cu二元合金系烧结过程的对比研究. 粉末冶金工业, 2007, 17(4): 10)
- [12] Yu J, Zhang Y, Zu F Q, et al. Change character of electrical resistivity with temperature of Sn-Zn alloys. *Chin J Nonferrous Met*, 2006, 16(8): 1337
(余瑾, 张燕, 祖方道, 等. 二元 SnZn 合金的电阻随温度变化的特性. 中国有色金属学报, 2006, 16(8): 1337)
- [13] An X G, Zha W S, Lei Y, et al. Effect of sintering temperature on crushing strength, oil content and microstructure of Al-Cu oil bearing. *Powder Metall Technol*, 2012, 30(2): 108
(安旭光, 查五生, 雷宇, 等. 烧结温度对 Al-Cu 系含油轴承压溃强度、含油率和微观形貌的影响. 粉末冶金技术, 2012, 30(2): 108)
- [14] Huang J S, Zhao X Y, Shida M. Effect of sintering technology on mechanical properties of Cu-20Zn brass. *Mater Sci Eng Powder Metall*, 2010, 15(5): 491
(黄钧声, 赵欣悦, 志田光明. 烧结工艺对 Cu-20Zn 黄铜力学性能的影响. 粉末冶金材料科学与工程, 2010, 15(5): 491)
- [15] Wu S S, Li Y, Mao Y W, et al. Effects of sintering method on density and microstructure of particulate reinforced copper matrix composites. *Spec Cast Nonferrous Alloys*, 2005, 25(10): 579
(吴树森, 李勇, 毛有武, 等. 烧结工艺对铜基复合材料密度及组织的影响. 特种铸造及有色合金, 2005, 25(10): 579)

(上接第 200 页)

- [8] Zhong J W, Zhang H, Chen Y X. Effects of Ce and La contents in rare earth elements on microstructure and properties of Cu-0.4Cr-0.2Zr-0.15Mg alloy. *Chin J Nonferrous Met*, 2016, 26(5): 1092
(钟江伟, 张鸿, 陈彦旭. 稀土元素 La、Ce 含量对 Cu-0.4Cr-0.2Zr-0.15Mg 合金组织和性能的影响. 中国有色金属学报, 2016, 26(5): 1092)
- [9] Ramesh C S, Noor Ahmed R, Mujeebu M A, et al. Development and performance analysis of novel cast copper-SiC-Gr hybrid composites. *Mater Des*, 2009, 30: 1957
- [10] Akbarpour M R, Salahi E, Alikhani Hesari F, et al. Fabrication, characterization and mechanical properties of hybrid composites of copper using the nanoparticulates of SiC and carbon nanotubes. *Mater Sci Eng A*, 2013, 572: 83
- [11] Suryanarayana C, Al-Aqelli N. Mechanically alloyed nanocomposites. *Prog Mater Sci*, 2013, 58: 383
- [12] Bai L, Ge C C, Shen W P. Spark plasma sintering technology. *Powder Metall Technol*, 2007, 25(3): 217
(白玲, 葛昌纯, 沈卫平. 放电等离子烧结技术. 粉末冶金技术, 2007, 25(3): 217)
- [13] Zhong W J, Ma K D, Wu W Z. *Practical Manual for Copper Processing Technology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
(钟卫佳, 马可定, 吴维治. 铜加工技术实用手册. 北京: 冶金工业出版社, 2007)
- [14] Nachum S, Fleck N A, Ashby M F. The microstructural basis for the mechanical properties and electrical resistivity of nanocrystalline Cu-Al₂O₃. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527(20): 5065
- [15] Huang P Y. *Theory of Power Metallurgy*. 2nd Ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2004
(黄培云. 粉末冶金原理. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2004)