

文章编号:1673-9981(2012)04-0224-07

Al₂O_{3p}弥散强化 Cu 复合材料研究进展*

秦晓冬^{1,2}, 蔡一湘¹, 韩胜利¹, 刘 沙²

1. 广东省工业技术研究院(广州有色金属研究院)粉末冶金研究所, 广东 广州 510650;
2. 中南大学材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083

摘 要:对 Al₂O_{3p}/Cu 复合材料的强化机制及制备工艺进行了综述,并对采用内氧化法制备的 Al₂O_{3p}/Cu 复合材料高温性能及其影响因素进行了分析,最后指出该制备方法所存在的问题。
关键词:Al₂O_{3p}/Cu 复合材料;内氧化;弥散强化;高温性能
中图分类号:TF123.1 **文献标识码:** A

氧化铝弥散强化铜基复合材料(ADSCC)是一类性能优异的功能材料^[1-3],具有高强高导电及耐高温特性,并作为点焊电极用 Cu-Cr-Zr 材料、电触头用 Cu-Cr 和 Cu-Ag 材料、引线框架用 Cu-Fe 材料、连珠结晶器用纯铜等的替代材料,广泛地用于电子、汽车工业及热核反应等领域中^[4-8]. 与以往铜合金依靠形变强化、固溶强化手段提高强度,但较大地损失导电率的情况不同,Al₂O₃/Cu 复合材料是以高稳定性、高硬度的 Al₂O₃ 陶瓷颗粒作为第二相,通过外加法或基体内部原位生成,弥散分布在铜基体中形成的一类特殊复合材料. 由于 Al₂O₃ 粒子在接近铜熔点的高温下仍能保持稳定,有效地钉扎位错、晶界、亚晶界移动,从而大大地提高了室温及高温下复合材料的强度^[9-11]. 另外,根据导电理论^[12],第二相对电子散射的影响小于固溶原子,使得复合材料能保持高的导电率.

由于 Al₂O₃/Cu 复合材料的优异性能,一直是国内外研究热点. 其中美、日、德等国家的研究异常活跃且已趋成熟. 在 20 世纪 70 年代,美国俄亥俄州 SCM 公司采用内氧化法制备出主要用于电阻焊电极的三种牌号(Glidcop) Al₂O₃/Cu 复合材料,月产量 18 t,至 90 年代月产达到 60 t 左右^[13]. 德国 Ecka 公司采用 RMMA(原料粉末+机械合金化)新工艺制备的弥散铜,正在德、日汽车工业及韩国造船工业

中试用^[14]. 我国科研院所于 90 年代初开始对此类材料进行研究,可一直局限于实验室. 至 2003 年,北京有色总院采用内氧化法,制备开发了 GM 系列 Al₂O₃/Cu 复合材料并形成年产 50 t 以上工业化生产能力^[15]. 昆明贵金属研究所也具有工业化生产 Cu(Al₂O₃)_{0.3}, Cu(Al₂O₃)_{0.5}, Cu(Al₂O₃)_{1.1} 三种弥散铜合金的能力^[14]. 广州有色金属研究院正研究高含量 Al₂O₃ 弥散强化 Cu 复合材料,并取得了关键性的进展.

随着电子工业的不断发展,对 Al₂O₃/Cu 复合材料的性能提出了更高的要求,Al₂O₃/Cu 复合材料的研究也不断地深入. 人们试图通过研究强化机理、改变弥散相添加量、优化制备工艺等来不断改善 Al₂O₃/Cu 复合材料的性能,并不断拓宽其应用领域. 本文从该复合材料的强化机理、制备方法及性能特点等方面作了概述.

1 Al₂O₃/Cu 复合材料强化机理

Al₂O₃/Cu 复合材料强度的提高主要分为两个方面,一是弥散分布的 Al₂O₃ 粒子对位错的钉扎,二是 Al₂O₃ 粒子抑制亚晶界、晶界迁移,使得材料晶粒细化而产生的细晶强化.

收稿日期:2012-10-17
* 基金项目:广东省科技厅国际合作项目(2010B050900019)
作者简介:秦晓冬(1986-),男,山西临汾人,硕士研究生.

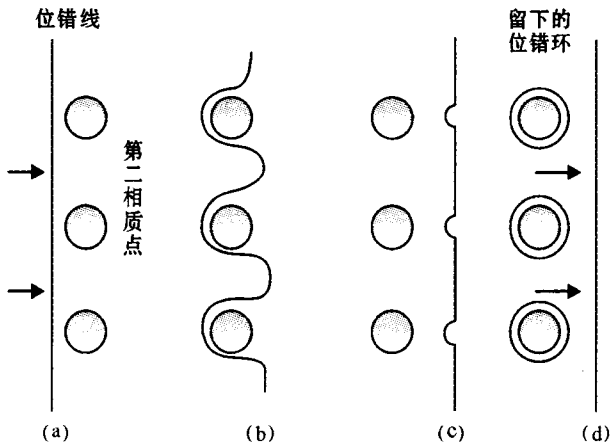


图 1 奥罗万机理示意图

Fig. 1 The Orowan mechanism schematic diagram

钉扎位错机理为著名的奥罗万机理^[16],图 1 为该机理的示意图.当位错无法切断硬质第二相时,其就会发生弯曲,同时增大了位错运动阻力.当外力使位错继续运动时,形成的位错环将 Al₂O₃ 颗粒包围并继续前进.由于位错环的产生,晶格发生畸变,使得位错运动阻力增大.产生的屈服应力增量为 $\Delta\sigma_{\text{Orowan}}$.

$$\Delta\sigma_{\text{Orowan}} = \frac{0.81MGb}{2\pi(1-\nu)^{1/2}} \cdot \frac{\ln(2r_s/r_o)}{(\lambda_s - 2r_s)} \quad (1)$$

式(1)中: M 是 Taylor 因子,为切变模量; G 为剪切模量; b 为柏氏矢量; ν 为泊松比; r_s 为粒子半径; r_o 是位错芯半径; $(\lambda_s - 2r_s)$ 表示粒子间距,当 Al₂O₃ 体积分数一定时,粒子间距越小,Orowan 强化越明显.

根据 W. S. Cremens 等人^[17]的研究可知,弥散相体积分数、粒子尺寸与粒子间距关系为:

$$\lambda = 1.5d(1/f - 1). \quad (2)$$

式(2)中: λ 为粒子间距、 d 为粒子直径、 f 为弥散相体积分数,在一定范围内,增加弥散相体积分数可有效减小粒子间距,屈服强度增大.

Al₂O₃/Cu 复合材料强度提高,还在于 Al₂O₃ 粒子对晶界、亚晶界起到拖曳作用,抑制晶界、亚晶界的移动,细化晶粒,产生 Hall-Patch 细晶强化^[16].

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{-1/2}. \quad (3)$$

式(3)中 σ_0 为位错在金属单晶中运动的总阻力,即 P-N 摩擦阻力,其决定于晶体结构与位错密度.

由上述强化机制可知,弥散相颗粒尺寸对基体强化起着非常关键的作用.当弥散相尺寸达到纳米级时,强化作用非常明显,因此,人们尝试采用各种方法制备纳米 Al₂O₃ 颗粒弥散 Cu 基复合材料.

2 Al₂O₃/Cu 复合材料制备方法

Al₂O₃ 弥散粒子的添加方式有外加与原位生成两种.外加法主要是粉末冶金法,虽然工艺成熟,产品性能稳定,但无法有效解决 Al₂O₃ 与 Cu 基体的润湿性问题,强度难以大幅提高.原位生成法是在 Cu 基体内生成 Al₂O₃ 颗粒,较好地解决了二者之间润湿性差的问题,且 Al₂O₃ 粒子在基体中分布均匀,与基体结合力强^[18].

2.1 粉末冶金法

粉末冶金法工艺流程为复合粉末的制备—复合粉末压制成型—烧结—二次加工(挤压、锻造、轧制等),该法通常是采用外加法制备复合粉末.为了提高制品性能,通常会采取热压烧结(HP)和放电等离子烧结(SPS)等特殊烧结方法.雷秀娟等人^[19]采用将外加的 Al₂O₃ 纳米粉与纯 Cu 粉混匀,双向压制,初烧 600 ℃×0.5 h,复烧 900 ℃×1 h 的方法,制备得到 Al₂O₃ 弥散强化 Cu 复合材料.结果表明,试样布氏硬度随 Al₂O₃ 体积分数增加而增加,当 Al₂O₃ 体积分数为 5.34% 时,试样相对硬度(试样硬度与纯铜硬度的比值)最大,达到 1.365. LIU Xiangbing 等人^[20]采用热压烧结法、SPS 烧结法制备了质量分数分别为 0.5%, 1.0%, 1.5% 的 Al₂O₃/Cu 复合材料.结果表明,SPS 烧结法所制备的材料效果更佳,当 Al₂O₃ 质量分数为 1.0% 时,复合材料的弯曲强度为 597 MPa,导电率达 88% IACS.

2.2 机械合金化法

机械合金化法是一种制备非平衡态合金粉末的技术,采用高能球磨机使得电解 Cu 粉颗粒与 Al₂O₃ 颗粒经磨球碰撞、挤压反复发生变形、断裂与焊合,形成 Al₂O₃/Cu 粉末^[21-22].此法的优点是复合粉体中 Al₂O₃ 分布均匀,Cu 晶粒尺寸可到纳米级,但其缺点是复合粉末易受到污染.由于外加的 Al₂O₃ 颗粒粒径均为微米级,这影响了材料的性能,要提高材料的性能则必须使弥散相粒径变小,为此 Visislava Rajkovic 等人^[23]采用了一种新方法,在空气气氛中高能球磨 Cu-2.5Al 合金粉,使 Cu-Al 合金粉中 Al 优先原位氧化,在 Cu 基体中形成纳米 Al₂O₃ 粒子,经热压成型,得到纳米 Al₂O₃ 粒子弥散强化 Cu 复合材料.结果表明,经 20 h 高能球磨,得到的复合材料的显微硬度达到 2200 MPa,晶粒尺寸为 61 nm,经 800 ℃×5h 退火后硬度仍高达 1500 MPa,晶粒尺寸仅为 82 nm,复合材料的导电率达 75% IACS.

2.3 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是制备 Al_2O_3 弥散强化 Cu 复合材料的新工艺^[4,24],其工艺流程如下:取适量 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 制备成硝酸铝溶液,同时不断搅拌溶液并逐滴加入氨水至溶液 $\text{pH}=9$,制得 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶胶后将 Cu 粉缓慢加入溶胶中,搅拌、静置、过滤,得到 Cu 与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 溶胶的混合物.将混合物在球磨机中充分研磨,室温干燥 24 h 后装入模具压制、烧结,再进行冷加工处理,制得成品.此法工艺过程容易控制,制备的 Al_2O_3 颗粒细小、纯度高,但仍在试验阶段.

贾燕民等人^[25]采用溶胶-凝胶法与热压烧结相结合的工艺,制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料(Al_2O_3 体积分数为 2.7%),经 900 °C 退火后 Al_2O_3 颗粒粒径仍保持在 0.1 μm ,颗粒间距为 0.3 μm ,复合材料的抗拉强度达到 583 MPa.计玮等人^[26]采用溶胶-凝胶与微波加热、微波烧结相结合的工艺,制备了 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料(Al_2O_3 体积分数为 2.5%).由于微波加热的独特机理, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料达到了较高的致密度,其密度达 8.55 g/cm^3 ,导电率达到 80.04% IACS,满足了电子工业的导电率的要求,其软化温度高达 950 °C.

2.4 反应喷射沉积法

反应喷射沉积法是在液相反应与喷射沉积基础上发展起来的一种快速凝固工艺^[27-28],该工艺流程为浇注 Cu-Al 合金铸锭—铸锭重熔并雾化—沉积 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料—挤压成型.图 2 为反应喷射沉积工艺示意图^[14].

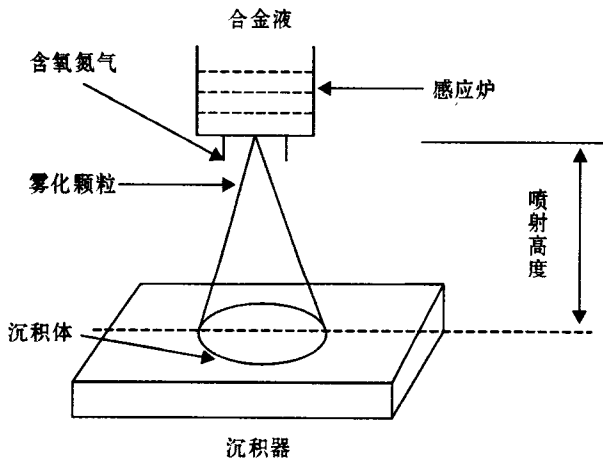


图 2 反应喷射沉积法简图

Fig. 2 The diagram of reactive spray deposition

反应喷射沉积法具有生成的晶粒细小、无宏观偏析、颗粒分布均匀,且工艺简单、产品形状丰富等优点,但也存在许多不足,如制备的复合材料致密度较低,过程中参数控制不当会导致弥散相粗化等问题.

文献^[29]对未经及经 Al_2O_3 粉末喷射工艺强化处理的电阻焊电极用铜锆青铜材料的机械性能进行了比较,其结果列于表 1.

表 1 Al_2O_3 粉末喷射强化铜锆青铜材料机械性能
Table 1 The mechanical property of Cu-Zr alloy strengthened by Al_2O_3 powder spraying

强化工艺	Al_2O_3 粉直径/ μm	$\varphi(\text{Al}_2\text{O}_3)$ / %	抗拉强度 /MPa	蠕变断裂强度 /MPa
未喷射	—	—	430	154
喷射	0.05	3.6	480	1570

2.5 内氧化法

内氧化法即通过合理调整氧分压,使氧源提供的氧原子溶解到 Cu-Al 合金中,使 Al 脱溶并择优内氧化,同时在 Cu 基体中原位生成 Al_2O_3 颗粒的方法.该法可有效改善 Al_2O_3 与 Cu 界面的润湿性,且界面清洁^[30-32].

目前,内氧化法是制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的最有效方法,美、日等国已采用该法进行 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的工业化生产.国内中南大学、北京有色金属研究院、北京科技大学、广州有色金属研究院等科研院校也正积极开展这方面的研究,有的已具有小规模的生产能力^[33].表 2 和表 3 分别为美国 SEM 公司及国内生产厂家生产的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的部分性能的对比结果^[16,35].

表 2 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料的物理力学性能
Table 2 The physical performance of Glidcop alloys

材料	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	导电率/ % IACS	热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	抗拉强度/ MPa
Al-10	8.82	92	359.82	500
Al-35	8.80	85	338.90	585
Al-60	8.78	80	322.17	620

表 3 国内部分单位生产的 Al₂O₃/Cu 性能

Table 3 The physical performance of Al₂O₃/Cu composites prepared by some research institutes

生产单位	牌号	w(Al ₂ O ₃)/ %	导电率/% IACS	900 ℃×30 min 及 H ₂ 退火	
				σ _s /MPa	HB
中南大学	AD15	0.28	95	260	60
	AD30	0.6	—	310	91
有研总院	GM-1	0.2~0.5	90~95	350~450	55~65
	GM-2	0.6~0.9	85~92	450~550	58~72
	GM-3	1.2~1.4	80~88	460~580	63~73

采用内氧化法成功制备材料的关键,是如何有效供氧以及控制氧分压.为此,许多人尝试了多种方法,如真空内氧化、包埋法、高能球磨+内氧化、热压+内氧化、低温配氧+高温扩散等,上述工艺可获得性能优异的 Al₂O₃/Cu 复合材料,但存在工序长的缺点,为此人们开发了压制成型与内氧化合为一体的工艺,即粉末与氧源混合后直接热等静压(致密化成型+内氧化).该方法可大大地缩短生产周期,但存在多余氧无法还原的问题,因此必须严格控制氧的加入量.工业化生产工艺为:熔炼 Cu-Al 合金→Cu-Al 合金粉末制备(水雾化或氮雾化)→Cu-Al 合金粉与氧源(Cu₂O)混匀→内氧化粉末→氢还原过量的氧→热等静压制→热挤压、冷拉拔成型(图 3).

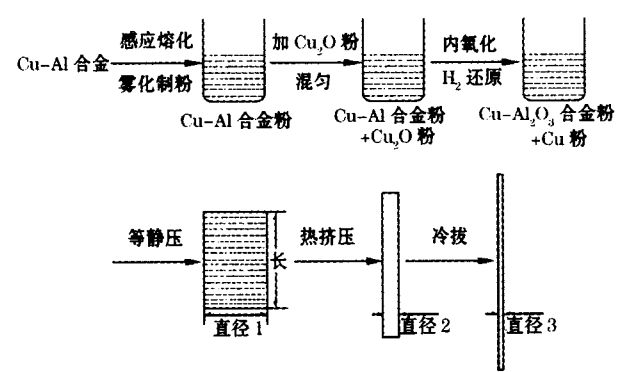


图 3 内氧化法工艺流程

Fig.3 The process flow of internal oxidation

李美霞等人^[34]采用内氧化法制备出了 Al₂O₃ 体积分数为 1.8% 的 Al₂O₃/Cu 复合材料,在 Cu 基体中生成的 γ-Al₂O₃ 粒子的平均粒度仅为 6 nm,颗粒间距为 30~50 nm.复合材料的热压态抗拉强度达到 450 MPa,导电率 87 % IACS,软化温度达 850 ℃;变形量增加到 99.8 % 时,抗拉强度达到 680 MPa.

3 Al₂O₃/Cu 复合材料高温性能

由于 Al₂O₃/Cu 复合材料晶粒及晶界弥散分布着纳米 Al₂O₃ 粒子,在高温下 Al₂O₃ 粒子稳定性好,在极高温下仍能钉扎位错,拖曳亚晶界迁移,抑制晶粒再结晶.因此,Al₂O₃/Cu 复合材料能在高温下保持高强度.表 4 列出了各单位生产的 Al₂O₃/Cu 复合材料及纯铜软化温度^[35].由表 4 可知,Al₂O₃/Cu 复合材料软化温度远远大于纯铜,约为纯铜熔点的 0.89 倍.

表 4 Al₂O₃/Cu, QCr0.5 及纯铜软化温度

Table 4 Soften temperature of Al₂O₃/Cu, QCr0.5 and pure copper

牌号	w(Al ₂ O ₃)含量/%	软化温度/℃
C15715	0.30	930
C15760	1.1	930
LGT20	0.24	800
LGT60	0.60	930
QCr0.5	—	450
Cu	—	300

林阳明等人^[36]研究了内氧化制备的 Cu-0.24Al₂O₃ 复合材料的高温拉伸性能,拉伸速率为 0.125 mm/min,并且与 Cu-0.7Cr 合金作了对比.从图 4 和图 5 可见,二者拉伸强度与屈服强度均随温度升高而下降,当温度为 500~700 ℃ 时,Cu-0.7Cr 合金的强度快速下降,600 ℃ 时拉伸强度仅为 48 MPa;而 Cu-0.24Al₂O₃ 复合材料的强度下降缓慢,600 ℃ 时拉伸强度接近 200 MPa,900 ℃ 时仍显出较高的强度保持比.由此可见,细小弥散的 Al₂O₃ 颗粒在高温下起到了抑制位错移动及 Cu 晶粒晶界迁移的作用,显著提高了复合材料的强度.

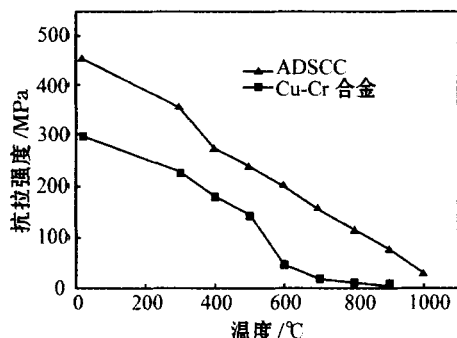


图4 ADSCC 抗拉强度随温度的变化

Fig.4 Tensile strength of ADSCC at various test temperatures

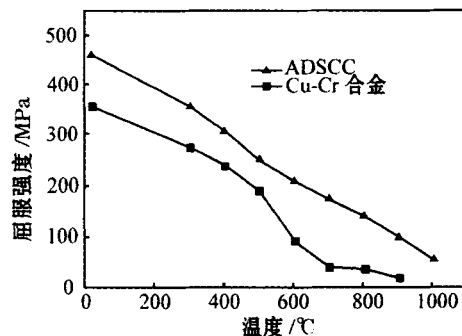


图5 ADSCC 屈服强度随温度的变化

Fig.5 Yield strength of ADSCC at various test temperatures

图6和图7为Cu-0.60Al₂O₃复合材料屈服比及塑性随温度变化曲线^[37]。从图6和图7可以看出:屈服比随温度的升高先是缓慢升高后缓慢下降,室温下为0.92,在温度为600℃时其值达到最高为0.97,但随后始终保持在0.8以上,表明该材料有良好的抗高温变形能力;Al₂O₃颗粒的存在极大影响

了Cu-0.60Al₂O₃复合材料的塑性,伸长率随温度的升高缓慢下降,当温度为250℃以上时其趋于平缓,稳定在2%左右;断面收缩率随着温度的升高则急剧下降,当温度为500℃时其值降至为9.1%,其后稳定在5%左右,材料显出高温脆性。

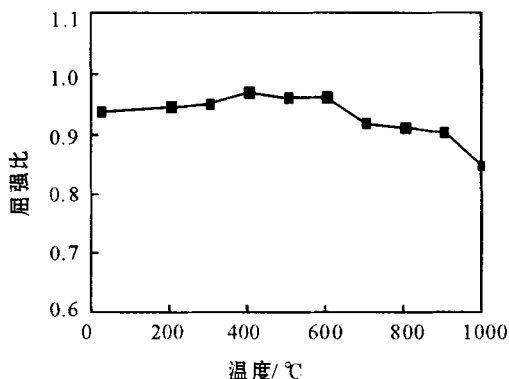
图6 Cu-0.60Al₂O₃ 复合材料屈服比随温度变化

Fig.6 Yield ratio at various temperatures

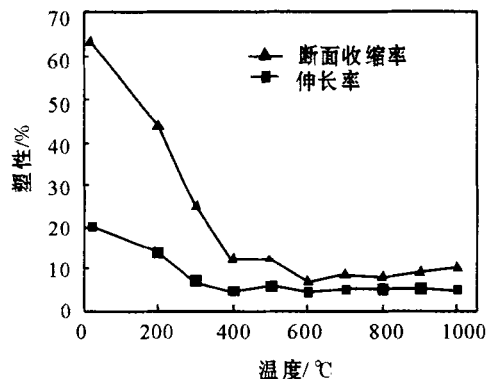
图7 Cu-0.60Al₂O₃ 复合材料塑性随温度变化

Fig.7 Elongation and reduction of area at various temperatures

4 问题及展望

虽然目前在工业化方面对内氧化法制备Al₂O₃/Cu复合材料做了大量研究,但由于内氧化法工艺复杂,仍有许多问题亟待解决。

(1)内氧化过程中Al原子易发生逆扩散,导致铝氧化物在粉末表面析出聚集,这不利于后续压制及烧结,尤其当Al含量大于1%时更明显,需进行变形加工才能改善Al₂O₃/Cu复合材料性能。

(2)由于传统内氧化法工艺复杂,为此人们尝试将致密化加工与内氧化同时进行,即直接热压或热

等静压制Cu-Al+Cu₂O复合粉末,此法可将内氧化、压制及烧结合为一体,大大简化工艺,但不足之处在于残余氧无法还原,影响制品最终性能。为此,必须精确控制氧加入量。

(3)由于Al₂O₃/Cu复合粉末的自身特性,普通压制烧结很难达到致密化。因此,人们采用了一些特殊成形烧结方法,如热(冷)等静压、真空热压、等离子电弧烧结等。

Al₂O₃/Cu复合材料具有广泛的应用前景,而如何通过新的技术、方法有效解决此类材料的制备及工业化生产中存在的上述问题,则是未来研究的方向。

参考文献:

- [1] CHENG Jianyi, WANG Mingpu, LI Zhou, et al. Fabrication and properties of low oxygen grade Al₂O₃ dispersion strengthened copper alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2004, 14(1): 121-126.
- [2] LIU Xiangbing, JIA Chengchang, CHEN Xiaohua, et al. Microstructures and properties of 1.0% Al₂O₃/Cu composite treated by rolling [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17: 626-629.
- [3] SHEHATA F, FATHY A, ABDELHAMEED M, et al. Preparation and properties of Al₂O₃ nano-particle reinforced copper matrix composites by in situ processing [J]. Materials and Design, 2009, 30: 2756-2762.
- [4] LEE D W, HA G H, KIM B K. Synthesis of Cu-Al₂O₃ NANO COMPOSITE POWDER [J]. Scripta, 2001, 44: 2137-2140.
- [5] WU Jianjun, ZHANG Yun, SHEN Yutian, et al. Internal Oxidation of Cu-Al Alloy [J]. J Mater Sci Technol, 1999, 15 (5): 444-448.
- [6] 申玉田, 孙建忠, 崔春翔, 等. Cu-Al 合金内氧化产物及分布的研究[J]. 粉末冶金技术, 2004, 22(3): 131-134.
- [7] TIAN Baohong, TAKAI Y, LI Yan, et al. Study of precipitate structure in an alumina dispersion-strengthened copper alloy [J]. Modern Scientific Instruments, 2006(supplement): 54-55.
- [8] 石德珂. 材料科学基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 263-269.
- [9] 陈文革, 王纯. 集成电路用金属铜基引线框架和电子封装材料研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 29-30.
- [10] SHEIBANI S, ATAIE A. Influence of Al₂O₃ reinforcement on precipitation kinetic of Cu-Cr nanocomposite [J]. Thermochimica Acta, 2011(9): 222-228.
- [11] BESTERCI M, JOZEF I, LADISLAV K. Influence of Al₂O₃ particles volume fraction on fracture mechanism in the Cu-Al₂O₃ system [J]. Materials Letters, 2000, 46: 181-184.
- [12] 王润. 金属材料物理性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [13] 李美霞, 罗骥, 郭志猛. 内氧化法制备纳米 Al₂O₃ 弥散强化铜复合材料的研究[J]. 粉末冶金技术, 2011, 29 (3): 214-217.
- [14] 何顺钦, 谢明, 陈力, 等. Al₂O₃ 弥散强化铜的研究现状与发展设想[C]//中国有色金属学会第六届学术年会论文集. 北京: 中国有色金属学会, 2005: 219-223.
- [15] 田保红, 宋克兴, 刘平, 等. 高性能弥散强化铜基复合材料及其制备技术[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 245.
- [16] 张廷杰, 曾泉浦, 毛小南, 等. 颗粒增强 MMCs 中小粒子的强化作用[J]. 稀有金属材料与工程, 1999(1): 14-16.
- [17] 燕鹏, 林晨光, 崔舜, 等. 弥散强化铜合金的研究与应用现状[J]. 材料导报, 2011(6): 101-106.
- [18] KOCZAK M J, KUMAR K S. In-situ process for producing a composite containing refractory material; U. S, 372, 1989[P]. 1989-02-28.
- [19] 雷秀娟, 王峰会, 胡锐, 等. Al₂O₃-Cu 纳米复合材料的制备工艺及强化机理[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(1): 90-91.
- [20] LIU Xiangbing, JIA Chengchang, CHEN Xiaohua, et al. Fabrication of Nano-Al₂O₃/Cu Composite With Powder Treated by Spherical Process [C] // Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium. Beijing: Sino-Swedish Advanced Materials Exchange Centre, 2007: 94-98.
- [21] SURYANARAYANA C. Mechanical alloying and milling [M]. Progress in Materials Science, 2001, 46: 11-13.
- [22] Ying D Y, Zhang D L. Processing of Cu-Al₂O₃ metal matrix nanocomposite materials by using high-energy ball milling [J]. Mater Sci Eng A, 2000, 226(1): 152.
- [23] VISESLAVA R, DUSAN B, MILAN T J. Effects of copper and Al₂O₃ particles on characteristics of Cu-Al₂O₃ composites [J]. Materials and Design, 2010, 31: 1962-1970.
- [24] SHEHATA F, FATHY A, ABDELHAMEED M. Preparation and properties of Al₂O₃ nanoparticle reinforced copper matrix composites by in situ processing [J]. Materials and Design, 2009, 30: 2756-2762.
- [25] 贾燕民, 丁秉钧. 制备弥散强化铜的新工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2000(2): 141-143.
- [26] 计玮, 陈艳. 微波场中利用溶胶凝胶法制备 Al₂O₃/Cu 复合材料[J]. 有色金属加工, 2010(6): 8-10.
- [27] PEREZ J F, MORRIS D G. Copper-Al₂O₃ composites prepared by reactive spray deposition [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(3): 231-235.
- [28] SINGERA R E. The principles of spray rolling of metals [J]. Met and Maetr, 1970(4): 246-256.
- [29] 郭明星, 汪明朴, 李周, 等. 原位复合法制备纳米粒子弥散强化铜合金研究进展[J]. 机械工程材料, 2005(4): 1-3.
- [30] SHEN Yutian, ZHU Jing, XU Yanji, et al. Fabrication of an in-situ nano Al₂O₃/Cu composite with high strength and high electric conductivity [J]. Rare Metals, 2005, 24: 46-54.
- [31] KONRAD C H, FUHRMANN L, VOLKL R, et al. In-

- ternal oxidation with significant contribution of oxygen diffusion through the oxide phase[J]. Corrosion Science, 2012, 63: 187-192.
- [32] KIM S H, LEE D N. Fabrication of alumina dispersion strengthened copper strips by internal oxidation and hot roll bonding[J]. Mater Sci Technol, 1999, 15: 352-354.
- [33] 李红霞, 田保红, 宋克兴, 等. 内氧化法制备 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(5): 64-68.
- [34] 李美霞, 罗骥, 郭志猛. 内氧化法制备纳米 Al_2O_3 弥散铜复合材料的研究[J]. 粉末冶金技术, 2011, 29(3): 214-217.
- [35] 刘平, 任凤章, 贾淑果, 等. 铜合金及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 316.
- [36] 林阳明, 宋克兴, 李红霞. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 复合材料强化机理研究[J]. 热加工工艺, 2005(4): 12-14.
- [37] 韩胜利, 田保红, 宋克兴, 等. Al_2O_3 弥散强化 Cu 基复合材料高温拉伸行为研究[J]. 材料开发与应用, 2004, 19(3): 4-7.

Research progress on $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite material

QIN Xiaodong^{1,2}, CAI Yixiang¹, HAN Shengli¹, LIU Sha²

1. P/M Department, Guangzhou Research Institute of Nonferrous Metals, Guangzhou 510650, China;

2. School of Material Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The preparing process and strengthening mechanism of Cu matrix composites strengthened by Al_2O_3 dispersion are reviewed in this paper. The preparation of internal oxidation of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composite material with high temperature properties and its influence factor have also been analyzed. Finally the existing problems of internal oxidation are presented.

Key words: $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ composites; internal oxidation; dispersion strengthened mechanism; elevated temperature property