文章编号: 1004-0609(2013)11-3165-06

# 强磁场时效对 Cu-Fe-Ag 合金组织和性能的影响

刘克明1,陆德平1,周海涛2,魏仕勇1,刘秋香1,余玖明1

(1. 江西省科学院 江西省铜钨新材料重点实验室,南昌 330029;2. 中南大学 材料科学与工程学院,长沙 410083)

摘 要:采用超导强磁场真空热处理炉对 Cu-14Fe-0.1Ag 合金进行不同的时效处理,利用扫描电子显微镜、能谱 仪、维氏硬度计及数字微欧计研究了强磁场时效对合金微观组织、固溶度、力学性能及导电性能的影响。结果表 明:在 Cu-14Fe-0.1Ag 合金的时效处理过程中,施加强磁场可促进 Fe 枝晶的球化,随着磁场强度的增加,Fe 枝晶的球化效应更加明显,Fe 在 Cu 基体中的固溶度逐渐减小:在 10 T 强磁场下,合金的较佳时效温度为 500 ℃;在 10T 和 500 ℃温度下时效 1 h,可获得强度和导电性匹配良好的合金材料。 关键词:Cu-Fe-Ag 合金;强磁场;时效处理;组织;性能 中图分类号:TG146 文献标志码:A

# Influence of high magnetic field aging on microstructure and properties of Cu-Fe-Ag alloy

LIU Ke-ming<sup>1</sup>, LU De-ping<sup>1</sup>, ZHOU Hai-tao<sup>2</sup>, WEI Shi-yong<sup>1</sup>, LIU Qiu-xiang<sup>1</sup>, YU Jiu-ming<sup>1</sup>

(1. Jiangxi Key Laboratory for Advanced Copper and Tungsten Materials,

Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330029, China;

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

**Abstract:** The aging treatment of Cu-14Fe-0.1Ag alloy was investigated by a vacuum heat treating furnace under a high magnetic field. The microstructure, solid solubility of Fe in Cu matrix, mechanical and electrical properties were investigated by scanning electron microscope, energy spectrometer, Vickers hardness tester and micro-ohmmeter. The results indicate that high magnetic field promotes the spheroidization of Fe dendrites; the spheroidization intensifies and the solid solubility decreases with the magnetic induction intensity increasing; the optimum temperature of aging treatment is 500  $^{\circ}$ C under a high magnetic field of 10 T; and the Cu-14Fe-0.1Ag alloy has a good combination property of strength and conductivity after aging treatment under 10 T at 500  $^{\circ}$ C for 1 h.

Key words: Cu-Fe-Ag alloy; high magnetic field; aging treatment; microstructure; property

近年来,低温超导技术的日趋成熟使得人们可以 获得10T以上的超导稳恒强磁场,从而有机会对一直 被忽略的非磁性物质的磁化力进行利用。通常情况下, 非磁性物质受磁化力的作用效果完全可以被忽略,但 在10T数量级的强磁场作用下,非磁性物质所受到的 磁化力相当于强磁性物质在 0.01 T 下受到的磁化力, 将对其产生非常明显的影响。这些强磁现象的出现使 得磁场的应用范围有可能跳出传统的铁磁性材料范畴 而进入更广阔的材料领域,是磁场在材料科学中应用 的重大突破。与普通磁场相比,清洁、无接触、高密

收稿日期: 2012-12-31; 修订日期: 2013-04-18

通信作者: 刘克明, 副研究员, 博士; 电话: 0791-88176237; E-mail: jokeyliu@163.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50961006); 江西省自然科学基金重点资助项目(20133BAB20008); 江西省自然科学基金资助项目 (20114BAB206016); 江西省铜钨新材料重点实验室开放基金资助项目(2010-WT-01; 2011-TW-02); 江西省科学院青年科技创新项目 (2012-YQC-09)

度能源的强磁场具有高达 10 T 数量级的磁感应强度, 不仅可作用于物质的宏观尺度,而且可传递到物质的 原子尺度,通过影响原子的迁移、匹配及排列等微观 行为改变材料的组织和性能。强磁场"不接触加工" 而控制材料微观组织的优势以及非铁磁性材料在强磁 场中表现出的一系列显著强磁特性,使得有关强磁场 在材料科学中应用的理论和实验研究迅速增多,并获 得了许多有关强磁场对金属材料、陶瓷材料、高分子 材料和复合材料等微观组织和性能的影响等方面的有 益成果<sup>[1-6]</sup>。

高强度高导电铜基材料是电子、信息、交通、能 源、冶金及机电等领域不可缺少的关键材料,广泛应 用于制造集成电路引线框架、电气化铁路接触导线、 高强磁场线圈、电阻焊电极、大功率异步牵引电动机 转子及大型高速涡轮发电机转子的导线等[7-8]。其中, Cu-Fe 系合金因其低廉的成本深受国内外研究工作者 的广泛关注。但高温下 Fe 在 Cu 中的固溶度较高,低 温下的扩散速度慢,导致室温下 Cu 基体中固溶的 Fe 含量远远大于相平衡浓度,同时,固溶Fe原子对基体 电导率的损害大,Fe的质量分数每增加1%可使电导 率降低 9.2 μΩ·cm<sup>[9-11]</sup>,导致 Cu-Fe 合金的电导率通常 不足 40%(IACS)。因此,如何降低 Fe 在 Cu 基体中的 固溶度,促进Fe从基体中析出,是该系合金的研究重 点。已有的研究中往往采用长时间扩散退火来改善材 料的电导率,但由于热处理过程中 Fe 粒子粗化等原 因,致使材料的强度降低<sup>[12-13]</sup>,因此,寻求新的工艺 手段以获得高强度和高电导率的良好匹配一直是该领 域的研究热点。强磁场作为一种极端物理场条件,能 较明显地影响合金的热处理过程,从而改善材料的组 织和性能,尤其是对无扩散型马氏体转变、高温扩散 型相变及金属再结晶等固态相变影响显著[14-17]。

前期研究表明<sup>[10]</sup>,在 Cu-14Fe 合中金添加微量 Ag 元素可改善材料的强度和导电性能。因此,本文作 者以 Cu-14Fe-0.1Ag 合金为基础,研究强磁场对 Cu-Fe 系合金微观组织及其导电、强度等性能的影响,优化 Cu-Fe 合金的热处理制度,为高强高导铜基复合材料 的研究与开发提供必要的理论和应用科学基础。

## 1 实验

Cu-14Fe-0.1Ag 合金采用电解铜(99.97%,质量分数)、工业纯铁(99.94%)和工业纯银(99.94%)在真空中频感应炉中熔炼,采用石墨模浇铸成 d36 mm 的合金铸锭。原始铸锭经表面去皮加工后,在气氛保护炉中

进行(950 ℃,3 h)的固溶处理,然后将试样切割成若 干直径为 9.6 mm、长度为 100 mm 的圆柱体,经表面 打磨并酸洗后装入内径为 10 mm 的氧化铝坩埚内,并 放置于超导强磁场真空热处理炉中,使试样中心、磁 感应强度 *B*最大处和真空电阻加热炉中心三者位置保 持一致,进行不同温度、不同时间及不同磁场强度下 的时效实验。

实验中所用磁场强度分别为 0、5 和 10 T,以 5℃/min 的加热速率将试样分别加热到 400、450、500 和 550℃,保温 1 h,随炉冷却至室温后取样。将所得 试样沿纵截面剖开,采用标准金相制备方法制样,利用 JSM-6360LV 扫描电子显微镜观察试样的显微组织;采 用能谱仪分析 Fe 在基体中的分布;采用 HV-10 型维 氏硬度计在室温下测量材料的显微硬度;采用 ZY9987 数字微欧计在室温下测定材料的电阻率。纯 Cu 的标准 电导率为 100%(IACS),对应的电阻率为 1.7241  $\mu\Omega$ ·cm(国际标准退火铜),试样的电导率等于 (172.41/ $\rho$ )%(IACS),其中 $\rho$ 为试样的电阻率, $\mu\Omega$ ·cm。

# 2 结果与讨论

### 2.1 合金的显微组织

图 1(a)所示为 Cu-14Fe-0.1Ag 合金的铸态显微组 织, Cu 基体上分布着第二相 Fe 枝晶;图 1(b)、(c)和 (d)所示分别为 Cu-14Fe-0.1Ag 合金在不同磁场强度 下经(500 ℃,1 h)时效处理后的显微组织。由图 1 可 见,经不同的磁场时效处理后,Cu-14Fe-0.1Ag 合金 的第二相 Fe 枝晶发生了不同程度的球化现象;对不同 磁场强度时效处理后的 Fe 枝晶形态进行对比分析,可 发现随着磁场强度的增加,第二相 Fe 枝晶球化的趋势 更加明显。改变时效温度和时间对合金进行不同磁场 强度下的时效处理,发现显微组织的变化趋势具有类 似结果。表明强磁场对 Cu-14Fe-0.1Ag 合金的第二相 Fe 枝晶具有球化作用,且随着磁场强度的增加球化效 应更加显著。

由 Cu-Fe 合金相图可知<sup>[9]</sup>, 在包晶反应温度 1 096 ℃以下时, Fe 在 Cu 中的最大固溶度约为 4.1%, 室温 下两者几乎不互溶。采用能谱仪分析了铸态及不同磁 场时效处理后 Cu-14Fe-0.1Ag 合金基体中固溶的 Fe 含量。为了提高测量精度,选用 4 000 倍的放大倍率 进行选区分析,选定的区域为 10 µm×5 µm 的矩形框, 选取 6 个测量区域,以其算术平均值作为 Fe 在基体中 的含量,结果见表 1。由表 1 可见,随着磁场强度的 增加, Fe 在基体中的含量逐渐减小。在 Cu-14Fe-0.1Ag



图1 Cu-14Fe-0.1Ag 合金的显微组织

**Fig. 1** Microstructures of Cu-14Fe-0.1Ag alloys: (a) As-cast; (b) Aging with (0 T, 500 °C, 1 h); (c) Aging with (5 T, 500 °C, 1 h); (d) Aging with (10 T, 500 °C, 1 h)

表 1 不同磁场强度下 Fe 在 Cu-14Fe-0.1Ag 合金基体中的 质量分数

**Table 1** Mass fraction of Fe in matrix of Cu-14Fe-0.1Agalloy under different magnetic induction intensities(%)

As-cast	0 T aging	5 T aging	10 T aging
3.9	2.6	2.3	2.2

铸态合金中,由于冷却速度较快,基体中的 Fe 含量为 3.9%,接近最大固溶度;而经(10 T,500 ℃,1 h)时 效处理的 Cu-14Fe-0.1Ag 合金,其基体中的 Fe 含量 仅为 2.2%,表明在时效处理过程中施加强磁场可有效 促进 Fe 从基体中析出,减小 Fe 在 Cu 基体中的固溶 度。Fe 原子的有效析出不仅有利于材料强度的提高,而且固溶 Fe 的减少将使材料电导率大幅度提升。

在强磁场的作用下,磁场对弱磁性热力学系统的磁 化能已不可忽略,特别是当析出相为铁磁性物质时,原 子的磁化作用引起的势垒ΔG改变将更加显著。由于强 磁场的施加,系统内原子跃迁激活能将发生改变<sup>[18]</sup>:

$$\Delta G_m = \Delta G + U \tag{1}$$

式中: Δ*G* 和Δ*G*<sub>m</sub>分别为强磁场施加前后原子的势垒; *U* 为磁化能。顺磁性物质单位体积磁化能可表示为

$$U_p = -\frac{1}{2}\mu_0\chi H^2 \tag{2}$$

式中: μ<sub>0</sub> 为真空磁导率; χ 为磁化率; H 为外部磁感 应强度。而铁磁性物质单位体积磁化能可表示为

$$U_f = -\mu_0 (H - \frac{1}{2}\mu_0 M_s) M_s$$
(3)

式中: *M*<sub>s</sub> 为饱和磁化强度。由式(2)和(3)可知,无论 是顺磁性原子还是铁磁性原子,在强磁场作用下其单 位体积的磁化能均为负值。即强磁场的施加,使扩散 原子的跃迁激活能减小,克服势垒的能力增加,有利 于原子的析出。这与通过能谱仪对 Fe 在 Cu 基体中含 量的分析结果相吻合。

### 2.2 合金的力学性能

图 2 所示为 Cu-14Fe-0.1Ag 合金在外加 10 T 强磁 场作用下经不同温度等时时效 1 h 后材料维氏硬度的 变化情况。由图 2 可见, Cu-14Fe-0.1Ag 合金经 400~550 ℃不同温度下等时时效后,材料的维氏硬度 随时效温度的提高而逐渐上升,在 500 ℃附近产生维 氏硬度峰值,温度大于 550 ℃后,材料的维氏硬度迅 速下降。材料硬度变化的主要原因是第二相 Fe 的析 出、析出 Fe 粒子的粗化以及材料本身的回复和再结 晶等。在 500 ℃以下时效处理 1 h 后, Cu-14Fe-0.1Ag 合金的微观结构内部缺陷减少,尤其是空位减少;而 且随着时效温度升高,析出 Fe 颗粒的密度持续增加, 中国有色金属学报



**图 2** Cu-14Fe-0.1Ag 合金经 10 T 强磁场等时时效 1 h 后维 氏硬度变化



产生的弹性应力场所引起的化学硬化和对位错的阻碍 作用不断增大,使位错增殖;此外,析出初期的细小 Fe颗粒具有高的界面面积,而材料的回复影响较小, 因此材料的强度逐渐提高。但随着时效温度的进一步 上升,尤其在 550 ℃以上时,材料的再结晶程度大大 增加,析出粒子聚集粗化,间距增大,强化效果减弱, 材料的强度开始下降。

### 2.3 导电性能

图 3 所示为 Cu-14Fe-0.1Ag 合金在外加 10T 强磁 场作用下经不同温度等时时效 1 h 后材料电导率的变 化情况。由图 3 可见, Cu-14Fe-0.1Ag 合金经 400~550



**图 3** Cu-14Fe-0.1Ag 合金经 10 T 强磁场等时时效 1 h 后电 导率的变化



℃不同温度下等时时效后,材料的电导率随时效温度 的提高而逐渐上升,在500℃附近产生电导率峰值; 温度大于550℃后,材料的电导率有所降低。材料电 导率变化的主要原因是第二相 Fe 的析出和固溶变化 引起的。Cu-14Fe-0.1Ag 合金在500℃以下时效时, 固溶在 Cu 基体中的 Fe 原子逐渐减少;随着固溶 Fe 原子的时效析出,基体中固溶 Fe 原子含量降低,使材 料电导率迅速上升;而随着温度升高,尤其是温度超 过550℃以后,Cu 基体中 Fe 的平衡固溶度明显增大, 基体中析出 Fe 的减少或者析出 Fe 粒子的重新溶解等, 都会降低材料的电导率。

表 2 列出了 Cu-14Fe-0.1Ag 合金在铸态及不同条件时效处理后的电阻率。由表 2 可知,时效处理后材料的电阻率明显降低,而且随着磁场强度的提高,材料的电阻率不断下降。这主要是因为基体中固溶 Fe 含量减少。研究表明<sup>[19-20]</sup>, Cu 合金的电阻率与组成相的单相电阻率、体积分数、尺寸及分布等有关。 Cu-14Fe-0.1Ag 合金经不同规范的时效处理后,铜基体、Fe 相的体积分数、尺寸及分布等均变化不大,而且 Fe 相的电阻率变化小,因此,Cu 基体的单相电阻率是影响 Cu-14Fe-0.1Ag 合金电阻率变化的最主要原因。Cu 基体的单相电阻率可表示为<sup>[21-22]</sup>:

 $\rho_{\rm M} = \rho_{\rm PHO} + \rho_{\rm DIS} + \rho_{\rm INT} + \rho_{\rm IMP} \tag{4}$ 

式中: $\rho_{PHO}$ 为声子散射电阻率; $\rho_{DIS}$ 为位错散射电阻率; $\rho_{INT}$ 为界面散射电阻率; $\rho_{IMP}$ 为杂质散射电阻率。

研究表明<sup>[19,23]</sup>,在形变之前,时效处理中声子散 射电阻率  $\rho_{PHO}$ 不变,位错散射电阻率  $\rho_{DIS}$ 变化很小。 时效处理后,单位 Cu 基体内析出 Fe 粒子引起的界面 变化很小,界面散射电阻率  $\rho_{INT}$ 的变化也不大。因此, Cu-14Fe-0.1Ag 合金及时效处理后,材料电阻率的差 异主要是由 Cu 基体中固溶 Fe 引起的杂质散射电阻率  $\rho_{IMP}$ 变化所致。固溶 1%Fe, Cu 基体的电阻率就增加 0.92 μΩ·cm。由此可知,根据表 1 中所列的基体中 Fe

**表 2** Cu-14Fe-0.1Ag 合金在不同磁场强度下经 500 ℃时效 1 h 后的电阻率

Table 2	Resistivity of Cu-14Fe-0.1Ag alloys after aging at 500
°C for 1 h	under different magnetic induction intensities ( $\mu\Omega{\cdot}cm)$

Magnetic induction	Resistivity/(μΩ·cm)		
intensity/T	Measured	Calculated	
As-cast	4.1	_	
0	3.0	2.90	
5	2.7	2.63	
10	2.6	2.54	

含量可计算出由 Fe 含量差异引起的电阻率变化,从而 得出经不同磁场强度时效后 Cu-14Fe-0.1Ag 合金的电 阻率,结果同样列于表 2。由表 2 可见, Cu-14Fe-0.1Ag 合金经不同磁场强度时效处理后电阻率的测量值和计 算值基本吻合。

## 3 结论

1) Cu-14Fe-0.1Ag 合金的铸态显微组织为 Cu 基体上较均匀地分布着第二相 Fe 枝晶,经强磁场时效处 理后,Fe 枝晶被球化,且随着磁场强度的增加,Fe 枝晶被球化的现象更加显著,Fe 在 Cu 基体中的含量 逐渐减小。

2) 在 10 T 强磁场下,研究不同时效处理温度对 材料强度和导电性能的影响发现, 500 ℃为 Cu-14Fe-0.1Ag 合金的较佳时效温度。

3) Cu-14Fe-0.1Ag 合金在外加10T强磁场的作用 下,经 500 ℃时效1h后,可获得较好的硬度和电导 率组合。

### REFERENCES

 王舒扬,李廷举,金俊泽.强磁场热处理对烧结 NdFeB 磁体 磁性能和显微组织的影响[J].稀有金属材料与工程,2008, 37(5):896-899.

WANG Shu-yang, LI Ting-jü, JIN Jun-ze. Effect of high-magnetic-field annealing on the magnetic properties and microstructure of sintered NdFeB magnets[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(5): 896–899.

- [2] LIU T, WANG Q, ZHANG H F, WANG K, PANG X J, HE J C. Effects of high magnetic fields on the microstructures and grain boundaries in binary Al-Li alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 469(1/2): 258–263.
- [3] ZHU W W, REN Z M, REN W L, ZHONG Y B, DENG K. Effects of high magnetic field on the unidirectionally solidified Al-Al<sub>2</sub>Cu eutectic crystal orientations and the induced microstructures[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 441(1/2): 181–186.
- [4] YASUDA H, OHNAKA I, FUJIMOTO S, TAKEZAWA N, TSUCHIYAMA A, NAKANO T, UESUGI K. Fabrication of aligned pores in aluminum by electrochemical dissolution of monotectic alloys solidified under a magnetic field[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(4): 527–532.
- [5] LI X, REN Z M, FAUTRELLE Y. Effect of a high axial magnetic field on the microstructure in a directionally solidified Al-Al<sub>2</sub>Cu eutectic alloy[J]. Acta Materialia, 2006, 54(20): 5349–5360.

- [6] 马国军,吴承伟,周文龙,张鹏程,季首华,郭建亭.强磁场 对 Ni33Al28Cr5.5Mo0.5Hf 合金微观组织及室温力学性能的 影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(3): 367-370.
  MA Guo-jun, WU Cheng-wei, ZHOU Wen-long, ZHANG Peng-cheng, JI Shou-hua, GUO Jian-ting. The influence of high magnetic field on the mechanical property and microstructure of Ni33Al28Cr5.5Mo0.5Hf alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(3): 367-370.
- [7] LU D P, WANG J, ZENG W J, LIU Y, LU L, SUN B D. Study on high-strength and high-conductivity Cu-Fe-P alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 421(1/2): 254–259.
- [8] SUZUKI S, SHIBUTANI N, MIMURA K, ISSHIKI M, WASEDA Y. Improvement in strength and electrical conductivity of Cu-Ni-Si alloys by aging and cold rolling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 417(1/2): 116–120.
- [9] 高海燕, 王 俊, 疏 达, 孙宝德. Cu-Fe-Ag 原位复合材料的 组织和性能[J]. 复合材料学报, 2006, 23(6): 120-126.
  GAO Hai-yan, WANG Jun, SHU Da, SUN Bao-de. Microstructure and properties of Cu-Fe-Ag in-situ composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(6): 120-126.
- [10] LIU K M, LU D P, ZHOU H T, ATRENS A, ZOU J, YANG Y L, ZENG S M. Effect of Ag micro-alloying on the microstructure and properties of Cu-14Fe in situ composite[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(18/19): 4953–4958.
- [11] GAO H Y, WANG J, SHU D, SUN BD. Effect of Ag on the microstructure and properties of Cu-Fe in situ composites[J]. Scripta Materialia, 2005, 53(10): 1105–1109.
- [12] SONG J S, HONG S I, PARK Y G. Deformation processing and strength/conductivity properties of Cu-Fe-Ag microcomposites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 388(1): 69–74.
- [13] HONG S I, HILL M A. Microstructure and conductivity of Cu-Nb microcomposites fabricated by the bundling and drawing process[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(10): 2509–2515.
- [14] ZUO X W, WANG E G, HAN H, ZHANG L, HE J C. Magnetic properties of Fe-49%Sn monotectic alloys solidified under a high magnetic field[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 492(1/2): 621–624.
- [15] LI X, FAUTRELLE Y, REN Z M, ZHANG Y D, ESLING C. Effect of a high magnetic field on the Al-Al<sub>3</sub>Ni fiber eutectic during directional solidification[J]. Acta Materialia, 2010, 58(7): 2430–2441.
- [16] HE L Z, LI X H, ZHU P, CAO Y H, GUO Y P, CUI J Z. Effects of high magnetic field on the evolutions of constituent phases in 7085 aluminum alloy during homogenization[J]. Materials Characterization, 2012, 71: 19–23.
- [17] LI Z F, DONG J, ZENG X Q, LU C, DING W J, REN Z M. Influence of strong static magnetic field on intermediate phase growth in Mg-Al diffusion couple[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 440(1/2): 132–136.

- [18] 左小伟,王恩刚,张 林,赫冀成.强磁场对 Cu-20%Fe 合金 沉积处理的影响[J].东北大学学报,2010,31(1):72-75.
  ZUO Xiao-wei, WANG En-gang, ZHANG Lin, HE Ji-cheng. Effect of high-intensity magnetic field on precipitation treatment of Cu-20%Fe alloy[J]. Journal of Northeastern University, 2010, 31(1):72-75.
- [19] 姚再起,葛继平,刘书华,李海山,李明生. Cu-11.5Fe 合金的 导电性[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(5): 1912-1917.
  YAO Zai-qi, GE Ji-ping, LIU Shu-hua, LI Hai-shan LI Ming-sheng. Conductivity of Cu-11.5%Fe alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(5): 1912-1917.
- [20] HERINGHAUS F, SCHNEIDER-MUNTAU H J, GOTTSTEIN G. Analytical modeling of the electrical conductivity of metal matrix composites: application to Ag-Cu and Cu-Nb[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 347(1/2): 9–20.
- [21] 刘克明,周海涛,陆德平, ATRENS A, 邹 晋, 陈志宝, 谢仕

芳. 微量 Ag 对形变 Cu-Fe 原位复合材料组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(6): 62-67.

LIU Ke-ming, ZHOU Hai-tao, LU De-ping, ATRENS A, ZOU Jin, CHEN Zhi-bao, XIE Shi-fang. Effect of trace Ag addition on microstructure and properties of Cu-Fe in-situ composites[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2010, 31(6): 62–67.

- [22] LIU K M, LU D P, ZHOU H T, ATRENS A, CHEN Z B, ZOU J, ZENG S M. Influence of Ag micro-alloying on the microstructure and properties of Cu-7Cr in situ composite[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 500(2): L22–L25.
- [23] HONG S I, HILL M A. Microstructural stability of Cu-Nb microcomposite wires fabricated by the bundling and drawing process[J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 281(1/2): 189–197.

(编辑 何学锋)