

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.01.018

稀土 La 的添加对 Cu-Cr-Zr 合金组织与性能的影响

杨 柳, 杨晓红, 康丹丹, 邹军涛, 肖 鹏

(西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文采用真空电弧熔炼-水冷铜坩埚法制备了 Cu-Cr-Zr-La 合金,并在 450 °C 对合金进行了时效处理,研究了 Cr 含量及稀土 La 的添加对合金组织和性能的影响。研究表明,Cu-Cr-Zr 合金的导电率随着 Cr 含量的增加呈下降趋势,其布氏硬度随着 Cr 含量的增加先增加后减小。合金中加入微量稀土元素 La 后,组织细化,等轴状晶粒所占比例提高。时效态 Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La 合金的硬度和导电率明显提高,分别达到了 143.1HB 和 78.6%IACS。X 射线衍射(XRD)分析表明,经时效处理后,Cu 的晶格参数有所减小,其衍射峰向右偏移,晶格畸变程度明显减小。

关键词: 铜铬锆合金; 稀土元素; 真空电弧熔炼; 时效处理

中图分类号: TG146.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)01-0110-06

Effect of La addition on microstructure and properties of Cu-Cr-Zr alloy

YANG Liu, YANG Xiaohong, KANG Dandan, ZOU Juntao, XIAO Peng

(School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The Cu-Cr-Zr-La alloys were prepared by the vacuum arc melting and water-cooling copper crucible method, and then aged at 450 °C. The effects of Cr content and La addition on the microstructure and properties of these alloys were investigated. The results show that the electrical conductivity decreases with the increase of Cr content, and the hardness increased firstly and then decreased with the increase of Cr content. After the addition of element La, the microstructures of Cu-Cr-Zr alloys were refined with the ratio of equiaxed grains increasing. Additionally, the hardness and electrical conductivity of Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La alloy were improved obviously, which reached 143.1HB and 78.6% IACS, respectively. The XRD analysis showed that the lattice parameter of Cu decreased, that the diffraction peak shifted to the right and that the lattice distortion decreased after aging treatment.

Key words: Cu-Cr-Zr alloy; rare earth element; vacuum arc melting; aging treatment

Cu-Cr-Zr 合金因其良好的导电性能和较高的强度,广泛地应用于大规模集成电路引线框架、电气工程开关导电触头和电气化铁路接触导线等工程中^[1-4]。随着我国交通、电力、通讯等行业的快速发展和技术水平的不断提高,对高强高导铜合金的材料特性提出了更高的要求,工程上一直希望能够获得各向同性、强度超过 600 MPa,同时导电率大于 80%IACS,可满足规模化生产的铜合金^[5]。王松等^[6]对经连续铸造、固溶和冷拉拔的 Cu-1.5Cr-0.2Zr 合金进行时效处理,研究了时效温度和时效时间对该合金组织和性能的影响,获得了显微硬度和导电率

分别为 241HV 和 72.5%IACS 的高性能合金。解浩峰等^[7]研究了时效热处理工艺对 Cu-0.22Cr-0.05Zr-0.05Sn 合金析出行为的影响,研究发现,在该合金中存在 Cr 和 Cu₄Zr 两种析出相。张毅等^[8]通过真空感应熔炼制备了 Cu-0.4Cr-0.15Zr-0.05Ce 合金,经过 80%冷变形并在 300 °C 下时效处理 16 h,使得合金硬度和导电率达到 170HV 和 66%IACS。对于 Cu-Cr-Zr 合金第四组元的添加,目前主要集中在 Mg、Sn、Ti、Ce 等元素,对于稀土元素 La 的研究并不成熟。目前,Cu-Cr-Zr 合金主要通过感应熔炼法来制备。本实验采用真空电弧熔炼-水冷铜坩埚

收稿日期: 2016-12-22

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程重点实验室资助项目(2014SZS08-K02);陕西省教育厅重点实验室科研计划资助项目(14JS065);陕西省重点学科建设专项资金资助项目(2011HBSZS009)

作者简介: 杨柳,女,硕士生,研究方向为高强高导铜合金。E-mail:tzyl326@163.com

通讯作者: 杨晓红,女,副教授,博士,研究方向为电工材料与熔渗技术。E-mail:yangxh@xaut.edu.cn

法制备铜合金,提高了合金冷却速度,改善了合金性能。

本文首先采用真空电弧熔炼法制备了不同 Cr 含量的 Cu-Cr-Zr 合金,研究了 Cr 含量对合金性能的影响。在此基础上,通过向合金中添加微量稀土元素 La,研究其对 Cu-Cr-Zr 合金铸态组织、性能的影响规律,并通过 XRD 分析计算不同状态下合金的固溶度,探讨时效处理对合金导电率、硬度的影响机理。

1 实验材料及方法

实验用原材料为:纯度 99.9% 的铜、纯度 99.9% 的 Cr 粒、纯度 99.9% 的 Zr 粒和纯度 99.5% 的 La 块。首先采用真空电弧熔炼法在氩气氛保护下,分别制备 Cu-20La 和 Cu-40Zr 中间合金。再将它们放置于电弧熔炼炉的水冷铜坩埚中,抽真空到 4×10^{-3} Pa 以上,然后通氩气作为保护气体,反复熔炼 4~5 次,每次熔炼 1.5~2 min,直至熔炼均匀。制备名义成分为 Cu-xCr-0.15Zr (x 取 0.7、1.2、2.3、4, wt%) 的三元合金,分析不同 Cr 含量对合金导电率和硬度的影响。然后,选择性能较好的合金添加稀土元素 La,采用电弧熔炼法制备 Cu-xCr-0.15Zr-0.1La 合金,并对其进行时效处理,时效温度为 450 °C,保温时间为 4 h。

采用 FQR-7501A 型涡流导电仪测定试样的导电率,通过 HB3000 型布氏硬度计测量合金的硬度,选用直径为 5 mm 的淬火钢球,加载压力为 250 kgf,保压 30 s,每个合金试样均测量 5 次取平均值。试样经过机械抛光和化学腐蚀(腐蚀液为 $\text{FeCl}_3 + \text{HCl} + \text{H}_2\text{O}$),在 OLMPLUS-GX71 倒置金相显微镜和 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜下,对合金进行显微组织分析,并结合能谱仪(EDS)进行微区成分分析。借用 7000S 型 X 射线衍射仪分析不同合金的相组成,根据 Cu 衍射峰的偏移状况,分析不同合金的固溶度变化,衍射角范围为 $30^\circ \sim 80^\circ$,扫描速度为 $8^\circ/\text{min}$,步长为 0.02° 。

2 结果与讨论

2.1 不同 Cr 含量 Cu-Cr-Zr 合金的性能

图 1 是采用真空电弧熔炼制备的 Cu-Cr-Zr 合金在铸态和时效态时的导电率和布氏硬度的变化曲线。从图 1 可知,随着 Cr 含量的增加,铸态合金的导电率呈下降趋势,硬度呈上升趋势。由于在电弧熔炼过程中,水冷铜坩埚具有较大的冷却速度,第二相元素在基体内的固溶度远大于普通铸造方法所得的合金,对其进行固溶处理,反而会降低固溶度,因

此,在本研究中,直接对合金样品进行时效处理。由图 1 可以看出,经过时效处理后,合金的导电率、硬度显著提高。这是因为时效处理使得合金中过饱和的固溶体发生脱溶,Cr、Zr 元素以一定的形式和形态从 Cu 中析出,并分布于基体中,产生强烈的弥散强化作用,从而改善合金的硬度和强度^[9]。而固溶入铜基体中的 Cr 和 Zr 从铜基体中快速析出,从而降低了电子散射的概率,导电率随之显著提高。但当 Cr 含量过高时,部分 Cr 相团聚长大,致使合金中弥散析出相减少,取而代之的是粗大的 Cr 颗粒,使合金的组织均匀性变差,最终导致合金性能恶化。综合考虑导电率和硬度的变化趋势,后续不再对 Cu-3Cr-0.15Zr 和 Cu-4Cr-0.15Zr 合金进行研究,主要集中在研究 Cu-(0.7~2)Cr-0.15Zr 合金在添加稀土 La 之后,其组织与性能的变化。

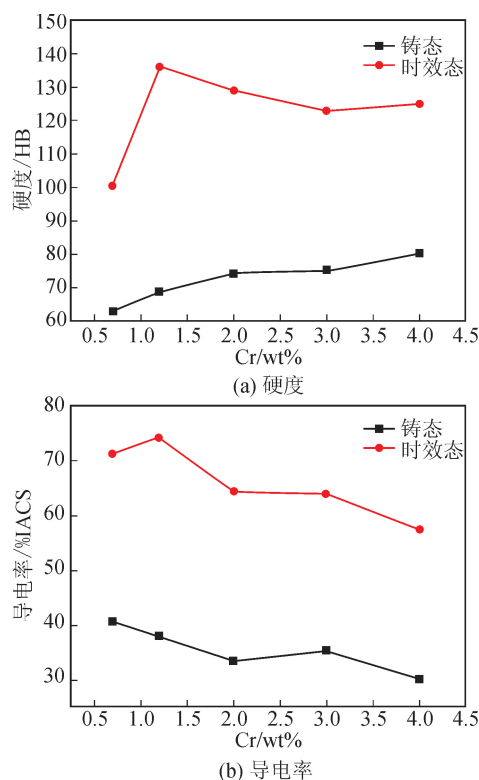


图 1 不同状态下 Cu-Cr-Zr 合金的导电率和硬度
Fig. 1 Conductivity and hardness of Cu-Cr-Zr alloy in different states

2.2 稀土元素对 Cu-Cr-Zr 合金组织的影响

图 2 为添加稀土元素前后,不同 Cr 含量的 Cu-xCr-0.15Zr 和 Cu-xCr-0.15Zr-0.1La 合金的铸态组织。从图中可以明显看出,在相同的冷却条件下,添加微量稀土元素 La 的合金组织相对更加细小,等轴状晶粒所占比例较高。随着 Cr 含量的增加,共晶相有所增多,基体上有少量亮白色的颗粒。Cr 在 Cu 中的极限固溶度为 0.7 wt% ($1\,076.2^\circ\text{C}$)^[10],

由于本实验采用水冷铜坩埚,冷却速度较快,所以在 Cu-0.7Cr-0.15Zr 合金组织中并没有明显的初生相 Cr 的生成。而在 Cu-1.2Cr-0.15Zr 和 Cu-2Cr-0.15Zr 合金中可以看到,在基体和晶界处分布着细小的 Cr 颗粒,这是由于在凝固过程中,冷却速度比合金元素在基体中的扩散速度快,以及固-液界面前沿成分过冷,导致合金元素来不及扩散,枝晶间合金元素偏聚,产生偏析,且随着 Cr 含量的增加,合金基体中富 Cr 区域变大,偏析进一步严重,初生 Cr 相所占比列也有所提高。与未添加 La 的合金组织相比,图 2(b)、(d)和(f)所示的合金组织晶粒更加细小,这说明微量稀土元素添加到 Cu-Cr-Zr 合金中起到了细化晶粒的作用,使得合金微观组织更加均匀、细小。由图 2 还可以看出,合金中等轴状晶粒所占比例有所增加,这是由于稀土元素 La 与 Cu 形成化合物,成为了优先形核的核心,增加了形核的数量,而增加液相中的晶核数量以及阻滞晶粒定向生长,有利于消除柱状晶组织,获得细小等轴晶组织^[11]。

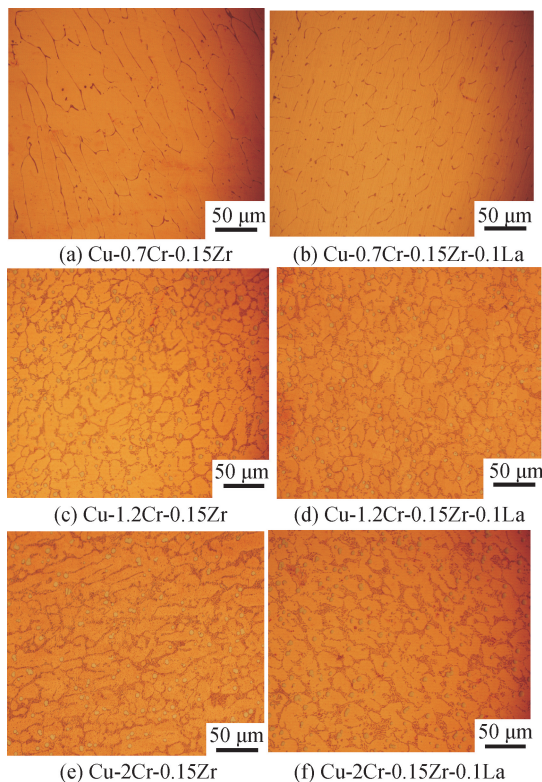


图 2 Cu-Cr-Zr 合金和 Cu-Cr-Zr-La 合金铸态金相显微组织
Fig. 2 Microstructure of as-cast microstructure of Cu-Cr-Zr alloy and Cu-Cr-Zr-La alloy

图 3 分别为铸态 Cu-0.7Cr-0.15Zr 合金和 Cu-0.7Cr-0.15Zr-0.1La 合金的扫描电镜组织照片。对合金的铸态组织中的不同区域进行了 EDS 能谱分析,结果如表 1 所示。

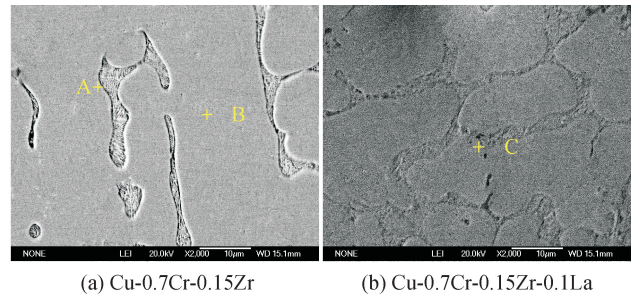


图 3 铸态 Cu-0.7Cr-0.15Zr 和 Cu-0.7Cr-0.15Zr-0.1La 合金组织
Fig. 3 Microstructure of as-cast Cu-0.7Cr-0.15Zr and Cu-0.7Cr-0.15Zr-0.1La alloy

表 1 图 3 中不同特征点的能谱分析
Tab. 1 Analysis of energy spectrum in different feature points in Fig. 3

特征点	Cu/wt%	Cr/wt%	Zr/wt%	La/wt%
A	98.77	1.15	0.08	0
B	99.19	0.73	0.08	0
C	81.65	1.20	0.12	17.03

分析发现,特征点 B 处为合金基体,含有少量 Cr 和 Zr 元素;特征点 A 和 C 处 Cr 含量分别达到了 1.15% 和 1.20%,而 Cu-Cr 共晶成分的 Cr 含量为 1.28%,因此可以认为,特征点 A、C 均为 Cu-Cr 共晶组织。而由特征点 C 处的能谱分析结果可以得出,稀土元素 La 主要在枝晶间处分布。稀土 La 的添加使得晶粒由粗大的柱状晶变为细小柱状晶与等轴晶的混晶组织;还改变了 Cu-Cr-Zr 合金中共晶组织的连续网状分布形态。凝固过程中,由于溶质再分配,在凝固界面前沿产生了稀土元素的富集,产生成分过冷,促使 α -Cu 产生更多的分支。这些分支相互连接,把剩余的液相分割成无数封闭孤立的细小液岛,这些封闭孤立的微小区域限制了共晶相生长,从而改变了最后凝固的 Cu-Cr 共晶组织分布形态^[12,13]。

图 4 是 Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La 合金的扫描电子显微镜(SEM)照片。

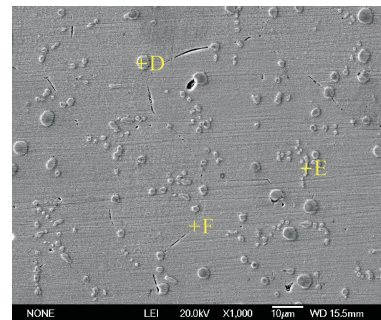


图 4 Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La 合金的 SEM 照片
Fig. 4 SEM image of the microstructure Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La alloy

表 2 为图 4 中不同特征点对应的 EDS 能谱分析结果。由图 4 可知,基体上均匀地分布着少量球形颗粒物(如特征点 D),由 EDS 分析结果可以看出,其主要为初生 Cr 相;特征点 E 处的细小颗粒主要为富 Zr 相;F 点处为合金基体。

表 2 图 4 中不同特征点的能谱分析
Tab. 2 Analysis of energy spectrum in different feature points in Fig. 4

特征点	Cu/wt%	Cr/wt%	Zr/wt%	La/wt%
D	10.87	89.13	0	0
E	76.21	0.60	23.19	0
F	99.87	0.86	0.13	0.04

2.3 稀土元素对 Cu-Cr-Zr 合金性能的影响

表 3 列出了不同状态下 Cu-xCr-0.15Zr 合金和 Cu-xCr-0.15Zr-0.1La(x 取 0.7、1.2、2)合金的硬度和导电率。由表 3 可知,随着微量稀土元素 La 的引入,合金的硬度和导电率均有一定程度的提高。分析认为,稀土元素的添加,使得枝晶细化,单位体积内的晶界面积增加,对位错运动的阻力也进一步增大,从而使合金硬度增大;同时,稀土元素的净化作用使铜原子间的结合力增强,加上微量固溶强化作用等,都使 Cu-Cr-Zr-La 合金硬度增加。而稀土对铜合金导电性能的影响机理可归因于以下两个方面^[14]:一方面,稀土的细化作用使得合金晶粒细化,晶界增加,电子散射几率增大,导致电阻率增大,导电性下降;另一方面,稀土的净化作用使铜中杂质减少,晶格畸变减弱,电子散射几率减少,导电性改善。从本研究测得的实验数据来看,0.1%稀土元素的加入,使得铜合金的导电率有所提高,说明稀土的净化作用强于其细化作用。因此,稀土元素 La 的添加,有利于合金导电性的提高。其中 Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La 合金的性能最优,其硬度和导电率分别达到了 143.1HB 和 78.6%IACS。

表 3 不同状态下 Cu-Cr-Zr(La)合金的性能
Tab. 3 Properties of Cu-Cr-Zr(La) alloy in different states

合金成分	铸态		时效态	
	硬度 /HB	导电率 /%IACS	硬度 /HB	导电率 /%IACS
Cu-0.7Cr-0.15Zr	63	39.6	98	71.5
Cu-0.7Cr-0.15Zr-0.1La	63.1	41.7	112.5	77.8
Cu-1.2Cr-0.15Zr	66.7	37.9	136	73.1
Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La	67.8	39.2	143.1	78.6
Cu-2Cr-0.15Zr	68.4	33.3	130	68.1
Cu-2Cr-0.15Zr-0.1La	73.8	44.3	137.5	73.5

2.4 Cu-Cr-Zr-La 合金的 XRD 分析

时效强化是 Cu-Cr-Zr 合金的主要强化手段之

一。通过时效处理,使过饱和固溶体分解,合金元素以一定的形式及形状析出,弥散地分布在基体中。本文通过 X 射线衍射来分析时效处理过程中合金元素的析出情况。

固溶体的晶格常数一般随着溶质浓度的改变而变化,因此,可以根据晶格常数来确定溶质的含量^[15]。图 5 是时效处理前后 Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La 合金的分析衍射图谱。从图中可观察到三个明显的 Cu 的衍射峰,且随着时效处理的进行,Cu 的衍射峰向右偏移。为了进一步确定晶格畸变情况,对铸态和时效态合金基体 Cu 的晶格常数的相对畸变量进行计算。

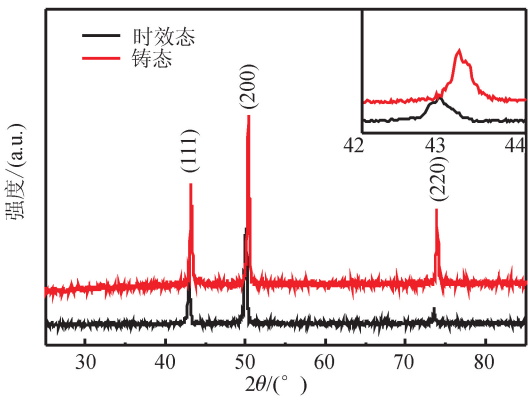


图 5 不同条件下 Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La 合金的 XRD 谱图
Fig. 5 XRD patterns of Cu-1.2Cr-0.15Zr-0.1La alloy in different states

根据不同晶面 Cu 的衍射峰所对应的 2θ , 结合布拉格方程 ($2d\sin\theta=n\lambda$), 可计算出各衍射峰所对应的晶面间距 d 。其中 X 射线的波长 $\lambda=0.154\ 056\text{ nm}$ 。计算结果如表 4 所示。

表 4 图 5 中 Cu-Cr-Zr-La 合金不同 Cu 的衍射峰对应的晶面间距
Tab. 4 Interplanar spacing of different diffraction peaks under different conditions in Fig. 5

Cu 衍射峰	晶面间距/ $\text{\AA}$	
	铸态	时效态
Cu(111)	2.097 08	2.092 02
Cu(200)	1.814 93	1.808 17
Cu(220)	1.285 30	1.280 53

晶格常数 a, b, c (对立方晶体结构的 Cu, $a=b=c$)和晶面间距 d 之间的关系式为:

$$a = d \times \sqrt{(h^2 + k^2 + l^2)} \tag{1}$$

式中, h, k, l 为晶面指数。

由式(1)可计算出不同 Cu 的衍射峰所对应的晶格常数 a , 同时:

$$D_a = (a - a_0)/a_0 \quad (2)$$

式中, D_a 为相对畸变; a_0 是室温下铜的晶格常数, $a_0 = 3.615\ 00\ \text{\AA}$ 。

按照式(2)可分别计算出铸态和时效态下基体 Cu 的晶格常数及其相对畸变量, 计算结果如表 5 所示。

表 5 不同状态下 Cu-Cr-Zr-La 合金的 Cu 的晶格常数及其相对畸变量

Tab. 5 Lattice parameters and relative deviation of different diffraction peaks under different conditions

Cu 衍射峰	晶格常数/ $\text{\AA}$		相对畸变 $D_a/\%$	
	铸态	时效态	铸态	时效态
Cu(111)	3.632 25	3.623 48	0.48	0.23
Cu(200)	3.629 86	3.616 34	0.41	0.04
Cu(220)	3.635 38	3.621 88	0.56	0.19

通过对比可以看出, 相对于时效态的 Cu-Cr-Zr-La 合金, 铸态合金中 Cu 基体的晶格畸变较大。这主要是由于 Cr 和 Zr 原子溶解在铜基体中, 产生晶格畸变, 使得 Cu 的衍射峰向左偏移。在时效处理过程中, 过饱和固溶体分解, 从基体中析出弥散的纳米级沉淀相, Cu 基体的晶格畸变明显减小。第二相粒子的析出使得畸变的晶格得以恢复, 从而削弱了其对自由电子的散射作用, 合金的导电率大幅提高。时效处理后, 大量弥散分布的第二相析出会阻碍位错运动^[16,17]。位错绕过析出相颗粒需要克服阻力做功, 使得位错滑移困难, 塑性变形不易进行, 从而显著提高合金硬度。

3 结 论

1) 本实验采用真空电弧熔炼制备 Cu- x Cr-0.15Zr(x 取 0.7、1.2、2.3、4) 合金, 并在 450 °C 进行时效处理。研究表明, Cu-Cr-Zr 合金的导电率随着 Cr 含量的增加呈下降趋势, 硬度随着 Cr 含量的增加先增加后减小。

2) 在 Cu-Cr-Zr 合金中加入微量稀土元素 La 后, 组织得到细化, 等轴状晶粒所占比例提高, 合金导电率和硬度明显提高。

3) XRD 分析表明, 时效处理后, Cu 的晶格常数减小, 衍射峰向右偏移, 晶格畸变程度减小。Cr 和 Zr 元素从 Cu 基体中析出, 使得合金的导电率和硬度显著提高。

参考文献:

- [1] 李周, 雷前, 黎三华. 超高强弹性铜合金材料的研究进展和展望 [J]. 材料导报, 2015, 29(4): 1-5.
LI Zhou, LEI Qian, LI Sanhua. Research progress and

prospect on super high strength elastic copper alloy [J]. Materials Review, 2015, 29(4): 1-5.

- [2] XIE G L, WANG Q S, MI X J, et al. The precipitation behavior and strengthening of a Cu-2.0wt% Be alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 558: 326-330.
- [3] WANG X F, ZHAO J Z, HE J. Investigation on the microstructure and mechanical properties of the spray-formed Cu-Cr alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 460-461: 69-76.
- [4] 刘瑞蕊, 周海涛, 周啸, 等. 高强高导铜合金的研究现状及发展趋势 [J]. 材料导报 A, 2012, 26(10): 100-105.
LIU Ruirui, ZHOU Haitao, ZHOU Xiao, et al. Present situation and future prospect of high-strength and high-conductivity copper alloy [J]. Materials Review A, 2012, 26(10): 100-105.
- [5] 丁宗业, 贾淑果, 邓猛, 等. Cu-0.36Cr-0.03Zr 合金时效析出相 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(2): 43-46.
DING Zongye, JIA Shuguo, DENG Meng, et al. Aging precipitation in Cu-0.36Cr-0.03Zr alloy [J]. Transaction of materials and heat treatment, 2014, 35(2): 43-46.
- [6] 王松, 谢明, 陈敬超, 等. 高强高导电 Cu-Cr-Zr 合金时效过程中组织和性能的演化 [J]. 电工材料, 2015, 1: 15-18.
WANG Song, XIE Ming, CHEN Jingchao, et al. Microstructure and properties evolution of Cu-Cr-Zr alloy with high strength and high conductivity during aging [J]. Electrical Engineering Materials, 2015, 1: 15-18.
- [7] 解浩峰, 米绪军, 黄国杰, 等. Cu-Cr-Zr-Sn 合金的时效析出行为与性能 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 40(9): 1549-1554.
XIE Haofeng, MI Xujun, HUANG Guojie, et al. Aging precipitation behavior and properties of Cu-Cr-Zr-Sn alloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2012, 40(9): 1549-1554.
- [8] ZHANG Y, ALEX A V, HAI T T, et al. Aging behavior and precipitates analysis of the Cu-Cr-Zr-Ce alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2016, 650: 248-253.
- [9] 慕思国, 曹兴民, 汤玉琼, 等. 时效态 Cu-Cr-Zr-Mg-RE 合金的组织与性能 [J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1112-1118.
MU Siguo, CAO Xingmin, TANG Yuqiong, et al. Microstructure and properties of aging Cu-Cr-Zr-Mg-RE alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1112-1118.
- [10] 戚正风. 固态金属中的扩散与相变 [M]. 北京: 机械

工业出版社, 1998: 10-12.

- [11] 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 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(5): 1092-1099.
- ZHONG Jiangwei, ZHANG Hong, CHEN Yanxu. Effects of Ce and La contents in rare earth elements on microstructure and properties of Cu-0.4Cr-0.2Zr-0.15Mg alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(5): 1092-1099.
- [12] 慕思国. 高强高导 Cu-Cr-Zr 系合金制备新工艺及理论研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- MU Siguo. New technology and theoretical study on preparation of high strength and high conductivity Cu-Cr-Zr alloy [D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [13] 宋雨来. 稀土改性 AZ91 镁合金组织及腐蚀性能 [D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- SONG Yulai. Microstructure and corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy modified by rare earth [D]. Changchun: Jilin University, 2006.
- [14] 毛向阳, 方峰, 谈荣生, 等. 稀土对铜及铜合金组织和

性能影响的研究进展 [J]. 稀土, 2008, 29(3): 2-3.

- MAO Xiangyang, FANG Feng, TAN Rongsheng, et al. Review on effects of rare earth on microstructure and properties of copper and copper alloy [J]. Chinese Rare Earths, 2008, 29(3): 2-3.
- [15] 邓丽萍. Cu-Nb 复合线材微观组织演变及力学和电学性能的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- DENG Liping. Research on texture evolution, mechanical and electrical properties of Cu-Nb composite wires [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [16] 苏娟华, 刘平, 董企铭. Cu-Cr-Zr 合金时效强化机理 [J]. 材料热处理学报, 2005, 26(6): 62-65.
- SU Juanhua, LIU Ping, DONG Qiming. Aging strengthening mechanism of Cu-Cr-Zr alloy [J]. Transaction of materials and heat treatment, 2005, 26(6): 62-65.
- [17] ZHAO M, LIN G B, WANG Z D, et al. Analysis of precipitation in a Cu-Cr-Zr alloy [J]. China Foundry, 2008, 5(4): 268-271.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 109 页)

参考文献:

- [1] TUNG C, TSO P L. A generalized cutting location expression and postprocessors for multi-axis machine centers with tool compensation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010(50): 1113-1123.
- [2] JUNG H C, HWANG J D, PARK K B, et al. Development of practical postprocessor for 5-axis machine tool with non-orthogonal rotary axes [J]. J. Cent. South Univ. Technol, 2011(18): 159-164.
- [3] FAROUKI R T, LI S Q. Optimal tool orientation control for 5-axis CNC milling with ball-end cutters [J]. Computer Aided Geometric Design, 2013, 30(2): 226-239.
- [4] 吴大中, 王宇晗, 冯景春, 等. 五坐标数控加工的非线性运动误差分析与控制 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10): 1608-1612.
- WU Dazhong, WANG Yuhan, FENG Jingchun, et al. Analysis and control of the non-linear errors in five-axis NC machining [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2007, 41(10): 1608-1612.
- [5] 张立新, 黄玉美, 韩旭炤, 等. 新型并联机床曲面加工的运动控制与后置处理算法 [J]. 机械科学与技术, 2007, 26(5): 643-646.
- ZHANG Lixin, HUANG Yumei, HAN Xuzhao, et al. Motion control and postprocessing algorithm for new parallel kinematic machine tools [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(5): 643-646.
- [6] 左晓明, 吴海兵, 陈小岗. 非正交双转台加工中心五轴定位铣削的后置处理与仿真验证 [J]. 机械科学与技术, 2012, 31(1): 154-159.
- ZUO Xiaoming, WU Haibing, CHEN Xiaogang. Postprocessor and simulation of 5-axis fixed-position milling for non-orthogonal machining center of table/table-rotating type [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(1): 154-159.
- [7] OKAZAKI Y, MISHIMA N, ASHIDA K. Microfactory concept, history and developments [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, 126(4): 837-844.
- [8] BANG Y B, LEE K M, OH S. 5-axis micro milling machine for machining micro parts [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005(25): 888-894.

(责任编辑 周 蓓)