

不同处理状态下 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的组织与性能演变

戴姣燕, 尹志民, 宋练鹏, 袁 远

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 以 Cu-2.5Fe-0.03P 高强高导铜合金带材为研究对象, 测试不同处理状态合金板材的力学性能和电学性能, 采用金相和电子显微分析方法研究该合金不同加工热处理状态下的组织与性能演变规律及其时效析出特性。并在此基础上研究微量元素 Fe 和 P 在合金中的存在形式和作用机制。结果表明: Cu-2.5Fe-0.03P 合金热轧后在线固溶态合金基本上为单相固溶体, 合金硬度、强度和电导率较低, 塑性较好, 但还存在少数未溶的 Fe 相外, 在线固溶效果有待进一步改善; 软化退火后的薄带进一步冷轧并时效后, 合金成品薄带的显微硬度、抗拉强度、屈服强度、伸长率和电导率分别达到 147 HV、456 MPa、271 MPa、10.7% 和 29.9 S/m; 热轧—在线固溶—冷轧—时效态 Cu-2.5Fe-0.03P 合金中的 Fe 和 P 以 Fe_3P 和 Fe 相形式存在, 合金的高强度来源于形变热处理产生的亚结构强化及 Fe_3P 和 Fe 粒子的析出强化。

关键词: Cu-2.5Fe-0.03P 合金; 显微组织; 性能演变; 析出强化

中图分类号: TG 146.1

文献标识码: A

Structure and properties evolution of Cu-2.5Fe-0.03P alloy under different treatment conditions

DAI Jiao-yan, YIN Zhi-min, SONG Lian-peng, YUAN Yuan

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

Abstract: The mechanical and electrical properties of Cu-2.5Fe-0.03P alloys with high-strength and high-conductivity at different treatment conditions were measured. The microstructures and properties evolution were investigated by OM and TEM. Based on the above mentioned experiment, the existing form and action mechanism of trace Fe and P in the alloy were also studied. The results show that, after hot rolling, on-line solution alloy is mainly a single-phase solid solution. However, there still is a small amount of dissolved Fe phase in the on-line solution alloy. After further rolling and aging, the mechanical properties and electrical conductivity of the alloy are improved further. The micro-hardness, tensile strength, yield strength, elongation and electrical conductivity of the Cu-2.5Fe-0.03P final product are HV 147, 456 MPa, 271 MPa, 10.7% and 29.9 S/m, respectively. Fe and P in Cu-2.5Fe-0.03P alloy at hot rolling—on-line solution—cold rolling—aging condition exist in the form of Fe and Fe_3P . Sub-structure strengthening coming from the thermo-mechanical treatment and precipitation strengthening of Fe and Fe_3P particles is responsible for high strength of the alloy.

Key words: Cu-2.5Fe-0.03P alloy; microstructure; properties evolution; precipitation strengthening

Cu-Fe-P 合金是引线框架铜合金材料的一大类, 在国内目前占引线框架铜合金的 80%^[1-4]。目前, 铜合

金引线框架的主要生产国为日本、美国、德国、法国和英国, 国内洛阳铜加工集团、兴业铜加工集团、清

华大学、中南大学、西安交通大学、河南科技大学、江苏冶金研究所、北京有色金属研究总院等高校、科研机构和企业在此领域开展了研究工作。苏娟华等^[5-6]研究微观状态下的 Cu-Fe-P 合金引线框架材料起皮处的 Fe 颗粒密集区,发现了 Cu 基体和 Fe 颗粒界面附近两相的残余应力值很大,最终导致界面处被撕裂,材料表面起皮。黄国杰等^[7]研究 Cu-Fe-P 合金的软化温度,发现采用分级时效工艺可以通过细化析出粒子而使合金的软化温度提高约 60 °C。陆德平等^[8]研究添加铈和硼对合金纯净度、组织和性能的影响。结果表明:添加微量的铈和硼一方面具有显著的脱 S、Bi 和 Pb 等杂质元素的作用;另一方面可以显著地提高合金的再结晶温度,从而使合金获得高强度和高导电率的良好结合。张红钢等^[9]在热模拟机上对 Cu-Fe-P 铜合金的流变应力行为进行了研究,采用 Zener-Hollomon 参数的指数函数形式较好地描述 Cu-Fe-P 铜合金高温变形时的流变应力行为。国内 Cu-Fe-P 合金引线框架材料性能与国外产品相比仍然存在差距。以 C194 合金为例,国外这种合金抗拉强度为 500 MPa,硬度为 151 HV,电导率为 3.77×10^{-2} S/m,而国内这种合金抗拉强度为 410 MPa,硬度为 120~145 HV,电导率为 3.48×10^{-2} S/m,还不能满足高端用户对材料性能的要求^[10]。Cu-2.5Fe-0.03P 合金与国外牌号为 C194 合金成分相似,本文作者以 Cu-2.5Fe-0.03P 合金为研究对象,研究合金在典型加工处理工艺条件下力学、电学性能和微观组织结构及其变化,研究成品合金的强化及导电机制,旨在从微观组织结构观察分析的角度为这种高精度引线框架材料性能的改善提供实验依据。

1 实验

研究结合生产现场进行,研究对象为 QFe2.5 合金,主要成分为 Cu-2.5Fe-0.03P。根据生产现场质量控制的需要,从主要工序上提取的试样状态如表 1 所列。显微硬度在 HV-5 型小负荷维氏硬度计上测试,载荷为 9.8 N,加载时间 15 s。每个试样测定 9 个数据,求取平均值。拉伸力学性能样品取自带材的纵向,在 INSTRON 8032 拉伸试验机上进行拉伸,拉伸速度为 2 mm/min。

采用双电桥测量法测合金的电阻,然后根据式(1)求出电导率。电阻测量设备为 QJ19 型单双臂双用电桥。

表 1 合金试样处理条件及尺寸

Table 1 Treatment condition and dimension of alloy sample

Number	Condition	Thick/mm
1	Hot rolling+on-line solution	13
2	First cold rolling of 88%	1.5
3	First cold rolling+annealing	1.5
4	Second cold rolling+annealing	0.83
5	Third cold rolling as semi-hard	0.4
6	Forth cold rolling as product	0.254

$$\rho = (RR_N/R_1)S/L \quad (1)$$

式中: ρ 为导体的电阻率; S 为导体的横截面积; L 为导体的长度; R , R_N 和 R_1 为已知电阻。

金相样品腐蚀剂是 25 mL 冰醋酸+55 mL 磷酸+20 mL 硝酸,加热到 50 °C,腐蚀 20 s。金相显微分析在 ROLYVER-MET 金相显微镜上进行,主要观察分析不同状态合金的晶粒大小和组织形态。TEM 样品经双喷电解减薄,电解液为硝酸与甲醇(体积比 1:3)混合液,温度控制在-25 °C以下,电压为 20~25 V,电流为 60~80 mA。TEM 显微组织观察在 Tecnai G²20ST 分析电镜上进行,加速电压为 200 kV。

2 结果与分析

2.1 不同处理状态下 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的力学和电学性能

典型处理状态 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的力学和电学性能如表 2 所列。由表 2 可以看出,不同加工热处理状态下 Cu-2.5Fe-0.03P 合金显微硬度和拉伸力学性能变化规律大体相似,热轧在线固溶状态的强度比较低,伸长率则比较高,经 88%冷轧变形后,加工硬化强度急剧升高,屈服比接近 99%,伸长率则降低到只有 5.8%;第一次冷轧后软化退火的合金强度很低,屈服强度只有 171 MPa;半硬态成品薄带的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 501 MPa、426 MPa 和 12.4%,冷轧-时效态成品薄带的抗拉强度、屈服强度和伸长率则分别为 456 MPa、271 MPa 和 10.7%。

由表 2 还可看出,热轧在线固溶状态电导率比较低,冷轧变形后电导率进一步降低,只有 17.6 S/m;第一次冷轧软化退火后电导率大幅度的提升到 34.9 S/m;随后的冷轧变形又降低了合金的电导率,半硬态成品电导率为 31.6 S/m,冷轧-时效态成品为 29.9 S/m。

2.2 不同处理状态下合金的显微组织分析

1) 金相组织观察

典型处理状态 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的金相组织如

图 1 所示。由图 1 可看出，热轧在线固溶态合金的晶粒组织为近似等轴的单相固溶体组织但晶粒仍然保留有微弱的沿轧制方向伸长趋势(见图 1(a))，合金经 88%

表 2 典型处理状态 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Cu-2.5Fe-0.03P alloy under typical treatment condition

Number	Condition	Thickness/mm	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	A /%	HV	$\sigma/(S \cdot m^{-1})$
1	Hot rolling+on-line solution	13	292	165	28.6	90	21.1
2	First cold rolling of 88%	1.5	469	464	5.8	141	17.6
3	First cold rolling+annealing	1.5	329	171	30.0	94	34.9
4	Second cold rolling+annealing	0.83	422	319	20.5	138	31.4
5	Third cold rolling as semi-hard	0.4	501	426	12.4	146	31.6
6	Forth cold rolling as product	0.254	456	271	10.7	147	29.9

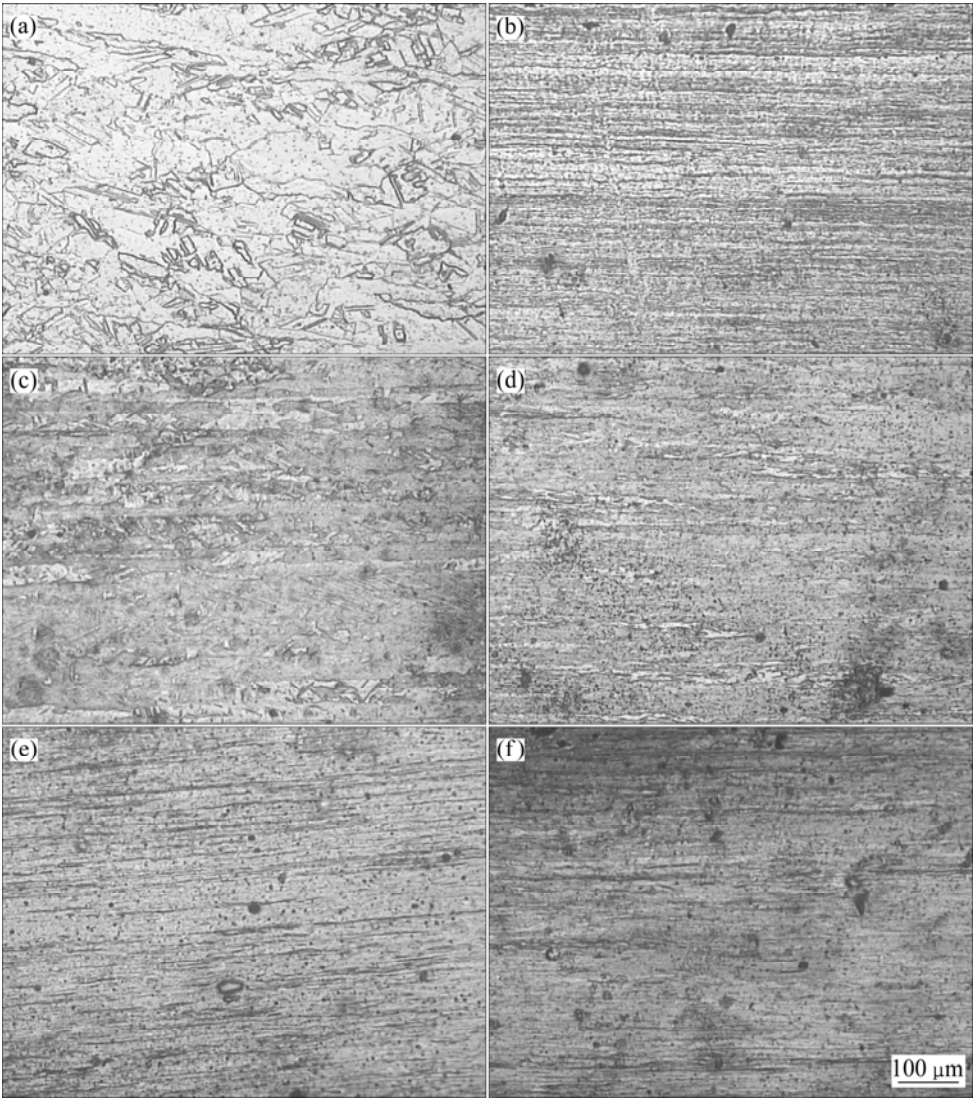


图 1 典型处理状态下合金的金相组织

Fig.1 OM structures of alloy under typical treatment condition: (a) On-line solution; (b) 88% cold rolling-primary aging; (c) Primary aging-soften annealing; (d) Secondary cold rolling-annealing; (e) Third cold rolling (semi-hard); (f) Forth cold rolling-aging (end product)

冷轧后的晶粒明显沿轧制方向被拉长, 为典型的纤维状变形组织(见图 1(b)); 88%冷轧-软化退火后合金晶粒已经发生了明显的回复和再结晶(见图 1(c)~(d)) 0.4 mm 厚半硬态成品又呈现出纤维状变形组织(见图 1(e)); 0.254 mm 厚成品态合金的晶粒组织基本上保留沿轧向分布的纤维态变形组织, 但是可以看到部分回复(见图 1(f))。

2) 透射电镜观察(TEM)

典型处理状态下 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的透射电子显微分析如图 2~6 所示。由图 2 可看出, 热轧后在线固溶态合金基本是单相固溶体, 基体上还保留着大量位错, 此外还可以见到一些亚微米级的粒子, 能谱分析表明这种粒子化学成分富 Fe, 可判断其为在线固溶未固溶的单质 Fe 相。

图 3(a)所示为固溶后一次冷轧至 1.5 mm 合金的 TEM 像。由图 3(a)可以看出, 固溶后冷轧合金中的位错密度增加, 位错缠结形成许多位错胞。图 3(b)所示

为第一次冷轧后软化退火的合金透射电子显微组织。由图 3(b)可见, 合金中的位错基本消失。图 3(c)所示为厚度为 0.4 mm 半硬态成品薄带的透射电子显微组织。由图 3(c)可看出, 冷轧后半硬态成品合金有较多的位错亚结构, 由于位错应力场的存在, 析出粒子的衬度低未能清楚的显示其形貌, 但可以看到位错线被这些析出粒子钉扎。

厚度为 0.254 mm 成品的透射电子显微组织如图 4 所示。与图 3(c)相似, 厚度为 0.254 mm 的成品薄带具有较多的位错亚结构。此外还可以看到 3 种形态的析出粒子; 一种为豆瓣状的与基体共格的粒子(见图 4(a)); 第二种是短棒状与基体不共格的粒子(见图 4(b)), 豆瓣状是由于球形粒子与基体形成共格关系从而产生应变场衬度在 TEM 下观察到的形貌。根据文献, 与基体共格的粒子应为 γ -Fe 粒子, 短棒状与基体不共格的粒子应为 α -Fe 粒子。另外还有一种与基体不共格的球状粒子(见图 4(d))。能谱分析表明与基体不

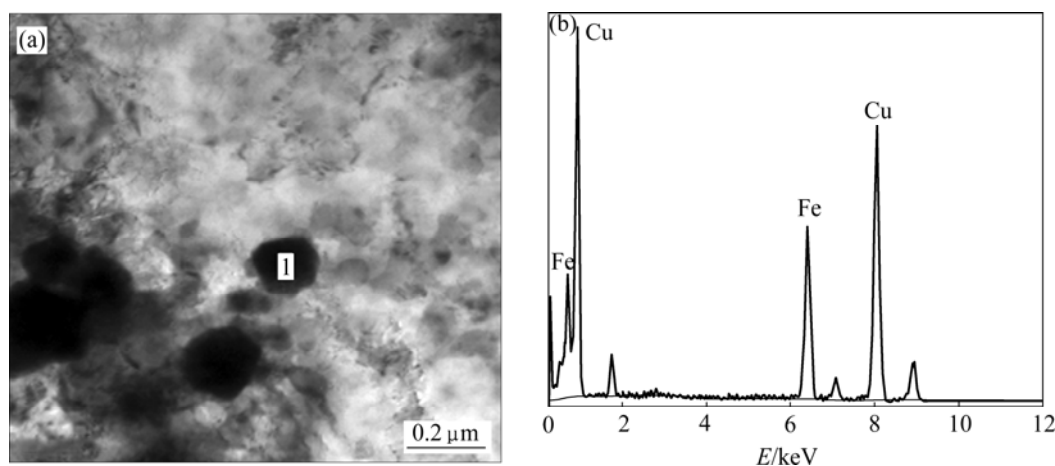


图 2 热轧后在线固溶状态合金的 TEM 像

Fig.2 TEM image(a) and energy spectrum of point 1(b) for alloy by hot rolling and on-line solution

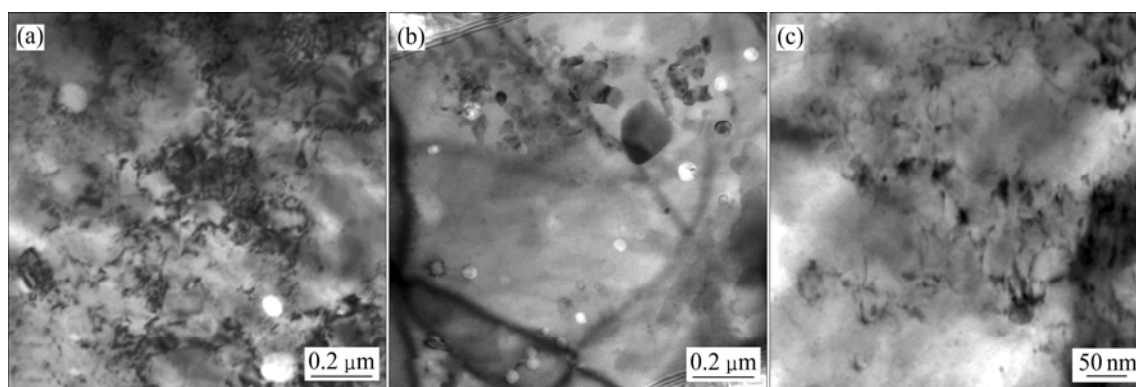


图 3 在线固溶后不同加工处理状态合金的 TEM 像

Fig.3 TEM images of alloy under different processing and treatment conditions after on-line solution: (a) Primary cold rolling; (b) Primary cold rolling-soften annealing; (c) Third cold rolling (semi-hard product)

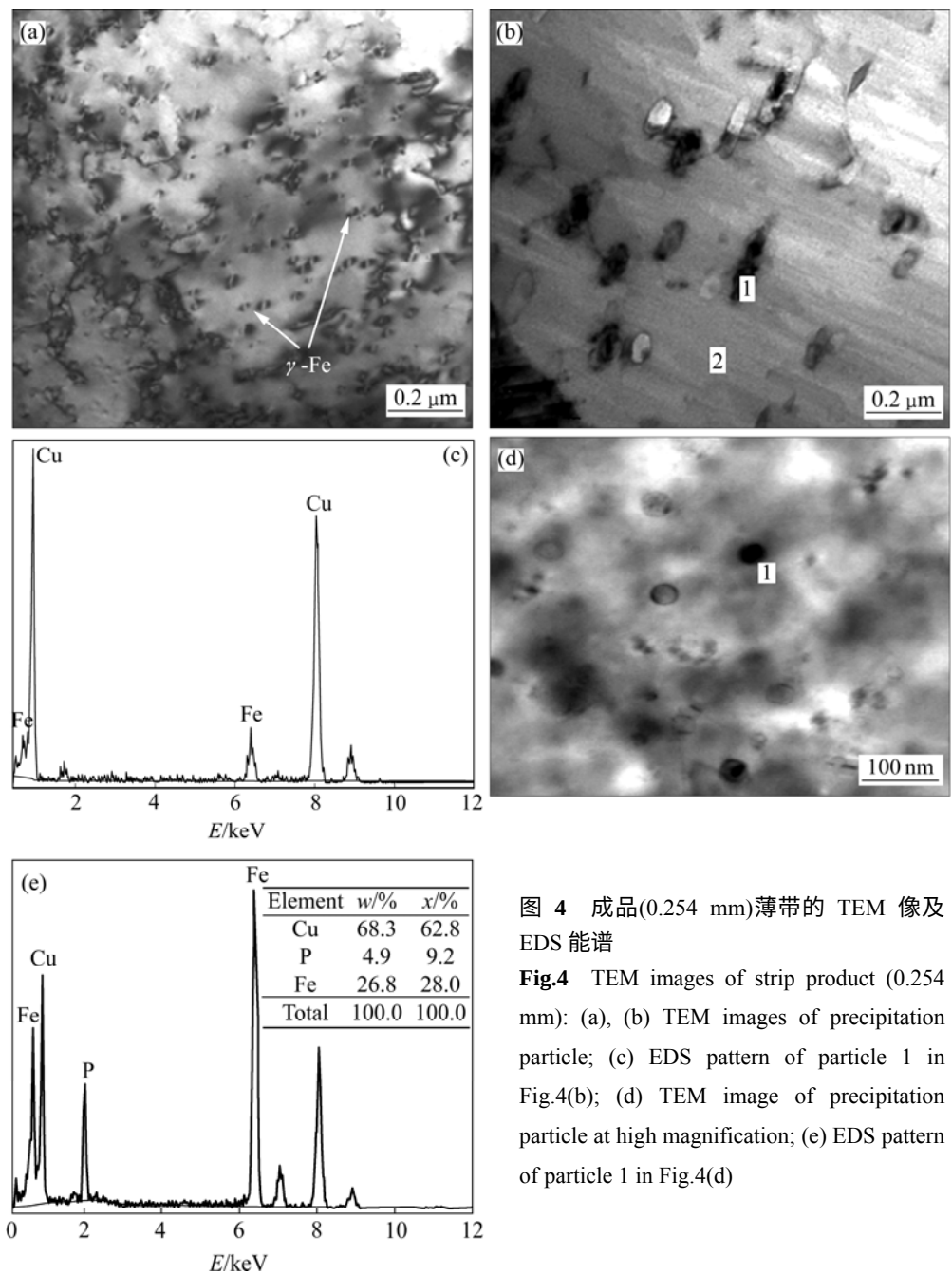


图 4 成品(0.254 mm)薄带的 TEM 像及 EDS 能谱
Fig.4 TEM images of strip product (0.254 mm): (a), (b) TEM images of precipitation particle; (c) EDS pattern of particle 1 in Fig.4(b); (d) TEM image of precipitation particle at high magnification; (e) EDS pattern of particle 1 in Fig.4(d)

共格的球状粒子为 Fe_3P 。

3 讨论

3.1 不同处理态 Cu-2.5Fe-0.03P 合金的力学和电学性能

合金的力学和电学性能与合金内部的晶粒组织、位错亚结构和析出相有关。热轧在线固溶态合金的晶粒组织为近似等轴的单相固溶体,固溶体较软,强度较低,伸长率较高,由于其过饱和程度大,因此电导

率较低。固溶后冷轧变形合金中的位错密度增加,位错缠结形成许多位错胞,合金由于加工硬化强度急剧升高、伸长率降低,位错缺陷增加了电子散射,合金的电导率进一步降低。冷轧后软化退火,合金中的位错亚结构基本消失,合金的硬度和强度降低,电导率则显著回升,合金软化使材料获得了较好的塑性,为随后的冷加工创造了条件。加工后时效,合金基体中先后析出弥散强化粒子,合金的硬度和强度升高。与此同时,由于时效过程中固溶体过饱和程度降低,电导率也升高。成品薄带由于位错亚结构强化和析出相强化具有较好的综合性能,显微硬度、抗拉强度、屈

服强度、伸长率和电导率分别达到 147 HV、456 MPa、271 MPa、10.7%和 29.9 S/m。

本研究中 Cu-Fe-P 合金的电阻率也可表示如下：

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho_s + \Delta\rho_p + \Delta\rho_v + \rho_d + \Delta\rho_{gb} \quad (2)$$

式中： ρ_0 为原始电阻率； $\Delta\rho_s$ 为固溶处理引起的电阻率变化； $\Delta\rho_p$ 为析出引起的电阻率变化； $\Delta\rho_v$ 为空位引起的电阻率变化； ρ_d 为位错引起的电阻率； $\Delta\rho_{gb}$ 为晶界引起的电阻率变化。其中对电阻率影响最大的是 $\Delta\rho_s$ ，其次为 $\Delta\rho_p$ 、 $\Delta\rho_{gb}$ 、 $\Delta\rho_v$ 、 $\Delta\rho_d$ 。

时效过程中各种因素对合金电阻率影响的示意图如图 5 所示。

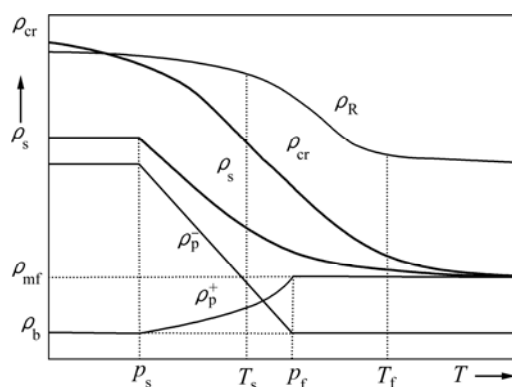


图 5 时效过程中合金电阻率的变化

Fig.5 Change of electrical resistivity of alloy during aging

图中 ρ_{cr} 代表冷变形态合金时效过程中电阻率变化曲线； ρ_s 代表固溶未经冷变形的合金时效过程中电阻率变化曲线； ρ_R 代表单一再结晶过程中电阻率变化曲线； ρ_p^- 代表单一析出过程中由固溶元素降低所引起的电阻率变化曲线； ρ_p^+ 代表单一析出过程中由第二相的出现所引起的电阻率变化曲线； ρ_{mf} 为复相合金在时效过程中电阻率变化曲线； ρ_b 为合金基体在时效过程中电阻率变化曲线。

时效过程对固溶未经冷变形的合金的电阻率有两方面影响，因此电阻率变化曲线为图中 ρ_p^- 和 ρ_p^+ 之和，即曲线 ρ_s 。对于经冷变形的合金，影响合金电导率的因素除上述 2 个外，合金还会发生回复和再结晶，从而部分降低合金电阻率，即曲线 ρ_R ，所以合金的电阻率应为 3 条曲线 (ρ_p^- 、 ρ_p^+ 和 ρ_R) 之和，即曲线 ρ_{cr} 。

固溶处理后合金中的 Fe、P 元素固溶到 Cu 基体中，使 $\Delta\rho_s$ 项增大，且此时 $\Delta\rho_v$ 项也较大，合金电导率很低；冷变形后形成大量的高密度位错和亚晶，晶

体缺陷浓度增大，电导率进一步降低，冷变形量越大，电导率越低。但在随后的时效过程中会发生回复、再结晶，使电导率部分或全部恢复。

在生产现场条件下，热轧在线固溶态合金中晶粒组织为近似等轴的单相固溶体组织，但仍然存在比较粗大的未固溶的单质 Fe 相，这种未溶相影响了合金元素添加效果和合金最终的力学和电学性能，通过调整在线固溶工艺消除这种未溶相，成品的性能应该可以进一步提高。

3.2 Cu-2.5Fe-0.03P 合金中 Fe 和 P 的存在形式及其作用

Cu-2.5Fe-0.03P 是 Cu-Fe-P 系合金中具有代表性的一种高强高导型引线框架材料。SUZUKI 等^[11]认为，微量 Fe 有提高合金强度和硬度、细化晶粒和延缓再结晶过程的作用，微量 P 有脱氧、防止合金产生氢脆的作用，但 P 显著降低铜的导电性和导热性。

Cu-2.5Fe-0.03P 合金成品薄带的透射电子显微分析表明，成品薄带中可以看到 3 种形态的析出粒子，一种为豆瓣状的与基体共格的粒子；另一种是短棒状和球状的、与基体不共格的粒子。根据电子衍射理论和文献[12-13]，与基体共格的豆瓣状粒子应为 γ -Fe 粒子，球状与基体不共格的粒子应为 α -Fe 粒子。能谱分析则表明与基体不共格的球状粒子所含元素为 Fe 和 P，摩尔比约为 3:1，结合其他文献可得出^[14-16]，此析出相为 Fe_3P 。

4 结论

1) 由于位错亚结构强化和析出相强化，Cu-2.5Fe-0.03P 合金成品薄带具有较好的综合性能，显微硬度、抗拉强度、屈服强度、伸长率和电导率分别达到 147 HV、456 MPa、271 MPa、10.7%和 29.9 S/m。

2) Cu-2.5Fe-0.03P 合金成品薄带中可以看到 3 种形态的析出粒子，一种为与基体共格的豆瓣状 γ -Fe 粒子；另外一种为与基体不共格的短棒状 α -Fe 粒子；还有一种与基体不共格的球状 Fe_3P 粒子。

3) 生产现场条件下，热轧在线固溶态合金中仍然存在比较粗大的未固溶单质 Fe 相，这种未溶相影响合金元素添加效果和合金最终的力学和电学性能，需要调整在线固溶工艺消除这种未溶相，成品的性能还可以进一步提高。

REFERENCES

- [1] 曹兴民, 向朝建, 杨春秀, 慕思国, 郭富安. 一种新型 Cu-Fe-P 系合金材料的组织性能分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 527-529.
CAO Xing-min, XIANG Chao-jian, YANG Chun-xiu, MU Si-guo, GUO Fu-an. The microstructure and properties of a new type of Cu-Fe-P alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(9): 527-529.
- [2] SAKAMOTO T. The tendency toward higher integration of IC and problems for copper based lead frame materials[J]. Functional Materials, 1993, 24(4): 100-105.
- [3] 李银华, 刘平, 田保红, 贾淑果, 任凤章, 张毅. 集成电路用铜基引线框架材料的发展与展望[J]. 材料导报, 2007, 21(7): 24-27.
LI Yin-hua, LIU Ping, TIAN Bao-hong, JIA Shu-guo, REN Feng-zhang, ZHANG Yi. Development and expectation of copper-based lead frame material used in intergrated circuit[J]. Materials Review, 2007, 21(7): 24-27.
- [4] 赵冬梅, 董企铭, 刘平, 金志浩, 康布熙. 高强高导铜合金合金化机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): 21-24.
ZHAO Dong-mei, DONG Qi-ming, LIU Ping, JIN Zhi-hao, KANG Bu-xi. Mechanism of alloying of copper alloy with high strength and high electrical conductivity[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S2): 21-24.
- [5] 苏娟华, 董企铭, 刘平, 李贺军, 康布熙. 引线框架铜合金精轧薄板表面起皮剥落的数值分析[J]. 功能材料, 2005, 36(1): 40-43.
SU Juan-hua, DONG Qi-ming, LIU Ping, LI He-jun, KANG Bu-xi. Numerical analysis of surface flacking in finish rolled lead frame copper alloy[J]. Functional Materials, 2005, 36(1): 40-43.
- [6] 苏娟华, 许莹莹, 董企铭, 刘平, 李贺军. Cu-Fe-P 合金引线框架材料残余应力的有限元分析[J]. 热加工工艺, 2006, 35(12): 7-10.
SU Juan-hua, XU Ying-ying, DONG Qi-ming, LIU Ping, LI He-jun. Finite element analysis on residual stress of Cu-Fe-P alloy for lead frame[J]. Hot Working Technology, 2006, 35(12): 7-10.
- [7] 黄国杰, 程镇康, 谢水生, 马吉苗, 程磊. 引线框架用 C194 铜合金的软化温度研究[J]. 稀有金属, 2006, 30(12): 158-161.
HUANG Guo-jie, CHENG Zhen-kang, XIE Shui-sheng, MA Ji-miao, CHENG Lei. Study on soften temperature of C194 copper alloy applied to lead frame[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(12): 158-161.
- [8] 陆德平, 王俊, 陆磊, 刘勇, 谢仕芳, 孙宝德. 硼和铈对 Cu-Fe-P 合金显微组织和性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2006, 24(4): 475-479.
LU De-ping, WANG Jun, LU Lei, LIU Yong, XIE Shi-fang, SUN Bao-de. Effect of B and Ce on microstructures and properties of Cu-Fe-P alloy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2006, 24(4): 475-479.
- [9] 张红钢, 张辉, 彭大暑. C194 铜合金热压缩变形流变应力[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2003, 25(3): 82-86.
ZHANG Hong-gang, ZHANG Hui, PENG Da-shu. Rheologic stress of C194 copper alloy under hot compression deformation[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2003, 25(3): 82-86.
- [10] 涂思京, 闫晓东, 谢水生. 引线框架用铜合金 C194 的组织性能研究[J]. 稀有金属, 2004, 28(1): 199-201.
TU Si-jing, YAN Xiao-dong, XIE Shui-sheng. Structure and performance of C194 copper alloy used for lead frame[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2004, 28(1): 199-201.
- [11] SUZUKI Y, KASAMATSU M, SUZUKI S. Forensic discrimination of lead-tin solder based on the trace impurity analysis by ICP-AES[J]. Anal Sci, 2003, 19(2): 415-418.
- [12] HUTCHINSON B. The effect of alloying additions on the recrystallization behaviour of copper—A literature review[R]. IM-2003. Sweden: Swedish Institute of Metals Research, 1985.
- [13] HIROSHI Y, JPN J. Microstructure and properties of ultra fine grained[J]. Copper Brass Res Assoc, 1984, 23: 109-115.
- [14] FARQUHARSON M J, GERKI K, FALKENBERG G, LEEK R, HARRIS A. The localisation and micro-mapping of copper and other trace elements in breast tumours using a synchrotron micro-XRF system[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2007, 65(2): 183-188.
- [15] 钟秋生, 杨元政, 陈小祝. 引线框架 C194 铜合金铸态组织和性能分析[J]. 铸造, 2007, 56(10): 1044-1047.
ZHONG Qiu-sheng, YANG Yuan-zheng, CHEN Xiao-zhu. Microstructure and properties analysis of the lead frame C194 as-cast copper alloy[J]. Foundry, 2007, 56(10): 1044-1047.
- [16] 曹兴民, 向朝建, 杨春秀, 慕思国, 郭富安. 一种新型 Cu-Fe-P 系合金材料的组织性能分析[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(9): 527-529.
CAO Xing-min, XIANG Chao-jian, YANG Chun-xiu, MU Si-guo, GUO Fu-an. The microstructure and properties of a new type of Cu-Fe-P alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(9): 527-529.

(编辑 李艳红)