

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0083- 05

冷变形 Cu-8~ 13Zn 合金的电阻率及其在退火过程中的恢复^①

罗丰华¹, 尹志民², 汪明朴², 左铁镛¹

(1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022; 2. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

[摘 要] 研究了冷变形对 Cu-8~ 13Zn 合金室温电阻的影响及其在退火过程中的恢复。结果发现: 相同应变量所导致的电阻增量随 Zn 含量的增加而增加, 在大应变量情况下(断面收缩率为 60%~ 86%), 应变电阻增量与 Zn 含量基本成正比关系。应变电阻增量的 54% 在回复退火完成前得到恢复, 并且恢复量与退火温度成正比关系, 其余部分在再结晶过程中恢复。

[关键词] CuZn 合金; 电阻率; 热处理

[中图分类号] TG 146. 1

[文献标识码] A

冷变形使电阻率增大是由于晶体畸变和晶体缺陷的增加, 造成点阵电场的不均匀性而加剧对电子散射的结果。应变电阻增量取决于材料的成分和状态, 对于纯金属约为 2%~ 6%, 低浓度固溶体基本上与纯金属相似, 而对于高浓度固溶体可以达到 10%~ 20%, 甚至更高^[1, 2]。作者和同事开发了一种用于大功率异步电动机转子导条材料的新型铜合金^[3~ 5], 并论述了 CuZn 合金的室温电阻率和电阻温度特性^[6, 7], 本文主要论述 CuZn 合金电阻率与变形量以及退火温度的关系。

1 实验

1.1 材料制备

本试验所采用的 5 种 CuZn 合金的化学成分见表 1, 原材料采用 1[#] 电解铜板、1[#] 电解锌锭, 在 10 kg 中频感应电炉中熔炼, 采用非真空熔炼的铸造方式铸成园锭。5 种合金经熔炼、铸造、均匀化、车皮后, 热挤压成 $d8\text{ mm}$ 的坯料。热挤压在 500 t 立式挤压机上进行, 热挤压温度为 870 °C, 挤压比为 $35^2/8^2=19$ 。再将热挤压坯料冷拉成 $d5, 4, 3\text{ mm}$ 的细条, 断面收缩率分别为 60%, 75% 和 86%。

1.2 材料的热处理工艺

将所得的 5 种合金拉丝材分别在 150 °C, 250 °C, 300 °C, 350 °C, 370 °C, 400 °C, 450 °C, 500

表 1 合金的 Zn 含量

Table 1 Zn content of prepared alloys (%)

Alloy	Nominal	Mass fraction	Mole fraction
Cu8Zn	8	7.69	7.49
Cu9Zn	9	8.46	8.243
Cu10Zn	10	9.54	9.298
Cu12Zn	12	11.47	11.18
Cu13Zn	13	12.76	12.45

°C, 600 °C, 700 °C 等温度下进行 1 h 的等温退火, 空冷。加工态和各退火态试样的室温电阻用双电桥方法测定, 测量精度达到 $10^{-6}\ \Omega$ 。在德国产 NEOPHOT-21 金相显微镜上观察其显微组织。

2 实验结果与分析

2.1 冷变形对 Cu-8~ 13Zn 合金室温电阻率影响

图 1 为研究的 5 种 CuZn 合金分别在 3 种不同冷变形程度下的电阻率(实验温度为 16 °C)。图 1 中所示冷变形量为总断面收缩率, 虚线代表的软态合金状态, 即完全结晶状态^[5, 6]的室温电阻率。

从图 1 可以看到, 5 种合金由于变形引起的电阻增量, 即合金冷变形状态下的电阻减去合金完全再结晶状态下的电阻, 简称应变电阻增量, 与 Zn 含量的关系可以作简单的线形回归, 回归结果见图 2。

① [收稿日期] 2000- 09- 13; [修订日期] 2001- 03- 06

[作者简介] 罗丰华(1969-), 男, 博士。

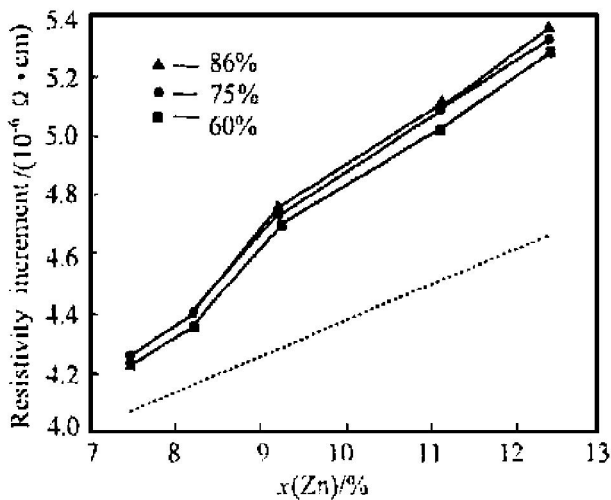


图 1 不同冷变形度下 CuZn 合金的电阻率

Fig. 1 Resistivity of CuZn alloys at different cold deformations

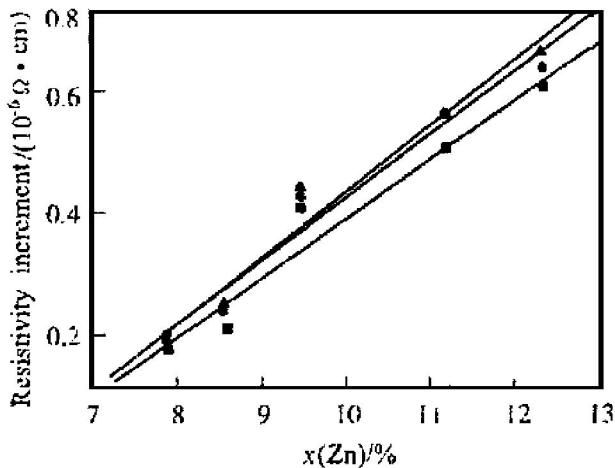


图 2 应变电阻增量与 Zn 含量的关系

Fig. 2 Relationship between Zn content and strain resistivity increment

- ▲—86%, $\Delta\rho_d = 0.57986 \times 10^{-6} + 0.10383 \times 10^{-6} x(\text{Zn})$;
- 75%, $\Delta\rho_d = 0.54798 \times 10^{-6} + 0.09952 \times 10^{-6} x(\text{Zn})$;
- 60%, $\Delta\rho_d = 0.51239 \times 10^{-6} + 0.09219 \times 10^{-6} x(\text{Zn})$

回归分析结果表明,冷变形量从 60% 增加到 86%,随着冷变形量增加,应变电阻增量与 Zn 含量的回归直线的斜率是增加的,但并不显著。因此可以用式(1)来简单估算 Cu-8~13Zn 合金冷变形量达到 60%~86% 引起的应变电阻增量 ($\Delta\rho_d$, $\Omega\cdot\text{cm}$)。

$$\Delta\rho_d = -0.54674 \times 10^{-6} + 0.09851 \times 10^{-6} x(\text{Zn}) \tag{1}$$

2.2 Cu-8~13Zn 合金应变电阻增量在退火过程中的恢复

冷加工量达 86% 的 5 种 CuZn 合金丝材料不同

温度退火 1 h 后的室温(16 ℃)电阻率数据见图 3。

从图 3 中可以看出,5 种合金室温电阻率随退火温度的变化大致都分为 3 个阶段,即在低于 350 ℃电阻率下降的量占总下降量的 50% 以上;在 350~400 ℃之间电阻率又急剧下降;400 ℃以后的基本保持不变。

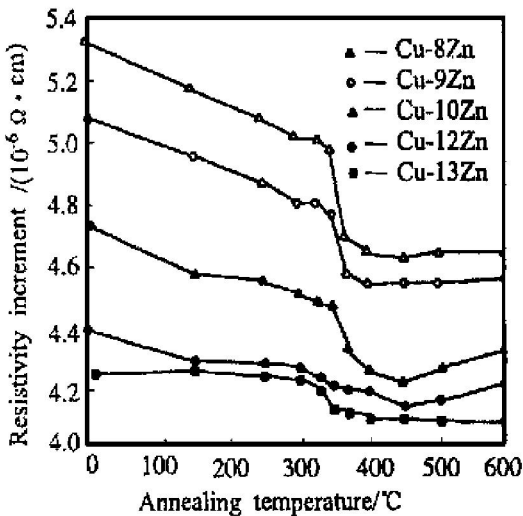


图 3 不同温度退火后合金的室温(16 ℃)电阻率

Fig. 3 Room temperature resistivity of alloys annealed at different temperatures

文献[6]已经指出,研究合金在高于 400 ℃以上温度退火将发生完全再结晶,所以电阻率基本保持不变。如果将冷变形状态下的电阻率减去 400 ℃时的电阻率称为总的应变电阻增量,而一定温度退火处理所引起的电阻率的减少称为应变电阻增量的恢复量,那么,用电阻的恢复量除以总的应变电阻增量,就得到该温度下的应变电阻率增量的恢复分数(X)。表 2 为根据图 3 的实验结果计算出来的 5 种合金在 5 个退火温度下的恢复分数(X):

表 3 不同温度下退火过程中的电阻率恢复分数

Table 3 Resistivity restoring fractions at different annealing temperatures

Alloy	150 ℃	250 ℃	300 ℃	330 ℃	350 ℃
Cu-8Zn	0.005 4	0.092 6	0.152 7	0.365 3	0.681 5
Cu-9Zn	0.441 5	0.513 0	0.559 2	0.706 4	0.836 8
Cu-10Zn	0.385 1	0.406 1	0.508 7	0.563 3	0.600 5
Cu-12Zn	0.202 0	0.366 3	0.469 0	0.486 1	0.542 6
Cu-13Zn	0.218 8	0.365 2	0.456 6	0.469 6	0.531 9
Average	0.225 1	0.339 9	0.448 6	0.473 0	0.543 3

Including later tow alloys.

从表 2 可以看出,3 种 Zn 含量较低的合金由于它们的电阻增量和恢复量的绝对数值太小而恢复规律不明显;对于 2 种 Zn 含量较高的合金,电阻率

恢复分数具有明显的规律性。图 4 为 2 种 Zn 含量较高的合金的电阻恢复分数与退火温度的关系。

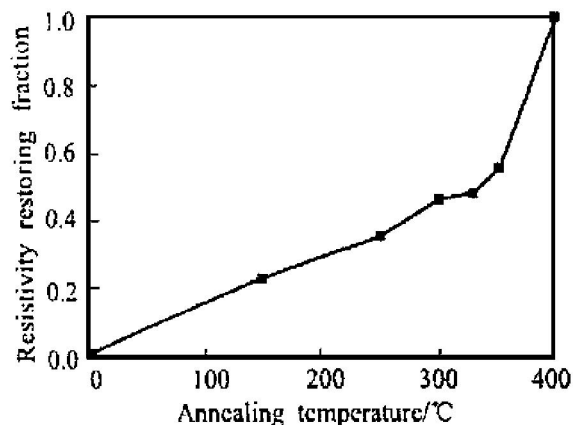


图 4 电阻率恢复分数与退火温度的关系

Fig. 4 Relationship between resistivity restoring fraction and temperature

图 4 把 400 °C, 1h 工艺处理下的电阻恢复分数作为 1, 在这个温度下, 由于完全再结晶而应变电阻率增量完全恢复。从图 4 可以看出, 退火温度低于 350 °C 时, Cu8~13Zn 合金的电阻率恢复分数与退火温度的关系基本上成正比, 回归关系式如下:

$$X = 0.00148 t \quad (2)$$

式中 X 为电阻率恢复分数; t 为退火温度, °C。

根据实验结果得到的经验关系式(2), 可以对研究范围内冷变形 CuZn 合金的电阻增量在退火温度低于 350 °C 时的恢复量进行估算。

3 讨论

3.1 冷变形 Cu8~13Zn 合金的电阻率

冷塑性变形使金属的电阻率增大, 是由于晶体点阵畸变和晶体缺陷的增加, 造成点阵电场的不均匀性而加剧对电子波散射的结果。在 Cu8~13Zn 合金中, Zn 是以固溶原子形式存在于合金中的, 固溶引起合金电阻率的增加主要是由于异类原子的溶入引起溶剂点阵的畸变, 增加了电子的散射, 因而加大了电阻。对于连续固溶体, 大约在两组元的原子分数各占 50% 时, 点阵畸变最大, 电阻最高, 因此, 对于 Cu8~13Zn, 随 Zn 含量升高, 电阻增加, 符合一般规律。

从 2.1 可知, Zn 含量增加, 相同冷变形量下, 应变电阻增量也增加, 这是由于金属中加入溶质原子在大多数情况下可增大加工硬化率, 溶质原子越多, 加工硬化率越高, 因而相同冷变形量下, 晶体缺陷越多, 产生的应变电阻增量越高。CuZn 合金

是典型的固溶强化合金, 属于这种情况。

研究合金冷变形量从 60% 增加到 86%, 其应变电阻增量都可以用式(1)来进行估算, 也就是说, 从冷变形量 60% 到 86%, 电阻率变化不大。由于在这种大应变下, 合金变形进入抛物线硬化阶段, 点缺陷基本稳定, 螺型位错开始产生交滑移而形成胞状组织, 位错的产生和相互抵消处于平衡, 因此, 在这个应变范围内, 虽然, 由于变形量的增大, 胞状组织的细化带来加工硬化率和位错密度的微小增大, 但总的缺陷数量变化不大, 电阻率也基本稳定。图 5 为研究合金的显微组织, 可以看出 60%, 75% 和 86% 的冷变形状态下的组织基本相似, 都为加工纤维组织。

3.2 退火对电阻率变化的影响

电阻率反映晶体点阵对电场作用下发生定向运动的电子所施加的阻力。晶体中的结构缺陷改变了点阵的周期势场, 成为运动电子的散射中心, 所以增加合金的电阻率。空位与间隙原子对电子的散射作用比位错的作用更有效, 电阻率的变化更灵敏地反映点缺陷的变化^[1,8]。由图 5(d) 和(e) 可知, 所研制 CuZn 合金在低于 350 °C 退火, 还未出现明显的再结晶晶粒, 尚处于回复阶段, 文献[3, 6] 结合硬度变化也详细地说明了这一点。由于合金发生回复, 点缺陷浓度显著降低, 从而导致合金电阻率下降量约占总下降量的 54%。

由图 5(f) 可知, 400 °C 退火后为细小的完全再结晶晶粒, 因此在 350~400 °C 之间, 合金为再结晶退火阶段, 晶体缺陷大幅度减少, 从而合金的电阻率也迅速下降。到 400 °C 以上温度退火, 合金都是完整的再结晶晶粒组织, 合金中的点缺陷基本稳定, 因此, 不再有电阻率的明显变化。从图 3 可以看到, 考虑到实验的误差, 可以认为所研究的 5 种 CuZn 合金的电阻率在 400~600 °C 温度范围退火后基本稳定。

4 结论

1) 应变引起的电阻率的增量与 Zn 含量有关, 相同应变下所导致的应变电阻增量随 Zn 含量的增加而增加。在大应变量情况下(断面收缩率为 60%~86%), 应变电阻增量可用直线关系 $\Delta\rho_d = -0.54674 \times 10^{-6} + 0.09851 \times 10^{-6} x(\text{Zn})$ 来进行估算。

2) 冷变形引起 Cu8~13Zn 合金的电阻增量

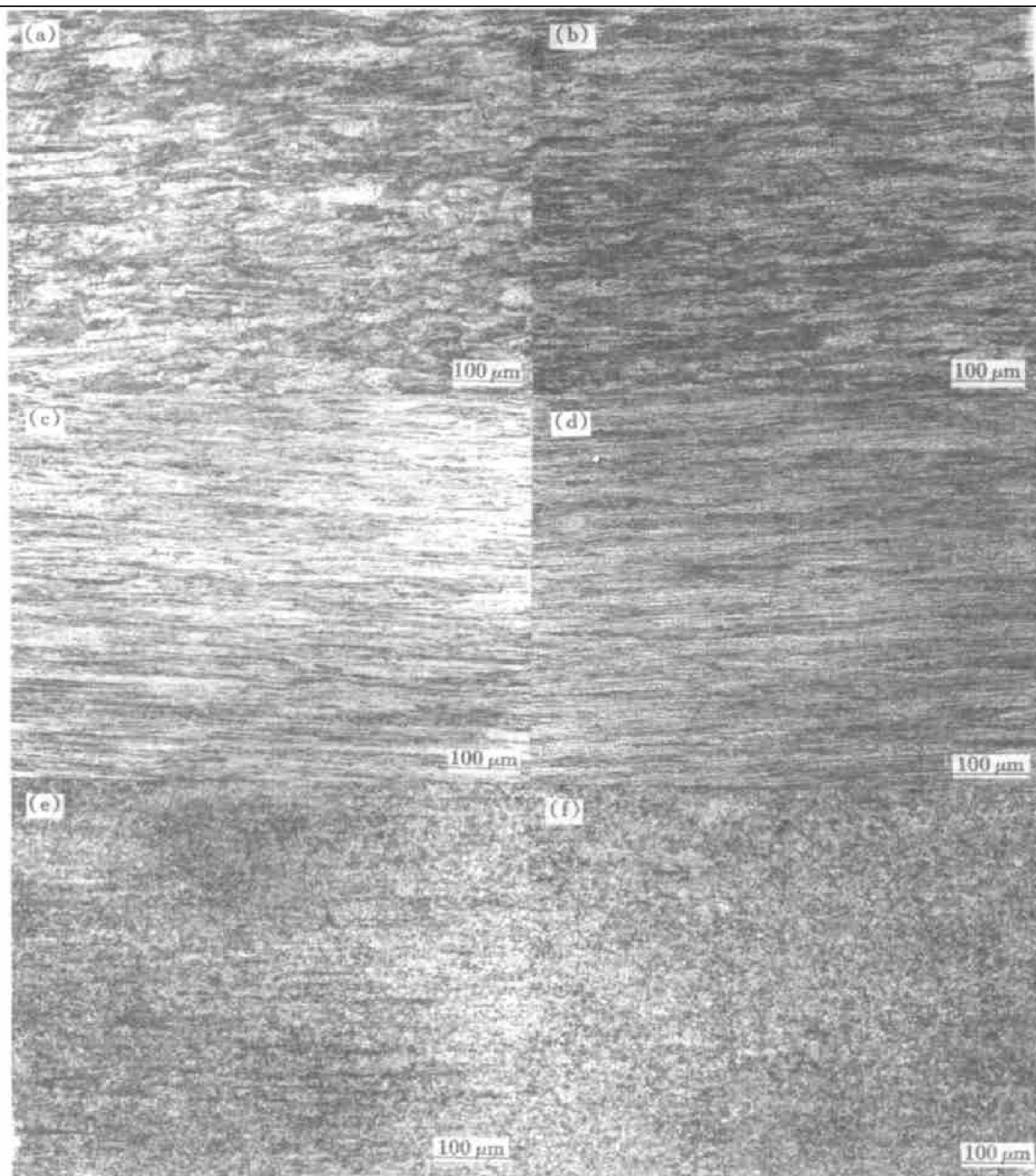


图 5 Cu-13Zn 合金显微组织

Fig. 5 Metallographies of Cu-13Zn alloys

(a) —60% cold deformed; (b) —75% cold deformed; (c) —86% cold deformed;
(d) —250 °C, 1 h; (e) —350 °C, 1 h; (f) —400 °C, 1 h

部分在回复过程中得到恢复, 且回复过程中电阻恢复分数与退火温度的关系可近似用 $X = 0.00148t$ 进行估算。

[REFERENCES]

- [1] Frank H. Recrystallization of Metallic Materials [M]. Germany, Duck Printing, 1978. 1- 49.
- [2] Szablewski J, Hanmann R. Influence of thermomechanical treatment on electrical properties of Cu-Cr alloy [J]. Materials Science and Technology, 1985, 1(11): 1053 - 1056.
- [3] LUO Feng-hua(罗丰华), YIN Zhì-min(尹志民). 微量 Zr 对 CuZn 合金再结晶的影响 [J]. J of Central South University of Technology (中南工业大学学报), 1999, 30(2): 182- 185.

- [4] YIN Zhi-min (尹志民), LUO Feng-hua (罗丰华), WANG Ming-pu (汪明朴), et al. 微量 Zr 对 Cu-13Zn 合金组织和性能的影响[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1999, 9(4): 705–708.
- [5] LUO Feng-hua (罗丰华). The Copper Alloys Used for the Asynchronous Traction Motor of High Speed Train (高速列车异步牵引电动机转子专用铜合金研究) [D]. 长沙: 中南工业大学材料科学与工程系, 1999. 11–60.
- [6] LUO Feng-hua, YIN Zhi-min, ZUO Tie-yong. Influence of Zn content and annealing process on electrical property of CuZn alloy [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2001, 11(2): 262–265.
- [7] LUO Feng-hua, YIN Zhi-min, ZUO Tie-yong. Zn 含量及残余应变对 Cu-8~13Zn 合金电阻温度曲线的影响[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 待发表.
- [8] LIU Guo-xun (刘国勋). Physical Metallurgy Principle (金属学原理) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1979. 50–80.

Resistivity of cold deformed Cu-8~13Zn alloys and its restoring during annealing process

LUO Feng-hua¹, YIN Zhi-min², WANG Ming-pu², ZUO Tie-yong¹

(1. School of Materials Science and Engineering,
Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, P. R. China;
2. Department of Materials Science and Engineering,
Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

[Abstract] The influence of cold deformation on the resistivity of Cu-8~13Zn alloys and the resistivity restoring during annealing process were investigated. The results show that the strain resistivity increases with the increases of Zn content for the same cold deformation value. At a large deformation value (section shrinkage up to 60%~85%), the resistivity increment is proportional to Zn content on the whole. 54% of resistivity increment is restored during recovering annealing temperature, and the restoring ratio is proportional to annealing temperature. The rest is restored in the subsequent recrystallization process completely.

[Key words] CuZn alloy; electrical resistivity; heat treatment

(编辑 黄劲松)