

Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金的时效强化^①

邓忠民

(昆明贵金属研究所, 昆明 650221)

摘 要 根据合金的力学和电学性能, 利用 XRD, TEM 和 SEM 技术研究了 Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金的时效强化。结果表明: 350 °C 下时效时, 力学性能增加; 边带分析有边带效应, 且随时效时间的增加调幅波长增加。电镜下观察到调幅结构, 说明该合金是调幅分解强化的合金。同时, 铝的加入没有改变合金的相结构, 但是, 对合金的强化起着重要作用。实验结果还表明, 合金在时效过程中, 调幅分解的同时还形成 DO₂₂(TiAl₃) 型结构的 Ni₃Sn 化合物相。

关键词 Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金 时效 强化

中图法分类号 TG146.11

铜基弹性材料由于具有良好的导电性和导热性及耐蚀、无磁、受冲击时不产生火花等特点, 而在仪器仪表工业中和特殊应用中占有重要的位置。Cu-Ni-Sn 系合金是调幅分解强化的优良铜合金弹性材料, 其机理已有不少报导^[1-5]。本文研究了新型铜基弹性材料 Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金强化机理以及其相结构变化。

1 实验

合金按名义成分配料, 在真空感应炉中熔铸。铸锭经均匀化处理后加工成所需试样, 中间退火温度为 820 °C。测试试样的力学性能和电学性能; 用 X 射线衍射仪研究经 820 °C 下 4.5 h 均匀化处理后又在 350 °C 下用不同时间时效试样的相结构和边带效应, 同时用透射电镜观察试样的显微结构, 用扫描电镜分析铝在合金中的分布。

2 实验结果

2.1 热处理对合金性能的影响

图 1 是冷变形 72% 的合金在不同温度下经 30 min 处理后的性能。从图 1 可看到, 在 400 °C 以下温度处理时, 随温度的提高, 合金的延伸率无变化, 而强度增加; 在 400 °C 以上处理时, 合金的强度下降, 延伸率增加。电阻率(ρ) 和电阻温度系数(α) 的变化是相反的, 且在 500 °C 左右出现拐点。

图 2 是冷变形 72% 的 Cu-5Ni-4Sn-3Al 和 Cu-9Ni-6Sn 合金在 350 °C 下时效时间对合金强度的影响。由图 2 看到, Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金的强度比 Cu-9Ni-6Sn 合金高得多, 前者达到强度的峰值比后者慢。

2.2 X 射线衍射分析

图 3 是经 820 °C 和 4.5 h 均匀化水淬后又在 350 °C 下用不同时间时效试样的 X 射线衍射谱。结构分析表明, Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金是面心立方固溶体, 时效 1230 和 1800 min 的试样有较明显的第二相衍射峰, 确定这个相是 DO₂₂(TiAl₃) 型结构的 Ni₃Sn 化合物。

用 X 射线衍射进行边带分析, 结果表明 Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金有边带效应。根据 Daniel-Lipson 公式^[6] 计算其调幅波长列于表 1。研究

① 收稿日期: 1998-10-05; 修回日期: 1998-12-06 邓忠民, 男, 57 岁, 高级工程师

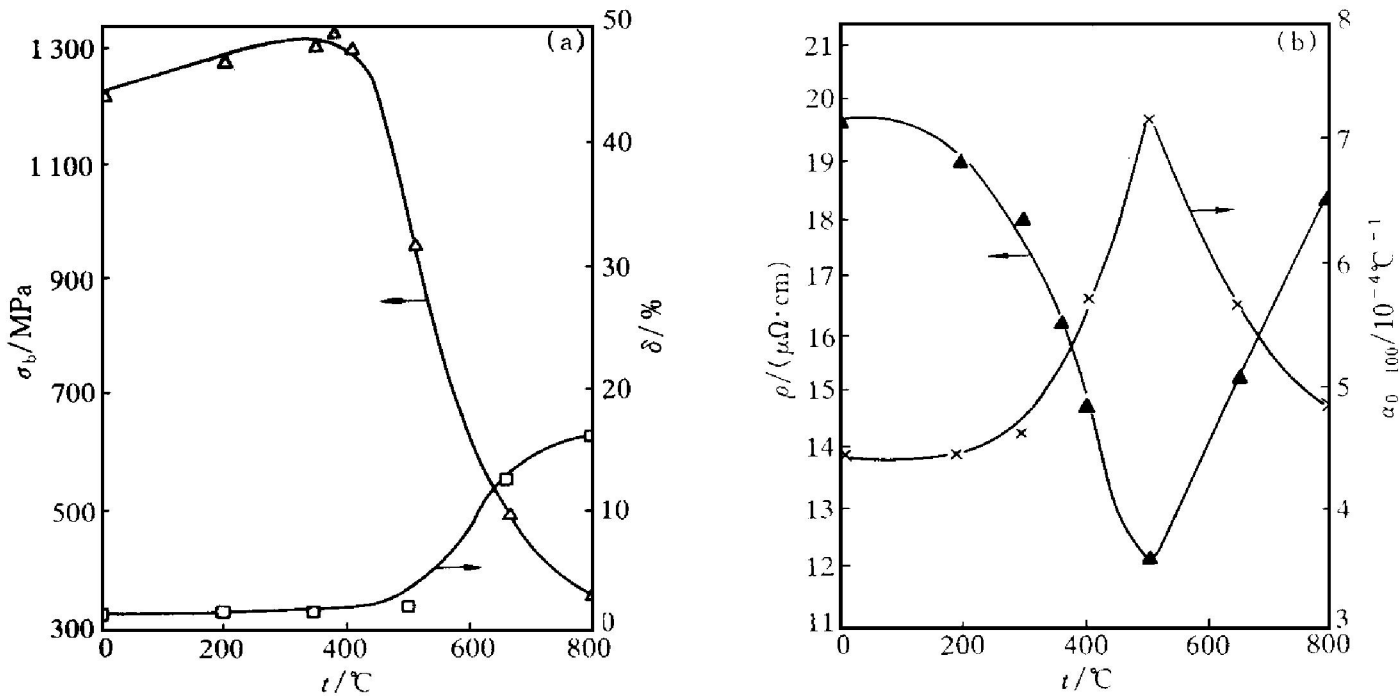


图 1 热处理温度对合金性能的影响

Fig. 1 Effect of thermal treatment temperature on properties of alloy

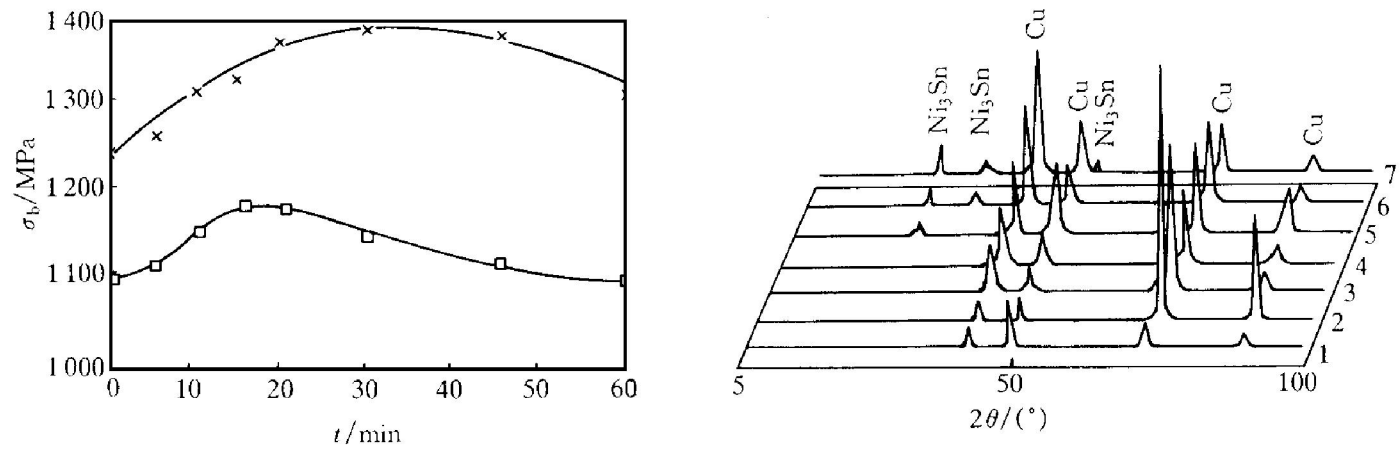


图 2 时效时间对合金强度的影响

Fig. 2 Effect of aging time on σ_b of alloy

× —Cu-5Ni-4Sn-3Al; □ —Cu-9Ni-6Sn

图 3 不同时效条件下 Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金的 X 射线衍射谱

Fig. 3 XRD spectra of Cu-5Ni-4Sn-3Al alloy

1—350 $^{\circ}\text{C}$, 10 min; 2—350 $^{\circ}\text{C}$, 25 min; 3—350 $^{\circ}\text{C}$, 40 min; 4—350 $^{\circ}\text{C}$, 60 min; 5—350 $^{\circ}\text{C}$, 300 min; 6—350 $^{\circ}\text{C}$, 1230 min; 7—350 $^{\circ}\text{C}$, 1800 min

发现, 该合金有短程有序现象, 根据公式^[7]计算的有序参数(a)也列于表 1。

2.3 TEM 观察

对经 820 $^{\circ}\text{C}$, 4.5 h 处理水淬后再经 350 $^{\circ}\text{C}$ 用 10, 300, 1230 和 1800 min 时效处理试样的 TEM(见图 4)研究表明, 经 10 min 时效的样品, 可观察到位错、孪晶, 没有明显的鱼鳞状条纹衬度, 电子衍射没有发现第二相的衍射斑点; 随着时效时间的增加, 鱼鳞状的条纹衬度

变得越来越明显, 但是即使时效 1800 min, 明场象也观察到位错线、孪晶、鱼鳞状的条纹共存, 电子衍射也没有观察到新相的衍射斑点。

2.4 SEM 观察

试样经 820 $^{\circ}\text{C}$, 4.5 h 均匀化水淬和经 820 $^{\circ}\text{C}$, 4.5 h 均匀化水淬又经 350 $^{\circ}\text{C}$, 5 h 时效后分别用 SEM 进行铝在合金中分布的研究。

表 1 Cu-5Ni-4Sr-3Al 合金
的调幅波长和有序参数

Table 1 Modulation wavelength and
parameters of short ordering for
Cu-5Ni-4Sr-3Al alloy

Temperature / °C	Time/ min	Modulation wavelength / Å	Ordering parameter, a_m
350	40		- 0.435 5
350	60	110	
350	300	124	- 0.434 4
350	1 230	161	
350	1 800	175	- 0.404 2

从图 5 看到: 无论是面扫描还是线扫描, 铝在合金中的分布是均匀的, 时效前后合金中铝的分布没有明显变化。

3 讨论

3.1 Cu-5Ni-4Sr-3Al 合金的强化机理

已有研究报导表明^[8], 冷加工可加速调幅分解的速率。上述实验证明冷变形 72% 的 Cu-5Ni-4Sr-3Al 合金在 350 °C 下时效, 强度是增加的; 边带分析表明该合金有边带效应, 其调幅波长随时效时间的增加而增加; 透射电镜下观察, 随时效时间的增加, 明场象观察到越来越明显的鱼鳞状条纹衬度。因此, 由以上 3 条理由可以得出结论, Cu-5Ni-4Sr-3Al 合金在时效过程中发生调幅分解。合金在时效过程中发生调幅分解是导致力学性能增加的主要原因。

3.2 铝对合金力学性能和相结构的影响

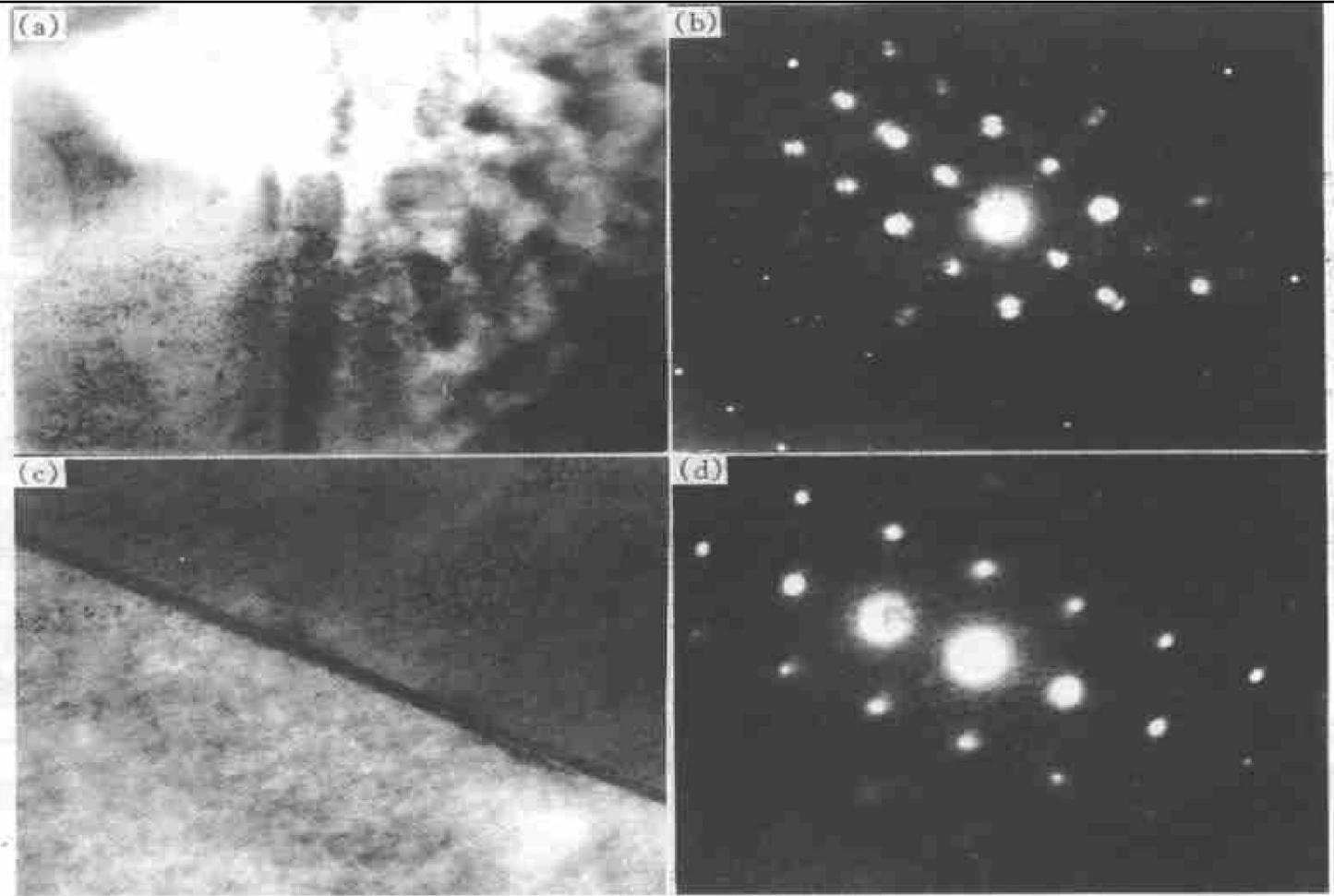


图 4 合金的 TEM 明场象和电子衍射谱

Fig. 4 TEM bright-field morphologies and diffraction patterns of alloy

(a) —Aging at 350 °C for 10 min(× 150 000); (b) —Aging at 350 °C for 10 min($L \lambda = 20 \text{ mm} \cdot \text{Å}$);
(c) —Aging at 350 °C for 1 800 min(× 150 000); (d) —Aging at 350 °C for 1 800 min($L \lambda = 20 \text{ mm} \cdot \text{Å}$)

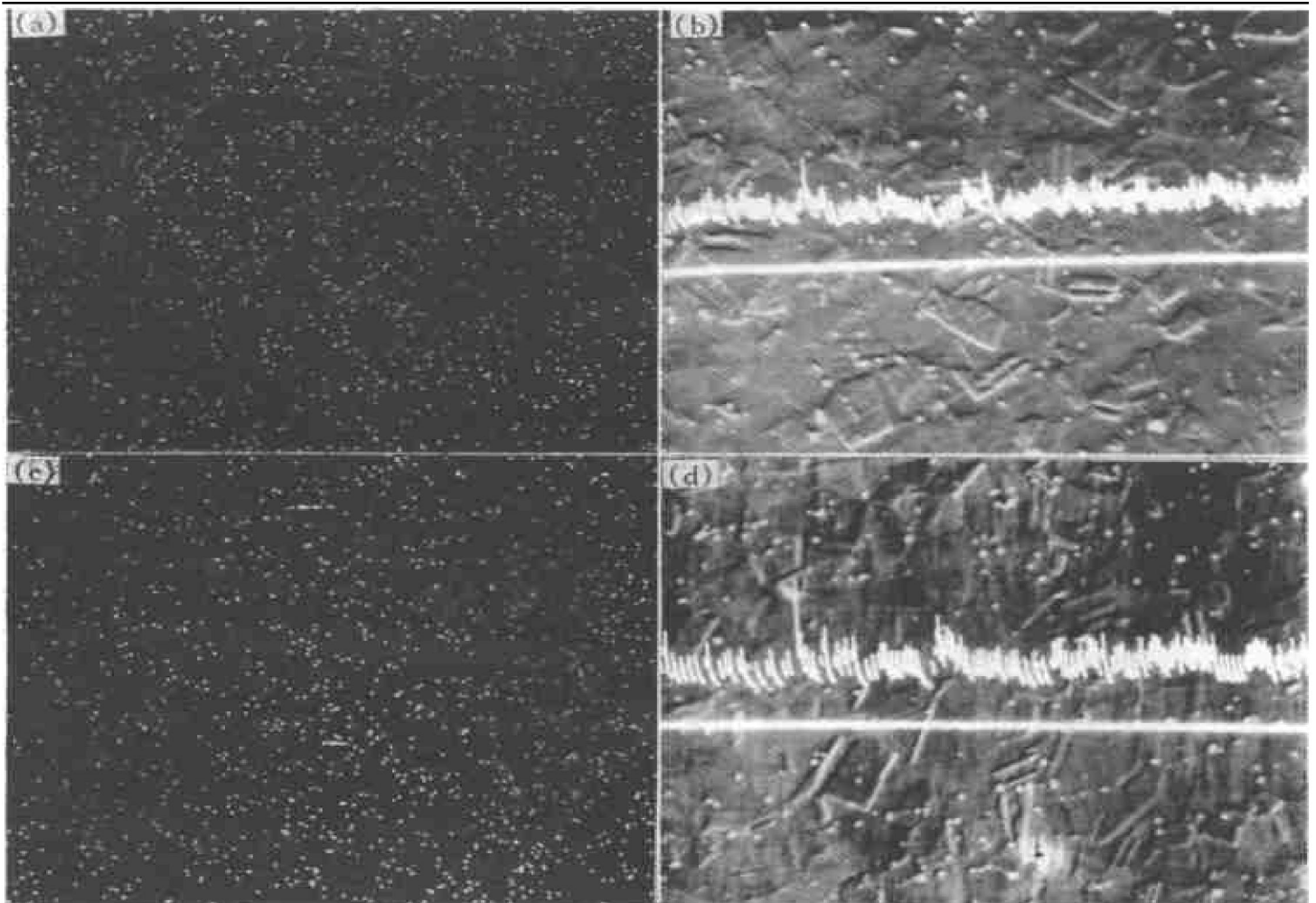


图5 铝在合金中的分布 ($\times 300$)

Fig. 5 Distribution of aluminium in alloy ($\times 300$)

- (a) —Face distribution, treated at 820 °C for 4.5 h then water quenching;
- (b) —Line distribution, treated at 820 °C for 4.5 h then water quenching;
- (c) —Face distribution, treated at 820 °C for 4.5 h then aging at 350 °C for 5 h;
- (d) —Line distribution, treated at 820 °C for 4.5 h then aging at 350 °C for 5 h

结构研究表明, Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金与 Cu-Ni-Sn 系合金一样都是面心立方结构, 在时效过程中没有发现有铝的化合物形成, 可见加入铝并没有改变 Cu-Ni-Sn 系合金的相结构。利用扫描电镜研究了固溶状态和时效状态下铝在合金中的分布, 面扫描和线扫描结果表明铝在合金中的分布是均匀的, 时效前后铝的分布无变化, 铝以固溶的形式存在于合金中。Cu-5Ni-4Sn 合金的强度应相当或低于 Cu-6Ni-5Sn 合金的强度, 但是, 从图 2 可看到, 由于铝的加入, Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金的强度高于 Cu-9Ni-6Sn 合金, 相当于 Cu-15Ni-8Sn 合金的强度^[2]。可见铝对 Cu-5Ni-4Sn 合金的强化起着

很重要的作用, 其作用机理尚不十分清楚。

3.3 合金时效过程中的相结构变化

结构研究表明: Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金是面心立方固溶体, 点阵常数 $a_0 = 3.6404 \text{ \AA}$ 。时效过程中产生面心正方晶系结构的 $\text{DO}_{22}(\text{TiAl}_3)$ 型的 Ni_3Sn 化合物, 该化合物的点阵常数 $a_0 = 4.7382 \text{ \AA}$, $c_0 = 3.1881 \text{ \AA}$ 。 Ni_3Sn 化合物随时效时间的增加而增加。从 X 射线衍射图看到, 在时效 300 min 后开始有 Ni_3Sn 化合物的衍射峰出现, 时效 1230 min 后有明显的 Ni_3Sn 化合物的衍射峰。从图 2 也可看到, Cu-5Ni-4Sn-3Al 合金强度达到最高值比 Cu-9Ni-6Sn 合金慢, 因此, 该合金调幅分解的速率是比较缓慢的。

从表1看到,合金在时效过程中有短程有序现象,短程序参数 $|a_m|$ 随时效时间的增加而减小。可见,时效过程中Cu-5Ni-4Sn-3Al合金相结构的变化与Cu-9Ni-0.3Ce相同^[9]。

4 结论

Cu-5Ni-4Sn-3Al合金在时效过程中发生调幅分解,该合金时效强化机理是调幅分解。时效过程中形成DO₂₂(TiAl₃)型Ni₃Sn化合物相,同时还有短程有序现象。

REFERENCES

1 Babouras E G, Kulkarni V D, Menon E S K *et al.* J

Appl Cryst, 1979, 12: 476.

2 Sponer S and Lefevre B G. Metall Trans, 1980, 11A: 1085.

3 Sato S, Katsutani S and Kato M. Acta Metall, 1988, 36(3): 633.

4 Plewes J T. Metall Trans, 1975, 6A: 1905.

5 Tsikalos T and Dagan M P. J Mat Sci, 1985, 20: 1301.

6 Tehekad H D and Chueh L H. Acta Metall, 1980, 28(2): 807.

7 Galnier A. X-ray Diffraction. San Francisco, 1963: 275.

8 Deng Zhongmin. Trans Nonferrous Met Soc China, 1992, 2(1): 93.

9 Deng Zhongmin (邓忠民). The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1994, 4(2): 95.

AGING STRENGTHENING OF Cu-5Ni-4Sn-3Al ALLOY

Deng Zhongmin

Institute of Precious Metals, Kunming 650221, P. R. China

ABSTRACT By means of measurement of mechanical and electrical properties, XRD, TEM and SEM, the stress aging of Cu-5Ni-4Sn-3Al alloy was studied. The experimental results showed that the mechanical properties increase with the aging time increasing at 350 °C. X-ray diffraction and TEM observed sidebands and modulated structure in aged alloy, therefore, spinodal decomposition occurred in the Cu-5Ni-4Sn-3Al alloy; the addition of aluminium has no effect on the structure of the alloy, but the effect of aluminium on the mechanical properties of the alloy is great. When spinodal decomposition occurred, DO₂₂(TiAl₃) type Ni₃Sn compound phase in the alloy was formed.

Key words Cu-5Ni-4Sn-3Al alloy aging stress

(编辑 袁赛前)