

文章编号: 1004-0609(2006)12-2066-05

铜包铝线材室温拉变形后的显微组织和力学性能^①

吴云忠, 马永庆, 张 洋, 刘世永
(大连海事大学 机电与材料工程学院, 大连 116026)

摘 要: 研究经室温拉变形后的纯铜包覆铝合金的不同线径的线材的显微组织及力学性能。结果表明: 显微组织自原始的等轴晶变为细长条纤维状, 纤维直径与形变量近似地成反比, 纤维长度与形变量的平方近似地成正比; 经室温拉变形的铜包铝线的极限抗拉强度随形变量增大而增大, 与形变量平方根呈直线关系; 延伸率随形变量增大逐渐降低, 但延伸率波动较大。根据原始纯铜和合金铝的极限抗拉强度值, 可以用复合材料强度的混合法则近似地预测不同线径的铜包铝线的极限抗拉强度。

关键词: 铜包铝线; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF 125.2

文献标识码: A

Microstructure and mechanical properties of copper clad aluminum wire by drawing at room temperature

WU Yunzhong, MA Yong-qing, ZHAN Yang, LIU Shiyong
(College of Electromechanics and Material Engineering,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of pure copper clad aluminum wires in different diameters by drawing at room temperature were studied. The results show that the microstructure of the cladding wire by drawing at room temperature is vimineous grain as fibril shape from prime equiaxed grain. The fibril diameter is in inverse proportion to deformation and the fibril length is in direct proportion to the square of deformation approximately. The ultimate tensile strength of the cladding wire by drawing at room temperature goes up in direct proportion to square root of deformation, whereas the elongation decreases and fluctuates. Based on the ultimate tensile strength of prime pure copper and alloy aluminum, the ultimate tensile strength of the cladding wires with different diameters can be doped out by mix principle of composite material.

Key words: copper clad aluminum wire; microstructure; mechanical property

复合导线与纯铜导线相比, 因价格低或力学性能高而受到广泛的重视^[1~2]。用铜包铝线制作的复合导线不仅价格低, 而且质量轻。当铜/铝的体积比为 0.15 时, 等径导线比纯铜线质量轻 62.5%, 直流等阻导线比纯铜线质量轻 55%。由于交流电在导线中的集肤效应, 因此, 这种包覆线用于传输高频电信号时, 在等径时具有与纯铜线一样的导电率, 目前已广泛地用于各种电线电缆中^[3~4]。生产铜包铝线的工艺方法很多^[5~8]。采用纯铜薄板包覆

在合金铝杆上, 在室温下拉拔成不同规格的线材的工艺方法, 也能够成功地得到双金属结合。室温拉拔时所造成的形变硬化可使强度提高, 并具有一定的塑性。极限抗拉强度和延伸率是导线的重要性能指标, 至目前为止, 还未见到根据原始材料力学性能预测铜包铝线力学性能的报道。为了满足用户对导线的力学性能的不同要求, 根据原材料的组织 and 性能预测铜包铝线的极限抗拉强度和延伸率十分重要。本文作者研究了经室温拉拔的纯铜包覆合

① 收稿日期: 2006-04-05; 修订日期: 2006-09-21

通讯作者: 马永庆, 教授; 电话: 0411-84726897; E-mail: myq@newmail.dlmu.edu.cn

金铝的不同线径的线材的显微组织及力学性能, 分析讨论了铜包铝线的显微组织和力学性能与形变量的规律, 给出了其抗拉强度的近似预测方法。

1 实验

用带状纯 Cu 薄板包覆在直径为 $d10\text{ mm}$ 合金铝杆上, 以自制拉拔机 YL-22 在室温拉拔为不同线径($d\ 5.05\sim 0.10\text{ mm}$) 的线材。纯 Cu 纯度为 99.98%(质量分数), 两种合金铝的原材料的化学成分及力学性能分别列于表 1, 2。用 MM6 光学显微镜和 PilipsXL30 扫描电镜分析显微组织, 晶粒的平均尺寸在 5 个观测区域上取平均值; 用 LDS-2K 拉伸实验机测定抗拉强度和延伸率。纯 Cu 包覆合金 Al(1) 简称为 Cu+ Al(1) 线, 纯 Cu 包覆合金 Al(2) 简称为 Cu+ Al(2) 线。

表 1 合金铝原材料的化学成分

Table 1 Chemical composition of alloy aluminum(mass fraction, %)							
Alloy	Si	Mg	Mn	Fe	Ce	La	Al
Al(1)	0.45	0.74	0.003	0.25	0.22	0.001	Bal.
Al(2)	0.42	3.38	0.006	0.21	0.13	0.001	Bal.

表 2 纯铜和合金铝原材料的力学性能

Table 2 Mechanical properties of pure copper and alloy aluminum		
Alloy	σ_b/MPa	$\delta/\%$
Pure Cu	245.0	38.0
Al(1)	138.0	20.5
Al(2)	246.9	21.2

2 结果与分析

2.1 显微组织

原始的 αCu 相和 αAl 相是等轴晶。原合金 Al(1) 的组织为 αAl 相加少量点状 Mg_2Si ; 原合金 Al(2) 的组织为 αAl 相加较多量点状和粒状 Mg_2Si ; 两者的 αAl 相均为 $15\sim 25\ \mu\text{m}$ 的等轴晶(图 1(a)、(b))。铜包铝线外层是 αCu 相, 内层是 αAl 相加点状 Mg_2Si 或加点状和粒状 Mg_2Si 。拉拔时 αCu 和 αAl 的晶粒变形会形成丝织构, 各晶粒的某一晶向大致与拔丝方向平行。经室温线拉后的 αCu 相和 αAl 相晶粒是延拉拔方向拉长呈纤维状, 随变形量增大纤维加长。因此, 横断面晶粒变

为不规则的形状(图 2(a)), 纵断面变为纤维状(图 2(b))。很显然, 纤维的直径随变形量增加而减小, 纤维的长度随变形量增加而加大(见表 2)。

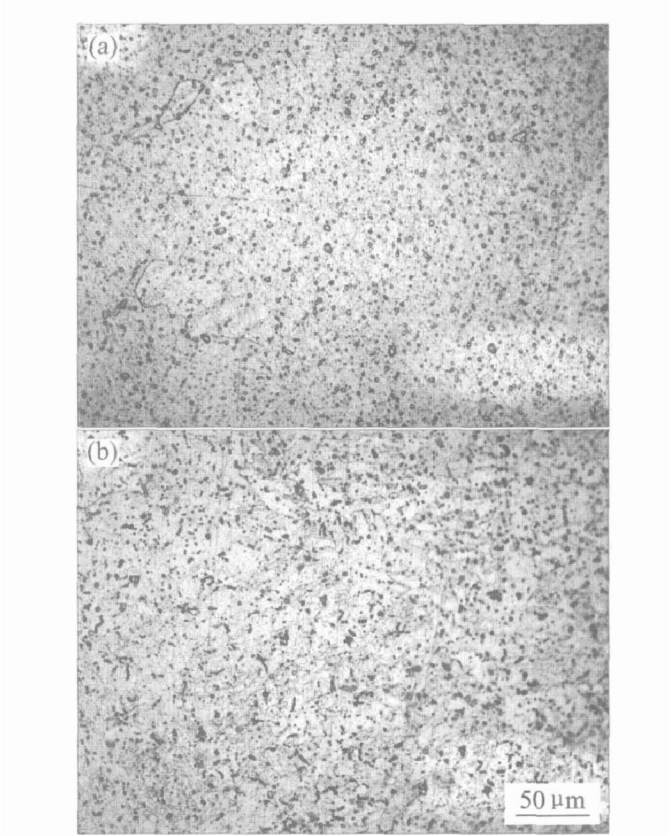


图 1 合金铝的原始显微组织

Fig. 1 Microstructures of prime alloy aluminum (a) —Alloy Al(1); (b) —Alloy Al(2)

2.2 力学性能

经室温拉拔的 Cu 包 Al 线的极限抗拉强度与形变量平方根关系如图 3 所示。由图可见, 随形变量增大, 其极限抗拉强度随形变量增大而增大, 与形变量平方根呈直线关系。而且, 在同样的形变量时, 原材料强度高的拉拔后强度也高, 其中, Cu+ Al(2) 线极限抗拉强度波动较大, 这可能与线径过小及组织中的较多的第二相的破断作用有关。当形变量平方根为 9.62 时, Cu+ Al(1) 线极限抗拉强度升高至 349 MPa, Cu+ Al(2) 线极限抗拉强度升高至 675 MPa。延伸率与形变量平方根关系如图 4 所示。由图可见, 经室温拉拔的 Cu 包 Al 线的延伸率随形变量增大逐渐降低, 但延伸率波动较大, 这也与线径过小和组织中的第二相的破断作用有关。而且, Cu+ Al(1) 线和 Cu+ Al(2) 线延伸率大小没有明显差别。

多晶体金属强度随形变量增大而上升的本质被认为是加工硬化^[9]。经室温拉拔的线材组织中既有晶界的延长, 也有晶粒内部位错密度的增加, 拉拔

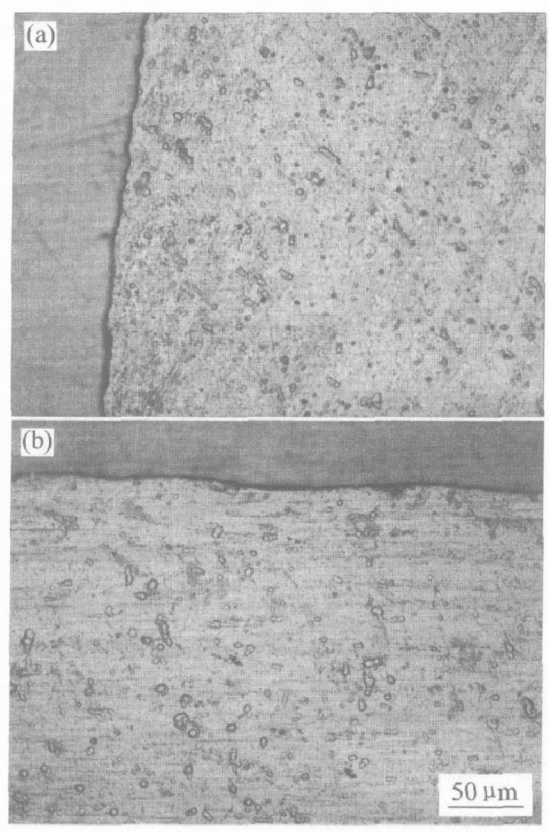


图 2 经室温拉拔的 Cu+ Al(1) 线的显微组织
Fig. 2 Microstructures of cladding wires of Cu+ Al(1) by drawing at room temperature
(a) —Transverse section($\bar{\epsilon}$ = 3.34);
(b) —Longitudinal section($\bar{\epsilon}$ = 1.98)

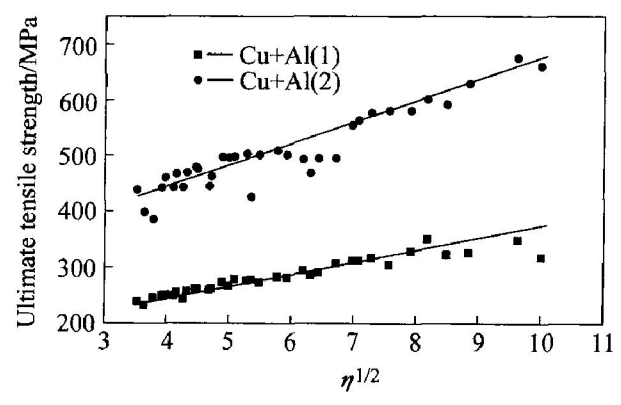


图 3 Cu 包 Al 线极限抗拉强度与形变量平方根的关系
Fig. 3 Relationships of ultimate tensile strength of cladding wires with square root of deformation

时形成丝织构,各晶粒的某一晶向大致与拉拔方向平行。

3 讨论

多晶体金属强度随形变量增大而上升的本质被

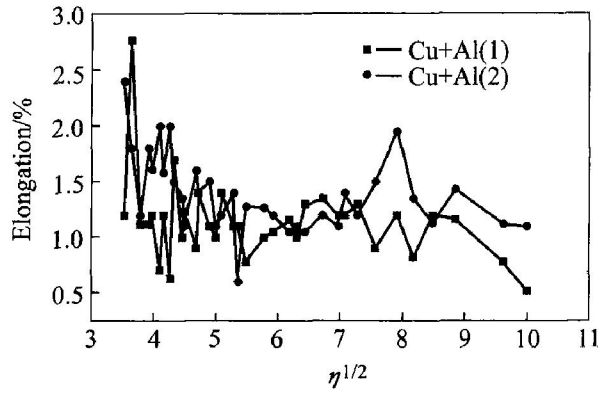


图 4 Cu 包 Al 线延伸率与形变量平方根的关系
Fig. 4 Relationships of elongation of cladding wires with square root of deformation

认为是加工硬化^[9~10]。随塑性变形的进行其位错不断增值,其强度也不断提高。经室温拉拔的线材组织中晶界的延长与位错密度增加是等同的。高纯铝多晶体轧制时,具有(011)[100]和(210)[001]取向的晶粒沿轧向轴旋转,原始细小等轴晶粒时,塑性变形的织构的模拟计算与 X 射线衍射测算的晶体三维取向分布函数具有很好的一致性^[11~12]。

如果原始等轴晶粒体积近似地按一个球体计算,拉拔后的纤维晶粒体积近似地按圆柱体计算^[13],纤维直径 d 可以近似地写成:

$$d = \frac{d_0}{\eta} \quad (1)$$

式中 d_0 为原始的等轴晶粒直径; η 为形变量。

按拉拔前后的体积不变规律,则纤维长度 L 可表示为

$$L = \frac{2}{3} d_0 \eta^2 \quad (2)$$

显然,纤维直径与形变量成反比,而纤维长度与形变量平方成正比。表 3 给出纤维的直径测量值和计算值以及纤维长度的计算值,其中,由于纤维长度过大使测量无法进行。

对于多晶体金属,其屈服强度 σ_s 与晶粒直径 d 符合 Hall-Petch 公式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k d^{-1/2} \quad (3)$$

式中 σ_0 和 k 均为常数。如果屈服强度 σ_s 与极限强度 σ_b 之比为 α 则 σ_b 为

$$\sigma_b = \alpha \sigma_0 + \alpha k d_0^{-1/2} \eta^{1/2} \quad (4)$$

因此,如果 α 和 d_0 为确定值时,经室温拉拔的包覆线的极限强度随形变量增大而增大,与形变量平方根呈直线关系。

根据原始的抗拉强度值(见表1),拉拔后的纯

表 3 Cu+ Al(1) 线中 α Al 相纤维状晶粒的测量值和计算值

Table 3 Results of measurement and calculation for fibril grain of α Al in cladding wires of Cu+ Al(1)

η	$d_{\text{mea}}/\mu\text{m}$	$d_{\text{cal}}/\mu\text{m}$	$L_{\text{cal}}/\mu\text{m}$
1.69	12.0	11.8	38.1
1.98	10.0	10.1	52.5
3.08	5.9	6.5	127.1
3.34	5.8	6.0	149.5
4.74	4.5	4.2	301.1

铜极限抗拉强度 σ_b^{Cu} 和合金 Al(1) 的极限抗拉强度 $\sigma_b^{\text{Al}(1)}$ 分别为

$$\sigma_b^{\text{Cu}} = 245 + 78\eta^{1/2} \tag{5}$$

$$\sigma_b^{\text{Al}(1)} = 138 + 14\eta^{1/2} \tag{6}$$

式(5)、(6)中的常数随原始实验数值而变化。

应用复合材料强度的混合法则^[13~15], 能够近似地预测不同线径的 Cu+ Al(1) 线的极限抗拉强度 σ_b^{wire} 为

$$\sigma_b^{\text{wire}} = \sigma_b^{\text{Cu}} \varphi(\text{Cu}) + \sigma_b^{\text{Al}} \varphi(\text{Al}) \tag{7}$$

式中 $\varphi(\text{Cu})$ 、 $\varphi(\text{Al})$ 分别为包覆线的纯铜和合金 Al 的体积分数。当 $\varphi(\text{Cu}) = 0.19$ 和 $\varphi(\text{Fe}) = 0.81$ 时, 按式(5)~(7)的计算结果如图 5 所示, 与实验值接近(见图 3)。

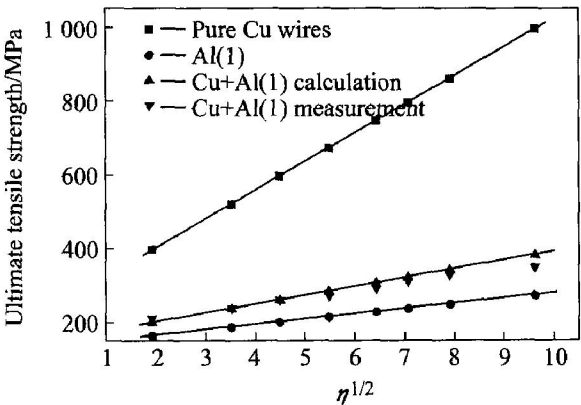


图 5 极限强度随形变量平方根变化的计算结果

Fig. 5 Calculation results of ultimate tensile strength with square root of deformation

在预测不同线径的 Cu+ Al(2) 线的极限抗拉强度时, 只须做少量实验将式(6)改写为 $\sigma_b^{\text{Al}(2)} = 246.9 + 44.5\eta^{1/2}$ 即可。

4 结论

1) 经室温拉拔的铜包铝线的显微组织是纤维

状细长晶粒。纤维直径与形变量近似地成反比, 纤维长度与形变量的平方近似地成正比。

2) 经室温拉拔的铜包铝线极限抗拉强度随形变量增大而增大, 与形变量平方根呈直线关系; 延伸率随形变量增大逐渐降低, 但延伸率波动较大。

3) 根据原始纯铜和合金铝的极限抗拉强度值, 能够用复合材料强度的混合法则, 近似地预测不同线径的铜包铝线的极限抗拉强度。

REFERENCES

[1] Hughes D D. High strength conductor for pulsed magnets[J]. Mater Sci Eng A, 1993, A168: 35 - 40.

[2] GE J P, YAO Z G, ZHAO H. Strength of the deformation-processed Cu-Fe in situ composites [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2005, 15(3): 553 - 559.

[3] 李明茂. 金属复合线材的生产使用现状与发展趋势[J]. 塑性工程学报, 2005, 12(3): 93 - 95.

LI Ming-mao. Present condition and development of metallic composite wires' forming and application[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12(3): 93 - 95.

[4] 孙德勤, 吴春京, 谢建新. 铜包铝复合线材制造技术的发展现状与前景[J]. 电线电缆, 2003, 3: 3 - 6.

SUN De-qin, WU Chun-jing, XIE Jian-xin. The present and future of the manufacturing technology for copper clad aluminum bimetallic wires [J]. Electric Wire & Cable, 2003, 3: 3 - 6.

[5] 吴春京, 于治民, 谢建新, 等. 充芯连铸法制备铜包铝双金属复合材料的研究[J]. 铸造, 2004, 53(5): 432 - 434.

WU Chun-jing, YU Zhi-min, XIE Jian-xin, et al. Fabrication of bimetal composites of copper cladding aluminum with process of continuous core-filling casting[J]. Foundry, 2004, 53(5): 432 - 434.

[6] 孙德勤, 吴春京, 谢建新. 金属复合线材成形工艺的研究开发概况[J]. 材料导报, 2003, 17(5): 65 - 68.

SUN De-qin, WU Chun-jing, XIE Jian-xin. Research and development of forming technologies for metallic composite wires[J]. Materials Review, 2003, 17(5): 65 - 68.

[7] 宣天鹏. 铜包铝线镀覆工艺的研究[J]. 表面技术, 1995, 24(2): 10 - 14.

XUAN Tian-peng. Study on plating process of copper plated aluminum wire[J]. Surface Technology, 1995, 24(2): 10 - 14.

[8] 胡捷. 铜包铝复合线材静液挤压加工工艺研究[J].

- 新材料新工艺, 2001, 6: 27 - 28.
- HU Jie. The study to produce copper fold aluminum composite wire by hydraulic extrusion[J]. New Technology and New Process, 2001, 6: 27 - 28.
- [9] SUN Zurgang, ZHENG Weiwei, YANG Wangyue, et al. Study on the deformation of undercooled austenites in plain low carbon steels[A]. Proceedings of Second International Conference on Advanced Structural Steels[C]. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2004: 68 - 73.
- [10] DONG Han, LIU Qingyou, YANG Zhongmin, et al. Ultrafine grained steels and their characteristics[A]. Proceedings of Second International Conference on Advanced Structural Steels[C]. Shanghai: The Chinese Society for Metals, 2004: 47 - 59.
- [11] 邓运来, 张新明, 唐建国, 等. 多晶纯铝轧制变形晶粒局部取向的演变[J]. 金属学报, 2005, 41(5): 477 - 482.
- DENG Yunlai, ZHANG Xinming, TANG Jianguo, et al. Evolution of local orientations within individual grains in rolled pure polycrystalline aluminum[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(5): 477 - 482.
- [12] 邓运来, 张新明, 刘 瑛, 等. 几何因素与摩擦耦合对高纯铝箔剪切织构的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(4): 634 - 638.
- DENG Yunlai, ZHANG Xinming, LIU Ying, et al. Effect of deformation geometry and friction on shear texture in high purity aluminum foils[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(4): 634 - 638.
- [13] WU Yunzhong, MA Yongqing, LIU Sha, et al. Microstructure and mechanical properties of clad copper-steel wire[A]. Proceedings of International Symposium on Materials Science and Engineering[C]. Taiyuan: Chinese Heat Treatment Society and Taiyuan University of Technology, 2005: 723 - 726.
- [14] Thilly L, veron M, Ludwig O, et al. High-strength materials in-situ investigations of dislocation behavior in Cu-Nb multifilamentary nanostructured composites[J]. Philos Mag A, 2002, A82: 925 - 942.
- [15] WU Yunzhong, GAO Hongtao, MA Yongqing, et al. Microstructure and mechanical properties of plain carbon steel Q195 by wire drawing at room temperature[A]. Proceedings of The Fifth International Conference on HSLA Steels[C]. Sanya: Iron & Steel, 2005: 408 - 412.

(编辑 陈爱华)