第 27 卷第 8 期 Volume 27 Number 8 2017年8月 August 2017

DOI: 10.19476/j.ysxb.1004.0609.2017.08.08

形变时效对不同 Cu 含量的 稀土铝电工圆杆的影响



胡谢君1,张仁国2,张晓燕1,林廷艺1,张俊杰1,黄 鑫1, 巩向鹏1, 鄢 俊1

(1. 贵州大学 材料与冶金学院,贵州 550025;2. 贵州合润铝业新材料科技有限公司,贵州 550000)

摘 要: 铝电工圆杆是电缆、电线的坯料,其质量好坏直接影响铝导线的优劣。通过扫描电镜、X 射线物相分析 等方法,对比铸态、轧制态和形变时效态下不同 Cu 含量的稀土铝电工圆杆的抗拉强度和导电率,研究形变热处 理对铝电工圆杆的影响。结果表明:经过形变热处理后,试样的晶界得到薄化,组织更加均匀;当 Cu 含量为 0.2% 时,通过(500 ℃,3 h 固溶处理)+ 85%轧制+(150 ℃,12 h 时效)的形变热处理,试样抗拉强度达到 179 MPa,导 电率为 60.78%IACS,综合性能较佳。

关键词:形变热处理;铝电工圆杆;导电率;抗拉强度

文章编号: 1004-0609(2017)-08-1597-06

中图分类号: TG146.21

文献标志码:A

随着我国"西部大开发"、"西电东输"、"城乡电 网改造"项目的实施,输电线路已向高压化、大容量 化、远距离化方面发展和延伸,特别是大跨度、超高 压线路对铝导线的综合性能提出更为严格的要求。铝 导线由铸造电工铝锭经连铸连轧而成,所以电工圆杆 是制造铝绞线的半成品,其质量好坏直接影响铝导线 质 量[1-2]。而铝电工圆杆的抗拉强度和导电率这两项 主要质量指标却相互矛盾,往往难以同时满足,要保 持材料高的导电率,则其强度往往不足,而要提高材 料强度却在很大程度上会降低其导电性能。目前,较 多的研究主要分别探讨形变热处理和合金化对铝合金 的影响^[3-7],如李红英等^[3]的固溶处理对 7B04 铝合金 组织及性能的影响,而对于合金化与形变热处理相结 合工艺的研究相对较少。本文作者探究了形变时效对 不同 Cu 含量的稀土铝电工圆杆抗拉强度和导电率的 影响,旨在保证抗拉强度的前提下,提升铝电工圆杆 的导电率。

1 实验

1.1 实验材料

本实验的原材料为硼化后质量分数为 99.7%的工

收稿日期: 2016-05-17; 修订日期: 2016-10-24

表1 实验原料合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of experimental alloy (massfraction, %)

Al	В	Si	Fe	Mg	
99.685	0.020	0.067	0.111	0.005	
Cr	Ni		Ti	Others	
0.001	0.007		0.033	0.071	

业纯铝,成分如表1所列。Cu和Ce均以中间合金方 式添加。用井式电阻炉中进行熔炼,并加入六氯乙烷 (C₂Cl₆)进行精炼,铸态铝棒尺寸为*d*170 mm×170 mm。

1.2 加工工艺

形变时效工艺为固溶+轧制+时效,固溶处理工艺 为(500 ℃,3 h);冷变形轧制工艺变形量为85%;时 效工艺为(150 ℃,12 h)。

1.3 分析测试方法

采用 F50-150 型轧圆机进行轧制;采用 Instron-8501 材料拉伸试验机进行试样的抗拉强度测试;利用 Sigma2008B/C 数字涡流金属电导率仪测量试样电导 率;借助 Olympus-BH2 光学显微镜、KYKY-2800B 扫描电镜、APOLLO-10X 能谱仪观察显微组织形貌及

基金项目:贵州省工业攻关项目(黔科合 GZ 字[2015]3004-2)

通信作者: 张晓燕, 教授; 电话: 13087829047; E-mail: ivzhangxiaoyan@163.com

元素分布;利用 X'Pert PRO X 射线多晶衍射仪分析合 金中的物相组成。

2 结果与分析

2.1 不同工艺状态下试样的导电率和抗拉强度

图 1 所示为不同工艺状态下 Cu 含量对稀土铝电 工圆杆的抗拉强度和导电率影响。由图 1 可知: 铸态 下,随着 Cu 含量增加,抗拉强度逐渐升高,导电率 急剧下降;固溶处理+轧制后,随着 Cu 含量增加,抗 拉强度呈先升后降趋势,导电率却呈下降趋势,抗拉 强度在 Cu 含量为 0.2%处达到 183 MPa 峰值,导电率 为 59.87%IACS; 固溶处理+轧制+时效后抗拉强度随着 Cu 含量的增加也呈先升后降趋势,导电率缓慢下降,抗拉强度也在 Cu 含量为 0.2%处达到 179 MPa 的峰值,导电率为 60.78%IACS。对比 3 种状态下可知:在 Cu 含量相同的情况下,铸态样经过轧制后,试样抗拉强度得到大幅度提高,导电率有小幅下降^[7]。轧制+时效处理后,抗拉强度下降,但导电率有所回升。

2.2 不同工艺状态下试样的显微组织及 EDS 能谱分析 2.2.1 金相组织

图 2 所示为不同状态下的铝电工圆杆显微组织。 由图 2 可见,未添加 Cu、Ce 的纯铝电工圆杆晶粒相 对粗大,且在部分晶界处存在有夹杂物或空隙(图 2(a));



图1 不同工艺状态下 Cu 含量对铝电工圆杆性能的影响

Fig. 1 Effect of Cu content on properties of electrical round aluminum rods under different process conditions: (a) Tensile strength; (b) Conductivity



图 2 不同状态下的铝电工圆杆的显微组织

Fig. 2 Microstructures of electrical round aluminum rods under different conditions: (a) Al; (b) Al-0.2%Cu, as-cast; (c) Al-0.2%Cu, solution+rolling; (d) Al-0.2%Cu, solution+rolling+aging



图 3 试样的 SEM 像及面扫描元素分布

Fig. 3 SEM images of samples and element distribution diagram of surface scanning: (a) Solution+rolling; (b) Solution+rolling+ aging; (c) Solution+rolling+aging, Ce; (d) Solution+rolling+aging, Cu

复合添加 Cu、Ce 后, 晶粒细化及晶界净化效果明显, 且二次相粒子均匀分布于晶界及其附近区域(见图 2(b)); 轧制后的试样, 晶粒沿着变形方向被拉长、破碎, 晶界薄化且变得模糊不清(见图 2(c)); 试样经过形变时效后, 析出相增加, 且均匀分布在基体上, 晶粒得到细化(见图 2(d))。

2.2.2 微观形貌及 EDS 能谱分析

图 3(a)所示为固溶处理+85%轧制的 Cu 含量为 0.2%稀土铝电工圆杆的形貌。由图 3(a)可知: 轧制后, 出现较多的空洞(如 *A*、*B* 两点),空洞的出现进一步增 加了试样的电阻率;第二相较少可能是大部分元素固 溶在基体内。对空洞进行能谱分析(见表 2)可知: *A* 点 主要含有 Al、Cu、Ce 及 Fe 等元素;而 *B* 点主要含有 的是 Al、Cu、Ce 及 Fe 等元素;而 *B* 点主要含有 的是 Al、Cu、Ce 等元素。如图 3(b)所示,试样经过 "固溶处理+轧制+时效"后,也出现圆点状和长条状 空洞,这些空洞大部分周围呈现亮色,所以这些空洞 可能是析出的第二相在抛光时掉落留下的,合金元素 的析出形成较多的第二相,进而提高试样的导电率。 对长条状(*a* 点)和圆点状(*b*、*c* 点)进行能谱分析,各点 的元素组成如表 2 所列。由图 3(c)和 (d)可知: Ce 和 Cu 主要分布在析出相及晶界处。

2.3 不同工艺状态下试样的物相分析

图 4 所示为 Al-0.2%Cu 试样固溶轧制后,经过时 效和未经时效试样的 XRD 谱。由图 4 可知:形变时

表2 各点的元素成分表

 Table 2
 Element composition of each point

· ·							
Point -	Mole fraction/%						
	Al	Cu	Ce	Fe	Si		
A	97.41	1.73	0.57	0.29	0		
В	94.63	0.69	0.53	0.18	0.03		
а	97.27	1.66	0.71	0.33	0.03		
b	94.5	2.92	1.53	0.53	0		
с	71.89	2.98	23.1	1.97	0.06		



图 4 Al-0.2%Cu 试样的 XRD 谱



效后,基体 Al 峰下降,CuAl₂相析出量增加,且有少量的 AlFe₃、Fe₂Si 及由 Al、Cu、Ce、Fe 及 Si 形成的复杂第二相析出。说明形变时效后,析出相增多,使得一些元素由固溶态较多的转变为析出态,因此,导电率相对只经过轧制的试样来说有一定量的提升^[8-9]。

3 分析讨论

3.1 形变处理对试样导电率的影响

铸态下, Cu 和 Ce 复合加入时,导电率呈下降趋势。虽然 Ce 与试样中 Si、Fe 等元素反应形成化合物, 使这些元素从固溶态转变成析出态,能够有效降低杂 质元素对导电率的有害影响^[10],但因为 Cu 和 Ce 的加 入对晶粒的细化程度较大,使晶界面积增多,从而增 大了电子通过晶界的阻力,此外,Cu 的加入造成晶格 畸变,增加了对电子的散射,所以复合加入 Cu 和 Ce, 电导率总的趋势仍为下降^[11-13];经固溶处理+轧制后, 晶粒细化使晶界面积增大是导电率小幅度下降的主要 原因;轧制+时效后,析出相增多,使得一些元素由 固溶态转变为析出态。从金属学导电理论来说,合金 元素的析出态对合金的导电率减小效果低于固溶态。 因此,轧制+时效后的试样相对只经过轧制的试样来 说,导电率有一定量的提升。

3.2 形变处理对试样抗拉强度的影响

铸态下, Cu和 Ce的加入均有细晶强化的作用, 且部分 Cu 与铝基体形成 CuAl₂ 难溶相,阻碍位错运 动以及晶界滑移[14-15],产生强化效果,从而提高了合 金的抗拉强度。固溶处理+轧制后,一方面枝晶网胞 及粗大的第二相被压碎, 晶粒得到细化, 细小的析出 相在组织中分布更加均匀(见图 2),有利于试样抗拉强 度的提高[16];另一方面随着轧制变形量的增加,试样 塑性变形较为明显,沿着轧制方向晶粒被拉伸,产生 了大量纤维状变形织构,对晶内的进一步滑移起到强 烈的阻碍作用。该织构内部位错密度较高,且具有高 的形变储能,由于轧制在较短时间完成,应力来不及 释放而残留在试样内部,从而使得试样的抗拉强度提 高[17]。经固溶处理+轧制+时效后,轧制时产生大量位 错,在回复过程中形成稳定的亚结构,实现亚结构强 化。同时形变过程中产生的大量位错加速了脱溶过程, 使脱溶产物量增多且更弥散,而大量沿位错析出的弥 散质点强烈的钉扎位错运动,增加位错运动难度,试 样的抗拉强度因此得以提高,进而部分弥补了低温回 复造成的部分形变储能的释放,所以相对只经过轧制 的试样来说,其抗拉强度下降量较少^[18]。总之,其有 较高的抗拉强度主要的原因是形变强化和第二相强化 的共同作用。

4 结论

4.1) 经过(500 ℃,3 h 固溶处理)+85%轧制
 +(150 ℃,12 h 时效)形变热处理,Al-0.2%Cu 合金的
 析出相增多,且均匀地分布在基体上,使导电率达到
 60.78%IACS。

2) 经过(500 ℃,3 h 固溶处理)+85%轧制
+(150 ℃,12 h 时效)形变热处理后,虽然低温回复造成的部分形变储能释放,但是由于形变强化和第二相强化的共同作用,使Al-0.2%Cu 合金的抗拉强度仍达到 179 MPa。

REFERENCES

- 黄元春,颜徐宇,邱 涛. 过冷轧制 AA6061 铝合金的显微组 织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(1): 12-18.
 HUANG Yuan-chun, YAN Xu-yu, QIU Tao. A study on microstructure characteristics and mechanical properties of cry-rolled AA6061 Al alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(1): 12-18.
- [2] 李 尧. 异步轧制对 3004 铝合金变形织构及制耳率的影响[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 116-120.
 LI Yao. Effects of cross shear rolling on deformation textures and deep drawing earing of 3004 aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(2): 116-120.
- [3] 李红英,刘蛟蛟,余玮琛,郝壮志.固溶处理对 7B04 铝合金
 组织及性能的影响[J].中国有色金属学报,2016,26(2):
 252-260.

LI Hong-ying, LIU Jiao-jiao, YU Wei-chen, HAO Zhuang-zhi. Effects of solution treatment on microstructures and properties of 7B04 aluminum alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(2): 252–260.

 [4] 刚建伟,韩小磊,李志辉,朱宝宏,张永安.固溶时效处理对 Al-6.6Zn-2.3Mg-2.1Cu-0.12 Zr 合金组织性能的影响[J].稀有 金属,2012,36(4):525-526.
 GANG Jian-wei, HAN Xiao-lei, LI Zhi-hui, ZHU Bao-hong, ZHANG Yong-an. Solution and aging treatment of

ZHANG Yong-an. Solution and aging treatment of Al-6.6Zn-2.3Mg-2.1Cu-0.12 Zr aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2012, 36(4): 525–526.

[5] 刘竞艳,许飞,苗壮. 富铈混合稀土对 Al-4.5Cu 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(S2): 573-576.

胡谢君,等:形变时效对不同Cu含量的稀土铝电工圆杆的影响

LIU Jing-yang, XU Fei, MIAO Zhuang. Influence of cerium-rich mischmetal on the microstructure and mechanical properties of Al-4.5Cu binary alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(S2): 573–576.

 [6] 王欣欣, 毛 亮. 稀土在铝合金中的作用[J]. 铸造技术, 2010, 31(12): 1617-1620.

WANG Xin-xin, MAO Liang. Effect of rare earth elements in aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2010, 31(12): 1617–1620.

 [7] 秦兴国,吴玉程,黄新民,杨 明,晏广华,王艳青.稀土元 素对高强高导铝合金的性能影响[J].金属功能材料,2010, 17(6):17-21.

QING Xing-guo, WU Yu-cheng, HUANG Xin-min, YANG Ming, WANG Yan-qing. Effect of rare earth elements on properties of aluminum alloy with high conductivity and strength[J]. Metallic Functional Materials, 2010, 17(6): 17–21.

[8] 戚文军, 王顺成, 陈学敏, 农 登, 周 志. Al-5Ti-1B 合金的 有效形核相与晶粒细化机制[J]. 稀有金属, 2013, 37(2): 179-185.

QI Wen-jun, WANG Shun-cheng, CHENG Xue-min, NONG Deng, ZHOU Zhi. Effective nucleation phase and grain refinement mechanism of Al-5Ti-1B master alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(2): 179–185.

- [9] 李 杰,宋仁国,陈小明,马晓春. 7050 高强铝合金强化固 溶处理研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(6): 125-128.
 LI Jie, SONG Ren-guo, CHEN Xiao-ming, MA Xiao-chun. Study on strengthening solution treatment for 7050 high strength aluminum alloy[J]. Hot Working Technology, 2009, 38(6): 125-128.
- [10] KAMRAN D, ATIYE N. Interactive effects of aging parameters of AA6056[J]. Metals and Materials International, 2011, 18(5): 757–767.
- [11] NORMAN A F, HYDE K. Examination of the effect of Sc on 2000 and 7000 series aluminium alloy castings: for improvements in fusion welding[J]. Materials Science & Engineering A, 2003, 354(1): 188–198.

- [12] PAN F S, YANG M B, CHENG L. Effects of minor scandium on as-cast microstructure, mechanical properties and casting fluidity of ZA84 magnesium alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 527(4): 1074–1081.
- [13] ZWICHAU E C, FREIBERG U T. Possibilities for the of industrial Cal culation heat treatment diagrams of industrial Al Zn Mg(Cu) alloys[J]. Aluminum, 1999, 75(1/2): 90–96.
- [14] 刘东雨,李文杰. 高电导率耐热铝合金导体材料的合金设计
 [J]. 材料热处理学报, 2014, 35(6): 17-21.
 LIU Dong-yu, LI Wen-jie. Alloying design of a thermal-resistant aluminum alloy conductor material with high conductivity[J].
 Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(6): 17-21.
- [15] 张兴孟,毛卫民,朱文志. Zn、Mg、Cu对 7075 铝合金热裂性
 能和组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(12):
 1336-1339.
 ZHANG Xing-meng, MAO Wei-min, ZHU Wen-zhi. Influence

of Zn, Mg and Cu contents on hot cracking behavior and microstructure of 7075 aluminum alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(12): 1336–1339.

- [16] 高红选,张晓燕. 锆、铜及稀土铈元素对铝电工圆杆组织和性能的影响[J]. 功能材料, 2015, 3(46): 3073-3081.
 GAO Hong-xuan, ZHANG Xiao-yan. The effect of Zr, Cu elements and rare earth Ce on microstructure and property of the electrical rod[J]. Functional Materials, 2015, 3(46): 3073-3081.
- [17] 吴 颖, 温 形, 朱曾涛. 7xxx 系铝合金时效处理的研究现状及应用进展[J]. 材料导报, 2012, 26(15): 114-118.
 Wu Ying, WEN Tong, ZHU Zeng-tao. Development of research and application of aging treatment technology on 7xxx series aluminum alloys[J]. Materials Review, 2012, 26(15): 114-118.
- [18] 宁爱林, 刘志义, 曾苏民, 莫亚武. 铝合金形变热处理工艺研 究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(3): 74-76. NING Ai-lin, LIU Zhi-yi, ZENG Su-min, MO Ya-wu. Research and progress of thermomechanical treatment of aluminium alloy[J]. Materials Review, 2007, 21(3): 74-76.

Effect of strain aging on rare earth electrical round aluminum rods with different Cu contents

HU Xie-jun¹, ZHANG Ren-guo², ZHANG Xiao-yan¹, LIN Ting-yi¹, ZHANG Jun-jie¹, HUANG Xin¹, GONG Xiang-peng¹, YAN Jun¹

(1. College of Material and Metallurgy, Guizhou University, Guizhou 550025, China;

2. Guizhou Herun new Aluminum Materials Technology Co., Ltd, Guizhou 550000, China)

Abstract: Electrical round aluminum rods are used as blank of cables and wires, their quality directly influences the merits of the aluminum wire. The tensile strength and electrical conductivity of rare earth electrical round aluminum rods with different Cu contents under the conditions of as-cast, rolling state and strain aging, respectively, were compared by scanning electron microscope, X-ray diffraction analysis and other methods. The effect of thermomechanical treatment on the properties of electrical round aluminum rods was studied. The result show that after deformation treatment treatment, the grain boundary of samples becomes thinner than former, the microstructure is more compact and well-distributed. The comprehensive performance of sample is better after (500 °C, 3 h, solid solution)+85% rolling+(150 °C, 12 h, aging) thermomechanical treatment, when the Cu content of specimen is 0.2%, the tensile strength of specimen reaches to peak value (179 MPa), and the electrical conductivity is 60.78%IACS.

Key words: thermo-mechanical treatment; electrical round aluminum rod; electric conductivity; strength of extension

Foundation item: Project([2015]3004-2) supported by Key Industrial Research Project of Guizhou Province, China Received date: 2016-05-17; Accepted date: 2016-10-24

Corresponding author: ZHANG Xiao-yan; Tel: +86-13087829047; E-mail: ivzhangxiaoyan@163.com

(编辑 何学锋)