

文章编号: 1004-0609(2006)03-0417-05

变形量对接触线用 Cu-Cr-Zr-Y 合金 时效特性和力学性能的影响^①

刘 勇^{1,2}, 刘 平¹, 董企铭¹, 田保红¹, 娄花芬³

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471003;

2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048;

3. 洛阳铜加工集团有限公司, 洛阳 471039)

摘 要: 探讨了不同变形量对电气化铁路接触线用 Cu-0.42Cr-0.13Zr-0.11Y 合金时效性能和力学性能的影响。研究表明, 合金经 950 ℃、1 h 固溶处理后施以不同程度冷变形, 再进行 480 ℃时效处理, 比合金固溶后直接时效可显著提高合金的电导率和显微硬度; 随变形量逐渐增大, 合金强度不断升高, 抗拉强度最高可达 645 MPa, 而延伸率和导电率略有降低。当二次拉拔变形量为 75.0% 时, 合金的抗拉强度、导电率和延伸率分别为 605.6 MPa、80.79% IACS 和 10.2%。

关键词: 接触线; Cu-Cr-Zr-Y 合金; 冷变形; 时效; 力学性能

中图分类号: TG 146.1

文献标识码: A

Effect of cold working on aging characteristics and mechanical properties of Cu-Cr-Zr-Y alloy contact wire

LIU Yong^{1,2}, LIU Ping¹, DONG Qi-ming¹, TIAN Bao-hong¹, LOU Hua-fen³

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology,
Luoyang 471003, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, China;

3. Luoyang Copper Working Group Co. Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: The influences of various cold working on properties of Cu-0.42Cr-0.13Zr-0.11Y alloy contact wire for electrified railway were studied. The results show that the tested alloy after solution at 950 ℃ for 1 h, various deformation and aging at 480 ℃, can attain higher electrical conductivity and microhardness than those of the alloy in solution-aged condition. The strength of the tested alloy increases with the increase of cold working, and the highest tensile strength value is 645 MPa, while the elongation and electrical conductivity drop a little. The values of tensile strength, electrical conductivity and elongation are 605.6 MPa, 80.79% IACS and 10.2% when the deformation of second drawing increases to 75.0%.

Key words: contact wire; Cu-Cr-Zr-Y alloy; cold working; aging; mechanical properties

① 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA331110); 河南省杰出人才基金资助项目(0521001200); 河南省教育厅自然科学基金资助项目(2006430004); 河南科技大学科研基金资助项目(2004ZY003)

收稿日期: 2005-01-14; 修订日期: 2005-12-10

作者简介: 刘 勇(1967-), 男, 副教授, 博士研究生

通讯作者: 刘 勇, 副教授; 电话: 0379-62851700; E-mail: liuyong@mail.haust.edu.cn

随着电气化列车向高速、重载发展,对接触网用接触线的性能也提出了愈来愈高的要求^[1-3],如要求其具有高的强度(≥ 600 MPa)、高的导电性($\geq 80\%$ IACS)、高的耐磨性和抗软化性能等。铜及铜合金由于具有许多优良特性,而被广泛应用于各行各业,如集成电路引线框架材料^[4-6]、高强磁场的导体材料、沿海电厂的热交换材料和耐蚀部件^[7]、电车及电力机车的架空导线^[8,9]等。

作为时效析出强化型^[10]的 Cu-Cr-Zr 系合金,因具有良好的导热导电性、较高的强度以及优良的耐磨性能,已在高速电气机车的架空导线等方面得到广泛使用^[11,12]。但与国外相比,国内相关研究尚不足,尤其在变形量对接触线强度影响方面缺乏深入、细致的研究。为更好地满足高强、高导材料方面需求,本文作者研究了时效温度和时效前冷变形对 Cu-Cr-Zr-Y 合金导电率和显微硬度的影响规律,以及该合金在不同拉拔变形量下的力学性能,以期今后接触线材料的相关研究提供参考。

1 实验

实验用 Cu-Cr-Zr-Y 合金经真空中频感应熔炼而成,合金的最终成分为: Cu-0.42Cr-0.13Zr-0.11Y。浇铸后的合金铸锭经切除冒口和去除表皮后锻造成 $d25$ mm 的棒材。经 950 $^{\circ}\text{C}$ 、 1 h 固溶处理后,将未变形及进行 40% ~ 80% 冷变形的试样,按最佳时效温度(480 $^{\circ}\text{C}$)进行时效处理,并分别测量其导电率和硬度。对棒材进行 480 $^{\circ}\text{C}$ 、 2 h 时效处理和二次拉拔变形,得到不同尺寸线材(不同变形量)作为力学性能测试用材料。

合金的固溶和时效处理,均在 SRJK-2-12 型氮气保护的管式炉中进行,采用 PID 控温,炉子工作时温度波动为 ± 2 $^{\circ}\text{C}$;冷变形在自制小型轧机上进行;电阻测量在 ZY9987 型数字式微欧计上进行,试样长度 ≥ 100 mm,宽度 ≥ 2 mm,厚度约为 0.3 mm,测量误差为 ± 0.02 $\mu\Omega$;显微硬度用 HVS-1000 型数显显微硬度计测量,载荷为 1 N,加载时间 10 s,每个试样测量次数不少于 5 次,测量误差 $\pm 5\%$;拉伸试样按 GB6397-86 进行制样,拉伸性能测试在 SHIMADZU(岛津)AG-I 250 kN 型精密万能实验机上进行,每种状态不少于 3 根;透射电子显微镜(TEM)试样经双喷减薄,电解液为 $V(\text{H}_3\text{PO}_4):V(\text{CH}_3\text{OH})=1:3$ 的混合溶液,在日产 H-800 型透射电子显微镜(TEM)上进行组

织观察和分析;拉伸断口则利用 JSM JEOL-5610LV 扫描电子显微镜(SEM)进行形貌观察和分析。

2 结果与分析

2.1 固溶—冷变形—时效处理后的导电率和显微硬度

Cu-Cr-Zr-Y 合金经 950 $^{\circ}\text{C}$ 、 1 h 固溶处理后,再经不同程度冷轧变形,然后在 480 $^{\circ}\text{C}$ 时效后测定其导电率和显微硬度,它们随时效时间变化的规律曲线如图 1 所示。

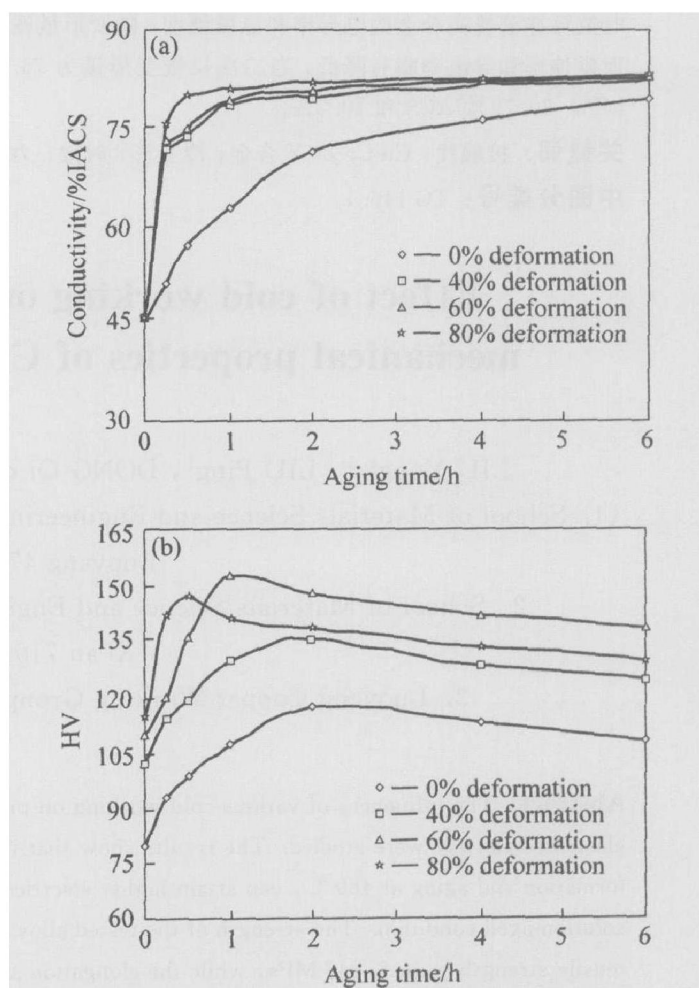


图 1 固溶态 Cu-Cr-Zr-Y 合金经不同冷变形、 480 $^{\circ}\text{C}$ 时效后的导电率(a)和显微硬度(b)与时效时间的关系曲线

Fig. 1 Curves of conductivity(a) and microhardness(b) of soluted alloy with aging time after aging at 480 $^{\circ}\text{C}$ under various cold working

影响铜合金导电性的主要因素是基体中固溶原子对电子的散射作用。合金基体中固溶元素的含量越多,对电子的散射作用就越强,导电率就越

低^[13]。如图 1(a) 所示, 在时效初期, 由于基体的过饱和度大, 第二相析出动力大, 析出速度快, 因此导电率在这一阶段快速上升。随时效时间的延长, 基体中固溶的合金元素不断析出, 因此导电率一直保持上升的趋势; 同时, 基体中溶质元素随析出过程的不断进行而呈现“贫化”, 使析出速度变缓, 因而导电率的增幅趋于平缓。

合金在时效初期由于析出相弥散分布, 并与基体保持着共格关系^[14], 故其硬度得以迅速提高。由于时效前进行了冷变形, 析出相析出速度加快, 显微硬度也在更短的时间内达到峰值, 如图 1(b) 所示。这说明合金时效前加以冷变形, 可以大大增加合金内部位错、空位等缺陷的数量, 造成点阵畸变及内能的升高, 为析出相的形核及生长提供了有利条件^[15]。且随时效前冷变形量的提高, 析出相析出速度加快, 显微硬度在时效初期的升幅也就越大, 如图 1(b) 所示。合金在 480 ℃时效时, 由于温度较高, 析出相容易长大, 故随着时效时间的延长, 出现“过时效”现象, 因此在时效过程中显微硬度曲线出现了峰值, 随后曲线呈现缓慢下降趋势。

从图 1(b) 还可看出, 随变形量的增加, 未变形、40% 变形和 60% 变形的合金到达硬度峰值所用时间越短, 所达到的峰值也越高; 而 80% 变形合金, 虽然在最短时间内达到硬度峰值, 但与 60% 变形合金相比, 其硬度峰值略低于后者。这是由于 80% 变形合金在时效初期即快速完成析出过程, 随即进入析出相长大阶段, 导致其硬度峰值略低于 60% 变形合金。

综上所述, 固溶态 Cu-Cr-Zr-Y 合金 60% 变形后再经 480 ℃时效处理 2 h, 可以获得较好的综合性能: 其显微硬度和导电率分别可达 HV148 和 80.72% IACS。

2.2 微观组织观察与分析

图 2 所示为固溶态 Cu-Cr-Zr-Y 合金进行经 60% 变形后, 再经 480 ℃时效处理 2 h 后的微观形貌。

从图 2(a) 可以看出, 基体上分布着高密度位错; 图 2(b) 所示为暗场像, 可观察到细小析出相弥散分布的形态。这与图 1 所示固溶态 Cu-Cr-Zr-Y 合金经 60% 变形后再进行 480 ℃、2 h 时效处理可获得良好的综合性能, 尤其是可获得较高硬度是一致的。

2.3 力学性能

对固溶后的 Cu-Cr-Zr-Y 合金棒材, 进行一次

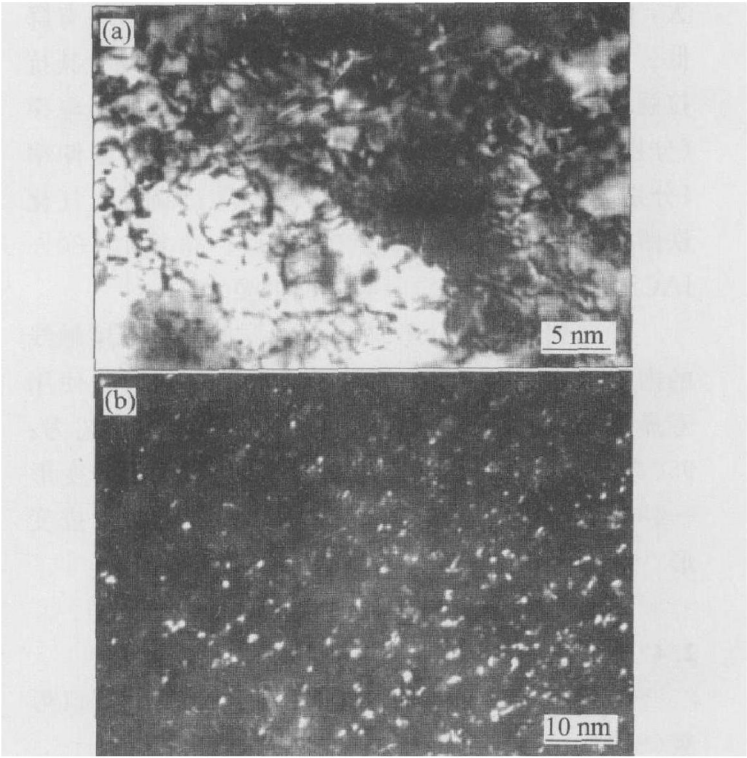


图 2 固溶态 Cu-Cr-Zr-Y 合金经 60% 变形、480 ℃时效处理 2 h 后的位错组态(a) 和析出相形貌(b) (TEM)

Fig. 2 Morphologies of dislocation(a) and precipitate(b) of Cu-Cr-Zr-Y alloy after deformation of 60% and then aging at 480 ℃ for 2 h

拉拔变形(变形率约为 40%)—480 ℃、2 h 时效—二次拉拔变形(变形率为 0%~87.8%)处理, 随后进行拉伸实验和导电率测试, 所得结果如表 1 所列。

表 1 Cu-Cr-Zr-Y 合金经一次拉拔—时效—不同程度二次拉拔变形后的力学性能和导电率

Table 1 Mechanical properties and conductivity of Cu-Cr-Zr-Y alloy after drawing—aging—various drawing

Deformation/ %	σ_s / MPa	σ_b / MPa	δ / %	Conductivity/ % IACS
0	425.4	437.8	17.4	82.76
20.0	512.4	524.4	14.8	82.15
36.0	529.7	537.6	13.8	82.17
57.8	546.7	569.1	11.7	81.64
75.0	598.5	605.6	10.2	80.79
80.0	608.6	624.8	9.9	79.87
87.8	625.0	645.0	5.46	78.39

随着二次拉拔变形量的升高, 加工硬化效应增大, 使合金的强度升高, 而延伸率和导电率略有降低。当二次拉拔变形量为 75.0% 和 80.0% 时, 其抗拉强度(分别为 605.6 MPa 和 624.8 MPa)、导电率(分别为 80.79% IACS 和 79.87% IACS)和延伸率(分别为 10.2% 和 9.9%)等, 基本满足高速电气化铁路对接触线高强(≥ 600 MPa)、高导($\geq 80\%$ IACS)和延伸率($\geq 5\%$)等方面的要求。

考虑到加工硬化效应增大的同时, 会使接触线的内应力相应升高, 从而给架设线路及接触线使用寿命带来不利影响, 因而推荐接触线加工工艺为: 950 °C、1 h 固溶—变形率为 40% 的一次拉拔变形—480 °C、2 h 时效—变形率为 75% 的二次拉拔变形。

2.4 拉伸断口形貌观察

图 3 所示为 Cu-Cr-Zr-Y 合金拉伸试样断口形貌(SEM)。

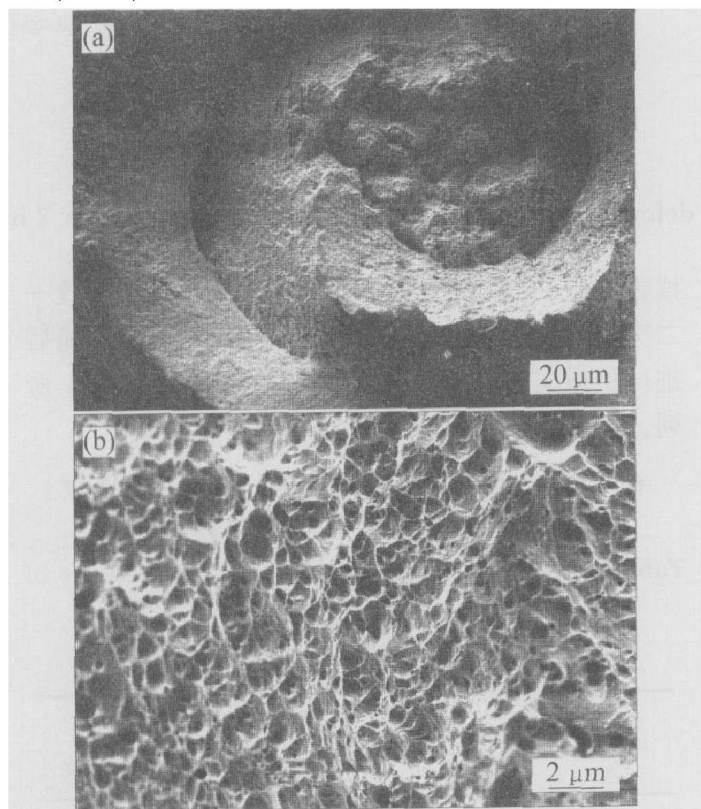


图 3 Cu-Cr-Zr-Y 合金拉伸试样断口的低倍(a)和高倍(b)形貌(SEM)

Fig. 3 Morphologies of Cu-Cr-Zr-Y alloy tensile sample

观察拉伸试样断口低倍形貌(图 3(a)), 不难看出拉伸试样在断裂前发生了明显的“颈缩”现象; 而观察拉伸试样断口高倍形貌(图 3(b)), 可以看到断面上分布有大量韧窝, 拉伸断口呈现出典型的韧

性断裂特征。

3 结论

1) Cu-Cr-Zr-Y 合金经 950 °C、1 h 固溶处理后, 再经 60% 变形, 480 °C、2 h 时效处理可以获得较好的综合性能, 其显微硬度和导电率分别可达 HV148 和 80.72% IACS。

2) 经 950 °C、1 h 固溶—一次拉拔变形(变形率为 40%)—480 °C、2 h 时效—二次拉拔变形(变形率为 75%)工艺加工所得接触线, 其抗拉强度、导电率和延伸率分别达到 605.6 MPa、80.79% IACS 和 10.2%, 可以满足高速电气化铁路对接触线高强(≥ 600 MPa)、高导($\geq 80\%$ IACS)和延伸率($\geq 5\%$)等性能方面的要求。

REFERENCES

- [1] 黄崇祺. 轮轨高速电气化铁路接触网用接触线的研究[J]. 中国铁道科学, 2001(1): 1-5.
HUANG Chong-qi. On contact wire line used in catenary of high speed wheel-rail electrified railway[J]. Railway Science in China, 2001(1): 1-5.
- [2] Tu J P, Qi W X, Liu F, et al. Effect of aging treatment on the electrical sliding wear behavior of Cu-Cr-Zr alloy[J]. Wear, 2002, 49(2): 1021-1027.
- [3] HUANG Fu-xiang, MA Jiu-sheng, NING Hong-long. Analysis of phases in a Cu-Cr-Zr alloy[J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 97-102.
- [4] 黄崇祺. 我国电力牵引用接触线的发展与展望[J]. 电线电缆, 2003(2): 3-8.
HUANG Chong-qi. Development and forecast of the contact wires for electrical traction in China[J]. Electric Wire and Cable, 2003(2): 3-8.
- [5] 丁雨田, 李来军, 许广济, 等. 接触线材料的现状及研究热点[J]. 电线电缆, 2004(2): 3-9.
DING Yu-tian, LI Lai-jun, XU Guang-ji, et al. The status-quo of contact wire and popular topics of its research[J]. Electric Wire and Cable, 2004(2): 3-9.
- [6] ZHAO Dong-mei, DONG Qiu-ming, LIU Ping, et al. Aging transformation in Cu-3.2Ni-0.75Si alloy[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(2): 258-261.
- [7] 王吉会, 姜晓霞, 李诗卓. 硼对铜合金组织和性能的影响[J]. 材料研究学报, 1997, 11(4): 381-385.
WANG Ji-hui, JIANG Xiao-xia, LI Shi-zhuo. The effect of the boron to the structure and property of

- copper alloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1997, 11(4): 381 - 385.
- [8] Nagasawa H, Kato K. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current[J]. Wear, 1998, 216: 179 - 183.
- [9] He D H, Manory R R, Grady N. Wear of railway contact wires against current collector materials[J]. Wear, 1998, 215: 146 - 155.
- [10] 青木久纯, 叶 娟. 析出强化铜合金(PHC)在接触导线上的应用[J]. 国外机车车辆与工艺, 2000, 31(7): 9 - 12.
- Hisazyun A, YE Juan. Application of precipitation hardened copper (PHC) on contact wire[J]. Foreign Locomotive Vehicle and Technics, 2000, 31(7): 9 - 12.
- [11] Batra I S, Dey G K, Kulkarni U D, et al. Microstructure and properties of a Cu-Cr-Zr alloy[J]. Journal of Nuclear Materials, 2001, 99(2): 91 - 100.
- [12] Singh R P, Lawley A, Friedman S. Microstructure and properties of spray cast Cu-Cr alloys[J]. Materials Science and Technology A, 1991, A145: 243 - 255.
- [13] 刘 平, 曹兴国, 康布熙, 等. 快速凝固 Cu-Cr 合金导电性分析[J]. 洛阳工学院学报, 1998, 19(4): 1 - 5.
- LIU Ping, CAO Xing-guo, KANG Bu-xi, et al. Factors account for the electrical conductivity of rapidly solidified Cu-Cr alloy[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 1998, 19(4): 1 - 5.
- [14] 刘 平, 康布熙, 曹兴国, 等. 快速凝固 Cu-Cr-Zr-Mg 合金的时效析出与再结晶[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(2): 241 - 246.
- LIU Ping, KANG Bu-xi, CAO Xing-guo, et al. Aging precipitation and recrystallization of rapidly solidified Cu-Cr-Zr-Mg alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(2): 241 - 246.
- [15] 董志力, 唐祥云. Cu-Zr 和 Cu-Zr-Si 的时效析出特性及冷变形对时效析出的影响[J]. 金属学报, 1989, 25(6): 462 - 465.
- DONG Zhì-li, TANG Xiang-yun. Aging precipitation of Cu-Zr and Cu-Zr-Si alloys and affected by cold working[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1989, 25(6): 462 - 465.

(编辑 何学锋)