

时效处理对低溶质 Cu-Cr-Zr 合金力学和电滑动磨损性能的影响

齐卫笑¹, 涂江平¹, 杨友志¹, 王耐艳¹, 张家涛²,
甘国友², 刘 芙¹, 张孝彬¹, 刘茂森¹

(1. 浙江大学 材料科学与工程学系, 浙江 杭州 310027;

2. 昆明理工大学 材料科学与工程系, 云南 昆明 650093)

摘要: 在销-盘式摩擦磨损试验机上进行了 Cu-Cr-Zr 合金的电滑动摩擦磨损试验, 考察了时效处理对其力学和电磨损性能的影响, 并采用扫描电子显微镜对其磨损表面进行观察分析. 结果表明: Cu-Cr-Zr 合金的磨损率随时效温度的升高逐渐降低, 在 500 ℃ 时达到最低值; 随着时效温度的进一步升高, 磨损率又开始增大. 在电流作用下, 合金的磨损机制主要有粘着磨损、磨粒磨损与电侵蚀磨损. 在相同的摩擦磨损试验条件下, Cu-Cr-Zr 合金的耐磨损性能明显优于 Cu-Ag 合金.

关键词: Cu-Cr-Zr 合金; 时效处理; 滑动磨损; 电流

中图分类号: TG135.6

文章标识码: A

文章编号: 1004-0595(2001)06-0405-05

随着现代高速电气列车的不断发展, 对铜接触导线的性能提出了愈来愈高的要求, 一方面, 要求铜接触导线有较高的导电率, 以减小电流在传输过程中在导线内的欧姆热耗及电压降; 另一方面, 铜接触导线要有较高的机械强度, 以适应大跨距敷设及减少敷设费用的需要. 此外, 为了延长铜接触导线的使用寿命, 减少其维护费用, 还要求其具有优良的耐磨性能^[1,2].

时效硬化型 Cu-Cr-Zr 合金因其高强度、高导电性以及优良的耐磨和耐热性能而在近几十年来倍受关注^[3]. 研究表明^[4-6], Cu-Cr-Zr 合金的时效过程是析出相由过渡相 [Heusler 相 CrCu₂(Zr, Mg)] 向平衡相 (Cr₃Cu₃Zr 及 Cu₄Zr) 转变的过程, 通过时效处理可以明显提高合金的强度, 但时效温度过低时, 析出强化效果不佳. 时效温度过高, 则容易发生过时效, 导致合金强化效果变差. 本文作者考察了含微量 Mg 和 Re 的 Cu-Cr-Zr 合金时效前后的显微结构及力学性能和磨损性能, 探讨了不同温度下时效处理对 Cu-Cr-Zr 合金力学和电磨损性能的影响以及滑动磨损机理, 并与目前使用的 Cu-Ag 合金导线 (CTHA 110) 在不同电流条件下的耐磨性能进行了比较分析.

1 实验部分

所用试材的化学组成为 Cu-0.4Cr, 并含少量 Zr 以及微量 Mg 和 Re. 将试材在真空中频感应炉中熔炼, 经热挤和冷拔制成 $\phi 5$ mm 的线材, 在 920 ℃ 保温 0.5 h 进行固溶处理, 然后分别在 420 ℃、460 ℃、500 ℃ 和 540 ℃ 进行时效处理, 时效处理时间为 2 h.

在 Philips MC200 型透射电子显微镜 (TEM) 上进行显微结构分析. 维氏硬度的测定载荷为 98 N, 每个试样测量次数不少于 5 次.

在销-盘式摩擦磨损试验机上进行电滑动摩擦磨损试验, 所用试销为 Cu-Cr-Zr, 尺寸 10 mm × 10 mm × 22 mm, 试盘选用尺寸 $\phi 5$ mm × 10 mm 的 H60 黄铜盘. 接触载荷 20 N, 滑动速度为 14 m/s, 施加电流分别为 0 A、10 A、20 A 及 30 A. 采用 L-200 SM 型分析天平称量测定试样的磨损质量损失, 测量精度为 0.01 mg; 以试样在单位滑动距离内的磨损质量损失来表示磨损率.

在 S-570 型扫描电子显微镜上进行磨损表面形貌的观察分析.

基金项目: 国家自然科学基金 (50071055); 浙江省自然科学基金 (500042); 教育部回国留学人员启动基金 (2000-367); 云南省省院省校科技合作项目 (98TZ-001).

收稿日期: 2001-01-19; 修回日期: 2001-06-13/联系人涂江平

作者简介: 齐卫笑, 女, 1977 年生, 硕士研究生, 目前主要从事金属材料摩擦学研究



2 结果与分析

2.1 时效前后材料的结构与力学性能

图 1 示出了合金的维氏硬度随时效温度的变化

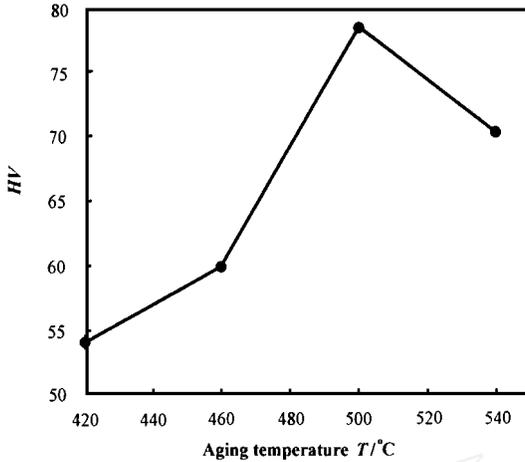


Fig 1 Variation of hardness of the alloy with aging temperature

图 1 Cu-Cr-Zr 合金维氏硬度随时效温度变化的关系曲线

曲线 可以看出: 合金经时效处理后硬度有较大提高, 并随时效温度的升高而增大, 在 500 时达最大值 78 4HV, 说明此时第二相充分析出, 并与基体维持良好共格关系, 强化效果最好. 当时效温度超过 500 后, 合金的硬度有所降低, 说明此时发生了过时效, 过渡相转变为平衡相从而与基体脱离共格关系, Cr 及 Cu₃Zr 等微粒发生聚合长大, 合金强化效果随之变差^[4]. 图 2 所示为合金经 500 时效 2 h 后的透射电

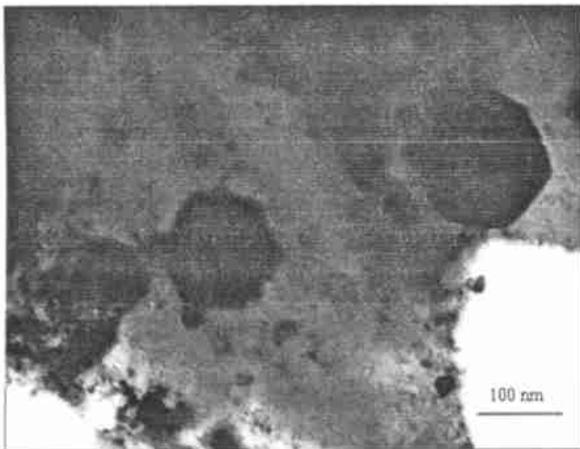


Fig 2 TEM image of the Cu-Cr-Zr alloy after aging at 500 for 2 h

图 2 Cu-Cr-Zr 合金经 500 时效 2 h 的 TEM 照片

子显微镜(TEM)照片. 可以看出, 基体内部弥散分布着尺寸约为 100~ 200 nm 的呈六角形状的小颗粒, 经

EDAX 分析表明其为富 Cr 的沉淀相

2.2 电流作用下合金的磨损性能

2.2.1 时效处理对磨损性能的影响

图 3 示出了施加电流为 30 A 时 Cu-Cr-Zr 试销

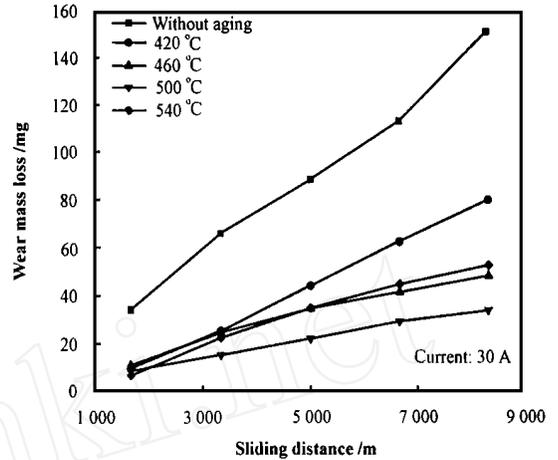


Fig 3 Wear mass loss of Cu-Cr-Zr alloy vs sliding distance
图 3 Cu-Cr-Zr 合金的磨损质量损失随滑动距离的变化曲线

在时效处理前后的磨损质量损失随滑动距离变化的关系曲线 可见, 经不同温度下时效处理可以在不同程度上改善合金的耐磨性能, 合金的磨损质量损失与滑动距离基本呈线性关系, 并且经 500 时效处理后的合金的磨损质量损失最小. 合金的磨损率随时效处理温度变化的关系曲线如图 4 所示. 可见, 合金磨损

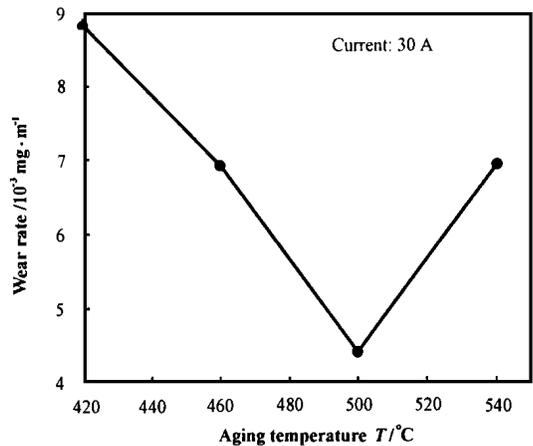


Fig 4 Effect of aging temperature on wear rate of Cu-Cr-Zr alloy

图 4 时效温度对 Cu-Cr-Zr 合金电滑动磨损率的影响

率随时效温度的升高逐渐降低, 在 500 时达最低值 $4.418 \times 10^{-3} \text{ mg/m}$, 而后随时效温度的进一步升高, 磨损率则增大. 与图 1 比较可以看出, 合金的磨损率与其硬度在一定程度上成反比关系. Saka 等^[7]认为, 该沉淀硬化型合金的磨损过程是材料亚表面层形变,

裂纹形核及裂纹扩展直至与表面分离的过程, 故其耐磨性能与硬度和显微结构密切相关。随着硬度的增加, 合金抵抗表面塑性变形的能力增强。但对于 Cu-Cr-Zr 沉淀硬化型合金, 在塑性变形过程中, 裂纹形核很可能出现在第二相质点和基体的分界面上, 因此应该考虑第二相粒子对裂纹形核与扩展的影响。当第二相质点细小、弥散, 并与基体维持良好的共格关系时, 裂纹形核困难; 而过时效使得第二相质点与基体丧失共格关系, 并聚集长大, 容易形成界面裂纹, 导致耐磨性能变差^[8]。由图 4 可以看出, 经 500 °C 时效 2 h 后 Cu-Cr-Zr 合金的耐磨性最佳, 当时效温度超过 500

则发生了过时效, 合金耐磨性有所变差。因此, 适当时效处理而产生的细小弥散析出物可以起到弥散强化作用, 进而提高材料的耐磨性, 而存在于基体表面的第二相粒子在磨损过程中还可以起承载作用, 从而提高材料的耐磨性^[9]。

2.2.2 磨损机理分析

我们在试验中发现, 在电流作用下, 当摩擦副发生瞬时脱离时产生电弧放电现象, 导致试样表面局部瞬时温度非常高且放热量大, 试样磨损表面颜色发黑, 出现较深的磨痕。图 5 示出了 Cu-Cr-Zr 合金磨损表面形貌的 SEM 照片。可见: 电流作用下的磨损表面

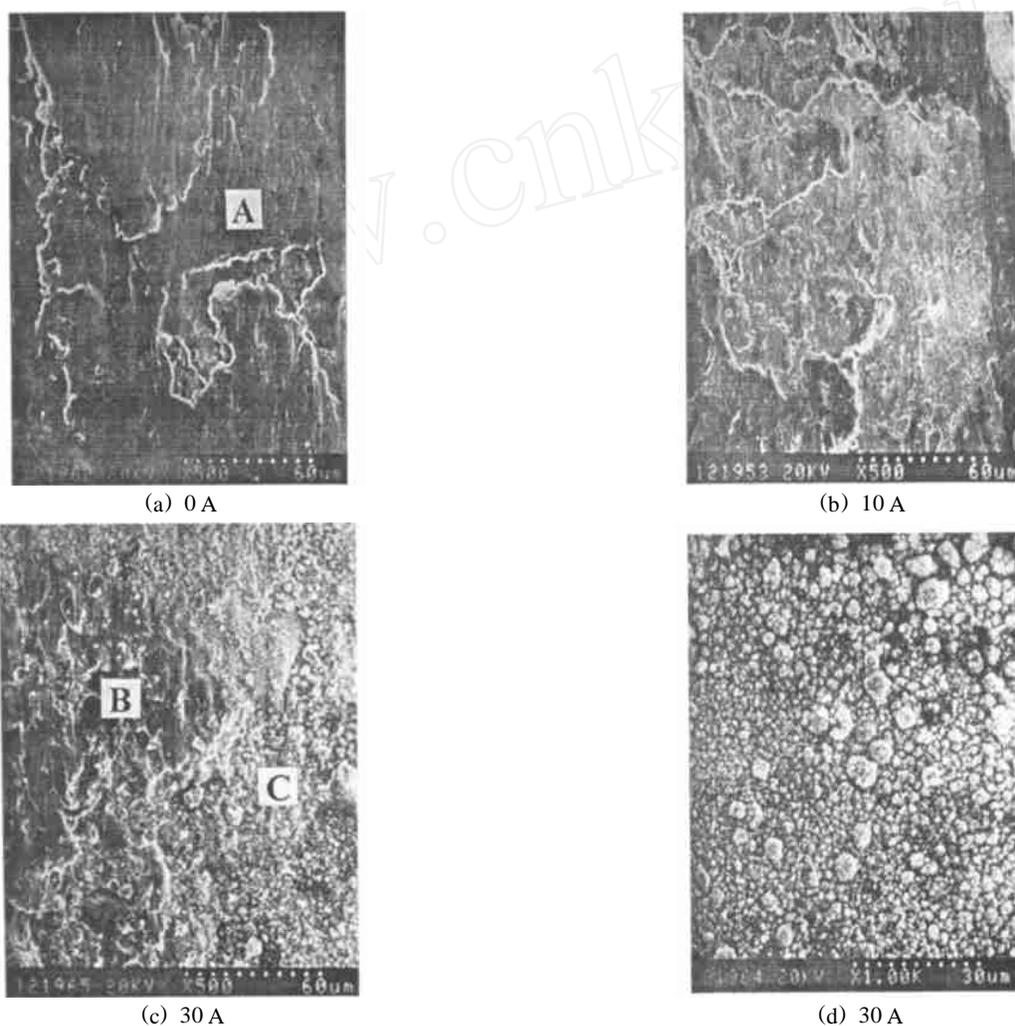


Fig 5 Scanning electron micrographs of worn surfaces of Cu-Cr-Zr alloy under various electric currents

图 5 不同强度的电流作用下 Cu-Cr-Zr 合金磨损表面形貌 SEM 照片

比不带电磨损表面更加粗糙不平, 当电流强度为 0 与 10 A 时, 磨损表面有一些较大的块状物, 并有明显的凿槽与犁沟, 表明相应的磨损形式主要为粘着磨损与磨粒磨损。当电流强度增加至 30 A 时, 磨损表面出现了 2 个明显不同的区域[如图 5(c) 中 B 和 C 区], 黑

色区域仍有明显的凿槽与犁沟, 白色区域则可见大量的团状小颗粒, 图 5(d) 为这些白色颗粒的放大形貌。对图 5 中的 A、B 和 C 等 3 个区域进行了 EDAX 分析, 其结果见表 1。可以看出, 磨损表面含有较多的 Zn, 说明在磨损过程中发生了材料的粘着转移。与

表 1 合金磨损表面 EDAX 分析结果

Table 1 EDAX results of worn surfaces of the alloy

Area	Composition/%		
	Cu	Cr	Zn
A	Balance	1.95	29.77
B	Balance	1.63	37.47
C	Balance	1.96	70.12

A 区域比较, B 和 C 区域的 Zn 含量更高, 表明在电流作用下, 黄铜的粘着转移更加剧烈。这可能是因为两试样脱离接触, 电弧放电产生的热效应使试样表面发生熔化^[10], 使得黄铜在 Cu-Cr-Zr 试样表面发生熔焊和粘附所致。从图 5(d) 可以看出, 这些“焊点”的直径约为 10~30 μm 。B 区的 Zn 含量比 C 区的低, 这可能是由于在该区域内焊点在磨损过程中成为磨屑并脱离表面所致。

综上所述, 在电场作用下, 合金的主要磨损机制为粘着磨损、磨粒磨损以及电侵蚀磨损。粘着磨损时产生的磨损碎片或氧化物颗粒可能成为磨粒, 从而导致磨粒磨损。Bouchoucha 等^[11]认为, 电流产生的高温强化可以起到氧化作用, 改变氧化物的机械性能, 而氧化物磨粒通过塑性变形与显微切削作用“犁入”材料表面, 导致磨损表面形成凹槽与犁沟, 当变形积累到一定程度时将形成裂纹, 裂纹最终发生剥离而产生磨屑^[8]。

2.2.3 Cu-Cr-Zr 合金与 Cu-Ag 合金耐磨性比较

为了评价 Cu-Cr-Zr 合金的耐磨性, 选用该合金 500 时效样品与目前使用的 Cu-Ag 合金导线 (CTHA 110) 进行对比分析, 结果如图 6 所示。可见, 随着电流强度的增大, 两种合金的磨损率均有所增加。研究认为^[12, 13], 材料的磨损率与接触表面的升温以及接触压力有关, 而电流作用下磨损表面产生的热量主要有摩擦热、接触电阻产生的焦耳热以及电弧放热, 其中摩擦热与接触压力有关, 而焦耳热和电弧放热与电流强度成正比。因此, 随着施加电流强度的增大, 合金的磨损率增大。从图 6 还可以看出, Cu-Ag 合金的磨损率明显比 Cu-Cr-Zr 合金的大, 并且随着电流强度的增大, Cu-Ag 合金磨损率的增加幅度明显增大, 当电流强度增至 30 A 时, 其磨损尤其严重。因此, 在电流作用下, Cu-Cr-Zr 合金的耐磨性较好。

3 结论

a 与黄铜配副时, Cu-Cr-Zr 合金试样的磨损质量损失与滑动距离基本呈线性关系。其磨损率随时

效处理温度的升高逐渐降低, 在 500 时达最低值, 之后随着时效处理温度的进一步升高而有所增大。

b. Cu-Cr-Zr 合金的电滑动磨损机制主要为粘

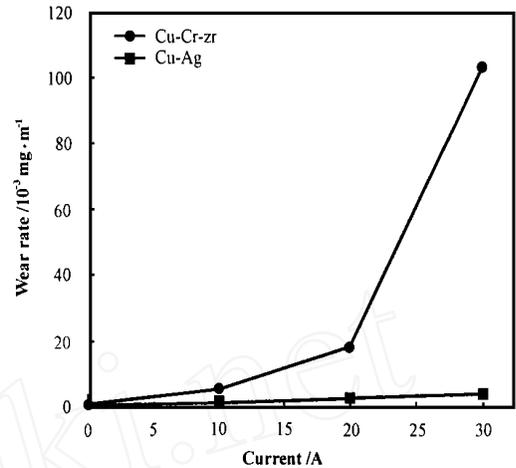


Fig 6 Variation of wear rate of Cu-Cr-Zr and Cu-Ag alloy under different currents

图 6 不同电流作用下 Cu-Cr-Zr 和 Cu-Ag 合金的磨损率变化

着磨损、磨粒磨损以及电侵蚀磨损。

c. Cu-Cr-Zr 合金的磨损率随施加电流强度的增大而增大, 在相同摩擦磨损试验条件下, Cu-Cr-Zr 合金的耐磨性优于 Cu-Ag 合金导线。

参考文献:

- [1] 温宏权, 毛协民, 徐匡迪, 等. 铜电车线材料的研究进展[J]. 材料导报, 1998, 12(1): 25-28
- [2] He Da Hai, Manory Rafael R, Grady Nom. Wear of railway contact wires against current collector materials[J]. Wear, 1998, 215: 146-155
- [3] 《有色金属及其热处理》编写组. 有色金属及其热处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [4] 刘技文. 稀土铜铬锆合金性能的研究[J]. 上海金属, 有色分册, 1993, 14(5): 10-13
- [5] Tang N Y, Taplin D M R, Dunlop G L. Precipitation and aging in high-conductivity Cu-Cr alloys with additions of zirconium and magnesium[J]. Mater Sci Technol, 1985, 1(4): 270-275
- [6] Batawi E, Morris D G, Morris M A. Effect of small alloying additions on behaviour of rapidly solidified Cu-Cr alloys[J]. Mater Sci Technol, 1990, 6(9): 892-899
- [7] Saka N, Panies-teixeira J J, Suh N P. Wear of two-phase metals[J]. Wear, 1977, 44: 77-86
- [8] 李建明. 磨损金属学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990
- [9] 高文, 何安莉, 汤道坤, 等. Au 基金合金电位器材料耐磨特性与显微组织关系的研究[J]. 摩擦学学报, 1997, 17(3): 199-205
- [10] Kubo Shunichi, Kato Koji. Effect of arc discharge on wear rate

- of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216: 172-178
- [11] Bouchoucha A, Zaidi H, Kadiri E K, *et al*. Influence of electric fields on the tribological behaviour of electrodynamic copper/steel contacts[J]. *Wear*, 1997, 203-204: 434-441.
- [12] 王成彪, 符党替, 温诗铸. 铸铁滑动摩擦副表面温度对其磨损机制的影响[J]. *摩擦学学报*, 1997, 17(4): 295-301.
- [13] Nagasawa Hiroki, Kato Koji. Wear mechanism of copper alloy wire sliding against iron-base strip under electric current[J]. *Wear*, 1998, 216: 179-183.

Effect of Aging Treatment on Mechanical and Sliding Wear Properties of Dilute Solute Cu-Cr-Zr Alloy Under Electric Current

Q I W ei-xiao¹, T U J iang-p ing¹, Y A N G Y ou-zhi¹, W A N G N ai-yan¹, Z H A N G J ia-tao²
G A N G uo-you², L U F u¹, Z H A N G X iao-bin¹, L U M ao-sen¹

(1. *Department of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;*

2. *Department of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)*

Abstract: The wear-resistance of Cu-Cr-Zr alloy sliding against brass in the presence of electric filed of various currents was examined on a pin-on-disk test rig. The effect of aging treatment on the mechanical and sliding wear-resistance of Cu-Cr-Zr alloy under electric current was investigated. The worn surfaces of Cu-Cr-Zr alloy were analyzed with a scanning electron microscope. The test results show that the wear rate of the alloy decreases initially with the aging temperature and then increases to some extent when the temperature rises above 500 . The smallest wear rate is reached for the alloy aged at 500 for 2h. The dominant wear mechanisms of the alloy against brass under electric current are adhesive wear, abrasive wear and arc erosion. Compared with Cu-Ag wire alloy (CTHA 110) under the same test condition, the Cu-Cr-Zr alloy has better wear resistance.

Key words: Cu-Cr-Zr alloy; aging treatment; sliding wear; electric current