

# 高强高导 Cu-Cr-Ag-Y 合金的时效特征及其载流滑动磨损性能

王松, 谢明\*, 张吉明, 朱刚, 陈永泰, 王塞北, 李再久  
(昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

**摘要:** 对经过连续铸造、固溶和冷拉拔的 Cu-Cr-Ag-Y 合金进行时效处理, 研究了时效工艺参数对合金组织和性能的影响, 探讨了合金的时效特征, 并在自制磨损试验机上对合金线材进行载流滑动磨损试验。结果表明: 铜基体中球形第二相的均匀析出是合金综合性能提高的根本原因。Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金经 450℃/4 h 时效处理后可以获得较好的综合性能, 其显微硬度与导电率达到 245Hv 和 80.7% IACS。随着加载电流的增加, 合金磨损量变大, 其载流磨损机制为电侵蚀磨损、磨粒磨损和粘着磨损。

**关键词:** 金属材料; Cu-Cr-Ag-Y 合金; 时效处理; 组织与性能; 载流磨损

**中图分类号:** TH117.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2014)S1-0062-05

## Aging Characteristics and Electrical Sliding Wear Properties of Cu-Cr-Ag-Y Alloy with High Strength and High Conductivity

WANG Song, XIE Ming\*, ZHANG Jiming, ZHU Gang, CHEN Yongtai, WANG Saibei, LI Zaijiu  
(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

**Abstract:** Effects of aging process parameters on microstructures and properties of a Cu-Cr-Ag-Y alloy which was produced by continuous casting, solution-treated and cold draw were investigated, and the aging characteristics of the alloy was analyzed. The electrical sliding wear experiment was carried out using a self-made electrical wear tester. The results reveal that the uniform precipitation of the spherical second phase from the copper matrix is the root cause of the improvement of comprehensive performance. A better combination of properties is obtained for the Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y alloy aged at 450℃ for 4 h, the micro-hardness and electrical conductivity of the alloy are 245Hv and 80.7%IACS, respectively. The wear loss of the alloy increased with increasing electrical current, and its electrical sliding wear mechanism is the electrical erosion wear, abrasive wear and adhesion wear.

**Key words:** metal materials; Cu-Cr-Ag-Y alloy; aging; microstructure and property; electrical sliding wear

铜铬系合金具有优异的导电与导热性能、较好的机械强度与塑性以及优良的耐磨损性能, 是一种理想的电气工程材料<sup>[1-3]</sup>。随着高速电气化列车不断发展, 对铜合金架空接触导线提出了更高的性能

要求。如何解决铜合金导电性与强度同时提升的矛盾, 以及进一步改善其载流摩擦磨损性能, 成为了当前材料工作者面临的新课题<sup>[4-10]</sup>。河南科技大学苏娟华等<sup>[11]</sup>试图采取不同固溶方式来优化快速凝

收稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51164015)、云南省省院省校科技合作项目(2012IB002)、云南省应用基础研究项目(2011FB126)和昆明市科技创新团队项目(20120101AR070005)。

第一作者: 王松, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 稀贵金属电接触材料。E-mail: femoyejin@qq.com

\*通讯作者: 谢明, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 稀贵金属粉末冶金新材料。E-mail: powder@ipm.com.cn

固 Cu-Cr-Sn-Zn 合金的组织性能, 虽获得了晶粒细小、析出相稠密, 硬度为 179 HV 的引线框架材料, 但其导电率相对偏低(60%IACS)。中南大学周海涛等<sup>[12]</sup>创新性地提出了一种二级时效工艺来改善合金的综合性能, 在保持合金高电导率(80%IACS)的同时, 制得了抗拉强度为 565MPa, 软化温度为 560 °C 的 Cu-Cr-Zr 合金材料。西安理工大学刘勇等<sup>[13]</sup>在 Cu-Cr-Zr 合金中加入质量分数为 0.41% 的稀土 Y 元素, 研究发现, Y 在铜合金熔炼过程中易于氧、硫和某些杂质结合形成高熔点化合物并进入渣相, 起到除杂和净化作用, 使合金硬度得到提升, 但导电率有所降低。有研究表明<sup>[14]</sup>, 稀土元素在 Cu-Cr-Zr 合金含量不宜过高, 合适的加入量应为 0.01%~0.03%。

鉴于此, 本研究在**高强高导 Cu-Cr-Ag 合金**中引入质量分数为 0.03% 稀土元素 Y, 采用连续铸造、固溶处理、冷拉拔、时效处理等工艺制得**高强高导电合金线材**。研究了时效工艺参数对 Cu-Cr-Ag-Y 合金显微组织、显微硬度和导电率的影响。基于合金导线的实际应用考虑, 进一步研究了 Cu-Cr-Ag-Y 合金在载流条件下的电滑动磨损行为。

## 1 实验

### 1.1 材料制备

以纯度>99.9%(质量分数)的铜、铬、银和钇金属为原材料, 合金的名义成分(质量分数)为 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y。采用日本 ASABA 型高速连铸

炉制得直径为 20 mm 的合金棒材。合金线材在 850 °C/3 h 条件下固溶处理并水淬, 随后在室温下进行多道次冷拉拔至直径为 8 mm 线材。采用 OTF-1200X-S 型管式电阻炉对合金线材进行时效处理, 以氮气作为保护气体, 炉膛控温精度为 ±3 °C。

### 1.2 组织分析及性能测试

利用日本岛津 HMV-FA2 型显微维氏硬度计测定试样的硬度, 载荷为 1.961 N, 保压时间为 10 s, 每个试样测量 5 次取其平均值。采用 FD101 型金属导电率测试仪测量合金的导电率, 测量精度为 ±0.1%IACS。利用 Leica DM4000M 型金相显微镜观察合金显微组织, 利用 Hitachi S-3400N 型扫描电子显微镜观察合金载流磨损表面形貌, 进而研究其磨损机制。在自制磨损试验机上进行载流滑动磨损试验, 将 Cu-Cr-Ag-Y 合金线材安装于直径为 200 mm 的转盘上, 滑块为锌白铜, 滑块与合金线材之间的接触压力为 20 N, 摩擦线速度为 2 m/s。加载的电流设为 0、5、10、15 和 20 A, 摩擦时间为 6 h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同时效温度条件下合金的显微组织

对 Cu-Cr-Ag-Y 合金线材进行时效处理, 其目的是使合金化元素以一定的形式及形状从过饱和铜基体中析出, 并弥散地分布在基体中, 进而达到同时提高合金强度和导电性能的目的。图 1 给出了时效时间为 4 h、不同时效温度工艺条件下, Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金显微组织照片。

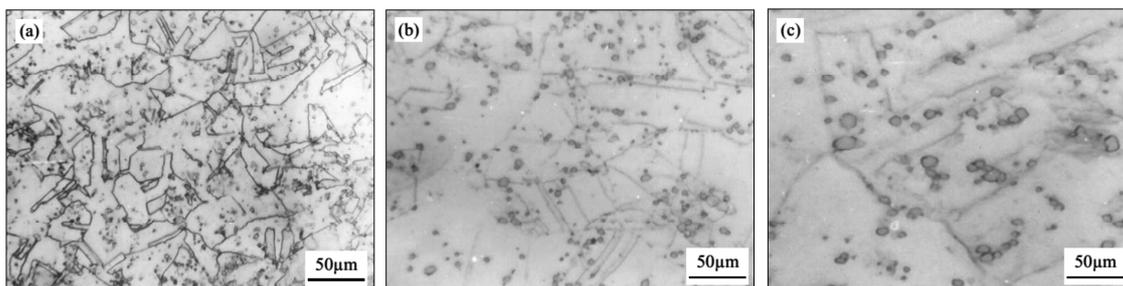


图 1 时效态 Cu-Cr-Ag-Y 合金的显微组织

Fig.1 Microstructures of Cu-Cr-Ag-Y alloy after aging treatment

[(a). 350°C/4 h; (b). 450°C/4 h; (c). 550°C/4 h]

由图 1(a)可知, 在 350°C/4 h 时效条件下, 第二相在基体晶界和晶粒内部均有析出, 但第二相析出的数量较少, 尺寸较小, 合金此时处于欠时效状态。

另外, 在铜基体中还可以明显观察到片状孪晶的存在。这是因为合金在时效前进行过一定量的冷变形, 且铜属于低层错能的面心立方金属, 时效时, 会伴

随再结晶过程, 由于层错的存在, 容易在铜基体三叉晶界处以层错为核形成片状孪晶, 使总界面能减少。图 1(b)所示为合金在 450℃/4 h 时效条件下第二相的分布, 该条件下第二相的数量明显增加, 析出较为完全, 第二相呈球状弥散分布于基体中, 其尺寸在 1~5 μm 之间, 此时的时效效果较为理想。图 1(c)所示为合金在 550℃/4 h 时效条件下第二相的形貌与分布, 可以看出第二相出现了相互连接, 发生了不同程度长大, 第二相尺寸在 5~15 μm 之间, 合金已明显处于过时效状态。

## 2.2 时效工艺对合金显微硬度的影响

图 2 所示为 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金经 350、450 以及 550℃ 时效时, 合金的显微硬度值随时效时间的变化规律曲线。

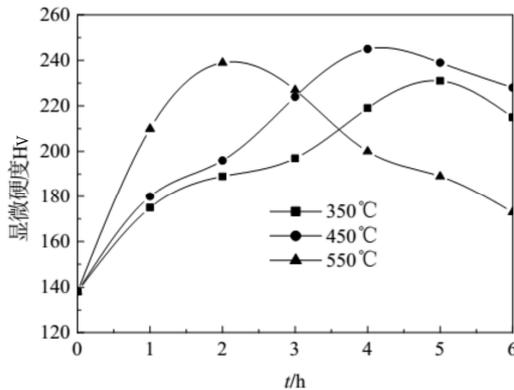


图 2 不同时效工艺处理时 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金的显微硬度

Fig.2 Microhardness of Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y alloy under different aging conditions

由图 2 可知, 在时效的起始阶段, 合金的显微硬度值均先随着时效时间的延长而增大, 当合金的显微硬度达到峰值后, 合金的显微硬度随着时效时间的延长而减小, 且时效温度越高, 合金显微硬度达到峰值所用的时间越短。合金在 350℃ 时效, 当时效时间为 5 h 时, 其显微硬度达到最大值 231 Hv; 450℃ 时效处理时, 合金的显微硬度于 4 h 左右达到最大值, 此时的显微硬度值为 245 Hv, 随着时效时间继续延长, 其显微硬度逐渐降低; 合金经 550℃ 时效处理的显微硬度峰值为 239 Hv, 时效时间为 2 h, 而后硬度随时效时间的延长而急剧降低, 当时效至 6 h 时, 显微硬度降至 173 Hv。合金在 350℃ 时效处理时, 由于时效温度相对较低, 合金中原子的扩散能力较弱, 基体中第二相的析出速率较慢且

析出相不易长大, 合金处于欠时效阶段, 故合金达到显微硬度最大值所用的时间较长。而合金在 450℃ 时效处理时, 合金中原子的扩散能力相对变强, 第二相的析出速率变快, 因而合金达到显微硬度峰值所用的时间较少。当时效时间继续延长至 5 h 后, 合金处于过时效状态, 基体中的部分析出相出现过生长, 破坏了析出相和基体之间的共格或半共格关系, 于是合金的显微硬度出现降低趋势<sup>[15]</sup>。时效温度为 550℃ 时, 合金中析出相的析出速率加快, 其显微硬度在 2 h 左右就可达到峰值。但由于时效温度过高, 析出相的长大速度较快, 使合金的显微硬度达到峰值以后便显著下降。

## 2.3 时效时间对合金导电率的影响

图 3 所示为 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金 450℃ 时效不同时间后, 其导电率的变化规律曲线。

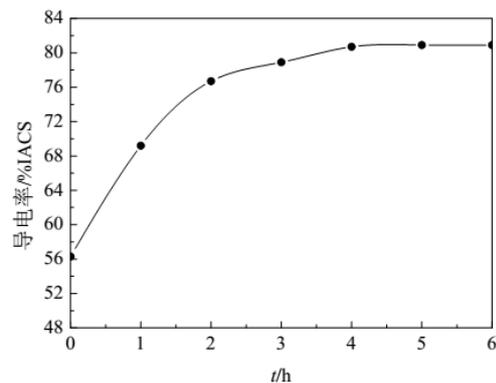


图 3 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金的导电率与时效时间的关系曲线

Fig.3 Curve of electrical conductivity at different aging time for the Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y alloy

从图 3 可以得知, 合金在 450℃ 温度下进行时效处理时, 在时效初期合金的导电率迅速上升, 达到某一值后逐渐平缓, 最后趋于恒值。这是由于时效初期合金中溶质原子析出速度较快, 溶质原子对电子的散射作用减弱明显, 导电率迅速升高。合金中的溶质原子的持续析出会使基体的过饱和度不断下降, 第二相的析出速度也逐步减慢, 合金的导电率增加幅度减少。随着时间的继续延长, 基体中溶质原子几乎全部析出, 所以导电率最后趋于稳定值。根据 Mathiessen 理论, 合金中析出相对电子的散射能力要低于固溶体对电子散射能力, 因此, 析出相的析出, 有利于 Cu-Cr-Ag-Y 合金导电率的提高。Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金在 450℃ 时效 4 h 时,

其导电率可达到 80.7% IACS。

## 2.4 Cu-Cr-Ag-Y 合金的载流磨损特征

取最优时效工艺(450℃/4 h)条件下的 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金线材作为试验的样品, 在自制载流磨损试验上对其进行不同电流条件下的磨损试验。图 4 给出了相应的试验结果。

由图 4 可以直观地看出, 载流磨损试验持续 6 h 后, 不同电流条件下, 合金的磨损量差别较大。随着电流的增大, 合金磨损量显著增加, 电流的作用表现得更为明显。合金的磨损与其接触压力、磨损时间和接触面温度有关, 当前两个因素不变时, 磨损量就直接受控于接触面温度。电流作用下, 合金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, 而其中的焦耳热和电弧放热与加载的电流强度成正比。因此, 电流愈大, 接触面所受热量越大, 温度越高, 导致合金硬度不同程度下降, 基材更容易被磨损。本试验中, 高强高导 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金线材经 6 h/20 A 载流

磨损后, 其质量损失达到 13.13 g。

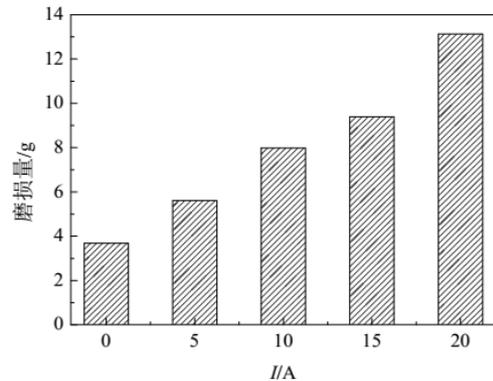


图 4 不同电流条件下 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金的磨损量  
Fig.4 Wear loss of Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y alloy under different current

为进一步研究合金的载流磨损机制, 对合金的载流磨损表面形貌进行了表征, 其结果如图 5 所示。

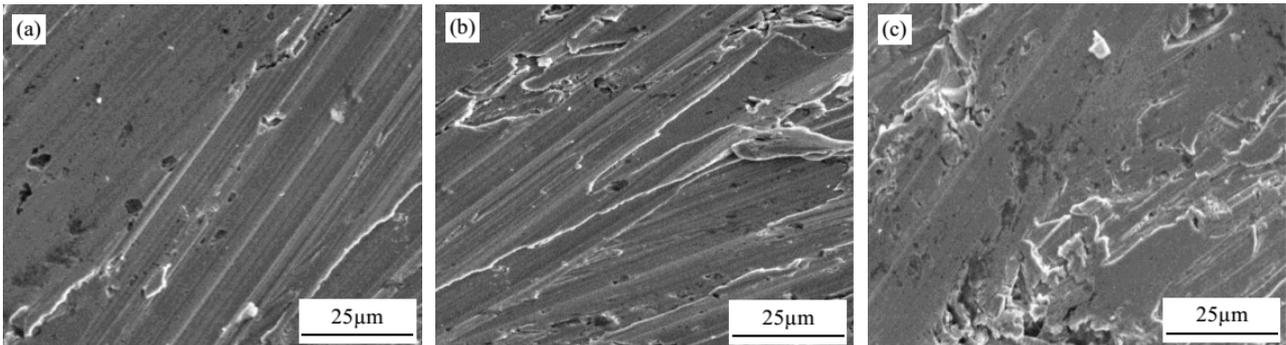


图 5 不同加载电流下 Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y 合金表面磨损形貌

Fig.5 Wear surface morphologies of the Cu-0.6Cr-0.15Ag-0.03Y alloy under different current

[(a). 0 A; (b). 10 A; (c). 20 A]

由图 5(a)可知, 未加载电流时, Cu-Cr-Ag-Y 合金磨损表面呈现出大小不一的剥落坑和犁沟, 此时合金的磨损形式主要为粘着磨损与磨粒磨损。在合金线材上加上 10 A 电流后, 合金的表面形貌发生了改变, 出现了明显的电烧蚀迹象以及沿滑动方向的塑性变形痕迹。这是由于电弧的作用在合金摩擦表面产生大量电弧热, 导致磨损表面局部温度急剧升高, 材料发生软化, 塑性变形被加速, 进而加剧磨损。电烧蚀是由于摩擦磨损过程中, 摩擦副之间产生电弧放电现象, 电弧产生的高温使得试样表面凸起部分烧蚀熔化, 形成电烧蚀区域, 见图 5(b)所示。此时合金的磨损形式主要为电侵蚀磨损、磨粒磨损和粘着磨损。当进一步增大电流至 20 A 时, 合金磨

损表面的犁沟变得稀少, 出现较深的电侵蚀孔隙或裂纹, 磨损表面形成凸起和棱角, 如图 5(c)所示。这些凸起和棱角随后会因电弧放电产生的热量不断被烧蚀掉, 而孔隙或裂纹的存在也会对合金耐磨性能造成不利的影响, 两者均会加剧合金载流条件下磨损的程度。

## 3 结论

(1) 时效处理后, Cu-Cr-Ag-Y 合金基体过饱和固溶体中会析出近球状的第二相。基体中第二相的均匀析出是合金显微硬度和导电率同时提高的原因。经 450℃/4 h 时效处理后, Cu-0.6Cr-0.15Ag-

0.03Y 合金可以获得较好的力学与电学性能, 其显微硬度与导电率分别为 245 Hv 和 80.7% IACS。

(2) 未加载电流条件下, Cu-Cr-Ag-Y 合金磨损形式主要为粘着磨损与磨粒磨损。加载电流后, 其磨损形式主要为电侵蚀磨损、磨粒磨损和粘着磨损。且随着加载电流的增大, 合金的磨损程度显著加剧。

### 参考文献:

- [1] 吴朋越, 谢水生, 黄国杰. 高速列车用铜合金接触线用材料及其加工工艺[J]. 稀有金属, 2006, 30(2): 203-208.  
Wu P, Xie S, Huang G. Materials and process technics of copper contact wires for high-speed train[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(2): 203-208.
- [2] 王松, 张吉明, 陈永泰, 等. 时效态 Cu-1.5%Cr 合金的组织与性能研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2014, 42(2): 64-68.  
Wang S, Zhang J, Chen Y, et al. Research on microstructures and properties of aged Cu-1.5%Cr alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2014, 42(2): 64-68.
- [3] Lu L, Shen Y F, Chen X H, et al. Ultrahigh strength and high electrical conductivity in copper[J]. Science, 2004, 304: 422-426.
- [4] Su J H, Dong Q M, Liu P, et al. Research on aging precipitation in a Cu-Cr-Zr-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 392: 422-426.
- [5] Xie H F, Mi X J, Huang G J, et al. Effect of thermo-mechanical treatment on microstructure and properties of Cu-Cr-Zr-Ag alloy[J]. Rare Metals, 2011, 30(6): 650-656.
- [6] 慕思国, 曹兴民, 汤玉琼, 等. 时效态 Cu-Cr-Zr-Mg-RE 合金的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(7): 1112-1118.  
Mu S, Cao X, Tang Y, et al. Microstructure and properties of aging Cu-Cr-Zr-Mg-RE alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(7): 1112-1118.
- [7] Li H Q, Xie S S, Mi X J, et al. Phase and microstructure analysis of Cu-Cr-Zr alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2007, 23(6): 795-800.
- [8] 陈小红, 刘平, 田保红, 等. Cu-15Cr-0.1Zr 原位复合材料中纤维相的组织演变[J]. 功能材料, 2008, 39 (12): 2011-2014.  
Chen X, Liu P, Tian B, et al. Microstructure evolvement of Cr fibers in Cu-15Cr-0.1Zr in-situ composite[J]. Journal of Functional Materials, 2008, 39(12): 2011-2014.
- [9] Vinogradova A, Patlanb V, Suzukib Y, et al. Structure and properties of ultra-fine grain Cu-Cr-Zr alloy produced by equal-channel angular pressing[J]. Acta Materialia, 2002, 50(7): 1639-1651.
- [10] 齐卫笑, 涂江平, 杨友志, 等. 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[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(6): 405-409.  
Qi W, Tu J, Yang Y, et al. Effect of aging treatment on mechanical and sliding wear properties of dilute solute Cu-Cr-Zr alloy under electric current[J]. Tribology, 2001, 21(6): 405-409.
- [11] 苏娟华, 董企铭, 刘平, 等. 不同固溶方式对引线框架 Cu-Cr-Sn-Zn 合金时效组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2005, 30(5): 49-52.  
Su J, Dong Q, Liu P, et al. Effects of different solution processes on microstructure and properties of the aged Cu-Cr-Sn-Zn alloy used in lead frame[J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(5): 49-52.
- [12] 周海涛, 钟建伟, 周啸, 等. 多级形变时效对 Cu-Cr-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 141-145.  
Zhou H, Zhong J, Zhou X, et al. Effects of multi-step thermomechanical treatments on microstructure and properties of Cu-Cr-Zr alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2009, 30(3): 141-145.
- [13] 刘勇, 刘平, 李伟, 等. Cu-Cr-Zr-Y 合金时效析出行为研究[J]. 功能材料, 2005, 36(3): 377-379.  
Liu Y, Liu P, Li W, et al. Aging precipitation behavior of Cu-Cr-Zr-Y alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2005, 36(3): 377-379.
- [14] Li H Q, Xie S S, Mi X J, et al. Influence of Cerium and Yttrium on Cu-Cr-Zr alloys[J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24(Spec. Issue): 367-371.
- [15] 王俊峰, 贾淑果, 陈少华, 等. 热轧态 Cu-Ni-Si-Mg 合金的时效动力学[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(7): 33-36.  
Wang J, Jia S, Chen S, et al. Aging kinetics of Cu-Ni-Si-Mg alloy[J]. Transaction of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(7): 33-36.