

时效温度和 Cr 含量对 Cu-Ag-Cr 合金性能的影响

王 耀^{1,2} 杨正海^{1,2} 杨倩倩³ 田保红¹ 杨晓辉⁴ 邵星海³ 徐 宇⁴ 曹 磊³

[1.河南科技大学材料科学与工程学院; 2.河南科技大学高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室; 3.清华大学天津高端装备研究院洛阳先进制造产业研发基地; 4.内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古电力科学研究院分公司]

摘 要 研究了时效温度和 Cr 含量对 70% 冷轧变形的 Cu-Ag-xCr 合金的硬度、导电性能和耐蚀性能的影响。结果表明,Cu-Ag-xCr 合金在 450~500 ℃时效后,其硬度随时效温度增加而降低,随 Cr 含量增加而升高;时效温度和 Cr 含量对合金电导率的影响不大;随时效温度升高,合金耐蚀性降低;随 Cr 含量增加,腐蚀速率降低,耐蚀性提高。Cr 含量为 0.34% 时,在 450 ℃时效 2 h 后,其综合性能较好,电导率为 47.02 MS/m,硬度(HV_{0.1})达到 128.34,耐腐蚀性较好。

关键词 Cu-Ag-Cr 合金;Cr 含量;时效温度;硬度;耐腐蚀性

中图分类号 TG146.1⁺1;TG144 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Aging Temperature and Cr Content on the Microstructure and Properties of Cu-Ag-Cr Alloy

Wang Yao^{1,2}, Yang Zhenghai^{1,2}, Yang Qianqian³, Tian Baohong¹,
Yang Xiaohui⁴, Shao Xinghai³, Xu Yu⁴, Cao Lei³

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology;
2.National High-end Bearing Tribology Technology and Application Laboratory, Henan University
of Science and Technology; 3.Luoyang Advanced Manufacturing Industry and Development Base,
Tianjin High-end Equipment Research Institute, Tsinghua University; 4.Inner Mongolia Electric
Power Research Institute Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd.)

Abstract: The influence of aging temperature and Cr content on the hardness, conductivity and corrosion resistance of 70% cold-rolled Cu-Ag-xCr alloy was investigated. The results indicate that with the Cu-Ag-xCr alloy aged at 450~500 ℃, the hardness of the alloy is decreased with the increase of the aging temperature, and increased with the increase of the Cr content. The effect of aging temperature and Cr content on the conductivity can be neglected. With the increase of the ageing temperature, the corrosion resistance is decreased, and with the increase of the Cr content, the corrosion rate is decreased and the corrosion resistance is increased. When the Cr content is 0.34%, the comprehensive performance is optimal at 450 ℃ aging for 2 h, where the conductivity is 47.02 MS/m, the hardness is 128.34 HV_{0.1}, and the corrosion resistance is better.

Key Words: Cu-Ag-Cr Alloy, Cr Content, Aging Temperature, Hardness, Corrosion Resistance

收稿日期:2020-08-28;修改稿收到日期:2020-11-04

基金项目:内蒙古电力(集团)有限责任公司博士后项目(2019-53)

第一作者简介:王耀,男,1993 年出生,硕士研究生,河南洛阳(471023),E-mail: wangyao@lamic.com.cn

通信作者:杨正海,男,1977 年出生,副教授,河南洛阳(471023),E-mail: yym20090115@163.com

引用格式:王耀,杨正海,杨倩倩,等. 时效温度和 Cr 含量对 Cu-Ag-Cr 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(3):353-358.

WANG Y, YANG Z H, YANG Q Q, et al. Effects of aging temperature and Cr content on the microstructure and properties of Cu-Ag-Cr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(3):353-358.

[13] SUN S C, YUAN B, LIU M P. Effects of moulding sands and wall thickness on microstructure and mechanical properties of Sr-modified A356 aluminum casting alloy[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2012, 22(8): 1 884-1 890.

[14] SRIVASTAVA A P, TONG M, TEFANOV T, et al. Elimination of porosity in bulk metallic glass castings using hot isostatic pressing[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2017, 468: 5-11.

[15] 杜旭初,洪润洲,杨守杰,等.热等静压对铝合金铸件组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(1): 55-59.

[16] RAN G, ZHOU J G, WANG Q G. The effect of hot isostatic pressing on the microstructure and tensile properties of an unmodified A356-T6 cast aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2006, 421: 80-86.

(编辑:栗万仲)

Cu-Ag 合金作为优良的导电材料之一,广泛应用于航空航天、轨道交通、机械制造及大规模集成电路等领域^[1~3]。近年来,高性能铜合金向少 Ag 甚至是无 Ag 方向发展,采用微合金化的方式^[4],在二元 Cu-Ag 合金中添加第三组元形成三元合金成为研究的重点,如 Zr、Nb 等^[5]。添加第三组元一方面可以在不显著降低导电性的同时进一步提高综合性能,另一方面也可以降低 Ag 元素的使用量,从而降低成本,扩大应用领域。为满足铜合金的高性能需求,主要对其进行固溶强化和时效强化,同时结合冷加工变形而达到高强度与高导电性相结合的优异综合性能。对于经高温固溶处理后的时效析出型合金,在随后的时效过程中一般会发生一系列复杂的变化,如 GP 区、亚稳相和稳定相的形成等^[6,7]。合金成分和时效工艺不同,其变化特点也不完全相同。因此,本课题通过改变 Cu-Ag-Cr 合金中 Cr 含量并经过不同时效温度处理,研究了大塑性变形条件下,Cr 含量及时效温度对 Cu-Ag-Cr 合金的微观组织、硬度、耐腐蚀性能和导电性能的影响,并分析了其对合金组织和性能的影响机制。

1 试验材料与方法

1.1 合金熔炼及热处理

试验原材料采用纯度(质量分数)为 99.99% 的标准阴极电解铜、99.99% 的 Cr、99.99% 的 Ag,表 1 为采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测量的合金化学成分。在 ZGJL0.01-4C-4 型 10 kg 真空中频感应熔炼炉中熔炼合金,并采用氩气保护,经过炉内浇注,铁型铸造,随后采用线切割进行取样,试样初始尺寸为 $\phi 70\text{ mm}\times 11\text{ mm}$ 。

表 1 Cu-Ag-Cr 铜合金的化学成分

Tab.1 The chemical composition of the Cu-Ag-Cr alloy %			
编号	ω_B		
	Ag	Cr	Cu 及其他元素
1	0.11	0.10	99.79
2	0.11	0.34	99.55

试样在 KS×4 箱式电阻炉中进行 $950\text{ }^{\circ}\text{C}\times 4\text{ h}$ 的均匀化处理后空冷;打磨去除氧化皮后在自制冷轧机进行多道次冷轧变形处理,冷轧变形量为 40%,厚度由 10 mm 变成 6 mm;再进行 $960\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 的固溶处理后水淬;然后在自制冷轧机上进行变形量为 70% 的多道次轧制,厚度由 6 mm 轧成 1.8 mm,试样的变形量按下式计算:

$$x = \frac{d_0 - d}{d_0}$$

式中, d_0 、 d 分别为轧制前后试样的厚度,中间不进行去

应力退火。最后将试样在氮气保护的管式电阻炉中分别进行不同温度的时效处理,PID 控温,炉子正常工作时温度波动为 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$,空冷至室温。

1.2 试验方案

将 1、2 号合金进行 $950\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 固溶处理和 70% 的冷变形后,分别在 450、475 和 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行 2 h 的人工时效处理,然后在试样上采用线切割切取 $\phi 11.29\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}$ 的试样,试样依次在 400、600、800、1000、1200、1500 号砂纸上打磨。

采用 HV-1000 型显微硬度计进行硬度测试,试验载荷为 0.98 N,保压时间为 10 s;采用 Sigma 2008 型涡流电导仪测量合金的电导率,选用 $\phi 8\text{ mm}$ 的电导仪探头,测试前用标准铜电极(电导率为 58.00 MS/m)进行校准。硬度和电导率测试中,每个试样测试 7 次,去掉最大值和最小值后取平均值。

采用 CHI600D 电化学工作站进行极化曲线测定,以饱和甘汞电极为参比电极、石墨电极为辅助电极、试样为工作电极。扫描速率为 0.001 V/s,交流阻抗的测试频率为 0.01 Hz~100 kHz,施加振幅为 5 mV,试验开展前先将试样在浓度为 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中浸泡 1 h。试样尺寸为 $\phi 11.29\text{ mm}\times 1.8\text{ mm}$,从试样背面引出铜线,用环氧树脂封装在 PVC 塑料管中,待凝固后依次用 1000、1500、2000 号砂纸打磨至完全露出 $\phi 11.29\text{ mm}$ 的工作面。

采用 JSM-5610LV 型扫描电镜(SEM)观察电化学腐蚀试验后铜合金腐蚀表面的形貌及状态,用于判定腐蚀程度及腐蚀过程。采用 JSM-7800F 型扫描电镜(SEM)及其附带的能谱(EDS)进行基体第二相形态及分布的观察和各个元素的面扫描测试与分析。采用 DMI8C 型倒置式金相显微镜观察基体的显微组织,试样经砂纸打磨、抛光、腐蚀后观察,腐蚀剂配比为 1.4 g 的 FeCl_3 、48 mL 的无水乙醇和 2 mL 的 HCl,腐蚀时间为 10 s。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织观察与分析

图 1 为不同状态下 2 号铜合金的金相组织。可以看出,在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时效 2 h,其晶粒仍然保持轧制后的状态,晶粒尺寸变化不大,处于破碎状态;而随着时效温度升高,合金的晶粒长大,其部分区域产生再结晶组织,形成细小的等轴晶;在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下时效 2 h,其再结晶组织有所减少,晶粒尺寸明显高于在 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时效温度下的。随着时效温度升高,Cu-Ag-Cr 合金的晶粒发生明显的再结晶现象,其晶粒尺寸也明显长大,组织的不

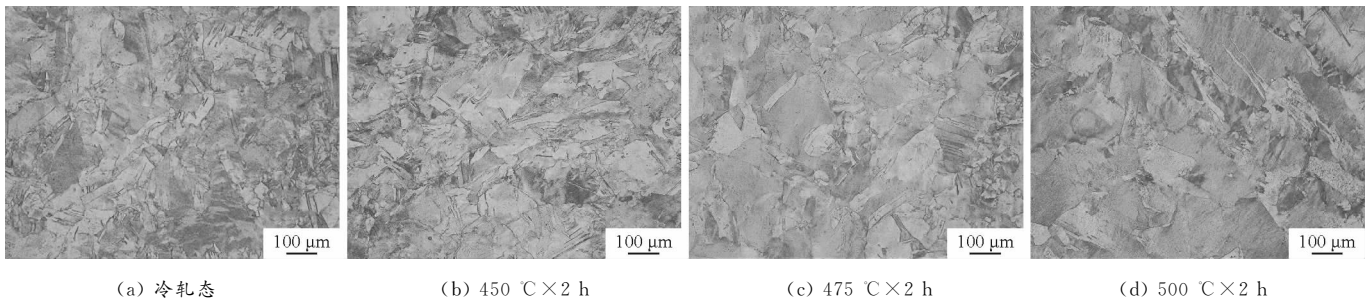


图 1 2 号铜合金在冷轧和不同时效温度下的金相组织

Fig.1 Microstructure of NO.2 copper alloy under cold rolling and different aging temperatures

均匀性成为降低其耐蚀性的关键因素。

1 号和 2 号铜合金基体的 SEM、Cr 元素面扫图和 EDS 分析分别见图 2~图 4。由图 2 可以看出,450 °C 时合金析出相为细小而弥散的颗粒;随着 Cr 含量增加,其析出相增多,出现棒条状的析出相与颗粒状共存状态^[8];随着时效温度升高,棒条状析出相的数量逐渐减小,颗粒状第二相也出现尺寸长大。由图 3 可以看出,

添加的 Cr 元素在基体中分布较均匀,但随着时效温度升高,部分面扫描区域亮度变亮,Cr 元素发生聚集;而随着 Cr 含量增大,其分布更加均匀。分析可知,450 °C 时效时,因 Cr 含量低,其析出相形成能相对小,只出现细小弥散相。随着 Cr 含量增大,会观察到棒条状的亚稳相生成,随时效温度升高,因外界给予能量增加,析出相的形成和大颗粒的分解的驱动力加大,因而棒状析出

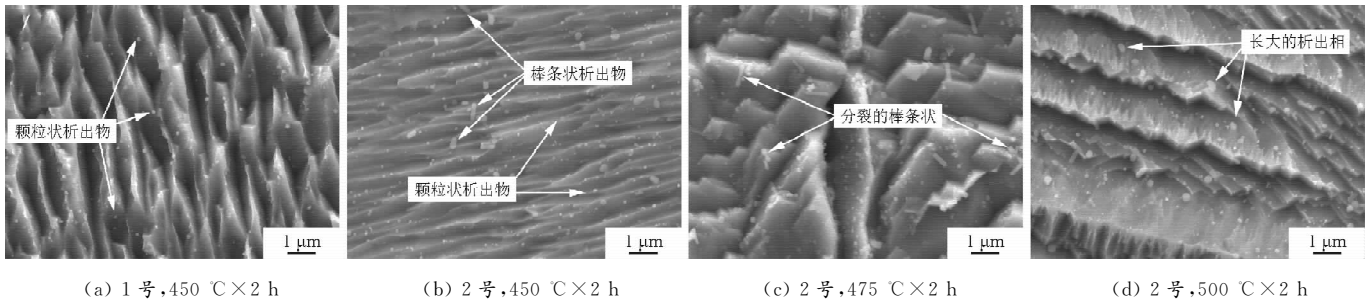


图 2 1、2 号合金不同时效温度下的 SEM 形貌

Fig.2 SEM microstructure of Cu-Ag-Cr alloy at different aging temperatures

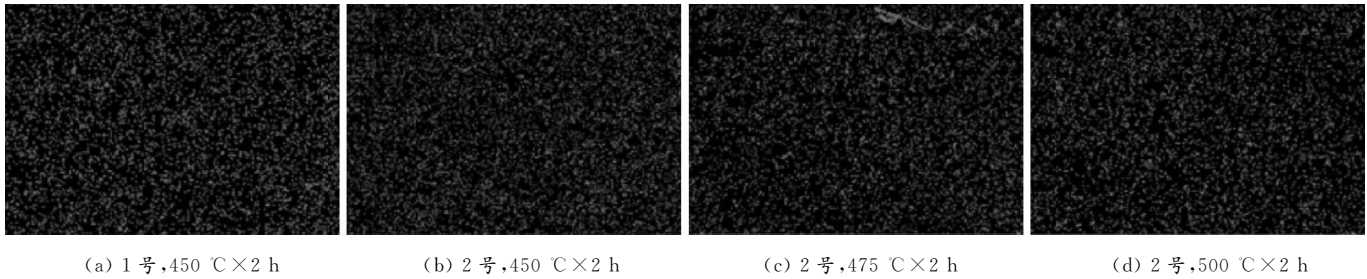


图 3 1、2 号合金不同时效温度下 Cr 元素面扫描

Fig.3 Surface scanning of Cr element in Cu-Ag-Cr alloy at different aging temperatures

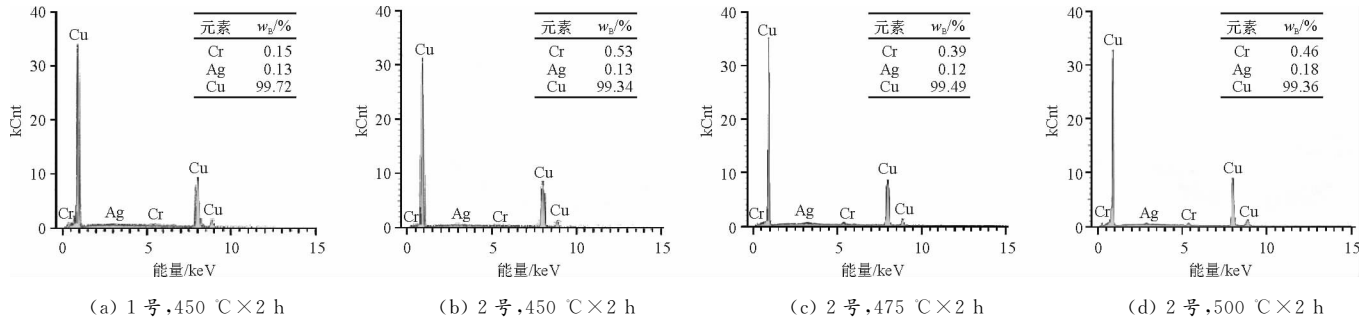


图 4 1、2 号合金不同时效温度下的 EDS 分析

Fig.4 EDS analysis of Cu-Ag-Cr alloy at different aging temperatures

相分解,颗粒状的析出相长大。

2.2 硬度和电导率分析

图 5 为 1、2 号合金在经过 $960\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}$ 固溶处理、70% 的冷变形,不同时效温度下人工时效 2 h 后的硬度和电导率。由图 5a 可以看出,随时效温度升高,合金的硬度呈现小幅度减小的趋势。450 $^{\circ}\text{C}$ 时效 2 h 后,两种合金的硬度值 ($\text{HV}_{0.1}$) 最大,分别为 118.08 和 128.34。时效温度在 450~500 $^{\circ}\text{C}$ 时,随着 Cr 含量增加,其显微硬度增大。由图 5b 可以看出,随着时效温度的升高以及 Cr 含量的变化,两种合金的电导率变化不大。

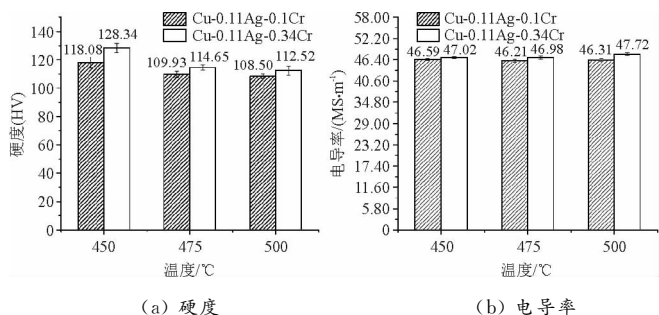


图 5 不同时效温度处理 2 h 后两种铜合金的显微硬度和电导率
Fig.5 The microhardness and electrical conductivity of two kinds of copper alloys treated with different aging temperature for 2 h

1 070 $^{\circ}\text{C}$ 时,Cr 元素在 Cu 中的最大固溶度为 0.65%,室温下仅为 0.03%^[9]。Cu-Ag-Cr 合金是典型的时效析出型合金^[10],在经过高温固溶和冷变形处理后的时效过程中析出相的体积分数是影响硬度变化的主要因素;而基体中固溶元素的含量是影响合金电导率的主要因素,即析出相的体积分数。溶质原子的活动能力和时效析出时的相变驱动力成为决定析出相的体积分数和铜基体中固溶元素含量的主要因素。随着固溶元素含量的增多,基体中所含的固溶元素量增多,其相变析出的相变驱动力增强;而随着时效温度增加,溶质原子的活动能力增加,相变驱动力增强。在相同时间内,时效温度的升高导致析出相的长大及其与基体共格关系的丧失,显微硬度随之逐渐降低。时效温度过高,由于原子的扩散能力增大,析出相聚集长大的速度也相应加大,析出相与基体很快失去共格关系,因此相应的硬度呈现降低的趋势。结合图 5 可以看出,经 450 $^{\circ}\text{C}$ 时效 2 h,合金的电导率和显微硬度都较好,此时,1 号合金的电导率为 46.59 MS/m 、显微硬度 ($\text{HV}_{0.1}$) 为 118.08;合金 2 号的电导率为 47.02 MS/m 、显微硬度 ($\text{HV}_{0.1}$) 为 128.34。

2.3 耐腐蚀性能分析

在电化学活性顺序中,Cu 具有比一般金属更高的正电位 ($+0.35\text{ V}_{\text{SHE}}$)^[11],析氢反应不会发生,热力学性

质比较稳定。但当 Cu 长期暴露于大气中时,其表面通常有蓝绿色或绿棕色的铜绿出现,若大气中含侵蚀性较强的粒子(如 SO_2 、 NO_2 和 Cl^- 等),铜表面的腐蚀会更加显著,其腐蚀速率也会显著加快。Cu 的大气腐蚀是一个复杂的物理化学过程,其本质是薄液膜下的电化学反应^[12]。暴露在大气中的 Cu 吸收水分,形成一层电解质液膜,这一过程进行很迅速,且与大气温度、相对湿度及金属表面的粗糙度等因素有关;随着污染性气体及盐粒吸附并溶解于水膜中,使得材料表面的液膜厚度增大,导电性、酸性及腐蚀性增强,并诱发电化学腐蚀。

图 6 为 1 号和 2 号铜合金经不同时效温度处理后,在浓度为 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中浸泡 1 h 后的动电位极化曲线。可以看出,在阳极极化区,随着扫描电压增加,试样的腐蚀经历了溶解 $\rightarrow$ 钝化 $\rightarrow$ 活化 $\rightarrow$ 破钝的过程。试样的阳极溶解起初遵循塔菲尔规律,但在电流密度很大时,则明显偏离塔菲尔规律。1 号和 2 号合金在不同时效温度处理后的极化曲线具有一定的相似性,其在阳极极化区均存在一个长短不一的平台,说明合金在该平台所对应的电位处发生了钝化现象,平台的长短差异表示钝化区域的范围有所不同。由图 6 和表 2 可知,当 Cr 含量较低时,随着时效温度升高,1 号合金的极化曲线左移,其在 450 $^{\circ}\text{C}$ 时效 2 h 后具有较正的 E_{corr} 和较低的 J_{corr} ,表明该时效温度下的合金具有较好的耐腐蚀性能;当 Cr 含量较高时,随着时效温度的升高,2 号合金的极化曲线向左移动,同样在 450 $^{\circ}\text{C}$ 时效 2 h 后具有较正的 E_{corr} 和较低的 J_{corr} ,表明该时效温度下的合金具有较好的耐腐蚀性能,合金具有较高的抗腐蚀倾向和较低的腐蚀速率。固溶态合金具有较好的耐腐蚀性能^[14],主要原因在于原铸态合金中的第二相固溶到合金基体中,也即是第二相中的合金元素溶入到合金基体后导致基体 E_{corr} 降低,降低合金发生腐蚀的驱动力。时效过程是一个促使第二相从基体中析出的过程,伴随着第二相析出的同时,邻近析出相的基体中合金元素的含量也会逐渐降低,从而导致合金 E_{corr} 随着析出相含

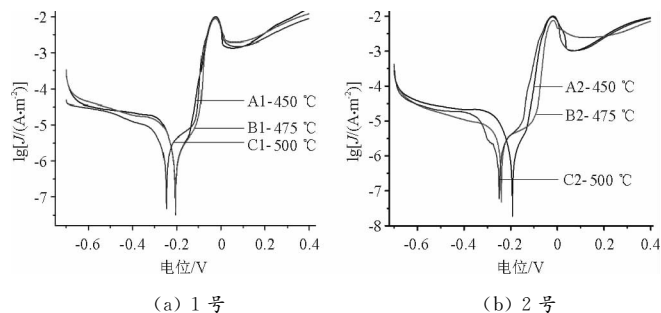


图 6 两种铜合金在不同时效温度处理 2 h 的 Tafel 曲线
Fig.6 Tafel curves of two kinds of copper alloy at different aging temperatures

量增加而增大。对于 1 号和 2 号合金来说,当时效温度为 450~500 ℃时,随着 Cr 含量的增加,第二相析出的驱动力增强,即作为阴极的析出相含量增加,增大了合金发生电化学腐蚀的动力,但析出的第二相在合金基体及晶界均匀分布,局部形成了 Cr_2O_3 ,致使合金的 E_{corr} 和 J_{corr} 降低,改善了合金的耐腐蚀性能。但在较高的时效温度下,析出相出现长大过快的现象,即过时效现象,从而导致 E_{corr} 和 J_{corr} 随着时效温度增加而增大,耐腐蚀性能出现随时效温度增加而降低的现象。

表 2 1、2 号合金自腐蚀电压及自腐蚀电流密度

Tab.2 The self-corrosion potential and self-corrosion current density of Cu-Ag-Cr alloys			
合金	时效温度/ ℃	自腐蚀电压 E_{corr}/V	自腐蚀电流密度 $J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
1 号	450	-0.206	0.109 4
	475	-0.206	0.188 5
	500	-0.247	0.248 4
2 号	450	-0.193	0.077 2
	475	-0.240	0.116 6
	500	-0.249	0.158 7

将经过不同时效温度处理的 1 号、2 号合金在浓度为 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中进行第二周期的 EIS 测试,试验结果见图 7。通常认为,交流阻抗圆弧半径越大,腐蚀反应的阻力就越大,合金的耐腐蚀性能越好^[13]。从图 7 可以看出,试样的 Nyquist 图只存在高频区的大容抗弧,容抗弧半径的大小反应的是腐蚀过程中的电荷转移电阻的大小,电荷转移电阻大小和耐腐蚀性呈正相关,也即大的容抗弧对应着高的耐腐蚀性、低的腐蚀速率。从图 7 还可以看出,1、2 号合金经过 450 ℃时效后,其容抗弧半径明显高于其他,表明 1、2 号合金的耐蚀性能在 450 ℃最好,且随 Cr 含量增加,其容抗弧半径增大,耐蚀性能进一步提高。

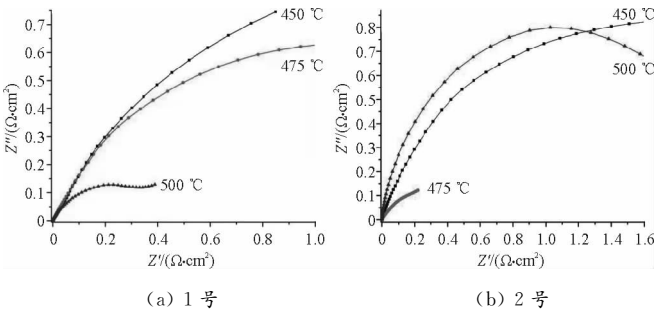


图 7 1、2 号合金在不同时效温度下的电化学交流阻抗谱(EIS)
Fig.7 Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of two kinds of copper alloy at different aging temperatures

2.4 极化后腐蚀表面形态

图 8 为 1、2 号合金经不同时效温度后,在浓度为 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中进行电化学腐蚀后的表面腐蚀形貌。可以看出,合金以均匀腐蚀为主,虽然合金表

面残留有点蚀小坑,但点蚀较弱。对比图 8a~图 8c 可以看出,合金表面腐蚀遵循表面钝化膜破裂→钝化膜脱落,表面附着部分腐蚀产物→钝化膜完全脱落,基体进入第二阶段腐蚀的顺序。这也说明,随着时效温度的升高,Cr 元素析出的热力学动力比较强,但 Cr 含量较低,因此析出的 Cr 元素不参与腐蚀钝化膜的生成^[14],基体中存留的 Cr 含量越高,其形成的钝化膜的结构越稳定,耐蚀性越强。

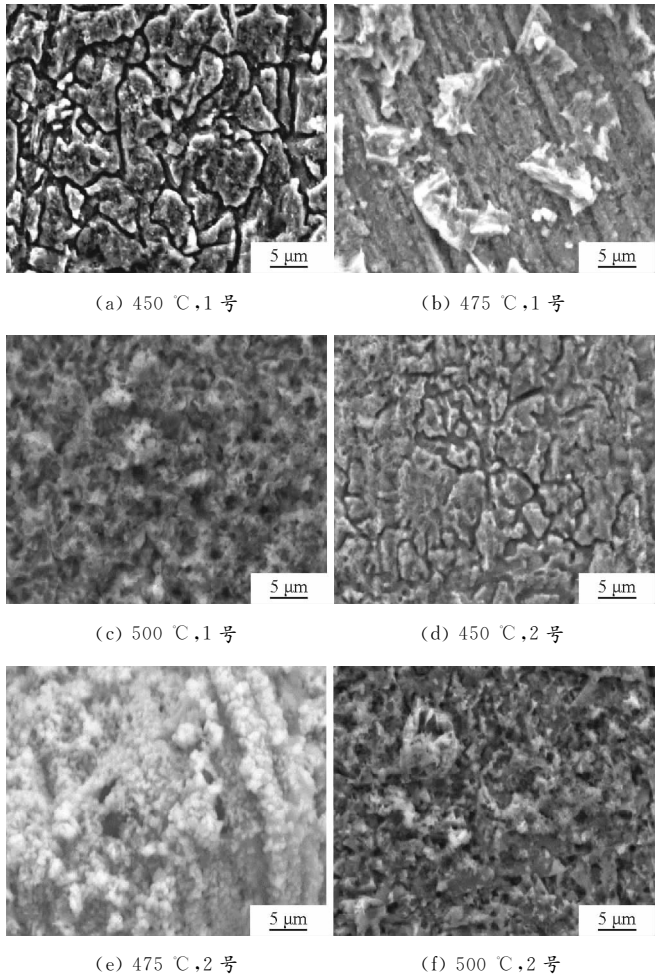


图 8 不同温度时效后的 Cu-Ag-Cr 合金在 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中的微观腐蚀形貌
Fig.8 Micro-corrosion morphology of Cu-Ag-Cr alloy aged at different temperature in 0.6 mol/L NaCl solution

对比图 8a 和图 8d 可知,同样的时效工艺下,随 Cr 含量的增加,晶界侵蚀现象变弱。Cr 含量较高的试样中腐蚀晶界较窄,且其体积分数低于 Cr 含量低的试样,极化表面似乎更平滑。大塑性变形不仅带来了晶粒的变形和破碎,同时晶粒内部和晶界的位错密度增加,随着位错在晶界的积累,晶界受到较大的冲击,从而产生明显的沟槽。此外,Cr 含量较高的合金腐蚀电流较低的原因可能是阴极反应中的相互作用,晶粒内外部相比,晶粒内部是阴极位置,晶界是阳极位置,因为析出相的优先氧化生成部分氧化物,电位较低,电位差相差不同

大,因而耐腐蚀性能较强。

3 结 论

(1)在 Cu-Ag 合金中加入质量分数为 0.1% 和 0.34% 的 Cr 元素,随时效温度升高,合金硬度降低,电导率变化不大。

(2)在 Cu-Ag 合金中添加质量分数为 0.1% 或 0.34% 的 Cr 后,随时效温度升高,其耐腐蚀性能下降,即自腐蚀电压减小,电化学腐蚀倾向增大;自腐蚀电流密度增加,电化学腐蚀速率加快。

(3)同一时效温度下,随着 Cr 含量增大,Cu-Ag 合金的硬度增大,电导率略微增大,其自腐蚀电压下降,腐蚀倾向减弱,其自腐蚀电流密度下降,腐蚀速率减小,即耐蚀性能增强。

(4)随着 Cr 含量增加,Cu-Ag 合金析出相呈现颗粒状与棒条状共存状态;而随着时效温度升高,其棒条状第二相分解,颗粒状第二相出现长大现象。

参 考 文 献

- [1] SAKAI Y, INOUE K, ASANO T, et al. Development of high-strength high conductivity Cu-Ag alloys for high-field pulsed magnet use[J]. Applied Physics Letters, 1991, 59(2): 2 965-2 967.
- [2] 沈月,付作鑫,张国全,等.高强高导铜银合金的研究现状及发展趋势[J].材料导报, 2012, 26(13): 109-113.
- [3] 刘平,赵冬梅,田保红,等.高性能铜合金及其加工技术[M].北京:冶金工业出版社, 2005.
- [4] 侯彬,陆亮亮,刘松,等.Cu-Cr-Zr-Mg-Ce 合金微观组织及时效工艺[J].特种铸造及有色合金, 2014, 34(1): 16-19.

- [5] SHANGINA D V, BOCHVAR N R, MOROZOVA A I, et al. Effect of chromium and zirconium content on structure, strength and electrical conductivity of Cu-Cr-Zr alloys after high pressure torsion[J]. Materials Letters, 2017, 199: 46-49.
- [6] 贾淑果,陈少华,宋克兴,等.Cu-0.1Ag-0.26Cr 合金的时效析出动力学[J].材料热处理学报, 2011, 32(S1): 49-52.
- [7] MORRIS D G, BENGHALEM A, MORRIS-MUNOZ M A. Influence of solidification conditions, thermomechanical processing, and alloying additions on the structure and properties of in situ composite Cu-Ag alloys[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(10): 1 123-1 130.
- [8] KONG L B, ZHOU Y J, SONG K X, et al. Effect of aging on properties and nanoscale precipitates of Cu-Ag-Cr alloy[J]. Nanotechnology Reviews, 2020, 9(1): 70-78.
- [9] YUAN Y, ZHOU L, ZHU X, et al. Microstructure evolution and properties of Cu-Cr alloy during continuous extrusion process[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 703: 454-460.
- [10] 李明亮,刘平,刘新宽,等.时效处理对冷轧 C194 铜合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(4): 457-460.
- [11] NIKITINA E V, KARFIDOV E A, KAZAKOVTSSEVA N A. Anodic selective dissolution of copper alloys in chloride and carbonate melts[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 845: 156 238.
- [12] 徐松,谢亿,王军,等.乡村大气环境中室外端子箱内铜导线腐蚀失效分析[J].腐蚀科学与防护技术, 2019, 31(6): 659-664.
- [13] 姚怀,刘亚,杜三明,等.时效处理对 Mg-2.0Zn-0.5Zr-3.0Gd 生物降解镁合金组织、力学性能及耐腐蚀性能的影响[J].中国有色金属学报, 2020, 30(3): 518-529.
- [14] 张雅妮,曾进蕾,郑茂盛,等.微量 Cr 的添加对铜合金耐蚀性的影响[J].稀有金属材料与工程, 2007(S3): 49-52.

(编辑:刘晨辉)

俄科研人员发现钛镍合金热机械处理最佳参数

近日,俄罗斯国立研究技术大学的科研人员首先发现了钛镍合金的热机械处理最佳参数,从而改进了生产医学形状记忆合金的技术。新方法可提升现有手术设备的可靠性,并开发出许多新产品。

形状记忆合金是受到严重变形后能够恢复形状的材料。目前,使用最广泛的是基于钛镍合金的形状记忆合金,其被用于具有高可靠性要求的医学植入物和智能医疗设备中,例如可移动式手术支架或血管支架。

钛镍合金可逆变形最大指标需要在不超过 600 ℃ 的温度下,通过热机械处理技术形成超细晶粒结构来获得。但现有的生产镍化钛的技术是在 800~900 ℃ 的温度下进行的,因此,无法获得具有超细晶粒结构的大型形状记忆合金。俄罗斯国立研究技术大学的科研人员首次发现了钛镍合金的热机械处理参数,使大型钛镍形状记忆合金获得不仅具有所需的纳米结构,而且还增强了其功能特性。

研究发现,300 ℃ 是钛镍合金从低温变形向高温变形转变的临界温度,而在 300~600 ℃ 范围内,变形后的钛镍合金动态多边形结构的形状记忆特性达到了最高水平,该热处理温度间隔对于形成超细晶粒结构和改善钛镍合金的功能特性最佳。使用按照新技术获得的纳米结构钛镍合金,不仅大大减少了金属的消耗,还提高了合金形状记忆效应的可靠性。

另外,在研究过程中科研人员首次获得了钛镍合金变形图,并研究了在低于 600 ℃ 的温度下形状记忆合金结构的形成过程,这对于钛镍合金纳米结构的形成有重要意义。通过对获得的数据进行分析,还可以解决形状记忆合金的恢复、再结晶动态温度范围等。

(摘自中国有色金属报)