

铜合金电化学腐蚀的研究进展

吴鑫林¹ 胡 强² 曾良才¹ 刘鑫旺³ 王 强¹

(1.武汉科技大学机械自动化学院,冶金装备及其控制省部共建教育部重点实验室;2.江西省科学院应用物理研究所;3.华中科技大学材料科学与工程学院,材料成形与模具技术国家重点实验室)

摘 要 铜合金在海洋工程、交通运输和航空航天等领域具有广阔的应用前景。由于服役环境复杂,除了要求优异的力学性能外,对铜合金的耐腐蚀性也提出了很高的要求。综述了铜合金电化学腐蚀的研究现状,重点分析了外界环境因素(温度、pH 值等)和合金元素(Fe、Mn 等)对铜合金腐蚀电位、腐蚀电流、腐蚀类型以及腐蚀产物等的影响规律和机制,以为后续铜合金耐蚀性能的优化提供参考。

关键词 铜合金;电化学腐蚀;环境因素;合金化

中图分类号 TG146.1⁺1;TG174.3⁺6

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Electrochemical Corrosion of Copper Alloys

Wu Xinlin¹, Hu Qiang², Zeng Liangcai¹, Liu xinwang³, Wang Qiang¹

(1.Key Laboratory of Metallurgical Equipment and Control, Ministry of Education, School of Mechanical Automation, Wuhan University of Science and Technology; 2.Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Sciences; 3.State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: Copper alloys have broad application prospects in the fields of marine engineering, transportation and aerospace. Due to the complex service environment, in addition to excellent mechanical properties, the corrosion resistance of copper alloys is also highly required. Therefore, the research status on electrochemical corrosion of copper alloys were reviewed, and influence law as well as mechanism of external environmental factors (temperature, pH value, etc.) and alloying elements (Fe, Mn, etc.) on the corrosion potential, corrosion current, corrosion types and corrosion products of copper alloys were emphasized in order to provide reference for the subsequent optimization of the corrosion resistance of copper alloys.

Key Words: Copper Alloy, Electrochemical Corrosion, Environmental Factors, Alloying

铜合金因兼具优良的物理和力学性能,广泛应用于电子工业、交通运输、国防、建筑、航天等领域^[1-4]。铜锡合金(青铜)是我国使用最早的铜合金,其铸造性能、耐磨性能以及力学性能良好,广泛应用于轴承、蜗轮及齿轮等零件制造中。由 Cu 和 Zn 组成的黄铜合金,主要应用于制造污水泵、各种阀门和散热器等。白铜主要以 Ni 为添加元素,其优点是力学性能以及耐腐蚀性能好,色泽美观,广泛应用于精密机械以及船舶构件^[5-9]。

腐蚀是金属材料应用过程中普遍存在的现象,已成为铜合金的主要失效形式之一^[10-12]。当材料表面发生

腐蚀,特别是点蚀等局部腐蚀时,会导致材料的突发性失效,进而造成安全事故和经济损失^[13-14]。此外,由腐蚀引起的设备损坏、环境污染以及可能引发的爆炸、火灾等间接经济损失更是无法估量^[15]。因此,金属的腐蚀问题不容忽视,研究腐蚀失效机理对材料的开发应用具有积极的意义。考虑到大部分铜合金构件的服役环境,电化学腐蚀是最主要的一种腐蚀形式。鉴于此,对外部环境和合金化元素影响的铜合金电化学腐蚀性能的研究成果进行了综述,以为减缓铜合金的腐蚀速度、延长服役寿命以及新型耐蚀铜合金的开发提供参考。

收稿日期:2022-07-01;修改稿收到日期:2022-08-08
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52001236);江西省重大科技研发专项基金资助项目(20212AAE01003)
第一作者简介:吴鑫林,男,1999 年出生,硕士研究生,武汉(430081),E-mail:2837644058@qq.com
通信作者:王强,男,1988 年出生,讲师,武汉(430081),E-mail:wangqiang2018@wust.edu.cn
引用格式:吴鑫林,胡强,曾良才,等.铜合金电化学腐蚀的研究进展[J].特种铸造及有色合金,2023,43(5):607-613.
WU X L, HU Q, ZENG L C, et al. Research progress in electrochemical corrosion of copper alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):607-613.

1 环境因素对铜合金腐蚀性能的影响

1.1 温度影响

一般情况下,随着温度升高,金属的腐蚀速度会加快。但温度对铜合金腐蚀性能的影响较为复杂,一方面温度升高可以提高离子的活性,使合金电化学腐蚀过程不断加快,另一方面,温度的升高也会使一些腐蚀性的阴离子(Cl^- 等)更容易穿过腐蚀产物保护膜,从而进一步与基体发生电化学反应,降低合金的耐腐蚀性能。迟长云等^[16]研究发现,温度升高会使 B30 铜镍合金的腐蚀速率增大。图 1 为 B30 铜镍合金在不同温度海水中的动电位极化曲线与 Nyquist 图。可以看出,海水的温度从 1℃ 升高到 50℃ 时,阴极极化电流密度增大了一个数量级,但当温度升高到 80℃ 时,电流密度又有所减小,这说明海水中的溶解氧含量会随着温度的变化而变化。温度升高会加快溶解氧在海水中的扩散速率,金属的腐蚀速率加快,但当温度超过某一临界值时,溶解氧的含量就会下降,影响阴极反应的速度。结合图 1a 可以看出,虽然海水温度的升高可以加快铜镍合金的腐蚀速率,使合金表面不断生成腐蚀产物膜,但合金的阻抗不断减小,说明生成的钝化膜并不能保护合金,且随着海水温度升高,B30 铜镍合金的耐海水腐蚀的性能不断下降。

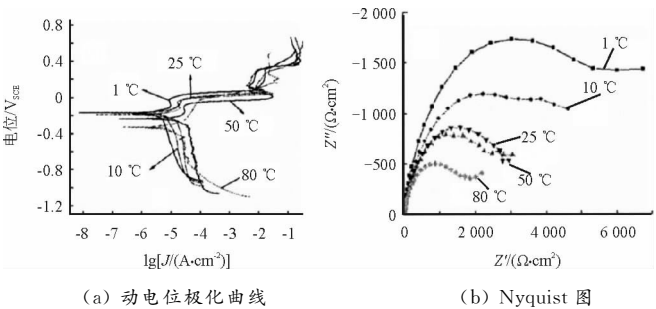


图 1 B30 铜镍合金在不同温度海水中的动电位极化曲线和 Nyquist 图^[16]

Fig.1 Potentiodynamic polarization curves and Nyquist plot of B30 copper-nickel alloy in seawater at different temperatures^[16]

1.2 pH 的影响

HUANG R J 等^[17]研究了 Cu-Se 和 Cu-Se-Te 合金在不同 pH 值下质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的腐蚀性能,其电化学结果见表 1。可以看出,3 种合金在 pH=7 时腐蚀速率最大,且在 pH=2 时更容易发生腐蚀。通过 SEM、EDS 以及 XRD 等材料表征法,发现当溶液的 pH=2 时,合金表面很难形成致密的保护膜,这是因为生成的腐蚀产物易溶解在酸性环境中,使阳极反应不断进行,即更易发生腐蚀;当 pH=7 时,合金表面会形成 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ 和 Cu_2O 薄膜;当 pH=12 时,合

表 1 Cu-Se 和 Cu-Se-Te 合金在不同 pH 值下的电化学数据^[17]

Tab.1 Electrochemical data of Cu-Se and Cu-Se-Te alloys at different pH values^[17]

试样	pH=2		pH=7		pH=12	
	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$)
Cu-0.5Se	-0.642	5.75	-0.248	9.71	-0.093 6	4.61
Cu-0.15Se-0.15Te	-0.651	7.01	-0.251	13.4	-0.083 4	5.53
Cu-0.25Se-0.25Te	-0.660	10.3	-0.258	21.1	-0.099 7	5.72

金表面会形成致密的 Cu_2O 薄膜,阻碍阳极反应进行,使合金得到保护,这是因为溶液呈强碱性,阴极氧的去极化反应难以进行,使电化学腐蚀速度相比中性溶液显著降低。

2 热处理对铜合金腐蚀性能的影响

合金的性能和微观组织密切相关,故通过热处理改变合金的微观组织,可以改变合金的性能^[18-19]。李思远^[20]研究了固溶处理与时效处理对 Cu-Ti 合金在 S^{2-} 污染海水中腐蚀性能的影响,见图 2。可以看出,组织中有粗大的枝晶,晶粒内部的化学成分与组织不均匀。经过固溶处理后,组织形态变为单一的过饱和 Cu 固溶体相,晶界清晰,晶粒中未出现第二相;经时效处理后的组织由岛状的 Cu 基体相和层片状的 $\beta\text{-Cu}_4\text{Ti}$ 析出相构成。通过合金在含 S^{2-} 的 NaCl 溶液中的腐蚀过程,发现经固溶处理后的合金发生了点蚀,并且随着溶液中 S^{2-} 浓度增加,逐渐转变为均匀腐蚀;而由于经时效处理后合金的组织中存在第二相,两种不同的相形成了微电偶腐蚀电池,作为腐蚀电池阳极的 Cu 基体相就被不断地腐蚀。所以 Cu-4Ti 合金经时效处理后耐蚀性能变差。

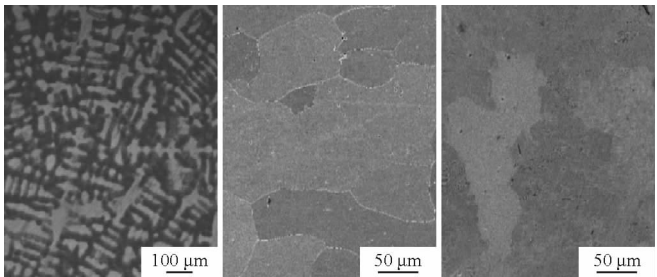


图 2 铸态、固溶处理与时效处理后 Cu-4Ti 合金的金相显微组织^[20]

Fig.2 Metallographic microstructure of as-cast, solution-annealed and aged Cu-4Ti alloy^[20]

杨冉等^[21]研究了固溶和时效处理对 Cu-6.9Ni-2.97Al-0.99Fe-1.06Mn 合金组织和腐蚀性能的影响,结

果见图 3。可以看出,铸态合金的组织中有粗大的树枝晶,且存在明显的偏析现象。经过固溶处理后的组织为过饱和的 α -Cu 基体,均有第二相 Ni_3Al 粒子析出,且随着保温时间延长,粒子的尺寸也增大。经固溶处理后试

样的腐蚀速率最低,耐蚀性最好;经时效处理后的试样,随着保温时间延长,腐蚀速率增大,且时效 24 h 后,试样的腐蚀速率比铸态的高。综上所述,固溶处理可提高铜合金的耐蚀性,保温时间在一定范围内的时效处理也

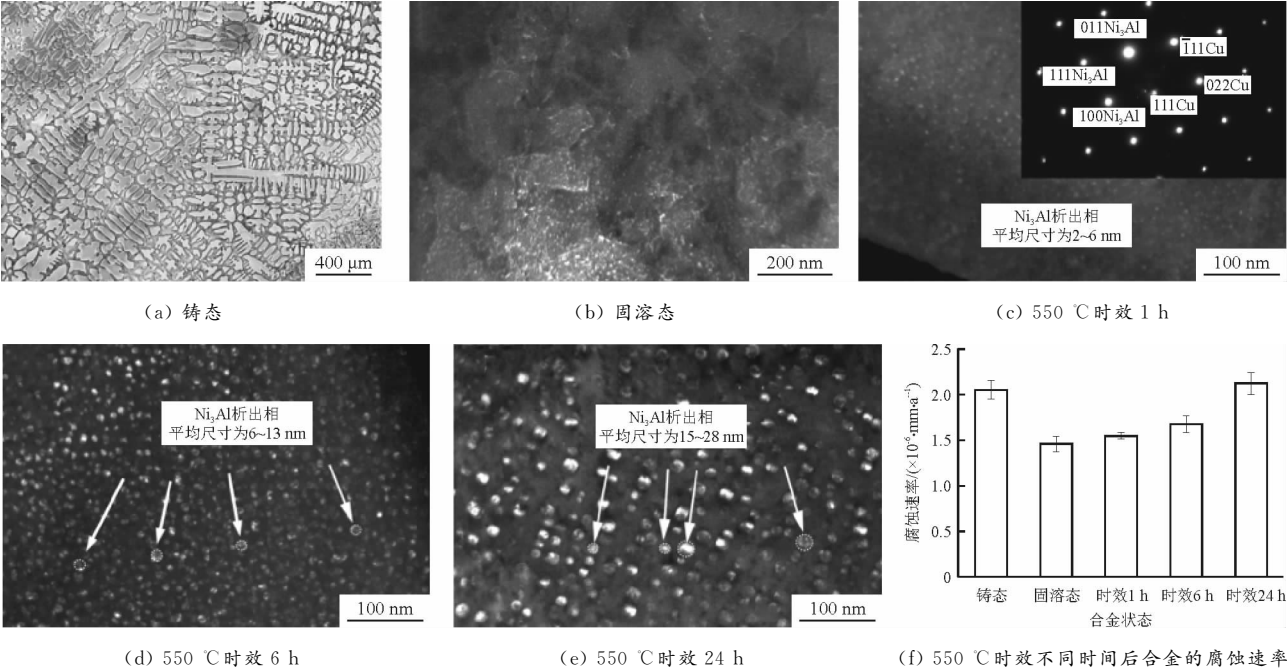


图 3 固溶和时效处理对 Cu-6.9Ni-2.97Al-0.99Fe-1.06Mn 合金组织和腐蚀性能的影响^[21]

Fig.3 Effects of solid solution and aging on microstructure and corrosion properties of Cu-6.9Ni-2.97Al-0.99Fe-1.06Mn alloy^[21]

能使合金的耐蚀性提高,但没有经固溶处理的效果好。
VRSALOVIC L 等^[22]研究了热处理对 CuAlNi 形状记忆合金腐蚀性能的影响,结果见图 4,其中, K_1 、 K_2 、 K_3 分别为 850、885、920 °C 退火 60 min 后水淬。可见铸态合金的容抗弧半径最小,阻抗值最小,耐蚀性

最差;而经过热处理后合金的耐蚀性都有所提高。经过热处理和铸态合金的极化曲线相似,自腐蚀电位相差不大。表 2 为铸态和淬火态 CuAlNi 合金在 0.9% 的 NaCl 溶液中的腐蚀参数。可以发现,经过热处理后,合金在 0.9% 的 NaCl 溶液中的自腐蚀电流密度均有所减小,

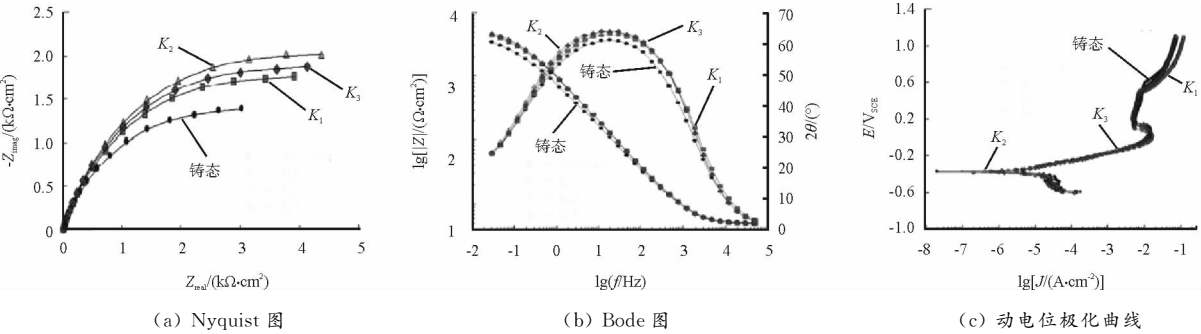


图 4 CuAlNi 合金在 0.9% NaCl 溶液中的 Nyquist 图、Bode 图和动电位极化曲线^[22]

Fig.4 Nyquist diagram, Bode diagram and potentiodynamic polarization curves of CuAlNi alloy in 0.9% NaCl solution^[22]

表 2 铸态和淬火态 CuAlNi 合金在 0.9% NaCl 溶液中的腐蚀参数^[22]

CuAlNi alloys in 0.9% NaCl solution ^[22]				
试样	自腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	自腐蚀 电位/V	极化电阻/ ($\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$)	腐蚀速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)
铸态	2.84	-0.372	4.805	0.031 3
K_1	2.32	-0.377	5.934	0.025 6
K_2	2.18	-0.375	5.985	0.024 2
K_3	1.75	-0.378	5.850	0.019 3

极化电阻增大,腐蚀速度降低,这表明经过热处理后 CuAlNi 合金的耐蚀性提高。

3 合金元素对铜合金腐蚀性能的影响

不同元素加入到铜合金中,会对铜合金的性能有不同的影响^[23-24]。Fe、Mn 是铜合金中重要的微合金化元素。冷翔^[25]研究了不同 Fe、Mn 含量对 B10 白铜合金

耐蚀性能的影响,见图 5。可见添加 Fe 元素有利于降低白铜合金的维钝电流密度,提高了合金的钝化性能,当添加的 Fe 质量分数为 0~1.5% 时,维钝电流密度逐

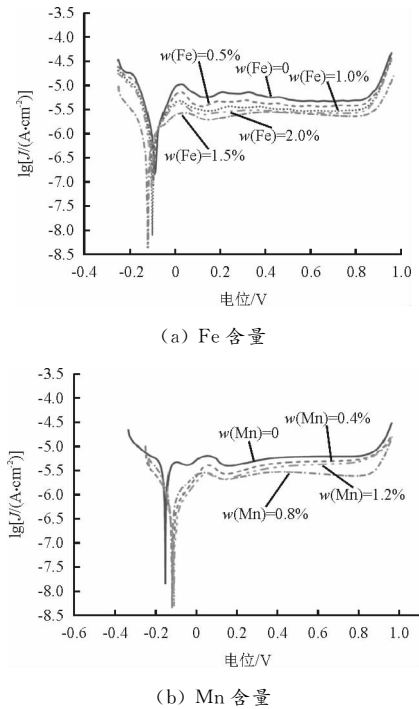


图 5 不同 Fe 含量和 Mn 含量白铜合金在硼酸钠缓冲溶液 (pH=9.0) 中的极化曲线^[25]

Fig.5 Polarization curves of cupronickel with different Fe and Mn contents in sodium borate buffer solution(pH=9.0)^[25]

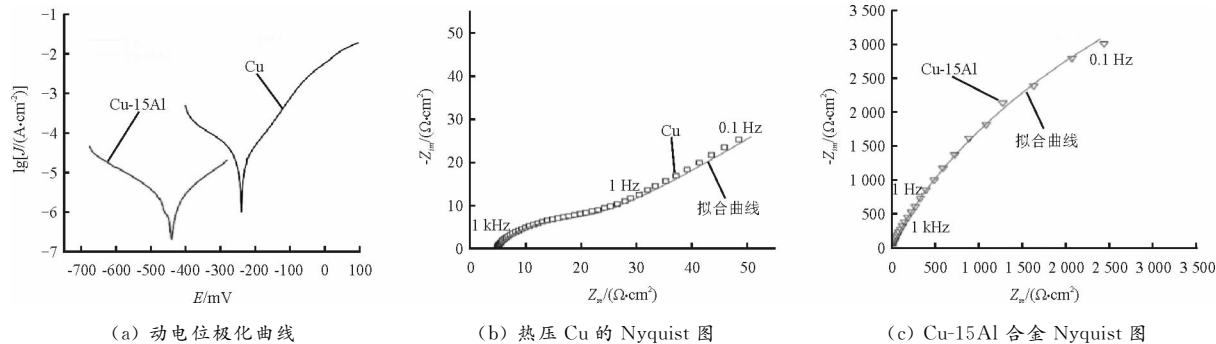


图 6 热压 Cu 和 Cu-15Al 合金在 30 °C 下浸入停滞的 3.5% NaCl 溶液 60min 后的在电化学行为^[26]

Fig.6 Electronic behavior of hot-pressed Cu and Cu-15Al alloys after immersion in stagnant 3.5% NaCl solution for 60 min at 30 °C^[26]

表 3 Cu 和 Cu-15Al 合金在 3.5% 的 NaCl 中 60 min 后的极化参数和腐蚀速率^[26]

Tab.3 Polarization parameters and corrosion rates of Cu and Cu-15Al alloys in 3.5% NaCl solution for 60 min ^[26]			
试样	自腐蚀电流密度/ ($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	自腐蚀电位/ (mV)	腐蚀速率/ ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)
Cu	33.59	-237.75	20.70
Cu-15Al	2.90	-440.22	1.65

时效态铜合金的电化学数据。可以发现,纯铜的自腐蚀电流密度明显要比加入合金元素的铜合金大,即铜合金的腐蚀速率要比纯铜的低,说明 Cr、Al、Sn 和 Ni 加入

渐减小;但当 Fe 质量分数为 2% 时,维钝电流密度略微增大,钝化性能降低。说明添加适量的 Fe 能提高 B10 白铜合金的耐蚀性能。添加适量的 Mn 也能提高 B10 白铜合金的耐蚀性能。当 Mn 含量为 0.8% 时,试样的耐蚀性能最好。

SHAIK M A 等^[26]研究了 Cu-Al 合金在海洋环境中的电化学行为,见图 6,电化学参数见表 3。Cu-15Al 合金比纯铜的自腐蚀电位明显要负,Cu-15Al 合金 ($1.65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$) 的腐蚀速度显著降低,其是由于在 Cu 合金表面形成了致密的 Al_2O_3 保护膜。Cu-15Al 合金的较高阻抗证实了这一保护膜的形,说明向铜合金中加入适量的 Al 可以提高 Cu 的耐腐蚀性能。

WEI H 等^[27]研究了不同 Ti 含量的 Cu-Ti 合金在 (质量分数为 3.5% 的 NaCl) 溶液中的腐蚀行为。图 7 为 Cu、Cu-2Ti 和 Cu-4Ti 合金在浸泡 96、192 h 后的质量损失图。可以看出,随着 Ti 含量增加,合金的质量损失明显增加,说明 Ti 含量的增加降低了 Cu-Ti 合金的耐蚀性,这是由于在 3.5% 的 NaCl 溶液中,Ti 和 Cu 的自腐蚀电位相差较大,易形成电偶腐蚀,Cu₂O 膜很难形成。

杨倩倩等^[28]研究了 Cr、Al、Sn 和 Ni 对铜合金性能的影响,表 4 是各试样的编号及成分,图 8 为合金的极化曲线和 Nyquist 图。从图 8a 可以看到,添加合金元素后的自腐蚀电位相比于纯铜,都发生了正移。表 5 为

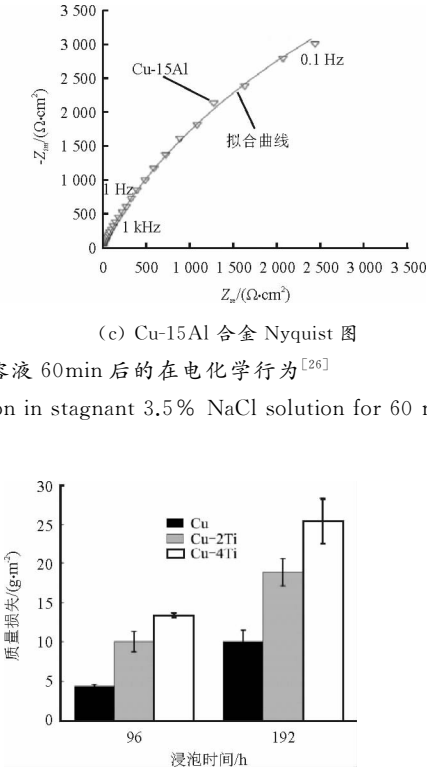


图 7 Cu、Cu-2Ti 和 Cu-4Ti 合金在浸泡 96、192 h 后的质量损失^[27]

Fig.7 Mass loss of Cu, Cu-2Ti and Cu-4Ti alloys after soaking for 4 and 8 days^[27]

表 4 铜合金加入方案^[28]

Tab.4 Addition scheme for copper alloy^[28]

编号	合金	$w_B/\%$				
		Cr	Al	Sn	Ni	Cu 及少量残余元素
1	Cu	—	—	—	—	余量
2	Cu-0.3Cr	0.3	—	—	—	余量
3	Cu-0.3Cr-0.3Al	0.3	0.3	—	—	余量
4	Cu-0.3Cr-0.3Sn	0.3	—	0.3	—	余量
5	Cu-0.3Cr-0.3Ni	0.3	—	—	0.3	余量

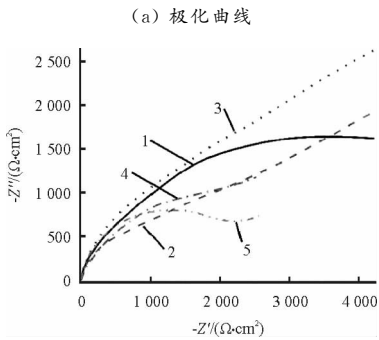
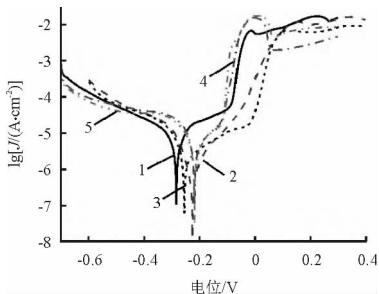


图 8 铜合金在 0.6 mol/L 的 NaCl 溶液中的极化曲线 Nyquist 图^[28]

Fig.8 Polarization curves and Nyquist plot of copper alloy in 0.6mol/L NaCl solution^[28]

表 5 时效态铜合金自腐蚀电位及自腐蚀电流密度^[28]

Tab.5 Self-corrosion potential and self-corrosion current density of aged copper alloys^[28]

试样	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度/ $(\mu A \cdot cm^{-2})$
Cu	-0.283	0.127 3
Cu-0.3Cr	-0.225	0.009 2
Cu-0.3Cr-0.3Al	-0.255	0.049 4
Cu-0.3Cr-0.3Sn	-0.218	0.037 8
Cu-0.3Cr-0.3Ni	-0.217	0.023 9

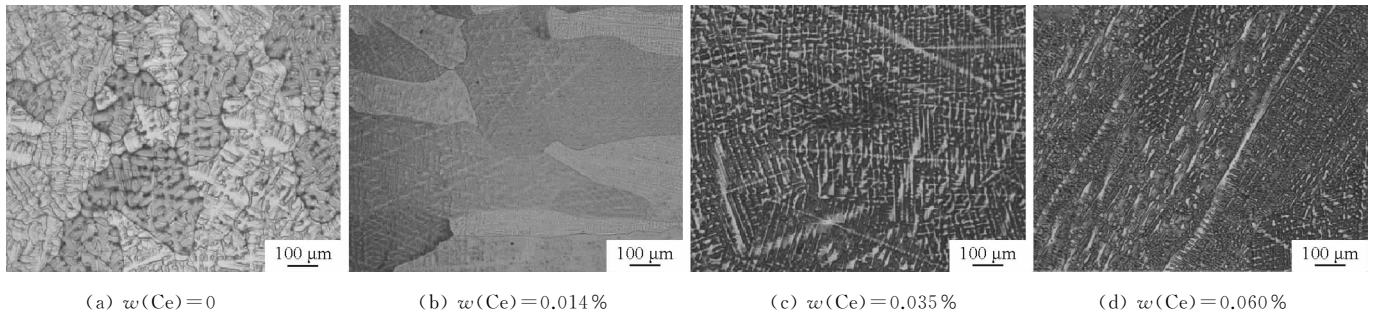


图 10 不同 Ce 含量的铸态 CuNi10Fe1.5Mn 合金的金相组织^[31]

Fig.10 Metallographic structure of as-cast CuNi10Fe1.5Mn alloy with different Ce contents^[31]

到 Cu 基体形成合金后,耐蚀性得到了增强。Cu-0.3Cr-0.3Al 合金的容抗弧半径最大,而容抗弧半径的大小与耐腐蚀性有关,这说明 Cu-0.3Cr-0.3Al 合金的耐腐蚀性最好,且 Al 元素对合金耐蚀性的提高效果显著。

谭文龙^[29]研究了 Co 元素对 Cu-Ni-Si 合金耐腐蚀性能的影响,Co 添加量分别为 0、0.1%、0.3% 和 0.5% (分别标记为 C₁~C₄ 试样)。图 9 为不同 Co 含量时效处理 60 min 后的极化曲线,通过 Tafel 外推法得到了试样的电化学参数,见表 6。可以看出,Co 的添加对试样的自腐蚀电位的影响较小,但随着其含量增加,试样的自腐蚀电流密度逐渐减小,极化电阻逐渐增大,说明添加 Co 可以增强 Cu-Ni-Si 合金的耐蚀性,且含量在 0~0.5% 范围内时,Co 添加量越高,合金的耐腐蚀性能会越好。

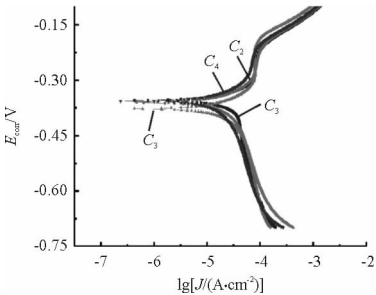


图 9 时效 60 min 后不同 Cu-Ni-Si 试样的极化曲线^[29]

Fig.9 Polarization curves of different Cu-Ni-Si specimens after aging for 60 min^[29]

表 6 时效 60 min 后试样的电化学参数^[29]

Tab.6 Electrochemical parameters of specimens after aging for 60 min^[29]

试样	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度/ $(\mu A \cdot cm^{-2})$	极化电阻/ $(k\Omega \cdot cm^2)$
C ₁	-0.36	0.987	0.961 9
C ₂	-0.36	0.485	1.007 0
C ₃	-0.38	0.449	1.107 0
C ₄	-0.36	0.289	1.331 2

在铜合金中,稀土一般能够通过净化合金基体、改善合金组织、提高合金腐蚀产物膜的致密性,来改善铜合金的耐蚀性能^[30]。孙军伟^[31]研究了稀土元素 Ce 对 CuNi10Fe1.5Mn 合金组织和性能的影响,图 10 为不同

Ce 含量的铸态 CuNi10Fe1.5Mn 合金的金相组织。可见,Ce 含量为 0.014% 时,合金中粗大的等轴晶被细化,

添加的 Ce 过量时,细化效果减弱,但仍较不添加 Ce 时的小。图 11 为不同 Ce 含量合金经过冷变形处理后的

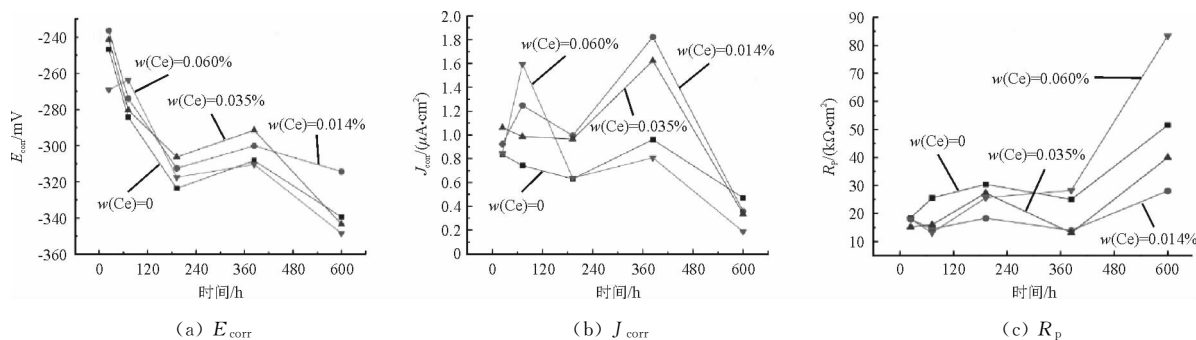


图 11 冷变形态 CuNi10Fe1.5Mn-xCe 合金极化曲线拟合参数 E_{corr} 、 J_{corr} 、 R_p 随时间的变化曲线^[31]

Fig.11 Variation curves of polarization fitting parameters E_{corr} , J_{corr} and R_p of cold-deformed CuNi10Fe1.5Mn-xCe alloy with time^[31]

极化曲线拟合参数 E_{corr} 、 J_{corr} 和 R_p 随时间的变化曲线。可以看出,添加稀土 Ce 后合金的自腐蚀电位有所提高,当添加 0.060% 的 Ce 时,合金的腐蚀电流密度最小,极化电阻最大,说明适量的稀土 Ce 可以增强 Cu-Ni10Fe1.5Mn 合金的耐腐蚀性。

4 结 语

铜合金在各种环境中服役,失效的形式非常多,其中电化学腐蚀是导致铜合金失效的重要因素之一。进一步探索铜合金在各种服役环境中的腐蚀机理,对于铜合金的应用、设备的维护具有重要意义。因此,在今后的铜合金应用中要合理选材,结合服役环境充分考虑合金的耐腐蚀性能,防止电偶腐蚀、应力腐蚀、缝隙腐蚀等危害性强的局部腐蚀。服役条件下铜合金往往不是受到单一的电化学腐蚀作用,而是多种因素共同作用的结果。因此,在一定条件下设计的铜合金无法满足其他环境中的应用,还需要通过大量研究来探索铜合金在各应用场合中的腐蚀行为。

参 考 文 献

- [1] TONG Y, SONG Q N, LI H L, et al. A comparative assessment on cavitation erosion behavior of typical copper alloys used for ship propeller[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2021, 41(5): 639-645.
- [2] TEJA K, RAHUL K. Fabrication of Cu-Sn-Ni/SiC FGM for automotive applications: Investigation of its mechanical and tribological properties[J]. Silicon, 2018, 10(4): 1 705-1 716.
- [3] HELM J, SCHULZ A, OLOWINSKY A, et al. Laser welding of laser-structured copper connectors for battery applications and power electronics[J]. Welding in the World, 2020, 64(4): 611-622.
- [4] CHANG T, HERTING G, GOIDANICH S, et al. The role of Sn on the long-term atmospheric corrosion of binary Cu-Sn bronze alloys in architecture[J]. Corrosion Science, 2019, 149: 54-67.
- [5] SUSILOWATI S E, FUDHOLI A, SUMARDIYANTO D. Mechanical and microstructural characteristics of Cu-Sn-Zn/Gr metal matrix composites processed by powder metallurgy for bearing ma-

- terials[J]. Results in Engineering, 2022, 14: 100 377.
- [6] GAN C L, ZHOU N, KANG Y H, et al. Failure analysis of lead-free brass valve bodies[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 100: 536-543.
- [7] ABEDINI M, GHASEMI H M. Electrochemical noise and polarization analyses on corrosion of Al-Brass alloy during erosion-corrosion[J]. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 2021, 7(2): 1-13.
- [8] YANG F F, KANG H J, GUO E Y, et al. The role of nickel in mechanical performance and corrosion behaviour of nickel-aluminium bronze in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2018, 139: 333-345.
- [9] JIN T Z, ZHANG W F, LI N, et al. Surface characterization and corrosion behavior of 90/10 copper-nickel alloy in marine environment[J]. Materials, 2019, 12(11): 1 869-1 875.
- [10] WU T Q, ZHOU Z F, XU S, et al. A corrosion failure analysis of copper wires used in outdoor terminal boxes in substation[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 98: 83-94.
- [11] FAES W, LECOMPTE S, AHMED Z Y, et al. Corrosion and corrosion prevention in heat exchangers[J]. Corrosion Reviews, 2019, 37(2): 131-155.
- [12] LI K, ZHAI X F, GUAN F, et al. Progress on materials and protection technologies for marine propeller[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and protection, 2018, 37(6): 495-503.
- [13] YANG R R, WANG Z R, JIANG J C, et al. Cause analysis and prevention measures of fire and explosion caused by sulfur corrosion[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 104 342.
- [14] AL-MAZEEDI H A, AL-WAKAA B, RAVINDRANATH K. Window-type rupture of carbon steel pipe in a hydroprocessing plant of a petroleum refinery due to ammonium bisulfide corrosion [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 120: 105 089.
- [15] 王凯. Al_{0.1}CoCrFeNi 高熵合金的电化学腐蚀行为[D].太原:太原理工大学, 2020.
- [16] 迟长云, 李宁, 薛建军, 等. 温度对 B30 铜镍合金在海水中电化学行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(11): 772-774,777.
- [17] HUANG R J, ZHU D C. Effect of pH on corrosion performance of Cu-Se and Cu-Se-Te Alloys in 3.5% sodium chloride solution[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(3): 1 402-1 409.
- [18] 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.

回收 316L 金属粉末电磁感应熔化过程数值模拟

赵 烁 朱仕彬 牛 乐 郝芳满 王冰杉
(河北工程大学材料科学与工程学院)

摘 要 以回收 316L 不锈钢粉末为例,基于 COMSOL Multiphysics 软件模拟了通电线圈感应加热并熔化 316L 粉末;通过改变金属粉末的空隙率、加热氛围、粒度和功率等参数,探究增材制造回收金属粉末形态以及加热方式对粉末熔化速率和熔化过程的影响。由模拟结果可得出较为适宜的加热条件,即使用加热频率高、线圈数量多、线圈与坩埚距离最近的真空感应炉,当 316L 粉末制备直径为 0.005 m 的致密球体时,电磁感应加热效率更高且成本最低。

关键词 金属粉末;316L 不锈钢粉末;COMSOL Multiphysics;感应加热;粉末熔化

中图分类号 TG142;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Numerical Simulation of Electromagnetic Induction Melting Process of Recycled 316L Metal Powders

Zhao Shuo, Zhu Shibin, Niu Le, Hao Fangman, Wang Bingshan
(College of Materials Science and Technology, Hebei University of Engineering)

Abstract: Taking recycling 316L stainless steel powder as an example, COMSOL Multiphysics finite element software was adopted to simulate the induction heating and melting of 316L powder by energized coils. By changing the porosity, heating atmosphere, particle size and power of the metal powder, effects of morphology of metal powder recycled by additive manufacturing and the heating method on the powder melting rate and melting process were explored. The simulation results reveal that the relatively suitable heating conditions can be obtained. When 316L powder is prepared into a dense sphere with a diameter of 0.005 m, the electromagnetic induction heating efficiency is higher and the cost is the lowest by using a vacuum induction furnace with high heating frequency, large number of coils and the closest distance between the coil and the crucible.

Key Words: Metal Powder, 316L Stainless Steel Powder, COMSOL Multiphysics, Induction Heating, Powder Melting

收稿日期:2022-07-21;**修改稿收到日期:**2022-09-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904086);河北省引进留学人员资助项目(C20200310);河北省引进国外智力项目;邯郸市科技计划资助项目(19422111008-33);中央引导地方科技发展资金项目(226Z1015G)

第一作者简介:赵烁,男,1984 年出生,副教授,河北邯郸(056000),E-mail: zsz7303@vip.163.com

引用格式:赵烁,朱仕彬,牛乐,等.回收 316L 金属粉末电磁感应熔化过程数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2023,43(5):613-618.

ZHAO S, ZHU S B, NIU L, et al. Numerical simulation of electromagnetic induction melting process of recycled 316L metal powders[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):613-618.

[19] 敬云兵,彭冬冬,甘春雷,等.退火温度对 Al₂O₃/Cu 弥散强化铜合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 524-1 528.

[20] 李思远.不同热处理状态下 Cu-Ti 合金在 S²⁻ 污染海水中的腐蚀行为研究[D].太原:太原理工大学,2021.

[21] 杨冉,文九巴,周延军,等.热处理对 Cu-6.9Ni-2.97Al-0.99Fe-1.06Mn 合金组织和腐蚀性能的影响[J].材料热处理学报,2019,40(12):74-78.

[22] VRSALOVIC L, IVANIC I, KOZUH S, et al. Effect of heat treatment on corrosion properties of CuAlNi shape memory alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6): 1 149-1 156.

[23] 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.

[24] 韩俊青,武玉英,胡家琨,等. B 在铜合金中的应用[J].特种铸造及有色合金,2021,41(6):718-721.

[25] 冷翔.合金元素(Fe、Mn、La)对 B10 白铜合金耐蚀性能的影响[D].江西赣州:江西理工大学,2020.

[26] SHAIK M A, SYED K H, GOLLA B R. Electrochemical behavior of mechanically alloyed hard Cu-Al alloys in marine environment [J]. Corrosion Science, 2019, 153: 249-257.

[27] WEI H, HOU L F, CUI Y C, et al. Effect of Ti content on corrosion behavior of Cu-Ti alloys in 3.5% NaCl solution[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(4): 669-675.

[28] 杨倩倩,徐宇,赵墨林,等.添加微量 Cr、Al、Sn 和 Ni 对铜合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(6):690-693.

[29] 谭文龙.添加 Co 对 Cu-Ni-Si 合金性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(11):1 306-1 308.

[30] 姜佳鑫,温永清.稀土在铜及铜合金中的作用及应用[J].稀土信息,2021(5):12-18.

[31] 孙军伟.稀土元素 Ce 对 CuNi10Fe1.5Mn 合金组织和性能的影响研究[D].江西赣州:江西理工大学,2019.

(编辑:刘晨辉)