

风电用 CuAl10Fe2 铝青铜套筒的显微组织与性能

姚 联^{1,2} 刘生发¹ 王 振¹ 徐星辉² 叶甲旺²

(1.武汉理工大学材料科学与工程学院;2.武汉泛洲中越合金有限公司)

摘 要 采用离心铸造工艺制备风电用 CuAl10Fe2 铝青铜套筒,研究其显微组织、力学性能及耐腐蚀性能。结果表明,离心铸造 CuAl10Fe2 铝青铜套筒的显微组织为 α -Cu 基体、不规则片状 β -Cu₃Al 相以及 K_1 -Fe₃Al 相,无 γ_2 相存在,且离心力场可细化合金的显微组织,其抗拉强度为 612.7 MPa,屈服强度为 318.6 MPa,伸长率为 32.5%,硬度(HBW)为 136.7。电化学测试结果表明,合金在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中的腐蚀电位为 -0.303 V,腐蚀电流密度为 0.66 A/cm²,腐蚀速率为 8.94 μ m/a,表明材料具有良好的耐腐蚀性能。合金在电化学腐蚀过程中形成以 Cu₂O 和 Al₂O₃ 为主的钝化膜,使合金不受腐蚀介质的继续侵蚀。

关键词 CuAl10Fe2; 离心铸造; 显微组织; 力学性能; 腐蚀性能

中图分类号 TG249.4

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Properties of CuAl10Fe2 Aluminum Bronze for Wind Power

Yao Lian^{1,2}, Liu Shengfa¹, Wang Zhen¹, Xu Xinghui², Ye Jiawang²

(1.School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology;

2.Wuhan Fanzhou Chuetsu Metal Co., Ltd.)

Abstract: CuAl10Fe2 aluminum bronze for wind power was prepared by centrifugal casting technology, and its microstructure, mechanical properties and corrosion resistance were investigated. The results indicate that the microstructure of centrifugal cast CuAl10Fe2 aluminum bronze is mainly composed of α -Cu, matrix, irregular sheet β -Cu₃Al phase, and K_1 phase without γ_2 phases, and centrifugal force field can refine the grains and precipitates. The tensile strength, yield strength, elongation, and hardness of the alloy reach 612.7 MPa, 318.6 MPa, 32.5% and 136.7 HBW, respectively. The electrochemical test results reveal that the corrosion potential, corrosion current density and corrosion rate of CuAl10Fe2 in 3.5% NaCl solution are -0.303 V, 0.66 A/cm² and 8.94 μ m/a, respectively, indicating desirable corrosion resistance. During the process of electrochemical corrosion, a passive film dominated by Cu₂O and Al₂O₃ are generated, which protects the matrix from the continuous erosion of corrosive media.

Key Words: CuAl10Fe2, Centrifugal Casting, Microstructure, Mechanical Properties, Corrosion

风力发电作为新能源领域中发展历史较长、技术积累较为充足及商业化前景广阔的朝阳产业,已成为增加能源供应多样化、保障国家能源安全稳定、缓解全球环境污染困局、实现碳达峰与碳中和的重要手段。近年来,铝青铜合金凭借其优良的力学性能、耐腐蚀性能和耐磨损性能及较低成本,在风电领域显示出极大的应用潜力^[1-3]。

二元铝青铜合金力学性能主要取决于 Al 含量,伸长率与强度分别在 Al 含量达到 6% 和 10% 时呈现峰值,因此控制 Al 含量为 9%~11% 可获得较好的综合力学性能。在工业生产中,当 Al 含量超过 8% 时就会

出现 γ_2 相,呈网状于 α 相晶界析出,形成隔离晶体联结的脆性硬壳导致合金发脆,导致力学性能下降。此外, γ_2 相可成为阳极首先被腐蚀,形成许多腐蚀小空洞,降低合金的腐蚀性能。由此可见,凝固过程中形成的脆性 γ_2 相会使铝青铜合金的力学性能及耐腐蚀性能明显下降。提高铸件凝固时的冷却速度并添加适量的 Fe、Mn、Ni 等合金元素,可有效抑制 γ_2 相的形成^[4-6]。本研究以 CuAl10Fe2 铝青铜合金为对象,基于套筒形状及尺寸特点,采用离心铸造工艺,并通过优化化学成分,调控其显微组织中 α 、 β 及 K_1 三相之间的比例,并避免 γ_2 相形成,以实现 CuAl10Fe2 铝青铜套筒强韧性配合以及力学性能与腐蚀性能相协调^[7-9]。

收稿日期:2022-08-19;修改稿收到日期:2022-10-12

第一作者简介:姚联,男,1979 年出生,工程师,武汉(430056),E-mail:yl@fzchuetsu.com

引用格式:姚联,刘生发,王振,等. 风电用 CuAl10Fe2 铝青铜套筒的显微组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):664-669.

YAO L, LIU S F, WANG Z, et al. Microstructure and properties of CuAl10Fe2 aluminum bronze for wind power[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):664-669.

1 试验材料及方法

采用中频无芯感应电炉(KGPS-150KW)进行熔炼,先把坩埚预热至暗红色,加入适量熔剂(20% Na_2AlF_6 + 60% NaF + 20% CaF_2),随后将预热至 200℃左右的铜块(1号标准铜,226 kg)加入炉中待熔化后进行搅拌,升温至1 150~1 180℃,加入20 kg的Al-Fe中间合金,最后分批压入13 kg纯铝锭(纯度为99.6%)并不断搅拌,合金熔体温度控制在1 120~1 220℃并进行除气精炼。熔炼过程中对铜合金熔体进行含气量检测,测试所用石墨型空腔尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,3次检测合格后出炉浇注。CuAl10Fe2铝青铜的名义化学成分(质量分数):83.0%~89.5%的Cu,8.5%~10.5%的Al,1.5%~3.5%的Fe, $\leq 1.5\%$ 的Ni, $\leq 1.0\%$ 的Mn, $\leq 0.5\%$ 的Zn, $\leq 0.2\%$ 的Si, $\leq 0.2\%$ 的Sn, $\leq 0.1\%$ 的Pb。采用卧式悬臂离心机,转速为700 r/min,延迟时间为180 s。铸造过程中外模、内模、铸坯等进行温度实时监控。

金相试样经2000号SiC砂纸打磨抛光后,经2 g重铬酸钾+1.5 g KCl+8 mL H_2SO_4 +10 mL水组成腐蚀液腐蚀;采用NIKON MA100型光学显微镜和Zeiss Ultra Plu型场发射扫描电镜观察显微组织。借助附加了INCA X-Act能谱仪的电子探针显微分析仪(EPMA,JXA-8230)进一步进行EDS点扫描和面扫描分析。采用X射线衍射仪(XRD,Empyrean)进行物相分析,Cu靶 $\text{K}\alpha$ 射线辐射,扫描角度范围为 $0^\circ \sim 100^\circ$,扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$ 。采用STA449F3热分析仪进行差示扫描量热分析。拉伸试样标距尺寸为 $\phi 50\text{ mm} \times 25\text{ mm}$;拉伸应变速率为 $2.5 \times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$ 。采用CMT-5205型电子万能试验机进行拉伸测试,同时采用SEM对拉伸断口进行形貌观察。用HB-3000型布氏硬度计测量试样的宏观硬度,采用310HVS-5数显维氏硬度计测试试样显微硬度。

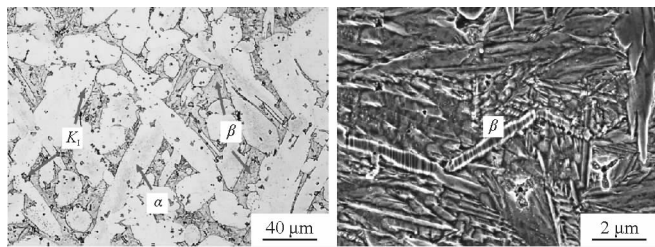
对CuAl10Fe2铝青铜进行极化曲线测试,采用质量分数为3.5%的NaCl溶液,电化学工作站为CHI660E型,三电极体系,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为石墨,工作电极连接试样。电位扫描范围为-0.5~1.2 V,扫描速度为1.0 mV/s。电化学交流阻抗的测试,交流信号幅值为10 mV,频率范围为0.01 Hz~100 kHz。使用SEM观察极化试验后试样的腐蚀表面形貌,结合极化曲线与阻抗谱数据及腐蚀形貌特征,综合表征试样的耐腐蚀性能。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织

图1为CuAl10Fe2铝青铜的显微组织形貌。可以

看出,其组织由 α -Cu基体,不规则片状 β - Cu_3Al 相以及 K_1 - Fe_3Al 相组成,其中 K_1 相呈不规则粒状分布在 α -Cu以及 β 相中,无 γ_2 相存在。离心铸造形成的离心力场以及由Al、Fe元素的晶粒细化共同作用导致合金组织较细小。借助IPP(Image-Pro Plus)图像分析软件确定 α -Cu基体相、 β 相及 K_1 相占比分别约为53%、40%和7%。为了避免铝青铜套筒显微组织中出现脆性相,对CuAl10Fe3化学成分进行了优化:实际化学成分控制为86Cu-9.3Al-2.7Fe-0.45Mn-0.68Ni(CuAl10Fe2C),适当降低Fe含量、加入少量Mn与Ni,利用Fe、Mn和Ni的复合合金化作用并结合离心铸造工艺可抑制 γ_2 脆性相形成,以实现强韧性配合。



(a) OM显微组织 (b) β 相的SEM形貌

图1 CuAl10Fe2铝青铜的显微组织形貌

Fig.1 Microstructure of CuAl10Fe2 aluminum bronze

图2为CuAl10Fe2铝青铜的SEM形貌及能谱分析结果。从图2a可以看出,合金由 α -Cu基体,片状 β 相以及 K_1 相组成。从图2b~图2h可以看出,片状 β 相析出位置,存在一定程度的Al元素偏聚。 K_1 相析出位置,存在明显的Fe元素偏聚以及部分Si元素偏聚。

图3为CuAl10Fe2铝青铜的对应图2a中A、B、C点处的点扫描能谱分析结果。可以看出, K_1 相主要由Fe、Cu、Al、Mn和Si组成,其中Fe含量最高,这与图2d中 K_1 相析出位置存在明显的Fe偏聚相符合。且 K_1 相析出位置Si摩尔分数为7.20%,这与图2h中存在一定程度的Si偏聚相符合。从图3b可以看出,片状 β 相主要为Cu,同时Al含量也较高,这与图2c中Al在 β 相析出位置偏聚的结果相一致。图3c为 α -Cu基体的点扫描能谱结果,可以看出, α -Cu基体中主要元素为Cu、Al和Fe,且质量比为89.57:8.64:1.79,与CuAl10Fe2化学成分基本一致。

图4为CuAl10Fe2铝青铜的XRD图谱。可以看出,CuAl10Fe2合金主要由3种物相组成,其中4个强度较高的主峰为 α -Cu基体的特征峰,特征峰的角度分别为 42.6° 、 49.6° 、 72.9° 和 82.2° 。同时也存在 β 相以及 K_1 相的特征峰。XRD结果与上述各析出相的SEM点扫描以及面扫描能谱结果相对应。

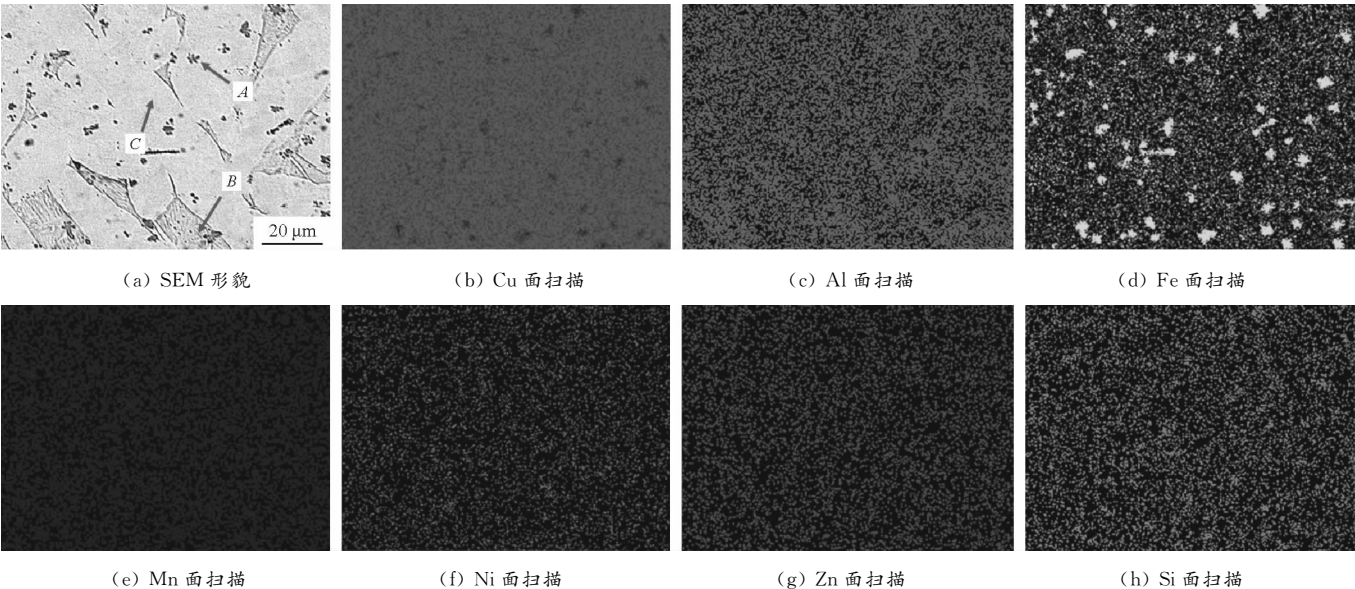


图 2 CuAl10Fe2 铝青铜的 SEM 显微组织形貌及能谱分析结果
Fig.2 SEM images and EDS results of CuAl10Fe2 aluminum bronze

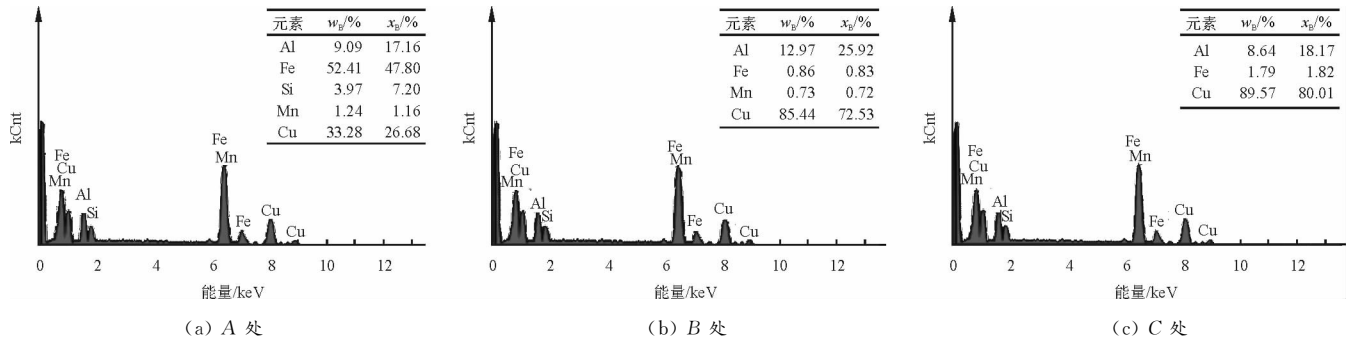


图 3 图 2a 中 CuAl10Fe2 铝青铜的点扫描能谱分析结果
Fig.3 Point scanning energy spectrum results of CuAl10Fe2 aluminum bronze

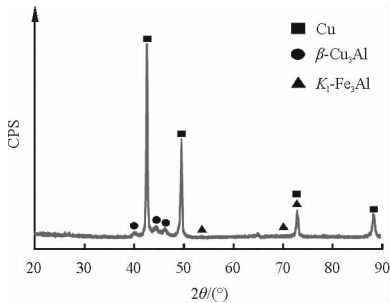


图 4 CuAl10Fe2 铝青铜的 XRD 图
Fig.4 XRD patterns of CuAl10Fe2 aluminum bronze

图 5 为 CuAl10Fe2 铝青铜的 DSC 冷却曲线。结合相图和显微组织分析结果,CuAl10Fe2 铝青铜的凝固过程可以描述为: $L \rightarrow \beta \rightarrow \alpha + \beta \rightarrow \alpha + \beta + K_1$,在高温熔融状态下为液相 L ,当温度下降到约 1 043 $^{\circ}\text{C}$,液相逐渐转变为 β 相(见图 5a)。当温度下降到约 879 $^{\circ}\text{C}$ 时, α 开始从 β 相中析出(见图 5b)。当温度下降到约 593 $^{\circ}\text{C}$ 时, K_1 相从 α 相和 β 相中析出(见图 5c)。由于离心铸造过程中冷却速度较快, β 相未全部转变为 α 相和 K_1 相。

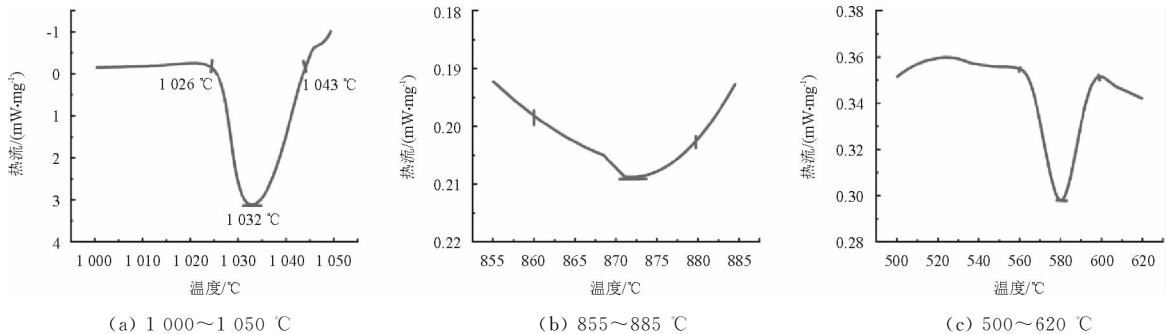


图 5 CuAl10Fe2 铝青铜的 DSC 曲线
Fig.5 DSC curves of CuAl10Fe2 aluminum bronze

2.2 力学性能

2.2.1 拉伸性能

图 6 为 CuAl10Fe2 铝青铜的应力-应变曲线。可以看出,其抗拉强度为 612.7 MPa,屈服强度为 318.6 MPa,伸长率为 32.5%。图 7 为 CuAl10Fe2 铝青铜的断口形貌。可以看出,试样断口存在大量的韧窝形貌,大韧窝与小韧窝交错分布,呈现较为典型的韧性断裂形貌,这与其较高的伸长率相一致,也与 CuAl10Fe2 铝青铜的显微组织较细密且存在大量的软相 α 基体相关。断口形貌图中有部分不属于韧窝的坑洞存在,其形貌和尺寸与基体组织中金属间化合物 K_1 相符,即拉伸断裂过程中 K_1 相的脱落导致部分坑洞状断口形貌产生。

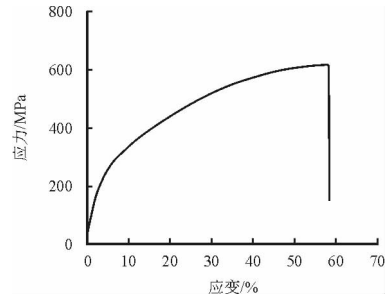


图 6 CuAl10Fe2 铝青铜的应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curve of CuAl10Fe2 aluminum bronze

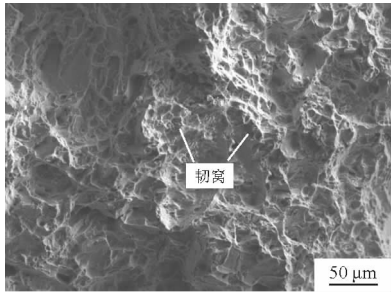


图 7 CuAl10Fe2 铝青铜的断口形貌
Fig.7 Fracture morphology of CuAl10Fe2 aluminum bronze

2.2.2 硬度

分别测得 α 基体、 β 相和 K_1 相 3 个区域的硬度 (HV) 平均值分别为 225、246 和 229,可以看出, β 相区域的硬度最高,含有部分 α 相的 K_1 相区域硬度稍高于纯 α 基体区域。测定试样的硬度 (HBW) 平均值为 136.7。由此可见, β 相和 K_1 相的占比将决定合金的硬度值。

离心铸造 CuAl10Fe2 铝青铜铜套具有良好的综合力学性能,其原因归结为:①合金元素 Al、Fe 的固溶强化;② K_1 相作为异质核心引起的细晶强化;③离心力场使得铸件凝固后的显微组织较致密。

2.3 腐蚀性能

2.3.1 极化曲线

图 8 为 CuAl10Fe2 铝青铜在质量分数为 3.5% 的

NaCl 溶液中的极化曲线。可以看出,阳极存在溶解区和钝化区,在溶解区域腐蚀电流密度逐渐增大,而在钝化区间腐蚀电流密度逐渐减小,钝化区间越宽,耐腐蚀性越好。基于极化曲线可给出 CuAl10Fe2 铝青铜电化学腐蚀的腐蚀电位和电流密度。依据法拉第定律,将腐蚀电流密度换算为腐蚀速率,见表 1。

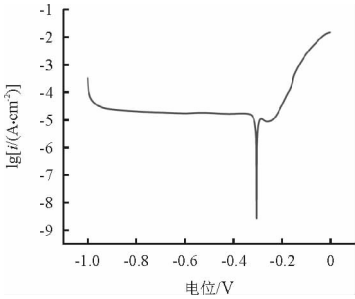
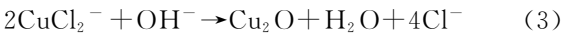
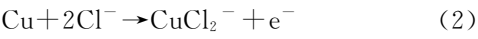
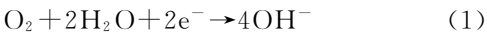


图 8 CuAl10Fe2 铝青铜的极化曲线
Fig.8 Polarization curve of CuAl10Fe2 aluminum bronze

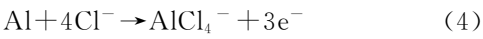
表 1 CuAl10Fe2 铝青铜在 3.5% 的 NaCl 溶液中极化曲线参数
Tab.1 Polarization curve parameters of CuAl10Fe2 aluminum bronze in 3.5 %NaCl solution

腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(A · cm ⁻²)	腐蚀速率/(μm · a ⁻¹)
-0.303	0.66	8.94

CuAl10Fe2 铝青铜在进行电化学腐蚀过程中,阳极发生金属溶解过程,而阴极发生氧气还原反应:



电化学腐蚀过程中 CuAl10Fe2 铝青铜试样表面形成 Cu_2O 氧化膜,一定程度上可阻止腐蚀进行。Al 在溶液中主要通过与氯离子的络合,然后水解生成氢氧化铝层:



CuAl10Fe2 铝青铜电化学腐蚀机制为:在电化学腐蚀过程中材料表面形成含 Cu 和 Al 的保护膜,其主要组成为 Cu_2O 和 Al_2O_3 ,该保护膜共同阻挡腐蚀产物的离子迁移,抑制氯离子对材料进一步侵蚀,使得 CuAl10Fe2 铝青铜具有良好的耐腐蚀性能^[10-12]。

2.3.2 阻抗谱

图 9 为 CuAl10Fe2 铝青铜电化学腐蚀的等效电路图,其中 R_s 为电解液的电阻,CPE₁ 为金属表面形成的氧化膜的 CPE, C_{dl} 为电子双层 (EDL) 的电容, R_{ct} 为电子双层的电荷转移电阻, R_f 为腐蚀过程中在金属表面形成的钝化膜的电阻。

图 10 为 CuAl10Fe2 铝青铜电化学腐蚀的 Nyquist 图和 Bode 图。一般来说,圆弧半径越大,代表极化电阻越大,耐腐蚀越好。图 10a 中在高频区域存在一个半

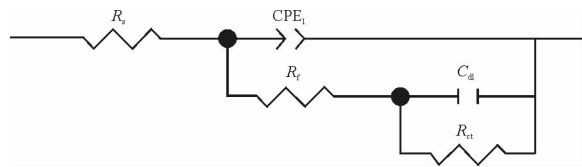


图 9 铝青铜 CuAl10Fe2 电化学测试等效电路图
Fig.9 Equivalent circuit of electrochemical test for CuAl10Fe2 aluminum bronze

圆弧,在低频区域,体系阻抗的实分量和虚分量呈现近似直线的关系。其中圆弧曲线反映的是电极表面电子转移过程受到的阻抗,其大小反映了电子转移过程的难易,圆弧直径越大,阻碍作用也就越大,电子转移速度越慢,即单位时间内电子交换的量越少,或单位时间内消耗的电活性物质的量越少。图 10a 中的半圆弧是容抗

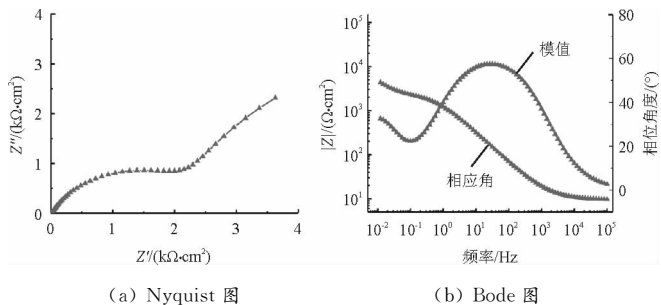


图 10 CuAl10Fe2 铝青铜的 Nyquist 图和 Bode 图

Fig.10 Nyquist diagram and Bode diagram of CuAl10Fe2 aluminum bronze

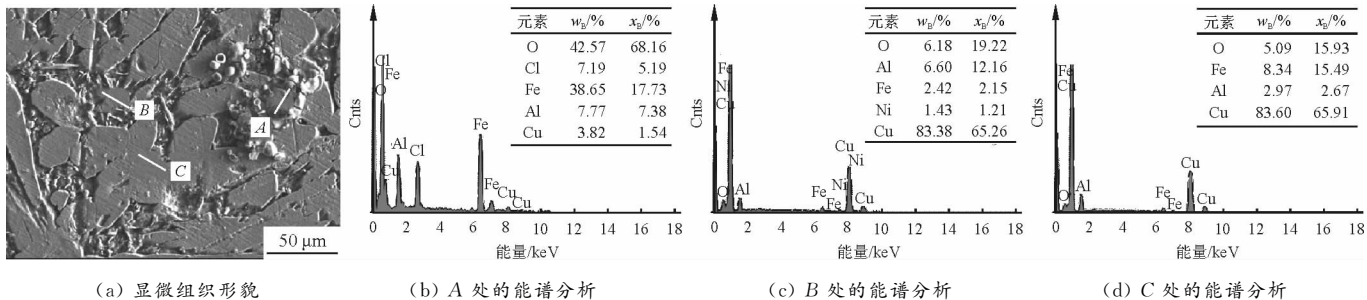


图 11 CuAl10Fe2 铝青铜的腐蚀形貌及能谱图

Fig.11 Corrosion morphologies and energy spectrum of CuAl10Fe2 aluminum bronze

耐腐蚀性能。

3 结 论

(1)离心铸造 CuAl10Fe2 铝青铜套筒具有良好的综合力学性能,其抗拉强度、屈服强度、伸长率及布氏硬度(HBW)分别为 612.7 MPa、318.6 MPa、32.5% 和 136.7。其原因归结为化学成分优化后 α 、 β 及 K_1 三相之间的合适占比,以及合金元素的固溶强化、细晶强化和离心力场引起的显微组织致密化。

(2)CuAl10Fe2 铝青铜在 3.5% 的 NaCl 溶液中的腐蚀电位为 -0.303 V ,腐蚀电流密度为 0.66 A/cm^2 ,腐蚀速率为 $8.94\text{ }\mu\text{m/a}$,表明材料具有良好的耐腐蚀性

弧,后面的斜线代表扩散过程,说明电极反应同时由电荷传递过程和扩散过程共同控制。可以看出,容抗弧度很大,说明材料具有很好的耐腐蚀性能。由图 10b 可知,阻抗的模值 $|Z|$ 随着腐蚀时间逐渐增加,说明合金表面形成了一种不断生长的保护性膜层。Bode 图中的相位角与 CuAl10Fe2 铝青铜表面/腐蚀介质界面处双电子层相关,其数值随着腐蚀时间而逐渐增大,表明 CuAl10Fe2 铝青铜表面的腐蚀速率不断降低。

2.3.3 腐蚀形貌及能谱分析

图 11 为 CuAl10Fe2 铝青铜在 3.5% 的 NaCl 溶液中电化学腐蚀后的表面显微组织形貌和在 K_1 相、 β 相及 α 基体处的点扫描分析结果。可以看出,在 K_1 相区域的腐蚀产物 O 含量较高,析出产物应为 Fe_2O_3 相。在 β 相区域的腐蚀产物含有一定的 O、Al 及 Cu,与基体成分基本一致,腐蚀程度较轻。在 α 基体区域,点扫描能谱结果显示,该区域 O 含量较低,成分与基体成分基本一致,表明该区域发生腐蚀程度较低。由此可见, K_1 相区域易腐蚀, α 相及 β 相区域在电化学腐蚀过程中于表面形成了一层致密的钝化膜,该钝化膜为层状的复合膜层,膜层之间相互重叠覆盖,靠近金属表面的钝化膜为 Al 的氧化膜层,而外层则为 Cu 的氧化膜层,主要组成为 Cu_2O 和 Al_2O_3 ,材料表面钝化膜的生成减小了试样的腐蚀速率,该保护膜使得铝青铜合金具有良好的

能。其原因在于其表面形成了 Cu_2O 和 Al_2O_3 钝化膜,保护基体材料不受腐蚀介质的侵蚀。

参 考 文 献

- [1] LIU T T, CHEN Z, XU J P, et al. Empirical evidence based effectiveness assessment of policy regimes for wind power development in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 164: 112 535.
- [2] ZHU M Y, QI Y, NATHAN H T M, et al. Low-carbon energy transition from the commanding heights: How state-owned enterprises drive China's wind power“miracle”[J]. Energy Research & Social Science, 2022, 85: 102 392.
- [3] MEIGH H. Cast and Wrought Aluminium Bronzes-Properties, Processes and Structure[M]. London: Institute of Materials, 2000.

超声喷丸对变形镁合金 AZ80M 腐蚀行为的影响

杜娟¹ 邓森² 李杰³ 陈云³

(1.武汉交通职业学院智能制造学院;2.天华化工机械及自动化研究设计院有限公司;
3.武汉理工大学交通与物流工程学院)

摘 要 采用超声喷丸工艺对 AZ80M 镁合金板材进行表面纳米化处理。结果表明,超声喷丸使 AZ80M 镁合金表层的晶粒尺寸显著减小,距喷丸表面 50 μm 以内为大变形区域,存在部分微裂纹;距喷丸表面 50~150 μm 范围内为晶粒细化区域,其组织致密且无明显缺陷。超声喷丸+抛光的 AZ80M 试样耐蚀性显著提高,开路电势为-1.551 V、自腐蚀电位为-1.481 V、钝化阻抗值 R_c 达 1 772 Ω·cm²。浸泡腐蚀试验表明,超声喷丸+抛光的 AZ80M 试样腐蚀速率明显降低,腐蚀形貌更均匀,腐蚀防护效果更好。

关键词 超声喷丸;AZ80M;显微组织;腐蚀行为

中图分类号 TG146.22;TG174 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Ultrasonic Shot Peening on Corrosion Behavior of AZ80M Alloy

Du Juan¹, Deng Sen², Li Jie³, Chen Yun³

(1.School of Intelligent Manufacture, Wuhan Technical College of Communications;
2.Tianhua Chemical Machinery and Automation Institute Co., Ltd.;
3.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology)

Abstract: AZ80M magnesium alloy plates were processed by ultrasonic shot peening. The results reveal that grain size on the surface layer of AZ80M magnesium alloy is significantly reduced. Within 50 μm from the peening surface, severe plastic deformation occurs with some micro cracks. In the range of 50~150 μm from the peening surface, grain refinement is observed, the structure is dense and free of apparent defects. The corrosion resistance of sample after ultrasonic shot peening is significantly improved, with an open-circuit potential of -1.551 V, a self-corrosion potential of -1.481 V, and a passivation impedance R_c up to 1 772 Ω·cm². Furthermore, immersion corrosion test indicates that the corrosion rate is significantly reduced with more uniform corrosion morphology and better corrosion protection.

Key Words: Ultrasonic Shot Peening, AZ80M, Microstructure, Corrosion Behavior

镁合金具有阻尼减振强、比强度高、屏蔽电磁干扰 等特点,在交通运输、航空航天等领域展现出良好的应

收稿日期:2022-09-12;修改稿收到日期:2022-11-23
第一作者简介:杜娟,女,1979 年出生,副教授,武汉(430065),E-mail:278096018@qq.com
通信作者:陈云,男,1981 年出生,教授,武汉(430063),E-mail:chenyunhbwh@163.com
引用格式:杜娟,邓森,李杰,等. 超声喷丸对变形镁合金 AZ80M 腐蚀行为的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):669-675.
DU J, DENG S, LI J, et al. Effects of ultrasonic shot peening on corrosion behavior of AZ80M alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):669-675.

[4] 许诺,王立昕,高瑜,等. 铝青铜合金的研究与发展[J]. 铸造工程, 2021(2): 11-15.

[5] 吕玉廷,王立强,毛建伟,等. 镍铝青铜合金(NAB)的研究进展[J]. 稀有金属材料与工程,2016, 45(6): 815-820.

[6] LIN G, LEI Y, ZENG J, et al. A comparative study on effects of special casting processes on microstructural development in Cu-10Al-4Fe-4Ni alloy[J]. Journal of Materials Research 2013, 28: 2 874-2 880.

[7] LIN G, WANG H, WEI Y, et al. Effects of heat treatments on microstructure and properties of nickel-aluminum bronze fabricated by centrifugal casting[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31: 3 832-3 840.

[8] 应俊龙,巢昺轩,李智勇.热处理工艺对离心铸造 QAl10-4-4 铝青铜组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021, 41(12): 1 568-1 571.

[9] 路阳,李振,李文生,等. 微量元素 Fe 对高铝铜合金腐蚀行为的影响[J]. 材料热处理技术,2008, 37(10): 33-36.

[10] 张赫栋,刘斌,石泽耀,等. 镍铝青铜合金海水腐蚀行为研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报,2021, 42(1): 25-33.

[11] 于辉,董飒英,黄国胜,等. 铝青铜在 3.5% NaCl 溶液中的脱成份腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报,2003, 23(6): 345-349.

[12] 魏笑,刘海霞,陈杰,等. NaCl 溶液质量分数和空蚀时间对被腐蚀铝青铜空蚀的影响[J].中国有色金属学报,2021, 31(2): 499-509.

(编辑:刘卫)