

再生 H65 黄铜中铁元素对其组织和性能的影响

尤治博¹, 钱高祥², 赖士浩², 张宇博¹, 王同敏¹, 李廷举¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 江西云泰铜业有限公司, 江西 鹰潭 335000)

摘要: 铜合金再生利用是铜合金生产的重要环节。在 H65 黄铜再生过程中, Fe 是常见的杂质元素, 显著影响黄铜性能, 需要严格控制其含量。本研究通过调控回收料配比, 控制再生 H65 黄铜中 Fe 的质量分数, 系统研究了铁元素对再生 H65 黄铜组织和性能的影响。研究表明, 随着黄铜中 Fe 质量分数的增加, 晶粒明显细化, 极限拉伸强度、屈服强度和硬度增加, 但延伸率和电导率下降。具体表现为, 当 Fe 的质量分数从 0.014% 上升至 0.051%, 平均晶粒尺寸由 64.2 μm 下降至 48.9 μm , 屈服强度由 105.9 MPa 提高至 122.1 MPa, 硬度由 74.5HV 升至 88.1HV, 延伸率和电导率由 62.6% 和 27.5% IACS 分别降低至 54.5% 和 25.8% IACS。电化学测试表明, H65 黄铜的耐蚀性能随 Fe 质量分数的增加呈现先上升后下降的趋势。Fe 的质量分数在 0.04% 以下时以固溶强化为主, 继续升高则可能出现偏聚甚至析出。本研究为再生黄铜的成分设计、组织调控、性能优化提供了实验依据。

关键词: 再生黄铜; 铁元素; 力学性能; 耐蚀性

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.001

中图分类号: TG146.1⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)02-0001-09

黄铜是以 Cu 为基体, Zn 作为主要添加元素的重要铜合金, 广泛应用于结构与功能材料领域。根据添加元素的种类, 黄铜可分为普通黄铜和复杂黄铜两大类。黄铜具有优异的物理性能、稳定的化学性能, 以及较好的耐磨性、导电性与导热性, 因而在电力、水利、海洋等诸多领域有着广泛的应用^[1-4]。中国黄铜牌号中, H65 黄铜一般指铜元素质量分数为 65% 的黄铜材料, 具有 $\alpha+\beta$ 双相组织。H65 黄铜具有良好的力学性能与工艺性能, 广泛应用于各类常见的五金配件、电器零件、管材等领域, 具有巨大的工程价值, 应用极其广泛^[5-6]。

再生铜是弥补中国铜资源不足的重要途径。与从铜矿石中冶炼铜相比, 再生铜可以缓解资源压力, 降低能源消耗, 减轻环境污染^[7-9]。然而, 受原料来源、工艺条件等限制, 再生黄铜中易引入 Fe 元素杂质。Fe 是一种极易进入 Cu 中的元素, 在 Cu 的精炼温度下固溶度达 5% 以上, 但随温度降低急剧下降。Fe 元素的引入对铜基体导电性与力学性能有着较大影响。研究表明, 纯铜中质量分数 0.5% 的 Fe 能使导电性能损失 50% 以上。Fe 作为溶质原子

能起到固溶强化的作用并细化晶粒, 显著影响铜的物理性能^[10-14], 因此各国都对 H65 黄铜中 Fe 质量分数上限做出了明确限制, 见表 1。

表 1 各国 H65 再生黄铜 Fe 质量分数上限标准
Table 1 Standards for Fe content in H65 recycled brass in various countries (%, mass fraction)

Standard	GB	UNS	W-Nr	EN	ISO
Maximum Fe content	0.07	0.07	0.05	0.05	0.1

除导电性能与力学性能外, H65 黄铜的耐腐蚀性能也是重要的指标之一。在各类腐蚀形式中, 脱锌腐蚀尤为典型: 该过程中锌被优先溶解, 留下疏松的铜结构, 导致力学性能急剧下降。一般来说, 随着锌的质量分数增加, 腐蚀速率与脱锌倾向都会增加。对于具有 $\alpha+\beta$ 双相组织的 H65 黄铜, 其 β 相锌含量更高而优先腐蚀, 而后扩展至 α 相基体, 这样的局部腐蚀更加剧了腐蚀。此外, 当 Fe 含量较高时, 其形成的富铁析出相与铜基体发生电偶效应, 会导致局部微电流增大而加速腐蚀^[15-20]。

在实际生产中, 各国 H65 黄铜的标准存在差异,

收稿日期: 2025-09-03; 修订日期: 2025-12-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52171135); 重点新材料研发及应用国家科技重大专项(2025ZD0611000, 子课题: 2025ZD0611003)资助

作者简介: 尤治博(2001—), 男, 辽宁盘锦人, 硕士研究生, 研究方向: 含铁废杂铜精炼再生, E-mail: 1105265746@qq.com; 通信作者: 张宇博, 副教授, E-mail: ybzhang@dlut.edu.cn

回收黄铜料中Fe来源复杂,难以控制。即使Fe含量控制在标准限值内,其微小波动仍能引起性能的显著变化。此外,当前研究大多聚焦于Fe对黄铜组织与力学性能的影响,对其功能性变化的研究相对缺乏。黄铜作为兼具结构性与功能性的关键材料,常用在电气、航海等领域,其耐蚀性与导电性直接关系到产品的性能与寿命。因此,研究标准范围内Fe的质量分数变化对H65黄铜组织、力学性能、导电性与耐蚀性的影响规律,对实际生产有着指导意义^[21-25]。为此,本文将云泰铜业制备的Fe含量梯度的H65黄铜板材作为研究对象,通过物理与电化学检测,分析Fe元素这一变量对H65黄铜微观组织、力学性能、导电性与耐蚀性的影响,旨在找到H65黄铜中Fe元素适宜的成分范围。

1 实 验

本研究实验材料取自云泰铜业10 t黄铜连续板带生产线的H65黄铜板材。生产中再生铜利用的方式为降级利用,具体工艺为:回收料经分类、清洗、破碎等预处理后,与高纯物料以一定比例掺合作为原料。通过调控回收料与纯物料的配比,能够精准调控产品中Fe的质量分数,从而制备出含有微量Fe的再生黄铜板材。样品的元素含量见表2。基于此成分体系,本研究系统探讨了Fe的质量分数对H65黄铜物理性能和腐蚀性能的影响规律。原料经水平连续铸造、多道轧制及退火后,得到最终样品。

表2 H65样品元素含量
Table 2 Element contents in H65 samples (% , mass fraction)

Elements	Al	Fe	Cu	Zn	La
1	0.210	0.014	64.186	35.433	0.019
2	0.240	0.027	64.216	35.369	0.019
3	0.248	0.035	64.256	35.201	0.018
4	0.217	0.051	63.997	35.484	0.020

在板材中部取样,经打磨、抛光制作成试验样品。采用帕纳科X射线荧光光谱仪(Axios)测量具体元素的质量分数,采用理学高功率X射线衍射仪(SmartLab 9 kW)测试物相,随后使用金相显微镜

(OLYMPUS-GX51)和扫描电子显微镜(JSM-IT800)观察显微组织。平均晶粒尺寸采用国标GB/T 6394—2017的直线截点法测定:每份样品统计5张金相照片中的平均值,采用纵向、横向两方向以及多条统计直线以保证可靠性。腐蚀液为5 g FeCl₃+95 mL无水乙醇溶液,腐蚀时间50 s。

将分割下来的黄铜板材加工成哑铃状试样(标距段尺寸:25 mm×6 mm×2 mm)在三思纵横有限公司生产的万能试验机(UTM 5105)上进行拉伸试验。采用南光维氏硬度计(HV1000)和非希尔手持式涡流电导率测试仪(SMP350),测试材料的硬度和电导率。

电化学实验在科思特电化学工作站(CS310M)上进行,采用经典的三电极系统,Pt片为辅助电极,饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,试样为工作电极。使用质量分数为3.5%NaCl的人工海水作为电解液,恒温25℃进行实验,工作电极面积为1 cm²。先进行20 min的开路电位(OCP)记录,待其稳定后进行电化学阻抗(EIS)测试与动电位极化测试。本文所有电位均相对于SCE标定。所有实验重复3次,取平均值或典型值作为结果。

2 结果与分析

2.1 Fe对黄铜微观组织的影响

为确定材料的实际成分,对多组取样进行XRF测试,以检测平均元素含量以及Fe的质量分数梯度,结果见表2。四组黄铜样品具有明确的Fe质量分数梯度,其余元素的影响基本一致,可忽略不计。样品的XRD结果如图1所示,可以发现四组样品均与Cu_{0.64}Zn_{0.36}标准卡片对应,说明材料的主体为H65黄铜,未形成明显的富铁相等杂相。进一步观察(200)晶面的放大图,可以发现样品的(200)衍射峰与标准Cu_{0.64}Zn_{0.36}相比有向低角度偏移的趋势,且各组样品之间也存在差异。此外,随着Fe的质量分数不断上升,峰宽不断增加。上述现象表明样品中Fe主要固溶在黄铜基体之中,且由于Fe的原子半径略大于Cu和Zn,峰位向低角度偏移。而随着Fe元素的质量分数不断增加,微观尺度的晶格畸变不断增加,峰位逐渐加宽。

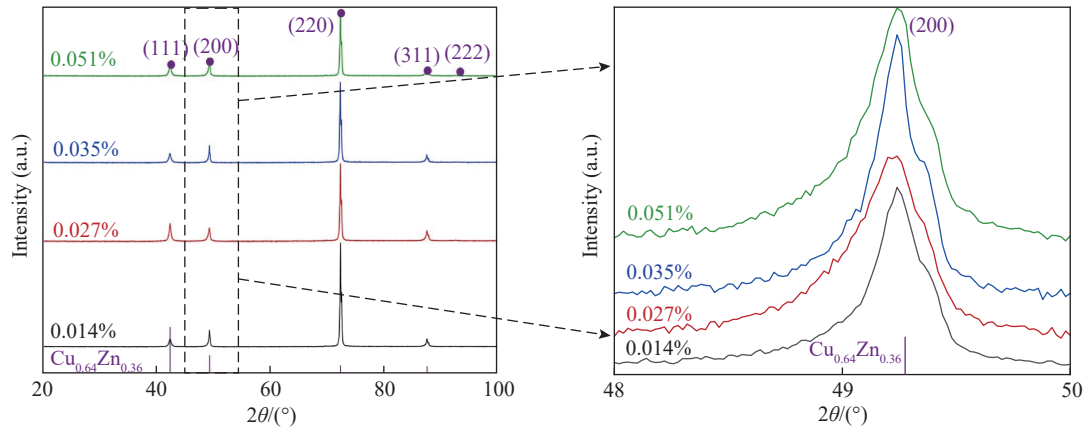


图1 (a)不同Fe质量分数H65黄铜样品的XRD衍射谱;(b)(200)晶面XRD放大图

Fig. 1 (a) XRD patterns of H65 brass samples with different Fe contents; (b) Magnified XRD patterns of the (200) crystal plane

图2是H65黄铜样品经腐蚀后的金相组织。以截点法统计各组样品晶粒尺寸的结果表明,Fe能够显著细化H65黄铜的晶粒。随着Fe的质量分数增加,平均晶粒尺寸出现下降的趋势:Fe质量分数为0.014%时,黄铜样品的平均晶粒尺寸为 $64.2\ \mu\text{m}$;随着Fe质量分数增至0.027%,0.035%,0.051%,平均晶粒尺寸依次下降到60,57.9,48.9 μm ,方差分别为16.9,1.56,8.38和7.15 μm^2 ,降幅分别为6.7%,9.8%

和23.8%。为了进一步探究其原因,对Fe质量分数为0.051%的H65黄铜样品进行SEM观察与EDS能谱分析,结果见图3:未腐蚀的基体上无明显可见的析出相,Cu,Zn元素分布较为均匀,且Fe的质量分数极低,在EDS谱图上不明显。结合XRD结果,推断H65黄铜样品中Fe元素主要是以固溶形式存在。然而,当Fe的质量分数上升至0.051%时,可能发生微观尺度下的富集,导致晶粒显著细化。

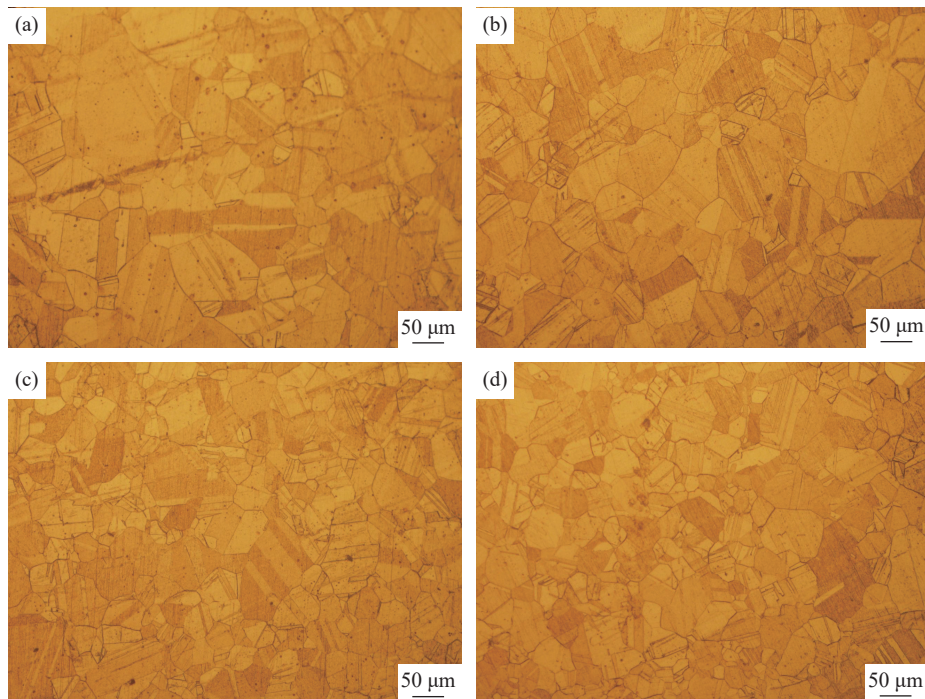


图2 不同Fe质量分数H65黄铜样品的微观组织

Fig. 2 Microstructure of H65 brass samples with different Fe contents: (a) 0.014%; (b) 0.027%; (c) 0.035%; (d) 0.051%

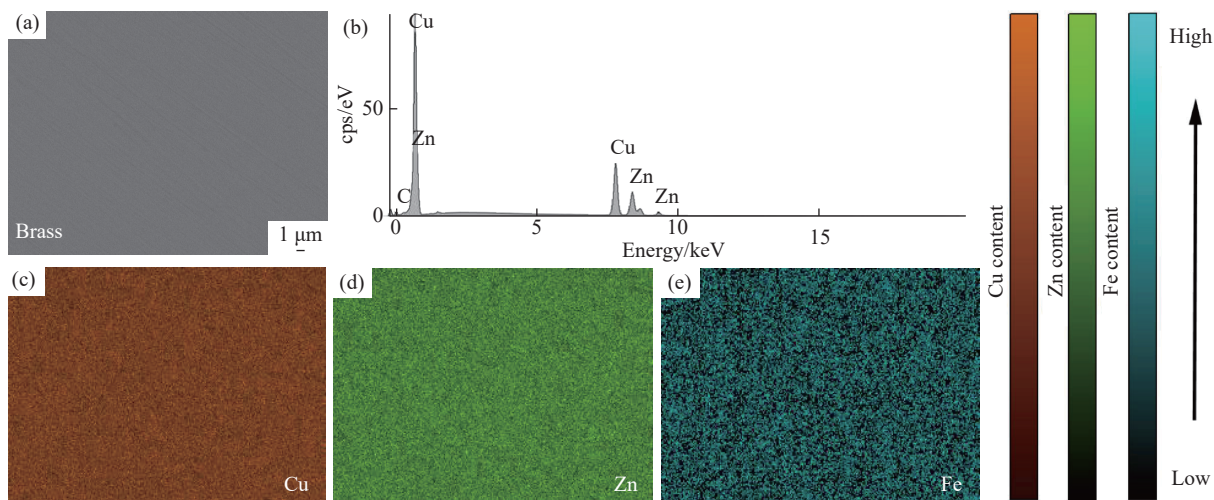


图3 Fe质量分数为0.051%的H65黄铜SEM-EDS图: (a)1500x SEM图像; (b)分布图总谱数; (c)Cu元素分布图; (d)Zn元素分布图; (e)Fe元素分布图

Fig. 3 SEM-EDS results of H65 brass with 0.051% Fe content: (a) 1500x SEM image; (b) Total spectral number of distribution map; Distribution map of (c) Cu, (d) Zn and (e) Fe

2.2 Fe对黄铜物理性能的影响

图4为H65黄铜样品物理性能测试的结果。在拉伸试验中:当Fe质量分数为0.014%时,极限拉伸强度为314.2 MPa,延伸率为62.6%,电导率为27.5%IACS,硬度为74.5HV;当Fe的质量分数分别增加至0.027%, 0.035%和0.051%时,样品的极限拉伸强度为320.4, 325.8和333.6 MPa,延伸率为57.2%, 56%和54.5%,电导率为26.6%, 26.4%和25.8%IACS,硬度为81.4HV, 85.4HV和88.1HV。极限拉伸强度的涨幅分别为2.0%, 3.7%和6.2%,延伸率的降幅分别为8.6%, 10.4%和12.9%,电导率的降幅分别为3.3%, 4.0%, 6.2%,硬度的涨幅分别为9.3%, 14.6%和18.3%。

不同Fe质量分数的黄铜样品晶粒尺寸与屈服强度的关系如图4(b)所示。屈服强度随着Fe质量分数的增加而持续上升:当Fe的质量分数为0.014%时,屈服强度为105.9 MPa;当Fe的质量分数增加至0.051%时,样品屈服强度为122.1 MPa。由此可见,在实验范围内,随着Fe质量分数的上升,材料屈服强度的增加和晶粒尺寸的减小呈现对应关系。通过Hall-Petch公式计算:

$$\sigma = \sigma_0 + kd^{(-1/2)} \quad \text{式(1)}$$

代入0.014%与0.027%的数据,解得: $\sigma_0 = -3.6183$, $k = 877.551$ 。进一步将0.051%, 0.035%的晶粒尺寸48.9, 57.9 μm 代入,解得屈服强度数值为

121.9, 111.7 MPa,与实际测量值基本对应,表明材料的行为符合Hall-Petch关系。由此可知,屈服强度的增加几乎全部来自晶粒细化。在微量Fe元素作用下,黄铜的屈服强度与晶粒细化的关系显著大于其他因素(如Fe元素的固溶强化和第二相强化)的影响。

这是因为:实际生产中,由于过冷度较大,部分Fe来不及聚集形成富铁相,以过饱和固溶体的形式存在,微量Fe元素进入H65黄铜时主要固溶在基体中;固溶在H65黄铜中的Fe元素易偏聚在晶界等高能量处,在加工过程中阻碍晶界移动而细化晶粒。两者共同作用,最终导致了材料极限拉伸强度和屈服强度增加,韧性降低,并通过影响电子迁移行为与晶体结构,使铜基体的导电性降低。值得注意的是:在Fe质量分数较低时,材料在维持较高极限拉伸强度与塑性的同时,电导率的下降幅度远小于硬度的提升幅度。这说明在对导电性要求不严苛的场景下,微量Fe杂质的存在是可以接受的。但是,室温下Fe在Cu基体中的溶解度很低,Fe质量分数的增加会导致富铁相析出,从而改变Fe元素的强化机制。

固溶Fe元素导致晶粒细化的机制可以由晶界能降低与晶格畸变两方面来解释。通常情况下,固溶元素易在晶界等晶体结构不完整处偏聚以降低晶界能,从而降低晶界迁移的驱动力;此外,晶界迁

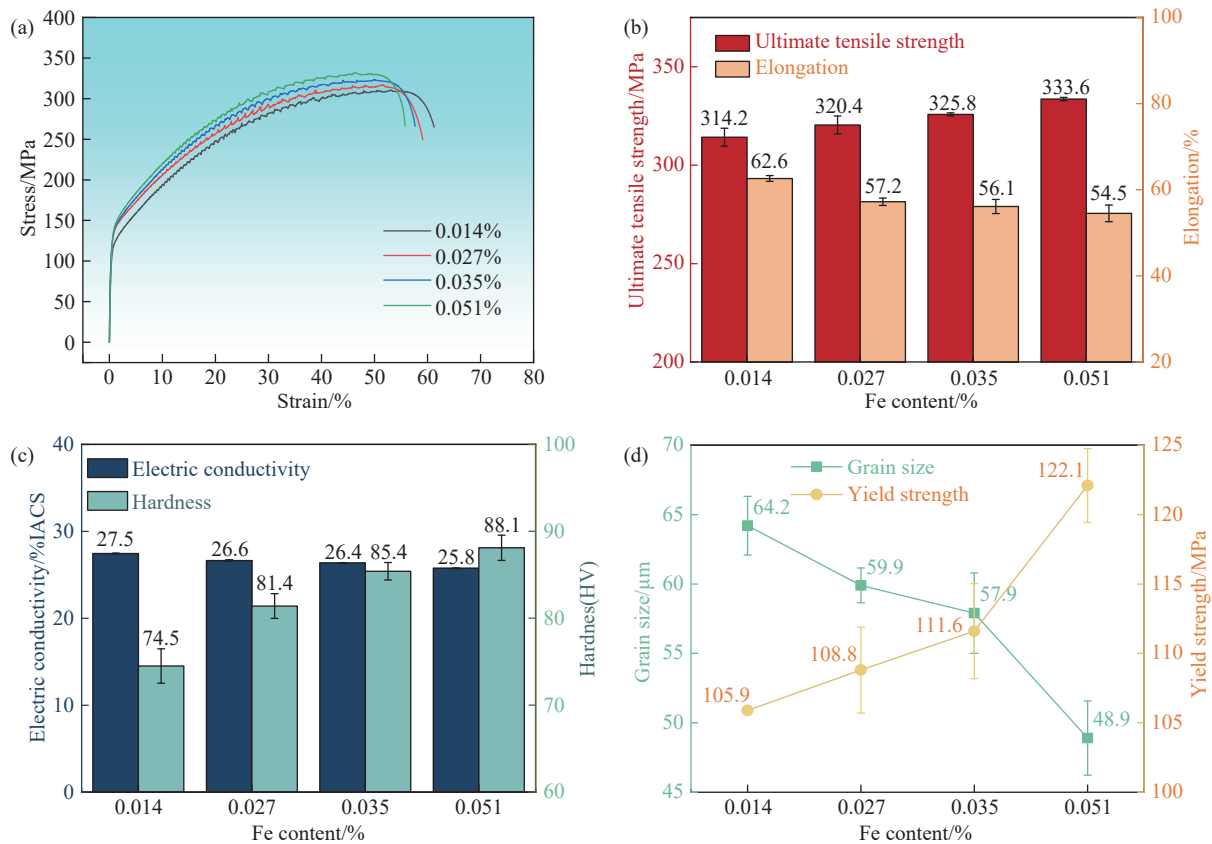


图4 不同Fe质量分数的H65黄铜样品物理性能: (a)应力-应变曲线; (b)极限拉伸强度与延伸率; (c)电导率和硬度; (d)晶粒尺寸与屈服强度

Fig. 4 Physical properties of H65 brass samples with different Fe contents: (a) Stress-strain curve; (b) Ultimate tensile strength and elongation; (c) Electrical conductivity and hardness; (d) Grain size and yield strength

移时必须令偏聚的溶质原子共同移动,使其跨过溶质元素的扩散激活能垒,从而细化晶粒。而当Fe的质量分数超出固溶度时,析出的富铁相会在凝固时充当异质形核位点,更加剧烈地细化晶粒。并且,在黄铜板材加工时,需要经过轧制、退火等工艺,细小的析出相影响退火再结晶中的晶界迁移过程,会钉扎在晶界处,阻碍晶粒长大从而细化晶粒。

2.3 H65黄铜的动电位极化测试

图5为不同Fe质量分数的H65黄铜样品在人工海水中进行动电位极化测试得到的结果。采用CS studio软件对数据进行拟合,得到塔菲尔斜率、交换电流密度、腐蚀电位等数据,见表3。如图5(a)所示,样品的阴极斜率始终大于阳极斜率,说明反应主要受阴极控制。结合阴极支曲线特点和中性盐溶液的反应条件,发现阴极主要受析氢反应控制^[26]:



随着电压逐渐升高,阳极区域出现平台区,电

位上升而电流趋于稳定,表现出典型的钝化特征。结合图5(b)的平均腐蚀速率可以发现:随着Fe质量分数的增加,H65黄铜的耐蚀性出现先上升后降低的趋势。而表3中的拟合结果进一步表明这种趋势由多种因素共同控制:一方面,随着Fe的质量分数不断增加,腐蚀电位从-0.239 V逐渐降低至-0.301 V,这说明Fe元素作为电位介于Cu, Zn之间的活泼元素,其含量的增加加剧了腐蚀倾向;另一方面,交换电流密度从 6.87×10^{-6} 先降低至 8.25×10^{-7} ,再升高至 4.11×10^{-6} ,这是因为低质量分数时Fe仍可以固溶在基体中,其导致的晶粒细化可以阻碍点蚀的发生,提升材料的耐蚀性能;但Fe质量分数进一步增加时会发生局部的富集甚至析出,形成的富铁相具有催化析氢反应的作用,能够降低析氢反应的活化能,促进该局部区域的析氢反应。此时Fe元素细化晶粒的正面效果无法抵消析出相带来的腐蚀加速的负面效果。

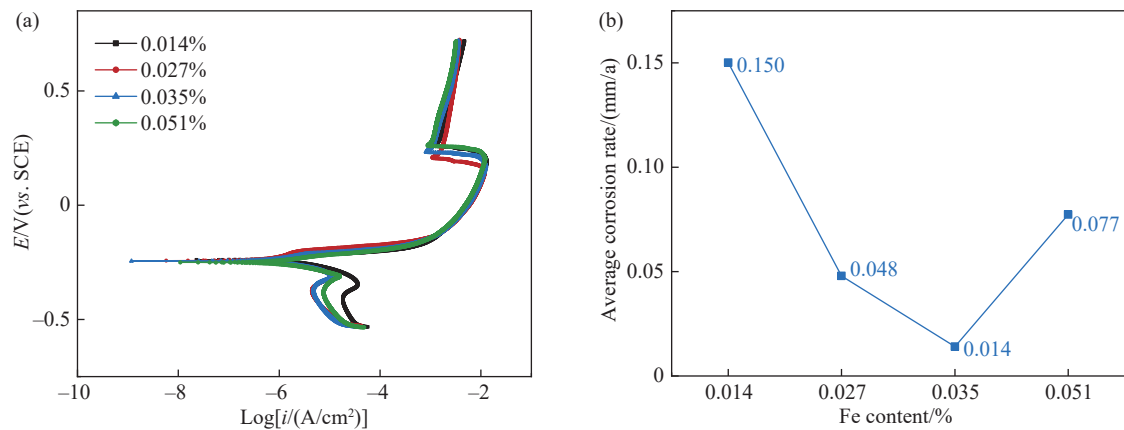


图5 不同Fe质量分数H65样品在人工海水中的动电位极化测试结果:(a)极化曲线;(b)平均腐蚀速率

Fig. 5 Potentiodynamic polarization test results of H65 brass samples with different Fe contents in artificial seawater:
(a) Polarization curve; (b) Average corrosion rate

表3 不同Fe质量分数H65黄铜样品的拟合结果

Fe contents				
Fe content/%	b_p /mV	b_a /mV	i_0 /(Amps/cm ²)	E_0 /V(vs. SCE)
0.014	66.470	348.44	6.87×10^{-6}	-0.23932
0.027	57.768	386.95	2.30×10^{-6}	-0.27540
0.035	50.905	195.37	8.25×10^{-7}	-0.27355
0.051	63.504	464.32	4.11×10^{-6}	-0.30188

2.4 H65黄铜的电化学阻抗谱

图6和表4显示了H65黄铜样品电化学阻抗谱结果。在等效电路拟合的过程中, R_s 表示溶液电阻, R_f 表示腐蚀产物膜电阻, R_{ct} 表示电荷转移电阻,三者之和约为极化电阻 R_p ,可以用来表征样品的耐蚀性能。从图6可知,多组样品Nyquist图形状相似,但容抗弧存在差异:Fe质量分数为0.035%样品容抗弧半径明显最大,0.027%样品次之,0.051%最小。容抗弧半径越大,样品耐蚀性越好,这与动电位极化测试结果一致;Bode图中0.035%样品的低频阻抗高于其余样品,其余样品间差异不大;而0.051%样品的中频相位角明显低于其他样品,表明反应过程电荷转移起主导作用,其腐蚀机制发生了改变。拟合电阻参数同样表现出耐蚀性先上升、后下降的趋势,细分为来看:随着Fe质量分数增加, R_f 与 R_{ct} 均为先增加后降低, R_s 变化较小,导致极化电阻 R_p 先增加后降低。由于腐蚀速率同时受腐蚀电位与极化电阻的影响,最终出现先下降后上升的趋势。此外, R_f 先上升后下降的趋势表明Fe不仅对H65基体组织

存在影响,还参与到腐蚀反应过程中,改变腐蚀产物的成分,影响腐蚀产物的保护性。

Fe对H65黄铜耐蚀性的影响可从细化晶粒与形成局部催化两方面来解释:一方面,当Fe的质量分数较低时,Fe导致的晶粒细化能增加晶界密度,从而增加晶界腐蚀路径,促进腐蚀的均匀扩展,减少因大晶粒等因素导致的局部区域优先溶解,抑制析氢腐蚀所需环境,从而提高材料耐蚀性;但是Fe的电位介于Cu,Zn之间,一般认为其相较于黄铜基体而言更加活泼,呈阳极性,且在黄铜基体里并不完全均匀固溶。当质量分数上升至0.051%时可能形成Fe的富集区甚至析出,富Fe相能够催化阴极析氢反应,通过提供活性表面,降低析氢反应的活化能,从而促进局部区域的析氢反应,加速腐蚀进程^[27-28]。综上所述,Fe对黄铜耐蚀性的影响由两方面因素相互竞争,最终呈现出先增加后降低的趋势。

综上所述,Fe对H65黄铜的组织演化与综合性能具有显著影响。随着Fe元素的增加,H65黄铜中回收料比例增加、成本降低、晶粒逐渐细化、耐蚀性出现先上升再下降的趋势,力学性能上升、延展性下降、电导率下降。根据本研究的实验结果,云泰铜业在实际生产中根据具体需求合理调控Fe元素的质量分数,达到了材料成本与性能之间的平衡,提升了H65黄铜产线的经济效益。

3 结 论

1)Fe元素能够显著细化晶粒:当Fe的质量分

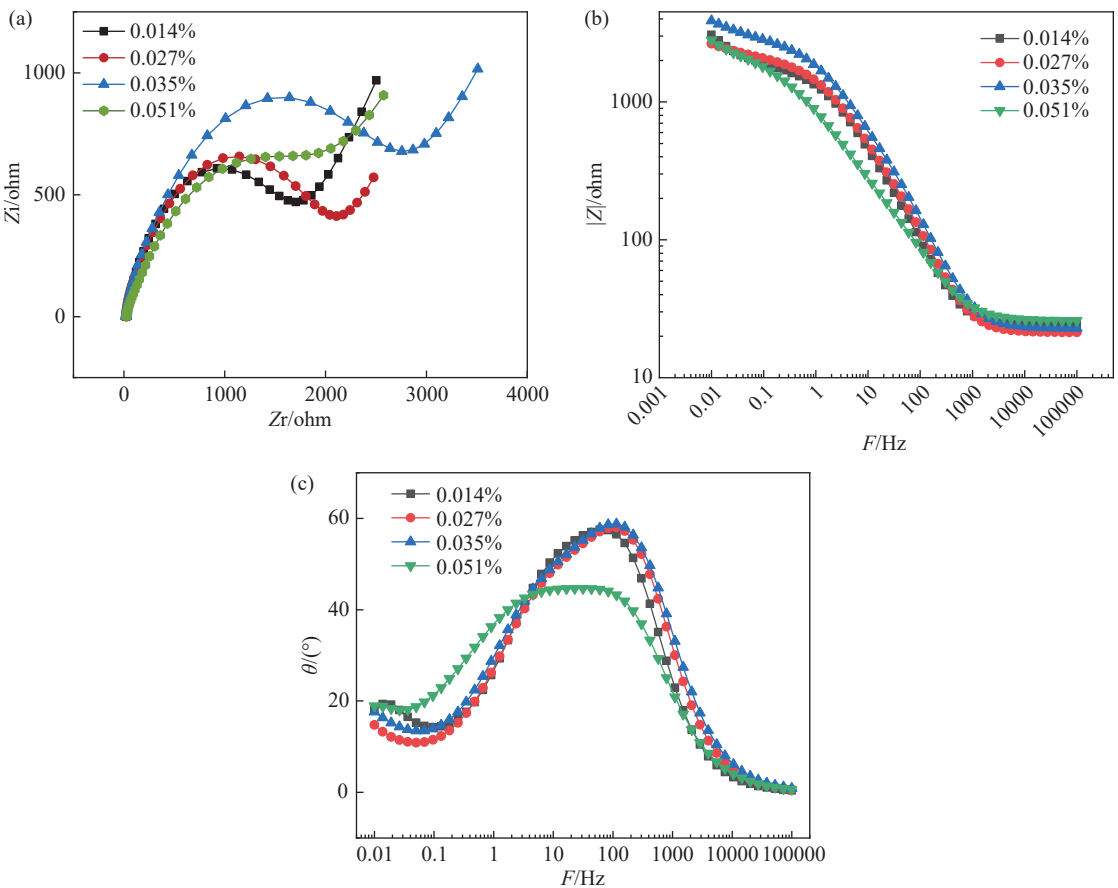


图6 不同Fe质量分数H65黄铜样品电化学实验结果: (a)Nyquist图; (b)bode图(频率-阻抗图); (c)bode图(频率-相位图)

Fig. 6 Electrochemical experimental results of H65 brass samples with different Fe contents: (a) Nyquist plot; (b) Bode diagram (frequency-impedance diagram); (c) Bode diagram (frequency-phase diagram)

表4 不同Fe质量分数H65黄铜样品Nyquist曲线的等效电路拟合结果

Table 4 Equivalent circuit fitting results of Nyquist curves for H65 brass samples with different Fe contents				
Fe content/%	$R_s/(\Omega/\text{cm}^2)$	$R_p/(\Omega/\text{cm}^2)$	$R_{ct}/(\Omega/\text{cm}^2)$	$R_{\text{total}}/(\Omega/\text{cm}^2)$
0.014	24.01	311.2	1396	1731.21
0.027	21.26	348.3	1689	2058.56
0.035	22.70	527.9	2221	2243.70
0.051	25.84	156.8	2055	2211.80

数从0.014%增加到0.051%时,样品的平均晶粒尺寸从64.2 μm 下降到48.9 μm ,降幅为23.8%。Fe元素主要固溶在黄铜基体中,但当其质量分数上升至0.051%时可能部分析出。

2)Fe元素能显著影响材料的物理性能:当Fe的质量分数从0.014%增加到0.051%时,电导率从27.5%IACS降低至25.8%IACS,降幅为6.2%;在硬度测试中,0.014%样品的硬度为74.5HV,0.051%样品的

硬度为88.1HV,涨幅为18.2%;屈服强度在0.014%时为105.9 MPa,0.051%时为122.1 MPa,涨幅为15.3%。经计算,屈服强度的提升几乎全部来自细晶强化。

3)随着Fe的质量分数增加,H65黄铜的耐腐蚀性能出现先增强后降低的趋势,其腐蚀电位随Fe的质量分数增加而增加,交换电流密度先降低后升高,极化电阻先升高后降低,基本符合腐蚀速率的变化趋势。耐蚀性的下降与Fe的富集与析出有关。

参考文献:

[1] 王鹏飞.超低温轧制及镍硅元素的添加对黄铜组织和性能的影响[D].大连:大连理工大学,2020:1-11.

[2] LI L Q, PAN D A, LI B, et al. Patterns and challenges in the copper industry in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 127: 1-7.

[3] 李航.复杂锰黄铜中 $[\text{Mn}(\text{Fe})_3\text{Si}_3]$ 相形成长大机制及其对性能影响研究[D].大连:大连理工大学,2018:

- 1-14.
- [4] 汪明朴, 尹志平. 中国材料工程大典, 第4卷: 有色金属材料工程(上)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 263-266.
- [5] 梅伟, 李文针. 复杂铜原料生产高品质黄铜技术与应用[J]. 铜业工程, 2022(2): 68-70.
- [6] 雷宇, 李永帅, 姜雁斌, 等. 退火对黄铜包覆纯铜绞线组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(3): 702-714.
- [7] FANG K, LI C L, TANG Y Q, et al. China's pathways to peak carbon emissions: New insights from various industrial sectors[J]. Applied Energy, 2022, 306: 118039.
- [8] 程贵桃, 项超, 罗波, 等. 多维协同优化高品位再生铜冶炼能耗的研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2025, 46(2): 20-24.
- [9] LI X, MA B Z, WANG C Y, et al. Sustainable recovery and recycling of scrap copper and alloy resources: a review[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 41: e01026.
- [10] 王煊凯. T2紫铜和H62黄铜及其镀锡层的大气腐蚀行为研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2022: 15-33.
- [11] 刘国民. 海水淡化液膜下铝黄铜的腐蚀行为和机理研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020: 1-10.
- [12] 尹立辉. 服役黄铜管及实海金属试片腐蚀电化学检测研究[D]. 天津: 天津大学, 2004: 19-101.
- [13] PEI Z B, CHENG X Q, YANG X J, et al. Understanding environmental impacts on initial atmospheric corrosion based on corrosion monitoring sensors[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 64: 214-221.
- [14] LU X, LIU Y W, LIU M R, et al. Corrosion behavior of copper T2 and brass H62 in simulated Nansha marine atmosphere[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019(9): 1831-1839.
- [15] 刘永辉, 张佩芬. 金属腐蚀学原理[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993: 1-6.
- [16] 顾爱玲. 黄铜表面钝化处理与耐环境腐蚀研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 5-9.
- [17] 王宏智, 陈君, 周建奇, 等. 紫铜海水管焊接部位在海水中的腐蚀特征[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(4): 645-650.
- [18] 崔中雨, 肖葵, 董超芳, 等. 西沙严酷海洋大气环境下紫铜和黄铜的腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(3): 742-749.
- [19] 黄佳伟, 胡强, 胡志, 等. 铜合金的腐蚀与防护研究进展[J]. 铜业工程, 2024(1): 1-21.
- [20] PAN C, LV W Y, WANG Z Y, et al. Atmospheric corrosion of copper exposed in a simulated coastal-industrial atmosphere[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(6): 587-595.
- [21] 张建丽, 朱力华, 王大鹏, 等. HAl77-2铜合金管在低温多效海水淡化装置中的耐蚀性[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(6): 484-489.
- [22] HONG S, CHEN W, LUO H Q, et al. Inhibition effect of 4-amino-antipyrine on the corrosion of copper in 3wt.% NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2012, 57: 270-278.
- [23] 王文礼, 王文, 郭韩. H65铜合金搅拌摩擦焊接头电化学腐蚀性能研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(17): 8-9, 12.
- [24] LI H, JIE J C, ZHANG Q Y, et al. Effect of annealing treatment on the microstructures, mechanical, and wear properties of a manganese brass alloy[J]. Journal of Materials Research, 2016, 31(10): 1491-1500.
- [25] WANG X L, JIE J C, LIU S C, et al. Growth mechanism of primary Ti_5Si_3 phases in special brasses and their effect on wear resistance[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 61: 138-146.
- [26] 李欣琳, 金国, 康丽霞, 等. 黄铜在酸碱盐腐蚀介质中的腐蚀研究[J]. 材料导报, 2018, 32(2): 228-233, 242.
- [27] 邓荟源, 解浩峰, 黄树晖, 等. 铝含量对铸态镍铝青铜合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属, 2025, 49(6): 795-806.
- [28] JIANG Y B, XU J, LIU X H, et al. Effects of Fe content on the microstructure and properties of $CuNi_{10}FeMn_{10}$ alloy tubes fabricated by HCCM horizontal continuous casting[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2016, 23(4): 449-457.

Influence of Iron on Microstructure and Properties of Recycled H65 Brass

YOU Zhibo¹, QIAN Gaoxiang², LAI Shihao², ZHANG Yubo¹, WANG Tongmin¹, LI Tingju¹

(1. *School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*; 2. *Yuntai Copper Co., Ltd., Yingtan 335000, China*)

Abstract: Recycling and reuse of copper alloys constitutes a crucial component in China's copper alloy production. During the recycling of brass, iron (Fe) is a prevalent impurity element that can significantly impact brass properties, thus necessitating stringent limitation of iron in brass. This study achieved precise control of Fe content during brass recycling by regulating the input of recycled materials, and systematically investigated the influence of iron on microstructure and properties of recycled H65 brass. Results demonstrated that with increasing Fe content in brass, grains were significantly refined, and the ultimate tensile strength, yield strength and plasticity increased. However, this led to a decrease in elongation and electrical conductivity. Specifically, as Fe content increased from 0.014% to 0.051%, the average grain size decreased from 64.2 μm to 48.9 μm , yield strength increased from 105.9 MPa to 122.1 MPa, and hardness increased from 74.5 HV to 88.1 HV. Conversely, elongation decreased from 62.6% to 54.5%, and electrical conductivity decreased from 27.5%IACS to 25.8%IACS. On the other hand, electrochemical tests revealed that the average corrosion rate exhibited an initial decrease followed by an increase, indicating corrosion resistance initially improved but subsequently deteriorated with increasing Fe content. When Fe content was below 0.04%, solid solution strengthening predominated. Further increases may lead to elemental segregation or even precipitation. This research offered systematical guidance for optimizing economic benefits, controlling microstructural evolution, increasing corrosion resistance, and improving processing performance of recycled brass.

Key words: reclaimed brass; iron; mechanical property; corrosion resistance property

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.02.001

引文格式: 尤治博, 钱高祥, 赖士浩, 张宇博, 王同敏, 李廷举. 再生 H65 黄铜中铁元素对其组织和性能的影响[J]. 铜业工程, 2026(2): 1-9.

YOU Zhibo, QIAN Gaoxiang, LAI Shihao, ZHANG Yubo, WANG Tongmin, LI Tingju. Influence of iron on microstructure and properties of recycled H65 brass [J]. Copper Engineering, 2026(2): 1-9.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc