

基于失效机理分析的耐蚀抗磨 高铬铜铸铁磨球开发

韩凯歌¹, 刘金浪¹, 沈茂林², 胡朝辉², 鲍刘虎², 赵莫迪³, 梁驹华³, 韩福生³

(1. 伊春鹿鸣矿业有限公司, 黑龙江伊春 152500; 2. 安徽省凤形新材料科技有限公司, 安徽宣城 242300;
3. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽合肥 230031)

摘要: 针对高铬铸铁磨球在湿法磨矿工况下存在的腐蚀磨损严重、使用寿命短等技术难题, 通过多尺度表征与合金设计相结合的方法, 系统揭示了磨球的失效机理并开发出新型高铬铜铸铁磨球。利用金相分析、扫描电镜及能谱分析等技术, 发现磨球失效主要源于基体微裂纹扩展、共晶碳化物断裂以及界面贫铬区的形成。基于失效机制分析, 采用铜合金化改性与热力学计算优化相结合的策略, 实现了材料成分与组织的协同调控。试验结果表明, 当铜含量超过1%时, 磨球的自腐蚀电位提升至-0.454 V, 腐蚀电流密度显著降低, 耐蚀性得到明显改善。同时, 铜合金化在保持HRC62高硬度的基础上, 使冲击韧性提升22%。工业化应用表明, 新型磨球在实际工况下的磨耗量降低9.5%~12.8%, 展现出优异的工程适用性。本研究不仅为湿式磨矿工况下磨球的材料设计提供了新思路, 而且对提升耐磨材料服役性能具有重要指导意义。

关键词: 高铬铸铁; 湿法磨矿; 腐蚀磨损; 铜合金化; 研磨介质; 耐磨性; 耐腐蚀性; 显微组织; 合金设计

中图分类号: TG143.7; TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 08-0862-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0111

Development of Corrosion-Resistant and Wear-Resistant High Chromium Copper Cast Iron Grinding Balls Based on Failure Mechanism Analysis

HAN Kai-ge¹, LIU Jin-lang¹, SHEN Mao-lin², HU Zhao-hui², BAO Liu-hu²,
ZHAO Mo-di³, LIANG Ju-hua³, HAN Fu-sheng³

(1. Yichun Luming Mining Co., Ltd., Yichun 152500, Heilongjiang, China; 2. Anhui Fengxing New Material Technology Co., Ltd., Xuancheng 242300, Anhui, China; 3. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: To address the severe corrosion-wear and short service life of high chromium cast iron grinding balls in wet grinding operations, this study employs a combined approach of multi-scale characterization and alloy design to systematically investigate the failure mechanisms and develop a novel high chromium copper cast iron grinding ball. Metallographic analysis, scanning electron microscopy, and energy spectrum analysis revealed that the failure primarily originated from matrix microcrack propagation, eutectic carbide fracture, and interfacial chromium-depleted zone formation. Based on the failure mechanism analysis, a strategy integrating copper alloying modification and thermodynamic calculation optimization was adopted to achieve synergistic regulation of material composition and microstructure. Experimental results demonstrated that when the copper content exceeded 1%, the self-corrosion potential of the grinding ball increased to -0.454 V with significant reduction in corrosion current density, indicating markedly improved corrosion resistance. Meanwhile, the copper alloying enhanced the impact toughness by 22% while maintaining high hardness of HRC 62. Industrial applications verified that the new grinding ball reduced consumption by 9.5%-12.8% under actual working conditions, demonstrating excellent engineering applicability. This research not only provides new insights for material design of grinding balls in wet grinding environments, but also offers important

基金项目: 国家自然科学基金 (52001304); 安徽省省级科技创新攻坚计划 (202523j08050015); 安徽省科技攻坚计划 (202423i08050036); 安徽省重点研究与开发计划 (2023z04020015)。

收稿日期: 2026-05-11 到初稿, 2026-06-21 收到修订稿。

作者简介: 韩凯歌 (1986-), 女, 工程师, 主要研究方向为物资设备管理、选矿及耐磨材料。电话: 18104588311, E-mail: 18104588311@163.com

引用格式: 韩凯歌, 刘金浪, 沈茂林, 等. 基于失效机理分析的耐蚀抗磨高铬铜铸铁磨球开发 [J]. 铸造, 2026, 75 (8): 862-868.

Han Kaige, Liu Jinlang, Shen Maolin, et al. Development of corrosion-resistant and wear-resistant high chromium copper cast iron grinding balls based on failure mechanism analysis [J]. Foundry, 2026, 75 (8): 862-868.

guidance for improving the service performance of wear-resistant materials.

Key words: high chromium cast iron; wet grinding; corrosion-wear; copper alloying; grinding media; wear resistance; corrosion resistance; microstructure; alloy design

耐磨材料作为矿山、水泥等行业的“工业粮食”，其核心地位不言而喻。其中，球磨机用研磨介质（磨球）因消耗量巨大，其性能优化一直是研究热点。高铬铸铁凭借其卓越的耐磨性，已成为制造磨球的主流材料^[1-4]。研究表明，通过优化铬含量并结合油淬等热处理工艺，可在保证同等力学性能的前提下，显著降低原材料成本。

然而，在湿法磨矿的苛刻工况下，磨球需同时承受物料冲击、磨粒磨损与介质腐蚀的多重作用，其失效是机械磨损与电化学腐蚀协同作用的复杂过程^[5]。尽管高铬铸铁应用广泛，但在强腐蚀性介质中，普通高铬铸铁磨球常出现磨耗剧增、寿命骤降的异常失效现象。这一问题的核心在于，现有材料在长期冲击载荷与腐蚀介质协同作用下的组织演变规律及失效机理尚不明确，严重制约了生产效率并增加了成本。

针对这一挑战，通过合金化手段提升材料的综合性能是重要研究方向^[6-9]。高铬铸铁的性能与碳化物的数量、尺寸、形态及基体组织密切相关。已有研究表明，通过变质处理、热处理及添加Mo、Nb和Mn等元素，可有效细化碳化物，改善基体韧性^[10-11]。而引入Ni、Cu等元素则有望进一步提升基体耐腐蚀性能^[11-14]，然而，目前关于铜合金化对高铬铸铁磨球组织演变及腐蚀磨损性能影响的系统性研究仍显不足，尤其是基于实际工况失效机理反向指导铜合金化磨球材料设计的研究更是鲜有报道。

基于此，本课题通过系统的试验研究与理论分析，旨在深入解析湿式磨矿工况下磨球的失效行为，揭示铜合金化对高铬铸铁组织与性能的影响机制，致力于开发出一种综合性能优良的新型研磨介质，以解决湿式磨矿中腐蚀磨损严重的问题，为耐磨材料的合金设计提供新的思路与方法，具有重要的理论意义和工程应用价值。

1 试验材料及方法

本研究采用的试验材料包括两类磨球样本：一类是从铜冶炼炉渣工业现场获取的异常磨损状态普通高铬铸铁磨球（如图1所示），用于失效机理分析；另一类是基于普通高铬铸铁磨球合金体系（即Fe-2.2C-10Cr-0.5Si-0.4Mn，质量分数，下同）的铜合金化改性高铬铜铸铁磨球（含铜量分别为0、0.77%、1.36%和1.98%），用于性能对比研究，其中两种磨球均为直径60 mm的铸铁磨球。



图1 工业用磨球异常磨损态形貌

Fig. 1 Surface morphology of an abnormally worn industrial grinding ball

新开发磨球采用铁模覆砂铸造工艺制备。熔炼过程中使用中频感应电炉，严格控制熔炼温度和合金元素添加顺序，浇注温度控制在1 450~1 480 ℃。热处理工艺包括980 ℃保温1.5 h的固溶处理，专用淬火液冷却，以及260 ℃保温2 h的低温回火处理。通过热力学计算优化了不同铜含量下的热处理参数，确保铜元素的充分固溶和碳化物的合理分布。

显微组织分析试样从磨球心部线切割获取，经研磨抛光后使用4%硝酸酒精溶液腐蚀。采用光学显微镜（Carl Zeiss AX10）和场发射扫描电镜（Siron2000）观察显微组织，配合能谱分析（EDS）进行微区成分分析。为分析腐蚀产物，对部分试样表面进行镀镍保护处理。

力学性能测试包括冲击韧性和硬度测试。冲击韧性依据标准GB/T 229—2020使用摆锤冲击试验机测试，冲击试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm，所有试样均从磨球本体上，沿通过浇口中心与球心方向的剖面线切割抽取标准无缺口试样。硬度测试采用HRS-150型数显洛氏硬度计测量磨球心部硬度（设备标称150 kgf保压5 s），HV-1000A显微硬度计（设备标称200 gfg保压10 s）测量基体显微硬度。

实际铜冶炼炉渣工业现场腐蚀环境呈现微弱碱性，考虑到实际工况一定的Cl⁻离子特征，耐腐蚀性能采用三电极CHI 760E电化学工作站，在3.5% NaCl水溶液中进行相关电化学测试。对比电极为Pt丝，参比电极为饱和甘汞电极（SCE），工作电极为待测高铬铸铁样品，样品截面尺寸为10 mm×10 mm，背面连接导线，经冷镶嵌后机械研磨抛光。工作电极在3.5%的NaCl溶液中浸泡0.5 h并测得开路电位，在开路电位-0.5 V~+1.25 V，扫描速率1.667 mV·s⁻¹下进行动电位极化测试。

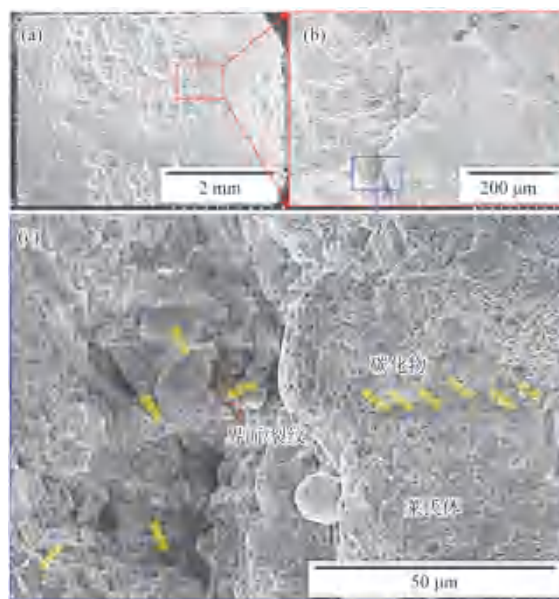
失效分析重点研究了磨球表面凹坑的形成机制，

通过面扫描和线扫描技术分析元素分布特征，并对腐蚀产物进行成分鉴定。所有测试均按照标准方法进行，每组试验重复三次以确保数据可靠性。

2 普通高铬铸铁磨球的失效机理分析

异常磨损态磨球表面凹坑的微观形貌特征如图2所示。宏观上看，凹坑由许多深浅不一的圆形小坑聚集而成，小坑直径为数十至数百微米，如图2(a)所示。局部放大后可以看到，凹坑边缘有明显的裂纹和沟壑，沟壑底部有深裂纹延伸至基体内部，如图2(b)和(c)所示。凹坑周围的区域非常平坦，几乎看不到裂纹，仅有大量细小的点状小孔，孔径约几微米，与二次碳化物的尺寸相近。因此，这些点状小孔为研磨过程中二次碳化物颗粒脱落形成。

为了进一步了解凹坑的形成原因，将异常磨损态磨球表面镀镍处理（防止金相研磨制样过程中对表层组织的损坏）后，分别采用光学显微镜及扫描电镜对凹坑附近的组织进行了准原位观察，结果如图3和4所示。



(a)、(b)和(c)依次为局部放大形貌

图2 磨球表面凹坑的形貌特征

Fig. 2 SEM morphology of the corrosion pit on the grinding ball surface

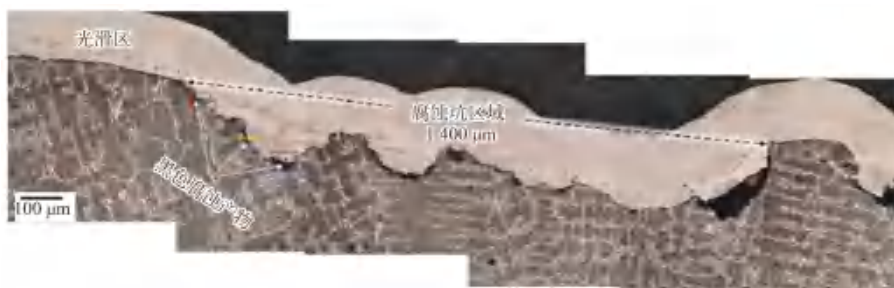
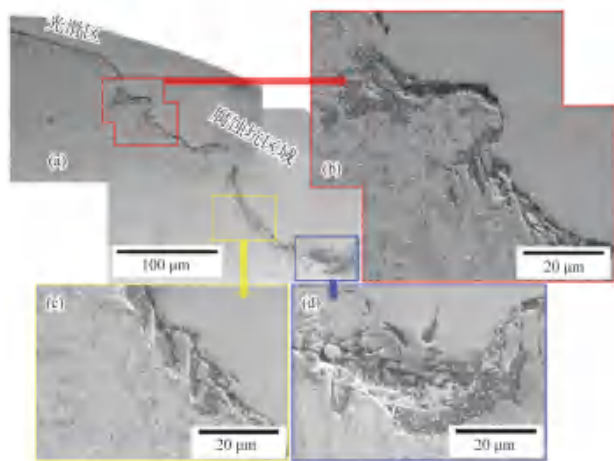


图3 磨球腐蚀坑的截面金相组织

Fig. 3 Cross-sectional metallography of the grinding ball corrosion pit



(a) 低倍截面形貌；(b)~(d) 分别为局部放大形貌

图4 磨球腐蚀坑的截面SEM显微照片

Fig. 4 Cross-sectional SEM micrographs of the grinding ball corrosion pit

由图3可以看出，凹坑底部与光滑区域的组织没有明显差别，但在凹坑底部的小坑表面均有黑色物质存在，而其他相对平坦的区域则无。根据图4，小坑表面有很多已经碎断的共晶碳化物以及虽未碎断但已经与基体分离的共晶碳化物。碎断碳化物周围的基体组织呈黑色，与其他地方的基体颜色明显不同。后续分析证明，该黑色组织为基体腐蚀后的产物。由此可以推断，凹坑的形成是由于裂纹引起剥落，剥落处的基体优先腐蚀，碳化物因此失去支撑而很容易被磨粒撞断。另一方面，基体因失去硬质相而快速磨损，从而在磨球表面部分区域产生磨损与腐蚀相互促进的耦合过程，导致凹坑形成。

对磨球凹坑附近的显微组织进行更进一步的能谱分析，如图5所示。结果显示，黑色组织主要分布于宏观磨损凹坑底部以及其附近的共晶碳化物与基体界面

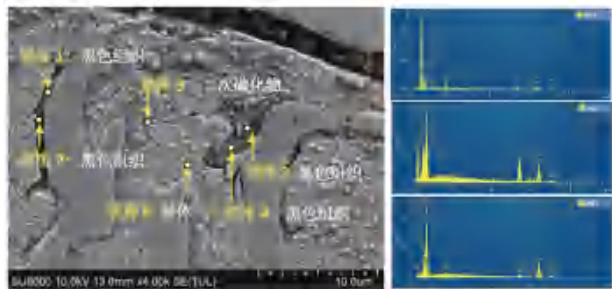


图5 磨球腐蚀坑附近微区组织的能谱分析结果
Fig. 5 EDS spectra corresponding to the microstructure near the grinding ball corrosion pit

表1 试样不同区域的EDS分析结果
Tab. 1 EDS analysis results of different areas in the specimen

分析区域	O	C	Cr	Na	S	Si	Fe	备注
谱图1	19.42	4.28	24.50		1.65		余量	
谱图2	25.57	5.99	17.91	0.65	1.95	1.95		黑色组织
谱图3	34.66	3.54	15.14	0.78	2.00	2.80		
谱图4	20.89	4.50	8.19		0.52	2.14		
谱图5		9.58	32.49				余量	二次碳化物
谱图6		2.41	4.40			0.79	余量	基体区域

结合处，且黑色腐蚀产物主要沿着碳化物与基体界面向磨球内部延伸。试样不同区域的EDS分析结果如表1所示。通过对比分析基体、共晶碳化物及黑色组织处的能谱发现：黑色组织中含有较高含量的O元素，表明黑色组织为Fe、Cr等腐蚀产物，同时检测到微量的Na、S和Si等元素。对界面处的腐蚀产物进行了能谱的线、面扫分析，如图6所示，界面区域高度富集了O、Cr元素。线扫结果证明O和Cr在黑色区域的峰值重合，值得注意的是，在黑色组织近基体侧出现明显Cr含量的最低值，即界面处存在贫铬区，如图中蓝色箭头所示。

鉴于黑色腐蚀产物主要分布在共晶碳化物周围，且这些共晶碳化物多数已经发生断裂，因此判定，黑色腐蚀产物在共晶碳化物断裂、碳化物与基体界面的贫铬区两者共同驱使下形成。即一方面由于实际工况下，磨粒的冲击和磨损作用导致碳化物发生破碎，腐蚀介质沿着破碎后的孔隙、微裂纹渗入造成磨损内部腐蚀。另一方面，碳化物与基体界面的贫铬区进一步促使腐蚀沿着界面进行。这种磨损与腐蚀的同步交替现象，共同促使磨球的腐蚀失效，使得碳化物周围的材料不断发生腐蚀剥离，最终形成尺寸较大的凹坑。

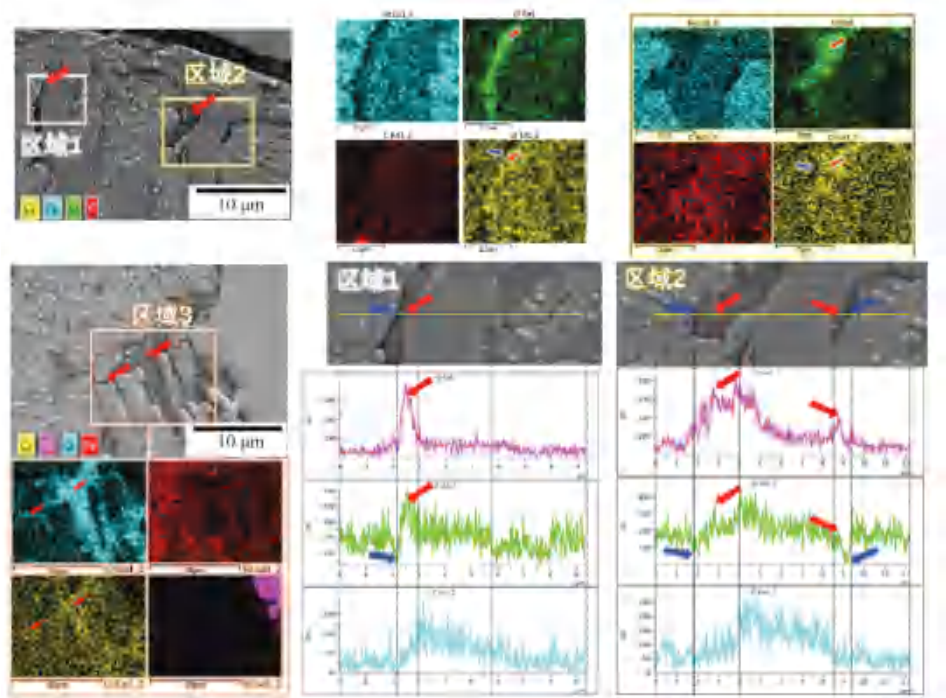


图6 元素的面分布图及线扫分析结果
Fig. 6 EDS mapping and line scanning results of the elements

3 耐蚀抗磨高铬铜铸铁磨球开发与应用

通过热力学计算（由北京科技大学工程技术研究

院提供Thermo-Calc热力学计算平台支持）研究了铜合金化对高铬铸铁相变行为的影响，如图7所示。高铬铸铁磨球在高温（1 000 ℃左右）下主要由奥氏体和M₇C₃型共晶碳化物组成。随着Cu添加量越高，富铜相析出

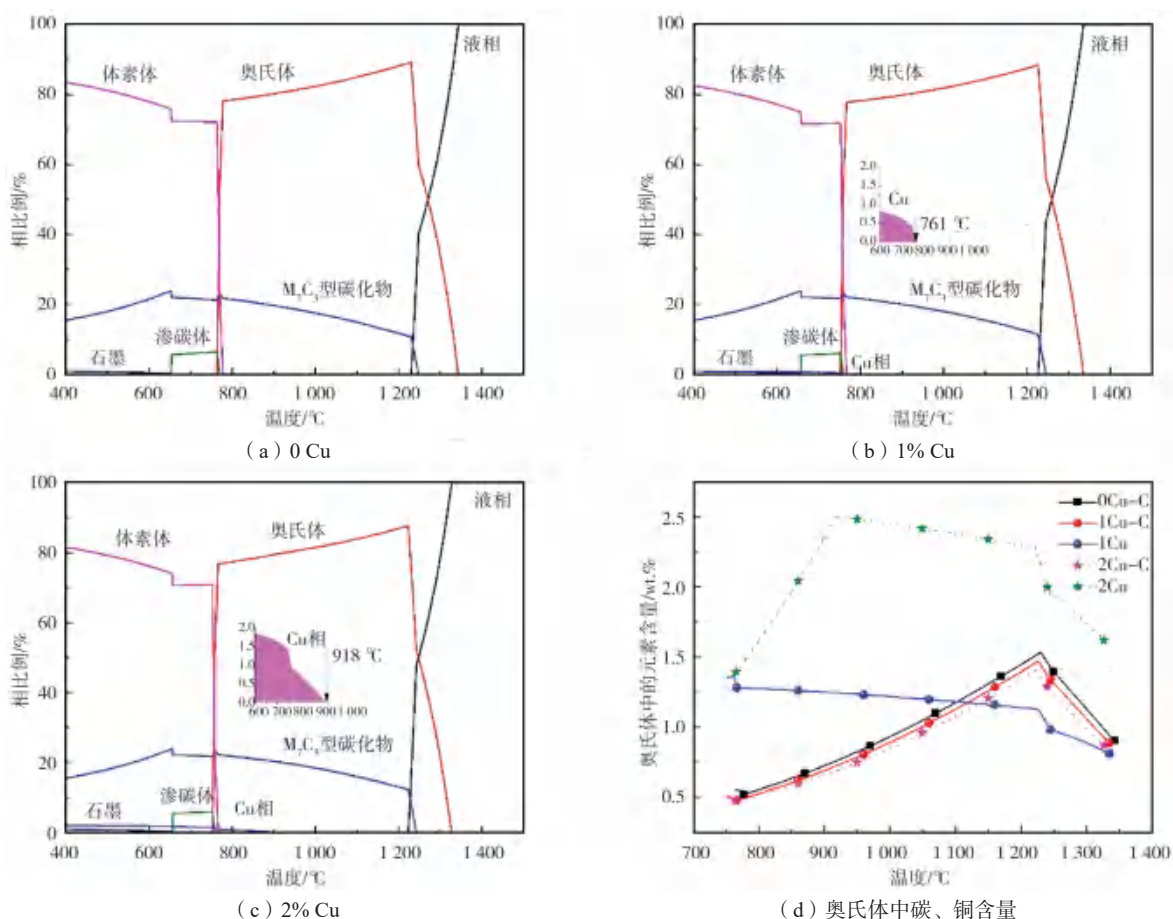


图7 不同铜含量高铬铸铁的热力学计算结果

Fig. 7 Thermodynamic calculation results for high chromium cast irons with different Cu contents

温度越高：含铜2%高铬铸铁奥氏体中，平衡固溶态的析出温度为918 °C，而1%含铜高铬铸铁奥氏体的平衡固溶析出温度则为761 °C。高铬铸铁磨球在冷却过程中，高温奥氏体往往发生转变成莱氏体，同时冷却状态或热处理方式的不同将会影响莱氏体内的基体组织，如珠光体、淬火及回火马氏体等。

奥氏体内的元素含量会对后续转变相的硬度、韧性甚至耐腐蚀性产生影响，因此对比了不同铜添加量下奥氏体中固溶碳元素的理论变化情况。结果表明：铜的添加，降低了相同温度下的奥氏体固溶碳含量，而固溶铜含量与磨球铜添加量正相关。随着奥氏体化温度的提升，奥氏体中固溶碳含量不断提升， M_7C_3 型共晶碳化物比例降低。对于2%铜合金化磨球而言，在铜析出温度918 °C之前，奥氏体铜合金含量随温度逐渐升高，直至完全固溶温度。理论计算的结果有助于热处理工艺的优化设计，如对于磨球固溶淬火温度的选择，需要综合考虑Cr、Cu和C等元素充分的固溶，避免因温度不合适而影响后续奥氏体转变产物的硬度、耐腐蚀性等性能。

为验证高铬铸铁磨球铜合金化后的显微组织及耐

腐蚀性差异，基于工业生产线制备了四种不同铜含量（0、0.77%、1.36%、1.98%）的磨球，并分别标记为0Cu、0.77Cu、1.36Cu、1.98Cu样品。磨球经热处理制备淬火态和淬火回火态样品，其中高温固溶温度为980 °C保温1.5 h，回火温度采用260 °C保温2 h。取1.98Cu样品进行铸态、固溶淬火态和回火态的显微组织观察，如图8所示。

磨球显微组织由高温奥氏体转变产物以及 M_7C_3 型共晶碳化物组成。三种状态的磨球主要差别在于原奥氏体转变产物的差异，分别为珠光体、过饱和碳马氏体组织及回火马氏体。在硝酸酒精腐蚀后的金相中，共晶碳化物（亮白色）、淬火马氏体（黄白色）、回火马氏体（浅灰色）和珠光体（深褐色）表现为依次降低的耐腐蚀特性，这与珠光体的大量片层、回火马氏体中大量二次碳化物析出增加了大量界面相一致。

考虑到淬火态磨球，铜含量全部固溶在磨球基体中，对比不同铜合金化磨球样品的动电位极化曲线，如图9所示。0Cu磨球自腐蚀电位最低，自腐蚀电流密度最大，耐腐蚀性差。0.77Cu磨球的自腐蚀电位略高于0Cu磨球，但明显低于1.36Cu及1.98Cu磨球。随着

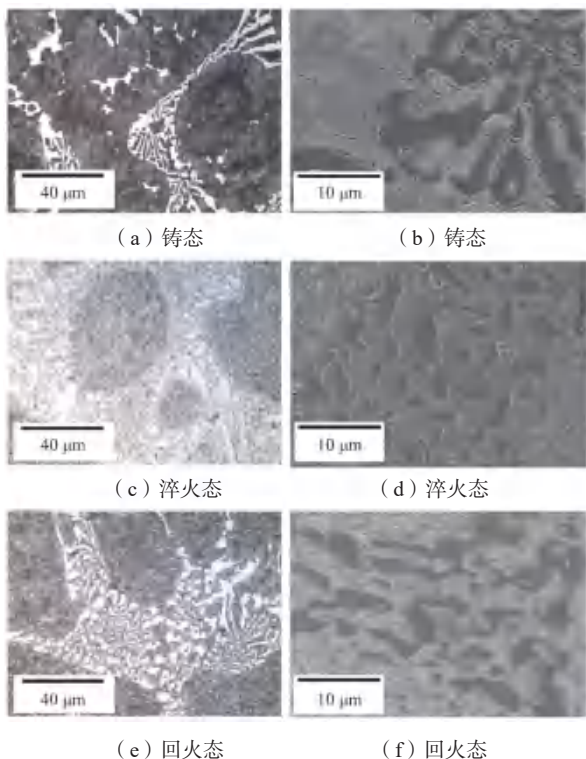


图8 1.98Cu磨球不同状态的显微组织金相及SEM图

Fig. 8 Optical and SEM micrographs of the 1.98Cu grinding ball under different conditions

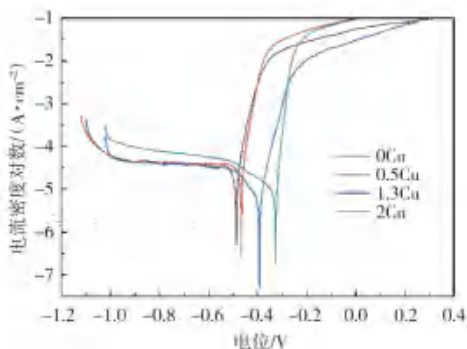


图9 铜合金化磨球的动电位极化曲线

Fig. 9 Potentiodynamic polarization curves of the Cu-alloyed grinding balls

铜含量的添加,磨球的自腐蚀电位不断提升,当铜合金含量大于1%时,电位提升尤为明显,且自腐蚀电流较小,表明铜合金化对改善材料耐腐蚀性具有积极作用。

为验证铜合金化磨球在真实服役状态的使用效应,采用企业连续式分段加热保温等热处理方式批量生产了直径60 mm的1.36%铜合金化磨球作为工程验证样品。表2为普通磨球和耐蚀抗磨高铬铜磨球冲击韧性、芯部硬度、基体显微硬度对比结果。

结果表明,铜合金化降低了回火态磨球基体(回火马氏体)的显微硬度,但并不影响磨球洛氏硬度。结合图7(d)中奥氏体固溶碳元素随铜合金化而降低

表2 不同状态下磨球的性能

Tab. 2 Properties of the grinding balls in various states

类型/ $\Phi 60$ mm	状态	冲击韧性/ ($J \cdot cm^{-2}$)	芯部硬度 HRC	基体显微 硬度HV
耐蚀抗磨高铬 铜磨球	铸态	3.5	52	510.8
	回火态	5.5	62	720.8
普通磨球	铸态	3.3	52	529.8
	回火态	4.5	62	755.1

现象分析,铜合金化磨球高温奥氏体相变产物——马氏体拥有更低的碳含量,进而导致其基体硬度略低于普通磨球马氏体基体,这有利于提高基体韧性。而磨球洛氏硬度除与基体相有关外,还与 M_7C_3 型共晶碳化物、二次碳化物等有关,并未出现明显降低。

目前该新产品已经在多地矿业公司进行了工业试验。应用结果表明,与普通高铬磨球相比,新产品在湿式磨矿工况下的磨耗降低了9.5%~12.8%。这一改善主要归因于铜合金化带来的耐腐蚀性能和冲击韧性的同步提升。这一结果验证了基于失效机理分析进行材料设计的有效性,为类似工况下的磨球选材提供了重要参考。

5 结论

通过系统的失效机理分析,为解决湿式磨矿工况下磨球的腐蚀磨损问题提供了有效方案,同时结合材料设计优化,成功开发出新型耐蚀抗磨高铬铜铸铁磨球,主要结论如下。

(1) 揭示了湿法磨矿工况下普通高铬铸铁磨球的失效机制。研究表明,磨球表面凹坑的形成是磨损与腐蚀耦合作用的结果,其中基体微裂纹扩展、共晶碳化物断裂以及界面贫铬区的产生是导致早期失效的关键因素。能谱分析证实腐蚀产物中含有丰富的氧、铬、铁等元素,界面处存在的贫铬区显著加速了腐蚀进程。

(2) 通过对铜合金化淬火态磨球的极化曲线对比研究,表明随铜含量的添加,磨球的自腐蚀电位不断提升,当铜合金含量大于1%时,电位提升尤为明显,且自腐蚀电流较小。

(3) 相对普通无铜合金化磨球,铜合金化磨球在保持磨球高硬度($\geq HRC62$)的同时,拥有良好的冲击韧性 $5.5 J/cm^2$ 。这归因于铜元素降低了奥氏体固溶碳含量,优化了马氏体组织的韧性特征。

(4) 新型磨球在多个矿业公司的工业试验表明,其磨耗较普通高铬磨球降低9.5%~12.8%,表现出优异的工程适用性。

参考文献:

- [1] Kaya S, Yılan F, Urtekin L. Influences of Cr on the microstructural, wear and mechanical performance of high-chromium white cast iron grinding balls [J]. *Journal of Materials and Manufacturing*, 2022, 1 (1): 23–30.
- [2] 段艳刚. 回火温度对Cr23高铬合金铸铁组织性能的影响 [J]. *铸造*, 2025, 74 (11): 1496–1501.
- [3] 袁志钟, 刘海明, 鞠玉琳, 等. 亚临界热处理对高铬铸铁组织及性能的影响 [J]. *金属热处理*, 2024, 49 (10): 1–7.
- [4] 高畅, 张少云, 陈琨, 等. 淬火温度对多元亚共晶高铬铸铁显微组织和性能的影响 [J]. *铸造*, 2025, 74 (9): 1172–1180.
- [5] Matsanga N, Nheta W, Chimwani N. A review of the grinding media in ball mills for mineral processing [J]. *Minerals*, 2023, 13 (11): 1373.
- [6] Fashu S, Trabadelo V. Development and performance of high chromium white cast irons (HCWCIs) for wear-corrosive environments: a critical review [J]. *Metals*, 2023, 13 (11): 1831.
- [7] 李嗣洋, 成小乐, 张京兵, 等. 合金化提高高铬铸铁耐磨性研究进展 [J]. *中国铸造装备与技术*, 2024, 59 (6): 11–19.
- [8] 任姗姗, 林纪海, 戴航, 等. Mo含量及热处理对高铬铸铁组织与耐磨性的影响 [J/OL]. *材料热处理学报* [2026-06-21]. <https://doi.org/10.13289/j.issn.1009-6264.2025-0311>.
- [9] 方伟, 尹振兴, 陶修坤, 等. 成分及热处理对高铬铸铁组织与性能的综合影响 [J]. *材料热处理学报*, 2025, 46 (12): 204–214.
- [10] Touhami R C, Mechachti S, Bouhamla K, et al. Wear behavior and microstructure changes of a high chromium cast iron: the combined effect of heat treatment and alloying elements [J]. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2023, 12 (4): 580–590.
- [11] Gong L, Fu H, Zhi X. Corrosion wear of hypereutectic high chromium cast iron: a review [J]. *Metals*, 2023, 13 (2): 308.
- [12] 杨惠云, 方琪, 孙伟, 等. 含铜钢中铜偏聚的研究现状及发展 [J]. *热加工工艺*, 2024, 53 (21): 22–26.
- [13] 陈礼清, 刁小慧. 低碳低合金及含铜海洋工程用钢的研究及其发展 [J]. *轧钢*, 2023, 40 (1): 1–11.
- [14] 许镇, 陈旋, 吴晓春. 回火工艺对含铜塑料模具钢在中性氯化钠溶液中腐蚀行为的影响 [J]. *材料导报*, 2022, 36 (20): 209–216.