

显微组织对 CADI 磨球冲击磨损性能的影响

赖伟基^{1,2}, 李 杰^{1,2}, 郑宝超^{1,2}, 涂小慧^{1,2}, 李 卫^{1,2}

(1. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632; 2. 暨南大学高性能金属耐磨材料技术国家地方联合工程研究中心, 广东广州 510632)

摘要: 采用油淬+空气等温热处理工艺制备CADI磨球, 利用不同的油淬时间获得组织不同的CADI磨球。使用OM、SEM、XRD和冲击磨料磨损试验机研究了显微组织对CADI冲击磨损性能的影响。结果表明: 采用短时油淬时, CADI磨球的基体组织主要为下贝氏体; 而长时间油淬时, CADI磨球基体形成了马氏体。在冲击功为1.2 J的冲击磨料磨损试验中, 马氏体CADI试样在初始阶段耐磨性较好; 随着时间的延长, 磨损失重越来越大, 超过贝氏体为主的CADI试样。冲击磨损过程中, 试样会产生形变层, 形变层内石墨球和基体的界面处会产生较大应力集中; 当组织韧性不足时, 裂纹极易从石墨球和基体的界面处萌生和扩展, 导致耐磨性下降。

关键词: CADI磨球; 油淬; 马氏体; 冲击磨料磨损; 石墨球; 应力集中

作者简介:

赖伟基 (1992-), 男, 硕士生, 主要从事金属耐磨材料研究。E-mail: 1219604282@qq.com

通讯作者:

涂小慧, 男, 教授, 博士, 硕士生导师。电话: 020-85223562, E-mail: 3162510484@qq.com; 李卫, 男, 教授, 博士生导师, 电话: 020-85222167, E-mail: lwxasn@sohu.com

中图分类号: TG143.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)04-0325-07

基金项目:

国家重点研发计划资助(2017YFB0305100); 广东省科技计划项目(2015A040404023 2014B090907005, 2017B090903005); 广东省自然科学基金项目(2018030310035); 广州市科技计划项目(201806040006)。

收稿日期:

2018-09-20 收到初稿,
2018-11-05 收到修订稿。

含碳化物等温淬火球墨铸铁CADI (Carbide Austempered Ductile Iron), 是近几年发展起来的一种高耐磨性的球墨铸铁, 具有较高的强度和抗冲击韧性。与目前常规的耐磨金属材料相比, CADI的耐磨性优于常规的锰钢、球墨铸铁, 而成本明显低于高铬铸铁^[1-5], 其铸造磨球在冶金、矿山等行业大型磨机中得到较广泛应用。CADI的热处理工艺通常采用工艺稳定性好, 等温温度易于控制的盐浴等温热处理, 有利于产品质量稳定。但是盐浴等温处理对环境危害较大, 生产线投资成本较高。为此, 行业内尝试采用油淬+连续回火炉空气中等温处理的方法替代盐浴等温处理来生产CADI铸球^[6]。目前, 对采用油淬+空气中等温处理获得的CADI组织和性能的研究报道还较少。本试验通过控制油淬时间使磨球淬火至不同温度, 出油后在空气热处理炉中等温, 获得不同基体组织的CADI磨球试样, 研究显微组织对CADI磨球冲击磨料磨损耐磨性能的影响。

1 材料制备与方法

采用1 t中频感应电炉进行CADI球铁的熔炼, 原料主要采用生铁和废钢按照不同比例进行配比。熔炼过程中采用喂丝法球化, 孕育处理孕育剂选用FeSi75, 加入量为1.3%。浇注直径为80 mm的磨球。磨球的化学成分如表1所示。将磨球进行奥氏体化处理后, 分两批进行油淬+连续等温处理。初始油温为80 ℃, 分别采用不同的油淬时间, 将磨球淬火至不同温度后立即出油在空气热处理炉中等温, 工艺参数如表2所示。试样通过线切割的方式获得, 冲击试样尺寸为55 mm × 10 mm × 10 mm (无缺口); 冲击磨料磨损试样的尺寸为10 mm × 10 mm × 40 mm, 磨损面为直径50 mm的弧面, 磨损面取样位置为磨球表面。

采用布洛维光学硬度计对CADI磨球的体积硬度进行检测。根据 GB/T 229 - 2007 对CADI试样进行冲击功检测。磨损试验采用MLD-10冲击磨料磨损试验机, 工作原理如图2所示。冲锤质量为10 kg, 冲击高度为12 mm, 预磨处理需至少冲击1 000次, 每次磨损后试样均用酒精超声清洗、吹干。称重选择在精度为0.001 g的电子天平上

进行, 试验磨料选用粒度为60~80目石英砂。每次试验冲击10 500次, 每进行1 500次冲击后称重1次, 每个试验数据点采集5次并取平均值作为耐磨性表征参数。

磨损试样的硬化层和基体硬度采用数字式显微硬度计测试, 载荷为0.098 N, 在距离磨损面深度约8 μm 区域, 平行于磨损面每间隔30 μm 测试其显微硬度值, 共取30个点, 计算平均值用于表征硬化层的硬度, 采用同样的方法在距离磨损面20 mm深度的显微硬度值用来表征基体硬度。金相试样采用4%硝酸酒精腐蚀, 分别采用金相显微镜、扫描电镜对材料的显微组织进行观察。采用Image Pro Plus软件对CADI试样中的石墨球数和球化等级进行统计。用X射线衍射仪Ultima IV进行物相分析。

2 试验结果与讨论

2.1 CADI的铸态显微组织分析

图2是CADI试样的铸态金相组织。分析结果表明, 石墨级别为7级, 石墨球化级别为3级, 碳化物含量为11.22 vol.%。图3为热处理后试样的显微组织。图3a是M0试样组织, 采用3 min短时油淬+240 $^{\circ}\text{C}$ 空气等温4 h的热处理工艺, 基体组织主要为下贝氏体、碳化物、石墨球和残余奥氏体。由于等淬在较低温度时, 铁原子难以扩散, 因此主要是通过共格切变的方式来实现由面心立方晶体向体心立方晶体的转变, 贝氏体转变的临界形核功减小, 相变的驱动力变大, 导致形核率增加, 同时低温也导致碳原子的扩散速度变慢, 致使组织呈密集的细针状形态^[7-8]。M1试样的基体除了石墨球和碳化物外, 主要是由回火马氏体、残余奥氏体组成。在18 min长时油淬和240 $^{\circ}\text{C}$ 的等温处理过程

表1 CADI磨球的化学成分

Table 1 Chemical composition of CADI grinding balls $w_B/\%$

C	Si	Mn	Cr	Cu	P	S
3.71	2.69	2.23	0.45	0.15	0.05	0.03

表2 CADI磨球热处理工艺

Table 2 Heat treatment process of CADI grinding balls

编号	奥氏体		工艺参数
	温度/ $^{\circ}\text{C}$	时间/h	
M0	880	2.5	3 min短时油淬+箱式炉 240 $^{\circ}\text{C}$ 保温4 h
M1	880	2.5	18 min长时油淬+箱式炉 240 $^{\circ}\text{C}$ 保温4 h

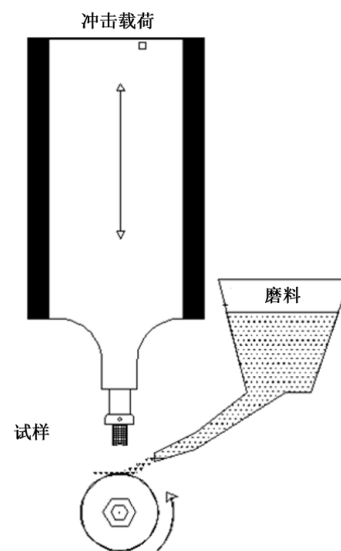
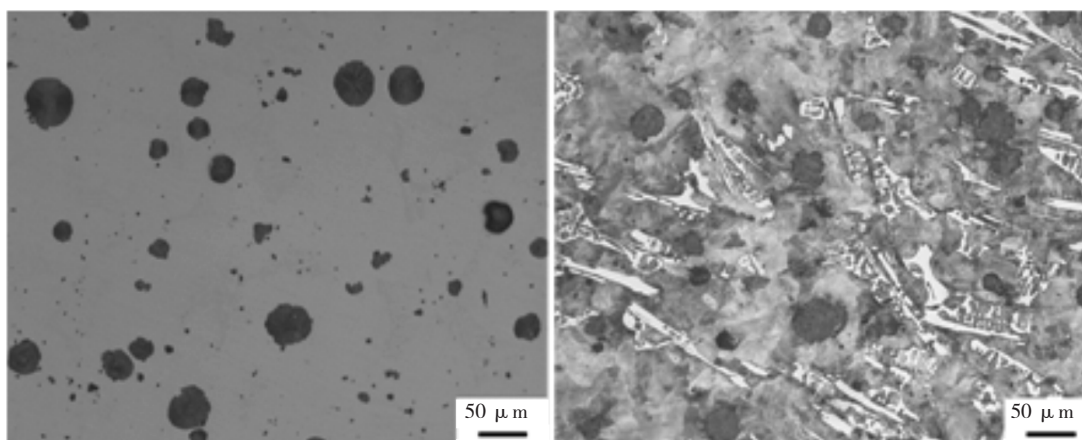


图1 MLD-10冲击磨损试验机示意图

Fig. 1 MLD-10 impact tester schematic diagram



(a) 未腐蚀

(b) 腐蚀

图2 CADI试样铸态组织

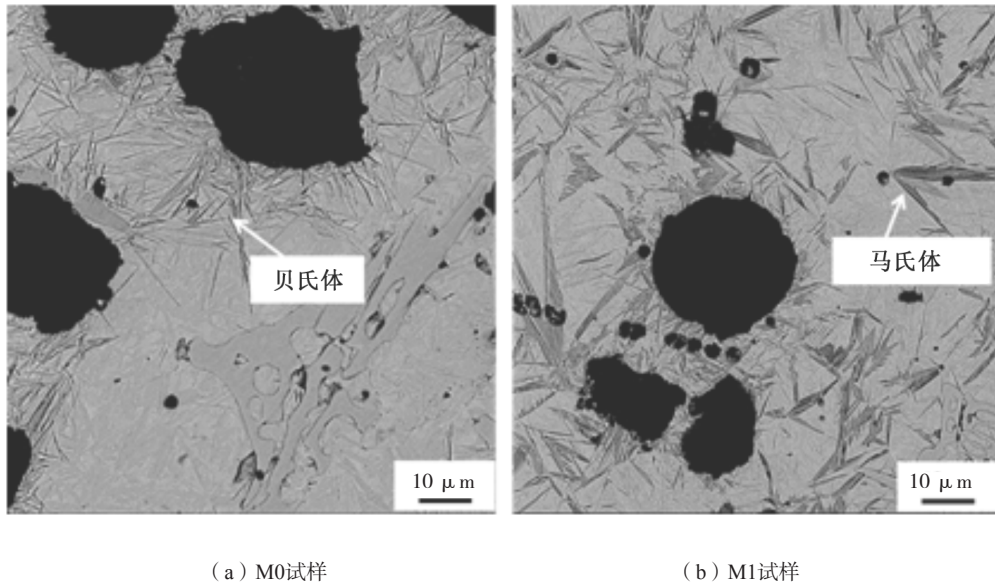
Fig. 2 As-cast microstructures of CADI samples

中, 样品获得足够的冷却速度, 磨球整体温度已经冷却到 M_s 点以下, 奥氏体发生马氏体转变, 随后的等温过程中淬火马氏体组织转变成回火马氏体。XRD的衍射结果(图4)表明两个试样均出现 γ 相, 证实了残余奥氏体的存在。

2.2 力学性能分析

图5为两组磨球的体积硬度(HRC)和冲击功的检测结果。从图中可以看出, 马氏体组织为主的M1试样硬度明显高于M0试样, M1试样硬度达到了HRC 59.0, 而M0试样硬度仅为HRC 53.4。冲击韧性M0试样明显优于M1试样, M0试样冲击功达到了10.0 J, 而M1试样为

5.8 J。图6为冲击后的断口形貌。图6a和图6c分别为M0试样和M1试样石墨与基体界面附近的断口形貌。从图6a中可以看出, 基体存在较多的撕裂岭, 且在石墨球周边有较多的凹坑, 而图6c的断口形貌较为平整, 存在冰川状解理面, 并且存在裂纹扩展至界面处终止的微裂纹。图6b和图6d可以更明显看出两组试样均为脆性断裂, 存在较多短且不连续河流花样, 但图6b中河流状花纹形貌明显短于图6d。从断口形貌可以看出, M0试样的冲击韧性明显优于M1试样。两组试样力学性能差异主要是由于M1中存在回火马氏体, 显著提高了试样的硬度和脆性, 但回火热处理过程中消除了试样中由于淬火导致的内应力, 致使脆性也将略有下降。



(a) M0试样 (b) M1试样

图3 不同油淬时间下CADI试样的显微组织
Fig. 3 Microstructures of CADI samples with different quenching times

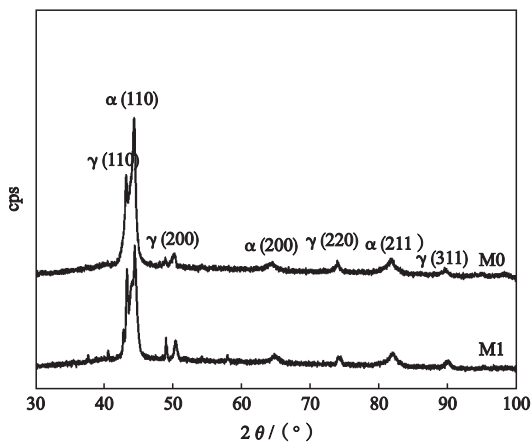


图4 不同油淬时间下CADI试样XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of CADI samples with different quenching times

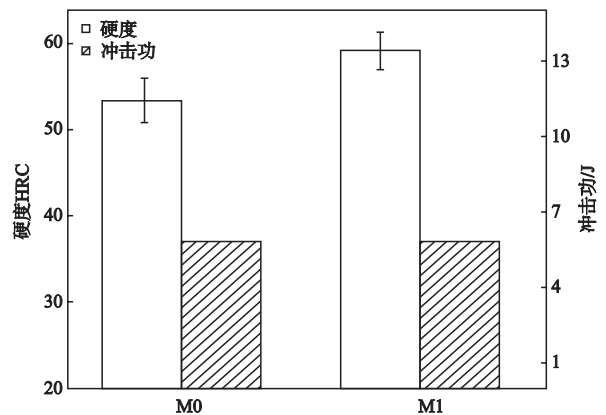
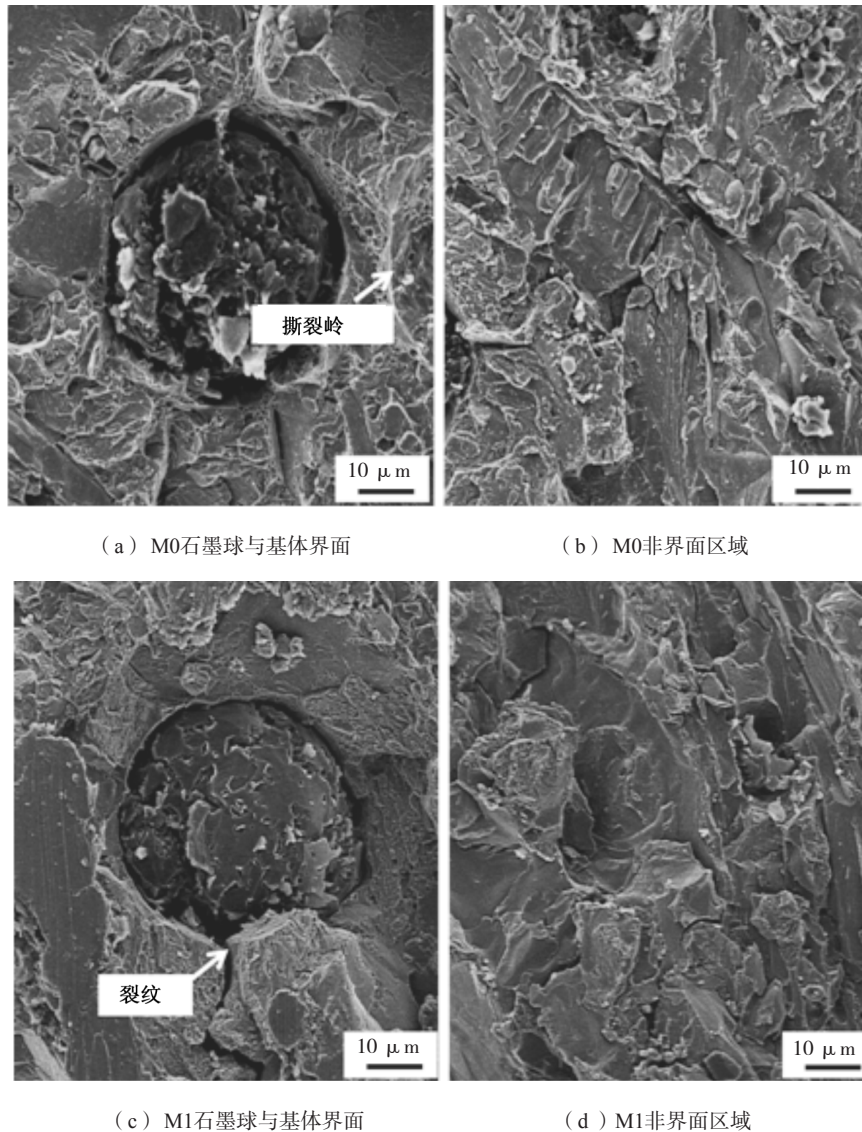


图5 CADI试样硬度和冲击功

Fig. 5 Volume hardness and impact energy of CADI samples



(a) M0石墨球与基体界面

(b) M0非界面区域

(c) M1石墨球与基体界面

(d) M1非界面区域

图6 CADI试样冲击断口形貌

Fig. 6 SEM images of fracture surfaces of CADI samples after impact test

2.3 冲击磨料磨损性能分析

图7是两组试样的重量损失随时间变化的曲线。由于CADI的脆性较大，高的冲击载荷磨损工况下容易导致试样边缘处产生大面积剥落，导致统计上产生误差。因此，选用冲击功为1.2 J，经循环冲击10 500次后，M1试样磨损失重为1.230 1 g，M0试样为1.067 7 g。从图7可以看出，经6 000次的冲击磨料磨损试验后，M1试样的磨损失重高于M0试样；随着磨损时间的延长，两组试样的磨损失重量差异越来越大。由此可见，在长时间的冲击磨料磨损过程中，M0试样的耐磨性优于M1组。

图8为两组试样冲击磨料磨损试验后磨损形貌图。磨损形貌中都存在明显的切削犁沟，这是由于高硬度的磨损介质（ SiO_2 磨料）在高冲击载荷的作用下迅速破

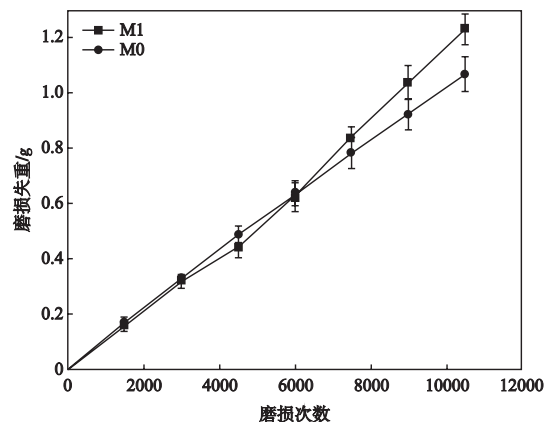
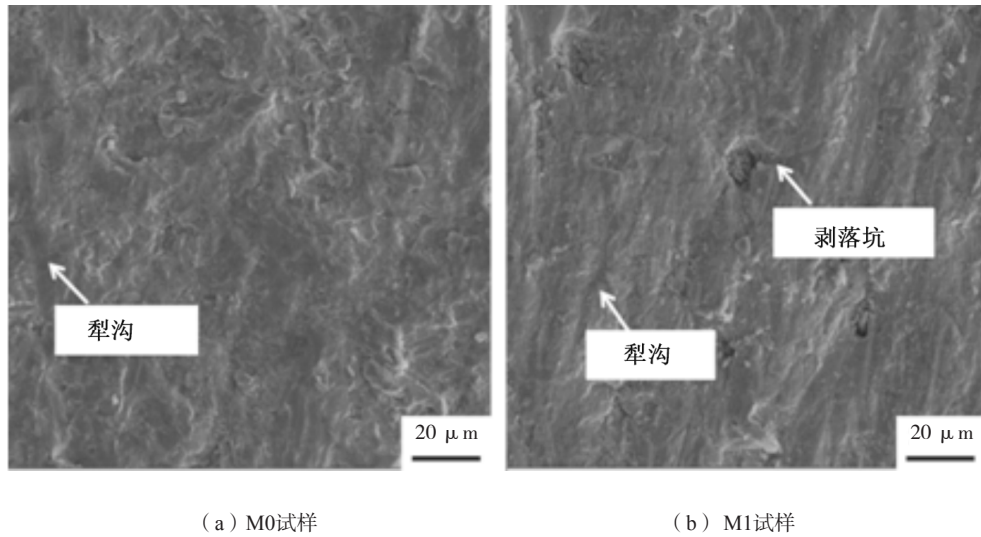


图7 磨损次数对CADI试样磨损失重的影响

Fig. 7 Effect of test cycles on cumulative mass loss of CADI samples



(a) M0试样

(b) M1试样

图8 CADI试样的冲击磨损形貌

Fig. 8 Impact worn surface of CADI sample

入试样表面，并与材料的磨损面发生相对滑动，形成显微切削。微切削是CADI材料在冲击磨损中主要的磨损机制。M1试样在冲击磨损试验的前期表现出较好的耐磨性，主要原因是M1试样中含有硬度较高的马氏体组织，抗磨损性能高。图8b石墨球周边可见明显的剥落坑，这是由于马氏体组织的存在，材料脆性加大，疲劳裂纹容易扩展造成材料剥落，增加试样的磨损失重。

图9为冲击磨损试验后基体和磨痕亚表层的显微硬度。从图9可以看出，冲击磨损试验后，亚表层组织出现了磨损加工硬化现象，两组试样的硬化层的硬度分别可达到HV 872.68和HV 891.26，两者差异并不明显。在冲击磨损试验循环冲击的作用下，CADI表层必然会产生加工硬化现象。形成这种表面硬化现象的原因有很多，但其中最主要的原因有两方面：其一是应变硬化效应，在金属材料发生形变的时候，其内部会积累大量的位错，导致位错密度急剧增大，甚至发生动态再结晶，形成纳米晶，导致材料的硬度显著提升；其二就是基体内部的残余奥氏体发生了形变诱导马氏体相变，从而使得材料的表面硬度提高^[9-12]。加工硬化现象导致材料的强度、硬度提高，从而提高耐磨性能。这也意味着CADI材料在冲击磨损试验过程中，随着磨损时间的延长初始硬度对耐磨性能的影响将减弱。

图10是CADI试样冲击磨损试验后磨损面截面SEM图，图中圆圈内可见石墨球及周围组织发生形变。变形石墨球产生尖角，如图10箭头所示。并且图10c和图10d在尖角处有明显微裂纹。资料证明^[13]，石墨球硬度极低，属于脆性相，可以被认为是基体上的空洞。在冲击载荷的作用下，试样会产生形变层，其中石墨球

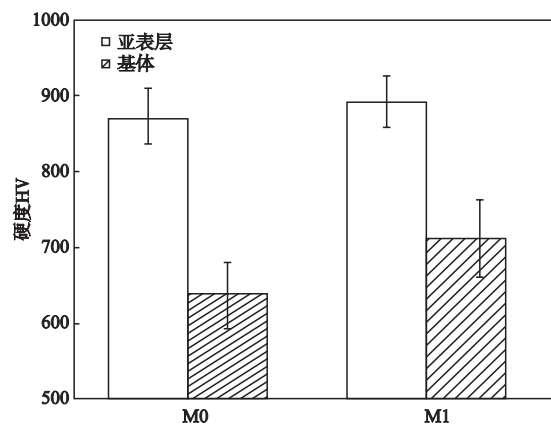
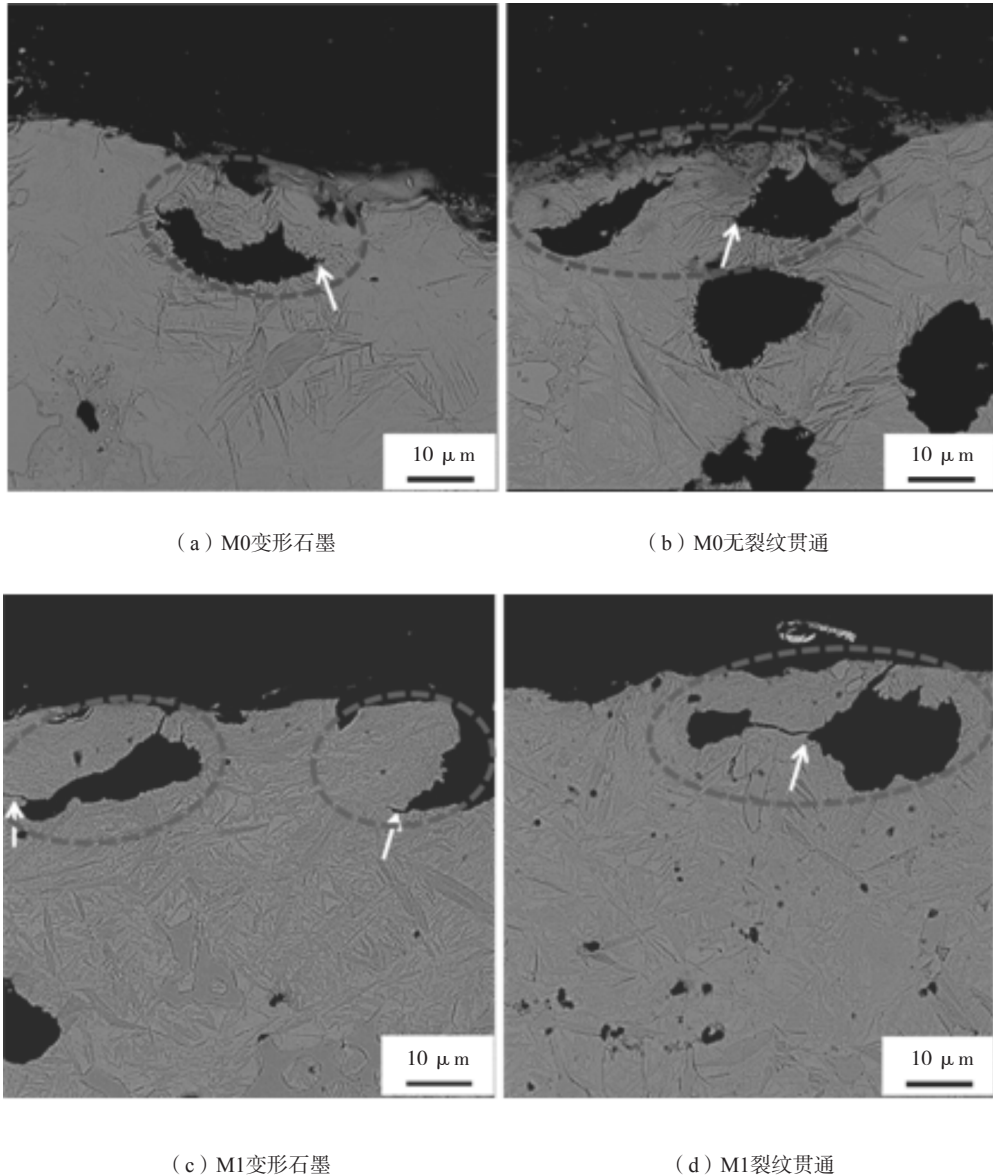


图9 冲击磨损试验后基体和磨痕亚表层的显微硬度

Fig. 9 Micro-hardness of matrix and worn scar subsurface after impact wear test

所在区域变形更为剧烈并出现尖角，尖角处产生较大应力集中。对于M0试样，基体主要为下贝氏体，其强度和硬度均较高，石墨球被下贝氏体包围时，能有效抑制石墨与基体界面裂纹的萌生及界面处裂纹向基体的扩展。而M1组试样基体中主要为马氏体，硬度高但脆性大，石墨与基体裂纹较易萌生并且向基体扩展。变形石墨球之间还能相互作用，因为石墨球为裂纹的扩展提供了便捷的扩展通道^[14]。如图10d所示，当石墨球距离较近时，裂纹极易相互贯通，从而导致较大区域的破坏，引起材料剥落，降低材料耐磨性。所以随着冲击磨损时间的延长，基体组织中含有马氏体的CADI试样耐磨性能会低于显微组织为贝氏体的M0试样。



(a) M0变形石墨

(b) M0无裂纹贯通

(c) M1变形石墨

(d) M1裂纹贯通

图10 CADI试样冲击磨损试验后的横截面SEM图

Fig. 10 SEM image of cross-section of CADI samples after impact wear test

3 结论

(1) 采用油淬+空气等温处理可成功制备CADI磨球, 通过调节油淬时间可以获得不同显微组织的CADI磨球。当进行3 min的短时油淬时, 可获得基体以下贝氏体为主的CADI磨球; 而当进行18 min长时油淬时, 可获得硬度较高的含马氏体的CADI磨球。

(2) 在冲击磨料磨损试验中, 显微切削是CADI试样重要的磨损机制。显微组织中含马氏体的CADI试样硬度高, 初期抗磨性能好, 但是脆性较大, 不利

于长时间大冲击的磨损工况。长时间大冲击磨损条件下, 下贝氏体为主的CADI试样耐磨性高于含马氏体的CADI试样。

(3) 在冲击磨损试验中, CADI试样会形成形变层, 石墨球力学强度低, 变形剧烈, 石墨球与基体界面处产生应力集中。对于基体组织主要为马氏体的CADI试样, 形变层内石墨与基体界面处裂纹的过早萌生和快速扩展是导致其磨性能下降的重要原因。

参考文献:

- [1] 刘金海, 叶学贤, 李国禄, 等. ADI和CADI在冶金矿山等行业中的应用及发展前景 [J]. 现代铸铁, 2008, 28 (4): 26-30.
- [2] SAHIN Y, DURAK O. Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron [J]. Materials & design, 2007, 28 (6): 1844-1850.
- [3] 张其飞, 刘兰俊, 祖方遒, 等. 碳化物对CADI硬度和冲击韧度的影响 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (1): 17-19.
- [4] 刘金海, 王昆军, 李国禄, 等. 国内外CADI的发展现状与趋势 [C] //全国铸铁及熔炼学术会议暨机床铸件技术研讨会. 2014.
- [5] LIU J, XIONG P, FU B, et al. Effects of austempering temperature on microstructure and surface residual stress of carbidic austempered ductile iron (CADI) grinding balls [J]. China Foundry, 2018, 15 (3): 173-181.
- [6] 姚永茂, 周健, 陈全心, 等. 两种热处理工艺对CADI铸球力学性能和耐磨性的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (7): 749-753.
- [7] 杨殿魁, 陈平. 奥贝型球铁组织形貌特征 [J]. 现代铸铁, 1999 (3): 43-47.
- [8] 孙玉福, 张婷, 赵靖宇, 等. 等温淬火温度对CADI组织及性能的影响 [J]. 铸造, 2011, 60 (1): 28-31.
- [9] ZHOU N, SONG R, LI X, et al. Dependence of austenite stability and deformation behavior on tempering time in an ultrahigh strength medium Mn TRIP steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 738: 153-162.
- [10] CHEN P, LI Y, LI R, et al. Microstructure, mechanical properties, and wear resistance of VC p-reinforced Fe-matrix composites treated by Q&P process [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2018, 25 (9): 1060-1069.
- [11] 陈欢, 孙新军, 王小江. 晶粒尺寸与应变率对高锰奥氏体钢加工硬化行为的影响 [J]. 金属热处理, 2018, 43 (11): 31-37.
- [12] CHIANG J, LAWRENCE B, BOYD J D, et al. Effect of microstructure on retained austenite stability and work hardening of TRIP steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (13-14): 4516-4521.
- [13] GAO N. Effects of graphite nodules on crack growth behaviour of austempered ductile iron [J]. Powder Metall Thch, 2007, 25: 203.
- [14] LIN C K, LAI P K, SHIH T S. Influence of microstructure on the fatigue properties of austempered ductile irons-I. High-cycle fatigue [J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18 (5): 297-307.

Effect of Microstructure on Impact Wear Resistance of CADI Grinding Balls

LAI Wei-ji^{1,2}, LI Jie^{1,2}, ZHENG Bao-chao^{1,2}, TU Xiao-hui^{1,2}, LI Wei^{1,2}

(1. Institute of Advanced Wear&Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 2. National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

Abstract:

CADI grinding balls were prepared by oil quenching and isothermal treatment in air. The grinding balls with different microstructures were obtained due to the different quenching times in oil medium. The effect of microstructure on impact wear resistance of CADI was investigated using OM, SEM, XRD and impact wear tester. The results showed that the microstructure of CADI grinding balls with a short quenching time mainly consisted of lower bainite, while the matrices of CADI with a long quenching time were mainly composed of martensite. In the impact wear test with the impact energy of 1.2 J, the martensite CADI samples showed the better wear resistance in the early stage of the wear test. As time went on, the wear loss was more and more severe, exceeding CADI samples without martensite. In addition, the samples may form the deformation layers, and the stress concentrators appear at the matrix-graphite nodule interfaces. When the toughness of the materials is insufficient, the cracks easily generate from the matrix-graphite nodule interfaces, resulting in wear performance to be diminished.

Key words:

CADI grinding ball; oil quenching; martensite; impact abrasive wear; graphite nodules; stress concentrator