

湿式弱酸性介质下的高锰钢衬板 腐蚀磨损失效分析

陈胜迁^{1,3}, 郑开宏², 王海艳², 杨昭¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 广州有色金属研究院 金属加工与成型技术研究所, 广东 广州 510650; 3. 张家界航空工业职业技术学院, 湖北 张家界 427000)

摘要:在昆钢大红山铁矿湿磨工况下,开展湿式半自磨机衬板的失效行为研究。采用OM、SEM、EDS、硬度仪等手段分析了失效衬板组织特征,并讨论了衬板材料在弱酸工况的腐蚀磨损机理。结果表明:失效衬板表面主要以切削犁沟、腐蚀坑和裂纹为主。高锰钢表面硬度低、加工硬化效果不明显及腐蚀磨损的交互作用是导致衬板失效的主要原因。

关键词:高锰钢;弱酸性;腐蚀磨损;失效分析

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.06.044

中图分类号: TG113

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2016)06-0159-04

Analysis on Corrosion and Wear Failure of High Manganese Steel Lining Plate Under Wet Weak Acidic Medium

CHEN Shengqian^{1,3}, ZHENG Kaihong², WANG Haiyan², YANG Zhao¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Institute of Metal Processing and Molding Technology, Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals, Guangzhou 510650, China; 3. Zhangjiajie Institute of Aeronautical Engineering, Zhangjiajie 427000, China)

Abstract: The failure behavior of wet type semi self-mill lining plate was researched under the condition of Kun-steel Dahong mountain iron mine wet grinding. The microstructure feature of failure lining plate was analyzed by OM, SEM, EDS, hardness tester and other modern analysis methods. The corrosive wear mechanism of lining plate material in weak acid condition was discussed. The results show that the surface of failure lining plate mainly contains cutting furrow, corrosion pits and cracks. The interaction of low surface hardness of high manganese steel, unobvious hardening effect and corrosion wear are the main reasons for leading to the failure of lining plate.

Key words: high manganese steel; weak acidic; corrosive wear; failure analysis

高锰钢具有较高的耐冲击性和加工硬化能力,是一种良好的耐磨材料,广泛用于矿山、建材、火电等领域。目前我国的湿式半自磨机衬板材料主要选用高锰钢,在湿磨工况下,高锰钢衬板不仅受到矿石和磨球的冲击磨损,还不断受到矿浆的腐蚀,服役环境恶劣,导致衬板的寿命大幅降低,通常不到半年的

时间就需要更换,生产成本较高^[4]。因此,开展衬板在湿磨工况下的失效分析,对湿式半自磨机衬板材料的改善或替代具有重要意义,但目前有关钢铁耐磨材料在湿式腐蚀磨损工况下的耐磨耐蚀性研究鲜有报道。鉴于此,本文以昆钢大红山铁矿厂的半自磨机衬板为研究对象,通过分析其失效行为,研究高锰钢衬板在弱酸性湿磨工况下的腐蚀磨损行为,为提高衬板的使用寿命及合理选材提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 衬板的使用工况

昆钢大红山铁矿所采用的半自磨机规格为 $\phi 8.53 \text{ m} \times 4.27 \text{ m}$,工作转速 10.9 r/min,添加的磨球为 $\phi 180 \text{ mm}$ 的钢球。

矿石进入半自磨机时颗粒度约为 250 mm,自磨

收稿日期: 2015-10-22

基金项目: 广东省专业镇中小微企业服务平台建设项目资助(2013B0916-01005, 2013B091601004); 广东省公益研究与能力建设专项(2015B070701026); 广东省产学研合作项目(2015B090906014); 广东省应用型科技研发专项(2015B090926009); 广州市协同创新重大专项项目资助(201508010061)

作者简介: 陈胜迁(1985-),男,湖南张家界人,硕士; 电话: 15274423570; E-mail: dzsrschen@163.com

通讯作者: 郑开宏(1967-),男,教授级高工,博士; E-mail: 13602721690@163.com

完成后矿石颗粒度小于 6 mm。半自磨机内的矿浆浓度约为 82wt%，pH 值为 6~7，矿浆温度小于 50℃。原铁矿物相分析结果见表 1。

表 1 原铁矿物相分析(质量分数,%)
Tab.1 Phase analysis of raw ore (wt%)

相别	磁铁矿 ^a	赤褐铁矿 ^a	假象赤铁矿 ^a	黄铁矿 ^a	硅酸铁	碳酸铁
含铁	24.60	12.50	0.46	0.06	0.54	1.00

1.2 试验步骤

试样取自拆卸的磨损衬板，先用自来水冲洗干净，然后从磨损衬板的表面切割 200 mm×200 mm 的大块试样，涂上黄油保护，再通过线切割加工成 10 mm×10 mm×30 mm 的试样若干，并在超声波清洗机中用丙酮清洗干净。分别用直读光谱、布氏硬度计、DMI3000M 金相显微镜和 JXA-8100 型电子探针扫描电镜等仪器设备对试样进行成分分析、硬度测试、微观组织分析和表面形貌分析。

2 试验结果与分析

2.1 衬板的化学成分、组织及硬度

衬板的材质是高锰钢，其化学成分见表 2。

表 2 衬板的化学成分(质量分数,%)
Tab.2 Chemical composition of lining plate (wt%)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
1.2958	0.5579	13.7283	0.7327	0.1586	余量

衬板的微观组织^[4]是经水韧化处理的奥氏体，见图 1。用布氏显微硬度仪测量衬板厚度方向的硬度为亚表层 363~382 HV，而远离表层(5 mm 以上)为 266~279 HV。硬度分布结果表明：湿磨工况与干磨料磨损工况不同，干磨料磨损为高应力磨损，伴随金属表面的严重应变硬化和磨料破碎，高锰钢表层硬度可达 600 HV 以上^[6-8]；湿磨工况下浆料对磨球的缓冲作用使衬板处于低冲击载荷状态，高锰钢在冲

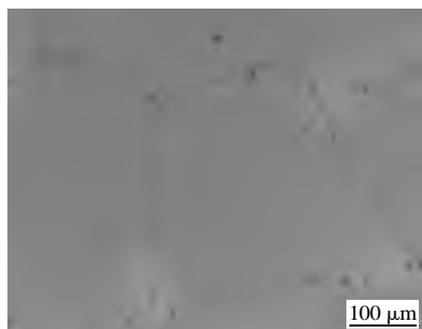


图 1 高锰钢衬板的微观组织

Fig.1 Optical micrographs of high manganese steel lining plate

击时产生的加工硬化效应不明显，材料的耐磨性未得到大幅提升。

2.2 衬板的腐蚀磨损形貌与分析

在实际生产过程中，衬板、磨球、矿浆一起随半自磨机以一定转速旋转，通过磨球、矿石及衬板之间的摩擦、撞击，达到研磨矿石，细化矿石的目的。衬板在研磨过程中主要受到磨球的冲击、磨料的切削以及矿浆的腐蚀。图 2 是衬板表面主要微观形貌。可看出，材料的表面有大量的划痕和切削犁沟，见图 2 (a)单箭头所示；整个工作表面上还可观察到许多细小的、排列规则的凹坑，这些凹坑不同于犁沟，凹坑主要以半球状为主，内较为光滑，无明显的变形特征，为典型的腐蚀坑，见图 2 (b)双箭头所示。

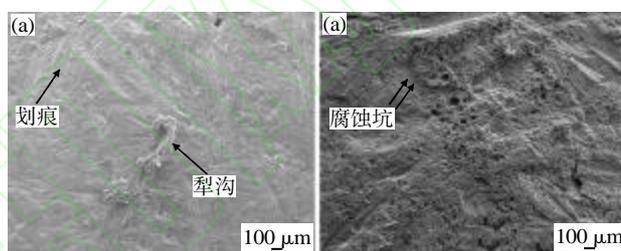


图 2 高锰钢衬板表面 SEM 照片
Fig.2 SEM micrographs of high manganese steel lining plate surface

图 3 是切削犁沟放大 200 倍的微观形貌图。可看出，材料表面发生塑性流动并犁出一条沟槽，沟槽两侧有凸起的塑性变形金属。分析原因认为，这是由于高锰钢的硬度低、韧性好，较硬的磨料在冲击载荷作用下压入金属表面进行切向运动，材料受到挤压被推移到磨料运动路径的两侧或前方，这些材料已受到剧烈的塑性损伤，很易在其他磨料的作用下被磨掉。



图 3 切削犁沟 SEM 照片
Fig.3 SEM micrographs of cutting furrows

图 4 是腐蚀剥落坑的微观形貌。可看到，腐蚀剥落坑底部微观形貌与纯腐蚀的形貌相同，有腐蚀坑和小的颗粒嵌入物，无显著塑性变形痕迹。腐蚀剥落坑与疲劳剥落坑不同，分析认为疲劳剥落坑是在循

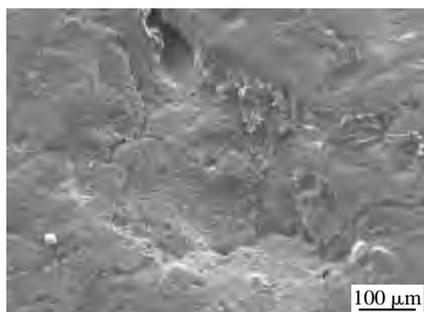


图4 腐蚀剥落坑微观形貌 SEM 照片
Fig.4 SEM micrographs of spalling corrosion pits



图6 表面裂纹微观形貌 SEM 照片
Fig.6 SEM micrographs of surface crack

环加载过程中局部塑性变形积累和亚表面裂纹形成与扩展、合并,直至材料分离所产生的;腐蚀剥落坑是在腐蚀与磨损的相互促进过程中形成的,兼有磨料磨损、腐蚀磨损等多种磨损特征。

图5是衬板冲击腐蚀磨损的腐蚀坑放大1000倍的微观形貌。可看出,图片显示大的腐蚀坑深处和周边,还存有大量细小腐蚀坑,表面出现明显变形、磨损。表明在半自磨机工作过程中,腐蚀坑在矿石和磨球的剪切力作用下产生局部塑性变形,从而造成腐蚀坑电化学性质的不均匀,形成电位差,发生电化学腐蚀。变形区阳极的加速腐蚀造成变形区的腐蚀坑面积和深度增大,同时产生了大量新的腐蚀小坑。

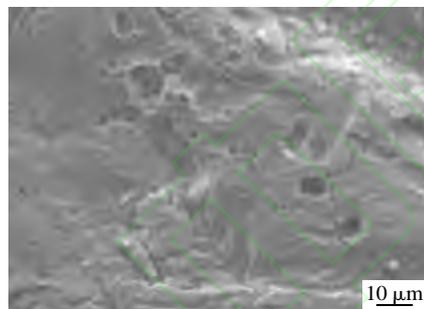


图5 腐蚀坑 SEM 照片
Fig.5 SEM micrographs of corrosion pit

循环往复的冲击加载,使衬板表面发生塑性变形并累积到一定极限,在腐蚀与磨损的交互作用下材料表面及表层形成裂纹(见图6),进而扩展导致材料发生大量剥落。

图7是裂纹的纵截面微观形貌。可看出,裂纹的延展与冲击轴线成一角度,其周边未观察到明显的腐蚀产物,裂纹呈连续状,无分叉。结合开裂处 EDS 谱的结果,显示裂纹形成区域与基体成分不同,其 C 含量高出于基体 2 倍多(见表3,谱图1和2位置见图8),因此裂纹的扩展主要发生在碳化物聚集区,伴有局部氧化反应。

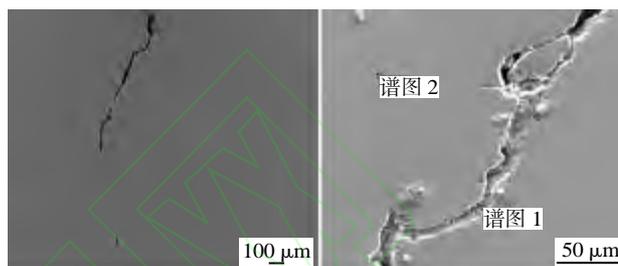


图7 裂纹的纵截面形貌 SEM 照片
Fig.7 SEM micrographs of longitudinal section of crack

图8 裂纹的 EDS 谱位置
Fig.8 EDS spectra positions of crack

表3 裂纹纵截面 EDS 谱分析结果(原子分数,%)
Tab.3 EDS analysis results of longitudinal section of crack(at%)

能谱点	C	O	Mn	Fe
谱图 1	21.58	12.16	8.24	56.34
谱图 2	5.98	-	14.44	77.53

2.3 讨论

从衬板微观形貌来看,衬板失效的主要原因是磨球及磨料冲击与矿浆腐蚀的交互作用。一方面腐蚀产生了大量蚀坑,造成材料流失,使高锰钢材料的表面冲击硬度不足,弱化材料表面的力学性能,在磨料继续作用下材料很易被去除而形成二次磨损,即腐蚀促进了磨损的进行。另一方面衬板在磨损作用下,裸露出新鲜表面,产生更强烈的活性溶解,腐蚀速度加快,这是由于高锰钢硬度低韧性高,磨料易在较低冲击力作用下使金属表面产生挤压变形而形成犁沟。犁沟的不均匀塑性变形使得强应变区处于高能区,强烈变形区将成为阳极而其余部位作为阴极构成“应变差异腐蚀电池”^[9],即磨损促进腐蚀。上述腐蚀磨损过程交替进行,导致腐蚀与磨损形成相互促进的恶性循环。与应力腐蚀开裂不同,衬板表面裂纹属于腐蚀疲劳开裂。崔约贤等^[10]认为应力腐蚀开裂只在一定的材料与介质组合条件下才能发生,拉应力是产生应力腐蚀破裂的必要条件,而衬板在安装和使用过程中未受到外加拉应力,磨球对衬板

的冲击则使衬板表面形成压应力。因此,衬板的表面裂纹是在交变应力作用下发生局部腐蚀,产生应力集中进而形成的裂纹,而不是应力腐蚀造成的。

3 结论

(1) 在昆钢大红山铁矿湿磨工况下,高锰钢衬板的加工硬化效果不明显,耐磨性差。

(2) 高锰钢衬板的失效主要是矿浆腐蚀和磨球及磨料冲击磨损的交互作用造成的,切削犁沟、腐蚀剥落坑、裂纹是衬板的主要失效形式。

(3) 磨球和磨料对衬板的冲击作用,使衬板表面产生了压应力,抑制了应力腐蚀开裂。衬板的表面裂纹是在交变应力作用下发生局部腐蚀,产生应力集中进而形成的裂纹。

参考文献:

[1] 李平,李锋军,刘松涛.履带板材料的研究现状[J].热加工工艺,2015,44(16):44-47.

- [2] 张美丽,王丽芳.腐蚀环境下改性高锰钢冲击腐蚀磨损机理研究[J].热加工工艺,2010,39(10):40-42.
- [3] 罗宏,龚敏.奥氏体不锈钢的晶间腐蚀[J].腐蚀科学与防护技术,2006,18(5):357-360.
- [4] 蒋业华,黎清宁,卢德宏,等.复合冲击磨损条件下高锰钢的腐蚀磨损行为及其交互作用[J].西安交通大学学报,2010,44(1):105-111.
- [5] 郑红红,赵爱民,曹佳丽,等.水韧处理对高锰钢铸件组织与性能的影响[J].金属热处理,2014,60(5):454-458.
- [6] 陈连喜,刘英,李卫.回火温度对中碳低合金钢 ZG30Cr2Si-MnMo 显微组织、硬韧性及冲击磨料磨损性能的影响[J].热加工工艺,2013,42(22):147-149.
- [7] 王猷.冲击磨料磨损机理研究[D].昆明:昆明理工大学,2003.
- [8] 李小蕴,祖方道,刘兰俊,等.模拟实际工况条件下高锰钢加工硬化能力的研究[J].铸造,2005,54(5):462-465.
- [9] 鲁沛沛,李卫.矿山湿磨衬板用耐磨合金铸钢研究与应用现状[J].铸造,2011,60(5):454-458.
- [10] 崔约贤,王长利.金属断口分析[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006. 

(上接第 158 页)

第二级均匀化超过 16h 后,虽然共晶相全部溶解,但是晶粒逐渐长大,部分晶粒粗化严重,富稀土相的增多和长大,使得过饱和固溶体中的稀土元素再次析出,降低了固溶强化效果,同时由于富稀土相的长大,割裂基体,导致合金力学性能降低。

考虑到在高温下均匀化时间过长可能会导致过烧,晶粒粗化以及能源利用等因素。结合实际生产应用的需求、合金的微观组织及拉伸力学性能,本次研究中分级均匀化处理制度较优为 325℃×12h+530℃×12h,空冷。

3 结论

(1) 均匀化处理过程中合金微观组织的转变包括共晶相溶解、富稀土相增多和长大以及晶粒粗化。

(2) 较优的均匀化制度为:分级均匀化,325℃×12h+530℃×12h,空冷。

(3) 这种均匀化处理后的合金抗拉强度达到 197.42MPa,伸长率为 334%,较单级均匀化有一定的提高。

参考文献:

- [1] 金军兵,王智祥,刘雪峰,等.均匀化处理对 AZ91D 镁合金组织和力学性能的影响[J].金属学报,2006,42(10):1014-1018.
- [2] 陈振华.变形镁合金[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [3] Zhang K, Li X G, Li Y J, et al. Effect of Gd content on microstructure and mechanical properties of Mg-Y-RE-Zr alloys [J]. Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2008, 18(s1):s12.
- [4] 何兰强,马鸣龙,李兴刚,等. Mg-9.0Y-3.0MM-0.6Zr 合金均匀化热处理研究[J].稀有金属,2011,35(2):164.
- [5] Anyanwu I A, Kamado S, Kojima Y. Creep properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys[J]. Materials Transactions, 2001, 42(1):1212.
- [6] 郑开云. Mg-Gd-Nd-Zr 系高强耐热镁合金组织与性能研究[D].上海:上海交通大学,2008.
- [7] 于建民,张治民,李旭斌,等.热处理工艺对 Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(12):1240-1243.
- [8] 任凤丽,张治民,张素转,等. Mg-8Gd-3Y-1Nd-0.5Zr 稀土镁合金的均匀化热处理[J].热加工工艺,2014,43(4):187-189.
- [9] 张素转,张治民,于建民,等.高强耐热 Mg-8Gd-3Y-1Nd-0.5Zr 合金挤压组织及性能研究[J].热加工工艺,2014,43(9):33-35,39. 