

# 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

蒋业华, 黎清宁, 卢德宏, 周荣  
(昆明理工大学机电工程学院, 650093, 昆明)

**摘要:** 采用自制的冲击腐蚀磨损试验装置,研究了湿磨弱酸性锡矿浆体系中高锰钢在静态、充氧、搅拌和冲击等复合条件下的腐蚀磨损行为,并利用失重法、电化学法和线性回归法,定量分析了腐蚀、磨损和腐蚀磨损中交互作用各分量的相对比率. 结果表明:充氧和搅拌促进了氧在高锰钢表面的传质过程,使腐蚀率较静态分别增加了 1.05 和 2.04 倍;高锰钢的累积质量损失、表面显微硬度和腐蚀磨损交互作用均随着冲击功的增加而增大;在不同冲击功下,高锰钢的腐蚀增量比静态腐蚀率高 15.15 ~ 25.54 倍,腐蚀磨损交互作用所占比率为 12.07% ~ 26.69%,表明磨损与腐蚀之间存在着一定的协同促进作用;在冲击功为 1 J 时,交互作用以磨损促进腐蚀为主;在冲击功为 2 ~ 4 J 时,交互作用以腐蚀促进磨损为主.

**关键词:** 腐蚀磨损;交互作用;高锰钢;电化学法

**中图分类号:** TG172.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0105-07

## Corrosive Wear Behavior and Synergy of High Manganese Steel under Combined Impact Abrasion

JIANG Yehua, LI Qingning, LU Dehong, ZHOU Rong

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Corrosive wear behavior and the synergy of high manganese steel under static, oxygen aeration, stirring and corrosive impact abrasion conditions were investigated by using self-made impact corrosive wear tester. The corresponding proportions of individual corrosion, wear and corrosive wear synergy to the total material loss were evaluated via electrochemical method, cumulative mass loss rate analysis and linear regression analysis. The results reveal that oxygen aeration and stirring accelerate the transport of oxygen to the substrate surface, and the corrosion rates increase by 1.05 and 2.04 times than that under static corrosion, respectively. The cumulative wear mass loss, surface hardness and corrosive wear synergy of the high manganese steel increase with increasing impact energy. The electrochemical corrosion rate gets 15.15 - 25.54 times higher than the static corrosion rate under different impact energy, and the proportion of corrosive wear synergy to total material loss is 12.07% - 26.69%, which indicates certain synergistic effect between corrosion and wear. Wear-accelerated corrosion is the dominating mechanism of the synergy under low impact energy (1 J), and corrosion-accelerated wear becomes the dominating mechanism under high impact energy (2 - 4 J).

**Keywords:** corrosive wear; synergy; high manganese steel; electrochemical method

在矿山湿式球磨机中,磨球与衬板材料同时受到磨损和腐蚀因素的影响.但是,人们通常认为湿磨工况下材料的损耗以磨损为主,将其简化为单纯的磨料磨损,忽视了腐蚀的作用,这与实际工况相差甚远<sup>[1-3]</sup>.实际上,该环境介质下材料的损耗并非简单的磨损或者腐蚀,而是同时包含磨损、腐蚀及腐蚀和磨损的交互作用.因此,探究材料在湿磨工况下的腐蚀、磨损规律及其交互作用机制,将有助于针对实际工况来合理选择和开发耐磨耐蚀材料,对提高材料在腐蚀和冲击磨损复合工况下的使用寿命具有重要的理论及现实意义.近年来,腐蚀磨损的研究受到了国内外的广泛关注<sup>[4-9]</sup>.湿磨工况下的腐蚀磨损属于高应力冲击载荷,目前对其行为及机理的研究相对较少,特别是定量研究磨损和腐蚀各自所占的比例及其交互作用,更是鲜有报道.目前,电化学法已成为腐蚀磨损定量研究的基础,它不但可计算出腐蚀磨损过程中的腐蚀量和磨损量,而且还能区分腐蚀加速磨损和磨损促进腐蚀的分量<sup>[10-13]</sup>.

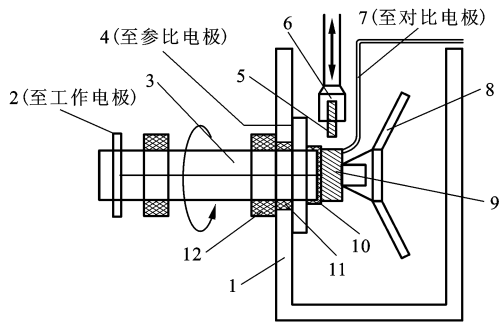
本文以云锡公司实地取样的锡铜共生硫化矿作为磨料来模拟腐蚀磨损环境,以国内球磨机衬板材料普遍使用的高锰钢为研究对象,使用自行研制的腐蚀磨损试验装置,运用失重法、电化学法、扫描电子显微镜(SEM)等分析测试手段,较为系统地探讨了高锰钢衬板材料在静止状态及充氧、搅拌和冲击等复合条件下的腐蚀磨损行为及其交互作用,以期 为湿磨工况下衬板材料耐磨耐蚀性能的提高提供理论依据和数据积累.

## 1 试验方法及条件

### 1.1 试验装置

研究所用的自制腐蚀磨损试验机主要由机械加载系统及电化学测试系统两部分组成,机械加载系统可实现不同形式的加载以模拟各种工况,电化学测试系统则用于测控腐蚀电化学参数.图1为试验机工作原理示意图,工作过程为:圆环状下试样安装在主轴上随轴转动,并始终浸泡于矿浆之中;上试样安装在冲锤上,通过往复运动冲击下试样;矿石颗粒在叶片搅拌下不断进入上、下试样的接触表面间,形成在腐蚀介质中带有冲击载荷的三体磨粒磨损体系.在冲击腐蚀磨损过程中,下试样作为工作电极,其腐蚀电化学信号通过主轴并经碳刷连接输出至带有微机测控的DJS-292型电化学恒电位仪.在试验槽内安装了环形石墨辅助电极和鲁金毛细管,鲁金毛细管通过盐桥连接至饱和甘汞参比电极(SCE),

组成三电极系统,从而可进行相应的电化学测控.试验中均以以下试样作为腐蚀磨损研究对象,测定其 在不同试验条件下的腐蚀磨损行为.



1:有机玻璃槽;2:碳刷;3:主轴;4:石墨辅助电极;5:上试样;  
6:夹具;7:盐桥;8:搅拌叶片;9:下试样;  
10:绝缘耐磨涂层;11:油封;12:轴承

图1 试验机工作原理示意图

### 1.2 试验材料与测试

为避免试验过程中异种金属材料间接触时产生电位干扰及电偶腐蚀,上、下试样均采用高锰钢,其化学组成(质量分数)为:C(1.3%),Si(0.69%),Mn(12.7%),S( $\leq 0.06\%$ ),P( $\leq 0.1\%$ ).将试样加热至1 050℃进行水韧处理,热处理组织为奥氏体,其金相照片见图2.下试样加工成 $\varnothing 50\text{ mm}\times\varnothing 30\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的圆环,上试样为 $30\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的长方体,上、下试样暴露的工作面均逐级研磨至600#湿砂纸.将非工作面用热溶胶进行涂封,之后用酒精洗净并烘干,置于干燥器中备用.上试样暴露的表面积为 $1\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ ,下试样暴露的圆环外表面积为 $\pi Dh=31.4\text{ cm}^2$ ,其中 $D$ 为圆环直径, $h$ 为圆环厚度.

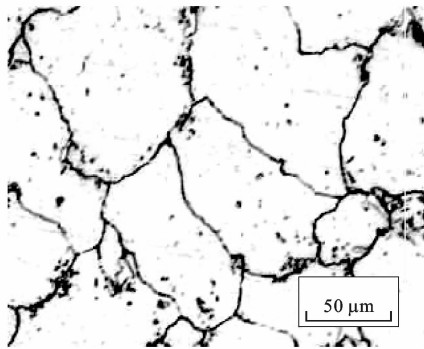


图2 高锰钢热处理后的金相照片

选用云锡公司生产的锡铜共生矿料做磨料,粒度为40~70目,矿浆浓度(磨料质量分数)为60%,用锡矿砂和自来水配制.根据试验要求用0.1 mol/

L 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  及 0.1 mol/L 的  $\text{NaOH}$  溶液调节介质的 pH 值,用 KL-009 型数字酸度计测定其 pH 值约为 5. 下试样转速为 200 r/min,上试样的冲击频率为 60 次/min,动态极化曲线测试的采样频率亦为 60 次/min,与冲击频率保持一致. 试验中保持矿浆性质不变,调节冲锤与试样的距离使冲击功分别为 1、2、3 和 4 J. 每隔一定时间将下试样取出,洗净烘干并称量,取 3 次试验质量损失数据的平均值,并换算为腐蚀磨损率. 所有试验均在室温下进行.

为了验证动态磨损过程对传质过程的影响,对高锰钢在静态、充氧、搅拌和冲击条件下矿浆中的电化学行为进行了测试:加入试验介质后静止 10 min,待试样自腐蚀电位稳定后进行静态和动态条件下的  $b_c$ 、 $b_a$ 、 $R_p$  ( $b_c$ 、 $b_a$  分别表示阴、阳极极化曲线 Tafel 直线段的斜率, $R_p$  表示极化电阻)等电化学参数测试. 扫描速度为 0.5 mV/s,扫描范围为自腐蚀电位±20 mV. 根据分析需要,对试验后的相应试样采用 XL30ESEM 型扫描电镜观察腐蚀磨损形貌,用金相显微镜观察磨损表面亚表层的组织形貌,用 HXD-1000 型显微硬度计测试亚表层硬度.

1.3 腐蚀磨损率测定

利用失重法测定总腐蚀磨损率:在腐蚀磨损试验中每隔一段时间将下试样取出,用酒精洗净并烘干,采用精度为 0.1 mg 的 AR2140 型光电天平准确称量腐蚀磨损试验前、后试样的质量损失,取 3 次试验数据的平均值,以单位磨损表面积和单位试验时间的质量损失作为腐蚀磨损率,即

$$V_t = \frac{m_1 - m_2}{St} \tag{1}$$

式中: $V_t$  为腐蚀磨损率( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ); $m_1$ 、 $m_2$  为试样腐蚀磨损前、后的质量(g); $S$  为试样暴露出的腐蚀磨损面积( $\text{m}^2$ ); $t$  为腐蚀磨损测试时间(h).

纯磨损分量的测定:在确定最佳阴极保护电位的基础上,通过恒电位仪对试样施加阴极保护电位,同时根据公式(1)计算质量损失率,以质量损失率最小的外加电位作为该体系的最佳保护电位. 因为此时腐蚀被抑制,材料流失应为单纯机械因素所造成,所以该条件下的质量损失可看作是单纯磨损质量损失.

1.4 腐蚀磨损参数的定量试验方法

在腐蚀磨损过程中,材料的总腐蚀磨损率  $V_{\text{total}}$  可视为磨损分量  $V'_w$  和腐蚀分量  $V'_c$  之和<sup>[14-15]</sup>

$$V_{\text{total}} = V'_w + V'_c \tag{2}$$

一般情况下,材料的腐蚀磨损率  $V_{\text{total}}$  大于纯磨

损率  $V_w$  与纯腐蚀率  $V_c$  之和,其增加量  $\Delta V$  可称为腐蚀磨损交互作用率

$$V_{\text{total}} = V_w + V_c + \Delta V \tag{3}$$

$\Delta V$  又可分为两部分:腐蚀对磨损的促进量  $\Delta V_w$  (磨损增量)和磨损对腐蚀的促进量  $\Delta V_c$  (腐蚀增量),即

$$\Delta V = \Delta V_w + \Delta V_c = (V'_w - V_w) + (V'_c - V_c) \tag{4}$$

根据上述公式可得

$$\begin{aligned} V'_w &= V_{\text{total}} - V'_c; \quad \Delta V = V_{\text{total}} - V_w - V_c; \\ \Delta V_c &= V'_c - V_c; \quad \Delta V_w = \Delta V - \Delta V_c \end{aligned} \tag{5}$$

通过以下试验方法,可以测定  $V_{\text{total}}$ 、 $V_w$ 、 $V_c$  以及  $V'_c$  4 个分量.

(1) $V_{\text{total}}$  测定:采用精度为 0.1 mg 的 AR2140 型光电天平,准确称量无阴极保护下腐蚀磨损试验前、后下试样的质量损失,以单位磨损表面积在单位时间内的质量损失作为腐蚀磨损率.

(2) $V_w$  测定:用阴极保护法测纯磨损率,阴极保护电位为-1 000 mV,此时腐蚀被抑制,材料流失可看作单纯磨损质量损失,将测定的下试样质量损失除以试样表面积和试验时间,即得纯磨损率.

(3) $V_c$  与  $V'_c$  的测定:采用电化学方法测试静态腐蚀率  $V_c$  和动态腐蚀率  $V'_c$ ,其中  $V_c$  的测试条件为无搅拌状态, $V'_c$  的测试条件为搅拌加冲击磨损.

根据实测 Tafel 极化曲线求得极化电阻  $R_p$ 、极化率  $b_a$  和  $b_c$  以及腐蚀电流密度  $i_{\text{corr}}$ ,然后根据式(6)将  $i_{\text{corr}}$  转化为腐蚀率  $V_{\text{corr}}$ <sup>[14-15]</sup>

$$V_{\text{corr}} = \frac{M}{nF} i_{\text{corr}} \tag{6}$$

式中: $M$ 、 $n$ 、 $F$  分别表示相对原子质量、原子价和法拉第常数.

2 结果与分析

2.1 充氧和搅拌对腐蚀电化学行为的影响

图 3 为充氧和搅拌对高锰钢自腐蚀电位、极化曲线的影响. 由图 3a 可知,充氧和搅拌均使自腐蚀电位正移,但搅拌的正移幅度较充氧大:充氧使自腐蚀电位相对于静态正移约 80 mV,搅拌则使腐蚀电位正移约 120 mV. 在图 3b 中,充氧和搅拌状态下极化曲线的阴极极化电流密度均比静态时有所增大. 充氧起到了增加溶解氧浓度的作用,促进了氧的去极化反应,使自腐蚀电位正移,阴极极化电流密度增大. 搅拌对腐蚀电位及极化曲线的影响与充氧类似,表明搅拌也促进了氧的去极化反应,而且搅拌具

有一定的冲刷作用,对电化学行为的影响比充氧更为剧烈.

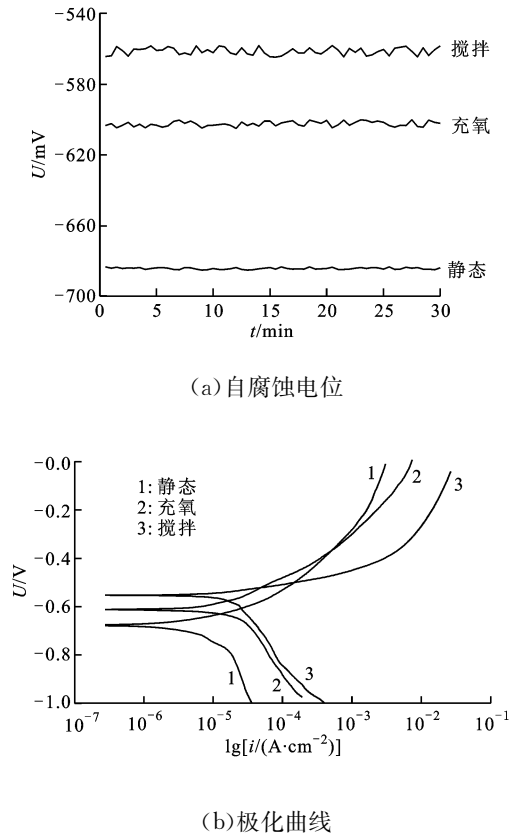


图 3 充氧和搅拌对自腐蚀电位和极化曲线的影响

表 1 为静态、充氧和搅拌状态下的电化学数据对比. 由表 1 可知,静态、充氧和搅拌条件下的腐蚀电流密度分别为  $12.02 \times 10^{-6}$ 、 $24.65 \times 10^{-6}$  和  $36.59 \times 10^{-6} A/cm^2$ ,即充氧和搅拌分别使腐蚀率较静态增加了 1.05 和 2.04 倍. 以上结果表明,充氧和搅拌对高锰钢的腐蚀电化学行为有较大影响,使金属腐蚀电流密度  $i_{corr}$  和自腐蚀电位  $E_{corr}$  增大.  $i_{corr}$  增大主要是由于电位差增大造成腐蚀反应的驱动力增大,使金属晶格中的金属正离子更易于克服其与电子间的引力,从而脱离金属表面进入腐蚀介质中,与此同时,原本与正离子保持电中性的过剩电子数量越来越多,电子流量增加致使  $i_{corr}$  增大.

| 表 1 静态、充氧和搅拌条件下的电化学参数 |                   |              |              |                               |                                          |
|-----------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| 状态                    | $E_{corr}/$<br>mV | $b_a/$<br>mV | $b_c/$<br>mV | $R_p/$<br>$\Omega \cdot cm^2$ | $i_{corr}/$<br>$10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ |
| 静态                    | -677              | 117.97       | 276.39       | 2 987.02                      | 12.02                                    |
| 充氧                    | -602              | 98.14        | 152.17       | 1 050.81                      | 24.65                                    |
| 搅拌                    | -553              | 70.44        | 819.69       | 769.72                        | 36.59                                    |

## 2.2 冲击对腐蚀电化学行为的影响

当冲击功(A)为 2 J 时,高锰钢在不同冲击时间下的极化曲线和线性极化电阻如表 2 所示,可见静态时阳极极化率较小,随着冲击的进行,腐蚀电位有所负移,阴、阳极极化电流密度都明显增大,表明冲击促进了腐蚀电化学的阴、阳极反应,增大了腐蚀率. 另外,60、120 和 180 min 时的  $i_{corr}$  分别为  $232.13 \times 10^{-6}$ 、 $279.96 \times 10^{-6}$  和  $266.24 \times 10^{-6} A/cm^2$ ,即腐蚀率较冲击前分别增加了 18.31、22.29 和 21.15 倍. 在冲击初期,高锰钢的线性极化电阻急剧下降,静态与动态下线性极化电阻的差值很大,冲击 60 min 后下降变缓,并逐渐趋于稳定. 极化电阻下降表明冲击使电化学反应阻力减小,促进了腐蚀电化学反应.

| 表 2 A=2 J 时不同冲击时间下的电化学参数 |                   |              |              |                               |                                          |
|--------------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| $t/min$                  | $E_{corr}/$<br>mV | $b_a/$<br>mV | $b_c/$<br>mV | $R_p/$<br>$\Omega \cdot cm^2$ | $i_{corr}/$<br>$10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ |
| 0                        | -677              | 117.97       | 276.39       | 2 987.02                      | 12.02                                    |
| 60                       | -554              | 174.92       | 652.17       | 258.01                        | 232.13                                   |
| 120                      | -625              | 229.35       | 419.99       | 230.03                        | 279.96                                   |
| 180                      | -658              | 176.38       | 410.55       | 193.72                        | 266.24                                   |

表 3 是 180 min 时,不同冲击功所对应的电化学参数,可见阳极和阴极过程均随冲击功增大而加速,冲击磨料磨损状态下阴极过程与静态相比变化较为显著,但不同冲击功之间的差异相对较小. 4 种冲击功下的腐蚀率较静态时分别增加了 15.15、21.15、22.46 和 25.54 倍;极化电阻随冲击功增大而减小,静态与动态间变化幅度较大,不同冲击功之间变化较为平缓.

| 表 3 不同冲击功下的电化学参数(冲击 180 min) |                   |              |              |                               |                                          |
|------------------------------|-------------------|--------------|--------------|-------------------------------|------------------------------------------|
| A/J                          | $E_{corr}/$<br>mV | $b_a/$<br>mV | $b_c/$<br>mV | $R_p/$<br>$\Omega \cdot cm^2$ | $i_{corr}/$<br>$10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ |
| 0                            | -677              | 117.97       | 276.39       | 2 987.02                      | 12.02                                    |
| 1                            | -642              | 201.61       | 462.03       | 302.56                        | 194.16                                   |
| 2                            | -658              | 176.38       | 410.55       | 193.72                        | 266.24                                   |
| 3                            | -644              | 166.05       | 507.05       | 185.26                        | 281.99                                   |
| 4                            | -661              | 135.06       | 504.39       | 139.72                        | 319.05                                   |

以上试验结果表明,力学因素对材料的腐蚀电化学行为有较大影响,这主要是因为金属在外力作用下,表面会发生弹性变形或塑性变形,弹、塑性变

形将改变金属在腐蚀介质中的热力学性质(如电极电位)和动力学过程<sup>[16]</sup>.

2.3 不同冲击功下的质量损失和显微硬度

图 4 为 4 种冲击功下高锰钢累积质量损失随时间的变化曲线,可见在不同冲击功下,高锰钢累积质量损失均随冲击腐蚀磨损时间延长而增加,在相同冲击腐蚀磨损时间内,累积质量损失随冲击功增加而增大,且在高冲击功(3 和 4 J)下的累积质量损失较为接近.

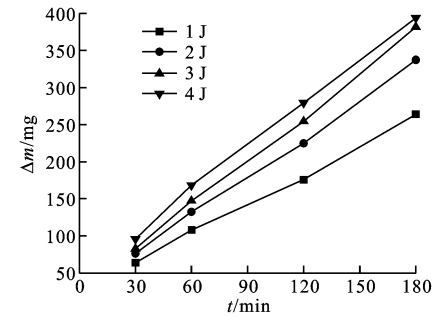


图 4 不同冲击功下高锰钢的累积质量损失

图 5 为不同冲击功下高锰钢亚表层的硬度分布曲线.可以看出:冲击后高锰钢表面存在一定厚度的硬化层,硬度变化梯度较大,且硬化层随冲击功的增加而增厚;硬度随冲击功的增加而增高,随到表面距离  $h$  的增加而减小.这是因为,在腐蚀磨损初期及冲击功较小时,试样的加工硬化程度较低,硬度低而韧性高,随着冲击功增大,试样的塑性变形程度增加,韧性降低,加工硬化作用增强,致使硬度提高.

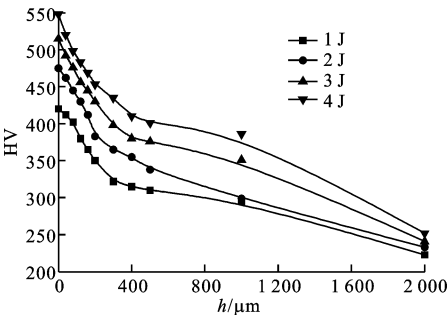


图 5 冲击功对试样亚表层硬度分布的影响

2.4 磨损和腐蚀的交互作用及腐蚀磨损机理

通过 1.4 节所述的试验方法,可得到不同冲击功下的  $V_{total}$ 、 $V_w$ 、 $V_c$  和  $V'_c$  等参数,然后根据相应的定量公式,即可计算出腐蚀磨损过程中的各个组成分量,进而得出不同冲击功下各腐蚀磨损分量所占的比例.数据分析结果见表 4.

表 4 高锰钢在不同冲击功下的腐蚀磨损分量  
 $g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$

| A/J | $V_{total}$ | $V_w$ | $V_c$ | $V'_c$ | $\Delta V$ | $\Delta V_c$ | $\Delta V_w$ |
|-----|-------------|-------|-------|--------|------------|--------------|--------------|
| 1   | 28.01       | 24.50 | 0.13  | 2.10   | 3.38       | 1.97         | 1.41         |
| 2   | 35.82       | 28.71 | 0.13  | 2.88   | 6.98       | 2.75         | 4.23         |
| 3   | 40.50       | 31.02 | 0.13  | 3.05   | 9.36       | 2.92         | 6.44         |
| 4   | 41.81       | 30.52 | 0.13  | 3.44   | 11.16      | 3.32         | 7.84         |

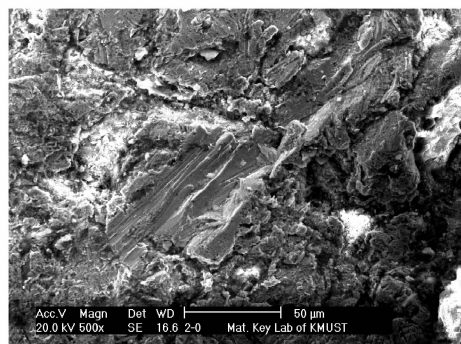
由测试结果可知: $\Delta V_w$  及  $\Delta V_c$  均随冲击功的增加而增大,但  $\Delta V_c$  的增长较为缓慢, $\Delta V_w$  的增幅大于  $\Delta V_c$ ;总腐蚀磨损  $V_{total}$  亦随着冲击功的增加而增大,在冲击功达到 3 J 后变化趋于平缓,但  $V_w$  先增加后降低,当冲击功为 3 J 时达到最大值,随后开始减小; $V_c$  值较小,与  $V_w$  相差 2~3 个数量级,表明该环境介质条件下的磨损作用明显大于腐蚀作用.由式(5)和表 4 可知,磨损分量占总腐蚀磨损的比例  $V'_w/V_{total}$  为 91.77%~92.53%,而腐蚀分量占总腐蚀磨损的比例  $V'_c/\Delta V_{total}$  则相对较小,表明力学因素造成的磨损是高锰钢质量损失的主要原因.另外,磨损增量与纯磨损率之比  $\Delta V_w/V_w$  为 5.76%~25.69%,增幅不大.腐蚀增量随着冲击功的增大而减小,在交互作用中的比例为 29.75%~58.28%.当冲击功为 1 J 时, $\Delta V_c/\Delta V$  较大,表明此时磨损对腐蚀的促进作用较强.磨损增量占交互作用的比例随冲击功的增大而增大,在冲击功为 2、3、4 J 时, $\Delta V_w/\Delta V$  分别为 60.61%、68.81%和 70.25%,均大于 50%,说明此时腐蚀对磨损的促进在交互作用中起主导作用.

虽然矿浆的腐蚀性相对较弱,但在腐蚀磨损过程中,由于磨损对腐蚀的促进作用,使腐蚀分量占整个腐蚀磨损量的比例仍能达到 7.49%~8.23%.腐蚀增量较静态纯腐蚀率增加了 15.15~25.54 倍,比磨损增量的增幅 5.76%~25.69%大得多.交互作用亦随着冲击功的增大而增强,其占总腐蚀磨损的比例为 12.07%~26.69%.这意味着在本试验工况下,12.07%~26.69%的材料损耗是由于弱腐蚀性矿浆造成的,从而表明在弱腐蚀强冲击环境下的腐蚀与磨损之间存在着较强的交互作用.

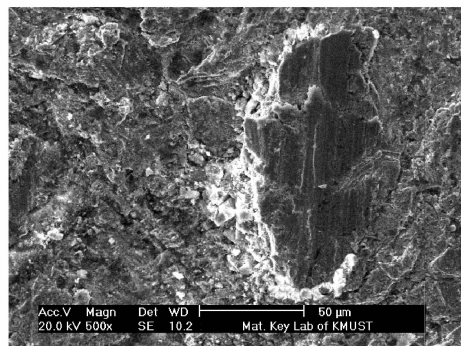
图 6 是不同冲击功下的腐蚀磨损表面形貌,可见低冲击功(1 J)下的磨面具有滚碾挤压塑性变形特征,并能观察到犁沟,磨损面上出现了大量塑性变形和一些凸起的棱,这主要是由于磨料粒子在冲击

作用下对其产生挤压变形的结果. 在冲击功较低时, 高锰钢材料的加工硬化程度有限, 无法提高其耐磨料磨损性能, 反而会恶化耐蚀性, 使腐蚀率增加了 15.15 倍, 腐蚀增量在交互作用中的比例  $\Delta V_c/\Delta V$  为 58.22%, 表明此时交互作用是以磨损促进腐蚀为主. 在高冲击功(4 J)条件下, 高锰钢的塑性变形及位错密度增大, 加工硬化程度提高, 耐磨损性能增强, 纯磨损量  $V_w$  得以减小, 但是在高冲击功下, 高锰钢发生了强烈形变硬化, 使韧塑性下降, 在冲击载荷及磨粒的反复作用下, 塑性变形能力耗尽, 材料更易达到疲劳极限而产生裂纹, 从而形成块状疲劳脱落形貌. 由于磨损表面的塑性变形及位错密度急剧增大, 致使局部残留内应力聚集, 在应力与腐蚀剂的共同作用下, 高锰钢的耐蚀性逐渐变差, 导致腐蚀率增加了 25.54 倍. 在冲击功为 4 J 时, 磨损增量在交互作用中的比例  $\Delta V_w/\Delta V$  为 70.25%, 表明是以腐蚀促进磨损为主.

磨损对腐蚀的促进作用在前面的电化学测试结果中也可得到证实.



(a) 冲击功为 1 J

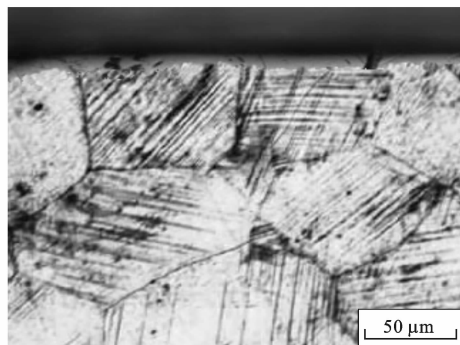


(b) 冲击功为 4 J

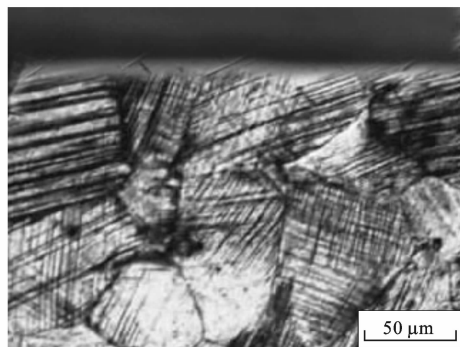
图6 不同冲击功下高锰钢的腐蚀磨损表面形貌

图7为1 J和4 J冲击功下高锰钢试样在光学显微镜下的亚表层组织, 可观察到亚表层有许多相互平行的滑移带, 且冲击功为4 J时的滑移带密度

明显高于1 J时的密度. 从图7中还可发现, 滑移带主要出现在晶体内部, 且各晶粒的滑移带方向不一致, 这主要是因为晶界处原子排列紊乱, 晶格畸变较大, 在滑移变形时, 位错移动至晶界处所受阻力增大, 产生塑性变形的抗力加强, 在晶界处难以变形, 同时磨料在冲击作用下对材料表面的作用力是随机过程, 这种随机性造成了滑移带方向的不一致. 另外, 在高冲击功下可观察到滑移带呈交叉形, 这主要是由于在滑移过程中, 晶体相对于外力轴转动, 致使原来位向不利的滑移系逐渐转为有利取向, 使滑移在2个或2个以上滑移系同时进行, 增大了不同滑移系间的相互交割阻力, 从而提高了加工硬化效果.



(a) 冲击功为 1 J



(b) 冲击功为 4 J

图7 不同冲击功下高锰钢的亚表层滑移带

### 3 结 论

(1) 充氧和搅拌作用促进了氧在介质中的传质过程, 加速了氧的去极化反应, 使高锰钢自腐蚀电位正移且使阴极极化电流密度增大. 充氧和搅拌分别使腐蚀率较静态增加了 1.05 和 2.04 倍.

(2) 冲击磨料磨损导致高锰钢产生较强的塑性变形, 加速了腐蚀电化学反应的阴极和阳极过程, 使得自腐蚀电位负移, 阳极极化电流密度增大, 线性极化电阻下降. 腐蚀率随冲击时间的延长和冲击功的增加而增大. 冲击功为 1、2、3 和 4 J 时的动态腐蚀

率比静态腐蚀率分别增加了 15.15、21.15、22.46 和 25.54 倍。

(3)不同冲击功下高锰钢的累积质量损失随冲击腐蚀磨损时间的延长而增大,在相同冲击腐蚀磨损时间内,质量损失随冲击功的增加而增大。冲击后高锰钢存在一定厚度的硬化层,硬度梯度较大,且硬化层随冲击功的增加而增厚,硬度也随冲击功的增加而增大,随到表面距离的增加而减小。

(4)磨损增量、腐蚀增量和总腐蚀磨损量均随冲击功的增加而增大,但磨损作用明显大于腐蚀作用。不同冲击功下磨损分量占总腐蚀磨损量的 91.77%~92.53%,腐蚀分量占 7.49%~8.23%,腐蚀增量的增幅比磨损增量的增幅大得多。腐蚀磨损交互作用亦随着冲击功的增加而增大,不同冲击功下腐蚀磨损交互作用占总腐蚀磨损量的 12.07%~26.69%。在低冲击功(1 J)时, $\Delta V_c/\Delta V$  为 58.22%,交互作用以磨损促进腐蚀为主;在冲击功为 2、3、4 J 时, $\Delta V_w/\Delta V$  均大于 50%,交互作用以腐蚀促进磨损为主。

## 参考文献:

- [1] IWASAKI I, POZZO R L, NATARAJAN K A. Nature of corrosive and abrasive wear in ball mill grinding [J]. International Journal of Mineral Processing, 1988, 22(1/4): 345-360.
- [2] LU Xinchun, LI Shizhuo, JIANG Xiaoxia. Effects of  $\sigma$  phase in stainless steels on corrosive wear behavior in sulfuric acid [J]. Wear, 2001, 251: 1234-1238.
- [3] CHENJE T W, SIMBI D J, NAVARA E. Wear performance and cost effectiveness: a criterion for the selection of grinding media for wet milling in mineral processing operations [J]. Minerals Engineering, 2003, 16(12): 1387-1390.
- [4] 丁厚福,崔方明,杜晓东. 成分和组织对衬板钢在腐蚀料浆环境下的冲击磨损性能与机理的影响[J]. 摩擦学学报, 2005, 25(3): 221-224.
- DING Houfu, CUI Fangming, DU Xiaodong. Effect of composition and microstructure on impact wear behavior and mechanism of liner steels in corrosive slurry [J]. Tribology, 2005, 25(3): 221-224.
- [5] DU Xiaodong, WANG Jiaqing, SUN Guodong. Effect of composition on impact-wear behavior of alloyed liner steels in corrosive condition [J]. Materials Science and Engineering: A, 2008, 477(1/2): 277-281.
- [6] 张安峰,邢建东,鲍崇高. 动态与静态纯腐蚀对定量研究材料冲刷腐蚀交互作用的影响 [J]. 金属学报,

2002, 38(5): 521-524.

ZHANG Anfeng, XING Jiandong, BAO Chonggao. The effect of dynamic and static pure corrosion on quantitatively studying the interaction between erosion and corrosion of materials [J]. Acta Metall Sinica, 2002, 38(5): 521-524.

- [7] 杨院生,曲敬信,邵荷生. 两种金属材料腐蚀磨损的交互作用[J]. 摩擦学学报, 1996, 16(1): 47-52.
- YANG Yuansheng, QU Jingxin, SHAO Hesheng. The interaction of corrosive wear of two metallic materials [J]. Tribology, 1996, 16(1): 47-52.
- [8] WANG X Y, LI D Y. Application of an electrochemical scratch technique to evaluate contributions of mechanical and electrochemical attacks to corrosive wear of materials [J]. Wear, 2005, 259(7/12): 1490-1496.
- [9] DING Houfu, CUI Fangming, DU Xiaodong. Effect of component and microstructure on impact wear property and mechanism of steels in corrosive condition [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 421(1/2): 161-167.
- [10] BOUAESHI W B, LI D Y. Effects of  $Y_2O_3$  addition on microstructure, mechanical properties, electrochemical behavior, and resistance to corrosive wear of aluminum [J]. Tribology International, 2007, 40(2): 188-199.
- [11] TANG C H, CHENG F T, MAN H C. Laser surface alloying of a marine propeller bronze using aluminium powder, part II: corrosion and erosion-corrosion synergism [J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 200(8): 2594-2601.
- [12] BATENI M R, SZPUNAR J A, WANG X, et al. Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel [J]. Wear, 2006, 260(1/2): 116-122.
- [13] TANG X, XU L Y, CHENG Y F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil-sand slurry, II: synergism of erosion and corrosion [J]. Corrosion Science, 2008, 50(5): 1469-1474.
- [14] WASTON S W, FRIEDERSDORF P J, MADSEN B W. Methods of measuring wear-corrosion synergism [J]. Wear, 1995, 181/183(2): 476-484.
- [15] ZHANG T C, JIANG X X, LI S Z. A quantitative estimation of the synergy between corrosion and abrasion [J]. Corrosion Science, 1994, 36(12): 1953-1962.
- [16] ZHANG Fucheng, LEI Tingquan. A study of friction-induced martensitic transformation for austenitic manganese steel [J]. Wear, 1997, 212(2): 195-198.

(编辑 葛赵青)

