

# 国外某铜矿半自磨机铸钢衬板失效分析

陈佳侠<sup>1,4</sup>, 张会友<sup>2</sup>, 刁晓刚<sup>1,3</sup>, 李杰<sup>1,4</sup>, 李卫<sup>1,4</sup>

(1. 暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东广州 510632; 2. 迁西奥帝爱机械铸造有限公司, 河北唐山 064300;  
3. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471003; 4. 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:** 针对铜矿湿磨工况下, 半自磨机衬板顶端提升条早期断裂的失效行为进行了研究。采用X射线衍射仪(XRD)、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)及显微硬度计等分析了衬板提升条和底端处材料的相组成和组织形貌特征, 讨论了上述两处材料的磨损机理和裂纹的萌生、扩展行为。结果表明: 衬板的冲击磨损机理为疲劳剥落和显微切削, 其中顶端提升条处疲劳剥落和显微切削都较明显, 而底端则以显微切削磨损为主。衬板使用过程中, 顶端提升条长期受到较大的冲击磨损作用, 亚表层发生形变而硬化。受形变和夹杂物共同影响, 裂纹在形变层内夹杂物周围萌生, 随后向基体内部扩展, 最终导致衬板断裂。提高衬板用钢熔炼质量, 减少衬板夹杂物, 并在保证衬板高硬韧性前提下, 进一步提高衬板用钢的韧性, 将是提高半自磨机衬板使用寿命的必要条件和主要路径。

**关键词:** 半自磨机; 衬板; 钢; 冲击磨料磨损; 亚表层

## 作者简介:

陈佳侠(1996-), 男, 硕士生, 主要从事金属耐磨材料研究。E-mail: stephen\_jnu@foxmail.com

## 通讯作者:

李杰, 男, 讲师。电话: 020-85220890, E-mail: lijiehigh@163.com

李卫, 男, 教授。电话: 020-85222167, E-mail: Lwxasn@sohu.com

中图分类号: TG142.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)05-0443-06

## 基金项目:

国家重点研发计划项目(2017YFB0305100); 广东省科技计划项目(2015A040404023, 2014B090907005, 2017B090903005, 2017A090905027, 2017B010136115); 广州市科技计划项目(201806040006)。

## 收稿日期:

2019-12-24 收到初稿,  
2020-03-14 收到修订稿。

在铜矿工业生产中, 原矿开采后需经破碎、研磨及选矿等工艺处理。其中大型半自磨机是当前磨矿工艺的首选设备应用。衬板是保证半自磨机正常运转的关键部件。然而, 在矿料和磨球的反复冲击磨损作用下, 衬板易发生断裂或磨损失效, 衬板寿命已成为决定半自磨机生产效率及能耗的重要因素<sup>[1-3]</sup>。关于衬板材料的选择, 早期中小型半自磨机衬板的首选材料为高锰钢和马氏体钢。然而, 高锰钢屈服强度低、马氏体钢冲击韧性差的缺陷使两者已无法满足大型磨机对衬板材料高强韧的要求。与此同时, 具有优异强韧性的贝氏体低合金耐磨钢引起了人们的注意, 有望用作大型半自磨机衬板。因此, 我们特别选择半自磨机贝氏体铸钢衬板进行失效分析研究, 讨论衬板的磨损机理和失效原因, 期待指导半自磨机衬板的改进。

本文针对墨西哥某大型铜矿大型半自磨机出料端筒体衬板使用过程中容易磨损, 特别是衬板提升条处容易早期断裂失效的现象, 分析研究衬板冲击磨损和断裂的微观形貌, 研究反复冲击作用下衬板表面特别是亚表层变化导致衬板断裂失效的原因, 以期为提高衬板的使用寿命及合理选材提供参考依据。

## 1 衬板工况及失效分析方法

半自磨机规格及衬板服役工况见表1。为了明确出料端筒体衬板过早断裂失效的原因, 从已断裂的磨机筒体衬板取样分析。断裂的衬板从磨机上拆卸下来之后冲洗干净, 然后从衬板提升条处和底端切取200 mm × 200 mm的大块试样, 表面涂敷黄油保护, 再使用线切割加工成15 mm × 15 mm × 8 mm的试样。图1即为取样示意图, 1号试样位于衬板顶端的提升条处, 衬板使用一段时间后易从此处断裂, 2号试样位于衬板的底端。试样在丙酮溶液中用超声波清洗后, 采用直读光谱仪、HBRVU-187.5型布洛维光学硬度计、冲击试验机、UMIASS倒置金相显微镜、X射线衍射仪、Phenom XL台式扫描电镜和显微硬度计等设备对试样进行成分分析、硬度测试、显微结构分析和表面形貌分析。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 衬板的化学成分、组织及力学性能

衬板的化学成分见表2, 衬板的力学性能见表3。

图2是衬板顶端提升条处和衬板底端试样的金相组织形貌及基体中夹杂物的能谱分析, 图3为其XRD图谱。从图2a、b可以看出, 衬板顶端提升条处和衬板底端的基体组织是一致的, 衬板的基体组织是由贝茵铁素体和残余奥氏体组成的。由图2c、d可知, 基体组织中的夹杂物主要是锰的硫化物和氧化物。由图3可知, 衬板顶端提升条处和衬板底端的XRD谱图基本是一致, 但衍射峰的强度存在一些不同。

为了得到衬板顶端提升条处和衬板底端的残余奥氏体体积分数, 计算残余奥氏体含量采用直接对比法, 利用式(1)计算其含量<sup>[4-8]</sup>。为保证测定的准确性, 选取 $\alpha(110)$ 、 $\alpha(200)$ 、 $\alpha(211)$ 、 $\gamma(111)$ 、 $\gamma(200)$ 、 $\gamma(220)$ 峰组合配对, 然后求取平均值。

$$V_{\gamma} = \frac{I_{\gamma}K_{\alpha}}{I_{\gamma}K_{\alpha} + I_{\alpha}K_{\gamma}} \quad (1)$$

式中:  $V_{\gamma}$ 为残余奥氏体体积分数;  $K_{\alpha}$ 为钢中铁素体的相关系数;  $K_{\gamma}$ 为钢中奥氏体的相关系数;  $I_{\alpha}$ 为钢中铁素体晶面衍射峰的积分强度;  $I_{\gamma}$ 为钢中奥氏体晶面衍射峰的积分强度。

计算得到衬板顶端提升条处组织中残余奥氏体体积分数为18.46%, 衬板底端组织中残余奥氏体体积分数为17.68%, 两者差距非常小, 说明衬板顶端提升条

表1 半自磨机规格及衬板服役工况

Table 1 Semi-autogenous mill specifications and liner service conditions

| 半自磨机规格/m              | 磨球最大直径/mm  | 矿浆质量浓度/% | 使用寿命/天 |
|-----------------------|------------|----------|--------|
| $\Phi 7.5 \times 3.5$ | $\Phi 127$ | 70~75    | 40     |

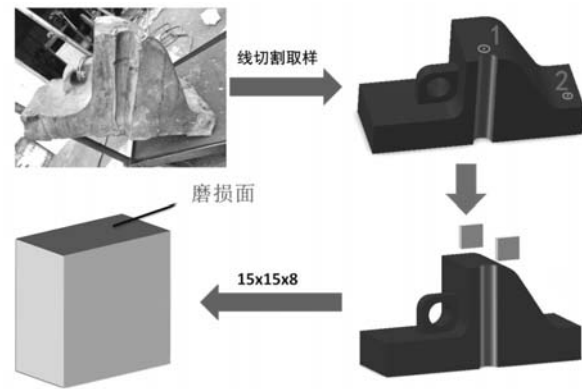


图1 失效衬板中取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling in failed liner

表2 衬板的主要化学成分

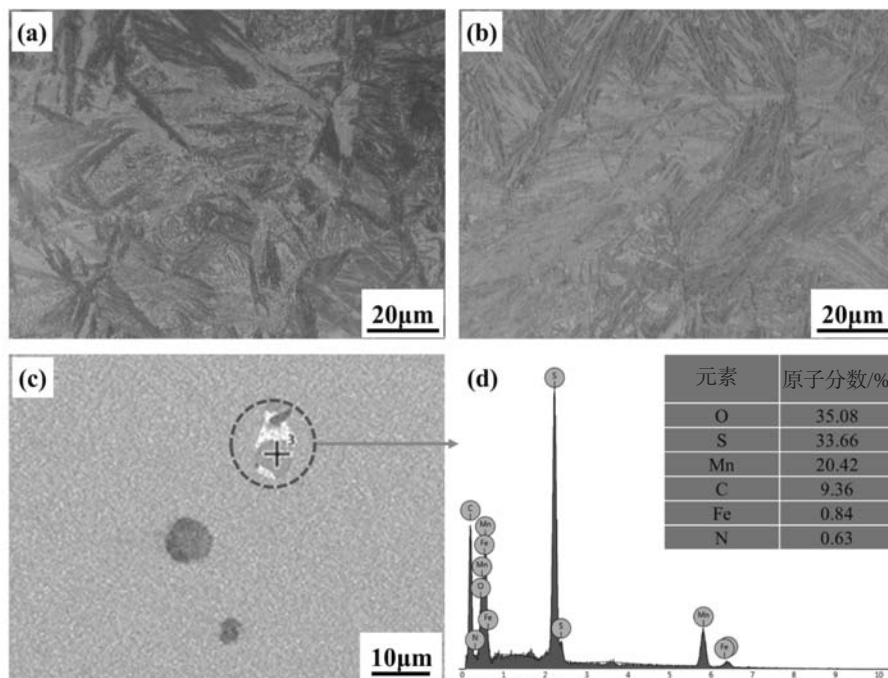
Table 2 Main chemical composition of liner

|            | C     | Si    | Mn    | P    | S     | Cr    | Ni    | Mo    | Cu    |
|------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $w_B / \%$ | 0.587 | 1.672 | 0.887 | 0.04 | 0.023 | 1.652 | 0.303 | 0.277 | 0.486 |

表3 衬板的力学性能

Table 3 Mechanical properties of liner

| 表面硬度 HRC | 中心硬度 HRC | 无缺口冲击吸收能量/J |
|----------|----------|-------------|
| 50.5     | 48.5     | 214         |



(a) 衬板顶端提升条处; (b) 衬板底端; (c)、(d) 基体的EDS

图2 衬板金相组织和能谱分析

Fig. 2 Metallographic structure and energy spectrum analysis of liner

处和衬板底端的基体组织是一致的。

### 2.2 衬板的磨损面形貌

图4是衬板顶端提升条处和衬板底端的磨损面形貌特征。如图4b所示，衬板顶端提升条处的磨损面有大量的犁沟和凹坑，犁沟为磨球、矿料与衬板间相对滑动造成的显微切削，凹坑是衬板在磨球和矿料的长时间冲击下造成的疲劳剥落。对比凹坑和犁沟的面积，衬板顶端提升条处的犁沟和凹坑数量都较多，说明衬板顶端提升条处受到的冲击力和摩擦力都很大；如图4d所示，衬板底端的磨损面犁沟较多，但凹坑却较少，说明衬板底端主要受到矿料和磨球相对运动带来的摩擦力。

### 2.3 衬板的亚表层微观组织

图5为衬板顶端提升条处和衬板底端的亚表层微观组织形貌。从图5a、b可以看出，衬板顶端提升条处的形变层要明显厚于衬板底端的形变层，这可能是受衬板工况直接影响，衬板顶端提升条处受到磨球和矿

料较大的冲击作用，而衬板底端因部分矿料堆积缓冲受到较小的冲击作用所致。另外从图5a中可以发现衬板顶端提升条处的形变层存在萌生于夹杂物附近的裂纹，而且裂纹已经扩展出了形变层，进入了衬板深处基体组织<sup>[14-15]</sup>。

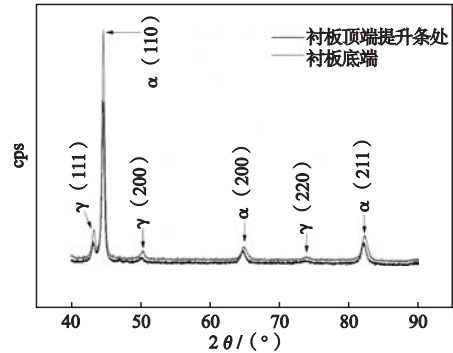
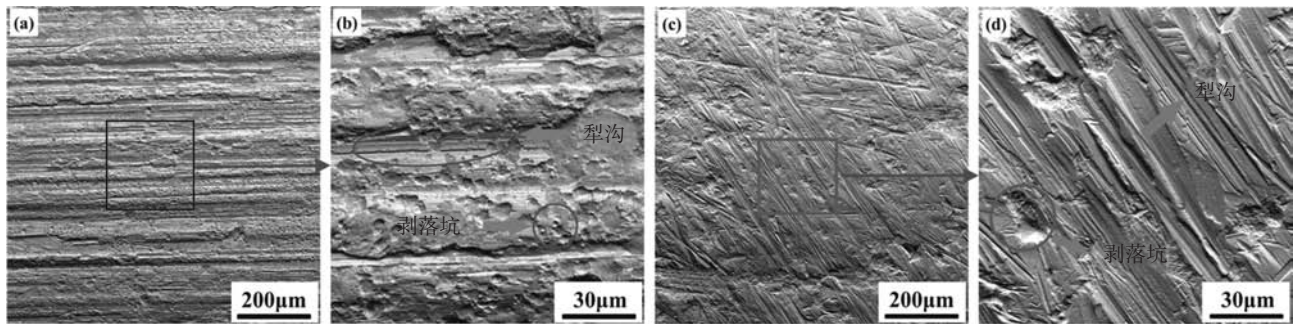


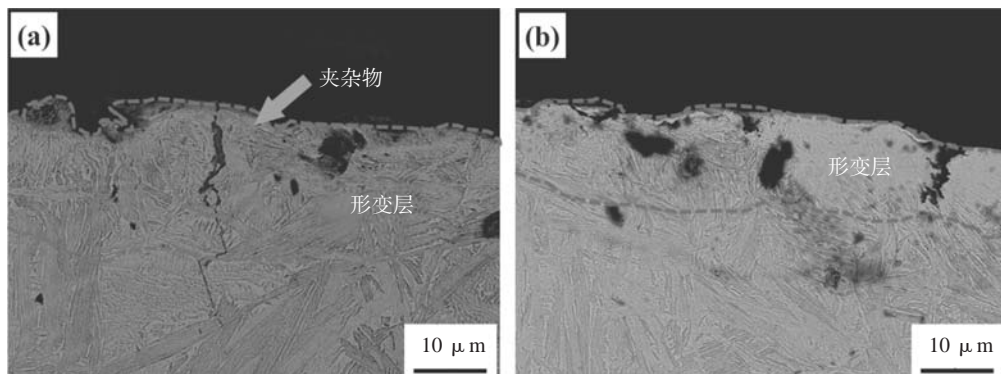
图3 衬板顶端提升条处和衬板底端的XRD谱图  
Fig. 3 XRD patterns of lifting strip and bottom of liner



(a)、(b) 衬板顶端提升条处；(c)、(d) 衬板底端

图4 衬板磨损面形貌

Fig. 4 Surface morphology of worn liner



(a) 衬板顶端提升条处

(b) 衬板底端

图5 衬板亚表层微观组织形貌

Fig. 5 Subsurface microstructure of liner

## 2.4 衬板的冲击磨损硬化曲线和显微硬度

用显微硬度计沿衬板厚度方向测量衬板的显微硬度,结果见图6、7。图6为衬板顶端提升条处和衬板底端的冲击磨损硬化曲线。图7是衬板顶端提升条处和衬板底端的亚表层硬度和较深处基体硬度的对比。可以看出,衬板的亚表层硬度较高,随着离磨损面距离的增大,衬板顶端提升条处的硬度由HV 695.5逐渐下降到HV 588.3,衬板底端的硬度由HV 653.8逐渐下降到HV 605.9,衬板顶端提升条处的亚表层硬度明显高于衬板底端的亚表层硬度,而且衬板顶端提升条处的冲击磨损硬化程度要远高于衬板底端。这可能是由于衬板顶端提升条处受到较大的冲击作用,亚表层微区形变致位错塞积。另外,由于衬板顶端提升条处的亚表层硬度符合马氏体硬度范围,因而亚表层硬度的提升可能是由于亚表层组织中的部分残余奥氏体转变为马氏体所致<sup>[6, 8-13]</sup>。

## 2.5 衬板磨损面和基体的残余奥氏体含量

为了进一步分析磨损面比基体的显微硬度高的原因,我们分别对衬板顶端提升条处的磨损面和基体以及衬板底端的磨损面和基体进行了XRD测试。图8a是衬板顶端提升条处磨损面和基体的XRD谱图,图8b是衬板底端磨损面和基体的XRD谱图。衬板底端磨损面的XRD谱图与基体的XRD谱图几乎重合,但是衬板顶端提升条处磨损面的XRD谱图与基体的XRD谱图却有些不一致,如图8a所示,衬板顶端提升条基体XRD谱图的衍射峰强度要高于磨损面XRD谱图的衍射峰强度。

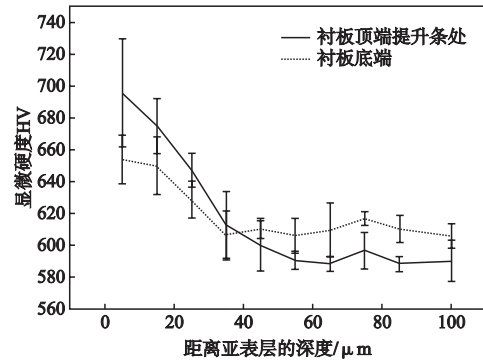


图6 衬板顶端提升条处和衬板底端的冲击磨损硬化曲线  
Fig. 6 Impact wear hardening curves of lifting strip and bottom of liner

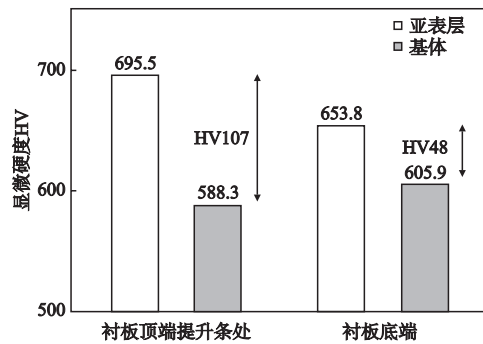
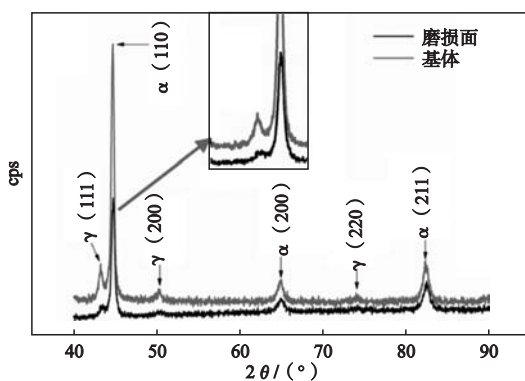
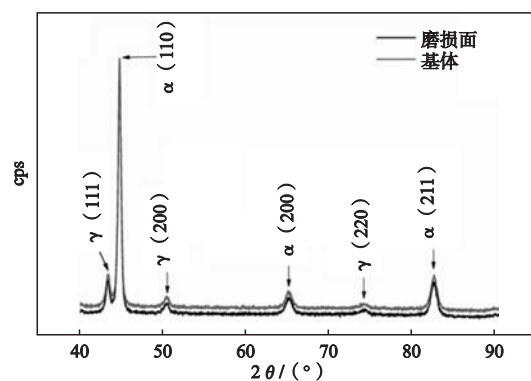


图7 衬板顶端提升条处和衬板底端亚表层硬度和衬板较深处基体硬度的对比  
Fig. 7 Comparison of subsurface hardness at lifting strip and bottom of liner and matrix hardness at deeper side of liner



(a) 衬板顶端提升条处



(b) 衬板底端

图8 衬板磨损面和基体的XRD谱图

Fig. 8 XRD spectra of worn surface and matrix of liner

为了得到衬板顶端提升条处磨损面和基体的残余奥氏体体积分数,计算残余奥氏体含量采用直接对比法,利用式(1)计算其含量<sup>[4-8]</sup>。计算得到了衬板顶端提升条处的磨损面组织中残余奥氏体体积分数为13.10%,基体组织中残余奥氏体体积分数为17.49%,磨损面中残余奥氏体体积分数明显少于基体组织中残余奥氏体体积分数,即磨损面相较于基体, $\gamma$ 相减少了,而 $\alpha$ 相增多了,故推测可能是磨损面组织中的部分残余奥氏体在冲击和高应力作用下转变为马氏体,故而磨损面的显微硬度高于基体的显微硬度<sup>[6, 8-13]</sup>。

综上所述,在矿山实际工况条件下,半自磨机衬板顶端提升条处不断受到磨球和矿料较大的冲击磨损作用,在反复冲击磨损特别是较大冲击下,衬板亚表层发生形变而呈现较明显的冲击磨损硬化现象,在耐显微切削机制磨料磨损能力提高的同时,衬板特别是其亚表层韧性下降,受形变和夹杂物共同影响,衬板亚表层处首先萌生显微裂纹,且裂纹不断扩展延伸到衬板深处,最终导致衬板早期断裂失效。

衬板失效分析和研究表明,须提高衬板用钢冶金质量,特别注意碱性炼钢时若造渣材料中含有硫化物矿石,则必须排除掉萤石,减少硫化物夹杂的形成;在保证衬板高硬韧性的前提下,进一步提高衬板用钢的韧性。这些材料技术措施将是提高半自磨机衬板使

用寿命的必要条件和主要路径。

### 3 结论

(1) 矿山半自磨机衬板的冲击磨损机理为疲劳剥落和显微切削,衬板顶端提升条处疲劳剥落和显微切削都较明显;衬板底端则是以显微切削磨损为主。

(2) 衬板使用中衬板亚表层形变并发生明显的冲击磨损硬化。硬化后衬板顶端提升条处的亚表层硬度明显高于衬板底端的亚表层硬度,而且衬板顶端提升条处的硬化深度即形变层厚度大于衬板底端形变层。

(3) 半自磨机运行中,衬板顶端提升条处不断受到磨球和矿料较大的冲击磨损作用,在反复冲击磨损特别是较大冲击下,衬板亚表层发生形变而呈现较明显的冲击磨损硬化现象,在耐显微切削机制磨料磨损能力提高的同时,衬板特别是其亚表层韧性下降,受形变和夹杂物共同影响,衬板亚表层处首先萌生显微裂纹,且裂纹不断扩展延伸到衬板深处,最终导致衬板早期断裂失效。

(4) 提高衬板用钢熔炼质量,减少衬板夹杂物;并在保证衬板高硬韧性前提下,进一步提高衬板用钢的韧性。将是提高半自磨机衬板使用寿命的必要条件和主要路径。

#### 参考文献:

- [1] 陈胜迁,郑开宏,王海艳.湿式弱碱性介质下的半自磨机衬板腐蚀磨损分析[J].特种铸造及有色合金,2016,36(6):577-579.
- [2] 龙骏,郑开宏,郑志斌,等.铜矿湿磨用球磨机合金钢衬板的腐蚀磨损失效分析[J].特种铸造及有色合金,2017,37(7):759-762.
- [3] 陈胜迁,郑开宏,王海艳,等.湿式弱酸性介质下的高锰钢衬板腐蚀磨损失效分析[J].热加工工艺,2016,45(6):159-162.
- [4] AMAR K D, DAVID C M, MARTIN C M, et al. Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by X-ray diffraction[J]. Scripta Materialia, 2004, 50(12): 1445-1449.
- [5] 范雄.金属X射线学[M].北京:机械工业出版社,1989.
- [6] 定巍,江海涛,唐荻,等.低硅TRIP钢的力学性能及残余奥氏体稳定性研究[J].材料工程,2010(4):72-75.
- [7] 杨静.高碳合金钢低温等温转变组织特征与力学性能的研究[D].秦皇岛:燕山大学,2012.

- [8] 姜颖. 超级贝氏体的TRIP效应研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- [9] 刘伟. 超细贝氏体钢组织与性能的研究 [D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2016.
- [10] 刘宏基, 宋兆焕, 柳永宁. 超级贝氏体的研究进展 [J]. 理化检验 (物理分册), 2015, 51 (1): 1-7.
- [11] GARCIA MATEO C, GARCIA CABALLERO F. The role of retained austenite on tensile properties of steels with bainitic microstructures [J]. Materials transactions, 2005, 46 (8): 1839-1846.
- [12] CORNIDE J, GARCIA-MATEO C, CAPDEVILAC, et al. An assessment of the contributing factors to the nanoscale structural refinement of advanced bainitic steels [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 577: 43-47.
- [13] 胡锋. 纳米结构双相钢中残留奥氏体微结构调控及其对力学性能的影响 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- [14] 唐荻, 杨柳, 武会宾, 等. 微观组织对贝氏体钢疲劳裂纹扩展行为的影响 [J]. 材料科学与工艺, 2013, 21 (6): 60-65.
- [15] 陈林, 郭飞翔, 王慧军, 等. 微观组织对U20Mn贝氏体钢疲劳裂纹扩展行为的影响 [J]. 材料热处理学报, 2018, 39 (2): 119-124.

---

## Failure Analysis of Cast Steel Liner for Semi-Autogenous Mill in a Copper Mine at Abroad

CHEN Jia-xia<sup>1,4</sup>, ZHANG Hui-you<sup>2</sup>, DIAO Xiao-gang<sup>1,3</sup>, LI Jie<sup>1,4</sup>, LI Wei<sup>1,4</sup>

(1. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 2. Qianxi ADI Mechanical Casting Co., Ltd., Tangshan 064300, Hebei, China; 3. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 4. National Joint Engineering Research Center of High Performance Metal Wear Resistant Materials Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China)

### Abstract:

In view of the wet grinding condition of copper ore, the failure behavior of early fracture at the top lift of the semi-autogenous mill liner was studied. X-ray diffractometry (XRD), optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM) and microhardness tester were used to analyze the phase composition and the microstructure of the top lifting strip and the bottom of the liner. The wear mechanism and crack initiation and propagation behavior of the top lifting strip and the bottom of the liner are discussed. The results show that the impact wear mechanism of the liner is fatigue spalling and micro-cutting. The fatigue spalling and micro-cutting at the top lifting strip of the liner are obvious, and the bottom of the liner is mainly micro-cutting wear. During the use of the liner, the top lifting strip of the liner has been subjected to large impact wear for a long time, and the subsurface layer has produced deformation and work hardening. Affected by the deformation and the inclusions together, microcracks initiate around the inclusions in the deformation layer and then propagate into the matrix, eventually leading to the premature rupture of the liner. To improve the melting quality of lining steel, reduce the inclusions of lining steel, and further improve the toughness of lining steel on the premise of ensuring the high hardness and toughness of lining steel will be the necessary conditions and main paths to improve the service life of lining steel of semi autogenous mill.

### Key words:

semi-autogenous mill; liner; steel; impact abrasive wear; subsurface