

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2025.5096

大型低合金钢空心磨球开裂分析

孙爱民¹, 张 颢¹, 吕振林²

(1. 马鞍山市海天重工科技发展有限公司, 安徽 马鞍山 243141; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 采用光学显微镜和扫描电镜对使用过程中开裂的大型低合金钢空心磨球残体进行了组织观察分析, 测定了其硬度和冲击韧性。结果表明, 大型低合金钢空心磨球组织中存在夹杂物和缩松, 以及组织转变不均匀和针状铁素体, 造成冲击韧性明显偏低和硬度偏高, 使空心磨球运行过程中发生开裂。提出了防止大型低合金钢空心磨球运行过程开裂的建议措施。

关键词: 空心磨球; 低合金钢; 开裂分析

中图分类号: TG156

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)06-0609-05

Analysis of the Cracking of Low Alloy Steel Hollow Grinding Balls

SUN Aimin¹, ZHANG Hao¹, LYU Zhenlin²

(1. Ma'anshan City Haitian Heavy Industry Technology Development Co., Ltd., Ma'anshan 243141, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Optical microscopy and scanning electron microscopy were used to observe and analyse the microstructures of large hollow grinding ball residues made of low-alloy steel that cracked during use, and their hardness and impact toughness were determined. The results show that inclusions and microscopic shrinkage cavities exist in the microstructures of large low alloy steel hollow grinding balls, as well as uneven and thorough microstructure transformation, resulting in significantly lower impact toughness and higher hardness, causing cracking of the hollow grinding balls during operation. Measures to prevent cracking of large low alloy steel hollow grinding balls have also been proposed.

Key words: hollow grinding balls; low alloy steel; cracking analysis

20 世纪 90 年代以来, 随着高炉喷吹煤粉技术的发展, 高炉用燃料逐渐由焦炭转为煤粉。煤粉的制备主要由 E 型中速磨煤机完成。为满足大型高炉的供煤需要, E 型中速磨煤机也向大型化发展, 最大的 E 型中速磨煤机(型号 EM140)每小时磨煤量可达 70 t 以上。其工作原理是磨球在上下磨环间滚动, 将磨环轨道内的煤块碾碎成煤粉^[1-2], 如图 1 所示。因此磨球是 E 型磨煤机的主要碾磨部件(为减轻磨球重量, 磨球通常为空心)。最大的 E 型磨煤机每台装有空心磨球 5 个, 每个空心磨球外径为 1 150 mm, 壁厚为 150 mm, 重量达 3 600 kg。为满足实际使用条件和使用性能要求, 大型空心磨球的材质通常为中碳低合金钢^[3-4], 使其具有较好的硬度和韧性匹配, 保证使用寿命。针对大型低合金钢空心磨球的结构和尺寸特点, 马鞍山市海天重工科技发展有限公司

采用了消失模铸造方法制造该空心磨球, 解决了普通砂型铸造容易产生砂芯上浮, 造成空心磨球壁厚不均匀从而影响磨煤机运行的难题, 满足了 E 型磨煤机磨球的使用性能要求, 平均使用寿命达到 15 000 h。然而大型低合金钢空心磨球在 E 型磨煤机实

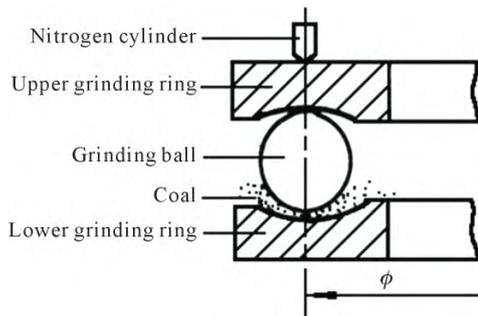


图 1 E 型中速磨煤机工作原理示意图^[1]
Fig.1 Schematic of the working principle of an E-type medium-speed coal mill^[1]

收稿日期: 2025-06-04

作者简介: 孙爱民, 1968 年生, 总经理. 主要从事耐磨铸件的生产和管理方面的工作. Email: htzgsam@163.com

通信作者: 吕振林, 1963 年生, 博士, 教授. 主要从事金属耐磨材料的研究与开发方面的工作. Email: 695794269@qq.com

引用格式: 孙爱民, 张颢, 吕振林. 大型低合金钢空心磨球开裂分析[J]. 铸造技术, 2025, 46(6): 609-613.

SUN A M, ZHANG H, LYU Z L. Analysis of the cracking of low alloy steel hollow grinding balls[J]. Foundry Technology, 2025, 46(6): 609-613.

际运行过程中,运行 3 000 多小时后发现一个磨球开裂,影响了磨煤机的正常运行。为此,本文对大型低合金钢空心磨球的开裂原因进行分析,并提出防止大型低合金钢空心磨球开裂的措施,为磨球的稳定生产和安全运行提供技术保障。

1 空心磨球的材质和性能要求

大型空心磨球材质为 40Cr2Ni2Mo 中碳低合金钢^[4],经正火(880~920 °C,空冷)+回火(550~620 °C,空冷)处理后的金相组织为回火索氏体,如图 2 所示。其力学性能要求^[5]抗拉强度 $R_m > 800$ MPa、冲击韧性 $\alpha_{kv2} \geq 20$ J/cm²、硬度 35~40 HRC (为保证韧性而没有选择更高的硬度)。装机运行结果表明,此种空心磨球的磨损速度为 3 mm/千小时,平均使用寿命约为 15 000 h。

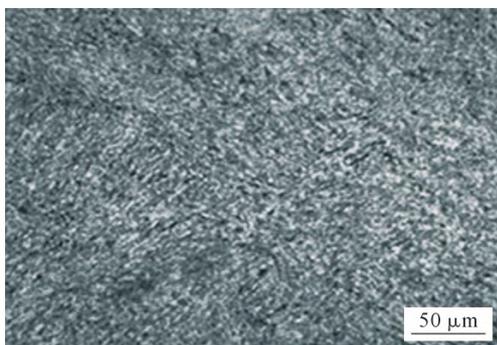


图 2 大型空心磨球金相组织

Fig.2 Metallographic structure of a large hollow grinding ball

2 空心磨球开裂分析

大型低合金钢空心磨球在 E 型磨煤机实际运转 3 000 多小时后发现一个磨球对半开裂,如图 3 所示。从断面观察可明显看出裂纹源区、裂纹扩展区和最后撕裂区,故认为大型低合金钢空心磨球的开裂属于疲劳断裂。对裂纹源区局部观察可见,断面上存在不致密区,即疏松区(裂纹起源之处),如图 4 所示。在扫描电镜上对断面微观形貌观察可见,断



图 3 空心磨球开裂宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of cracked hollow grinding ball

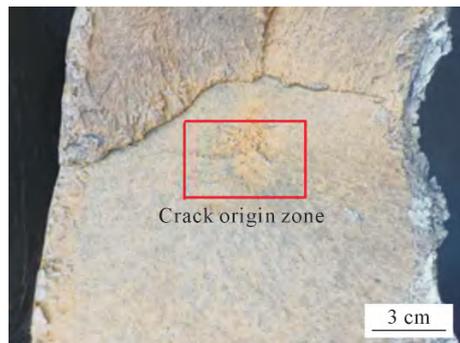


图 4 空心磨球开裂局部形貌

Fig.4 Local morphology of the cracked hollow grinding ball

面呈现沿晶准解理断裂形貌,且在晶界处存在夹杂物(主要为 FeO)及晶界裂纹(图 5)。FeO 的存在表明钢液脱氧还不完全,因为氧在钢液中主要以 FeO 形式存在^[6]。对磨球残体的光镜组织观察如图 6 所示,其中图 6a 为靠近空心磨球外表面处的组织,图 6b 为空心磨球壁厚中心处的组织。可以看出,在靠近磨球表面处,尽管大部分转变为索氏体组织,但还保留少部分块状和针状铁素体;而在壁厚中心处则存在着疏松、夹杂物及部分组织保留马氏体形态(即马氏体没有转变完全)。这表明开裂的大型低合金钢空心磨球组织中,除了存在微观缩孔、夹杂物外,还存在热处理组织不均匀的问题。这些组织缺陷均可成为其疲劳裂纹的起源^[7-12]。

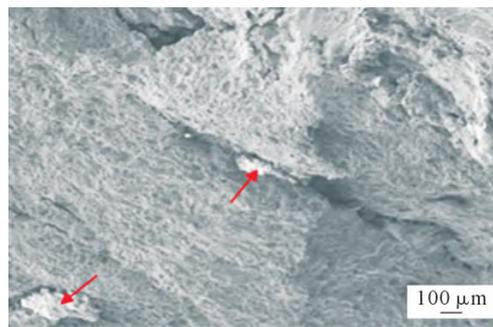


图 5 空心磨球残体断面微观形貌

Fig.5 Cracked-sectional morphology of cracked hollow grinding

由于大型低合金钢空心磨球组织中存在的缺陷及组织不均匀现象,造成了其冲击韧性偏低,对开裂的空心磨球残体取样测得冲击韧性 α_{kv2} 为 5.8~7.6 J/cm²(平均 6.7 J/cm²,按照 GB/T 229 标准,采用 10 mm×10 mm×55 mm 标准试样,V 型缺口,在 JBS-300B 型摆锤冲击试验机上测定),远低于低合金钢空心磨球的冲击性能指标要求。硬度为 41~43 HRC (采用 HBRV-187.5 型布洛维硬度计在冲击试样上测定),稍高于磨球的硬度指标要求。

空心磨球中的微观孔洞与铸造工艺设计和钢液在铸型中的冷却有关,主要是凝固时钢液补缩不足。

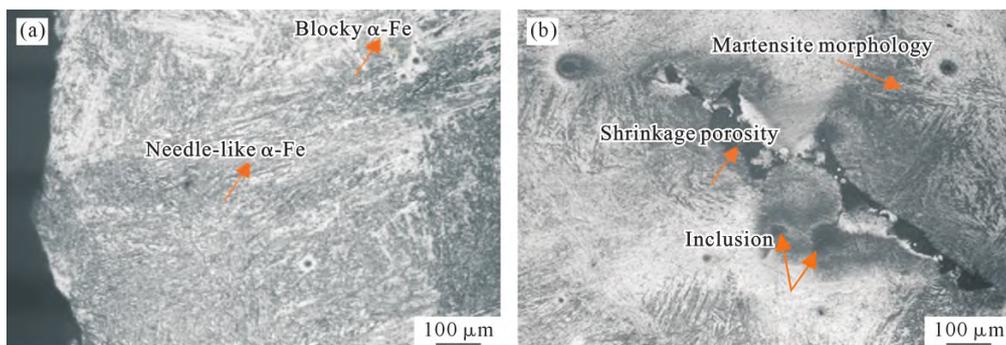


图6 空心磨球残体金相组织:(a) 靠近磨球外表面处的组织;(b) 磨球球壁中心组织

Fig.6 Microstructure of cracked hollow grinding balls: (a) microstructure near the outer surface of the grinding ball; (b) microstructure at the center of the grinding ball wall thickness

造成的,在空心磨球铸造工艺设计时,应保证钢液的顺序凝固,并与冒口配合,使缺陷进入冒口中而保证空心磨球的致密性。

空心磨球组织不均匀性是热处理过程中造成的。在热处理过程中,一是奥氏体化不充分,即铸态组织未完全转变为奥氏体(空心磨球在炉内加热时整体温度不均匀或偏低),冷却时铁素体优先在贫碳区域形核,形成块状或针状组织;二是正火时冷却速度不足,大型空心磨球尺寸和重量均较大,冷却速度可能过慢导致奥氏体在较高温度区间(珠光体转变区域以上)析出先共析铁素体,形成块状(多边形)铁素体;而冷却速度介于正火与退火之间,则会出现针状铁素体(魏氏体)。

大型低合金钢空心磨球在实际热处理过程中,采用大型燃气热处理炉,炉长6 m,装球4~6个。因炉膛体积大,装球数量多,且是点状发热器,造成炉内温度不均匀及空心磨球球体温度偏低,从而形成了正火及回火后的组织转变不均匀现象。再加上组织中缩松和夹杂物的存在,造成了磨球在运行过程中萌生了疲劳裂纹及裂纹扩展,进而引起断裂。

3 其他因素

除微观组织外,引起空心磨球开裂的因素可能还与其表面缺陷有关。消失模铸造大型低合金钢空

心磨球存在最多的表面缺陷,一是表面夹渣,二是表面微裂纹(磁粉探伤显示),如图7所示。夹渣物的来源有:①泡沫模样的残留物,泡沫模样在高温钢液作用下气化不完全,残留的碳渣或液态焦油状物质卷入钢液,形成夹渣,这是消失模铸造方法特有的缺陷^[13-17];②钢液熔化和浇注过程中操作不当造成,如原料锈蚀严重、扒渣不彻底、浇注时挡渣不严格以及脱氧不充分等,钢液中渣滓较多并随钢液流入铸型中而形成。

由于大型空心磨球体积和质量庞大,在钢液凝固过程中承受的热应力和相变应力也大,再加上晶界夹杂、微气孔、缩松等缺陷,极易造成裂纹的出现^[18-20]。

表面夹渣和微裂纹的存在,会造成空心磨球在实际运行过程中疲劳裂纹的萌生和扩展,引起空心磨球开裂。图8为正常使用后更换下来的空心磨球表面形貌。可以看出,磨球表面除了煤粉造成的碾压坑外,还出现了裂纹。因此表面夹渣及微裂纹,也可能引起大型低合金钢空心磨球疲劳裂纹的出现^[21-22]。

综合上述分析,大型低合金钢空心磨球运行过程中发生的开裂与其内部组织不均匀性、夹杂物、缩松及表面夹渣、微裂纹等因素有关。尤其是内部组织不均匀及针状铁素体、缩松的存在是造成本次大型低合金钢空心磨球开裂的主要原因。

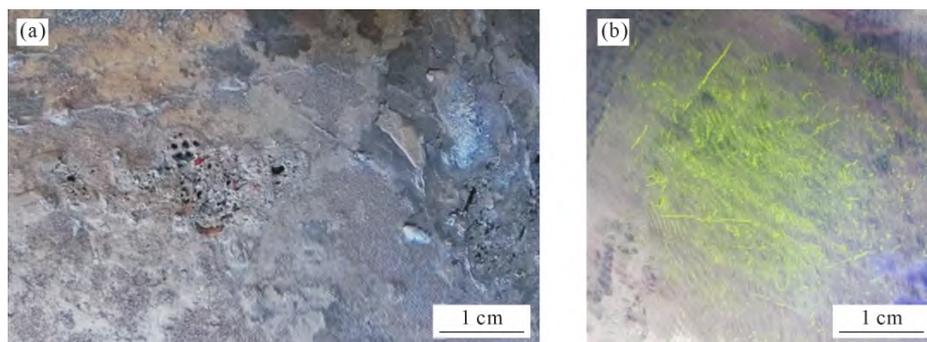


图7 空心磨球表面缺陷:(a) 表面夹渣缺陷;(b) 铸态表面微裂纹缺陷

Fig.7 Surface defects of a hollow grinding ball: (a) surface slag inclusion defect; (b) microcrack defect on the as-cast surface of a hollow grinding ball

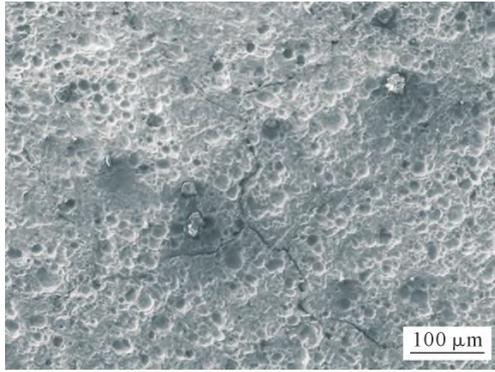


图8 运行 15 000 h 后的磨球表面形貌

Fig.8 Surface morphology of the grinding ball after 15 000 h of operation

4 建议

为防止大型低合金钢空心磨球在 E 型磨煤机运行过程中发生开裂现象,建议从钢液熔化质量、泡沫模样制备、钢液浇注过程、热处理过程等方面严格操控,保证钢液熔化质量和热处理质量,从而保证大型低合金钢空心磨球的力学性能和使用效果。

(1)钢液质量 通过原材料控制、脱氧除气、精细除渣和静置吹氩等措施,减轻钢液中夹杂物数量和气体含量,保证钢液熔化质量。

(2)泡沫模样 选用密度适中、残留物及发气量小的泡沫粒子。涂料涂刷均匀,且充分干燥。

(3)浇冒口设计及浇注过程控制 浇冒口设计时注意挡渣和集渣,并形成顺序凝固;浇注过程注意浇铸温度和挡渣,防止渣滓流入铸型。

(4)热处理 加热和保温时保证大型空心磨球整体温度均匀和完全奥氏体化,冷却时完全转变为马氏体。回火时注意避开出现回火脆性的温度区间,保证马氏体完全转变为回火索氏体。从而保证空心磨球的组织均匀性和使用性能要求。

(5)空心磨球质量检验 除按规定检测磨球本体硬度外,还应增加磨球本体金相组织检验,对于组织异常的空心磨球,应筛选出来并重新进行热处理。

参考文献:

- [1] 胡海明,蒋海育,李新富,赵卫东. E 型磨煤机磨球材质的研制[J]. 水利电力机械,1994(4): 39-42.
- [2] 妞家鳌. E 型磨煤机的系统和特点[J]. 华东电力,1981(1): 75-80.
- [3] 李宁波,谢敬佩,王文焱,王爱琴. 耐磨立磨空心磨球材料及性能研究[J]. 铸造技术,2011,32(7): 951-953.
- LI N B, XIE J P, WANG W Y, WANG A Q. Wear-resistant hollow ball of vertical mill and properties [J]. Foundry Technology, 2011, 32(7): 951-953.
- [4] 江海燕,张颢,施懋祥,吕振林,孙爱民. 低合金钢大型空心磨球热处理裂纹的分析[J]. 铸造技术,2017,38(10): 2380-2382, 2392.

- JIANG H Y, ZHANG H, SHI M X, LYU Z L, SUN A M. Analysis of heat treatment cracks in large hollow grinding balls[J]. Foundry Technology, 2017, 38(10): 2380-2382, 2392.
- [5] 江海燕,吕振林,李伟,张良红,张颢,黄宜荣,施懋祥. $\phi 1150$ 大型耐磨空心磨球产业化关键制备技术的研发[Z]. 安徽:马鞍山市海天重工科技发展有限公司,2018-04-21.
- [6] 张磊. 铸造合金及其熔炼[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2021.
- [7] LANG K H, KORN M, ROHM T. Very high cycle fatigue resistance of the low alloyed steel 42CrMo4 in medium- and high-strength quenched and tempered condition[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 1133-1142.
- [8] RUFFING C, IVANISENKOC Y, KERSCHER E. A comparison of the fatigue and fracture behavior of high strength ultrafine grained medium carbon steel SAE 1045 with high strength bearing steel SAE 52100[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 2: 3240-3247.
- [9] ZHOU S T, LI Z D, YANG C F, XIE S K, YONG Q B. Cleavage fracture and microstructural effects on the toughness of a medium carbon pearlitic steel for high-speed railway wheel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 761: 138306.
- [10] HASHIMOTO K, FUJIMATSU T, TSUNEKAGE N, KAZUHIKO H, HIRAOKA K, KIDA K, SANTOS E S. Effect of inclusion/matrix interface cavities on internal-fracture-type rolling contact fatigue life[J]. Materials & Design, 2011, 32: 4980-4985.
- [11] CHEN Z, CHEN N P, WANG Q M, RAN Q J, WEI C C, TANG J, LONG J H, ZHANG Y L. Research on fatigue crack propagation and fracture failure analysis of piston rod[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 174: 109523.
- [12] 陈红圣,徐贵宝,李平平. 地铁转向架关键铸钢件失效分析及质量改进[J]. 铸造,2017,66(12): 1329-1332.
- CHEN H S, XU G B, LI P P. Failure analysis and quality optimization on the critical steel casting of metro bogie [J]. Foundry, 2017, 66(12): 1329-1332.
- [13] 高成勋. 铸钢件消失模铸造常见缺陷与防止措施[A]. 2023 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆:重庆铸造行业协会,重庆市机械工程学会铸造分会,2023. 156-159.
- GAO C X. Brief discussion about corresponding prevention measures from defects in steel castings with full mold casting[A]. Proceedings of the Chongqing Casting Annual Conference 2023 [C]. Chongqing: Chongqing Foundry Industry Association, Foundry Branch of Chongqing Mechanical Engineering Society, 2023. 156-159.
- [14] 朱锦辉. 消失模铸造铸钢件夹渣分析及解决办法[J]. 金属加工(热加工),2019(8): 78-79.
- [15] 李增民,李立新,张田田. 消失模铸钢件夹渣缺陷的形成机理分析[J]. 特种铸造及有色合金,2011,31(3): 245-247.
- LI Z M, LI L X, ZHANG T T. Origination of slag inclusion in EPC steel casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2011, 31(3): 245-247.
- [16] 袁东湖,张宝庆,王林慧,裴虎平,王国平. 消失模铸造“夹渣”缺陷的成因及对策[J]. 铸造技术,2011,32(1): 133-135.
- YUAN D Z, ZHANG B Q, WANG L H, PEI H P, WANG G P. Causation and prevention of sand inclusion defect in EPC process [J]. Foundry Technology, 2011, 32(1): 133-135.
- [17] 张复文,童容英,栾新华. 铸钢工程车桥壳消失模铸造[J]. 铸造

- 技术, 2020, 41(3): 283-285, 290.
- ZHANG F W, TONG R Y, LUAN X H. EPC cast steel engineering axle shell[J]. Foundry Technology, 2020, 41(3): 283-285, 290.
- [18] 罗怀晓, 李云. ZG25 铸钢件裂纹产生原因分析[J]. 铸造技术, 2017, 38(1): 120-121.
- LUO H X, LI Y. Analysis on formation cause of crack in ZG25 casting steel[J]. Foundry Technology, 2017, 38(1): 120-121.
- [19] 王虎. 大型铸钢件表面裂纹缺陷的产生原因及控制措施[J]. 建设监理, 2024(3): 79-82.
- [20] 陈帮文. 中大型铸钢件铸造缺陷分析与控制[A]. 2021 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆: 重庆铸造行业协会, 重庆市机械工程师学会铸造分会, 2021. 123-129.
- CHEN B W. Analysis and control of casting defects in medium and large cast steel parts [A]. Proceedings of the Chongqing Casting Annual Conference 2021[C]. Chongqing: Chongqing Foundry Industry Association, Foundry Branch of Chongqing Mechanical Engineering Society, 2021. 123-129.
- [21] 王志明. ZL114A 铝合金电动汽车底盘横梁开裂失效分析[J]. 金属热处理, 2019, 44(S1): 142-146.
- WANG Z M. Crack failure analysis of ZL114A aluminum alloy electric vehicle chassis beam[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(S1): 142-146.
- [22] ZHAO H, HAN R P, GAO J W, ZHU S P, HAN J. Fatigue performance evaluation of high-strength railway axles subjected to different surface defects [J]. Alexandria Engineering Journal, 2025, 127: 66-74.

(责任编辑: 杨浩雪)