

磨煤机用磨球磨损失效分析及球耗降低策略

马元礼¹, 周兵¹, 冯宝宇¹, 于磊¹, 李骞², 何生成², 刘康²

(1. 黄河大通发电有限责任公司, 青海西宁 810100; 2. 青海大学机械工程学院, 青海西宁 810016)

摘要: 应用于磨煤机的磨球存在磨耗过大、破煤效率低的问题。采用扫描电子显微镜、X-射线衍射、激光共聚焦显微镜等仪器对ZQCr5磨球磨损状况进行了表征, 并利用EDEM软件调整球径配比, 通过煤块粘结键破坏速率、破碎作用力和衬板所承受的能量三方面进行定量比较, 得出最佳方案。结果表明: 硬度和韧性偏低是造成磨球损耗较高的主要原因, 建议提高Cr含量并控制残余奥氏体含量来提升耐磨性。切向磨削为破碎烟煤主要方式, 表面磨削磨损为磨球主要失效方式。更改磨球级配关系为 $\Phi 60\text{ mm}:\Phi 30\text{ mm}:\Phi 20\text{ mm}=16:3:1$, 可以使得磨球消耗同比降低35%, 破碎效率提升9%, 衬板的损耗大幅降低, 该工作可为提升磨煤效率, 降低磨球损耗提供参考。

关键词: 金属磨球; 球耗; 显微组织; 失效分析; 离散元模拟; 磨煤效率

作者简介:

马元礼(1973-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火电厂特种设备故障诊断与处理。E-mail: 13997258612@163.com

通讯作者:

李骞, 教授, 硕士生导师。电话: 13389710640, E-mail: 178660319@qq.com

中图分类号: TG115.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

07-0819-08

基金项目:

青海省基础科学研究计划(2022-ZJ-742); 大通县科学技术项目(PJ-161588222246836)。

收稿日期:

2022-08-17 收到初稿,

2022-09-21 收到修订稿。

燃煤发电作为我国能源消费的主体^[1-2], 其能源利用效率问题一直是研究的热点。截至2021年末, 中国火电装机容量129 678万千瓦, 同比增长4.1%。磨煤机在燃煤发电中用来破碎煤块, 是提升煤炭燃烧效率的重要一环^[3]。磨煤过程中, 磨球与衬板的过量磨损消耗会大幅增加成本^[4-6], 且耐磨件大幅变形后也会使得磨煤效率降低^[7]。研究者们为提升磨球及衬板耐磨性做了很多工作, 包括改变材料化学成分与生产工艺^[8-10], 更改磨球尺寸^[11]、更改衬板排布方式等。还有研究者基于离散元仿真方法对衬板的形状^[12]、磨球的尺寸^[13]及添加比例^[14-16]进行了更为深入的探究, 对煤粉细度提升及生产成本降低具有不可忽视的指导作用。为解决实际破碎烟煤时球耗高的问题, 本研究以某电厂磨煤机破碎烟煤的实际情况为基础, 采用离散元模拟软件EDEM对投入磨球配比进行了优化, 从而提高了磨煤的利用率, 减少了磨球损耗。

1 试验材料及方法

1.1 失效样品制备及测试方法

在BBD 4054双进双出钢球磨煤机中随机抽取ZQCr5磨球中度磨损状态、重度磨损状态, 并与未磨损的磨球对比。使用线切割从球体切取测试样品。测定磨球的化学成分并观察其显微组织、磨损形貌和磨损失效情况。

1.2 数值模拟方案

采用EDEM 2020离散元软件, 对磨煤机进行了建模, 仅保留了破碎煤块部分。利用Solidworks软件建立了模型, 并导入EDEM进行分析。煤块按实际工作状态下的烟煤的物理属性进行参数输入, 选择实际工况下使用的磨球材料进行参数的输入, 衬板材料为高铬铸铁, 关键参数设置如表1所示。

对工厂内现采用磨球投放方案进行离散元分析模型的建立, 瞬时型腔内磨球保有量为2 t, 煤料直径为40 mm, 投放1 t。不同直径磨球投放比例为 $\Phi 60\text{ mm}:\Phi 30\text{ mm}:\Phi 20\text{ mm}=1:2:1$, 在模拟环境中煤料及磨球下落至磨煤机筒体内衬板上, 在0.4 s颗粒全部生成完毕, 磨煤机平稳运行。设置总模拟时间为10 s, 磨煤机筒

表1 材料特性参数
Table 1 Characteristic parameters of the materials

材料	半径/mm	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/GPa
煤料	20	1 300	0.3	2×10^8
磨球(中铬白口铸铁)	30/15/10	7 700	0.27	4.5×10^{10}
衬板(高铬白口铸铁)		7 800	0.3	4.5×10^{10}

体的转速为16.6 r/min。保证总投放磨球及煤量不变,制定新的磨球级配方案如表2所示,通过衡量破碎定量煤料所需时间并结合衬板磨损状况来探索最佳级配方案。

表2 磨煤机磨球投放级配方案
Table 2 Grading scheme for the ball feeding of the coal mill

方案	装球规格及重量/kg		
	60 mm	30 mm	20 mm
原方案	500	1 000	500
No.1	1 000	500	500
No.2	500	500	1 000
No.3	1 200	300	500
No.4	500	300	1 200
No.5	1 600	300	100
No.6	300	1 600	100
No.7	1 800	100	100
No.8	2 000	0	0

2 结果与讨论

2.1 失效磨球化学成分

失效磨球各元素含量(质量分数%): 3.06 C, 4.96 Cr, 0.026 Cu, 0.958 Mn, 0~0.010 Mo, 0.711 Si, 0.017 P, 0.027 S。与国家电力行业标准DL/T 681.1—2019《燃煤电厂磨煤机耐磨件技术条件》对比后显示:各元素含量均符合标准要求,可排除化学成分不合格导致的磨球过早失效的可能。

2.2 磨球宏观磨损状态及微观组织

在球磨机内部抽取未磨损的磨球、中度磨损的磨球和重度磨损的磨球,对磨球表面组织状况以及心部组织进行了分析。未磨损与其他两种磨损状态下磨球微观组织形态见图1、图2、图3。

铬系白口铸铁的碳化物类型、形态及分布由Cr/C决定,中铬铸铁的Cr/C小于3.5,碳化物类型为 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C} + (\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 混合型, $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 型碳化物与 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 型碳化物相比,不仅硬度高且强度和

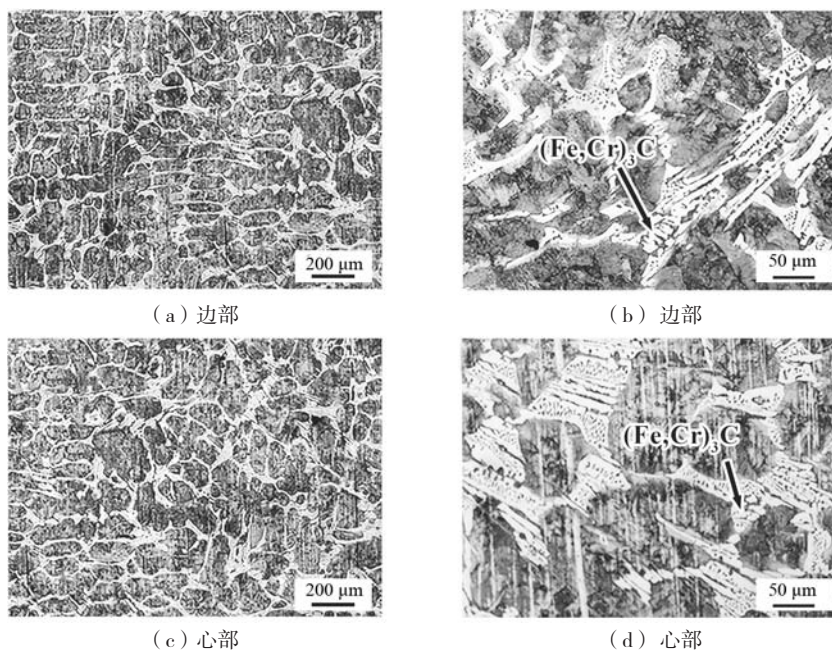


图1 未磨损磨球微观组织

Fig. 1 The microstructures of the non-worn grinding ball

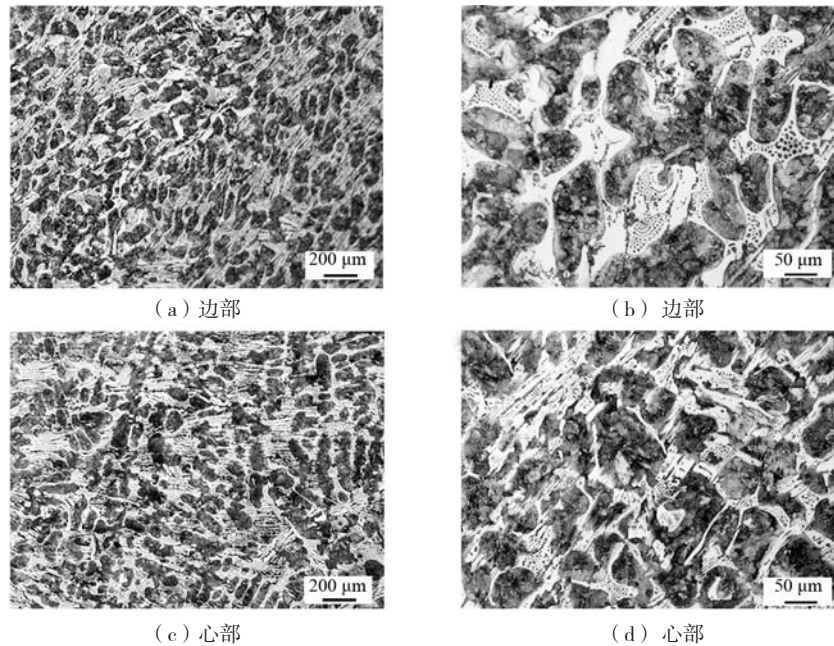


图2 中度磨损磨球微观组织

Fig. 2 The microstructures of the moderately worn grinding ball

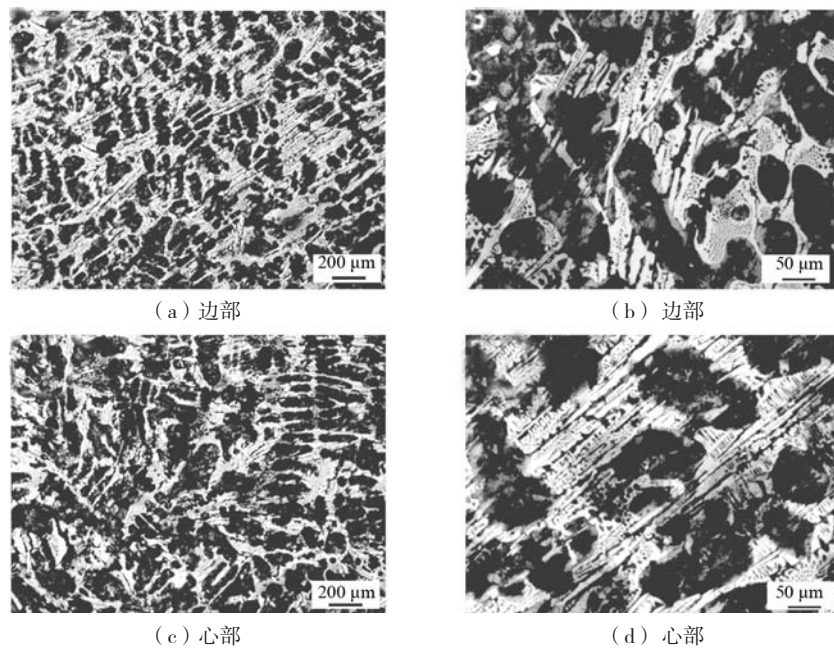


图3 重度磨损金相组织

Fig. 3 The microstructures of the severe worn grinding ball

韧性也高,但结果显示磨球样品中 $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 占比更高。由图1a,图2a,图3a金相照片可以了解到, $(\text{Fe}, \text{Cr})_3\text{C}$ 型碳化物在小范围内存在连续网状现象,在碳化物的局部连接位置存在断续网状现象,但整体看来,大部分为孤立的网状,方向性不明显。这会导致碳化物对基体的割裂作用加重,大大降低韧性和耐磨性。因此,建议通过增加Cr含量,提升Cr/C,

可以提高磨球中 $(\text{Cr}, \text{Fe})_7\text{C}_3$ 型碳化物的比例,进而提升耐磨性,防止过早失效。

未磨损状态下磨球表面的微观形貌如图4所示,重度磨损后的磨球表面微观形貌如图5所示。从两者对比结果来看,磨球表面主要以显微切削为主,含有少量的塑性变形区和磨料嵌入区,见图5a,5b。由于实际工况下磨料磨损会使得磨球产生剥落,导致磨球表面

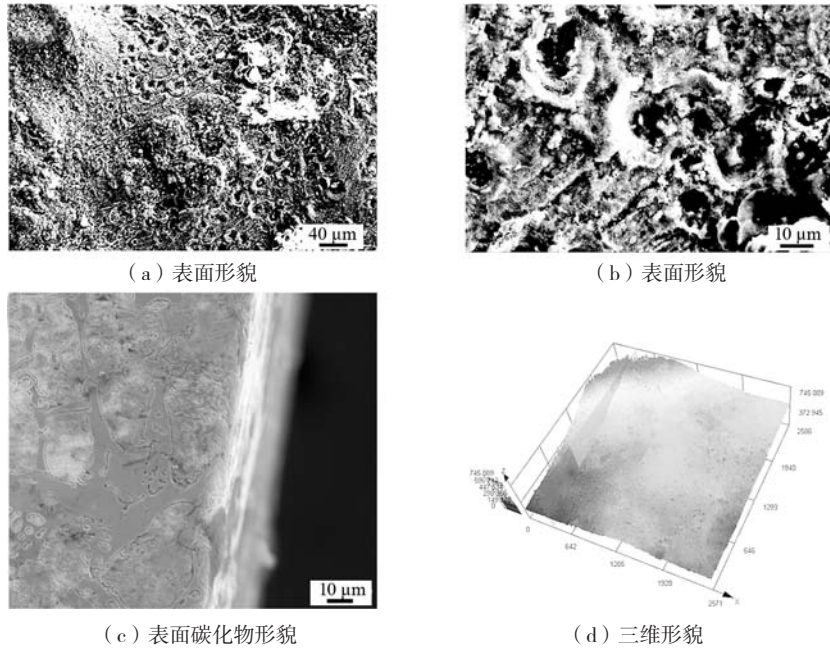


图4 未磨损磨球

Fig. 4 The surface morphologies of the non-worn grinding balls

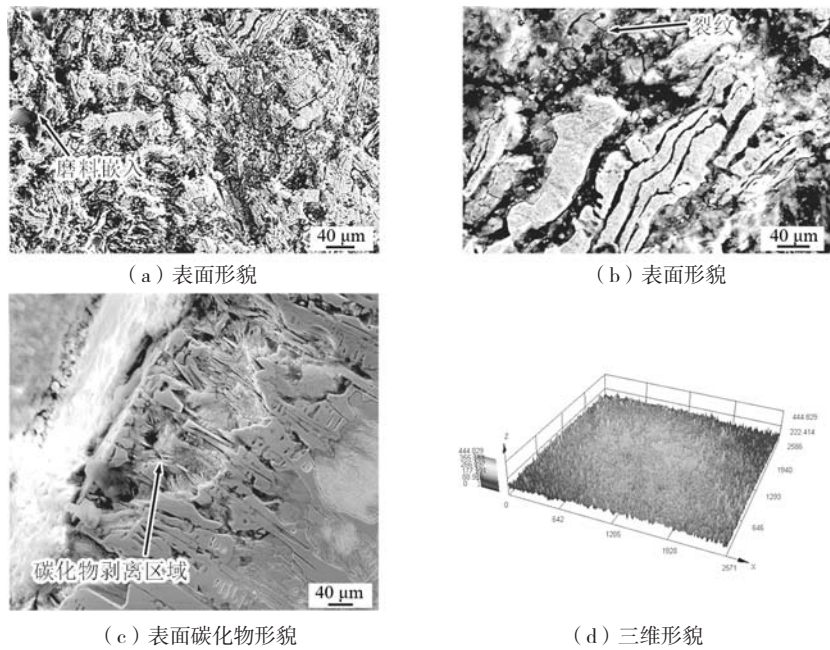


图5 重度磨损磨球

Fig. 5 The surface morphologies of the severe worn grinding balls

有大量的凹坑和局部有裂纹出现，进而使得碳化物从基体表面完全脱离，如图5c所示，从而形成图5a中的剥落坑。在失去碳化物的保护后，基体磨损加剧，磨损量增加^[17]。未磨损及重度磨球两种磨球激光共聚焦显微镜下三维表面形貌如图4d，图5d显示：未磨损磨球的表面粗糙度较高，而重度磨损后的磨球表面已被煤料磨损至较为光滑。因此，根据上述对磨球工况及磨

损状况的分析，磨球需要有足够的硬度来抵抗煤料中坚硬物质的磨削磨损。

图6为三种状态下磨球的X射线衍射分析结果，结果表明， $(Fe, Cr)_3C$ 和 $(Cr, Fe)_7C_3$ 两种碳化物混合分布在磨球中，磨损前后磨球的XRD谱图基本一致，但严重磨损后的 $(Fe, Cr)_3C$ 含量有明显的降低。利用公式计算磨球残余奥氏体含量^[18-19]得，未磨损磨球样品

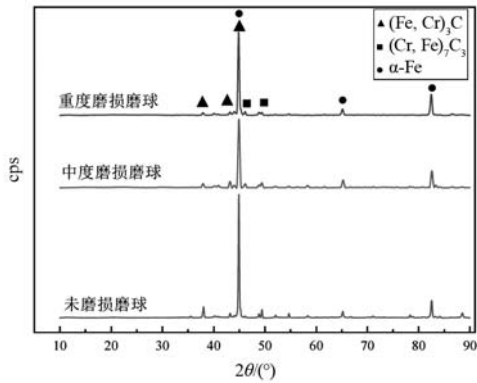


图6 三种磨损状态磨球X射线衍射分析结果

Fig. 6 X-ray analysis results of the grinding balls in three wear states

的残余奥氏体体积分数为12%，中度磨损样品的残余奥氏体体积分数为11.9%，重度磨损样品的残余奥氏体体积分数为10.5%。随着磨煤过程的推进，残余奥氏体在承受较大应力后发生相变，使得其体积分数降低了1.5%。相关研究表明^[20-22]，优化热处理工艺可以严格控制残余奥氏体含量，进而增加耐磨性，这可以有效降低磨球的损耗。

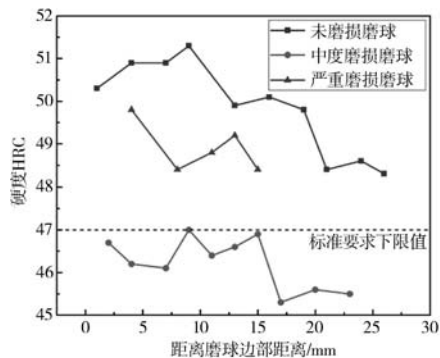
2.3 力学性能和断口特征

图7a为三种磨损状态下磨球在半径方向上的硬度测试结果，未磨损状态磨球由表及里硬度呈减少趋势，表面硬度HRC 50.2，硬度分布范围为HRC 48.3~51.3。中度磨损状态磨球靠近表面硬度仅为HRC 46.7，距离边部9 mm位置的硬度最高为HRC 47，其他位置的硬度值远低于标准要求的HRC 47，故中度磨损磨球硬度值不符合标准。

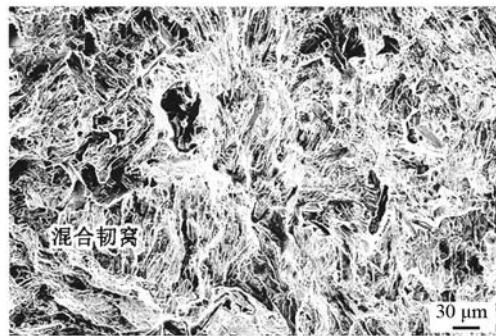
对磨球取样进行无缺口冲击韧性测试，结果为4.26 J/cm²，韧性较低，这与磨球中(Fe, Cr)₃C型碳化物占比更多、对基体的割裂作用明显有关。冲击断口的形貌如图7b所示，经无缺口冲击韧性测试后，样品断口处表现为混合韧窝特征，即脆性断裂中有韧窝出现，其塑性变形能力有限，韧性较差，属于准解理脆性断裂，断口整体比较灰暗，未发现明显夹杂物导致的断裂现象。

2.4 不同磨球级配方案破碎效果

八种磨球直径配比方案得到的模拟结果与原始方案得到的数值仿真结果如图8所示，图8a中显示了在模



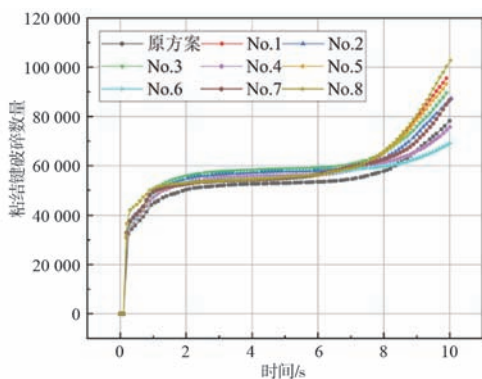
(a) 硬度分布



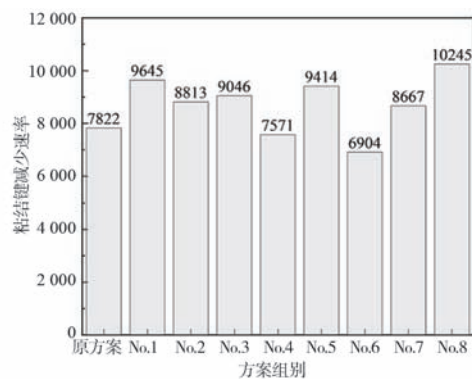
(b) 冲击断口形貌

图7 三种磨损磨球半径方向硬度分布及冲击断口形貌

Fig. 7 The hardness distributions in the radial direction of three kinds of the wear grinding balls and the impact fracture morphologies



(a) 实时破碎数量



(b) 破碎速率

图8 不同球径配比方案下粘结键变化

Fig. 8 The change of the bond under different ball diameter proportioning schemes

拟时间为10 s内烟煤块粘结颗粒的破碎数量。原方案在10 s左右时烟煤块粘结键破碎数量达到78 216个，而No.8号方案此时破碎粘结键达到了102 681个，拥有最佳的破碎效果。No.1方案，No.5方案，No.3方案次之（见图8b）。最佳破碎效率的排列顺序为No.8方案，No.1方案，No.5方案，No.3方案，相对原方案破碎效率分别提升了31%，23%，20%，16%。

由于上述分析只考虑了破碎效率，忽视了磨料对衬板的磨损影响，所以必须对以上四种条件下的衬板磨损情况进行深入的分析。采用优选方案后衬板所受

法向能量与切向能量如图9所示。虽然No.8方案拥有最高的破碎效率，但与此同时造成的衬板法向磨损量远超过其他方案及原方案。No.1方案造成的衬板切向磨损能量最高达65 093 J，原方案磨损能量为54 849 J，同比增加19%，如图9b所示。因此，在考虑衬板磨损量的基础上，重点优化方案选定为3号和5号，其中No.5方案形成的综合磨损能量最小，为69 122 J，No.3次之，为70 317 J，综合考虑衬板损耗与磨煤效率后最终认为No.5方案为最佳方案。

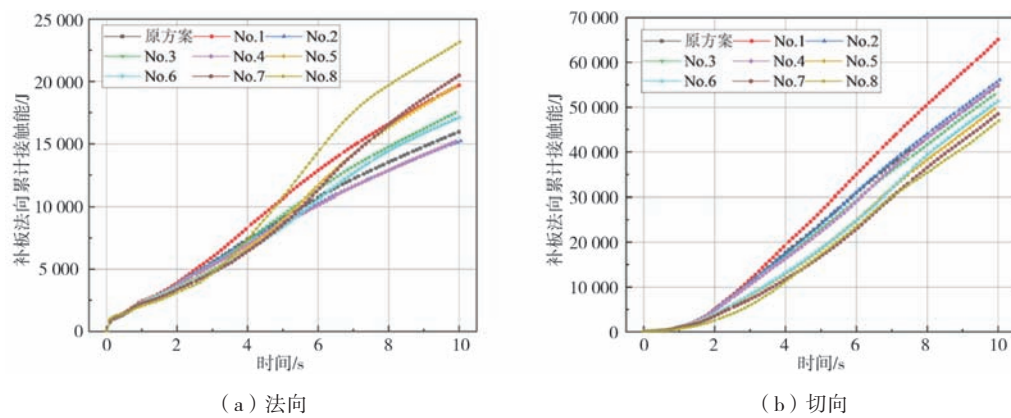


图9 九种球径配比方案下衬板所承受能量

Fig. 9 The energy borne by lining plate under nine schemes

2.5 改进级配后仿真效果

为了检验第5号方案是否有利于减少磨球的损耗，在No.5方案的磨球配比基础上，保证1 t煤量不变，降低磨球总投入量至1 300 kg，即投入 $\Phi 60$ mm磨球1 040 kg， $\Phi 30$ mm磨球195 kg， $\Phi 20$ mm磨球65 kg，仿真结果如图10a。此方案在9.122 s实现原方案10 s内破碎相同煤料粘结键数目，使得磨煤时间减少约9%，球耗降低35%。破碎过程中煤块颗粒粘结键所受法向力与切

向力如图10b所示，原方案中粘结键所受切向力为主要破碎力，这与失效分析中磨球的磨损状态一致，即破碎烟煤过程中ZQCr5磨球主要为磨削失效，它比冲击磨损占据更大比重，提升磨球的硬度可以有效地缓解磨削造成的体积损失。通过对磨球配比进行优化设计，使煤块承受的法向力和切向力同时实现粉碎效果，从而提高了磨矿的生产效率。

为了同时减少衬板磨损，分析了在8.25 s时最优

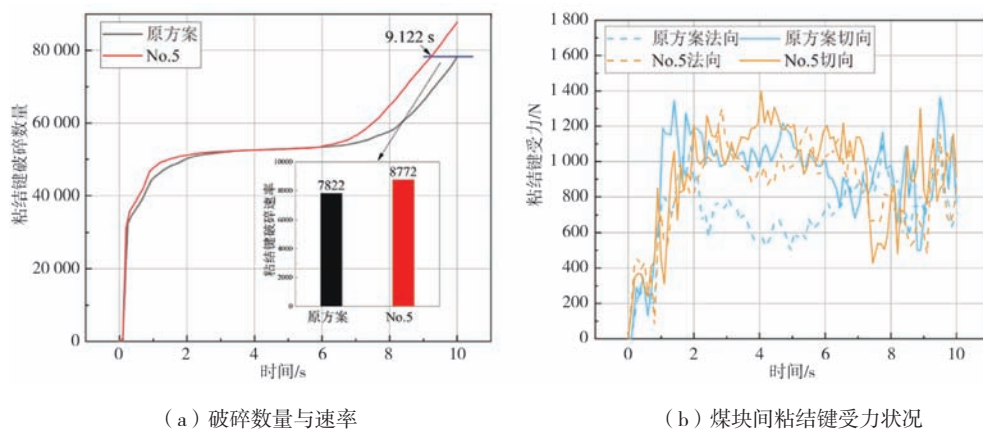


图10 最优配比No.5方案与原方案磨煤效果对比

Fig. 10 The comparison of the effect between the optimal No.5 scheme and the original scheme

No.5方案的衬板累积接触能分布云结果,并与原始方案比较,结果如图11所示。原方案导致的衬板磨损主要集中在携球坡面和凸起面靠近携球面位置,法向能量主要集中在携球面,最大能量13 772 J,切向能量高达44 344.7 J,分布范围很广,包括上述两个位置,这与实际生产替换下来的失效衬板磨损现象一致。

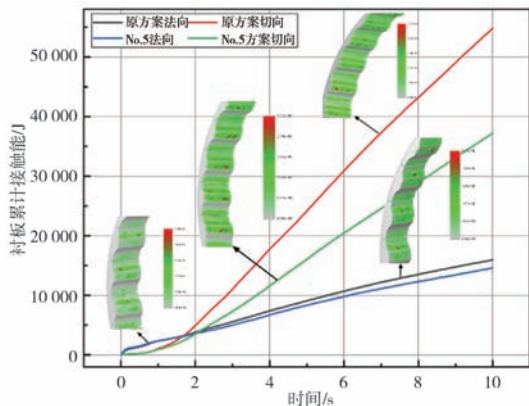


图11 最优配比No.5方案与原方案衬板累计接触能量与8.25 s时能量分布云图

Fig. 11 The cumulative contact energy of the lining plate in the optimal No.5 scheme and the original scheme, and the nephogram of the lining plate energy distribution at 8.25 s

优化后方案使得衬板所受能量得到有效降低,在8.25 s时法向接触能下降9%,切向接触能下降33%,这证明了最优方案能显著减少衬板的磨损。同时,结合图10a所示的结果表明,衬板磨损降低的同时破碎效率提高了9%,球耗减少了35%。

3 结论

(1) 破碎烟煤用磨球ZQCr5的共晶碳化物为 $(Fe, Cr)_3C + (Cr, Fe)_7C_3$ 混合型,其中 $(Fe, Cr)_3C$ 占主要部分。网状碳化物 $(Fe, Cr)_3C$ 削弱了基体的结合,使得磨球的力学性能下降,尤其使冲击韧性下降,脆性增加。此外,中度磨损的硬度低于标准值,这些原因引起磨球的损耗增大,发生过早失效。

(2) 磨球表面集中出现大量磨削磨损痕迹,数值仿真结果佐证了煤块主要受切向破碎力,磨煤过程亦发生了残余奥氏体含量的降低现象。优化磨球投放比例为 $\Phi 60 \text{ mm} : \Phi 30 \text{ mm} : \Phi 20 \text{ mm} = 16 : 3 : 1$ 后,可以降低磨球损耗35%,提升破碎效率9%。优化后的方案使得衬板所受能量得到有效地降低,其中法向接触能量同比降低9%,切向接触能量降低33%,大幅减少了衬板的损耗。

参考文献:

- [1] 王国法, 任世华, 庞义辉, 等. 煤炭工业“十三五”发展成效与“双碳”目标实施路径[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(9): 1-8.
- [2] 肖先勇, 郑子莹. 《双碳》目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
- [3] 陶文华, 柴天佑, 岳恒. 钢球磨煤机的动态参数模型与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2004(4): 778-780.
- [4] AZIZI, ASGHAR. Investigating the controllable factors influencing the weight loss of grinding ball using SEM/EDX analysis and RSM model[J]. Engineering Science & Technology an International Journal, 2015, 18(2): 278-285.
- [5] ALDRICH C. Consumption of steel grinding media in mills - a review[J]. Minerals Engineering, 2013, 49(8): 77-91.
- [6] RADZISZEWSKI P. Exploring total media wear[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(12): 1073-1087.
- [7] 梅瑛. 球磨机磨球的服役条件及工艺设计[J]. 热加工工艺, 2007, 36(9): 89-91, 98.
- [8] 李具仓, 赵爱民, 王丽娜. 热处理对Cr26高铬铸铁磨球组织与性能的影响[J]. 铸造, 2005(9): 912-915.
- [9] 武鑫龙, 王涛, 凌清峰, 等. 基于钒钛掺杂的高铬磨球材料性能研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5): 137-139.
- [10] 钟兆栋, 陈灿光, 桂劲松, 等. 热处理对大直径CADI磨球微观组织和性能的影响[J]. 铸造, 2021, 70(4): 409-414.
- [11] 任成艳, 张如华, 徐强, 等. 一种新型大直径锻造钢球B3的组织性能探究[J/OL]. 热加工工艺, <https://doi.org/10.14158/j.cnki.1001-3814.20181473>.
- [12] XU L, LUO K, ZHAO Y. Numerical prediction of wear in SAG mills based on DEM simulations[J]. Powder Technology, 2018, 329: 353-363.
- [13] 许磊, 罗坤, 赵永志, 等. 物料粒径对半自磨机衬板磨损的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(12): 2255-2263.
- [14] 刘青, 彭良振, 王宝, 等. 介质的尺寸和配比对球磨机磨矿粒度影响的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(6): 68-73.
- [15] 夏恩品, 董为民, 陈洪, 等. 球磨机磨矿介质配比的试验研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(1): 82-85.
- [16] 崔瑞, 刘昕, 张义闹, 等. 球磨机钢球球径制度对磨碎速率的影响研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1): 39-43.
- [17] 翟晨晨, 苏恒渤, 郭嘉, 等. Cr/C比对中铬铸铁复合抗磨辊圈组织和耐磨性的影响[J]. 铸造技术, 2019, 40(2): 139-142.
- [18] DE A K, MURDOCK D C, MATAYA M C, et al. Quantitative measurement of deformation-induced martensite in 304 stainless steel by

X-ray diffraction [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 50 (12) : 1445–1449.

- [19] 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.
- [20] 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) : 4516–4521.
- [21] WANG Y, ZHANG K, GUO Z, et al. A new effect of retained austenite on ductility enhancement in high strength bainitic steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 552: 288–294.
- [22] ZHANG K, ZHANG M, GUO Z, et al. A new effect of retained austenite on ductility enhancement in high-strength quenching-partitioning-tempering martensitic steel [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2011, 528 (29) : 8486–8491.

Wear Failure of Grinding Balls Used in Coal Mills and Strategies to Reduce Wear

MA Yuan-li¹, ZHOU Bing¹, FENG Bao-yu¹, YU Lei¹, LI Jian², HE Sheng-cheng², LIU Kang²

(1. Huanghe Datong Power Generation Co., Ltd., Xining 810100, Qinghai, China; 2. School of Mechanical Engineering, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract:

The grinding balls used in coal mills have the problems of excessive wear and low coal breaking efficiency. The wear status of ZQCr5 grinding balls was characterized by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, laser confocal microscopy, and other instruments. The ball diameter ratio was adjusted by EDEM software. The optimal scheme was determined by a quantitative comparison of three indicators: the failure rate of the coal block bond, the crushing force, and the energy borne by the lining plate. The results showed that low hardness and toughness were the reasons for the high wear of the grinding balls. It is suggested to increase Cr content and control residual austenite content to improve wear resistance. In the process of crushing bituminous coal, the tangential grinding was the main way of crushing bituminous coal, and the surface grinding wear was the main failure mode of the grinding ball. While changing the grinding ball gradation relationship to: $\Phi 60\text{ mm} : \Phi 30\text{ mm} : \Phi 20\text{ mm} = 16 : 3 : 1$, the grinding ball consumption was reduced by 35%, the crushing efficiency was increased by 9%, and the loss of the liner was greatly reduced. The work could provide the reference for improving coal grinding efficiency and reducing grinding ball loss.

Key words:

metal grinding ball; grinding balls wear; microstructure; failure analysis; discrete element simulation; coal grinding efficiency