 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i9.11799

Research on the Cause Analysis and Remediation Strategies for Non-Standard Steel Ball Grinders with Dual-Input/Dual-Output Configuration

Bo Long Zejun Dong Tong Liu

Huaneng Yuwang Phase II (Yunnan) Energy Co., Ltd., Qujing, Yunnan, 655507, China

Abstract

The double inlet and double outlet steel ball coal mill is the main equipment in the powder production system of large thermal power units. The integrity of the grinding medium directly affects the powder production capacity and operational economy. This article takes the BBD4060 double inlet and double outlet steel ball coal mill of a certain 6 × 600MW unit as the research object. In response to the problem of irregular steel balls accounting for about 10% discovered in the limited output control of the unit in 2025, a systematic analysis was carried out using methods such as hardness testing, spark discharge atomic emission spectroscopy analysis, and profile metallographic examination. The study has also discovered the failure evolution law of reduced grinding capacity and increased powder consumption caused by the accumulation of irregular steel balls. A full process governance strategy is proposed from four aspects: operation control, maintenance, material improvement, and screening technology innovation, providing engineering reference for the service life management of steel balls in similar coal mills and energy saving and consumption reduction of powder systems.

Keywords

dual inlet and dual outlet coal mill; Alien steel ball; Failure analysis; Chromium manganese tungsten wear-resistant cast iron

双进双出钢球磨煤机异形钢球成因分析及治理策略研究

隆波 董泽俊 刘彤

华能雨汪二期（云南）能源有限公司，中国 · 云南 曲靖 655507

摘 要

双进双出钢球磨煤机是大型火电机组制粉系统的主要设备，研磨介质的形态完整性直接影响到制粉能力以及运行经济性。本文以某6×600MW机组BBD4060型双进双出钢球磨煤机为研究对象，针对2025年机组限出力治理中发现的占比约10%的异形钢球问题，用硬度检测、火花放电原子发射光谱分析、剖面金相检验等手段实行系统的分析。研究又发现了异形钢球累积造成的研磨能力减少、制粉单耗增加的失效演化规律，从运行控制、检修保养、材质改良、筛分技术革新四个方面给出全流程治理方略，给同类型磨煤机钢球寿命管理、制粉系统节能降耗给出工程参照。

关键词

双进双出磨煤机；异形钢球；失效分析；铬锰钨抗磨铸铁

1 引言

双进双出钢球磨煤机由于煤种适应性强、负荷响应快、运行可靠性高等优势，在亚临界及超临界大型火电机组中得到了大量的应用。该型磨煤机集干燥、研磨、输送功能于一体，研磨出力及煤粉细度直接影响锅炉燃烧能力及机组带负荷能力。钢球是磨煤机研磨过程中的能量传递介质以及粉碎执行体，钢球材质、级配分布、形态完整性是影响磨煤机出力、电流负载、制粉单耗的主要变量。

该电厂 6×600MW 机组锅炉为亚临界压力、一次再热、单炉膛平衡通风、自然循环单锅筒锅炉，设计燃料为无烟煤，使用双进双出正压直吹制粉系统和“W”火焰燃烧方式，每台炉配备六台 BBD4060 型双进双出钢球磨煤机。2011 年 5 月该厂对磨煤机实行小球技术改造，将原衬板厚度 45mm 改为 28mm 节能衬板，使用湖南红宇耐磨新材料有限公司生产的高性能铬锰钨抗磨铸铁钢球，设计有效使用寿命不低于 2.5 万小时。改造后单台磨煤机钢球装载量由原来的 60 吨降到现在的 40 吨，运行电流由原来的 145A 降到现在的 105A，节能效果明显。

2 磨煤机设备概况与技术参数

2.1 锅炉及制粉系统主要参数

该厂锅炉型号为B&WB-2028/17.4-M，设计燃用无烟煤，

【作者简介】隆波（1983–），男，中国重庆人，本科，工程师，从事火电厂生产运维管理研究。

制粉系统使用双进双出正压直吹。每台炉配六台 BBD4060 型磨煤机，原设计单台出力为 60t/h（基准条件：哈氏可磨性指数 HGI=50，全水分 H_2O=8%，75% 借助 200 目筛）。该型磨煤机为筒式低速球磨机，两端进煤、两端出粉，一次热风将煤粉送入炉膛燃烧器 [1]。

2.2 小球技术改造概况

2011 年 5 月实行的磨煤机小球技术改造，是该厂制粉系统的一项重大革新。改造内容为全炉磨煤机衬板全部更换，更换的衬板为 28mm 厚，原设计为 45mm 厚。同步更换研磨介质为铬锰钨抗磨铸铁钢球，初始装球量为 40 吨，比原设计的 60 吨减少 33.3%。改造后磨煤机运行电流稳定在 105A 左右，比原运行电流 145A 下降 27.6%。该改造的主要设计理念就是减少衬板厚度、减少钢球装载量，然后减小磨煤机的转动负荷，靠着高铬合金钢球的优良耐磨性能来保持研磨出力。

3 异形钢球检测结果与数据分析

3.1 异形钢球形貌分类与统计

2025 年 4 号机组 D 修期间，对六台磨煤机实行了全量钢球倒出分捡。筛分结果表现以下典型形貌类别：

（1）条状和圆圈状异形物截面不规则，长度从几毫米到几厘米不等，表面呈光亮金属色或者包含灰黑色氧化层。其几何特征明显偏离球体，部分呈螺旋状或者环形，与标准钢球的圆形截面没有相似之处。

（2）方形以及椭圆形：此为异形钢球中占比最高的类别。方形钢球是原圆形球体经多次冲击后形成近似方形或多边形轮廓，边缘呈圆角过渡；椭圆形钢球是球体在某一轴向发生塑性伸长，长短轴比可达 1.3:1 以上。部分钢球表面有明显的弧形陷坑，坑底为光滑压痕。

（3）半圆形以及破裂片，数量很少，呈钢球沿某一截面脆性断裂，断口呈结晶状或贝壳状纹理，部分断口有锈蚀痕迹，说明破裂后已在筒体内存留较长时间。

（4）不规则棱形颗粒，表面有不规则的小坑，质地较钢球轻，经鉴别为未充分研磨的煤矸石颗粒混入钢球筛分物中 [2]。

3.2 硬度检测结果分析

2025 年 7 月 1 日对异形钢球实行随机抽样自检，检测指标为表面硬度和芯部硬度。检测结果表明，所有取样钢球的硬度值均满足铬锰钨抗磨铸铁钢球技术规范的要求。但是更深一步分析可知，部分钢球存在明显的硬度梯度问题，表面硬度接近技术规范上限，芯部硬度满足下限要求，但是表芯硬度差值超过正常范围。由此可知，部分钢球出厂前热处理时淬火冷却速度不够或冷却不均匀，造成芯部没有得到完全的马氏体组织。

另外，对照入炉煤设计硬度匹配性分析发现，部分失圆钢球的硬度水平与无烟煤的高磨蚀性不完全匹配。无烟煤可磨性系数低（HGI=50），研磨时钢球表面承受较大的接触应力及剪切应力，如果钢球芯部硬度不能支撑表面硬化层，那么在循环冲击载荷作用下就会产生塑性累积变形。

3.3 化学成分检测结果分析

2025 年 7 月 8 日，对异形钢球随机抽样后送云南电力试验研究院（集团）有限公司实行剖面检测，用火花放电原子发射光谱法测定主要合金元素含量，同样实行剖面硬度梯度测试（报告编号：云电试技 YC 字 [2025] 第 C505 号）。

检测结果表明，各个取样钢球的 Cr、Mn、W 等主要合金元素含量都在技术规范规定的成分范围内。但是大尺寸铬锰钨钢球（直径 90#）的 Cr 含量大多在规范下限附近，有些试样甚至偏低。Cr 元素在高铬铸铁中主要起增加淬透性、助推马氏体转变的作用。当 Cr 含量不足时，钢球在淬火过程中临界冷却速度增大，芯部不能完全发生马氏体相变，转而形成珠光体或者贝氏体等非马氏体组织。此类组织的硬度比马氏体低，强度以及韧性不匹配，造成钢球整体承载能力大大降低。筒体内高应力冲击下，芯部硬度低的钢球容易从内部开始发生组织屈服，继而造成整体变形或者压溃失效 [3]。

4 异形钢球成因综合解析

4.1 衬板紧固件脱落的异物混入机制

条形和圆圈状异形物经形态比对及来源追溯，主要成分为磨煤机衬板固定螺栓以及配套垫圈的磨损脱落。BBD4060 型磨煤机衬板用螺栓组固定在筒体内壁上，螺栓头部及垫圈直接暴露在研磨腔体内。伴随运行时间的增加，衬板表面厚度由原来的 28mm 逐渐减薄，螺栓头部和垫圈也承受着煤料和钢球的反复冲刷、撞击。紧固件磨损到临界尺寸之后，连接预紧力消失，螺栓或者垫圈从衬板安装孔中脱落进入筒体。

脱落的紧固件为碳钢或者低合金钢，硬度远低于铬锰钨抗磨铸铁钢球。但是由于螺栓及垫圈的形状是非球形的，在筒体旋转过程中很难借助球 - 球冲击的方式被破碎或者磨圆，而是长期以条形、环形异物的形式存在于钢球级配中。异形物的存在会占据有效研磨空间，还会对钢球运动轨迹造成干扰，加重局部非正常磨损。

4.2 空磨及低料位工况下的冲击变形机理

方形、椭圆形失圆钢球是该厂异形钢球的主要组成，其形成要满足一定的力学条件以及工况组合。正常运行的磨煤机筒体内充满煤料，煤粉在钢球之间起到缓冲介质的作用，钢球在抛落过程中以压应力及剪切应力为主对煤料实行粉碎，球体之间很少发生高能刚性冲击。

但是磨煤机启停阶段以及煤矸石研磨作业时，筒体内料位明显降低甚至无煤。此时钢球几乎处于空载运转状态，抛落的大直径钢球（尤其是新补入的 90# 钢球）以很高的动能直接撞击筒体底部的小直径钢球。由于成品钢球由表及里硬度呈递减分布，芯部硬度较低，当撞击能量大于芯部材料的屈服强度时，小钢球表面就会出现局部陷坑，球体沿冲击方向发生塑性缩短，径向发生膨胀，然后形成方形或者椭圆形。

该厂自 2011 年小球技术改造之后到 2025 年，长达 14

年时间里没有实行过全量钢球筛分更换工作。长期累积效应造成每次空磨冲击产生的变形钢球不能及时清除，反而继续留在筒体内加入后续研磨。变形钢球由于形状失圆，在后续运行中更容易被大球击中，形成正反馈循环，使异形钢球比例逐步上升到 10% 以上的较高水平 [4]。

4.3 材料淬透性不足的内因分析

化学成分检测发现的大尺寸钢球 Cr 含量偏低问题，要从材料科学思路实行分析。Cr 元素在高铬铸铁中主要起到的作用有（1）增加淬透性，减少临界淬火冷却速度；（2）形成 $(Cr, Fe)_7C_3$ 型共晶碳化物，增加硬度以及耐磨性；（3）固溶于基体强化马氏体。当 Cr 含量在技术规范下限时，直径 90# 的大尺寸钢球芯部在常规淬火工艺下很难得到完全马氏体组织，保留了大量的奥氏体或者转变为屈氏体、索氏体等软质组织。

由于组织不均匀性，钢球在服役过程中就会形成硬壳软心的结构。表面硬化层初期能保持较高的耐磨性，但是伴随运行时间的增加，芯部软质组织在循环压应力的作用下发生蠕变和塑性流动，逐渐失去对表面硬化层的刚性支撑。当表面硬化层所受弯曲应力大于其断裂强度时，就会产生整体变形或者局部剥落。部分半圆形钢球就是脆性破裂形式的极端表现形式。

5 综合治理策略

5.1 运行管控层面的优化措施

针对空磨冲击变形的主要原因，在磨煤机启停操作时必须严格控制料位。磨煤机运行期间，除计划检修放空外，筒体料位不应低于 100Pa 差压对应值。机组启动阶段，磨煤机必须在盘车状态下开启容量风实行充分暖磨，保证筒体温度场均匀，防止由于干燥出力不足而被迫增加料位造成堵磨风险，防止钢球内外温差过大造成热应力破裂。

针对煤矸石掺配工况，生产管理部门应根据当日煤矸石来料量，融合每台磨煤机的运行属性，将矸石入磨比例原则上控制在 20% 以内，均衡分配到各个磨煤机上，避免个别磨煤机长时间处于高矸石、低有效煤量的研磨状态，最大限度减少空磨研磨矸石的作业频次。

在钢球材质改良上，加强兄弟电厂技术交流，选取单台磨煤机做 Cr26 钢球以及现有铬锰钨钢球的对比工业试验。从耐磨寿命、失圆率、制粉单耗、融合成本四个方面对两种材质的适用性实行评定，为以后钢球采购技术规范的修订给予依据。

5.2 检修维护层面的规范化管理

建立精进的磨煤机衬板更换台账，记录每台磨煤机衬板的安装日期、运行小时数、磨损厚度测量数据。利用等级检修的机会，对衬板的磨损情况实行逐块检查，对磨损超标的衬板及时更换。特别要加强对衬板固定螺栓及垫圈的检查，在衬板服役中期增设专项检查节点，发现紧固件磨损严重时提前更换，从源头上防止脱落物进入筒体。

制定专业的小钢球筛捡周期，摒弃“多年不筛”的粗放管理方式。根据各台磨煤机累计运行时间、补球量、电流变化趋势来确定合理的筛捡间隔，一般每运行 8000-10000 小时实行一次系统性筛分。筛捡出的异形钢球要称重记录并统计占比，作为判断钢球质量及调整补球方案的依据。

5.3 钢球质量管控与工艺改进

修订钢球采购技术规范，对 90# 等大直径钢球单独规定 Cr 含量下限和芯部硬度保证值，要求供货商给出每批产品的淬透性试验报告。建议将表芯硬度差值作为验收指标之一，差值不能大于 HRC 5。热处理工艺上要求供货商对大尺寸钢球使用强化淬火工艺，增加淬火介质冷却能力、延长淬火时间或者使用分级淬火方案，保证芯部马氏体含量不低于 85%[5]。

同时加强入厂钢球质量抽检力度，把金相组织检验列入常规验收项目，重点检查碳化物形态和分布、基体组织类型，防止带状组织、网状碳化物等有害组织的产品进入生产环节。

6 结论

（1）某电厂 BBD4060 型双进双出磨煤机异形钢球占总重量的 10%，主要形态有条状 / 圆圈状、方形 / 椭圆形、半圆形等，形成原因有外部异物混入、运行工况异常、材料内在缺陷三个层面。

（2）硬度、成分检测结果表明，异形钢球整体符合技术规范要求，但是大尺寸钢球 Cr 含量偏低造成芯部淬透性差、表芯硬度梯度过大，是钢球发生整体变形压溃的材料学内因。

（3）条形、圆圈状异形物主要是衬板固定螺栓、垫圈磨损脱落造成的；方形、椭圆形钢球是空磨或低料位工况下大球冲击小球造成的塑性变形；半圆形破裂以及材料脆性断裂有关。

（4）异形钢球长期累积造成研磨能力减少、制粉单耗上升，应从运行料位控制、定期筛捡制度、衬板紧固件检查、钢球材质改良、机械化筛分技术研发等几个方面建立综合治理体系。

参考文献

[1] 焦传宝,王建华.双进双出钢球磨煤机运行中存在的问题及对策[J].中国电力,2004,37(10):68-71.

[2] 王雅琳,刘正雄,王晓丽,等.基于差分进化的球磨机钢球磨损规律预测方法[J].华东理工大学学报(自然科学版),2014,40(3):347-353.

[3] 双进双出磨煤机制粉系统机理建模与仿真[J].动力工程学报,2017,37(6):458-464.

[4] 宋绍伟.磨煤机钢球最佳级配技术应用研究[J].电力科学与工程,2011,27(5):67-71.

[5] 双进双出钢球磨煤机的特性与故障处理[J].中国电力,2004,37(10):72-75.