

# 磨煤机配套钢球的选型及技术经济研究

徐金苗, 吴阿峰, 樊晓茹, 李伟科

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 文章对不同耐磨钢球的材质、性能进行了研究, 完善了少球技术定义, 并介绍了高铬钢球技术的应用情况。针对目前市场上不同耐磨钢球的成分、价格差异, 结合工程实例, 对普通钢球、高铬钢球、铬锰钨抗磨铸铁磨球进行了技术经济性对比分析, 最后对耐磨钢球及衬板的选型给出了建议。

**关键词:** 钢球磨; 高铬钢球; 少球技术; 衬板; 技术经济

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)S1-0178-05

## Study on Steel Mill Ball Selection and Technique Economic Research

XU Jinmiao, WU Afeng, FAN Xiaoru, LI Weike

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** This paper is focus on material properties of steel mill ball and give a completed definition of reduce ball technology. Then the application of high-Cr steel ball was introduced. The performance and price of steel mill balls have a very different in the market. An economic research was studied according to a project case for different steel mill balls. The suggestion of steel ball and lining board selection were presented in this article.

**Key words:** ball mill; high-Cr steel ball; reduce ball technology; lining board; technique economic research

钢球磨煤机具有结构简单、运行可靠、煤种适应性强、对锅炉负荷响应快等特点, 在电力、水泥等行业应用广泛。其碾磨原理是筒体内的耐磨钢球随磨煤机筒体旋转运动, 通过球的撞击和滚动对煤粉进碾磨。所以, 耐磨钢球的材质选择、装载数量、规格级配就成了钢球磨煤机控制出粉细度、电耗、噪音等问题的关键。目前市场上的耐磨钢球品种较多, 其成分、性能各有不同, 而且市场价格差距也很大, 这给耐磨钢球的正确选型造成了困难。本文将针对市场上的耐磨钢球技术进行介绍, 对比技术性能, 并结合具体工程进行经济性对比分析, 为耐磨钢球的选型给出建议。

## 1 耐磨钢球

磨煤机中的耐磨钢球为一些直径各不相同的金属球, 根据制造工艺的不同分为铸造磨球和锻(轧)

磨球; 铸造磨球又分为球磨铸铁磨球和铬合金铸球; 铬合金铸球根据铬含量的多少分为高铬球、中铬球、低铬球。在耐磨钢球的实际生产、使用中, 一般是根据磨球运行磨损工况和用户要求, 选择适当加入 V、Ti、Nb、B、W 等微量元素, 来改善耐磨钢球的特性。这也就造成了市面上的耐磨钢球成分各异、性能各异、价格差别较大的局面。

### 1.1 普通钢球

普通钢球一般采用中铬铸球, Cr 含量在 11% 左右。其晶粒细度表里不一, 表层细、中心粗, 这样使得球表面硬度高、中心硬度低, 且硬度值相差较大。实际使用过程中, 球表面磨损慢, 当把硬度值高的表层磨掉后, 中心部分则很容易磨损, 所以其磨损速度是先慢后快, 普通钢球总的磨损性较差。

普通钢球在我国电力行业使用过程中存在的主要问题是<sup>[1]</sup>:

1) 普通钢球硬度表里差异大, 导致实际运行中钢球直径的减小量不一致, 使得钢球的级配远远偏离设计值, 进而造成煤粉细度不达标、磨煤机出力

收稿日期: 2015-11-01

作者简介: 徐金苗(1982), 男, 湖北宜昌人, 工程师, 硕士, 主要从事发电厂热机专业设计研究工作, xujinmiao@gedi.com.cn。

下降、运行电耗增加。

2) 普通钢球磨损速率高, 导致小直径普通钢球难以推广应用。煤粉锅炉使用的煤大部分粒径在 3 mm 以下, 使用直径在 25~30 mm 的钢球足以将其磨成煤粉。若钢球的耐磨性较低, 小直径的钢球磨损失效的时间会很短, 会造成钢球磨煤机频繁停机换球, 严重影响磨煤机的使用效率。

通过调研以及对钢球磨煤机的碾磨机理研究发现, 普通钢球失效的主要原因是:

1) 钢球与物料之间的磨损。钢球在与物料相互作用时主要承受小能量的多次冲击, 会产生一定的冲击疲劳磨损。另外, 物料具有一定的硬度, 也会对钢球产生磨损。钢球磨煤机在运行中, 在滚筒下半部会形成混合物料对钢球产生挤压磨损; 部分钢球在随筒体向上运行过程中会沿衬板下滑, 产生切削和凿削磨损。

2) 钢球与钢球之间的磨损。钢球磨煤机在运行时需将钢球携带至一定高度抛下, 钢球之间会产生碰撞, 此时的冲击势能大小随着磨煤机设备结构尺寸的增大而增大。在钢球碰撞过程中, 钢球表层会破碎并剥落一些硬度较高的碎片, 这些碎片在设备运行中会与钢球表面发生摩擦, 产生磨损。

3) 钢球与衬板之间的磨损。钢球在设备运行中不仅对钢球有冲击碰撞对衬板也会产生较大的冲击势能, 特别是磨筒内物料较少的情况下这种冲击更明显。另外, 若钢球的硬度高于衬板硬度, 那么衬板的磨损会明显加剧。

所以, 钢球失效的主要形式有磨损、撞击破碎、剥落失圆等。

## 1.2 高铬钢球

高铬钢球为钢球磨磨球的一种, 其外形尺寸及宏观特征与普通钢球并无差异, 只是在材料化学成分及金相组织上有区别。高铬钢球的材料化学成分如下:  $\Phi 20 \sim \Phi 90$  mm,  $C \geq 2.4\%$ ,  $Si + Mn + W \geq 2.0\%$ ,  $Cr \geq 18\%$ ,  $P \leq 0.1\%$ ,  $S \leq 0.1\%$ 。高铬钢球的金相组织为回火马氏体加碳化物, 碳化物为铬、锰、钨复合碳化物, 显微硬度  $> 1\ 600$  HV, 远高于石英的 1 200 HV; 碳化物颗粒细小(尺寸大部分为 5~20  $\mu\text{m}$ )、分布弥散均匀。

### 1.2.1 耐磨性

高铬钢球经过特殊的热处理工艺, 新材料的金相组织由马氏体及高硬度的碳化物组成, 碳化物的

硬度高于煤矸石中的石英; 并且碳化物弥散分布, 将马氏体有效的保护起来。经测定, 高铬钢球表层与芯部的洛氏硬度大于 60 HRC。直径为  $\Phi 30$  mm 的高铬钢球在磨煤机中运转 1 年后才磨损到  $\Phi 20$  mm, 即可实现 1 年只废球清理 1 次。按 1 年平均运行 300 d, 磨损总计 10 mm 计算, 钢球一天的直径磨损量  $< 0.033$  mm, 所以高铬钢球的耐磨性较好。

### 1.2.2 对衬板的影响

一般来讲, 钢球磨煤机的衬板和钢球对铬含量的要求是不一致的。由于更换磨煤机衬板工作量较大, 所以一般要求衬板的使用寿命是 7~10 年(根据以往经验, 一般要求厂家满足按 70 000 运行小时的使用寿命)。衬板采用高铬, Cr 含量一般为 26%, 钢球采用中铬铸球, Cr 含量一般为 11%~12%。这样, 钢球的耐磨性比衬板低, 才能保证衬板的使用寿命。

当钢球硬度增加时, 对衬板耐磨损也会进一步加剧, 故一般高铬钢球的生产厂家都会要求磨煤机改换新型衬板。磨煤机生产厂商也认为由于钢球硬度增加较多, 仍会降低衬板的寿命, 从而缩短衬板的检修维护周期。

在低负荷运行时, 如进煤量未能及时调整, 造成磨煤机内部存煤量过少时, 部分钢球直接与衬板摩擦, 使衬板磨损加大, 当采用高铬钢球时, 其磨损会进一步加剧。

### 1.2.3 对初始装球的影响

对于耐磨性而言, 高铬钢球的芯部与表面基本上一致, 在磨制煤粉过程中钢球的磨损量与设备运行小时呈线性关系。例如, 磨煤机运行 1 000 h, 其中高铬钢球直径减少 2 mm; 运行 8 000 h, 直径减少 16 mm。所以, 为了降低磨机荷载和运行电耗, 初装球一般以中小球为主。

## 1.3 铬锰钨抗磨铸铁磨球

所谓铬锰钨抗磨铸铁磨球是指用含锰、钨的高铬抗磨铸铁制作的耐磨钢球, 其化学成分在 GB/T 24597—2009 中有明确规定。

对比化学成分可以发现, 锰钨系抗磨铸铁主要是在成分中加入了更多的 Mn、W 元素。钨与碳形成的碳化钨有很高的硬度和耐磨性。锰是良好的脱氧剂和脱硫剂, 一般钢中含锰 0.30%~0.50%。在碳素钢中加入 0.70% 以上时就算“锰钢”, 较一般

钢量的钢不但有足够的韧性,且有较高的强度和硬度,能提高钢的淬性,改善钢的热加工性能。

虽然 GB/T24597—2009《铬锰钨系抗磨铸铁件》对化学成分、硬度都做了明确规定,但具体的热处理工艺以及大小球配比仍属于生产厂商的技术机密,不对外公布。若采用铬锰钨抗磨铸铁的耐磨钢球,相应的磨煤机衬板也要采用相关专利产品,具有一定的技术垄断性,初投资额较高。

## 2 少球技术

近年来,市场上结合铬锰钨抗磨铸铁磨球的使用出现了一种“少球技术”。这一概念最初由华能安源电厂张春秋<sup>[2]</sup>在文献中提出,他认为少球技术就是优化耐磨钢球的配比,增加小直径钢球的数量。笔者认为所谓少球技术是通过充装钢球的合理级配、合理补球方式等手段在满足磨煤机技术指标的前提下实现初装钢球量的减少、补球量的减少、电耗的减少、衬板磨损的减少。“少球技术”是一种综合性技术手段,与耐磨钢球本身为何种材质无关,且在实际生产中可以实现节约电耗、减少球耗。另外,适当提高钢球自身耐磨性,对延长补球周期,减轻维护工作量是有重大意义的。

在钢球磨实际碾磨过程中,每一个粒径范围内煤的碾磨或破碎都对应这某一直径范围的钢球,这一直径范围内的钢球对其对应的燃煤磨制效率是最高的。所以,钢球磨煤机的装球要采用合理的级配方案,这样可以实现装球量少、耗电量小、钢球球耗小,同时也保证钢球对磨煤机衬板的磨损较小<sup>[3]</sup>。在运行维护中要积累补球经验,通过采用合理的补球方案,来要保证钢球级配的稳定性。

## 3 高铬钢球技术应用情况

在中国火电厂行业钢球磨煤机的钢球直径选型尚无统一标准,一般沿用前苏联的经验;运行维护方面,补球方案绝大多数电厂是根据经验补加大球,没有使钢球磨煤机在钢球级配设计值下运行。所以,根据火电厂实际燃煤特性并结合钢球磨煤机性能参数,确定钢球的最佳级配和补球方案对电厂的实际生产运行至关重要。

笔者对国内高铬球应用情况进行了调研,其中三个典型电厂的应用情况如下。

河南裕东电厂于2008年9月将磨煤机的普通

钢球改为高铬钢球,改造投资费用未知。改造后电耗降低24.52%,节约电费58.63万元/年;球耗降低19.07%,节约补球费用62.72万元/年<sup>[4]</sup>。

湖南益阳电在#3机组上的3D磨煤机上用高铬球,其它磨煤机采用普通球,进行对比试验。初投资每台磨增加23万;电耗降低25.93%,节约电费48万元/年;球耗降低59.15%,补球费用较普通球59.15%,补球费用较普通球多4.3万元/年。实际球耗110 g/t,大于厂家承诺的40 g/t<sup>[5]</sup>。

国电荃阳电厂#1、#2新建机组均采用高铬球,2011.10月两台机组运行一年后12台磨煤机的衬板均出现磨损严重的问题。检修期间将衬板改为高效节能新型衬板。改造投资费用未知;改造完衬板后,电耗降低23%,节约电费87万元/年<sup>[6]</sup>。

## 4 技术经济分析

### 4.1 技术性能对比

#### 4.1.1 普通钢球与高铬钢球的性能对比

耐磨性:高铬钢球耐磨性较好,表层和芯部耐磨性基本一致,磨损速率较慢;普通钢球相对较差。

衬板影响:高铬钢球的硬度和衬板接近,容易磨损衬板,高铬钢球生产厂商一般要求衬板与钢球同时配供,但磨煤机厂商认为衬板的磨损速率仍会加速。普通钢球的硬度低于衬板,对衬板的磨损较小。

钢球补充及废球清理要求:两种钢球都需要定期的补充中型钢球,并定期对小钢球进行废球清理,以降低运行电耗。

运行维护费用:两种钢球均需要定期补充,普通钢球的补充量相对较大但单位成本较低,高铬钢球补球量小但单位成本高。高铬钢球由于初始装球量较小,故磨煤机初始电耗会相对较低。但磨煤机运行电耗和钢球补充时间间隔相互影响,对于普通钢球如果缩短钢球补充及废球清理周期,可以降低装球量及磨煤机运行轴功率。对于高铬钢球,若不及时进行钢球废球清理,磨煤机运行轴功率也会提高。

#### 4.1.2 磨煤机运行机制对磨球的影响

按照主要磨煤机厂家的意见,采用高铬钢球只是投入初期由于装球量较小,电耗有所降低,随着运行过程小球数量的增加,若不加快废球清理周期,其运行电耗也会增加,并且高铬钢球对磨煤机的衬板损伤性较大。采用普通钢球技术,只要合理控制

废球清理时间, 其运行电耗也可以下降。根据以往工程运行经验, 钢球的最佳配比都需要在现场结合煤质和运行维护习惯进行调整, 以确保最优效果。

## 4.2 经济性分析

为了便于比较, 下面以某电厂  $2 \times 620$  MW 超临界机组共计 12 台双进双出钢球磨煤机的工程实例为基础进行分析。

### 4.2.1 初始投资

为了客观、准确了解高铬钢球市场价格信息, 笔者对高铬钢球厂家进行了调研。同时, 对磨煤机相关参数进行了技术收资。结果显示, 由于高铬材料产量增加、耐磨市场竞争激烈程度加剧等因素, 国内高铬耐磨钢球的市场价格有较大幅度回落, 且普通钢球与高铬钢球对应的衬板价格相差不大。这样, 两台机组使用高铬钢球的初投资较普通钢球高出 375.72 万元。若使用铬锰钨系抗磨铸铁钢球, 两台机组的初投资将比普通钢球高出 1 371.12 万元。

### 4.2.2 球耗及衬板损耗的成本

准确的球耗数据需要在电厂运行后通过实验求得才能计算球耗成本。结合湖南省电力公司试验研究院在湖南益阳发电有限责任公司上的测试结果, 对球耗成本估算, 具体详见表 1。

表 1 球耗及衬板损耗的成本对比

Table 1 The Cost of Ball Consumption and Lining Board Loss for Different Steel Ball

项目	普通球	高铬球	铬锰钨系抗磨铸铁钢球
球耗率/(g/t 煤)	200	110	80
每炉年耗钢球量/t	380.9	209.495	152.36
两台机组每年衬板更换费用/万元	121.875	122.85	195
两台机组每年钢球更换费用/万元	403.754	356.142	518.024
两台机组年更换费差额/万元	基准	-46.638	187.395

### 4.2.3 磨煤机运行功率

无论采用高铬钢球还是中铬钢球, 在磨煤机初始装球量是一样的条件下, 磨煤机初始轴功率一样。不同的是高铬钢球耐磨性好, 后期磨损率比中铬球低, 当磨煤机运行一段时间后, 采用中铬钢球的磨煤机, 随着破损钢球数量的增多, 筒体内有效钢球数量减少, 磨煤机出力将降低, 需要加装钢球增加磨煤机出力, 这样磨煤机总装球量加大, 造成磨煤机轴功率升高。而高铬钢球由于耐磨性较中铬

好, 后期补球数量少, 磨煤机筒体内钢球量较低, 磨煤机轴功率相比中铬钢球低。

若选用普通钢球, 每台磨轴功率为 1 781 kW; 若选用高铬钢球, 每台磨轴功率约为 1 683 kW(按照钢球生产厂家推荐的装球量), 电耗降低约 5.5%, 与其它电厂改造后电耗降低值相当; 若选用铬锰钨系抗磨铸铁钢球, 按厂家提供的节省电量 15% 考虑, 即每台磨轴功率为 1 514 kW。按照年利用小时数 6 500 h 考虑, 发电标煤耗 297.37 g/kWh, 则每年两台机组可以节约标煤量分别为 2 273 t、6 199 t, 按照标煤价格 601.2 元/t 进行估算, 每年可以节省运行电费分别为 136.65 万元/年、372.68 万元/年。

### 4.2.4 投资及运行费汇总

将上述各单项费用汇总如表 2 所示。

表 2 投资及运行费用对比(按两台机组计)

Table 2 The Investment and the Operating Cost of Ball Mill for Different Steel Ball

项目	普通球	高铬球	铬锰钨系抗磨铸铁钢球
初始投资差额/万元	基准	375.72	1 371.12
钢球及衬板年更换费用差额/万元	基准	-46.637 5	187.395
电耗年费用差额/万元	基准	-136.5	-372.68
年运行费用差额/万元	基准	-183.137 5	-185.285
投资差额静态回收年限/年	基准	2.05	7.40

从表 2 可以看出, 高铬钢球技术的主要优势在于降低磨煤机轴功率, 节约厂用电。以上经济性分析有一前提, 即认为无论采用何种钢球, 磨煤机的废球清理机制、运行水平、运行习惯均保证磨煤机处于设计钢球级配下工作。如果因为运行水平等问题导致破碎钢球清理不及时, 则磨煤机的电耗会迅速上升, 那么高铬钢球技术的优势就不明显了甚至不复存在。另外, 机组利用小时数降低也会使节能优势降低。

## 5 耐磨钢球选型

耐磨钢球材料选型重点在于材料硬度和韧性。材料硬度大, 抗磨性高, 磨损小, 但韧性低, 易脆断。冲击韧性大的材料硬度较低, 磨损大。如何兼顾材料的硬度和韧性非常重要。

适当的硬度即适当的耐磨性是减少球耗,保证级配稳定的最基本的要素,如果磨球耐磨性低一则在较短时间内磨球尺寸就会变小,影响级配的稳定。再者,由于耐磨性较小,则势必会缩短补球周期,影响生产。

通常,磨球硬度高,耐磨性也高,材质损耗低。但磨球的磨损不仅与其硬度有关,而且与球磨机衬板及碾磨对象硬度有关。据有关资料和文献介绍:耐磨系数 $\varepsilon$ 是磨球硬度 $H_m$ 与煤质硬度 $H_a$ 比值的函数,即: $\varepsilon=f(H_m/H_a)$ ,令 $K=H_m/H_a$ 。当比值 $K=0.8\sim 1.3$ 范围内,耐磨系数随磨球硬度的提高而升高。但是当比值 $K>1.3$ 时,磨球硬度再提高,则耐磨系数提高不显著,反而使磨球的冲击韧性下降,导致球磨机磨矿效率下降。这是因为磨球硬度越高时脆性越大,其冲击韧性也越小,在球磨机运转中,磨球与磨球、磨球与磨机衬板撞击后,脆性大的磨球最容易出现大片剥落现象,形成不圆的球,不圆的球受力比圆的球受力大些,容易引起破裂或碎裂。

## 6 耐磨钢球与衬板的匹配关系

耐磨钢球与衬板的匹配关系是相互制约的,若一味提高钢球的硬度和耐磨性,则衬板的使用寿命势必减少。

对于磨煤机钢球和衬板选型应根据电厂实际燃煤煤质进行合理选择,主要指标是煤质磨损指数 $K_e$ 。当 $K_e<2$ 时,选用普通锻磨球或中铬球配以高铬钢衬板;当 $K_e>3.5$ 时,选用高铬铸铁球配以多元合金衬板或组合自固衬板;当 $K_e$ 介于2和3.5之间时,选用低铬铸铁球配以高铬钢衬板,以发挥高铬钢衬板的加工硬化作用。上述选型建议并非绝对的,实际设计选型时最好经过试验验证后确定。

## 7 结论

1)普通钢球一般为中铬钢球,铬含量在11%左右,表面和芯部硬度相差较大,耐磨性较差。高铬钢球的铬含量较高,耐磨性较好,表层和芯部耐磨性基本一致,磨损速率较慢。铬锰钨抗磨铸铁磨球是高铬钢球的一种,只是在其成分中添加了硬度、耐磨性更好的锰、钨元素。

2)所谓少球技术是通过充装钢球的合理级配、合理补球方式等手段在满足磨煤机技术指标的前提

下来实现初装钢球量的减少、补球量的减少、电耗的减少、衬板磨损的减少。少球技术是一种综合性技术手段,与耐磨钢球本身为何种材质无直接关系,但是能提高钢球耐磨性,对减轻维护工作量是有利的。

3)普通钢球、高铬钢球、铬锰钨抗磨铸铁磨球的市场价格差别较大,高铬钢球技术在我国已有较多应用,且使用效果良好。

4)高铬钢球技术的主要优势在于降低磨煤机轴功率,节约厂用电。采用高铬钢球或铬锰钨系抗磨铸铁钢球,投资回收年限都很短。但如果因为运行水平、运行机制等问题导致破碎钢球清理不及时,则磨煤机的电耗会迅速上升,那么高铬钢球技术的优势就不明显甚至不复存在。

5)耐磨钢球材料选型要重点关注材料硬度和韧性。磨球的磨损不仅与其硬度有关,而且与球磨机衬板及碾磨对象硬度有关。

6)磨球与衬板的关系是相互影响的,对于磨损指数低的煤,不必选用高硬度的耐磨合金材料。

### 参考文献:

- [1] 陈平,任立军. 火电厂球磨机铬锰钨抗磨铸铁磨球的研制与应用[J]. 中国电力, 2009, 42(11): 20-21.  
CHEN Ping, REN Lijun. The Development and Application of Cr-Mn-W Wear-Resistance Cast Iron on Grinding Ball in Thermal Power Plant [J]. Electric Power, 2009, 42(11): 20-21.
- [2] 张春秋. 浅谈厂磨煤机少球技术的应用[J]. 机电信息, 2012, 336(18): 95-97.  
ZHANG Chunqiu. The Application of The Reduce Ball Technology of Ball Mill [J]. Mechanical and Electrical Information, 2012, 336(18): 95-97.
- [3] 余涛,张翠珍,刘亮. 钢球磨煤机钢球的最佳级配及补球参数[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007(4): 68-71.  
YU Tao, ZHANG Cuizhen, LIU Liang. Optimal Proportion of The Loading Ball System and the Adding Ball System of Ball Mills [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2007(4): 68-71.
- [4] 王瑞丽,武伟,王峰. 高铬少球技术在火力发电厂钢球磨煤机中的应用[J]. 河南电力, 2012(4): 58-60.  
WANG Ruili, WU Wei, WANG Feng. Application of the Technology of Reduce Ball of High-Cr Steel Balls on Pulverize in the Thermal Power Plant [J]. Henan Electric Power, 2012(4): 58-60.
- [5] 薄立群,焦庆丰,肖克,等. 高铬钢球在双进双出磨煤机上的应用及效益分析[J]. 湖南电力, 2009, 29(5): 22-24.
- [6] 王科峰,王磊,许翊. 抗磨钢球节能技术在双进双出磨煤机上的应用[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(6): 47-48.

(责任编辑 林希平)