

# 钢渣粉磨技术探讨

夏能超, 张柱银

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 针对目前我国钢渣利用率不高, 利用层次低的现状, 在分析钢渣理化性质和传统的钢渣回收利用技术缺陷的基础上, 根据“料层粉磨”原理, 提出了一种用卧辊磨粉磨钢渣的技术。重点研究卧辊磨的结构、粉磨原理以及制备钢渣粉的工艺流程, 结果表明: 卧辊磨粉磨钢渣具有工作压力小、效率高、节能等优点。

**关键词:** 钢渣粉磨; 料层粉磨; 卧辊磨

中图分类号: TQ172.6+3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2011)06-0006-05

## Research on the Steel Slag Grinding Technology

Xia Nengchao, Zhang Zhuyin

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** In view of the current low rate and low level utilization of steel slag in China, analyzes the physical and chemical properties of steel slag and its recycling technical defects. On the basis of "particle beds comminution" principle, puts forward a new technique of grinding steel slag with horomill. Studies in detail the structure and the grinding principle of horomill and the process flow to make steel slag powder. The results show that using horomill to grind steel slag has advantages of low working press, high efficiency, low energy consumption and so on.

**Keywords:** grinding steel slag; particle beds comminution; horomill

### 1 钢渣利用现状

钢渣是炼钢时排出的固体废弃物, 约为粗钢产量的15%~20%。我国是钢铁生产大国, 2010年钢铁产量已达6.2亿t, 排出钢渣约1.2亿t<sup>[1]</sup>。随着钢铁工业的不断发展, 钢渣的产量还在不断增加。钢渣的传统处理方式是直接将钢渣堆放在渣场, 大量钢渣的弃置不仅占用了大量的空间, 而且污染了环境。因此, 改进钢渣处理技术, 增强钢渣处理能力, 从而提高钢渣利用率, 是我国节能减排、发展循环经济的重要内容。

20世纪初, 研究人员开始研究钢渣的回收利用方法, 但由于钢渣的成分波动较大, 迟迟未能实际应用。70年代初, 美国首先把每年排放的1700万t钢渣全部利用起来<sup>[2]</sup>, 迄今为止, 研究人员已研发出多种钢渣利用途径, 主要用于冶金、建筑、农业等领域。从总体上看, 发达国家的钢渣利用率较高, 发展中国家利用率较低, 如1985年日本钢渣的利用率已达100%<sup>[3]</sup>。20世纪末, 世界上主要产钢国家的钢渣利用情况见表1<sup>[3-5]</sup>。

从表1可知, 我国的钢渣利用率, 与发达国家相比有较大差距。

收稿日期: 2011-09-07

作者简介: 夏能超(1985-), 男, 湖北汉川人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为卧辊磨粉磨机理,

E-mail: xianengchao2010@163.com

表1 世界上主要产钢国家的钢渣利用率

Table 1 The steel slag utilization of major steel-producing countries in the world

国家	利用情况	利用率
日本	返回冶金循环 20%，筑路 23%，土木工程 42% 以上，建材 6%，农肥 2%，其他 5%。	100%
美国	返回冶金循环 56%，筑路 38%，其他 4%	98%
德国	返回冶金循环 7%，土建 56%，建材 30%，农肥 2%。	95%
俄罗斯	返回冶金循环 6.3%，筑路 35.7%	42%
中国	返回冶金循环 5%，筑路、建材 2%，水泥混凝土掺合料 3%。	10%

## 2 钢渣基本理化性能

钢渣在 1 500~1 700 °C 下形成，高温时呈液态，缓慢冷却后呈块状、坨状，而且表面易成壳状<sup>[2]</sup>。渣块一般为深灰、深褐色，且质地坚硬密实，孔隙较少；渣坨和渣壳结晶细密、界线分明，尤其是渣壳，断面齐整。

钢渣的化学成分及冷却条件不同，其外观形态和颜色有差异。如碱度较低的呈黑灰色，碱度较高的呈褐灰色、灰白色。多数情况下，钢渣的主要化学成分为 CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, FeO, f-CaO (游离 CaO) 等，其混合样各主要成分质量分数见表 2<sup>[6]</sup>。

表2 钢渣混合样主要成分质量分数

Table 2 The mass fraction of the major components in steel slag compound %

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	f-CaO
20.97	7.72	0.71	0.38	0.39	3.00	0.60	0.00
∧	∧	∧	∧	∧	∧	∧	∧
54.06	35.46	16.16	19.98	4.72	21.77	30.10	21.63

## 3 钢渣的预处理技术

钢渣综合利用途径根据其来源、基本特性和成分，大致可分为内循环和外循环 2 种。前者主要是钢渣在钢铁企业内部循环利用；后者是在钢铁企业外的利用。内循环历来受钢铁企业的重视，也是一种普遍采用的途径，主要用作烧结配料、高炉和转炉炼钢溶剂和转炉溅渣护炉添加剂，这 3 种方法虽然有降低烧结矿品位和碱度，改善钢渣的流动性，节约生产成本的作用，但也会造成钢渣中有害元素的富集，加入量和加入时间不好掌握等一系列问题。外循环利用途径主要用于筑路、回填工程、建材制品、废水处理和农业等方面。外循环的核心思想是使钢

渣中的 f-CaO 和 f-MgO (游离 MgO) 尽可能消解。但是不论是内循环还是外循环，钢渣的利用率都较低，且利用层次都不高，要解决钢渣利用效率和层次低下问题就必须对钢渣进行预处理。

现在国内钢渣预处理工艺较多，主要有热焖法、风淬法、热泼或浅盘热泼法以及滚筒法等。风淬法、滚筒法处理工艺对钢渣的流动性要求较严，且还需其它处理工艺才能完全处理热态钢渣；热泼法或浅盘法处理工艺简单、处理能力大，但在环保和钢渣处理效果方面还有待改进；热焖法处理虽兼顾了钢渣性能和环保要求，但在处理能力方面尚有不足。虽然上述 4 种预处理工艺各有所长，但它们都没有涉及钢渣中回收利用价值较高的铁的处理，从而造成了铁资源的严重浪费。铁的比重大、韧性好、易磨性差、易腐蚀，不利于现有运用较广的粉磨机对钢渣的粉磨处理。

## 4 钢渣的粉磨处理技术

钢渣粉磨处理一般是指在预处理的基础上对已经选出的含有废钢或废铁的渣进行粉磨处理，并使处理之后的尾渣粒度达到综合利用的要求。即以  $w(\text{Fe})$  为 30%~60%，粒度为 10~300 mm 的初选钢渣为原料，经粉磨、分级、磁选等工艺得到  $w(\text{Fe}) > 90\%$  的优质废钢。通过粉磨处理能使钢渣中渣、铁分离，以利于各种有用物质的回收利用<sup>[7]</sup>。

钢渣的主要化学成分与硅酸盐水泥熟料相近，结构处于高能量状态，不稳定，潜在活性大，对钢渣粉磨处理，主要是超细粉磨处理能激发钢渣活性，使其得到高价值资源化再利用。目前国内使用较广的粉磨机主要有球磨机、立磨、辊压机。球磨机能耗高，物料在磨内的停留时间长，噪音大；立磨能量利用率高于球磨机，且结构紧凑，占地面积小，但结构复杂，系统通风费用高；辊压机辊子所承受的压力极高，制造条件极为苛刻，造价昂贵，且极易磨损，维修费用高，特别是轴承发热烧损后的更新以及辊面磨损后的维修费用会抵消辊压机的全部节电效益<sup>[8]</sup>。另外，钢渣的韧性较好，铁含量较高，这会严重磨损研磨体和磨辊，因此，上述 3 种粉磨机都不太适用于钢渣的粉磨。而最新的粉磨设备卧辊磨不仅具有辊压机节能高效的特点，还兼具立磨结构紧凑及球磨机运行稳定、操作可靠等优点，更重要的是，与球磨机、立磨、辊压机相比，卧辊磨更适宜粉磨钢渣，增强钢渣的活性，提高钢渣的循环利用率。

### 4.1 卧辊磨

卧辊磨是钢渣超细粉磨的核心设备，近年来，以卧辊磨为代表的挤压粉磨技术及其工艺已取得突破

性进展。

### 4.1.1 粉磨原理

卧辊磨粉磨物料基于“料层粉碎”原理。在粉磨过程中，物料靠自身重力从进料口进入卧辊磨回转筒体内，由于回转筒体的高速转动，物料在离心力作用下分布在回转筒体内壁表面和其上方磨辊构成的挤压通道内，并在此挤压通道内形成料床，再进一步形成“密集颗粒集群”<sup>[9]</sup>。磨辊依靠液压缸对筒体内表面上的物料施加压力，并借助料床对磨辊的摩擦力作回转运动。在磨辊的作用下，接触到磨辊的物料颗粒受到粉磨压力的作用而被粉磨，没有接触到磨辊的物料，各颗粒之间也进行群体化相互作用，其内部晶格结构逐渐被破坏，从而达到颗粒被粉碎的目的（见图1）。在卧辊磨内，随着物料从入口向出口移动，料床在磨辊的作用下密集颗粒集群内部单体颗粒之间自粉磨过程被不断重复，物料被充分粉磨，既提高了能量利用率，又降低了金属材料的消耗。

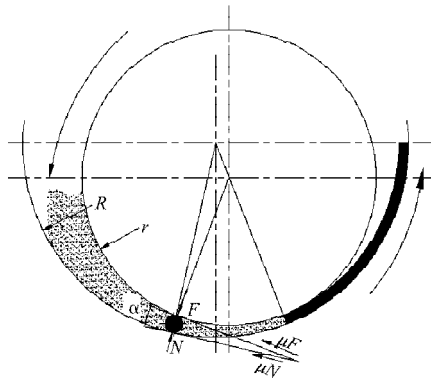


图1 卧辊磨“料层粉磨”原理图

Fig.1 The principle of "particle beds comminution" for horomill

### 4.1.2 主要结构及工作过程

卧辊磨的主要结构是，由一个支撑在液压滑履上的回转筒体和一个横卧在筒体内的自由回转磨辊构成（如图2）。筒体粉磨区附有耐磨衬板圈，磨辊借助液压缸向衬板上的物料施压。

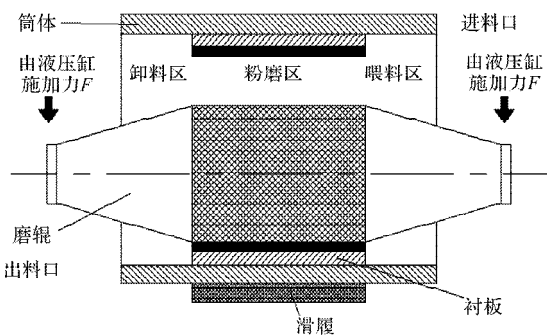


图2 卧辊磨主要结构示意图

Fig.2 The schematic diagram of horomill structure

卧辊磨粉磨工作区由喂料区、粉磨区和卸料区3部分组成，如图3所示。

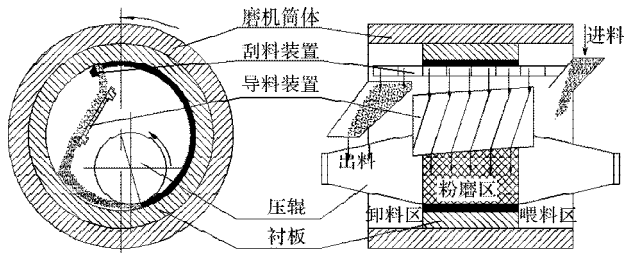


图3 卧辊磨粉磨过程示意图

Fig.3 The schematic diagram of grinding process of horomill

物料通过进料端盖板上的进料口进入磨机筒体内的喂料区，在离心力的作用下迅速贴附于筒体内壁跟随筒体一起转动到特定位置时，被设置在筒体上部空间的刮料板刮下落到导料板上，经导料板（导料板与筒体轴向成一定的角度且可调）的作用进入筒体的粉磨区，在磨辊与筒体间形成的楔形空间内被咬入再被挤压粉碎；在挤压区域内的物料开始被压实，少量破碎，最终通过磨辊与筒体内壁间的最小间隙处而被大量粉碎，从而完成了第一次挤压。挤压后的物料随筒体运动到上部后再被刮刀刮下落入导料板，再次进入挤压粉磨区，重复上述过程。物料在筒体内始终按一定的轴向速度前进，离开粉磨区时已被挤压多次。物料被挤压的次数可通过调整导料板的导料角度来实现。离开粉磨区的物料进入卸料区经出料口排出磨外。由此，实现了一次通过多次粉磨。

### 4.1.3 超细粉制备工艺流程

钢渣超细粉的制备主要由超细粉磨、分级、渣铁分离、捕集与烘干、输送等环节组成，形成一个高效的生产系统，如图4所示。

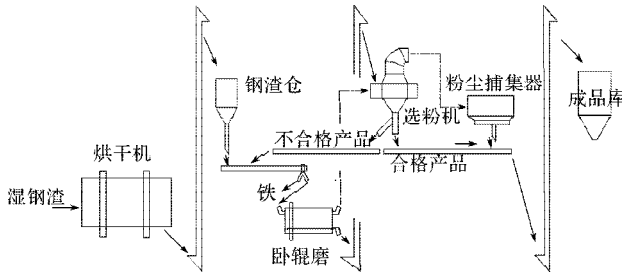


图4 卧辊磨钢渣粉磨工艺流程

Fig.4 The process of steel slag grinding for horomill

以卧辊磨为核心的钢渣粉磨流程工艺的功能是，将湿钢渣在烘干机中烘干后，经出口提升机送到钢渣仓中，再进入带式输送机，经磁选后，使渣、铁分离，剩下的钢渣进入卧辊磨中粉磨；粉磨后的钢渣经提升机输送到选粉机，选粉机筛选后的钢渣主

要有3个去向,一个是筛选后的钢渣成品经提升机输送到成品库中储存;二是粉尘经由粉尘捕集器回收后送到成品库中储存;三是余下不合格的钢渣经带式输送机返回卧辊磨进一步粉磨。

#### 4.2 卧辊磨粉磨钢渣的主要优点

由于卧辊磨的研磨力大小可以调整,粉磨过程可以循环进行,研磨时间和粉磨轨迹可以根据工艺需要调节,有利于成品粒度和颗粒级配的调整,因此,卧辊磨粉磨系统有如下几方面优点:

1) 通道收缩率较小,咬入角较大。卧辊磨采用的磨辊挤压力介于立磨和辊压机之间,其大小仅为辊压机的 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{5}$ ,约为立磨的2~5倍<sup>[9]</sup>;此外,卧辊磨磨辊咬入角一般为 $17^\circ$ ,而且还有进一步提升的空间。如江苏某公司刚研制出的新型卧辊磨,临界咬入角达到 $23^\circ$ ,突破了传统的设计局限,大幅提高了料床的稳定性和挤压粉磨的效率。而立磨和辊压机则分别不超过 $12^\circ$ 和 $6^\circ$ <sup>[10]</sup>。研究发现,料床厚度与咬入角成正比,由于卧辊磨的咬入角最大,故其料床厚度也最大。为避免振动,卧辊磨的磨辊速度一般趋向高速,但立磨磨辊转速不能过高或过低。立磨辊子转速过低时,离心力不足,物料难以均匀分布在磨盘上;转速过高时,离心力过大,物料易撒到磨盘以外而得不到充分粉磨。球磨机的转速一般是其理论临界转速的70%~80%。所以,为保证卧辊磨内物料的正常运动,筒体最低转速不应低于其理论临界转速的1.2倍,且理论上卧辊磨的最高速度不受限制<sup>[11]</sup>。基于上述优点,卧辊磨能选择较小的磨辊压力而获得较高的功率输入,较大的出磨物料成品率,较宽的出磨物料粒度分布以及平稳的工作性能。

2) 一次通过,多次挤压。根据物料粉磨工艺要求,通过控制机构可以调整物料的挤压次数,以达到调整出料细度的目的。物料依靠料床、磨辊的回转运动,可经济、方便地在粉磨机内部循环,以实现多次挤压作业。物料从入口进入卧辊磨到出口过程中,物料总共能被粉磨7~8次。

3) 能耗小。球磨机的能量利用率不足5%,辊压机可达30%<sup>[12]</sup>,而卧辊磨相比辊压机更节能。这3种粉磨机的能耗及相关参数比较见表3<sup>[13]</sup>。

4) 加工成品活性大。卧辊磨采用回转筒体加物料推进器协调作用的方法调节粉磨状态,将辊压机的一次挤压通过方式变为多次挤压通过。由于物料在磨内受到多次粉磨,使得卧辊磨产品的颗粒形貌、活性与球磨机产品相差无几。另外,卧辊磨的料床只在磨辊的两侧产生“边缘效应”,而多次循环粉磨

过程又使“边缘效应”产生的大颗粒物料不断减少。因此,卧辊磨粉磨效率相比辊压机有较大提高。而且,卧辊磨作为终粉磨设备,在工艺上是可以实现,其最终产品的使用性能满足相关要求,这是立磨和辊压机做不到的。

5) 良好的经济效益和社会效益。传统的钢渣处理工艺是尽可能地消解其中的碱性物质,如f-CaO,这样不仅使处理工艺效率低,而且还存在较严重的能量浪费,如热泼法就有大量热能散失,而且处理后的钢渣中渣、铁还是混在一起。而钢渣经卧辊磨处理,不仅能量利用率高,而且每吨约有90元纯利润,这就给钢铁企业带来不菲的直接经济效益;另外,由于卧辊磨粉磨钢渣属于钢渣的深度处理,其相比预处理工艺,增加了处理工艺流程,这就意味着增加了劳动岗位,促进了就业,符合我国和谐社会的国策。

表3 3种粉磨机的相关参数

Table 3 The correlation parameters of three kinds of grinding mills

种类	功率/kW	生产能力/(t·h <sup>-1</sup> )	主机电耗/(kW·h·t <sup>-1</sup> )
球磨机	2 500	30	75
辊压机	2×800	80	45
卧辊磨	2300	50~70	33.5

## 5 结语

钢渣粉磨加工处理设备卧辊磨经过我国科技工作者将近20年研究,已经取得了相当大的进展。前不久,江苏某集团公司研制的最新型卧辊磨已经通过国家相关部门验收。这不仅使得基于“料层挤压”技术的卧辊磨进一步在我国得到应用,而且加快了钢渣超细粉无球化制备技术向更深层次发展,同时也促进了卧辊磨装备的大型化、系列化,为钢渣的粉磨技术提供了更佳的设备。

### 参考文献:

- [1] Jason. 2010年我国全年粗钢产量创历史新高[EB/OL]. [2011-01-21]. <http://china.trade2cn.com/news/110121134042v15-1.html>.  
Jason. In 2010, Annual Crude Steel Production of Our Country Makes a new Record[EB/OL]. [2011-01-21]. <http://china.trade2cn.com/news/110121134042v15-1.html>.
- [2] [佚名]. 钢渣[EB/OL]. [2011-06-05]. <http://baike.baidu.com/view/1607469.html>.  
[Anon]. Steel Slag[EB/OL]. [2011-06-05]. <http://baike.baidu.com/view/1607469.html>.
- [3] 单志峰. 国内外钢渣处理技术与综合利用技术的发展分

- 析[J]. 工业安全与防尘, 2000(2): 27-31.
- Shan Zhifeng. The State of Treatment Technique and Comprehensive Utilization to Steel Slag in China and Abroad [J]. Industrial Safety and Dust Control, 2000(2): 27-31.
- [4] 卜庆才, 陆钟武. 中国和主要产钢国铁资源效率的对比分析[J]. 中国冶金, 2005, 15(8): 9-12.
- Bu Qingcai, Lu Zhongwu. Comparison of Iron Resource Efficiency Between China and Other Chief Steel-Producing Countries[J]. China Metallurgy, 2005, 15(8): 9-12.
- [5] 姜从盛, 丁庆军, 王发洲, 等. 钢渣的理化性能及其综合利用技术发展趋势[J]. 国外建材科技, 2002, 23(3): 3-5.
- Jiang Congsheng, Ding Qingjun, Wang Fazhou, et al. Physical and Chemical Properties of Steel Slag and The Development Trend of Comprehensive Utilization Technology[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2002, 23(3): 3-5.
- [6] 舒型武. 钢渣特性及其综合利用技术[J]. 钢铁技术, 2007 (6): 48-51.
- Shu Xingwu. The Characteristics and Comprehensive Utilization of Steel Slag[J]. Iron & Steel Technology, 2007 (6): 48-51.
- [7] 北京高路通科技发展有限公司. 一种钢渣处理方法: 中国, 02124081[P]. 2005-02-16.
- Beijing Gaolutong Technology Development Co., Ltd. A Treatment Process of Steel Slag: China, 02124081[P]. 2005-02-16.
- [8] 胡永波, 吴德成, 杨连国. 中卸式柱磨机与辊压机、立磨、卧辊磨的工作原理及特点比较[J]. 国外建材科技 2008, 29(2): 108-112.
- Hu Yongbo, Wu Decheng, Yang Lianguo. Comparison the Working Principal and Character Between Middle-Dump Column Mill and Roller Press, Vertical Mill, Horizontal Roller Mill[J]. Science and Technology of Overseas Building Materials, 2008, 29(2): 108-112.
- [9] 陈新勇. 钢渣粉磨工艺技术研究[J]. 一重技术, 2011(1): 1-6.
- Chen Xinyong. Research on Slag Pulverizing Process Technology[J]. CFHI Technology, 2011(1): 1-6.
- [10] 邹德芳, 姚长盛, 张红军, 等. 高效节能的粉磨设备: 筒辊磨[J]. 科技创新导报, 2008(19): 81.
- Zou Defang, Yao Changsheng, Zhang Hongjun, et al. The High Efficiency and Energy-Saving Grinding Equipment: Horomill[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2008(19): 81.
- [11] Gutierrez Jessie, Hong Chang Oh, Lee Byunghyun, et al. Effect of Steel-Making Slag as A Soil Amendment on Arsenic Uptake by Radish(Raphanus sativa L.) in An Upland Soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2010, 46(6): 617-623
- [12] 盖国胜. 超细粉碎分级技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2001: 230-238.
- Gai Guosheng. Ultrafine Grinding and Classification Technology[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001: 230-238.
- [13] 李凤生. 超细粉体技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 19-22.
- Li Fengsheng. Ultrafine Powder Technology[M]. Beijing: China National Defence Industry Press, 2001: 19-22.

(责任编辑: 邓光辉)