

# 球磨机制水煤浆工艺初步研究

王二林, 刘占江, 张爱东

(首钢矿业公司 烧结厂, 河北 迁安 064400)

**摘要:** 论述了水煤浆生产常用的溢流型球磨机的构造及磨碎原理; 分析了球磨机转速, 筒体直径和长度, 内衬板和研磨介质, 内装球量、球径、球比等因素对其磨碎效率的影响; 以首钢矿业公司烧结厂的制浆工艺为例, 确定了最佳磨矿条件。

**关键词:** 水煤浆; 球磨机; 转速; 配球比

**中图分类号:** TD941.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8397(2013)03-0066-05

随着石油资源日益贫乏和石油价格不断上涨, 迫切需要一种石油替代品。虽然核能、太阳能技术研究不断发展, 但是目前距离广泛应用还有很长的路。水煤浆作为石油替代品以其制造技术要求低、工艺简单、成本低廉得到迅速发展, 而且在很多地方已经开始替代重油, 并取得了可观的经济效益。目前大部分水煤浆生产厂家采用的磨机为溢流型球磨机, 这一设备在水煤浆制浆工艺中发挥了重要作用。

收稿日期: 2013-01-16

作者简介: 王二林(1982—), 男, 河北保定人, 2004年毕业于河北科技师范学院机械设计制造及其自动化专业, 工学学士, 首钢矿业公司烧结厂机动科机械设备工程师, 电话: 0315-7713671。

## 3 结论

(1) 通过优化原料配比、反应温度和反应时间等, 制得了改性木质素磺酸钠分散剂 GM。合成分散剂的最佳工艺条件是: 木质素磺酸钠、丙烯酸与乙二醇配比为1:3:4, 引发剂过氧化氢与七水合硫酸铁配比为4:5, 反应温度 70 ℃, 反应时间为 1 h。

(2) 将 GM 作为水煤浆分散剂用于宝日希勒褐煤制水煤浆, 最高煤浆浓度达到 55.41%, 说明 GM 是一种性能优良的改性木质素磺酸钠系水煤浆分散剂。

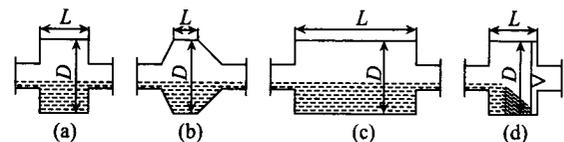
## 参考文献

[1] 郝祯娟, 付晓恒, 张晓波. 水煤浆干法制浆工艺发展现

## 1 磨机的选择

### 1.1 磨机的分类

依照磨矿介质、筒体形状、筒体直径和长度的比例以及排料方式的不同, 磨机主要分为短筒型、圆锥型、管型等几类, 磨机筒体的直径与长度示意图 1, 磨机的分类见表 1。



a—短筒型磨机(溢流型); b—圆锥型磨机(溢流型);  
c—管型磨机(溢流型); d—短筒型磨机(格子型)

图 1 磨机筒体直径和长度的比例示意

状 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2010(2): 41-43.

- [2] 张荣曾. 水煤浆制浆技术 [M]. 北京: 北京科学出版社, 1996.
- [3] 苏毅, 马步伟, 赵振新. 分散剂在水煤浆中作用 [J]. 河南化工, 2005(22): 8-11.
- [4] Funk James E. Coal Water Slurry and Methods for its Preparation: US, 4282006 [P]. 1981-08-04.
- [5] 邹立壮, 朱书全, 王晓玲, 等. 不同水煤浆分散剂与煤之间的相互作用规律研究: XI 分散剂改性煤粒的界面性质及其对 CWS 性质的影响 [J]. 燃料化学学报, 2006, 34(2): 161-165.
- [6] 茅晔辉, 朱书全, 吴晓华, 等. 聚羧酸系水煤浆分散剂的合成试验 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2009(1): 44-48.
- [7] 谢欣馨, 戴爱军, 杜彦学, 等. 水煤浆分散剂的发展动向 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2010(2): 43-46.

表1 磨机的分类

类型	磨料 介质	筒体 形状	筒体长度L与 直径D的关系	排矿 方式
球磨机	钢球 或 铁球	锥形	$L = (0.25 \sim 1)D$	溢流排料 格子排料
		短筒型	$L \leq 2D$	溢流排料 格子排料
		管型	$L = (3 \sim 6)D$	溢流排料 格子排料
棒磨机	钢棒	筒形	$L = (1.5 \sim 2)D$	溢流排料
自磨机	无介质或 少量钢球	短筒形	$L = (0.3 \sim 1.0)D$	风力吸运 格子排料
立磨机	钢球	短筒形	$L \leq 2D$	溢流排料

我国水煤浆生产厂家使用最广泛的是球磨机、棒磨机和自磨机。首钢矿业公司烧结厂所用球磨机规格为 $\Phi 1830 \times 7000$  mm,属于管型溢流排料球磨机。

### 1.2 各类磨机的特点

(1)格子型球磨机。强制排料、排料速度快(不适合细磨)、构造复杂、对维护要求高、生产能力较溢流型球磨机高15%,但是粉碎效率低、单位产量能耗较高、研磨介质容易磨损、运转时噪音大。主要用于新建选矿厂,不适合用作水煤浆磨机。

(2)溢流型球磨机。物料在球磨机内停留时间长,适合细磨,构造简单,检修方便,工艺成熟,投资少,目前被绝大多数水煤浆生产厂家采用。

(3)棒磨机。物料研磨后粒度均匀,一般粒度为0.3~3 mm,适用于粗磨性脆易泥化矿物,不适合水煤浆生产。

(4)自磨机。无磨料介质,靠物料相互冲击和磨剥实现磨碎,直径大,一般用于矿石粉碎,不适合水煤浆生产。

(5)立磨机。可以控制物料的研磨时间,构造简单,生产能力低。目前开平水煤浆厂即采用此设备。

## 2 溢流型球磨机的构造

溢流型球磨机(传动方式为右旋)的结构,见图2。

球磨机筒体的筒壳是由18~36 mm的钢板卷

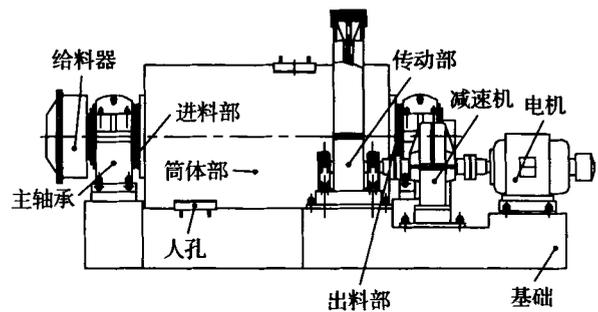


图2 溢流型球磨机结构示意图

制焊成的圆筒,筒壳两端焊有铸钢制成的法兰,法兰经过精细加工,必须相互平行和同心。用螺栓把球磨机前后端盖紧固在筒壳两端法兰上,形成一个整体。筒壳上留有两个对称配置的矩形人孔,用作检查、观察筒体内情况和检修。球磨机工作时,用双头螺栓将人孔盖紧固密封在筒体上。筒壳内有衬板,用楔形螺丝固定在筒壳上。为了防止水煤浆沿螺丝孔泄漏,在螺丝帽下垫有橡胶垫圈。

## 3 影响溢流型球磨机粉碎效果的主要因素

### 3.1 磨碎过程的影响

当球磨机按照规定的转速运转时,研磨介质与物料在离心力 $C$ 和摩擦力 $F$ 的作用下被提升到一定高度后,由于重力 $G$ 作用而脱离筒壁沿抛物线轨迹下落;之后又被提升一定高度,再沿抛物线轨迹下落;如此周而复始,使处于研磨介质之间的物料受冲击作用而被击碎。同时,由于研磨介质的滚动和滑动,使颗粒受研磨、摩擦、剪切等作用而被磨碎。

### 3.2 球磨机转速的影响

球磨机转速大小决定着筒体内研磨介质的运动状态和研磨作用效果。当转速较小时,全部介质被提升的高度较小,只向上偏转一定的角度,其中每个介质都围绕自己的轴线转动。当介质的倾角超过介质(钢球、瓷球或鹅卵石)在介质表面上的自然休止角时,介质即沿此斜坡滚下。介质的这种运动状态称为泻落,如图3(A)所示。在泻落式状态工作的磨机中,物料在介质间主要受到磨剥作用,冲击作用很小,故粉碎效率低。

如果磨机的转速合适,介质边自转边随筒体内壁做圆曲线运动上升到一定高度,然后纷纷作

抛物线下落,这种运动状态称为抛落式,如图3(B)所示。在抛落式状态工作的磨机中,物料在圆曲线运动区受到介质冲击和强烈翻滚着的介质磨剥作用,故此种运动状态下,物料的粉碎效率最高。

当球磨机转速过快时,介质就贴在筒壁上而不再下落。这种运动状态称为离心运转,如图3(C)所示。发生离心运转时,物料也随筒体一起运转,既无介质的冲击作用,此时磨剥作用很弱,粉碎作用几乎停止。

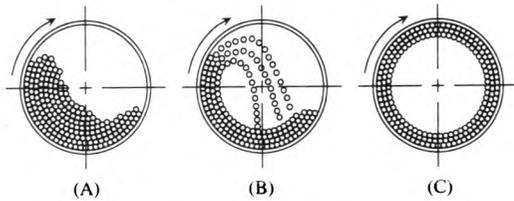


图3 研磨介质运动轨迹

以球磨机中最外层研磨介质为研究对象,其受力分析如图4所示。当研磨介质被提升到A点脱离筒体抛落下来时,离心力C要小于或等于向心力N,即:  $C = N$ 。

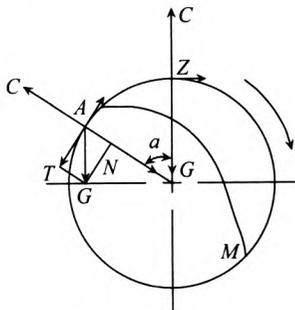


图4 研磨介质落下时的受力情况

因为

$$C = \frac{mv^2}{R}$$

$$N = G \cos \alpha = mg \cos \alpha$$

所以

$$\frac{mv^2}{R} = mg \cos \alpha$$

$$v^2 = Rg \cos \alpha$$

由此得:

$$v = \sqrt{Rg \cos \alpha} \quad (1)$$

在图4所示位置时,研磨介质与水平线成一

定角度并以速度  $v$  抛出物体。圆周切线速度  $v$  和球磨机转速  $n$  之间有下列关系:

$$v = \frac{\pi D n}{60} = \frac{\pi R n}{30}$$

代入式(1)得:

$$n = \frac{\sqrt{g \times 30}}{\pi \sqrt{R}} \sqrt{\cos \alpha} \quad (\text{r/min})$$

取  $g$  为  $9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\pi \approx \sqrt{g}$ , 则有:

$$n = \frac{30}{\sqrt{R}} \sqrt{\cos \alpha} \quad (2)$$

当  $R$  一定时,由式(2)可知,球磨机转速  $n$  与变量  $\alpha$  角为反比关系;  $\alpha$  角减小,  $\sqrt{\cos \alpha}$  则增大,使得球磨机转速增大,即为钢球提高到最高位置再抛落的演变过程。当  $\alpha = 0$  时,  $n = \frac{30}{\sqrt{R}}$ , 研磨介质的径向分力(向心力)不能克服离心力,钢球便开始随筒体一起做回转离心运转。根据式(2),当  $\alpha = 0$  时,  $\cos \alpha = 1$ , 则:

$$n_{\text{临界}} = \frac{30}{\sqrt{R}} = \frac{42.4}{\sqrt{D}} \quad (\text{r/min}) \quad (3)$$

这时球磨机的转速为临界转速。式(3)说明  $n_{\text{临界}}$  与球磨机直径成反比关系。即球磨机筒体越大,  $n_{\text{临界}}$  值越小;当球磨机直径越小时,  $n_{\text{临界}}$  则愈大。用它作为一个标准尺度,来比较同类球磨机的不同转数或不同磨机的工作转数的效果,有其指导意义。

由于上述研究是建立在一种特殊条件上的,忽略了研磨过程中钢球的滑动,并以最外层的研磨介质作为研究对象。当球的填充率在  $40\% \sim 50\%$  时,研磨浓度较大,与采用不平滑衬板时较为接近。对此,既应考虑到磨机内、外层钢球最适合高度的最大破碎作用,又要兼顾到整个研磨介质对物料的冲击和磨剥作用,从而得出球磨机适宜的工作转数(一般应为该球磨机临界转数的  $72\% \sim 80\%$  [1]), 即:

$$n = (0.72 \sim 0.8) \times n_{\text{临界}} \quad (4)$$

根据式(3)可计算本厂水煤浆球磨机(规格为  $\Phi 1830 \times 7000$ ) 的  $n_{\text{临界}}$ :

$$\begin{aligned} n_{\text{临界}} &= \frac{42.4}{\sqrt{D}} = \frac{42.4}{\sqrt{1.83}} = \frac{42.4}{1.3528} \\ &= 31.34 \quad (\text{r/min}) \end{aligned} \quad (5)$$

工作转速  $n$ :

$$n = (0.72 \sim 0.8) \times 31.34 \\ = 22.56 \sim 25(\text{r/min}) \quad (6)$$

根据实际测算,本厂球磨机实际工作转速为25 r/min,与式(6)计算出的工作转速相吻合,说明本厂球磨机在转速上达到了最佳粉碎效果。

### 3.3 球磨机筒体直径和长度对粉碎效率的影响

磨机的直径越长,物料受到的冲击、磨剥作用也越大,单位产量电耗也就越低;反之球磨机的生产能力就低,单位电耗越高。

据彭德功指数的测定表明,球磨机的生产能力与直径的2.6次方成正比,输出功率与直径的2.4次方成正比。两者直径指数相差0.2次方,即磨机的效率按直径的0.2次方增加,每吨水煤浆电耗按直径的0.2次方减少。

当球磨机直径一定时,在一定范围内,筒体越长,则球磨机的容积相应增加,从而可提高球磨机的生产率,并有利于增加细磨作用,改善水煤浆粒度指数。但是筒体太长时,会浪费部分电能。

### 3.4 球磨机内衬板和研磨介质的选择

对于球磨机的衬板不但要求耐磨,并要承受巨大的冲击,因此必须具有相当大的硬度和韧性。对研磨介质的硬度要求较低,韧性要求较高。

目前本厂水煤浆球磨机衬板为锰钢浇铸制成,研磨介质采用高铬钢球。与橡胶衬板、树脂橡胶衬板、铸石板、陶瓷板相比,锰钢衬板会给物料更大冲击和磨剥作用,但噪音也增大。根据2012年一季度监测情况,水煤浆球磨机在运转时噪音可达118 dB。自2003年本厂水煤浆工艺投产以来,于2006年5月对衬板全部进行了更换。在2005年9月及2006年5月检修期间把损坏的钢球剔除,加入了新的钢球;并在平时生产过程中定时补充钢球,每周一填加Φ40钢球30 kg,每周五填加Φ25钢球50 kg。

### 3.5 球磨机内装球量、球径、球比的影响

#### 3.5.1 装球量

如果球磨机内钢球过多,不仅占用球磨机的有效容积,球与球之间还会相互干扰,无谓的消耗能量;反之又不能充分发挥冲击和磨剥作用。

本厂水煤浆球磨机额定转球量为19.5 t,铸钢球堆密度为4.35~4.65 t/m<sup>3</sup>,球磨机规格为

Φ1 830×7 000,由此可得填充率为:

$$\frac{19.4 \div (4.35 \sim 4.65)}{3.14 \times \left(\frac{1.83}{2}\right)^2 \times 7} \times 100\% \\ = 22.79\% \sim 24.36\%$$

磨矿用球磨机的装球量和填充率是否合适,往往可以根据电动机的电流表读数来判断。因为在正常操作情况下,转数、衬板形式等因素是确定的。球磨机内冲击、磨剥效果达到最大时,所需电量也大。因此当电流表读数最高时,球磨机内钢球填充率最适宜。

#### 3.5.2 球径和球比

在球磨机中具体执行研磨任务的是运行的钢球,钢球大小会严重影响研磨效果。钢球一方面对物料有冲击作用,另一方面对物料进行挤压、研磨。粗粒物料的破碎主要靠冲击力,细磨主要靠球的研磨作用。而两种作用都是通过球与球和球与衬板之间的接触,实现对物料的冲击和研磨。在装球量一定的条件下,球的尺寸决定球的个数。球在球磨机中的冲击次数随球径的减小而增加。球与球间的研磨间隙则随球径的减小而减小。但在研磨过程中要击碎那些大颗粒物料,必须由较大的球来完成。因此,要得到较高的生产能力,就必须按照物料的粒度要求,装入一定重量和适当比例的各种直径的钢球。

2005年11月,本厂新安装了一台破碎机,保证了进球磨机的物料中3~5 mm粒级占到65%。降低入料粒度后,本厂将球磨机内原直径Φ60的钢球剔除,只剩Φ40和Φ25的两种钢球。

由于水煤浆为新兴产业,目前无任何权威资料 and 统计结果能表明磨机中能达到的最佳填充率,只能从生产实践中摸索。2012年5月本厂进行了钢球级配实验。实验用球磨机为格子型球磨机,其技术参数为:Φ420×450,转速57 r/min,介质充填率40%。实验结果如表2和表3所示。

从表中可以看出,不同直径钢球配比Φ40:Φ30:Φ20=2:3:1时,研磨效果最好,研磨效率最高。

## 4 结 语

(1)在球磨机中,钢球与筒壁脱离点仅与设计尺寸有关,而与转速无关。

表2 不同钢球配比下的研磨效果对比

序号	不同直径钢球配比 Φ40: Φ30: Φ20	浓度/%	-0.074 mm 粒级产率/%	72 h 沉淀 状况	矿浆 流动性	粘度
1*	0:0:100	76.00	72.72	沉淀	差	大
		72.10	58.58			
		72.10	59.27			
		73.4	63.52			
2	50:50:0	61.33	73.99	微沉淀	一般	微大
		57.82	79.06			
		64.58	79.34			
		61.24	77.46			
3	50:33.3:16.7(3:2:1)	60.91	90.05	不沉淀	好	好
		61.03	88.91			
		64.55	85.23			
		62.16	88.06			
4	40:30:30(4:3:3)	67.60	84.53	沉淀	一般	可以
		65.45	87.78			
		63.19	88.56			
		65.41	86.96			
5	33.3:50:16.7(2:3:1)	61.54	87.63	不沉淀	一般	可以
		60.97	93.33			
		60.00	88.99			
		60.84	89.98			
6	16.7:33.3:50(1:2:3)	65.48	75.80	沉淀	差	大
		64.00	79.90			
		63.13	73.39			
		64.32	76.36			
7	16.7:50:33.3(1:3:2)	62.14	85.06	不沉淀	一般	可以
		60.91	85.76			
		62.17	88.30			
		61.74	86.37			

\* 由于给矿机故障、水压变小造成该试验磨矿浓度偏高。

表3 不同钢球配比下的研磨效率对比

不同直径 钢球配比 Φ40: Φ30: Φ20	研磨效率 (新生 -0.074 mm 粒级)/ kg · (L · h) <sup>-1</sup>	研磨 效率 排序
0:0:100	0.107	7
50:50:0	0.135	5
50:33.3:16.7	0.156	2
40:30:30	0.154	3
33.3:50:16.7	0.160	1
16.7:33.3:50	0.133	6
16.7:50:33.3	0.153	4

(2) 本厂目前使用的锰钢衬板和高铬钢球虽然冲击和磨剥作用较好, 但噪音过大。

(3) 当球磨机电流表达到读数最高时, 球磨

机内钢球填充率最适宜。

(4) 球磨机内的钢球配比值除了在实验室进行实验外, 还需经过生产实践的检验。

### 参考文献

- [1] 郑水林. 超细粉碎原理、工艺设备及应用 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 1993.
- [2] 陈世柱. 行星式高能球磨机工作原理研究 [J]. 矿冶工程, 1997(12): 62-65.
- [3] 刘 垚, 赵国锋, 何岩岩, 等. 生产水煤浆用新型超细搅拌球磨机的研究 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2011(1): 47-49.
- [4] 詹 隆, 贾传凯, 杜丽伟, 等. 水煤浆制浆工艺与专用设备的新发展 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2011(5): 43-47.