

文章编号:1674-2869(2012)11-0025-05

云南某磷肥厂球磨机钢球配比的优化

郭永杰^{1,2}

(1. 国家磷资源开发利用工程技术研究中心, 云南 昆明 650600;

2. 云南磷化集团有限公司, 云南 昆明 650600)

摘 要:针对云南某磷肥厂因钢球配比不合理、大球过多而造成的磨矿细度不高,不能很好地适应磷酸生产要求的问题,分析了入磨矿石的粒度组成。根据矿石的粒度组成采用昆明理工大学段希祥教授的精确化装球方法,提出了一套针对该磷肥厂球磨机的精确化装球方案,同时提出了一个偏大方案和一个偏小方案,并和现厂的装球方案进行对比。针对四种装球方案进行了实验室扩大试验,研究结果表明:最佳装球方案为精确化装球方案,该方案与现厂的装球方案相比,可以使球磨机的生产能力提高 14.44%;根据新方案的粒度特性曲线给出了补加钢球的方案,按此方案补加钢球可以使球磨机中的球荷组成始终保持近似于推荐的初装球组成。

关键词:入磨矿石;粒度组成;精确化装球;粒度特性曲线

中图分类号:TD921.4

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.11.006

0 引 言

磷矿磨矿的处理能力和磨矿产品的质量直接影响到企业的经济效益,可以说提高企业的磨矿水平已成为确保磷化工产业稳定可持续发展的必然要求。磨矿介质的装补方案是提高磷矿磨矿水平的关键技术,它可以提高磷矿在磨矿方面的能力并能改善产品的质量,更有利于下一步的磷酸生产,并可实现磨矿系统的节能降耗。

云南某磷肥厂现有的球磨机装置为 3.6 m×9.0 m 的长筒、溢流型球磨机,目前该球磨机装置的处理能力已经达到了 150 t/h(湿基,含水量约为 10%),比最初设计的生产能力 120 t/h 提高了 25%。但困扰该厂的一个问题是磨矿的产品细度达不到生产磷酸要求的-0.15 mm 含量不低于 90%的标准,该厂 2009 年 3-5 月的统计数据中磨矿产品细度还存在-0.15 mm 含量低于 80%的情况,平均细度最高的月份-0.15 mm 含量只有 86%左右。针对该厂存在的磨矿细度不够的问题开展了磨矿介质优化的研究,以此来提高磨矿产品的细度。

1 实验室方案优化

1.1 磨机给矿粒度组成测定

给矿粒度组成是确定球磨机装球的重要依

据,对球磨机给矿进行筛析,筛析结果见表 1。

表 1 全给矿及待磨矿料粒度组成

Table 1 All feeder and stay grinding material grain composition

粒级/mm	新给矿产 率 $\gamma_1/\%$	磨机返砂 产率 $\gamma_2/\%$	全给矿产 率 $\gamma_0/\%$	待磨物料 产率 $\gamma/\%$
+35	6.99	0.00	4.11	5.18
-35+25	7.68	0.00	4.52	5.69
-25+20	3.23	0.00	1.90	2.39
-20+15	10.16	0.00	5.98	7.53
-15+12	7.41	0.00	4.36	5.49
-12+8	12.76	0.00	7.51	9.46
-8+5	19.96	0.00	11.74	14.79
-5+2	3.34	1.02	2.38	3.00
-2+0.90	3.65	2.54	3.19	4.02
-0.90+0.45	2.59	12.94	6.85	8.63
-0.45+0.30	1.69	18.53	8.62	10.86
-0.30+0.15	5.03	37.06	18.22	22.96
-0.15+0.074	4.47	10.66	7.02	—
-0.074	11.04	17.25	13.60	—
合计	100.00	100.00	100.00	100.00

从表 1 看出,磨矿的返砂中+0.9 mm 以上的粗粒只占 3.56%,而 0.15 mm~0.9 mm 的细粒占了 68.53%。返砂的上述特点判明,球磨机内大

收稿日期:2012-09-17

作者简介:郭永杰(1981-),男,山东聊城人,工程师,博士。研究方向:矿物加工工程。

球偏多,能有效磨碎粗粒,但球磨机内小球不足,导致中间粒级含量较大。

要确定球磨机的钢球配比,主要的依据是球磨机内待磨物料的粒度组成。待磨物料包括两部分:一是磨机的新给矿或叫原矿,二是分级形成的返砂。待磨矿料的粒度组成取决于前两部分的粒度组成及各部分矿粒所占的比例。

从表 1 中抽出新给矿各粒级的产率数值,再从表 1 中抽出磨机返砂各粒级产率数值,按 70% (经测定现场的返砂比约为 70%) 的返砂比计算出全给矿的粒度组成列入表 1。全给矿为待磨物料,其中的绝大部分粗矿粒是需要磨碎的,但有少部分矿料,如-0.15 mm 以下细粒物料已达到产品要求,不需要再磨,因此,在进行钢球级配时不考虑不需磨细的小于 0.15 mm 的细级别。

1.2 初装球径的精确计算

1.2.1 单级别矿粒精确球径计算 目前确定球径的公式不少,国内外不少于 10 个,但都属于经验公式,这些经验公式一是因考虑的因素太少,也就是考虑一二个影响因素,二是一个经验系数难把其余因素均包括进去。通过试验证明,奥列夫斯基公式计算的结果普遍偏小得多;戴维斯公式计算的结果又普遍偏大;拉苏莫夫简便计算式计算粗级别需用球径时结果偏小太多,计算细级别球径基本可行,但仍略偏大;榜德简便计算公式也有拉苏莫夫公式类似的毛病^[1]。经多年科研证实,效果较好的是昆明理工大学段希祥教授提出的球径半理论公式^[2]:

$$D_b = K_c \cdot \frac{0.5224}{\psi^2 - \psi^6} \cdot \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{压}}}{10\rho_e D_0}} \cdot d_f$$

式中: D_b 为特定磨矿条件下给矿粒度 d 所需的精确球径, cm; K_c 为综合经验修正系数; ψ 为磨机转速率, %; $\sigma_{\text{压}}$ 为岩矿单轴抗压强度, kg/cm²; ρ_e 为钢球在矿浆中的有效密度, g/cm³; D_0 为磨机内钢球“中间缩聚层”直径, cm; d_f 为磨机给矿 95% 过筛粒度, cm。

根据球径半理论公式各参数的意义及该厂 3.6 m×9.0 m 球磨机的实际工作条件,分别计算出各待磨矿料组所需的精确球径,具体数据见表 2。

表 2 第 5 组中,计算出的精确球径是 20.1 mm,但实际生产中小于 30 mm 的小球将很快从球磨机的内排出,所以很少使用 30 mm 以下的小球。从钢球货源供应、价格上看,采用 30 mm 以下的小球也不合算,故笔者把最小钢球尺寸确定为 30 mm。

表 2 待磨物料不同粒度范围所需钢球直径

Table 2 Ball diameter according to the different range of grinding materials

按粒度分组	粒度范围/ mm	计算的精确 球径/mm	调整球径/ mm
第 1 组	+20	101	100
第 2 组	-20+12	79	80
第 3 组	-12+5	58.1	60
第 4 组	-5+0.45	30.2	40
第 5 组	-0.45+0.15	20.1	30

1.2.2 整体钢球精确球径计算 就球磨机中钢球磨矿的机理来讲,在钢球抛落过程和随筒体一起转动过程中,钢球对矿粒的破碎是冲击破碎、挤压破碎、研磨破碎共同作用的结果。或者说钢球对矿粒的破碎作用带有随机性,钢球下落或滚动中可能碰到矿粒,也可能碰不到矿粒,所以钢球与矿粒的相碰是随机的;钢球即使碰到矿粒,但能否发生破碎行为也是随机的,这就是说,钢球碰上适宜它破碎的矿粒时才可能出现破碎行为,而钢球的能量破碎不了的矿粒,则破碎行为就不能发生。因此,球磨机内的破碎过程实际是一个随机过程^[3]。

单级别矿粒的球径精确计算可以用球径半理论公式来解决,但磨机内整体球荷的精确计算,一靠单级别球径的精确,二靠各级别钢球比例的科学搭配^[4]。而各级别钢球的比例是根据各级别矿粒的产率来确定。对一段磨矿而言,各级别矿粒均要磨碎,故各级别矿粒均需照顾到。研究证明,当钢球的比例和适宜它磨碎的矿粒产率相当时有好的磨碎效果,按照这样的原则对各级别钢球进行搭配如表 3。

表 3 不同规格钢球的比例

Table 3 Proportion of different specifications of steel ball

粒度范围/mm	待磨物料 产率/%	各待磨物料级所 需球径/mm	应配的钢球 比例/%
+20	13.26	100	15
-20+12	13.02	80	15
-12+5	24.25	60	25
-5+0.45	15.65	40	15
-0.45+0.15	33.82	30	30

因此,本研究中推荐的初装球比例为:

$$\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 : \Phi 30 = 15 : 15 : 25 : 15 : 30.$$

推荐的初装方案是否是最佳的? 只能用磨碎试验来证明. 为了进行磨碎试验验证, 必须再设计及各方案, 一是比推荐方案球径偏大的方案, 二是比推荐方案球径偏小的方案, 这就从上方及下方包围了推荐方案, 再加上选厂的方案, 即以下 4 个方案:

推荐方案: $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 : \Phi 30 = 15 : 15 : 25 : 15 : 30$ (平均球径 57 mm);

偏大方案: $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 30 : 30 : 30 : 10$ (平均球径 76 mm);

偏小方案: $\Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 : \Phi 30 = 25 : 25 : 25 : 25$ (平均球径 52.5 mm);

现厂方案: $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 70 : 10 : 10 : 10$ (平均球径 88 mm).

上述 4 个初装球方案需要在实际磨矿试验中进行对比验证, 证明哪个方案最优.

1.3 扩大试验验证

扩大试验验证应使试验球磨机与生产现场的球磨机的磨机工作参数相当. 现厂磨机为 $3.6 \text{ m} \times 9.0 \text{ m}$, 转速 17 r/min, 转速率 75.25%. 试验球磨机为 $0.45 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$, 装球 100 kg, 装球率为 36.5%, 将试验室的试验球磨机转速调至 51 r/min, 转速率为 75%, 装球率及转速率与现厂磨机的相当.

将磨机新给矿及返砂按 1 : 0.7 配成全给矿, 分成 5 份, 每份 16 kg, 经探索磨碎试验, 磨 28 min 可使产品细度达 80% 左右的一 0.15 mm. 每个初装方案磨碎一份试料, 均磨 28 min. 磨矿产品取样 1 kg 进行筛析, 计算磨碎结果, 分别列入表 4~表 7.

表 4 推荐方案的磨碎结果

级别/mm	级别重量/ g	级别产率 $\gamma/\%$	正累积产率 $\sum \gamma_{\pm}/\%$	负累积产率 $\sum \gamma_{\mp}/\%$
+2.5	24.1	2.41	2.41	100.00
-2.5+0.9	1.1	0.11	2.52	97.59
-0.9+0.45	4.3	0.43	2.95	97.48
-0.45+0.3	16.2	1.62	4.57	97.05
-0.3+0.15	151.4	15.14	19.71	95.43
-0.15+0.074	156.0	15.60	35.31	80.29
-0.074	646.9	64.69	100.00	64.69
合计	1 000.0	100.00	—	—

表 5 偏大初装球方案的磨碎结果

级别/mm	级别重量/ g	级别产率 $\gamma/\%$	正累积产率 $\sum \gamma_{\pm}/\%$	负累积产率 $\sum \gamma_{\mp}/\%$
+2.5	21.1	2.11	2.11	100.00
-2.5+0.9	1.7	0.17	2.28	97.89
-0.9+0.45	20.5	2.05	4.33	97.72
-0.45+0.3	43.7	4.37	8.70	95.67
-0.3+0.15	183.6	18.36	27.06	91.30
-0.15+0.074	143.2	14.32	41.38	72.94
-0.074	586.2	58.62	100.00	58.64
合计	1 000.0	100.00	—	—

表 6 偏小初装球方案的磨碎结果

级别/mm	级别重量/ g	级别产率 $\gamma/\%$	正累积产率 $\sum \gamma_{\pm}/\%$	负累积产率 $\sum \gamma_{\mp}/\%$
+2.5	29.0	2.90	2.90	100.00
-2.5+0.9	1.6	0.16	3.06	97.10
-0.9+0.45	5.3	0.53	3.59	96.94
-0.45+0.3	16.8	1.68	5.27	96.41
-0.3+0.15	160.1	16.01	21.28	94.97
-0.15+0.074	160.7	16.07	37.25	78.72
-0.074	626.5	62.65	100.00	62.65
合计	1 000.0	100.00	—	—

表 7 现厂初装球方案的磨碎结果

级别/mm	级别重量/ g	级别产率 $\gamma/\%$	正累积产率 $\sum \gamma_{\pm}/\%$	负累积产率 $\sum \gamma_{\mp}/\%$
+2.5	4.3	0.43	0.43	100.00
-2.5+0.9	1.1	0.11	0.54	99.57
-0.9+0.45	27.6	2.76	3.30	99.46
-0.45+0.3	55.8	5.58	8.88	96.70
-0.3+0.15	182.3	18.23	27.11	91.12
-0.15+0.074	146.1	14.61	41.72	72.89
-0.074	582.8	58.28	100.00	58.28
合计	1 000.0	100.00	—	—

采用如下 4 个指标作为评价各个方案优劣的标准:

a. +2.5 mm 粗颗粒含量,用于判别各个初装方案磨碎粗颗粒的能力;

b. -0.15 mm 产率,表明达到磨矿粒度的级别含量,自然是愈大愈好;

c. -0.074 mm 级别产率,选矿工作者通常把它当作细磨效果的指标,自然也是愈大愈好;

d. 按 -0.074 mm 计的磨机利用系数或按 -0.074 mm 计的磨机生产率 $q_{-0.074}$ [单位:吨/(米³·时)],也是愈高愈好,以现厂的 $q_{-0.074}$ 为比较基准,可以判明采用各个初装球方案后 $q_{-0.074}$ 提高的幅度。

4 种初装球方案的磨碎结果比较列入表 8。

表 8 4 种初装球方案的磨矿效果比较

Table 8 Effect comparison of four scheme

方案	推荐方案	偏大方案	偏小方案	现厂方案
+2.5 mm 产率/%	2.41	2.11	2.90	0.43
+0.15 mm 产率/%	19.71	27.06	21.28	27.11
-0.15 mm 产率/%	80.29	72.94	78.72	72.89
-0.074 mm 产率/%	64.69	58.62	62.65	58.28
$q_{-0.074}$ / [吨/(米 ³ ·时)]	0.301	0.265	0.289	0.263
$q_{-0.074}$ 为 现厂倍数	1.144 4	1.007 6	1.098 9	1.000

表 8 的比较结果说明:

a. 4 个初装球方案中,现厂方案因为装大球比例过多破碎粗块的能力强,所以产品中 +2.5 mm 的粗粒含量最低,而偏小方案破碎粗块的能力差,产品中粗粒含量高;

b. 以磨矿粒度为判断依据,推荐方案磨矿的能力最强,偏大及现厂方案磨不细级别的含量最高,而达到磨矿粒度的含量自然是推荐方案最高,偏大及现厂方案最低;

c. -0.074 mm 磨细量中推荐方案最高,偏大方案及现厂方案最差;

d. 按 -0.074 mm 计的磨机生产率推荐方案最高,可比现厂方案提高 14.44%,偏小方案次之,偏大方案及现厂方案差不多。

产品中有少量粗块必然要入返砂再磨,而 -0.15 mm 的高产率才是决定方案优劣的依据,据此认为推荐的初装球方案为最佳方案,偏小方案次之,偏大方案及现厂方案应放弃。

而现在所有的厂矿都担心的问题是磨机内小球比例偏多是否影响磨矿效果。为解决这个问题,特意按不考虑返砂只考虑新给矿的方案进行配球,按照新给矿的粒度组成应用破碎统计力学原理进行配球,得出的比例如下:

$\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 50 : \Phi 40 : \Phi 30 = 21 : 21 : 15 : 24 : 11 : 8$ (平均球径 65.6 mm)。

按扩大试验中相同条件进行磨矿,磨碎结果见表 9。

表 9 按新给矿计算初装球方案的磨碎结果

Table 9 Grinding results according to the new feeder calculation scheme

级别/mm	级别重量/ g	级别产率 $\gamma/\%$	正累积产率 $\Sigma\gamma_{+}/\%$	负累积产率 $\Sigma\gamma_{-}/\%$
+2.5	25.3	2.53	2.53	100.00
-2.5+0.9	1.9	0.19	2.72	97.47
-0.9+0.45	9.5	0.95	3.67	97.28
-0.45+0.3	35.2	3.52	7.19	96.33
-0.3+0.15	177.0	17.70	24.89	92.81
-0.15+0.074	156.0	15.60	40.49	75.11
-0.074	595.1	59.51	100.00	59.51
合计	1 000.0	100.00	—	—

从表 9 可知,虽然新给矿的配球减小了 30 mm 球的比例,并加大了大球的比例但与推荐方案对比,-0.15 mm 产率比推荐方案小 5.18%,磨不细粗粒也高 0.12%。磨机利用系数 $q_{-0.074}$ 只有 0.270 5,远小于推荐方案的 0.301。因此可以认为,片面的加大大球的比例不可取,实际生产中还是推荐方案的效果最佳。

1.4 补球方案确定

不管推荐的初装球如何精确及合理,但一经开始磨矿,原有的初装球状态就会发生改变,因为磨损将改变钢球的尺寸及配比^[5]。为了维持初装球的原有配比,就必须补球以补入前一天消耗的球量,但如果要维持与初装球相近的配比则需要一个合理的补加钢球方案。

根据推荐的初装球方案,作出钢球的正累积特性曲线,平行移动得到需要补加的钢球的特性曲线。根据补加钢球的特性曲线可以确定补加钢球比例为 $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 45 : 15 : 25 : 15$ 。

补球量根据过去的单耗及目前的处理量计算后逐步校核补加单耗,几个月后可形成正常的补球制度。

2 结 语

a. 球磨机返砂的粒度较细, 2 mm 以上的粗粒仅占 1.02% 左右, 0.074 mm~0.9 mm 的中间粒级多达 79.19%, 证明磨机内球荷直径过大, 大球比例过多.

b. 经过球径精确化的计算, 推荐最佳的初装球方案是: $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 : \Phi 30 = 15 : 15 : 25 : 15 : 30$; 经过扩大磨碎对比试验证明, 所推荐的初装球方案是最佳的初装方案, 比它偏大或偏小的方案均不如推荐的初装方案. 球磨机推荐方案的生产率比现厂装球方案提高了 14.44%.

c. 根据钢球的正累积特性曲线计算得到的补球比例为 $\Phi 100 : \Phi 80 : \Phi 60 : \Phi 40 = 45 : 15 : 25 : 15$,

按此比例补加钢球可以使球磨机中的球荷组成始终保持近似于推荐的初装球组成.

参考文献:

- [1] C. E. 安德列耶夫, B. A. 别洛夫. 有用矿物的破碎、磨碎和筛分[M]. 北京矿业学院, 译. 北京: 中国工业出版社, 1963.
- [2] 段希祥. 球磨机钢球尺寸的理论计算研究[J]. 中国科学: A 辑, 1989, 19(8): 856-863.
- [3] 段希祥, 曹亦俊. 球磨机介质工作理论与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [4] 任德树. 粉碎筛分原理与设备[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
- [5] 段希祥. 碎矿与磨矿: 第 2 版[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.

Optimum ratio of steel ball for mill in Yunnan phosphate fertilizer plant

GUO Yong-jie^{1,2}

(1. National Engineering Research Center of Phosphate Resources Development and Utilization, Kunming 650600, China;
2. Yunnan Phosphate Chemical Group Co., LTD., Kunming 650600, China)

Abstract: Aiming at the problem that an unreasonable ball ratio and the low degree of grinding fineness resulted by too much big balls in a phosphate fertilizer plant of Yunnan can not meet the requirements of phosphoric acid production, the grain size composition of ore was analyzed. According to the grain size composition of ore, using the accurate costume complement method proposed by Duan Xixiang professor of Kunming University of Science and Technology, a scheme of precise ball solution for mill to the phosphate fertilizer plant, and a partial big scheme and a partial small scheme were put forward, which compared with the pack ball scheme in the factory. Experimental study results show that the accurate pack ball schemes is best, which can increase the production capacity of ball mill by 14.44%. Based on the new scheme of the grain size characteristics curve, a plan of ball load and addition is given, which can make the steel ball load composition always keep the level of recommended initial installation approximately.

Key words: ore into mill; grain size; exact load and addition of ball; grain size curve

本文编辑: 苗 变