河北某煤矿 Bond 功指数测定研究

牛福生[1,2]，刘亚[1]，信晓飞[3]

（1. 华北理工大学矿业工程学院，河北　唐山　063210；2. 河北省矿业开发与安全技术重点试验室，河北　唐山　063210；3. 河北省地矿局第二地质大队，河北　唐山　063210）

摘要：本文基于 Bond 粉碎第三理论对煤矿矿样进行功指数的测定，取得了较好的试验结果。Bond 功指数测定表明，在筛孔尺寸为 270 μm，给矿中 80% 物料能通过的粒度大小为 785 μm，磨矿平衡时筛下产品中 80% 物料能通过的粒度大小为 245 μm，每一转所生成 Gbp 为 4.54 g/r，通过计算得出 Bond 球磨功指数为 13.98 kW·h/t，为煤矿磨矿时磨机的选取提供很好的指导意义。

关键词：煤矿；Bond 功指数；可磨度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2019.02.029

中图分类号：TD951　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-6532（2019）02-0140-04

碎磨过程中矿石粒度的减小与能量消耗存在一定关系，主要的碎磨能耗学说有雷廷格尔（Rittinger）面积学说、基克（F.Kick）体积学说、邦德（Bond）与王文东第三破碎学说，其中与磨矿过程紧密相关的是邦德（Bond）与王文东第三破碎学说[1]。Bond 功指数是影响磨矿效果的一个极为重要的因素[2]。

在球磨机磨矿作业中，测定矿石可磨度和功指数对整个试验流程制定以及磨矿设备选型极为重要。目前，国内外对磨矿 Bond 功指数做了大量研究，使用较多的有基于粉碎第三理论的 Bond 棒磨机功指数测定以及 Bond 球磨机功指数测定两种方法。但是对煤矿磨矿功指数的研究较少，大部分是基于较为难磨矿石的功指数试验。

1　试验矿样的加工准备

Bond 功指数测定试样取自河北某选煤厂。由于煤矿易吸水变潮，首先对矿样进行晾晒处理，测得原矿矿样大约含有 10% 的水分，对晾干后的矿样进行缩分，然后进行加工处理制取试验所需矿样。

2　煤样球磨功指数的测定

磨矿功指数的测定对磨机直径、球磨介质直径以及磨机转数等参数的确定具有重要意义[3]。

2.1　功指数测定公式和试验方法

Bond 功指数是指给定某一矿石，将其磨至指定粒度时所消耗的功的大小，用来表示矿石磨矿的难易程度，矿石的粉碎程度不同，功指数也会不同。

2.1.1 功指数测定公式

功指数测定公式见下式（1）：

$$W_{ib}=\frac{49.04}{[P_1^{0.23}G_{bp}^{0.82}(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}}-\frac{10}{\sqrt{F_{80}}})]} \quad (1)$$

式中：

W_{ib}- 球磨机功指数，kW·h/t；

P_1- 试验筛孔尺寸，μm；

G_{bp}- 球磨机每转新生成的指定筛子筛孔以下粒级煤样的重量，g/r；

P_{80}- 产品中 80% 物料通过的粒度尺寸，μm；

F_{80}- 给矿中 80% 物料通过的粒度尺寸，μm；

收稿日期：2017-08-08；**改回日期**：2017-09-13

作者简介：牛福生（1974-），男，教授，硕士生导师，主要从事复杂难选矿选矿方面的科研工作。

通讯简介：刘亚（1992-），男，硕士研究生，15127501672；272386623@qq.com。

万方数据

由式(1)可以看出，要测出煤样的球磨功指数，必须测出 P_1、G_{bp}、P_{80} 和 F_{80} 四个参数。P_{80} 和 F_{80} 可经给矿和最终产品套筛筛分，绘制曲线获得。

2.1.2 球磨机下一周期转数的确定

当功指数球磨机运转平衡时，用选定的筛子筛分，得到筛下产品重量 q_N 以及循环负荷 q_c，Bond 球磨机磨矿流程见图 1。

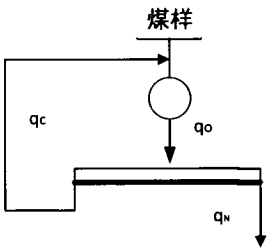

图 1　球磨机磨矿流程

Fig .1　Flow chart of ball mill grinding

$$q_0 = q_N + q_C = 3.5q_N \tag{2}$$

$$q_N = \frac{q_0}{3.5} = 700S_v / 3.5 \tag{3}$$

$$q_N = q_u \tag{4}$$

$$q_u = \frac{700 \cdot S_v}{3.5} \tag{5}$$

式中：q_n- 新给矿质量，g；

q_c 磨矿返回矿量，g；

S_v- 松散密度，g/mL。

在测定功指数试验中，下一周期球磨机合适的转数 ni 定义为：

$$n_i = \frac{\text{期望}q_u - q_N\text{中含有通过试验筛孔的质量}}{G_{bp}(\text{上一周期测得的})} \tag{6}$$

2.1.3 平衡值 Gbp 的计算

Gbp 指在球磨机中加入 700 mL 矿样，经过磨矿后将矿样卸下，用选定目数的筛子筛分，得到每转净生成产品的重量。Gbp 值计算方法如下。

$$G_{bp} = \frac{Q_p - Q_F(1 - R_F)}{N_{bp}} \tag{7}$$

式中：Q_p- 每次磨矿时，（270 μm）筛下的生成量，g；

Q_F- 每次磨矿时，物料的添加量，g；

R_F- 入磨物料的筛上累计率，%；

N_{bp}- 磨机的转数，圈。

2.1.4 试验步骤

①首先对原矿进行筛析，得出原料中 80% 通过筛孔的粒级尺寸 F_{80}。②在球磨机中加入 700mL 矿样进行磨矿，用筛孔尺寸为 P_1 的筛子对磨完后的矿样进行筛分，计算出每转净生成产品重量 G_{bp}，并求出下一周期所需转数。③补加与上一步骤筛下矿量相同容积的原矿，与筛上矿样混合至 700 mL，并按照上一步计算的转数进行磨矿，重复进行筛分作业。④当试验计算出的 G_{bp} 值在连续二到三个周期内 G_{bp} 值最大值与最小值之差不超过这三个 G_{bp} 平均值的 3%，认为试验达到平衡，将最后三次的 Gbp 取平均值。对磨矿最终产品进行粒度筛析，得出产品中 80% 通过筛孔的粒级尺寸 P_{80}[4-6]。

2.2　测定功指数的球磨机及试验套筛的选定

Bond 球磨功指数选用的设备是 Bond 球磨机，设备型号为直径 Φ(305 × 305) mm 的间歇式球磨机，球磨机筒体内光滑无衬板，可设置磨矿转数，转到一定转数时自动停机[7]。按既定标准程序，在循环负荷率为 250% 的闭路粉磨过程中对煤样功指数进行测定。

试验球磨机以 70 r/min 速度进行运转，相当于临界转速的 91.30%。磨机装有测定用的钢球共 285 个，重量为 20.125 kg，球径尺寸配比为：Φ36.5 mm 48 个；Φ30.2 mm 67 个；Φ25.4 mm 10 个；Φ19.1 mm 71 个；Φ15.9 mm 94 个[8]。

功指数测定试验中筛孔尺寸的确定至关重要，常用的筛孔尺寸为 0.15 mm、0.074 mm、0.053 mm、0.045 mm 等。由于该洗煤厂要求磨矿产品的粒度为 -0.074 mm 占 40% ~ 50%，因此本次中煤煤样球磨功指数测定试验控制筛孔尺寸为 270 μm，在闭路磨矿条件下，进行功指数测定。

2.3　给料松散密度及粒度测定

对试验煤样混合均匀后，对其松散密度进行了测定，测定结果见表 1 所示。

万方数据

表 1 煤样松散密度的测定

Table 1 Test of bulk density of coal samples

第一次结果 /(t·m^{-3})	第二次结果 /(t·m^{-3})	第三次结果 /(t·m^{-3})	平均值 /(t·m^{-3})
1.05	1.04	1.04	1.04

由表 1 可知，功指数磨机给料的松散密度为 1.04 t/m^3，煤样密度较小。

称取一定量试验煤样于套筛中，套筛选用 1.0 mm、0.85 mm、0.30 mm、0.15 mm、0.125 mm、0.106 mm、0.074 mm 以及 0.045 mm 的筛子，在振动筛上进行筛分作业。得到煤样功指数球磨机给料粒度特性曲线见图 2。

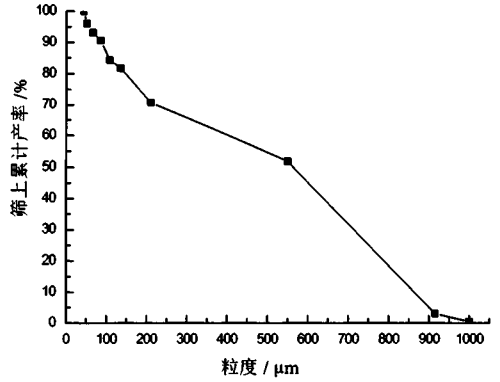

图 2 功指数球磨机给料粒度特性曲线

Fig .2 Particle size characteristic curve of feed

对图 2 进行分析可知，该中煤煤样球磨功指数测定试验的给料粒度 F80=785 μm。

2.4 球磨机可磨度的测定

试验在干式闭路循环条件下进行磨矿作业，循环负荷为 250%±5%。试验结束要求每转所产生的选定筛子筛孔以下的产量 Gbp 在最后二到三个周期达到平衡。Bond 功指数测定所得试验结果如下表 2。

表 2 中煤煤样邦德功指数试验数据

Table 2 Bond work index test data of coal samples

试验次数	球磨机转 /r	磨矿产品中 -0.27 mm 含量 /g	给矿中 -0.27 mm 含量 /g	磨矿所净生成 -0.27 mm 含量 /g	每一转所生成 -0.27 mm Gbp/(g·r^{-1})
1	10	420.05	351.39	68.66	6.86
2	2	247.56	201.92	45.64	22.82
3	4	146.13	119.00	27.13	6.78
4	21	167.71	70.24	97.47	4.64
5	28	208.37	80.62	127.75	4.56
6	24	207.57	100.16	107.41	4.49
7	24	210.74	97.78	110.96	4.62
8	23	205.13	101.30	103.83	4.51

$$\overline{G_{bp}} = \frac{G_6 + G_7 + G_8}{3} = \frac{4.49 + 4.62 + 4.51}{3} = 4.54\ \text{g/r}$$

$$\Delta G = \frac{G_{max} - G_{min}}{\overline{G_{bp}}} = \frac{4.62 - 4.49}{4.54} = 2.86\%$$

故△ G 满足误差 3% 的要求，因此煤样所得试验结果均在允许误差范围内，Gbp=4.54g/r。

循环负荷的计算

$$\overline{q_u} = \frac{q_6 + q_7 + q_8}{3} = \frac{207.57 + 210.74 + 205.13}{3} = 207.81$$

循环负荷 q_c：（728-207.81）/207.81=250.32%

△ q_c= 250.32%-250.00%=0.32%

满足循环负荷 250±5% 的要求。

2.5 磨矿平衡时产品粒度特性

中煤矿样磨矿达到平衡状态时，取最后三个周期的筛下产品缩分筛析，得到平衡产品粒度特性曲线见图 3。

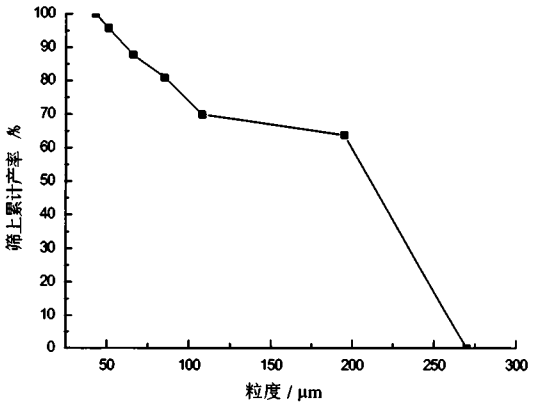

图 3 平衡产品粒度特性曲线

Fig .3 Particle size characteristic curve during grinding balance

由图 3 可以看出，中煤煤样磨矿平衡时筛下产品粒度 P_{80}=245 μm。

2.6 球磨功指数计算

通过一系列的磨矿试验和粒度分析，将最终得到的 P_1、G_{bp}、P_{80} 和 F_{80} 值代入功指数 W_{ib} 的计算公式，可以求出待测矿石的功指数，计算原始数据见表 3。

万方数据

表 3　球磨功指数计算结果

Table 3　Calculation results of ball mill work index

试验筛孔 P1/ μm	可磨度 Gbp/(g·r^{-1})	产品粒度 P80/ μm	给料粒度 F80/ μm	功指数 Wib /(kW·h·t^{-1})
270	4.54	245	785	13.98

将表 3 的数据带入功指数计算公式（1）：

$$W_{ib}=\frac{49.04}{[P_1^{0.23}G_{bp}^{0.82}(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}}-\frac{10}{\sqrt{F_{80}}})]}$$

$$=\frac{49.04}{270^{0.23}\cdot 4.54^{0.82}(\frac{10}{\sqrt{245}}-\frac{10}{\sqrt{785}})}=13.98\ \text{kW}\cdot\text{h/t}$$

通过计算可知，该煤样的球磨机功指数为 W_{ib}=13.98 kW·h/t。

3　结　语

（1）Bond 功指数测定表明，在筛孔尺寸为 270 μm，给矿中 80% 物料能通过筛孔的粒度大小为 785 μm，磨矿平衡时筛下产品中 80% 物料能通过筛孔的粒度大小为 245 μm，每一转所生成 G_{bp} 为 4.54 g/r，通过计算得出 Bond 球磨功指数为 13.98kW·h/t。

（2）本文基于 Bond 粉碎第三理论对煤矿矿样进行功指数的测定，取得了较好的试验结果，为煤矿可磨度的研究提供了良好的建议。

参考文献：

[1]H. 内马托拉希，吴世平 . 用新规格的试验室球磨机确定邦德功指数 [J]. 国外金属矿山，1994 (9): 42-45.

[2] 吴建明 .Bond 粉磨功指数研究与应用的进展 [J]. 有色设备 ,2005 (3): 1-3+49.

[3] 王强，林齐 . 复杂铝土矿 Bond 功指数测试研究 [J]. 世界有色金属 ,2009 (12): 39-41.

[4] 石原透，罗中兴 . 球磨机功指数的试验结果 [J]. 有色矿山，1984 (3): 48-55.

[5]Rene John Deister, 段慧文 . 利用试验室球磨机做可磨性试验确定邦德功指数的方法 [J]. 有色设备，1988 (3): 10-14.

[6] 王炬 . 云南某含铁铜矿石球磨功指数及自磨介质适应性试验研究 [J]. 矿业快报，2007 (10): 34-36.

[7] 杨文新，华映梅 . 功指数法用于磷矿石磨矿机能力的计算 [J]. 云南化工 ,1992 (2): 65-66.

[8] 王宏勋，吴建明 . 球磨可磨度和邦德球磨功指数测定 [J]. 金属矿山 ,1984 (8): 52-54.

Experimental Study on Bond Work Index of a Coal Mine in Hebei Province

Niu Fusheng[1,2],Liu Ya[1],Xin Xiaofei[3]

(1.College of Mining Engineering, Hebei United University, Tangshan, Hebei China;
2. Hebei Province mining industry develops with safe technology priority laboratory, Tangshan, Hebei China;3.No.2 Geological Brigade of Hebei Geology and Mineral Exploration Bureau, Tangshan, Hebei China)

Abstract: In this paper, based on Bond smash the third theory of coal, for the work index and the degree of grinding can be measured, we have achieved good test results. The Bond work index showed that when the size of sieve was 270 μm, the 80% of the material in the ore can pass through the sieve size of 785 μm. At the same time, the 80% of the material in the sieved product is subjected to a grain size of 245 μm and the Gbp reached 4.54g/r when grinding is balanced. It is concluded that the Bond grinding index is 13.98 kW · h/t, which provides a good reference for the selection of mill in coal minegrinding.

Keywords: Coal mine; Bond work index;Grinding degree

万方数据