



一种评价颗粒堆积效果的简便方法及其应用

涂亚楠, 徐志强, 蔡斌, 范秀圆, 朱林丰, 杨蛟洋

(中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 提出一种评价颗粒堆积效果的简便方法, 将颗粒划分为多个窄粒级进行隔层充填, 基于匀相微元假设, 通过计算上隔层空隙率的方式计算堆积评价指标 E , 以此评价颗粒堆积效率, 并通过水煤浆制备试验验证其可行性。结果表明, E 值越大堆积效率越高, 成浆浓度随之呈增大趋势, 说明了方法的有效性; 对于不同的煤样, E 具有最优值, 颗粒堆积效率足够高, 且不会因为过度堆积影响流动性; Rosin-Rammler 拟合模型的均匀性系数 n 为 0.7~0.8 时, E 值较大, 但是通过 n 值判断堆积效率的优劣时会因拟合误差过大而存在失效的可能性; 煤样氧化后的 E 值即使大于氧化前的, 其成浆性仍可能降低; 同一种煤制得的水煤浆, 体积膨胀率具有一致性。

关键词: 颗粒; 堆积; 评价; 水煤浆; 连续粒径

中图分类号: TQ536, TB115

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2013)05-0053-07

A Simple Method for Evaluation of Particles Packing Efficiency and Its Application

TU Yanan, XU Zhiqiang, CAI Bin, FAN Xiuyuan,
ZHU Linfeng, YANG Jiaoyang

(School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: A simple method was proposed to evaluate particles packing efficiency. Based on symmetrical distribution hypothesis, the particles were separated to several narrow size grades to characterize the total system. Through changing upper interval grade void content, the evaluation index E of packing efficiency was calculated to evaluate the system packing efficiency. The availability of the method was tested via coal water slurry experiments. The results indicate that E is available to evaluate particles packing efficiency that is improved by increase of E and coal water slurry concentration. The best value of E is variable for different coal samples. When the parameter n in Rosin-Rammler model is between

0.7 and 0.8, E gets its relatively high value, but some exception occurs possibly in multi-grading particles accumulation. The realizable concentration decreases when the sample is oxidized, even using a high E value. The expansion ratio coal water slurry prepared by the same coal sample is consistent.

Key words: particle; packing; evaluation; coal water slurry; continuous size

颗粒的堆积效果会影响许多工艺过程的效率, 如矿浆的输送、湿物料的干燥等, 也会影响产品的质量, 如制品的强度、密度、透气性、热值、流变性等。现实中最普遍的是连续尺寸颗粒的堆积问题。最早倡导对此研究的 Andreason 提出将实际的颗粒分布描述为具有相同形式的分布, 利用 Guadin-Schuhmann 方程表征替换实际颗粒分布, 指出当 Guadin-Schuhmann 方程的模型参数为 0.3~0.5 时, 颗粒体系具有最高堆积效率^[1]。而 Suzuki 等则认为模型参数应为 0.5~0.8^[2]。张荣曾^[3]在前人研究的基础上提出隔层堆积计算的方法, 利用计算机随机堆积试验确定了符合 Alfred 和 Rosin-Rammler 分布的颗粒体系在模型参数分别为 0.37 和 0.7~0.8 时具有最高堆积效率, 并指出 Andreason 和 Suzuki 的观点不同的原因在于各自所选颗粒尺度不同。Stovall 等^[4]研究证实 n 组粒径体系中, 至少有 1 组粒径的颗粒是充分密实的, 并提出干粉体系堆积效率线性堆积模型, 但是此模型带有多个不易确定的参变量。黄新等^[5]根据 Stovall 的研究, 验证了该模型对水泥浆体具有良好的适应性, 但是由于采用反复调节待定参变量的方法, 使计算值能够与试验结果相吻合, 因而无法对颗粒复配比例进行指导。乔龄山^[6]利用 Fuller 曲线评价当时中国水泥的颗粒分布, 并指出细颗粒含量偏低的问题。叶大年等^[7]指出大、小球体积比为 1:1 时, 大、小球粒径比 1:0.70 为堆积密度的阈值, 但是仅限于 2 种粒度球体的堆积情况。上述方法在实验室进行多级级配制备水煤浆时往往存在问题, 而且应用时较为困难。这主要是因为多级级配会导致颗粒的实际分布不能很好地符合某一种特定的粒度分布模式。为此, 在张荣曾的隔层堆积研究的基础上, 本文中提出一种简便的堆积效率评价方法,

收稿日期: 2013-02-28, 修回日期: 2013-03-25。

基金项目: 国家自然科学基金项目, 编号: 51274208; 国家自然科学基金青年科学基金资助项目, 编号: 51204190。

第一作者简介: 涂亚楠(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为水煤浆的制备与应用、洁净煤技术、固体废弃物处理与利用。电话: 18600193306, E-mail: yanan.tu@gmail.com。

通信作者简介: 徐志强(1965—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水煤浆制备技术、洁净煤技术、选煤厂自动控制。电话: 010-62339899, E-mail: xuzhiqiang@263.net。

不需要经过颗粒粒度分布拟合,而直接进行堆积计算,给出该方法在水煤浆试验中的实例应用,并获得较好的效果。

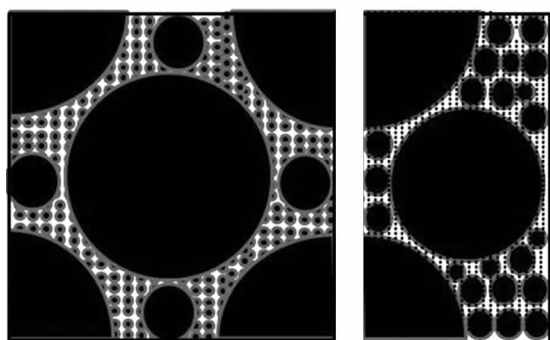
1 堆积效率评价方法

1.1 基本假设

基于以下 3 个基本假设提出堆积效率评价方法。

假设 1:假设集料中所有颗粒是均匀分散的,整个体系可以划分为多个具有相同粒度分布模式的计算微元,并且计算微元堆积时不再产生额外的空隙,那么研究计算微元的堆积与研究整个体系的效果等效。在任一计算微元中,任一粒级的空隙均可容纳所有剩余颗粒,整个计算微元的实际空隙率是多种粒级的颗粒相互堆积的结果,并等于整个体系的空隙率。

假设 2:与张荣曾的隔层充填的假设^[3]相同,将体系按照粒空比 B 划分为多个窄粒级,并假设各窄粒级中的颗粒不相互充填,而上粒级的粒度下限与下粒级的粒度上限相等,因此需要隔层充填。至此,原连续分布的集料实现了离散化。由于是隔层堆积的,因此将生成 2 个系列的次级微元,这 2 个次级微元合并成为同一个计算微元(如图 1 所示)。



(a) 次级微元 1 (b) 次级微元 2

图 1 计算微元与次级微元

Fig. 1 Calculation infinitesimal and secondary infinitesimal

由上述分析可以获得描述匀相的数学方程:

$$\frac{V_i}{1-\varepsilon_i}=V, \quad (1)$$

式中: V_i 为计算微元中第 i 粒级颗粒的体积, cm^3 ; ε_i 为第 i 粒级颗粒在计算微元中分布后的空隙率; V 为计算微元中全部颗粒占据空间的体积(包括空隙体积), cm^3 。

假设 3:假定所有颗粒无论粒径大小,均为球体,并且紧密接触(不存在颗粒相互支撑形成的空腔),不考虑颗粒自身特性(如形状、配位数、表面荷电、密度等)的影响。

1.2 计算思路

在进行水煤浆制备试验时,需要对原煤样进行磨

矿,并制得不同粒度分布的多种样品。磨后煤样的粒度分布情况可以通过激光粒度仪测定。最后分析各磨后煤样的粒度分布状况进行级配优化,选择合理的样品和比例进行制浆试验。这时就可以通过加权的方法,计算煤样配比后的粒度分布,并将粒度值划分为多个窄粒级,获得窄粒级的分布情况。Furnas^[8]指出 2 种粒径的颗粒体系中,当细颗粒可以完全充填粗颗粒空隙时可得最高堆积效率,并由此可以进一步扩展到多粒径分布;但是该法过于理想化(不同粒级的空隙率相等),而在实际的连续粒径分布的集料中,粗颗粒含量不足,相互接触时的空隙不可能容纳所有细颗粒。在这种情况下,细颗粒将粗颗粒隔开,表现为粗颗粒粒级空隙率的提高。

需要注意的是,在实际的颗粒相互堆积中,即使是单一粒度颗粒堆积,其空隙率也不等于按照某一特定堆积模式(如正六面体堆积等)下的值。张荣曾等^[9]测定细粒度窄粒级颗粒紧密接触时的堆积效率,发现随着粒度的减小,堆积效率呈下降趋势,结果如表 1^[9]所示。这说明对于任一窄粒级,在被更细粒级颗粒充填前,存在最小的空隙率。

表 1 4 种窄粒级煤颗粒紧密接触随机堆积时的堆积效率

Tab. 1 Random packing efficiency of 4 types of coal particles with different narrow size

粒径/ μm	视密度 $\rho_s/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	堆积密度 $\rho_p/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	堆积效率 λ
450~280	1.362	0.715 7	0.525 5
<280~180	1.362	0.704 7	0.517 4
<180~125	1.362	0.666 5	0.489 4
110~98	1.362	0.690 5	0.507 0

水煤浆试验中通常要求粒径小于 $300\ \mu\text{m}$, 根据表 1,将各窄粒级的最小空隙率取值为 0.5。为了保证所有小颗粒可以完全充填至大颗粒中,要使粒空比 B 大于 $5^{[10]}$,因此 B 取值为 2.44,以保证隔层粒空比大于 5 的条件。

1.3 计算方法

在计算微元中,设 m 为窄粒级个数, V_i 为第 i 窄粒级颗粒的体积, cm^3 , ε_i 为第 i 窄粒级自身的空隙率,最小值为 0.5; V_{vi} 为第 i 窄粒级的表观体积, cm^3 ,则:

$$V_{vi} = \frac{V_i}{1-\varepsilon_i}. \quad (2)$$

第 i 粒级的空隙体积 $V_{vi}(\text{cm}^3)$ 为

$$V_{vi} = \frac{V_i}{1-\varepsilon_i} \varepsilon_i. \quad (3)$$

此时可以根据粒级测量数据,由式(2)、(3)计算各窄粒级的颗粒体积、表观体积以及空隙体积。根据 1.1 节的基本假设以及 1.2 节的分析,为了保证第 i 窄

粒级能够完全充填到第 $i+2$ 粒级中,应满足

$$V_{ai} \leq V_{ai+2} \circ$$
 (4)

当可满足式(4)时,将充填后的第 $i+2$ 粒级继续向更上隔层第 $i+4$ 窄粒级充填计算即可。当不能满足式(4)的要求时,则需要提高 ε_{i+2} 的值,或者通过式(5)计算获得,然后充填。

$$\varepsilon_{i+2} = \frac{V_{ai}}{V_{ai} + V_{ai+2}} \circ$$
 (5)

当反复充填至不再存在上隔层时,得到最粗的 2 个窄粒级的表观体积 $V_{am}、V_{am-1}$ 。此时,即可计算最终的堆积效率评价指标 E ,

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m V_i}{V_{am} + V_{am-1}} \times 100\% \circ$$
 (6)

E 可以认为是计算得到的颗粒堆积效率,其值越大表明堆积效率越高,但是此堆积效率并不能作为实际的堆积效率,它是通过理想化假设以及紧密接触堆积获得的一个理想值。要准确表达实际堆积效率,不仅需要考虑到颗粒特性导致的体系膨胀(如颗粒的形

状、表面特性、密度等),还要考虑样品处理的不同,如振实、压实、悬浮等条件。基于基本假设,可以认为所有实际的颗粒堆积效率是得到的总表观体积做不同程度膨胀后的 E 值。

2 水煤浆试验中的实例应用

2.1 煤样粒度分布

选取 3 种煤样,均进行空气干燥,然后分别利用球磨磨制粗、细 2 种样品,并利用行星式球磨机磨制超细样品。其中,煤样 3 是煤样 2 经过 105 ℃热风干燥 3 h 后,利用氧化干燥煤样进行磨矿所得。煤样磨制了多种样品,并筛选出用于配比制浆的 3 种磨后煤样(分别为粗样、细样和超细样),其粒度分布如表 2 所示(已按照粒空比 B 为 2.44 划分窄粒级)。由表可知,比较煤样 2、3 的超细样粒度数据,可得经氧化干燥后同一种煤的磨矿效率提高;煤样 2 则因可磨性较差,导致粗、细、超细 3 种样品的平均粒度差异不及其他 2 种煤样。

表 2 3 种煤样的粒度负累积分布
Tab. 2 Particle size distribution of 3 types of coal samples

粒径/ μm	负累积质量分数/%								
	煤样 1			煤样 2			煤样 3		
	粗样	细样	超细样	粗样	细样	超细样	粗样	细样	超细样
300.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
122.95	76.32	100.00	100.00	80.75	91.68	95.66	83.24	99.58	100.00
50.39	39.05	98.02	100.00	47.62	68.40	79.29	51.17	90.33	99.88
20.65	15.99	75.26	97.34	22.89	41.48	54.35	25.40	61.65	95.09
8.46	5.88	38.82	75.25	9.80	21.63	31.64	11.13	32.05	74.07
3.47	2.00	15.05	38.35	3.78	9.74	15.53	4.37	13.54	41.92
1.42	0.56	4.44	13.23	1.19	3.47	5.93	1.39	4.45	16.79
0.58	0.10	0.79	2.61	0.23	0.77	1.41	0.28	0.90	3.97

2.2 堆积效率评价指标的计算与应用

根据 1.3 节的计算步骤,对表 2 中各煤样的不同配比进行堆积效率评价指标 E 的计算,煤样的密度均取为 1.3 g/cm^3 ,并将配比后的粒度用 Rosin-Rammler 方程拟合,获得相应的模型参数(特征粒度 d_x 与均匀性系数 n),对比张荣曾等^[3,9]提出的最佳模型参数与本

方法计算的 E 值的指导作用。拟合采用 Excel 自带的规划求解进行,而不是采用双对数法计算模型参数,原因是利用双对数法的误差较大^[11]。在得到指标 E 后,选择不同 E 值的配比进行制浆,药剂量均为适度过量,比较制浆浓度(以质量分数计,下同)的大小,结果如表 3—5 所示,其中可制浆浓度范围指的

表 3 煤样 1 堆积效率评价指标计算与制浆结果
Tab. 3 Calculation of packing efficiency evaluation indexes and coal water slurry experiment results for coal No.1

粗样、细样、超细样质量比	堆积效率评价指标 $E/\%$	Rosin-Rammler 模型参数 n	拟合方差	平均粒径/ μm	质量分数/%
7:1:2	84.60	0.78	91.35	60.18	64.4~64.5
7:0:3	83.92	0.74	145.67	59.30	64.9~65.1
7:2:1	82.89	0.84	54.65	61.05	64.2~64.3
7:3:0	79.48	0.89	37.87	61.92	63.2~63.5
6:4:0	79.02	0.84	50.29	55.23	62.0~62.2

· 颗粒测试与表征 ·

表 4 煤样 2 堆积效率评价指标计算与制浆结果

Tab. 4 Calculation of packing efficiency evaluation indexes and coal water slurry experiment results for coal No.2

粗样、细样、超细样质量比	堆积效率评价指标 $E/\%$	Rosin-Rammler 模型参数 n	拟合方差	平均粒径/ μm	质量分数/ $\%$
4:0:6	82.33	0.83	12.53	48.24	52.0~52.2
5:0:5	81.54	0.85	13.00	52.14	51.8~52.0
0:7:3	80.78	0.85	8.99	41.55	52.1~52.3
1:7:2	80.47	0.86	8.14	45.44	51.1~51.3
5:2:3	80.35	0.88	11.81	54.68	51.1~51.3
7:1:2	79.42	0.94	14.66	61.20	50.7~50.9
4:5:1	79.37	0.90	9.33	54.59	50.7~50.9
6:4:0	78.46	0.96	11.18	61.12	49.7~49.8

表 5 煤样 3 堆积效率评价指标计算与制浆结果

Tab. 5 Calculation of packing efficiency evaluation indexes and coal water slurry experiment results for coal No.3

粗样、细样、超细样质量比	堆积效率评价指标 $E/\%$	Rosin-Rammler 模型参数 n	拟合方差	平均粒径/ μm	质量分数/ $\%$
8:0:2	85.65	0.79	46.93	54.62	49.9~50.1
7:0:3	83.82	0.71	65.37	48.63	50.5~50.6
6:1:3	82.73	0.70	56.34	44.18	49.1~49.3
5:4:1	80.18	0.81	21.40	42.79	48.0~48.1
3:4:3	79.61	0.75	61.94	30.83	47.8~48.0
3:6:1	78.83	0.84	29.73	33.89	47.7~47.8
6:4:0	78.23	0.89	15.16	48.78	47.7~47.8
8:2:0	77.90	0.94	9.68	57.68	47.8~47.9

是剪切率为 100 s^{-1} 条件下表观黏度为 $1\ 200\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 时可以制得的水煤浆浓度变化区间。

3 结果与讨论

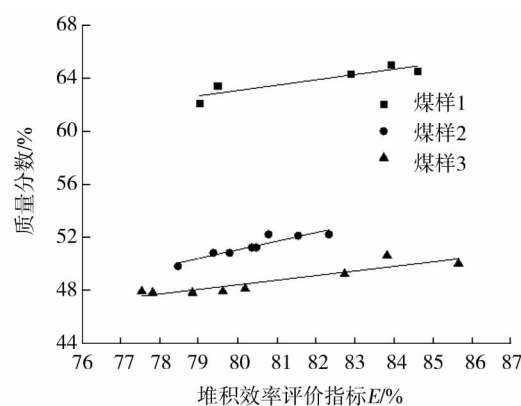
试验中采用的煤样 1 为低阶烟煤, 煤样 2 为褐煤, 显然煤样 1 的成浆性高于煤样 2 的^[12], 试验结果也证明了此判断。

3.1 堆积效率评价指标与可制浆浓度的关系

评价指标 E 值越大, 表明堆积效率越高。由表 3—5 的数据可以获得 E 值与可制浆浓度的关系, 如图 2 所示。由图可知, 随着 E 值的增大, 可制浆浓度均近似呈线性升高的趋势, 说明利用 E 值来评价并指导水煤浆颗粒的堆积效果是有效的。3 种煤样随着级配的优化, 质量分数均增大 2% 左右, 可见通过优化堆积的方法可以在不进行提质的条件下有效提高水煤浆的浓度, 原因是随着堆积效率的提高, 颗粒间留给水分的空间越少, 在相同体积下, 颗粒的体积分数更大, 从而使得制浆浓度得以提高。煤样 2 的最高 E 值整体比其他 2 种煤样要小, 因此通过进一步的级配, 其可制浆浓度仍有提高空间。

由表 3—5 和图 2 还可以看出, 煤样 1、3 在 E 值取最大值时, 并不能获得该煤可制浆的最大浓度值, 说明过高的堆积效率, 对于水煤浆制备而言并不是最优状态。这是因为颗粒过分密实后, 颗粒间

的水分不足以有效分散颗粒, 所以将导致黏度增大。此时为了保证水煤浆产品的黏度符合要求, 只能通过减小制浆浓度的手段保证体系中有足够的水分, 这说明对于不同的煤样存在最优的煤水体积比(固液比), 即最优堆积效率。同时, 不同煤样的最优堆积状态是不同的, 说明最佳的 E 值还与颗粒自身的特性有关。

图 2 可制浆浓度随堆积效率评价指标 E 的变化规律Fig. 2 Realizable concentration at different evaluation indexes E of packing efficiency

3.2 堆积效率评价指标与 Rosin-Rammler 模型参数 n 的关系

对比表 3—5 中 E 值和 Rosin-Rammler 拟合模型参数 n 的值, 结果如图 3 所示。由图可知, 在 E 值

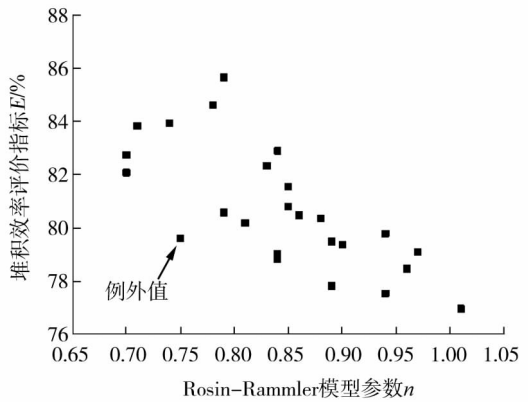


图 3 堆积效率评价指标 E 与 Rosin-Rammler 模型参数 n 的关系
Fig. 3 Relevance between evaluation indexes of packing efficiency E and parameter n in Rosin-Rammler model

较大时,堆积效率较高,此时 n 值为 0.7~0.8,这与张荣曾的研究基本相符^[9]。研究发现一个例外值,即表 5 中粗样、细样、超细样质量比为 3:4:3 的制浆样品,其 n 值为 0.75,却不能制备得到浓度较大的水煤浆,而 E 值较小,与试验结果相符。与其他配比比较可见,此配比的平均粒度很小,且拟合误差较大。说明在多级级配时,粗细样的差异如果较大,会使得采用 Rosin-Rammler 公式拟合的误差整体增大,这时采用 n 值来推断堆积效果的优劣并不合理,甚至可能失效。

3.3 可制浆浓度与平均粒度的关系

图 4 所示为可制浆浓度与平均粒度的关系曲线。可以看出,两者针对 3 种不同的煤样制备的水煤浆没有一致的规律性影响。实际上,平均粒度过小会造成颗粒比表面积急剧增大,表面吸附水的能力将越高,进而影响可制浆浓度;而过大的平均粒度可能导致无法制备具有流体特点的水煤浆。试验中没有发现此现象,可能是由于所选的平均粒度差异不明显。

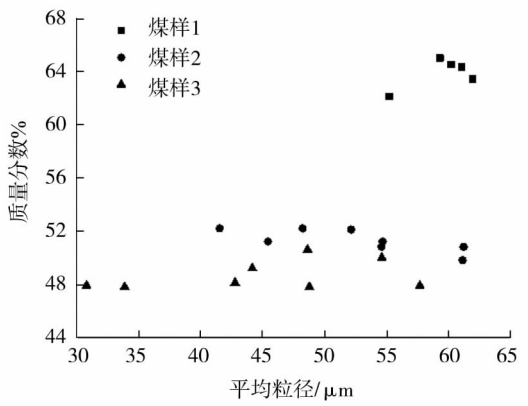


图 4 可制浆浓度与平均粒度的关系
Fig. 4 Realizable concentration at different average sizes

3.4 堆积效率评价指标与平均粒度的关系

图 5 所示为平均粒度与堆积效率评价指标 E 的

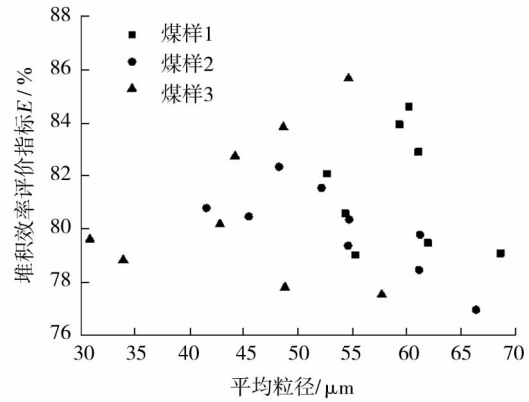


图 5 堆积效率评价指标 E 与平均粒度的关系
Fig. 5 Evaluation indexes of packing efficiency E at different average sizes

关系曲线。可以看出,两者针对 3 种不同的煤也没有一致性的规律,然而颗粒在实际堆积中,平均粒度的影响很大。利用振实密度仪检测了不同平均粒度下煤样 1 的振实堆积效率(振实 3 000 次),结果如表 6。由表可知,对于粒度上限为 300 μm 的煤样 1,平均粒度与振实堆积效率呈正相关,但是与 E 值没有必然联系。可见,由于 E 值在理想状态下进行计算得到,采用的是一个统一的最小空隙率,并假定颗粒可以紧密接触,即并没有考虑由于形状、表面荷电、配位数、密度等原因造成的颗粒实际空隙率的变化,因此 E 仅能代表基本假设条件下的堆积效率,而不能等同于不同处理方式下的实际堆积效率。

表 6 振实堆积效率试验值
Tab. 6 Results of jolt ramming experiments

平均粒径/ μm	堆积效率评价指标 $E/\%$	振实堆积效率/ $\%$
82.00	69.27	66.05
61.92	79.42	62.52
55.23	79.84	59.95
37.46	66.58	58.35
24.35	68.43	50.65
15.07	68.89	46.85

3.5 煤样干燥氧化的影响

由表 3、4 和图 2 可知,即使煤样 3 的 E 值大于煤样 2 的,但是经过氧化干燥后,制浆浓度反而减小。这是由于 105 $^{\circ}\text{C}$ 的热风干燥仅能将内在水分蒸发,并可提高煤样的磨矿效率,但是这种低温干燥方式不会对煤样进行提质,反而会缓慢氧化煤样表面,使其氧含量更高,表面亲水性更强,煤的变质程度实际上是降低的。这些都会降低煤的成浆性^[3,12]。表面亲水性的增强会弱化药剂的分散作用,为了保证颗粒能够有效分散,需要增大用水量,这会导致符合黏度要求的水煤浆产品的颗粒间距增大,也就表现为实际的堆积效率下降,但是此时 E 值可能很大。

· 颗粒测试与表征 ·

表 7 水煤浆体系的参数 δ Tab. 7 Parameters δ of coal water slurry system

煤样	堆积效率评价指标 $E/\%$	体积分数 $\varphi/\%$	参数 δ	参数 δ 的平均值	最大相对误差 $\%$
煤样 1	84.60	58.29	1.45	1.42	2.21
	83.92	58.82	1.43		
	82.89	58.08	1.43		
	79.48	57.13	1.39		
	79.02	55.76	1.42		
煤样 2	82.33	45.55	1.81	1.80	1.71
	81.54	45.36	1.80		
	80.78	45.75	1.77		
	80.47	44.66	1.80		
	80.35	44.66	1.80		
	79.42	44.27	1.79		
	79.37	44.27	1.79		
	78.46	43.28	1.81		
煤样 3	85.65	43.48	1.97	1.91	2.87
	83.82	44.07	1.90		
	82.73	42.69	1.94		
	80.18	41.62	1.93		
	79.61	41.43	1.92		
	78.83	41.33	1.91		
	77.81	41.33	1.88		
	77.53	41.43	1.87		

3.6 堆积效率评价指标与体积分数的关系

根据表 3—5 的实际制浆数据, 可以根据式 (7) 计算水煤浆中煤颗粒占据煤浆体积的含量, 即体积分数, 相应地可以代表煤颗粒的实际堆积效率。由于计算体积分数时, 内在水分占据的空间也作为颗粒间空隙处理, 因此实际堆积效率比体积分数高, 而考虑到同一煤种其孔隙特征相似, 因此将体积分数与堆积效率评价指标 E 进行对比是科学的。计算结果如表 7 所示。

$$\varphi = \frac{\varphi / \rho_c}{w / \rho_c + (100 - w) / \rho_w} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: φ 为体积分数, %; w 为质量分数, %; ρ_c 为煤的真密度, g/cm^3 ; ρ_w 为水的密度, g/cm^3 。

表 7 中引入的参数 δ 为 E 与煤颗粒体积分数的比值, 其值越大表明颗粒实际堆积时的表观体积由紧密接触堆积时的体积膨胀越明显。可以看出, 对于同一种煤而言, δ 差异很小 (相对误差均不超过 3%), 这说明在达到可制浆浓度时, 水煤浆中颗粒的体积膨胀具有良好的一致性。这样, 通过试验和计算任意配比的制浆浓度以及 E 值, 即可得到不同 E 值下同一种煤可制浆浓度的大致范围, 但是需要避免过分堆积的情况 (此时 E 值太大)。此外, 不同煤的 δ 差异较大, 且表现为煤的变质程度越低 (煤样 3 经氧化, 可认为其煤阶降低), δ 越大, 说明在水煤浆体系中, δ 的大小受煤颗粒本身特性的影响。

4 结论

1) 采用堆积评价指标 E 来指导水煤浆制浆试验是有效的; 随着 E 值的增大, 可制浆浓度呈增大趋势。

2) 对于不同的煤样, E 值具有不同的最优值, 此时颗粒可以合理地堆积而不至于过分密实, 导致可制浆浓度减小。

3) Rosin-Rammler 模型的均匀性系数 n 为 0.7~0.8 时, E 值较大, 但是在多级级配时可能存在例外。

4) 干燥煤样可以提高干磨效率, 煤样可能被缓慢氧化, 导致成浆性降低。

5) 在达到可制浆浓度时, 同一种煤具有相近的膨胀特点。

参考文献 (References):

- [1] 曾凡, 胡永平. 矿物颗粒学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995: 78-89.
- [2] GOTOH K, MASUDA H, HIGASHITANI K. Powder technology handbook[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1997.
- [3] 张荣曾. 水煤浆制备技术[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 45-49.
- [4] STOVALL T, de LARRARD F, BUIL M. Linear packing density model of grain mixtures[J]. Powder Technology, 1986, 48 (1): 1-12.
- [5] 黄新, 朱宝林, 郭晔, 等. 连续粒径粉体在浆体中的堆积密度[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32 (4): 461-465.
- [6] 乔岭山. 水泥的最佳颗粒分布及其评价方法[J]. 水泥, 2001 (8): 1-5.
- [7] 叶大年, 张金民. 非等大球体的任意堆积[J]. 地质科学, 1990 (2):

- 127-126.
- [8] FURNAS C C. Grading aggregate: I; mathematical relations for beds of broken solids of maximum density[J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1931, 23 (9): 1052-1058.
- [9] 张荣曾, 刘炯天, 徐志强, 等. 连续粒度分布的充填效率[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31 (6): 552-556.
- [10] BROWN G G. Unit operation[M]. New York: John Wiley and Sons Inc., 1950.
- [11] 赵三银, 赵旭光, 余其俊. RRB 分布模型特征粒径和均匀性系数的准确计算[J]. 水泥, 2006 (5): 1-3.
- [12] 吴家珊, 宋永玮, 张春爱, 等. 煤的性质对水煤浆特性的影响[J]. 燃料化学学报, 1987, 15 (4): 298-304.

2014 年《化学工程》征订启事

《化学工程》于 1972 年创刊, 月刊, 国内外公开发行人。现由中国国际图书贸易集团有限公司代理对外发行, 发行代号: M4814。

《化学工程》是国家科技部中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊), 中文核心期刊、中国科学引文数据库文献源期刊和 RCCSE 中国核心学术期刊。期刊发表的论文被国际著名索引系统 CA、荷兰 Scopus、俄罗斯文摘杂志、《日本科学技术振兴机构中国文献数据库》(JST)、美国剑桥科学文摘、波兰《哥白尼索引》(IC)等引用, 在国内被“中国化学化工文摘”、“中国知网 CNKI 系列期刊数据库”、“中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊”、“中国学术期刊文摘源期刊”、“中文科技期刊数据库”等机构收录。期刊获历届陕西省优秀科技期刊一等奖, 2011 年第七届全国石油和化工行业优秀期刊一等奖, 首届《CAJ-CD 规范》执行优秀期刊奖。

主管单位: 华陆工程科技有限责任公司

主办单位: 华陆工程科技有限责任公司

协办单位: 中国石油和化工勘察设计协会化学工程设计专业委员会

办刊宗旨: 积极宣传化学工程学科的科研、开发成果; 推广化学工程设计、生产新技术及经验; 交流化学工程信息、工程建设产品; 促进科技成果的转化, 积极为设计、生产、科研、教学服务, 不断提高化学工程学术与技术水平。

开辟栏目: 专家特约、节能减排、生物化工、环境化工、过程强化、能源化工、材料科学、传质过程及设备、传热过程及设备、化工热力学、化工流体力学、反应工程、煤化工、医药工程、膜技术、过程模拟、化工系统工程、化工工艺等栏目。

订阅办法: 国内订户请到当地邮局订阅, 国外订户请与中国国际图书贸易总公司联系, 也可与编辑部联系。每期定价 15 元, 全年 180 元。

刊号: ISSN 1005-9954 CN 61-1136/TQ CODEN HUGOEN **邮发代号:** 52-52

地址: 西安市高新技术产业开发区唐延南路 7 号华陆大厦《化学工程》编辑部 **邮政编码:** 710065

电话: (029) 87988830 **传真:** (029) 87988280

E-mail: chem_eng@chinahualueng.com

Http: //www.chinahualueng.com; // www.ntcced.com; //imiy.cbpt.cnki.net

《化学工程》——设计与科研人员的良师益友
《化学工程》——企业家开拓创新与发展的园地