

doi: 10.11799/ce201903027

干法磨矿对长焰煤粒度分布与堆积效率的影响

涂亚楠, 王磊, 梅杰文, 徐志强

(中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 水煤浆颗粒不仅需要具有一定的细度, 而且需要合理的粒度分布。磨矿方式对其具有重要影响。在实验室条件下, 利用球磨、棒磨和行星式球磨三种方法对一种长焰煤进行了干法磨矿试验, 通过 Rosin-Rammler 方程对物料的粒度分布特性进行了分析, 并探讨了堆积效率随磨矿方式和磨矿时间的变化规律。结果表明: 球磨和行星磨比棒磨的磨矿效率高, 产品粒度更细, 但粒度分布窄, 堆积效率低; 棒磨产品粒度分布相对均匀, 并可有效防止颗粒过磨, 堆积效率更高; 当 Rosin-Rammler 方程的均匀性指数 n 值范围在 0.75~1.3 时, 与堆积效率具有很好的线性关系, 可以作为堆积效率的快速预估方法。

关键词: 长焰煤; 磨矿; 粒度分布; 堆积效率; 水煤浆

中图分类号: TD94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2019)03-0122-05

Effect of Dry-grinding Methods on Particle Size Distribution and Packing Density of Long Flame Coal

TU Ya-nan, WANG Lei, MEI Jie-wen, XU Zhi-qiang

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

Abstract: Coal water slurry (CWS) requires a certain fineness and size distribution of the coal powder to obtain higher packing density. In practice, grinding methods exert an important influence on these parameters. In this study, a ball mill, a rod mill and a planetary mill were used to grind a long flame coal. The particle size distributions and their packing densities with different grinding methods at different grinding time were tested and analyzed through fitting the data by Rosin-Rammler model. The results showed that the grinding efficiency of the ball mill and the planetary mill were much higher than that of the rod mill. Their products were much finer. However, the size distributions were narrower, and their packing densities were much lower than that of the rod mill. The uniformity index of the Rosin-Rammler equation had a well linear relation with the packing density when its values varying 0.75~1.3. Therefore, the uniformity index could be used as a fast evaluation method for the particles packing density.

Keywords: long flame coal; grinding; particle size distribution; packing density; coal water slurry

我国已成为世界上水煤浆技术领先、产能最大且应用行业最广泛的国家, 燃料水煤浆和气化水煤浆的使用量已分别超过 3000 万 t/a 和 2 亿 t/a。煤粉的粒度分布对水煤浆特性具有重要影响。科学合理的粒度分布能够使煤粉获得较高的堆积效率, 从而在不进行其他高能耗处理的条件下制备出高浓度的水煤浆^[1,2]。

我国的水煤浆产品普遍粒度比较粗, 水煤浆浆

体流动性较低, 并且粒度的分布不合理^[3]。水煤浆生产以单磨机高浓度制浆工艺为主, 磨机的选择和工况将直接影响水煤浆产品的粒度分布。水煤浆工业制备用的磨机主要是球磨机(用于燃料水煤浆)和棒磨机(用于气化水煤浆)。其中, 球磨主要利用的是钢球间的点接触, 在接触点上作用力大、破碎力大^[4]。磨机内磨矿介质的尺寸及配比不仅决定着球磨机的生产能力, 而且也决定着磨矿产品的粒度特

收稿日期: 2018-10-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51504261); 国家自然科学基金面上资助项目(51574251)

作者简介: 涂亚楠(1984—), 男, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 主要研究方向为水煤浆制备技术、洁净煤技术, E-mail: 201315@cumtb.edu.cn。

引用格式: 涂亚楠, 王磊, 梅杰文, 等. 干法磨矿对长焰煤粒度分布与堆积效率的影响 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 122-126.

性^[5]；棒磨主要利用的是钢棒间的线与线接触，它适合嵌布粒度粗的矿石磨矿，其破碎产品粒度均匀过粉碎轻，介质消耗量低，能耗低。采用直径不同的几种混合磨矿介质比用同一种直径的磨矿介质磨矿粒度低^[6]。磨机的入料粒度、钢棒级配及装填率等则是棒磨产品粒度特性的主要因素^[7]。

有关磨机的研究更多的集中在如何快速降低粒度的工艺或方法上，而对堆积效率的影响则研究较少。本研究的主要目的是横向对比球磨和棒磨对煤的干法研磨特点，探讨两种磨矿方式下对煤的粒度分布和堆积效率的影响规律。此外，随着水煤浆原料煤范围的拓展，众多低可磨性煤种也被应用于水煤浆生产。低可磨性煤在常规球磨或棒磨过程中产生的细粒级颗粒较少，难以充填粗颗粒之间的空隙，

导致堆积效率降低。这就需要其他方式加工出足够的细颗粒以实施粒度级配。因此，本文还同时考察了行星式球磨机的磨矿效果。需要指出的是，由于工业生产水煤浆是将水、添加剂和煤直接加入到专用磨机中进行研磨，添加剂和水均具有助磨作用，进而将对堆积效率产生影响。这将在之后的研究中加以探讨。

1 试验

1.1 试验用煤样分析

试验用煤样为神东哈拉沟选煤厂神优2产品，是优质的化工用煤，其工业分析和元素分析见表1。煤样经空气干燥后破碎至-3mm，并在105℃下干燥3h作为磨矿试验用样品，其水分含量为2.3%。

表1 长焰煤的工业分析与元素分析

工业分析/%				$Q_{gr,ad}/$	元素分析/%				
M_{ad}	A_{ad}	V_{daf}	FC_{daf}	($MJ \cdot kg^{-1}$)	C_{ad}	N_{ad}	H_{ad}	S_{ad}	O_{ad}
7.97	7.01	37.23	62.77	26.98	67.44	0.69	3.72	0.53	12.64

1.2 试验方法

1.2.1 磨矿方法

试验采用三种不同的磨矿机，其参数见表2。样品磨矿时间设定为0min、5min、10min、20min、30min、40min、80min、160min、320min。煤样装量分别设置为：球磨机1kg、棒磨机1kg、行星磨250g×2(对称两槽)。

表2 各磨机相关参数表

磨机种类	参数	数值
球磨机	介质材质	钢球
	介质直径/mm	Φ40 : Φ30 : Φ20 : Φ12
	配比	14 : 7 : 3 : 1
	内径/mm	180
	深度/mm	250
	筒体转速/($r \cdot min^{-1}$)	69
	功率/W	400
棒磨机	介质材质	钢棒
	介质直径/mm	Φ20 : Φ16 : Φ12
	配比	3 : 4 : 3
	内径/mm	180
	深度/mm	250
	筒体转速/($r \cdot min^{-1}$)	69
	功率/W	400
行星球磨机	介质材质	钢球
	介质直径/mm	Φ15 : Φ10 : Φ6
	配比	3 : 5 : 2
	罐体容积	2.5L×4
	转速/($r \cdot min^{-1}$)	250(公转)、500(自转)
	功率/W	1500

1.2.2 测试方法

将每次试验的磨矿产品用0.3mm的筛子筛分。取100g筛上产物用1.0mm、0.5mm标准筛进行干法筛分。-0.3mm物料采用OMEC的LS-900激光粒度分析仪测试。所得的筛分或激光粒度分析数据采用Rosin-Rammler方程(式(1))进行拟合，并计算相应的 D_{98} 、 D_{75} 、 D_{35} 、 De 、 n 值等特性数据。

$$R(d) = 100 - 100e^{-\left(\frac{d}{De}\right)^n} \quad (1)$$

式中， d 为粒级， μm ； $R(d)$ 为 d 粒级的负累积含量，%； e 为自然对数； De 为特征粒度(模型参数)， μm ； n 为均匀性系数(模型参数)，无量纲。

2 结果与讨论

2.1 粒度分布特性分析

-0.3mm粒级含量随磨矿时间的变化见表3。棒磨达到-0.3mm含量100%的磨矿时间最长，达到320min。而球磨和行星磨均需要40min。就前20min而言，球磨的效率要比棒磨和行星磨更高。这主要是由于球磨钢球的球径比行星磨的要高，且与煤颗粒的接触点要多于棒磨，因此对粗颗粒具有更多的研磨作用。从研磨30min的结果看，行星磨的-0.3mm含量超过了球磨，表明其对较小粒级物料的研磨更高效。

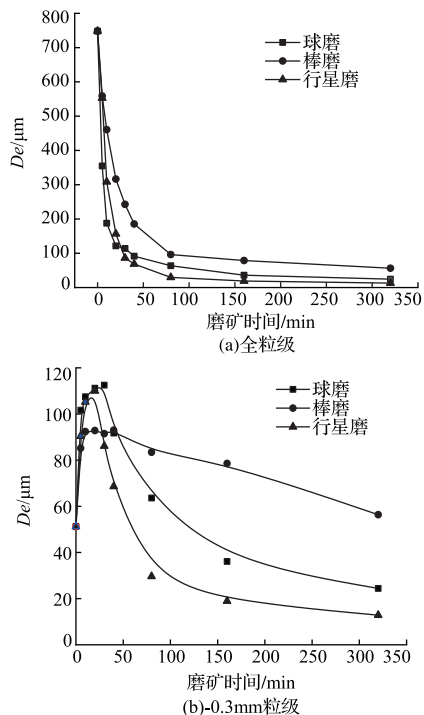
表3 -0.3mm 粒级含量

磨矿时间/min	含量/%		
	球磨	棒磨	行星磨
0	28.05	28.05	28.05
5	49.63	34.14	39.35
10	73.88	39.24	58.42
20	94.71	51.47	83.04
30	98.90	60.18	99.85
40	100.00	70.47	100.00
80	100.00	93.53	100.00
160	100.00	99.70	100.00
320	100.00	100.00	100.00

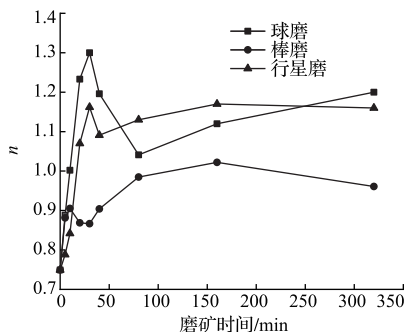
全粒级及-0.3mm 粒级物料粒度分布经式(1)拟合后的 D_e 值,如图1所示。该值反映了物料的整体粗细。由图1(a)可知,对全物料而言,煤样的整体粒度在初始阶段快速变细,而后粒度下降趋势变缓。行星球磨的最终产物最细,其次为球磨,而棒磨物料的粒度最粗。这主要是由于行星磨是离心条件下的球磨,当磨机转动后,定位在球磨罐上的参考系做行星运动,钢球随着罐体做同步运动,受到三个力的作用,分别为公转引起的离心力、自传引起的离心力、公转与自转互相作用引起的科式惯性力^[8]。本次试验的行星球磨机公自转速度均大于球磨机的速度。因此,行星球磨机能够比其他磨矿设备产生更好的粉碎效果^[9]。球磨是利用钢球间的点接触,在接触点上作用力大、破碎力大、加之大小球的配比,容易在接触点上高度的应力集中,在运动中既有冲击作用又有磨剥作用,故破碎行为容易发生。球介质在运动中与矿物接触是无选择性的,因为接触点上的破碎力过大,破碎精确性差,故选择性解离差,贯穿破碎作用较多,过粉碎现象严重,特别是当球的尺寸选择过大时这种现象就更为严重^[10]。棒磨是利用钢棒间的线与线接触,产品粒度均匀过粉碎轻。钢棒堆在一起时,钢棒之间会有缝隙,物料与筒体之间接触面较小,进而造成研磨不充分的现象。粗细钢棒配比,之间的缝隙就会变小,钢棒与物料接触面积会增大,物料在磨机内流速变慢,物料有较多的机会与钢棒接触从而被研磨更细^[11]。但整体上,物料与钢棒的接触点要少于球磨,因此整体粒度较粗。

由图1(b)可知,-0.3mm 粒级物料的粒度呈现先变粗后变细的现象,表明磨矿初始阶段主要是针对大颗粒的研磨。此外,由图1(b)还可以发现:棒磨物料的 D_e 极大值(磨矿时间小于30min时)要低于

球磨和行星磨,而研磨至80min以后,其值则显著大于球磨和行星磨,甚至高于原煤,这表明在试验条件下,棒磨对粗粒级的研磨更为高效,而对细粒级的进一步研磨的效率较低,体现出防过磨的特性。

图1 不同磨矿时间产品的特征粒径 D_e

Rosin-Rammler 方程中的均匀性系数 n 随磨矿时间变化如图2所示, n 值反映了颗粒分布均匀程度,其值越大则粒度分布越窄,其值越小则粒度分布越宽。由图2可知,棒磨的 n 值波动最小,球磨的波动最大,表明棒磨物料的粒度分布最宽,粒度组成相对均匀,而球磨和行星磨过程的产品粒度相对集中。这与2.1节所做的分析是相匹配的。

图2 n 值随磨矿时间的变化

2.2 研磨时间分析

水煤浆要求煤粉具有一定的细度。不同磨矿条件下的 D_{98} 、 D_{75} 和 D_{35} 值(分别指代当筛下累积分别达到98%、75%和35%时的粒度值)如图3所示。

其中,对于气化型水煤浆,一般要求 $D_{98} \leq 1.5\text{mm}$, $D_{35} \leq 0.045\text{mm}$;对于燃料型水煤浆,一般要求 $D_{98} \leq 0.3\text{mm}$, $D_{75} \leq 0.074\text{mm}$ 。

由图3(a)、(b)和(e)、(f)可知,各物料在达到气化型水煤浆粒度上限要求($D_{98} \leq 1.5\text{mm}$)的时间大致为:球磨 40min、棒磨 20min、行星磨 10min。而达到气化型水煤浆细度要求($D_{35} \leq 0.045\text{mm}$)的时间大致为:球磨 40min、棒磨 75min、行星磨 30min。可见,要达到气化型水煤浆的要求时,行星

磨所需的时间最短,但其物料上限过小。虽然棒磨达到要求的时间较长,但其整体分布更为合理。

由图3(a)、(b)和(c)、(d)可以看出,在达到燃用型水煤浆粒度上限要求($D_{98} \leq 0.3\text{mm}$)的时间大致为:球磨 40min、棒磨 160min、行星磨 30min。而达到燃用型水煤浆细度要求($D_{75} \leq 0.074\text{mm}$)的时间大致为:球磨 100min、棒磨大于 320min、行星磨 50min。可见,棒磨体现出了良好的防过磨特性,但显然其不适宜用于单机制备燃料型水煤浆。

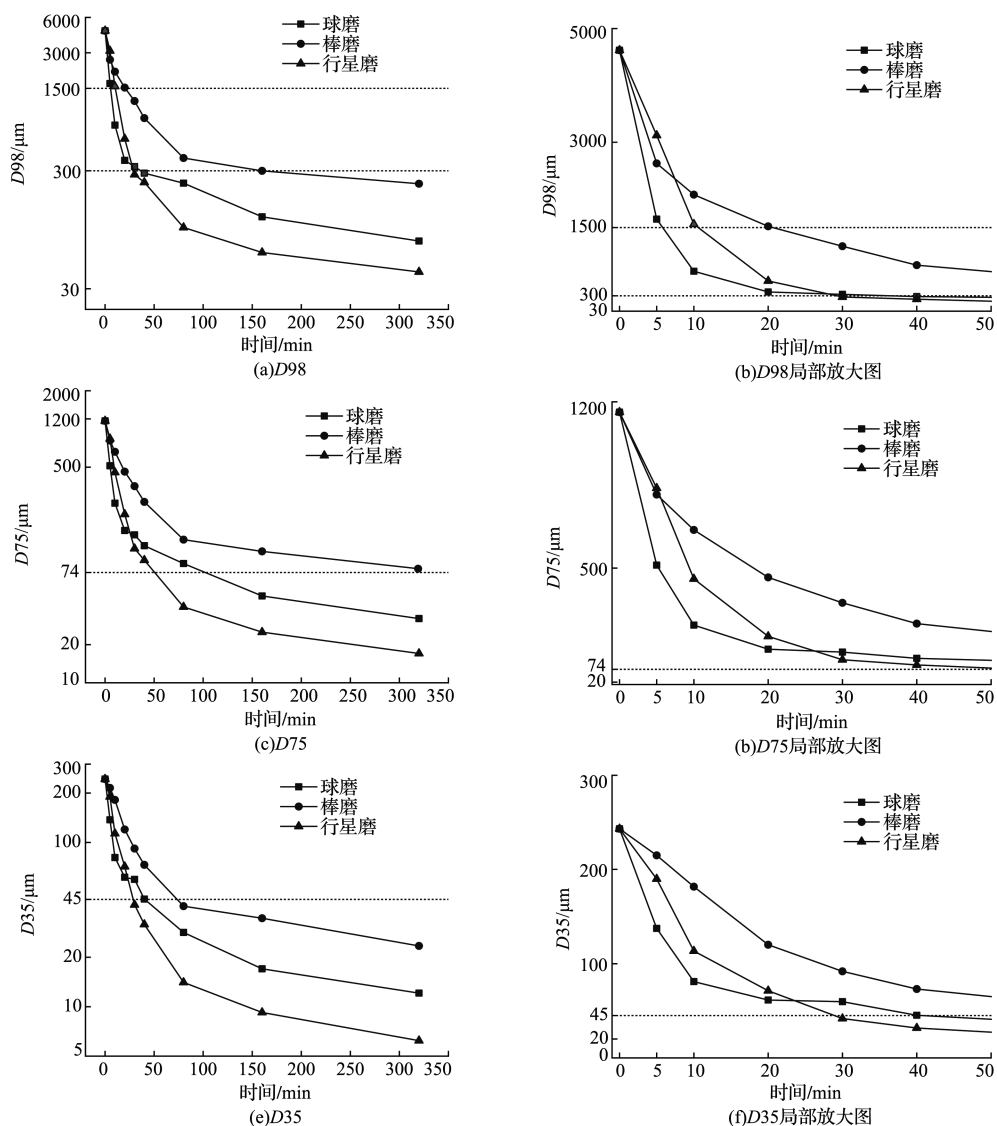


图3 不同磨矿条件下的 D_{98} 、 D_{75} 、 D_{35} 值

2.3 堆积效率分析

水煤浆制备需要其煤粉颗粒具有良好的堆积效率。张荣曾等^[12]的研究表明:对于 Rosin-Rammler 粒度分布, n 值在 0.7~0.8 之间时堆积效率最高。利用涂亚楠等^[13]提出的一种评估水煤浆中颗粒堆积效果的方法,对不同磨矿条件下的产品粒度数据进

行了相应的堆积评价指标 E 的计算,所得结果如图4所示。评价指标 E 值越大,表明堆积效率越高^[13]。由图4可知,在粒度上限为 2mm 条件下,堆积效率 E 与 n 值在 0.78 至 1.3 之间时具有很好的线性相关性,其拟合方程为 $y = 115.16 - 29.83x$,拟合优度 Adjusted $R^2 = 0.9978$ 。因此,上述线性方程可以作为

在此区间内的一种快速评价颗粒堆积效率的方法。由图2和图4还可以发现,三种磨矿方式出料的堆积效率差异较大,且随着磨矿时间的延长,堆积效率逐步下降。此外,由图4可知,棒磨产品的整体堆积效率要显著高于球磨和行星磨,而球磨产品的整体堆积效率均在较低的值。因此,单机制备水煤浆用煤粉,尤其是球磨和行星磨,其粒度分布显然不具备较好的堆积效率,需要通过钢球级配手段或多磨机多峰粒度级配方法取得更好的堆积效果。

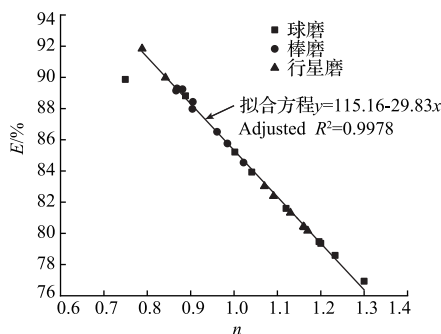


图4 堆积效率 E 与均匀性系数 n 的关系

3 结论

1) 在干法磨矿条件下,球磨初期的研磨效率最高,行星磨可以获得粒度分布更细的产品,而棒磨产品粒度分布较均匀,并可有效防止颗粒过磨。

2) 当 Rosin-Rammler 方程中的均匀性系数 n 值范围在 0.75~1.3 时,堆积效率 E 与 n 值具有很好的线性相关性,拟合方程为 $y = 115.16 - 29.83x$, Adjusted R^2 为 0.9978,可由此方程初步判断水煤浆颗粒的堆积效果。

3) 对于单磨机干法磨煤来说,行星球磨和球磨能在较短时间内获得符合燃料型水煤浆粒度要求的产品,但整体堆积效率较低,应当通过级配手段获得更高的堆积效果。

4) 棒磨产品粒度较粗,不适宜用作制备燃用型水煤浆的磨矿设备。但其产品的堆积效率较高,更适宜作为气化型水煤浆的磨矿设备。

参考文献:

- [1] NYASHINA G, LEGROS J, STRIZHAK P. Environmental Potential of Using Coal-Processing Waste as the Primary and Secondary Fuel for Energy Providers [J]. Energies, 2017, 10(3): 405.
- [2] 段清兵. 中国水煤浆技术应用现状与发展前景 [J]. 煤炭科学技术, 2015(1): 129-133.
- [3] 李文明. 试论气化用水煤浆成浆影响因素 [J]. 石化技术, 2017(12): 198-200.
- [4] 张锦瑞, 梁冰, 赵礼兵. 球磨机机理与磨矿介质制度研究现状及发展趋势 [J]. 有色矿冶, 2013(1): 42-45.
- [5] KOTAKE N, KUBOKI M, KIYA S, et al. Influence of dry and wet grinding conditions on fineness and shape of particle size distribution of product in a ball mill [J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(1): 86-92.
- [6] HUANG K Q, XIAO C H, WU Q M, et al. Application of Accurate Ball-Load-Addition Method in Grinding Production of some Tailings [J]. Advanced Materials Research, 2014, 962-965: 771-774.
- [7] 张海龙. 浅析棒磨机加棒量对煤浆粒度的影响 [J]. 氮肥技术, 2017(3): 26-28.
- [8] 王月梅. 理论力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [9] 孙怀涛, 方莹, 万永敏. 行星球磨机磨球运动规律的研究 [J]. 金属矿山, 2007(10): 104-106.
- [10] 张锦瑞, 梁冰, 赵礼兵. 球磨机机理与磨矿介质制度研究现状及发展趋势 [J]. 有色矿冶, 2013(1): 42-45.
- [11] 李锋军. 水煤浆棒磨机的钢棒装填量及成浆性研究试验 [J]. 煤炭加工与综合利用, 2014(4): 70-72.
- [12] 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(6): 8-12.
- [13] TU Y, XU Z, WANG W. Method for evaluating packing condition of particles in coal water slurry [J]. Powder Technology, 2015 (281): 121-128.

(责任编辑 杨蛟洋)