



卧式行星球磨和立磨中试粉磨线的功耗

马 娜, 叶旭初

(南京工业大学 材料化学工程国家重点实验室; 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要: 为研究卧式行星磨的功耗状况, 分别采用卧式行星磨与立式磨机的中试粉磨线进行粉磨试验研究和各个单元设备的功耗测量, 通过 $45\ \mu\text{m}$ 累积筛下和勃氏比表面积来确定粉磨效果, 用 KHD 经验公式折算成 $300\ \text{m}^2/\text{kg}$ 比表面积时所需的单位功耗比较。结果表明: 对于长石和重晶石的粉磨, 卧式行星磨机相对立磨单机而言, 功耗稍偏高, 卧式行星磨中试线的系统总功耗较立磨中试线低, 立磨粉磨过程中, 吐渣率高达 20%~30%, 行星磨将物料全部粉磨成产品。行星磨提高行星因子, 更节能。

关键词: 卧式行星磨; 立磨; 功耗; 中试实验

中图分类号: TB44, TD453

文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2016)05-0006-04

Energy consumption of grinding process in horizontal planet mill and vertical mill

MA Na, YE Xuchu

(College of Materials Science and Engineering;

State Key Laboratory of Chemical Engineering Material,

Nanjing Tech University, Nanjing 210009, China)

Abstract: This paper studied the power consumption of the horizontal planetary mill. The pilot plant test of horizontal planetary mill and the vertical mill was respectively carried out, and then the power consumption was contrasted through measuring each equipment power consumption, calculating the cumulative wass percentage at $45\ \mu\text{m}$ partical size and Blaine specific surface area, computing specific power consumption of $300\ \text{m}^2/\text{kg}$ specific surface area by KHD empirical formula. The results show that, when feldspar and barite are grinded, the horizontal planetary mill stand-alone power consumption is slightly higher than the vertical mill stand-alone power

consumption, however, the total power consumption of horizontal planetary mill pilot is less than that of the vertical mill pilot, in addition, the total power consumption is gradual decrement with the revolution speed of the horizontal planetary mill increasing.

Keywords: horizontal planetary mill; vertical mill; power consumption; pilot plant test

行星球磨机简称行星磨, 到目前为止还主要是实验室的研究工具, 其被广泛应用在超细粉体的制备^[1]、机械力化学^[2]和机械合金化等领域^[3], 既可以干磨^[4], 也可以湿磨^[5]。对卧式行星磨内钢球动力学和功耗理论进行了探讨, 理论推导出卧式行星磨相对于普通球磨机的节能效率为 $(0.29z^{0.375}-1)/(1.26z^{0.375})$, 其中 z 为行星因子^[6-7]。早在 1954 年, 已有连续化卧式行星磨的设备专利^[8], 但是, 卧式行星磨的工业化应用并没有被社会重视。本世纪初, 扬州群鑫粉体有限公司首先尝试了行星磨的连续化生产^[9], 但是, 采用螺杆输送方式送料^[10]易堵。文献^[11-13]中比较全面地解决了行星磨的连续化生产和设备大型化后长期运转的可靠性问题。卧式行星磨与现有的高效粉磨系统的功耗问题仍是空白。

本文中分别采用自建的行星磨中试粉磨线和中材国际南京水泥设计研究院自建的立磨中试粉磨线, 对长石和重晶石进行了连续化粉磨试验, 比较了 2 套系统的功耗状况, 对行星磨的工业化推广应用具有重要意义。

1 实验

1.1 原料

实验所用长石和重晶石原料的粒径累积筛余如表 1、2。可以看出, 分别进入 2 个系统的长石和重晶石粒径分布相近, 因此可以认为是相同颗粒级配的原料。

1.2 主要设备和实验方法

卧式行星磨中试生产线生产过程中, 物料先经过斗提喂入小存储仓, 随后进入卧式行星磨进行粉磨, 物料粉磨后, 再由气力输送进入选粉机, 经选粉机分选后, 合格成品经过旋风筒及袋收尘器收集, 最后通过螺旋输送至包装机进行包装, 而不合格的物料被送回卧式行星磨继续粉磨。

收稿日期 2016-08-23, 修回日期 2016-09-13。

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划 编号: IRT1146; 国家重点基础研究发展计划(973 计划) 编号: 2009CB623100。

第一作者简介: 马娜(1989—), 女, 硕士研究生, 研究方向为材料工程。E-mail: pldnana@126.com。

通信作者简介: 叶旭初(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为粉体加工及过程的数值模拟。E-mail: yexuchu@njtech.edu.cn。

表 1 长石入料级配
Tab. 1 Gradation of feldspar

筛径/mm	行星磨累积筛余质量分数/%	立磨累积筛余质量分数/%
3.35	4.19	4.56
2.00	12.75	12.82
1.18	22.60	22.56
0.5	42.52	42.19
0.08	80.48	79.26
<0.08	100.00	100.00

表 2 重晶石入料级配
Tab. 2 Gradation of barite

筛径/mm	行星磨累积筛余质量分数/%	立磨累积筛余质量分数/%
3.35	1.87	1.60
2.00	10.80	9.39
1.18	23.53	21.70
0.5	47.87	47.27
0.08	86.20	86.09
<0.08	100.00	100.00

用电能表记录在粉磨时间内卧式行星磨、选粉机和风机的用电量,每隔特定的时间进行取样,采用筛分方法对物料进行粒径测试,测量 45 μm 累积筛下和勃氏比表面积。

立磨中试生产线生产过程中,原料经过斗提喂入称重小仓,启动小仓下方圆盘给料机,开始向立磨喂料,物料经立磨研磨后,难以粉磨的物料从立磨吐渣口排出(本试验中,排渣率为 20%~30%),粉料随气流进入选粉机,经选粉机分选后,合格成品通过选粉机,经旋风筒、袋收尘器收集,粗粉落到磨盘再次研磨。

待系统喂料稳定后,使用秒表记录粉磨时间,在电量监控程序中直接获得功率消耗数值。立磨运行过程中使用电流表测量选粉机和风机的电流,再根据电压、电机功率因素计算选粉机、风机的平均功率,最后,计算粉磨时间内选粉机、风机的累计耗电量。并间隔一定的时间对成品粉体进行取样,测量 45 μm 累积筛下和勃氏比表面积。

最后采用 KHD 经验式(1)^[14]将卧式行星磨和立磨实际测得比表面积所需要的功耗折算成 300 m²/kg 比表面积时所需的单位功耗,便于比较卧式行星磨和立磨的功率利用情况。

$$\frac{P}{P_1}=(\frac{S_1}{S})^{1.3}, (1)$$

式中: S、P 分别表示成品实际比表面积(m²/kg)及对应的单位电耗(kWh/t); P₁表示成品比表面积转换为 S₁时的矫正单位电耗。

卧式行星磨和立磨的主要设备参数如表 3。

表 3 行星磨和立磨系统主要设备参数
Tab. 3 Main equipment parameters of planetary mill and vertical mill system

序号	设备	参数	行星磨系统	立磨系统
1	磨机	功率/kW	132	11
		电压/V	380	380
		电流/A	239.5	26.4
2	选粉机	功率/kW	15×3 超细分级机	1.1
		电压/V	380	380
		电流/A	103	34.7
3	系统风机	功率/kW	55	18.5
		转速/(r·min ⁻¹)	2 900	2 930
		风量/(m ³ ·h ⁻¹)	9 983	3 365
		风压/Pa	11 717	10 917

2 结果与讨论

2.1 长石粉磨细度比较

分别对卧式行星磨和立磨粉磨的长石成品细度和比表面积进行了比较。测量卧式行星磨和立磨粉磨后的粉体 45 μm 累积筛下质量分数,结果如图 1,其中立磨粉磨后的粒径大于 45 μm 的粉体质量占入料粉体的 18.87%,卧式行星磨粉磨后粒径大于 45 μm 的粉体质量占入料粉体的 3.02%。说明卧式行星磨粉磨长石可以得到更细的粒径。

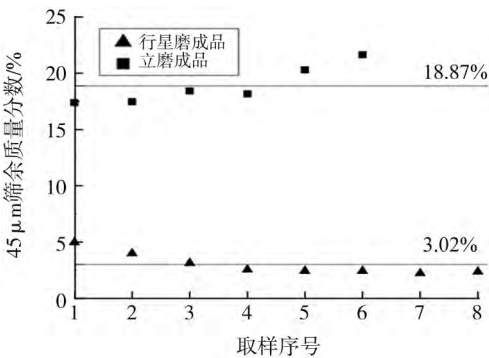


图 1 长石成品 45μm 筛余质量分数比较

Fig. 1 Comparison of percentage of feldspar finished 45 μm screens

同时对 2 种仪器粉磨后对应的比表面积进行了比较,图 2 为采用勃氏比表面积测试仪测得的物料比表面积。

采用卧式行星磨粉磨长石后成品的平均比表面积为 537.7 m²/kg,而使用立磨粉磨长石后粉体的平均比表面积为 306.2 m²/kg,根据雷廷格理论^[15],即破碎物料的比表面积增加量与破碎的功耗成正比,因此在卧式行星磨中的单位质量长石粉体吸收了更多的功率。

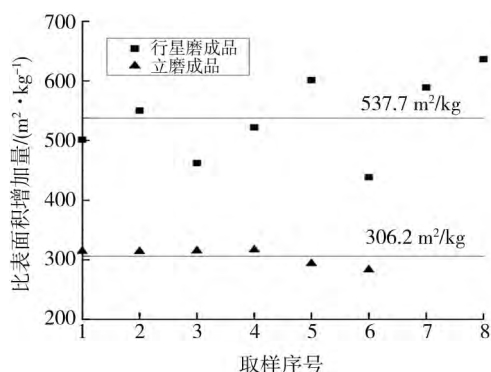


图 2 长石成品比表面积增加量比较

Fig. 2 Comparison of increase in amount of feldspar in finished products

2.2 长石粉磨电耗比较

直接测量卧式行星磨和立磨粉磨每吨长石所消耗的功率,如图 3。

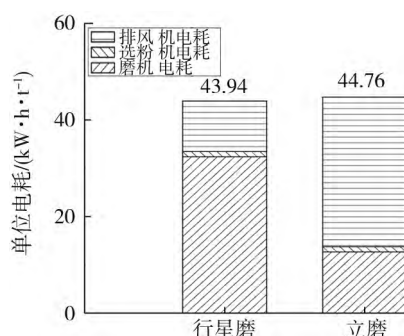


图 3 长石粉磨电耗比较

Fig. 3 Feldspar grinding power consumption comparison

考虑到选粉机和排风机的电耗到功率因素,需要进行修正,即 $\cos\phi=0.8$ 。卧式行星磨粉磨系统磨机所消耗的功率为 $32.36 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$,占系统总电耗的 73.65%;立磨粉磨系统磨机消耗的功率为 $12.66 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$,占系统总电耗的 28.28%,对于磨机来说,立磨的功率利用率较高,但是在立磨粉碎工艺中排风机消耗的功率远远大于卧式行星磨粉磨工艺中排风机的电耗。总体来说,行星磨和立磨系统的总电耗分别为 43.94、44.76 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$,行星磨球磨功耗略低。由上可知 2 个系统所粉磨后的粉体粒径和比表面积存在差异,因此通过 KHD 公式将单位质量电耗转换为特定比表面积的电耗,将卧式行星磨系统和立磨系统的粉磨电耗均转为表面积为 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ 所消耗的功率,如图 4。

通过 KHD 矫正后,得出卧式行星磨系统总功耗为 $20.58 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$,远小于立磨系统的总功耗 $43.58 \text{ kW}\cdot\text{h/t}$,这说明卧式行星磨球磨工艺更加节省功耗。

2.3 重晶石粉磨细度比较

在进行重晶石粉磨测试时,改变卧式行星磨中卧式行星磨的公转转速,其中行星磨 1 对应公转转速为 66 r/min ,行星磨 2 为 88 r/min ,行星磨 3 为 100 r/min 。

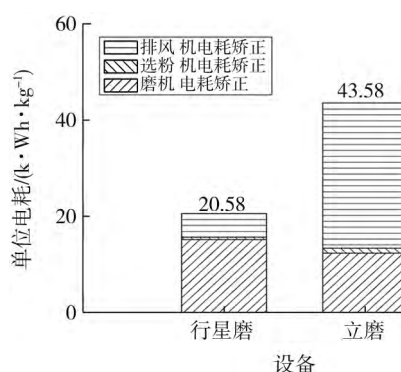
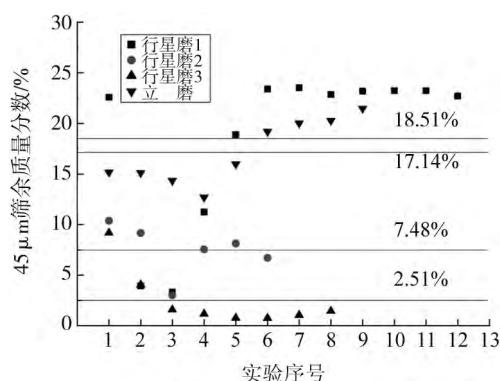


图 4 KHD 公式矫正过的功耗比较

Fig. 4 Comparison of the energy consumption of KHD formula

测量卧式行星磨和立磨系统粉磨得到的重晶石成品的细度和比表面积,结果如图 5,其中立磨粉磨重晶石的粒径大于 $45 \mu\text{m}$ 的粉体质量占入料粉体的 17.14%,卧式行星磨粉磨重晶石后的粒径大于 $45 \mu\text{m}$ 的粉体质量分别占入料粉体的 18.51%、7.48%、2.51%,随着行星因子的增加, $45 \mu\text{m}$ 的粉体筛余相应减小,总体来说行星磨粉磨重晶石可以得到更细的粒径。

图 5 重晶石成品 $45\mu\text{m}$ 筛余质量分数比较Fig. 5 Barite finished $45\mu\text{m}$ sieve percentage comparison

对 2 种仪器粉磨重晶石后对应的比表面积进行比较,图 6 为采用勃氏比表面积测试仪测得的物料比表面积。

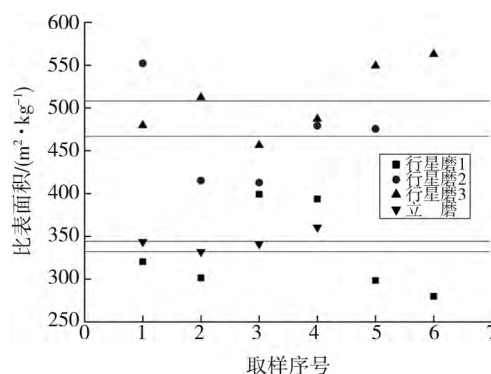


图 6 重晶石成品比表面积增加量比较

Fig. 6 Barite products increase surface machine

采用卧式行星磨粉磨重晶石后成品的平均比表面积分别为 332、466、508 m^2/kg ,采用立磨粉磨重晶石后

粉体的平均比表面积为 $344 \text{ m}^2/\text{kg}$, 根据雷廷格理论, 即破碎物料的比表面积增加量与破碎的功耗成正比, 在卧式行星磨中的单位质量长石粉体吸收了更加多的功率。

2.4 重晶石粉磨电耗比较

测量卧式行星磨和立磨粉磨每吨重晶石所消耗的功率, 如图7, 其中考虑到选粉机和排粉机的电耗功率因素, 对其进行修正, 即 $\cos\Phi=0.8$ 。改变卧式行星磨的行星因子, 其所消耗的功率分别为 18.34、30.24、33.7 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 分别占系统总电耗的 63.21%、72.02%和 73.45%; 立磨所消耗的功率为 11.17 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 占系统总电耗的 28.62%。对于磨机来说, 立磨的功率利用率较高。

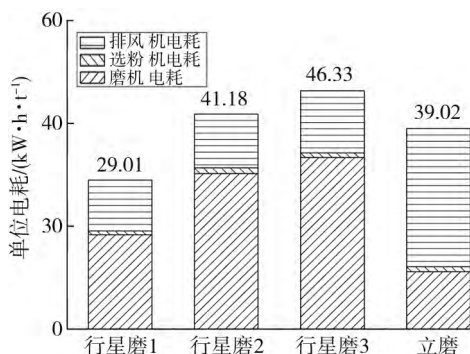


图7 重晶石粉磨电耗比较

Fig. 7 Barite grinding power consumption comparison

立磨粉碎的工艺中排风机消耗的功率远远大于卧式行星磨粉磨工艺中排风机的电耗且立磨排渣量很大。由于2个系统粉磨后的粉体粒径和比表面积存在差异, 通过KHD公式将实际的电耗转换为特定比表面积的电耗, 即将卧式行星磨系统和立磨系统的粉磨电耗均转为表面积为 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ 所消耗的功率, 如图8。

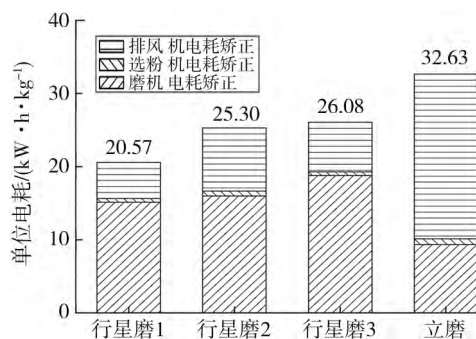


图8 KHD公式修正过的功耗比较

Fig. 8 Comparison of the energy consumption of KHD formula

通过KHD修正后, 卧式行星磨粉磨重晶石至 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ 所消耗的功率分别为 18.78、15.99、15.11 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 立磨粉磨重晶石至同样粒径所消耗的功率为 9.14 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 两者功耗差减小。而卧式行星磨系统总功耗分别为 26.08、25.30、20.57 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 远小于立磨系统的 32.63 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 说明卧式行星磨粉碎功率利用率高于立磨, 且增加公转转速可以有效地提高行星磨的功率利用率。

3 结论

1) 对长石和重晶石进行粉磨后, 卧式行星磨中试生产线工作稳定, 消耗的功率占总功率消耗的主要部分, 立磨生产线中风机消耗的功率占总功耗的主要部分。卧式行星磨单位质量成品所消耗的功率均低于立磨的, 且粉磨后得到物料的粒径更细, 比表面积更大。

2) 将实际测得的功耗通过KHD经验公式折算成 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$ 比表面积时所需的单位功耗可得: 卧式行星磨粉磨长石的功耗为 20.58 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 立磨为 43.58 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 因此卧式行星磨生产线的功率消耗比较低。卧式行星磨粉磨重晶石时, 改变其公转转速, 速度为 88、66、111 r/min , 其功耗分别为 26.08、25.30、20.57 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 立磨消耗的功率为 32.63 $\text{kW}\cdot\text{h/t}$, 说明卧式行星磨生产线具有更好的节能效果。

3) 增大卧式行星磨的公转转速, 磨机的功率也随之增加, 并且粉体的 $45 \mu\text{m}$ 筛和比表面积随着行星因子的增大而增大。

参考文献(References):

- [1] 曾辉, 王华昌, 黎东涛, 等. 钕铁超细微粒及含钕铁涂料的制备和应用[J]. 热加工工艺, 2008, 37(1): 4-5.
- [2] 高海炼, 陈伟凡, 李凤生, 等. 湿固相机械化学法制备超细氧化钨的研究[J]. 稀有金属, 2006, 30(6): 795-799.
- [3] 吴其胜, 张少明, 周勇敏, 等. 无机材料机械力化学研究进展[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(1): 137-142.
- [4] FUKUMORI Y, TAMURA I, JONO K, et al. Dry grinding of chitosan powder by a planetary ball mill [J]. Advanced Powder Technol, 1998, 9(4): 281-292.
- [5] MATIJASIC IG, ZIZEK K, GLASNOVIC A. Suspension rheology during wet comminution in planetary ball mill [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2008, 86(4): 384-389.
- [6] 张加官, 吴琼, 柏杨, 等. 卧式行星磨内行星效应的探究(一)[J]. 矿山机械, 2014(6): 67-70.
- [7] 蔡雪玲, 叶旭初, 李德, 等. 行星效应对卧式行星磨粉磨效果及能耗的影响[J]. 矿山机械, 2015(4): 67-70.
- [8] 李瑞涛, 方湄, 张文明. 基于虚拟样机的立式行星磨仿真的研究[J]. 矿山机械, 2001(1): 25-26.
- [9] 颜景平, 周家春, 张志胜. 连续式干法行星磨磨: 2377001 [P]. 2000-05-10.
- [10] 叶旭初. 大型卧式行星球磨机的基础研究与工业粉磨应用前景[J]. 矿山机械, 2015(12): 5-9.
- [11] 徐金山, 颜景平. 一种大型连续进出料行星球磨机: 1846858 [P]. 2006-10-18.
- [12] 方建强, 叶旭初. 卧式行星球磨机的集料装置: 10400593A [P]. 2014-08-27.
- [13] 叶旭初. 一种卧式行星球磨机的传动结构: 103977868A [P]. 2014-08-13.
- [14] 王仲春, 曾荣. 水泥粉磨工艺技术及进展[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.
- [15] TEMMERMAN M, JENSEN P D, HEBERT J. Von Rittinger theory adapted to wood chip and pellet milling in a laboratory scale hammermill[J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 56: 70-81.