

卧式行星球磨机粉磨水泥熟料的试验研究

吴光瑞, 张林进, 叶旭初

(南京工业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:分析卧式行星球磨机的工作优点和粉磨机理;采用自行设计的多功能卧式行星球磨机装置,研究离心加速度、磨筒自传与公转转速比和粉磨时间对典型水泥熟料粉磨效果和成品粉体(粒度小于 $75\ \mu\text{m}$)产率的影响。结果表明:离心加速度为 $14G$ 时粉磨效果最好;磨筒自传与公转转速比是控制磨筒内离心区域与向心区域分界线的主要因素;在 $14G$ 的离心加速度下, $5\ \text{min}$ 内可使成品粉体产率达到 65.23% 。

关键词:卧式行星球磨机;水泥熟料;粒度分布

中图分类号:TF123.1⁺1 **文献标志码:**A

文章编号:1008-5548(2010)06-0039-05

Study on Cement Clinker Grinding in Horizontal Planetary Ball Mill

Wu Guangrui, Zhang Linjin, Ye Xuchu

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: The advantages and grinding mechanism of the horizontal planetary ball mill were analyzed. A self-designed multi-functional horizontal planetary ball mill was employed to study the influence of the centrifugal acceleration, the rotation-to-revolution speed ratio, and grinding time on the cement clinker grinding effect and the yield of available cement powder ($d < 75\ \mu\text{m}$). The results showed that the best grinding effect was obtained when the centrifugal acceleration was $14G$. The key factor of controlling the regional boundary of centrifugal area and centripetal area in the pot was the rotation-to-revolution speed ratio. In the $14G$ centrifugal acceleration, it could get a 65.23% rate of production of the available powder in $5\ \text{min}$.

Key words: horizontal planetary ball mill; cement clinker; particle size distribution

近年来,我国新型干法水泥生产工艺技术的发展日臻成熟。在新型干法生产工艺迎来技术发展顶峰的同时,水泥窑的节能降耗空间将越来越小,水泥

工艺节能降耗的重点将落在粉磨工艺技术的改进上。众所周知,水泥生产能耗大,尤其是水泥粉磨过程。但由于普通球磨机临界转速的限制,使得水泥粉磨工程能量利用率很低,据文献^[1]报道:用于工业生产的普通球磨机的效率只有 0.6% ,最高也超不过 $2\%\sim 9\%$ 。这势必增加了水泥的成本。相比较而言,行星球磨机可使球料获得较高的撞击速度,在相同粉磨量的情况下,可节能 $30\%\sim 40\%$ ^[2],其中卧式行星球磨机工作时可以充分利用物料的重力,使其参与粉磨,避免了立式行星球磨机物料结底的缺点,并且还能充分应用磨机筒体的整个内表面积,大大提高了设备粉磨能力^[3]。国外一直重视行星球磨机的研究, Hiroshi Mio 等^[4-7]通过计算机模拟技术,研究过立式行星球磨机结构参数对研磨介质撞击力的影响,得到增大公转转速、公转半径可提高立式行星球磨机中磨球的撞击力等结论。

目前,卧式行星球磨机实现了连续进出料^[8-9],满足了工业化大生产的需求,并已将其应用到了滑石、方解石等材料的工业化粉磨^[10]。为了将其推广到水泥粉磨行业,本文中将在实验室自行设计的多功能卧式行星球磨机装置上开展离心加速度、磨筒自传与公转转速比和粉磨时间对典型水泥熟料粉磨效果影响的研究。

1 粉磨机理

1.1 卧式行星球磨机工作原理

卧式行星球磨机磨筒工作系统如图 1 所示。该系统主要由垂直的转盘和数个水平放置的磨筒组成,这些磨筒均匀地分布在转盘上,它们的轴线相互平行。每个磨筒均绕各自的轴 O_1 转动,自转角速度为 ω 。各筒的轴绕与其平行的中心轴 O 做圆周运动,公转角速度为 Ω 。

在卧式行星球磨机中,研磨介质和物料的受力情况如图 1 所示,重力为 G 、球料公转与自转引起的离心力合力为 F 、磨筒壁对球料的支持力为 N 、摩擦力为 f 。球料脱离筒壁的条件为 $N=0$;当 $N>0$ 时的磨筒区域为球料的离心区域,即球料沿着筒壁做圆周运动,此

收稿日期:2010-01-13,修回日期:2010-03-13。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目,编号:2009CB623100。

第一作者简介:吴光瑞(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为粉体材料、设备设计与优化。电话:15850597563, E-mail:wuguangrui521dl@163.com。
通信作者:叶旭初(1957-),男,教授,博士生导师,从事粉体加工及过程的数值模拟研究。E-mail:yexuchu@njut.edu.cn。

时球料之间只有挤压和磨剥作用;当支持力 N 消失时,此时球料所处的区域为向心区域,球料处于抛物运动状态,并将在抛落点处进行撞击粉碎。磨筒中离心区域和向心区域如图 2 所示: A 为向心区域, B 为离心区域,它们之间分界线的位置主要受到磨筒自转与公转速比等的影响。

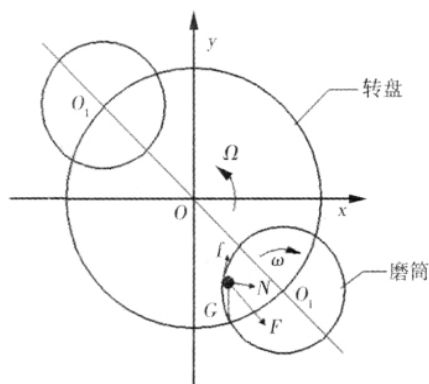


图 1 行星式磨筒工作系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of planetary mill pot working system

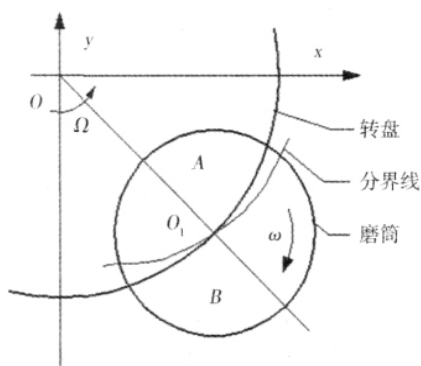


图 2 磨筒中工作条件示意图

Fig.2 Schematic diagram of working conditions in mill pot

1.2 行星效应与节能原理

行星效应是用来反映行星式球磨机离心加速度的一个系数,用 z 表示; $z=a/g$, 式中: g 为重力加速度; a 为行星式球磨机磨筒中心处的离心加速度,当行星式球磨机的公转角速度为 Ω ,筒心所在圆周半径为 R 时, a 值为 $a=\Omega^2 R$ [11]。因此磨筒中球料的离心加速度与公转角速度平方和公转半径成正比例。磨料时可通过调节离心加速度来改变磨球对物料的撞击力,使物料所受应力大于其强度极限的比例增大,来提高整个粉磨过程能量利用率。

1.3 物料的粉磨模型

由于离心加速度的作用,可使磨筒在较高的公转和自转转速情况下仍具有粉磨作用,这样研磨介质和物料都能具有较大的冲击速度和冲击力,所以物料在粉磨过程中存在两种粉磨模型:1)研磨介质对物料的撞击和磨剥作用;2)物料的自粉磨作用,包括物料与物料、物料与磨球和磨筒壁之间撞击和研磨作用。

这两种粉磨模型再加上高的粉磨打击频次,可以大为提高卧式行星球磨机的粉磨能力。

2 试验装置及水泥熟料化学组成

2.1 设备和物料

自行设计的小型多功能卧式行星球磨机,结构图如图 3 所示,其特点为:大盘垂直放置,圆盘上均匀分布着 3 个磨筒,磨筒到大盘的中心距离(磨筒的公转半径)可调;磨筒可以拆卸下来更换不同尺寸的磨筒(磨筒的自转半径可调);自转电机控制磨筒的自转,公转电机通过主轴控制磨筒的公转。调速范围为 0~1 400 r/min,其转速通过变速器来调控,该设备各级传动均采用齿轮精确传动。

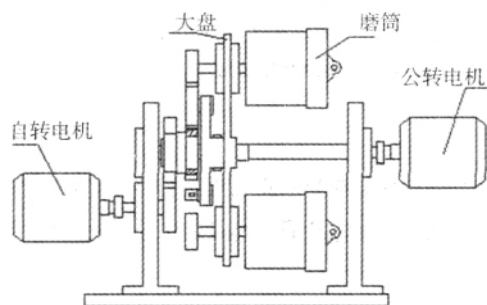


图 3 多功能卧式行星球磨机结构图

Fig.3 Schematic diagram of multi-functional horizontal planetary ball mill

用 8411 型电动振筛机选取 2~3 mm 范围的水泥熟料颗粒,水泥熟料的化学组成见表 1。

表 1 水泥熟料的化学组成

Tab. 1 Chemical composition of cement clinkers

组分	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	其他
w/%	64.8	21.31	4.98	3.51	2.34	0.724	0.232	0.34	1.764

粉磨得到粉体的粒度分布用泰勒筛经 10 min 筛分后测定,筛具筛孔分别为 10、12、30、40、50、60、100、150、190 目,为了方便做图分析,把 190 目(75 μm)粉体的筛子孔径设为 0 mm,筛分后的粉体用天平称量,天平感量为 0.1 g。

2.2 参数设置

本文中研究各参数对水泥熟料粉磨的影响。恒定参数为:筒磨自转与公转的转向相反,粉磨介质为钢球,密度为 7.78 kg/cm³,每只磨筒磨球级配为:直径 20 mm 球 5 个、直径 10 mm 球 12 个、直径 5 mm 球 12 个。磨筒有效直径为 90 mm,总体积为 1.526 L,每只磨筒中装料 150 g。实验过程中,以下参数不变时设为:磨筒公转为 250 r/min、磨筒自转与公转速度比为 2.5、公转半径为 140 mm、粉磨时间为 3 min。

3 结果及讨论

3.1 离心加速度对水泥熟料粉磨的影响

离心加速度对水泥熟料粉磨的影响规律如图4—7。从图4—5可见:设定磨筒自转与公转转速比为2.5时,随着磨筒公转转速的提高,0.20 mm 粒径以下的熟料颗粒逐渐增加,成品粉体产率成线性增长,表示提高离心加速度有利于卧式行星磨机对熟料的粉磨

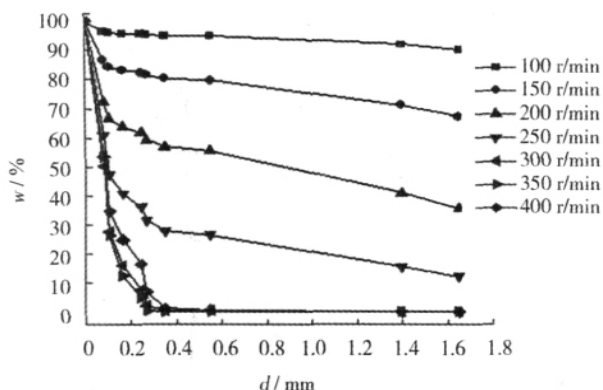


图4 一定自转与公转转速比下磨筒公转转速对熟料粉磨的影响
Fig.4 Influence of revolution speed on cement clinker grinding at a certain rotation-to-revolution speed ratio

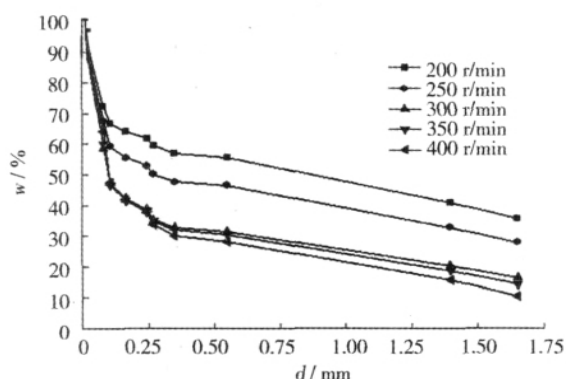


图6 一定自转转速下磨筒公转转速对熟料粉磨的影响
Fig.6 Influence of revolution speed on cement clinker grinding at a certain rotation speed

公转半径对水泥熟料粉磨的影响见图8。从图中可知:增大磨筒公转半径,可加快粒径在0.2 mm 以下颗粒的生成,提高该设备对水泥熟料的粉磨能力,同样是由于增大磨筒的离心加速度,来增大研磨介质对熟料的撞击力,使熟料所受应力大于其强度极限的比例增大,提高设备对熟料的粉磨能力,因此从设备结构上改善了其粉磨能力。

上述的研究结果表明:对于本研究中采用的典型熟料,在该试验条件下存在一个最佳的输入能量,该输入能量产生的打击力对粉碎物料没有达到破坏时,继续增加能量输入,即提高离心加速度,使磨球对熟料的撞击力增大,对提高粉磨速度是有利的。而一旦

能力增加。当公转转速达到300 r/min 时,粒径大于0.20 mm 熟料颗粒几乎没有,成品粉体产率达到最大,此时球料的离心加速度为14G;公转转速高于300 r/min,熟料粒径分布和成品粉体产率接近于公转转速为300 r/min 时的粉磨结果。从图6—7中同样可以得到:设定磨筒自转转速为500 r/min 时,随着磨筒公转转速的增大,卧式行星磨机对水泥熟料的粉磨能力呈线性增加,当公转转速达到300 r/min 时,设备的粉磨能力达到最好。

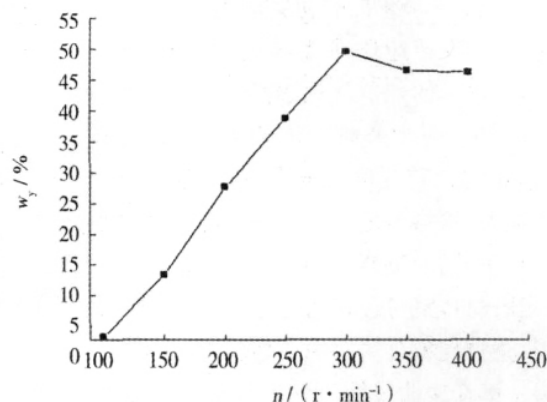


图5 一定自转与公转转速比下磨筒公转转速对成品粉体产率的影响
Fig.5 Influence of revolution speed on cement powder yield at a certain rotation-to-revolution speed ratio

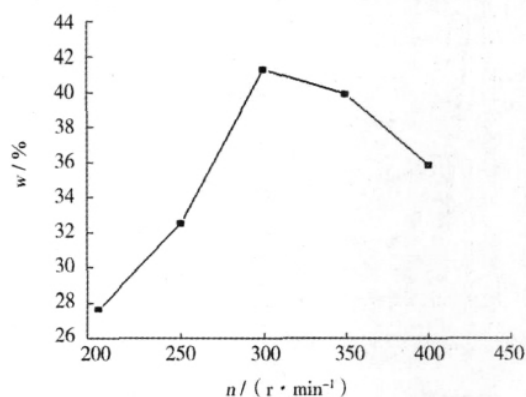


图7 一定自转转速下磨筒公转转速对成品粉体产率的影响
Fig.7 Influence of revolution speed on cement powder yield at a certain rotation speed

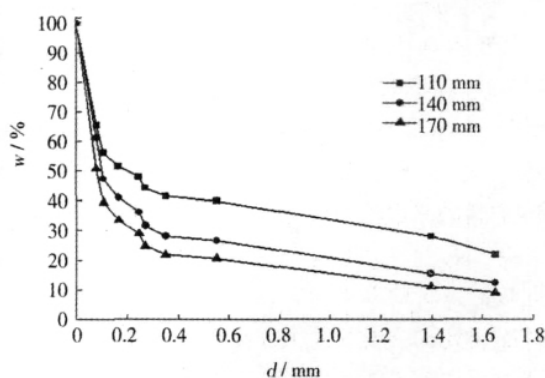


图8 磨筒公转半径对熟料粉磨的影响
Fig.8 Influence of revolution radius on cement clinker grinding

打击力达到了粉碎熟料的能力, 再增加能量输入无益, 只会浪费电能。因此, 对于粉碎任何物料, 都可能存在一个最佳的能量输入值, 即最佳的离心加速度。

3.2 磨筒自转与公转转速比对水泥熟料粉磨的影响

本实验中还研究磨筒自转与公转转速比(磨筒公转转速恒定为 250 r/min, 改变自转速度)对水泥熟料粉磨的影响。

图 9—10 为磨筒自转与公转转速比对熟料粉磨的影响。由图可知: 随着磨筒自转与公转转速比的增大, 卧式行星球磨机的粉磨能力先增大后减小, 磨筒自转与公转转速比在 1~3 的增大过程中, 粒径在 0.2 mm 以下的熟料颗粒逐渐增加, 成品粉体产量成线性增加, 因为磨筒自转与公转转速比在增大过程中, 磨筒的自转速度在增大, 传递到球料的运转速度也在增大, 这样就增加了磨球对熟料颗粒的撞击力和撞击频率, 同时提高了磨球对熟料的挤压力和磨剥作用; 当磨筒自转与公转比为 3.5 时, 该设备失去了粉磨作用, 这种现象是由磨筒自转转速超过了其临界转速引起, 图 9 中曲线缓慢下降为设备在启动和关闭时, 磨球与熟料短暂的粉磨作用所至。

上述试验研究表明: 磨筒的离心区域和向心区

域的划分主要是受磨筒自转与公转转速比控制。随着磨筒自转与公转转速比的增大, 离心区域逐渐增大, 向心区域逐渐减少, 当磨筒自转与公转转速比超过临界比时, 向心区域消失, 离心区域占据整个磨筒容积, 球料开始完全的离心运动, 使设备完全失去了粉磨作用。

3.3 粉磨时间对水泥熟料粉磨的影响

在离心加速度为 14G(公转转速 300 r/min, 公转半径 140 mm) 的情况下, 粉磨时间对水泥熟料粉磨影响如图 11—12。从图可知: 卧式行星球磨机能在 5 min 内达到较好的粉磨效果, 能量利用率达到最佳, 如图 11, 3 min 时磨筒内完全没有粒径大于 0.25 mm 的熟料颗粒, 粉磨 3 min 和 5 min 时成品粉体产率的增长速度基本相同, 5 min 可使成品粉体的产率达到 65.23%, 5 min 之后随着粉磨时间的增加, 筛分累积曲线接近于 5 min, 成品粉体产生速率明显降低。原因有两点: 一是卧式行星球磨机通过离心加速度的作用可使球料获得极大的抛落速度, 增大了球对熟料颗粒的粉磨作用和熟料的自粉磨作用, 因此熟料在较短的时间内获得较好的粉磨效果; 二是随着时间的推移, 成品粉体的产量增加, 粉体对磨球的缓冲作用增大, 使球对

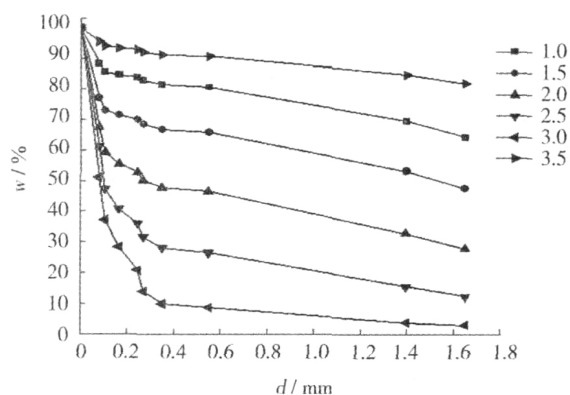


图 9 磨筒自转与公转转速比对熟料粉磨的影响

Fig.9 Influence of rotation-to-revolution speed ratio on clinker grinding

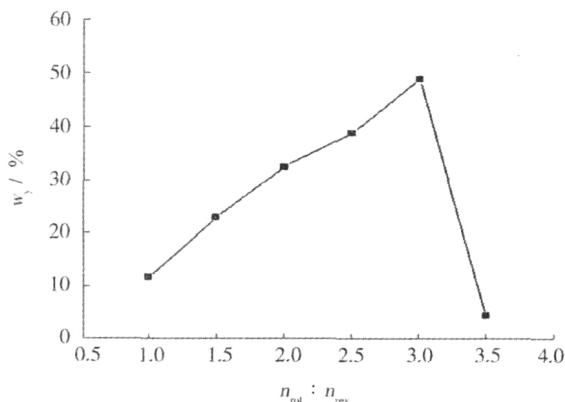


图 10 磨筒自转与公转转速比对成品粉体产率的影响

Fig.10 Influence of rotation-to-revolution speed ratio on powder yield

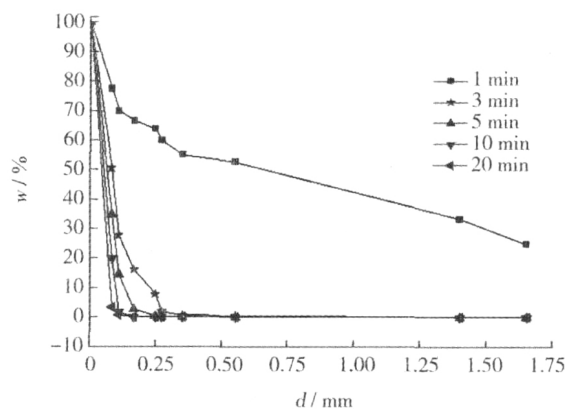


图 11 粉磨时间对熟料粉磨的影响

Fig.11 Influence of grinding time on clinker grinding

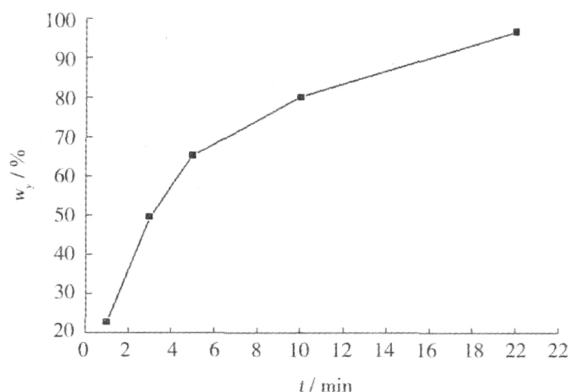


图 12 粉磨时间对成品粉体产率的影响

Fig.12 Influence of the grinding time on powder yield

粉体的撞击力减小,粉磨速度开始降低。

4 结论

卧式行星球磨机在粉磨过程中没有结底现象,其中离心加速度和磨筒自转与公转转速比在最佳值处,设备表现出较强的粉磨能力,表现在:

1)通过改变离心加速度,增加对水泥熟料的冲击力,粉磨速度提高,离心加速度增加到一定值后,粉磨速度几乎不变,对于本研究中的水泥熟料,最佳的离心力加速度为 $14G$ 。

2)磨筒自转与公转转速比可以调节磨球对熟料的撞击力、撞击频率和磨筒向心区域和离心区域的比例,改变卧式行星球磨机的粉磨能力,超过临界转速比时,离心区域占据整个磨筒,设备失去粉磨能力。

3)卧式行星球磨机在最佳的离心加速度 ($14G$) 下, 5 min 可使成品粉体产率达到 65.23% , 由于粉体的缓冲作用,随着时间的推移成品粉体的产率逐渐降低。如果连续进出料,及时把成品粉体运出,可以大大提高卧式行星球磨机总体粉磨能力和能量利用率。

参考文献 (References):

[1] 姚鲁之. 剖析球磨机能量利用率极低的原因[J]. 新世纪水泥导报,

2002(2):37-39

[2] 颜景平, 易红, 史金飞, 等. 行星式球磨机研制及其节能机理[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 38(1):27-31

[3] 毛邦仰, 孙新. 卧式行星球磨机: 中国, 01272924.8[P]. 2002-09-25

[4] FENG Y T, HAN K, OWEN D R J. Discrete element simulation of the dynamics of high energy planetary ball milling processes[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 375-377: 815-819

[5] MIO Hiroshi, KANO Junya, SAITO Fumio, et al. Effects of rotational direction and rotation-to-revolution speed ratio in planetary ball milling[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 332 (1-2): 75-80

[6] MIO Hiroshi, KANO Junya, SAITO Fumio, et al. Optimum revolution and rotational directions and their speeds in planetary ball milling[J]. International Journal of Mineral Processing, 2004, 74(Suppl 1): 85-92

[7] MIO Hiroshi, KANO Junya, SAITO Fumio. Scale-up method of planetary ball mill[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(24): 5 909-5 916

[8] 颜景平, 周家春, 张志胜. 连续式干法行星球磨机: 中国, 99228781. 2[P]. 2000-05-10

[9] 徐金山, 颜景平. 一种大型连续进出料行星球磨机: 中国, 2006100 40101.7[P]. 2006-10-18

[10] 郑水林. 中国超细粉碎和精细分级技术现状及发展[J]. 现代化工, 2001, 21(11): 10-15

[11] 颜景平, 党根茂. 行星式球磨机超细粉碎机理探讨[J]. 电子工业专用设备, 1990(2): 28-30

密友集团研成纳米离心式珠磨机

一种能够提高研磨效率,使得研磨细度达到纳米级,满足各种生产需求的纳米粉体生产设备——纳米离心式珠磨机,由江苏省高新技术企业密友集团——昆山密友粉碎设备有限公司研制成功,日前获得国家实用新型专利(专利号: ZL 2009 2 0283900.6)。

现代高科技的发展需要纳米级材料,如薄膜型液晶显示器的彩色光阻、打印机的喷墨、被动组件、光电产业及生化产业等。同样的粉体材料一经纳米化,其身价倍增,每千克即可达数千到数万元,甚至几十万元,“钱”景无限。

目前市场上的各类干法研磨机都难以满足生产纳米粉体加工需求,即使通过一定的性能改造也只是勉强达到要求,缺乏一种全新的具有更高研磨效率的研磨装置。因此,如何将超微细研磨技术应用于纳米材料的制作及分散研磨已成为当下的重要课题。

为了填补市场空白,密友集团组织科技人员,在吸纳现有研磨设备优点的基础上,进行创新,成功推出纳米离心式珠磨机。与现有的研磨机相比,该珠磨机由于自身机身的特点,通过离心力的作用实现对物料的充分研磨,同时研磨珠相比以前的更为细小,研磨珠与物料采用动态分离技术,研磨腔内较多数量的销棒之间的相对旋转使得物料能够更充分的受到研磨珠的撞击实现研磨细化,很大程度的提高了研磨效率和研磨的精度。另外,该机的转轴同时具备了物料进出的作用,使得能够对物料进行连续性的研磨,简化了机体的构造,使得结构简单,降低了生产成本。

经用户使用证明,该设备是对其液固物料进行湿式搅拌、砂磨、分散的高效研磨分散设备;可广泛应用于油漆涂料、化妆品原料、食品、日化、染料、油墨、药品、农药、磁记录材料、铁氧体、新能源锂电池等工业领域。

(咨询热线:0512-5779 0006、5519 6006; 密友网站:www.miyou.com.cn)

(吴宏富)