



HRM 超细立式磨的研制与应用分析

秦广超

(合肥水泥研究设计院 合肥中亚建材装备有限责任公司 安徽 合肥 230051)

摘要: 结合超细重质碳酸钙粉体材料的应用指标需求特点,探索 HRM 超细立式磨研制的创新点和研究方向;通过重质碳酸钙、滑石等非金属矿粉体超细加工工程应用经验,对 HRM 超细立式磨研磨装置的结构、磨盘转速、磨辊压力以及分级装置的动静态转子结构、叶片放置形式、转速等进行创新设计与研制。结果表明,HRM 超细立式磨所生产的超细产品达到 $2\ \mu\text{m}$ 细粉体积分数 $\geq 22\%$ 、 $d_{100} \leq 45\ \mu\text{m}$ 、 $d_{50} = 5.1 \sim 6.3\ \mu\text{m}$ 、吨产品电耗 $\leq 55.6\ \text{kWh/t}$ 、比表面积达到 $0.83 \sim 0.92\ \text{m}^2/\text{g}$,设备运转效率达到 98%。

关键词: 超细非金属矿粉体;立式磨;研磨装置;分级装置

中图分类号:TM277 文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2016)04-0078-05

Analysis and application development of hRM superfine vertical roller mill

QIN Guangchao

(Hefei Cement Research & Design Institute, Hefei ZhongYa Building Material Equipment Co.Ltd. Hefei 230051, China)

Abstract: In this paper, combined with the characteristics of the application of ground calcium carbonate (GCC) powder material, the innovation points and the research direction of the development of HRM ultra-fine vertical mill were explored. By the GCC, talc and other non-metallic mineral powder superfine processing engineering application experience, the focus of research in HRM vertical superfine grinding device for grinding structure, disc rotating speed, grinding pressure roller and grading device for dynamic and static grading wheel structure, material selection and speed for the design and fabrication. The practice prove that HRM vertical superfine grinding the production of superfine product $2\ \mu\text{m}$ fine powder volume content $\geq 22\%$, $d_{100} \leq 45\ \mu\text{m}$, $d_{50} \leq 6.5\ \mu\text{m}$, tons of product power consumption is less than or equal to $55.6\ \text{kWh/t}$, specific surface area reach $0.83 \sim 0.92\ \text{m}^2/\text{g}$, equipment running efficiency reach 98%.

收稿日期:2015-10-13, 修回日期 2016-04-15。

基金项目:国家重点新产品项目 编号 2014GR609005。

作者简介:秦广超(1971—),男,硕士,高级工程师,研究方向为非金属矿粉体制备与工艺设计。E-mail: qgchao@163.com。

Keywords: ultrafine non-metallic mineral powder; vertical roller mill; grinding device; grading device

近年来,国内重质碳酸钙(简称重钙)等非金属矿粉体的加工装备与技术发展较快,雷蒙磨、环辊磨、球磨机、振动磨等装备技术已广泛应用^[1-4],但是还存在能耗高、产品稳定性差、粉尘污染严重、单机产能小等问题^[2-4,6]。

立式磨装备技术具有绿色节能、产品稳定、规模化生产的优势,在重钙等非金属矿粉体加工行业已经开始兴起,但是,其生产产品的 $2\ \mu\text{m}$ 细粉体积分数、 d_{100} 、 d_{97} 、 d_{50} 等粒度及其分布指标、颗粒形貌特征不能很好地适应下游应用市场的精细化要求^[5,7-11],即立式磨在超细加工方面还存在不足,难以实现超细加工。鉴于此,结合非金属矿超细加工的需求以及合肥中亚建材装备有限责任公司 HRM 立式磨在非金属矿行业应用的经验,探索 HRM 超细立式磨的创新点和研究方向,对原 HRM 立式磨的研磨装置和分级装置及其系统进行创新设计与研制,以实现 HRM 超细立式磨能够生产出 $2\ \mu\text{m}$ 细粉体积分数 $\geq 22\%$ 、 $d_{100} \leq 45\ \mu\text{m}$ 、 $d_{50} \leq 6.5\ \mu\text{m}$ 的超细非金属矿粉体产品^[5,16],实现超细产品的规模化生产。

1 HRM 超细立式磨研制

1.1 重钙粉体应用的精细化指标分析

影响重钙粉体产品应用的指标有白度、杂质含量、粒径及其分布(d_{97} 、 d_{100} 、 $2\ \mu\text{m}$ 细粉体积分数、平均粒径 d_{50} 、比表面积、颗粒形貌)、晶型、吸油值及水分等^[3-5,8,16]。其中产品 d_{97} 、 d_{100} 、 $2\ \mu\text{m}$ 细粉体积分数、平均粒径 d_{50} 、比表面积、颗粒形貌、吸油值等粒度及其分布指标与加工装备的研磨效率与分级效率直接相关。

以几种常见装备工艺所生产的 $d_{97}=23\ \mu\text{m}$ 重钙粉体产品为依据,具体分析常见装备工艺生产的产品粒径及其分布特点,见表 1。由表中数据可知,雷蒙磨、环辊磨等设备生产的重钙粉体产品存在 $2\ \mu\text{m}$ 细粉体含量过低、比表面积小的问题,影响产品的应用性能;球磨机加分级机工艺生产的重钙粉体产品存在 $2\ \mu\text{m}$ 细粉

体积分数过大、比表面积过大的问题,颗粒易团聚,产品分散性能差,吨产品能耗过高,原 HRM 立式磨生产的产品存在 2 μm 细粉体积分数略小、比表面积不足的

问题,这是由于原 HRM 立式磨的研磨装置超细研磨效率低、分级装置超细分级效率不足造成的,但是,在所列常见装备工艺中立式磨也是最具有开发价值的^[3-4,16]。

表 1 几种常见装备工艺生产的重钙粉体产品粒径及其分布分析($d_{97}=23\ \mu\text{m}$)

Tab. 1 Analysis of the particle size and its distribution of GCC powder produced by several common techniques($d_{97}=23\ \mu\text{m}$)

常见装备工艺	雷蒙磨	环辊磨	球磨机加分级机	台湾立式磨	原 HRM 立式磨	应用要求值
2 μm 细粉体积分数/%	12.76	15.23	42.72	31.52	19.05	≥ 21
$d_{10}/\mu\text{m}$	56.13	46.00	40.24	44.04	45.00	≤ 45
$d_{50}/\mu\text{m}$	8.09	7.93	3.32	5.62	6.97	5.5–6.3
分布跨度	2.02	2.13	3.15	2.36	2.89	2.2–2.8
比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	0.603	0.672	0.997	0.865	0.737	0.83–0.92
吨能耗/($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)	~63	~61	~69	~56	57.3	≤ 56
颗粒形态	扁平状多,球形颗粒少		近似球形居多		近似球形	
分析	研磨、分级效率低,维修率高		研磨效率过高,即存在过磨问题,能耗过高		研磨、分级效率适中,市场前景好	
					研磨、分级效率待提升(本研究重点)	

目前,台湾产超细立式磨代表了该行业的国际先进水平,结合台湾立式磨生产的 2 μm 细粉体积分数、比表面积和 $d_{97}=23\ \mu\text{m}$ 重钙粉体产品的指标及其应用要求值,对原 HRM 立式磨的研磨装置、分级装置等关键部件进行创新设计与研制。

1.2 设计与研制

HRM 超细立式磨是合肥中亚建材装备有限责任公司,在广泛吸收国外先进的超细立式磨技术以及 30 多年立式磨在水泥、矿渣、非超细非金属矿粉体等行业应用经验的基础上,结合重钙粉体产品的应用分析而开发出的高效节能超细加工装备。HRM 重钙超细立式磨获得 2014 年国家重点新产品称号。

1.2.1 装备结构创新设计

为了适应重钙等非金属矿粉体规模化超细加工的需求,主要对研磨装置、分级装置等关键部件进行创新设计与研制,具体如下:

1) 研磨装置。磨盘和磨辊是立式磨重要的研磨装置部件,HRM 超细立式磨研究对磨盘和磨辊进行创新设计,目的是使被粉磨的物料在磨盘上形成一定厚度的稳定料床,达到超细研磨的效果^[11-14]。

①采用特殊的磨盘弧面曲线配以相适应的磨辊弧面曲线,磨盘和磨辊弧面曲线设计见图 1。物料落入磨盘中心后在传动装置的带动下,离心分散进入研磨轨迹经粗磨区粗磨后,再经细磨区进行超细研磨;

②合理的磨盘转速与磨辊压力。根据粉磨物料的特性,控制合理的磨盘转速与磨辊压力,以达到稳定料层、提高粉磨效率的作用,实现超细研磨,产生足够多的 2~10 μm 细粉,满足超细分级要求。磨盘转速主要体现为物料在磨盘边缘的线速度,磨辊压力由常规的 7~8 MPa 提高到 10~15 MPa,较大的粉磨压力保证了

最大的研磨效率。研磨装置磨盘磨辊组合图见图 2。

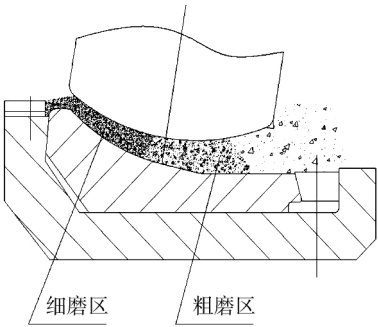


图 1 磨盘和磨辊弧面曲线设计

Fig. 1 Arc curve design of millstone and grinding roller

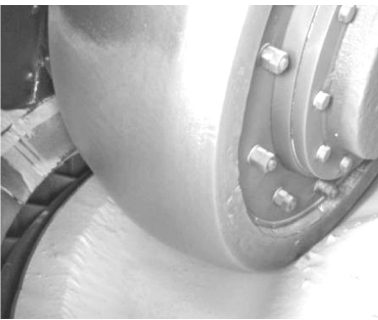


图 2 磨盘磨辊组合图

Fig. 2 Combination of millstone and grinding roller

③特殊的风环设计:为确保磨内风速合理、粗颗粒被淘洗排出,即超细研磨后的物料落入风环处,被淘洗剩下的粗颗粒料落入风环下从磨内排出。细颗粒料在一定风速气流的带动下进入分级装置,通常来说,风环处的风速达到 30 m/s 以上。图 3 为风环示意图。

考虑到物料的易磨性差异,磨盘衬板及磨辊辊套材料的选择也尤为重要,对于难磨物料或对产品金属

污染要求较高的,建议采用磨辊和磨盘堆焊。



图 3 风环示意图

Fig. 3 Schematic diagram of air ring

2) 分级装置

分级转子采用先进高效的动-静态组合方式,是分级装置的核心部件,如图 4—6 所示。分级转子的性能决定了分级机的性能。该分级叶轮结构设计从以下几个方面进行了创新设计:

①动-静态转子的结构尺寸决定了分级机的处理能力和处理风量,确保达到一定的产能,满足规模化

生产的目的;

②动-静态转子的材料选择、机械强度决定了分级装置高速运行的可靠性,确保系统稳定运行;

③动-静态转子叶片的设置形式决定了分级叶轮的压降(风阻)和分级效果,减小系统压力,降低吨产品能耗,提升产品精细化程度;

④分级机转速设计决定了分级效果和分级精度,保证产品的 d_{100} 、 d_{97} 、 d_{50} 、 $2\mu\text{m}$ 细粉体积分数等超细指标,也是分级装置的核心要素,高转速对应超细分级程度的提升,不同细度的产品,分级转速不同,通过变频调节控制;

⑤分级机转子间隙密封,防止大颗粒逃逸,主要是指对产品 d_{100} 指标的控制。常规的密封方式有迷宫机械密封和外接一定压力气体密封,本研究采用 2 种方式的创新设计。

图 4 为动-静态转子设计,主要从结构尺寸、材料选择、机械强度以及叶片的设置形式等角度创新设计。图 5 为分级装置的流场示意图,目的是选择最佳的分级机转速,采用合理的转子间隙密封方式,确保分级效果和分级精度。图 6 为动-静态转子的组合,静叶片起到粗筛大颗粒的作用,动叶片起到控制产品 d_{50} 、 d_{97} 、 d_{100} 粒度指标,达到产品超细分级的作用。

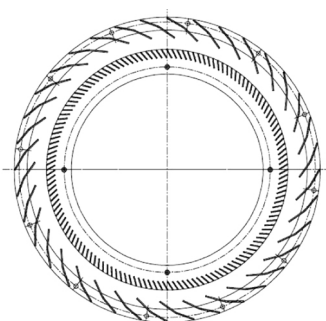


图 4 动静态转子设计

Fig. 4 Design of dynamic and static grading wheel

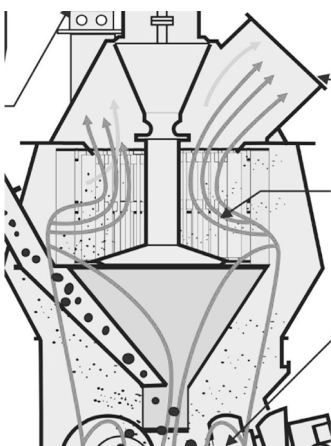


图 5 分机装置流场示意图

Fig. 5 Schematic diagram of extension device flow field

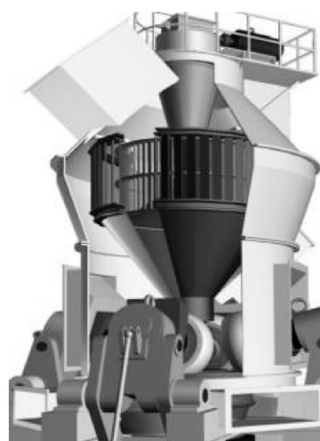


图 6 动静态转子的组合图

Fig. 6 Combination of dynamic and static grading wheel

1.2.2 设计指标

经过创新设计,HRM 超细立式磨生产的重钙粉体 $d_{97}=23\sim 24\mu\text{m}$ 产品拟达到以下指标:

- 1) $2\mu\text{m}$ 细粉体积分数达到或超过 22%;
- 2) $d_{100}\leq 45\mu\text{m}$ $d_{50}\leq 6.3\mu\text{m}$, 分布跨度在 2.2~2.8;
- 3) 比表面积 $\geq 0.83\text{ m}^2/\text{g}$;
- 4) 吨产品能耗 $\leq 56\text{ kWh/t}$;
- 5) 运转效率 $\geq 96\%$ 。

通过设计创新,分别研制开发出 HRM17/2X、HRM21/2X、HRM21/3X 超细立式磨,在重钙粉体超细

加工行业得到应用,并在滑石粉体超细加工行业得到推广。

2 应用分析

2.1 工作原理

立式磨是利用磨辊与磨盘的相对运动对物料进行料床粉碎,随着磨辊碾压压力增加,物料细度变小;磨细的物料靠气流将其带起,由其上面的分级装置在磨内分级,粗粉落入磨盘重新被粉碎,合格细粉由风送出磨至袋收尘器收集^[2-4]。

2.2 系统工艺设计

从重钙等非矿粉体产品多样化需求的角度考虑，在进行立式磨粉体工程系统设计时多采用立式磨+二次(或三次)分级工艺，一是利用立式磨的规模化节能超细生产；二是利用二次分级有利于产品精细化提升。如安徽某重钙粉体公司，应用 HRM17/2X 超细立式磨生产重钙粉体的工艺流程图如图 7 所示。HRM17/2X 超

细立式磨系统直接生产 $d_{97}=13\sim40\text{ }\mu\text{m}$ 重钙产品，单机产量达到 5~12 t/h，发挥立式磨的规模化节能优势；二次(或三次)分级系统生产 $d_{97}=5\sim13\text{ }\mu\text{m}$ 重钙产品，单机产量达到 1.8~6.0 t/h，发挥分级机的精细化节能优势。这就需要立式磨生产的粉体中有足够的细粉，也就是说立式磨必需具备超细研磨精细分级的能力，以满足二次(或三次)分级的精细化加工要求^[2-4,16]。

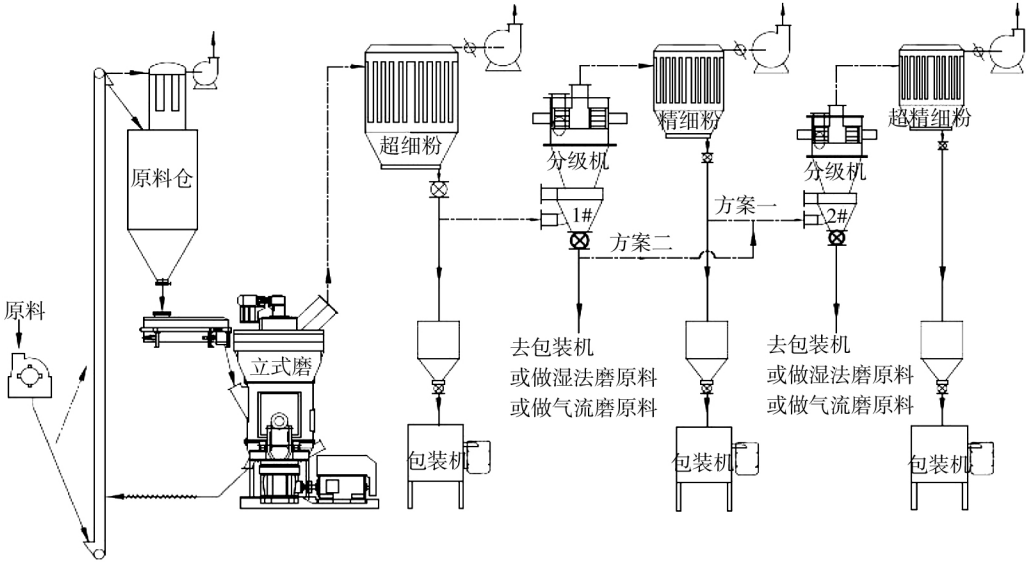


图 7 HRM 超细立式磨工艺流程图
Fig. 7 Process flow chart of HRM ultra-fine vertical mill

2.3 超细粉体工程应用分析

结合 HRM17/2X、HRM21/2X、HRM21/3X 超细立式磨在重钙粉体和滑石粉体加工行业的应用情况，分别对重钙粉体及滑石粉体加工工程的应用进行具体分析。

1)重钙超细粉体工程应用分析

分别对 HRM17/2X、HRM21/2X、HRM21/3X 超细立式磨生产的 $d_{97}=23\text{ }\mu\text{m}$ 重钙粉体产品的应用统计结果与台湾 LURM-1100 立式磨的生产指标与性能进行对比分析，具体结果如表 2 所示。

表 2 HRM 超细立式磨生产的重钙粉体技术指标($d_{97}=23\text{ }\mu\text{m}$)
Tab. 2 Technical specifications of GCC powder produced by HRM ultra-fine vertical mill($d_{97}=23\text{ }\mu\text{m}$)

立式磨型号	HRM17/2X	HRM21/2X	HRM21/3X	LURM-1100 ^[1]	原 HRM17X	应用要求值
2 μm 细粉体积分数/%	28.37	25.02	31.32	31.52	19.05	≥ 21
$d_{100}/\mu\text{m}$	≤ 42	≤ 44	≤ 44	44.04	45.00	≤ 45
$d_{50}/\mu\text{m}$	5.0~5.4	5.8~6.3	5.1~5.6	5.6	6.9	5.0~6.3
分布跨度	2.37~2.61	2.59~2.83	2.39~2.77	2.36	2.89	2.2~2.8
比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	0.84~0.88	0.83~0.87	0.84~0.92	0.865	0.737	0.83~0.92
单机功率/kW	237	475	475	255	222	/
单机产能/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$) ^[2]	6.5	11.7	12.9	6.7	5.6	/
吨能耗/($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$) ^[2]	54.9	55.6	54.2	~56	~57.3	≤ 56
使用单位或地区	安徽泾县	欧米亚青阳	广西贺州	浙江桐庐	浙江桐乡	

表注 [1]为台湾立山机械公司生产超细立式磨 [2]为 $d_{97}=23\text{ }\mu\text{m}$ 产品的平均产能和能耗。HRM17/2X、HRM21/2X、HRM21/3X 生产的产品数据为实际运行数据的统计结果。

由表中数据可见，HRM 超细立式磨生产的产品：2 μm 细粉体积分数达到 25%~31%、 $d_{97}\leq 44\text{ }\mu\text{m}$ 、 $d_{50}=5.0\sim 6.3\text{ }\mu\text{m}$ 、分布跨度在 2.23~2.67，比表面积达到

0.83~0.92 m^2/g ，吨产品能耗在 54.2~55.6 kWh/t 。各项运行指标均达到台湾超细立式磨生产的重钙粉体产品的技术指标。从单机装机功率和吨产品能耗来看，

HRM 超细立式磨的单机产能也已经达到或优于国际同类型立式磨。

目前 HRM17/2X、HRM21/2X、HRM21/3X 超细立式磨等机型在重钙粉体超细加工行业已经成功得到应用,在此基础上,对 HRM 超细立式磨在滑石等其他非金属矿行业超细加工进行了大量的市场

调研。

2)滑石超细粉体工程应用推广

在重钙粉体工程基础上,2015 年 10 月,HRM21/3X 超细立式磨生产 $d_{97}=23\sim 25\ \mu\text{m}$ 滑石粉生产线在山东烟台某公司投产运行,该立式磨的生产指标与产品性能如表 3 所示。

表 3 HRM21/3X 超细立式磨生产滑石粉的技术指标($d_{97}=23\sim 25\ \mu\text{m}$)

Tab. 3 Technical specifications of French chalk produced by HRM21/3X ultra-fine vertical mill($d_{97}=23\sim 25\ \mu\text{m}$)

技术指标	2 μm 细粉 体积分数/%	$d_{100}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	比表面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	吨能耗/ ($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)	单机产能/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)
$d_{97}=23.37\ \mu\text{m}$ 样品	19.73	≤ 44	5.97	0.853	56.1	10.3
$d_{97}=24.76\ \mu\text{m}$ 样品	19.31	≤ 45	6.03	0.829	55.2	10.5
要求指标	17~21	≤ 45	5.8~6.3	0.82~0.87	≤ 57	≥ 10.0

由表可以看出,HRM21/3X 超细立式磨生产的产品 2 μm 细粉体积分数、 d_{100} 、 d_{50} 、比表面积、吨产品能耗等指标均达到滑石粉体产品的市场要求。滑石粉体行业的成功应用为 HRM 超细立式磨在其他非金属矿行业深入推广奠定了坚实的基础。

2.4 应用指标评价

以上述 3 种 HRM 超细立式磨应用于重钙行业的运行统计结果为基础,并结合项目设计指标进行对比分析,结果如表 4 所示。

表 4 HRM 超细立式磨应用指标分析

Tab. 4 Application index analysis of HRM ultra-fine vertical mill

技术指标	2 μm 细粉 分数/%	$d_{100}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	分布 跨度	比表 面积/ ($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)	吨能耗/ ($\text{kWh}\cdot\text{t}^{-1}$)
设计指标	≥ 22	≤ 45	≤ 6.3	2.2~2.8	≥ 0.83	≤ 56.0
HRM17/2X	23~28	≤ 42	5.0~5.4	2.37~2.61	0.84~0.88	≤ 55.0
HRM21/2X	22~27	≤ 44	5.8~6.3	2.59~2.83	0.83~0.87	≤ 55.6
HRM21/3X	25~31	≤ 44	5.1~5.6	2.39~2.77	0.84~0.92	≤ 54.2

由表中数据可见,HRM 超细立式磨的运行指标达到或优于设计指标,满足了重钙粉体超细加工产品粒度分布窄、应用性能好、单机生产能力大、单位产品能耗低、设备检修少、运行稳定性高的要求。

3 结语

实践证明,HRM 超细立式磨装备技术达到了非金属矿粉体超细加工的要求,产品中 2 μm 细粉体积分数为 25%~31%、 $d_{100}\leq 44\ \mu\text{m}$ 、 $d_{50}=5.0\sim 6.3\ \mu\text{m}$ 、分布跨度在 2.23~2.67,比表面积达到 0.83~0.92 m^2/g ,吨产品能耗在 54.2~55.6 kWh/t ,设备运转效率达到 98%,该项目运行技术指标达到或优于项目设计指标,达到同类装备的国际先进水平。

“十三五”期间,装备技术创新和工业化生产技术创

新是非金属矿粉体产业升级转型发展的重点。HRM 超细立式磨的研制成功,有利于国内重钙等非金属矿产业精细化产品个性化创新,有助于行业去产能、去库存,更有助于促进我国非金属矿粉体加工装备技术升级,提升中国非金属矿粉体装备技术在国际上的竞争实力。

参考文献(References):

- [1] 郑水林. 非金属矿加工与应用 [M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2008:13~42.
- [2] 袁凤宇, 崔啸宇, 迟源. “立式磨+互联网”在非金属材料行业中的应用[J]. 中国粉体技术, 2016, 22(2):108~111.
- [3] 秦广超. “十三五”期间重质碳酸钙产业转型升级发展探析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2016(2):1~5, 13.
- [4] 秦广超, 崔啸宇, 陈飞, 等. 浅析重质碳酸钙产业发展及其粉体装备技术升级[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2013(6):35~39.
- [5] ALLEN T. Particle size measurement volume 1: powder sampling and particle size measurement[M]. London: Chapman and Hall, 1997.
- [6] 刘明. 中国水泥工业发展与节能降耗和减排政策措施[J]. 中国水泥, 2007(4):7~9.
- [7] 郑水林. 超微粉体加工技术与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005:1~44.
- [8] 刘长松, 王玲, 李志文, 等. HF 对微纳米 ZnO 的形貌及其润湿性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10):1690~1694.
- [9] 秦广超, 崔啸宇, 迟源, 等. “十二五”期间重质碳酸钙产业发展分析[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(6):1~4.
- [10] 陈德伟, 葛晓陵, Quentin SHI, 等. 重质碳酸钙在超细粉碎中的多维形特征[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(6):72~75.
- [11] 张国旺, 黄圣生. 超细粉体装备技术的应用和发展[J]. 化工矿物与加工, 2001, 30(12):1~3.
- [12] 梁莉. 中型矿渣立式磨结构对动态特性的影响[D]. 内蒙古科技大学, 2013.
- [13] 景景亮. 立式磨粉磨性能分析与仿真实验技术研究[D]. 济南 济南大学, 2011, 1~2.
- [14] 戴少生. 立式磨的转速探讨[J]. 上海建材学院学报, 1996, 9(1):55~61.
- [15] 张正彬, 汪日光. 大型亚微米分级机的研究[J]. 机械设计与自动化, 2009, 38(6):63~65.
- [16] 张志宇, 秦广超, 迟源, 等. 塑料用重质碳酸钙产品精细化与立式磨工艺研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(5):45~47, 58.