

综合评述

# 湿式细磨技术研究进展

孙小旭<sup>1,2</sup>, 王芑卜<sup>1,2</sup>, 姚建超<sup>1,2</sup>, 何建成<sup>1,2</sup>

1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
2. 北矿机电科技有限责任公司, 北京 100160

中图分类号: TD921.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)06-0174-05  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.06.019

**摘要** 在介绍湿式细磨技术在矿物加工行业细磨作业流程中重要作用的基础上, 重点对湿式细磨中的能量耗散和研磨介质运动状态的理论进行了分析, 对基于 CFD、DEM、PEPT 的模拟仿真过程及结果进行了探讨。在简述湿式细磨技术与装备的应用进展的基础上, 总结了典型湿式细磨技术与装备的结构研发、技术优化和应用进展, 以期能为湿式细磨技术和装备的研究、推广提供帮助, 为实现矿物加工行业的节能高效细磨奠定基础。

**关键词** 螺旋式; 盘式; 棒式; 细磨; 介质运动

随着矿产资源采选行业的快速发展, 已经有越来越多的贫、细、杂等难处理、细粒嵌布矿物进入采选流程中, 推动了采选行业湿式细磨技术的产生与发展。基于此, 近些年国内外对细嵌布粒度矿物的高效解离的关注度越来越高, 湿式细磨技术也快速发展<sup>[1-2]</sup>。本文主要针对入磨粒度  $F_{80} \leq 100 \mu\text{m}$ 、产品粒度  $P_{80} \geq 10 \mu\text{m}$  范围内的湿式细磨过程及技术应用进行分析。

湿式细磨技术一般采用普通卧式球磨机和各种类型的卧式或立式搅拌磨机作为细磨装备。与普通卧式球磨机不同, 以搅拌装置的旋转带动筒体内介质和矿物相互研磨从而达到细磨目的的各类搅拌磨机近些年被广泛应用于细磨领域<sup>[3]</sup>。研究及应用实践表明, 在矿物粒度  $F_{80} \leq 100 \mu\text{m}$  时, 各种类型的搅拌磨机的效率远远高于普通卧式球磨机, 主要因为其允许的研磨介质更小, 搅拌装置线速度更高, 能量尽可能多地耗散在细磨作用中而不是其他辅助作用, 从而使矿物快速达到要求粒度<sup>[4]</sup>; 此外, 单位容积能量密度更高<sup>[5]</sup>, 相同处理量下设备规格更小, 初次投资更低, 成本和技术优势更加明显<sup>[6]</sup>。故本文主要针对以搅拌磨机为代表的湿式细磨技术进展进行分析。

现阶段针对以搅拌磨机为代表的湿式细磨过程研究主要集中于装备大型化、降低介质消耗、减少磨损、降低成本等方面, 对机理的系统性分析和报道较少, 对微观过程、机理揭示得不够明确。本文在介绍湿式搅拌磨机样机的基础上, 着重阐述搅拌磨机的细磨机理、介质运动规律及重要应用进展。

## 1 典型结构

1928 年 Klein 和 Szegvari 最先提出了搅拌磨机的概念, 到现在已有近百年历史。近百年中, 虽有无数的原型样机不断涌现, 但基本上仅有螺旋式、棒式、盘式搅拌磨机等湿式细磨技术与装备得到了广泛应用, 三者细磨原理上虽区别不大但整体结构却相差很大, 其中棒式、螺旋式主要以立式搅拌磨机为主, 而盘式的则立式和卧式搅拌磨机均有应用<sup>[9]</sup>。

以搅拌磨机为代表的湿式细磨技术研究主要分为细磨基础理论和仿真模拟两大类。细磨基础理论主要从能量耗散和介质运动规律角度对矿物细磨机理进行宏观分析。仿真模拟研究主要对搅拌磨机内部矿物、介质运动及矿物与介质相互作用的层面进行微观仿真分析研究。

## 2 细磨基础理论

### 2.1 能量耗散

Klaus Schonert<sup>[7]</sup> 是较早开展搅拌磨机细磨技术理论性分析的研究者之一, 提出了湿式细磨过程的粉碎机理, 即利用粉碎过程来分析细磨作用; 随后 Schwedes、Stehr、Kwade 等人<sup>[8-9]</sup> 在其理论的基础上, 针对矿物颗粒、介质碰撞等作用进行了完善, 形成了从宏观的能量耗散角度分析湿式细磨技术的理论, 为后续技术和装备的发展打下了坚实基础。

收稿日期: 2022-05-26

作者简介: 孙小旭(1989—), 男, 河北易县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事细磨技术装备研究与推广。

Kwade 等人<sup>[10]</sup>认为, 湿式细磨中矿物的细磨主要由两个关键因素控制: 单个矿物颗粒在细磨过程中一定时间内受到研磨介质的有效总碰撞次数 (Stress Number,  $SN$ ), 及每次碰撞过程中单个矿物颗粒所受到的有效应力强度 (Stress Intensity,  $SI$ )。

$SN$  与一定时间内研磨介质的总碰撞次数 ( $N_C$ )、有效碰撞到颗粒形成细磨作用的概率 ( $P_S$ )、颗粒总量 ( $N_p$ ) 三者间存在定量关系, 其具体作用关系如式 (1) 所示<sup>[11]</sup>。

$$SN = \frac{N_C P_S}{N_p} \quad (1)$$

利用单位规格原型的具体参数来进行表述更便于理解, 通过分析及一系列公式换算、等价后, 式 (1) 可扩展为式 (2) 所示<sup>[12]</sup>。

$$SN \propto \frac{\varphi_{GM}(1-\varepsilon)}{(1-\varphi_{GM}(1-\varepsilon))c_V} \frac{nt}{d_{GM}^2} \quad (2)$$

式中:  $\varphi_{GM}$  为研磨介质充填率, %;  $\varepsilon$  为研磨介质层孔隙率, %;  $d_{GM}$  为研磨介质直径, mm;  $t$  为细磨时间, min;  $n$  为转速, r/min;  $c_V$  为固体浓度, %。

$SI$  表现为研磨介质运动过程中损失的动能, 关系如式 (3)。

$$SI \propto SI_{GM} = d_{GM}^3 \rho_{GM} v_i^2 \quad (3)$$

式中:  $\rho_{GM}$  为研磨介质密度, kg/m<sup>3</sup>;  $d_{GM}$  为研磨介质直径, mm;  $v_i$  为末端线速度, m/s。

综上, 即  $SI$  和  $SN$  基本决定湿式细磨效果, 进一步从单个颗粒扩展至全部颗粒可知, 整个细磨过程全部能量耗散或总输入功率也由两者决定, 即两个参数为湿式细磨技术中能量耗散与结构、工艺参数、细磨效果、粒度间的纽带<sup>[13]</sup>。

在此基础上, Jankovic<sup>[14]</sup>将该理论继续深入完善, 其对  $SI$  计算方法在特定场合下进行了修正, 主要考虑湿式细磨中研磨介质重力势能对细磨效果的影响 ( $SI_{gm}$ )。Jankovic<sup>[6]</sup>利用修改后的应力强度 ( $SI$ ) 对实验室湿式细磨装置进行了粒度与能耗间关系的研究, 结果表明原有理论适用于不同形式湿式细磨技术, 只是特定场合下的一些参数需要修正。

上述细磨理论研究了湿式细磨过程中研磨介质的运动状态, 明确了研磨介质运行规律、运动轨迹、尺度变化及细磨过程能量耗散和分布, 为优化升级、模拟仿真、放大研究、装备研制提供了理论支撑。但需看到, 研究集中在宏观理论分析方面, 在宏观与微观联系方面的分析较少, 如矿物可磨度、结构变化等与细磨间的影响关系几乎没有涉及; 此外, 总碰撞次数、应力强度与矿物细磨效率、粒度变化间的对应关系也并未涉及; 这些均需在后续研究中重点关注, 只有这样才能更完善地从能量耗散角度揭示细磨机理的全部内容。

## 2.2 介质运动规律

研磨介质运动规律研究是以搅拌磨机为代表的湿式细磨理论技术的重要领域, 主要因为细磨颗粒所需能量基本来自研磨介质与颗粒间的碰撞、磨剥、研磨, 但因研磨介质与颗粒间、颗粒与颗粒间的运动形式十分复杂, 故很长时间内该方向的理论研究一直处于停滞。直到 20 世纪末, 得益于试验和测试手段不断进步, 固液混合下的介质运动规律研究才逐渐发展起来<sup>[15-17]</sup>。

Stender 等人<sup>[18]</sup>从细磨原型样机的空间结构分布出发, 以研磨介质应力强度为研究点, 通过理论分析, 描述了内部介质及能量分布情况, 主要分为 4 个区域 (图 1):

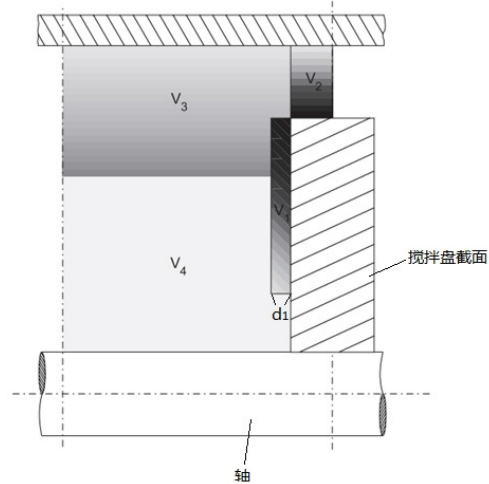


图 1 内部能量分布  
Fig. 1 Energy distribution

$V_1$  区域 (搅拌装置表面的狭小区域, 区域大小与介质尺度相关): 研磨介质切向速度从搅拌装置的最大值急剧减小至 50% 左右;

$V_2$  区域 (搅拌装置外沿到内壁): 研磨介质切向速度从最大值减至几乎为零;

$V_3$  区域 (内壁附近大部分区域, 约占近 60%): 研磨介质以一定的速度从动, 能量分布较少;

$V_4$  区域 (搅拌主轴附近大部分区域, 约占近 25%): 研磨介质与颗粒几乎同步运动, 能量分布极小。

因 Stender 等人的研究以卧式盘式搅拌磨机为原型样机, 因其搅拌装置转速较快, 离心加速度较大且研磨介质尺寸较小, 故在研究过程中忽略了重力的影响作用, 相关结论与立式湿式搅拌磨机研磨介质的运动规律存在不一致, 故 Jankovic 等<sup>[19]</sup>重点对该领域进行了分析研究。

Jankovic 等人将搅拌磨机分成多个不同区域, 对每个区域的介质运动分开研究, 据其运动规律、能量分布, 建立了运动模型。在立式螺旋搅拌磨机中, 以

螺旋搅拌装置外沿为分界线,将筒体内部空隙区域分为螺旋区域和间隙区域,指出在切向方向上,介质运动速度先增加再降低,在螺旋外沿处达到最大;在轴向方向上,介质以一定速度向上部运动,到达顶端后自由下落。在立式棒式搅拌磨机中,以棒式搅拌装置外沿为分界线,将筒体内部空隙区域分为直棒区域和间隙区域,指出在切向方向上,介质运动速度先增加再降低,在搅拌棒的外沿处达到最大;在轴向方向上,搅拌棒影响区域有限,仅搅拌棒附近的介质以一定速度运动,其余空隙区域介质基本上属于从动状态。分区模型的建立,分析了不同区域内介质和矿物的运动状态,运动状态与搅拌装置速度、筒体空隙等建立了关系,确定了搅拌装置附近区域是高效作用区域,此区域介质、矿物相互作用,筒体空隙区域是介质和矿物在重力作用下的循环区域,此区域介质和矿物的相对速度较大且变化明显,是细磨作用发生的主要区域,影响细磨效果的优劣。

研磨介质运动理论、能量分布规律与 Kwade 等人<sup>[20-21]</sup>湿式细磨理论能量分布预测基本相似,较为全面地描述了内部运动规律,对细磨技术发展和装备研究具有较强指导意义。但需看到,研究集中在介质分区运动上,区域内介质详细运动轨迹、状态及作用效果等并未深入,同时,介质运动状态、细磨效果与搅拌磨机结构间的关系尚未涉及,如搅拌装置直径大小、空隙区域大小与细磨效果间的影响等等;这些均为后续研究的重点,只有突破这些才能更清楚地掌握介质的全部运动状态。

### 3 仿真及检测技术分析

湿式细磨仿真模拟及检测技术分析有 CFD (Computational Fluid Dynamics, 计算流体动力学)、DEM (Discrete Element Method, 离散单元法) 和 PEPT (Positron Emission Particle Tracking, 正电子发射颗粒跟踪技术) 三个方面,其中,基于 CFD 的研究集中在将矿浆看作牛顿流体并忽略介质而研究矿浆速度和受力分布;基于 DEM 的研究集中在研究内部介质的运动状态而忽略矿浆的作用,就介质的能量分布、受力、速度分布展开研究;基于 PEPT 的检测较为全面,可将整个搅拌磨机内部的全部运动状态显示清楚,但受限于装置的特殊性,此方面的深入研究较少<sup>[9]</sup>。

Jayasundara 等人<sup>[22-24]</sup>利用 CFD、DEM 等手段对湿式细磨中流体、研磨介质运动状态进行了分析,对转速、浓度、研磨介质尺度等参数与细磨效果间关系进行了逐项分析。研究表明:转速提升会使细磨效率提高,但能耗增加更为明显;浓度增加会使细磨效率提高;介质充填率增加会使细磨效率提高,介质尺度变小利于细粒级产生。

但 CFD、DEM 模拟仿真中仅关注了湿式细磨中

矿物或研磨介质一个方面,交互作用下的研究较少,缺少细磨效果间的交互作用分析数据。Sinnott<sup>[25-26]</sup>、Baker 等人<sup>[27-28]</sup>借助 PEPT 仿真对交互作用进行了探索。研究表明:非球形研磨介质不利于短时间内产生较强的细磨作用和效果,主要原因为非球形研磨介质的运动较为困难,相对运动会较少;黏度提升会影响矿物流动状态,进而影响内部停留时间而对细磨效果产生影响。

模拟仿真技术发展为很多在理论分析、实验室试验中无法推算、观察的现象提供了较好分析手段,可从微观角度揭示湿式细磨中结构、工艺参数与细磨效率间的关系,为细磨技术发展及磨机结构设计、优化及放大等提供了支持。但需看到,模拟仿真分析基本是独立分析整个过程的某个方面且存在较多假设,比如 CFD 仅研究矿浆运动而 DEM 仅研究介质运动,而实际中两种运动均存在且相互作用,但关于 CFD-DEM 耦合分析研究较少,需要加强,只有这样才能通过仿真手段理清全部细磨过程。

### 4 技术应用进展

在湿式细磨理论和模拟仿真分析的基础上,以螺旋搅拌磨机、棒式搅拌磨机为代表的典型湿式细磨装备取得了长足发展,逐步得到了市场认可,在国内外众多矿山选厂得到了应用。

螺旋搅拌磨机由静止筒体、螺旋搅拌装置、支架、电机、减速机等组成,研磨介质直径通常 12~30 mm,搅拌器以 2.5~4.0 m/s 左右线速度旋转带动钢质或陶瓷质介质作研磨,矿物产品粒度可至  $P_{80}=20 \mu\text{m}$ <sup>[29]</sup>。

在国际上以日本 EIRICH 的 ETM 系列和芬兰 Metso 的 VTM 系列为代表,最大已应用规格的装机功率达约 3 350 kW。VTM-4500-C 立式螺旋搅拌磨机装机功率为 3 350 kW,是目前世界上已经应用的最大规格,在南非某金矿上应用时,入料为高压辊磨机产品,入料粒度  $F_{90}=3 \text{ mm}$ ,处理量为 200 t/h,产品粒度为  $P_{90}=74 \mu\text{m}$ ,既实现了湿式细磨作用,也向更粗的给矿粒度进行了扩展,应用效果良好<sup>[9]</sup>。

在国内研究立式螺旋搅拌磨机的机构较多,但以长沙矿冶研究院 JM 型和北矿机电科技有限责任公司 KLM 型最早。KLM-1250 立式螺旋搅拌磨机装机功率 1 250 kW,是目前国内已经应用的最大规格,在中国某钒钛磁铁矿细磨流程中应用时,入料为粗选后的粗精矿,入料粒度  $F_{50}=74 \mu\text{m}$ ,处理量为 70 t/h,产品粒度为  $P_{95}=38 \mu\text{m}$ ,实现了高效细磨,实现了钒钛磁铁矿高效解离,应用效果良好。

棒式搅拌磨机由静止筒体、棒式搅拌装置、电机、减速机等组成,介质直径通常 2~12 mm,搅拌器以 7.0~13 m/s 左右线速度旋转带动陶瓷介质作研磨,矿物产品粒度可至  $P_{80}=10 \mu\text{m}$ <sup>[30-31]</sup>。

在国际上以 Metso 公司的 SMD 磨机为代表, 其中 SMD-1100-E 棒式搅拌磨机的装机功率为 1 100 kW, 为目前世界上已经应用的最大规格, 在澳大利亚某铅锌矿应用时, 入料粒度  $F_{80}=38\ \mu\text{m}$ , 处理量为 35 t/h, 产品粒度为  $P_{80}=10\ \mu\text{m}$ , 实现了高效细磨, 应用效果良好<sup>[2]</sup>。

在国内研究棒式搅拌磨机的机构很少, 主要以北矿机电科技有限责任公司为代表, 已经应用最大规格为 370 kW, 在莫桑比克某石墨矿应用时, 入料为细鳞片石墨, 入料粒度  $F_{50}=74\ \mu\text{m}$ , 处理量为 40 t/h, 产品粒度为  $P_{85}=74\ \mu\text{m}$ , 实现了细鳞片石墨的高效细磨, 应用效果良好。

湿式细磨装备研究主要集中在大型化方面, 且国内装备大型化的速度远比国外的要慢, 需要我们不断在装备大型化方面下功夫; 此外, 精细化、智能化的研究和分析较少, 如易损件寿命预测、单位功耗降低、选择性细磨等等方面, 这些均是装备能否更加智能、高效服务于绿色矿山的关键。

## 5 结语

湿式细磨技术理论研究中, 以有效碰撞次数和研磨介质应力强度为支撑的能耗散理论, 揭示了细磨过程中能量传递和耗散的轨迹; 以介质分区研究运动和作用状态的分析, 指明了细磨过程中的高效细磨区域。模拟仿真研究中, 揭示了在理论计算中无法分析的矿物性质、介质性质与能量输入、细磨效果间的关系, 为从微观角度分析结构、工艺参数与细磨效果间的关系提供了方法。技术与装备的应用, 验证了理论分析的正确性, 为后续理论分析提供了试验平台、指明了方向。

但需看到, 理论研究对矿物性质、介质运动状态分析得不够透彻, 对矿物可磨度、介质硬度、搅拌装置结构、空隙区域等与高效细磨间的影响关系研究较少, 未能揭示参数间的具体影响关系。不同类型搅拌磨机细磨技术研究的发展差别较大, 对立式搅拌磨机的探索仍有很长的路要走。立式搅拌磨机还存在一些特有问題, 如自分级区域与细磨区域的合理匹配等, 均是很有价值的潜在研究方向。

随着技术的进一步发展, 湿式细磨研究现正逐渐朝着两个方向进行:

(1) 针对能量耗散、介质运动模型的更新和优化: 伴随计算机水平飞速发展及模拟仿真软件的更新, 研究必然会从单一矿物、介质运动研究向介质、矿物两相耦合研究发展, 不合理的假设会越来越少, 建立的模型与实际情况拟合度会越来越高, 对整个机理的研究会更加深入, 更重要的是基于模型所进行的工艺参数与结构优化及合理放大选型都将更具有实际指导意义。

(2) 针对现有装备的智能化、精细化及技术升级:

伴随智能化的发展和理论研究的不断深入, 外力很少参与就能根据矿物性质变化动态调整装备工艺参数、介质等的智能化装备必然会成为今后重要研究方向, 同时, 针对现有装备的易损件智能预测、选择性细磨分析等也是现今矿山选厂的迫切需求; 这些研究的深入和突破, 必将能使湿式细磨装备更好地满足绿色矿山的需求。

## 参考文献:

- [1] 卢世杰, 刘佳鹏, 何建成, 等. 几种典型搅拌磨机磨矿机理的研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2017(z1): 13-21.  
LU S J, LIU J P, HE J C, et al. Typical wet stirring fine grinding technology and application progress[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2017(z1): 13-21.
- [2] 卢世杰, 孙小旭, 何建成, 等. 典型湿式搅拌细磨技术与应用进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1): 159-165.  
LU S J, SUN X X, HE J C, et al. Typical wet stirring fine grinding technology and application progress[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(1): 159-165.
- [3] JANKOVIC A. Mathematical modelling of stirred mills[D]. Australia, Queensland: University of Queensland, 1999.
- [4] 李椿楠, 李国峰, 刘立伟, 等. 搅拌磨机的研究及应用现状[J]. 矿产综合利用, 2021(4): 110-117.  
LI C N, LI G F, LIU L W, et al. Research and application status of stirring mill[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4): 110-117.
- [5] SHI F, MORRISON R, CERVELLIN A, et al. Comparison of energy efficiency between ball mills and stirred mills in coarse grinding[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(7): 673-680.
- [6] JANKOVIC A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills[J]. Minerals Engineering, 2003, 16(4): 337-345.
- [7] SCHONERT K. Advances in comminution fundamental, and impacts on technology[A]. X VII International Mineral Processing Congress, Dresden, 1991, 9(1): 1-21.
- [8] STEHR N, SCHWEDES J. Investigation of the grinding behaviour of a stirred ball mill[J]. German Chemical Engineering, 1983, 6(6): 337-343.
- [9] STEHR N. Recent developments in stirred ball milling[J]. International Journal Mineral Processing, 1988, 22(1): 431-444.
- [10] KWADE A. Wet comminution in stirred media mills-research and its practical application[J]. Powder Technology, 1999, 105(1/2/3): 14-20.
- [11] KWADE A. Determination of the most important grinding mechanism in stirred media mills by calculating stress intensity and stress number[J]. Powder Technology, 1999, 105(1/2/3): 382-388.
- [12] KWADE A, SCHWEDES J. Breaking characteristics of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills[J]. Powder Technology, 2002, 122(2/3): 109-121.
- [13] BECKER M, KWADE A, SCHWEDES J. Stress intensity in stirred media mills and its effect on specific energy requirement[J]. Int. J. Miner. Process, 2001, 61(3): 189-208.
- [14] JANKOVIC A. Media stress intensity analysis for vertical stirred mills[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(10): 1177-1186.
- [15] COOKER B, NEDDERMAN R M. Circulation and power consumption in helical ribbon powder agitators[J]. Powder Technology, 1987, 52(2): 117-129.
- [16] RYDIN R W, MAURICE D, COURTNEY T H. Milling dynamics: part 1. attritor dynamics: results of a cinematographic study[J].

- Metallurgical Transactions*, 1993, 24(1): 175–185.
- [ 17 ] DUFFY, S. M. Investigation into the performance characteristics of tower mills[D]. Australia, Queensland: University of Queensland, 1994.
- [ 18 ] STENDER H H, KWADE A, SCHWEDES J. Stress energy distribution in different stirred media mill geometries[J]. *Int. J. Miner. Process*, 2004, 74: 103–117.
- [ 19 ] JANKOVIC A, MORRELL S. Power modelling of stirred mills[C]//Proceedings of the Second UBC-MCGILL BI-Annual International Symposium on Fundamentals of Mineral Processing and the Environment, Sudbury, Ontario, Canada, 1997: 195-208.
- [ 20 ] BLECHER L, KWADE A, SCHWEDES J. Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 1: Energy density distribution and motion of single grinding beads[J]. *Powder Technology*, 1996, 86(1): 59–68.
- [ 21 ] KWADE A, BLECHER L, SCHWEDES J. Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2: Stress intensity and its effect on comminution[J]. *Powder Technology*, 1996, 86(1): 69–76.
- [ 22 ] JAYASUNDARA C T, YANG R Y, GUO B Y, et al. Effect of slurry properties on particle motion in IsaMills[J]. *Minerals Engineering*, 2009(11): 886–892.
- [ 23 ] JAYASUNDARA C T, YANG R Y, YU A B, et al. Effects of disc rotation speed and media loading on particle flow and grinding performance in a horizontal stirred mill[J]. *Int. J. Miner. Process*, 2010, 96(1): 27–35.
- [ 24 ] JAYASUNDARA C T, YANG R Y, YU A B. Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 33: 66–71.
- [ 25 ] SINNOTT M, CLEARY P W, MORRISON R D. Slurry flow in a tower mill[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(2): 152–159.
- [ 26 ] SINNOTT M D, CLEARY P W, MORRISON R D. Is media shape important for grinding performance in stirred mills[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(2): 138–151.
- [ 27 ] R. W. BARLEY, J. CONWAY-BAKER, R. D. Pascoe, et al. Measurement of the motion of grinding media in a vertically stirred mill using positron emission particle tracking (PEPT) Part II [J]. *Minerals Engineering*, 2004, 17(11): 1179–1187.
- [ 28 ] J. CONWAY-BAKER, R. W. BARLEY, R. A. Williams, et al. Measurement of the motion of grinding media in a vertically stirred mill using positron emission particle tracking (PEPT)[J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(1): 53–59.
- [ 29 ] 孙小旭, 卢世杰, 周宏喜, 等. 细磨用KLM立磨机选型试验研究[J]. *铜业工程*, 2018(6): 73–76.  
SUN X X, LU S J, ZHOU H X, et al. Experimental study on selection of KLM vertical mill for fine grinding[J]. *Copper engineering*, 2018(6): 73–76.
- [ 30 ] 孙小旭. GJM型棒式搅拌磨机工业试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2017(3): 66–69.  
SUN X X. Industrial test research on GJM rod stirred mill[J]. *Nonferrous Metals(mineral processing section)*, 2017(3): 66–69.
- [ 31 ] 何建成, 孙小旭, 姚建超, 等. 石墨高效再磨擦洗技术及工业试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2018(2): 78–81.  
HE J C, SUN X X, YAO J C, et al. Study on High efficiency regrinding and washing technology of graphite and industrial test[J]. *Nonferrous Metals(mineral processing section)*, 2018(2): 78–81.

## Research Progress of Wet Fine Grinding Technology

SUN Xiaoxu<sup>1,2</sup>, WANG Dubo<sup>1,2</sup>, YAO Jianchao<sup>1,2</sup>, HE Jiancheng<sup>1,2</sup>

1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. BGRIMM Machinery and Automation Technology Co., Ltd., Beijing 100160, China

**Abstract:** On the basis of introducing the important effect of wet fine grinding technology in the process of fine grinding in the mineral process field, analyzing the wet fine grinding prototype of the screw, rod. Theoretical analysis of energy dissipation, grinding media motion of wet fine grinding and simulation processes and results based on CFD, DEM and PEPT were discussed emphatically. Also, the research progress of wet fine grinding technology and equipment were analyzed. Then, the typical structure research, technical optimization, development and application progress of wet fine grinding technology and equipment were summarized, so as to give a hand to the research and popularization of wet fine grinding technology and equipment. And, they could lay a foundation for the realization of energy-saving and efficient fine grinding and ultra-fine grinding in mineral process industry.

**Keywords:** screw type; disc type; rod type; fine grinding; media motion

引用格式: 孙小旭, 王芑卜, 姚建超, 何建成. 湿式细磨技术研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(6): 174–178.

SUN Xiaoxu, WANG Dubo, YAO Jianchao, HE Jiancheng. Research progress of wet fine grinding technology[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(6): 174–178.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)