球磨机介质运动仿真与优化

崔振强[1]，田万一[1]，汪 群[2]
(1. 湖南大学 机械与运载工程学院，湖南 长沙 410082；2. 营口港船舶燃料供应有限责任公司，辽宁 营口 115000)

摘 要：以某型号球磨机为研究对象，结合离散元软件，建立了球磨机研磨介质的数值仿真模型，通过对比试验验证了数值模拟方法的可靠性。结合仿真方法，通过调节衬板的倾斜角，得到对应的研磨介质的运动特性，并结合研磨介质的运动轨迹、数量分布以及介质接触力不同种类占比的变化，分析研磨介质运动特性受衬板倾斜角调控过程的变化特点。结果表明：在磨矿中通过改变衬板倾斜角调节介质运动时，其倾斜角越小，对介质的提升作用越好；当倾斜角在75°~90°时，介质之间相互作用力占比保持在一个较高的水平值，其磨矿效果较好。

关键词：球磨机；仿真；衬板；研磨介质；运动特性
中图分类号：TD952；TD453 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-8764(2020)04-0061-04
doi：10.13403/j.sjqt.2020.04.056

Simulation and optimization of medium motion of ball mill

Cui Zhenqiang[1], Tian Wanyi[1], Wang Qun[2]
(1. *College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha* 410082, *Hunan*; 2. *Yingkou Port Ship Fuel Supply Co., Ltd., Yingkou* 115000, *Liaoning*)

Abstract Taking a certain type of ball mill as the research object, combined with discrete element software, a numerical simulation model of the ball mill grinding media is established, and its reliability of this numerical simulation method is verified through a comparative test. Combined with the simulation method, by adjusting the inclination angle of the lining board, the corresponding motion characteristics of the grinding medium are obtained. Combined with the movement trajectory, the quantity distribution and the proportion change of different types of medium contact force, the variation characteristics on the motion characteristics of the grinding medium in the process of adjusting the inclination angle of the lining board are analyzed. The results show that, when the medium motion is adjusted by changing the inclination angle of the lining board during grinding, the smaller the inclination angle of the lining board, the better the lifting effect on the medium. When the inclination angle is between 75° and 90°, the proportion of the interaction force between the mediums remains at a high level, which grinding and crushing get better effects.

Key words ball mill; simulation; lining board; grinding medium; kinetic characteristic

球磨机是一种用来进行物料破碎的机械设备，被广泛应用于陶瓷、水泥、矿业行业中进行磨矿作业。随着我国生产力水平的提高，球磨机的应用越来越广泛，每年球磨机磨矿所消耗电量达到全国总耗电量的5%[1-2]。长期以来，球磨机一直存在着耗电量大、工作效率低等问题，关于球磨机的碎磨理论仍处于半经验、半公式阶段，球磨机的磨矿效率与磨机自身结构和填充介质的运动特性息息相关[3]。球磨机衬板是用来提高介质运动能力的一种机械结构，不同的衬板导致球磨机内介质具有不同的运动特性，从而影响球磨机的磨矿效率。在实际磨

收稿日期：2020-05-12
基金项目：矿冶过程自动控制技术国家重点实验室/矿冶过程自动控制技术北京市重点实验室开放研究基金资助项目(BGRIMM-KZSKL-2018-05)
作者简介：崔振强(1995—)，男，硕士研究生，从事球磨机磨矿破碎过程与效率分析方面的研究。
通讯作者：田万一(1982—)，男，副教授，主要从事冶金设备的可靠性分析与研究、冶金设备热过程的节能减排等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

矿作业中，球磨机的磨矿过程保持为一个相对稳定的状态，人们无法实时对磨机内的碎磨作业进行监控和调节。当存在因工况设计不合理等因素而导致磨矿效率低下时，球磨机的磨矿过程无法实时调节，其所产出的物料也无法满足生产要求，这种情况往往造成极大的能源和资源浪费。所以针对球磨机内介质运动受衬板影响的特性，研究衬板在调节研磨介质运动中的作用，对实现球磨机磨矿过程的精确控制具有重要意义。

研磨介质不同的运动规律代表着不同的磨矿状态和磨矿效率。Rogers 等[2]研究了3种球磨机衬板对研磨介质运动特性的影响，阐述了衬板形状对磨矿影响的机理；Meaders 等[3]进一步分析了提升条高度对球磨机内研磨介质运动的影响特性；Vermeulen[4]则从研磨介质的抛落角度分析了提升条的作用。上述球磨机磨矿研究中，尚未涉及衬板在球磨机磨矿中对介质实时控制的研究。在磨矿过程中，若能随时调节衬板来控制介质的运动特性，则能更好地实现磨矿的精确控制，提高球磨机的磨矿效率。

为深入了解球磨机内研磨介质的动态变化规律，更好地实现球磨机磨矿的过程控制，本文以离散元法为理论基础，建立球磨机研磨介质动力学分析模型，并探究衬板倾斜角在磨矿过程中的改变对介质运动的调节规律，为球磨机工作条件的选择以及球磨机的设计、运行提供参考与借鉴。

1 模型的建立

1.1 数学模型

离散元法是专门用来解决不连续介质问题的数值模拟方法，其通过追踪颗粒群的运动特性来宏观显示离散问题的运动规律[5]。随着离散元法的发展，其越来越多地应用于球磨机的磨矿分析上。离散元法集成了许多不同类型的接触模型，不同的接触模型适用不同的计算环境，Hertz-Mindlin(No slip)[6-7]接触模型是应用最广泛的接触模型，它通过颗粒之间接触重叠量的大小定义颗粒之间接触力。颗粒之间的法向力是法向重叠量的函数[8]，切向力取决于切向重叠量和切向刚度[9]，具体计算方法见式(2)、(3)。

$$F_n = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta_n^{\frac{3}{2}} \tag{1}$$

$$F_t = -S_t\delta_t \tag{2}$$

式中：F_n 为法向力，N；δ_n 为法向重叠量，m；F_t 为切向力，N；δ_t 为切向重叠量，m；S_t 为切向刚度，N/m；E^* 为杨氏模量，N/m^2；R^* 为半径，m；其均为当量值，公式定义如下。

$$\frac{1}{E^*} = \frac{(1-V_i^2)}{E_i} + \frac{(1-V_j^2)}{E_j} \tag{3}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j} \tag{4}$$

$$S_t = 8G^*\sqrt{R^*\delta_n} \tag{5}$$

式中：E、V、R 分别是每种颗粒的杨氏模量、泊松比和接触球体的半径(m)；切向刚度(S_t)则由当量剪切模量(G^*，N/m)计算，颗粒之间的法向阻尼力F_n^d和切向阻尼F_t^d按照如下方式计算:

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*}\,V_n^{\overrightarrow{rel}} \tag{6}$$

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*}\,V_t^{\overrightarrow{rel}} \tag{7}$$

式中：m^* 为颗粒接触模型的当量质量，kg；$V_n^{\overrightarrow{rel}}$和$V_t^{\overrightarrow{rel}}$分别是相对速度的法向分量和切向分量；$S_n$ 为法向刚度，N/m，$S_n = 2E^*\sqrt{R^*\delta_n}$；$\beta = \frac{lne}{\sqrt{ln^2e+\pi^2}}$，其中，$e$ 是恢复系数。

接触模型中还通过在接触表面施加1个力矩来考虑颗粒接触中的滚动摩擦。

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i \tag{8}$$

式中：μ_r 是滚动摩擦系数；R_i 是接触点到质心的距离，m；ω_i 是颗粒在接触点处的角速度矢量，rad/s。

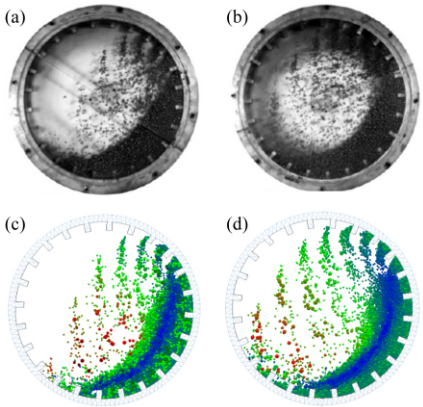
1.2 仿真方法验证

离散元数值分析的准确性体现在介质的宏观运动规律上，因此颗粒数值模拟参数的选择就显得尤为重要，适当的参数能够更为准确地反映球磨机介质的运动特性。在数值分析中，由于介质仿真环境与真实环境存在一定的差别、真实环境介质颗粒的形状差异以及材料的不均

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

匀性等，使得模型无法直接使用真实的接触参数。因此，在离散元方法中通常会结合材料实际参数值，在软件内对仿真参数进行试验标定，并最终获得较为符合的数值仿真参数。

为使球磨机磨矿结果更符合实际过程，借助两组不同转速率(55%，70%)的试验结果来验证仿真参数的可靠性。图 1 为所进行的仿真结果与试验结果的对比。由图 1 可看出：仿真结果中研磨介质的抛落与堆积等宏观运动状态与试验结果相符合，说明所采用仿真方法能够很好地模拟球磨机的磨矿运动规律。



转速率：(a) 55%(仿真)；(b) 70%(仿真)；(c) 55%(试验)；(d) 55%(试验)

图 1　仿真结果与试验结果的对比[10]

2　仿真结果分析

球磨机磨矿过程始终伴随着物料的粉粹，球磨机从启动时刻开始逐渐进行粉粹作业，最终达到一个稳定的磨矿状态，并保持这种状态。然而在设计球磨机磨矿工况参数时，工程师们无法直接得出球磨机的最优工况参数，复杂的工作环境也导致实际效率低于理想设计效率。这说明球磨机磨矿效率仍存在可提高的空间，如果能结合磨矿状态判断球磨机磨矿效率的高低，并通过改变工况对磨矿状态进行实时调节，那么就能极大程度地提高球磨机的磨矿效率，使球磨机工作始终处于高效率状态。

根据上述分析，可以对球磨机工况参数进行调节来提高球磨机的磨矿效率。球磨机的工况参数通常有介质填充率、介质大小、衬板高度及角度等。然而一些参数如介质填充率、介质大小等无法实现实时调节，由于衬板安装在筒体上，因此可以利用机械结构改变衬板的角度来调节球磨机的磨矿状态，同时还可以利用控制系统改变球磨机转速来调节球磨机的磨矿状态。本文结合实际经验，选取衬板提升条角度为研究对象，来分析该因素的变化对球磨机内研磨介质控制的效果。

采用直径为 7.3 m 的大型球磨机，为方便分析，添加 1 种研磨介质，介质粒度为 100 mm。为探究衬板对研磨介质的调控能力，根据经验设置 5 种工况，衬板倾斜角(α)变化范围为 60°～120°，相邻两衬板倾斜角之差为 15°。图 2 为球磨机衬板倾斜角示意。

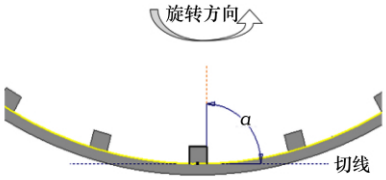
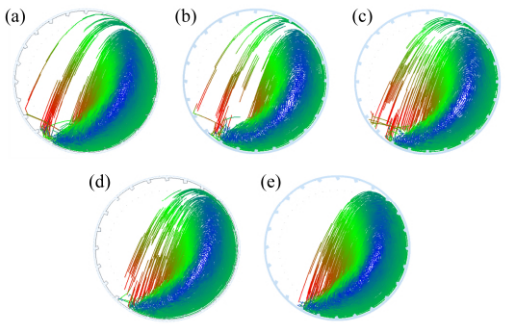


图 2　球磨机衬板倾斜角

图 3 为介质群达到稳定状态下的运动轨迹。由图 3 可知：随着衬板倾斜角逐渐增大，其对研磨介质的提升作用也逐渐减弱，研磨介质的抛射距离逐渐变短；衬板倾斜角越小，研磨介质抛落越远，介质的抛落速度越大；倾斜角为 60°时，一部分速度较大的介质落点超过了底部物料的活动范围并砸向筒壁，该部分介质并没有对物料产生冲击作用；而在衬板倾斜角为 120°时，其理论速度比倾斜角为 60°时低，但所有研磨介质的轨迹落点均在底部的介质活动区上，这说明了仅通过研磨介质的运动速度并不能完全体现球磨机的磨矿效率。



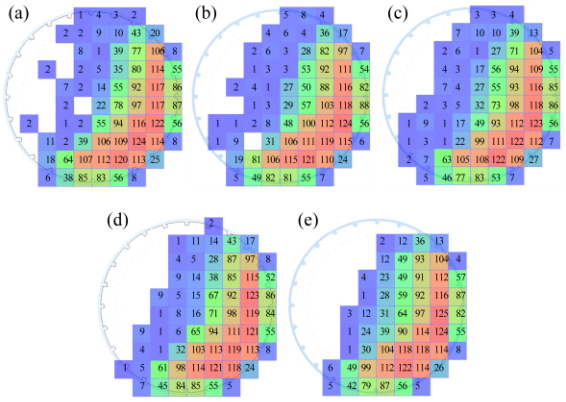
倾斜角：(a) 60°；(b) 75°；(c) 90°；(d) 105°；(e) 120°

图 3　不同的衬板倾斜角所对应的研磨介质的运动轨迹

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

此外，球磨机内部填充的研磨介质对矿石物料的冲击作用加速了物料的粉碎过程，这表示在冲击物料时，研磨介质的速度越大，其对矿石的粉碎效果越好。

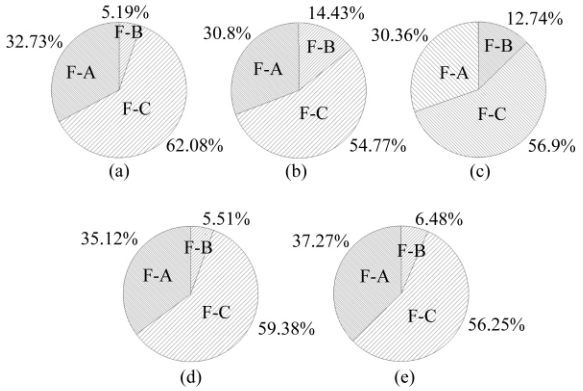
为进一步探究衬板对研磨介质运动的控制能力，对球磨机的磨矿区域进行网格划分，统计在稳定状态下每个网格内研磨介质的数量，如图 4 所示。由图 4 可知：贴近筒壁并一起爬升的区域部分(红色(浅色)区域)的介质数量基本不会受衬板角度的影响，而从最高点落下的区域部分(蓝色(深色)区域)介质的数量会随着衬板角度的增加而减少。结合图 3、4 可以看出，磨矿中速度较高的研磨介质数量仅占总数量的小部分，该部分研磨介质受衬板影响较大，其余部分研磨介质受衬板倾斜角的影响较小。



倾斜角：(a) 60°；(b) 75°；(c) 90°；(d) 105°；(e) 120°

图 4 研磨介质的数量分布

研磨介质的作用力代表了其磨矿能力的大小，5 种不同衬板倾斜角对应的磨矿中不同类型的接触法向力分布如图 5 所示。由图 5 可知：介质与筒壁、介质与衬板之间的接触总力占介质接触总力的 90% 左右，这说明球磨机磨矿中物料粉碎主要发生在筒壁和衬板附近，同时也说明球磨机的磨损也较大；衬板倾斜角的变化对介质与衬板和介质与筒壁的接触力分布影响较小，而对介质与介质之间的接触力分布影响较大。介质之间相互作用越多，说明磨矿有效碰撞次数越多，磨矿效果越好。在随着衬板倾斜角从 60°～120°的变化过程中，介质与介质之间接触力占比先升高再降低，这说明衬板倾斜角过高或过低都会使研磨介质之间的接触作用降低，当衬板倾斜角在 75°～90°时介质自身接触力的占比较高。



衬板倾斜角：(a) 60°；(b) 75°；(c) 90°；(d) 105°；(e) 120°

接触类型：F-A—介质与介质；F-B—介质与筒壁；F-C—介质与衬板。

图 5 法向力分布

3 结 论

本文运用离散元方法，通过建立数学模型和仿真方法对球磨机研磨介质的运动过程进行模拟，通过改变衬板倾斜角分析衬板对研磨介质运动的调节能力，得到如下结论。

(1) 衬板倾斜角越小，其对介质的提升作用越好，反之对介质的提升作用越弱，介质被抛射越近。根据研磨介质的数量分布得出，抛射较远的研磨介质受衬板的影响程度越大。

(2) 衬板倾斜角过高或过低均会使研磨介质自身的相互作用力占比降低，而当倾斜角在 75°～90°时，介质之间的相互作用力占比保持在一个较高的水平，该情况下的磨矿效果较好。

参考文献

[1] 吴桂义. 球磨机介质离散传热及热力破碎特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2019.

[2] 陶伟平. 矿石筛分与粉碎系统工艺流程的优化和改进[J]. 烧结球团,2019,44(4):51－56.

[3] 李文亮,杨涛,于向军,等. 国外大型球磨机发展现状[J]. 矿山机械,2007(1):13－15;4.

[4] Rogers R S C,Shoji K,Hukki A M,et al. The effect of liner design on the performance of a continuous wet ball mill[C]// Proceedings of the XIV International Mineral Processing Congress. Stockholm: Elsevier Science Publichers,1988.

(下转第 76 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

BrØnsted 酸性位点，水洗再生可以恢复 Lewis 酸性位点对 NH_3 的吸附能力。

(3) 负载 Na_2SO_4 和 K_2SO_4 会造成催化剂表面活性物质 V 的还原性降低，水洗可以恢复 V 的还原性，但还原峰面积明显减小，这可能是催化剂降解 CB 活性未能较好恢复的原因。

参考文献

[1] Qian L X, Chun T J, Long H M, et al. Emission reduction research and development of PCDD/Fs in the iron ore sintering [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018(117): 82 - 91.

[2] 周茂军，张代华. 宝钢烧结烟气超低排放技术应用及分析 [J]. 烧结球团，2019，44(3)：58 - 63.

[3] 纪光辉. 烧结烟气超低排放技术应用及展望 [J]. 烧结球团，2018，43(2)：59 - 63.

[4] 钱立新，龙红明，吴雪健，等. 铁矿石烧结过程中的二噁英检测方法研究 [J]. 环境污染与防治，2016，38(6)：34 - 38.

[5] 龙红明，李家新，王平，等. 尿素对减少铁矿烧结过程二恶英排放的作用机理 [J]. 过程工程学报，2010，10(5)：944 - 949.

[6] Long H, Wu X, Chun T, et al. Mechanism of Selective Desulphurization in Iron Ore Sintering Process by Adding Urea [J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36(2): 183 - 188.

[7] 谈琰，戴帆，李咸伟，等. 碳酰肼对烧结过程二噁英生成的抑制作用 [J]. 环境污染与防治，2012(5)：48 - 53.

[8] Zhang Y D, Buekens A, Liu L N, et al. Suppression of chlorinated aromatics by nitrogen and sulphur inhibitors in iron ore sintering [J]. Chemosphere, 2016(155): 300 - 307.

[9] 李惠莹，王浩，金保昇. 浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势 [J]. 烧结球团，2018，43(1)：61 - 65.

[10] 潘文，焦光武，高新洲，等. 烧结大烟道烟气循环利用合理的循环烧结面积控制研究 [J]. 烧结球团，2016，41(4)：49 - 53.

[11] Long H, Shi Q, Zhang H, et al. Application status and comparison of dioxin removal technologies for iron ore sintering process [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2018, 25(4): 357 - 365.

[12] 李强. 太钢烧结烟气二恶英减排技术应用及分析 [J]. 环境工程，2013，31(4)：93 - 96.

[13] 李国喜，王红斌. 太钢烧结烟气活性炭净化工艺的选择及应用 [C]//2013 年全国烧结烟气综合治理技术研讨会. 大同：中国金属学会，2013.

[14] 赵利明，陈海波. SCR 烟气脱硝技术在宝钢股份 4# 烧结机的应用 [J]. 烧结球团，2018，43(6)：29 - 33.

[15] 孟庆立，李昭祥，杨其伟，等. 台湾中钢 SCR 触媒在烧结场脱硝与脱二噁英中的应用 [J]. 武汉大学学报(工学版)，2012，45(6)：751 - 756.

[16] 朱德庆，石玥，潘建，等. 含锌杂料球团金属化烧结实验研究 [J]. 钢铁研究学报，2018，30(11)：866 - 873.

[17] Yan M, Li X D, Chen T, et al. Effect of temperature and oxygen on the formation of chlorobenzene as the indicator of PCDD/Fs [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, 22(10): 1 637 - 1 642.

[18] Kong M, Liu Q C, Zhou J, et al. Effect of different potassium species on the deactivation of V_2O_5-WO_3/TiO_2 SCR catalyst: Comparison of K_2SO_4, KCl and K_2O [J]. Chemical Engineering Journal, 2018(348): 637 - 643.

[19] 高凤雨，唐晓龙，易红宏，等. 商用 SCR 催化剂的钠中毒及再生 [J]. 中南大学学报(自然科学版)，2015，46(6)：2 382 - 2 390.

[20] Chen L, Li J H, Ge M F. The poisoning effect of alkali metals doping over nano V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalysts on selective catalytic reduction of NO_x by NH_3 [J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 170(2 - 3): 531 - 537.

[21] 熊丽仙，沈伯雄，杨晓燕，等. 纳米负载型 V_2O_5-WO_3/TiO_2 催化剂碱及碱土金属中毒 [J]. 环境化学，2010，29(4)：690 - 695.

(上接第 64 页)

[5] Meaders R C, Macpherson A R. Technical design of autogenousmills [J]. Mining Engineering, 1964(16): 81 - 83.

[6] Vermeulen L A. The lifting action of lifter bars in rotary mills [J]. Journal of The South African Institute of Mining & Metallurgy, 1985, 85(2): 51 - 63.

[7] 郑培，宋文绯，胡雄. 斗轮堆取料机塌料工况下挖掘阻力的 EDEM 仿真 [J]. 烧结球团，2019，44(6)：50 - 54.

[8] Tsuji Y, Tanaka T, Ishida T. Lagrangiannumerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizonalpipe [J]. Powder Technology, 1992, 71(3): 239 - 250.

[9] Sakaguchi H, Ozaki E, Igarashi T. Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo [J]. International Journal of Modern Physics B, 1993, 7(9 - 10): 1 949 - 1 963.

[10] Hertz H. On the contact of elastic solids [J]. Journal Für Die Rne und Angewandte Mathematik (Crelles Journal), 1981(92): 156 - 171.

[11] Mindlin R D, Deresiewicz H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces [J]. J. Aappl. Mech., 1953, 20(3): 327 - 344.

[12] 李同清. 球磨机矿磨介质动力学行为研究 [D]. 徐州：中国矿业大学，2018.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net