

文章编号:0253-9993(2012)04-0678-05

煤矸颗粒在鼠笼式选择性分离装备中的动力学行为模拟

徐龙江

(中国矿业大学 机电工程学院,江苏 徐州 221008)

摘要:为研究鼠笼式选择性分离装备在不同滚筒结构情况下对煤矸破碎程度的影响,在软球模型的基础上利用颗粒流二维程序 PFC^{2D} 建立了分离装备的离散元模型,并对颗粒在不同滚筒结构情况下的动力学行为进行模拟分析。结果表明:滚筒上均匀布置破碎杆数量为 6 时煤矸破碎程度适中,破碎杆数量为 9 时难以完成煤矸的破碎,而破碎杆数量为 3 时煤矸过度破碎。通过实验和模拟结果对比表明:实验结果与模拟分析结果相一致。

关键词:煤矸颗粒;动力学行为;软球模型;离散元法

中图分类号:TD454 **文献标志码:**A

Dynamic behavior simulation of coal-gangue particles in squirrelcage selectivity separation equipment

XU Long-jiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: In order to investigate crushing degree of coal-gangue with different roller structure by squirrelcage selectivity separation equipment, a discrete element model was established with particle flow code in two dimensions (PFC^{2D}) based on soft ball model, and dynamic behaviors of coal-gangue particles were simulated and analysed with different roller structures. The result shows that crushing degree of coal-gangue is moderate with 6 broken rods. Coal-gangue can not break with 9 broken rods, and coal-gangue may severely break with 3 broken rods. It is shown by the comparisons between numerical results and experimental data that they have good consistency.

Key words: coal-gangue particle; dynamic behavior; soft ball model; discrete element method

井下煤矸分选实现矸石井下填充对减少矸石上井对地面环境的污染有重要的意义^[1-2]。由于煤矸物理性质差异,煤和矸石冲击破碎时极限速度不同^[3],在一定冲击速度情况下煤的破碎程度要大于矸石^[4]。鼠笼式选择性分离装备在工作参数一定的条件下,滚筒结构对煤矸破碎程度的影响很大,通过对煤矸颗粒在装备中动力学行为分析可以预测煤矸的破碎程度,使煤破碎程度适中而矸石少破碎以便于进一步分选。然而煤矸颗粒在分离装备中频繁地发生碰撞,且运动的随机性很大,难以通过实验方法来监测颗粒在分离装备中的动力学行为。利用离散单

元法可以对颗粒碰撞过程中的位置、速度变化等参数进行监测^[5]。Cundall 等^[6]首先以牛顿第二定律为基础提出了适合岩土力学的离散元法;Walton 等^[7]利用离散元法研究散体流动并推动了离散元法在散体力学中的应用;Moakher 等^[8]模拟了离心滚动机中颗粒群体的混合和分离的力学行为;赵啦啦等^[9-10]利用三维离散元法对直线振动筛的筛分过程进行了模拟。本文在软球接触模型理论的基础上,利用颗粒流二维程序 PFC^{2D} 建立了分离装备的离散元模型,并对不同滚筒结构情况下煤矸颗粒在分选装备中的动力学行为进行分析研究,以预测煤破碎程度和指导滚筒结构

收稿日期:2012-02-13 责任编辑:张晓宁

基金项目:国家科技部中小企业创新基金资助项目(10C26213200925);江苏省科技支撑资助项目(BE2011643)

作者简介:徐龙江(1968—),男,江苏徐州人,高级工程师,博士研究生。E-mail:lj6828@126.com

的改进。

1 颗粒接触模型

离散元法是通过跟踪颗粒群中颗粒每一时刻的位置、速度以及接触力进行跟踪来达到模拟颗粒动力学行为的数值模拟方法。离散元法中常用的模型有硬球模型和软球模型。由于硬球模型未考虑颗粒间的碰撞过程,因此硬球模型不适宜处理颗粒群的碰撞行为,故本文采用软球来处理煤矸颗粒的碰撞行为^[11]。软球接触模型是采用微分形式的牛顿运动方程,其假设颗粒碰撞过程中形状保持不变,但颗粒间有一定的重叠量,如图1所示, δ 为颗粒间的法向重叠量,重叠量的大小直接影响颗粒的动力学行为。

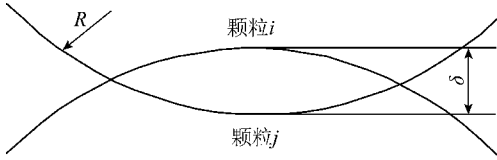


图1 软球模型中颗粒叠加示意

Fig. 1 Particles superposition in soft ball model

软球模型主要由弹簧、阻尼器、耦合器以及滑动阻尼器等组成,如图2所示。颗粒间的相互碰撞作用时,法向弹簧模拟颗粒的变形,法向阻尼模拟颗粒间相互碰撞的阻尼因素影响,滑动阻尼器模拟颗粒间滑动摩擦力的影响。利用软球模型考虑煤矸颗粒之间的相互碰撞,不仅能够监测动态颗粒的运动和位置参数,还可以求出颗粒碰撞过程中的接触力。影响颗粒动力学行为的参数主要有:弹簧刚度 k 、阻尼系数 η 和摩擦系数 f 。

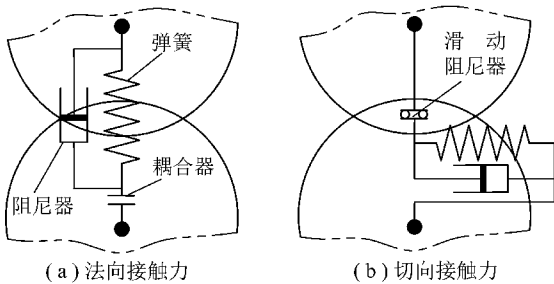


图2 软球模型

Fig. 2 Soft ball model

颗粒碰撞过程中颗粒的法向力 F_{ij}^n 可以分解为是法向弹簧力和阻尼力两部分,又根据 Hertzian 接触理论可知法向力与重叠量的 1.5 次方成线性关系,则 F_{ij}^n 可以表示为

$$F_{ij}^n = (-k_n \delta_n^3 - \eta_n v_{ij} n_c) n_c \quad (1)$$

式中, k_n 为法向弹簧刚度系数,N/mm; η_n 为法向阻尼系数; δ_n 为颗粒与颗粒的法向重叠量,mm; v_{ij} 为颗

粒 i 和颗粒 j 的相对碰撞速度,mm/s; n_c 为颗粒 i 圆心到颗粒 j 圆心的单位矢量。

切向力由切向弹簧的弹性力和切向阻尼的阻尼力两部分组成, F_{ij}^t 可以表示为

$$F_{ij}^t = -k_t \delta_t - \eta_t v_t \quad (2)$$

式中, k_t 为切向弹簧弹性系数; η_t 为切向阻尼系数; δ_t 为接触点的切向重叠量,mm; v_t 为接触点的滑移速度,mm/s。

颗粒在碰撞过程中还发生了滑动,则切向接触力 F_{ij}^t 表示为

$$F_{ij}^t = -\mu |F_{ij}^n| t \quad (3)$$

式中, μ 为静摩擦系数; t 为切向单位矢量, $t = v_t / |v_t|$ 。

模拟过程中,每隔一个时间步长 Δt ,颗粒群中的所有颗粒进行一次扫描,计算颗粒的速度、位置等参数。当颗粒发生碰撞时计算出颗粒的法向重叠量 δ_n 和切向重叠量 δ_t ,进而求出颗粒碰撞时的合力大小 F ,然后计算该步长后颗粒的位置和速度参数等,计算方法如下:

$$\begin{aligned} \delta_n &= \int (v_{ij} n_c) n_c dt \\ \delta_t &= \int v dt \\ \Delta v_x &= F_x \Delta t / m \\ \Delta v_y &= F_y \Delta t / m \\ \Delta X &= v_x \Delta t \\ \Delta Y &= v_y \Delta t \end{aligned} \quad (4)$$

式中, v 为颗粒的滑移速度; $\Delta v_x, \Delta v_y$ 为颗粒在 x, y 方向上的速度增量; F_x, F_y 为颗粒在 x, y 方向上受到的力; $\Delta X, \Delta Y$ 为颗粒在 x, y 方向上的位移增量; v_x, v_y 为颗粒在 x, y 方向上的速度; m 为颗粒的质量。

由以上分析可知,在时间步长 Δt 内颗粒求出颗粒群体中任一颗粒的位置、速度和受力情况,依此监测每一时间步长 Δt 内颗粒的运动速度、位置以及接触力等,即可模拟颗粒在分离装备中的动力学行为。

2 分离装备的离散元模型

鼠笼式选择性分离装备结构如图3(a)所示,其主要由破碎滚筒、壳体等组成。为了真实再现煤颗粒在分离装备运动状态,根据分离装备的实际结构参数,利用颗粒流二维程序 PFC^{2D} 内置 Fish 语言程序对分离装备进行建模。滚筒上均匀布置一定数目的破碎杆,滚筒1结构如图3(b)所示。本文3种不同结构滚筒上分别均匀布置9,6和3根破碎杆记为滚筒1,2和3。

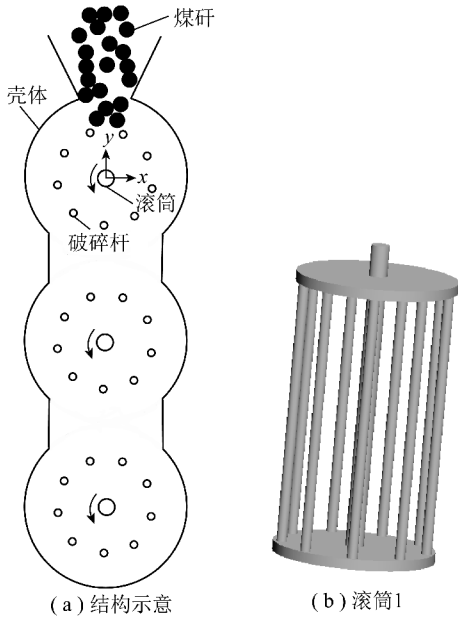


图3 鼠笼式选择性煤矸分离装备
Fig. 3 Squirrelcage selectivity separation equipment for coal and gangue

离散元模型中的煤颗粒采用软球接触模型,破碎滚筒以及壳体均采用线性接触模型,在不影响模拟分析的情况下忽略装备次要的结构特征。煤颗粒以及装备的物理参数见表1。

表1 煤颗粒以及装备的物理参数

Table 1 Physical parameters of coal and equipment

项目	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	弹性模 量/GPa	摩擦系数
煤	1 300	0.2	4.60	0.6
装备	7 800	0.3	206.00	0.4

3 颗粒的动力学行为分析

3.1 颗粒的运动轨迹分析

煤在选择性破碎分离过程中频繁的发生碰撞,不同滚筒结构情况下颗粒的运动轨迹各不相同,对其运动轨迹进行监测、分析,在一定程度上可以预测颗粒群体在分离装备中的碰撞程度。在滚筒转速为 657.8 r/min 情况下随机生成 20 个直径为 80 mm 的煤颗粒,利用离散元法对不同结构滚筒情况下颗粒的碰撞过程进行模拟,并对群体中某颗粒的运动轨迹进行监测,其运动轨迹如图4所示。

由图4(a)可知,此种结构情况下煤颗粒主要在破碎滚筒与左侧壳体之间不断发生碰撞,此时由于装备自身结构限制了颗粒与破碎杆碰撞时的重叠量,导致煤难以得到有效的冲击破碎。图4(b)为滚筒2情

况下煤颗粒在分离装备中的运动轨迹,与图4(a)相比较,颗粒在此种结构下运动区域更大,煤颗粒主要在破碎滚筒和壳体左右侧之间不断碰撞,由于滚筒上破碎杆数量相对减少,必然使颗粒与破碎杆碰撞时重叠量加大而导致煤能够得到有效的冲击破碎,并且大部分煤颗粒破碎后可以顺利的向下端的出料口处运动。鉴于井下煤矸破碎分离要求,煤不能过度破碎而影响使用价值,故此种结构下煤的破碎效果较滚筒1好。图4(c)为滚筒3情况下煤颗粒在分离装备中的运动轨迹,由于滚筒3上破碎杆数量太少导致颗粒在滚筒内部穿越的概率增大,进而导致颗粒在装备内发生剧烈碰撞使煤过度破碎,此时破碎后的煤也不易从出料口下落。

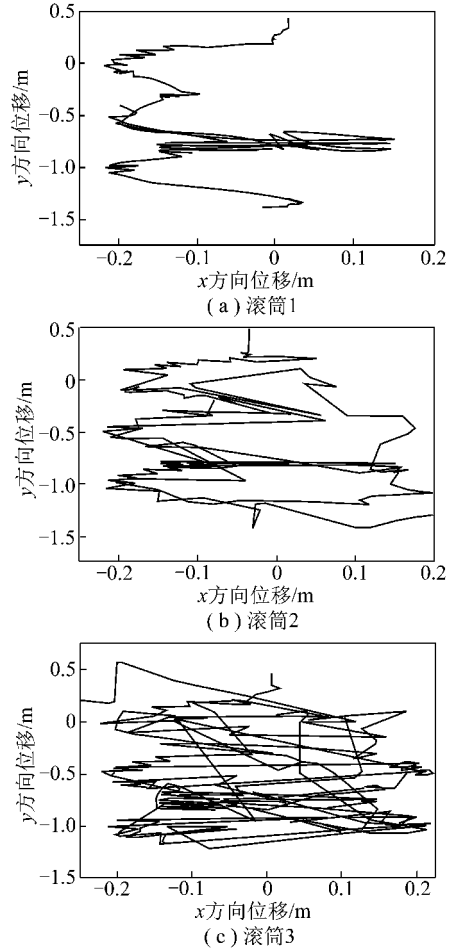


图4 颗粒运动轨迹
Fig. 4 Particle trajectory

3.2 颗粒运动速度分析

利用分离装备冲击破碎煤矸时,颗粒与破碎杆的重叠量与滚筒的转速和结构有关,又由于颗粒在分离装备内频繁地碰撞,难以通过理论方法对碰撞过程中的速度进行求解。对颗粒运动速度分析可知颗粒在分离装备中碰撞的剧烈程度以对煤矸的破碎效果进行预测。同样,在滚筒转速为 657.8 r/min 情况下随

机生成 20 个直径为 80 mm 的煤颗粒,利用离散元法对不同结构滚筒情况下某颗粒的速度进行监测,如图 5 所示。由图 5(a)可知,颗粒在分离装备中多次发生碰撞,但颗粒速度幅值较小,难以完成破碎。图 5(b)为破碎滚筒 2 情况下颗粒的速度变化,颗粒在分离装备中也发生多次碰撞,但与图 5(a)相比较,颗粒速度幅值较大,即颗粒受到有效的冲击破碎。图 5(c)为滚筒 3 情况下的速度变化,可见颗粒速度幅值与滚筒 2 结构情况下相近,说明颗粒的速度幅值并不随破碎杆数的减少而线性增大。由于滚筒 3 的破碎杆数量较少,则颗粒速度最大时必然是与破碎杆发生了正向对心碰撞,也间接说明滚筒 2 结构情况下也可以实现破碎杆对煤矸颗粒的正向冲击。对比图 4(c)和 5(c)说明滚筒 3 可以完成煤矸的有效冲击,但破碎后的煤矸粒度很小导致使用价值下降。

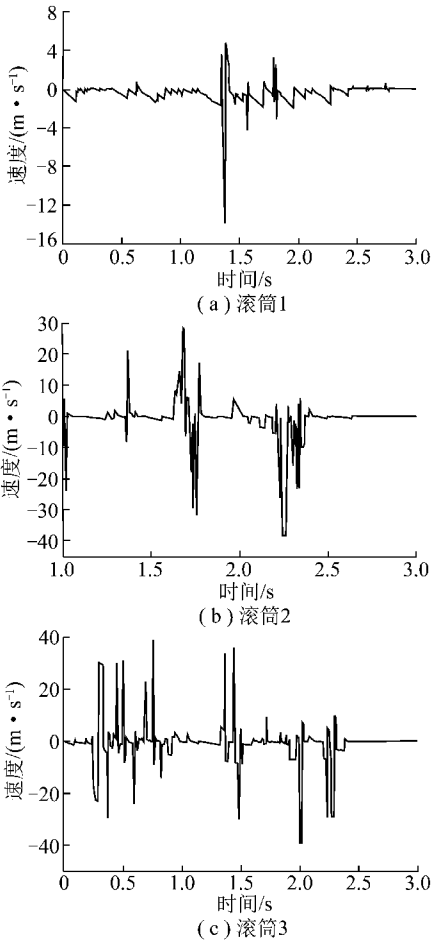


图 5 颗粒的运动速度

Fig. 5 Velocity of the particle

从以上模拟分析可知:滚筒 3 虽然能够使煤得到有效的破碎,但破碎后的煤粒度过小导致使用价值降低;滚筒 1 由于自身结构的限制难以对煤进行有效地冲击破碎;滚筒 2 能够使煤的破碎程度适中,便于进一步进行煤的分选。

4 实验验证

为了进一步验证模拟分析结果是否正确,在模拟条件相同的情况下利用分离装备对一定质量的煤进行破碎,破碎完成后对煤进行粒度分级处理。破碎后不同粒径范围内煤的质量分数如图 6 所示。

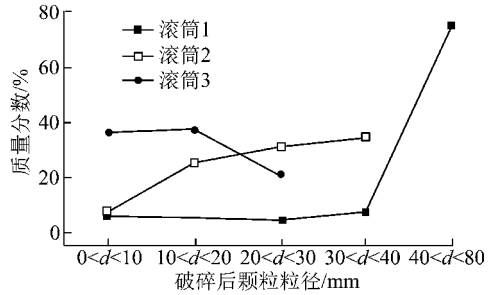


图 6 不同粒径范围内煤的质量分数

Fig. 6 Proportion of coal in different particle size range after crushing

从图 6 可见滚筒 1 结构情况下煤破碎后粒度在 40 ~ 80 mm 的占 75.1%。由于实际中认为破碎后粒度小于破碎前粒度一半为有效破碎,即破碎滚筒 1 未能对煤进行有效破碎。在破碎滚筒 3 结构情况下,虽然煤破碎后的粒度均在 30 mm 以下,但颗粒小于 10 mm 的占 38.7%,其使用价值降低,而此时矸石的破碎率可能也较大,故该结构情况下煤矸选择性破碎效果也不理想。在破碎滚筒 2 结构情况下,煤破碎后的粒度主要集中在集中在 20 ~ 40 mm,占 90.5%,而颗粒小于 10 mm 仅占 7.3%,不影响使用价值且便于分选,故破碎效果较好。根据以上分析可知,通过对颗粒动力学行为的分析预测煤矸破碎效果与实验得到的结果相一致,说明利用离散元法对分离装备中颗粒动力学行为模拟预测煤破碎程度和指导装备结构改进是可行的。

5 结 论

(1) 基于软球接触模型建立了鼠笼式选择性分离装备的离散元模型,并对颗粒在分离装备中的动力学行为进行模拟分析,颗粒的运动轨迹和速度变化与分离装备的结构相关。

(2) 对不同滚筒结构情况下,煤颗粒在分离装备中动力学行为进行分析,结果表明采用破碎滚筒 2 能够使煤在不影响使用价值的情况下得到有效的破碎,便于进一步分选。

(3) 通过实验对不同结构情况下煤破碎后粒度进行分析,验证了利用分离装备内颗粒动力学行为预测其破碎效果的正确性,也进一步说明利用离散元法

对颗粒动力学行为进行监测、分析可以预测煤破碎效果和指导装备结构的优化改进。

参考文献:

- [1] 马立强,李永升. 煤矿井下矸石置换煤炭清洁生产技术[J]. 煤炭学报,2010,35(5):816-819.
Ma Liqiang, Li Yongsheng. The clean production technology of replacement of coal gangue in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5): 816-819.
- [2] 缪协兴,张吉雄,郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报,2010,35(1):1-6.
Miao Xiexing, Zhang Jixiong, Guo Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [3] 刘 瑜,杜长龙,付 林,等. 煤块冲击破碎速度研究[J]. 振动与冲击,2011,30(3):18-21.
Liu Yu, Du Changlong, Fu Lin, et al. Impact crushing velocity of lump coal[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 18-21.
- [4] Li Jianping, Du Changlong, Bao Jianwei. Direct impact of sieving coal and gangue [J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(4):611-614.
- [5] 仇 轶,由长福,祁海鹰,等. 用 DEM 软球模型研究颗粒间的接触力[J]. 工程热物理学报,2002,23(6):197-200.

- Qiu Yi, You Changfu, Qi Haiying, et al. Studying of contact forces among particles with the DEM model [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2002, 23(6): 197-200.
- [6] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [7] Walton O R. Particle dynamics modeling of geological material [R]. USA: Lawrence Livermore Lab, 1980.
- [8] Moakher M, Shinbrot T, Muzzio F J. Experimental validated computations of flow, mixing and segregation of non-cohesive grains in 3D tumbling blenders [J]. Powder Technology, 2000, 109(1-3): 58-71.
- [9] 赵啦啦,刘初升. 颗粒筛分过程的三维离散元法模拟[J]. 煤炭学报,2010,35(2):307-311.
Zhao Lala, Liu Chusheng. Numerical simulation of particle screening process based on 3D discrete element method [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2): 307-311.
- [10] Zhao Lala, Zhao Yumin, Liu Chusheng. Simulation of the screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM [J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(5): 677-680.
- [11] 孙其诚,王光谦. 颗粒流动力学及其离散元模型评述[J]. 力学进展,2008,38(1):87-100.
Sun Qicheng, Wang Guangqian. Review on granular flow dynamics and its discrete element method [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(1): 87-100.

2012 年《煤炭学报》征订启事

《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的、向国内外发行的煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科学研究成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》刊载的论文具有较高的学术价值和文献收藏价值,被 Ei、IEA Coal Abstract CD-ROM、中国科学引文数据库、科学技术文摘速报(日本)、Coal Highlights、中国学术期刊文摘等国内外 20 多种重要文摘检索系统所收录。1992 年荣获首届全国优秀科技期刊评比二等奖,获中国科学技术协会优秀学术期刊二等奖,获北京市新闻出版局、北京市科学技术期刊编辑学会全优期刊奖。1996 年荣获第二届全国优秀科技期刊评比一等奖,获中国科学技术协会优秀科技期刊一等奖。1999 年荣获首届国家期刊奖。2004,2007,2010,2011 年分别入选第三、第六、第九和第十届“百种中国杰出学术期刊”。2008,2011 年荣获“中国精品科技期刊”称号。2009 年荣获“新中国 60 年有影响力的期刊”称号。

《煤炭学报》深受广大作者、读者的爱护和支持,也受到各级部门的重视,在学术水平上具有较高的地位,很多单位都将在《煤炭学报》发表的论文作为作者学术水平考核指标之一。

《煤炭学报》为月刊,每期 176 页,每册订价 58 元,全年共收费 696 元。欲订者可直接与本编辑部联系,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-804 联系人:毕永华

E-mail:mtxbbyh@126.com