

球团流与球流在球床内的混合卸料特性研究

葛良¹, 桂南^{1,*}, 杨星团¹, 屠基元^{1,2}, 姜胜耀¹

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;

2. 皇家墨尔本理工大学 工程学院, 澳大利亚 墨尔本 3083)

摘要:为更好地了解球床中球团与单球的双组分体系的流动特性,本文采用离散单元法模拟分析了球床中球团与单球二元混合颗粒材料的卸料特性。球团由3个粘接的单球通过刚性bond组合而成,形成60°、90°、120°和180°夹角。不同数量占比的球团和单球从球床底部的卸料口混合卸出,定量分析了球团组合夹角和球团数量占比对球床双组分混合球流流动特性的影响。研究结果表明,球团的存在会降低卸料速率,定量分析该降低程度与球团的粘接夹角及球团数量占比的关系后,发现卸料速率与二者均存在一定负相关性,即卸料速率随球团夹角及球团数量占比的增加而减小。

关键词:球床;球流;球团;双组分颗粒流;组合角;数量占比

中图分类号:TL333

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2020)02-0235-07

doi:10.7538/yzk.2019.youxian.0175

Binary Mixture Discharging Characteristics of Pebble Cluster Flow and Pebble Flow in Pebble Bed

GE Liang¹, GUI Nan^{1,*}, YANG Xingtuan¹, TU Jiyuan^{1,2}, JIANG Shengyao¹

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Engineering, RMIT University, Melbourne VIC 3083, Australia)

Abstract: In order to better understand the flow features of binary mixtures in pebble bed which is composed of pebble clusters and pebbles, discharging characteristics of the binary mixture material of pebble cluster and pebbles were simulated by DEM. The pebble cluster was composed of three particles connected by rigid bonds, forming angles of 60°, 90°, 120° and 180° and being discharged from the discharging hole at the bottom of pebble bed with different number fractions. The discharging characteristics of pebble clusters and pebbles of different number fractions and included angles were quantified. The results show that the existence of pebble clusters can reduce the discharging rate, and the degree of reduction is negatively correlated with the increase of the included angles and the number fraction of pebble clusters. When the included angle and the

收稿日期:2019-03-19;修回日期:2019-05-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51576211)

作者简介:葛良(1990—),男,湖南岳阳人,博士研究生,核能科学与工程专业

*通信作者:桂南, E-mail: guinan@mail.tsinghua.edu.cn

网络出版时间:2019-08-28;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190827.1011.002.html>

number fraction of pebble clusters increase, the discharging rate reduces.

Key words: pebble bed; pebble flow; pebble cluster; binary mixture particle flow; included angle; number fraction

世界上现在运行的模块化高温气冷实验堆(HTR-10)是由清华大学研制的,于2003年成功发电。得益于球床式堆芯的设计,高温气冷堆堆芯产生的“溢出热量”能自发向环境中排放^[1],即使发生人为事故和遇到不可抗力天灾,在冷却剂无法循环工作的情况下,堆芯最高温度也不会超过安全限值,且可自发停止运行^[2]。因此球床式高温气冷堆安全性高,被认为是希望满足第四代核能系统要求的堆型。

在HTR-10堆芯球床内,堆芯是由相同直径的燃料球组成的重力驱动下缓慢的稠密颗粒流。本课题组已对等直径的球流运动特性开展了多年的研究,如建立了与实际堆芯尺寸比例为1:5的二维可视化球流实验装置^[3-4],在此基础上结合离散单元法(DEM)开发了对应的计算模拟程序^[5],发现球流运动在微观上具有随机性和在宏观上具有不连续性等^[6],通过实验结果和模拟数据的对比验证,论证了目前HTR-10的堆芯设计合理、球床内不存在滞留区^[7]。相比于实验,DEM具有能获得颗粒全部运动学信息的优势,因此被广泛应用于粉体材料的研究^[8-9]。

之前关于堆芯球床内球流运动的机理性研究主要是针对单组分球形燃料球,同时也因为球床堆内球流运动存在多体互相接触且具有随机性、间歇性和不连续性等复杂颗粒流动特性,假设极端异常事故发生时燃料球可能发生附着,球团的出现可能导致堆芯球排放卸料流动速度的降低。为进一步深入研究球流运动,对于球团和单球组成的双组分燃料球的流动问题仍有待研究,很多机理性问题尚不十分清楚。鉴于此,本文将研究球床内球团和单球组合球流的流动特性,为反应堆在极端情况下球流特性的预测和分析提供指导。

1 计算模型和模拟条件

1.1 数学模型

DEM的基本原理^[10-11]就是将球流研究对象离散为独立的计算单元,通过计算分析每个

独立的单元获得整个宏观系统的整体运动状态。DEM在模拟过程中,通过检索2个单球球心间距判断两者是否接触或碰撞,再使用合适的物理模型表征碰撞应变和能量的耗散,使用牛顿第二定律分析接触碰撞中每个单球的受力和运动学信息,从而更新下一时刻单球运动状态和空间坐标,DEM基本方程包括平动和旋转两个部分^[12],具体方程如下:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^c + F_i^g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (2)$$

其中: m_i 、 I_i 、 v_i 和 ω_i 分别为堆芯球*i*的质量、转动惯量、速度及角速度; F_i^g 为重力; F_{ij}^c 和 M_{ij} 分别为堆芯球*i*受堆芯球*j*的接触力和转矩。接触力可分解为法向接触力 F^n 和切向接触力 F^t 。

$$F^n = k^n \xi^n - \gamma^n \dot{\xi}^n \quad (3)$$

$$F^t = k^t \xi^t - \gamma^t \dot{\xi}^t \quad (4)$$

$$F^t \leq \mu F^n \quad (5)$$

其中: k^n 和 k^t 分别为法向和切向的刚性系数; γ^n 和 γ^t 分别为法向和切向的阻尼系数; ξ^n 和 $\dot{\xi}^n$ 分别为法向应变和速度; ξ^t 和 $\dot{\xi}^t$ 分别为切向应变和速度; μ 为摩擦系数。

在课题组前期的研究^[13-15]中,已在多种球流工况下验证了DEM的准确性。

1.2 计算模型

本文所采用的计算模型与实际HTR-10实验反应堆球床几何尺寸相同,主要由球床圆柱体、锥形底座和卸料口3部分组成,如图1所示。模拟计算所采用的主要参数列于表1。堆芯球流是重力驱动下的稠密流,本文使用两种堆芯球,第1种堆芯球为与实际堆芯球等大,即直径 $d_p=60$ mm的单球。第2种堆芯球为由3个单球粘接成的球团,又根据组成球团的单球粘接的角度不同以及球团所占球床内堆芯球总个数比不同,使用多球模型分别模拟了 $\theta=60^\circ$ 、 90° 、 120° 和 180° 4种不同的粘接夹角,以及在这些夹角下 $R_n=N_c:N_s=1\ 800:21\ 600$ 、 $4\ 500:13\ 500$ 、 $7\ 200:5\ 400$ 和 $9\ 000:0$

等 4 种球团数量占比的工况, N_c 为球团个数, N_s 为单球个数, 9 000 : 0 即为球床中仅含球团不含单球。

布于绿色单球体系内, 局部近壁区可看到球团的直角构型形状。

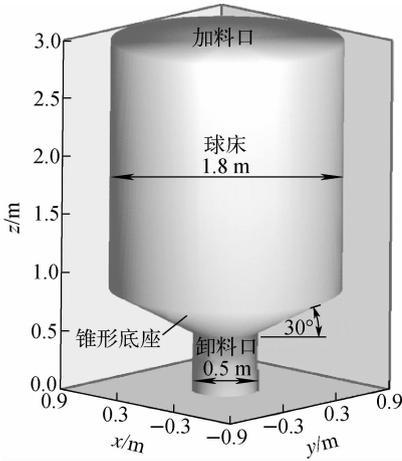


图 1 高温气冷堆实验装置

Fig. 1 Experimental installation

of high temperature gas-cooled reactor

整个卸载过程分为加载堆积和卸料两个步骤, 初始状态是球团和单球在球床内自由落体随机堆积, 此时卸料口关闭, 加载结束到堆积状态稳定后再打开卸料口开始卸球。

表 1 计算模型主要参数

Table 1 Parameter used in simulation

参数	数值
堆芯直径	1.8 m
堆芯高度	3 m
堆芯锥角	30°
球直径 d_c	60 mm
回复系数 e	0.97
杨氏模量 E	1×10^7 Pa
摩擦系数 μ	0.3
粘接夹角 θ	60°, 90°, 120°, 180°
球团数量占比 R_n	1 800 : 21 600, 4 500 : 13 500, 7 200 : 5 400, 9 000 : 0
	(简记为 1 : 12, 1 : 3, 4 : 3, 9 000 : 0)

2 结果与讨论

2.1 典型卸料过程

图 2 为粘接夹角 $\theta=90^\circ$ 和 $R_n=1:12$ 时球团和单球混合卸料过程在 $t=5, 10, 20$ s 的单球分布。整个卸料过程中, 单球和球团用不同颜色表示, 绿色代表单球, 其余颜色代表由 3 个单球组成的球团。初始堆积好后, 各球团随机分

从图 2 可看出, 卸料的球流运动是由卸料口向周围扩散的一种依赖于时间的整体行为, 局部交换较少, 球床中的顶面始终保持接近水平。在卸球引入空隙和内壁约束的共同影响下, 在球床的上部, 球团和单球整体均匀地向下运动, 在锥形底座附近, 边缘的堆芯球朝中心汇聚, 再经由卸料口排出。随着时间推进, 球床内堆积的顶面逐渐降低。

2.2 球团粘接夹角和数量占比对卸料速率的影响

为更好地分析球团粘接夹角和数量占比对卸料速率的影响, 定义卸球数量占比 λ_t 如下:

$$\lambda_t = N_t / N_0 \quad (6)$$

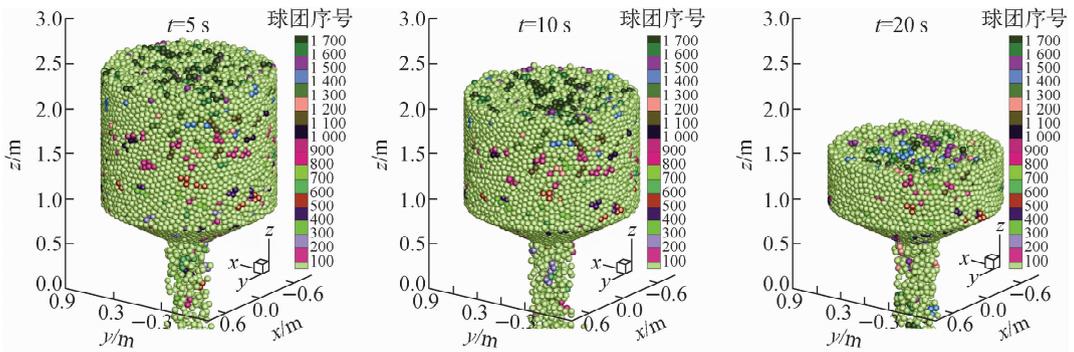


图 2 堆芯球卸料过程 ($\theta=90^\circ, R_n=1:12$)

Fig. 2 Discharge of pebble for $\theta=90^\circ$ and $R_n=1:12$

其中： N_t 为 t 时刻已卸载的单球和球团数量之和； N_0 为初始堆积球床内单球和球团数量之

和。不同粘接夹角及不同球团数量占比卸料过程的卸球数量占比计算结果如图 3、4 所示。

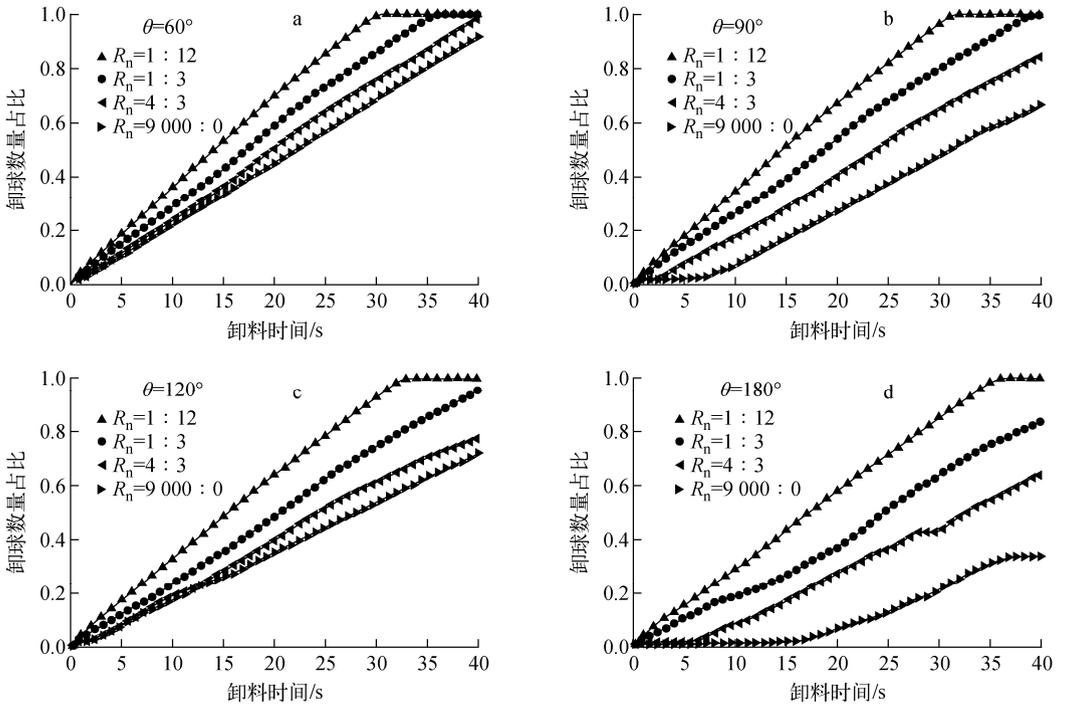


图 3 不同粘接夹角卸料过程卸球数量占比的变化

Fig. 3 Percent of discharging particles at different included angles

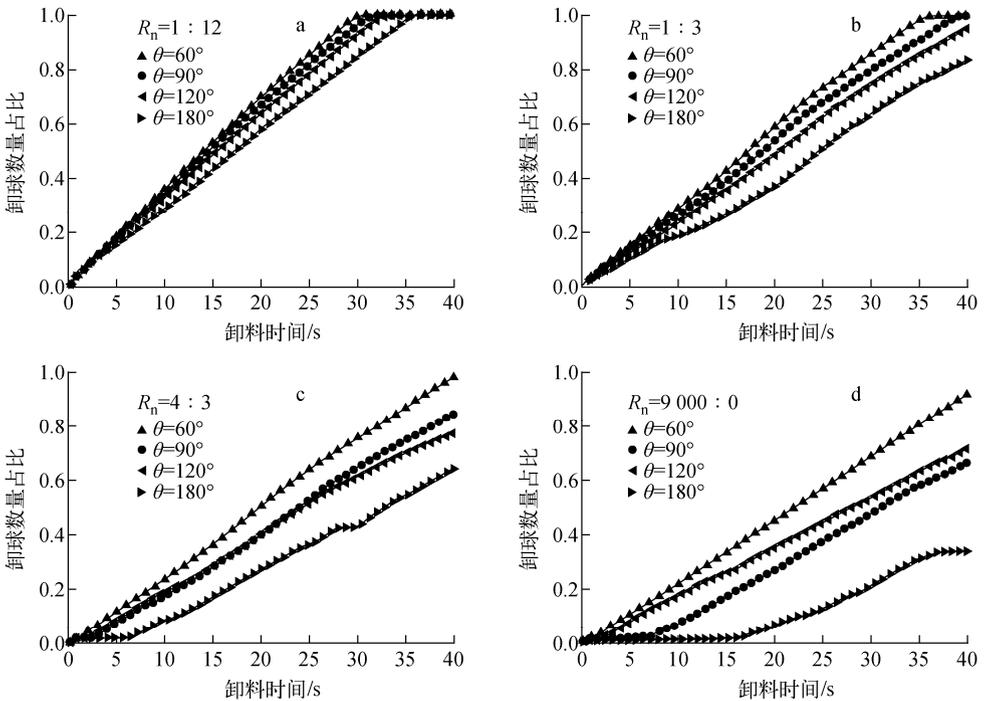


图 4 不同球团数量占比卸料过程卸球数量占比的变化

Fig. 4 Percent of discharging particles at different number fractions

图3为球团夹角固定的情形下不同球团数量占比对卸球流率的影响,图中曲线上任意点的导数(斜率)等于该时刻瞬时卸球流率。从图3可清楚地看到,卸球数量占比 λ_i 随时间逐渐增大。

从图3可看出,在固定夹角 θ 下,随着球团数量占比 R_n 的增加, λ_i 的变化速率降低,这说明 R_n 的增加也会导致卸球流率降低。需指出的是,随着 R_n 的增大,不同粘接夹角的 λ_i 斜率的差异也逐渐增大,这说明随着球团数量增多,降低卸球流率的作用越明显。这是因为球团和单球一样,运动也分为平移和旋转两个部分,但因球团并不具备单球中心对称的特性,球团的存在将会降低自身和周围球团/单球的旋转和旋转^[16],且球团的体积为单球的3倍,球团的存在也会增加对周围单球/球团的挤压、碰撞、滑移和反弹等作用,加强相互之间的竞争和阻滞,因此球团的存在会降低整体的球流速度从而降低卸球流率。

由图4可看出,在固定 R_n 下,随着粘接夹角 θ 的变大,曲线的斜率逐渐减小,意味着增大的球团的内夹角也起到了延迟或降低球床卸球流率的作用。根据T_o等^[17]的研究,当卸料口直径大于球直径的5倍时,不会形成堵塞拱,在混合球流中,单球起到了润滑的作用,球流速度减缓,但不会出现堵塞现象。然而在纯球团流

动、小粘接夹角的工况($R_n = 9\ 000 : 0, \theta = 60^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$)中, λ_i 随时间逐渐增加。特别地,对于 $\theta = 180^\circ$ 且 $R_n = 9\ 000 : 0$ 时的情况(图4d),可能发生卸球数量占比短暂性持平的情形,表明此时卸料过程发生了间歇性阻塞。这种暂时性的阻塞在重力的驱动下随着时间推进会消失,表现为卸球数量占比恢复增加的情形。因此,在整个球床内不存在滞留区。

综上可见,球团的存在总是起到减缓卸料流率的作用,因此,球团的存在会降低卸料流动性。球团粘接夹角和数量占比对卸球特性的影响可独立分析。

2.3 球床内堆芯球平均速度分析

为直观显示堆芯球流动速度特性,将球床根据径向距离和轴向高度划分成等大的网格,然后分别依次统计每一时刻内任意网格内球团和单球各自在重力方向的速度分量,最后对时间取均值得到卸载过程中重力方向的球流速度均值 v_{rz} 的空间分布,计算公式如下:

$$v_{rz} = \frac{1}{T} \frac{1}{N_{rz}} \sum_{j=1}^{N_{rz}} v_z(j, r, z, t) \quad (7)$$

其中: N_{rz} 为径向距离为 r 、轴向高度为 z 的网格内球团或单球的数量; v_z 为对应球团或单球在重力方向上的速度分量,其计算结果如图5所示。

从图5可看出,在径向上,距离中心越近,速度越大;在轴向高度上,距离卸料口越近,速

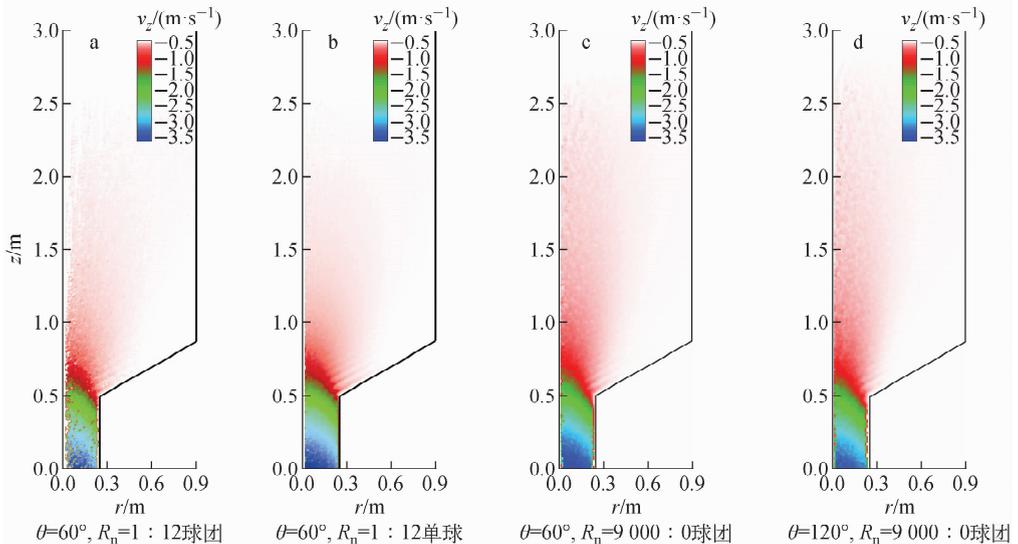


图5 卸载过程中球流速度均值的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean velocity of pebble flow during discharging

度越大。在球床圆柱本体空间内因距离卸料口较远而受到的影响较小,因此球流运动速度较小。在卸料出口附近,球流速度急剧增大,并在卸料口处达到最大值。对比图 5a、b 可发现,球团和单球之间的速度差异不大,这是因为在重力驱动下,球团和单球因为多体间的互相接触,存在驱动、阻滞和竞争等互相影响的机制,因此球流运动呈现整体性运动趋势,导致球团和多球有着相近的速度。且需指出的是,通过分别对比图 5a、c、d 可发现,在球床的大部分空间内,重力方向上球流速度的空间分布与粘接角度和数量占比之间的关系不大,只有卸料口及附近的空间内,才出现了速度分化。因此,对于双组分的球床及不同的球团形状,球床本体内仍保留了较好的整体流流态特征。

为定量分析球团粘接夹角和数量占比对球

流速度的影响,沿轴向高度分别统计 $\theta=60^\circ$, $R_n=1:12, 1:3, 4:3$ 以及 $R_n=4:3, \theta=60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ 下重力方向的球流速度均值 v_p , 计算公式如下:

$$v_p = \frac{1}{T} \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p} v_z(j, z, t) \quad (8)$$

其中: T 为总的计算时间, s ; N_p 为颗粒数; t 为瞬时时间, s 。

速度均值 v_p 计算结果如图 6 所示。定量的结果表明,球团和单球之间的平均速度存在差别,但绝对值的变化不大,球流呈整体运动趋势。对比单球和球团在相同夹角下不同数量占比的情形(图 6a)和在相同数量占比而不同夹角下的情形(图 6b),可发现夹角的变化对整体流动速度的影响更大,这意味着相比于球团数量占比的增大,球团夹角的增大会造成更大程度球流流动速度的降低。

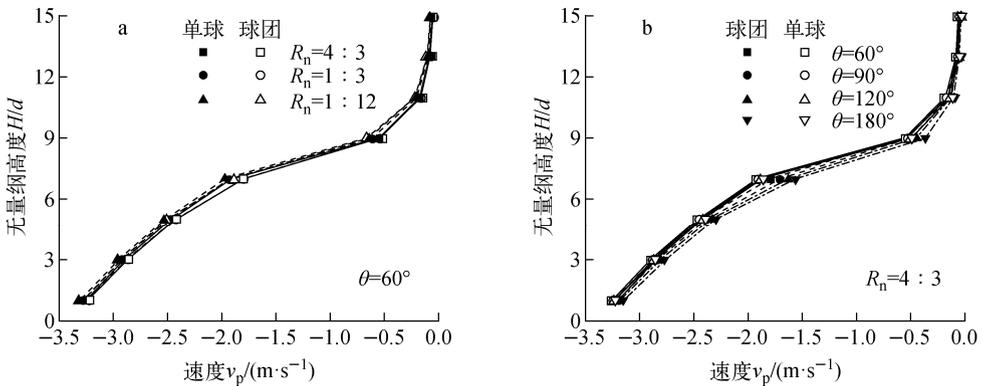


图 6 球流速度沿高度的分布

Fig. 6 Distribution of discharging velocity of pebble flow with height

3 结论

本文采用 DEM 方法对球团和单球的混合卸料进行了定量分析,讨论了球团粘接夹角 θ 和数量占比 R_n 对二元混合组分球流卸球流率的影响,得到如下结论。

1) 球团和单球的混合卸料过程为随时间变化的整体性流动,局部混合较少,球床圆柱本体内部球流保持近似水平下降且堆芯的底部不存在滞留区。

2) 球团的存在会降低卸料速率,卸料速率降低的程度与粘接夹角及球团数量占比的增大呈正相关趋势。需注意的是,在 $\theta=180^\circ$ 且 $R_n =$

9 000 : 0 时,可能会出现间歇性的堵塞,但堵塞只是暂时性的。

3) 球流运动的速度变化趋势是轴向越靠近卸料口,球流的速度越快;径向越靠近球床中心,球流的速度越快。因为球流呈整体性运动,同一工况下球团和单球在径向距离和轴向高度上的分布有一定区别,但相差不大,球流速度与粘接夹角和数量占比之间的关系也不大。

参考文献:

- [1] KADAK A C, BERTE M V. Advanced modularity design for the MIT pebble bed reactor[J].

- Nucl Eng Des, 2006, 236(5-6): 502-509.
- [2] Pebble Bed Modular Reactor Limited. PBMR safety analysis report, 001929-207/4, Rev. B[R]. South Africa: PBMR, 1999.
- [3] YANG X T, HU W P, JIANG S Y. Experimental investigation on feasibility of two-region-designed pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor[J]. J Nucl Sci Technol, 2009, 46(4): 374-381.
- [4] JIANG S Y, YANG X T, TANG Z W, et al. Experimental and numerical validation of two-region-designed pebble bed reactor with dynamic core[J]. Nucl Eng Des, 2012, 246: 277-285.
- [5] THORNTON C. On the relationship between the modulus of particulate media and surface energy of the constituent particles[J]. J Phys D: Appl Phys, 1993, 26(10): 1 587-1 591.
- [6] CHOI J, KUDROLLI A, ROSALES R R, et al. Diffusion and mixing in gravity-driven dense granular flows[J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(17): 174301.
- [7] 杨星团, 刘志勇, 胡文平, 等. HTR_10 堆芯球流运动的唯象学 DEM 模拟[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(12): 2 231-2 237.
YANG Xingtuan, LIU Zhiyong, HU Wenping, et al. DEM simulation of pebble flow in HTR-10 core by phenomenological method[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2013, 47(12): 2 231-2 237(in Chinese).
- [8] COETZEE C. Calibration of the discrete element method and the effect of particle shape[J]. Powder Technology, 2016, 297: 50-70.
- [9] HÖHNER D, WIRTZ S, SCHERER V. A study on the influence of particle shape on the mechanical interactions of granular media in a hopper using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2015, 278: 286-305.
- [10] TSUJI Y, TANAKA T, ISHIDA T. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe[J]. Powder Technology, 1992, 71(3): 239-250.
- [11] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29: 47-65.
- [12] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system[C]//Proceedings of the International Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Nancy, France: International Society for Rock Mechanics, 1971.
- [13] WU H, GUI N, YANG X T, et al. Effects of particle size and region width on the mixing and dispersion of pebbles in two region pebble bed [J]. Granular Matter, 2016, 18(4): 76.
- [14] JIA X L, GUI N, YANG X T, et al. Experimental study and analysis of velocity correlation and intermittency of very slow and dense pebble flow in a silo bed[J]. Nucl Eng Des, 2016, 305: 626-638.
- [15] LI Y, GUI N, YANG X T, et al. Effect of friction on pebble flow pattern in pebble bed reactor [J]. Ann Nucl Energy, 2016, 94: 32-43.
- [16] GRAVISH N, FRANKLIN S V, HU D L, et al. Entangled granular media[J]. Phys Rev Lett, 2012, 108(20): 208001.
- [17] TO K, LAI P Y, PAK H K. Flow and jam of granular particles in a two-dimensional hopper [J]. Physica A, 2002, 315: 174-180.