

球形燃料元件累积旋转角度和角速度问题研究

赵颖^{1,2} 朱兴望¹ 曲世祥¹ 陈堃¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所嘉定园区上海 201800)

2 (中国科学院大学北京 100049)

摘要球床堆采用球形燃料元件,其在循环过程中存在滚动磨损以及滑动磨损并产生石墨粉尘。本文借助一种球形无线探测系统量化了角速度及累计旋转角度,并量化了滚动磨损对石墨粉尘产生的影响。实验结果表明,累计旋转角度和角速度与初始径向位置有关,随着初始径向位置由里向外,呈 V 字型分布,与仓筒内壁接触的球累计旋转角度和角速度远大于其他位置,内壁滚动效应显著。计算结果表明,滚动磨损对石墨粉尘产生量的贡献在 11%–27%,且靠近仓筒内壁处该百分比高于其他位置,内壁效应明显。一般情况下,滚动磨损产生石墨粉尘量要低于滑动磨损产生的石墨粉尘量,以往在估算球床堆中的石墨粉尘量时,只考虑滑动磨损而忽略滚动磨损,会导致石墨粉尘的估算偏高。

关键词球形燃料元件, 累计旋转角度, 角速度, 滚动磨损, 球形无线探测系统

中图分类号 TL37

DOI:10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.030603

Rotation angles and angular velocities study of pebble-shaped fuel element based on a detection system

ZHAO Ying^{1,2} ZHU Xingwang¹ QU Shixiang¹ CHEN Kun¹

¹(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Jiading Campus, Shanghai 201800, China)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Background: Pebble Bed Reactor (PBR), most often used in Generation IV high-temperature gas-cooled nuclear reactor, employs pebble-shaped fuel elements. As pebbles flow through the reactor, they will slide and rotate against each other and the wall, causing generation of graphite dust. **Purpose:** This study aims to investigate the rotation angles and angular velocities of pebble-shaped fuel elements (PSFE). **Methods:** The rotation angle and angular velocity were studied by using a simulated transparent cylinder to replace the reactor core. A pebble-shaped detection system is employed to test the angular velocities and accumulated rotation angles of PSFEs with wireless interface. The generation of graphite particles by rotational abrasion was also studied. **Results:** The experimental results show that the initial seeding position has influence on rotation angles and angular velocities. The distribution of rotation angles and angular velocities from the center to the wall can be described as an inverted V-type distribution. The calculation results show that wear mass by rotation accounts for 11%–27% of the total graphite dust. **Conclusion:** Sliding abrasion is stronger than rotation abrasion in general, graphite generation tends to be overestimated if we only take sliding abrasion into consideration and ignore rotation abrasion.

中国科学院战略性先导科技专项项目(No.XDA02050100)资助

第一作者: 赵颖, 女, 1989 年出生, 2011 年毕业于山东建筑大学, 现为博士研究生, 研究领域为短距离无线通信、微电子及球床堆堆芯颗粒流
通信作者: 陈堃, E-mail: chenkun@sinap.ac.cn

Supported by Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02050100)

First author: ZHAO Ying, female, born in 1989, graduated from Shandong Architecture University in 2011, doctor student, focusing on short-range wireless communication technique, microelectronics, granular dynamics in pebble bed reactor cores

Corresponding author: CHEN Kun, E-mail: chenkun@sinap.ac.cn

收稿日期: 2015-11-26, 修回日期: 2016-01-27

Key words Pebble-shaped fuel element, Rotation angles, Angular velocity, Rotation abrasion, Pebble-shaped detector system

球床堆是一种采用球形燃料元件的反应堆, 冷却剂一般采用气体或熔盐^[1]。燃料球最外层的包覆材料为石墨, 堆芯反射层一般也采用石墨材料^[2-6]。球床堆运行时, 燃料球由于在线装卸料操作, 在堆内循环形成球流。球流穿过堆芯时, 燃料球相互之间、燃料球与石墨反射层和其它构件之间发生摩擦、造成磨损并形成石墨粉尘。这些粉尘可能会积累在堆芯或热交换系统中, 影响反应堆的安全和运行。例如, AVR (Arbeitsgemeinschaft Versuchreaktor) 在 20 年运行期间产生的石墨粉尘 50–60 kg^[7]。

针对石墨粉尘问题, 各国学者开展了多年的模拟和实验研究。如 Lee 等^[8]采用计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 方法模拟燃料球的摩擦; Brendlé 等^[9]和 Luo 等^[10]分别利用实验分析了堆芯温度、压强以及冷却剂行为对石墨的磨损系数和摩擦系数的影响。研究表明, 堆芯石墨粉尘的产生与燃料球在堆芯的磨损有关。燃料球在堆芯的磨损既包括滑动磨损, 又包括滚动磨损。滑动磨损产生的石墨粉尘主要由燃料球的移动距离和不同温度对应的磨损率决定。滚动磨损则与燃料球在循环过程中的累计旋转角度有关^[11-12]。由于球流循环过程中的燃料元件的累计旋转角度很难获得, 可供参考的研究数据较少, 因此在分析石墨粉尘的产生时, 一般很难定量分析滚动磨损的影响^[13-14]。

为研究燃料球运动过程中滚动磨损对于石墨粉尘产生的影响, 我们借助一种球形无线探测系统,

量化分析了燃料球的累积旋转角度和角速度。为便于实验, 我们采用常温下的模拟球来模拟实际堆芯中的球流。研究表明, 经过合理模化的模拟球系统能够较好反映实际堆芯中球流的运动学特性^[15]。

1 实验简介

1.1 实验装置

实验研究对象选取的是麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 设计的球床模块高温气冷堆 (Pebble-Bed Modular Reactor, PBMR)^[16], 这是一种有代表性的球床堆。实验的主要研究内容是燃料球在卸料过程中的角速度和累计旋转角度。通过模化分析, 确定实验装置的几何尺寸依据 PBMR 的 1/6 缩放^[17]。PBMR 采用的球形燃料元件直径 d_1 为 60mm, MIT 设计的反应堆半径为 1.75m (即 $29d_1$), 依据 Rycroft 等^[17]的分析, 经 1/6 缩放半径四舍五入为 $5d_1$ 。PBMR 出口半径为 $5d_1$, 但考虑到当出口半径小于 $2.5d_1$ 时就会出现卡球现象, 故 1/6 缩放后出口半径设定为 $2.5d_1$ ^[18]。模拟球的直径 d 为 30 mm, 实验装置尺寸与 PBMR 几何尺寸的对比如表 1 所示。实验装置主容器为圆柱形仓筒结构, 仓筒的直径为 $10d$ 。仓筒的底端连接一个坡度为 30° 的漏斗, 漏斗的底端连接一个半径为 $2.5d$ 的圆柱形出口管, 出口管的底端为一可闭合的挡板。

表 1 实验装置尺寸与 PBMR 尺寸对比
Table 1 Size of experiment apparatus vs. size of PBMR.

参数 Parameter	实验装置 Experiment apparatus	6:1 scaled PBMR	Full-size PBMR
出口管半径 Exit pipe radius	$2.5d$	$2.5d_1$	$5d_1$
出口管长度 Length of exit pipe	$2.5d$	$2.5d_1$	$10d_1$
漏斗坡度 Slope of funnel	30°	30°	30°
圆筒高度 Length of container	$30d$	$30d_1$	$180d_1$
圆筒直径 Radius of container	$5d$	$5d_1$	$29d_1$

实验仓筒等采用透明亚克力材质, 高速摄像可记录表层模拟球运动信息。模拟球采用聚丙烯材质, 以便于模拟燃料球的摩擦系数^[15]。实验共使用 2050 个模拟球。

1.2 球形无线探测系统

为实时记录模拟球运动过程中的角速度和累积

旋转角度, 我们采用了自主研发的球形无线探测系统, 如图 1 所示。该系统主要包括探测球、接收端和主控机等。其中探测球的尺寸、密度及最外层材质与模拟球完全一致。探测球内置运动传感器、温度传感器、无线收发装置以及电池等。其中运动传感器位于探测球球心, 且通过配重方法, 使球重心与几何中心重合。探测球能够实时测量和无线传输

实验过程中采集的加速度、角速度和温度等信息，并给出实时姿态和累计旋转角度。加速度和温度的测量精度为相对误差在 3%以内，静止时角速度的绝对误差在 $\pm 2^{\circ}\cdot s^{-1}$ 以内，运动状态下角速度测量相对误差在 3%以内。

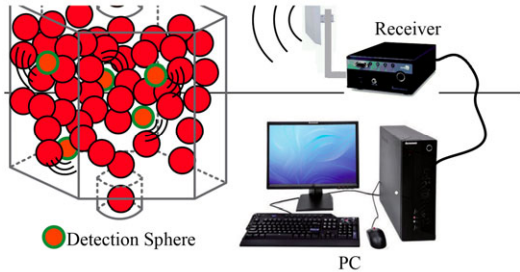


图 1 球形无线探测系统
Fig.1 Pebble-shaped detection system.

1.3 实验过程

实验时首先闭合仓筒底部挡板，令模拟球自仓筒顶部自由下落，形成高度约 88cm 的不规则堆积球床，以模拟实际堆芯球床的堆积。在球床顶端放置探测球，探测球球心初始位置分为 4 个不同的径向位置 R ，其半径由内向外依次为：0 cm、4 cm、8 cm、13.5 cm，对应的探测球个数依次为 1、4、8、18 颗。球心径向位置位于 13.5cm 处的探测球与仓筒内壁直接接触。实验时打开底部挡板，模拟球和探测球在重力作用下自由下落，直至全部流出仓筒，以模拟实际堆芯中燃料球的运动。在此过程中探测球以 100Hz 的采样率实时测量自身的加速度、角速度，并通过计算给出实时姿态和累计旋转角度。

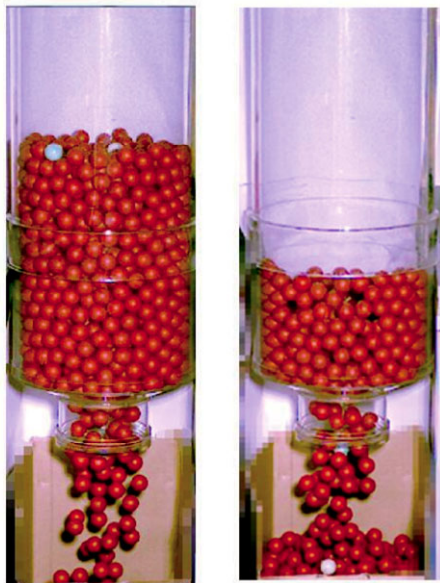


图 2 圆柱形仓筒卸料实验
Fig.2 Discharging experiment with cylindrical container.

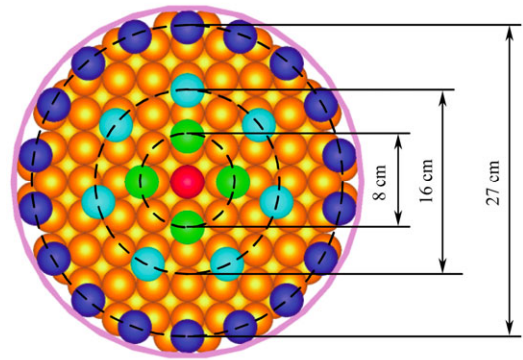


图 3 探测球初始位置
Fig.3 Initial seeding position of detection pebbles.

2 结果与分析

由于探测球在仓筒中的运动具有随机性，本文重复进行了 45 次上述实验以获取探测球物理量统计规律。

2.1 探测球滚动的量化

本文采用三维累积旋转角度来量化探测球在下落过程中产生的旋转，其平均值的计算采用如下的方式进行。此处以靠近筒壁($R=13.5\text{cm}$)的探测球为例，给出探测球累积旋转角度平均值的计算过程。把符合该位置的全部实验数据 ($45 \times 18 = 810$ 组) 进行统计，并用正态分布函数分别对三维累积旋转角度分布进行拟合(图 4)，从而得到平均累积旋转角度分别为： 1156.6° (X 轴)、 709.3° (Y 轴) 和 1026.2° (Z 轴)，其它拟合参数如表 2 所示。

表 2 拟合参数
Table 2 Parameters of experiment apparatus.

拟合参数 Parameters of apparatus	X 轴 X-axis	Y 轴 Y-axis	Z 轴 Z-axis
拟合均值 Fitting average value / ($^{\circ}$)	1154.1	707.7	1024.0
拟合标准差 Fitting standard deviation	308.7	159.7	296.5
均值 Average value / ($^{\circ}$)	1156.6	709.3	1026.2
标准差 Standard deviation	304.4	156.5	293.0
拟合优度 Goodness of fit	1.25	2.21	2.35

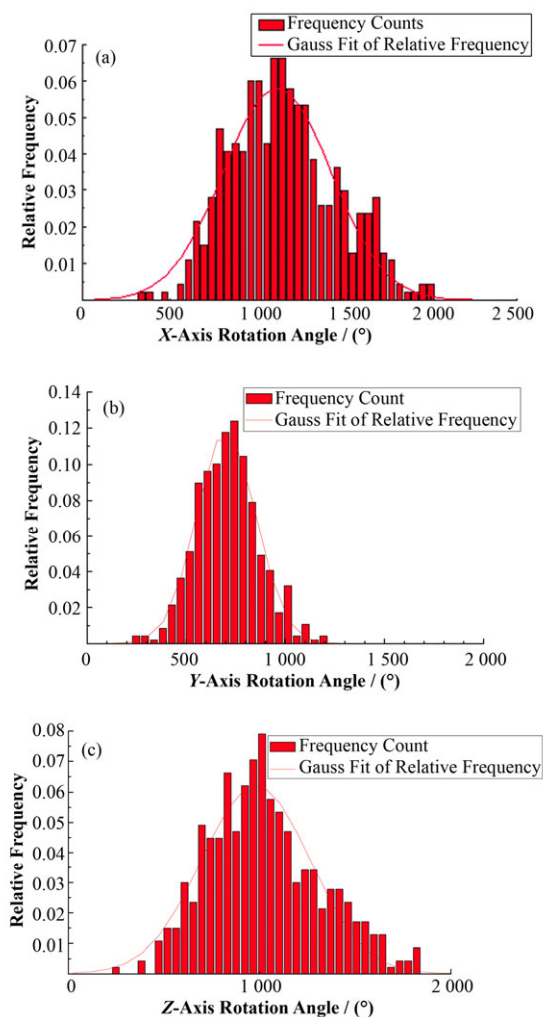


图4 X轴(a)、Y轴(b)、Z轴(c)累计旋转角度统计直方图
Fig.4 Statistical results of X-axis(a), Y-axis (b), Z-axis (c) rotation angle.

同样,位于 $R=0\text{cm}$ 、 4cm 、 8cm 的探测球也采用类似方法处理。由于计算过程相同,此处不再累述。不同位置 R 的旋转累积角度如图5所示。结合相同实验条件的滞留时间分布^[18],给出不同径向位置 R 的平均角速度如图6所示。

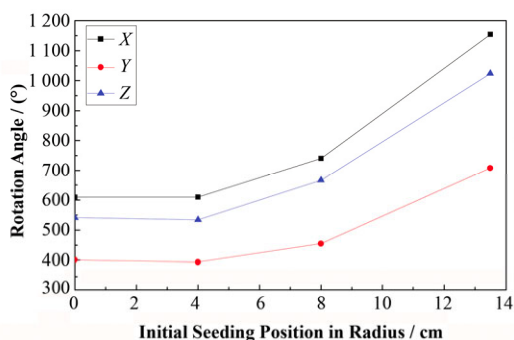


图5 累计旋转角度统计结果
Fig.5 Statistical results of rotation angle.

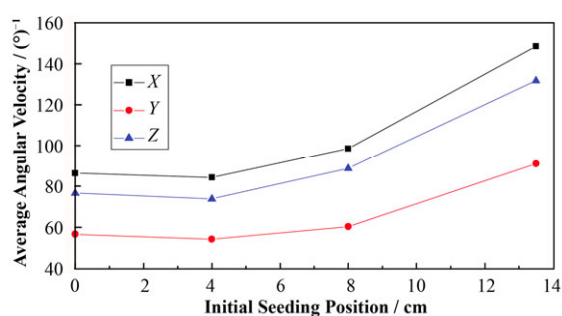


图6 平均角速度
Fig.6 Average angular velocity.

由统计结果可看出,探测球在下落过程中产生的平均累积旋转角度和角速度与初始位置相关,整体分布呈V形,且随初始位置半径 R 而增大;靠近仓筒轴心处滚动小而缓,而在与筒壁接触的位置滚动较为突出,约为中心位置探测球的两倍。产生这一现象,主要是由于本次实验中 $R=13.5\text{cm}$ 处的探测球采用靠近筒壁的放置方式,实验开启挡板后,探测球易贴近筒壁滚落,其角速度要比其它位置探测球大(图7)。需要指出的是,目前在利用颗粒离散元方法(Discrete Element Method, DEM)等数值计算方法来模拟小球在球床中的运动规律时,这一特殊的边壁滚动效应通常并没有被考虑到^[18-20]。

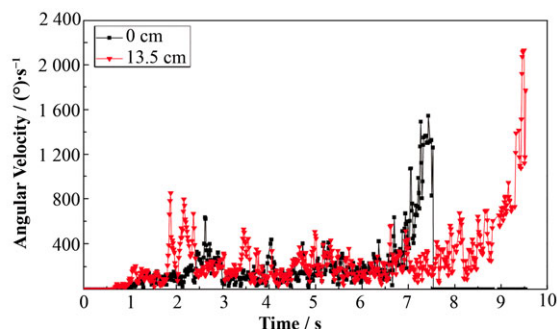


图7 初始径向位置为 0cm 和 13.5cm 处球的角速度
Fig.7 Angular velocities for the initial radial location of 0cm and 13.5cm .

2.2 石墨粉尘的计算

通过参考探测球滚动的量化,可以进一步建立在考虑滚动摩擦情况下石墨粉尘的计算模型,并对滑动与滚动间进行量化的比较。

通常情况下,单个石墨因滚动摩擦产生的粉尘可由式(1)计算:

$$M_{\text{rot}} = N \cdot P_{\text{rot}} \cdot t \quad (1)$$

式中: N 为 Voronoi 单元中与小球直接接触的小球个数; P_{rot} 为单位时间内石墨球间因滚动磨损产生的粉尘量(可通过实验测量), $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为石墨球的平均滞留时间, s 。

而因滑动摩擦产生的粉尘量通常由式(2)计算：

$$M_{\text{slid}} = N \cdot P_{\text{slid}} \cdot L_{\text{slid}} \quad (2)$$

式中： P_{slid} 为单位距离上石墨粉尘因滑动而产生的磨损量， $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$ ； L_{slid} 为石墨球的平均滑动距离，m。

实验中受到重力作用而自由下落的探测球，其平均运动距离近似为流道长度 H ，探测球在下滑过程中发生“原地打转”的概率较小，因此有：

$$L_{\text{rot}} + L_{\text{slid}} = H \quad (3)$$

根据式(1)–(3)计算出下落过程中产生的石墨粉尘总量：

$$M = N \cdot P_{\text{rot}} \cdot L_{\text{rot}} + N \cdot P_{\text{slid}} \cdot (H - L_{\text{rot}}) \quad (4)$$

探测球在下落期间的平均滚动距离 L_{rot} 由本实验计算出：

$$L_{\text{rot}} = \theta \cdot 2\pi \cdot \frac{r}{360} \quad (5)$$

式中： θ 为平均旋转累积角度； $r=1.5\text{cm}$ 为探测球半径。

利用理论模型并类比本实验装置，在考虑滚动和滑动因素下对单个小球的粉尘产生量进行分析。计算所需参数归为表 3。

表 3 计算使用的参数
Table 3 Parameters in calculating.

参数 Parameters	探测球初始位置 R/cm			
	0	4	8	13.5
流道长度 Flow pathlength H/m	0.88	0.903	0.926	0.957
滚动距离 Rotation distance L_{rot}/m	0.135	0.134	0.162	0.251
滑动距离 Sliding distance L_{slid}/m	0.745	0.768	0.763	0.706
滚动磨损率 Rotation wear rate $P_{\text{rot}}/\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	4.617×10^{-5}	4.617×10^{-5}	4.617×10^{-5}	4.617×10^{-5}
滑动磨损率 Sliding wear rate $P_{\text{slid}}/\text{g}\cdot\text{m}^{-1}$	0.005	0.005	0.005	0.005
平均滞留时间 Average of residence time t/s	7.054	7.234	7.514	7.776
平均接触点 Contact site N	6	6	6	3

对表 3 中计算参数作简要说明：

1) 滑动磨损率 P_{slid} 。根据 Troy 等对石墨滑动磨损率的实验研究^[11]，在一定范围内，滑动磨损率随着角速度以及受力而增加，两颗型号为 GM-101 (由 Graphtek LLC 制造) 的石墨球接触处的滑动磨损率变化范围在 $0.005\text{--}0.991\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ 之间。本实验结果表明，探测球的角速度及负载均小于 Troy 的实验条件，因此本文保守取 $P_{\text{rot}}=0.005\text{ g}\cdot\text{m}^{-1}$ (实际上，此处 P_{rot} 已被高估)。

2) 滚动磨损率 P_{rot} 。根据 Troy 等对石墨球滚动磨损的实验研究^[21]，滚动磨损率随着角速度以及受力而增加，石墨球在 $450\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $1500\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下每个触点的磨损率介于 $0.003\text{--}0.07\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ 之间。由于滑动磨损率的研究采用的是 Graphtek LLC 的 GM-101 石墨球^[11]，为方便比较，本文采用 GM-101 且负载为 15kg 左右的滚动磨损率，对 $1500\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $450\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速下的滚动磨损率求均值为 $0.00585\text{--}0.00365\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ，并外推求得 $30\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时磨损率为 $0.00277\text{ g}\cdot\text{min}^{-1}$ ($4.617 \times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$)。

3) N 的取值。规则排布情况下，Voronoi 单元中与球相互邻近的球大于 20 个，与之直接接触的球的个数为 12，如图 8 所示。根据 Yang 等^[22]的研究，在随机排布的球床中，Voronoi 单元中与球相互邻近的球为 14 个左右，故与之直接接触的球的个数小于规则排布的球的个数 12，此处保守取 12 个，对于靠近仓筒边壁的探测球，保守 6 个。排除重复计算的情况后，靠近仓筒边壁的探测球 $N=3$ ，其他位置 $N=6$ 。

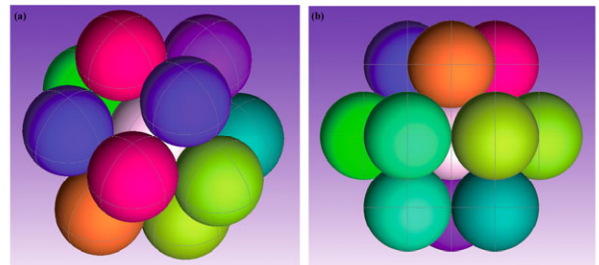


图 8 规则排布时与中心球的接触情况
Fig.8 Contact conditions of spheres under rule configuration.

经过计算，小球的滚动磨损量和滑动磨损量如图 9 所示。从图 9 中可看出，石墨粉尘的产生量来自于滚动磨损的贡献在 $11\%\text{--}27\%$ ，靠近仓筒中心位

置处小, 而靠近仓筒边壁处贡献较大。这意味着在计算球床堆中燃料球(石墨球)的石墨粉尘时, 若忽略滚动磨损的贡献, 则石墨粉尘的估算值偏大。另外, 图9也说明, 边壁处滚动产生的石墨粉尘要比其它位置多, 这就要求我们在分析时需要考虑燃料球(石墨球)的边壁效应。

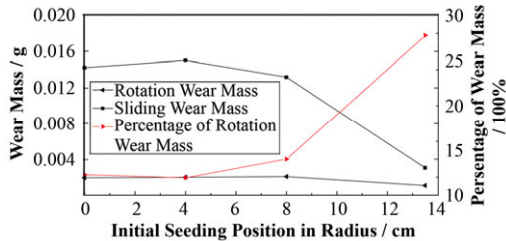


图9 滚动磨损质量、滑动磨损质量以及滚动磨损质量与总量的百分比

Fig.9 Rotation wear mass, sliding wear mass and the percentage of rotation wear mass and total wear mass.

3 结语

球床堆采用球形燃料元件, 循环过程中存在球与球以及球与边壁的滑动摩擦和滚动摩擦, 从而导致石墨粉尘的产生。有关滑动磨损的研究很多, 且在估算石墨粉尘产生量时, 通常由滑动磨损率和滑动距离保守计算得到。本文利用自主开发的球形无线探测系统, 在模拟实验装置中开展实验, 精确测量实时角速度, 并给出累积旋转角度(亦可求得累计滚动距离), 结合滞留时间给出平均角速度, 从而量化了滚动。通过类比文中实验, 首次量化了滚动产生的石墨粉尘, 计算结果表明, 通常采用的忽略滚动的做法会使得计算得到的石墨粉尘偏于高估。同时, 通过本次实验, 我们发现在采用数值计算等方法来模拟球床的运动规律时, 需要考虑球的边壁效应。利用本实验装置采集的转动角度、角速度等信息可以进一步帮助改善模型。

参考文献

- 1 彭超, 朱兴望, 张国庆, 等. 采用 SCALE 计算氟盐冷却高温堆产氙量的一些问题[J]. 核技术, 2015, 38(8): 080601.DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080601
- 2 雒晓卫, 于溯源, 张振声, 等. HTR-10 产生石墨粉尘量的估算及其尺寸分布[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 203-208
- 3 LUO Xiaowei, YUSuyuan, ZHANGZhensheng, *et al.* Estimation of graphite dust quantity and size distribution of graphite particle in HTR-10[J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(2): 203-208
- 4 Hong R, Huber S, Lee K, *et al.* Reactor safety and mechanical design for the annular pebble-bed advanced high temperature reactor[R]. UC Berkeley:Department of Nuclear Engineering, Report UCBTH09-001, 2009
- 5 Bickel J E, Laufer M R, Li L, *et al.* Conceptual design, experiments, and analysis for the core of an FHR-16 test reactor[C]. Proceedings of the 2010 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants-ICAPP'10, 2010
- 6 Wu Z, Lin D, Zhong D. The design features of the HTR-10[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218(1): 25-32.DOI:10.1016/j.nucengdes.2009.02.023
- 7 朱兴望, 王帅, 彭超, 等. 固态钍基熔盐堆中¹⁴C的产生及释放探讨[J]. 核技术, 2015, 38(3): 030603.DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.030603
- 8 ZHUXingwang, WANGShuai, PENGChao, *et al.* Production and release of ¹⁴C in TMSR-SF1[J]. Nuclear Techniques, 2015, 38(3):030603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.030603
- 9 Gottaut H, Krüger K. Results of experiments at the AVR reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 121(2): 143-153.DOI:10.1016/0029-5493(90)90099-J
- 10 Lee J J, Park G C, Kim K Y, *et al.* Numerical treatment of pebble contact in the flow and heat transfer analysis of a pebble bed reactor core[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(22): 2183-2196.DOI:10.1016/j.nucengdes.2007.03.046
- 11 Brendlé M, Stempflé P. Triboreactions of graphite with moisture - a new model of triboreactor for integrating friction and wear[J]. Wear, 2003, 254(9): 818-826.DOI:10.1016/S0043-1648(03)00231-X
- 12 Luo X, Yu S, Sheng X, *et al.* Temperature effect on IG-11 graphite wear performance[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(21): 2261-2274.DOI:10.1016/j.nucengdes.2005.05.001
- 13 Troy R S, Tompson R V, Ghosh T K, *et al.* Generation of graphite particles by sliding abrasion and their characterization[J]. Nuclear Technology, 2015, 189(3): 241-257.DOI: 10.13182/NT14-25
- 14 Troy R S, Tompson R V, Ghosh T K, *et al.* Particle production by rotational abrasion between graphite spheres[J]. Nuclear Technology, 2015, 191(1):

- 71–91.DOI:10.13182/NT14-109
- 13 Rostamian M, Johnson G, Hiruta M, *et al.* Computational and experimental prediction of dust production in pebble bed reactors—Part I[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **263**: 500–508.DOI:10.1016/j.nucengdes.2013.04.019
- 14 Hiruta M, Johnson G, Rostamian M, *et al.* Computational and experimental prediction of dust production in pebble bed reactors—Part II[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **263**: 509–514.DOI:10.1016/j.nucengdes.2013.04.032
- 15 Griveau A. Modeling and transient analysis for the pebble bed advanced high temperature reactor (PB-AHTR)[R]. MS Project Report, UCBTH-07-001, 2007
- 16 Kadak A C. MIT pebble bed reactor project[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2007, **39**(2): 95–102.DOI: 10.5516/NET.2007.39.2.095
- 17 Rycroft C H, Dehbi A, Lind T, *et al.* Granular flow in pebble-bed nuclear reactors: scaling, dust generation, and stress[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, **265**: 69–84.DOI:10.1016/j.nucengdes.2013.07.010
- 18 Zuriguel I, Pugnali L A, Garcimartin A, *et al.* Jamming during the discharge of grains from a silo described as a percolating transition[J]. Physical Review E, 2003, **68**(3): 030301.DOI: 10.1103/PhysRevE.68.030301
- 19 Yu Y, Saxén H. Discrete element method simulation of properties of a 3D conical hopper with mono-sized spheres[J]. Advanced Powder Technology, 2011, **22**(3): 324–331.DOI:10.1016/j.apt.2010.04.003
- 20 Laufer M R. Granular dynamics in pebble bed reactor cores[D]. Berkeley:University of California, 2013
- 21 Troy R S, Tompson R V, Ghosh T K, *et al.* Particle production by rotational abrasion between graphite spheres[J]. Nuclear Technology, 2015, **191**(1): 71–91.DOI:dx.doi.org/10.13182/NT14-109
- 22 Yang R Y, Zou R P, Yu A B. Voronoi tessellation of the packing of fine uniform spheres[J]. Physical Review E, 2002, **65**(4): 041302.DOI:dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.65.041302