

球床反应堆燃料元件成组串列管路气力提升方法研究^①沈 鹏^{②*} 刘洪冰^{*} 都 东^{③*} 王 鑫^{**} 张海泉^{**}

(* 清华大学机械工程系先进成形制造教育部重点实验室 北京 100084)

(** 清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘 要 为了满足球床高温气冷堆利用气力输送方法实现球形燃料元件多次通过堆芯的循环运行方式的运行经济性和控制可靠性要求,提出了一种成组串列气力提升燃料元件的方法,并从动力学特性、提升效率及压降等方面研究了其具体实现方法。该方法可使燃料元件短暂时间间隔地顺次进入提升管路,并由气力提升至堆芯,在同一时刻,燃料元件组成队列共同占用提升管路。研究结果表明,在燃料元件成组串列气力提升过程中,组内各元件运行平稳,间距可控,可以避免因碰撞导致元件破损。与燃料元件逐一完成气力提升方法相比,采用成组串列气力提升方式有利于在必要时实现反应堆燃料快速循环,而且在维持正常循环时,可以降低提升气体流速和每个燃料元件的运行速度,进而减小元件对堆芯的冲击,并且可以减小系统压降,使球床反应堆更加经济可靠地运行。

关键词 球床反应堆, 燃料循环能力, 成组串列气力提升(GTPL), 计算流体力学, 动力学分析

0 引 言

球床高温气冷堆作为很有潜力的核电站用堆型,其发展越来越受到重视^[1,2]。该堆型的重要特征是利用气力输送方法实现球形燃料元件多次通过堆芯的循环运行方式。其重要运行指标是燃料循环能力,即单位时间通过堆芯的燃料元件的最大数量^[3,4]。燃料循环能力的高低决定了堆芯功率密度分布的均匀性,直接关系到堆芯功率调节的可靠性和燃料的平均燃耗^[5,6]。燃料元件从堆芯内排出后经燃耗测量等环节,其中大部分需借助气力沿堆芯外部近等径管路竖直向上提升数十米再次进入堆芯,该过程是球床堆燃料循环的关键环节^[7]。在这一过程中,单位时间提升至堆芯的燃料元件的数量是一个重要指标,它是限制燃料循环能力的主要因素之一,直接影响到反应堆能否实现燃料快速循环模式。另一方面,由于提升管路与堆芯顶部相连,燃料元件的运行速度将决定元件对堆芯冲击力的大小和元件的破损率,直接关系到反应堆的安全性。因此,研究并采用有效的燃料元件气力提升方法,以提

高燃料元件提升效率,增强燃料循环能力,对确保球床反应堆经济可靠地运行具有重要意义。基于这种考虑,本研究从理论和实践两个方面进行了探索,提出了燃料元件的成组串列气力提升方法,并对其进行了理论分析和实验研究,验证了其可行性和有效性。

1 成组串列气力提升方式的提出

燃料循环能力是球床反应堆的重要运行指标,它用下式表示:

$$C_s = N_s / T \quad (1)$$

其中 C_s 为燃料循环能力, N_s 为时间 T 内通过堆芯的燃料元件的最大数量。

在堆芯规模不变的情况下, C_s 越大,堆芯功率密度分布越均匀,进而堆芯功率调节的可靠性和燃料的平均燃耗也越高。燃料元件气力提升过程是球床反应堆燃料循环的关键环节,在这一过程中,燃料元件提升效率 P_s ,即单位时间沿管道气力提升至堆芯的燃料元件的数量,与燃料循环能力 C_s 存在如下关系:

$$C_s \leq P_s \quad (2)$$

① 国家科技重大专项(ZX06901)资助项目。

② 男,1985年生,博士生;研究方向:核反应堆流体力学与气力输送;E-mail: shenpengmtr@163.com

③ 通讯作者,E-mail: dudong@tsinghua.edu.cn

(收稿日期:2012-07-04)

球床反应堆试验堆型(德国的 AVR 和中国的 HTR-10)均采用“逐一气力提升方法”完成燃料元件的循环输送:单个燃料元件沿管路被气力提升至堆芯,并确保监测到该元件到达堆芯后,下一个元件才开始进入提升管路^[8,9]。采用逐一气力提升方法时,在同一时刻仅有一个燃料元件占用提升管路, P_s 较小, C_d 受限。该方法适用于试验堆型,原因是反应堆堆芯规模小, C_d 仅需要为每天 125 球次即可满足试验的要求^[10]。而对于商业运行的球床反应堆,更高的运行经济性和控制可靠性要求 C_d 必须提高到每天近万球次。依据式(2),燃料元件气力提升过程的 P_s 应大于或等于 C_d 。为实现 P_s 的大幅提高,本文提出了“成组串列气力提升方法”,即多个燃料元件短暂时间间隔地顺次进入提升管路,随后由气力提升至堆芯,使同一时刻燃料元件组成队列共同占用提升管路。

成组串列气力提升方法能否运用到商业运行的球床反应堆上,主要取决于该方法是否能满足以下要求:

- (1)组内各元件应运行平稳,以避免因碰撞导致的元件破损。
- (2)提升效率应满足工艺要求,且具有适量裕度。
- (3)提升气体流速和系统压降应较小,以降低对流体动力设备的要求和能量消耗,提高运行经济性。

2 提升过程的动力学分析

采用成组串列气力提升方法时,球形燃料元件的直径与输送管道内径十分接近(直径比达 0.92 至 0.97),组内单个燃料元件受到的气体作用力如图 1 所示, e 为横向位移, w 为旋转角速度,气动推

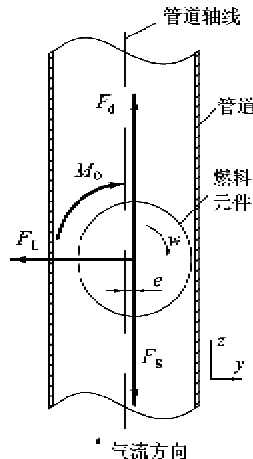


图 1 燃料元件的受力分解

力 F_d 为燃料球所受沿管道轴向的合力,侧向力 F_L 为燃料球所受沿管道径向的合力,转矩 M_o 为燃料球所受的合力矩。

在平衡提升阶段,沿管道轴线方向存在如下方程^[11]:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A_o \rho_g (v_g - v_z)^2 \tag{3}$$

$$F_d = F_g = mg \tag{4}$$

式中 C_d 为牵引系数, A_o 为燃料元件的迎风面积, ρ_g 为气体密度, v_g 为提升气体流速, v_z 为燃料元件的轴向速度, m 为燃料元件的质量。

联立式(3),(4)得到燃料元件的轴向速度方程:

$$v_z = v_g - \sqrt{\frac{2mg}{C_d A_o \rho_g}} \tag{5}$$

由式(5)可知,当 v_g 为定值时, v_z 只由牵引系数 C_d 决定。通过控制顺次加入的两个元件的间隔时间可形成不同的串列特征,如组内元件数 i (单队列包含的燃料元件个数)和元件间距 s (相邻元件表面点的最小距离)。基于计算流体力学原理,运用数值模拟方法得出不同的串列特征对各燃料元件的 C_d 影响不同,涉及的基本参数见表 1。图 2 显示了 $i=3$ 时提升气流的速度场,气体流经燃料元件与管道内壁之间狭窄的缝隙时速度急剧增大,形成喷射状尾流。依据来流方向,后方元件依次处于前方元

表 1 燃料元件气力输送数值模拟基本参数

名称	符号	单位	数值
燃料元件直径	d	mm	60
燃料元件迎风面积	A_o	mm ²	2826
管路内径	D	mm	65
气体密度(氦气)	ρ_g	kg/m ³	10.26
提升气体流速	v_g	m/s	6
燃料元件质量	m	kg	0.2
操作压力		MPa	7

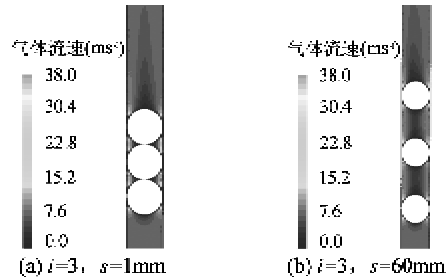


图 2 提升气流的速度场

件的尾流区。当 $s = 1\text{mm}$ 时, 气体径向速度梯度较大, 气流喷射作用于后方元件表面, 致使其受到的气动推力依次大于前方元件。当 $s = 60\text{mm}$ (即燃料元件直径 d) 时, 气流喷射效应减弱, 各元件受到的气动推力相等。图 3 显示了 $s = 1\text{mm}$ 时组内元件的牵引系数, 为便于对比, 纵坐标 C_d 使用逐一气力提升方法 (简称逐一法) 下燃料元件的牵引系数 C_{d1} 进行标准化。可知, 当 i 在 2 至 4 之间时, 燃料元件的 C_d 沿来流方向依次增大, 且变化幅度在 C_{d1} 的 5% 以内。图 4 显示了 $s = 60\text{mm}$ 时组内元件的牵引系数。可知, 当 i 在 2 至 4 之间时, 各元件的 C_d 基本相等, 且 C_d 随着 i 的增加而增大。

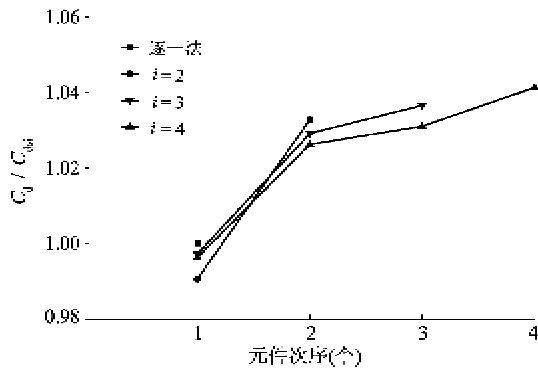


图 3 $s = 1\text{mm}$ 时组内元件的牵引系数

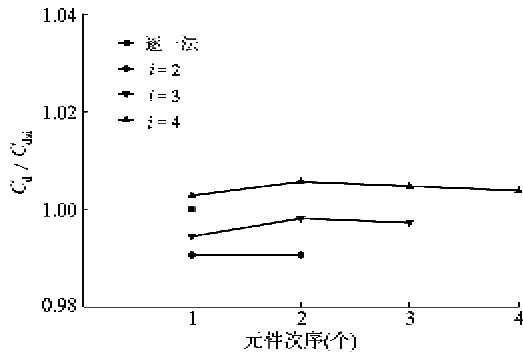


图 4 $s = 60\text{mm}$ 时组内元件的牵引系数

图 5 反映了元件间距 s 变化对前方元件及后方元件 (相邻的两个元件下面元件为前方元件, 上面元件为后方元件) 牵引系数的影响, s 用对数坐标表示。依据两者的大小关系可将 s 分为 3 个区间: 小于 60mm 、 60mm 至 2000mm 和大于 2000mm 。当 s 小于 60mm 时, 前方元件的 C_d 小于后方元件, 依据式 (3) 前方元件的轴向速度 v_x 小于后方元件, 两者产生背离的相对运动, 致使 s 不断扩大直至 60mm ; 当 s 在 60mm 至 2000mm 之间时, 前方元件的 C_d 大

于后方元件, 依据式 (3) 前方元件的 v_x 大于后方元件, 两者产生靠近的相对运动, 致使 s 不断缩小直至 60mm ; 当 s 大于 2000mm 时, 前方和后方元件的 C_d 值基本相等, 两者具有相同的 v_x , 在输送过程中 s 保持不变。因此, 采用成组串列气力提升方法时, 组内各元件运行平稳, 元件间距 s 保持为 60mm 或大于 2000mm , 可以避免因碰撞导致的元件破损。

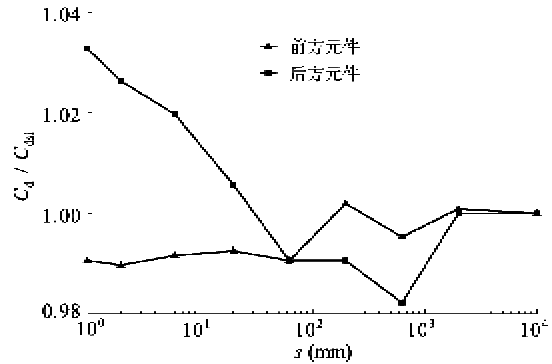


图 5 元件间距对相邻元件牵引系数的影响

3 提升效率及压降计算

采用成组串列气力提升方法时, 燃料元件提升效率 P_s 可以依据输送管道的当量长度 L (60m) 和燃料元件的轴向速度 v_x 计算:

$$P_s = i \times (3600 \times 24) / (L / v_x) \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6), P_s 与提升气体流速的关系式如下:

$$P_s = \frac{86400}{L} \times i \times (v_g - \sqrt{\frac{2mg}{C_{d1} A \rho_g}}) \quad (7)$$

图 6 显示了 P_s 随 v_g 的变化过程。提升气流由工艺系统供给, v_g 在 2.3m/s 至 9.0m/s 之间取值^[12]。当 v_g 相同时, 成组串列气力提升方法的 P_s 较逐一气力提升方法大幅增加, 且组内元件数 i 越

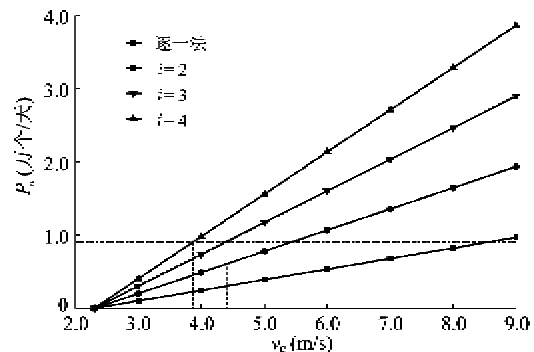


图 6 提升效率随提升气体流速的变化

大, P_g 增加越显著; 由于工艺系统的限制, 当 v_g 取最大值 9.0 m/s 时, 在各输送状态下, P_g 也达到最大值, 依次为 1.9 万个/天 ($i=2$), 2.9 万个/天 ($i=3$), 3.8 万个/天 ($i=4$), 对商业运行的球床反应堆, P_g 可以满足工艺需求, 且具有相当的裕量; 当 P_g 相同时, 成组串列气力提升方法与逐一气力提升方法相比, v_g 减小, 且随着 i 的增大, v_g 下降的幅度增大, 如当 P_g 为 0.9 万个/天时, v_g 分别为 8.6 m/s (逐一法), 5.4 m/s ($i=2$), 4.4 m/s ($i=3$), 3.8 m/s ($i=4$)。可见, 维持 P_g 不变, 与逐一气力提升方法相比, 成组串列气力提升方法显著减小了提升气体流速 v_g , 降低了对流体动力设备的要求; 同时降低了燃料元件的轴向速度 v_z , 进而减小了元件对堆芯的冲击力和元件的破损率, 有利于堆芯的安全性。

燃料元件气力提升的系统压降是球床堆的重要运行参量和经济性指标, 其由提升压降和管路压降组成。提升压降表征了实际用于提升燃料元件的流体动力的大小, 不随提升气体流速变化; 管路压降表征了提升气流沿程的能量损耗, 与提升气体流速的平方成正比, 表达式如下:

$$\Delta p_s = \Delta p + \xi \cdot \frac{\rho_g v_g^2}{2} \quad (8)$$

式中 Δp_s 为系统压降, 与流体动力设备提供的压升相等; Δp 为提升压降; ξ 为管路压降系数, 其在球床反应堆中约为 640。

依据数值模拟结果中提升气流的压力场 (图 7), 得到 Δp , 见图 8。采用逐一气力提升方法时, Δp 为 678 Pa。采用成组串列气力提升方法时, 随着组内元件数 i 的增加, Δp 逐次升高; 当 $i=2$ 时, Δp 处于 1339 Pa 至 1356 Pa 之间, Δp 的上下限分别在元件间距为 60 mm 和 2000 mm 时达到; 当 $i=3$ 或 4 时, Δp 的范围分别为 [2007 Pa, 2034 Pa] 和 [2655 Pa, 2712 Pa]。与管路压降相比, 提升压降在系统压降中占比较小, 即流体动力大部分被沿程阻力消耗。

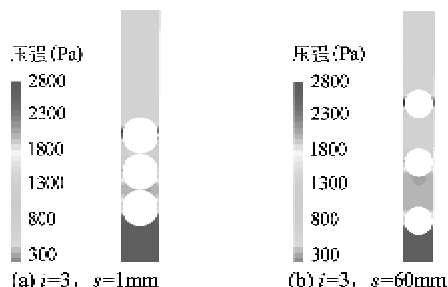


图 7 提升气流的压力场

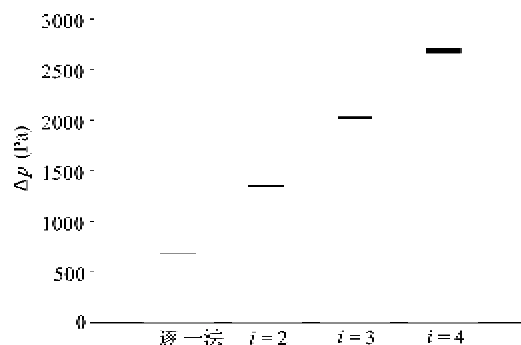


图 8 不同方法的提升压降

图 9 显示了 Δp_s 随 P_g 的变化过程, 由图可知, 当达到相同提升效率 P_g 时, 成组串列气力提升方法较逐一气力提升方法, 提升气体流速 v_g 下降, 系统压降显著减小, 且随着 i 的增大, Δp_s 下降的幅度增大, 例如当 P_g 为 0.9 万个/天时, Δp_s 分别为 241 kPa (逐一法), 98 kPa ($i=2$), 65 kPa ($i=3$), 52 kPa ($i=4$)。综合以上提升效率及压降的分析可知, 与燃料元件逐一气力提升方法相比, 采用成组串列气力提升方法一方面提高了燃料元件提升效率, 有利于实现反应堆燃料快速循环模式, 另一方面在维持提升效率不变时, 降低了提升气体流速和燃料元件的运行速度, 并且减小了系统压降, 使得反应堆安全性和运行经济性相应的提高。

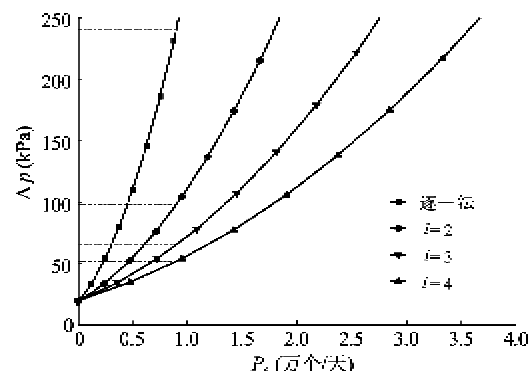


图 9 系统压降随提升效率的变化

4 实验验证

燃料元件气力提升实验平台如图 10 所示, 由额定压升 98 kPa 的罗茨风机提供气体动力, 并用手动调节阀调节提升气体的流速。气体流经的管路上依次设置测温计、测压计和气体流量计, 以测量各气体参数, 试验过程中空气密度为 1.2 kg/m³。直径 60 mm 的燃料元件模拟件 (彩色有机玻璃球体) 通过加料装置进入内径 65 mm 的有机玻璃输送管道, 被

气力提升至 15m 高处的收集装置,并利用每秒 200 帧的高速摄像机记录模拟件的运动。图 11 为高速摄像机采集到的一组运动图像(s 约为 5mm)。

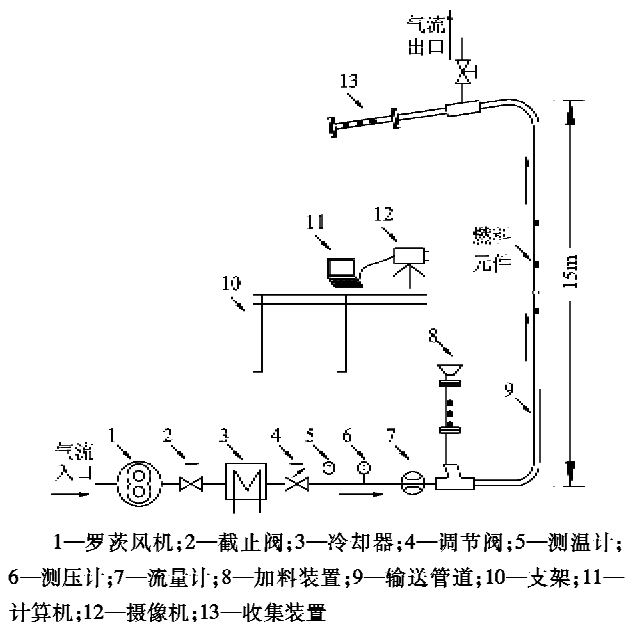


图 10 实验系统示意图

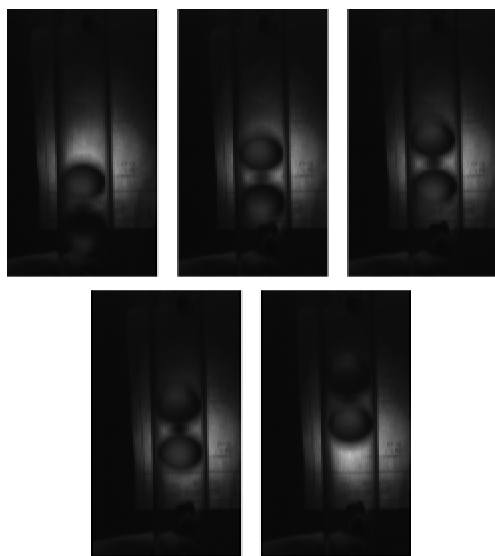


图 11 模拟件的运动图像

加料装置分别间隔一定的时间(0s, 1s, 2s), 顺次将 2 至 4 个模拟件加入输送管道, 可以观察到, 模拟件组成队列被气力提升至收集装置; 在气力提升的全过程中, 相邻模拟件没有发生碰撞; 在提升气体流速不变的情况下, 单位时间完成提升的模拟件数量随组内元件数的增加而显著增大; 当组内元件数由 2 个增加至 3 个时, 系统压降略有增大, 增大的幅度约 0.7kPa。实验现象与理论分析符合的较好, 验证了成组串列气力提升方法的优点及可行性。

5 结 论

燃料元件气力提升过程是球床反应堆燃料循环的关键环节, 燃料元件提升效率是限制燃料循环能力的主要因素之一。在球床高温气冷堆从试验堆型向商业核电站转化的进程中, 为实现更高的燃料元件提升效率和运行经济性, 本文提出了成组串列气力提升燃料元件的设想, 即多个燃料元件短暂时间间隔地顺次进入提升管路, 随后由气力提升至堆芯, 使同一时刻燃料元件组成队列共同占用提升管路。从动力学特性、提升效率和提升压降方面进行的研究表明, 燃料元件成组串列气力提升过程中, 组内各元件运行平稳, 间距可控, 可以避免因碰撞导致的元件破损。与燃料元件逐一气力提升方法相比, 采用成组串列气力提升方法不仅提高了燃料元件提升效率, 有利于实现反应堆燃料快速循环模式, 而且在维持正常循环时, 降低了提升气体流速和燃料元件的运行速度, 进而可以减小元件对堆芯的冲击, 并且可以减小系统压降。在实验平台上成功进行的燃料元件成组串列气力提升实验显示, 产生的现象与理论分析符合得较好, 验证了该方法的优点及可行性, 为使用该方法实现球床反应堆经济可靠的运行提供了依据。

参考文献

- [1] 吴宗鑫. 我国高温气冷堆的发展. 核动力工程, 2000, 21(1): 39-44
- [2] Zhang Z Y, Wu Z X, Wang D Z, et al. Current status and technical description of Chinese $2 \times 250\text{MWth}$ HTR-PM demonstration plant. Nuclear Engineering and Design, 2009, 239(7): 1212-1219
- [3] 曾凯, 沈鹏, 都东等. 球床反应堆燃料循环球流管系结构过球可靠性分析. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52(7): 935-940
- [4] Liu J G, Xiao H L, Li C P. Design and full scale test of the fuel handling system. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218(3): 169-178
- [5] 李富, 周旭华, 王登营等. 采用堆芯外探测器监测堆内功率分布. 核动力工程, 2010, 31(2): 92-96
- [6] 周旭华, 李富, 蔡琦等. 高温气冷堆堆外探测器空间响应函数的计算和特性分析. 核动力工程, 2011, 32(6): 2-6
- [7] 刘继国, 孙德刚, 关廷光等. 10MW 高温气冷实验堆燃料元件装卸系统设计. 高技术通讯, 1996, 6(5): 51-55

- [8] Faber R, Maversberger P, Rysy W. Fundamentals of the pneumatic transport of spherical fuel elements. *Kerntechnik*, 1972, 14(4): 153
- [9] 曾凯, 沈鹏, 都东等. 球床堆燃料元件循环系统任务剖面的建立. *核动力工程*, 2011, 32(4): 10-13
- [10] 刘继国, 肖宏伶, 王伟成等. 10MW 高温气冷实验堆燃料元件装卸系统研制. *原子能科学技术*, 2003, 37(4): 334-339
- [11] 沈鹏, 曾凯, 都东等. 球床堆近等径球流管路气力输送动力学建模. *清华大学学报: 自然科学版*, 2012, 52(8): 1075-1080
- [12] 刘继国, 肖宏伶. 10MW 高温堆燃料元件输送速度的测量. *高技术通讯*, 2001, 11(5): 95-96

Research on a method for grouped tandem pneumatic lifting a pebble-bed reactor's fuel element transportation in pipelines

Shen Peng*, Liu Hongbing*, Du Dong*, Wang Xin**, Zhang Haiquan**

(* Department of Mechanical Engineering, Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084)

(** Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract

To meet the requirements of operational economy and control reliability of a pebble-bed high-temperature gas-cooled reactor characterized by its fuel elements' repeated pneumatic moving through the reactor core, a scheme for grouped tandem pneumatic lifting (GTPL) of fuel elements in pipelines was proposed, and its corresponding implementation was researched in the aspects of dynamic characteristics, lifting efficiency and pressure drop. By this method, fuel elements are sequentially added to the lifting pipelines with short time interval, and then pneumatically lifted to the reactor core, so the lifting pipelines are occupied by a queue of fuel elements at the same time. The results of the simulation and the experiment show that the new method can make fuel elements move steadily with the controllable spacing between each two fuel elements in GTPL, so the breakage of the elements caused by elements-element collision can be avoided. Compared with the method of lifting the elements one by one, the GTPL scheme has obvious advantages. On one hand it can achieve the rapid fuel cycle if necessary, on the other hand, it can help to reduce the gas flow rate and the moving velocity of each fuel element in normal fuel cycle, and then descend the impact on the core as well as the pressure drop of the operation system.

Key words: pebble bed reactor, fuel cycling capability, grouped tandem pneumatic lifting (GTPL), computational fluid dynamics, dynamic analysis