

# 球床反应堆燃料元件脉冲气力提升动力特性分析

曾 凯<sup>1</sup>, 沈 鹏<sup>1</sup>, 都 东<sup>1</sup>, 王 鑫<sup>2</sup>, 张海泉<sup>2</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:**球床反应堆采用球形燃料元件多次通过堆芯的循环运行方式, 燃料元件从堆芯底部连续单列排出后依靠管路气动推力逐一被提升至堆芯顶部。本文建立了球形燃料元件“近等径”管路脉冲气力提升运动模型, 并在此基础上分析了气源压力、控制阀有效截面积、球外径与管内径的直径比等参数对提升过程燃料元件运行速度的影响。利用测速装置测量了 10 MW 球床反应实验堆提升器出口燃料元件的运行速度, 实验结果接近理论分析结果。近等径球流管路脉冲气力提升运动模型的建立及实验研究为球床反应堆燃料输送系统优化设计及运行调控提供了理论依据。

**关键词:**球床反应堆; 球形燃料元件; 脉冲气力提升; 运动分析

**中图分类号:** TL353. 3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6931(2012)08-0947-04

## Dynamical Analysis of Impulse Pneumatic Transportation of Fuel Element in Pebble Bed Reactor

ZENG Kai<sup>1</sup>, SHEN Peng<sup>1</sup>, DU Dong<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>2</sup>, ZHANG Hai-quan<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Pebble bed reactors use “multi-pass” circulation scheme of spherical fuel element. The fuel spheres are uploaded from the core one by one, and lifted up to return to the core through the pneumatic conveying pipeline. In this paper, the motion model of impulse pneumatic transportation of spherical fuel characterized by the “approximately equal diameter” was established. Some influences, such as air supply pressure, effective area of controlling valve, sphere-to-pipe diameter ratio, etc., to the velocity of fuel elements were analyzed. The practical velocity of fuel element was measured by using speed measuring instrument fixed in 10 MW pebble bed reactor. The test results agree with the theoretical results. The establishment of the motion model of fuel element in impulse pneumatic transportation provides the foundation for the optimum design and regulation of fuel transporting system.

收稿日期: 2011-03-24; 修回日期: 2011-05-11

基金项目: 国家重大科技专项经费资助项目 (ZX06901)

作者简介: 曾 凯 (1976—), 男, 甘肃武都人, 博士研究生, 从事球床反应堆核电站燃料元件循环系统设计研究

**Key words:** pebble bed reactor; spherical fuel element; impulse pneumatic transportation; motion analysis

模块式球床高温气冷堆是国际核能界公认的一种具有良好安全特性的堆型<sup>[1]</sup>。此堆型采用球形燃料元件多次通过堆芯的循环运行方式。燃料元件依靠卸料装置从堆芯底部连续单列排出,并借助提升管中气流推力逐个提升返回至堆芯。球床反应堆燃料元件输送具有“近等径”球流管路气力输送特征,即外径接近管道内径的球形燃料元件,在带压氦气流的推动下窜行于管道中。球床堆燃料元件气力提升方式有两种,即脉冲气流提升和连续气流提升,脉冲气流提升适用于低燃料循环量输送,连续气流提升适用于高燃料循环量输送。脉冲气流提升是通过向提升器中释放高压脉冲氦气流提升燃料元件<sup>[2]</sup>。为了降低燃料元件对管路和输送设备的冲击,保证提升过程的可靠性和燃料元件实体完整性,需控制提升器出口燃料元件瞬时速度在设计允许值以内,此速度也成为系统设计中一个重要设计参量。球形燃料元件气力输送的动力及运动分析对系统优化设计及运行调控具有重要的工程实践指导意义。文献[3-4]针对球床堆燃料元件连续气流输送开展了有关阻力系数、悬浮速度以及运动分析的基础性研究。相对于连续气流输送,脉冲气力提升动力分析需根据气压传动基本原理分别建立质量方程、能量方程及运动方程,同时需考虑燃料元件与管道的间隙泄漏量,模型建立较为复杂。目前尚无针对球形燃料元件脉冲气力提升输送动力及运动研究的文献报导。

本文主要研究建立球床反应堆燃料元件脉冲气力提升运动模型,并分析燃料元件提升速度的影响因素。

# 1 “近等径”球流管路脉冲气力提升运动模型的建立

近等径球流管路脉冲提升气动原理简图如图1所示,选择图1虚线所示的控制体。其中: $p$ 为控制体中气体压力,Pa; $p_c$ 为堆芯压力,Pa; $p_s$ 为气源压力,Pa; $S_1$ 为阀的有效截面积,m<sup>2</sup>;  $T_s$ 为气源温度,K; $b$ 为临界压力比。

当提升器中的燃料元件需提升时,打开控

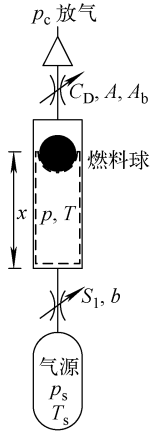


图1 近等径球流管路脉冲气力提升示意图  
Fig. 1 Scheme of impulse pneumatic lifting of fuel sphere

制阀,提升器底部产生脉冲气压,燃料元件在脉冲提升气源推动下提升。由于燃料元件提升时间短,其脉冲提升过程可近似等效为变容容器绝热充放气过程。

变容容器绝热充放气时的能量方程<sup>[5]</sup>为:

$$k(i_s - i)dm_1/m = di + pdv \quad (1)$$

式中: $k$ 为等熵指数; $i_s$ 为流入控制体的气体的质量热力学能,J/kg; $i$ 为控制体气体的质量热力学能,J/kg; $dm_1$ 为流入控制体的气体质量,kg; $m$ 为控制体中气体质量,kg; $v$ 为气体比容,m<sup>3</sup>/kg。

控制体质量方程为:

$$dm = dm_1 - dm_2 \quad (2)$$

式中, $dm_2$ 为 $dt$ 时间内从管道与燃料元件之间的缝隙产生的泄漏量,kg。

由能量方程、质量方程以及状态方程可得:

$$dm_1 = \frac{V}{kRT_s}dp + \frac{p}{RT_s}dV + dm_2 \frac{T}{T_s} \quad (3)$$

假设在提升过程中提升气流的温度与气源温度接近,即 $T/T_s \approx 1$ ,结合 $dV = Adx$ 以及 $V = V_0 + xA$ ,式(3)可改写为:

$$dm_1 = \frac{V_0 + xA}{kRT_s}dp + \frac{pA}{RT_s}dx + dm_2 \quad (4)$$

由于球床堆燃料元件脉冲气力输送过程中, $p_c/p_s$ 大于临界压力比,因此,控制阀的气流流动属于亚声速流,其质量流量可表示为:

$$q_{m_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{(k+1)/2(k-1)} \cdot$$

$$\sqrt{\frac{k}{RT_s} - \frac{k}{RT_s} \left( \frac{p/p_s - b}{1-b} \right)^2} p_s S_1 \quad (5)$$

储气罐为有限容积,供气过程中罐中压力不断变化,而提升时间较短,整个供气过程可视为等温放气过程,其质量流量可表示为:

$$q_{m_1} = - \frac{V_s}{RT_s} \cdot \frac{dp_s}{dt} \quad (6)$$

从球形燃料与管内通道形成的缝隙之间的气流流动特性可用气流绕流阻力系数  $C_D$  以及环形缝隙面积  $A - A_b$  来表示。其中,  $C_D$  由式(7)<sup>[6]</sup> 计算。

$$C_D = \frac{2K^2 - K^4}{(1 - K^2)^2} \quad (7)$$

式中,  $K$  为直径比,即球形燃料元件外径与管内径的比值。

因此,泄漏的质量流量可表示为:

$$q_{m_2} = (A - A_b) \sqrt{\frac{2(1 - k^2)^2 (p - p_c) \rho}{2k^2 - k^4}} \quad (8)$$

燃料元件的运动方程为:

$$(p - p_c) A_b - m_b g (\sin \theta + f \cos \theta) = m_b \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (9)$$

式中:  $\theta$  为提升管水平倾角;  $f$  为燃料元件与管壁间的摩擦系数。

联合式(4)~(9),并代入初始条件解微分

方程组,即可得到燃料元件瞬时速度及相关的动力参数的数值解。

## 2 燃料元件管路脉冲气力提升运动特性分析

利用以上运动模型分析计算了球床反应堆燃料元件脉冲提升过程中不同气源压力、控制阀有效截面积、直径比以及缓冲罐和供气罐容积对燃料元件瞬时速度的影响,结果如图2所示,以上曲线计算参考的其他参数列于表1。

通过分析可得:1) 在提升器前的控制阀打开后,燃料元件瞬间加速,运行速度达到最高,之后缓慢降低;2) 气源压力、控制阀有效截面积是影响提升速度的主要因素,增大以上参数将提高燃料元件最高运行速度和平衡运行速度,特别是控制阀有效截面积,此特性参数基于声速放气法并结合喷管壅塞流下的流量公式计算而得,不同结构型号的阀门对应着不同的特性参数,且波动范围较大;3) 随着供气容积的减小,燃料元件最高运行速度基本不变,但运行速度下降较快;4) 燃料元件的运行速度对直径比较敏感,增大直径比,燃料元件出口瞬时速度提高,这是由于直径比的提高使得燃料元件与管道之间泄漏的气流量减小,进而提高了气动推力。由此可知,在管道结构及其它条件一定时,提升器出口燃料元件瞬时速度会因燃料元件外径尺寸偏差产生较大的波动。

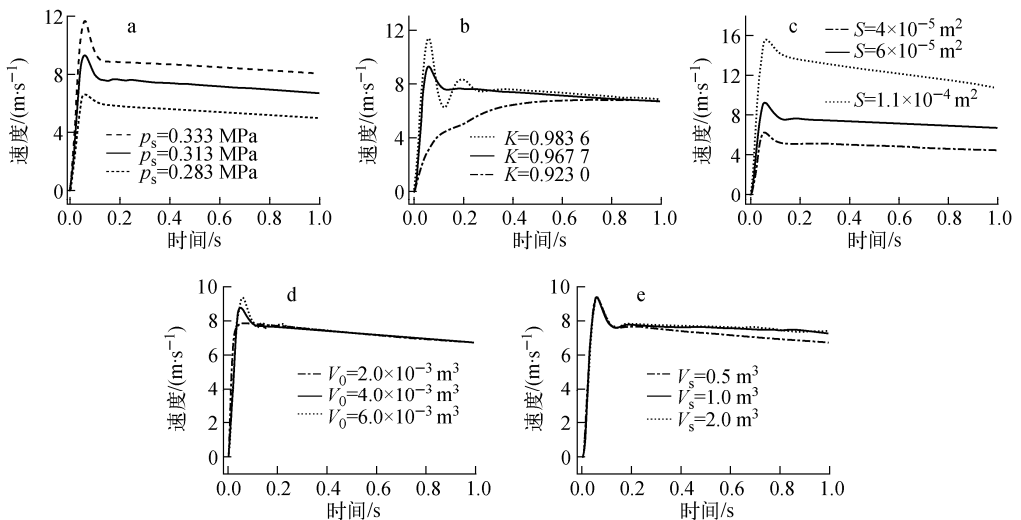


图2 球形燃料元件脉冲气力输送运行速度影响因素分析

Fig. 2 Analysis of some influencing factors to velocity of fuel sphere in impulse pneumatic transportation

a——气源压力;b——直径比;c——控制阀有效截面积;d——缓冲容积;e——供气容积

