



颗粒学在高温气冷堆核能工程中的应用

刘马林, 刘荣正, 李自强, 李天津, 刘 兵, 邵友林

(清华大学 核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:梳理了高温气冷堆核能工程涉及的颗粒学问题研究内涵,对高温气冷堆核能工程中相关颗粒学相关问题进行综述,认为高温气冷堆研发过程中有很多基础理论问题和颗粒学密切相关,例如颗粒的制备、测量、流化、分选、输送、混合、碳气溶胶的凝聚和沉积等,凝炼颗粒学学科与核能工程学科的结合点。结果表明:核能工程中的颗粒学相关研究具有普遍意义,也有其自身特殊性;通过进一步深入研究核能工程中相关学科交叉切入点,可以更好地为核能安全利用服务,同时也拓展颗粒学学科的研究范围和内涵。

关键词:颗粒学;核能工程;高温气冷堆

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:1008-5548(2014)04-0001-07

Application of Particuology in High Temperature Gas Cooled Nuclear Reactor Engineering

LIU Malin, LIU Rongzheng, LI Ziqiang,
LI Tianjin, LIU Bing, SHAO Youlin(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University,
Beijing 100084, China)

Abstract: The application of particuology in nuclear engineering which was high temperature gas cooled nuclear reactor was reviewed. It was thought that there were many application issues of particuology in the development process of high temperature gas cooled nuclear reactor, such as particle preparation, measurement, coating, fluidization, transport, aerosols aggregation and deposition. The integration between the particuology and nuclear engineering was condensed. The results show that particuology in nuclear engineering has universal significance, and also has its own peculiarities. The in-depth study of interdisciplinary point can provide better service for the safe use of nuclear energy, and expand the scope and content of the particuology discipline.

Key words: particuology; nuclear engineering; high temperature gas cooled nuclear reactor

收稿日期:2014-03-23,修回日期:2014-04-25。

基金项目:国家自然科学基金项目,编号:21306097;高等学校博士点专项科研基金项目,编号:20121010010;北京市高等学校青年英才计划项目,编号:YETP0155;清华大学自主科研计划,编号:2011Z02159。
第一作者简介:刘马林(1983—),男,博士,副研究员,研究方向为核燃料循环与材料、流化床-化学气相沉积技术。E-mail: liumalin@tsinghua.edu.cn。

颗粒学是一门多学科交叉的学问,涉及颗粒的制备、颗粒的测量与表征、颗粒的形成与团聚、颗粒与气、液的分离、固体颗粒的输送、流态化、破碎、团球、气溶胶等诸多科学与技术问题^[1]。颗粒学在核能领域有广泛的应用,但相关研究还未见专题综述报道。目前,核能利用已经被我国列入国家能源发展规划,计划到2050年,核能占全国一次能源供给的比例由目前的1.8%提高到15%,因此颗粒学在核能领域的应用研究还有很大的发展空间。

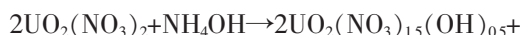
球床式高温气冷核反应堆(简称高温气冷堆)是一种使用球形燃料元件的核反应堆,其安全性为国际公认,并有很多潜在的用途^[2],是第四代推荐堆型之一,已经列入国家科技重大专项,并已开工建设。高温气冷堆内中子吸收剂使用的是含碳化硼的颗粒,因此高温气冷堆研发过程中有很多理论与颗粒学密切相关,例如颗粒的制备、测量、流化、输送、分选、混合以及石墨粉尘碳气溶胶等。本文中对高温气冷堆涉及的颗粒学应用以及研究热点进行综述,凝炼颗粒学学科与核能工程学科的结合点,从而提出进一步深入研究的学科交叉切入点,以更好地为核能安全利用,特别是为高温气冷堆未来优化和发展服务,同时拓展颗粒学学科的研究范围和内涵。

1 颗粒制备

1.1 溶胶-凝胶法

高温气冷堆燃料元件由包覆燃料颗粒和石墨基体组成,其中包覆燃料颗粒由 UO_2 颗粒和4层包覆层组成,如图1所示。

UO_2 核芯颗粒制备采用溶胶-凝胶法^[3]。首先将八氧化三铀(U_3O_8)溶于硝酸,形成 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 水溶液,再添加一些高聚物,改变黏度和表面张力,然后用稀氨水进行预固化,反应式如下:



形成符合要求的胶液后,用针管滴定形成液滴,液滴直径为1.8 mm,液滴坠入浓氨水进行外凝胶,初步形成颗粒^[4],如图2所示。反应式如下:

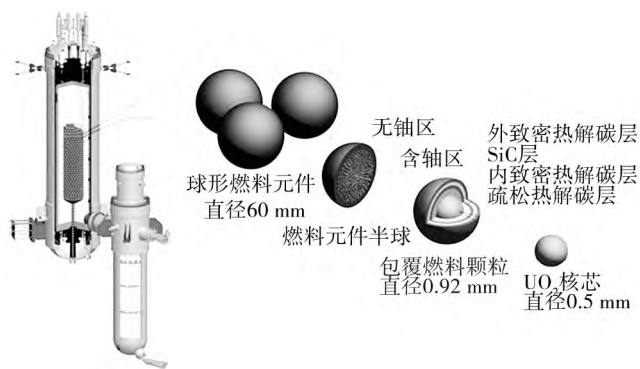
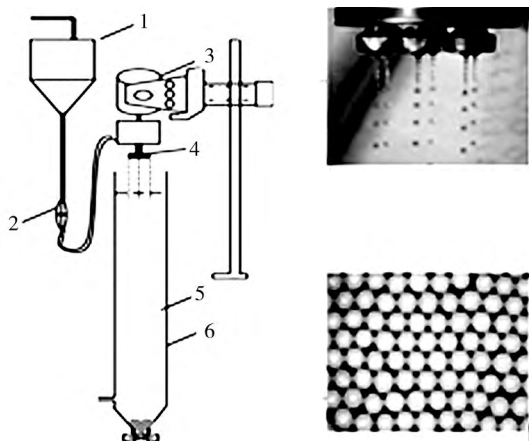


图 1 高温气冷核反应堆系统及燃料元件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high temperature gas cooled reactor and fuel elements



固体 $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ 颗粒直径约为 1 mm, 需要在浓氨水中陈化一段时间至充分凝胶完成, 然后洗涤, 干燥, 并在氧气中焙烧, 除去杂质及不需要的成分, 反应式

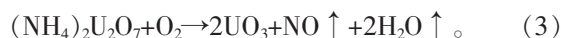


1—胶液杯; 2—流量计; 3—振荡器; 4—喷嘴; 5—分散柱; 6—氨水。

图 2 溶胶-凝胶法制备 UO_2 颗粒示意图Fig. 2 Schematic diagram of preparing UO_2 particles

by sol-gel method

如下:



得到 UO_3 颗粒直径约为 0.75 mm, 再用氢气进行还原:



这样就制备了 UO_2 颗粒, 粒径约为 0.5 mm, 密度约为 10.96 g/cm^3 。

在溶胶-凝胶制备颗粒的过程中, 胶液的配置以及液滴的形成过程至关重要, 是溶胶-凝胶法制备颗粒的研究热点, 核燃料制备中尤其如此。由于颗粒球形度、粒径大小关系到核燃料的性能, 乃至影响整个高温气冷堆的核反应裂变产物的扩散控制, 因此根据现在的核反应堆及中子输运设计, 核燃料颗粒粒径一般为 0.5 mm。

1.2 流化床-化学气相沉积法

高温气冷堆燃料元件中需要将 UO_2 颗粒均匀包覆上涂层, 形成 3 种各向同性结构层 (简称 TRISO) 型包覆燃料颗粒, 这个制备过程采用的是流化床-化学气相沉积 (简称 FB-CVD) 法^[5]。该方法将 UO_2 颗粒放入流化床沉积炉后, 调整不同的沉积温度, 依次通入和切换不同的反应气体 (乙炔、丙烯和甲基三氯硅烷), 在高温下发生化学气相沉积过程, 在 UO_2 颗粒外面依次沉积疏松热解碳层 (buffer PyC)、内致密热解碳层 (IPyC)、碳化硅层 (SiC) 和外致密热解碳层 (OPyC), 最后待流化床沉积炉降温冷却后, 卸出包覆燃料颗粒, 再进行筛分振选处理, 得到 TRISO 型包覆燃料颗粒。流化床-化学气相沉积实验设备如图 3 所示, 左边是气路供给系统, 包括烃类气体 (乙炔和丙烯)、氢气以及甲基三氯硅烷蒸气供给及控制系统; 中间是喷动流化包覆炉, 包括喷动流化床、加热及温度控制系统、水冷及气体密封系统; 右边是尾气处理系统, 包括旋风分离器、过滤器以及碱液吸收塔系统。

1.3 转鼓喷雾造粒法

上述 TRISO 型包覆燃料颗粒外层需要均匀包覆

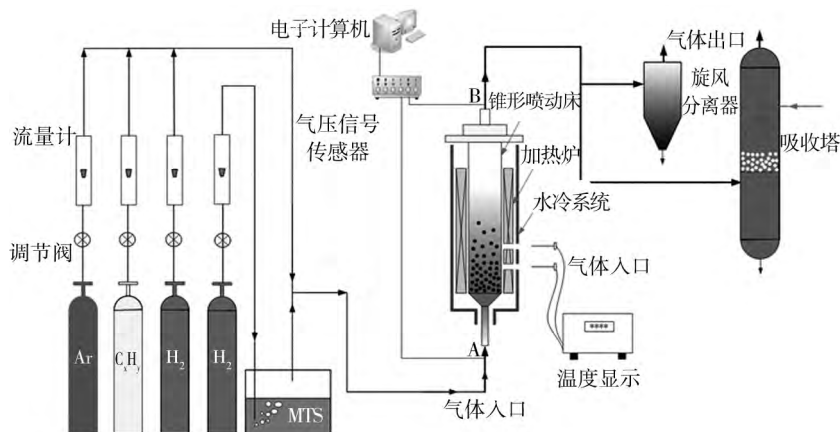
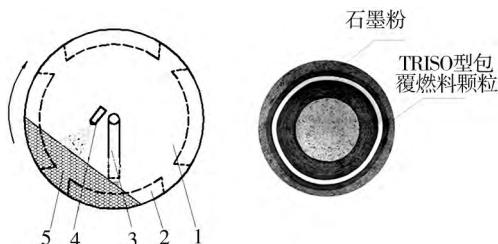


图 3 喷动流化床包覆生产线系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spout-fluid bed coating system

一层石墨粉形成缓冲层,防止包覆颗粒在加压过程中发生挤压破裂,该过程采用转鼓喷雾造粒方法^[6],制备的颗粒称为穿衣颗粒。

旋转转鼓鼓体均匀布有网孔,鼓内壁装有斜向交错的导流板,乙醇喷嘴和穿衣粉下料管均固定于鼓内,所用穿衣粉为天然石墨粉、人造石墨粉及酚醛树脂经混捏、干燥、粉碎而成,设备如图4所示。转鼓喷雾造粒时,穿衣鼓沿轴线旋转,颗粒通过鼓内壁摩擦和导流板作用沿复杂轨迹运动。颗粒运动到乙醇喷嘴的雾化区域内时首先被乙醇润湿,继续运动到下粉管下方将穿衣粉粘附到颗粒表面,由于穿衣粉中含有醇溶性酚醛树脂,因此在不断翻动和滚动的过程中,颗粒不断粘附穿衣粉而逐渐长大并滚圆。当穿衣颗粒达到尺寸要求时结束转动,然后进行真空干燥处理以去除其中的乙醇,最终获得符合质量要求的穿衣颗粒。



1—转鼓; 2—导流板; 3—下料管; 4—喷嘴; 5—颗粒。

图4 转鼓喷雾造粒法制备穿衣颗粒示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rotating drum coating system

1.4 准等静压机械法

高温气冷堆球形燃料元件是采用准等静压机械法制备^[7],即将上述穿衣颗粒与石墨粉混合,然后装入模具压制而成。准等静压机械法制备颗粒的原理如下:作为传递均衡等静压力的介质为一种硬质弹性构件(由橡胶、合成橡胶等制成),弹性构件在体积应变时像高黏性液体一样向压塑粉传递施加的压力,并且在多次应变后仍能保持自身的稳定性和可还原性,而无残余变形,因此通过压模的阳模向弹性构件施加的压力可均衡地传递到被压制品的整个体积,形成对制品的立体挤压,如图5所示。

具体燃料元件的压制工艺分为2步,即预压球芯和终压成型。预压球芯指的是在约为3 MPa的压力下预压燃料芯球。终压成型指的是在预压芯球的外面压制石墨基体球壳,压力为300 MPa。

球床式高温气冷堆的堆堆系统设计了控制棒和吸收球2套停堆系统。吸收球为含有碳化硼(B_4C)的石墨球,在正常停堆或紧急停堆时,吸收球落入反应堆的吸收球孔道,利用 ^{10}B 的中子吸收特性阻止反应堆的链式反应而实现停堆。在中子吸收球制备工艺

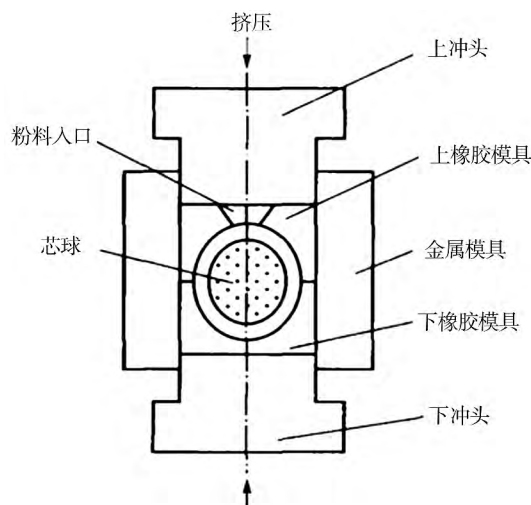


图5 准等静压机械法制备球形燃料元件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of preparing spherical fuel elements by quasi-isostatic molding

中,首先将碳化硼、石油焦、石墨粉体、树脂等与乙醇混合配成浆料,将浆料注入喷雾造粒机进行造粒和干燥,造粒后的复合颗粒采用准等静压机械法制备吸收球,即将颗粒和石墨粉混合后装入一定的模具中进行准等静压机械压制而成。

2 颗粒测量

核能工程中颗粒测量的准确性、稳定性和重复性要求非常严格。另外,为了满足核反应堆物理设计的要求,也有一些特殊的测量项目,因此需要进行颗粒测量方法学的研究,目的是优化测量精度和速度,满足核燃料颗粒检测要求。

2.1 粒径和形状测量

为了描述颗粒群粒径的大小,一般要借助统计学的方法对颗粒粒径进行表征。商业动态颗粒尺寸和形状分析仪无法满足测量要求,需要进行改进。通过实验设计、加装具有独特功能单列的进样器^[8],将无序的颗粒整齐排列成一队,一个一个单独进入测量区域,通过光学投影精确测量,然后通过图形软件分析,得到每个颗粒的尺寸和形状,粒径测试精度优于 $5\mu m$ 。

2.2 密度测量

颗粒或者涂层密度可以通过粒度分析仪计算得到^[9],也可以通过液体滴定法测量得到。通过机械破坏的方式挑选出每个单独涂层的碎片,采用液体滴定法测量碎片密度的根据是,固体悬浮在液体中时二者密度相同的原理。本方法最重要的是找到能互溶的轻、重2种液体,且互溶后体积为单独轻、重2种液体体积之和。液体滴定测量法的精度达到 $0.01 g/cm^3$ 。

2.3 颗粒分布的测量

采用准等静压机械法制备的球形燃料元件需要

测量其内部颗粒分布状况,原因是核燃料颗粒分布的均匀性决定了核燃料元件的中子能谱和热量释放过程。清华大学核能与新能源技术研究院研制成功 X 线无损检测仪器,可获得元件中包覆颗粒的分布情况。通过 X 线无损检测实时成像技术测试方法得到电子图像,水平旋转工件,每隔一定角度得到一张电子图像。最终可以通过 X 线计算机断层扫描(CT)重建软件快速重建出工件的三维断层图像,如图 6 所示,可进行球形燃料元件内部颗粒的分布情况统计。

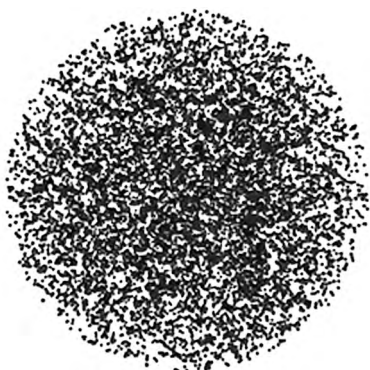


图 6 球形燃料元件内颗粒空间分布示意图
Fig. 6 Schematic diagram of particle distribution in
nuclear fuel element

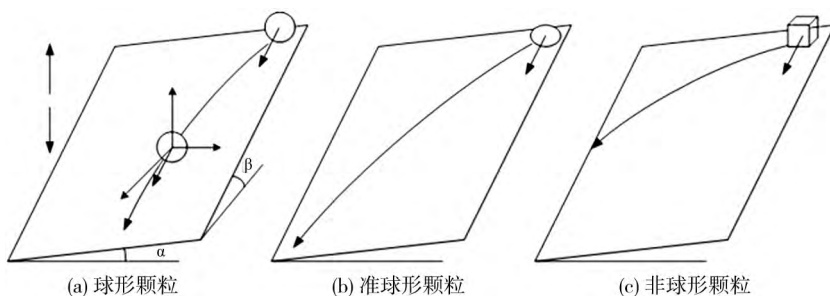


图 7 振动台分选原理示意图
Fig. 7 Schematic diagram of particle sorting principle

设计参数包括平台表面粗糙度、平台纵向长度、振动弹簧强度和安装位置等,操作参数包括倾斜平台的 2 个方位的倾斜角 α 、 β ,以及振动平台的振动频率和振动强度。研究表明,托板表面粗糙度大,有利于提高分辨力而不利缩短分选周期;调节弹簧强度和安装位置可以控制平台振动均匀性;增大托板的纵向长度,有利于提高分辨力,不利缩短分选周期。

4 颗粒流化

颗粒流态化技术是颗粒学的一个重要分支,其在核燃料循环工业中的应用非常广泛^[12],在高温气冷堆领域的典型应用是包覆颗粒制备的 FB-CVD 过程。需要指出的是,由于核能的安全性级别要求较高,不同

3 颗粒分选

3.1 尺寸分选

颗粒尺寸分选是颗粒学研究中古老的课题。核燃料颗粒尺寸分选的要求是高效、精确。通过分析各种颗粒筛选办法,研制出新型滚筒式颗粒尺寸分选设备,具有颗粒连续均匀进料、一次性 2 级分选、筛网不变形、不易堵塞、易拆卸清洗等特点。经过对筛网的结构、筛分样式等进行测试,优化筛网的双搭互扣结构和振动进料方式,研制出推挤式 2 级筛网、内部螺旋导流板结构^[10],大大提高了颗粒尺寸分选效率,可应用于核燃料颗粒工业化生产。

3.2 球形度分选

倾斜台振动分选是工业上对不同球形度颗粒的进行分别的手段之一,其原理是利用不同球形度的颗粒在振动的倾斜台上的运动轨迹不同来达到颗粒区分的目的,如图 7 所示。

高温气冷堆核燃料颗粒的球形度是高温气冷堆核燃料元件的重要指标和参数,如能在生产核燃料颗粒时就进行球形度的准确分选,对高温气冷堆燃料元件的安全性保证具有重要意义,因此需要对振动分选机的设计参数和操作参数进行研究^[11]。振动分选机的

批次颗粒包覆层的性质(厚度、密度、各向异性度等)要求均匀一致,因此对核燃料颗粒流态化过程中气、固接触效率提出了极高的要求。

为了满足核燃料颗粒包覆制备的需要,提出一种新型的喷动床,即多环斜孔式喷动流化床^[13-14]。其特殊设计的环状斜孔入口结构所形成的孔间气流强协同作用决定了颗粒的运动行为和气、固接触效率,既满足传统喷动床一般规律^[15],又有其自身特点。其主要特点是气体分别经由中心孔、多级环状分布的斜孔,按一定的分配比例和角度进入床内,共同形成喷动流化效果,满足 FB-CVD 过程中气、固均匀接触的要求。

与传统单入口喷动床不同,其喷动区、环隙区和喷泉区会受环孔数量、斜孔角度、锥度设计的影响,同

时颗粒还在床内形成局部的内循环。传统喷动流化床流化气体从环隙区底部细孔(微米级别)进入床内,形成颗粒流化效果,增加环隙区气含率,然而流化气孔在FB-CVD过程中很容易被沉积物堵塞,无法长期运行。传统多孔喷动床中每个入口设计与传统单孔喷动床的入口类似,多孔之间多为分腔室喷动,孔间的协同流化作用不强,床层底部颗粒不易流化,难以实现均匀包覆。多环斜孔式喷动流化床结合了传统多孔喷动床和喷动流化床的优点,其环状排列的不同入口角度的斜孔之间相互配合,通过孔间强协同作用,形成喷动流化效果,能够在短时间内实现气、固均匀接触,获得化学气相沉积的一致性,同时沉积物不易堵塞气孔,反应器可以长时间运行。该反应器还需要进一步明确各种结构参数、操作参数对颗粒流态化特征量的影响,明确多孔协同作用对颗粒运动的影响机制,为进一步优化床型和放大设计提供理论依据。

5 颗粒运输

5.1 吸收球运输

吸收球的顺利运输是实现反应堆有效控制的重要保证^[16]。吸收球气力输送全流程可分为气-固两相流段及气相段2部分。压送式气力输送系统(图8)主要由过滤器、罗茨风机、供料器、旋风分离器、贮球罐、吸收球孔道、涡街流量计、管道、阀门、计算机数据采集与处理系统等组成。空气经过滤后进入罗茨风机升压,通过旁路调节阀控制供料器入口的空气流速。具有一定压头的气流对供料器中的吸收球进行初始流态化形成气-固两相流,经供料器出口进入气力输送垂直管段,然后进入贮球罐中进行气、固分离。吸收球落入贮球罐内堆积,空气则从贮球罐中排出并最终排入大气。

吸收球运输研究包括输送压降特性研究^[16]、供

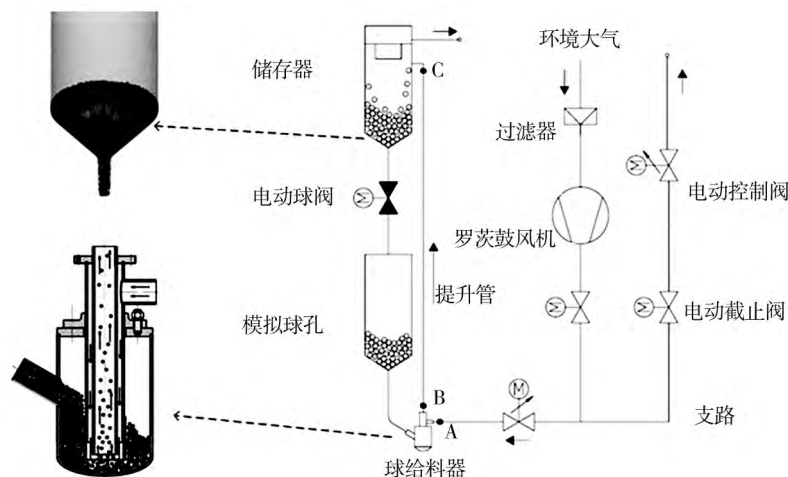


图8 吸收球气力输送系统示意图

Fig. 8 Schematic diagram of pneumatic transport of adsorber particles

料器结构影响^[17]、吸收球大小对气力输送过程的影响等。研究表明:物料粒径小,均匀性好,输送压力要求相对较低,而且小粒径物料与气流的跟随性好,其流动的径向均匀性也好;吸收球粒径增大时,风机理论功率、管路总压损、输送气流速度都会相应增大。

5.2 燃料元件运输

燃料元件运输循环系统采用重力和气力输送方式实现燃料元件的循环运行,每天数千个元件从堆芯底部被逐一排出,在具有空间走向的输送管道中借助连续气流产生的推力提升至堆芯顶部^[18]。由于球形燃料元件的直径与输送管道内径十分接近,直径比达0.92~0.97,因此该输送方式为近等径球流管路气力输送,如图9^[19]所示。在球床堆燃料元件气力输送过程

中,燃料球受到重力 F_g 、气体施加的推力 F_d 、侧向力 F_l 和转矩 M_o 的作用,产生轴向运动、横向运动和旋转运动 ω 。管球偏心距 e 、管道倾斜角 θ 、碰撞恢复因数

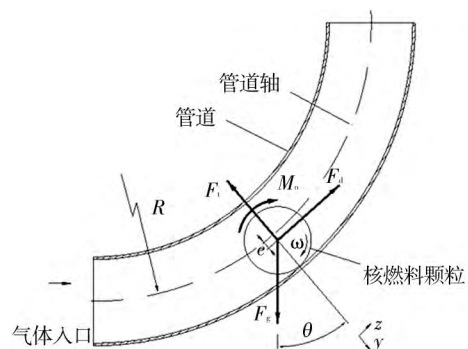


图9 燃料元件气力输送示意图

Fig. 9 Schematic diagram of pneumatic transport of fuel elements

管道弯曲半径 R 等管路结构参数对燃料元件的运动特性有显著影响。研究表明:管球直径比和管道倾斜角增大,燃料球的轴向加速时间缩短,末速度增大;碰撞恢复系数越大,燃料球与管道内壁的碰撞越剧烈;燃料球平衡速度小于气体流速,并随着管球直径比的增大而显著增大;减小管球直径比和管道弯曲半径可以限制整个气力输送过程燃料球的最终速度,减小燃料球对堆芯的冲击。

6 颗粒混合(球流运动)

球床式高温气冷堆采用不停堆换料方式,燃料元件在反应堆堆芯中的运动和混合过程,即堆芯球流运动规律是球床式高温气冷堆设计中重要的基础性问题。

为了展平堆芯功率密度分布,通常采用双区堆芯,即堆芯中间采用石墨慢化球,周边采用真实燃料元件,如图 10^[20]所示。双区边界处慢化球和燃料球的混合情况对反应堆功率输出影响重大,另外颗粒球的质量流率、稳定分区的大小、反应堆底部设计及堆芯顶部颗粒球的堆积情况等对反应堆设计有着至关重要的影响^[20]。离散单元法的模拟研究表明,燃料球和石墨球具有不同的更新周期,近壁的燃料球有迟滞现象,石墨球停留时间小于燃料球。倒锥形区域颗粒径向偏移增大,空隙率增大,为颗粒的混合提供了可能性。这些颗粒学模拟结果为高温气冷堆操作参数的设计提供了必要的理论和数据支持。

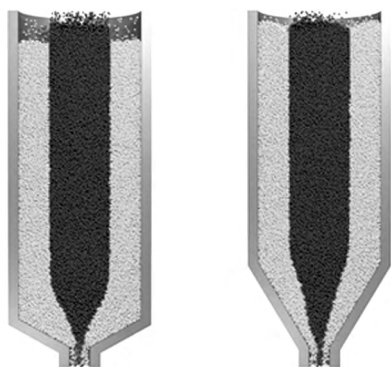


图 10 不同底部结构的双区堆芯示意图

Fig. 10 Vertical cross sections of different geometries of bidisperse core

7 石墨粉尘(碳气溶胶)

气溶胶指固体微粒或(和)液体微粒悬浮于气体介质中所形成的、具有特定运动规律的整个分散体系。燃料元件在循环的过程中,燃料球自身以及与其他石墨构件发生摩擦磨损,并产生石墨粉尘(碳气溶胶)^[21]。碳气溶胶的产生会引发一系列的新问题,并可

会影响反应堆的安全与正常运行^[22],因此需要对石墨粉尘的粒径分布、碳气溶胶粒子的碰撞、凝并和沉积、碳气溶胶放射性评估进行研究^[23]。

在石墨粉尘流动过程中,布朗运动使得石墨粉尘发生碰撞与凝并,导致石墨颗粒不断长大,并改变石墨粉尘的粒度分布。对石墨粉尘碰撞与凝并的研究可以借助颗粒动力学理论,得到石墨颗粒的凝并方程,通过选用适当的数值求解模型对凝并方程进行数值求解,得到稳态时石墨粉尘的粒度分布情况。沉积现象比较复杂^[24],它不但与石墨粉尘的参量有关(如密度和粒度等),而且还与流体的流动形式(层流或紊流)和物理性质(温度、黏度等)以及沉积表面的特性(几何形状、表面粗糙度和温度等)有关。系统的研究计算表明,10 MW 高温气冷堆中每年产生的石墨粉尘质量约为 2.74 kg,石墨粉尘在热气导管中总的沉积率为 0.166‰,每年在热气导管内石墨粉尘的沉积质量为 0.455 g^[23]。

8 总结和展望

通过对高温气冷堆中涉及的颗粒学应用问题的系统总结,可以发现核能工程中有大量的颗粒学应用问题,包括颗粒的制备、测量、流化、输送、分选、混合、碳气溶胶的凝聚和沉积等许多方面。长期以来,由于核能学科的特殊性,其中的颗粒学问题往往被作为一种孤立的现象进行专门的分析研究,因此难以形成完整的学术架构和研究体系。未来更应该重视颗粒学研究的普遍意义成果在核能工程中的交叉应用。例如,颗粒测量学的快速发展成果可以使得核燃料颗粒检测更加高效和可靠,气-固流态化相关基础知识的积累可以为核燃料包覆颗粒制备方法即 FB-CVD 过程的放大提供有益的借鉴,气溶胶学科的科学理论,如颗粒动力学理论可以为石墨粉尘的聚并和沉积提供研究基础等等。

需要说明的是,核能工程中的颗粒学应用和实践也是对颗粒学基础研究领域和内涵的一个很好的扩充和拓展。颗粒学一直都是一个多学科交叉的学科,应结合国民经济的现状和前景进行发展,颗粒学基础研究必须有应用实践作为导向和目标。核能作为在可预见的未来唯一一种可大规模替代传统化石能源的无 CO_2 排放的清洁能源,已经受到国家层面的关注,并将逐渐改变我国的能源结构,在未来国民经济中起到重要作用,因此核能工程中的颗粒学应用问题应该成为颗粒学科的一个重要组成部分。例如,高密度核燃料陶瓷颗粒的制备、流化、均匀包覆、碳气溶胶以及近等径管路颗粒输送中的科学问题,不仅仅是核能工程研究所关注的问题,而更应该是整个颗粒学研究一

个值得关注的发展方向。

致谢: 感谢清华大学核能与新能源技术研究院郝少昌、卢振明、聂君锋等同志提供相关研究资料!

参考文献 (References):

- [1] 中国科学技术协会, 中国颗粒学会. 颗粒学学科发展报告 (2009—2010)[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [2] 张平, 于波, 陈靖, 等. 核能制氢与高温气冷堆[J]. 化工学报, 2004 (增刊 1): 12–17.
- [3] HAO S, MA J, ZHAO X, et al. Large-scale production of UO_2 kernels by sol-gel process at INET[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 271: 158–161.
- [4] 刘马林, 郝少昌, 刘兵, 等. UO_2 核芯制备过程中分散滴球喷嘴内流动均匀性模拟研究[J]. 核动力工程, 2013 (5): 68–73.
- [5] LIU M. Coating Technology of nuclear fuel Kernels: a multiscale view [M]//ALIOFKHAZRAEI M. Modern surface engineering treatments. Rijeka: InTech, 2013: 160–184.
- [6] LIU M, LU Z, LIU B, et al. DEM simulation of particle mixing for optimizing the overcoating drum in HTR fuel fabrication [C]// Proceedings of 7th powders and grains conference. 2013: 726–730.
- [7] ZHOU X, LU Z, ZHANG J, et al. Preparation of spherical fuel elements for HTR-PM in INET[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 263: 456–461.
- [8] 张凯红, 赵宏生, 刘小雪, 等. 颗粒尺寸和形状分析设备: 中国, 102768172A[P]. 2012–10–22.
- [9] 李自强, 刘小雪, 赵宏生, 等. 颗粒尺寸分析仪法测量包覆颗粒疏松层密度的研究[J]. 原子能科学技术, 2013 (12): 130–133.
- [10] 刘马林, 卢振明, 邵友林, 等. 滚筒式颗粒尺寸分选装置: 中国, 103433200A[P]. 2013–06–23.
- [11] 左华亮, 杨志军, 刘隆祉. UO_2 燃料芯核振动分选机的模型仿真与分析[J]. 原子能科学技术, 2001 (2): 38–43.
- [12] 刘马林. 化工流化床技术在铀燃料循环工业中的应用[J]. 化工进展, 2013, 32 (3): 508–548.

- [13] LIU M, LIU B, SHAO Y. Optimization of the UO_2 kernel coating process by 2D simulation of spouted bed dynamics in the coater[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 251: 124–130.
- [14] LIU M, LIU B, SHAO Y, et al. Optimization design of the coating furnace by 3D simulation of spouted bed dynamics in the coater[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 271: 68–72.
- [15] LIU M, SHAO Y, LIU B. Pressure analysis in the fabrication process of TRISO UO_2 -coated fuel particle[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, 250: 277–283.
- [16] 李天津, 何学东, 陈凤, 等. 吸收球气力输送压降特性冷态试验研究[J]. 原子能科学技术, 2012 (增刊 2): 815–818.
- [17] LI T, CHEN F, ZHANG H, et al. Effect of feeder inner structure on feeding performance for absorber sphere pneumatic conveying[C] // Proceedings of 21st international conference on nuclear engineering, 2013: 1–5.
- [18] LIU J G, XIAO H L, LI C P. Design and full scale test of the fuel handling system[J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218: 169–178.
- [19] 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及应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2012, 52 (8): 1075–1080.
- [20] RYCROFT C H, GREY G S, LANDRY J W, et al. Analysis of granular flow in a pebble-bed nuclear reactor[J]. Physical Review: E, 2006, 74 (2): 021306–1–021306–18.
- [21] PENG W, ZHANG T, YU S, et al. Graphite dust resuspension in a depressurization accident of HTR[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 265: 785–790.
- [22] YU X, YU S. Analysis of fuel element matrix graphite corrosion in HTR-PM for normal operating conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2010, 240: 738–743.
- [23] 雒晓卫. 10 MW 高温气冷堆中石墨粉尘行为研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [24] 陈志鹏, 于溯源. 高温气冷堆一回路管道内石墨粉尘沉积模型分析[J]. 过程工程学报, 2010, 10 (增刊 1): 211–215.

本期广告目次

彩页

- 封面 珠海欧美克仪器有限公司
- 封二 广州市博勒飞粘度计质构仪技术服务有限公司
- 封三 福建龙岩市亿丰粉碎机械有限公司
- 封四 丹东百特仪器有限公司
- 插一 浙江丰利粉碎设备有限公司
- 插二 桂林恒达矿山机械有限公司
- 插三 潍坊正远粉体工程设备有限公司
- 插四 插五 福建丰力机械科技有限公司
- 插六 山东华特磁电科技股份有限公司
- 插七 耐驰(上海)机械仪器有限公司
- 插八 济南微纳颗粒仪器股份有限公司
- 插九 盐城吉达机械制造有限公司

插十 成都精新粉体测试设备有限公司

- 插十一 第十二届中国国际粉体加工 / 散料输送展览会
- 插十二 长沙高新开发区万华粉体设备有限公司
- 插十三 河南黎明重工科技股份有限公司
- 插十四 合肥中亚建材装备有限责任公司

单色整版

- 插一 浙江力普粉碎设备有限公司
- 插二 沈阳飞机研究所粉体公司
- 插三 大连德宝力机械制造有限公司
- 插四 《中国粉体技术》双月刊
- 插五 南京南大有限公司
- 插六 上海细创粉体装备有限公司