

UO₂核芯还原炉设计模拟研究

刘马林¹, 刘业飞², 郭文利^{1,*}, 梁彤祥¹

(1. 清华大学 核能与新能源技术研究院, 精细陶瓷北京市重点实验室, 北京 100084;

2. 清华大学 化学工程系, 北京 100084)

摘要:以 N-S 方程和 $k-\epsilon$ 湍流模型为基础, 针对 UO₂ 核芯颗粒制备过程中的焙烧还原炉设备, 采用计算流体力学方法模拟考察了南非和国内正在使用的两种还原炉体设计及入流速度对内部流场的影响。从模拟结果中可发现, 两种炉体设计均无法实现气流在轴向上的均匀分布, 而是呈现出炉体顶部气量大、底部气量小的分布状态, 这是导致颗粒还原不均匀的原因之一, 且这种不均匀性随气速增加变化不大。在分析轴向压力变化影响径向气流分布的基础上对还原炉体进行了改进, 提出了一种新型设计, 模拟结果证实改进后的炉体设计能够实现径向气流在轴向上更为均匀的分布, 因而可推定该新型炉体设计可使炉内不同轴向高度处的颗粒还原更加均匀。

关键词:计算流体力学; 还原炉; UO₂ 核芯

中图分类号: O35

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)09-1087-06

Simulation Study of UO₂ Kernel Reduction Furnace Design

LIU Ma-lin¹, LIU Ye-fei², GUO Wen-li^{1,*}, LIANG Tong-xiang¹

(1. *Beijing Key Lab of Fine Ceramics, Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Based on the N-S equations and the $k-\epsilon$ turbulence model, different kinds of UO₂ kernel reduction furnace equipments in PBMR, South Africa and INET, China were numerically simulated using computational fluid dynamics method. The simulation results show that these two kinds of furnace designs can not be achieved on the uniform distribution of gas flow in the axial direction, but show large volume at the top and small volume at the bottom of the furnace, and this is one of the reasons of non-uniform particle reduction. Improved design was proposed based on the analysis of changes of axial pressure in the furnace. Simulation results demonstrate that the improved furnace design is suitable for obtaining a more uniform distribution of the gas in the axial direction. It can be concluded that the improved furnace design will improve particle reduction effects.

收稿日期: 2010-06-22; 修回日期: 2010-12-11

基金项目: 国家重大专项资助项目 (ZX06901-013)

作者简介: 刘马林 (1983—), 男, 安徽淮北人, 助理研究员, 博士, 核燃料循环与材料专业

* 通信作者: 郭文利, E-mail: guowenlily@tsinghua.edu.cn, 电话: 010-89796101

Key words: computational fluid dynamics; reduction furnace; UO_2 kernel

高温气冷堆燃料元件 UO_2 核芯采用溶胶凝胶工艺进行生产。工艺基本流程包括溶解、制胶、分散、陈化洗涤、干燥、焙烧、还原和烧结。还原操作在一特殊设计的还原炉中进行。为增大处理量,通常将 UO_3 固体颗粒置于多层托盘中,这些多层托盘中轴串联在一圆柱中轴上,气体从中轴分级进入托盘,进而发生还原反应。文献[1]报道,当这些托盘均堆放在还原炉中时,处于不同轴向高度(即不同级)的托盘中的颗粒其还原效果不同,即还原后的核芯直径、氧铀比和核芯颗粒密度等均有所差别。这种显著的非均匀性表明,部分 UO_3 颗粒并未完全被还原,这应与托盘设计、 H_2 流量、温度和反应时间等因素相关。导致产品非均匀性的主要原因是还原气体的流动模式。另外,文献[1]还对不同气体流量和还原温度下颗粒的还原效果进行了研究,以期获得质量均匀的 UO_2 核芯。

本文采用计算流体力学的方法对还原炉进行全床数值模拟,并提出一种改进的炉体设计。

1 模拟方法

1.1 数学模型

将 Navier-Stokes 方程通过有限体积法进行离散化处理,采用 SIMPLE 压力校正算法进行求解,湍流采用 k - ϵ 模型进行模拟计算。质量和动量基本控制方程^[2]如下。

质量守恒方程(连续性方程)为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = -\nabla p' +$$

$$\nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} (\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T)) + F_B \quad (2)$$

采用不可压缩流体模型进行模拟,边壁采用无滑移(non-slip)边界条件,入口采用速度入口边界条件,出口采用压力出口边界,流场各初值的设置由程序默认,流速初场为 0 m/s。在本文模拟中因孔流较多,需考虑湍流的模拟,采用通用的 k - ϵ 模型方程,其中湍流动能 k 和湍动耗散率 ϵ 的输运方程^[3]为:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} k) =$$

$$\nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \epsilon) =$$

$$\nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1} G_k - C_{\epsilon 2} \rho \epsilon) \quad (4)$$

式中: ρ 为流体密度; $\mathbf{u}$ 为流体的时均速度矢量; t 为时间; μ_{eff} 为考虑了湍流效应的有效黏度 ($\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$), μ 为黏度, μ_t 为湍流黏度,其计算表达式为 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \epsilon$; p 为流体压力; p' 为修正压力; F_B 为体积力的总和; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, σ_k 、 σ_ϵ 为常数。

$$p' = p + \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \nabla \cdot \mathbf{u} + \frac{2}{3} \rho k \quad (5)$$

$$G_k = \mu_{\text{eff}} \nabla \cdot \mathbf{u} (\nabla \cdot \mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{u} (\mu_{\text{eff}} \nabla \cdot \mathbf{u} + \rho k) \quad (6)$$

上述模型中包含参数的取值^[4]为: $C_{\epsilon 1}$, 1.44; $C_{\epsilon 2}$, 1.92; σ_k , 1.0; σ_ϵ , 1.3; C_μ , 0.09。

1.2 模拟设置

本文模拟所涉及的还原炉设计几何构型分别来自南非 PBMR(以下简称 PBMR 还原炉)、清华大学核能与新能源技术研究院(以下简称 INET 还原炉)以及改进后的还原炉设计。通过对还原炉设计进行研究可发现,现有的两种还原炉最大的不同在于 PBMR 还原炉的入口和出口分别位于还原炉的两端,而 INET 还原炉则将入口和出口均设置于还原炉的底端,这两种设计形式将影响还原炉内部气体流场的分布。在内部托盘设计上二者较为类似,均设计为上下叠加的托盘,还原气体从中轴通道流入,然后从中轴侧壁孔流入托盘,并和置于托盘中的颗粒发生反应,而后还原气体产物和未参与反应的还原气体从托盘外缘孔流出,沿炉体外壳内侧汇集,最后从气体出口流出。

上述两种还原炉内部近似为中心轴对称结构,因此均可采用轴对称面二维稳态模拟来进行分析。根据还原炉内部的几何结构特征,流域网格采用非结构网格,特别是在中心轴气流通道和侧壁孔附近等位置进行了局部网格加密处理,这样有助于提高计算精度,总网格数约 60 万。计算开始时采用一阶精度,以保证计算

的速度和收敛性,之后采用二阶精度得到模拟结果。为便于比较,将 PBMR 还原炉的模拟结构改为底部为气体入口,顶部为气体出口,如图 1 所示。设置模拟还原炉的主体高度为 1.0 m,内径为 0.5 m,上下为圆弧形形状,中置 16 个托盘,最上方设置 1 个托盘盖,托盘盖的轴向高度为 0.9 m,每两个托盘间的轴向间距为 50 mm,托盘半径为 200 mm,托盘外缘挡板高 25 mm,中轴管道直径为 40 mm,最高处轴向高度为 0.95 m,侧壁孔位于每层托盘底部,直径均为 5 mm。气体入口位于中轴管道底部,直径为 18 mm,PBMR 还原炉的气体出口置于顶部,直径为 40 mm。INET 还原炉的气体出口在底部中轴管道的两侧,直径也为 40 mm。

对模拟结果的网格无关性进行验证,选取合适的网格划分密度。在模拟中还发现,模拟结果非常依赖于收敛精度,分别选择了 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 和 10^{-6} 等 4 个收敛精度进行模拟计算,结果发现当收敛精度为 10^{-5} 和 10^{-6} 时,二者模拟结果基本相同。因此,为提高运算效率,本文在所有模拟过程中将收敛精度设置为 10^{-5} 。

2 结果与讨论

考察目标为通过轴向上每个侧壁孔的平均径向气速 U_r ,其与侧壁孔面积 A 的乘积即为进入侧壁孔对应的托盘的气体流量 Q ,即 $Q = U_r A$ 。在实际设计中,由于侧壁孔的大小一致,且每个托盘底面均为无孔设计,故进入每层托盘的 Q 和对应的 U_r 的变化趋势应是一致的。而进入每层托盘的 Q 直接影响到每层托盘的颗粒

还原效果,因此本文进行还原炉设计的目标之一即是使通过每个侧壁孔的 U_r 沿轴向分布均匀。

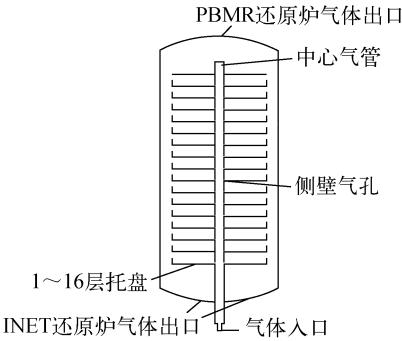


图 1 还原炉的几何设置
Fig.1 Dimensions of reduction furnace
图中托盘序号从底部到顶部为第 1~16 层

2.1 PBMR 还原炉设计

当入口气速 U_{inlet} 分别为 7.0 m/s(图 2a)和 17.0 m/s(图 2b)时,气速在还原炉内的分布情况如图 2 所示。从图 2 可看到,径向气流分布沿轴向呈明显的不均匀分布,且这种不均匀性随着入口气速的增加并无改善的趋势。由此表明,在这种还原炉的设计中,还原气体大多会进入到炉体第 13~16 这 4 层托盘内,因此,这 4 层内的颗粒被还原的效果最好,而其他层托盘内的颗粒还原程度则很不充分。

图 3 示出 PBMR 还原炉内的静压力场分布,可看到,在炉体第 13~16 这 4 层托盘附近中心气管的压强较高,而下方 12 层托盘临近的压强变化不大。同时,上方 4 层侧面通道的压力损失也最大。

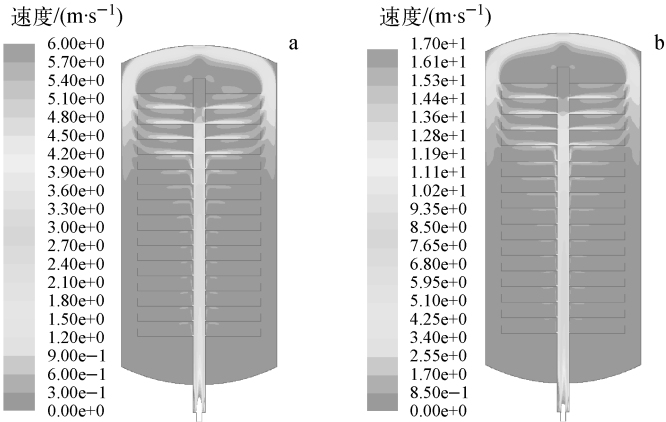


图 2 PBMR 还原炉内不同入口气速下气流速度的模拟结果

Fig.2 Simulation results of gas velocity under different inlet gas velocities in PBMR reduction furnace

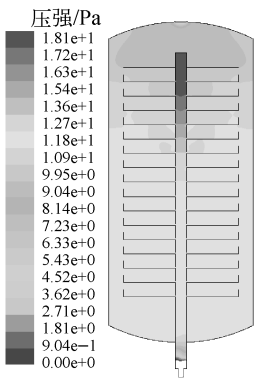


图3 PBMR 还原炉内静压力场分布的
模拟结果($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)

Fig. 3 Simulation results of static pressure profile
in PBMR reduction furnace ($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)

为进一步说明造成轴向气流不均匀分布的决定因素,图4示出PBMR还原炉内通过轴向上每个侧壁孔的 U_r 与中心管道内的轴向静压强分布($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)。可看出,二者的变化趋势是一致的,这说明中心管道顶部的高压区会使大部分气体从炉体第13~16这4层托盘内通过,故而导致通过炉体下方12层托盘的气体量逐渐减少。

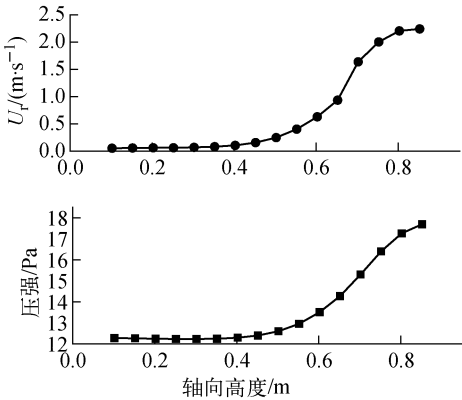


图4 PBMR 还原炉内轴向上每个侧壁孔的
 U_r 与轴向压强分布

Fig. 4 Simulation results of U_r and pressure
along axial distance in PBMR reduction furnace

2.2 INET 还原炉设计

U_{inlet} 为 7.0 m/s 的条件下,流速在INET还原炉内的分布情况如图5所示。从图5可看出,与图2a相比,径向气流分布的轴向分布稍有改善,如第12层托盘上的气流明显增加,但

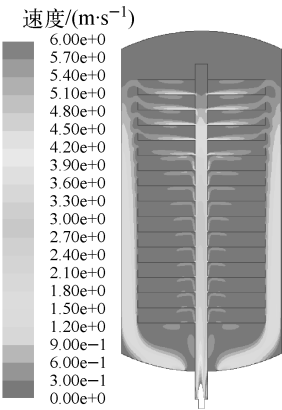


图5 INET 还原炉内气流速度的模拟结果
($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)

Fig. 5 Simulation results of gas velocity
in INET reduction furnace ($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)

在轴向上也呈明显的不均匀分布。

图6示出INET还原炉内的静压力场分布,可看出,在炉体第13~16这4层托盘附近中心气管的压强较高,下方12层托盘临近的压强变化不大。同时也可看出,上方4层侧面通道的压力损失也最大,这与PBMR还原炉类似。

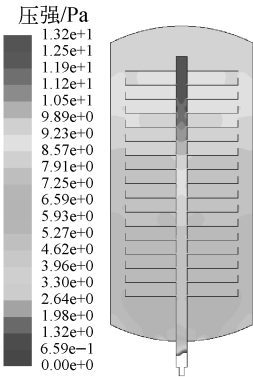
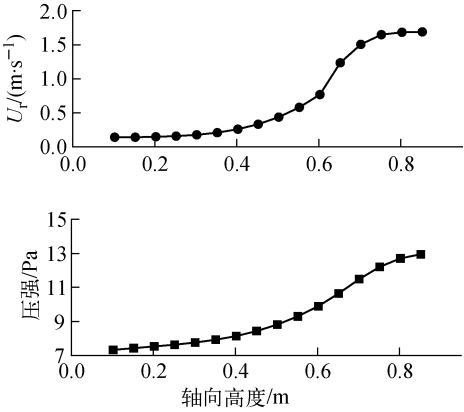


图6 INET 还原炉内静压力场分布的
模拟结果($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)

Fig. 6 Simulation results of static pressure profile
in INET reduction furnace ($U_{\text{inlet}}=7.0\text{ m/s}$)

图7示出INET还原炉内通过轴向上每个侧壁孔的 U_r 与中心管道内轴向压强分布,可看到二者的变化趋势也是一致的,这说明高压区的存在会使径向气流高速射出,从而导致径向气流的轴向分布不均匀。



盘之间加入一长度为 5 mm 的锯齿板,模拟结果如图 8 所示。可看出,进入第 11 层托盘的气流速度明显增大,这说明通过锯齿板可改进径向气流速度在轴向分布上的不均匀性。

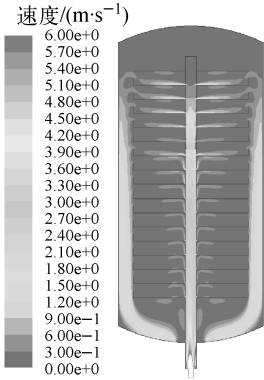


图 7 INET 还原炉内通过轴向上每个侧壁孔的 U_r 与轴向压强分布

Fig. 7 Simulation results of U_r and pressure along axial distance in INET reduction furnace

2.3 改进后的还原炉设计

从上述两种炉型设计来看,通过侧壁孔的 U_r 沿轴向均呈不均匀分布,这种不均匀性是由中心轴管道内的压强分布决定的。若能改变中心管道内靠近侧壁孔位置处局部压力的轴向分布,则通过侧壁孔 U_r 的轴向分布也会随之改变。因此,此处引入化工中常见的锯齿管增强传热的概念^[5],即通过在中心轴管道内侧加入类似锯齿的小板,以改变局部压力分布,从而使压强轴向分布的均匀性得到改进,再逐步进行模拟优化设计,最终使通过侧壁孔的 U_r 沿轴向分布趋于均匀。

1) 改进设计 1

为验证上述想法,在第 11 层和第 12 层托

图 8 改进设计 1 中还原炉内气流速度的模拟结果($U_{inlet}=7.0\text{ m/s}$)

Fig. 8 Simulation results of gas velocity in reduction furnace by improved design 1 ($U_{inlet}=7.0\text{ m/s}$)

2) 改进设计 2

在改进设计 1 的基础上再逐步进行优化设计,最终确定改进设计 2 中在还原炉的第 5~12 层托盘之间分别加入一长度为 5 mm 的锯齿板,而在第 1~5 层托盘之间则分别加入一长度为 2.5 mm 的锯齿板,模拟结果如图 9 所示。从图 9 中可看出,侧壁径向气流的分布状况大为改善,中心气管中静压力分布趋于均匀,同时,各侧壁孔的流道压力损失也几乎一致。

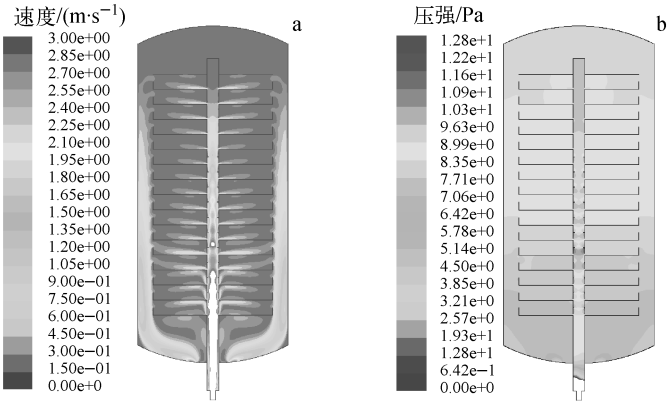


图 9 改进设计 2 中还原炉内的模拟结果($U_{inlet}=7.0\text{ m/s}$)

Fig. 9 Simulation results in reduction furnace by improved design 2 ($U_{inlet}=7.0\text{ m/s}$)

a——速度分布;b——静压力分布

图 10 示出 3 种还原炉内通过侧壁孔的 U_r 的模拟结果对比情况。可发现, U_r 由改进前炉体顶部约为 2.0 m/s、底部约为 0.2 m/s 变为改进后炉体顶部和底部气速均趋于 0.75 m/s。由此表明, 改进后的炉体设计实现了气流在轴向上较为均匀分布, 从而可推测新型炉体设计能使炉内不同轴向高度处的颗粒还原更为均匀。

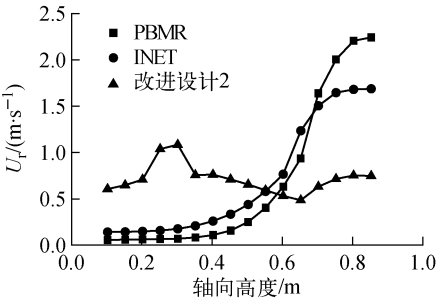


图 10 3 种还原炉内通过侧壁孔的 U_r 的轴向变化比较

Fig. 10 Comparison of U_r in three kinds of reduction furnaces

3 结论

本文模拟研究了 UO_2 核芯还原炉炉型设计对炉内气体流动分布的影响, 并对还原炉内部构型进行了优化改进设计。通过以上分析, 可得出如下结论。

- 1) PBMR 还原炉和 INET 还原炉的炉型设计均不能使进入各层托盘内的气体量沿轴向趋于均匀, 且这种不均匀性在入口气速增加时并未得到改善。
- 2) 进入托盘内的气体量在轴向上的不均匀性和中心管道内轴向压强的不均匀分布是密

切相关的, 改变轴向压强分布可改变进入托盘内的气体量在轴向上的分布状况。

3) 通过在中心轴管道内侧加入锯齿板, 提出一种改进还原炉设计, 可改变侧壁孔附近的局部压强分布, 从而使中心管道内的轴向压强分布趋于均匀。同时模拟结果也表明, 改进后的还原炉设计可使进入每层托盘内的气体量沿轴向分布更为均匀。

参考文献:

[1] MÜLLER A. Establishment of the technology to manufacture uranium dioxide kernels for PBMR fuel[C] // 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology. Johannesburg, South Africa: [s. n.], 2006: 1-4.

[2] 张建文, 杨振亚, 张政. 流体流动与传热过程的数值模拟基础与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 13-36.

[3] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[4] 秦本科, 薄涵亮, 郑文祥, 等. 组合阀布降流道三维数值模拟[J]. 原子能科学技术, 2010, 44(1): 34-39.

QIN Benke, BO Hanliang, ZHENG Wenxiang, et al. Numerical analysis of flow field in integrated valve step-down flow channel [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2010, 44(1): 34-39(in Chinese).

[5] BAE J H, PARK M H, LEE J H. Local flow and heat transfer of a 2-row offset strip fin-tube heat exchanger[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 1999, 6(1): 13-29.