# 脱硝流化床的流体仿真计算研究

赵永龙(中核四0四有限公司后处理运行公司,甘肃 兰州 735100)

张 晖(甘肃新核建设实业有限公司,甘肃 兰州 735100)

摘 要:流化床是制备三氧化铀产品的关键设备,因三氧化铀具有较强的放射性,这就为开展脱硝流化床的实验研究带来了一定的限制,利用成熟的流体仿真计算软件,可以对流化床的各种运行工况进行仿真计算,这为开展流化床的研究提供了很大的便利。本文利用 ANSYS Fluent 软件对 k-e 计算模型的适宜性,沟流及腾涌工况的产生,侧向进气方式对流态化的影响,喷嘴射流对流态化的影响进行了仿真计算研究。仿真计算结果表明,标准 k-e 计算模型对流化床的仿真计算具有更好的适宜性,小颗粒和低流化气速可造成流化床沟流,大颗粒和高流化气速可造成流化床腾涌,侧向进气方式更有利于流态化,床内气固两相分布均匀,无死床区,但需更高的流化气速,喷嘴射流对流态化有较为明显的影响,在实际应用中可通过调整喷嘴结构来使雾化效果更好,对流态化的影响更小。

关键词:流化床仿真;沟流;腾涌;侧向进气;喷嘴射流

Abstract: Fluidized bed is the key equipment for the preparation of uranium trioxide products. Due to the strong radioactivity of uranium trioxide, it has brought certain limitations for the experimental study of denitrification fluidized bed. Using mature fluid simulation software, various operating conditions of fluidized bed can be simulated and calculated, which provides great convenience for the study of fluidized bed. In this paper, ANSYS Fluent software is used to simulate and calculate the suitability of k- $\varepsilon$  calculation model, the generation of ditch flow and surge conditions, the influence of lateral intake mode on fluidization, and the influence of nozzle jet on fluidization. The simulation results show that the standard k –  $\varepsilon$  calculation model has better suitability for the simulation calculation of fluidized bed. Small particles and low fluidization gas velocity can cause the ditch flow of fluidized bed, large particles and high fluidization gas velocity can cause the fluidized bed to swell, and the lateral inlet mode is more conducive to fluidization. The gas-solid two-phase distribution in the bed is uniform, and there is no dead bed area. However, higher fluidization gas velocity is needed. The nozzle jet has a relatively obvious influence on fluidization. In practical application, the atomization effect can be better and the influence on fluidization can be smaller by adjusting the nozzle structure.

Key words: fluidized bed simulation; ditch flow; surge; lateral intake; nozzle jet

# 1 引言

随着流态化技术在石油工业和化学工业中应用的不 断发展,从 20 世纪 50 年代开始逐渐向核工业领域发展。

美国和英国是最早研究将流化床脱硝技术应用于核 燃料循环前端的国家,如英国斯普林菲尔德厂和美国马 林克洛特大型核燃料前处理厂。

随着流化床脱硝技术在核燃料循环领域的逐步发展 和成熟,美国和英国又将流化床脱销技术成功应用于核 燃料循环后端工艺过程,如英国温茨凯尔二厂、美国中 西部燃料回收厂及爱达荷化学处理厂都成功的应用流化 床脱硝技术制备三氧化铀产品。

流化床脱硝是利用压缩空气将硝酸铀酰溶液雾化喷 入使用三氧化铀颗粒充床的高温床体内,硝酸铀酰溶液 随即脱水、分解并生成三氧化铀颗粒。因流化床设备结 构简单、无转动部件、容易实现自动化操作等优点而广 泛应用于核燃料循环后端工艺。

因核燃料循环后端产品仍具有较强的放射性,必须 在具备条件的放射化学实验室或后处理厂开展实验研 究,且开展实验研究具有一定的难度,这就限制了对流 化床脱硝技术在核燃料循环后端的技术研究。 为解决以上客观存在的问题,本文利用大型商业化 流体仿真计算软件 ANSYS Fluent 模块,结合脱硝流化床 的实际工艺设计参数,对脱硝流化床的运行过程进行了 流体仿真计算研究。

#### 2 ANSYS Fluent 简介

ANSYS Fluent 软件是当今世界 CFD 仿真计算领域最为全面的软件包之一,基于有限体积法开发,具有广泛的物理模型,能够快速、准确的计算出结果。

流化床的流体仿真计算主要涉及以下模块:

2.1 Geometry 模块

Geometry 模块用来建立进行流体仿真计算的几何模型, ANSYS Fluent 提供了 SpaceClaim Geometry、Discovery Geometry 和 DesignModeler Geometry 三种建模工具,本 文选择 DesignModeler Geometry 工具进行流化床建模。

#### 2.2 Meshing 模块

本模块为为网格划分模块,用来进行流化床计算模 型的网格划分操作。

## 2.3 Solution 模块

本模块为计算设置模块,用来进行通用条件、材料、 计算模型、边界条件、求解方程、松弛因子、计算步长 及步数等设置。

#### 2.4 CFD-Post 模块

本模块用来对计算结果进行分析及处理,将计算结 果输出为颗粒云图、速度矢量图、二维图及动画等,便 于对计算结果进行分析。

# 3 流体仿真计算

本文计算中所使用脱硝流化床的参考文献 [1] 中的设计数值,即流化床直径 200mm,床层高度取 1200mm。

## 3.1 仿真模型对比研究

针对流化床的流体计算仿真, ANSYS Fluent 供提供 了标准 k-ε 模型、重整化群 k-ε 模型和 Realizable k-ε 模型三种计算模型,本文针对以上三种仿真模型,在相 同的初始条件下进行对比研究,选择出最佳的计算模型, 便于后续计算工作的开展。



图1 标准 k-c 模型计算结果和残差趋势



图 2 重整化群 k-c 模型计算结果和残差趋势



(从左至右,分别为 1.0s、 2.0s、
3.0s、 4.0s、 5.0s 时刻颗粒云图)
图 3 Realizable k-ε 模型计算结果和残差趋势

设定初始计算条件如下:颗粒直径为0.2mm,进气 速度为0.2m/s,三氧化铀颗粒密度为3.68g/cm<sup>3</sup>,仿真计 算步长设置为0.01s,计算总步长设置为500步,其他 条件为默认值,计算结果如图1、图2和图3所示。

通过对三种计算模型的对比分析可以看出,在采用 默认松弛因子设置的情况下,标准 k-ε模型、重整化 群 k-ε模型均能较好的模拟流态化过程,特别是标准 k-ε模型计算残差变化平缓,且能满足残差小于10-3 的计算要求,在后续的计算中采用标准化 k-ε模型进 行计算。

3.2 沟流及腾涌研究

contour-1 Volume fraction (solid) 6.29e-01 5.67e-01 5.04e-01 4.41e-01 3.78e-01 3.15e-01 2.52e-01 1.89e-01 1.26e-01 6.29e-02 0.00e+00



(从左至右,分别为 1s、1.5s、2.0s 时刻颗粒云图) 图 4 沟流仿真计算结果



(从左至右,分别为 1s、1.5s、2.5s、3.0s 时刻颗粒云图) 图 5 腾涌仿真计算结果 流化床的流化气进口速度和三氧化铀颗粒直径直接 决定着流化床的运行状态,特别是在小颗粒直径和低流 化气速工况和大颗粒直径和高流化气速工况下,流化床 会出现典型的沟流和腾涌两种异常工况。

本文通过改变流化气进气速度和三氧化铀颗粒直径 对沟流和腾涌过程进行仿真计算。

沟流工况仿真计算设置颗粒直径为0.01mm,流化 气速为0.1m/s,密度为3.68g/cm<sup>3</sup>,计算步长0.01s,计 算结果如图4所示。

通过对图 4 分析可知, 1s 时刻流化床底部颗粒出现 局部流态化趋势, 1.5s 时流化气前流化床内壁形成明显 贯穿通道,出现沟流趋势, 2.0s 时刻流化气沿壁面局部 贯穿,形成沟流现象。

腾涌工况仿真计算设置颗粒直径为 0.8mm,流化气 速为 0.9m/s,密度为 3.68g/cm<sup>3</sup>,计算步长 0.01s,计算 结果如图 5 所示。

通过分析图 5 可知,在 1s 时刻流化床内部形成与流 化床同直径的大气泡,无聊随气泡在床体内上升,在1.5s 时刻,部分物料回落至床底,2.5s 时刻床内形成两段气 泡,物料在气泡的作用下继续运动,3.0s 时刻,物料重 复前时刻运动,形成类似活塞运动工况,出现明显的腾 涌现象。

# 3.3 进气方式研究

本文通过改变流化气的进气方式,对流化床内部的 流态化过程进行了仿真计算。计算中流化床的进气方 式为从流化床底部与壁面垂直的侧孔进气,颗粒直径 0.2mm,进气速度为0.45m/s,流态化仿真结果如图6所 示。



(从左至右,分别为 3.0s、 4.0s、 5.0s 时刻颗粒云图) 图 6 侧向进气仿真计算结果

对比图 1 可知,侧向进气方式能够带来更加均匀的 床内气相和固相的分布,更加有利于硝酸铀酰的脱硝过 程,床层底部无死床区,且不易在床内结块。但在相同 的仿真条件下,侧向进气需要更大的进气速度,方可保 证正常的流态化。

# 3.4 喷嘴射流对流态化的影响

前述仿真计算过程均未考虑喷嘴射流对床内流态化 过程的影响,为更加真实的模拟流化床内部工况,本部 分仿真加入喷嘴射流对仿真的影响。假设喷嘴距床底高 度为 500mm,喷嘴直径为 2.5mm 圆孔,颗粒直径 0.2mm, 流化气速度 0.3m/s,假设喷嘴只进入气相,仿真计算结 果如图 7 所示。





通过分析图 7 的仿真计算矢量图可知,在喷嘴附近 射流对床内颗粒的运动造成了明显的影响,颗粒在射流 的作用下由垂直运动变为沿着射流边缘的运动,甚至局 部出现击穿现象,在实际应用中,可通过改变喷嘴的结 构,增加射流的轴向宽度,降低喷射距离,防止料液在 壁面结疤。

# 4 结论与总结

本文通过采用 ANSYS Fluent 对核燃料循环后端关键 设备脱硝流化床进行了流体仿真计算,得到以下结论:

①标准 k-ε 模型可较好的对脱硝流化床进行流体 仿真计算,可满足实际应用需求;

②通过改变流化气的进气速度和三氧化铀颗粒的直径,对沟流和腾涌两种典型的异常工况进行了仿真计算, 对流化床的正常稳定运行具有重要的指导意义,避免出现上述异常工况;

③流化床侧向进气可以带来更好的流态化效果,可 防止垂直进气方式中颗粒对进气孔的堵塞,但相比垂直 进气,侧向进气方式需要更大的进气速度;

④进料喷嘴射流对流化床的运行有较为明显的影响,在实际应用中可通过改变喷嘴结构,降低喷射速度 及距离,增大射流的纵向宽度,来实现更好的雾化效果 并防止料液在壁面结疤。

# 参考文献:

 顾水忠.中试厂铀尾端脱硝工艺设计[J].核工程研究 与设计,1997(22):6.

## 作者简介:

赵永龙(1988-),男,汉族,甘肃天水人,硕士研究 生,工程师,研究的方向: 乏燃料后处理化工设备的流 体仿真计算方面。