

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.05.004

硝基胍连续喷雾干燥数值模拟研究*

赵林林 郭效德 黄珊珊 向贵锋

南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心(江苏南京,210094)

[摘 要] 在对喷雾干燥塔内流动特点认识的基础上,采用较为成熟的计算流体力学(CFD)模型及算法,建立适用于硝基胍物料喷雾干燥的应用模型。利用 Gambit 软件对几何模型进行网格划分,导入 Fluent 中进行数值计算,预测塔内流场分布情况、液滴含水率及颗粒平均粒径等。通过测试样机干燥产品的含水率、产品粒度分布及场内温度分布等发现,预测结果与实验结果大致吻合,说明模拟结果有一定的准确度和可靠性。

[关键词] 数值模拟;硝基胍;喷雾干燥系统;计算流体力学(CFD)

[分类号] TQ560.7; O64

Numerical Simulation of Continuous Spray Drying of Nitroguanidine

ZHAO Linlin, GUO Xiaode, HUANG Shanshan, XIANG Guifeng

National Special Superfine Powder Engineering Research Center of China, Nanjing University
of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] Computational fluid dynamics (CFD) model and algorithm were used to establish suitable application model for spray drying of nitroguanidine based on the understanding of the flow characteristics of materials in spray drying tower. The geometric model was meshed by Software Gambit. It was introduced into Fluent for numerical calculation to predict flow field distribution, droplet moisture content and the average particle size in the tower. In the experiment, the moisture content, particle size distribution and temperature distribution in the field of dried products tested by the experimental prototype are used to verify the correctness of the mathematical model. The predicted results are similar to the experimental results, indicating the simulation results have certain accuracy and reliability.

[KEYWORDS] numerical simulation; nitroguanidine; spray drying system; computational fluid dynamics (CFD)

引言

硝基胍是一种具有优越综合性能的易燃、易爆材料。为保证制造过程安全,硝基胍物料制备工序一般在水中进行,然而使用时又需要足够干燥。目前,硝基胍干燥设备仍然采用传统的落后干燥技术,很难满足大批量、连续生产的工艺需求。因此,急需寻求一种新的干燥技术与装备^[1]。

喷雾干燥因快速、高效等特点,得到了广泛的应用与研究^[2-4]。喷雾干燥是利用雾化器将料液分散为细小的雾滴,并在热干燥介质中迅速蒸发溶剂、形成干粉产品的过程。喷雾干燥一般包括 4 个阶段:料液雾化、雾群与热干燥介质接触混合、雾滴的蒸发

干燥、干燥产品与干燥介质分离^[5]。采用喷雾干燥技术对硝基胍浆料进行干燥,改善了落后工艺,满足了工业化、连续性的生产需求^[6-7]。

随着喷雾干燥技术在工业上的不断应用,国内外学者加深了计算机仿真技术在喷雾干燥领域的研究,并模拟出干燥塔的流场分布、两相流作用等,为干燥理论研究、塔内优化分析提供相应的理论依据^[8-11]。最近,计算流体动力学常用于预测喷雾干燥过程的最优工艺参数、两相流动动力学等,以达到提高干燥效率、降低生产成本、优化工业设备的目的^[12-14]。

本文中,采用数值模拟仿真手段有效地建立物理流体仿真模型,并对塔内的速度、温度和压力剖面进行预测,形象地再现流体流动现象,揭示干燥塔内

* 收稿日期:2020-12-21

基金项目:基础科研项目火炸药专项

第一作者:赵林林(1996-),女,硕士研究生,研究方向为喷雾干燥数值模拟。E-mail:820426790@qq.com

通信作者:郭效德(1968-),男,博导,研究方向为纳米材料制备、修饰及改性技术。E-mail:guoxiaodenj@163.com

部粒子运动规律、流场分布特性。计算流体力学 (CFD) 可大幅减少高昂的测量成本,有效节省实验时间,为实验分析、操作优化提供指导。

1 数值模型的建立^[15]

参考前期预实验研究,从保证安全操作、提高工作效率、降低损耗等角度考虑,确定了硝基胍喷雾干燥合适工艺条件:控制硝基胍质量分数为 25%;热空气进风温度 180 ℃,出风温度 80 ℃。

1.1 连续相控制方程组

干燥塔内的热空气满足连续流体假设,待干燥物料蒸发水分与水蒸气之间进行对流与扩散,此过程可以用组分质量守恒方程进行描述:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y) + \nabla(\rho Y) = -\nabla J + S. \quad (1)$$

其中,扩散通量 J 可以表示为

$$J = -\rho D \nabla Y - D_t \frac{\nabla T}{\nabla}. \quad (2)$$

式中: t 为时间, s; ρ 为连续相密度, kg/m³; Y 为质量分数; J 为扩散通量; S 为质量源项; D 为扩散系数; T 为温度, K; D_t 为时间 t 时的扩散系数。

1.2 离散相控制方程组

离散相控制方程组用于追踪颗粒在干燥室内的运动轨迹。将物料液滴视为离散相,液滴运动满足的动力学方程可表示为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F. \quad (3)$$

式中: F_D 为单位质量物料液滴的拖曳力; u 为连续相速度, m/s; u_p 为液滴速度, m/s; g 为重力加速度, m/s²; ρ_p 为液滴密度, kg/m³; 第 3 项 F 为其他力, m/s², 包括热泳力、萨夫曼升力、布朗力等。

等号右边第 1 项为气体与液滴间的阻力, 第 2 项为重力, 第 3 项为其他力。

F_D 拖曳力表达式

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2 24}; \quad (4)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu}. \quad (5)$$

式中: μ 为流体黏度, Pa·s; d_p 为液滴直径, m; Re 为液滴雷诺数; C_D 为曳力系数。

1.3 颗粒的传热传质方程组

硝基胍物料颗粒受到热空气的加热作用的同时,由于表面水分的蒸发,又会带走部分热量,颗粒的热平衡满足如下控制方程:

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) - \frac{dm_p}{dt} h_{f,g}. \quad (6)$$

式中: m_p 为液滴质量, kg; c_p 为液滴比热容, J/(kg·K); T_p 为液滴温度, K; h 为对流传热系数, W/(m²·K); A_p 为液滴表面积, m²; T_∞ 为连续相温度, K; dm_p/dt 为蒸发速度, kg/s; $h_{f,g}$ 为汽化潜热, J/kg。

颗粒表面对流换热满足 Ranz-Marshall 模型

$$Nu = \frac{h d_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Pr^{1/3}. \quad (7)$$

式中: Nu 为努塞尔数; k_∞ 为空气导热系数; Pr 为普朗特数。

颗粒表面水分蒸发的传质过程满足如下动力学方程:

$$N = k_c (c_s - c_\infty). \quad (8)$$

式中: N 为蒸汽的摩尔流率通量, kmol/(m²·s); k_c 为传质系数, m/s; c_s 为液滴表面蒸气中硝基胍的浓度, kmol/m³; c_∞ 为气相主流的蒸汽浓度, kmol/m³。

传质系数 k_c 可以根据舍伍德数 Sh 计算获得,舍伍德数根据如下方程计算:

$$Sh = \frac{k_c d_p}{D} = 2.0 + 0.6 Re_d^{1/2} Sc^{1/3}. \quad (9)$$

式中: D 为蒸汽扩散系数, m²/s; Sc 为施密特数, $Sc = \mu/(\rho D)$ 。

1.4 气流式喷嘴模型

在气流式喷嘴中,物料液滴以液膜或液柱的形式离开喷嘴后与高速气流相混合,在高速气体的剪切、摩擦等作用下,液膜被撕扯、拉伸,进而破碎成细小的液滴,从而实现雾化。随着气流与液体速度差异以及液滴颗粒直径的不同,液膜会经历多种不同机制的破碎,如哑铃形破碎、袋形破碎、伞形破碎等^[16]。

模拟计算过程中,需要考虑高速气流对液体的破碎作用,选用经典的 TAB (Taylor analogy breakup) 模型计算液滴的破碎过程。TAB 模型中,假设相对于标准的球形液滴,气流中的液滴变形量用 x 表示,其无量纲形式可表示为

$$y = \frac{x}{C_b r}. \quad (10)$$

式中: y 为变形率,是无量纲常数; $C_b = 0.5$; r 为液滴的半径。

无量纲变形量 y 满足如下动力学方程:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{C_F \rho_g u^2}{C_b \rho_1 r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_1 r^3} y - \frac{C_d \mu_1}{\rho_1 r^2} \frac{dy}{dt}. \quad (11)$$

式中: σ 表示水滴的表面张力, N/m; ρ_1 为液滴密度, kg/m³; μ_1 为水滴的动力黏度, kg/(m·s); ρ_g 为气体

密度,kg/m³;C_F、C_k 和 C_d 为无量纲参数,取值分别为 1/3、8 和 5。

式(11)中等号右边的 3 项分别为作用在液滴上的气动力、表面张力和黏性力,在液滴破碎过程中分别起到了激振力、恢复力和阻尼力的作用。

当 $y > 1$ 时,即发生液滴破碎,新形成的液滴尺寸满足如下分布:

$$g(r) = \frac{1}{r}e^{-\frac{r}{\tau}}。$$

(12)

在气流式喷嘴雾化过程中,由于液滴的破碎,式(4)中的曳力系数会随着液滴破碎发生变化,此时曳力系数可表示为

$$C_{D,s} = \begin{cases} 0.424, & Re \geq 1\,000; \\ \frac{24}{Re}(1 + \frac{1}{6}Re^{\frac{2}{3}}), & Re \leq 1\,000。 \end{cases} \quad (13)$$

考虑液滴剪切变形的影响,曳力系数做如下修正:

$$C_D = C_{Ds}(1 + 2.632y)。$$

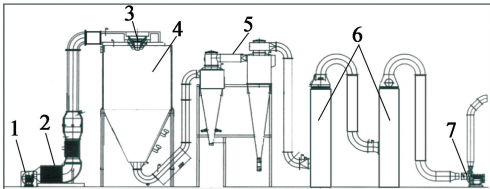
(14)

其中,y 根据式(11)确定。

2 几何模型

2.1 物理模型

物理模型参照南京理工大学国家特种超细粉体中心研发的 LPG-150 型喷雾干燥塔,雾化方式采用气流式雾化,喷雾干燥装置简图如图 1 所示。



1 - 鼓风机;2 - 热源;3 - 雾化器;4 - 喷雾干燥器;
5 - 旋风分离器;6 - 水幕除尘器;7 - 引风机。

图 1 喷雾干燥装置简图

Fig. 1 Simplified schematic of spray drying device

空气通过加热装置加热后从顶部热风分配器中流出;同时,硝基胍浆料通过蠕动泵输送至干燥塔内,并由气流式雾化喷嘴喷出;喷雾液滴与高温干燥空气在喷嘴处发生混合,液滴被撕扯、扭曲,比表面积增加,与高温空气接触后吸收热量,汽化并蒸发大量水分,从而实现硝基胍浆料的干燥。在出口处收集干燥的硝基胍产品,干燥过程中产生的废气经过两级除尘后排放至外界。

将雾化器外形进行相应的简化,忽略壁面的厚

度,通过 Solidworks 三维建模构建干燥塔三维模型,并导入 Gambit 进行网格划分。考虑计算的收敛性与稳定性,通过合理的优化,在全干燥塔内进行结构化网格划分,整体网格划分如图 2 所示。在热风进口和喷嘴附近,流场较为复杂,进行局部网格加密,最小网格 4 mm;干燥塔顶部靠近侧壁区域对流场影响较小,网格可适当放宽,网格尺度最大约 100 mm。最终网格量约 246 万。

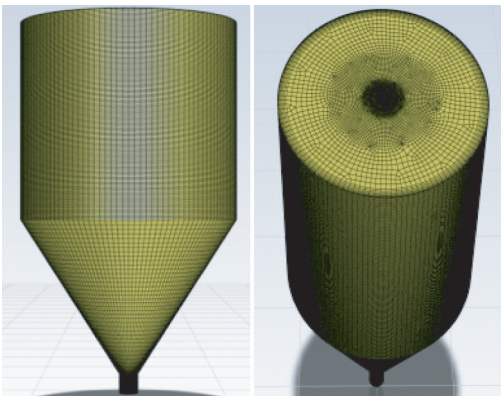


图 2 网格划分图

Fig. 2 Meshing diagram

2.2 边界条件

热空气是经过加热器加热后得到的,定义边界条件为质量流速,空气质量流速设为 10 000 kg/h,湍流强度为 5%,水力直径为 240 mm,其物理性质见表 1。

表 1 热空气的物理性质

Tab. 1 Physical properties of hot air

质量流速/(kg · s ⁻¹)	温度/K	黏度/(kg · m ⁻¹ · s ⁻¹)
2.778	453	2.53 × 10 ⁻⁵
密度/ (kg · m ⁻³)	热容/ (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	导热系数/ (w · m ⁻² · K ⁻¹)
0.779	1 034	0.037 8

使用气流式雾化方式,物料质量流速设为 345 L/h,选用 3 个 SU42 型喷嘴,单个喷嘴物料质量流速约为 115 L/h,喷嘴外径约为 3 mm。模拟计算过程中,3 个喷嘴均匀布置,处于热风风口下方,喷嘴和干燥塔中心轴线的距离为 200 mm,将 3 个气流式喷口分别设定 3 个射流源,x、y、z 表示液滴注入点距离的位置,如表 2 所示。

模拟中选择 Air-blast-atomizer 空气辅助雾化(雾化器模型),设定物料质量流速为 0.037 5 kg/s。液膜与空气之间的最大相对速度为 200 m/s。其模型参数如表 3 所示。

表 2 射流源位置
Tab.2 Position of injection

射流源	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
1 [#]	-200	-150	0
2 [#]	100	-150	-173
3 [#]	100	-150	173

表 3 Air-blast-atomizer 喷雾模型参数
Tab.3 Parameters of Air-blast-atomizer Spray Model

质量流速/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	喷嘴外 半径/ mm	喷嘴内 半径/ mm	喷射 时间/ s	温度/ K
0.037 5	3	0	1 000	293

3 数值模拟结果与分析

选用离散相模型进行计算。将热空气视为连续相,液滴颗粒视为离散相,通过两相耦合计算喷雾液滴雾化蒸发,湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$ 。

3.1 速度分布

干燥塔内空气流速分布见图 3。模拟可得,空气最大流速为 48.7 m/s,平均流速为 27.2 m/s。

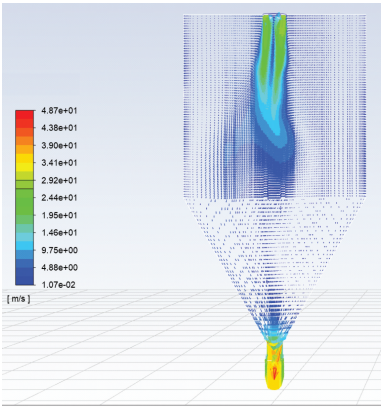


图 3 干燥塔内空气流速分布

Fig.3 Distribution of air velocity in drying tower

高温空气以与轴线成 25° 的形式从顶部风口螺旋进入干燥塔,并与喷出的硝基胍物料混合,相互作用,形成如图 4 所示的干燥塔内的热空气迹线。

从图 4 中可以看出:热气流并未沿着干燥塔轴线稳定地向下流动,而是稍稍偏离轴线;在干燥塔下半段,大部分气流沿着壁面流动,并最终排出干燥塔;而其余气流则受到锥体结构的约束,呈螺旋向上,在锥体部分充分混合,具有一定的搅拌作用。

图 5 为不同截面的空气流速分布,截面距离顶部分别为 1、2、3 m 和 5 m。由于气体具有黏性,高

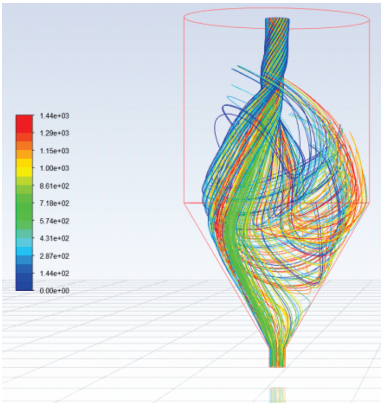


图 4 干燥塔内热空气迹线图

Fig.4 Trace of hot air in drying tower

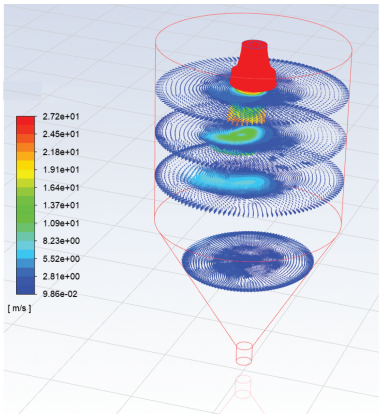


图 5 不同截面的空气流速分布

Fig.5 Distribution of air velocity on different sections

温气流螺旋流动时会诱导周围空气一起做螺旋流动,相应地,周围空气对高温气流的阻力等因素也会致使高温气流诱导的流场速度不断减小。从图 5 中心区域的颜色变化可以看出,这一现象随着高温气流的向下流动变得越发明显。

在去除向下气流后,可以得出图 6。分析可得:在靠近喷嘴处,气流绕轴线的速度可达 2.5 m/s;而

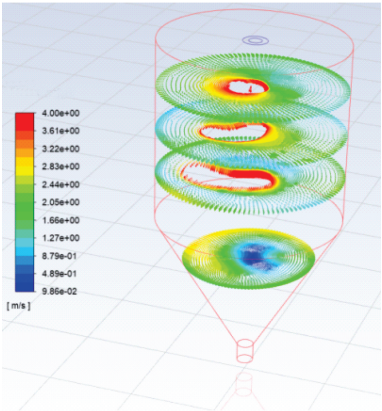


图 6 去除向下气流后不同截面上的速度分布

Fig.6 Velocity distributions on different sections after removal of downdraft

靠近出口处,这一速度约为 0.5 m/s。

3.2 温度分布

图 7 为干燥塔内温度分布。可以看出,干燥塔锥体部分温度较高。这是由于大量热空气在此处进行螺旋混合,与图 4 相呼应,由于热空气向下冲刷,并未到达顶部壁面附近,再加上干燥塔顶部漏热,故顶部气体温度相对较低。热空气在进入干燥塔顶部的过程中与喷嘴处的硝基胍物料进行混合,将高温释放给低温物料,硝基胍物料吸收大量的热量并实现自身干燥,故在出风口位置处会出现局部的蓝色低温点。

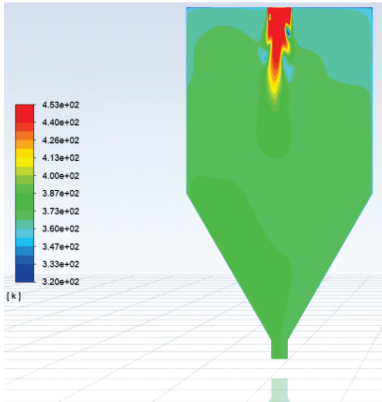


图 7 干燥塔内温度分布

Fig.7 Temperature distribution in drying tower

测试塔顶、塔底及距离喷雾塔顶部距离为 $y_1 = 0.6\text{ m}$ 、 $y_2 = 2.0\text{ m}$ 、 $y_3 = 5.2\text{ m}$ 5 个位置处的温度分布。图 8 为塔内实测温度,旨在验证 CFD 模型的正确性。在实际喷雾干燥塔内,安装的测试探头并非位于塔的正轴心,所以选取的模拟值的点并非正好是测量点的位置,只能检查预测的温度是否在实测值范围内。从表 4 可以看出,模拟结果与实测结果大致吻合,可在一定程度上验证此模型的正确性。

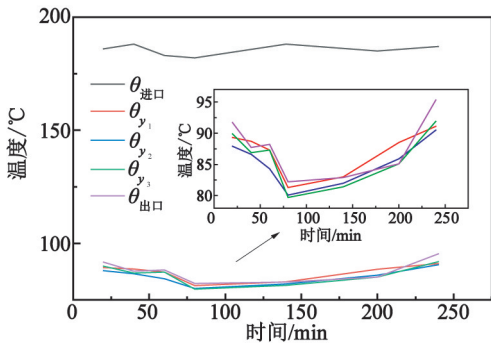


图 8 塔内实测温度

Fig.8 Measured temperature in tower

3.3 颗粒运动与水分含量

图9给出了物料颗粒直径的变化情况。物料离

表 4 不同平面处的预测温度与实测温度

Tab.4 Predicted and measured temperatures in different planes

(x,y,z)	预测 温度/℃	实测 温度/℃
$(0,0.6,-1.5)$	92	81.3 ~ 91.1
$(0,0.6,-0.6)$	94	
$(0,0.6,0.6)$	93	
$(0,0.6,0.6)$	92	
$(0,2.0,-1.5)$	89	80.1 ~ 90.5
$(0,2.0,-0.6)$	93	
$(0,2.0,0.6)$	92	
$(0,2.0,1.5)$	90	
$(0,5.2,-0.5)$	79	79.7 ~ 91.9
$(0,5.2,-0.3)$	100	
$(0,5.2,0)$	101	
$(0,5.2,0.3)$	101	
$(0,5.2,0.5)$	79	

开气流式喷嘴时,液滴直径约 30 μm ,之后与高温空气混合,由于空气摩擦、剪切和撕扯等作用,物料颗粒中的水分不断蒸发,颗粒直径快速缩小,平均粒径约 15 μm 。

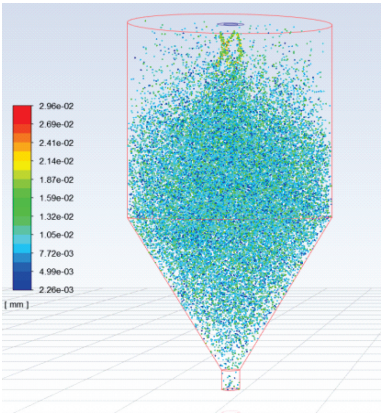


图 9 物料颗粒的直径变化

Fig.9 Diameter changes of material particles

将实验收集到的硝基胍产品进行粒度实验分析,得出其粒径分布如图 10 所示。喷雾干燥后的硝基胍平均粒径 d_{50} 为 12.6 μm ,与模拟所得平均粒径误差约为 13%。其原因是干燥塔出口连接有旋风分离器,出料桶位置位于旋风分离器出口处,故引起了粒度偏差。

从图11的物料颗粒密度变化中可以看出:在靠近喷嘴出口处,颗粒含水量较高,密度较低;随着干燥的进行,水分很快蒸发,物料颗粒被充分干燥,颗粒密度趋近于硝基胍物料密度 1 710 kg/m^3 。从图 12 的物料颗粒表面传质速度可以看出,水分蒸发速度最快的地方位于喷嘴区域,高温气流将热量传递

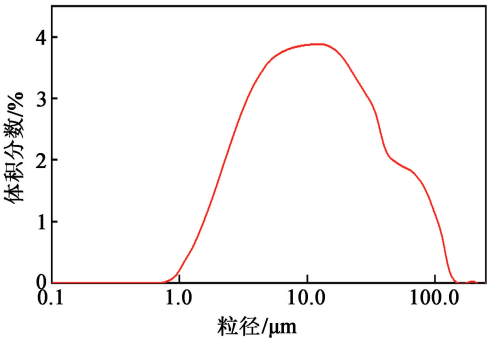


图 10 喷雾干燥硝基胍的粒径分布

Fig. 10 Particle size distribution of nitroguanidine in spray drying

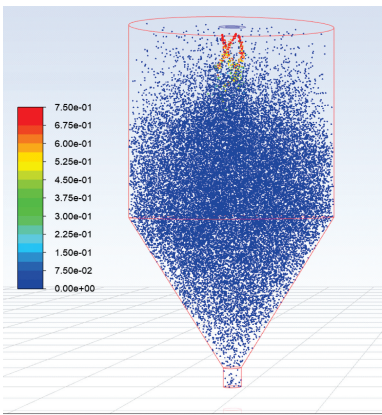


图 13 物料颗粒中水分的质量分数

Fig. 13 Mass fraction of water in material particles

粒液滴进行了较为充分的干燥。

图 14 给出了干燥塔内空气相对湿度的分布。可以看出,干燥塔内整体湿度较低,只有喷嘴处湿度较大。这是因为物料中水分在此处蒸发,形成水蒸气,使得空气相对湿度较大。较低的相对湿度分布有利于物料的充分干燥,因此,在干燥塔内部可有效实现物料的干燥。

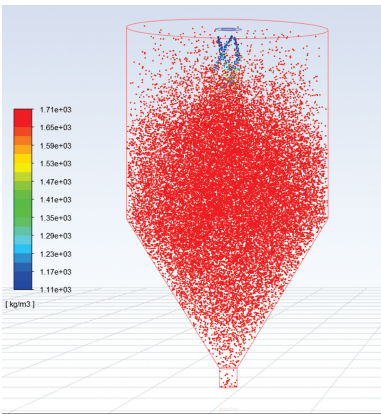


图 11 物料颗粒密度的变化

Fig. 11 Density changes of material particles

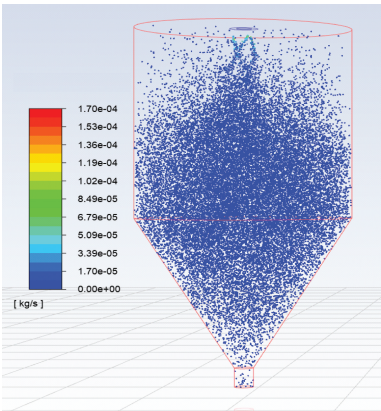


图 12 物料颗粒表面传质速率

Fig. 12 Mass transfer rate on the surface of material particles

给物料,物料吸收热量并快速蒸发水分,与图 11 的颗粒密度变化规律相一致。

从图13可以看出,经过干燥后,物料颗粒中水的质量分数从入口的75%降低到了接近于0,说明了物料颗粒进行了较为充分的干燥。通过实验,对干燥后产品进行含水率测定,水的平均质量分数为0.03%,含水率较低,与模拟结果一致,表明物料颗

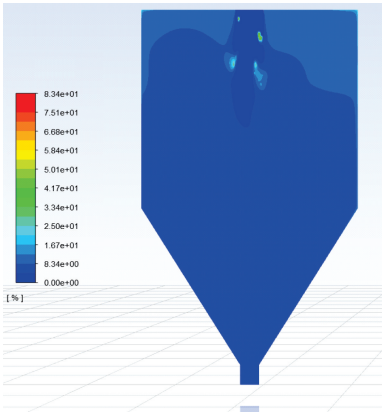


图 14 干燥塔内相对湿度分布

Fig. 14 Relative humidity distribution in drying tower

4 结论

对 LPG-150 型气流式干燥塔进行三维建模与网格划分,建立了干燥塔内热空气流动与硝基胍物料干燥的分析模型,并开展了数值模拟。结合实验数据,得到以下结论:

1)在热空气质量流速为 10 000 kg/h、单个喷嘴硝基胍物料质量流速为 115 L/h 条件下,模拟显示,热空气进入干燥塔后螺旋向下快速冲刷,干燥塔内空气流场与温度场受到入口结构以及物料颗粒液滴的共同作用。在靠近喷嘴处,物料液滴中的水分快

速汽化,物料干燥作用明显。

2)模拟结果显示,出口处物料含水率趋近于 0,干物料颗粒直径约 15 μm。用喷雾干燥法对硝基胍浆料进行干燥,干燥后产品的含水质量分数约为 0.03%,平均粒径 $d_{50}=12.6\text{ }\mu\text{m}$,比模拟的平均粒径结果相差约 13%。

3)由于干燥塔内部封闭,准确测量塔内温度具有一定的困难。对比测量点的预测温度和实验温度,两者大致吻合,说明模拟结果有一定的准确度和可靠性。

参 考 文 献

[1] 林海勇. 超细硝基胍的制备工艺及其应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016.
LIN H Y. The preparation and application research of ultra-fine nitroguanidine[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2016.

[2] YE B Y, AN C W, WANG J Y, et al. Formation and properties of HMX-based microspheres via spray drying[J]. RSC Advances, 2017, 7(56):35411-35416.

[3] 安振华. 喷雾干燥技术的应用综述[J]. 中国粉体工业, 2020, 96(4):8-10.
AN Z H. Application of spray drying technology[J]. China Powder Industry, 2020, 96(4):8-10.

[4] SONG C G, LI X D, YANG Y, et al. Formation and characterization of core-shell CL-20/TNT composite prepared by spray-drying technique[J]. Defence Technology, 2021. DOI:10.1016/j.dt.2020.12.005.

[5] 于才渊, 王宝和, 王喜忠. 喷雾干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013:2-3.
YU C Y, WANG B H, WANG X Z. Spray drying system Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013:2-3.

[6] 郑丹. 超细硝基胍的制备技术及其性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2015.
ZHENG D. The preparation and performance research of ultra-fine nitroguanidine[D]. Nanjing:Nanjing University of Science and Technology, 2015.

[7] 李云飞, 华泽钊, 刘宝林. 真空冷冻干燥中多孔层结构塌陷与玻璃化的关系[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1997(增刊1):202-205.
LI Y F, HUA Z Z, LIU B L. Relationship between vitrification and collapse of porous freeze dried layer [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science), 1997 (Suppl. 1):202-205.

[8] 戚严文, 许京荆, 孙裕萍, 等. 催化剂喷雾干燥过程气固两相流数值模拟[J]. 工业控制计算机, 2018,

31(5):73-75.
QI Y W, XU J J, SUN Y P, et al. Numerical simulation of gas-particle flow in catalyst spray drying process [J]. Industrial Control Computer, 2018, 31(5):73-75.

[9] JASKULSKI M, WAWRZYNIAK P, ZBICINSKI, I. CFD simulations of droplet and particle agglomeration in an industrial counter-current spray dryer[J]. Advanced Powder Technology, 2018, 29(7):1724-1733.

[10] LANGRISH TAG, HARRINGTON J, HUANG X, et al. Using CFD simulations to guide the development of a new spray dryer design[J]. Processes, 2020, 8(8):932.

[11] HERNÁNDEZ B, FRASER B, JUAN L M D, et al. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of swirling flows in industrial counter-current spray-drying towers under fouling conditions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 57(35):11988-12002.

[12] 磨正遵, 商飞飞, 潘中田, 等. 山楂果粉喷雾干燥参数工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(4):100-105.
MO Z Z, SHANG F F, PAN Z T, et al. Study on spray drying parameters of hawthorn fruit powder[J]. Food Research and Development, 2018, 39(4):100-105.

[13] 秦娅, 吕庐峰, 侯栓弟, 等. 大型催化裂化催化剂喷雾干燥塔数值模拟及参数优化[J]. 石油炼制与化工, 2019, 50(4):59-63.
QIN Y, LÜ L F, HOU S D, et al. Numerical simulation and parameter optimization of large FCC catalyst spray dryer [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals [J]. 2019, 50(4):59-63.

[14] 胡月, 戴惠良. 基于 ANSYS Fluent 的气流喷雾干燥研究与仿真[J]. 机床与液压, 2018, 46(6):54-59.
HU Y, DAI H L. Study and simulation of air spray drying based on ANSYS Fluent[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(6):54-59.

[15] 于勇. Fluent 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008:45-49.
YU Y. Fluent introduction and advanced course[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2008:45-49.

[16] 金仁瀚. 气流中单液滴破碎过程及子液滴分布特性研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2016.
JIN R H. Investigations of deformation and breakup process of single and the distribution characteristics of the sub-droplet in airflow[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.