

不同进风方式喷雾干燥过程的 CFD 模拟研究

李翔宇¹, 杜健军^{1,2*}, 樊江莉^{1,2}, 彭孝军^{1,2}

(1.大连理工大学,精细化工国家重点实验室,辽宁 大连 116024;

2.大连理工大学深圳研究院,广东 深圳 518057)

摘要:根据实验室已有的旋流式干燥塔建立模型并按照相同尺寸建立直流干燥塔模型,对比了 2 种进风方式的干燥效果。模拟结果表明,旋流式干燥塔的干燥效果要好于直流式干燥塔,但会有黏壁、过热等现象。因此在实验过程中对于高分子物料干燥时应该有关于干燥气体温度及在颗粒干燥塔内的停留时间的特殊操作要求。

关键词:喷雾干燥;计算流体力学;进风方式;温度

中图分类号:035

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)01-0202-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.01.043

Study on effect of different air flow patterns on spray drying process via CFD modeling

LI Xiang-yu¹, DU Jian-jun^{1,2*}, FAN Jiang-li^{1,2}, PENG Xiao-jun^{1,2}

(1.State Key Laboratory of Fine Chemicals, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2.Shenzhen Research Institute, Dalian University of Technology, Shenzhen 518057, China)

Abstract: There are two different drying air patterns with different spray drying towers: direct flow and swirling flow. Different drying air flow patterns have significantly impact on the result of spray drying. Two models with different air flow patterns are built with same size to investigate the effect of air flow pattern on drying effect. The simulation results show that the drying performance of the swirling drying tower is better than that of the direct flow drying tower. But there also exists problems for the swirling drying tower, like sticking walls and overheating. Therefore, in the process of experiment for drying polymer materials, there shall be special operation requirements for drying gas temperature and residence time in the particle drying tower.

Key words: spray drying; computational fluid dynamics (CFD); air inlet pattern; temperature

喷雾干燥作为工业上生产粉体和颗粒最常用的方法之一,主要流程是通过将料液在干燥塔内雾化成液滴,再通过气相干燥媒介将其溶剂蒸发形成颗粒或者粉体^[1]。喷雾干燥过程涉及多相之间的能量、质量和动量的传递过程十分复杂,有诸多因素会影响传质过程进而影响最终的产品质量。这些影响因素不仅仅是操作条件(温度、流量、流速)和物料性质(密度、表面张力、黏度),还包括了两相间的混合方式和接触方式等^[2-4]。因此,近年来随着计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)的迅速发展,这项数值模拟技术开始被应用于研究各种实验参数对喷雾干燥各个环节的影响,对于喷雾干燥领域的研究起到了显著的推动作用^[5-7]。

计算流体力学可以通过计算机数值模拟对实验过程进行模拟仿真,进一步根据模拟结果指导和优化实验,并可以呈现一些实验研究中无法观测的现

象^[8]。近年来,国内外一些学者通过计算流体力学模拟的方法对于喷雾干燥过程中操作条件和物料性质对产品颗粒的粒径大小和分布的影响进行了大量研究^[9]。目前,对于液滴干燥动力学和两相间接触混合方式的研究成为热点方向。由于喷雾干燥塔内的流场十分复杂,很难有效测量,使用计算流体力学的方法可以进行有效的模拟^[8]。对于并流干燥塔, Wawrzyniak 等^[10]通过对一个工业生产中使用的喷雾干燥塔进行模拟分析后发现,干燥塔内的干燥气体流动具有极大的不稳定性,导致气体温度的分布没有固定统一的形式。杨树俊等^[11]通过使用均一粒径液滴喷雾塔系统研究了在干燥过程中分散气旋流、热空气旋流以及二者共同旋流对颗粒运动和最终干燥效果的影响。研究发现,当旋流角度为 30° 时干燥效果最佳;而当使用同向旋流时,干燥效果可以提高 2%,并且塔体可以缩短近 12%。另一方面,

收稿日期:2019-04-26;修回日期:2019-11-11

基金项目:国家自然科学基金项目(21822804);大连市科技重大专项项目(2018ZD14GX002)

作者简介:李翔宇(1994-),男,硕士生;杜健军(1981-),男,博士,教授,研究方向为多功能染料及颜色微粒子绿色构建及应用,通讯联系人,dujj@dlut.edu.cn。

对于对流干燥塔,陈翠玲^[12]对已有的干燥塔结构进行调整,对比了直流进风方式和旋流进风方式在对流干燥塔中的区别,发现旋流进风方式可以使干燥气体在塔内拥有更长的停留时间。此外, Jubaer 等^[13]考察了计算流体力学模拟过程中不同湍流模型的影响,给出了不同模型的适用条件,为进一步研究干燥塔内的多相运动提供帮助。

在上述工作的基础上,本文中根据实验室的并流式旋流进风干燥塔进行建模,按照尺寸建立了一个相同高度和直径的直流式进风干燥塔几何模型,整合 DPM 离散相模型和 REA 干燥模型,通过计算流体力学模拟对比了 2 种不同干燥塔的干燥效果。进一步对高分子物质在干燥过程中的性质变化对颗粒产品的影响进行探究,为优化操作条件得到高质量的颗粒提供参数指导。

1 模拟和分析方法

1.1 模型概述

模拟不同进风方式的 2 个喷雾塔模型如图 1 所示,图 1(a)为直流式进风干燥塔,图 1(b)是和实验室尺寸相同的旋流式进风干燥塔。2 个塔主体圆柱部分的高度均为 2.1 m,直径为 1.4 m,下面的锥体部分高度均为 1.1 m。为了简化模型,2 个喷雾塔模型均忽略了塔顶部的雾化装置深入塔体的部分。直流式干燥塔的进风口为圆形,直径约为 0.3 m。旋流式干燥塔的进风口为长方形,进气管道的长、宽分别为 0.5、0.3 m,高度为 0.09 m。喷雾塔所用的干燥介质是加热至 65℃ 的氮气,干燥气体和喷雾产生的液滴均从塔顶部向下流动,采用并流的方式。颗粒和干燥气体从塔的底部流出干燥塔,进入后续的分选流程。

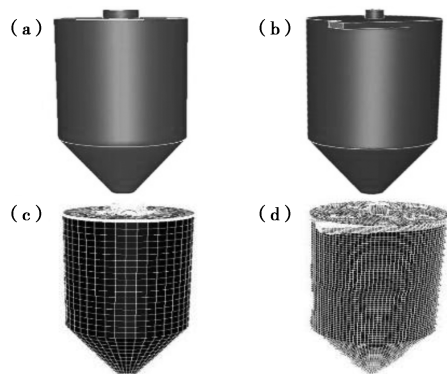


图 1 喷雾干燥塔模型及模型网格划分

数值模拟所用的网格由 ICEM 软件绘制,如图 1(c)所示,因为干燥气体的物料的进口流动情况比

较复杂,因此在这 2 个位置采用高密度的网格。对于直流式干燥塔因为其流动情况相对简单,采用了结构网格,最终的网格包括 28 397 节点和 25 670 四面体单元。而旋流式的干燥塔则使用了非结构网格进行划分,最终的网格包含 109 066 节点和 101 830 四面体单元。

2 个干燥塔的计算区域都包含 2 个进口和 1 个出口,1 个雾化料液所用的入口,1 个干燥气体的入口和干燥室底部表压为 0 的 1 个出口。干燥气体进口处的动能 k 和湍动耗散系数 ϵ 分别为 $0.031 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $0.39 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。干燥的液滴是由苯乙烯丙烯酸酯、聚乙烯蜡和染料组成的混合物溶解于乙酸乙酯配置成质量分数为 30% 的溶液,从干燥塔的顶部以 25°C 、30 L/h 的流量进入干燥塔。由于在 FLUENT 软件的物性数据库中没有相应的混合物,因此创建了一种新的物质,采用用户自定义函数(UDF)对其物性进行设置。关于其他的边界条件在表 1 中列出。

表 1 模拟初始边界条件

初始边界条件	干燥气体	雾化料液
料液流量/(L·h ⁻¹)	—	0.0064
初始温度/℃	65	25
气体流速/(m·s ⁻¹)	7.5	—
初始体积分数/%	100(N ₂)	20

1.2 理论基础

喷雾干燥过程涉及到料液和干燥气体的流动过程,复杂的能量传递过程,以及液滴或颗粒的形成过程。在 2 种不同形式的干燥塔中,采用欧拉-拉格朗日法对连续相和离散相进行耦合计算^[14]。所有这些过程中没有涉及到化学反应,因此在数值模拟的过程中主要涉及到以下一些基本控制方程。

质量守恒方程又叫做连续性方程,适用于可压缩和不可压缩流体^[15]:

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

动量守恒方程依据的原理是牛顿第二定律。在惯性参考系中,动量守恒方程的形式如方程(2)所示:

$$\begin{aligned} & (\frac{\partial}{\partial t})(\rho E) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \\ & - \nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \end{aligned} \quad (2)$$

能量守恒方程包括流体间的能量传递和热量传递,如方程(3)所示:

$$\begin{aligned} & (\frac{\partial}{\partial t})(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{v}(\rho E + p)] = \\ & \nabla \cdot [\kappa_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})] + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

在干燥气体中的离散液滴使用曳力模型进行计算,因为液滴和干燥气体之间存在着相对运动,因此液滴受到了气体的拉力、浮力还有自身重力的影响^[16]:

$$d\vec{v}_p/dt = C_D 18\mu_p Re(\vec{v} - \vec{v}_p)/(24\rho_p d_p^2) + (g/\rho_p)(\rho_p - \rho_b) \quad (4)$$

在模拟液滴干燥的过程中反应工程方法 (REA) 也用来描述颗粒干燥过程中的物理属性^[17]。根据 REA 方法的原理,液滴干燥过程中传质的推动力主要是液滴和干燥气体之间含水度的差异。方程 (6) 用来计算液滴和干燥气体之间传质过程的速率^[18]:

$$\begin{cases} -m_s(dX/dt) = h_m A_p(\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \\ dm_{air}/dt = nh_m A_p(\rho_{v,s} - \rho_{v,b}) \end{cases} \quad (5)$$

方程中的质量传递系数 h_m 可以通过修正过后的 Ranz-Marshall 方程计算得到^[19]:

$$\begin{cases} Nu = h_m d_p / \kappa_\infty = (2 + 0.6 \cdot Re^{0.5} + Sc^{0.33}) \\ Sh = h_m d_p / D_i = (2 + 0.6 \cdot Re^{0.5} + Pr^{0.33}) \end{cases} \quad (6)$$

2 结果与讨论

2.1 干燥塔内的流动区域

模型的连续相经过约 500 次的迭代计算,当各项参数均小于 10^{-4} 这一残差收敛指标时,认为是达到收敛,满足总体的质量和能量平衡要求。

2 种进风方式的连续相速度模拟结果的轴向和径向截面图如图 2 所示。由图可以看出,直流式喷雾干燥塔干燥气体在进口处的速度较大,在干燥塔内部由于要和液滴进行传递作用,因此速度减慢。在喷雾塔下部的锥体部分因为塔体的直径发生了变化,因此热风的分布产生了一定的涡流,而且干燥气体流速因为直径变小而增大。从干燥气体的分布来看,主要均匀分布在喷雾干燥塔的中间部分,扰动较小,相应的在喷雾干燥塔内的停留时间也就较短,可能会导致液滴的干燥时间不足,从而出现湿粉等现象。

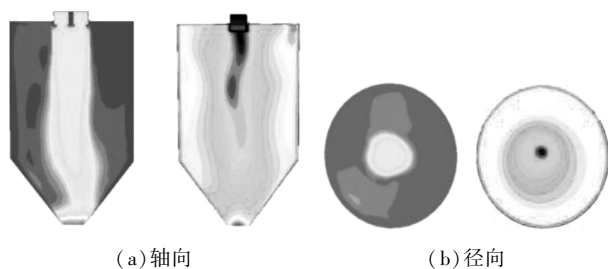


图 2 直流式和旋流式进风模型的连续相模拟结果速度云图

旋流式干燥塔速度在轴向上较为均匀,在塔体下方的锥体部分因为直径的变化影响了速度的分布。由旋流式干燥塔的径向切面图可以看出,热风进入干燥塔后在径向上形成一个切圆,贴近塔壁的速度较快,中心速度较慢。这种旋转的气流分布增加了干燥塔内的扰动和停留时间,与干燥的液滴充分接触传质,但高分子物质长期在高温环境中可能会发生分子状态的变化,从而造成产品的变质。因此后续的研究中不仅会考虑最后得到产品的含湿度,也将考虑得到的产品品质和液滴在喷雾塔中的变化。

2.2 干燥颗粒模拟

基于以上连续相模拟的结果,在 2 种类型的干燥塔进行离散相模拟,颗粒的粒径分布和在干燥塔内的停留时间如图 3 所示。在直流式干燥塔中,喷雾的形态较为规则,液滴大小分布在 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 而且主要集中在干燥塔的中间部分,跟干燥气体的分布基本吻合。大的液滴主要集中在喷嘴附近,随着干燥的进行,越靠近出口处的液滴粒径越小,但是总体的液滴尺寸变化不大,主要是因为直流式干燥塔的干燥时间过短,许多液滴还未充分干燥。在液滴到达锥体部分时,有一部分小颗粒因为自身质量较小,会碰撞壁面或者随着干燥气体的涡流重新返回喷雾塔中。从停留时间分布图也可以看出,重新返回塔内的颗粒在塔内有较长的停留时间,从而导致过度干燥,产品变质。还有部分颗粒会直接黏附在

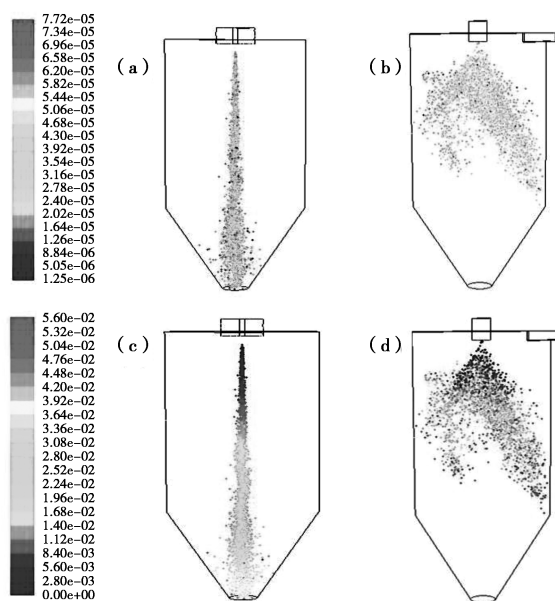


图 3 直流式和旋流式进风模型的离散相模拟

锥体部分的壁面上造成干燥塔出口部分的黏壁现象,或在一段时间的干燥后自行脱落,虽然可以得到干燥的产品但是产品的形状不再是规则的球形,不能满足产品要求。在旋流式干燥塔中液滴分布相对较为分散,各个大小的粒径分布也较为均匀。主要集中在 $20\sim 60\ \mu\text{m}$ 。从液滴停留时间图不难发现,液滴随着干燥气体在塔内运动,从而使得旋流干燥塔会拥有比直流干燥塔更长的停留时间,更好地达到干燥效果。但是从液滴的轨迹图也可以看出,随着颗粒的旋转,部分小颗粒因为较小的质量会在离心力的作用下直接被甩到干燥塔的主体圆柱部分的塔壁上。停留时间分布图中也反映出这一现象,黏附在塔壁上的液滴会在壁面上形成沉积,随着设备运行时间的增加,这些壁面沉积会越来越厚,不仅难以清理而且会对塔内干燥气体的流动造成影响,进而影响传热和传质的效率。

2种干燥塔的温度场分布云图如图4所示,对于直流式干燥塔温度的分布在径向上是从塔中间沿轴线部分温度最高,向两侧靠近塔壁的位置温度逐渐降低。原因主要是直流式干燥塔中温度较高的干燥气体主要分布在塔的中间部分,靠近塔壁的地方会和外界进行热量交换,造成一定的热量损失。而在轴向上越靠近喷嘴的位置温度越高,越远离喷嘴干燥气体的温度越低。因为雾化液滴的溶剂蒸发会和干燥气体进行热量交换,造成干燥气体温度迅速降低。而在干燥塔的下部,液滴基本已经干燥完成,没有进一步的传热过程。干燥气体自身产生的涡流也会造成不同温度气体的混合,因此温度基本保持不变。在旋流式干燥塔中,温度的分布比较均匀,在干燥塔内部只有刚被雾化的颗粒温度较低,经过一段时间的传热作用,干燥气体的温度有所下降,同时颗粒的温度和干燥气体达到一致。由于干燥气体在塔内的旋转,较高温度的干燥气体运动轨迹距离塔壁较近,因此塔壁附近的温度下降并不明显。

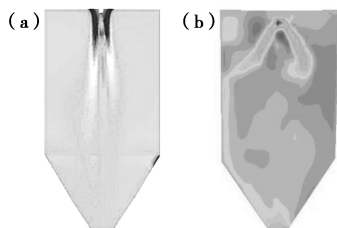
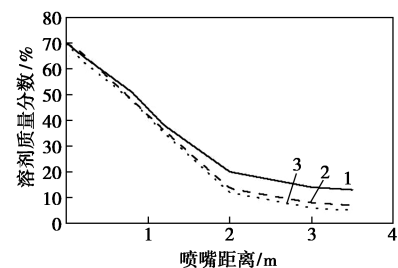


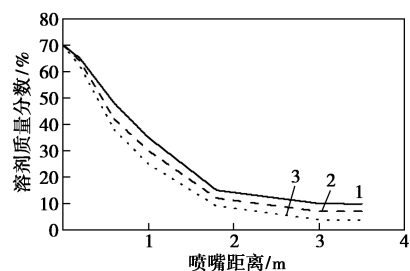
图4 直流式和旋流式模型在模拟过程中干燥塔内的温度分布

考察喷雾干燥所得到的颗粒的指标主要有2

个,一是颗粒的粒径以及粒径的分布;二是颗粒的含湿率,也就是颗粒的湿度。只有当得到的颗粒产品达到要求的最低湿度才能看作是干燥过程完成,满足生产要求。因此模拟了2种喷雾塔在不同的流量下所得到的颗粒湿度的平均值,对比曲线如图5所示。根据George等^[20]的研究,液滴干燥的第一阶段为恒速干燥阶段,此时液滴表面湿度较大,主要是液滴表面和干燥气体进行传质,基本没有传质阻力,因此传质的速度保持恒定。但是这一阶段时间较短,当液滴的湿度达到临界含水率时,传质阻力增大干燥速度开始减慢,进入降速干燥阶段。由干燥结果曲线图可以看出,液滴在进入干燥塔后,先是经历一个低蒸发速率的阶段,这是因为液滴刚进入喷雾塔时温度相对于干燥空气较低,传质推动力较小从而导致相应的干燥速率也比较低。随着液滴温度的不断升高,干燥速率逐渐增大,当达到最大干燥速率后液滴的干燥会先后经历恒速和降速2个阶段,最终达到干燥要求形成产品颗粒。对比2种不同进风形式干燥塔的干燥曲线可以发现,旋流式干燥塔在距离雾化喷头3m左右的位置就基本完成干燥,颗粒的湿度大约在3.7%左右,可以满足干燥要求。随着流量的增加,得到颗粒的湿度也会有所增加而且干燥曲线形状基本相同。但当流量增加至70 L/h以后,干燥曲线发生变化,最终的颗粒湿度也随之变大,可以看作是干燥塔已经无法满足这一流量的干



(a) 直流式



(b) 旋流式

1—30 L/h; 2—50 L/h; 3—70 L/h

图5 直流式和旋流式在不同流量下模拟的颗粒湿度结果

燥要求,因此在实验和实际生产过程中应根据干燥设备选择合适的流量。在直流干燥塔中,液滴的干燥曲线和旋流干燥塔基本相同,但是直流干燥塔的干燥时间较长,在较小的流量条件下,液滴在接近出口处约 3.3 m 才基本完后干燥,最后的颗粒湿度也相对较高,约为 5%。而对于相对较大的流量,颗粒在接近出口仍未达到干燥要求,将会得到湿度较大的湿粉产品。因此在能满足干燥要求的前提下,旋流式进风塔的干燥能力要高于直流式进风塔。

3 结论

对尺寸大小相同的旋流式干燥塔和直流式干燥塔进行了计算流体力学模拟,得到了 2 种进风方式产生颗粒的粒径、停留时间、湿度等信息。对模拟结果进行分析讨论后发现,直流式进风干燥塔的干燥气体和雾化液滴的分布都比较集中,气体在干燥塔内的扰动较小,因此导致传热传质效率不高,液滴干燥不够彻底,不能达到干燥要求。旋流式的干燥塔中干燥气体的分布更为均匀,雾化的液滴在进入干燥塔后随着干燥气体进行运动,增加了干燥时间,保证得到的颗粒产品满足湿度要求。但在液滴运动过程中也有可能因为离心力作用黏附在壁面上形成壁面沉积,因此需要对干燥气体的流速和流动形态进行控制。

参考文献

- [1] 张丽丽.冲击式气流喷雾雾化机理及干燥过程数值模拟的研究[D].济南:山东大学,2008.
- [2] 潘阳敏,罗祎青,王丽雯,等.压力旋流式喷嘴喷淋液膜区换热过程的数值模拟[J].化工学报,2017,68(2):575-583.
- [3] 亓航,张伟,巩亮.喷雾冲击条件下液膜流动与传热模型[J].化工学报,2018,69(5):2014-2022.
- [4] 王瑾,郝惠娣,曹乔乔.基于 CFD 的旋流喷嘴内部流场模拟研究[J].现代化工,2015,35(3):159-161.
- [5] Sadripour M, Rahimi A, Hatamipour M S. CFD Modeling and experimental study of a spray dryer performance[J]. ChemProd Process Model, 2014, 9(1): 89-94.
- [6] Ramachandran R P, Akbarzadeh M, Paliwal J, et al. Computational fluid dynamics in drying process modelling—a technical review[J]. Food Bioprocess Technol, 2018, 11(2): 271-292.
- [7] Bellinghausen R. Spray drying from yesterday to tomorrow: An industrial perspective[J]. Drying Technol, 2018, 29(7): 1-11.
- [8] 宋峻林,唐荣联,王洪.絮凝过程 CFD 数值模拟研究[J].现代化工,2018,38(8):231-235.
- [9] Huang L X, Kumar K, Mujumdar A S. A parametric study of the gas flow patterns and drying performance of co-current spray dryer; Results of a computational fluid dynamics study[J]. Drying Technol, 2003, 21(6): 957-978.
- [10] Wawrzyniak P, Jaskulski M, Zbiciński I, et al. CFD modelling of moisture evaporation in an industrial dispersed system[J]. AdvPowder Technol, 2017, 28(1): 167-176.
- [11] 杨树俊,魏玉聪, Wai Woo Meng, 等.入口旋流对均一粒径液滴喷雾干燥塔影响的数值模拟[J].化工学报,2018,69(9):3814-3824.
- [12] 陈翠玲.旋流式干燥塔物理场的数值模拟及其结构优化研究[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [13] Jubaer H, Afshar S, Xiao J, et al. On the effect of turbulence models on CFD simulations of a counter-current spray drying process[J]. Chem Eng Res Des, 2019, 141: 592-607.
- [14] Xiao J, Yang S, George O A, et al. Numerical simulation of mono-disperse droplet spray dryer: Coupling distinctively different sized chambers[J]. Chem Eng Sci, 2019, 200: 12-26.
- [15] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M].北京:人民邮电出版社,2016.
- [16] Jubaer H, Afshar S, Xiao J, et al. On the importance of droplet shrinkage in CFD-modeling of spray drying[J]. Drying Technol, 2018, 36(15): 1785-1801.
- [17] Patel K C, Chen X D. Drying of aqueous lactose solutions in a single stream dryer[J]. Food Bioprod. Process, 2008, 86(3): 185-197.
- [18] Yang X, Xiao J, Woo M, et al. Three-dimensional numerical investigation of a mono-disperse droplet spray dryer: Validation aspects and multi-physics Exploration[J]. Drying Technol, 2015, 33(6): 742-756.
- [19] Ranz W E. Rate-Processes at a spherical boundary—a citation-classic commentary on evaporation from drops[J]. Current Contents/Engineering Technology & Applied Sciences, 1993, (22): 89-97.
- [20] George O A, Chen X D, Xiao J, et al. An effective rate approach to modeling single-stage spray drying[J]. AIChE J, 2015, 61(12): 4140-4151. ■
- [12] Amano I, Tanino M, Fijiii N, et al. Sterilization using a wide-gap discharge formed by dielectric barrier discharge coupled with surface discharge under atmospheric pressure[C]. Industry Applications Conference, 2007: 1115-1118.
- [13] 高烨楠,董丽芳,刘莹.介质阻挡放电中不同厚度气隙内微放电通道的光谱特性研究[J].光谱学与光谱分析,2015,35(10):2708-2711.
- [14] Sun Y, Qiu Y, Ding W. Effect of power supply frequency on dielectric-barrier discharge[J]. High Voltage Technology, 2002, 28(11): 43.
- [15] Xiong B, Liu Z, Hu W, et al. Study on high frequency and high voltage power supply circuit of dielectric barrier discharge flat lamp[J]. Vacuum Electronic Technology, 2008, (6): 8-12.
- [16] Li R, Li C, Tang J, et al. Microstructure and chemical composition of boron nitride fibers[J]. Key Engineering Materials, 2013, 591: 16-19.
- [17] 张艳.高硫石油焦脱硫新技术研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [18] Wang Y, Liu Y, Qi C, et al. Homogeneous combustion of fuel ultra-Lean methane-air mixtures; Experimental study and simplified reaction mechanism[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(8): 3437-3445.
- [19] 朱全华. DBD 镇流层制备工艺改良及非对称电极电场强化效应研究[D].大连:大连海事大学,2008. ■

(上接第 201 页)