

# 高温 DBD 系统的研制及其放电特性研究

张雨晨<sup>1</sup>, 邓官奎<sup>1</sup>, 齐学礼<sup>2</sup>, 刘 振<sup>1\*</sup>, 张连成<sup>1</sup>, 郑钦臻<sup>1</sup>, 闫克平<sup>1</sup>

(1. 浙江大学化学工程与生物工程学院, 浙江 杭州 310028;

2. 山东工业陶瓷研究设计院新材料事业部, 山东 淄博 255031)

**摘要:**为探究高温条件下介质阻挡放电特性,采用氮化硅陶瓷为绝缘介质的同轴管式结构研制了一套可在 800℃ 高温下运行的 DBD 放电系统,研究了在氮气气氛中不同温度条件下的 DBD 放电性能。结果表明,研制的 DBD 系统可在室温到 800℃ 范围内实现稳定放电。随着电压逐步提升,内电极附近区域最先发生细丝放电,强度优于外电极;随着温度的升高,放电逐步变得均匀;在维持外加电压不变时升高温度,有效电流和放电功率显著增大;高温环境 DBD 性能稳定,600℃ 时系统运行 1 h 后能量变化方差仅为 0.81。

**关键词:**高温介质阻挡放电;同轴管式电极;氮化硅;稳定性

**中图分类号:** O461.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2020)01-0198-04

**DOI:** 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2020.01.042

## Development of a high-temperature DBD system and its discharge characteristics

ZHANG Yu-chen<sup>1</sup>, DENG Guan-lei<sup>1</sup>, QI Xue-li<sup>2</sup>, LIU Zhen<sup>1\*</sup>, ZHANG Lian-cheng<sup>1</sup>,  
ZHENG Qin-zhen<sup>1</sup>, YAN Ke-ping<sup>1</sup>

(1. College of Chemical and Biological Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China; 2. Advanced Materials Division, Shandong Industrial Ceramic Research & Design Institute Co., Ltd., Zibo 255031, China)

**Abstract:** In order to investigate the characteristics of dielectric barrier discharge (DBD) at high temperature, a DBD system that uses silicon nitride ceramic insulating medium and has a coaxial tube structure is developed, which can operate at a temperature up to 800℃. The discharge characteristics of this DBD system at different temperatures are studied in a nitrogen atmosphere. The results show that this DBD system demonstrates well discharge characteristics at high temperature. As the voltage increases gradually, the discharge occurs firstly in the area near the inner electrode, with an intensity stronger than that near the outer electrode. With the increase of temperature, the discharge becomes more uniform. The effective current and discharge power both increase greatly when the temperature goes up under a constant applied voltage. This system maintains a stable performance in a high temperature circumstance. The variance of discharge energy is 0.81, at 600℃, within 1 h. At 600℃, the variance of energy change is 0.81 only after the system runs for 1 h.

**Key words:** high-temperature dielectric barrier discharge; coaxial tube electrode; silicon nitride; stability

非平衡等离子体一般通过气体放电产生<sup>[1]</sup>。介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 是一种将绝缘介质插入放电空间的非平衡气体放电,这种放电表现均匀、稳定<sup>[2-4]</sup>,可用于处理工业废气,将其中的挥发性有机化合物氧化成无害或毒性较小的化合物<sup>[5]</sup>,如净化柴油尾气<sup>[6]</sup>、分解有害气体和对烟气脱硫脱硝<sup>[7-8]</sup>等。目前 DBD 的研究主要关注电极结构<sup>[9-11]</sup>、放电间隙<sup>[12-13]</sup>、电源电压和频率<sup>[14-15]</sup>等方面,对不同温度条件,尤其是 500℃ 以上高温环境 DBD 的研究较少,限制了相关应用。

工业过程存在许多需在高温下展开的工艺,如纤维陶瓷材料的制备、高温煅烧石油焦进行脱硫、催化燃烧处理有机废气等<sup>[16-18]</sup>,不同工艺所需的反应

温度从数百度到几千度不等。因等离子体对气体分子的活化作用,可将等离子体引入传统工艺加速反应。为此,需研究不同温度下等离子体的放电特性。

本文中研制了一套高温 DBD 系统并测试了其在不同温度下的电特性。为了评估系统在不同温度下的稳定性,开展了 100~800℃ 下的实验研究,出于安全考虑,实验在 N<sub>2</sub> 中进行。本文中重点介绍 DBD 系统的研制,不同温度的放电特性及高温 DBD 系统的放电稳定性等。

## 1 高温 DBD 系统研制

图 1 为高温 DBD 系统整体结构剖面图。难点之一在于高压绝缘结构,因反应器内部温度可达

收稿日期:2019-03-18;修回日期:2019-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(21276232)

作者简介:张雨晨(1994-),女,硕士,研究方向为等离子体放电特性,21628037@zju.edu.cn;刘振(1978-),男,博士,副教授,研究方向为低温等离子体和脉冲功率技术,通讯联系人,zliu@zju.edu.cn。

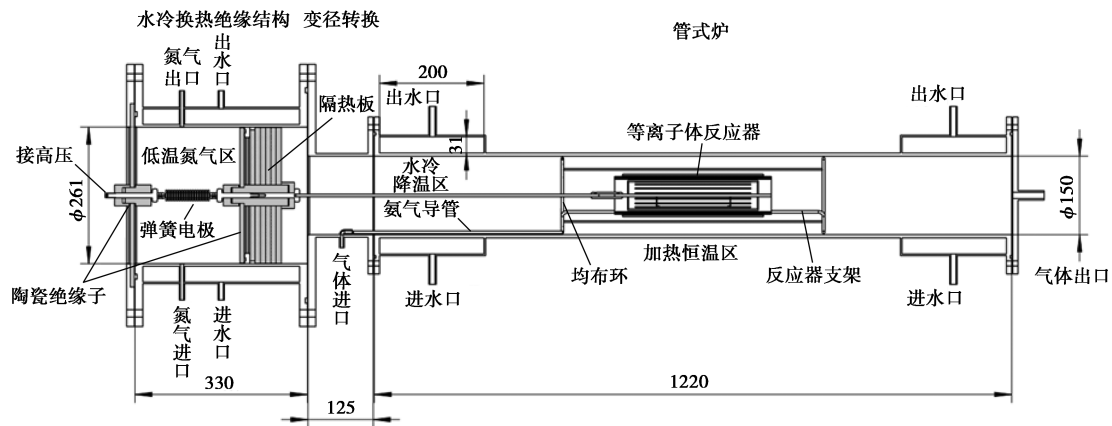


图 1 高温 DBD 系统整体结构剖面图

1 000℃,电源高压需从室温环境馈入,巨大温差可能导致破裂处发生沿面闪络放电并引起爆炸事故,因此必须保证系统密封性、安全性。为此设计了一种水冷热交换高压绝缘结构,主要包含以下功能:①水冷热交换高压引出单元,降低陶瓷绝缘子所处环境温度;②氮气封闭高压保护单元,加强保护,即使隔热层出现气体泄漏,也不会直接同空气混合。

DBD 放电结构采用同轴管式电极。耐高温的绝缘介质是实现高温 DBD 系统的另一难点,本文中采用定制的氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )陶瓷管:内径 62 mm,壁厚 5 mm,长 330 mm, $\text{Si}_3\text{N}_4$  具有优异的高温力学性能和抗高温氧化性能;电极采用 310S 不锈钢材料,金属内电极通过弹簧电极接高压;外电极通过外壳接地。内外电极间的放电总间隙为 8 mm,放电体积约为  $433.7 \text{ cm}^3$ 。

## 2 实验结果

实验在氮气气氛中进行,流程示意图如图 2 所示。该系统由电源、数据收集系统和高温 DBD 系统组成。电源为双极性微秒脉冲电源,频率在 1~10 kHz 可调,输出电压 0~20 kV。实验过程频率设为 2 kHz,即每秒钟注入反应器的脉冲数为 4 000 个;

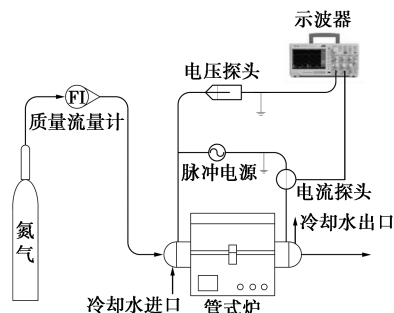


图 2 实验流程

采用高压探头 Northstar PVM-5(1 000:1)和 Pearson 电流计(1:1)测量电压、电流,泰克示波器 Tektronix MDO3024 记录波形;放电图像由数码相机(Sony、ILCE-6300L、APS-C)记录;采用质量流量计控制气体流量为 1 L/min;用于保护实验装置的冷却水流量为 60 L/h。

### 2.1 放电现象

图 3 显示了 700℃ 温度环境中,不同电压下 DBD 的放电形貌,图上注释表示温度和峰值电压。施加电压后,放电细丝随机径向分布在氮气间隙中,易观察到明亮跳跃的细丝(通常称为微放电,产生等离子体),随着外加电压的增大,放电细丝数量增加,放电更加均匀、完整。

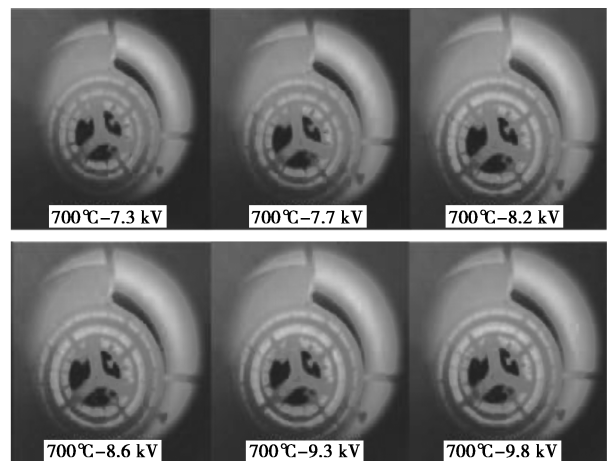


图 3 700℃ 下的放电照片

(图中注释代表:温度-峰值电压)

图 4 为 400、500℃ 条件下,峰值电压为 9.2 kV 时拍摄的放电照片。从图中可以看出,内电极(阳极)比外电极放电更明显,外加电压相同时,500℃ 放电更明显。

由气体放电理论可知,通常利用电场不均匀系

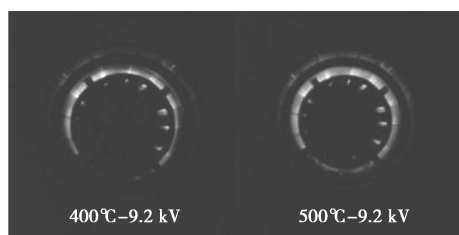


图 4 外加电压 9.2 kV 时 400、500℃ 的放电现象

数  $f$  来判断电场是否均匀,当  $f=1$  时为均匀电场,当  $f \neq 1$  时为非均匀电场。同轴管式电极电场的  $f$  可用以下经验公式<sup>[19]</sup>进行估算:

$$f = E_{\max}/E_{\text{av}} \quad (1)$$

式中,  $E_{\max}$  为电场中的最大场强, V/cm;  $E_{\text{av}}$  为平均场强, V/cm。

根据式(1)计算本文中同轴电极的电场不均匀系数  $f=0.7$ , 属于不均匀电场。施加电压后, 由于内电极曲率半径小, 表面场强最大, 先发生放电。随着电压进一步增大, 放电区域不断延伸直至充满气隙。当温度升高时, 气隙中的电子崩和正电粒子运动更剧烈, 增加了碰撞机率, 故高温条件放电现象更明显。

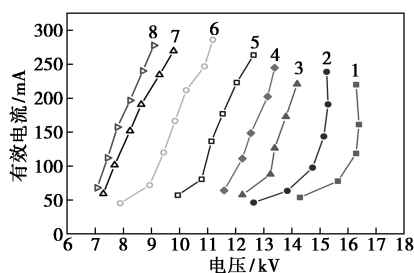
### 2.2 放电特性

DBD 反应器的功率采用积分法计算, 计算公式为:

$$P = v \int_0^{\Delta T} u i dt \quad (2)$$

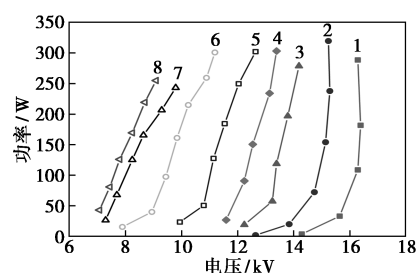
式中,  $v$  为脉冲电源的频率, Hz;  $i$  为经过反应器的电流, A;  $\Delta T$  为采样间隔, s。

图 5、图 6 分别为不同温度下有效电流、放电功率随电压变化的趋势图。从图 5 可以看出, 有效电流随着外加电压的增加急剧增大。当介质和放电间隙一定时, 增大电压给介质电容充电, 放电空间内丝状通道数目增加, 电流增大。而后介质电容趋于稳定, 放电细丝趋于饱和, 电流仅和电压有关, 随电压线性增大。从图 6 可以看出, 放电功率随电压的增



1—100℃; 2—200℃; 3—300℃; 4—400℃; 5—500℃; 6—600℃; 7—700℃; 8—800℃

图 5 不同温度下有效电流随电压的变化

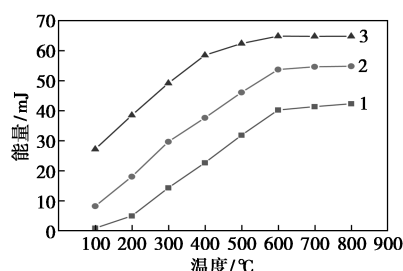


1—100℃; 2—200℃; 3—300℃; 4—400℃; 5—500℃; 6—600℃; 7—700℃; 8—800℃

图 6 不同温度下功率随电压的变化

加近似线性增大, 但不同温度下的斜率略有差别。当电压为 10 kV 时, 500℃ 的放电功率为 24.99 W, 600℃ 的放电功率达 181.18 W。同时随着温度的升高, 起始放电电压显著降低, 说明高温有利于气体放电。

图 7 为使用不同的电源参数时, 能量随温度的变化。可以看出, 随着温度的升高, 注入反应器的能量先增加后趋于稳定。如工况 3 时, 100~800℃ 时的能量分别为 27.2、38.5、49.2、58.5、62.4、63.8、64.7、64.8 mJ, 系统能量的变化由场强变化引起。



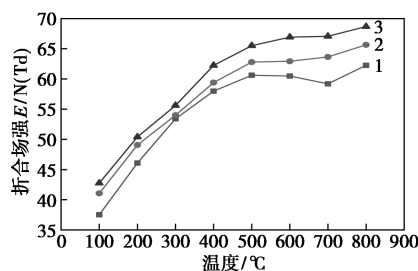
1—工况 1; 2—工况 2; 3—工况 3

图 7 能量随温度的变化

同轴管式电极放电区域的非均匀电场强度难以测定, 采用折合场强计算说明:

$$E_e/N = kuT/[xp \ln(R'/r)] \quad (3)$$

根据式(3)计算并绘制了不同电源参数时折合场强随温度的变化, 得图 8, 可知随着温度的升高,



1—工况 1; 2—工况 2; 3—工况 3

图 8 折合场强随温度的变化

折合场强先增大后趋于稳定,而场强的大小直接影响了气体放电中电子的平均能量,所以升高温度有利于增大气体分子的能量,与图 7 趋势相符。由式(3)可知,可通过改变温度和电压来调节折合场强,进而调节电子平均能量这一重要物理量。

### 2.3 放电稳定性试验

在 400、600、800℃ 3 个典型温度下,持续放电 1 h,每隔 5 min 记录反应器上的电压、电流和能量的变化得图 9。从图中可以看出,电压、电流和能量随时间变化的幅度很小,尤其是 600℃ 和 800℃ 时,电压、电流仅在误差允许范围内波动,放电参数十分稳定。运行 1 h 后 400、600、800℃ 的能量变化方差分别为 4.84、0.81、1.00。说明自主设计的高压绝缘结构和电极结构能在高温环境稳定工作,高温系统性能优良,为研究提供保障。

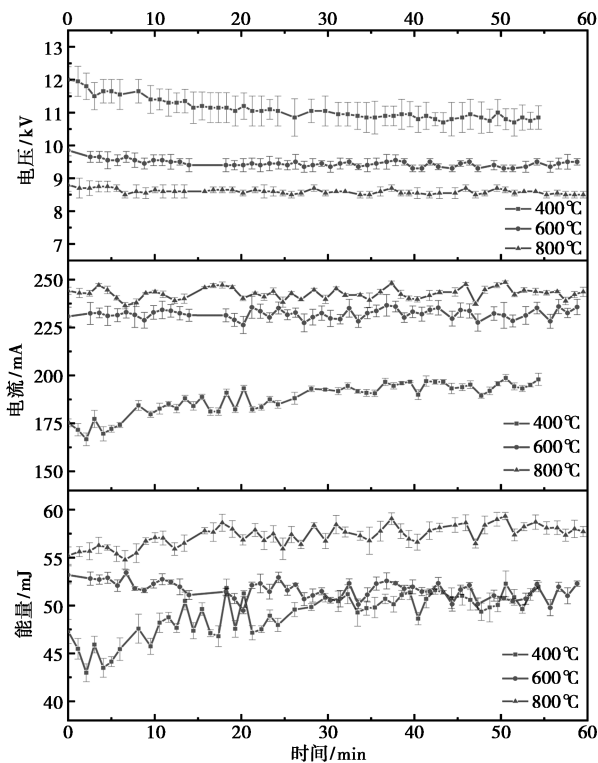


图 9 高温系统在不同温度下运行 1 h 电压、电流和能量的变化

### 3 结论与展望

介绍了一套自主研制的高温 DBD 系统并研究了其在高温下的放电特性,结论如下。

(1) 同轴管式电极结构在外加电压的作用下产生不均匀电场,内电极场强最大,升高电压后最先发生细丝放电,且放电现象最明显。

(2) 在维持外加电压不变的情况下,升高温度,有效电流和功率显著增大;温度一定时,增大电压,电流随之增大同时给介质电容充电,待电容稳定后电流随电压线性增大。

(3) 研制的高压绝缘结构在高达 800℃ 的温度环境下能长时间稳定工作,电学参数变化较小,600℃ 时能量变化方差仅为 0.81,说明高温系统性能优良。

综上,研制的 DBD 系统在高温下可实现稳定放电,为结合 DBD 和传统高温工艺的研究提供基础。

### 参考文献

- [1] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- [2] Eliasson B, Kogelschatz U. Modeling and applications of silent discharge plasmas [J]. Plasma Science IEEE Transactions on, 1991, 19 (2): 309-323.
- [3] Roth J. Industrial plasma engineering [M]. Bristol: Institute of Physics Publishing, 1995.
- [4] Chen Y, Ling Y. The experimental research for the generation of ozone using dielectric barrier discharge [J]. Journal of Electron Devices, 2004, 27(4): 653-657.
- [5] Blin-simian N, Pasquiers S, Jorand F, et al. Removal of formaldehyde in nitrogen and in dry air by a DBD: Importance of temperature and role of nitrogen metastable states [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(12): 122003.
- [6] Higashi M, Uchida S, Suzuki N, et al. Soot elimination and NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> reduction in diesel-engine exhaust by a combination of discharge plasma and oil dynamics [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 20(1): 1-12.
- [7] Wang J, Nie Y, Zhong K. The influences of power supply on lean NO<sub>x</sub> removal by plasma-facilitated selective catalytic reduction [C]. Report-conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena, 2007.
- [8] 任荣. 烟气 NO<sub>x</sub>/SO<sub>x</sub> 联合脱除反应器流化——DBD 特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007.
- [9] 周波, 王晓静, 孙才新. 电极结构对介质阻挡放电参数的影响研究 [J]. 高压电器, 2010, 46(4): 31-34.
- [10] Wang C, Zhang G, Wang X. Comparisons of discharge characteristics of a dielectric barrier discharge with different electrode structures [C]. Effects of Electrode Structure and Electron Energy on Abatement of NO in Dielectric Barrier Discharge Reactor, 2012: 960-964.
- [11] Zhao W, Wang F, Liu Y, et al. Effects of electrode structure and electron energy on abatement of NO in dielectric barrier discharge reactor [J]. Applied Sciences-Basel, 2018, 8(4): 618-620.

(下转第 206 页)

干燥要求,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]. Adv Powder 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)