

高压电场中液体雾化特性的实验研究

崔佳明, 高士博, 俞瑞利, 焦东升, 夏良志*
(大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116000)

摘要:提出了一种静电喷雾干燥制备超细墨粉的新工艺, 对该工艺涉及的静电雾化过程进行了实验研究, 分析了电压、流量、针头内径等因素对高压电场中液体雾化模式和雾化效果的影响。结果表明, 随着电压的增加, 乙醇的雾化呈现出滴落模式、锥射流模式、鞭动模式、多极分岔射流模式和稳定多股射流模式, 其中稳定多股射流模式下的雾化效果较好。雾化液滴的平均粒径随电压的增大先减小后基本保持不变、随针头内径的减小而减小、随流量的增大而增大。各因素对液滴分布均匀性以及液滴平均粒径大小的影响程度均为电压最大、针头内径次之、流量最小。最佳实验条件为电压 8 kV、流量 2.5 mL/min、针头内径 0.2 mm, 该条件下平均粒径最小为 37.96 μm 。使用质量分数 5% 的墨粉前驱液进行静电雾化实验, 液滴主要分布在 15~35 μm , 液滴的平均粒径为 24.49 μm , 计算得到墨粉的平均粒径为 8.31 μm 。

关键词:墨粉; 静电雾化; 液滴粒径; 影响因素; 正交实验

中图分类号:TK173; O358

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0304-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.056

Experimental study on liquid atomization characteristics in high electric field

CUI Jia-ming, GAO Shi-bo, YU Rui-li, JIAO Dong-sheng, XIA Liang-zhi*

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: A novel process is presented for preparing ultrafine toner via electrostatic spray drying method, and the electrostatic atomization involved in the process is studied experimentally. The influences of voltage, flow rate and needle diameter on the mode and effect of liquid atomization in high voltage electric field are analyzed. The results show that with the increase of voltage, the atomization of ethanol presents with droplet mode, cone jet mode, whip mode, multi-pole bifurcation jet mode and stable multi-jet mode. Among them, the stable multi-jet mode exhibits a better atomization effect. With the increase of voltage, the average particle size of atomized droplets decreases firstly and then remains basically unchanged, while it decreases with the decrease of needle diameter, and increases with the increase of flow rate. The influence degree of voltage on droplet distribution uniformity and droplet average particle size is always the largest, that of needle diameter is the second, and that of flow rate is the least. The optimal experimental conditions are as follows: voltage is 8 kV, flow rate is 2.5 mL·min⁻¹, and needle diameter is 0.2 mm, under which the average particle size of atomized droplets is the minimum, 37.96 μm . As 5% toner precursor is used to perform atomization experiments, it is shown that the droplet size mainly distributes in the range of 15~35 μm , the average size of droplet is 24.49 μm , and the calculated average particle size of the toner is 8.31 μm .

Key words: toner; electrostatic atomization; droplet size; influence factor; orthogonal experiment

墨粉是电子信息打印行业的主要耗材, 属于高附加值的超细粉体, 若想要达到高清晰度的打印效果, 墨粉的粒径最好在 6~10 μm 之内。目前, 我国常用的墨粉制备方法主要为熔融粉碎法和化学聚合法, 但是熔融粉碎法制备的墨粉表面形貌较差, 粒径分布不均匀, 化学聚合法工艺复杂、成本较高且产生的废水容易污染环境^[1], 为了克服传统墨粉制备方法的缺点, 提出了一种静电喷雾干燥法制备墨粉的新工艺。喷雾干燥是一种常见的粉体颗粒制备技术, 料液通过喷嘴雾化成小液滴, 液滴与干燥气体在干燥室中进行传热传质使溶剂蒸发, 最终形成粉体颗粒并收集^[2]。传统的喷雾干燥方法虽然热效率较高, 但是颗粒的大小及分布难以控制^[3]。因此使

用静电雾化代替传统的压力、旋转、气流式雾化。

静电雾化是指利用高压静电技术使流经毛细管的液体在电场力的作用下形成泰勒锥, 然后破碎成细小荷电雾滴群的过程^[4]。1745 年 Bose 就在实验中发现了静电雾化现象, 但是当时并没有进行深入研究。19 世纪 70 年代, Rayleigh^[5] 在研究中指出, 带电的液滴之所以能够保持稳定, 是因为其带电量没有超过某一界限, 而一旦液滴的带电量超过该界限, 液滴将无法维持稳定状态并发生分裂, 该极限值被称为“Rayleigh 极限”。20 世纪 60 年代, Taylor^[6] 在实验中发现, 当电压达到某一临界值时, 管口处的液体由半球形转变为锥形, 这一带电的锥体被称为“泰勒锥”。与传统的雾化方式相比, 静电雾化技术

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-03-10

作者简介: 崔佳明(1995-), 男, 硕士生; 夏良志(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型高效喷雾干燥实验平台研究, 通讯联系人, xlz@dlut.edu.cn。

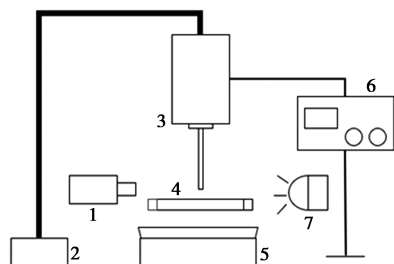
能产生粒径小、单分散性好、可控性强、沉积率高的液滴,可以有效提高液体利用率^[7],因此在静电喷涂、静电印刷、农药喷洒、生物制药、微型燃烧和微纳米材料制备等众多领域都有着广泛应用^[8-13]。尤其是在微纳米颗粒制备方面,静电雾化产生的荷电液滴所需干燥温度低,降低了热降解的风险,产物活性高,具有广阔的发展前景^[14]。Schmatz等^[15]将电喷雾技术引入到藻蓝蛋白的制备中,最终制备藻蓝蛋白耐热性高达216℃,并且保持了较高的抗氧化活性。Vehapi等^[16]采用电喷雾方法制备了牛至橄榄油/壳聚糖粒子,很大程度上提高了产物的包埋率和抗真菌效果。Mutukuri等^[17]使用静电喷雾干燥的方式生产了单克隆抗体制剂,比传统的喷雾干燥方式生成的产物稳定性更好。Karimi等^[18]采用静电雾化喷涂的方法制备了ZnS薄膜,研究了电压、流量以及喷涂间距对薄膜形貌的影响。Ri等^[19]使用静电喷涂沉积技术制备了纳米复合锂离子电极材料,具备较高的均匀性和稳定性。目前对静电雾化制备微纳米颗粒的研究大多集中在产物的性能测试与表征方面,对雾化模式以及液滴尺度信息方面的研究较少。

本文中使用的无水乙醇为实验介质,对液体在高压静电场中的雾化模式及雾化特性进行初步研究,探究电压、流量、针头内径对静电雾化过程中液滴分布均匀性以及液滴平均粒径大小的影响。除此之外,还使用墨粉前驱液进行静电雾化实验,获得了雾化液滴的粒径信息,为之后的干燥过程奠定了坚实的研究基础。

1 实验装置与流程

1.1 实验装置

本文中使用的静电雾化实验装置如图1所示,主要包括负高压直流电源、蠕动泵、环形电极、雾化喷嘴、高速摄像机、冷光源、废液收集桶等。



1—高速摄像机;2—蠕动泵;3—雾化喷嘴;4—环形电极;
5—废液收集桶;6—高压电源;7—冷光源

图1 高压静电雾化实验装置

1.2 实验流程

液体的物性是静电雾化过程影响因素之一,其中起主导作用的是表面张力。墨粉前驱液的溶剂为四氢呋喃,但是四氢呋喃对人体有一定生殖毒性,有机物中无水乙醇的表面张力与四氢呋喃相近且比较安全,因此先使用无水乙醇进行静电雾化实验,探索实验规律。无水乙醇的物理性质如表1所示。

表1 无水乙醇的物理性质

参数	数值
无水乙醇密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	790
无水乙醇黏度/($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	1.17
无水乙醇表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	0.022
无水乙醇介电常数	24.5

静电雾化实验的基本流程如下:检查仪器设备的完好性并规范连接。调整毛细管口与环形电极的垂直距离,确定间距。调节蠕动泵的转速来控制流量,将转速控制在实验值并等待出液稳定。设定电压保护值,保证实验安全。电压从0开始增加,使用高速摄像机拍摄无水乙醇雾化模式的变化情况。收集不同条件下雾化生成的液滴,用高倍生物显微镜观测并拍摄图片。

2 静电雾化实验结果

2.1 无水乙醇的雾化模式

不同电压下无水乙醇的雾化模式如图2所示。在电场力作用下无水乙醇呈现出滴落模式、锥射流模式、鞭动模式、多极分岔射流模式以及稳定多股射流模式。

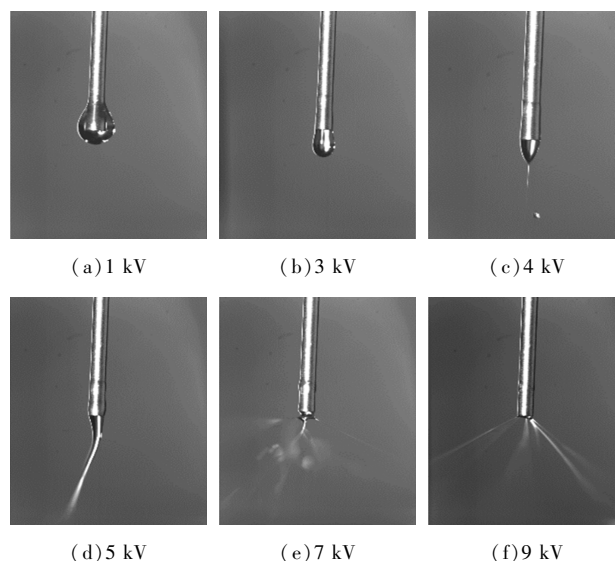


图2 不同电压下无水乙醇的雾化模式

(1) 施加的电压在 3 kV 以下时, 无水乙醇处于滴落模式。从图 2(a)、(b) 可以看出, 一部分液体会先包覆在毛细管壁上, 然后凝成一颗液滴自管口处下落, 这是因为电压较小时, 重力与表面张力起主导作用。施加的电压为 3 kV 时, 电场力的影响已经比较明显, 此时包覆在毛细管壁的液体变少, 导致管口处聚积的液体体积明显变小, 只比毛细管外径略大, 液滴下落的间隔也大幅度缩短。

(2) 施加的电压为 4 kV 时, 滴落模式结束, 泰勒锥成型, 无水乙醇的雾化处于稳定的锥射流模式。泰勒锥的形成与断裂是一个重复性的周期过程, 从图 2(c) 可以看出, 乙醇形成的泰勒锥锥体细长, 锥角较小, 锥尖处拉伸出了一条细小的射流。

(3) 施加的电压为 5~6 kV 时, 无水乙醇处于不稳定的鞭动模式。从图 2(d) 可以看出, 管口处的液体呈现鞭状并左右摆动。随着电压的增加鞭动会更加剧烈, 主要表现为鞭状射流明显变短, 左右摆动幅度加大。

(4) 施加的电压为 7 kV 时, 无水乙醇处于不稳定的多极分岔射流模式。从图 2(e) 可以看出, 管口处的液体会分岔成几股并出现旋转现象, 伴随着旋转现象的发生液体会破碎成多个液滴。

(5) 施加的电压为 8 kV 时, 无水乙醇处于稳定多股射流模式。从图 2(f) 可以看出, 此时毛细管口底端边缘处形成了数条稳定的细小射流, 每一条射流都会雾化破碎形成小液滴, 雾化状态十分稳定。随后电压增大到 12 kV 时依旧处于稳定多股射流模式。稳定多股射流模式下的雾化液滴如图 3 所示, 可以看出该模式下雾化液滴的粒径较小且分布比较均匀。

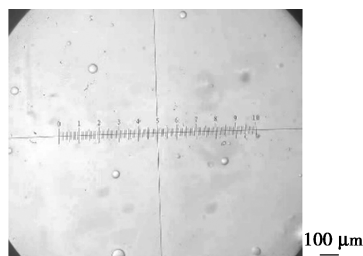


图 3 稳定多股射流模式下的雾化液滴

2.2 不同因素对雾化液滴粒径的影响

除了雾化模式, 雾化液滴的粒径也是液体雾化效果好坏的重要评判标准, 尤其是对制备各种功能性微纳米粉体而言, 雾滴粒径的大小直接影响最终产物的粒径大小, 进而影响产物的性能, 因此将通过

单因素实验研究电压、流量、针头内径对液滴粒径的影响。

2.2.1 电压的影响

实验条件为流量 5 mL/min, 针头内径 0.4 mm 时, 不同电压下无水乙醇的雾化粒径如图 4 所示。

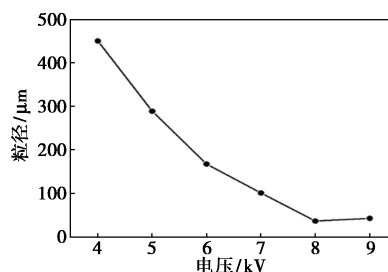


图 4 电压对雾化液滴粒径的影响

从图 4 中可以看出, 无水乙醇的雾化液滴粒径随着电压的增大先减小后基本趋于不变。锥射流模式虽然比较稳定, 但是由于无水乙醇的表面张力比较小, 锥射流出现时的电压值较低, 荷电效果不佳, 此时雾化液滴的粒径较大。鞭动模式和多极分岔射流模式的雾化稳定性很差, 粒径分布不均匀。8 kV 之后, 无水乙醇的雾化进入稳定多股射流模式, 此时雾化液滴粒径较小, 该模式下电压增加时粒径几乎不发生变化, 稳定性很好。

2.2.2 流量的影响

实验条件为电压 6 kV, 针头内径 0.27 mm 时, 不同流量下无水乙醇的雾化粒径如图 5 所示。

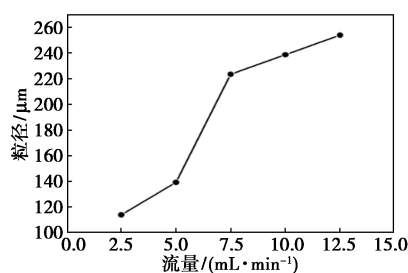


图 5 流量对雾化液滴粒径的影响

从图 5 中可以看出, 无水乙醇的雾化液滴粒径随着流量的增大逐渐增大, 这是因为流量增大时, 喷嘴处液体的流速会加快, 液体在强电场中的停留时间变短。如果液体在电场中的停留时间小于液体荷电的弛豫时间就会导致液体荷电不充分, 从而影响雾化效果, 使液滴粒径变大。

2.2.3 针头内径的影响

实验条件为电压 6 kV, 流量 5.0 mL/min 时, 不同针头内径下无水乙醇的雾化粒径如图 6 所示。

18G、22G、24G、26G、28G 型号针头的内径分别为 0.86、0.40、0.27、0.22、0.17 mm。

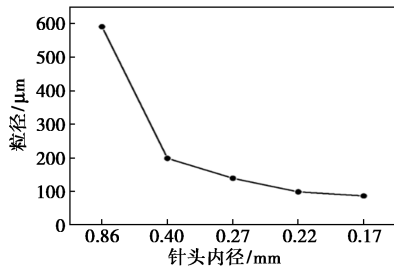


图 6 针头内径对雾化液滴粒径的影响

从图 6 中可以看出,无水乙醇的雾化液滴粒径随着针头内径的减小无水乙醇的雾化液滴粒径逐渐减小,这是因为施加电压后在毛细管附近激发的电场是基于尖端效应,毛细管的内径越小曲率越大,尖端效应也越明显。因此电压和间距不变时,针头内径越小激发的场强越大,液滴粒径变小。

3 雾化因素影响机理分析

静电雾化的影响因素主要有 3 种:过程参数、液体性质以及外界环境^[20],通过正交实验来研究不同因素对液体雾化效果的影响并确定最佳实验条件。

3.1 正交实验方案设计

以单因素实验为基础,选取电压(A)、流量(B)、针头内径(C) 3 个因素进行正交实验,正交实验因素水平表如表 2 所示。

表 2 正交实验因素水平

水平	电压/kV	流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)	针头内径/mm
I	4	2.5	0.4
II	6	5.0	0.3
III	8	7.5	0.2

根据表 2 可知,本次实验为 3 因素 3 水平正交实验,一共需要 9 组实验,实验方案及结果如表 3 所示。

表 3 正交实验方案及结果

序号	A	B	C	标准差	平均粒径/ μm
1	4	2.5	0.4	100.49	467.35
2	4	5.0	0.3	106.80	359.25
3	4	7.5	0.2	78.41	353.06
4	6	2.5	0.3	28.69	74.50
5	6	5.0	0.2	19.51	95.57
6	6	7.5	0.4	59.04	272.76
7	8	2.5	0.2	6.78	37.96
8	8	5.0	0.4	30.15	114.27
9	8	7.5	0.3	20.62	92.13

3.2 结果分析与讨论

不同条件下液滴粒径的标准差均值如表 4 所示,可以在一定程度上代表雾化液滴粒径分布的均匀性。不同条件下液滴粒径的平均粒径均值如表 5 所示,可以在一定程度上代表雾化液滴粒径大小。

表 4 不同条件下的标准差均值

因素	电压/kV			流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)			针头内径/mm		
	4.0	6.0	8.0	2.5	5.0	7.5	0.2	0.3	0.4
标准差均值/ μm	95.23	35.75	19.18	45.32	52.12	52.69	34.90	52.04	63.23

从表 4 中可以看出,改变电压时各个实验组的标准差均值变化很大,当电压增大到 8 kV 时,标准差均值急剧减小,说明电压对液滴粒径分布均匀性的影响十分显著。这是因为雾化模式会随着电压的改变而变化,在 8 kV 时雾化处于稳定多股射流状态,此时液滴分布均匀性较好,因此标准差均值也比

较小。改变流量时各个实验组的标准差均值变化比较小,说明流量对于液滴均匀性的影响不是很明显。改变针头内径时各个实验组的标准差均值变化大于流量小于电压,随着针头内径的减小标准差均值也稳定减小,说明针头内径对液滴粒径分布均匀性的影响一般,大于流量但小于电压。

表 5 不同条件下的平均粒径均值

因素	电压/kV			流量/($\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$)			针头内径/mm		
	4.0	6.0	8.0	2.5	5.0	7.5	0.2	0.3	0.4
平均粒径均值/ μm	393.22	147.61	81.46	193.27	189.70	239.31	162.20	175.29	284.79

从表 5 中可以看出,改变电压时不同实验组的平均粒径均值变化很大,说明电压对平均粒径的影

响十分显著,原因也是改变了雾化模式。改变流量时不同实验组的平均粒径均值变化较小,说明流量

对平均粒径的影响较小。改变针头内径时不同实验组的平均粒径变化比改变流量明显,但是当针头内径减小到 0.3 mm 以下时,对平均粒径的影响变得很小。

3 种因素对液滴均匀性的影响程度为电压最大,针头内径次之,流量最小,对液滴平均粒径的影响程度也为电压最大,针头内径次之,流量最小。综合液滴分布的均匀性和液滴的平均粒径可以得出本次正交实验的最佳实验条件:电压为 8 kV,流量为 2.5 mL/min,针头内径为 0.2 mm,此时的液滴均匀性较好,平均粒径为 37.96 μm ,是 9 组实验中的最小值。

3.3 墨粉前驱液雾化液滴的粒径分布

结合 3.2 节的实验结果,使用自行配置的墨粉前驱液进行静电雾化实验,为之后的干燥过程数值模拟提供依据。实验条件为电压 8 kV,针头内径 0.2 mm,流量 2.5 mL/min。墨粉前驱液为质量分数 5% 的四氢呋喃溶液,溶质包括树脂主体以及黏结剂石蜡,两者的质量比为 $m(\text{树脂}):m(\text{石蜡})=9:1$ 。实验得到的雾化液滴粒径分布如图 7 所示。

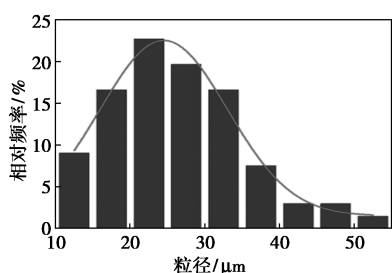


图 7 液滴粒径分布

从图 7 中可以得出,液滴粒径大多集中在 15~35 μm ,占总体液滴的 75.76%,雾化液滴的平均粒径 24.49 μm 。在只考虑料液和产物性质的理想情况下,液滴粒径和产物粒径的关系如下:

$$D_d/D_w = \{(\rho_w/\rho_d) \times [(1 + X_2)/(1 + X_1)]\}^{1/3}$$

式中, D_d 为产物粒径, μm ; D_w 为液滴粒径, μm ; ρ_w 为料液密度,890 kg/m^3 ; ρ_d 为产物密度,约为 1 200 kg/m^3 ; X_1 和 X_2 分别为初始物料和最终产物的干基含湿量,在喷雾干燥中, X_2 一般非常小,可忽略不计,质量分数 5% 的溶液 X_1 为 19,得到的最终产物的平均粒径为 8.31 μm 。

4 结论

(1) 高压电场中的无水乙醇在电场力的作用下会呈现出多种雾化模式,主要有滴落模式、锥射流模

式、鞭动模式、多极分岔射流模式以及稳定多股射流模式。稳定多股射流模式下无水乙醇的雾化效果比较好,该模式下的雾化状态比较稳定,雾化液滴粒径小且分布均匀。

(2) 通过单因素实验研究了电压、流量、针头内径对雾化液滴粒径的影响。结果表明,雾化液滴的粒径随着电压的增大先减小而后基本保持不变,随针头内径的减小先急剧减小后平稳减小,随着流量的增大而增大。

(3) 通过正交实验研究了不同因素对液滴粒径的影响程度。结果表明,对液滴分布均匀性的影响程度为电压最大,针头内径次之,流量最小,对液滴平均粒径的影响程度也为电压最大,针头内径次之,流量最小。静电雾化的最佳实验条件为电压 8 kV,流量 2.5 mL/min,针头内径 0.2 mm,此时雾化液滴的平均粒径最小,为 37.96 μm 。

(4) 使用质量分数 5% 的墨粉前驱液进行静电雾化实验,实验条件为电压 8 kV,针头内径 0.2 mm,流量 2.5 mL/min。实验结果表明,液滴粒径大多集中在 15~35 μm ,占总体液滴的 75.76%,雾化液滴的平均粒径为 24.49 μm ,预测墨粉成品的平均粒径为 8.31 μm 。计算结果满足墨粉 6~10 μm 的粒度特性要求,为之后的干燥过程研究奠定了可靠的基础。

参考文献

- [1] 任忠永,齐俊梅,姚雪丽,等.彩色化学墨粉研究进展[J].天津化工,2021,35(1):6-9.
- [2] Naar Z. Nanoencapsulation technologies for the food and nutraceutical industries [J]. Acta Alimentaria: An International Journal of Food Science, 2017, 46(3): 390.
- [3] Jafari S M, Arpagaus C, Cerqueira M A, et al. Nano spray drying of food ingredients; materials, processing and applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 109: 632-646.
- [4] Miao P, Balachandran W, Wang J L. Electrostatic generation and theoretical modelling of ultra fine spray of ceramic suspensions for thin film preparation [J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51/52(1/2/3/4): 43-49.
- [5] Rayleigh L. On the instability of jets [J]. Proceedings of the London Mathematical Society, 1878, s1-10(1): 4-13.
- [6] Taylor G I. The force exerted by an electric field on a long cylindrical conductor [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1966, 291(1425): 145-158.
- [7] 王军锋,左子文,霍元平.液滴演化及静电场下锥射流形成的数值模拟[J].工程热物理学报,2013,34(4):667-671.

(下转第 320 页)

- [5] 黄俊,刘羿良,吴鹏,等. TiAl 基羰基硫水解催化剂的中毒机制与抗氧化性能研究[J]. 化工学报, 2022, 73(10): 4461-4471.
- [6] 杨超越. 适用于天然气选择性脱硫的空间位阻胺合成及性能评价[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
- [7] Pal P, Abukashabeh A, Al-Asheh S. Role of aqueous methyldiethanolamine (MDEA) as solvent in natural gas sweetening unit and process contaminants with probable reaction pathway [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 124-131.
- [8] 徐宏建,张慧鑫,孙雅萍. 非水 MDEA 混合溶剂对 H₂S 的选择性脱硫[J]. 上海电力学院学报, 2010, 26(3): 242-246.
- [9] 柯明,陈冬,冯琪,等. 羰基硫和醇胺溶液反应机理及反应动力学研究进展[J]. 化工科技, 2014, 22(6): 71-74.
- [10] 胡清,高飞,马会霞,等. 空间位阻胺脱硫化氢研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(3): 801-804.
- [11] 杨波,诸林,杨超越,等. 空间位阻胺 1,3-二(二乙胺基)-2-丙醇的合成及脱硫性能评价[J]. 现代化工, 2017, 37(3): 146-150.
- [12] 张峰,沈本贤,孙辉,等. 基于分子管理的脱有机硫复配型溶剂的开发与应用[J]. 化工进展, 2015, 34(6): 1786-1791, 1803.
- [13] Ernst W R, Chen M S K, Mitchell D L. Hydrolysis of carbonyl sulfide: Comparison to reactions of isocyanates[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1990, 68(2): 319-323.
- [14] Reilly J T, Schubert C N, Lindner J R, et al. Effect of heterocyclic amine additives on the absorption rates of carbonyl sulfide and carbon dioxide in aqueous methyldiethanolamine solutions [J]. Chemical Engineering Communications, 1990, 93(1): 181-191.
- [15] 王亭沂. 络合铁法液相氧化还原脱硫技术中络合剂的优化研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023, 43(19): 144-147.
- [16] 孙洁浩,赵全辉,唐量,等. 聚天冬氨酸络合铁体系在污水处理厂沼气脱硫中的应用研究[J]. 能源化工, 2023, 44(5): 33-37.
- [17] Girish M Deshmukh, Aparna Shete, Deepali M Pawar. Oxidative absorption of hydrogen sulfide using an iron-chelate based process: Chelate degradation[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2013, 88(3): 432-436.
- [18] 耿李好. 高炉煤气精脱硫协同碳捕集配方型吸收剂研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [19] 周冬梅. 高炉煤气中羰基硫的脱除技术研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- [20] 魏振浩. CODS 溶剂脱除高炉煤气中有机硫性能考察[J]. 中国冶金, 2020, 30(10): 87-91.
- [21] Littell R J. On the kinetics between COS and heterocyclic amines in aqueous solutions [J]. Chemical Engineering Communications, 1993, 126(1): 179-187.
- [22] Feng Z, Benxian S, Hui S, et al. Rational formulation design and commercial application of a new hybrid solvent for selectively removing H₂S and organosulfurs from sour natural gas[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(1): 12-19.
- [23] 袁宇轩,沈凯,陈超,等. 基于 ASPEN 的络合铁法高炉煤气脱硫模拟与优化[J]. 环境工程, 2023, 41(12): 172-181.
- [24] 王贵生. CO₂ 捕集液物性对其捕集性能的影响分析[J]. 石油石化节能, 2023, 13(6): 1-8.
- [25] 李永生. MDEA 脱硫溶液吸收选择性提升研究[J]. 石油与天然气化工, 2015, 44(3): 36-39.
- [26] 向言. 络合铁法湿式脱硫再生反应动力学研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019. ■

(上接第 308 页)

- [8] 李庆,吉晓晓,杜云鹏,等. 高压静电场雾化过程中荷电微射流体的研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 624-629.
- [9] 江旭丽,甘云华,江政纬,等. 乙醇-生物柴油液滴的荷电与破碎特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4115-4121.
- [10] Onses M S, Sutanto E, Ferreira P M, et al. Mechanisms, capabilities, and applications of high-resolution electrohydrodynamic jet printing [J]. Small, 2015, 11(34): 4237-4266.
- [11] Kwon H, Li X, Hong J, et al. Non-lithographic direct patterning of carbon nanomaterial electrodes via electrohydrodynamic-printed wettability patterns by polymer brush for fabrication of organic field-effect transistor[J]. Applied Surface Science, 2020, 515: 145989.
- [12] Jiang Z, Gan Y, Ju Y, et al. Experimental study on the electrospray and combustion characteristics of biodiesel-ethanol blends in a meso-scale combustor[J]. Energy (Oxford), 2019, 179: 843-849.
- [13] Jaworek A, Sobczyk A T, Krupa A. Electrospray application to powder production and surface coating[J]. Journal of Aerosol Science, 2018, 125: 57-92.
- [14] Jayaprakash P, Maudhuit A, Gaiani C, et al. Encapsulation of bioactive compounds using competitive emerging techniques: Electrospraying, nano spray drying, and electrostatic spray drying [J]. Journal of Food Engineering, 2023, 339: 111260.
- [15] Schmatz D A, Da Silveira Mastrantonio D J, Vieira Costa J A, et al. Encapsulation of phycocyanin by electrospraying: A promising approach for the protection of sensitive compounds[J]. Food and Bio-products Processing, 2020, 119: 206-215.
- [16] Vehapi M, Yilmaz A, Özçimen D. Fabrication of oregano-olive oil loaded PVA/chitosan nanoparticles via electrospraying method[J]. Journal of Natural Fibers, 2021, 18(9): 1359-1373.
- [17] Mutukuri T T, Maa Y F, Gikanga B, et al. Electrostatic spray drying for monoclonal antibody formulation[J]. Int J Pharm, 2021, 607: 120942.
- [18] Karimi M, Mirkazemi S M, Vahidshad Y, et al. Preparation and characterization of zinc sulfide thin film by electrostatic spray deposition of nano-colloid[J]. Thin Solid Films, 2021, 737: 138929.
- [19] Ri V, Kim H, Lee H, et al. Directly electrostatic-spray deposited cross-linked nanocomposites for the high performance lithium-ion battery anode[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 980: 173613.
- [20] Wang J, Zhang Y, Zhang W, et al. Research progress of electrostatic spray technology over the last two decades[J]. Journal of Energy Engineering, 2021, 147(4): 03121003. ■