

3 种脱硫喷嘴雾化特性对比试验

刘开新¹, 刘荣华^{1*}, 王鹏飞^{1,2}, 袁新虎¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 南方煤矿瓦斯与顶板灾害预防控制安全生产重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为了解不同类型脱硫喷嘴的雾化特性, 选取螺旋喷嘴、实心锥喷嘴和空心锥喷嘴作为研究对象, 用清水作为试验工质, 结合激光粒度分析仪研究这 3 种脱硫喷嘴在不同供水压力下的射程、流量、雾化角、雾滴粒径等性能参数的变化规律。试验结果表明: (1) 喷嘴的雾滴粒径与供水压力呈现负相关, 流量、射程、雾化角与供水压力均呈正相关。(2) 螺旋喷嘴的流量变化最大, 其流量系数为 0.495; 实心锥喷嘴在供水压力逐渐增加的情况下流量变化不明显。(3) 在 0.2 MPa 的初始供水压力下, 螺旋喷嘴的雾化角就远大于实心锥喷嘴和空心锥喷嘴的雾化角, 达到 148.6°; 在相同供水压力下, 螺旋喷嘴的射程较其他 2 种喷嘴的射程小。(4) 3 种喷嘴的雾滴粒径在 0.2 MPa 的初始供水压力下均较大, 雾化效果不佳; 随着供水压力的增加, 雾滴体积频率的最大值呈现往粒径减小的方向移动的规律。综合雾化特性的结果, 螺旋喷嘴的雾化性能较好, 比较适合用于实际生产过程中。

关键词: 脱硫喷嘴; 雾化特性; 雾化角; 雾滴粒径

中图分类号: X701.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2024)01-0066-07

Comparative Test of Atomization Characteristics of Three Desulfurization Nozzles

LIU Kaixin¹, LIU Ronghua¹, WANG Pengfei^{1,2}, YUAN Xinhui¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Work Safety Key Lab on Prevention and Control of Gas and Roof Disasters for Southern Coal Mines,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to understand the atomization characteristics of different types of desulfurization nozzles, spiral nozzles, solid cone nozzles and hollow cone nozzles are selected as the research objects, and clean water is used as the test working fluid, and the variation of performance parameters such as range, flow rate, atomization angle and droplet size of these three desulfurization nozzles under different water supply pressures is studied by combining laser particle size analyzer. The test results show that firstly the droplet size of the nozzle is negatively correlated with the water supply pressure, and the flow, range, atomization angle are positively correlated with the water supply pressure. Secondly, the flow rate of the spiral nozzle changes the most, and its flow coefficient is 0.495, and the flow rate of the solid cone nozzle does not change significantly when the water supply pressure gradually increases. Thirdly, with the initial water supply pressure of 0.2 MPa, the atomization angle of the spiral nozzle is much larger than that of the solid cone nozzle and the hollow cone nozzle, reaching 148.6°. At the same water supply pressure, the range of the spiral nozzle is smaller than that of the other two nozzles, and lastly, the droplet size of the three nozzles is large under the initial water supply pressure of 0.2 MPa, and the atomization effect is not good. With the increase of water supply pressure, the maximum value of droplet volume frequency

收稿日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574123); 湖南省教育厅科学研究重点资助项目(18A185)

* 通信作者, E-mail: rhliu2008@sina.com

shows a law of decreasing particle size. Based on the results of atomization characteristics, the atomization performance of the spiral nozzle is better, and it is more suitable for the actual production process.

Keywords: desulfurization nozzle; atomization characteristics; atomization angle; droplet particle size

空气中的SO₂主要来自燃煤电厂大量燃烧含硫燃料,给人们正常的生产生活带来严重的影响,是造成大气污染的主要气体之一^[1].根据《锅炉大气污染物排放标准》(DB 41/2089—2021)规定,企业在生产过程中允许排放大气污染物SO₂的最大质量浓度为35 mg/m³.虽然政府已经采取相关措施治理,但SO₂的整体排放量依然很大^[2].我国现阶段普遍应用于燃煤电厂的脱硫技术是湿法脱硫技术(WFGD),在该技术中,脱硫喷嘴是其关键设备,脱硫喷嘴的雾化性能对脱硫效率产生重要影响^[3-5].

目前国内学者对湿法脱硫技术和喷嘴的雾化性能进行了深入研究.田静^[6]、母章霞^[7]从发展现状、反应原理、工艺流程等方面对5种燃煤烟气湿法脱硫技术进行了对比分析;HOU等^[8]构建了SO₂脱除效率等技术性能指标模型和石灰石消耗、电耗以及工艺用水量等经济性能指标模型;苗懂艳等^[9]对螺旋喷嘴在不同喷嘴流量、喷雾射程和粒子速度下的雾化特性进行试验研究;李洪喜等^[10]基于计算流体动力学对超声雾化喷嘴进行数值模拟研究,揭示喷嘴管流型空化机理;张德俐等^[11]、李兆东等^[12]对螺旋喷嘴的雾化特性进行了研究,得出供水压力和喷孔直径对雾化性能有不同程度的影响.

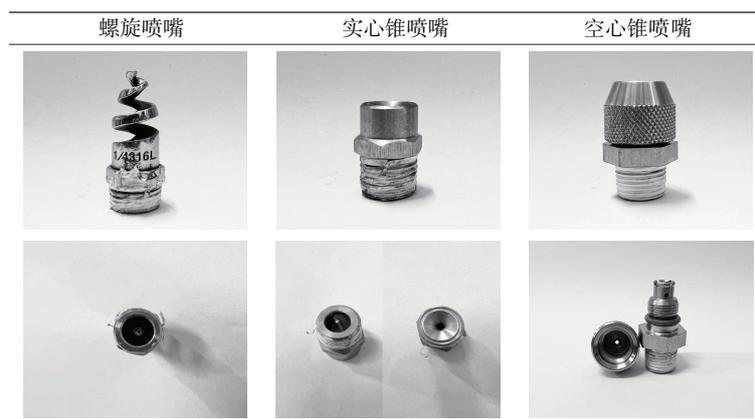
目前可供使用的脱硫喷嘴种类繁多,喷嘴的雾化效果受喷嘴内部结构、材质、精细度等多种因素影响,针对多种脱硫喷嘴的雾化特性的对比研究还较少.因此,基于前人对湿法脱硫技术及单一类型喷嘴雾化特性的研究,本文选取螺旋喷嘴、空心锥喷嘴和实心锥喷嘴这3种脱硫喷嘴,对其在不同供水压力下的流量、射程、雾化角、雾滴粒径等性能的变化进行对比,分析相关试验数据,优选出雾化性能较好的喷嘴,为实际生产中脱硫喷嘴的选择提供参考.

1 试验系统及方案

1.1 试验喷嘴

根据现场实际情况,本试验选用螺旋喷嘴、实心锥喷嘴和空心锥喷嘴,其外观结构如表1所示.

表1 3种脱硫喷嘴的外观



螺旋喷嘴的工作原理是指流经喷嘴内部的液体在供水压力的作用下,不断与螺旋内壁面相切碰撞,被分裂成大量的小液滴,通过螺旋断面间的空隙喷出而形成雾状,并产生分层喷淋的效果.螺旋喷嘴内部独特设计可减小摩擦阻力,使流量达到峰值,其喷射角度为60°~180°.

实心锥喷嘴的特点是液体从喷嘴前端流出时,会产生实心锥形状的喷雾,喷射角度为30°~120°,喷射区域接近圆形.该类型的喷嘴能够在较大的流量区间和供水压力下产生均匀分布的喷雾.

空心锥喷嘴的喷射泵中心与喷嘴后端的中心线不在同一水平线上,导致喷出的喷雾呈现锥形空心圆

环状,喷射角度为 $40^{\circ}\sim 90^{\circ}$,喷出的雾滴较其他喷嘴的雾滴粒径更小,不容易造成喷嘴堵塞的情况.

1.2 试验系统

采用自行设计的试验系统进行脱硫喷嘴雾化性能的试验,如图1所示.该试验系统主要由控制柜、高压水泵、水箱、管路、压力传感器、流量计、阀门、马尔文雾滴粒度分析仪、数码相机等设备组成.清水作为本次试验的工质,由高压水泵从水箱中抽取,通过管路流经流量计和压力传感器再到达喷嘴,经喷嘴雾化后滴落到实验平台,经下水管道及时排出.



图1 试验系统

1.3 试验方案

采用高压水泵(BPZ75/12型,供水压力 $P_L \leq 12$ MPa,额定流量为 4.5 m³/h)对水箱中的水进行加压处理,达到试验设置的额定压力后通过管路流至喷嘴.观察电磁流量计(YY-LED15K4C型,测量范围为 $0\sim 9.54$ m³/h)和数字式压力表(DX-801XB00150型,精度为 $\pm 1.0\%$),监测试验时水的压力和流量数据,根据实际需要调节控制柜以达到预期要求.

依据喷嘴类型的不同设置3组试验,每组均对喷嘴的流量、雾化角、射程、雾滴粒径等性能进行试验分析.3种喷嘴的孔径均为2 mm,每种类型的喷嘴均进行3次重复试验,取3次试验数据的平均值作为试验结果,以保证试验数据的准确性.试验时,通过操作控制柜调节水压和流量的大小,依据脱硫喷嘴的实际工况,本次试验设置的供水压力为 $0.2\sim 0.7$ MPa.待压力和流量的数据波动幅度在误差范围内,且形成稳定的喷雾场后,采用数码相机拍摄喷雾场并将图上传到电脑系统,经后处理软件Image-Pro Plus6.0处理得到喷嘴的雾化角和射程的大小.测量雾滴粒径时,需要先用马尔文雾滴粒径分析仪测量试验背景,待操作系统提示测试背景已结束,再进行相应工况下的试验,从而得到3种喷嘴的雾滴粒径.

2 试验结果及分析

2.1 喷嘴的流量

按照试验方案调节控制柜使供水压力达到设定的大小,待供水压力稳定后记录流量计上的读数.依据曹建明^[13]对喷雾学的研究,得到流量与供水压力之间的数学表达式:

$$Q = \frac{\pi}{4} C_q d^2 \sqrt{\frac{2P_L}{\rho}} \times 60. \quad (1)$$

式中: Q 为喷嘴流量,L/min; C_q 为流量系数; d 为喷嘴喷孔直径,mm; P_L 为供水压力,MPa; ρ 为液体密度,kg/m³,本文清水密度 $\rho = 1\ 000$ kg/m³.

流量系数是评价喷嘴性能的一个重要指标^[14],流量系数的大小受喷嘴内部结构、工质在喷嘴中的流

动状态及工质的物理性质等多个因素的影响^[15].依据式(1),利用 SPSS 软件对测得的 3 种喷嘴流量数据进行拟合分析,得到 3 种喷嘴的流量系数,如表 2 所示.

表 2 3 种喷嘴在不同供水压力下的流量及流量系数

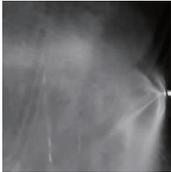
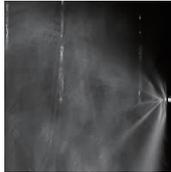
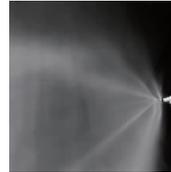
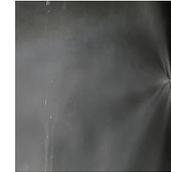
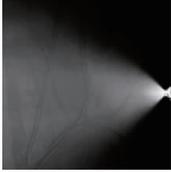
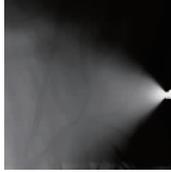
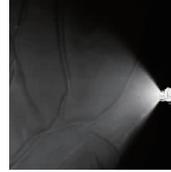
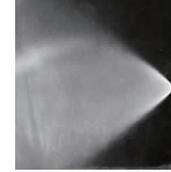
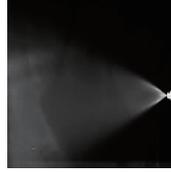
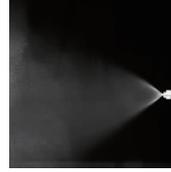
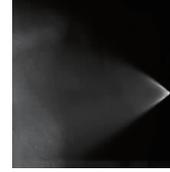
喷嘴类型	喷嘴流量(L/min)						C_q
	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa	0.6 MPa	0.7 MPa	
螺旋喷嘴	2.25	2.45	2.51	2.83	3.13	3.46	0.495
实心锥喷嘴	1.80	1.85	1.89	1.93	2.07	2.47	0.354
空心锥喷嘴	1.06	1.13	1.19	1.31	1.40	1.57	0.227

由表 2 可知,螺旋喷嘴的流量系数是这 3 种脱硫喷嘴中最大的,说明流体在流经螺旋喷嘴时压力损失最小.此外,3 种喷嘴的流量随着供水压力的增大而增大,且相同供水压力下螺旋喷嘴的流量高于其他 2 种喷嘴.在供水压力为 0.2~0.7 MPa 下,螺旋喷嘴流量从 2.25 L/min 增加到 3.46 L/min,变化幅度较大;实心锥喷嘴的流量变化较小,增长幅度不明显;在供水压力不低于 0.5 MPa 时,空心锥喷嘴的流量变化小于其他 2 种喷嘴的流量变化.

2.2 喷嘴的雾化角和射程

雾化角是指喷嘴喷出的水雾形成围绕喷嘴轴心线扩展的圆锥体,其锥顶角为喷嘴的雾化角.雾化角的大小与供水压力和喷嘴类型有着密切的关系^[16-17].表 3 为不同供水压力下 3 种喷嘴的喷雾场实图,由表 3 可以直观看到 3 种喷嘴的雾化角均随供水压力的增大而增大,但空心锥喷嘴的雾化角变化不大,较为稳定.

表 3 不同供水压力下 3 种喷嘴的喷雾场实图

喷嘴	供水压力/MPa					
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
螺旋喷嘴						
实心锥喷嘴						
空心锥喷嘴						

在不同供水压力下测得 3 种脱硫喷嘴的雾化角和射程,其变化趋势如图 2 所示.由图 2a 可知,脱硫喷嘴的雾化角与供水压力呈现出正相关的变化规律,且该规律与喷嘴额定的雾化角大小范围相匹配.其中螺旋喷嘴在初始工况(0.2 MPa)下雾化角就已达 148.6°,远大于其他 2 种喷嘴初始条件下的雾化角;实心锥喷嘴的雾化角的变化幅度不及螺旋喷嘴的变化显著;而空心锥喷嘴的雾化角变化相较于前 2 种喷嘴不是很明显,并且实心锥和空心锥喷嘴在供水压力不低于 0.5 MPa 时,雾化角的增长幅度减小.

从图 2b 可知,射程与供水压力呈正相关.在相同供水压力下,实心锥喷嘴的射程始终大于其他 2 种类

型的喷嘴.这是因为实心锥喷嘴内腔与螺旋状喷口的起始点相切,使其雾化角较大;喷嘴腔体从入口至出口呈流线型,能极大地减少流体的阻力,以致在相同工况下其射程最大.

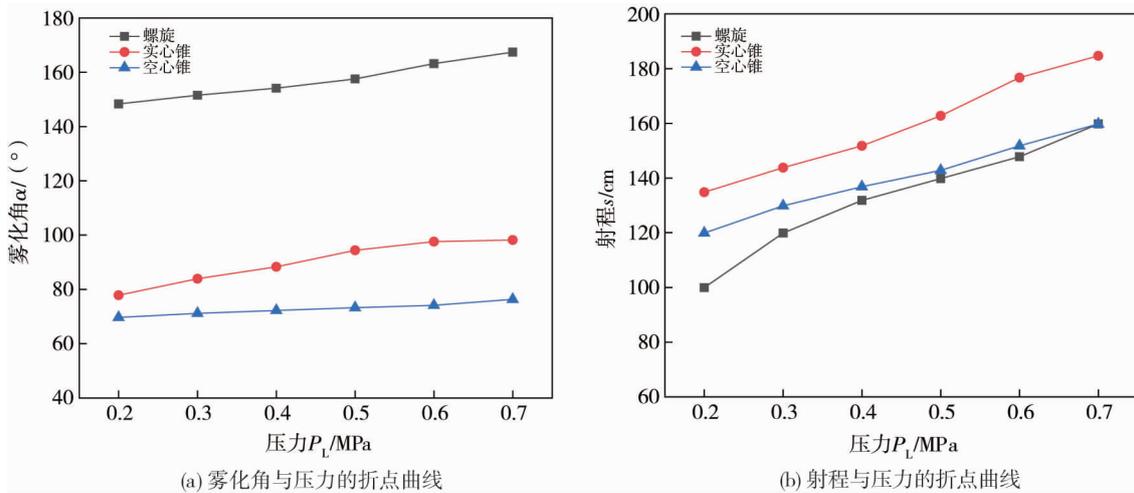


图2 供水压力对喷嘴雾化角和射程的影响

2.3 喷嘴的雾滴粒径

雾滴粒径是衡量喷嘴雾化性能的重要指标^[18-19],通常用 D_{10} , D_{50} , D_{90} , $D_{[3,2]}$ 等来表示雾滴粒径的大小,其中 D_{10} , D_{50} , D_{90} 表示雾滴特征直径; $D_{[3,2]}$ 表示雾滴 Sauter 平均直径^[20].图3为3种喷嘴雾滴粒径的特征直径对比.由图3可知,当供水压力在 0.2~0.6 MPa 时,雾滴的特征直径曲线总体呈现下降的趋势,但当供水压力大于 0.6 MPa 时,有的雾滴粒径曲线反而呈现上升的趋势,这是由于喷嘴孔径及供水压力的变化导致特征直径呈现上下波动^[21].

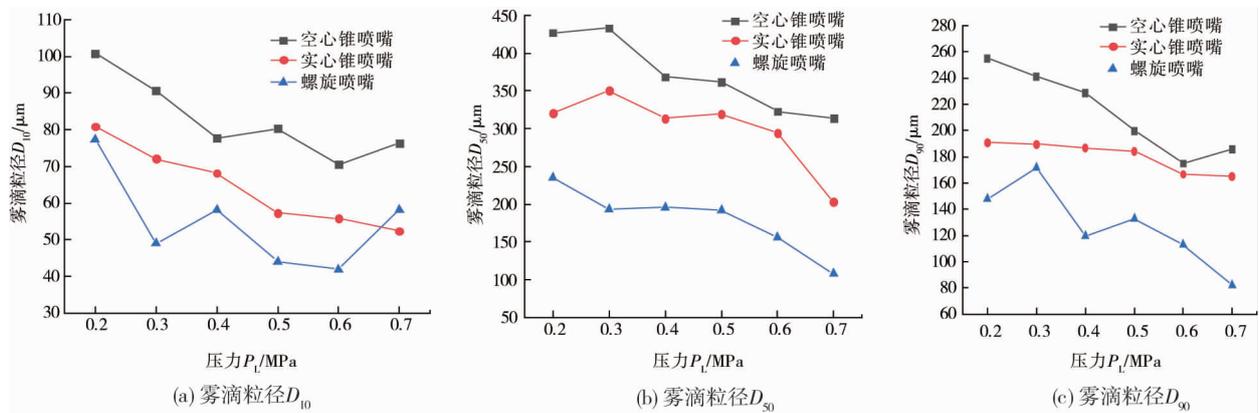


图3 3种喷嘴的雾滴特征直径对比

图4是3种喷嘴雾滴的 Sauter 平均直径对比.在初始供水压力下,3种喷嘴雾滴粒径的平均直径均较大,雾化效果较差,随着供水压力的增加,雾滴平均直径逐渐减小.当供水压力大于 0.3 MPa 时,空心锥喷嘴雾滴的平均直径曲线逐渐趋于平缓,这是由于其雾化场为空心锥状,依靠空气切割单层液膜实现雾化,因此粒径分布均匀;螺旋喷嘴在供水压力为 0.2~0.7 MPa 时,雾滴平均直径的变化幅度相比其他2种喷嘴的平均直径变化幅度更明显,这是由于供水压力增加使液滴与螺旋面相切碰撞增加,进而液膜破碎程度加剧导致.

笔者针对螺旋喷嘴在 0.2~0.7 MPa 的供水压力下的雾滴粒径分布进行研究(如图5所示),从体积频率的条形图中可以发现,随着供水压力的增加,体积频率的最大值呈现出往粒径减小方向移动的规律.

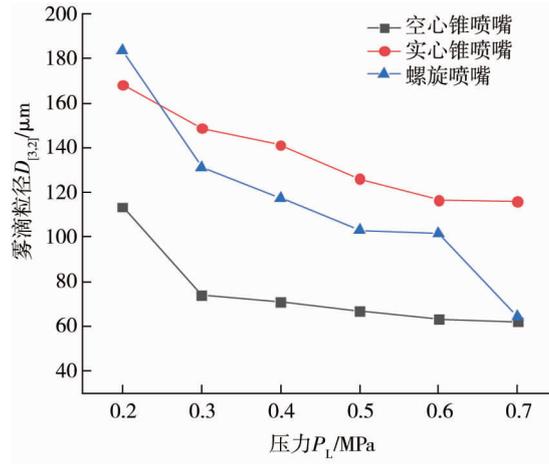


图 4 3种喷嘴的雾滴粒径平均直径对比

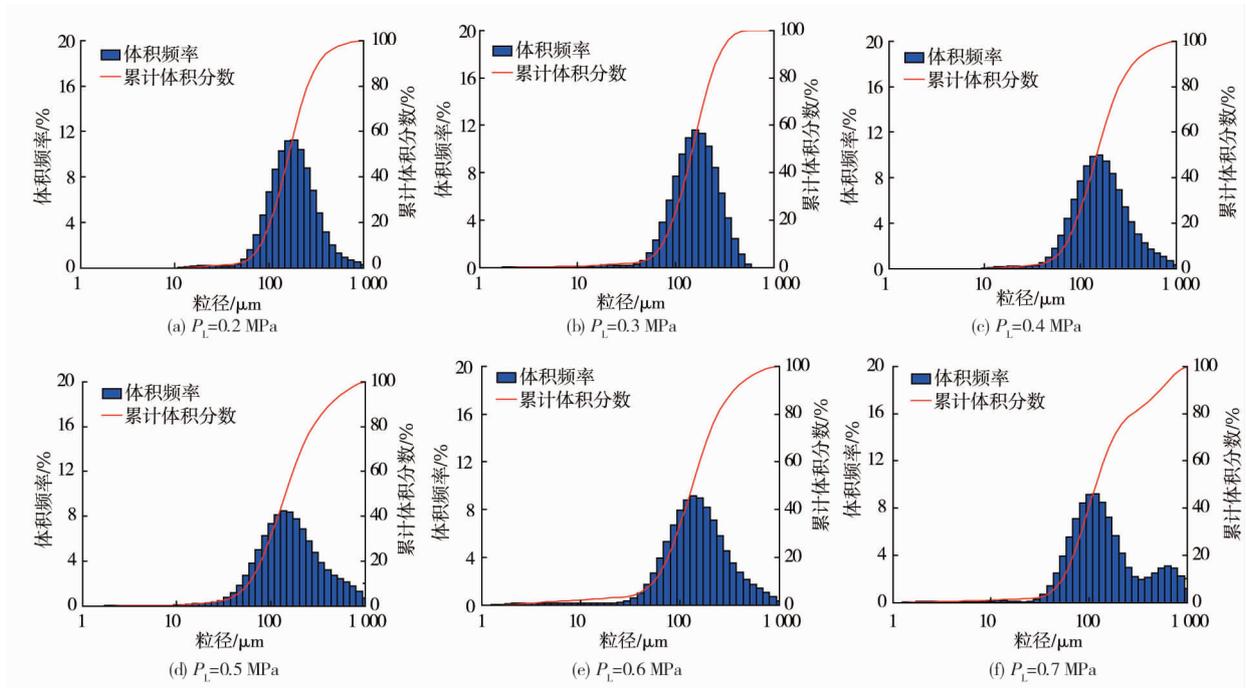


图 5 不同供水压力下螺旋喷嘴的雾滴粒径分布

3 结论

- 1) 3种脱硫喷嘴的流量、雾化角和射程与供水压力均呈现正相关的规律.
- 2) 3种喷嘴的雾滴粒径随着供水压力的增加总体呈现逐渐减小的趋势.
- 3) 螺旋喷嘴的雾化特性优于实心锥喷嘴和空心锥喷嘴的雾化特性,推荐优先使用于实际生产中.

参考文献:

[1] 杨家俊,张冰洁,刘定平.螺旋喷嘴雾化特性试验研究[J].环境工程,2013,31(5):71-74.
 [2] 李昀龙.城市大气污染的现状及其防治措施[J].农村经济与科技,2018,29(14):7.
 [3] 王春燕,王廷杰,王海玉.烟气脱硫技术的进展、现状、展望[J].科技视界,2021(14):144-145.
 [4] 王韶晖,石振晶,白少林,等.空气助力式脱硫喷嘴雾化特性试验[J].热力发电,2020,49(9):169-174.
 [5] 况延良,臧艳.燃煤电厂常见湿法脱硫装置运行特点分析[J].华东电力,2013,41(5):1132-1138.

- [6] 田静.燃煤烟气湿法脱硫技术研究[J].煤炭与化工,2021,44(12):115-118.
- [7] 母章霞.大型燃煤发电厂锅炉烟气脱硫技术分析[J].科学技术创新,2020(17):171-172.
- [8] HOU P F, BAI J Y, YIN J. On-line monitoring and optimization of performance indexes for limestone wet desulfurization technology[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013,295/296/297/298: 1020-1028.
- [9] 苗懂艳,高贵军.喷嘴螺旋倾角对雾化性能影响的试验研究[J].煤矿安全,2020,51(4):14-17.
- [10] 李洪喜,张建林,刘燕萍,等.矿井降尘超声雾化喷嘴空化流动特性仿真研究[J].煤矿安全,2018,49(1):40-43.
- [11] 张德俐,李志合,易维明,等.喷淋塔内螺旋喷嘴雾化特性的试验研究[J].太阳能学报,2013,34(11):1969-1972.
- [12] 李兆东,王世和,王小明,等.湿法烟气脱硫旋流喷嘴雾化粒径试验研究[J].热力发电,2006,35(1):28-30.
- [13] 曹建明.喷雾学[M].北京:机械工业出版社,2005:116-156.
- [14] JINESCU C V. Experimental determination of the flow rate coefficient required to calculate the flow rate in the feeding zone of a single screw extruder[J]. Materiale Plastice, 2009, 46(3): 279-283.
- [15] 周新建,陈听宽.引射喷嘴流量系数的计算方法[J].化工学报,2002,53(10):1092-1094.
- [16] 雒晨辉,黄靖龙,孙世彪,等.司马煤业有限公司掘进机外喷雾喷嘴雾化特性及降尘性能研究[J].采矿技术,2022,22(1):166-170.
- [17] 王鹏飞,刘荣华,汤梦,等.煤矿井下喷雾降尘影响因素的试验研究[J].安全与环境学报,2015,15(6):62-67.
- [18] 李兆东,王世和,王小明.湿法脱硫螺旋喷嘴雾化性能[J].东南大学学报(自然科学版),2008,38(3):493-495.
- [19] 王鹏飞,李泳俊,刘荣华,等.内混式空气雾化喷嘴雾化特性及降尘效率研究[J].煤炭学报,2019,44(5):1570-1579.
- [20] 袁新虎,王鹏飞,刘黎明,等.风送式抑尘喷雾机喷嘴的优化选型[J].环境工程,2022,40(5):171-177.
- [21] JIANG L, WU R L, ZHAO H, et al. Middle or low water pressure direct spiral double helix converging nozzle structure optimization and flow field analysis[J].High Technology Letters, 2015,21(3):261-268.