DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202502018

柴油机双喷系统前级 SCR 的光学诊断

魏　锋，王井山，杨海龙，苏菲菲，孙彦斌，贾德民
（潍柴动力股份有限公司内燃机与动力系统全国重点实验室，潍坊 261061）

摘要：为了满足柴油机未来排放法规，双喷选择性催化还原（SCR）系统成为一种重要手段，其前级 SCR（cc-SCR）截面尿素液滴分布均匀性对 NO_x 的转化至关重要. 提出了一种基于粒子图像测速（PIV）光学测试系统和可视化后处理装置的前级 SCR 截面尿素液滴速度场和液滴浓度分布的快速测试方法，用来评价前级 SCR 不同配置下的截面液滴分布情况，并进行了验证. 结果表明：在 1.00 s 内，喷射脉宽不足 1.00 s 时，排气管截面在剩余时间内无液滴，可能会导致低氨储工况下 NO_x 转化效率降低；不同截面位置，二维速度场均呈双旋涡的情况，且仿真与试验结果吻合；在温度为 215 ℃、排气流量为 1250 kg/h 和 360 kg/h 条件下，对于不同粒径的喷嘴，其截面尿素液滴分布均匀性取决于排气流量，仿真结果很好解释了这一现象.

关键词：柴油机；后处理；速度场；粒子图像测速
中图分类号：TK429　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）02-0153-05

Optical diagnostic on close-coupled SCR of diesel engine dual-injection system

Wei Feng，Wang Jingshan，Yang Hailong，Su Feifei，Sun Yanbin，Jia Demin
（State Key Laboratory of Engine and Powertrain System，Weichai Power Company Limited，Weifang 261061，China）

Abstract：In order to meet the future emission regulations for diesel engines，dual-injection selective catalytic reduction（SCR）system has become an important means，in which the urea uniformity on the cross section of the close-coupled SCR（cc-SCR） is crucial for NO_x conversion. A transparent after-treatment test bench was established and a particle image velocity（PIV） optical method was used to measure the urea droplet velocity field and droplet concentration distribution of the cc-SCR. A computing simulation of the urea distribution was also conducted and validated by the measurement. Results showed that，when the injection pulse width is less than 1.00 s，there has no urea droplets on the cross section of the cc-SCR within 1.00 s，which leads to a decrease of NO_x conversion efficiency under the condition of low ammonia storage. The velocity field at different cross-sections presents double vortices. The simulation results are found to be consistent with the experimental results. In addition，different nozzles with different particle sizes were tested on the bench under the temperature of 215 ℃ and the air flow rate of 1 250 kg/h and 360 kg/h，respectively. It is found that the distribution uniformity of urea droplet depends on the exhaust air flow rate. This phenomenon is also well explained through simulation results.

Keywords：diesel engine；after-treatment；velocity filed；particle image velocity

柴油机由于具备功率输出范围广、可靠性高且使用寿命长等特点，目前被广泛应用在交通运输行业、工程机械行业、农业机械行业及电力行业等. 柴油燃烧过程中会产生降低空气质量的气体，如 CO、SO_2 和氮氧合物（NO_x）等[1-2]. 其中，NO_x 具有不同程度的毒性，对自然界和人体产生严重危害，是柴油机尾气处理的主要目标[3-4].

在众多尾气处理技术中，选择性催化还原（SCR）因其技术可靠、运行中可保持高转换效率而迅速发展. SCR 技术的工作原理以 32.5%（质量分数）的尿

收稿日期：2024-05-11；**修回日期**：2024-09-02.
基金项目：泰山产业领军人才工程资助项目.
作者简介：魏　锋，硕士，助理工程师，weifeng@weichai.com.
通信作者：贾德民，硕士，高级工程师，jiadm@weichai.com.

素水溶液为还原剂，根据实际发动机工况定量向 SCR 前端喷射尿素水溶液液滴[5]. 尿素水溶液液滴经过高温雾化、蒸发、热解及水解后，生成用于将尾气中 NO_x 污染物还原成无害 N_2 和 H_2O 的还原剂. 为了应对日益严苛的排放限值，行业内提出了前级 SCR（cc-SCR）系统. 通过预先将少量尿素溶液与尾气在前级混合器进行预混合，实现 NO_x 的进一步降低[6-7]. 尾气管中尿素液滴的空间分布情况显著影响 NO_x 转换效率. 实时表征前级 SCR 中尿素液滴的空间分布可为后处理系统设计提供指导方向. 目前，行业内关于柴油机实际 SCR 后处理系统中尿素液滴空间分布的检测鲜见报道，需开展相关工作.

粒子图像测速（PIV）技术作为一种光学检测技术，具备无接触、实时及全流场测量等特点. PIV 技术相比于以往的测速技术，如激光多普勒测速（LDV）、热线（热膜）测速等的传统单点测量技术，实现了对空间瞬态流场的实时测量，具有极高的空间分辨率和精度，且不干扰被测流场，已被广泛应用于不同场景流场的表征.

笔者采用 PIV 测速技术测量后处理系统中尾气管尿素液滴截面流场情况，探究不同工况下尿素液滴在排气管中的分布，分析在相同工况下不同喷嘴类型对尿素液滴速度场的影响，以期为后处理系统仿真提供一定的参考，同时也为喷嘴和混合器的匹配选型提供快速测试和评价手段.

1 装置及仿真工具

图 1 为测试系统，主要包括加热器、风机、可视化光学管道、尿素喷嘴、尿素喷射系统、CCD 相机、双脉冲激光器、同步控制器、计算机及商用图像处理软件 Davis.

试验中采用的激光器单脉冲能量为 200 mJ、频率为 10 Hz 且波长为 532 nm. 激光通过片光生成器转化为张角为 20°、厚度小于 1 mm 的扇形片光. 采用 CCD 相机，其像素为 5 M、采样频率为 10 Hz；CCD 相机最小粒径测量范围为 5 μm. 利用双脉冲激光器照亮可视化排气管，排气管中尿素液滴散射激光光强，使得 CCD 相机能够捕捉到尿素液滴对应的内部流场. CCD 相机采集的图片分辨率为 2 456 × 2 456. 首先打开风机、加热器后，待可视化光学管道内部温度达到目标温度后，开始喷射尿素溶液. 此时，在激光器照射下，CCD 相机同步采集可视化光学管道内部尿素液滴流场. 将采集的 CCD 相片导入软件 Davis 进行处理，得到不同工况下排气管中尿素液滴的流场.

笔者采用 4 种尿素喷嘴，表 1 为尿素喷嘴技术参数，其中喷嘴 4 为气助式喷嘴，索特平均直径（SMD）为 15 μm，喷雾锥角为 15°；其他尿素喷嘴为压力雾化喷嘴，SMD 均大于 50 μm，喷雾锥角为 25° ~ 67°. 用 Bettersize2000S 喷雾激光粒度仪测算 SMD，用图像处理技术测量喷雾锥角. 仿真工具为商用 Fluent，仿真过程中，湍流模型选择 SST κ-ω；开启组分运输模型和离散相模型；离散相模型中，连续相和离散相双向耦合，尿素喷射选取锥形喷射器.

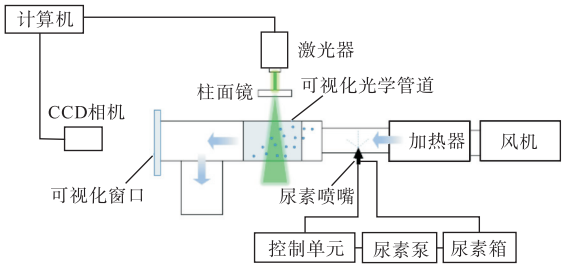


图 1 离线前级 SCR 光学测试系统示意

Fig.1 Schematic of off-line cc-SCR optical test system

表 1 尿素喷嘴的技术参数

Tab.1 Specifications of urea nozzle

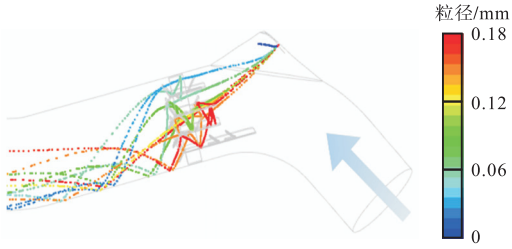
喷嘴	SMD/μm	喷雾锥角/(°)
1	68	25
2	50	67
3	52	64
4	15	15

2 结果分析

图 2 为前级 SCR 混合器示意. 为分析前级 SCR 截面均匀性的影响因素，笔者在混合器结构确定的条件下进行了不同喷嘴、排气流量及尿素喷射量对前级



（a）前级混合器



（b）前级混合器内部粒子轨迹仿真

图 2 前级 SCR 混合器示意

Fig.2 Schematic of the cc-SCR

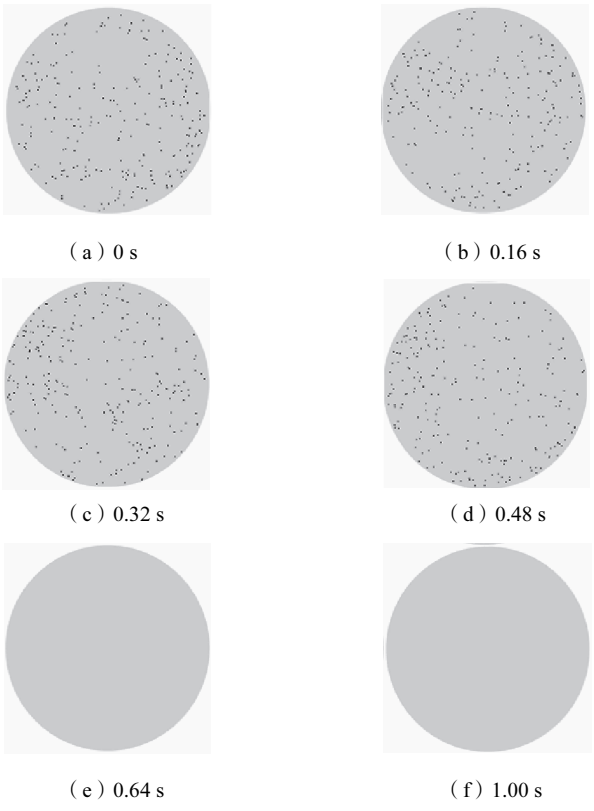
SCR 尿素水溶液液滴截面均匀性的影响研究.

图 2(a)中，气体流向如红色箭头所示，由右侧接口流向左侧接口后进入前级 SCR 载体. 图 2(b)为前级混合器排气流量为 1 000 kg/h 条件下，仿真计算的尿素水溶液液滴运动轨迹. 可知，气流(蓝色箭头)以一定夹角进入到前级混合器后与尿素水溶液液滴混合，粒径较大的液滴受气流影响较小，与混合器下方扇片碰撞；粒径较小的液滴受到气流的夹带作用，碰撞到排气管的上方. 气流对液滴的夹带作用会影响到前级 SCR 截面中尿素液滴的运动轨迹[8-9].

图 3 为 CCD 相机 1.00 s 内(单周期)拍摄的前级 SCR 截面. 在温度为 220 ℃、排气流量为 500 kg/h 和尿素喷射量为 1 200 mg/s 下进行. 在尿素喷嘴喷射后，截面存在了大量的液滴. 对液滴进行数目统计，尿素液滴主要集中在截面的中部以及左侧和右侧，1.00 s 内距离喷嘴 540 mm 位置处的管道圆截面尿素液滴数分布见图 4. 由于气体流动方向与排气管存在夹角，当气体在排气管中运动时，气体夹带着液滴碰撞到排气管壁面，造成了液滴管道圆截面分布主要集中在以上空间.

图 5 示出距离喷嘴 540 mm 位置处 SCR 截面速度分布. 由于最大尿素喷射量为 1 980 mg/s，尿素喷射量为 1 200 mg/s 对应 60.6% 的占空比，喷射频率为 1 Hz 时则会导致在 1 个周期(0.64 s ~ 1.00 s)内的排气管中无尿素液滴存在，当 SCR 载体中氨存储较少且喷射占空比不足 100.0% 时，尾气排放中 NO_x 质量分数可能会因排气管中一段时间内无尿素液滴而偏高. 该发现为低氨储工况下的 SCR 尿素喷射策略优化提供了方向.

图 5(a)为试验测量的前级 SCR 截面速度场. 在排气流量为 360 kg/h、排气温度为 215 ℃且尿素喷射量为 1 000 mg/s 的工况下进行. 可知，排气管截面上尿素水溶液液滴对应的运动方向呈两个涡旋，分别位于排气管截面的上部和排气管截面的下部. 造成尿素水溶液液滴涡旋运动的原因是气体运动的方向、排气管几何方向及尿素水溶液液滴喷射方向存在夹角，



(a) 0 s　(b) 0.16 s　(c) 0.32 s　(d) 0.48 s　(e) 0.64 s　(f) 1.00 s

图 3　单周期内距喷嘴 540 mm 位置处管道内部液滴分布

Fig.3　Droplet distribution in the pipeline with 540 mm from the nozzle in a single cycle

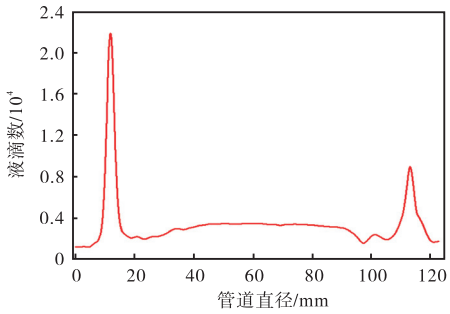
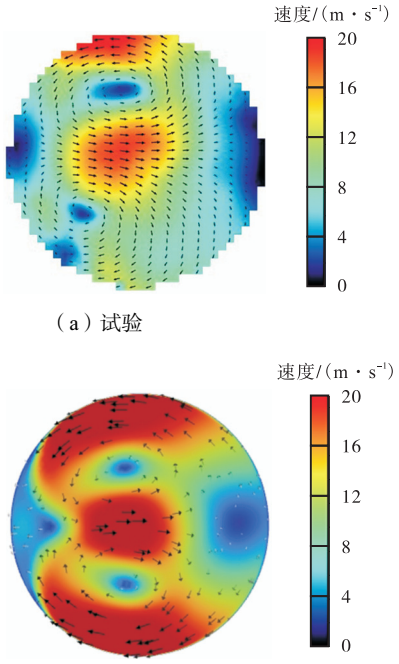


图 4　单周期内水平方向管道圆截面液滴数分布

Fig.4　Droplets distribution in horizontal direction of pipe section in a single cycle



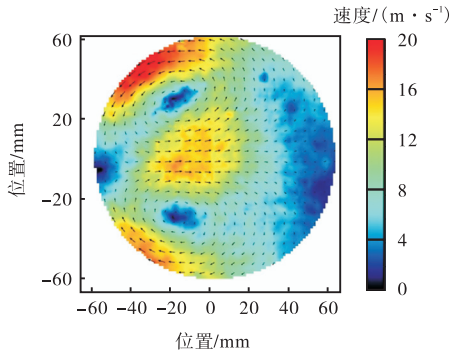
(a) 试验　(b) 仿真

图 5　距离喷嘴 540 mm 位置处 SCR 截面速度分布

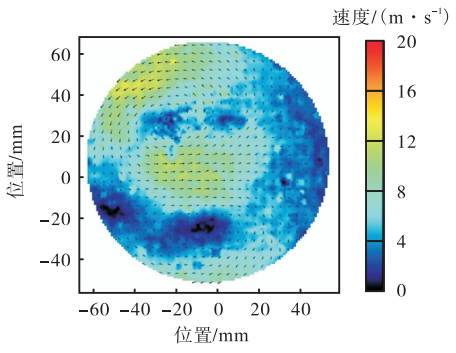
Fig.5　Speed distribution of SCR section with 540 mm from the nozzle

导致了尿素水溶液液滴碰撞排气管壁面. 碰壁后的液滴群分散成两个部分，一部分向排气管截面上半部运动，一部分向排气管截面下半部运动. 图 5(a)中，在排气管截面中，液滴中心位置具有较高的速度，原因是混合器叶片结构引导排气向中心区域流动，同时与尿素喷雾液束喷射方向一致，因而中心区域的液滴速度较快，而壁面附近液滴因气流方向和碰壁等因素速度有所减小；而两个旋涡中心和排气管截面左、右两侧具备较小速度，是因为此处的压力相对较大，造成了液滴运动缓慢. 图 5(b)为相同工况下仿真软件计算出的截面速度场分布. 可知，仿真得出的速度分布与试验结果具有相似的空间分布，可靠性较高.

图 6 示出温度为 210 ℃、排气流量为 1 250 kg/h 且尿素喷射量为 1 000 mg/s 条件下，CCD 相机焦平面距离尿素喷嘴安装位置不同位置对应的速度场分布. 可知，在距离喷嘴 540 mm 位置处，整个场内液滴速度较高，对应的平均速度为 9.387 m/s；距离喷嘴 740 mm 位置处，对应的平均速度为 6.145 m/s. 两个速度场映射图表明距离喷嘴的位置会影响截面速度场分布. 当距离喷嘴越远时，截面速度场的旋转程度会发生很大的变化. 在距离喷嘴较近时，由于上游气体的来流方向与尾气管存在夹角，会使靠近喷嘴的



（a）距离喷嘴 540 mm 位置处



（b）距离喷嘴 740 mm 位置处

图 6　喷嘴 1 不同位置对应的速度场分布

Fig. 6　Velocity field distribution corresponding to different positions of nozzle 1

截面速度场产生较大的旋转，导致管道内部的尿素液滴具有较大的速度[10]. 当距离尿素喷嘴较远距离时，由于来流气体在排气管中运动时间增强，造成了沿排气管径向速度减小. 虽然距离喷嘴位置会影响尿素液滴在截面中的速度分布，但距离喷嘴 540 mm 位置处速度场在左上角和左下角各有一个涡旋；距离喷嘴 740 mm 位置处速度场在左上角和正下方各有一个涡旋[11]. 两个截面旋涡位置出现不同是因为当前方气流来流时与排气管径向存在一定的夹角，气体在传输过程中会碰撞排气管左侧或右侧壁面，因而截面速度场存在旋涡结构. 在距离喷嘴 740 mm 位置处气流在管道中运动时间较长，沿截面径向的速度大大减小，因而该位置尿素液滴的速度及旋转程度较小.

图 7 为前级 SCR 管道截面尿素液滴分布情况. 可知，在截面的上部和下部各有一个较少尿素液滴的分布区域. 这是因为大量的尿素液滴被尾气夹带，转移至排气管的上半部位，因而造成了大量的尿素液滴转移至排气管上部.

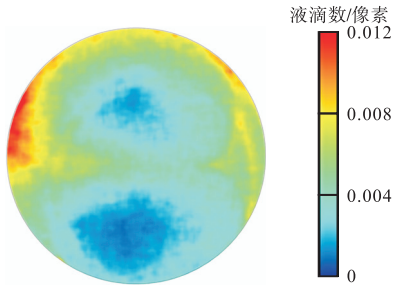


图 7　前级 SCR 尿素液滴分布

Fig.7　Distribution of urea droplets in the cc-SCR

尿素截面液滴分布均匀性 C 是影响 SCR 催化剂载体的重要因素，通过可视化可以获得尿素液滴在截面上的分布，通过统计不同位置对应的液滴数即可得到 C[12]，有

$$C=1-\frac{1}{2n}\cdot\frac{\sum_{1}^{n}(x_i-\bar{x})}{\bar{x}} \tag{1}$$

式中：n 为截面分割份数，n 由前期图像处理所确定；$\bar{x}$ 为分割后尿素水溶液液滴平均数；x_i 为第 i 份的尿素水溶液液滴个数. C 最大为 1，数值越大表明均匀性越好.

小排气流量下，气助喷嘴 4 对应的截面液滴分布均匀性约为 0.87；在大排气流量条件下，喷嘴 4 对应的截面液滴分布均匀性为 0.71，如图 8 所示. 仿真验证了在 1 250 kg/h 的较大排气流量条件下，较大尿素液滴粒径和较小尿素液滴粒径在排气管中的轨迹是不同的，较小尿素液滴粒径更易受到气流的影响.

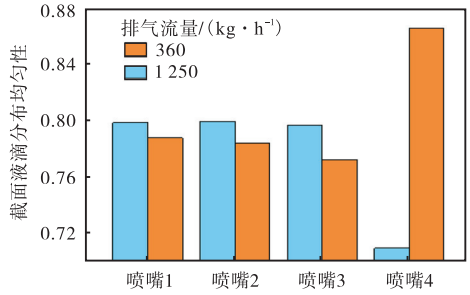
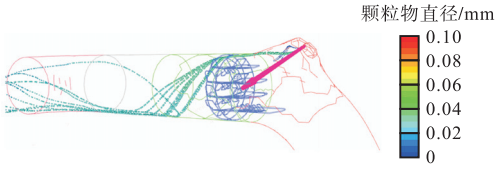


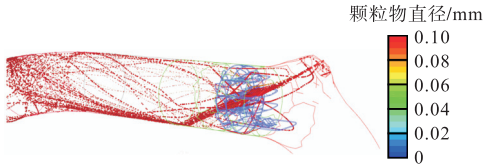
图 8　不同排气流量下距离喷嘴 740 mm 位置处的尿素截面液滴分布均匀性

Fig.8　Cross section uniformity of urea droplets at 740 mm from the nozzle under different air flow rate

图 9 示出排气流量为 1 250 kg/h 条件下不同粒径的运动轨迹. 可知，大粒径液滴具有较大雷诺数，动量较高[13-15]，受气流夹带影响较小，大量液滴经过前级 SCR 混合器与气流进行混合；对于粒径较小的尿素液滴，其雷诺数小，动量低，易受到大排气流量气流夹带至排气管壁面，在运动过程中，大量小粒径液滴不经过前级 SCR 混合器与气流进行混合，导致了较低的均匀性.



（a）液滴粒径为 15 μm



（b）液滴粒径为 68 μm

图 9　排气流量为 1 250 kg/h 条件下不同粒径的运动轨迹

Fig.9　Movement paths of different particle sizes under 1 250 kg/h of air flow rate

3　结　论

（1）单次喷射周期内，排气管中并不是所有时刻都有尿素液滴；前级 SCR 管路不同截面的速度场均呈双旋涡现象，但随着与喷嘴距离的增大，旋涡大小变小，液滴速度减小；仿真计算也很好地反映该混合器双旋涡的特点.

（2）在较小排气流量（360 kg/h）条件下，小粒径的气助式喷嘴液滴分布均匀性优于大粒径的非气助式喷嘴，而较大排气流量（1 250 kg/h）下的结果相反，气助式喷嘴的液滴分布均匀性最差，并未发挥小粒径的优势，这主要是因为排气流量大的时候小粒径液滴更易受侧风的影响，更易被吹到喷嘴一侧管路上.

（3）基于激光测试设备和可视化后处理装置的光学测试系统可有效应用于前级 SCR 截面速度场和液滴分布情况的测试，为前级 SCR 喷嘴、混合器的选型匹配提供快速评价手段.

参考文献：

[1] 吕立群，李钊，孙文强，等. 柴油机 SCR 系统快速老化方法研究[J]. 内燃机学报，2023，41(6)：532-538.

[2] 宋军太，王明明，张勇，等. 国六轻型柴油机 PN 排放研究[J]. 内燃机与配件，2023(20)：1-4.

[3] 刘圣华，周龙保，韩永强，等. 内燃机学(第 4 版)[M]. 北京：机械工业出版社，2017：108-138.

[4] Serinyel Z，Herbinet O，Frottier O，et al. An experimental and modeling study of the low- and high-temperature oxidation of cyclohexane[J]. Combustion and Flame，2013，160(11)：2319-2332.

[5] 何学良，李疏松. 内燃机燃烧学[M]. 北京：机械工业出版社，1990：10-29.

[6] 王昆，刘屹，韦伟. 重型柴油机双 SCR 系统转化效率影响因素研究[J]. 合肥工业大学学报，2021，44(6)：734-747.

[7] 唐成章，毕玉华，徐松，等. DPF 对柴油机性能影响的仿真研究[J]. 车用发动机，2018(1)：50-54，61.

[8] 李拓，张清福，陈爽，等. 基于粒子图像分割的混合 PIV-PTV 算法[J]. 空气动力学学报，2023，35(5)：68-75.

[9] 尉星航，马宏伟，廖鑫. LDV 和 PIV 测试技术测量离心压气机内部流动的应用进展[J]. 实验流体力学，2023，35(5)：1-18.

[10] 刘瑞林，董素荣，孟军，等. 二级可调增压控制系统的控制方法：中国，201310117646. 3[P]. 2013-10-11.

[11] 张兆合，王建旭，马太民，等. 涡流水平对柴油机微粒排放的影响[J]. 农业机械学报，2001，32(2)：5-7，14.

[12] 沈正昊，丁国清，陈欣. 扇形喷嘴参数与雾场均匀度影响研究[J]. 重庆理工大学学报：自然科学版，2023，37(8)：138-147.

[13] 李洪涛，张彦辉，宋庆松，等. 硅氧烷油气旋流分离器流场特性及性能优化[J]. 化工设备与管道，2022，59(4)：64-69.

[14] 周宁，戴瑶瑶，陈兵，等. 变截面管道中气云的燃爆传播研究[J]. 安全与环境学报，2021，21(2)：599-606.

[15] 王璞，张海滨，白博峰. 横向气流对空心锥形喷雾液滴群的夹带特性[J]. 推进技术，2019，40(8)：1792-1798.