

# 超音速动力喷雾装置结构优化及尘噪协同控制效果研究

张 天<sup>1,2</sup>, 陶 爽<sup>1,2</sup>, 葛少成<sup>3</sup>, 李 胜<sup>4,5</sup>, 王长友<sup>6</sup>, 穆新升<sup>1,2</sup>, 郭雨浩<sup>1,2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 阜新 123000; 3. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 4. 辽宁地质工程职业学院, 辽宁 丹东 118302; 5. 辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000; 6. 中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**超音速同轴气动喷雾降尘技术在呼吸性粉尘方面治理良好, 其具有喷雾浓度高、雾滴粒径小、运动速度快等优势, 但会带来严重的噪声污染, 尤其是高频噪声。为解决该问题, 对超音速同轴气动雾化降尘装置进行了结构优化, 通过 COMSOL Multiphysics 软件研究了该装置优化前后拉瓦尔喷管内流场速度分布及声场分布, 验证了其可行性, 并结合试验, 利用 YSD130 噪声分析仪、激光粒度分析仪、粉尘采样器开展测量, 研究了不同气动压力、水流量下的喷雾噪声特性和变化规律及两喷嘴的雾滴粒径、降尘效率。结果表明: 在拉瓦尔喷管内, 两喷嘴声压级沿中心轴向向外皆逐渐降低。优化后喷管内超音速层的厚度减小, 使其所对应的声压级降低。当水流量为 10 L/h 时, 随气动压力增大, 两喷嘴声源处高频段声压级均呈增长趋势, 传播方向处优化前呈先增大后减小趋势转变为上升趋势。优化后声源处声压级降低了约 16.7%, 峰值声压级降低了 8.5%~9.3%, 传播方向处声压级降低了约 18%。气动压力为 0.4 MPa 时, 随水流量增大, 声源处优化前声压级由一直增大转变为低频段声压级呈先上升后下降趋势, 中高频段呈上升趋势, 传播方向处优化前呈先增大后减小趋势转变为下降趋势。优化后喷嘴声源处声压级降低了约 9.8%, 峰值声压级降低了 19.2%~20.9%, 传播方向处声压级降低了约 12.7%。压力为 0.4 MPa, 水流量为 12 L/h 时, 两喷嘴雾滴数量在 50% 的雾滴粒径皆在 11  $\mu\text{m}$  左右, 空间分布均匀。降尘效果随着测试时间的增加呈线性增长, 降尘效率皆达到 84% 以上。研究在保证喷雾降尘效果的同时, 通过结构优化降低了雾化过程的致噪声压级, 为超音速动力降尘喷雾的安全应用及粉尘、噪声的协同控制提供了理论与技术支持。

**关键词:**超音速同轴雾化; 结构优化; 噪声测量; 降尘效率; 喷雾效果

中图分类号: TD714.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)05-2540-10

## Study on structure optimization of supersonic aerodynamic spray device and synergistic control effect of dust and noise

ZHANG Tian<sup>1,2</sup>, TAO Shuang<sup>1,2</sup>, GE Shaocheng<sup>3</sup>, LI Sheng<sup>4,5</sup>, WANG Changyou<sup>6</sup>, MU Xinsheng<sup>1,2</sup>, GUO Yuhao<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety Science and Technology, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Fuxin 123000, China; 3. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 4. Liaoning Geology Engineering Vocational College, Dandong 118302, China; 5. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 6. China Coal Xi'an Design Engineering Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

收稿日期: 2024-05-29 策划编辑: 王晓珍 责任编辑: 陈思成 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.0600

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52204216); 辽宁省自然科学基金资助项目 (2022-BS-331); 中国博士后启动基金资助项目 (2022M711456)

作者简介: 张 天 (1992—), 男, 辽宁阜新人, 讲师, 博士。E-mail: zhangtian@lntu.edu.cn

通讯作者: 陶 爽 (2000—), 女, 贵州赫章人, 硕士研究生。E-mail: 1468376234@qq.com

引用格式: 张天, 陶爽, 葛少成, 等. 超音速动力喷雾装置结构优化及尘噪协同控制效果研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(5): 2540-2549.

ZHANG Tian, TAO Shuang, GE Shaocheng, et al. Study on structure optimization of supersonic aerodynamic spray device and synergistic control effect of dust and noise[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(5): 2540-2549.



移动阅读

**Abstract:** Supersonic coaxial air spray dust removal technology is good in the treatment of respirable dust. It has the advantages of high spray concentration, small droplet size and fast movement speed, but it will bring serious noise pollution, especially high-frequency noise. In order to solve this problem, the research group optimized the structure of the technical device. The velocity distribution and sound distribution of the flow field in Laval nozzle before and after optimization were studied by COMSOL Multiphysics software, and the feasibility was verified. Combined with the experiment, YSD130 noise analyzer, laser particle size analyzer and dust sampler were used to measure the spray noise characteristics and change rules under different pneumatic pressure and water flow, as well as the droplet size and dust removal efficiency of the two nozzles. The results show that in Laval nozzle, the sound pressure level of both nozzles decreases gradually along the central axis. The thickness of supersonic layer of optimized nozzle is smaller than that of optimized nozzle, and the corresponding sound pressure level is smaller. When the water flow rate is 10 L/h, with the increase of aerodynamic pressure, the sound pressure level of high frequency band at the sound source of two nozzles shows an increasing trend, and the trend of increasing first and then decreasing at the propagation direction changes to an increasing trend before optimization. Compared with the optimized nozzle, the optimized nozzle sound pressure level at the sound source is reduced by about 16.7%, the peak sound pressure level is reduced by 8.5%–9.3%, and the sound pressure level at the propagation direction is reduced by about 18%. When the pressure is 0.4 MPa, with the increase of water flow, the sound pressure level of the nozzle before optimization increases at the sound source, and increases first and then decreases at the propagation direction. After optimization, the sound pressure level of the nozzle at the sound source increases first and then decreases, the sound pressure level at the middle and high frequency band increases, and the sound pressure level at the propagation direction decreases. Compared with the optimized nozzle, the optimized nozzle sound pressure level at the sound source is reduced by about 9.8%, the peak sound pressure level is reduced by 19.2%–20.9%, and the sound pressure level at the propagation direction is reduced by about 12.7%. When the pressure is 0.4 MPa and the water flow rate is 12 L/h, the particle size of the droplets with 50% of the number of droplets in the two nozzles is about 11  $\mu\text{m}$ , which can effectively capture micron dust. With the increase of test time, the dust removal effect increased linearly, and the dust removal efficiency of the two nozzles reached more than 84%. The research not only ensures the dust removal effect, but also reduces the noise pressure level in the atomization process through structural optimization, which provides theoretical and technical support for the safe application of supersonic aerodynamic dust removal spray and the collaborative control of dust and noise.

**Key words:** supersonic coaxial atomization; structure optimization; noise measurement; dust removal efficiency; spray effect

## 0 引 言

随着煤炭工业的迅速发展,我国原煤产量得到了大幅提升,但其仍存在噪声污染问题。气动喷雾技术作为降尘利器,被广泛应用于煤矿行业,其具有喷雾浓度高、雾滴粒径小、运动速度快等优势,能高效地捕捉呼吸性粉尘,但难免会带来噪声污染。据国家卫健委调查数据显示,在职业病危害因素企业中噪声危害企业占比 88.81%,接触噪声的工人占接触职业病危害因素的 71.95%<sup>[1-3]</sup>。作业者长期暴露于噪声环境中,不仅会造成听力损伤,还会诱发多种疾病,导致失眠、头痛以及全身乏力、记忆力衰退等症状<sup>[4-7]</sup>。由此可见,噪声防治于作业者健康具有重大意义。

目前,许多国内外学者通过主动降噪或被动降噪的方法对气动噪声展开了研究。2021年,赖俊桂等<sup>[8]</sup>

采用试验的方法对风送式喷雾机的气动噪声展开测量,研究了其在铺设不同降噪材料下的喷雾噪声,结果表明 5 mm 厚的泡沫金属铝降噪效果最好,各测点声压级降低 2 dB。2023年,林康等<sup>[9]</sup>基于 CFD(Computational Fluid Dynamics) 软件对某型号离心风机气动噪声进行预测,研究叶片穿孔对其噪声声压级的影响,结果表明该方案可使风机总声压级降低 2.64 dB。2023年,卢岩<sup>[10]</sup>根据气动噪声产生机理对复兴号高速动车产生的气动噪声进行了数值模拟,基于噪声控制理论对其噪声源区域内壁做吸声处理,研究表明通过优化后声源位置噪声有所下降。2022年,陈泽等<sup>[3]</sup>基于各类防治技术原理对神东各矿井粉尘和噪声防治进行了研究,研究发现通过将粉尘传感器与各类设备进行联动可实时调控喷雾压力,降低粉尘含量,通过有源消声技术可将噪声值降低到规程限值以下。

ZHAO 等<sup>[11-13]</sup>采用数值模拟与试验的方法分析了风叶外缘翻边与尾缘结构优化对内流场及噪声的影响,结果表明外缘翻边使其降低了 3~5 dB,尾缘结构优化降低 1~2 dB。2024 年,马锦超等<sup>[14]</sup>采用试验的方法研究了高阶谐波控制 (HHC) 对倾转旋翼飞行器近场气动噪声的影响,研究表明 2  $\Omega$  的 HHC 控制输入的降噪效果最佳,且在直升机模式下,机身顶部近场气动噪声下降 4.5 dB。2018 年,LIU 等<sup>[15]</sup>采用大涡模拟和 FW-H 声类比法研究了天然气放空管产生的射流噪声,结果表明流速的增加会导致噪声从低频向高频转移,通过安装设计的膨胀室消声器后可使其喷气噪声降低 10~40 dB。2022 年,张文敏等<sup>[16]</sup>采用子域法对某高速列车进行了气动仿真模拟,研究发现在车厢连接上、下缺口前端和后端增加波浪板能使乘务在 40 Hz 下对应的声压级降低 5 dB。2021 年,张伟捷<sup>[17]</sup>基于室内离心风机的宽频噪声特性及消声原理对其装设了微穿孔消声器,结果表明各风档噪声总值平均降低 1 dB,噪声峰值平均降低 4 dB。2018 年,ZHANG 等<sup>[18]</sup>采用遗传算法研究了单级管道压缩机在内部非定常流场激励下的结构振动和噪声辐射,研究表明经过优化后的管道微穿孔吸收器可使管道的振动和噪声辐射降低。

综上所述,国内外大多学者采用结构优化的方式保障设备工作效率的同时寻求噪声的降低。尽管其对气动噪声控制的研究已十分深入,但还未见对超音速气动喷雾噪声防控的研究。因此,本文利用 COMSOL 软件对研发的超音速同轴气动喷雾降尘装置及优化后的装置声场进行模拟,并结合试验,对两喷嘴

喷雾噪声、粒径及降尘效率展开测试,分析其在不同气动压力、水流量下的噪声特性及变化规律,对比其声压级、峰值声压级、雾滴粒径及降尘效率。

## 1 数值模拟

为探究优化前后喷嘴声场变化情况,开展了超音速流场下气流噪声传播过程数值模拟研究。ZHANG 等<sup>[19]</sup>基于牛顿流体 (Newtonian fluid)、纳维斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程、一维等熵流动方程对拉瓦尔喷管内速度场进行了研究。本文基于该方法,利用 COMSOL 软件中线性势流频域、线性势流边界模式模块对喷管气流噪声进行了模拟。

### 1.1 雾化装置

该装置利用了超音速气动雾化原理,是指在跨音速流场中,液体因高压喷射受到高速剪切气流、激波和大尺度涡旋的共同作用,经液柱断裂、一次破碎、二次破碎之后形成微米级雾滴的过程<sup>[20]</sup>。经过前期的研究<sup>[21]</sup>,其喷雾噪声主要源自喷管内压缩气流的膨胀、各速度层间及雾滴与喷管壁面的摩擦、音速环及斜激波的产生和演化。因此,将喷嘴的拉瓦尔喷管、台直径及腔体尺寸缩小 2 倍,台长缩小 4 倍。目的是降低气流量,局部减少能量损失,减少喷管内的超音速层厚度,小幅度降低气流的速度,使不同速度气流层间的摩擦减小,使声源噪声强度降低。优化前后喷嘴结构及实物如图 1 所示。

### 1.2 数学模型

利用高马赫数流动 Spalart-Allmaras 模块对拉瓦尔喷管内流场进行模拟得到气动噪声源。其中,气流

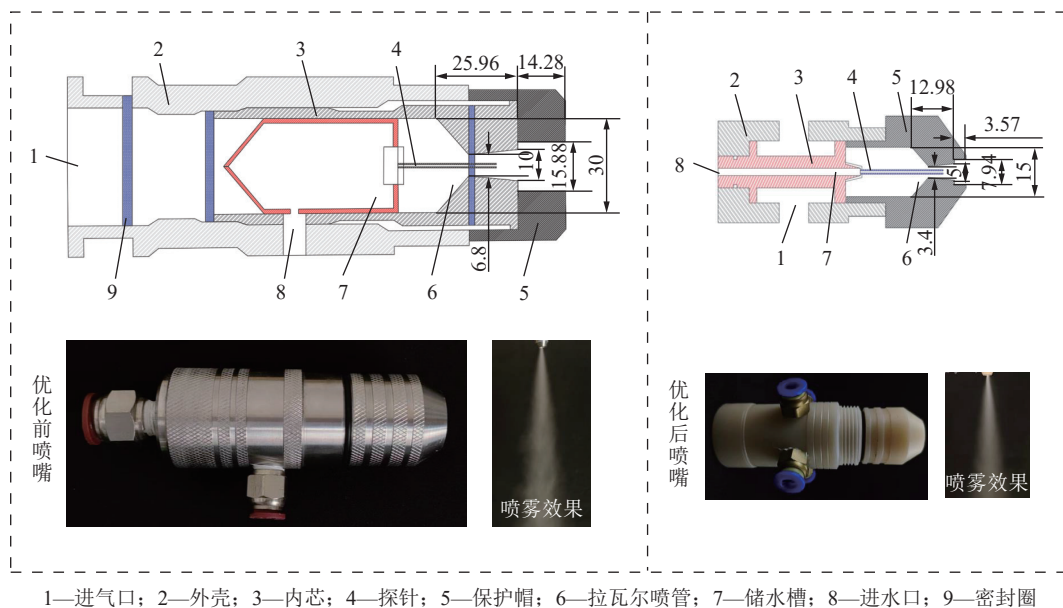


图 1 两喷嘴结构及实物

Fig.1 Two nozzle structure and object

场主要控制方程、边界条件及参数设定引自文献[19]。假设背景平均流可由势流描述,此模型中为均匀流动,通过线性势流边界模式及线性势流频域对喷管噪声进行计算。该模型主要利用以下关键方程。

线性势流方程:

$$\frac{\rho_0}{c_0^2} i\omega(i\omega\phi + v\nabla\phi) = \nabla\left(\rho_0\nabla\phi - \frac{\rho_0}{c_0^2}(i\omega\phi + v\nabla\phi)v\right) \quad (1)$$

式中:  $\rho_0$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_0$  为声速,  $\text{m/s}$ ;  $\phi$  为速度势,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $\omega$  为角速度,  $\text{rad/s}$ ;  $v$  为平均流速,  $\text{m/s}$ 。

其中速度势表示为

$$\phi = \phi(r, z)e^{-im\varphi}, \quad \phi(r, z) = \phi_1 \quad (2)$$

式中:  $m$  为方位角模数;  $r$  和  $z$  为坐标轴方向;  $\varphi$  为衍射场;  $\phi_1$  为流体速度势。

声速可表示为

$$c_0 = \sqrt{\gamma R_s T} \quad (3)$$

式中:  $\gamma$  为比热率;  $R_s$  为比气体常数,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ 。

温度可表示为

$$T = T_0(r, z) \quad (4)$$

密度可表示为

$$\rho_0 = \rho(r, z) \quad (5)$$

$r$  方向平均速度流为

$$u_1 = u_0(r, z) \quad (6)$$

$z$  方向平均速度流为

$$\omega_1 = \omega_0(r, z) \quad (7)$$

式中:  $T_0$ 、 $\rho_0$ 、 $u_0$ 、 $\omega_0$  分别代表气流场中的温度、密度、 $r$  方向平均速度流、 $z$  方向平均速度流; 变量温度  $T$ 、密度  $\rho_0$ 、平均速度流  $u_1$ 、 $\omega_1$  为通过参数方程形式调用到声场中的气流场数据。

### 1.3 几何模型与网格建立

超音速同轴雾化喷嘴主要由雾化帽、拉瓦尔喷管、探针及外壳等部分组成。该模拟采用二维轴对称模型,其几何模型的简化及网格划分如图2所示。由图2可知,两喷嘴单元质量分布范围为0.6~1,可见网格生成质量的可靠性。并由试验验证了该模型网格生成的正确性、独立性及可靠性。相关边界条件的设定见表1。

### 1.4 结果与讨论

以雾化喷嘴为中轴,在地面距离喷嘴1.65 m中心点处,压力为0.3 MPa,半径在2、5、8 m下,优化后喷嘴声压级模拟结果及试验结果如图3所示。喷嘴模

拟所得声压级与试验测得声压级误差约12.4 dB,证实了模拟结果的准确性、可靠性。

压力在0.3 MPa时,两喷嘴拉瓦尔喷管内部跨音速流场速度分布如图4所示。气流通过拉瓦尔喷管时,在中轴部分时两喷嘴速度超过音速,两喷嘴流场速度沿中心轴向外逐渐减小,其速度在液相出口处大致相同,优化后喷管内速度大小及速度层的厚度减小。不同速度层间的摩擦会导致音速环、斜激波的产生和演化,进而产生高频(>1 kHz)噪声。

利用COMSOL软件轴对称模块模拟了两喷嘴距离地面2.5 m,半径0~8 m时的喷雾噪声,如图5所示。在拉瓦尔喷管内,处于喉部及扩张段中间部分时两喷嘴声压级达到最大,原因是不同速度气流层间的剧烈摩擦。优化前喷嘴超音速层的厚度是优化后喷嘴的2倍,其所对应的声压级更大。传播方向处,随着半径的增大,两喷嘴声压级逐渐降低,但优化前喷嘴声压级始终大于优化后喷嘴声压级。

## 2 试验

### 2.1 试验系统

为探究优化前后喷嘴雾滴粒径、噪声特性及降尘特性,搭建了超音速同轴气动喷雾雾滴粒径及尘噪测试平台,如图6所示。

喷雾噪声测试使用仪器及设备主要包括雾化喷头、空气压缩机、水箱(水泵)、液体流量计及YSD130噪声分析仪器等。其中,YSD130噪声分析仪测量误差为 $\pm 1$  dB,可测量参数包括声压级、声暴露级及峰值声压级等。喷头悬挂于2.5 m处,试验测量了两喷嘴声源处及传播方向处喷雾噪声在压力为0.2、0.3、0.4 MPa及水流量为10、12h、14 L/h时的变化情况。

雾滴粒径测试使用设备主要有粒度分析仪、雾化喷头及空气压缩机等。其中,激光粒度分析仪主要基于激光衍射及动态光散射原理,具有高分辨率及高灵敏度,能对微米级及纳米级颗粒进行测量。该试验测量了压力为0.4 MPa,水流量为12 L/h,喷雾距离在1 m时两喷嘴的雾滴粒径,并对其进行对比分析。

为测量两喷嘴降尘特性,试验采用取自陕西榆林某矿综采工作面的煤粉,利用DFS-3发尘器(东北大学科兴应用技术研究所制)将50 g的微细煤粉发入12 m<sup>2</sup>的全封闭空间内,待发尘结束后,通过粉尘采样器测得其初始浓度。将压力调为0.4 MPa,水流量为12 L/h,测量喷雾时间在0~1、1~2、2~3 min时的粉尘浓度。将所测样本晾干后对其进行称重,根据数据对两喷嘴降尘效率进行分析。

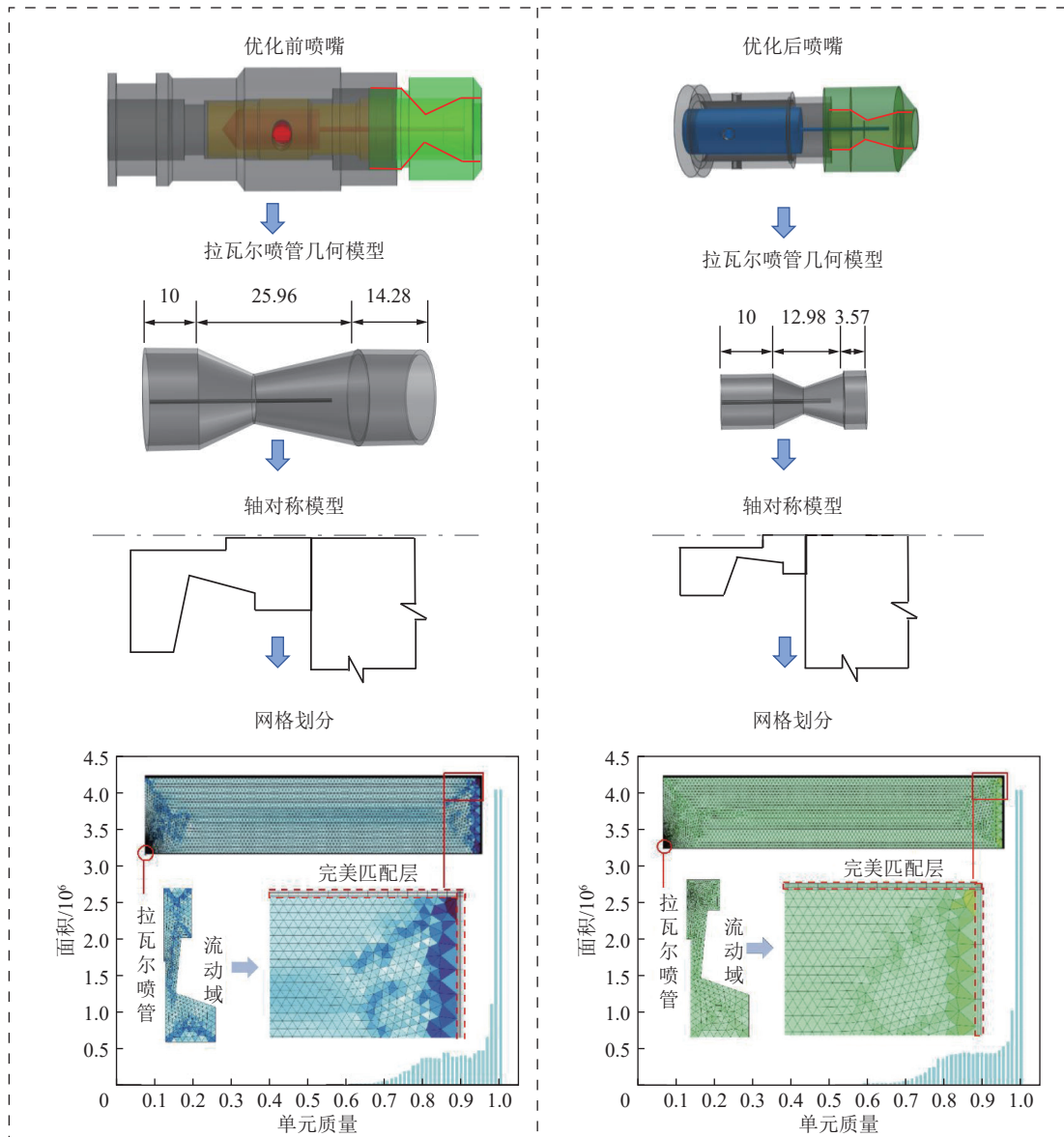


图 2 模型简化及网格划分

Fig.2 Model simplification and mesh division

表 1 边界条件及参数设定

Table 1 Boundary conditions and parameter settings

边界参数	数值	边界参数	数值	边界参数	数值
比气体常数/( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	287	比热率	1.4	温度/K	300
方位角模数	0	密度/( $kg \cdot m^{-3}$ )	3.48	声速/( $m \cdot s^{-1}$ )	347

2.2 噪声测试结果

2.2.1 不同压力下喷雾噪声特性

水流量在 10~14 L/h 时, 该装置雾化效果较好, 为研究噪声最大时两喷嘴的雾滴特性, 水流量采用 10 L/h。不同压力下两喷嘴在声源处的噪声倍频程及峰值声压级如图 7 所示。随着压力的增大, 优化前喷嘴声压级总体呈先增大后减小趋势, 频率在 4~8 kHz 时呈增大趋势, 尤其在压力为 0.4 MPa 时, 频率为

8 kHz 的声压级达到了 119.7 dB, 优化后喷嘴整体呈上升趋势。原因是压力增大, 气流喷射速度越快, 压缩气流的膨胀、气流与喷管内壁的摩擦及不同速度气流层的摩擦作用增强及斜激波和音速环的产生与演化。优化后喷嘴较之优化前声压级降低了约 16.7%, 峰值声压级降低了 8.5%~9.3%, 表明喷嘴通过结构优化降低其气流耗散量、各层间速度大小及超音速层厚度, 使得各频段声压级及峰值声压级得到改善, 但其

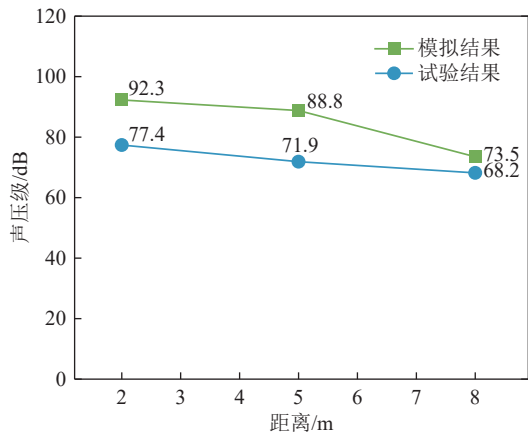


图 3 不同距离下喷嘴声压级

Fig.3 Nozzle sound pressure levels at different distances

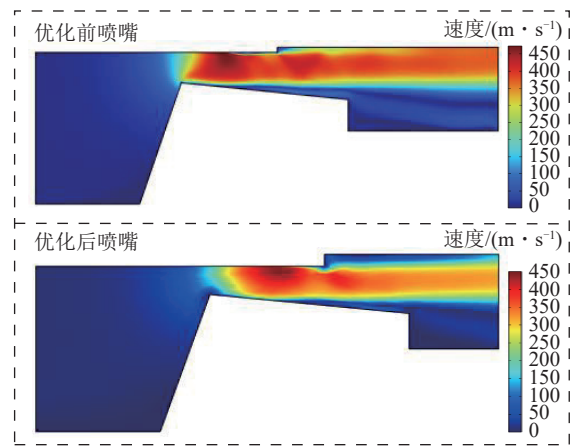


图 4 两喷嘴流场分布

Fig.4 Two nozzle flow field distribution

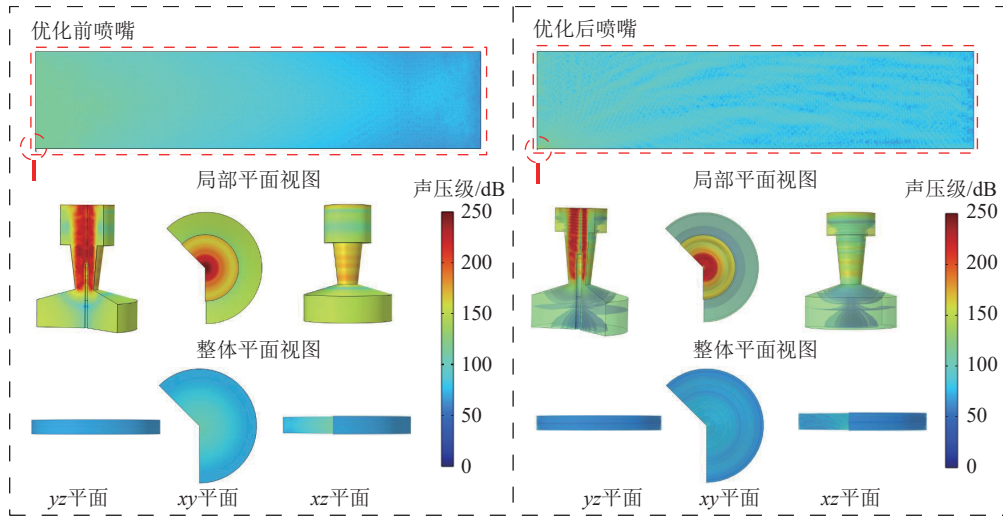
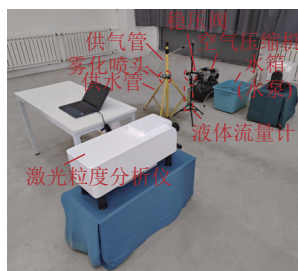


图 5 两喷嘴声场分布

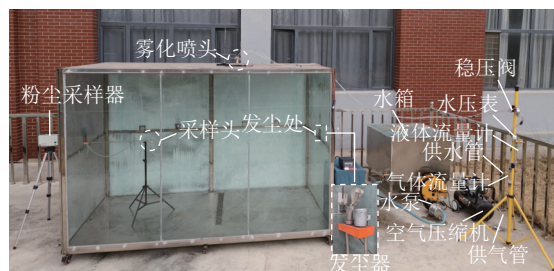
Fig.5 Sound field distribution of two nozzles



(a) 喷雾噪声测试平台



(b) 雾滴粒径测试平台



(c) 降尘特性测试平台

图 6 雾滴粒径及尘噪测试平台

Fig.6 Droplet size and dust noise test platform

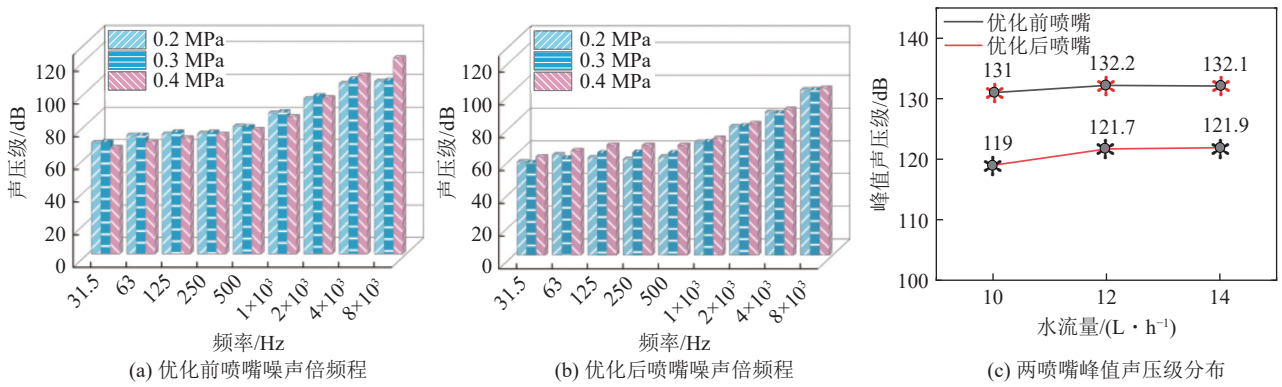


图 7 不同压力下声源处两喷嘴喷雾噪声

Fig.7 Spray noise of two nozzles at different pressure source

噪声仍在国家标准要求阈值之上。

雾化喷头悬挂 2.5 m 高,以地面距离喷嘴 1.65 m 为中心,在半径 2 m 处测其喷雾噪声,得出两喷嘴在不同压力下的噪声倍频程如图 8 所示。与优化前喷嘴对比,传播方向处优化后喷嘴声压级降低了约 18%,且在国家标准要求的阈值之下。当压力增大时,优化前喷嘴声压级总体呈先增大后减小趋势,但频率在 4 kHz 时,其声压级逐渐上升;频率在 8 kHz 时,其声压级呈先减小后上升趋势,优化后喷嘴整体呈增长趋势。各压力下声压级呈勾型,即先减小后增大趋势。主要原因是喷管内气流与壁面、各速度层间的摩擦及气流对液滴的剪切破碎作用在低频段 (< 500 Hz) 时振幅较大,接近中频段 (> 500 Hz) 震动相对减弱,在高频段时振动剧烈。

### 2.2.2 不同水流量下喷雾噪声特性

为探究两喷嘴在不同水流量下的变化情况,试验考虑矿井下气压及用水量,测量了气压在 0.4 MPa 时,水流量为 10、12、14 L/h 下的喷雾噪声特性,如图 9 所示。声源处优化后喷嘴各频段声压级约降低了 9.8%,峰值声压级降低了 19.2%~20.9%。随着水流

量的增大,优化前喷嘴各频段声压级总体呈增长趋势,优化后喷嘴声压级在低频段时呈先增大后减小趋势,中高频段时呈增长趋势。

在传播方向 2 m 处,两喷嘴在水流量为 10、12、14 L/h 下的喷雾噪声如图 10 所示。传播方向处优化后喷嘴较之优化前喷嘴各频段声压级约降低了 12.7%,尤其是中高频段极为明显。显然优化后喷嘴在拉瓦尔喷管尺寸缩小 2 倍,台长缩小 4 倍,台的直径缩小 2 倍后,其气流耗散量降低对高频段噪声起到良好的治理效果。随着水流量的增大,优化前喷嘴声压级总体呈先增大后减小趋势,优化后喷嘴声压级呈下降趋势。原因是优化后喷嘴耗气量降低及各层间速度下降使其水流量达到饱和雾化极限状态的工况下降。雾化水平达到饱和状态使得气流破碎液滴的能量不足,导致大液滴对气流运动造成阻碍,噪声强度得以降低。

### 2.3 雾化降尘测试结果

优化后喷嘴噪声强度得到一定降低,尽管声源处喷雾噪声还未达到国家标准,但传播方向处已在国家标准阈值之下。为验证其雾化效果及除尘效率的一

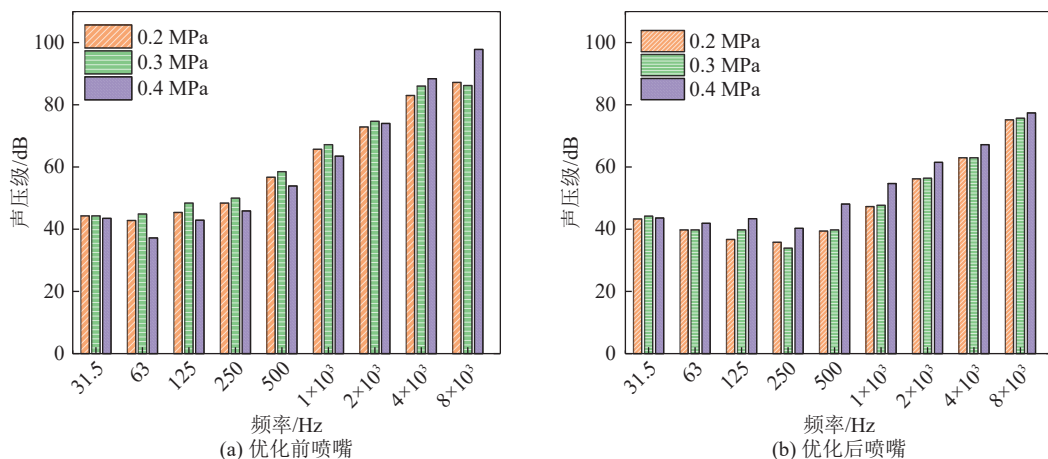


图 8 不同压力下传播方向处两喷嘴噪声倍频程

Fig.8 Two nozzles noise octave at different propagation directions under different pressures

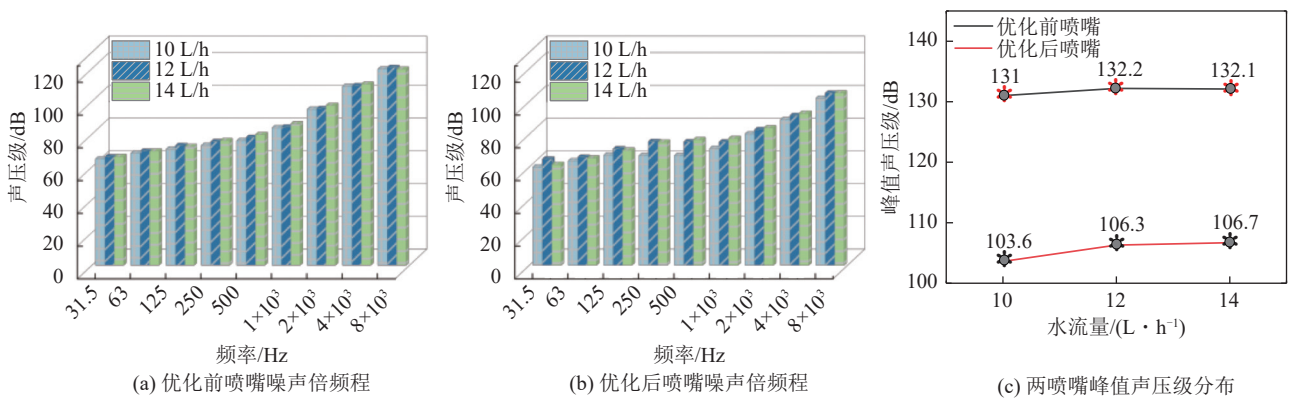


图 9 不同水流量下声源处两喷嘴喷雾噪声

Fig.9 Spray noise of two nozzles at the sound source under different water flow

致性,展开了雾滴粒径及降尘测试。考虑到喷雾噪声及雾化效果的情况,选取压力为 0.4 MPa,水流量为 12 L/h,测量喷雾距离处于 1 m 时的雾滴粒径。发现两喷嘴雾滴数量在 50% 的雾滴粒径在 11 μm 左右,雾滴数量在 90% 的雾滴粒径在 16 μm 左右,能高效地捕捉微米级粉尘。在长 3 m、宽 2 m、高 2 m 的全封闭

空间内发入 50 g 的煤粉(干燥且粒径在 50 μm 以下)后,打开控制开关,测得压力为 0.4 MPa,水流量为 12 L/h 时,喷雾时间在 0~1、1~2、2~3 min 内的粉尘浓度,结果表明降尘效果随着测试时间的增加呈线性增长趋势。在喷雾 3 min 时,两喷嘴降尘效率皆达到 84% 以上。结果如图 11 所示。

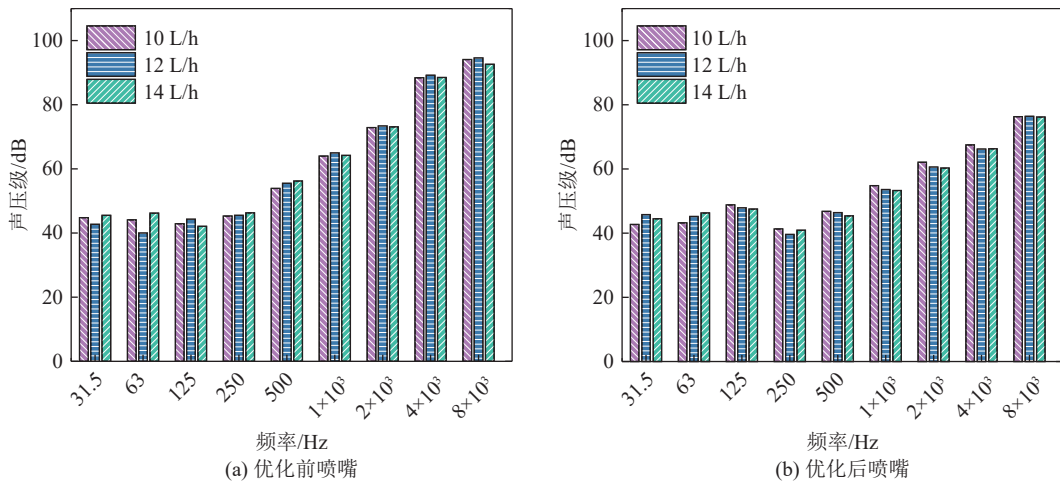


图 10 不同水流量下传播方向处两喷嘴噪声倍频程

Fig.10 Two nozzles noise octave at different water flow directions

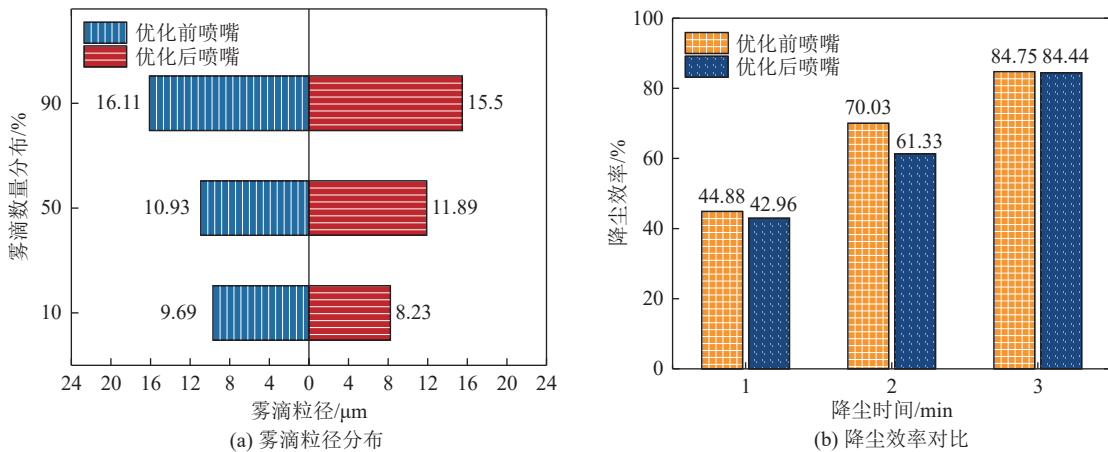


图 11 两喷嘴雾滴粒径分布及降尘效率对比

Fig.11 Comparison of droplet size distribution and dust removal efficiency between two nozzles

### 3 结 论

1) 在拉瓦尔喷管内,两喷嘴声压级沿中心轴向外皆逐渐降低。优化后喷管内超音速层的厚度减小,使其所对应的声压级降低。

2) 当水流量为 10 L/h 时,随气动压力增大,两喷嘴声源处高频段声压级均呈增长趋势,传播方向处优化前声压级总体呈先增大后减小趋势,优化后声压级呈上升趋势。优化后声源处声压级降低了约 16.7%,峰值声压级降低了 8.5%~9.3%,传播方向处声压级降低了约 18%。

3) 气动压力为 0.4 MPa 时,随水流量增大,声源处优化前声压级由一直增大转变为低频段声压级呈先上升后下降趋势,中高频段呈上升趋势,传播方向处呈先增大后减小趋势转变为下降趋势;优化后喷嘴声源处声压级降低了约 9.8%,峰值声压级降低了 19.2%~20.9%,传播方向处声压级降低了约 12.7%。

4) 压力为 0.4 MPa,水流量为 12 L/h 时,两喷嘴雾滴数量在 50% 的雾滴粒径皆在 11  $\mu\text{m}$  左右,空间分布均匀。降尘效果随着测试时间的增加呈线性增长,降尘效率皆达到 84% 以上。

### 参考文献(References):

- 陈泽,董旭东,卞涛,等.采煤工作面职业病危害防治研究[J].煤炭工程,2022,54(S1):230-234.  
CHEN Ze, DONG Xudong, BIAN Tao, et al. Exploration of prevention and control of occupational diseases in coal mining faces[J]. Coal Engineering, 2022, 54(S1): 230-234.
- 柳润东,李志强,伍向阳,等.高速列车关键区域流场结构及气动噪声特性仿真分析[J].中国铁路,2024(6):1-6.  
LIU Rundong, LI Zhiqiang, WU Xiangyang, et al. Simulation analysis of flow field structure and aerodynamic noise characteristics in key areas of high speed trains[J]. China Railway, 2024(6): 1-6.
- 陈泽,郝玉兵,董旭东,等.综采面噪声和粉尘危害防治研究[J].中国安全科学学报,2022,32(S2):248-253.  
CHEN Ze, HAO Yubing, DONG Xudong, et al. Study on prevention and control of noise and dust hazards in comprehensive mining surfaces[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S2): 248-253.
- 田子建,张立亚.矿用多波主动噪声控制系统[J].煤炭学报,2011,36(6):1056-1059.  
TIAN Zijian, ZHANG Liya. Multi-wave active noise control system at the underground mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(6): 1056-1059.
- 杨理华,张骁,张翔鹏,等.潜艇舱室环境噪声危害及治理进展研究[J].舰船科学技术,2022,44(12):1-5.  
YANG Lihua, ZHANG Xiao, ZHANG Xiangpeng, et al. Research on environmental noise hazards and control progress in submarine cabins[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(12): 1-5.
- 王爽,郭永存,胡坤,等.双盘式磁力耦合器振动噪声分析与实验研究[J].煤炭学报,2020,45(2):811-818.  
WANG Shuang, GUO Yongcun, HU Kun, et al. Analysis and experimental study of vibration and noise of double disk magnetic coupler[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 811-818.
- 臧静,魏振江,孙瑞霞.石化钻井行业工程服务公司职业病危害调查与现状评价[J].职业与健康,2022,38(21):2885-2888.  
ZANG Jing, WEI Zhenjiang, SUN Ruixia. Investigation and current situation evaluation on occupational hazards in petrochemical drilling industry engineering service company[J]. Occupation and Health, 2022, 38(21): 2885-2888.
- 赖俊桂,占旭锐,李震,等.风送式喷雾机噪声测量及降噪分析[J].农机化研究,2022,44(7):228-233.  
LAI Jungui, ZHAN Xurui, LI Zhen, et al. Noise measurement and noise reduction analysis of air-assisted sprayers[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(7): 228-233.
- 林康,沈承,王斌,等.某离心风机气动噪声计算与控制研究[J].噪声与振动控制,2023,43(6):24-30,37.  
LIN Kang, SHENG Cheng, WANG Bin, et al. Research of calculation and control of pneumatic noise of a centrifugal fan[J]. Noise and Vibration Control, 2023, 43(6): 24-30,37.
- 卢岩.高速列车头车气动噪声控制技术[D].北京:北京交通大学,2023.  
LU Yan. Research on aerodynamic noise control technology of head car of high speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- ZHAO X F, SUN J J, ZHANG Z. Numerical and experimental investigation of flow behaviour and aerodynamic noise in axial flow fan of air-conditioner[C]//Volume 7: Turbomachinery, Parts A, B, and C. ASMEDC, 2011: 985-994.
- ZHAO X F, SUN J J, ZHANG Z. Prediction and measurement of axial flow fan aerodynamic and aeroacoustic performance in a split-type air-conditioner outdoor unit[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(3): 1098-1108.
- ZHAO X F, SUN J J, GAO R H, et al. Quantitative evaluation of flow-induced fan casing structural vibration and noise radiation of air-conditioner outdoor unit[C]//Volume 1A: Aircraft Engine; Fans and Blowers. American Society of Mechanical Engineers, 2014: V01AT10A013.
- 马锦超,陆洋,王亮权,等.基于高阶谐波控制的倾转旋翼近场气动噪声主动控制试验[J].航空学报,2024,45(9):528602.  
MA Jinchao, LU Yang, WANG Lianguan, et al. Active control test of tiltrotor near-field aeroacoustics based on higher harmonic control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(9): 528602.
- LIU E B, PENG S B, YANG T W. Noise-silencing technology for upright venting pipe jet noise[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(8): 1687814018794819.
- 张文敏,李启良,贾尚帅,等.某型高速列车车厢连接处脉动压力的预测与控制[J].城市轨道交通研究,2022,25(3):21-25.  
ZHANG Wenmin, LI Qiliang, JIA Shangshuai, et al. Prediction and

- control of fluctuating pressure at the inter-coach of certain type high-speed train[J]. *Urban Mass Transit*, 2022, 25(3): 21–25.
- [17] 张伟捷. 空调器风机气动及辐射噪声研究和控制[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- ZHANG Weijie. The research and control of air conditioner fan aerodynamic and radiation noise[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [18] ZHANG Q L, MAO Y J, ZHOU H H, et al. Vibro-acoustics of a pipeline centrifugal compressor Part II. Control with the micro-perforated panel[J]. *Applied Acoustics*, 2018, 132: 152–166.
- [19] ZHANG T, MU X S, JING D J, et al. Influence of aerodynamic pressure on dust removal by supersonic siphon atomization[J]. *Energy*, 2023, 282: 128727.
- [20] BELOKI PERURENA J, ASMA C O, THEUNISSEN R, et al. Experimental investigation of liquid jet injection into Mach 6 hypersonic crossflow[J]. *Experiments in Fluids*, 2009, 46(3): 403–417.
- [21] 张天, 陶爽, 葛少成, 等. 超音速气动喷雾技术噪声特性及致噪机理研究[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(7): 2830–2837.
- ZHANG Tian, TAO Shuang, GE Shaocheng, et al. Study on noise characteristics and mechanism of supersonic aerodynamic spray technology[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(7): 2830–2837.