



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402207

引用格式:刘文广,周新健,李启才,等.基于响应面分析的扇形喷嘴结构优化对射流打击力影响[J].科学技术与工程,2025,25(4):1467-1474.

Liu Wenguang, Zhou Xinjian, Li Qicai, et al. Effect of fan-shaped nozzle structure optimization on jet impact force based on response surface analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1467-1474.

基于响应面分析的扇形喷嘴结构优化 对射流打击力影响

刘文广¹, 周新健¹, 李启才², 高伟², 阳浩¹

(1. 内蒙古科技大学机械工程学院, 包头 014010; 2. 艾弗茨(天津)冶金设备有限公司, 天津 301701)

摘要 扇形喷嘴是高压水除鳞系统的重要部件,其内部结构参数直接影响射流性能。利用流体仿真软件 FLUENT 对喷嘴流场进行分析,选取喷嘴出口段直径,锥形段收缩角,出口收缩角为参考因素,以射流打击力为评价指标,采用响应面方法优化喷嘴结构参数。结果表明:单因素出口段直径与锥形收缩角的变化会影响内流场速度分布,对喷嘴流量影响较小;出口段直径与喷嘴出口收缩角的变化影响着喷嘴静压降,喷嘴锥形段收缩角对压降的影响可以忽略。当出口段直径为 3.15 mm、锥形收缩角为 26.17°、出口收缩角为 40.93°时,通过建立外流场,运用气液两相流模型仿真计算,发现喷嘴打击力由原始的 94.91 N 提升至 143 N。研究成果为优化喷嘴结构以提升射流打击力提供理论指导。

关键词 响应面优化; 扇形喷嘴; 高压水除鳞; 中心复合试验

中图分类号 TH137; **文献标志码** A

Effect of Fan-shaped Nozzle Structure Optimization on Jet Impact Force Based on Response Surface Analysis

LIU Wen-guang¹, ZHOU Xin-jian¹, LI Qi-cai², GAO Wei², YANG Hao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. Aifuci (Tianjin) Metallurgical Equipment Co., Ltd., Tianjin 301701, China)

[Abstract] Fan nozzle is an important part of high pressure water descaling system, and its internal structure parameters directly affect the performance of jet. The nozzle flow field was analyzed by using fluid simulation software FLUENT, and the nozzle exit diameter, cone section contraction angle and exit contraction angle were selected as reference factors. The jet impact force was used as evaluation index, and the nozzle structure parameters were optimized by response surface method. The results show that the velocity distribution of the internal flow field is affected by the single factor of the diameter of the outlet section and the conical contraction angle, but the flow rate of the nozzle is little affected. The pressure drop of nozzle is affected by the change of the diameter of outlet section and the contraction angle of nozzle outlet, and the influence of the contraction angle of nozzle conical section on the pressure drop is negligible. When the diameter of the outlet section is 3.15 mm, the taper shrinking angle is 26.17°, and the outlet shrinking angle is 40.93°, it is found that the nozzle striking force is increased from the original 94.91 N to the optimized 143 N by establishing the outflow field and applying the gas-liquid two-phase flow model simulation calculation. The research results provide theoretical guidance for optimizing nozzle structure to enhance jet impact force.

[Keywords] response surface optimization; fan nozzle; high pressure water descaling; central compound test

热轧生产工艺流程中,板坯出炉后表面会形成一层氧化铁皮^[1]。高压水除鳞装置是热轧生产线重要设备,布置在轧机的前后侧,通过上、下集管喷嘴的水流打击力,实现带钢表面氧化铁皮的清除,从而改善带钢表面光洁度^[2]。利用高压水经过除鳞喷嘴产生强大冲击力和水流将氧化铁皮冲击掉是目前最常用的除鳞方法。

扇形喷嘴广泛运用于高压水除鳞系统,是产生射流的执行部件。中外学者根据喷嘴结构参数对射流性能影响进行了研究。对内流场研究有不同喷嘴腔体形状^[3]、出口收缩角及切槽类型对评价指标影响^[4]。文献[5-6]通过极差分析和方差分析验证了喷嘴结构参数对射流性能影响敏感性。王博等^[7]研究不同喷嘴收缩角对自身的冲蚀情况,发现

收稿日期:2024-03-28; 修订日期:2024-11-25

基金项目:内蒙古自然科学基金(2020LH05025)

第一作者:刘文广(1977—),男,汉族,河北尚义人,博士,副教授。研究方向:专用机械。E-mail:myshine@imust.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

收缩角增大,冲蚀集中区域后移。胡坤等^[8]对圆柱形喷嘴进行研究,采用响应面方法优化了喷嘴结构。于兰英等^[9]对不同出口直径的扇形喷嘴在不同压力下的打击力、动压进行了比较。Huang等^[10]研究了喷嘴壁面的气体生成速率和轴向速度分布,确定了扩压器的最佳尺寸。Wang等^[11]分析了喷嘴结构参数与喷嘴内部流场轴向静压和速度的关系。沈正昊等^[12]研究了喷嘴的切槽角、切深、接口形状以及喷射压力参数对喷嘴的雾场分布及其均匀性的影响。目前对高压水除鳞喷嘴结构参数的研究大多集中于外流场或内流场单个流场的分析,多个参数共同作用下对喷嘴流场的影响研究较少。

鉴于此,建立扇形喷嘴三维模型,运用 FLUENT 单相流模型对喷嘴内流场进行分析,得到其物理量分布情况。结合参数化设计分析喷嘴内部结构参数对内流场速度分布及喷嘴流量的影响。设定喷嘴原始尺寸变动范围,利用中心复合试验设计方法设计参数表,根据响应面分析得到喷嘴结构参数的最优组合。建立外流场,通过流体容积法(volume of fluid, VOF)对喷嘴外流场进行仿真。对比结构参数优化前后喷嘴射流打击力大小,得到多个参数交互作用下对射流性能的影响,为喷嘴结构优化提供理论指导。

1 喷嘴模型与射流理论值

1.1 喷嘴几何结构

轴向扇形喷嘴其出口截面为椭圆状,椭圆喷孔一般由一定角度的“楔”与球形喷孔垂直相贯而成^[13]。“楔”常分V形和U形两类。图1为某型号出口切槽为U形的扇形喷嘴结构,图2为对应喷嘴实物。由结构示意图(图1)可知,高压水流进入圆柱形入口段,在锥形收缩段处水流直径逐渐减小后到达出口段,经出口收缩段再次收缩作用最终抵达喷嘴切槽,在其形成的椭圆形出口集束后形成扇形扁平射流束。喷嘴内部结构参数的改变会影响内流场流动行为及射流性能,如图3所示, L_1 为出口段锥孔延长线高度, L_2 为锥形收缩段延长线锥孔高度,选取出口收缩角 $\theta = 50^\circ$,出口段直径 $d = 7 \text{ mm}$,锥形收缩角 $\alpha = 30^\circ$ 作为原始喷嘴尺寸。

1.2 理论计算公式

除鳞效果的好坏与射流打击力密切相关,是衡量喷嘴射流性能的重要指标,喷嘴射流打击力理论值 F 的计算公式为

$$F = \frac{F_s}{S} = \frac{0.055Q\sqrt{p}\cos\beta}{H^2 \tan \frac{\varphi}{2} \tan \frac{\tau}{2}} \quad (1)$$

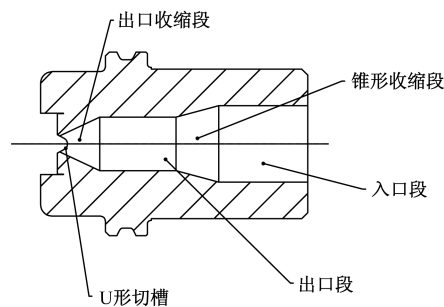


图1 扇形喷嘴结构示意图

Fig. 1 Fan nozzle structure schematic



图2 喷嘴实物

Fig. 2 Nozzle diagram

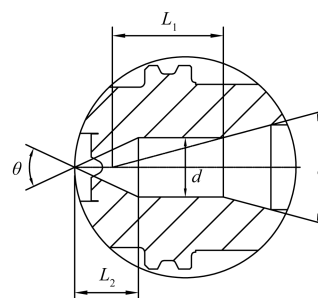


图3 喷嘴局部结构参数

Fig. 3 Nozzle local structure parameters

$$F_s = k_1 k_2 k_3 W = k_1 k_2 k_3 \frac{Qv}{60} \quad (2)$$

式中: F 为射流作用于物体上的打击力, N/mm^2 ; F_s 为总打击力, N ; W 为喷嘴出口打击力, N ; S 为打击面积, mm^2 ; Q 为喷嘴的流量, L/min ; p 为喷嘴入口压力, kg/cm^2 ; β 为喷嘴轴线与喷射打击面法线方向夹角, $(^\circ)$; H 为喷嘴喷口端面至打击力面的垂直距离, mm ; φ 为喷嘴的喷射角, $(^\circ)$; τ 为射流厚度方向喷射角, $(^\circ)$; k_1 、 k_2 为射流流速与流量衰减系数,分别取0.7与0.75; k_3 为整流系数,取1.3; v 为射流流速, m/s 。

根据动量定理,可得到射流流速 v 为

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P g}{\rho_w}} \quad (3)$$

式(3)中: g 为重力加速度,取 $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; ρ_w 为水流密度,取 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; ΔP 为喷嘴压降, kg/m^2 。

在不考虑安装参数前提下,由式(1)、式(2)可知,射流打击力主要与喷嘴流量 Q 及喷嘴压降 ΔP 有关。为便于后续监测,将流量 Q (单位: L/min) 换算为质量流量 q (单位: kg/s),在后续响应面分析中将喷嘴压降 ΔP 与质量流量 q 设置为监测指标。

2 内流场数值计算及结果分析

2.1 控制方程

(1)连续性方程。位置固定无穷小微团质量的变化率 = 流入无穷小微团质量 - 流出无穷小微团质量的变化率。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式(4)中: ρ 为流体密度; u, v, w 分别为 X, Y, Z 方向速度。

(2)动量方程。该方程实质是牛顿第二定律,可表述为:微元体中流体的动量对时间的变化率等于外界作用在该微元上的各种力之和。

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{V} \quad (5)$$

式(5)中: ρ 为流体密度; \mathbf{V} 为速度矢量; p 为压力; \mathbf{f} 为单位体积流体受的外力; ∇ 为哈密尔顿算子; μ 为动力黏度。

2.2 喷嘴模型建立及边界条件设置

为对喷嘴内流场进行数值模拟,先抽取喷嘴模型流体域。该流场区域几何尺寸较小,且喷嘴出口不规则,物理量对网格数量不敏感,因此网格无关性在后续外流场分析中验证。划分网格时以四面体网格为主导,对喷嘴非进出口区域进行边界层网格建立。将第一层网格高度定为 0.02 mm ,图4为网格模型及边界命名,统计网格单元数量为 $69\ 755$,网格平均质量 0.64 。求解过程中使用稳态、压力基求解器,喷嘴射流属于自由剪切流动,湍流模型采用 Realizable k (湍动能)- ε (耗散率)模型,该模型能更好地模拟圆孔射流问题。材料模型添加液态水,并充满整个计算区域,将喷嘴入口处端面命名为压力入口边界,设定为 22 MPa ;出口设为压力出口边界,初始表压定为 0 MPa ,即一个标准大气压;其余边界类型均为无滑移光滑壁面。压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法,残差及松弛因子根据经验设置,迭代步数设定为 $1\ 000$ 步。

2.3 内流场仿真分析与讨论

对仿真云图进行可视化处理,在计算区域内创建二维平面切片,喷嘴内部 XZ 平面速度及压力场分布如图5所示。可以看出,来自除鳞系统管路中的水流进入喷嘴后,经过喷嘴圆锥收缩段后速度增

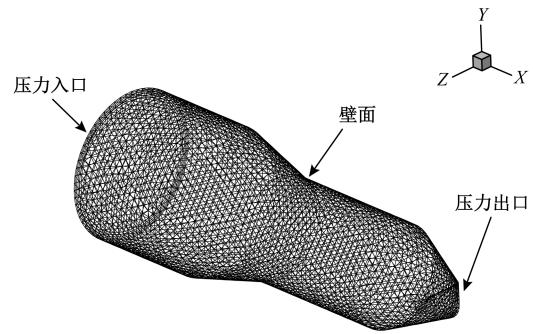


图4 内流场网格及边界类型

Fig. 4 Internal flow field grid and boundary types

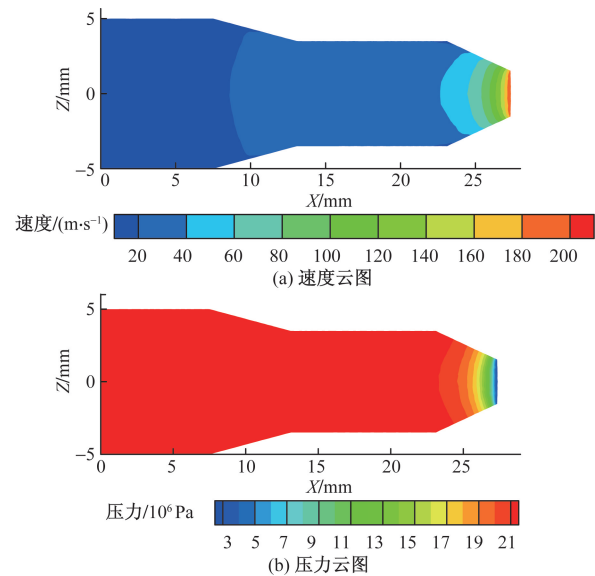


图5 XZ 平面物理量分布

Fig. 5 The XZ plane physical quantity distribution

加,从入口位置的 16 m/s 增加到 40 m/s 。在直径不变的出口段处速度波动较小,到达出口收缩段处水流速度提升最为明显,直至临界出口时水速到达约 200 m/s 。此时喷嘴进出口压降为 $2.18 \times 10^7 \text{ Pa}$,质量流量为 1.26 kg/s ,该过程完成了从管路中的低速流动水到外界高速水射流的转变。

2.3.1 出口段直径对内流场速度分布影响

为探究单因素对射流性能影响,对该因素进行参数化设计,该方法缩短了重复建模及网格划分等前处理时间,加快了数值仿真计算。选取出口收缩角 $\theta = 50^\circ$,锥形收缩角 $\alpha = 30^\circ$ 。出口段直径 d 依次选择 $3.0, 3.2, 3.8, 4.0 \text{ mm}$,同原直径 $d = 3.5 \text{ mm}$ 进行仿真计算,设定模型 X 轴为速度监测位置,提取其速度值,结果如图6所示。

出口段直径的改变会使出口段与锥形收缩段水流速度产生差异,对入口段与出口流速影响较小。对于原始出口段直径,随着出口段直径增加,锥形收缩段速度降低,速度趋势变得“平缓”;当直

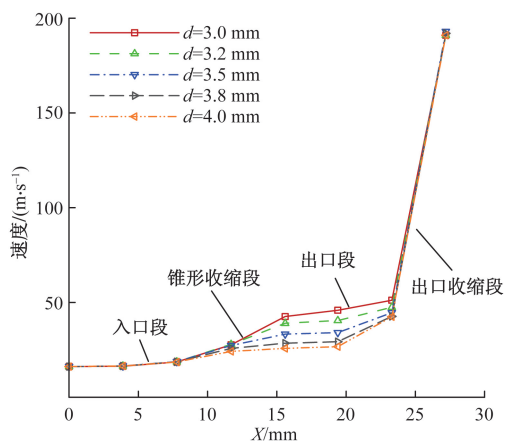


图6 喷嘴X轴流场速度

Fig. 6 Flow field velocity at nozzle X axis

径减小时,锥形收缩段速度相应增加,速度曲线变得“陡峭”。在 $X = 15 \sim 20$ mm处,不同直径喷嘴内流场速度处于 $26.7 \sim 45.8$ m/s。可知喷嘴内部水流速度数值分层次增长,速度改变点处于锥形收缩段与出口段结束部位。

2.3.2 锥形收缩角对内流场速度分布影响

锥形收缩段是连接喷嘴入口段与出口段的部位,改变锥形收缩角会影响水流在Y方向的速度变化。若喷嘴内部不包含锥形收缩段,入口段与出口段在径向处垂直相连,导致流动水直接冲击Y方向壁面,湍动能增大,减小了X方向速度分量,不利于内流场水流速度提升,进而影响射流性能。选取出口收缩角 $\theta = 50^\circ$,出口段直径 $d = 3.5$ mm。锥形收缩角 α 依次选择 20° 、 25° 、 35° 、 40° 。与原始锥形收缩角 $\alpha = 30^\circ$ 进行分析,提取X轴上速度分布,结果如图7所示。

锥形收缩角的变化使得锥形收缩段流体速度产生差异。如图7所示,对于原始锥形收缩角,随着

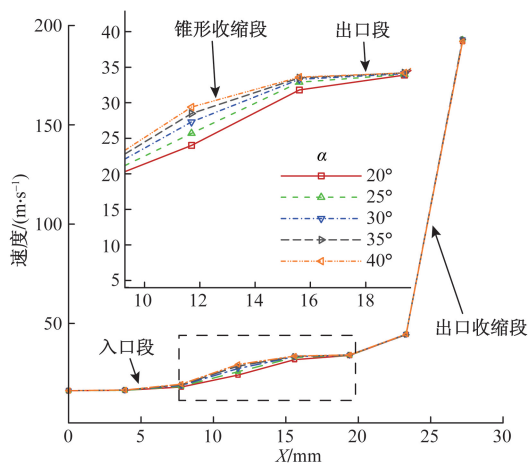


图7 喷嘴X轴心处流场速度

Fig. 7 Flow field velocity at nozzle X axis

角度增加,锥形段水流速度增加;角度减少时,锥形段水流速度则降低。由上述两个仿真可知,对于单个变量出口直径、锥形收缩角的改变,虽未对出口流速,流量产生实质影响,但会显著影响内流场速度分布情况,使得内流场速度变化剧烈程度不同。

2.3.3 出口收缩角对射流流量影响

选取锥形收缩角 $\alpha = 30^\circ$,出口段直径 $d = 3.5$ mm。锥形收缩角 θ 选择 40° 、 45° 、 55° 、 60° ,与原尺寸 $\theta = 50^\circ$ 进行仿真计算,提取压力出口处质量流量,结果如图8所示。

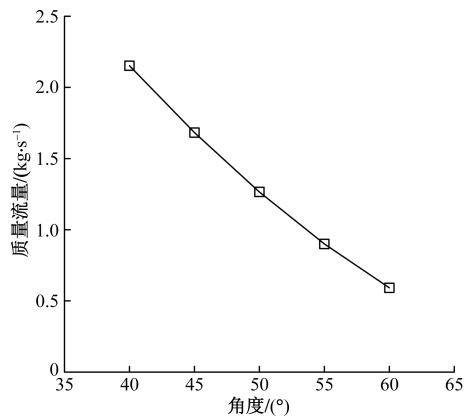


图8 出口收缩角对质量流量影响

Fig. 8 Effect of outlet contraction Angle on mass flow

喷嘴出口收缩段与喷嘴出口段、锥形收缩段的不同之处在于该部位同外界环境相接触,内流场水流在此区域进入外界大气,所以该处水流速度变化最明显。改变出口收缩角的大小不会对内流场速度分布有较大影响,但会改变出流孔的等效面积,进而影响了质量流量。由图8可知,出口收缩角的减小显著提升了质量流量。出口收缩角每改变 5° ,质量流量变化33%,两者的线性关系明显。

3 响应面方法优化喷嘴结构

3.1 方法介绍及变量选取

响应面方法是数学方法与统计理论相结合的产物,通过一系列的多项式建立输入和输出之间的数学模型,确定最佳的工艺参数或条件。响应面法能够拟合出一个近似的包含所需变量的函数来描述响应值。由于响应面法仅输出描述关于变量和目标函数关系的函数,依靠目标函数本身的性质确定最优解,拟合出较高精度的响应关系,因此被广泛地应用于设计优化过程中^[14]。

喷嘴结构参数包括 L_1 、 L_2 、 d 、 α 、 θ 。参数间关联关系可表示为

$$\alpha = 2 \times \frac{180}{\pi} \operatorname{atan}\left(\frac{d}{L_1}\right) \quad (6)$$

表 2 参数设计
Table 2 Parameters design

出口直径/mm	锥形圆锥高/mm	出口圆锥高/mm	锥形收缩角/(°)	出口收缩角/(°)	质量流量/(kg·s ⁻¹)	压降/Pa
3.50	13.40	7.58	29.28	49.54	1.30	21 862 100
3.15	13.40	7.58	26.46	45.11	1.60	21 791 300
3.85	13.40	7.58	32.06	53.82	0.94	21 928 500
3.50	11.00	7.58	35.30	49.54	1.30	21 862 100
3.50	15.80	7.58	24.98	49.54	1.30	21 862 100
3.50	13.40	6.72	29.28	55.02	0.90	21 934 200
3.50	13.40	8.45	29.28	45.00	1.68	21 769 700
3.22	11.45	6.88	31.38	50.09	1.26	21 871 000
3.78	11.45	6.88	36.58	57.62	0.67	21 963 400
3.22	15.35	6.88	23.66	50.09	1.26	21 870 900
3.78	15.35	6.88	27.70	57.62	0.67	21 963 400
3.22	11.45	8.29	31.38	42.41	1.82	21 729 400
3.78	11.45	8.29	36.58	49.08	1.35	21 852 100
3.22	15.35	8.29	23.66	42.41	1.82	21 729 300
3.78	15.35	8.29	27.70	49.08	1.35	21 852 200

表 1 参数约束
Table 1 Parameters constraint

输入参数	参数上限	参数下限
出口段直径/mm	3.85	3.15
锥形段圆锥高/mm	15.8	11.0
出口段圆锥高/mm	8.45	6.72
出口收缩角/(°)	60	40
锥形收缩角/(°)	40	20

$$\theta = 2 \times \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{d}{L_2}\right) \quad (7)$$

影响喷嘴打击性能的物理量包括喷嘴出口流量、喷嘴压降,在此选取的目标变量及目标函数为:目标变量:喷嘴压降 ΔP 与质量流量 q ;目标函数: $\max(\Delta P)$ 及 $\max(q)$ 。参数约束如表 1 所示。

3.2 结构参数设计点

根据表 1 中参数上下限,采用中心复合试验方法,该方法适合多因素多水平的试验方案。形成的试验设计如表 2 所示。

3.3 参数灵敏度分析

由于各输入参数的改变对输出参数影响效果不同,需分析输入输出参数之间敏感性。图 9 为结构参数对质量流量灵敏度曲线。

由图 9 可知,对喷嘴质量流量有影响的输入参数有:喷嘴出口直径、喷嘴出口段圆锥高度。喷嘴锥形段圆锥高度对质量流量影响较小。其中,喷嘴出口直径、喷嘴出口段圆锥高度与质量流量近似呈线性关系。

图 10 为结构参数对喷嘴压降灵敏度曲线。与质量流量灵敏度曲线类似,影响喷嘴压降的因素为喷嘴出口直径,喷嘴出口段圆锥高度。不同的是两

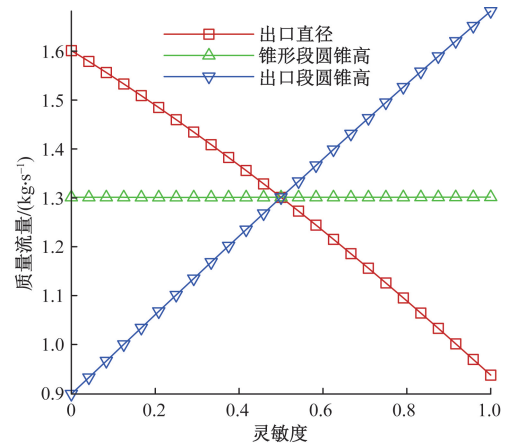


图 9 参数对质量流量灵敏度

Fig. 9 Parameter sensitivity to mass flow

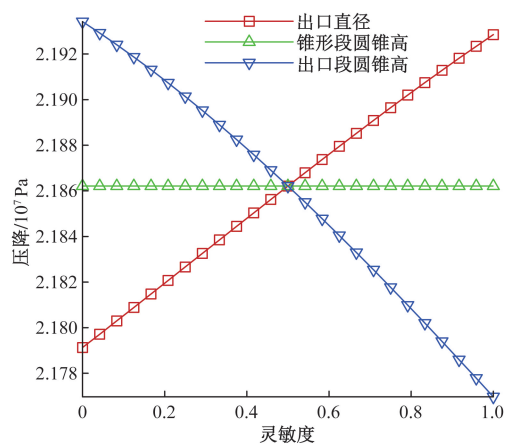


图 10 参数对压降灵敏度

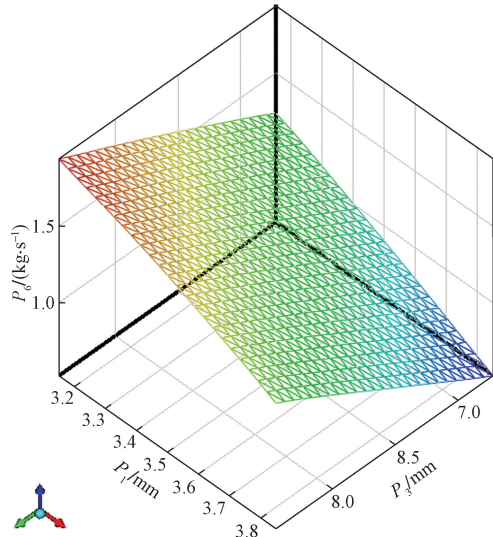
Fig. 10 Parameter sensitivity to static pressure drop

参数与压降灵敏度所显现的线性关系斜率发生转变,而喷嘴锥形段圆锥高度对喷嘴静压降的影响较不明显。

3.4 响应面优化结果

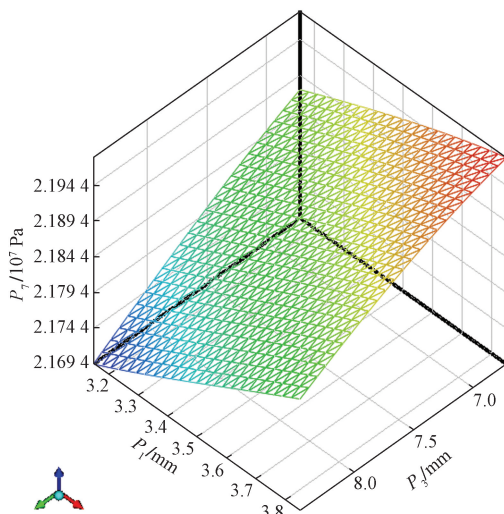
由参数灵敏度曲线,得到锥形段圆锥高度变化对质量流量及压降影响不大。输出喷嘴出口直径、喷嘴出口段圆锥高度对目标变量三维响应面如图 11、图 12 所示。

根据表 2 中参数设计,利用响应面优化得到最优参数组合,对其进行圆整处理,如表 3 所示。



P_1 为出口段直径, P_3 为出口段圆锥高度, P_6 为质量流量
图 11 P_1 、 P_3 对质量流量响应

Fig. 11 P_1 and P_3 respond to the mass flow rate



P_7 为喷嘴压降

图 12 P_1 、 P_3 对压降响应

Fig. 12 P_1 and P_3 respond to pressure drop

表 3 最优参数

Table 3 Optimal parameters

出口直径/ mm	锥形圆锥 高/mm	出口圆锥 高/mm	锥形收缩 角/(°)	出口收缩 角/(°)
3.15	13.56	8.45	26.17	40.93

同时,响应面优化给出了此参数组合下输出参数预测值。为对预测值进行可靠性分析,将该优化点组合作为设计点导入至喷嘴结构参数中进行数值计算,得到预测值与仿真值之间误差,如表 4 所示。

表 4 误差

Table 4 Error

指标	预测值	仿真值	误差/%
质量流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	1.937 1	1.92	-0.6
压降/Pa	21 694 608	21 700 300	0.2

利用响应面分析对参数设计(表 3)中的离散点进行三维曲面预测并得到响应图,根据最大化原则得到喷嘴优化参数。可以看出,预测值与仿真值误差值在合理范围内,可用于后续外流场分析。

4 外流场数值计算及结果分析

4.1 外流场网格划分及边界条件设置

喷嘴内部结构参数优化后,需获取其外流场射流打击力。因此对喷嘴外部射流流场进行数值模拟,在原始喷嘴与优化喷嘴内流场外界衔接一个体积较大的矩形区域,与圆柱区域相比,矩形区域更加符合扁平射流形状。该区域初始由空气填满,以模拟外界大气。为减少数值计算时间,将整个计算区域进行对称处理,即沿着 XZ 平面将其剖分,保留 Y 正方向区域。划分网格后,经过网格无关性验证后,将网格数量确定为 122 051,平均网格质量为 0.78。网格边界命名如图 13 所示,令 XZ 平面上计算区域命名为对称面,喷嘴口面对的外流场区域最远端设定为壁面。其余边界类型与喷嘴内流场仿真时相同。在求解器中采用 VOF 两相流模型,主相设为空气,次相设为液态水,将喷嘴入口处水的体积分数定为 1。初始化类型采用标准初始化,参考位置选择压力入口,并选择局部初始化,将喷嘴内外流场水体积分数设定为 0。建立力矩监视器,目标面选择射流打击壁面。

4.2 外流场仿真结果

对喷嘴进行外部射流场数值模拟,XZ 平面处喷嘴外部射流流场的速度云图如图 14 所示。随着射流距离的增加,水在空气的阻碍下,流动速度减慢,逐渐形成一个扇形射流束。在射流束范围内存在一射流核心区,射流核心区内射流水的速度最大,对钢坯的冲击力最大,除鳞效果最为显著。

XY 平面处喷嘴外部射流流场的速度云图如图 15 所示,可以看出,射流在 Y 方向上分布较为扁平,在径向距离上未发生波动。射流中心线含水量高,流体不受空气剪切作用,因而速度稳定。随着

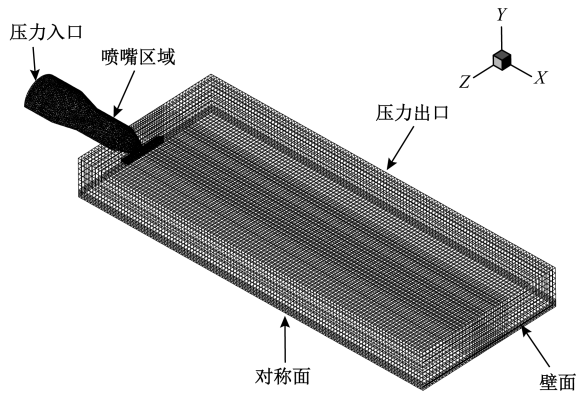


图 13 外流场网格

Fig. 13 Outflow field grid

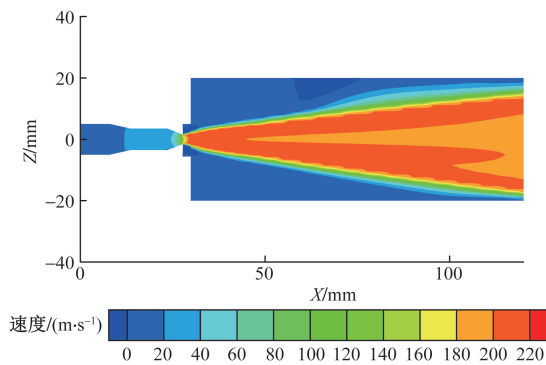


图 14 XZ 平面速度分布

Fig. 14 XZ plane velocity distribution

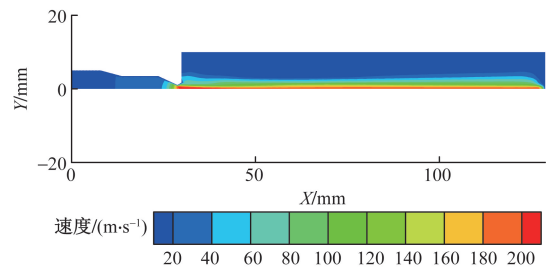


图 15 XY 平面速度分布

Fig. 15 XY plane velocity distribution

径向距离增加,水流带动空气流动,速度逐渐减缓。在云图右侧,射流撞击壁面,流速大幅度降低。经力矩监视器计算,原始喷嘴射流总打击力为 94.91 N,优化后喷嘴总打击力为 143 N。

4.3 数值模拟验证

在对喷嘴射流速度及打击力完成数值模拟后,通过理论计算公式验证。将 $\Delta P = 2.18 \times 10^7 \text{ Pa} = 2.18 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$ 代入式(3)得到理论射流速度 v 。其次计算射流打击力,将质量流量 q (单位: kg/s) 换算为流量 Q (单位: L/min),连同射流速度 v 代入式(2)分别得到喷嘴优化前后的理论打击力。需注意的是,由于仿真打击面为实际区域面积的 $\frac{1}{2}$,因

此计算理论总打击力后采取其数值的 $\frac{1}{2}$ 进行对比,表 5 为理论值与仿真值的对比。

表 5 数值验证

Table 5 Numerical verification

指标	理论值	仿真值	误差/%
射流速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	206.7	209.0	1.1
优化前打击力/N	89.86	94.91	5.32
优化后打击力/N	132	143	7.7

5 结论

利用响应面分析对扇形喷嘴结构参数进行优化,得出以下结论。

(1) 将参数化设计与中心复合试验方法结合。缩短了喷嘴流场重复建模及网格划分等前处理时间,便于研究多个参数共同作用下流场特性。

(2) 基于内流场的单因素分析,发现喷嘴结构参数中的出口段直径,锥形收缩角是影响内流场速度分布的主要因素,但对喷嘴流量影响较小。出口收缩角影响着喷嘴流量,对内流场速度分布影响不大。

(3) 基于中心复合试验设计方法,得到三因素两水平参数设计表,展现了不同因素对喷嘴的质量流量与压降的敏感程度。通过灵敏度曲线可知,喷嘴质量流量与静压降对出口段直径,出口收缩角较为敏感,且线性关系明显,但对锥形收缩角敏感性较低。

(4) 利用响应面优化得到了喷嘴最佳结构参数,并根据理论打击力公式对其进行验证。得到出口段直径 d 为 3.15 mm、锥形收缩角 α 为 26.17°、出口收缩角 θ 为 40.93°。建立外流场流体计算区域,测得射流打击力由原来的 94.91 N 提升至优化后的 143 N。

参考文献

- [1] 杨帆. 热轧带钢生产工艺及常见质量问题探讨[J]. 模具制造, 2023, 23(4): 76-79.
Yang Fan. Production process and common quality problems of hot rolled strip[J]. Die & Mould Manufacture, 2023, 23(4): 76-79.
- [2] 董永刚, 仪帅, 栾嘉宾, 等. 钢轨高压水除鳞过程射流冲击流场及冲击压力分布研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(2): 144-153.
Dong Yonggang, Yi Shuai, Luan Jiabin, et al. Study on jet flow field and impact pressure distribution of rail high pressure water descaling process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(2): 144-153.
- [3] 衣正尧, 李峰, 张梦, 等. 船舶喷涂机器人扇形喷嘴内射流模拟对比分析[J]. 机床与液压, 2022, 50(21): 43-47.

- Yi Zhengyao, Li Feng, Zhang Meng, et al. Comparative analysis of jet simulation in fan-shaped nozzle of ship spraying robot[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2022, 50(21): 43-47.
- [4] 周慧宇, 杜岩, 陈淑楠, 等. 结构参数对扇形喷嘴的射流性能影响研究[J]. *宽厚板*, 2023, 29(3): 15-22.
Zhou Huiyu, Du Yan, Chen Shunan, et al. Influence of structural parameters on jet performance of fan-shaped nozzles[J]. *Wide and Heavy Plate*, 2023, 29(3): 15-22.
- [5] Shi X D. Research on geometrical parameters effect of fan nozzle jet performance based on orthogonal experiment [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 13: 119-126.
- [6] 梁博健, 高殿荣. 高压水除鳞喷嘴结构参数对喷嘴射流性能的影响[J]. *中国机械工程*, 2018, 29(24): 2939-2946.
Liang Bojian, Gao Dianrong. Effects of structural parameters on the high-pressure water descaling nozzle performance [J]. *China Mechanical Engineering*, 2018, 29(24): 2939-2946.
- [7] 王博, 王卫强, 徐鑫. 渐缩型气动喷砂喷嘴冲蚀模拟分析[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(1): 183-188.
Wang Bo, Wang Weiqiang, Xu Xin. Erosion simulation analysis of tapered pneumatic blasting nozzle[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(1): 183-188.
- [8] 胡坤, 艾志久, 喻久港. 基于响应面方法圆柱形喷嘴结构优化研究[J]. *机床与液压*, 2014, 42(1): 27-30.
Hu Kun, Ai Zhijiu, Yu Jiugang. Study for cylindrical nozzle structure optimization based on response surface method [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2014, 42(1): 27-30.
- [9] 于兰英, 周万阳, 邓斌, 等. 基于CFD的清洗用扇形喷嘴清洗参数研究[J]. *机床与液压*, 2016, 44(13): 164-167.
Yu Lanying, Zhou Wanyang, Deng Bin, et al. Study in cleaning parameters of flat fan nozzle used in cleaning based on CFD [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2016, 44(13): 164-167.
- [10] Huang Y Q, Li Z C, Sun J, et al. Optimization design and experimental study of self-oscillating cavitating jet descaling nozzle based on cleaning operation[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 259: 139027455.
- [11] Wang A, Sun P, Zhang Z, et al. Numerical simulation and experimental study on high-pressure water jet descaling in coal mine drainage pipeline[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2020, 46(1): 1-18.
- [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)*, 2023, 37(8): 138-147.
Shen Zhenghao, Ding Guoqing, Chen Xin, et al. Research of influence between fan nozzle structure and fog field uniformity [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(8): 138-147.
- [13] 薛胜雄, 黄汪平, 陈正文. 高压水射流技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
Xue Shengxiong, Huang Wangping, Chen Zhengwen. High pressure water jet technology and application [M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [14] 唐应时, 朱彪, 朱位宇, 等. 基于响应面方法的转向梯形优化设计[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(7): 2601-2606.
Tang Yingshi, Zhu Biao, Zhu Weiyu, et al. Optimization of ackerman steering linkage based on RSM [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(7): 2601-2606.