

# 染色机喷嘴缝隙的流动分析与结构优化

褚利权, 钱 淼, 赵 航

浙江理工大学机械工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年11月24日; 录用日期: 2023年12月10日; 发布日期: 2024年1月16日

## 摘 要

为了提高染色机环形喷嘴的冲击和牵引性能, 通过数值模拟分析研究了四种环形缝隙形状(矩形、锥形、锥直形、维多辛斯基形)喷嘴性能的差异, 并对锥直形喷嘴结构参数进行了正交实验, 还建立了回归预测模型, 并利用算法进行了多目标优化, 得到了最优结构组合, 最后开展了数值模拟验证。结果表明: 在不同性能指标下, 锥形、锥直形和维多辛斯基形喷嘴均大于矩形喷嘴, 且锥直形和维多辛斯基形喷嘴两者性能接近; 优化后的锥直形喷嘴在缝隙入口大小为6.00 mm、直段长度为2.00 mm, 出口间隙为1.50 mm以及射流角度为40°时, 性能有了进一步的提升。

## 关键词

染色机喷嘴, 环形缝隙形状, 数值模拟, 优化

# Flow Analysis and Structural Optimization of Gaps in Dyeing Machines Nozzle

Liquan Chu, Miao Qian, Hang Zhao

School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Nov. 24<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 10<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 16<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to improve the impact and traction performance of dyeing machine annular nozzles, the differences in the performance of nozzles with four annular gap shapes (Rectangular, Conical, Cone Straight, and Vidocinsky) were investigated through numerical simulation analysis, then orthogonal experimental analysis was carried out on the structural parameters of cone-straight nozzles, and a regression prediction model was also established, and a multi-objective optimization was carried out by using an algorithm to get the optimal structural combinations. And build related experiments to verify the simulation model. The results show that: under different per-

formance indexes, the conical, conical straight and Vidocinsky nozzles are larger than rectangular nozzles, and the performance of conical straight and Vidocinsky nozzles are close to each other; the optimized cone straight nozzles with a gap inlet size of 6.00 mm, a straight section length of 2.00 mm, a gap outlet size of 1.50 mm and a jet angle of 40° provide a further performance improvement.

## Keywords

Dyeing Machine Nozzle, Annular Gap Shape, Numerical Simulation, Optimization

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

在当下的实际工程应用中, 利用水射流技术的不同类形喷嘴已广泛应用于破岩[1]、注浆[2] [3]、切割[4]、采矿钻井[5]、农业[6]等多个不同领域, 多年来取得了显著的社会效益和经济效益。而不同结构参数的喷嘴具有不同的水力性能, 其水力性能直接决定了喷嘴的运行效率。因此, 选择合适的喷嘴类形并优化其结构参数, 以尽可能地提高性能是非常必要的。

目前研究较多的就是圆管喷嘴, 此种喷嘴能提供强大的冲击力, 在除锈、清洗等方面有着显著的效果, 因此也就成了相关研究的重点。Wen Jiwei 等人[7]对直锥喷嘴与其他形状喷嘴的结构和水力性能进行了研究, 得出了直锥喷嘴的最佳结构, 发现其产生的水射流冲击力随其出口直径的增大而显著增大。Luyun Huang 等人[8]根据超高压水射流除锈喷嘴的工作特点, 对喷嘴的水动力特性进行了三维仿真研究, 发现靶距和射流角对壁面剪应力大小的影响最为显著。Xin Qiang 等人[9]提出了一种锥形等离子体射流喷嘴, 并通过单因素仿真分析了喷嘴几何形状对射流性能的影响, 最后通过正交实验对喷嘴结构进行了进一步的优化。张吉智等人[10]对不同结构喷嘴进行了数值模拟, 获得了不同结构喷嘴内外壁面的压力场、速度场分布, 结果表明相比圆柱形喷嘴, 圆锥和余弦形喷嘴射流反推特性更好。还有诸多研究人员对圆管喷嘴进行了研究, 分析了出口直径、靶距、工况、形状等影响因素, 再通过设计试验、数值模拟、理论计算和实验验证, 进一步得出了圆管喷嘴的最优结构参数, 以获得最佳喷嘴性能。

不同于常见的圆管喷嘴圆柱射流, 还有一类为环形狭缝射流, 环形射流泵、喷气(水)织机等设备也均利用了此技术。He Shanshan 等人[11]为了减少喷气织机的回流现象, 设计了一种双喉口的新形主喷嘴结构, 通过用负压值和负压区长度来评价回流现象的强度, 验证了新结构负压区长度更短, 负压值更小, 引纬能力更强。Yu Meihong 等人[12]通过控制变量优化算法对 R1234yf 喷射器的面积比和喷嘴出口位置在内的几何参数进行优化, 以提高其性能。最终结果使喷射器的性能比优化前的夹带率提高了约 17%。陈亮[13]设计了一种新形的双喷嘴芯串联作用的主喷嘴, 并对其引纬流场进行数值模拟和实验分析, 发现在合理的压力分配下, 新形主喷嘴中气流牵引力能够得到提升, 且耗气量得到了有效控制。针对环形射流泵和喷气(水)织机上的环形狭缝射流, 诸多研究重心都是在其喷嘴的整体结构, 通过设计与优化, 使喷嘴性能得到进一步提升。

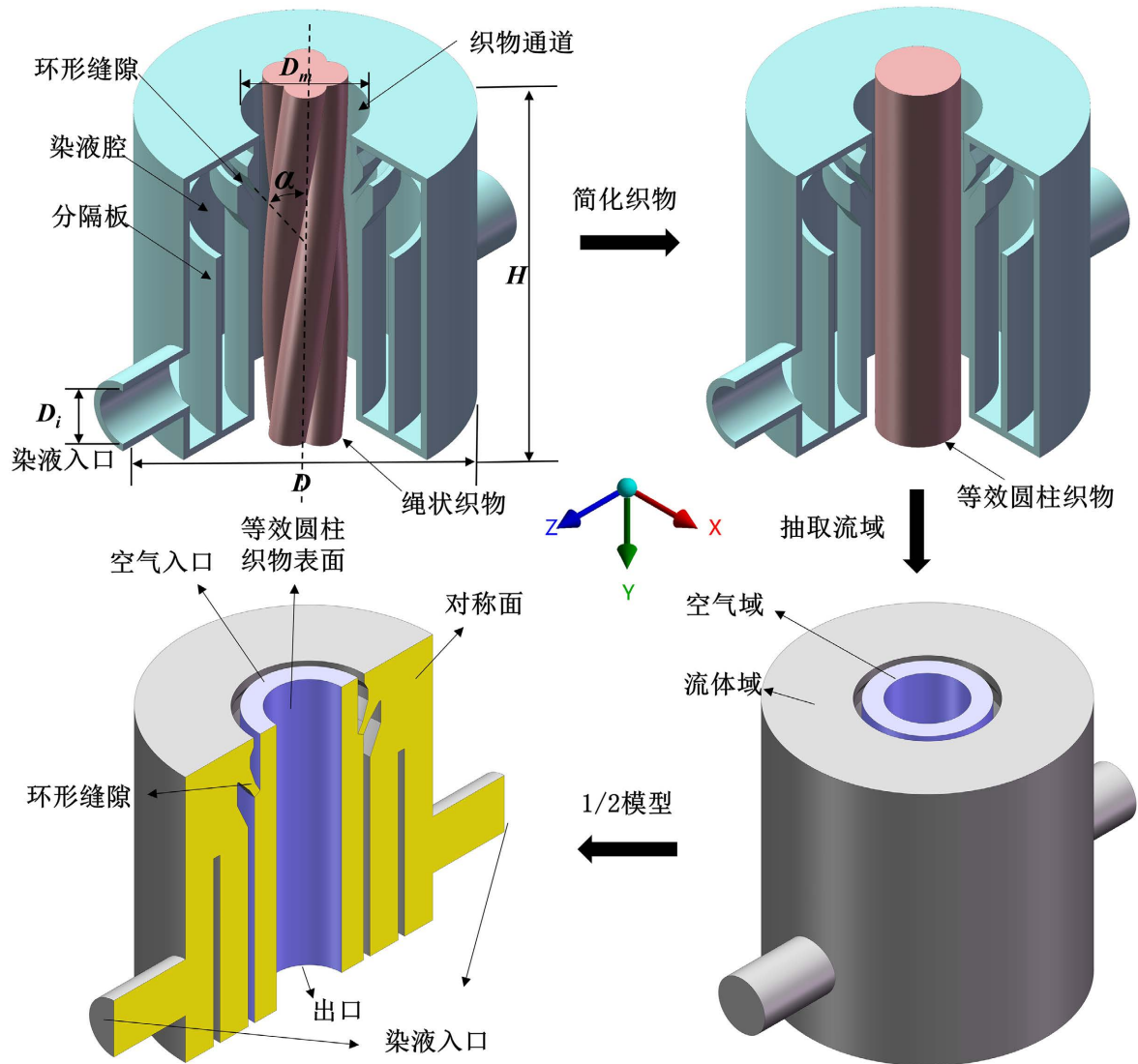
综上所述, 国内外对喷嘴结构设计进行了大量的研究, 研究结果表明, 通过结构设计和优化可以明显改善喷嘴的性能。在染色机中, 环形喷嘴是染色机的核心部件, 对染色性能起着至关重要的作用[14] [15] [16]。然而, 目前对染色机喷嘴结构和形状设计的研究较少。为此, 本文通过数值模拟的方法对染色机的

喷嘴的环形缝隙结构进行了设计, 并对不同环形缝隙形状的喷嘴进行了数值模拟, 分析了其性能区别, 随后对较优的环形缝隙形状进行优化, 获得了较优性能的喷嘴。

## 2. 建模与仿真

### 2.1. 模型建立

如图 1 是染色机圆形喷嘴结构及其计算域, 染液经 2 个入口进入, 先经分隔板的缓冲作用, 然后进入染液腔内, 待染液腔充满染液后, 最后从环形缝隙射流而出。在通道内的织物收到高速染液的冲击后, 开始运动, 同时织物吸附染液, 从而实现织物运动的同时进行染色。图中喷嘴直径  $D$  为 80 mm, 喷嘴高度  $H$  为 80 mm, 织物入口直径  $D_m$  为 30 mm, 染液入口直径  $D_i$  为 15 mm, 射流角度  $\alpha$  为  $30^\circ$ 。



**Figure 1.** Dyeing machine nozzle structure and calculation domain  
**图 1.** 染色机喷嘴结构与计算域

本文利用 SolidWorks 提取染色机喷嘴的流域。为了更好地研究染液从环形缝隙喷射到织物上的影响, 建立了一个带有绳状织物的空气域。但是, 为了研究方便, 使用刚性圆柱体代替绳状织物[17]。因此, 计

算域如上图所示, 考虑到模型具有对称性, 为了减少网格数量和提高计算效率, 只选择了一半结构进行仿真分析。

为了研究不同环形缝隙流道形状对染色机喷嘴喷射性能的影响, 设计了图 2 中的四种不同环形缝隙流道形状, 分别是矩形、锥形、锥直形和维多辛斯基形。矩形因加工制造方便, 是目前染色机喷嘴中应用最广泛的一种缝隙形状, 而其余 3 种缝隙形状鲜有应用到环形喷嘴上的案例。图中缝隙长度  $l$  为 8 mm, 缝隙出口间隙  $b$  为 2 mm, 缝隙入口大小  $d$  为 4 mm, 直段长度  $l_1$  为 3 mm, 其中维多辛斯基形由维多辛斯基曲线方程确定, 再通过镜像对称曲线组合形成。

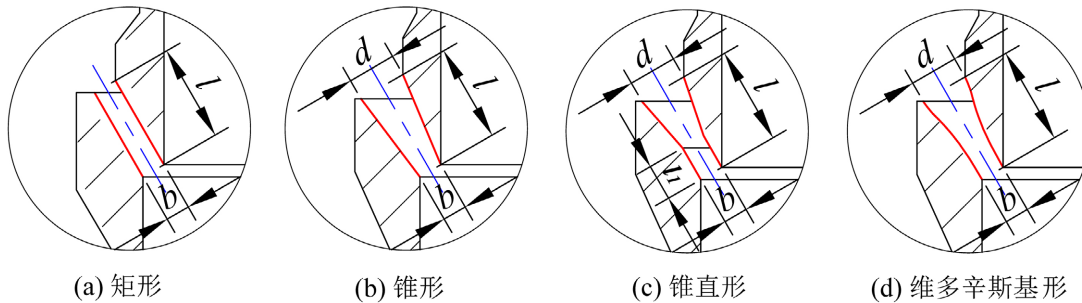


Figure 2. Annular gap shapes  
图 2. 环形缝隙形状

## 2.2. 仿真设置

由于染液从环形缝隙喷射到织物上时, 会与周围的空气发生动能的交换, 因此本文选用广泛运用的  $k-\epsilon$ -RNG 双方程湍流模型[18] [19] [20]和 Mixture 多相流模型[21] [22] [23]。本文用水代替染液进行分析, 喷嘴染液入口设置为压力入口为 0.1 MPa, 水相体积分数设定为 1; 空气入口设定为 0 Pa 的压力入口, 水相体积分数设定为 0; 出口设置表压为 0 Pa。

本文利用 ANSYS-Fluent 2021 软件进行计算, 采用 Coupled 稳态算法求解上述控制方程, 梯度选择 Least Squares Cell Based, 压力选择 PRESTO, 动量、湍流动能和湍流耗散率均为二阶迎风格式, 体积分数采用一阶迎风格式, 变量残差的收敛准则小于  $10^{-5}$ 。

## 2.3. 评价指标

由于无法直接从数值模拟中得到喷嘴对织物的牵引力, 因此本文选取了三个评价指标来反映喷嘴性能, 分别是环形缝隙出口速度  $V_0$ 、等效圆柱织物表面上的最大冲击压力  $P_{\max}$  和 Y 轴方向上的最大剪切力的代数和  $\Delta w$ 。环形缝隙出口速度  $V_0$  在本文中利用 Ansys Fluent 软件通过计算其出口的面积加权平均速度计算得出。

为了能够量化不同环形缝隙形状对等效圆柱织物表面产生的冲击效果, 在等效圆柱织物表面等间距设置了多条沿着 Y 轴方向的检测轴线, 如图 3(a)所示, 每条检测轴线上又等距布置了 500 个检测点, 并将所有检测轴线上沿圆周对应点的数据进行求和再对其平均, 从而得到一条由平均值组成的等效检测轴线, 并以此检测轴线上的数据进行分析。因此, 可以从等效检测轴线上的数据得到不同环形缝隙形状对等效圆柱织物表面产生的压力分布, 从而得到最大冲击压力  $P_{\max}$ 。

在本文中, 因射流冲击的是圆柱面而不是平板, 因此不考虑 X 与 Z 方向上的剪切力作用, 定义沿 Y 轴负方向的剪切力, 阻碍织物运动; 沿 Y 轴正方向的剪切力, 加速织物运动。为了更好的反应不同流道形状的冲击性能, 用等效检测轴线上的 Y 轴正负方向上两个最大剪切力的差—— $\Delta w$  来表示不同流道射流冲击效果:

$$\Delta w = W_{\max\_Y+} + W_{\max\_Y-} \tag{1}$$

式中： $W_{\max\_Y+}$ 表示沿 Y 轴正方向上的最大剪切力； $W_{\max\_Y-}$ 表示沿 Y 轴正方向上的最大剪切力。

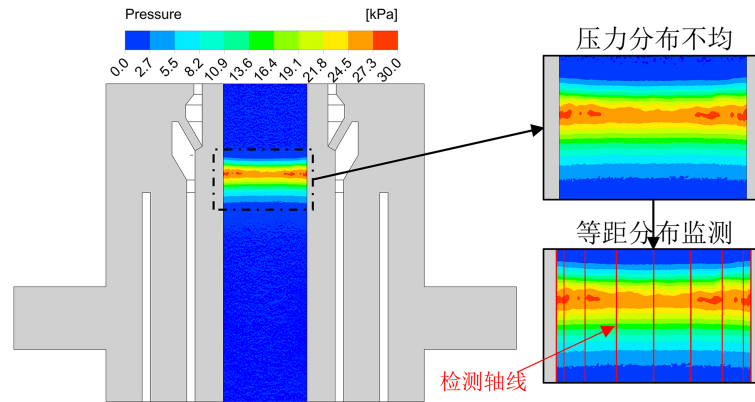


Figure 3. Data collection methods  
图 3. 数据采集方式

### 2.4. 模拟结果与分析

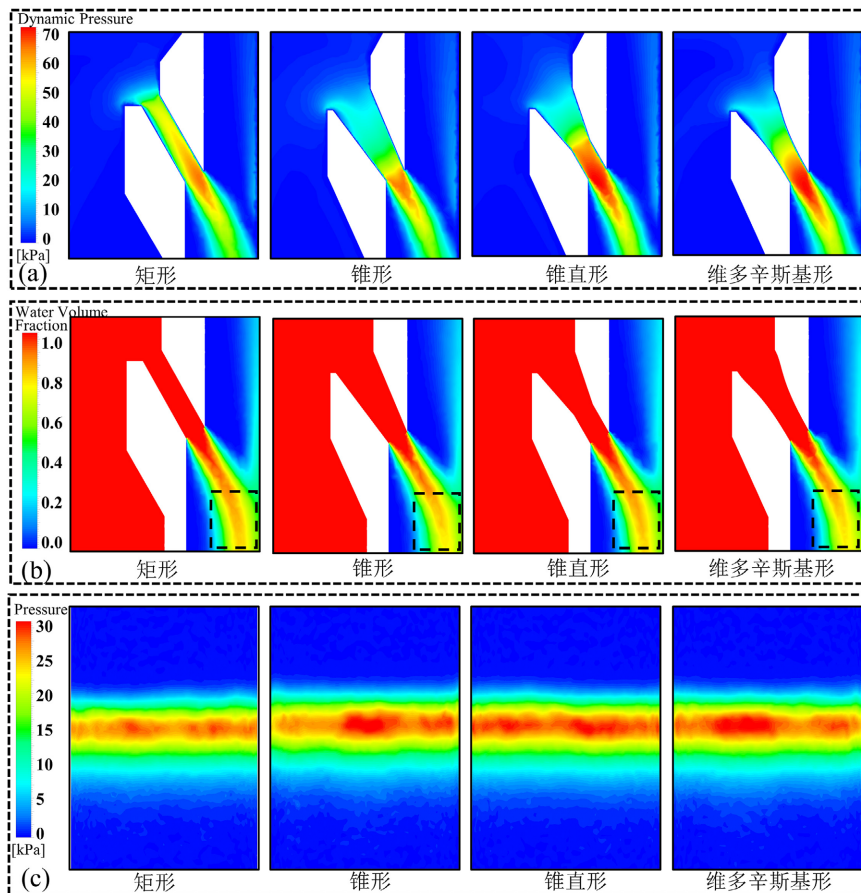


Figure 4. Comparison of different annular gap shapes. (a) Dynamic pressure, (b) Water volume distribution, (c) Pressure distribution  
图 4. 不同环形缝隙形状对比。(a) 动压, (b) 水相分布, (c) 压力分布



如图 4(a)中可以看出, 矩形缝隙中的水流的高速区主要集中在缝隙中心, 而锥形和维多辛斯基形的高速区集中在出口处, 而锥直形由于缝隙流径在直段  $l_1$  突然变化, 使得直段处的水流受到挤压而导致速度迅速加快。从图中也可发现, 由于水流在此压强下为不可压缩流体, 因此可以发现锥直形和维多辛斯基形缝隙出口速度明显大于矩形和锥形, 出口的高速区长度也更长, 且两者的  $V_0$  接近, 分别为 11.48 m/s 和 11.49 m/s。

而从图 4(b)的水相分布来看, 经四种不同环形缝隙形状的射流在冲击到等效圆柱织物表面前, 其中心水相体积分数无明显区别, 但在冲击后, 锥形和维多辛斯基形的射流其中心的水相体积分数较矩形和锥直形有所下降, 说明在射流发生了扩散, 损失了动能。

从图 4(c)压力分布来看, 锥直形喷嘴在等效圆柱织物表面造成的冲击压力分布均匀, 矩形、锥形和维多辛斯基形都有不同程度的压力分布不均的现象, 这是因为一方面, 水流从缝隙射流后会扩散, 此时射流的形态会发生变化, 另一方面环形射流冲击到圆柱面上后会互相作用, 导致冲击压力分布不均匀。从  $P_{\max}$  的具体数值来看, 矩形的  $P_{\max}$  为 26.49 kPa, 锥形和维多辛斯基形接近, 分别为 27.71 kPa 和 27.91 kPa, 而锥直形  $P_{\max}$  最大, 较矩形提高了 6.15%, 达到了 28.12 kPa。

从图 5 中可以看出, 四种喷嘴在等效圆柱织物表面产生的剪切力在 Y 负方向上无明显区别, 均有剪切力分布不均的现象出现。而在 Y 正方向上, 锥直形喷嘴产生的剪切力分布较均匀, 而矩形、锥形和维多辛斯基形喷嘴产生的剪切力分布有局部集中的现象, 这是因为冲击压力分布不均导致剪切力分布也产生了差异。

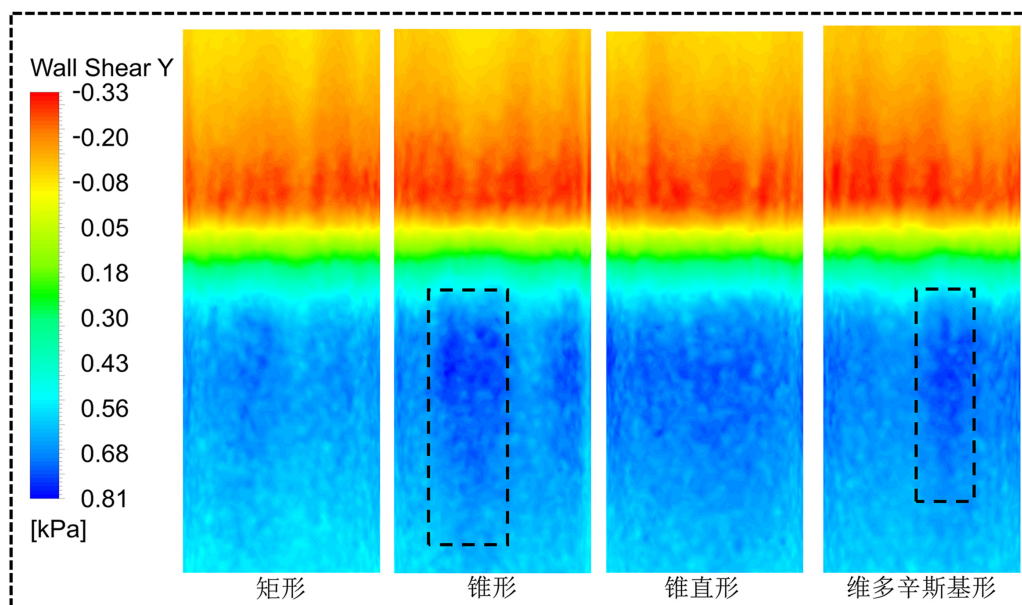
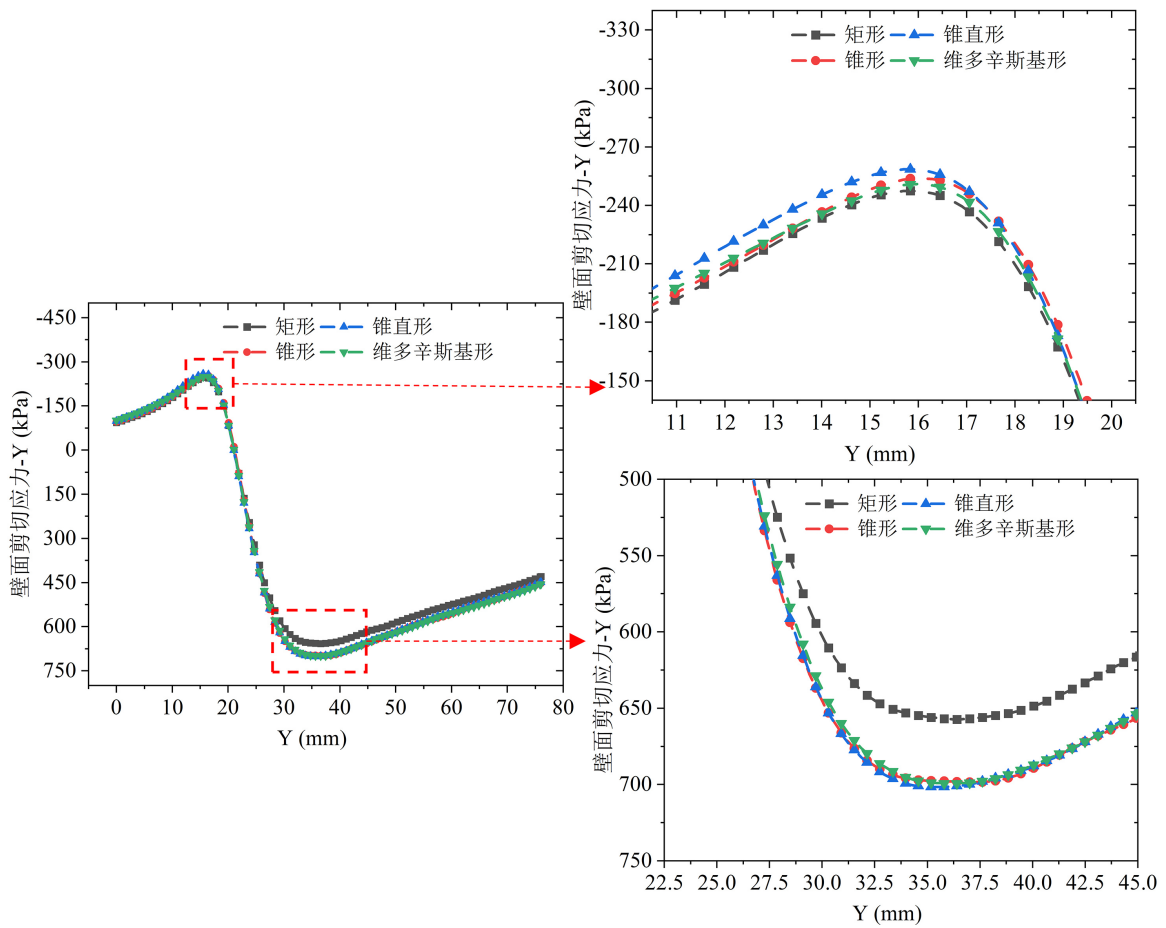


Figure 5. Y-direction wall shear stress distribution cloud

图 5. Y 方向壁面剪切力分布云图

从图 6 可以看到, Y 负方向上, 剪切力大小各形状喷嘴之间接近; Y 正方向上, 矩形喷嘴产生的剪切力最小, 锥形、锥直形和维多辛斯基形喷嘴产生的剪切力互相接近, 计算  $\Delta w$  的值可知, 矩形喷嘴的  $\Delta w$  为 0.41 kPa, 锥形、锥直形和维多辛斯基形喷嘴的  $\Delta w$  对比矩形喷嘴均提升了约 8.90%。

综上所述, 锥直形喷嘴性能优于矩形、锥形和维多辛斯基形, 造成的射流冲击力更大, 且受力分布均匀, 可使织物运动平稳, 因此下文以锥直形喷嘴为对象进行下一步分析。



**Figure 6.** Y-direction wall shear stress distribution curve  
**图 6.** Y 方向壁面剪切力分布曲线。

### 3. 喷嘴优化

#### 3.1. 正交实验研究与分析

因锥直形其结构参数的变化极易影响射流性能[24], 因此建立正交实验, 来研究锥直形结构组成在缝隙整体长度  $l$  不变的情况下, 缝隙入口大小  $d$ 、直段长度  $l_1$ 、出口间隙  $b$  以及射流角度  $\alpha$  对喷嘴性能的影响。建立的水平因素表如表 1 所示, 4 个因素加 1 个空白对照组共 5 个因素, 根据正交设计原理, 5 因素 4 水平需进行 16 次实验, 记作  $L_{16}(4^5)$ 。16 次实验结果如表 2 所示。

**Table 1.** Test factors and levels  
**表 1.** 试验因素及水平

	A-入口大小 $d$ - mm	B-直段长度 $l_1$ - mm	C-出口大小 $b$ - mm	D-射流角度 $\alpha$ - °
水平 1	3	2	1.50	25
水平 2	4	3	1.75	30
水平 3	5	4	2.00	35
水平 4	6	5	2.25	40

**Table 2.** Results of orthogonal experiments  
**表 2.** 正交实验结果

编号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	$V_o$ -m/s	$P_{\max}$ -kPa	$\Delta w$ -Pa
S1	3	2	1.5	25	12.28	19.46	395.14
S2	3	3	1.75	30	11.86	27.09	422.05
S3	3	4	2	35	11.37	34.47	436.69
S4	3	5	2.25	40	10.94	41.07	394.80
S5	4	2	1.75	35	11.87	34.23	454.44
S6	4	3	1.5	40	12.24	39.25	463.52
S7	4	4	2.25	25	11.06	21.77	400.11
S8	4	5	2	30	11.44	28.19	423.33
S9	5	2	2	40	11.49	41.38	432.54
S10	5	3	2.25	35	11.08	34.95	407.66
S11	5	4	1.5	30	12.15	25.58	423.15
S12	5	5	1.75	25	11.72	20.20	394.29
S13	6	2	2.25	30	11.12	28.40	419.28
S14	6	3	2	25	11.60	22.57	412.23
S15	6	4	1.75	40	11.80	40.09	442.46
S16	6	5	1.5	35	11.99	31.68	431.26

极差分析具有计算简单, 结果直观等优点[25], 因此采用极差分析来处理上述实验数据, 其计算公式如下:

$$R_j = \max \{T_{j1}, T_{j2}, T_{j3}, T_{j4}\} - \min \{T_{j1}, T_{j2}, T_{j3}, T_{j4}\} \quad (2)$$

式中,  $T_{jm}$  为第  $j$  列因素  $m$  水平的实验指标平均值,  $R_j$  为第  $j$  列水平因素变化从而影响评价指标幅度的大小。其各指标下的极差分析结果如表 3 所示。以  $V_o$  为指标时, 锥直形缝隙形状不同结构参数对  $V_o$  的影响先后顺序为出口间隙  $b$ 、直段长度  $l_1$ 、射流角度  $\alpha$ 、缝隙入口大小  $d$ 。  $T_{C1} > T_{C2} > T_{C3} > T_{C4}$ , 说明  $V_o$  随着间隙的增大而减小, 以  $V_o$  为指标时, 其最优组合为入口大小 4 mm, 直段长度 3 mm, 出口间隙 1.50 mm, 射流角度  $25^\circ$ 。

**Table 3.** Range analysis  
**表 3.** 极差分析

	$V_o$ -m/s				$P_{\max}$ -kPa				$\Delta w$ -Pa			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
$T_{j1}$	11.61	11.69	12.17	11.66	30.53	30.87	28.99	21.00	412.17	425.35	428.27	400.44
$T_{j2}$	11.65	11.69	11.81	11.64	30.86	30.97	30.41	27.32	435.35	426.37	428.31	421.95
$T_{j3}$	11.61	11.60	11.47	11.58	30.53	30.48	31.65	33.83	414.41	425.60	426.20	432.51
$T_{j4}$	11.63	11.52	11.05	11.62	30.69	30.29	31.55	40.45	426.31	410.92	405.47	433.33
R	0.05	0.17	1.12	0.09	0.34	0.68	2.66	19.45	23.18	15.45	22.84	32.89



以  $P_{\max}$  为指标时, 锥直形缝隙形状不同结构参数对  $P_{\max}$  的影响先后顺序为射流角度  $\alpha$ 、出口间隙  $b$ 、直段长度  $l_1$ 、缝隙入口大小  $d$ 。一般研究当中射流角度的改变需要控制靶距, 但由于染色机喷嘴的织物通道的直径是由所染织物的克重决定的, 而且实际运行过程中织物会在织物通道内摆动[26], 造成靶距实时发生变化。因此, 为了便于研究, 在仿真中假设织物一直处于喷嘴中心, 即不考虑因射流角变化造成靶距的变化。因此在以  $P_{\max}$  为指标时, 射流角度  $\alpha$  的影响最大, 且随着角度的增大,  $P_{\max}$  也随之增大。以  $P_{\max}$  为指标时, 其最优组合为入口大小 4 mm, 直段长度 3 mm, 出口间隙 2.00 mm, 射流角度  $40^\circ$ 。

以  $\Delta w$  为指标时, 锥直形缝隙形状不同结构参数对  $\Delta w$  的影响先后顺序为射流角度  $\alpha$ 、缝隙入口大小  $d$ 、出口间隙  $b$ 、直段长度  $l_1$ , 其最佳水平组合为入口大小 4 mm, 直段长度 3mm, 出口间隙 1.75 mm, 射流角度  $40^\circ$ 。

通过极差分析, 发现在不同指标下, 锥直形喷嘴的最佳结构参数组合有所不同, 这是因为缝隙出口速度  $V_0$  最大时, 最大冲击压力  $P_{\max}$  与最大剪切力代数和  $\Delta w$  都不是最大值, 而且  $P_{\max}$  影响喷嘴对织物的上染效果,  $\Delta w$  影响喷嘴对织物的牵引能力, 因此确定锥直形喷嘴的最佳结构参数时, 以  $P_{\max}$  与  $\Delta w$  这两项指标作为优化目标。

### 3.2. 建立回归预测模型

由于涉及以  $P_{\max}$  与  $\Delta w$  这两项指标作为优化目标, 因此需先建立其各自的回归预测模型。目前许多数据分析软件具有能够基于多种方式对数据进行分析、归纳、预测、调整、改进等功能, 因此本文利用 Minitab 软件对 16 组数据进行回归预测模型的建立。考虑到锥直形缝隙形状四个参数对不同评价指标的影响, 以及正交实验的分析, 得知四个影响因素之间可能存在交互作用, 因此采用二次多元回归模型, 分别对  $P_{\max}$  和  $\Delta w$  建立预测模型, 得到如下模型:

$$P_{\max} = -38.29 - 0.2228l_1 + 26.34b + 1.2973\alpha - 6.07b^2 \tag{3}$$

$$\Delta w = -523.6 + 11.57d + 12.17l_1 + 495.6b + 28.5\alpha - 83.1b^2 - 0.2069\alpha^2 - 3.68d \cdot l_1 - 6.938b \cdot \alpha \tag{4}$$

在正交实验各因素的水平范围内, 随机选取了 8 种参数组合来验证模型, 其结果如表 4 所示, 其中  $P_{\max}$  平均误差为 1%, 最大误差 3.48%;  $\Delta w$  平均误差 1.24%, 最大误差为 2.64%。两者其平均误差均小于 2%, 表明预测模型精度较高, 可以用于求解喷嘴最佳参数组合。

Table 4. Regression prediction model validation

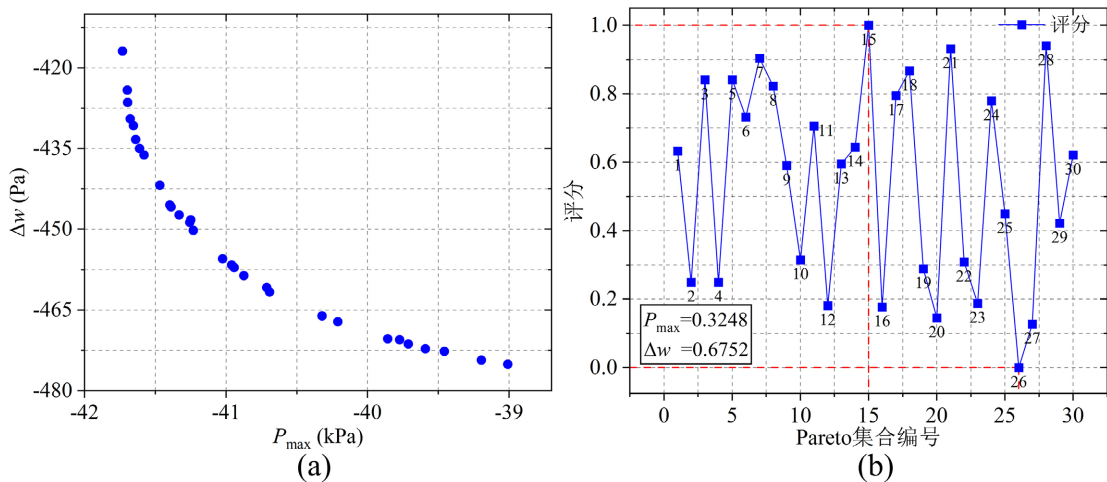
表 4. 回归预测模型验证

编号	A	B	C	D	$P_{\max}$ (模拟)	$P_{\max}$ (预测)	误差 (%)	$\Delta w$ (模拟)	$\Delta w$ (预测)	误差 (%)
1	3	2	1.75	30	26.76	27.69	3.48	425.91	430.72	1.12
2	3	5	2.00	35	34.24	34.40	0.48	425.97	433.95	1.84
3	4	2	1.50	25	19.50	19.55	0.24	397.69	397.02	-0.17
4	4	4	2.25	35	34.90	34.76	-0.41	415.26	404.57	-2.64
5	5	2	1.75	40	40.89	40.66	-0.56	448.35	457.90	2.09
6	5	3	2.25	25	22.10	22.01	-0.41	404.88	402.89	-0.49
7	6	3	2.00	40	41.39	41.33	-0.15	432.04	428.81	-0.75
8	6	5	1.5	30	24.81	25.37	2.26	412.70	409.28	-0.84

### 3.3. 多目标优化

得到  $P_{\max}$  与  $\Delta w$  的目标函数后, 本文利用 NSGA-II 算法进行多目标优化。NSGA-II 算法的种群数量为 200, 迭代次数为 1000 次, 交叉比例为 0.7, 变异比例为 0.2, Pareto 前沿比例为 0.15, 并规定了缝隙入口大小  $d$  上下边界范围为 3 mm~4 mm、直段长度  $l_1$  范围为 2 mm~5 mm 和出口间隙  $b$  为 1.50 mm~2.25 mm, 以及外部参数射流角度  $\alpha$  范围为  $25^\circ\sim 40^\circ$ 。经过计算, 得到了如图 7(a)所示的包含 30 个解的 Pareto 前沿最优集合。

由于实际应用中, 需从 Pareto 前沿最优集合中选择一个最优解来作为最终结果。这就需要对多目标进行决策过程, 本文中采用了基于熵权法的 TOPSIS 方法对 Pareto 前沿最优集合中的解进行客观赋值后进行评分, 以此来得到其最优解。经过计算, 得出最大冲击压力  $P_{\max}$  权重为 0.325, 最大剪切和  $\Delta w$  权重为 0.675, 其 30 个解各自所得评分如图 7(b)所示, 其中第 26 号参数组合评分最差为 0, 第 15 号最好评分为 1, 其对应的结构参数为: 缝隙入口大小  $d$  为 6.00 mm、直段长度  $l_1$  为 2.00 mm, 出口间隙  $b$  为 1.50 mm 以及射流角度  $\alpha$  为  $40^\circ$ 。



**Figure 7.** The Pareto set and its score: (a) Pareto set, (b) Score  
**图 7.** Pareto 集合及其评分: (a) Pareto 集合, (b) 评分

### 3.4. 优化结果对比

**Table 5.** Optimization before and after comparison  
**表 5.** 优化前后对比

入口压力-MPa	优化前			优化后		
	$V_0$ -m/s	$P_{\max}$ -kPa	$\Delta w$ -kPa	$V_0$ -m/s	$P_{\max}$ -kPa	$\Delta w$ -kPa
0.10	11.48	28.12	0.43	12.24	39.47	0.45
0.15	14.06	42.21	0.65	15.01	59.39	0.68
0.20	16.25	56.46	0.91	17.34	79.28	0.92
0.25	18.22	70.75	1.11	19.40	99.14	1.15
0.30	19.96	84.66	1.36	21.26	119.09	1.39

利用数值模拟对优化前后的锥直型喷嘴分别在不同入口压力下进行了验证, 结果如表 5 所示。优化

后锥直型环形缝隙的出口速度  $V_0$  对比优化前提升了 6.60%，而优化后锥直型喷嘴最大冲击压力  $P_{\max}$  对比优化前有 40.46% 的提升幅度。最后，优化后锥直型喷嘴的  $\Delta w$  也较优化前提升了 3.12%。总的来说，优化后的锥直型喷嘴性能有了进一步的提升。

#### 4. 总结

本文探讨了不同环形缝隙形状(矩形、锥形、锥直形、维多辛斯基形)喷嘴冲击和牵引性能的差异。此外，还对锥直形喷嘴的结构参数进行了优化，以获得更好的性能。得出以下结论：

1) 在不同性能指标下，锥形、锥直形和维多辛斯基形喷嘴均大于矩形喷嘴，且锥直形和维多辛斯基形喷嘴两者性能接近。

2) 对锥直形喷嘴结构进行了正交实验设计，分析发现不同性能指标下，出口间隙  $b$  和射流角度  $\alpha$  的影响程度最大。

3) 通过建立回归预测模型与利用 NSGA-II 算法对锥直形喷嘴进行多目标优化求解，并利用基于熵权法的 TOPSIS 方法得到了最优组合为缝隙入口大小  $d$  为 6.00 mm、直段长度  $l_1$  为 2.00 mm，出口间隙  $b$  为 1.50 mm 以及射流角度  $\alpha$  为  $40^\circ$ ，并利用数值模拟进行了对比，发现优化后喷嘴性能得到了进一步的提升。

综上所述，对喷嘴环形缝隙的改进与优化能够有效提升染色机喷嘴的牵引性能，提高整机生产效率，降低能耗，进一步推动印染行业绿色发展。

#### 基金项目

浙江理工大学 2022 年省教育厅一般科研项目(项目编号：Y202250589)。

#### 参考文献

- [1] 张汶定. 直旋混合射流破岩钻进能力及关键参数研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- [2] 杨冬冬. 多重管法旋喷注浆用射流喷嘴的结构设计与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [3] 张峰, 邓永锋, 等. 三重管法高压喷射注浆装置水气同轴喷嘴 CFD 模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 623-630.
- [4] Marko, J., Henri, O. and Josko, V. (2022) CFD Analysis of Thermal Fields for Ice Abrasive Water Jet. *International Journal of Mechanical Sciences*, **220**, Article ID: 107154. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107154>
- [5] 童毅. 水采高压水枪喷嘴的几何结构及设计[J]. 水力采煤与管道运输, 2015(3): 1-7.
- [6] Cui, D.D., Li, H.W. and He, J. (2022) Applications of Water Jet Cutting Technology in Agricultural Engineering: A Review. *Applied Sciences*, **12**, Article No. 8988. <https://doi.org/10.3390/app12188988>
- [7] Wen, J.W., Qi, Z.W., Behbahani, S.S., et al. (2019) Research on the Structures and Hydraulic Performances of the Typical Direct Jet Nozzles for Water Jet Technology. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, **41**, Article No. 570. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2075-2>
- [8] Huang, L.Y. and Chen, Z.S. (2022) Effect of Technological Parameters on Hydrodynamic Performance of Ultra-High-Pressure Water-Jet Nozzle. *Applied Ocean Research*, **129**, Article ID: 103410. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103410>
- [9] Xin, Q., Su, X., Alavi, S., et al. (2018) Effects of Conical Nozzle and Its Geometry on Properties of an Inductively Coupled Plasma Jet Used for Optical Fabrication. *Applied Thermal Engineering*, **128**, 785-794. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.131>
- [10] 张吉智, 魏列江, 张振华, 等. 基于 CFD 的喷嘴结构对高压水射流反推特性的影响[J]. 液压与气动, 2021, 45(3): 102-107.
- [11] He, S.S., Qian, Y., Xue, W.L., et al. (2019) Numerical Simulation of Flow Field in Air-Jet Loom Main Nozzle. *Autex Research Journal*, **19**, 181-190. <https://doi.org/10.1515/aut-2018-0053>
- [12] Yu, M.H., Wang, C., Wang, L., et al. (2022) Optimization Design and Performance Evaluation of R1234yf Ejectors for Ejector-Based Refrigeration Systems. *Entropy*, **24**, Article No. 1632. <https://doi.org/10.3390/e24111632>

- [13] 陈亮. 基于 CFD 的喷气织机主喷嘴引纬流场分析及优化[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [14] 陈立秋. 1:8 浴比高不高? [J]. 染整技术, 2008(9): 51-52.
- [15] Rupp, J. (2010) Recent Developments in Dyeing. *Textile World*, **160**, 36-37.
- [16] Juraeva, M., Ryu, K.J. and Song, D. (2014) Optimum Design of the Injection Nozzle System of a Three-Drive Jigger Dyeing Machine. *Textile Research Journal*, **84**, 1247-1254. <https://doi.org/10.1177/0040517514521121>
- [17] Osman, A., Delcour, L., Hertens, I., *et al.* (2018) Toward Three-Dimensional Modeling of the Interaction between the Air Flow and a Clamped-Free Yarn inside the Main Nozzle of an Air Jet Loom. *Textile Research Journal*, **89**, 914-925. <https://doi.org/10.1177/0040517518758006>
- [18] Vahid, M.S. and Fathali, M. (2023) Comparison of Effects of Four Subgrid-Scale Turbulence Models in Large Eddy Simulation of a Large Wind Farm. *Journal of Mechanical Science and Technology*, **37**, 2439-2449. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0420-y>
- [19] 张科. 基于 CFD 的喷气织机主喷嘴气流场分析及局部结构参数优化[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2010.
- [20] Qian, M., Li, J., Xiang, Z., *et al.* (2019) Effect of Pin Diameter Degressive Gradient on Heat Transfer in a Microreactor with Non-Uniform Pin-Fin Array under Low Reynolds Number Conditions. *Energies*, **12**, Article No. 2702. <https://doi.org/10.3390/en12142702>
- [21] Qian, M., Mei, D.Q., Yi, Z., *et al.* (2017) Fluid Flow and Heat Transfer Performance in a Micro-Reactor with Non-Uniform Micro-Pin-Fin Arrays for Hydrogen Production at Low Reynolds Number. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 553-561. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.150>
- [22] Wang, Y.S., Politano, M. and Weber, L. (2019) Spillway Jet Regime and Total Dissolved Gas Prediction with a Multiphase Flow Model. *Journal of Hydraulic Research*, **57**, 26-38. <https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1428231>
- [23] 姜峰, 李明海, 李远哲, 等. 基于数值模拟的汽油机喷嘴结构优化 CFD 分析[J]. 热科学与技术, 2018, 17(3): 204-210.
- [24] 李猛, 何雪明, 高彬, 等. 淹没环境下高压水射流喷嘴的结构优化[J]. 液压与气动, 2022, 46(7): 31-39.
- [25] 杨蒙, 郭霁贤, 张国强, 等. 基于正交试验的新型混凝土喷嘴结构优化研究[J]. 液压与气动, 2021(2): 100-104.
- [26] 郑永忠, 刘江坚, 董林, 等. 交变循环染色方式及控制[J]. 印染, 2023, 49(8): 58-61.