

doi: 10.11832/j.issn.1000-4858.2021.02.016

基于正交试验的新型混凝土喷嘴结构优化研究

杨蒙^{1,2}, 郭霁贤³, 张国强³, 曹文斌³, 朱彦鹏¹

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730000;

2. 四川航天建筑工程公司, 四川 成都 610000; 3. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为满足工程需要,设计一种自混合的混凝土喷嘴。通过该喷嘴可以将混有速凝剂的压缩空气和通过管道运输过来的混凝土拌合物混合。基于 $L_9(3^4)$ 正交试验,利用 Fluent 对 9 组不同结构参数的喷嘴进行数值模拟,采用极差分析法处理喷嘴出口混合均匀度,得到了新型喷嘴最佳的结构参数组合。结果表明:与传统喷嘴相比,优化后的新型喷嘴出口均匀度提高了 9.69%,达到了改善混合效果的目标,验证了新型喷嘴结构设计的合理性,为新型喷嘴的实际应用提供了一定的理论支持。

关键词: 混凝土喷嘴; 气力运输; 正交试验; 数值模拟; 混合均匀度

中图分类号: TH138; TD352 文献标志码: B 文章编号: 1000-4858(2021)02-0100-05

Structure Optimization of New Concrete Nozzle Based on Orthogonal Experiment

YANG Meng^{1,2}, GUO Ji-xian³, ZHANG Guo-qiang³, CAO Wen-bin³, ZHU Yan-peng¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730000;

2. Sichuan Aerospace Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000;

3. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730000)

Abstract: A self-mixing concrete nozzle is designed to meet engineering needs. This nozzle can mix compressed air mixed with accelerator and concrete transported through pipelines. Based on the $L_9(3^4)$ orthogonal experiment, the Fluent simulation software is used to calculate the 9 groups of nozzles with different structural parameters. Then the range analysis method is used to process the nozzle outlet mixing uniformity, and obtain the best combination of structural parameters for the new nozzle. The results show that compared with the traditional nozzle, the optimized nozzle outlet uniformity increased by 9.69%. The goal of improving the mixing effect is achieved, and the rationality of the new nozzle structure design is verified. It provides certain theoretical support for the practical application of the new nozzle.

Key words: concrete nozzle, pneumatic transport, orthogonal test, numerical simulation, mixing uniformity

引言

混凝土结构在土木建筑工程及公路建设中发挥着重要作用,在不良地段的快速立模施工中经常使用混凝土灌浆设备进行加固,混凝土喷嘴作为混凝土灌浆设备的主要结构部件,其结构与工艺参数选择将直接影响喷射出的混凝土混合均匀度,进而影响混凝土灌浆施工的施工效率和加固效果。

传统混凝土喷嘴的进风道是与喷嘴轴线成一定夹角的沿轴线圆周均布排列的多个斜向小孔,夹杂着速凝剂的高速气流通过斜向小孔喷入喷嘴,将流过的混

凝土打散、分离^[1]。但是拌制好的成熟混凝土在喷嘴内运输的物理状态极为复杂,且易受混凝土自身性质等多种因素影响,使混凝土在与速凝剂混合时容易形成大小不均匀的黏性胶质团,导致喷嘴出口出料不稳定,产生流量脉动,严重时甚至造成堵管^[2]。现有喷嘴

收稿日期: 2020-10-09

基金项目: 国家重点实验室开放基金(GZKF-201823)

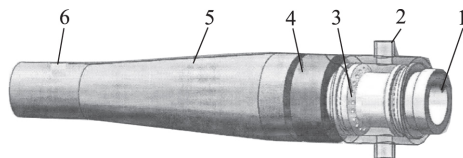
作者简介: 杨蒙(1988—),男,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事建筑与土木工程技术方面的研究。

的优化设计多以湿喷机为应用背景开展相关研究,主要基于传统结构,在泥浆管入射角、混合管与变径管的长度及聚料管直径等方面对喷嘴出口混凝土混合均匀度的影响进行分析^[3],并没有针对混凝土喷嘴研究改变其结构对混合效果的影响。为此,本研究设计了一种自混合的混凝土喷嘴,喷嘴的使用方式与传统喷嘴相同,但是该型喷嘴可以减少黏性胶质团的形成,降低出料脉动和堵管的可能性。通过使用正交试验法,利用 Fluent 仿真软件对不同结构参数的喷嘴进行数值模拟,以提高喷嘴出口成分混合均匀度为优化目标,得到新型喷嘴结构参数的最佳组合^[4]。

1 喷嘴结构初步设计

1.1 传统喷嘴结构

传统混凝土喷嘴结构及内部结构如图 1、图 2 所示。现有喷嘴的优化设计多以湿喷机为应用背景开展相关研究,主要以圆周设置进气口为传统混合结构,在泥浆管入射角、预混合管的长度、变径管的长度、聚料管直径等方面对喷嘴出口混凝土混合均匀程度进行分析。存在混凝土料流被冲击集中于喷嘴中心,无法混合速凝剂,导致速凝剂直接排出,危害操作工人健康等问题^[5]。



1. 直管 2. 引气环 3. 混合芯 4. 卡环
5. 前部聚敛段 6. 聚料口

图 1 传统混凝土喷嘴结构图

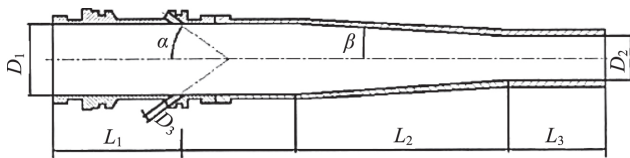


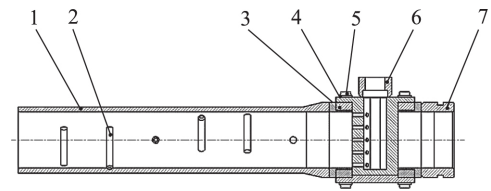
图 2 传统混凝土喷嘴的内部结构

1.2 新型喷嘴结构设计

针对改善混凝土混合均匀度的问题,本研究提出了一种新型混凝土喷嘴结构,研究改变其混合结构参数对混凝土混合效果的影响。

新型喷嘴结构如图 3 所示,在喷嘴的使用过程中,混凝土拌合料流通过接头 7 进入喷嘴中,而速凝剂与压缩空气经混合后通过进气口进入混合器 6;气流通过设置在混合器 6 上的通孔单元进入混合腔;与混凝土拌合料进行混合;利用空气与混凝土的推力将混

凝土料流向前输送,通过喷管 1 喷出。



1. 喷管 2. 混合柱 3. 混合腔 4. 垫片 5. 内六角螺栓
6. 混合器 7. 接头

图 3 新型喷嘴设计结构图

通过设置椭圆柱混合器 6,并在混合器上设置垂直于混合器中心轴线的通孔,在喷嘴内设置沿圆周方向错位、间隔均匀分布的混合柱 2,使压缩空气和速凝剂的混合物与混凝土在喷嘴内混合,混合物在流过混合柱 2 时,可以进行二次混合,减少黏性胶质体团的形成,提高混合均匀度。图 4 为新型喷嘴混合器结构剖视图。

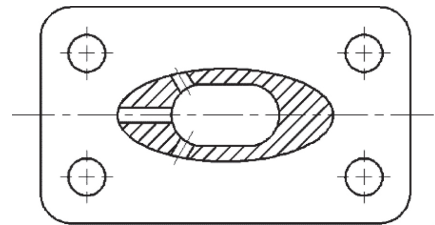


图 4 新型喷嘴混合器结构剖视图

2 数值模拟

2.1 三维模型建立及网格划分

图 5 所示为新型喷嘴三维模型。将建立的三维模型导入 Workbench 中进行流体域模型抽取,再将流体域模型导入 ICEM 中进行流体域模型网格划分。采用非结构网格划分并简化模型结构以减少计算量,全局网格尺寸为 6 mm,部分结构加密网格最大为 1 mm,喷嘴管的管壁均设置 5 层初始厚度为 1 mm,增长率为 1.2,最大厚度为 1.5 mm 的边界层,网格质量均在 0.2 以上。新型喷嘴流体域的网格模型如图 6 所示。

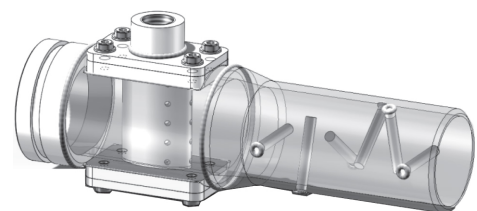


图 5 新型喷嘴三维模型

2.2 基本假设

由于喷嘴内部的混凝土流动是一个极为复杂的多

相流混合过程,为便于计算作如下假设^[6-8]:

- (1) 将喷嘴内流体视为定常流动;
- (2) 忽略喷嘴内砂、碎石之间的碰撞以及砂、碎石与喷嘴壁面之间的相互作用力;
- (3) 忽略混凝土中各项之间的化学反应以及混凝土料流与喷嘴壁面之间的热量交换;
- (4) 将拌制好的混凝土视为各项同性的液体。

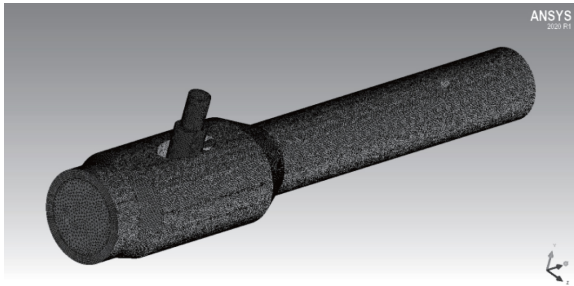


图6 新型喷嘴流体域三维网格模型

2.3 边界条件

采用 mixture 模型和 $k-\varepsilon$ 模型中的标准模型,基于压力求解器求解^[9]。混凝土流体密度为 2500 kg/m^3 ,混凝土动力黏度为 $32 \text{ N}\cdot\text{s/m}^2$ 。根据混凝土喷嘴实际使用工况,混凝土料流流量约为 $5 \text{ m}^3/\text{h}$,通过流场连续性方程计算分析,得出喷嘴内粗/细骨料与水泥浆等组成的混凝土流体速度为 0.2448 m/s ,混凝土流体进口设置为速度入口;空气和速凝剂混合物进口设置为压力入口,表压为 0.1 MPa ,空气和速凝剂的体积比为 $95:5$;喷嘴出口设置为压力出口,表压为 0 ;压力速度耦合方案使用 SIMPLE 算法,计算进出口质量流量差为 $\pm 0.01 \text{ kg/s}$ 。

3 正交试验

通过分析,确定可能影响喷嘴混合效果的参数如下:

- (1) 喷管的总体混合长度、设置在喷管中的混合柱间距和近出口处混合柱与出口间的距离;
- (2) 出口直径;
- (3) 速凝剂和空气喷出小管与 XY 面间的夹角;
- (4) 混合柱的个数与夹角。

根据上述分析对混合器内部参数采用正交试验法的方式进行优化设计。选择有效长度、出口直径、喷射角度与混合柱个数作为试验研究的主要影响因素,每个因素取 3 水平,试验方案及数值模拟结果如表 1 所示^[10]。由于速凝剂在喷出的混凝土流体中的含量只有 5% ,与另外两种成分相比含量差距悬殊。因此,本研究忽略混凝土中的速凝剂,用空气在混凝土中的均匀度来表征喷嘴中混合流体的均匀度:

表1 试验方案及数值模拟结果

试验号	有效长度 A/mm	出口直径 B/mm	喷射角度 C/mm	混合柱个数 D	混合均匀度 H/%
1	235	65	50	4	54.99
2	235	75	55	5	57.70
3	235	85	60	6	54.37
4	355	65	55	6	64.09
5	355	75	60	4	61.96
6	355	85	50	5	61.98
7	475	65	60	5	59.94
8	475	75	50	6	70.26
9	475	85	55	4	62.61

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

$$H = \left(1 - \frac{S}{\bar{x}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, H —— 出口均匀度, %

S —— x 的标准偏差

x —— 喷嘴出口端面空气体积分数

x_i —— 喷嘴出口端面空气体积分数均值

由表 1 所得数值计算结果可知,试验 8 的混合均匀度最高,为 70.26% 。表 2 为对正交试验数值模拟结果进行的极差分析,其中 R 值为极差值,表示该因素对数值计算结果的影响程度,极差值 R 越大,则该因素对试验结果的影响越显著; x_1, x_2, x_3 为水平 1, 2, 3 的均值^[11-12]。

表2 数值模拟结果极差分析

均值	有效长度 A/mm	出口直径 B/mm	喷射角度 C/mm	混合柱个数 D
x_1	55.687	59.673	62.410	59.853
x_2	62.677	63.307	61.467	59.873
x_3	64.270	59.653	58.757	62.907
极差 R	8.583	3.654	3.653	3.054

由表 2 可知,4 个因素对混合均匀度影响的次序为 $A > B > C > D$,即喷嘴有效长度对混凝土混合均匀度的影响最为显著,出口直径与喷射角度对混

土混合均匀度的影响程度基本持平,混合柱个数对混凝土混合均匀度的影响较弱。

不同因素与水平对混凝土均匀度的影响如图 7 所示,在 A3、D3 时可以得到最佳混合均匀度,在 B2 时得到最佳混合均匀度,在 C1 时得到最佳混合均匀度。

综上所述,正交试验的最佳组合为 A3、B2、C1、D3,喷嘴有效长度为 475 mm,出口直径 75 mm,喷射角度 50°,混合柱均布设置为 6 个,确定第 8 组试验为最优方案。

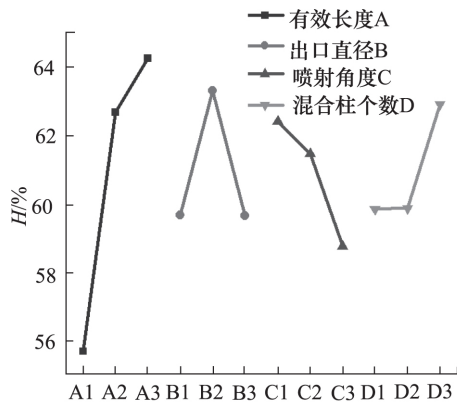


图 7 不同因素与水平对混凝土混合均匀度的影响趋势

4 优化前后数值模拟结果对比

传统喷嘴模型出口均匀度为 60.57%,新型喷嘴优化后模型的出口均匀度为 70.26%,均匀度提高了 9.69%,由此可知相比于传统喷嘴,新型喷嘴的混合效果更好。主要原因为:

(1) 混合器设置在喷嘴混凝土流道内,而且在混合器上设置了 3 组垂直于混合器中心轴线的通孔,可以充分打散流动中的混凝土料流,形成悬浮状;

(2) 喷管内设置了沿圆周方向错位、间隔均匀分布的混合柱,可以进一步的对速凝剂与混凝土的搅拌,减少黏性胶质团的形成,提高了混凝土与速凝剂的混合均匀度。

图 8、图 9 分别为空气、混凝土体积分布云图。传统喷嘴出口端面空气与混凝土体积分数云图呈环形分布,由于传统喷嘴进气口沿管壁圆周分布设置,因此导致高速气流冲击混凝土,使混凝土主要集中在流场中心部位,而压缩空气分布在圆周外围,靠近圆心处的混凝土无法与压缩空气相互接触,容易形成黏性胶质团,导致喷嘴出口出料脉动,严重时引发喷嘴堵塞;新型喷嘴出口端面混凝土部分集中在管壁两侧,压缩空气分布在喷管中心,新型喷嘴的混凝土相分布更均匀,压缩空气可以深入到混凝土内部,且由于存在混合柱,减少

了混凝土黏性胶质团的形成,降低流量脉动。

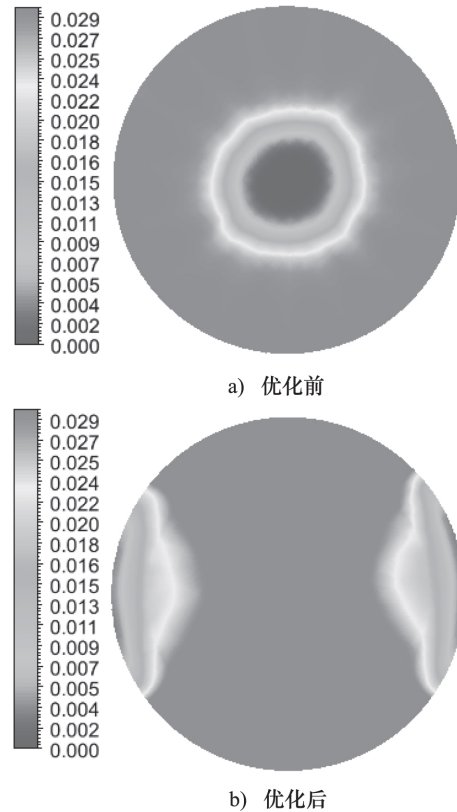


图 8 空气相体积分数云图

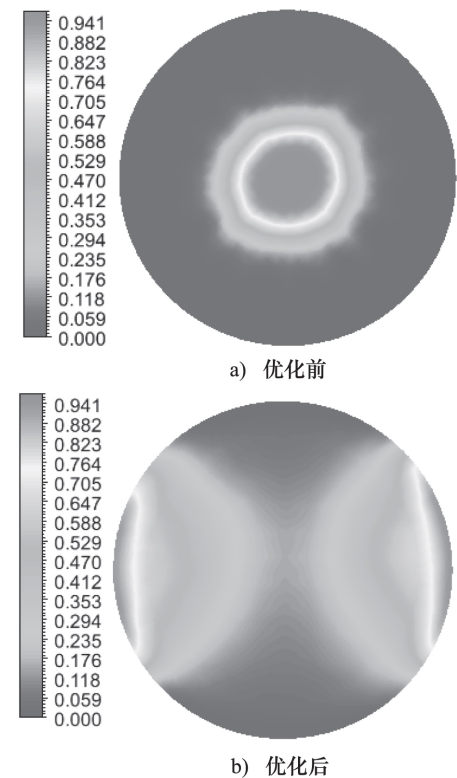


图 9 混凝土相体积分数云图

5 结论

本研究以提高喷嘴出口混凝土中速凝剂均匀度为优化目标,完成了新型喷嘴结构的设计及优化设计,并基于正交试验,利用 Fluent 仿真软件对不同结构参数的喷嘴模型进行数值分析计算,得出以下结论:

(1) 喷嘴各结构参数对混凝土料流与速凝剂混合均匀度影响主次顺序为:有效长度、出口直径、喷射角度、混合柱个数;

(2) 仿真计算优化后的新型喷嘴最佳结构参数组合为:喷嘴有效长度 475 mm,出口直径 75 mm,喷射角度 50°,混合柱均布设置 6 个;

(3) 新型喷嘴经结构优化后出口均匀度提高了 9.69%,达到了提高速凝剂、压缩空气与混凝土混合效果的目的,并验证了新型喷嘴结构设计的合理性。

参考文献:

- [1] 王桂梅,王清强.基于正交试验的湿喷机喷嘴结构参数优化研究[J].中国煤炭,2016,42(9):54-60.
WANG Guimei, WANG Qingqiang. Research on Optimization of Nozzle Structure Parameters of Wet Spraying Machine Based on Orthogonal Experiment [J]. China Coal, 2016, 42(9): 54-60.
- [2] 刘操.混凝土喷射机喷嘴内混合流体流场均匀度研究[D].长沙:中南大学,2013.
LIU Cao. Research on Uniformity of Mixed Fluid Flow Field in Nozzle of Concrete Jet [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [3] 朱奇,李强,陈朵云,等.小型混凝土泵车泵送行程试验及泵送性能测试研究[J].液压与气动,2020,(1):124-130.
ZHU Qi, LI Qiang, CHEN Duoyun, et al. Test Research Pumping Travel and Pumping Performance of Small Concrete Pump Truck [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (1): 124-130.
- [4] 曹年欢,王国志,谭元文.基于拟水平正交实验法的隧道除尘喷嘴设计[J].液压与气动,2020,(7):138-143.
CAO Nianhuan, WANG Guozhi, TAN Yuanwen. Design of Tunnel Dust Removal Nozzle Based on Quasi-horizontal Orthogonal Experiment [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (7): 138-143.
- [5] 李燕,全勇男,蔡茂林.微喷嘴射流截面能量密度和信息熵[J].液压与气动,2020,(9):161-167.

引用本文:

- 杨蒙,郭霖贤,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.
YANG Meng, GUO Jixian, ZHANG Guoqiang, et al. Structure Optimization of New Concrete Nozzle Based on Orthogonal Experiment [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, (2): 100-104.

- LI Yan, QUAN Yongnan, CAI Maolin. Energy Density and Information Entropy of Micro-nozzle Jet Section [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (9): 161-167.
- [6] 王清强,郝磊,王桂梅.湿喷机喷嘴内液固两相流数值模拟[J].煤矿机械,2018,39(2):44-47.
WANG Qingqiang, HAO Lei, WANG Guimei. Numerical Simulation of Liquid-solid Two-phase Flow in the Nozzle of Wet Jetting Machine [J]. Coal Mine Machinery, 2018, 39(2): 44-47.
 - [7] NICOLAS G, MARC J. Investigation of Spray Pattern in Shotcrete Applications [J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 966-972.
 - [8] 吕苏荷,李小宁.射流宽度和壁面曲率比值对附壁效应真空发生器性能的影响规律研究[J].液压与气动,2018,(1):110-115.
LV Suhe, LI Xiaoning. Influence of Ratio of Fluidic Width and Wall Curvature on the Performance of Coanda Ejector [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2018, (1): 110-115.
 - [9] 满春雷,贾涛,陆畅,等.基于 Fluent 的矢量喷管作动器温度场仿真[J].液压与气动,2020,(7):9-15.
MAN Chunlei, JIA Tao, LU Chang, et al. Temperature Field Simulation of Vector Nozzle Actuator Under Two Operating Conditions [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2020, (7): 9-15.
 - [10] 任露泉.试验优化设计与分析[M].吉林:吉林科学技术出版社,2001.
REN Luquan. Experimental Optimization Design and Analysis [M]. Jilin: Jilin Science and Technology Press, 2001.
 - [11] 胡仕成,刘操,王祥军,等.湿喷机喷嘴流场仿真分析[J].长安大学学报:自然科学版,2015,35(2):145-151.
HU Shicheng, LIU Cao, WANG Xiangjun, et al. Simulation Analysis of Nozzle Flow Field of Wet Jet [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35(2): 145-151.
 - [12] 李玉朵,蔡业彬,张银钊,等.三维旋转喷射枪喷嘴结构的优化[J].液压与气动,2015,(10):40-43.
LI Yuduo, CAI Yebin, ZHANG Yifen, et al. Three Dimensional Structural Optimization for Nozzle of Rotating Sprayed Gun [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2015, (10): 40-43.