

某型号大流量导流式消防水炮喷嘴设计与改进

刘子平¹, 胡靖², 李涛², 郭雷²

¹怀化市消防救援支队, 湖南 怀化

²怀化学院物电与智能制造学院, 湖南 怀化

收稿日期: 2023年1月10日; 录用日期: 2023年3月13日; 发布日期: 2023年3月20日

摘要

为针对导流式消防炮炮头内部压损较大以及出口速度难以通过除了采用提高流量外的其他方式来进行提升的问题, 本文以导流式消防炮的炮头以及炮身部分作为研究对象, 采用数值计算方法, 利用CFD商业软件对导流式消防水炮在不同流量以及加导流结构后的内部流动特性进行分析, 结果发现: 管道内的流速以及压力损失随着流量的增大而增大; 加导流装置后可以大幅降低管道压力损失以及能量损耗, 此外还能使出口动压得到有效提升, 这会在一定程度上提升消防喷水射程, 为以后类似消防炮的设计提供了一定的指导。

关键词

消防炮, 导流式, 数值模拟, 改进

Design and Improvement of Nozzle of a Type of Large Flow Diversion Fire Water Cannon

Ziping Liu¹, Jing Hu², Tao Li², Lei Guo²

¹Detachment of Huaihua Fire and Rescue, Huaihua Hunan

²School of Physics, Electronics and Intelligent Manufacturing, Huaihua University, Huaihua Hunan

Received: Jan. 10th, 2023; accepted: Mar. 13th, 2023; published: Mar. 20th, 2023

Abstract

In order to solve the problem that the internal pressure loss of the diverter fire gun head is large and the exit velocity is difficult to be improved by other means other than increasing the flow rate, this paper takes the gun head and body part of the diverter fire gun as the research object and adopts the numerical calculation method. CFD software was used to analyze the internal flow characteristics of the diverting fire cannon at different flow rates and with the diverting structure.

The results showed that the flow rate and pressure loss in the pipeline increased with the increase of the flow rate. After adding the diversion device, the pressure loss and energy loss of the pipeline can be greatly reduced. In addition, the dynamic pressure of the outlet can be effectively improved, which will improve the fire spray range to a certain extent, and provide certain guidance for the design of similar fire cannons in the future.

Keywords

Fire Cannon, Diversion Type, Numerical Simulation, Improvement

Copyright © 2023 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

消防水炮是用射流的方法设定其射流大小和控制压力，进行灭火的消防设备。消防水炮喷头主要由喷嘴、稳流器、弹簧、导流芯等零件装配组合而成，如图 1 喷头内部结构实物图所示。因近年来民众对消防安全的重视程度越来越高，国内外大量学者对消防装备的研究也越来越多。



Figure 1. Internal structure of fire sprinkler (a) and site working diagram (b)

图 1. 消防喷头内部结构(a)以及现场工作图(b)

Mitsukiyomurakami 和 Kinji Katayama [1]通过对喷嘴的有关参数包括收缩直径和收缩角等参数的优化，在一定程度上提高了射高以及射程。Yan H 等[2]通过仿真手段计算了在有整流器情况下的喷嘴出口流场和速度场的分布情况，得到整流器能获得更好的流动状态。Tatsuya Miyashita [3]等基于移动粒子半隐式法对压力在 0.6~0.9 Mpa 且流量在 10~40 KL/min 下的水射流情况进行仿真模拟。证实了喷射压力和流量会影响射流的轨迹与运动状态，并且用实验对仿真数据进行了验证，发现实验和仿真结果吻合较好。Ali Setork [4]开发出了针对高速水射流数值求解的数学模型，此外还对空气阻力对水射流过程的影响进行了分析，得到了整个射流过程中水破碎的动态发展过程。胡国良等[5]采用商用 Fluent 软件研究了导流式消防水炮的喷嘴，对其在直流射流和喷雾射流两种模式下的压力场和速度场进行了仿真计算，还对喷嘴在不同的出口圆环面积、出口直线段长度与喷嘴嘴芯结构参数下的射流特性进行分析，最后得出了

较优的喷嘴结构参数。张俊[6]等对不同的锥形喷嘴参数下的射流反推力进行了理论分析和仿真计算,并且具体研究了流量、压力以及喷嘴结构参数于反推力的关系,最终确定了锥形喷嘴的较优的结构参数。刘平安等[7]通过 CFD 数值模拟对炮身在串联与并联这两种内部流道结构下的压力损失、射程以及压力分布等方面进行了研究,为后续能设计出远射程、大流量以及高能效的并联式结构的消防炮提供了理论支撑。薛林等[8]通过 CFD 数值模拟对三种不同回转结构的炮身进行了研究,同时采用弯管的曲率作为自变量,对出口流态和水力损失进行了分析,得出了在同一弯管曲率下大回转炮身这一结构更优的结论。胡国良等[9]在炮身的“U”形弯管中间部位安装了导流片用以减小横向流,并且还能有效地降低了雷诺数,通过 CFD 数值模拟得出了水流分布速度较理想的结论。贾兴豪等[10]通过对 90°弯管的内部布置结构形式不同的导流片,通过 CFD 数值模拟对弯管内的流体流动特性进行了分析,确定了能改善内部流体流动状态的较优导流片安装位置。袁丹青等[11]在对五种曲率半径不同的“U”形水炮的炮身内部安放有不同位置、不同数量的导流片,通过 CFD 数值模拟对流动的压力损失以及出口湍动能进行了分析,可知单片导流片应在消防水炮的具体设计时应该优先选择。

综合分析上述研究,可以发现数值模拟已经成为研究消防水枪和水炮等复杂导流结构的重要手段。分析近年来的数值模拟研究,主要集中在两个方面:一是在现有消防导流设备内部速度场和压力场进行模拟的基础上,发现喷嘴或射流管存在的问题并进行结构优化。二是在模拟和实验对比的基础上,提出新的数值模拟方法,以提高求解的精度和速度。而对于新型导流芯稳流装置的研究相对较少,对于描述导流装置与压力损失、出口动压的关系在文献中较为鲜见。因此利用 CFD 流体仿真技术对这一问题进行分析显得更加有意义。

针对导流式消防水炮存在的压力损失大、射程不理想等问题,本文以某型号导流式消防水炮炮头以及炮身作为研究对象,通过数值模拟对其内部流动情况进行模拟并针对流动问题进行改进,主要研究内容包括:

- 1) 建立导流式消防炮三维实体模型与流体模型;
- 2) 对原方案的内部流动情况进行计算,找出问题;
- 3) 对原方案存在的问题进行改进。

2. 模型的建立

计算模型的建立

如图 2(a)所示为导流式消防水炮实物图,图 2(b)为对应的流体模型。

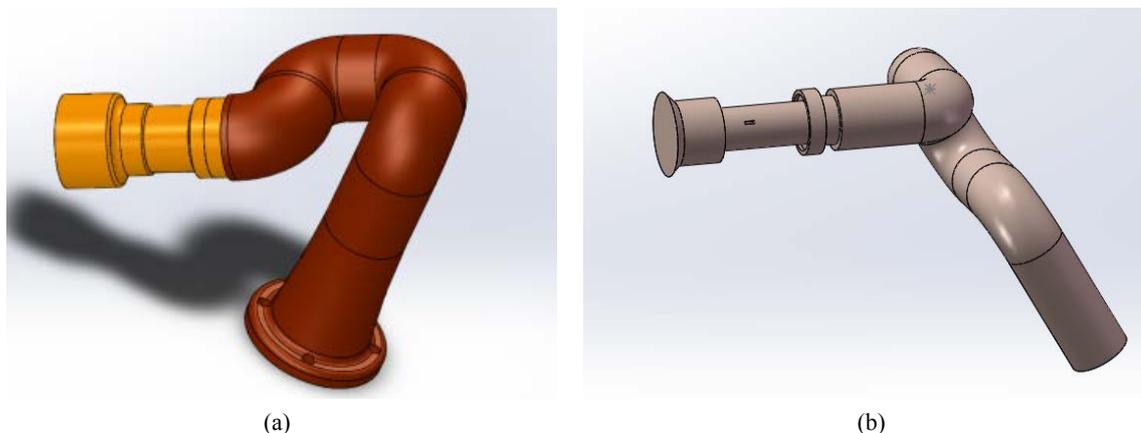


Figure 2. Three-dimensional structure of fire cannon (a) and its fluid model (b)

图 2. 消防炮三维结构(a)及其流体模型(b)

3. 模型的前处理

将模型导入流体仿真软件中，采用多面体网格对其进行网格划分，确定网格单元尺寸之前对网格无关性进行了验证，如图 3 所示。

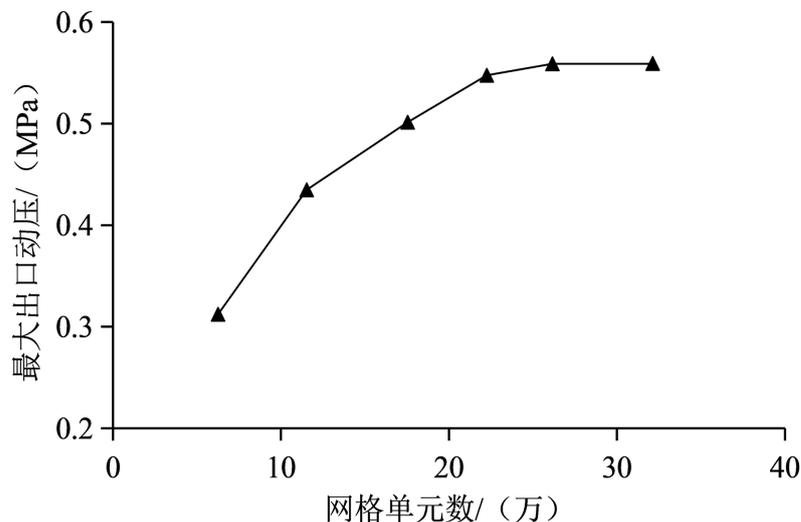


Figure 3. Grid independence verification

图 3. 网格无关性验证

由图 3 发现网格单元数在超过 22 万个后管道出口动压变化很小，因此最后固定好单元尺寸，考虑到计算成本以及计算精度，最后共划分了 261,564 个网格单元，如图 4 所示为消防炮炮身以及喷嘴部分的网格模型。

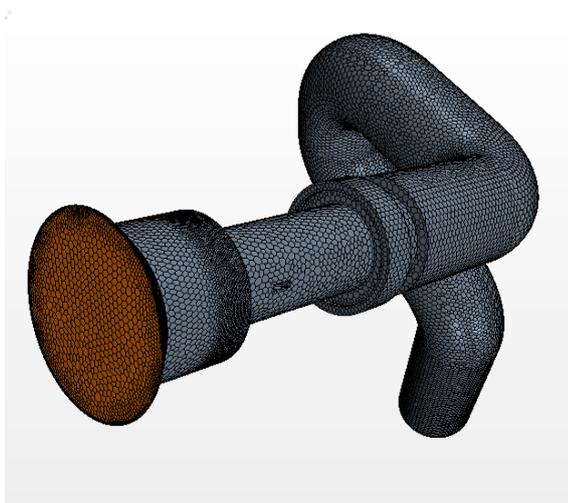


Figure 4. Grid model of the simulation

图 4. 网格模型

模型边界条件设置如下[11]: 1) 入口为质量流量，范围为 20~120 L/s; 2) 出口为压力出口边界，压力为 0; 3) 其他壁面设为无滑移壁面。具体见图 5 所示。

本计算在商业计算软件 Star CCM+中进行且采用的湍流模型为标准的 K- ϵ 模型。

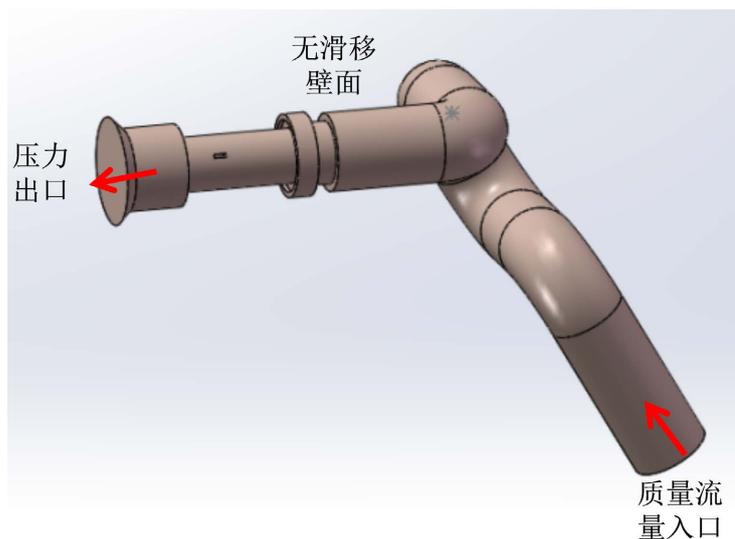


Figure 5. Main boundary conditions
图 5. 主要边界条件

4. 计算结果与分析

4.1. 原方案

图 6, 图 7 分别代表原方案在水流量为 60 L/s 和 120 L/s 时喷嘴及炮身内部的速度矢量图和速度云图。可知消防炮头在 60 L/s 时炮身及喷嘴的最高速度为 55.5 m/s, 最大出口速度为 20.1 m/s, 在 120 L/s 时炮身及喷嘴的最高速度为 113.4 m/s, 最大出口速度为 39.3 m/s, 相比较流量为 60 L/s 而言, 喷嘴及炮嘴内部最大水流速提升了近 104%, 最大出口速度提升了近 95.5%。

图 8, 图 9 为对应的截面压力分布与出口动压分布。可知消防炮头在 60 L/s 时炮身及喷嘴的最高压力为 0.648 MPa, 最大出口动压为 0.202 MPa, 在 120 L/s 时炮身及喷嘴的最高压力为 2.51 MPa, 最大出口动压为 0.770 MPa, 相比较流量为 60 L/s 而言, 喷嘴及炮嘴内部最大压力提升了近 287%, 最大出口动压提升了近 281%。两者增幅差距不大, 不过压力在稳流器后有压力堆积, 需要进行改进。

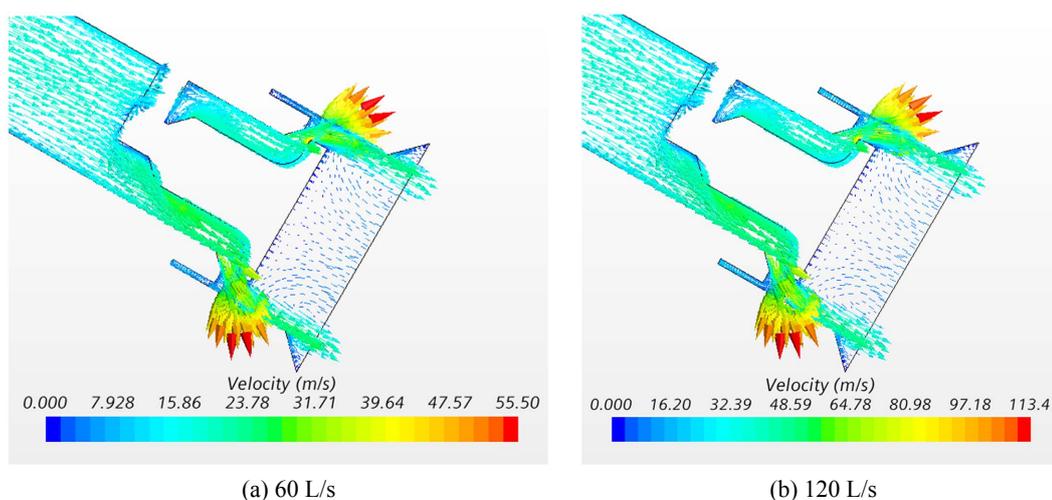


Figure 6. Velocity distribution cloud diagram of the original scheme
图 6. 原方案的速度分布云图

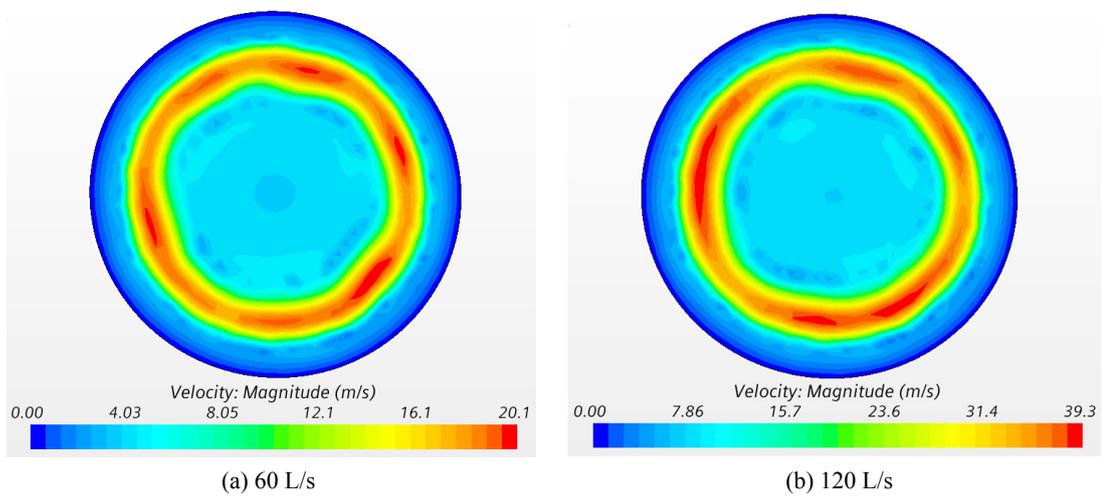


Figure 7. Exit velocity distribution cloud diagram of the original scheme
图 7. 原方案的出口速度分布云图

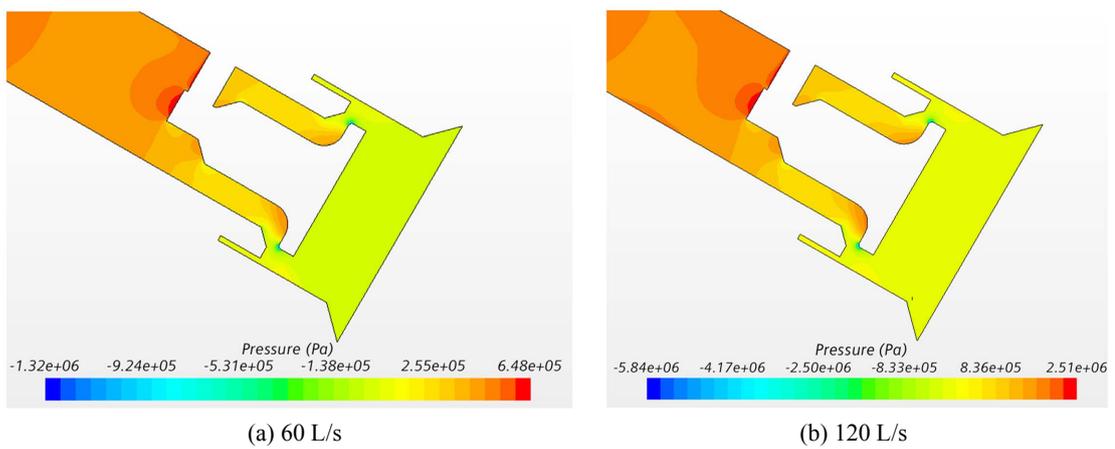


Figure 8. Pressure distribution cloud diagram of the original scheme
图 8. 原方案的压力分布云图

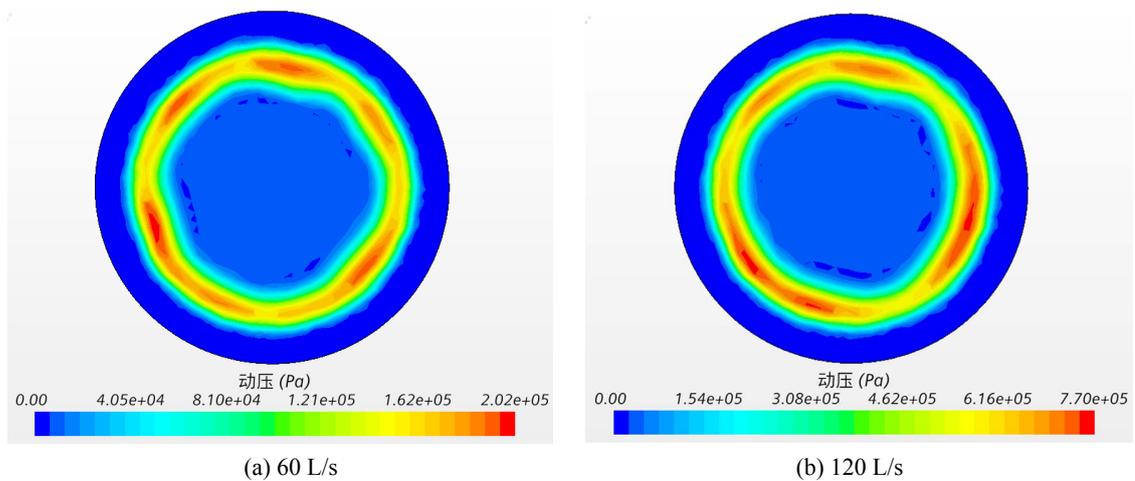


Figure 9. Cloud diagram of outlet dynamic pressure distribution of the original scheme
图 9. 原方案的出口动压分布云图

图 10 给出了原方案炮嘴与炮身之间的压力损失与不同流量的关系。可以看出压力损失随着水流流量的增大快速递增，当水流在 60~120 L/s 时，压降增大幅度提升明显。这说明管道内部结构需要改进。结合内部压力分布可知喷嘴稳流器尾部压力堆积流通不畅，可以在此进行改进。

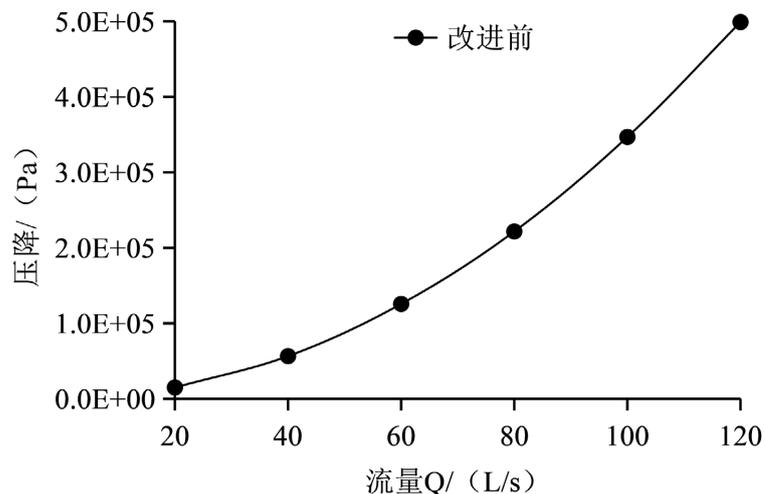


Figure 10. The relationship between pressure drop and flow in the original scheme

图 10. 原方案的压降与流量的关系图

4.2. 改进方案与对比

消防喷嘴主要是由喷嘴芯、芯座和喷嘴体等主要结构组合而成，根据图 11 可知在分析速度和压力分布时，水流整体上通过相对收缩和整流作用后，从喷嘴芯和喷嘴体中间上侧和下两侧的缝隙中喷射而出，最后经由喷嘴体的外壁通过反射作用最终成聚合的形态直接喷射出。消防喷嘴的射流属于紊态射流，在形成汇聚形态之前，射流内部存在着一个“锥形”状的空心，在经过中段之后在汇聚射流时具有紊流程度较小的特点，且呈现分布均匀的流速，喷嘴流道包括收缩段与直流段，这样使得水历经收缩和变形之后能起到调整和稳定的作用。

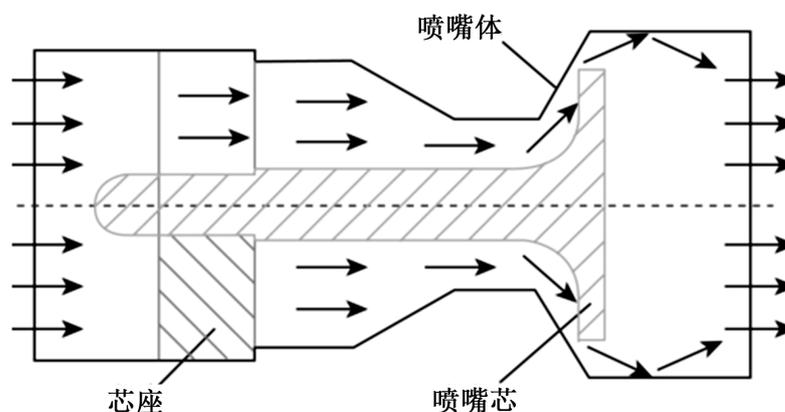


Figure 11. Schematic diagram of fire nozzle

图 11. 消防喷嘴示意图

针对原方案存在的稳流器尾部存在压力堆积以及高进口流量下管道内部压力损失高的问题，给出了针对稳流器的改进方案，具体如图 12 所示，具体改进有：

- 1) 后端增加了导流罩以减少流阻;
- 2) 适当增加稳流器叶片的倒角以减少流动阻力;
- 3) 增大过渡圆角的直径。

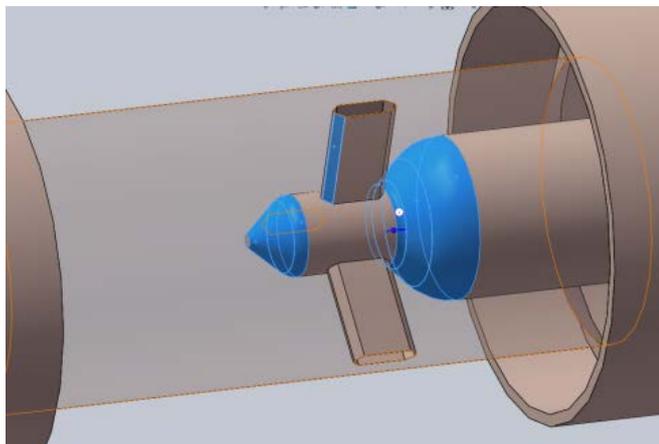


Figure 12. Improved current stabilizer structure
图 12. 改进后的稳流器结构

图 13, 图 14 分别代表改进方案在水流量为 60 L/s 和 120 L/s 时喷嘴及炮身内部的速度矢量图和速度云图。可知消防炮头在 60 L/s 时炮身及喷嘴的最高速度为 58.24 m/s, 最大出口速度为 21.4 m/s, 在 120 L/s 时炮身及喷嘴的最高速度为 115.6 m/s, 最大出口速度为 46.2 m/s, 相比较流量为 60 L/s 而言, 喷嘴及炮嘴内部最大水流速提升了近 98%, 最大出口速度提升了近 115%。这说明水流量是影响喷射速度的主要原因。

图 15, 图 16 为对应的截面压力分布与出口动压分布。可知消防炮头在 60 L/s 时炮身及喷嘴的最高压力为 0.655 MPa, 最大出口动压为 0.228 MPa, 在 120 L/s 时炮身及喷嘴的最高压力为 3.06 MPa, 最大出口动压为 1.07 MPa, 喷嘴及炮嘴内部最大压力提升了近 367%, 最大出口动压提升了近 369%。这说明改进结构下水射流获得的动力更大, 理论上具有更高的射程。

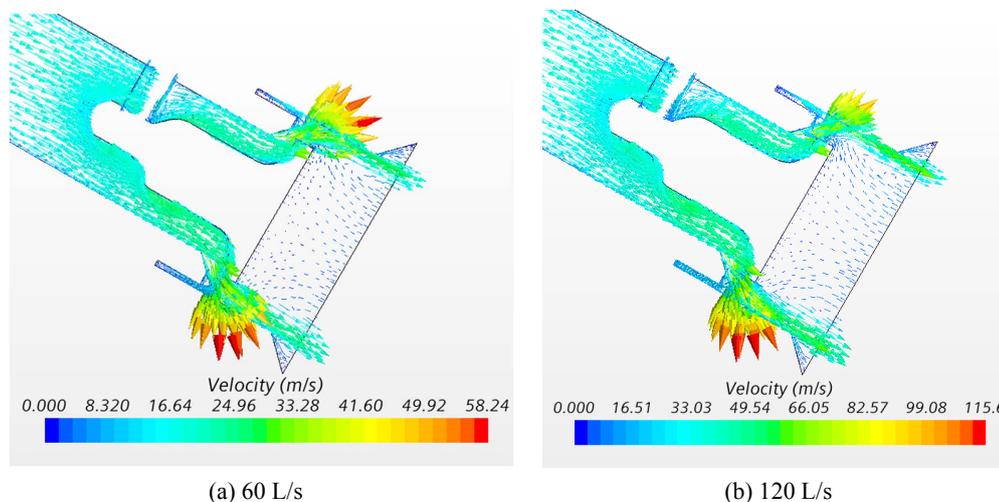


Figure 13. Improved velocity distribution cloud image
图 13. 改进后的速度分布云图

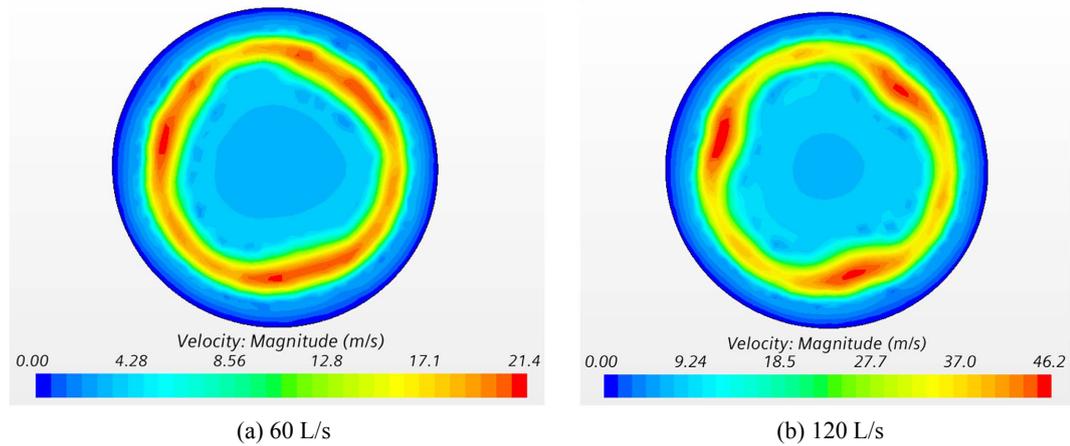


Figure 14. Improved exit velocity distribution cloud diagram
图 14. 改进后的出口速度分布云图

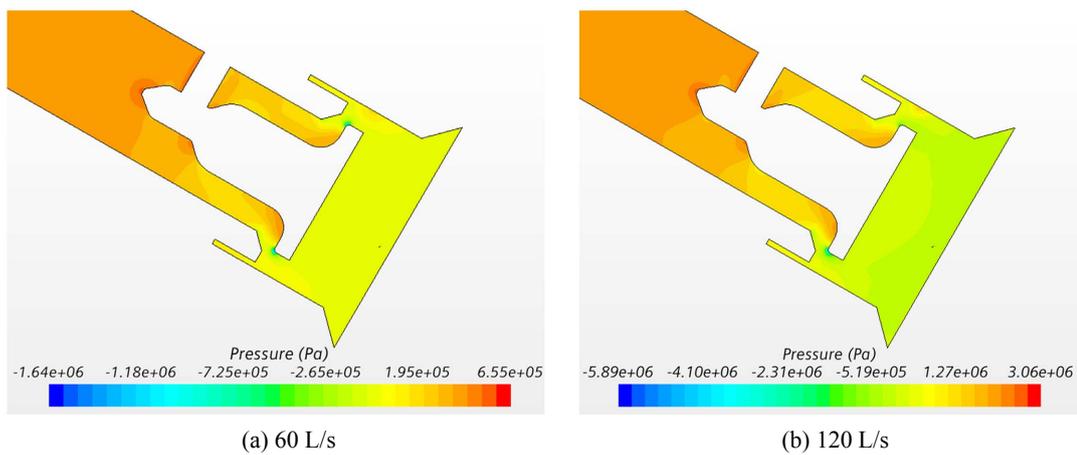


Figure 15. Improved cloud image of pressure distribution
图 15. 改进后的压力分布云图

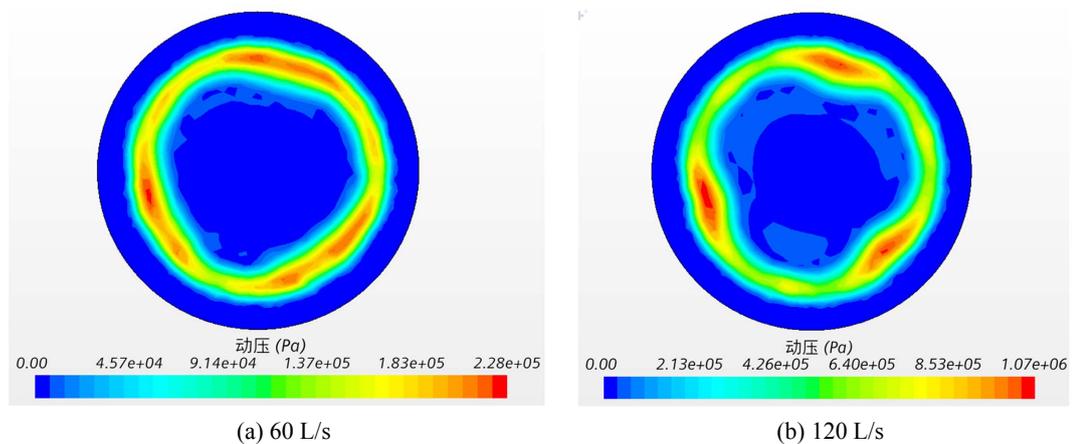


Figure 16. Improved cloud image of outlet dynamic pressure distribution
图 16. 改进后的出口动压分布云图

图 17 给出了原方案炮嘴与炮身之间的压力损失与不同流量的关系。可以看出压力损失随着水流量

的增大快速递增，当水流在 60~120 L/s 时，压降增大幅度提升明显，这和原方案的结果类似，因此在大流量时更多的需要考虑到管道压力损失带来的影响。

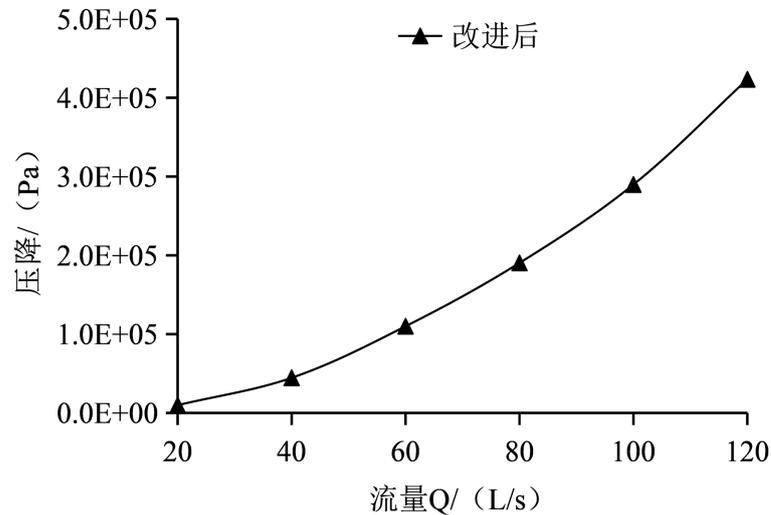


Figure 17. Relationship between improved pressure drop and flow rate
图 17. 改进后的压降与流量的关系图

为了更加清楚的体现出改进方案的优点，采用炮头出口动压、出口速度、压力损失等数据与原方案进行对比说明。

图 18 给出了改进前后出口最大速度的对比，图 19 给出了改进前后出口最大动压的对比，图 20 给出了改进前后压降的对比。

由图 18，图 19 可知：在改进前后的最大出口速度对比分析得出，改进后的最大出口速度在 60 L/s 至 120 L/s 范围内较原方案而言增幅具有明显的提升，这和改进后的动压所呈现出的规律类似，这意味着改进方案较原方案在喷射距离上较原方案而言具有较大改进。

由图 20 通过压降前后对比曲线图可知，改进后的压降整体上较改进前的而言有一定幅度的降低，这

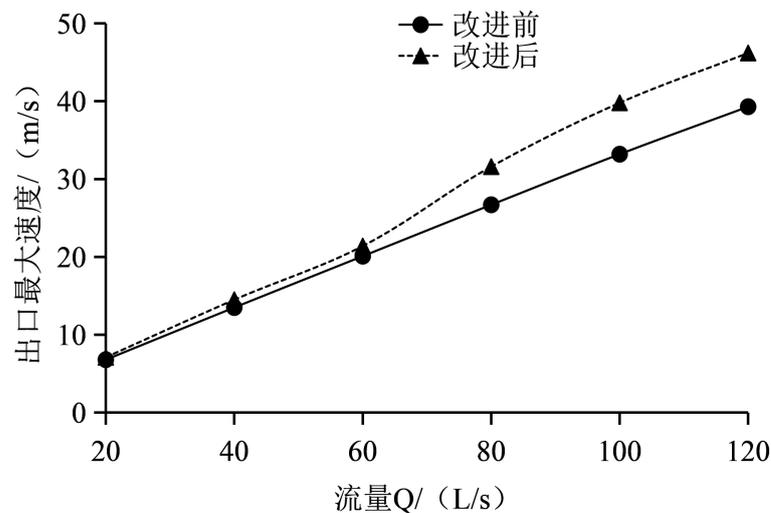


Figure 18. Comparison of maximum exit velocity before and after improvement
图 18. 改进前后出口最大速度的对比

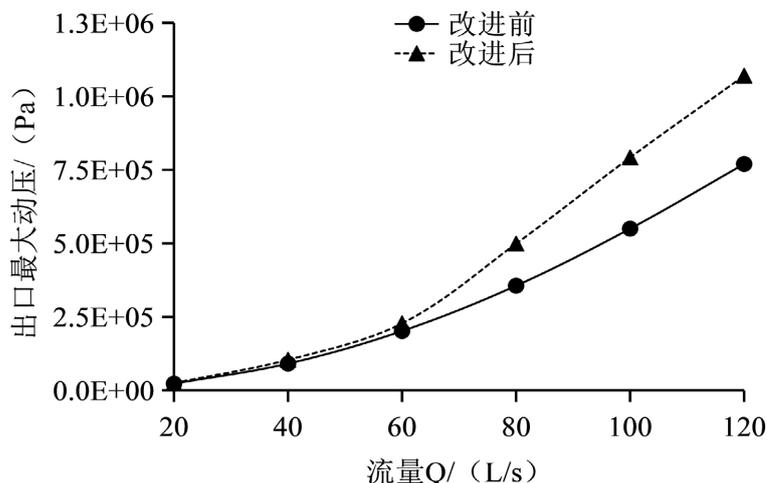


Figure 19. Comparison of maximum outlet dynamic pressure before and after improvement
图 19. 改进前后出口最大动压的对比

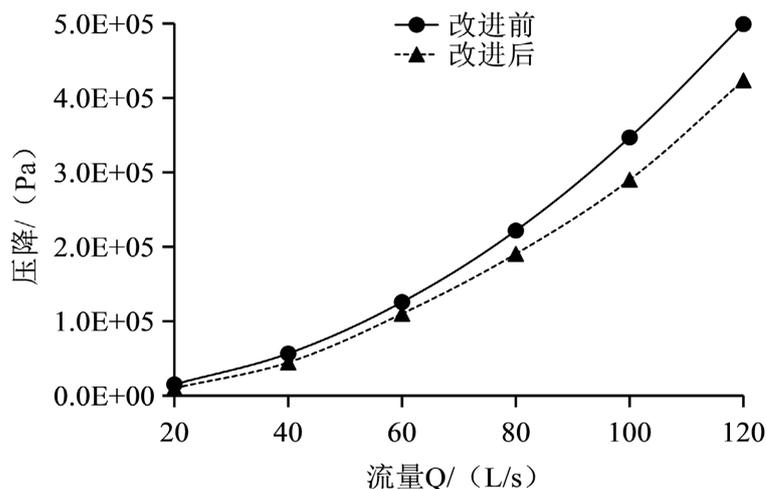


Figure 20. Comparison of pressure drop before and after improvement
图 20. 改进前后压降的对比

说明改进后的方案相对于改进前的方案在能量损耗上会降低很多，这为改进方案出口速度增大继而提升消防炮射程提供了前提条件，改进方案符合预期。

5. 结论

本文以导流式消防水炮的炮身与炮头为研究对象，采用数值模拟对导流式消防炮喷嘴内部的流动情况进行了深入研究，得到了导流结构与压力损失以及出口动压的关系。总结如下：

1) 管道压力损失随着水流量的增大而增大，管道结构改进后管内压力损失得到一定程度的降低；出口最大动压随流量增加也增大，结构改进后的出口动压得到有效提升，说明改进后的消防炮出口喷射速度得到提升，进而灭火能力得到增强。

2) 改进后的炮体出水口的一定射流较为集中，同时汇聚的效果更佳，炮体出口的流速相对更加稳定，内部流场更加的稳定，射流的同时射流集中可以对火源的作用更加准确，精准，也可以减少灭火剂相对的减损。

3) 下一步将以本文数值模拟研究的结果作为参考,设计开发改进型导流结构,并进行相关实验研究。通过实验结果与数值模拟结果的对比,反向优化数值模拟的模型,进而获得最优化的消防水炮导流芯结构,以用于灭火救援实战。

参考文献

- [1] Mitsukiyomurakami, K.K. (1966) Discharge Coefficients of Fire Nozzles. *Transactions of ASME*, **88**, 706-716.
- [2] Yan, H., Ou, Y., Nakano, K., *et al.* (2009) Numerical and Experimental Investigations on Internal Flow Characteristic in the Impact Sprinkler. *Irrigation and Drainage Systems*, **23**, 11-23. <https://doi.org/10.1007/s10795-009-9061-2>
- [3] Miyashita, T., Sugawa, O., Imamura, T., *et al.* (2014) Modeling and Analysis of Water Discharge Trajectory with Large Capacity Monitor. *Fire safety Journal*, **63**, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.09.028>
- [4] Setork, A. (1983) Mathematical Models and Their Numerical Solution for the Flow Field of High Velocity Water Jets. Southern Illinois University, Carbondale, IL.
- [5] Hu, G.L., Long, M. and Chen, W.G. (2013) Structure Design and Analysis of Water Jet Performances of a New Type of Fixed Fire Water Monitor. *Hydromechatronics Engineering*, **41**, 15-22.
- [6] 张俊, 李晓晖, 朱玉泉. 锥形喷嘴水射流反推力的研究[J]. 机床与液压, 2007(4): 139-141.
- [7] 刘平安, 廖小东, 王铨. 两种不同结构的消防炮性能对比分析[J]. 机械研究与应用, 2013(5): 16-18.
- [8] 薛林, 袁寿其, 向清江, 等. 消防水炮主体弯管的绕转结构出口流态分析[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(4): 378-383.
- [9] 胡国良, 刘世鸿, 徐明, 等. 消防水炮流道优化设计及仿真实验分析[J]. 机械设计与制造, 2016, 302(4): 13-16.
- [10] 贾兴豪, 彭向和, 龙血松. 导流板改善弯管流场的数值模拟与优化[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(3): 139-143.
- [11] 袁野, 薛林, 王丽晶. 导流式消防炮喷嘴水力性能研究及优化设计[C]. 2016 中国消防协会科学技术年会论文集, 2016: 33-36.