DOI:10.11918/202406002

# 粒子图像测速技术优化设计盲端扰流器

高金良1,李坤仪1,王 全2,齐世华3,田 园4,于景洋3,刘仁涛3,陈健勋1,丁言琛1

(1. 哈尔滨工业大学环境学院,哈尔滨150090;2. 深圳市深水龙华水务有限公司技术研发部,广东深圳518083; 3. 黑龙江建筑职业技术学院市政与环境工程系,哈尔滨150025;4. 哈尔滨凯纳科技股份有限公司技术研发部,哈尔滨150028)

摘 要:针对中国城镇供水管网中存在的盲端支管污染问题,提出安装扰流器的创新解决方案。通过粒子图像测速技术,系统研究扰流器对低雷诺数湍流中盲端支管内污染物扩散的影响及控制效果,并对其设计参数进行优化。结果表明:扰流器能够在盲端支管与干管交界处形成空腔结构,显著改变干管来流路径与流动模式,降低盲端支管内旋转强度,减弱掺混效果;扰流器的设计参数包括倾斜角度、高度和宽度,安装位置对控制效果具有显著影响;倾斜角度为 30°、高度较大、宽度更大的扰流器以及安装在干管前缘的位置更能有效抑制污染物向干管扩散。本研究为供水管网水质保障与运营管理提供了新的思路和方法,对维护居民用水安全具有重要意义。

关键词:供水管网;盲端;扰流器;粒子图像测速技术;水质改善

中图分类号: TU991.37 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2025)06-0035-08

# Optimized design of dead-end spoilers using particle image velocimetry technology

GAO Jinliang<sup>1</sup>, LI Kunyi<sup>1</sup>, WANG Quan<sup>2</sup>, QI Shihua<sup>3</sup>, TIAN Yuan<sup>4</sup>, YU Jingyang<sup>3</sup>, LIU Rentao<sup>3</sup>, CHEN Jianxun<sup>1</sup>, DING Yanchen<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Technical Research and

Development Department, Shenzhen Shenshui Longhua Water Co., Ltd., Shenzhen 518083, Guangdong, China;

3. Department of Municipal and Environmental Engineering, Heilongjiang Institute of Construction Technology, Harbin 150025, China;

4. Technical Research and Development Department, Harbin Corner Technology Co., Ltd., Harbin 150028, China)

**Abstract:** In response to the widespread issue of pollution in dead-end pipes within urban water supply networks, an innovative solution involving the installation of spoilers was proposed. This study systematically investigated the impact of spoilers on the dispersion of pollutants within dead-end pipes under low Reynolds number turbulent flow conditions and evaluates their control effectiveness using particle image velocimetry technology. Additionally, the design parameters of the spoilers were optimized. The experimental results indicated that spoilers can create a cavity structure at the junction between the dead-end pipe and the main pipe, significantly altering the flow path and pattern of the incoming flow, reducing the rotational intensity within dead-ends, and weakening the mixing effect. The design parameters of spoilers, including tilt angle, height, and width, as well as their installation position, have a significant impact on the control effectiveness. Specifically, spoilers with a tilt angle of 30°, larger height and width, and installed at the leading edge of the main pipe are more effective in suppressing the spread of pollutants into the main pipe. This study provides new ideas and methods for water quality assurance and operational management of water supply networks, which is of great significance for ensuring the safety of residential water usage.

Keywords: water supply network; dead-end; spoiler; particle image velocimetry technology; water quality improving

为保证城镇消防所需用水,城镇建筑物附近设置了基数较大的室外消火栓,根据 GB 50013—2018 《室外给水设计标准》规定,室外消火栓间距不应超过 120 m,中等大小的市政供水管网中就存在着上 千个室外消火栓,其通过连接管直接与城镇供水管 网系统相连,在供水管网中形成盲端支管<sup>[1]</sup>。与管 道相连的盲端支管通常采用三通与干管直接相连, 由于管道内水流速度慢、水龄长,污染物容易在其中

收稿日期: 2024-06-02;录用日期: 2024-07-09;网络首发日期: 2024-08-01

网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240731.1043.002

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3203803);揭榜制科研项目(CE602022000203);黑龙江省重点研发计划(2022ZX01A06);2023 年度新 一轮黑龙江省"双一流"学科协同创新成果(LJGXCG2023-018)

作者简介:高金良(1971--),男,副教授,博士生导师

第57卷

滞留导致水质恶化、管道腐蚀现象加剧<sup>[2-3]</sup>。为维 护居民用水安全,需采取有效措施防止盲端支管中 污染物进入干管。

目前,常采用清洗管道方法包括人工清洗<sup>[4]</sup>、 冰浆清洗技术<sup>[5]</sup>和气水脉冲清洗技术<sup>[6]</sup>等。虽然 这些方法可以从源头减少盲端中污染物,但是存在 效率低、能耗大、成本高、停水时间长等不足。为更 加经济有效地控制盲端污染物扩散,已有研究基于 盲端污染物扩散机制,提出建立盲端污染物扩散数 学模型,以及在盲端安装扰流器等方法。基于盲端 污染物扩散数学模型,可评价受盲端影响的供水管 网中铁、锰浓度分布情况,并针对污染严重区域提出 消火栓放水策略以及优化管道冲洗策略<sup>[1,3,7]</sup>。在 盲端支管处安装扰流器,可改变盲端支管与干管连接 处水流状态,有效控制盲端内污染物向干管中扩散<sup>[8]</sup>。

扰流器按形状可分为前缘锯齿形扰流片<sup>[9]</sup>、圆 柱扰流棒<sup>[10]</sup>、金属条<sup>[11]</sup>、前缘扰流板<sup>[12]</sup>等,各类扰 流器在其适用领域对流体流动控制效果已被证 实<sup>[13-15]</sup>。安装扰流器方法以其成本低、安装方便等 优点,在盲端污染物控制领域颇具应用前景,然而其 在各项参数的优化设计方面尚有欠缺。本研究旨在 通过粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV) 技术观测与分析在供水管网长期运行中干管水流速 度对盲端内污染物扩散影响规律,以及多种规格扰 流器在低雷诺数湍流中对盲端内污染物扩散控制效 果与规律,以优化扰流器设计参数。

1 研究方法

# 1.1 PIV 装置

本研究采用 PIV 装置,观测盲端支管与其所在 干管截面二维速度场,以实现对盲端内部瞬态流分 析,获得一定时间维度内流体流动准确情况。所采 用 PIV 装置主要由4部分组成,即光源系统、散播示 踪粒子的被测流场、图像采集系统和图像处理系统、 光源采用连续激光器,波长为532 nm,额定功率为 10 W。示踪粒子采用不透明白色聚酰胺树脂颗 粒,平均粒径为50 µm、折射率为1.582、密度为 1 030 kg/m<sup>3</sup>。图像采集采用 ISP504 高速摄像机,曝 光时间为1 µs,分辨率为2 320 × 1 720 像素,焦距为 50 mm 和105 mm。

示踪粒子运动时间经过时间间隔  $\Delta t$ ,位置从 (x(t),y(t))变化到( $x(t + \Delta t)$ , $y(t + \Delta t)$ )。当  $\Delta t$ 足够小时,可用式(1)表示流场瞬时速度:

$$\begin{cases} v_x = \lim_{dt \to 0} \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \\ v_y = \lim_{dt \to 0} \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} \end{cases}$$
(1)

式中:x 和 y 分别代表被测流场视图窗口横纵方向,  $v_x$  和  $v_y$  分别为 x 和 y 方向上速度分量。

当被测流场中存在足够多示踪粒子时, PIV 观测结果有效性可从统计分析上得以保证。通过建立 坐标关系,计算得到各示踪粒子速度矢量后,即可建 立盲端支管与其所在干管流场速度分布。

## 1.2 实验平台

实验平台占地 60 m<sup>2</sup>, 布置为环形供水回路, 由 水箱、管道、水泵、散播示踪粒子被测流场、变频控制 器、阀门、电磁流量计、电位器式远传压力表等主要 组件以及其他附件组成。实验平台各组件信息如 表1所示。其中, 散播示踪粒子的被测流场如图1 所示, 由透明的水箱、模拟消火栓和模拟供水管道组 成, 模拟消火栓和模拟供水管道固定在透明水箱中, 通过法兰安装于环状实验管网。

表1 实验平台各组件信息

Tab. 1 Information on the components of the experimental platform

组件	参数	数量
水箱	玻璃钢水箱,高1.5 m,长1.5 m,宽1.0 m	2
管道	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯管材,DN100	
水泵	额定扬程 62 m,额定流量 100 m <sup>3</sup> /h,功率 30 kW,转速 2 950 r/min	1
散播示踪粒子 的被测流场	聚甲基丙烯酸甲酯材料,透明水箱主体部 分长2.4 m,宽1.0 m,高0.7 m,模拟消火 栓与其所在模拟供水管道直径均为 DN100	3
变频控制器	调整水泵运行频率以达到调节管道流速 目的	1
阀门	DN65 蝶阀	6
电磁流量计	流量范围 17~100 m <sup>3</sup> /h	1
电位器式远 传压力表	测量范围0~0.6 MPa	1



图1 散播示踪粒子的被测流场

Fig. 1 Measured flow field with dispersed tracer particles

图 1 中虚线为模拟消火栓的中线,其横轴坐标 为 x = 230。根据 GB 50974—2014《消防给水及消火 栓系统技术规范》<sup>[16]</sup>中第 7.2.2 条,市政消火栓宜

• 37 •

采用直径 DN150 的室外消火栓;第8.1.1条,当市 政给水管网设有市政消火栓时,接市政消火栓的环 状给水管网的管径不应小于 DN150。DN150 为供 水管网中最为常见消火栓型号,并且由于安装被测 流场的实验平台为环状管网,选择直径 DN150 的室 外消火栓安装于 DN150 环状给水管网中的场景进 行模拟。受实验平台水泵可提供能量以及实验场地 面积限制,对所设计被测流场进行等比缩小,模拟消 火栓与模拟供水管道的透明管直径均为 DN100。模 拟消火栓高度为 200 mm。

### 1.3 实验工况设计

扰流器示意如图 2 所示。H 为扰流器高度, B 为扰流器宽度,θ 为扰流器倾斜角度,l 为盲端支 管前缘干管长度。扰流器设计高度标准基于边界层 厚度确定,采用式(2)计算:

$$H > \delta = 0.37 l R e^{-0.2}$$
 (2)

式中: $\delta$ 为边界层厚度, *Re*为雷诺数。本研究中*l*均为20 cm。以管径 DN100、流速 1.0 m/s 工况为例, 由式(2)计算可得 $\delta$ 为0.82 cm。



Fig. 2 Spoiler schematic

当扰流器的高度大于边界层时,可引发流场扰动,促使湍流生成和重新分布,形成空腔结构。因此,按照式(2)计算结果,适用于 DN100 管道扰流器的设计高度不宜小于1 cm。适用于其他管径的扰流器,应按管径变化比例同倍数缩放扰流器大小。实验所采用各扰流器尺寸设计参数如表2 所示。

表 2	各扰流器尺寸设计参数

Tab. 2 Design parameters for each spoiler size

编号	适用管径	倾斜角度 θ/(°)	高度 H/cm	宽度 B/cm
1	DN100	45	2.00	8.00
2	DN100	30	2.00	8.00
3	DN100	60	2.00	8.00
4	DN100	30	1.15	8.00
5	DN100	45	2.00	4.00
6	DN100	45	2.00	2.00

为探究在供水管网长期运行中水流速度对盲端 内污染物扩散影响规律,进行不同干管流速下盲端 污染物扩散实验。根据 GB 50974—2014《消防给水 及消火栓系统技术规范》<sup>[16]</sup>中第 8.1.8 条,消防给 水管道的设计流速不宜大于 2.5 m/s。考虑到安装 消火栓的供水管道可能按经济流速设计,在非消防 用水时的流速可能较低,在 0.10~1.80 m/s 共设置 10 个流速工况,分别为 0.10、0.20、0.40、0.60、 0.80、1.00、1.20、1.40、1.60、1.80 m/s。通过控制 实验平台水泵转速,改变供水管道来流速度。

为探究扰流器对盲端支管内污染物扩散控制效 果与规律,进行安装与未安装扰流器控制盲端污染 物扩散对比实验。考虑到实际供水管网中盲端水流 速度缓慢,设计干管来流速度为0.20 m/s,雷诺数 为1.7×10<sup>4</sup>。此时水流液态为低雷诺数湍流,边界 层厚度为1.13 cm,选择高度为2 cm 的编号1 扰流 器进行对比实验。

为探究扰流器倾斜角度、高度、宽度以及安装位 置等扰流器设计参数对扰流器控制盲端支管内污染 物扩散效果影响,选择编号2~6扰流器进行扰流器 设计参数影响实验。设计干管来流速度为1.00 m/s, 雷诺数为8.6×10<sup>4</sup>,可保证干管来流为局部均 匀流。

所有实验中示踪粒子质量浓度为1 g/m<sup>3</sup>,干管 来流方向为图2 所示方向。

2 干管流速对污染物扩散的影响

# 2.1 平均流速对比

沿 x 方向对被测流场进行切片处理, 计算每一 个切片中速度矢量的横向分量  $v_x$  和纵向分量  $v_y$  的 平均值。图 3(a)为横向分量  $v_x$  的平均值, 向右为 正方向, 图 3(b)为纵向分量  $v_y$  的平均值, 向上为正 方向。图 3 中干管管壁坐标为 y = -2 与 y = 98, 干 管中心坐标为 y = 49。

由图 3(a)可知,不同水流速度工况下,v<sub>x</sub> 的平均值呈现一致规律,即在干管中心略靠近上管壁处水流速度达到越大,越靠近管壁流速越小。这说明在干管中心附近出现均匀流,随着靠近管壁,固定方向上均匀流逐渐消失。当 y > 98 时,即在盲端支管内部,v<sub>x</sub> 的平均值并不随着流速增大而增大,在所有工况下 v<sub>x</sub> 的平均值都接近 0。说明在盲端支管内部的水流几乎不存在横向流动。

分析图 3(b)可知,在干管低流速工况下(0.10 ~ 0.40 m/s),盲端支管内 v, 的平均值方向为正方向 (自下而上)。说明干管水流速度较低时,水流以从 干管流入盲端支管为主要趋势。随着流速逐渐提

高,在干管水流速度超过 0.40 m/s 的工况下, 盲端 支管内 v, 的平均值方向发生转变, 为负方向(自下 而上)。说明干管水流速度较高时,水流以从盲端 支管流入干管为主要趋势, 可能引起盲端支管内部 污染物随水大量流入干管。随着流速逐渐提高, 在 干管水流速度超过 1.00 m/s 的高流速工况下, v, 的 平均值逐渐减小。此时, 盲端支管内部污染物随水 流入干管的量有所减少。这可能是由于在较高流速 下,较小湍流涡旋取代局部均匀流成为流场内主要 流体结构, 使得速度矢量正负方向相互抵消。

这些结果与文献[1]中 CFD 数值模拟结果有较 大出入。CFD 数值模拟结果显示,干管中水流速度 的改变不会影响污染物扩散方向与扩散量,只会影 响扩散快慢,当流速越大时,污染物扩散速度越快。 PIV 实验结果与 CFD 数值模拟结果出现较大差异, 可能由于在进行 CFD 数值模拟时缺少对盲端支管 污染物扩散机制的深入理解,导致在计算模型与边 界条件等设计时与现实情况出现较大偏差。后续研 究需要进一步构建盲端支管污染物扩散机制模型。

### 2.2 涡量对比

由 2.1 分析可知,在干管水流速度超过 1.00 m/s的高流速工况下,v 的平均值逐渐减小,初 步分析可能与湍流涡旋形成有关。为进一步验证该 猜想,分别选取干管来流速度0.20 m/s 与1.80 m/s 作为低流速与高流速工况代表,进一步对比分析其 涡量云图。如图 4 所示, 0. 20 m/s 时流线较为稳 定,尤其是经过盲端支管以后沿干管方向变得更为 平滑,可以视为局部均匀流。涡旋极少,主要集中在 均匀流附近,并且涡量较大。流速1.80 m/s 时流线 杂乱无序,可视为湍流。涡旋分布非常均匀,并且涡 量较小。由此证明2.1节在较高流速下,较小湍流 涡旋取代局部均匀流成为流场内主要流体结构,使 得速度矢量正负方向相互抵消的猜想。值得注意的 是,干管来流速度较高时(1.80 m/s),在盲端支管 与下游干管连接处出现较为明显流动分离现象,形 成一个反向涡旋,这有助于减缓盲端支管内污染物向 干管扩散,进一步验证2.1节中在高流速工况下,盲端 支管内部污染物随水流入干管的量有所减少的猜想。



### 图 3 被测流场平均流速





### 图4 不同工况下被测流场涡量对比

Fig. 4 Comparison of vorticity in measured flow field under different working conditions

#### 扰流器效果分析 3

对比安装与未安装编号1扰流器实验所得瞬时 流场图(图5)发现,在没有扰流器时,干管下游管壁



附近瞬时流速接近理论流速,流速分层现象不太明 显。安装扰流器后,流体通过管道时横截面积减少, 使干管下游瞬时流速增加,出现明显流速分层现象。 这表明扰流器对干管中流体流速分布产生显著影响。



#### 图 5 安装与未安装编号1 扰流器实验所得瞬时流场图对比

安装编号1扰流器实验所得空腔位置涡旋示意 如图 6 所示。下侧箭头所示来流不与盲端支管管壁 接触,沿着下游管壁流动;上侧箭头所示来流,由于 剪切层不稳定性,流入盲端支管,改变其中原有流体 结构。这表明扰流器可以引发剪切层抬升,并在盲 端支管与干管连接处形成空腔结构。

对比安装与未安装编号1扰流器实验所得涡量 云图(图7),可以明显观察到有无扰流器时盲端内 涡旋结构存在显著差异。在没有扰流器情况下,来 流在到达盲端支管与下游干管连接处时,紧贴盲端 支管右侧管壁向上流动。直到流体遇到盲端支管堵 头处阻塞时,才在靠近盲端支管尽头处形成一个逆 时针方向涡旋。当加入扰流器后,空腔效应导致来 流在深入盲端支管之前就发生旋转,在盲端内形成 "8"字型涡旋。就流速而言,有无扰流器对盲端支











#### 图 7 安装与未安装编号1扰流器实验所得涡量云图对比

Comparison of vortex cloud maps obtained from experiments with and without No. spoiler installed Fig. 7

扰流器设计参数影响 4

#### 扰流器倾斜角度影响 4.1

编号2和3扰流器倾斜角度分别为30°和60°,

其他设计参数均相同。基于编号2和3扰流器实验 所得涡量云图(如图8),分析扰流器倾斜角度对扰 流器控制盲端支管内污染物扩散效果影响。扰流器 倾斜角度为30°时,在盲端支管下部出现较为明显

由右向左平移流场。进入盲端支管流体更偏向于横 向移动,阻碍盲端支管内污染物向干管扩散。扰流 器倾斜角度为60°时,进入盲端支管流体更偏向于 纵向移动,在盲端支管下部生成涡旋,易携带盲端支 管内污染物进入干管。由此可推断,扰流器倾斜角 度设计为30°时控制盲端支管内污染物扩散效果更好。

### 4.2 扰流器高度影响

y/mm

编号 2 和 4 扰流器高度分别为 2.00 cm 和 1.15 cm,其他设计参数均相同。基于编号 2 和 4 扰 流器实验所得涡量云图(如图 9),分析扰流器高度 对扰流器控制盲端支管内污染物扩散效果影响。扰 流器高度为 2.00 cm 时,进入盲端支管干管水流在 盲端支管内部只形成一个顺时针涡旋。而扰流器高 度为 1.15 cm 时,干管来流受扰流器阻碍减小,进入 盲端支管动能更强,更易形成多个涡旋,增大掺混强度,加剧盲端支管内污染物扩散。由此可见,其他设计参数相同条件下,具有更大高度扰流器控制效果更好。

## 4.3 扰流器宽度影响

基于编号5和6扰流器实验所得瞬时流场图 (如图10),分析扰流器倾斜宽度对扰流器控制盲端 支管内污染物扩散效果影响。安装不同宽度扰流器 时,盲端支管内部流场相似,呈现顺时针方向旋转流 动。对比二者发现,扰流器宽度更大时,顺时针旋转 涡旋趋势更为明显,可认为其对污染物控制效果也 更好。尽管如此,与长度和高度相比,扰流器宽度对 盲端支管内部流体流动状态影响较不明显,工程应 用中应重点关注扰流器倾斜角度与高度参数优化。











Fig. 10 Comparison of transient flow field diagrams obtained from experiments with No. 5 or 6 spoiler installed

### 4.4 扰流器安装位置影响

将干管来流首先到达的盲端支管与干管连接处 的干管管壁称为干管前缘,支管管壁称为支管前缘。 基于编号1扰流器分别安装于干管前缘与支管前缘 实验所得旋转强度图(图11),分析扰流器安装位置 对扰流器控制盲端支管内污染物扩散效果影响。当 扰流器安装在干管前缘时,干管来流分别沿着盲端 支管左右侧管壁上行,并且仅在支管入口处形成逆 时针转动涡旋,支管内污染物几乎不受干管来流扰

> 旋转强度/(rad·s-1) 346 167 13.9 2.0296 157 1.8 12.5 1.6 11.1 247 147 1.4 9.7 197 w/mm 137 v/mm 1.2 8.3 1.0 6.9 147 127 0.85.5 97 117 4.2 0.6 107 0.4 47 2.8 1.4 0.2 97 -3∟ -26 124 200 275 502 135 160 185 210 235 260 285 310 49 351 426 x/mmx/mm(a) 干管前缘 (b) 支管前缘



Fig. 11 Comparison of rotational intensity diagrams from experiments with No. 1 spoiler installed on the leading edge of the main pipe or the leading edge of the branch pipe

然而,将扰流器安装于干管前缘不可避免地会 引起供水管网水头损失的增加。为进一步探究安装 扰流器对供水管网水力的影响,通过式(3)计算扰 流器的局部阻力系数:

$$\zeta = \frac{200gh}{\bar{v}^2} \tag{3}$$

式中: 《为扰流器的局部阻力系数, h为压力降, g为 重力加速度, v 为扰流器后(水流方向)的平均水流 速度。

在实验室条件下,经过测定  $h = \bar{v}$  后计算得到 编号1 扰流器的局部阻力系数为1.2。由此计算得 到在水流速度为1.00 m/s 时,编号1 扰流器的局部 水头损失仅为5.85×10<sup>-4</sup> MPa。而一根长度1 000 m 的 DN100 铸铁管沿程水头损失为2.06×10<sup>-2</sup> MPa。 与管道沿程水头损失相比,扰流器的局部水头损失 小了近2 个数量级,对供水管网水力影响几乎可以 忽略不计。

5 结 论

 1)随着供水管道水流速度的增加,盲端支管内 部流体流向由从干管流入盲端支管转变为从盲端支 管流入干管。高流速下形成的反向涡旋减缓了污染 物的扩散,表明涡旋结构在盲端污染物控制中起重 要作用。 2)加入扰流器能够在盲端支管与干管交界处 形成空腔结构,并导致涡旋生成和重新分布,从而显 著改变干管来流路径与流动模式。在低雷诺数湍流 中,扰流器功能得到良好实现,盲端支管内旋转强度 明显降低,掺混效果减弱。

3) 扰流器倾斜角度对扰流器控制盲端支管内 污染物扩散效果影响最为显著, 倾斜角度为 30°时 控制效果更好。其次, 控制扰流器高度也十分重要。 在相同倾斜角度下, 高度较大扰流器更能有效抑制 涡旋。再者, 当扰流器宽度更大时, 顺时针旋转涡旋 趋势更为明显, 对污染物控制效果也更好。此外, 扰 流器安装位置应位于干管前缘, 才更能发挥其效果, 同时其对供水管网水力影响几乎可以忽略不计。

4)本研究主要关注扰流器的倾斜角度、高度、 宽度和安装位置等设计参数对盲端污染物扩散控制 效果的影响,而对于扰流器的具体形状及其在实际 应用中的流体动力学效应尚未深入探讨,为未来研 究提供了进一步探索的空间。在未来的研究中,可 以考虑对不同形状扰流器的流体控制效果进行比较 分析,以期发现更为有效的扰流器设计。

# 参考文献

[1] 贺泳博. 市政消火栓的铁、锰释放与扩散规律研究[D]. 哈尔 滨:哈尔滨工业大学,2022

HE Yongbo. Study on the release and diffusion law of iron and



动。当扰流器安装在支管前缘时,干管来流沿着盲

manganese in municipal fire hydrants[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022

 [2]张金松,李冬梅.新《生活饮用水卫生标准》推动供水行业水质 保障体系化建设[J]. 给水排水,2022,58(8):6
 ZHANG Jinsong, LI Dongmei. New standards for drinking water

quality leads water industry into systematic construction of water quality assurance [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(8): 6. DOI:10.13789/j. cnki. wwe1964.2022.05.18.0009

 [3]欧谌吴,高金良,胡诗苑,等.基于空腔流动理论的市政消火栓 盲端铁迁移扩散机制研究[J].环境科学学报,2020,40(10): 3615

OU Chenhao, GAO Jinliang, HU Shiyuan, et al. Research on mechanism of iron migration and diffusion from dead-endbranch pipe of municipal fire hydrant based on square cavity flow mechanism [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40 (10): 3615. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2020.0362

[4]张宝东,何刚. 给水管道清洗技术在管网运营维护中的应用分析[J]. 中国给水排水,2012,28(22):43
 ZHANG Baodong, HE Gang. Application of pipeline cleaning

technologies in operation and maintenance of water network [~J~] . China Water & Wastewater, 2012, 28(22): 43

[5]施凯,程志强,彭秀华,等.管道冰浆清洗在高品质供水示范区 建设中的应用[J].净水技术,2022,41(3):178

SHI Kai, CHENG Zhiqiang, PENG Xiuhua, et al. Application of pipelines ice slurry cleaning in construction of high quality water supply demonstration area [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 178. DOI:10.15890/j.cnki.jsjs.2022.03.026

[6]杨坤. 气水脉冲清洗给水管道两相流过程研究及其数值模拟 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014 YANG Kun. Two-phase flow research and numerical simulation of

air-water pulse cleaning process for water distribution pipe [  $\rm D$  ]. Harbin Harbin Institute of Technology, 2014

- [7]高金良,贺泳博,郭文娟,等.应用正交试验的消火栓末端铁扩散影响因素研究[J].给水排水,2022,58(1):118
  GAO Jinliang, HE Yongbo, GUO Wenjuan, et al. Research on influencing factors of iron diffusion at the end of fire hydrant by orthogonal test [J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 58(1):118. DOI:10.13789/j.cnki.wwe1964.2022.01.019
- [8]李博. 消火栓盲端支管铁扩散规律与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022

LI Bo. Law analysis and control research of iron diffusion at dead-end branch pipe of municipal fire hydrant[D]. Harbin: Harbin Institute

of Technology, 2022. DOI:10.27061/d.cnki.ghgdu.2021.002875 [9]刘瑜, 童明波, HU Z. 基于 DDES 算法的有扰流片腔体气动噪 声分析[J]. 空气动力学学报, 2015, 33(5):643

LIU Yu, TONG Mingbo, HU Z. DDES of aeroacoustic over an open cavity with and without a spoiler [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2015, 33(5): 643

- [10]章文文,徐荣武.前缘扰流体对水中流激空腔振荡影响的数值 研究[J].振动与冲击,2021,40(24):12
  ZHANG Wenwen, XU Rongwu. Numerical investigation on the influence of leading-edge spoilers on underwater flow-induced cavity oscillations[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021,40(24): 12. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.24.002
- [11]吴继飞,徐来武,范召林,等.开式空腔气动声学特性及其流动控制方法[J].航空学报,2015,36(7):2155
  WU Jifei, XU Laiwu, FAN Zhaolin, et al. Aeroacoustic characteristics and flow control method of open cavity flow[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(7):2155
- [12] DUDLEY J G, UKEILEY L. Passively controlled supersonic cavity flow using aspanwise cylinder [J]. Experiments in Fluids, 2014, 55(9): 1810. DOI:10.1007/s00348-014-1810-9
- UKEILEY L S, PONTON M K, SEINER J M, et al. Suppression of pressure loads in cavity flows [ J ]. AIAA Journal, 2004, 42 (1); 70. DOI:10.2514/1.9032
- [14]余培汛,白俊强,郭博智,等.剪切层形态对开式空腔气动噪声的抑制[J].振动与冲击,2015,34(1):156
  YU Peixun, BAI Junqiang, GUO Bozhi, et al. Suppression of aerodynamie noise by altering the form of shear layer in open cavity
  [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1):156. DOI: 10.13465/j. enki. jvs.2015.01.028

[15]陈小勇,姚璐,郭正鑫,等. B 柱扰流器对风振噪声的影响及 其机制[J]. 汽车工程, 2023, 45(9): 1772
CHEN Xiaoyong, YAO Lu, GUO Zhengxin, et al. Influence of Bpillar spoiler on wind buffeting noise and its mechanism [J]. Automotive Engineering, 2023, 45(9): 1772. DOI:10.19562/ j. chinasae. qcgc. 2023.09.025

 [16]中国中元国际工程公司. 消防给水及消火栓系统技术规范: GB 50974—2014[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2014
 China IPPR International Engineering Corporation. Technical code for fire protection water supply and hydrant systems: GB 50974— 2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014

(编辑 刘 形)