

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.15.018

# 基于冲击力测量的排水立管终限流速实验研究

夏艳辉<sup>1,2</sup>, 王文海<sup>1,3</sup>, 宫永伟<sup>1,3</sup>, 谢鹏<sup>1</sup>, 赵梓轩<sup>1</sup>

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 联合赤道环境评价股份有限公司, 天津 300042; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

**摘要:** 针对建筑排水立管中水流终限流速的问题,提出了一种基于冲击力测量的方法。使用力传感器和变送器将水流冲击平板的力转化为电压信号采集,再依据流体动量方程将冲击力换算成水流下落速度。结果表明:在超过一定高度后,排水立管下端出流流速与立管高度基本无关;验证了排水立管中确实存在终限流速,且与流量正相关;拟合出水流速与流量的二次函数关系式,相关系数 $R^2 = 0.9467$ 。对该方法的可靠性进行了初步验证,可为建筑排水立管设计和相关测量提供一定的理论支撑。

**关键词:** 排水立管; 终限流速; 冲击力; 动量方程

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)15-0122-05

## Terminal Velocity of Vertical Drainage Pipe Based on Impact Force Measurement

XIA Yan-hui<sup>1,2</sup>, WANG Wen-hai<sup>1,3</sup>, GONG Yong-wei<sup>1,3</sup>, XIE Peng<sup>1</sup>, ZHAO Zi-xuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>,

Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Lianhe

Equator Environmental Impact Assessment Co. Ltd., Tianjin 300042, China; 3. Beijing

Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

**Abstract:** This paper proposed a method based on impact force measurement to measure whether there was a terminal velocity of water flow in building vertical drainage pipe. The force of water impacting on the plate was converted into voltage signal collection through a weighing transmitter and a weight sensor, and then the impact force was converted into the falling velocity of water according to the fluid momentum equation. After exceeding a certain height, the flow velocity at the lower end of the vertical drainage pipe had little relation with the height of the pipe. The conclusion that the terminal flow velocity existed in the vertical drainage pipe and was positively correlated with the flow rate was verified. The quadratic function relation between flow velocity and flow rate was fitted, and the correlation coefficient  $R^2$  was 0.9467. The reliability of this method was preliminarily verified, which could provide theoretical support for the design of building vertical drainage pipe and related measurement.

**Key words:** vertical drainage pipe; terminal velocity; impact force; momentum equation

建筑排水立管的排水能力和水力学分析一直是世界各国的重要研究方向之一,而其安全稳定运行的前提是保证室内排水立管连接的器具水封不被破坏,或室外排水立管中始终保持重力流。在重力作用下,立管中水流下降时克服摩擦力,先做加速度逐渐减小的变加速运动,当加速度减小到0时,速度达到最大值,即为“终限流速”。

世界各国对水流的终限流速进行了相关研究。20世纪30年代,美国研究人员首先提出“水膜流”和“终限流速”等理论,提出终限流速 $v_{\max}$ 的计算公式,水流达到终限流速时在管中下落高度所对应的管长称为终限长度 $L$ ,但该公式并没有对排水立管的材质进行相关说明,存在一定的局限性<sup>[1]</sup>;随后,美国研究者又在设计手册中提出了适用于铸铁管的终限流速经验公式<sup>[2]</sup>;英国研究人员提出了排水立管内水和空气流量的经验关系公式<sup>[3]</sup>;20世纪70年代,日本研究者也提出并逐渐完善了适用于本国立管设计负荷的计算方法<sup>[4]</sup>。而我国对建筑排水系统的排水能力以及终限流速的理论分析和实验研究起步较晚。21世纪初,卢安坚<sup>[5]</sup>、王增长<sup>[6]</sup>根据美国学者不同时期的研究总结出排水立管水流终限流速和终限长度的计算公式;随后李亚峰<sup>[7]</sup>根据我国排水管道实际情况,给出适合我国塑料排水立管水流终限流速的经验计算公式,以及终限长度与终限流速的对应关系;徐长杰<sup>[8]</sup>根据实际工程计算指出,排水立管中水流达到终限流速时的终限长度只有3 m,超过3 m后,其下落速度不再增加;张之立<sup>[9]</sup>借助水膜流阻力计算公式,系统分析了国外惯用的怀特-伊顿公式,认为其与我国排水立管公式本质相同;汪雪姣等<sup>[10]</sup>以内径为90.9 mm的有机玻璃排水立管进行测试,但排水高度只有9 m,仅相当于3层楼的高度,结论并不充分;彭海龙<sup>[11]</sup>则认为在建筑排水立管中不存在所谓的“终限流速”。因此,国内外关于排水立管终限流速的研究还不够透彻,甚至关于终限流速的有无,学界也还存在争议,有必要进行进一步的研究和探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 基于冲击力的流速测量方法

冲击力测量系统见图1。在排水立管出口处设置一个平板称作为承力盘,承受下落水流的冲击力,平板下方连接一支力传感器,用于计量冲击力

的大小。传感器通过变送器将力信号转化为电压信号并通过变送器进行放大、滤波等处理后形成标准电压信号,再通过A/D数据采集器进入计算机显示并记录。

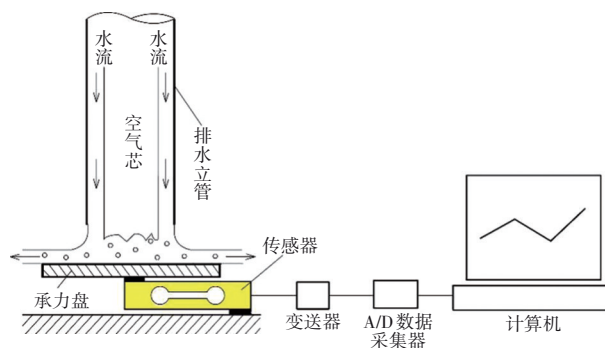


图1 冲击力测量系统示意

Fig.1 Schematics of impact force measurement system

水流落于水平承力盘后侧向流出(见图2),取控制断面A-A、C-C,以竖直向上为 $y$ 坐标轴正方向,进行控制体内水体受力及各断面流速分析。

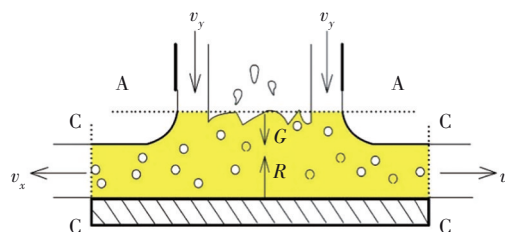


图2 水流控制体受力分析

Fig.2 Force analysis of water flow control body

图2中 $v_y$ 为A-A面上垂直于承力盘面的速度, m/s; $v_x$ 为C-C面上平行于承力盘的速度, m/s; $R$ 为承力盘对水的反作用力, N; $G$ 为控制体内水体的重力, N; $Q$ 为控制体内流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ; $\rho$ 为水的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。则竖直方向上恒定总流动量方程如下所示:

$$\sum F_y = R - G = \rho Q(0 - v_y) \quad (1)$$

瞬时速度 $v_y$ 的表达式为:

$$v_y = -\frac{R - G}{\rho Q} \quad (2)$$

在忽略控制体内水体的重力 $G$ 时,  $F \approx R$ , 则:

$$v_y \approx -\frac{R}{\rho Q} \quad (3)$$

根据牛顿第三定律, 承力盘所受力 $F$ 即为其对水体的反作用力 $R$ , 因此只要测出一定流量下承力盘所受到的力即可通过式(3)求得流速 $v_y$ 。

## 1.2 实验装置与过程

实验系统见图3,循环水系统主要由水箱、水泵、变频器、阀门、供水管、承雨斗、无排水横支管的PVC排水立管组成。水箱尺寸为100 cm×70 cm×100 cm,供水管外径由50 mm变为110 mm,排水立管外径为110 mm。循环水由水泵经供水管提升至承雨斗,经排水立管下落至正下方的承力盘。流量由变频器和阀门调节,满足《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)规定的雨落管泄水能力极限值<sup>[11]</sup>。冲击力测量系统由承力盘、传感器、变送器、超声波流量计、A/D数据采集器、计算机构成。超声波流量计安装于供水管,实验前先用砝码标定传感器,建立变送器输出电压 $U$ 与冲击力 $F$ 的关系,其输出的标准电压信号通过A/D数据采集器输入电脑。

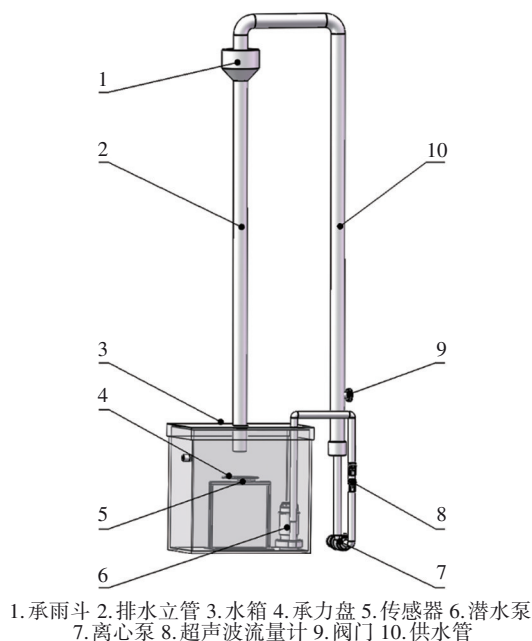


图3 实验系统

Fig.3 System diagram of the experiment

实验现场的流量计量实物如图4所示。实验时同步改变供水管和排水立管的高度,模拟不同建筑高度水流进入排水立管的场景。实验装置安装在楼侧,立管起点到承力盘高度设计为 $H=3$ 、7、8.5、10、11.5和14.5 m,分别在这些高度下改变流量,并采集流量与冲击力的变送数据。由于高流速下水流具有强烈的湍流脉动特性,导致所测力和流量呈现一定幅度的波动,故均采用测试软件获取其稳定1 min内的时均值。



图4 流量计量实物

Fig.4 Actual device of flow measurement

## 2 结果与讨论

### 2.1 测速实验结果

分别获取各排水管高度条件下的流量与冲击力数据,基于式(3)获得其对应的流速值,并据此绘制不同高度下流速与流量的关系(见图5),以及经过插值法计算得到的流量为 $8.0 \text{ m}^3/\text{h}$ 下的出流流速与高度的关系(见图6)。

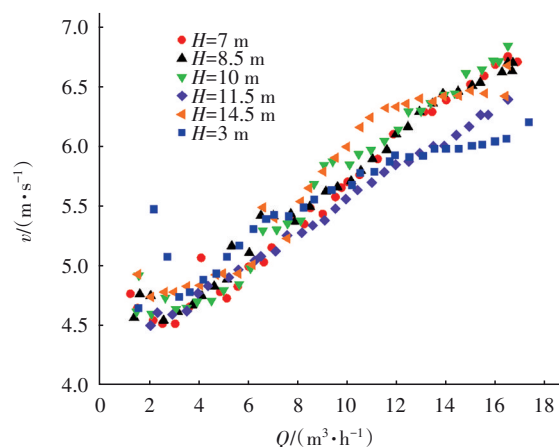


图5 不同高度下流速与流量的关系

Fig.5 Relationship between flow velocity and flow rate at different heights

由图5和图6可知:①对比相同流量下 $H=14.5$ 、11.5、10、8.5、7 m的出流流速,可知实验条件下管中水流流速随下落高度增至一定数值后便不再显著单调增加,可能存在一个最大值即“终限流速”。从图5还可看出,管道末端出流流速与流量呈明显

正相关,这与前人研究的结论<sup>[8]</sup>是吻合的。②在流量固定时,不同高度下的实验数据发展趋势有一定的离散性,原因在于更改高度时,虽经严格控制,但承雨斗处的入流条件和管道的垂直走向也会发生微小变化,此二者会明显影响管壁水膜的周向分布,进而影响末端出流流速的大小。③实际观察到当流量小时易出现水流不贴附管壁直接下落的现象,这会直接导致小流量下末端出流流速反而增大的情况出现。④当 $H=3\text{ m}$ 时,更容易出现水流未完全贴附管壁直接下落的现象,所以在小流量下甚至可能出现出流流速高于其他高度对应速度的现象;而在大流量下,由于没有足够的高度使其完成加速过程,出流速度明显低于其他高度的速度,未能达到该流量下预期的最大出流流速,证明在实验高度条件下,其终限长度大于 $3\text{ m}$ ,这与文献<sup>[7]</sup>的结论相吻合。⑤不同高度的流量与末端出流流速之间近似满足线性关系,且 $R^2=0.9467$ ,如式(4)所示。

$$v=0.1529Q+4.1749 \quad (4)$$

式中: $Q$ 为流量, $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $v$ 为流速, $\text{m/s}$ 。

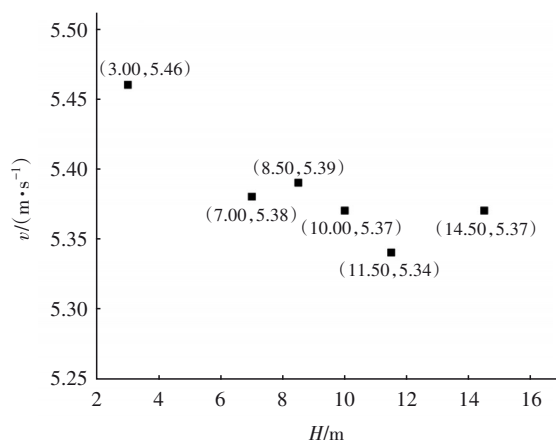


图6 出流流速与高度的关系( $Q=8.0\text{ m}^3/\text{h}$ )

Fig.6 Relationship between outflow velocity and height at  $Q=8.0\text{ m}^3/\text{h}$

## 2.2 示踪验证实验

为验证本研究测速方法的可靠性,选取排水立管高度为 $11.5\text{ m}$ 的工况进行示踪法验证:将排水立管下端衔接一段透明管,在管外设置长度为 $0.5\text{ m}$ 的标识区。以乒乓球为标识物,用 $960\text{ 帧/s}$ 的高速摄像追踪管内水流及乒乓球下落过程,如图7所示。用视频分析软件回放读出乒乓球穿越标识区的时长,并以此求得其穿越标识区的速度,同时测量水流冲击力,获取对应的水流终限流速,其对比见图

8。可见,乒乓球下落速度与冲击力法测得的水流下落终限流速趋势基本吻合但相对偏小,可能是由于冲击力法忽略了平板上的积水重力,即式(2)简化至式(3)所致。同时,也观察到流量较小时乒乓球下落速度较大的现象,这与前文分析一致。

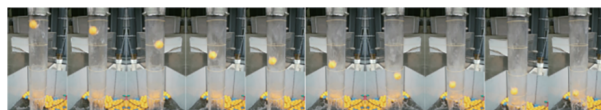


图7 高速摄像追踪下落标识物分帧截屏图像

Fig.7 Framed screenshot images of falling marker tracked by high-speed camera

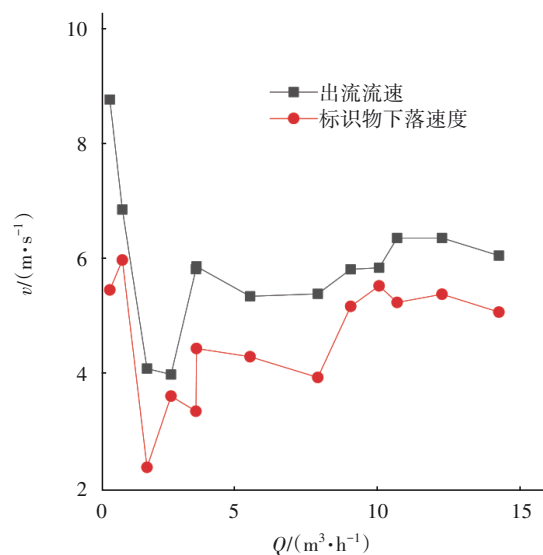


图8 不同流量条件下出流流速和标识物下落速度对比

Fig.8 Comparison of outflow velocity and marker falling velocity under different flow conditions

## 2.3 误差分析

本研究测量方法主要误差如下:①排水立管下缘与承力盘中间存在 $150\text{ mm}$ 的高度差,导致水流出立管后流速会继续加大,根据能量守恒定律可推知,当终限流速为 $6\text{ m/s}$ 时,会带来不超过 $0.24\text{ m/s}$ 的正误差。②采用式(3)计算终限流速时忽略了承力盘上水体的重力,导致测得的力大于实际冲击力,会带来正误差;定量分析这部分误差较为困难,但根据连续方程,由于流速很大,导致实验观测到承力盘上的水膜很薄,同时流量越大冲击力越大,因此大流量下忽略重力带来的误差较小,而小流量下相对误差较大。

## 3 结论与展望

① 当流量一定或变化较小,且排水立管超过



一定高度时,管端出流流速近似保持不变,可以间接证明终限流速是存在的。

② 实验条件下所得管端出口流速与流量呈显著正相关,统计各高度下测量数据后,拟合出其关系方程 $v=0.1529Q+4.1749$ , $R^2=0.9467$ 。

由于该实验系统采用水泵直接供水方式,在改变立管高度后很难准确复现之前的流量条件,建议进一步的研究采用高位水箱恒定水位供水方式,在保持流量不变的前提下进行实验,同时入流条件及立管安装精度也需要进行更严格的控制。另外,由于实验系统未设置横支管,所得具体数据的应用仅限于重力流雨水排放系统。

#### 参考文献:

- [1] DAWSON F M, KALINSKE A A. Report on Hydraulics and Pneumatics of Plumbing Drainage Systems [M]. Iowa: State University of Iowa, 1937.
- [2] WYLY R S, EATON H N. Capacities of stacks in sanitary drainage systems for buildings [J]. National Bureau of Standards Monograph, 1961, 31: 6-9.
- [3] 陈方肃. 高层建筑给水排水工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2001.  
CHEN Fangsu. High-rise Building Water Supply and Drainage Engineering [M]. Changsha: Hunan Science & Technology Press, 2001 (in Chinese).
- [4] 李伟. UPVC塑料排水立管最大允许充水率 $\alpha$ 值的试验研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.  
LI Wei. The Experimental Research on the Maximum Allowable Fullness Ratio ( $\alpha$ ) of UPVC Plastic Drainage Stack [D]. Changsha: Hunan University, 2005 (in Chinese).
- [5] 卢安坚. 美国建筑给水排水设计[M]. 北京: 经济日报出版社, 2007.  
LU Anjian. Plumbing System Design in US [M]. Beijing: The Economic Daily Press, 2007 (in Chinese).
- [6] 王增长. 建筑给水排水工程[M]. 5版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.  
WANG Zengzhang. Building Water Supply and Drainage Engineering [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005 (in Chinese).
- [7] 李亚峰. 建筑给水排水工程[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2018.  
LI Yafeng. Building Water Supply and Sewerage Engineering [M]. 3th ed. Beijing: China Machine Press, 2018 (in Chinese).
- [8] 徐长杰. 高层建筑排水立管消能问题探讨[J]. 浙江建筑, 2007, 24(12): 45-46.  
XU Changjie. Discussion on energy dissipation of drainage riser in high-rise building [J]. Zhejiang Construction, 2007, 24(12): 45-46 (in Chinese).
- [9] 张之立. 关于塑料排水立管终限流量公式与终限长度公式的确立[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会2020年学术年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020: 508-530.  
ZHANG Zhili. On the establishment of final limiting discharge formula and final limiting length formula for plastic drainage standpipe [C]//China Civil Engineering Society. China Civil Engineering Society 2020 Annual Conference Proceedings. Beijing: China Architecture Building Press, 2020: 508-530 (in Chinese).
- [10] 汪雪姣, 高乃云, 夏圣骥. 单立管排水系统通水能力的试验研究[J]. 给水排水, 2007, 33(6): 65-67.  
WANG Xuejiao, GAO Naiyun, XIA Shengji. Study on flux capacity of single stack drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(6): 65-67 (in Chinese).
- [11] 彭海龙. 双乙字弯安装对dn110普通单立管排水系统排水能力的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.  
PENG Hailong. Effect on Drainage Capacity of dn110 Single Stack Drainage System by the Installation of Pipe Offsets [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017 (in Chinese).

**作者简介:** 夏艳辉(1995-), 女, 辽宁朝阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为雨水污染控制与资源化利用。

**收稿日期:** 2020-12-03

**修回日期:** 2021-02-03

(编辑: 沈靖怡)