

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.01.010

圆管流速骤增对局部阻力的影响

戴 杰, 蔡书鹏, 彭绍府, 申正辉

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 为探究流速骤增引起的阻力特性以及相关受制因素的受控特性, 采用速度骤增比分别为 25:1 和 4:1 的透明有机玻璃圆管和不同来流紊流程度的试验装置进行了局部阻力测试试验。试验结果表明, 速度骤增管的阻力系数先随雷诺数增加而急剧减小, 而后随雷诺数的增加逐渐减少直至不变。随着上游来流的紊流强度增加, 在试验所测雷诺数范围内, 局部阻力系数因分离流再附点提前而减小; 速度骤增管的局部阻力系数不仅与速度骤增比和突缩结构有关, 同时在设计管内流速下与雷诺数成负相关。这一试验结果与经典教科书对突缩阻力系数与雷诺数无关的传统经验公式并不相同, 对管网设计过程中必须进行的总阻力准确评估, 具有一定的参考意义。

关键词: 局部阻力系数; 流速; 速度骤增; 再附点提前; 试验装置

中图分类号: TV134

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)01-0067-05

引文格式: 戴 杰, 蔡书鹏, 彭绍府, 等. 圆管流速骤增对局部阻力的影响 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(1): 67-71.

Research on the Effect of a Sudden Current Velocity Increase on Circular Tube Local Resistance

DAI Jie, CAI Shupeng, PENG Shaofu, SHEN Zhenghui

(College of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of an investigation of the resistance characteristics brought about by the rapid increase of velocity and the related factors, the local resistance test has been carried out by using transparent plexiglass circular tubes with sudden velocity increase ratios of 25:1 and 4:1 respectively, with experimental devices of different incoming turbulence degrees adopted as well. The experimental results show that the drag coefficient of the tube decreases sharply with the increase of Reynolds number, subsequently decreasing gradually with the increase of Reynolds number until it remains constantly unchanged. With the increase of the turbulence intensity of upstream flow, the local resistance coefficient decreases due to the advance of reattachment point of separated flow within the range of Reynolds number measured in the test. The local resistance coefficient of the tube with sudden velocity increase is not only related to the sudden velocity increase ratio and sudden contraction structure, but also negatively related to the Reynolds number under the design velocity in the tube. The experimental results subvert the traditional empirical formula that the

收稿日期: 2021-03-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51476051)

作者简介: 戴 杰 (1996-), 男, 湖南湘潭人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为水流减阻,

E-mail: 1318734541@qq.com

通信作者: 蔡书鹏 (1963-), 男, 河北迁安人, 湖南工业大学教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为水流减阻,

E-mail: windowscsp@sina.com

coefficient of resistance of sudden shrinkage is independent of Reynolds number in the classical textbook, but rather it has a certain reference significance for the accurate evaluation of the total resistance in the process of pipe network design.

Keywords: local resistance coefficient; current speed; velocity surge; advance of reattachment point; tese device

0 引言

管道流体运输被广泛应用在水利、化工、城市居民及其它工业工程领域。输送过程中所需的能量消耗主要来自流体的黏性导致的各种能量损失,包括流动发展损失和流动充分发展损失两类基本损失。流动充分发展损失是指流动速度的断面分布沿流动方向不再改变的流域产生的阻力产生的能量损失;流动发展损失是因流动方向和流动速度大小变化而使得流动速度的断面分布随流动发生改变的损失,该流域产生的阻力称为局部阻力,它完全是因管路固体边界突然发生改变而产生,原因虽然局限于局部,损失却可能分布在较长的管路区域。固体边界形状突然改变时,会引起原有水流内部结构的改变,从而产生漩涡和脱流分离等现象,以及在边界条件改变后,水流还需重新调整结构以适应新的均匀流条件,如在弯头、突扩、突缩等处。沿程阻力相对局部阻力有一套更为完整的理论,局部阻力的研究虽未发展完善,但在近年来国内研究者也做了大量关于局部阻力的试验研究^[1-3]。

孙琳等^[4-5]使用4种不同突缩比管道进行试验和数值模拟后得出,圆管突缩局部阻力系数均随着管径比的增大而增大。焦利芳等^[6]通过试验研究表明,突缩比为1:1.5的突扩及突缩局部阻力系数随流量改变甚微,但其得到的试验突扩局部阻力系数在低雷诺数区域并不准确。张昕等^[7]通过对工程常用90°圆弧弯管进行数值模拟得知局部阻力系数与相对粗糙度呈正相关。李静等^[8]对90°圆弧弯管进行数值模拟,发现同一雷诺数下弯管半径与圆管直径之比越大,局部阻力系数 ζ 越小。当雷诺数 $Re \leq 6 \times 10^5$ 时,局部阻力系数 ζ 随雷诺数增大而迅速减小;当 $Re \geq 6 \times 10^5$ 时,局部阻力系数 ζ 随 Re 的变化很小,几乎趋于不变。白兆亮等^[9-10]对有压输水管道孔板进行试验后,发现孔板局部阻力系数与雷诺数有关,雷诺数较小时,其局部阻力系数大小随雷诺数变化而变化,在水力计算时不能视为定值;当 $Re \geq 1 \times 10^5$ 时,孔板局部阻力系数基本为一定值,不再随雷诺数的变化而改变。

本文拟采用试验手段,使用不同突缩比的速度骤增管及不同来流紊流度的测试装置进行试验,旨在探究局部阻力与相关受制因素之间的依存关系,以及装置主体部分对试验结果准确性的干扰程度,期望为相关的工程设计提供参考。

1 试验装置和方法

1.1 泵循环试验装置

图1为泵循环试验装置示意图,由输水段、测试段及回流段3部分构成。

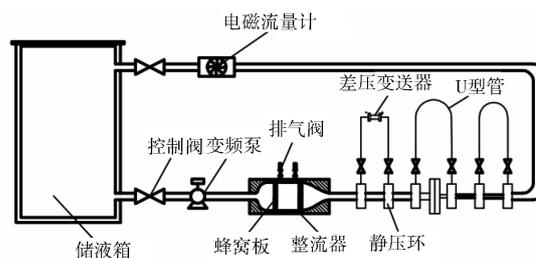


图1 泵循环试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of pump circulation experimental device

输水段含带盖的储液箱、控制阀、变频泵、整流器。测压段上游使用两种亚克力圆直管,内径 D 分别为20 mm和50 mm,长度同为2 m;下游测压管使用内径为10 mm,长度同为2 m的圆直管,分别构成直径突缩比为2:1和5:1的速度骤增复合管;上游测压段与下游测压段使用定制法兰盘进行连接。回流段由控制阀、电磁流量计、不锈钢管、PVC管、90°弯接头组成。泵开式测试系统去除泵循环装置中的回流段,改由称重法代替电磁流量计计量流量,将回流段控制阀接管做溢流,接水管保证其供水,供水段、测试段与原装置基本一致。为尽可能抑制来流紊动,在水泵到测试端之间装有整流箱,它由不锈钢的圆柱胴体和两端为半椭圆形的端部焊接而成,且其内部还被置有两道筛网,用于碎涡。

1.2 平流箱试验装置

图2为平流箱试验装置示意图,分供水段、测试段两部分,其测试段与泵循环测试段基本相同,仅是

没有回流段。供水段由固定势能的平流箱(储水箱)、溢流管、进水管、供水管、整流箱构成,平流箱底端距测试段管的中轴线高差为3.5 m,平流箱上有溢流阀和输水阀以保证其溢流,从而保持水的势能不变,采用提高储水箱的高度来代替泵的作用,同时还能降低由于泵所导致的来流脉动。

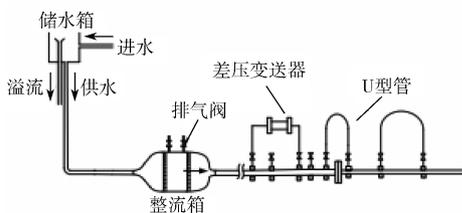


图2 平流箱试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device of the advection box

1.3 试验方法

1.3.1 试验装置影响测试

为探究试验装置各主要部分对局部阻力试验的影响,进行3组不同试验装置对比试验:1)将泵循环闭式测试系统和泵开式测试系统进行对比测量,可以得出泵循环测试系统中回流段对局部阻力试验有无影响,同时可以考察水泵带来的来流扰动对局部阻力的影响;2)采用泵循环开式测试系统与平流箱测试系统进行对比试验,除了可以观察水泵的来流扰动对局部阻力的影响之外,还可以观察没有下游回流段对局部阻力可能产生的影响;3)将平流箱有整流箱测试系统与无整流箱测试系统所测局部阻力系数进行对比,可评价整流箱的整流对局部阻力的影响。标定流量计读数、压差变送器读数所产生的误差大小,以便后期对所测数值进行修正。在试验开始前,先对电磁流量计采用质量法进行标定,其结果表明,在流量计读数小于 $0.35 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,误差为5%;流量值大于 $0.68 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,其误差为2%;读数在两者之间时,其误差为3%。在上游试验段需选用压差变送器,为保证压差变送器芯体不因测试段压差过大而损坏,先行使用U型管测得大致压差范围,由此选定合适量程的压差变送器进行测量,通过测量选定0~224 mm水柱量程的微差压力变送器,使用注射称重法对其进行标定,标定后误差为5%。

1.3.2 试验方法

对于泵循环及泵开式测试系统,通过调频器改变频率以调节流速,使用微型压差变送器测量 D_{20} 管段压差,使用U型测压管测量 D_{10} 管段及 D_{20} 到 D_{10} 突缩段的压力。泵循环闭式测量时,使用电磁流量计测量流量;在泵循环开式测量时,使用称重法测流量,

称重法计算流量时,数据误差选用小于5%。 D_{10} 管、 D_{20} 管、 D_{50} 管取压方式为静压环取压,所有管均需在试验前打孔并安装静压环。同时,每段测试管道需在合适位置取4~5个排气孔,并在试验前排出气泡,确保试验在管道内无气泡的条件下进行。

2 试验结果及分析

2.1 突缩局部阻力分析

通过试验测得直径 D_{10} 段、 D_{20} 段以及突缩段的压差,通过计算得出不同突缩比的局部阻力系数。雷诺数、沿程阻力系数、局部阻力系数分别按照如下公式定义或计算:

$$Re = UD / \nu, \quad (1)$$

$$\lambda = 2\Delta p Dg / (LU)^2, \quad (2)$$

$$\zeta = 2gh / U^2. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: U 、 Re 分别为管内平均流速和雷诺数; λ 、 ζ 分别为沿程阻力系数和局部阻力系数,均为无量纲量; Δp 为充分发展流区两点间压差,m; L 为阻力损失测试段的长度,m; h 为突缩的局部阻力损失,通过四点压差测试法计算; g 为重力加速度; ν 为纯水的运动黏度。

2.2 试验装置数据分析

2.2.1 上游来流对非沿程助的影响

图3为泵循环装置与泵循环开式装置对局部阻力系数的影响的试验数据。

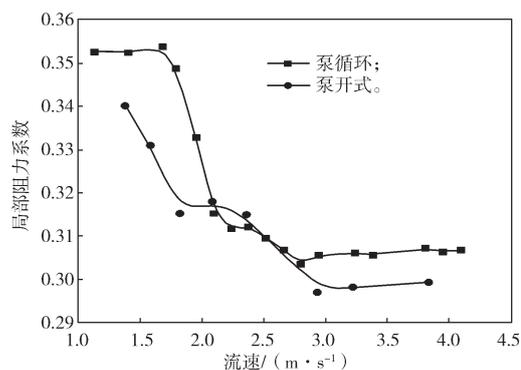


图3 泵循环装置与泵循环开式装置对局部阻力系数的影响特性曲线

Fig. 3 Comparison of local resistance coefficient for the pump-driven flow system with or without returning tubes

由图3可知,当流速为2.0~2.8 m/s ($Re=20\ 000\sim 28\ 000$)时,泵循环测试系统与开式系统所测得的局部阻力系数基本相同;在流速小于2.0 m/s时 ($Re<20\ 000$),泵循环测试系统测试得出的局部阻力系数比开式系统高出0~10%。但是当流速大于2.8 m/s ($Re>30\ 000$)时,两者的局部阻力系数基本不随

流速而改变,但循环系统的局部阻力系数约比开式系统的大3%。这一结果可解释如下:回流管的流动造成了突缩而引起的流动发展长度大于开式系统,从而导致局部阻力相应增加。另外,泵循环式在下游测压段后接 90° 弯头,在低流速时会影响下游段测压导致循环式所测出的局部阻力要略大于泵开式所测结果, D_{10} 管段增加管长以尽量消除弯管所带来的误差。

图4为泵开式和平流箱局部阻力系数对比图。由图可知,相同流速或者相同雷诺数下的局部阻力系数,尽管两者的来流紊流程度不同,但经过整流器整流后,对速度骤增引起的局部阻力的影响在0~4%的范围内,基本可忽略不计。

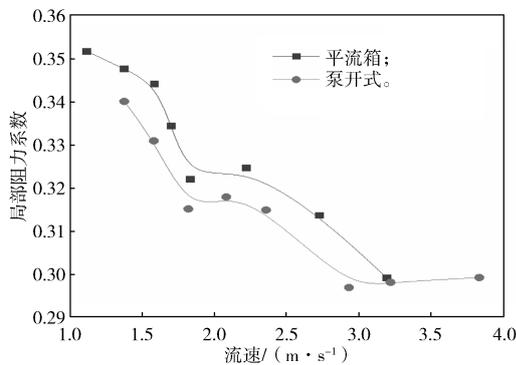


图4 平流箱装置与泵开式装置局部阻力系数对比图
Fig. 4 Comparison diagram of local resistance system between advection box device with the pump open device

图5为有无整流箱对平流箱装置的局部阻力系数随管平均流速或雷诺数的改变特性曲线。

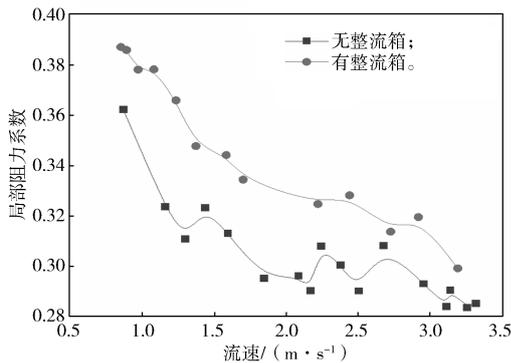


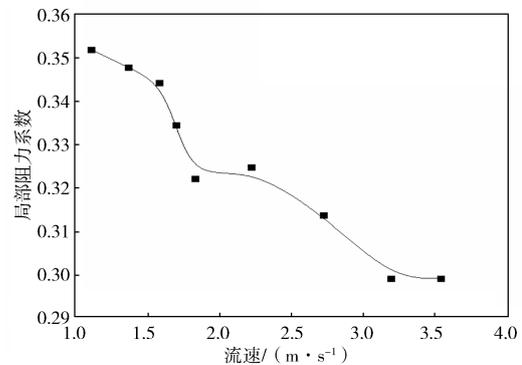
图5 有无整流箱对平流箱装置局部阻力系数的影响曲线
Fig. 5 Comparison diagram of the influence of rectifier box on local resistance coefficient under advection box device

由图5可知,平流箱在其它条件相同但未使用整流箱的情况下,随着流速增大局部阻力波动较为剧烈,但较设置整流箱的情况,局部阻力系数普遍增大2%~8%,说明测试段进口的来流紊流程度越大,局部阻力越小。这一试验结果可解释如下:来流的紊流程度越大,越能使速度骤增流体的再附点提前,

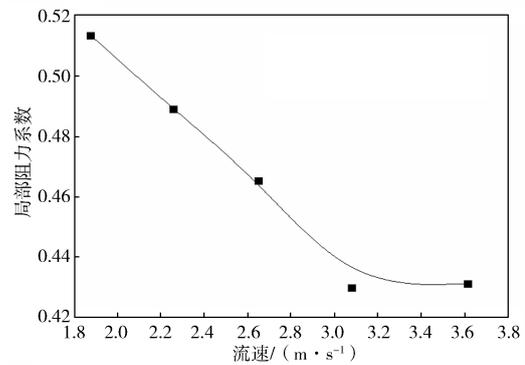
逆向流的长度减小,从而使局部阻力减小。而使用整流箱后,来流波动较小,使阻力系数相对无整流箱而增大的明显趋势。对比可知,供水段不进行整流会对测试段造成较大的影响。 90° 弯接头对流体产生的紊流可以由整流箱消除部分杂乱的流体^[11]。受试验场所限制,不能增长 D_{10} 管段段长,于是循环测试系统无法消除由弯管带来的影响,使用泵开式与平流箱差别较小,从试验结果看,整流箱基本符合试验需求。

2.2.2 速度骤增比对局部阻力系数的影响

选用直径突缩比为 $D_{50}:D_{10}$ 和 $D_{20}:D_{10}$ 两种速度骤增复合管,折算成速度骤增比分别为25:1和4:1($D_{20}:D_{10}$ 为速度骤增复合管的内径比)。图6为直径突缩比 $D_{20}:D_{10}$ 和 $D_{50}:D_{10}$ 的局部阻力系数随管内流体平均流速的变化特性曲线。



a) $D_{20}:D_{10}$



b) $D_{50}:D_{10}$

图6 不同突缩比下突缩管局部阻力系数随管内流体流速的变化特性曲线

Fig. 6 Local resistance coefficient versus mean velocity in sudden contraction pipe under different sudden contraction ratios

据图6可知,对于 $D_{20}:D_{10}$ 速度骤增管,在管平均流速大于2.5 m/s($Re < 25\ 000$)前,局部阻力系数随流速增大而减小;而在管内平均流速大于3.0 m/s($Re > 30\ 000$)后,局部阻力系数随流速加快而开始变缓,与雷诺数的关联渐失。对于 $D_{50}:D_{10}$ 速度骤增管,在管平均流速3.5 m/s(雷诺数 $Re < 35\ 000$)之前,局

部阻力系数随流速增大而减小,流速(雷诺数)与局部阻力系数呈负相关;而在管内平均流速大于3.5 m/s ($Re > 35\,000$)后,局部阻力系数随流速加快开始平缓,与雷诺数的关系基本消失。

3 结论

本文通过对突缩式速度骤增管引起的局部阻力特性相关受制因素的受控特性进行试验研究,得到了如下结论:

1) 速度骤增引起的局部阻力系数,首先在大于某个与速度骤增比有关的雷诺数之前,其随雷诺数增加而减小;在大于该雷诺数之后,其与雷诺数的关联逐渐减小直至不变;

2) 上游流非稳定流动程度对所测的雷诺数全部范围内,对速度骤增管的局部阻力系数呈正相关的控制作用;

3) 速度骤增管的局部阻力系数不仅与速度骤增比和突缩结构有关,在管内设计流速下,还与雷诺数呈负相关,这一试验结果与经典教科书对突缩阻力系数与雷诺数无关的传统经验公式并不相同,对管网设计中总阻力的准确评估具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 贺益英,赵懿琚,孙淑卿,等.弯管局部阻力系数的试验研究[J].水利学报,2003,34(11):54-58.
HE Yiyang, ZHAO Yijun, SUN Shuqing, et al. Experimental Study on Local Loss Coefficient of Bend in Pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(11): 54-58.
- [2] 贺益英,赵懿,孙淑卿,等.输水管道中弯管局部阻力的相邻影响[J].水利学报,2004,35(2):17-20.
HE Yiyang, ZHAO Yi, SUN Shuqing, et al. Interaction of Local Loss Between Bends in Pipe Line[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 17-20.
- [3] 李卓,俞坚,马重芳.小通道单相流体突扩和突缩局部阻力特性[J].化工学报,2007,58(5):1127-1131.
LI Zhuo, YU Jian, MA Chongfang. Local Resistances of Single-Phase Flow across Abrupt Expansion and Contraction in Small Channels[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2007, 58(5): 1127-1131.
- [4] 孙琳.圆管突扩(缩)局部阻力试验及流场数值模拟[D].哈尔滨:东北农业大学,2010.
SUN Lin. Experimental Study and Flow Field Numerical Simulation on Loss of Pipe with Sudden Expansion or Contraction[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2010.
- [5] 孙琳,赵宝峰,郭春力.对圆管突然缩小局部阻力系数的研究[J].水利科技与经济,2010,16(4):367-368.
SUN Lin, ZHAO Baofeng, GUO Chunli. Study on Local Resistance Coefficient of Sudden Reduction of Circular Pipe[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2010, 16(4): 367-368.
- [6] 焦利芳,李凤臣,董泳,等.表面活性剂溶液在不规则管件内的湍流减阻特性[J].节能技术,2009,27(1):7-13,68.
JIAO Lifang, LI Fengchen, DONG Yong, et al. Turbulent Drag Reduction Characteristics of Surfactant Solution in Irregular Tubing Units[J]. Energy Conservation Technology, 2009, 27(1): 7-13, 68.
- [7] 张昕,纪昌知,姜敏,等.相对粗糙度和雷诺数对90°弯管局部阻力系数的影响[J].水力发电学报,2013,32(4):88-93,152.
ZHANG Xin, JI Changzhi, JIANG Min, et al. Influence of Relative Roughness and Reynolds Number on Local Resistance Coefficient of 90° Bend Pipeline[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 88-93, 152.
- [8] 李静,杨俊红,黄涛,等.雷诺数和半径比对90°圆弧弯管流动特性的数值研究[J].机械科学与技术,2017,36(10):1491-1497.
LI Jing, YANG Junhong, HUANG Tao, et al. Numerically Studying Effects of Reynolds Number and Radius Ratio on Flow Characteristics of 90° Arc Bend Pipe[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(10): 1491-1497.
- [9] 白兆亮,李琳.有压输水管道孔板局部阻力相邻影响试验[J].水利水电科技进展,2015,35(2):28-31,42.
BAI Zhaoliang, LI Lin. Test on Local Resistance Adjacent Influence of Pressure Water Pipe[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(2): 28-31, 42.
- [10] 白兆亮.有压输水管道孔板局部阻力相邻影响研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2015.
BAI Zhaoliang. The Study on Orifice's Local Resistance Adjacent Impact in Pressure Water Pipe[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- [11] 屈鑫鑫.带流动调整器圆形截面管道内流场分布特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.
QU Xinxin. Experimental Study on the Flow Conditioning of the Water-Pipe Network Installed with Flow Conditioner[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

(责任编辑:申剑)