

柔性管自激振动减阻效果的实验研究

蔡书鹏¹ 唐川林¹ 李大美²

(1. 株洲工学院高压水射流研究所 湖南 株洲 412008; 2. 武汉大学水利水电学院 湖北 武汉 430072)

摘要 在实验确认柔性管紊流减阻效果的基础上,采用双重管结构,对柔性管的自激振动减阻效果进行了实验研究。结果表明,管的壁厚越小自激振动的减阻率越大,在雷诺数约为 2.2×10^4 时,壁厚为 2 mm、3 mm 及 4 mm 的柔性管自激振动减阻率依次约为 13%、10%、8%。

关键词 柔性管;双重管结构;自激振动;紊流减阻

中图分类号:TV131.2

文献标识码:A

文章编号:1006-764X(2006)01-0016-04

Experimental study on drag reduction effect by self-excited vibration of flexible tubes // CAI Shu-peng¹, TANG Chuan-lin¹, LI Da-mei² (1. Institute of High Pressure Water Jet, Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou 412008, China; 2. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on the confirmation of the turbulent drag reduction effect of flexible tubes, an experimental study was conducted on the drag reduction effect by self-excited vibration of flexible tubes with a double-sleeve structure. The result shows that the drag reduction rate by self-excited vibration inversely varies with the thickness of the tubes. The rates of drag reduction of the flexible tubes with the thickness of 2 mm, 3 mm, and 4 mm were about 13%, 10%, and 8%, respectively, at the Reynolds number about 2.2×10^4 in the experiment.

Key words: flexible tube; tube with double-sleeve structure; self-excited vibration; turbulent drag reduction

国内经济的持续高速发展使能源供需态势日益呈现紧张趋势,节能减阻技术的开发是解决人类所面临的能源渐枯、工业的高速发展与能源需求倍增之间矛盾的可行途径之一,同时也是科技领域的重大研究课题。

工业管路的流体输送基本上是紊流形态,降低其紊流减阻的方法是建立在改变边界层紊流结构,尽量减少边界层内部紊流摩擦能量耗散这一机理上,主要方法有柔性固壁减阻^[1]以及基于 Toms 效应的长链高分子添加剂^[2]和表面活性剂添加剂减阻^[3]。最大减阻率可达 80% 的直长链高分子添加剂由于其链状结构不能承受反复的高剪切流,只适用于非循环式流体输送系统;一度遭高剪切破坏后的分子链状结构在从高剪切状态释放后能够迅速反复修复的表面活性添加剂减阻方法可用于循环式流体输送系统。但是柔性圆管减阻的研究近年来除文献[4]外尚不多见。

柔性管管摩系数不仅受随流量工况而改变的管径变化的影响,而且更与柔性管与紊流场内部发生的猝发现象之间的相互脉动响应特性有关,这种相

互响应特性使柔性管呈现脉动性振动,称之为柔性管的自激振动,柔性管的自激振动又会反作用于紊动流场,进而改变原刚性管的流场特性。如何单独评价柔性管自激振动的减阻效果是这一领域研究的难点之一。迄今为止大部分研究如文献[4]都是使用置于大气状态下的管径依据压力损失求出管摩系数,从中减去由于内径变化部分所得到的就是具有柔性管的自激振动单独减阻效果的管摩系数,文献[4]指出最大减阻率可达 22%,而且减阻率在雷诺数大于 3.5×10^4 后仍有随之快速增大的趋势。但是由于柔性管的黏弹性性质使得内径变化对管摩系数的影响无法准确计算,因此对柔性管的自激振动减阻效果的评价也就自然缺乏准确性。为解决这一难题,本研究首先在管外压力为大气压的条件下,使用层流段的管径计算管摩系数,充分确认柔性管具有减阻效果之后,采用将流动的水引入柔性管外侧的双重管结构进行压力损失测试,以便单独考量柔性管的自激振动减阻效果。

在双重管结构下,由于柔性管与外部刚性管之间的黏性固结,可保证不受实验段上下游柔性管设

置张力不均的影响,从而避免了因张力设置的不同而对柔性管自激振动的影响。柔性管内部压力分布沿流下降,但柔性管外部却承受的是小于内部平均压力的均布压力,在最大流量工况下内外压力分布不均导致的管径膨胀最大,经平面弹性应变理论计算小于0.1%。因此在双重管结构实验条件下,依据所测出的压力损失计算的减阻率可以认为是柔性管自激振动的单独减阻效果。

1 实验装置及实验方法

1.1 实验材料

实验使用了3种柔性硅胶圆管,壁厚分别为2 mm、3 mm、4 mm;公称内径均为12 mm;弹性模量 $E = 3.7 \text{ MPa}$;泊松比 $\nu = 0.45$ 。

1.2 实验装置

实验装置如图1所示,图2为实验段双重管结构示意图。管路全线采用等距柔性支撑,双重管间的水取自下游静压环下游30 mm处,为确保能在很大雷诺数范围内取得实验数据,同时应保证最容易发生变形的2 mm实验管不至于引起塑性变形,最大限度地设计了供水箱的高度。为实现定常紊流,进水口的压头应该保持恒定,为此在供水箱里设置了溢流平水装置。测试部分上下游静压孔按测压孔工艺要求加工,采用三点连通平均测压。此外还应保证实验段上游有足够的管长,以确保紊流的发展有足够的距离。上游安有温度感应装置,以监测实验时的温度变化,但应尽量控制温度的变化,流量采用重量法,由下游的调节阀调节。

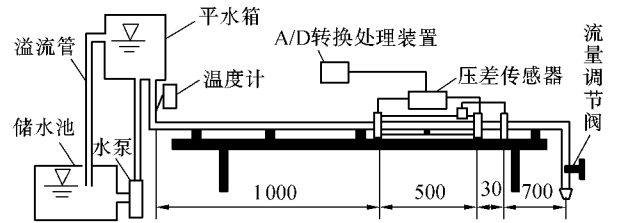


图1 实验装置示意图(单位:mm)

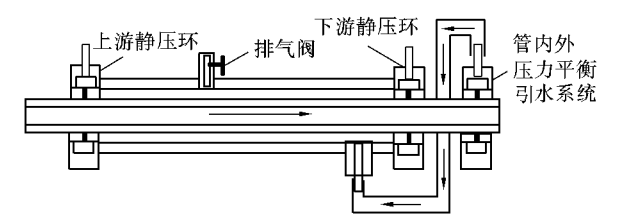


图2 双重管实验段结构示意图

1.3 实验方法

为确保实验装置的可信性,在正式实验前,使用内径为13 mm、壁厚为3 mm的透明玻璃纤维刚性管作测试管,进行了预备实验。实验结果表明:在层流

阶段管摩系数实验点与层流理论公式 $\lambda = 64/Re$ 的最大偏差为0.9%;在紊流阶段与Blasius的经验公式最大偏差0.7%,说明实验装置足够可信。

正式实验时,首先进行管外压力为大气压下柔性管的压力损失测定,待确认确有减阻效果后,再使用双重管结构进行柔性管的自激振动减阻效果的压力损失测定,以下为叙述方便起见分别称之为管况1和管况2。

为使压力损失的测定具有较高的精度,依据压力损失大小分档测量,分别采用5 mmAq、60 mmAq、100 mmAq、200 mmAq 4种压差传感器,并将压差传感器接收到的压差变化信号通过A/D转换器和与其配套的日本松下株式会社的计测分析软件得到时均压差。

实验中主要的量测物理量为压力损失,其精度在层流时小于 $\pm 1\%$,在紊流时小于 $\pm 0.7\%$ 。

2 实验结果分析

2.1 管径变化

根据文献[5]中的Bender经验公式,管内完全发展层流所需的发展距离为 $0.0566 Red$,其中 d 为管内径, $Re = u_m d / \nu$ (u_m 为断面平均流速)。根据测试段上游长度来计算保证测试区域为充分发展层流的最大雷诺数,考虑到其他外来扰动等影响因素,该雷诺数约为1200,与实测基本一致,因此,小于该雷诺数时实验点应与层流的理论管摩系数公式 $\lambda = 64/Re$ 一致,在此前提条件下,可按照式(1)反求出管径:

$$d = \left(\frac{128 \rho L \nu Q}{\Delta p \pi} \right)^{0.25} \tag{1}$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 ; L 为压差测试区长度,m; ν 为水的运动黏度, m^2/s ; Q 为流量, m^3/s ; Δp 为压差,Pa。层流区的压力损失甚小,在管况1和管况2下对使用式(1)计算的管径数据组分别采用最小二乘法找出一个等效管径 d_e 作为该测试管在相应管况下的管摩系数计算用管径。当 $Re > 1200$ 时,由于内部压力随流速增加而降低,因此在管况1下紊流区的实际管径必然小于等效管径 d_e 。

依据完全层流的压力损失测试数据,在管况1和管况2下求算的等效管径如表1所示。管况1与管况2相比,除壁厚4 mm管因壁厚较大管径基本不变外,其他两种测试管均有较大的膨胀,2 mm及3 mm管的管径变化分别约为2%及1%。

表1 不同柔性管层流段的等效管径 d_e mm

管况	壁厚 2 mm	壁厚 3 mm	壁厚 4 mm
1	11.83	11.43	11.60
2	11.64	11.31	11.58

2.2 管摩系数

管径 d 的变化对管摩系数 λ 的影响可由压力损失的定义公式推得：

$$\lambda = \frac{\pi^2 \Delta p}{8 \rho L Q^2} d^5 \tag{2}$$

因此在管况 1 下,如果依据实测的压力损失使用等效管径 d_e 计算的紊流段管摩系数小于刚性管的管摩系数,那就可以充分地说明减阻效果的真实性。

图 3 是 3 种柔性管在管况 1 和管况 2 下,管摩系数随着雷诺数变化的比较,图中同时绘出了刚性管的实验点,以便与柔性管直观比较。图 3(a)表明:在管况 1 下,即便是使用层流段的等效管径 d_e 计算的管摩系数,对于所给的 3 种柔性管在紊流段也比刚性管小,可见其自激振动减阻效果确实存在,这一结果与文献 [4] 报告的结果一致。图 3(b)为各柔性管自激振动单独作用下的管摩系数,如图 3(a)所推测,明显低于刚性管。

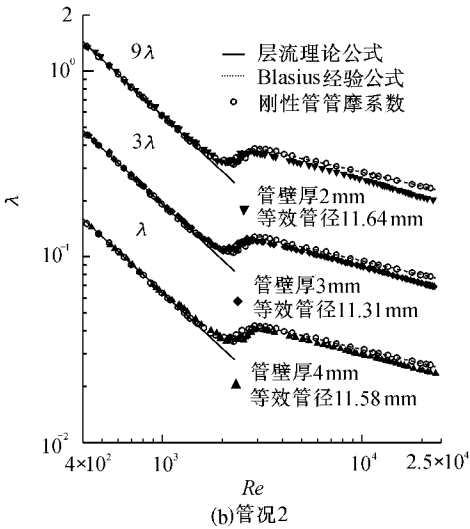
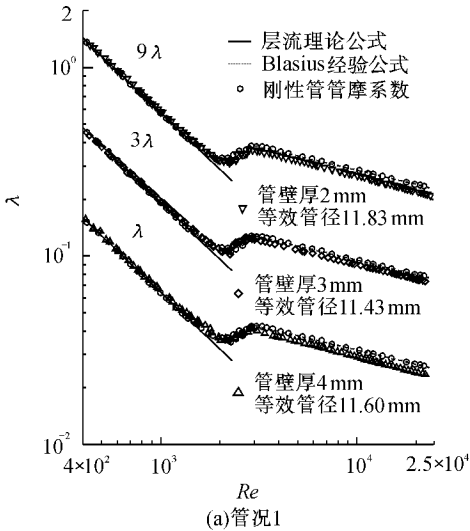


图 3 柔性管与刚性管的管摩系数比较
每种测试管在两种管况下于 $Re > 1350$ 范围内都上偏离了层流理论直线 $\lambda = 64/Re$, 分析主要原因

是在该雷诺数下测试区域并不都是充分发展层流,有部分是未充分发展层流,压力损失比完全发展层流略有增加所致。

2.3 自激振动减阻率

图 4 是 3 种柔性管在不同管况下减阻率 DR 的变化比较,图中空心符号为管况 1,实心为管况 2),具体由式 (3) 定义：

$$DR = (\lambda_r - \lambda) / \lambda_r \tag{3}$$

其中 $\lambda_r = 0.3164 Re^{-0.25}$ 为 Blasius 经验公式。

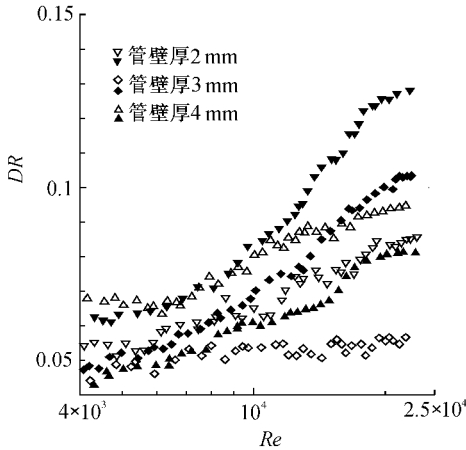


图 4 不同壁厚柔性管的减阻率比较

图 4 显示,在管况 1 下,壁厚 4 mm 管减阻率最大,2 mm 管次之,3 mm 管最小。使用层流区的等效管径 d_e 计算的紊流段减阻效果应为自激振动减阻效果减去因使用较紊流段实际管径大的等效管径 d_e 计算管摩系数所带来的表观增阻效果,自激振动最弱的 4 mm 管之所以减阻效果最大,可以解释为紊流段的实际管径与 d_e 相差最小,因而表观增阻效果最小,自激振动减阻效果比例最大;相反 2 mm 管及 3 mm 管因计算管径与实际管径相差较大,因此表观增阻效果加大,自激振动减阻效果显得比较小,但由于 2 mm 管自激振动减阻效果远大于 3 mm 管,所以 2 mm 管的减阻率大于 3 mm 管。

在管况 2 下,2 mm 管减阻率最大,3 mm 管次之,4 mm 管最小。对于所给的 3 种壁厚,呈现出了壁厚越小,柔性管自激振动减阻效果越好的倾向。在柔性管的紊流减阻机理尚未明确之前,可以推测为,壁厚的减小有利于促进柔性管管壁与紊流流场脉动间的动力响应,减小猝发现象发生的频率并减弱其强度,进而更有效地扼制脉动能量的产生,从而减阻效果越好。

2 mm 和 3 mm 管的自激振动减阻率大于管外压力为大气压时的减阻率,这一点从式 (2) 很容易得到解释。但 4 mm 管却出现了相反的趋势,可以解释为,因为该管在管况 1 和管况 2 下,管径变化小于 0.2%,但由于后者管外充满水使本来就较小的自激

振动受到的扼制程度较大所致。

3 结 论

a. 当管外压力为大气压时 ,柔性管的内径随流量工况而变化。

b. 柔性管的黏弹性与流体脉动的相互作用即自激振动改变了紊动流场特性 ,其减阻效果确实存在。与刚性管相比可以预测的是 ,猝发现象发生的频率减小、强度减弱 ,黏性底层的增厚 ,紊流能量的生成强度减弱以及雷诺应力的降低等。

c. 在所给的 3 种测试管壁厚范围内 ,自激振动的减阻效果随着柔性管壁厚的减小而增加 ,当 $Re \approx 22000$ 时 ,2 mm ,3 mm 及 4 mm 管的自激振动减阻率依次约为 13% ,10% 和 8%。

d. 自激振动的减阻率在所测的 $Re < 23\,000$ 范围内有随 Re 增加而增加的趋势 ,但增加趋势越来越缓慢 ,其增加程度也因壁厚而异。

柔性管壁与脉动流场的相互作用具体改变了紊

动流场的哪些力学特性 ,柔性管壁自激振动的频率波动特性如何 ,其波动特性与流场的脉动之间有着怎样的关系 ,是本实验课题的下一步研究目标。

参考文献：

[1] CHOI K S X. Turblent drag reduction using complian[J]. Proc R Soc Lond ,1997 ,A53 :2229-2240.
[2] 方义.长谷川.希薄高分子水溶液の管内流れにおける摩擦損失と圧力変動特性[J].日本机械学会论文集 B ,1996 ,62(598) :59-63.
[3] 伊藤ら.界面活性水溶液の乱流境界層れにおける速度場計測[J].日本机械学会论文集 B ,2004 ,70(693) :22-29.
[4] FUKUHARA M. Experiment study on drag reduction using flexible[J]. JSME International Journal Series B ,1998 ,41(1) :77-85.
[5] 中林,伊藤.流体力学(粘性编) [M]. 东京:株式会社コナナ,1993 :70-79.

(收稿日期 2005-03-23 编辑 熊水斌)

(上接第 9 页)

4 结 论

湿地能够调蓄洪水、调节气候、净化污水、提供丰富的自然生态资源和优美的景观。而匮乏的水资源 ,频繁的洪涝灾害以及恶劣的气候都警示着人类恢复和重建湿地是当前刻不容缓的任务。考虑到洪泛过程对湿地的产生和发展起着至关重要的作用 ,而人为的防洪工程在一定程度上阻滞了洪水对湿地的自然补给作用 ,在湿地消失、退化等方面起到了不利的影响 ,因此只有通过人工的方法模拟自然洪水泛滥补给湿地的过程 ,才能有效地恢复湿地与洪水之间的原有联系。洪水资源化为湿地的维系和保护提供了重要的依据和保障 ,利用蓄滞洪区主动分蓄水库弃掉的多余洪水来恢复湿地或回补地下水是其中重要的手段。

参考文献：

[1] 刘青松.湿地与湿地保护[M]. 北京:中国环境科学出版社,2003 :9-101.
[2] 刘军.中国湿地现状综述[J].中国环境管理干部学院院报,2004 ,14(2) :64-67.
[3] 孙广友.沼泽湿地的形成演化[J].国土与自然资源研究,1998(4) :33-35.
[4] 陈宜瑜.湿地功能与湿地科学研究的方向[J].中国基础科学,2002 ,1(1) :7-11.
[5] 王忠静,郭书英.海河流域洪水资源安全利用关键技术研究[R].北京:清华大学,2003.

[6] 向立云,彭静,张胜红.海河流域蓄滞洪区洪水资源化的示范研究[R].北京:中国水利水电科学研究院,2003.
[7] 梅亚东,冯尚友.洪灾与蓄滞洪区利用管理[J].大自然探索,1994 ,13(3) :14-19.
[8] 翟金良,邓伟,何岩.洪泛区湿地生态环境功能及管理对策[J].水科学进展,2003 ,14(2) :203-208.
[9] 水利部黄河水利委员会.科学调度黄河水量维持黄河健康生命[J].中国水利,2004(5) :28-36.
[10] 朱庆平,任建华,王建中,等.我国内陆河流生态调水[J].中国水利,2003(3) :49-52.
[11] 曹伯万,许立军.引哈济党工程对内陆河干旱地区环境的影响[J].水电站设计,2000 ,16(3) :32-51.
[12] 姜宝玉,韩玉梅,曹波,等.试论扎龙湿地与水资源优化配置问题与对策[J].黑龙江水利科技,2003(2) :5-6.
[13] 张云祥,张代臣.如何有效利用过境洪水资源[J].吉林水利,2004(11) :5-6.
[14] 王学雷,吴宜进.江汉平原湿地系统的退化与生态恢复重建[J].华中农业大学学报,2004 ,23(4) :467-471.
[15] 庄大昌,欧维新,丁登山.洞庭湖湿地退田还湖的生态经济效益研究[J].自然资源学报,2003 ,18(5) :536-543.
[16] 刘世江,卢仁富,陈会云.菠萝泡湿地引水工程的效益分析[J].东北水利水电,2004 ,22(7) :31-34.
[17] 田玉柱,王明芹,武振德.延庆地区的湿地保护[J].北京水利,2004(5) :27-28.
[18] 陈莉,肖羽柏.长江中游地区防洪与农业现代化[J].自然灾害学报,2000 ,9(4) :126-129.
[19] 刘影.平垌行洪退田还湖对鄱阳湖区防洪形式的影响分析[J].江西科学,2003 ,21(3) :235-238.
[20] 姜加虎,黄群.洞庭湖区退田还湖的洪水效应模拟[J].自然灾害学报,2004 ,13(4) :44-48.

(收稿日期 2005-03-23 编辑 熊水斌)