

文章编号: 1000-582X(2012)12-062-06

射流对管道水流压力场的影响

何 川^{a,b}, 徐 浩^b, 李少华^b, 时 雯^b, 王廷军^b, 王 丹^b

(重庆大学 a. 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室; b. 动力工程学院, 重庆 400044)

摘 要: 为探究射流对有压管道内主流压力场的影响, 就矩形管道内流体汇入单股射流进行了实验研究。射流入射方向与主流之间的角度为 90° , 射流速度为主流速度的 1~6 倍。实验结果表明, 在入射口附近存在 1 个向下游偏斜的射流核心区; 随着入射流体的进入, 核心区内的压力略有增加; 核心区外, 管道内流体压力产生较大幅度的提升, 该提升量与射流速度的二次方成正比, 与主流速度无关。

关键词: 管道; 流动; 射流; 不可压缩流体

中图分类号: O358

文献标志码: A

An experimental investigation of a single jet into fluid flow in a pipe

HE Chuan^{a,b}, XU Hao^b, LI Shaohua^b, SHI Wen^b, WANG Yanjun^b, WANG Dan^b

(a. Key Laboratory of Low-grade Energy Utilization Technologies and Systems of Ministry of Education;

b. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An experimental investigation is performed on a single jet issuing into a flow in a pipe. The pressure of the flow in pipe is measured under the condition when there is a right angle between the jet and the mainstream and the velocity of the jet is 1 to 6 times of the mainstream. The results show that, there exists a jet core with skewing downstream near the entrance port; the pressure in that core increases slightly with the fluid incidence. Outside the core, the pressure of the flow inside the pipe increases significantly; the pressure increment is correlated with the velocity of the jet quadratic dependence.

Key words: pipe; flow; jet; incompressible flow

当液体经喷嘴射入静止的有自由液面的水体时, 会在水体中出现一股有界面的流动, 其发展要经历射流初始段、过渡段和射流主体段, 在其射流中心处有一个保持出口速度不变的射流核心区, 从入射口至核心区末端的一段为射流初始段, 射流湍动性充分发展的区域为射流主体段^[1-3]。在射流的主体段, 随着射流的发展, 射流对环境流体的影响逐渐减弱, 射流速度、浓度等成规律性衰减^[4-8]。环境水体中射流的时均压力沿垂直于射流轴线方向符合高斯分布^[9-10]。

当射流垂直射入有自由液面且横向流动的流体时, 由于横流的作用, 射流的核心区向下游偏斜, 其发展经历初始弯曲段、弯曲段、顺流扩散段^[11]。在顺流扩散段, 射流流动方向与横流方向基本一致, 顺流横向扩散和漩涡扩散并存, 射流对横流的影响逐渐减弱^[12-14]。马健在其数值研究中发现, 随着射流与横流流速比的增加, 射流横向扩散的范围增大, 射流对下游压力影响明显, 而对上游压力的影响很小^[15]。

有人认为管路汇流的流动特性与射入横流环境

收稿日期: 2012-07-15

基金项目: 科技部国家重大专项资助项目(2009ZX07424-004-02-1)

作者简介: 何川(1955-), 男, 重庆大学教授, 主要从事流体流动与传热的研究, (E-mail) hechuan@cqu.edu.cn。

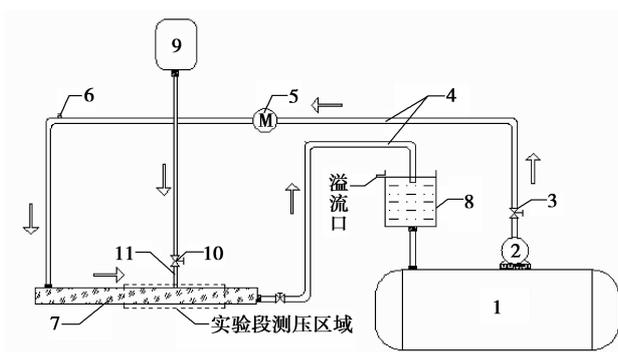
下的射流类似^[16-17]。茅泽育等对等管径 90°管路汇流进行的实验研究表明,主流的总水头线在汇流附近存在明显的下降,说明汇流造成较大的机械能损耗^[18-19]。

尽管对横向射流已经有了大量的研究成果,马健和茅泽育等在研究中均涉及到了压力场的分布问题,然而对于管路横向射流,由于射流射入的是一个密闭、满流、有压的通流环境,其对管路压力的影响范围是否局限于出射口附近,还有待进一步研究。而且管道内部的横向射流的压力场具有更加复杂的特性,在有压管路设计计算中也需要考虑到管路的压力变化情况以及其产生的相关因素。为此,笔者就矩形管道对上述问题进行了实验研究,对射流前后管内压力场的变化情况进行了初步分析。

1 实验系统及方法

1.1 实验系统

如图 1 所示,实验装置由水循环部分和射流部分组成。水循环部分包括:循环水箱、水泵、泵出口阀、连接管、流量计、排气阀、实验段、溢流水箱。循环水箱中的水通过水泵加压后经连接管送至实验段,而后经连接管、溢流水箱返回循环水箱,实现整个系统的水循环。射流部分包括:恒压水箱、连接管、节流阀、射流管。节流阀开启时,水由恒压水箱经连接管通过射流口射入实验段,顺流至溢流水箱,而后经溢流口流出。



注:1 循环水箱;2 水泵;3 泵出口阀;4 连接管;5 流量计;6 排气阀;
7 实验段;8 溢流水箱;9 恒压水箱;10 节流阀;11 射流管

图 1 实验系统图

实验段为矩形有机玻璃管道,长为 700 mm,截面积为 44 mm×44 mm。射流管为塑料圆管,内径 4 mm,射流管位于实验段纵向长度 3/5 处。如图 2 所示,以入射口中心为原点,沿主流方向取 x 轴,入射口中心至侧边壁为 y 轴,沿射流方向取 z 轴。定

义 y 轴正方向一侧的壁面为管道左侧壁面。

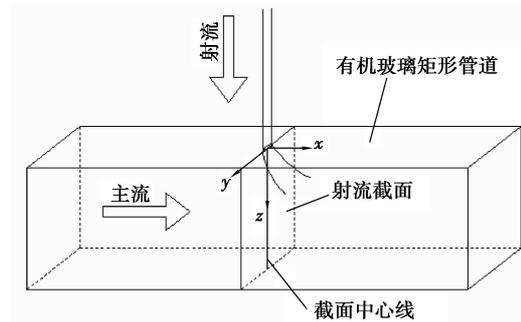


图 2 测压区域结构示意图

为测量射流截面上的压力值,如图 3 所示,在管道左侧壁面沿 z 轴布置 8 个测点,从顶至下分别位于 z 为 0、3、6、9、12、23、29、32 mm 处;在管道右侧壁面沿 z 轴布置 5 个测点,从顶至下分别位于 z 为 4.5、7.5、10.5、18、21 mm 处。为测量主流压力沿 x 方向的变化,在管道左侧壁面如图 4 所示,沿 z 方向选取深度分别为 3、23、32 mm 的位置,在每个深度上分别沿 x 方向于 z 轴上下游 30 mm 内以 5 mm 为间距对称布置 12 个测点,于 z 轴上下游 30~110 mm 内以 20 mm 为间距对称布置 8 个测点。通过测量各被测点与测压基点的压差,来实现对管内流体压力的测量。各被测点如前面所述布置,测压基点布置于管道右侧壁面 z 轴上 z 为 41 mm 处,即图 3 中的测压基点。实验中采用精密步进螺纹控制测压探针移动的距离,使测压探针经各测点,沿 y 方向垂直实验段管道侧壁面横向移动至管内指定测压位置。

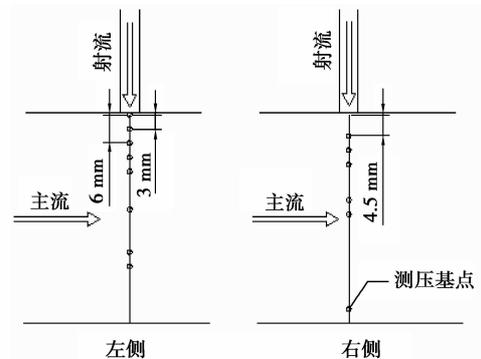


图 3 沿 z 轴方向测压孔布置

将中空金属细管作为测压探头,金属管前端垂直管道侧壁面沿 y 方向通过各测压点移动至管道内部指定的测压位置,金属细管尾部由细胶管连接至

U 形玻璃管,U 形管内预先装有染色水。

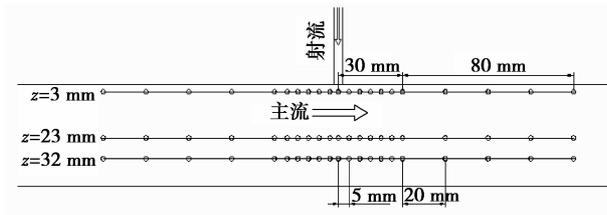


图 4 沿主流方向测压孔布置

采用倾斜微压计测量压差,其读数精度为 0.5 mm,误差约为 1 Pa。

1.2 实验过程

1)将循环水箱及溢流水箱充满水后,启动水泵,打开水泵出口阀及管道排气阀将管路系统内的空气排出,打开节流阀,通过恒压水箱向系统加水,当各连接管内充满水且溢流口开始溢流时,关闭排气阀,之后维持系统稳定运行 5 min,此时溢流水箱内水位在溢流口处保持稳定,关闭节流阀。

2)待系统运行 5 min 后,通过流量计测量主管流量,将其换算成主流流速,测量各测点在无射流时压力;

3)开启节流阀,使射流管向主流射入流体,所射入流体经溢流口溢出(其溢流量即为入射流体的射流量),多次测量溢流量,取其平均值换算成射流的流速,测量各测点在有射流时的压力;

4)改变节流阀开度,改变射入流量,重复步骤 3),测量不同射流速度下各测点的压力值;

5)关闭节流阀,使射流管不再向主管射入流体(此时溢流口无溢流)。重复步骤 2),再次测量无射入条件下各测点压力。

2 实验结果及分析

图 5 给出了不同射流速度 v_s 下射流截面中心线上沿 z 轴的压力测量值,其主流速度为 0.23 m/s。图中也给出了无射流时沿中心线上的压力测量值。

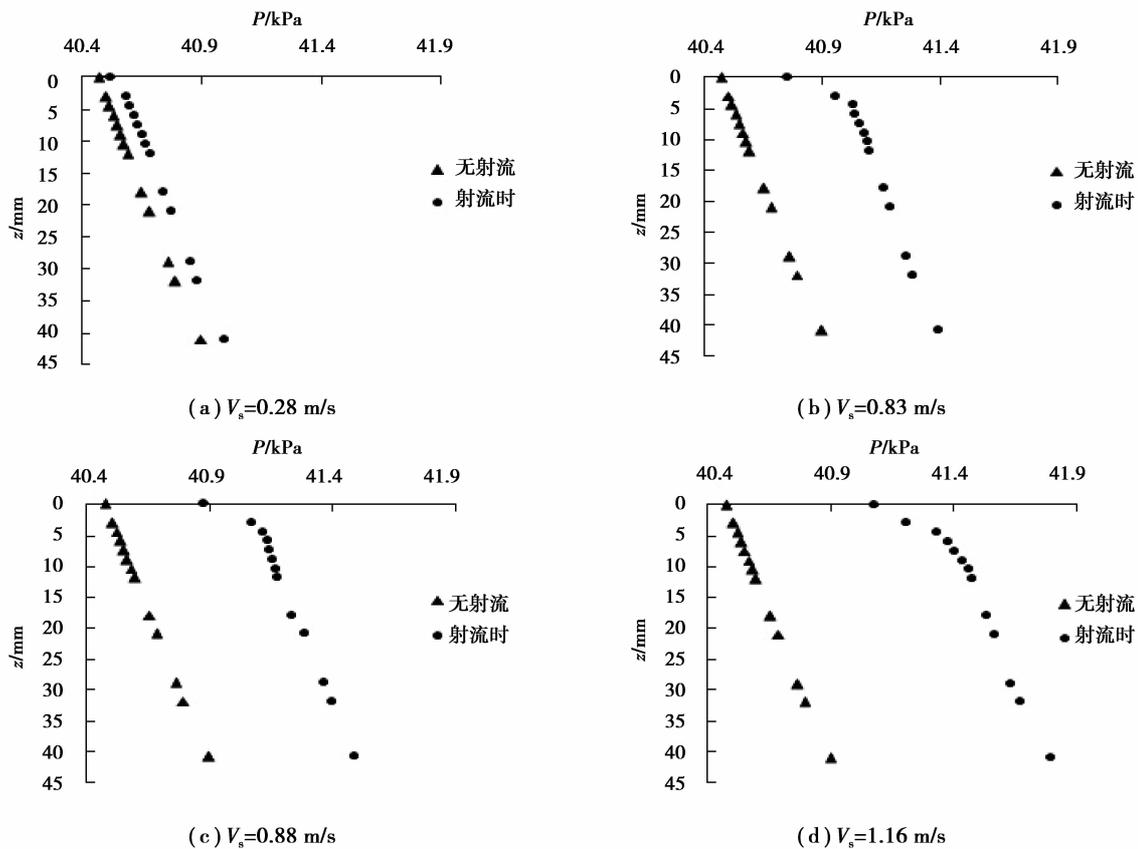


图 5 射流截面中心线上沿 z 轴的压力测量值

从图 5 可以看出,无射流时,中心线上的压力沿 z 轴呈线性分布,与管内平行直线流区域的压力分布规律一致,说明实验采用的测量方式及装置可用。

图 5 显示,随着入射流体速度的增加,中心线上各点的压力出现不同程度的增加。射流速度为主流速度 1.2 倍时,中心线上的压力测量值分布基本与

无射流时平行;射流速度增大至 3.6 倍主流速度时,入射口附近出现了一个很小的压力凹陷区,从入射口沿 z 轴经过一段距离后,该凹陷区消失, z 轴上的压力值分布又恢复到与无射流时平行的状态,上述压力凹陷区的范围随着射流速度的增大而增加。

图 6 为相同工况下射流截面上不同深度沿 y 方向至管道侧边壁的沿程压力测量值。

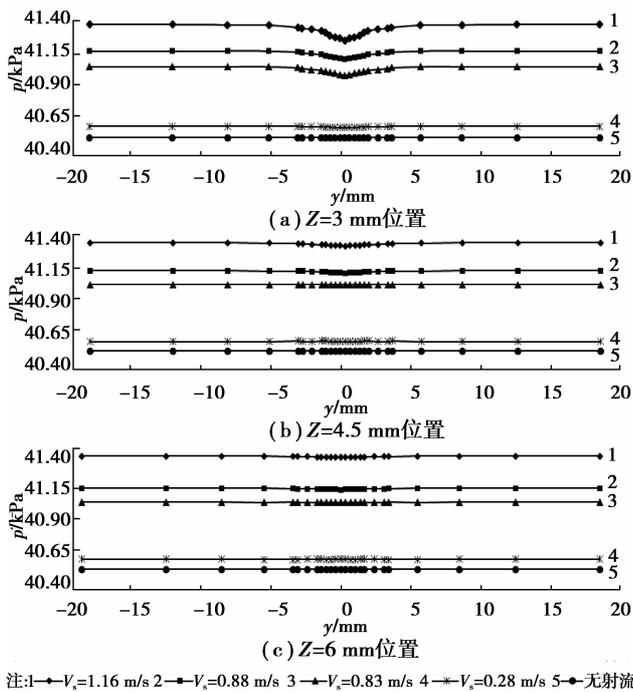


图 6 射流截面上不同深度沿 y 方向上的压力测量值

从图 6 中不难看出,射流截面上沿 y 方向的压力值较无射流时增大;在不同射流速度下,除入射口附近区域外,射流截面上沿 y 方向的压力值分布基本与无射流时平行;入射口附近沿 y 方向有一个对称射流截面中心线分布的压力凹陷区,随着射流速度的增大,该压力凹陷区的范围随之增加。

图 7 给出的是不同深度下,主流沿 x 轴方向的压力测量值。图中 v_s 为射流速度,主流速度为 0.28 m/s。

由图 7 可以看出,在入射口处,射流入侵横向主流的范围沿 z 轴存在一个影响深度 L , L 随着射流速度的增大而加深。由于横向的主流速度与射流速度的叠加,使射流呈向下游偏斜的弯曲状,故 L 为入射口中心与射流发展至顺流扩散段处的垂直距离,此时射流方向发展到与主流方向平行, L 以外的主流为平行直线流。

如图 7 所示,在入射口附近区域,沿 x 方向上有 1 个向下游偏斜的压力凹陷区,此区域表明在影响

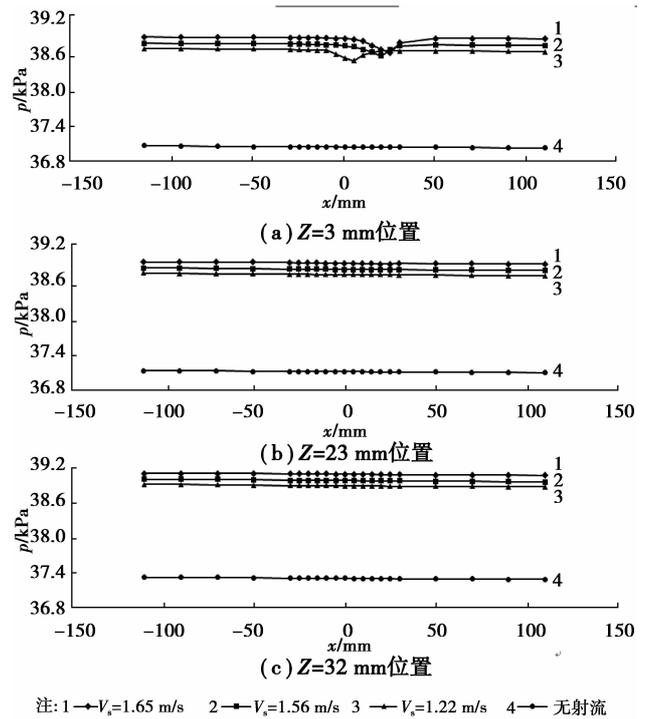


图 7 主流沿 x 轴方向上的压力测量值

深度 L 内,射流的动能只有一部分转化为入射口处流体的压力能。而离入射口一段距离超过影响深度 L 后,该凹陷区域消失,沿 x 方向上的压力值呈现沿途略有下降的线性分布状态,几乎与无射流时的管道内部沿程压力分布线平行。上述现象表明射流对于管内的主流产生了 2 种作用:其一,与横流环境下的射流相类似,管内射流也存在一个局部的射流核心区,在实验条件下,该射流核心区被管内主流推动向下游偏斜,该射流核心仅影响入射口附近区域;其二,在射流核心区之外,入射流体使上述影响区域之外的管道内部流体压力产生大幅提升,并且向上下游 2 个方向传递。

笔者从三通汇流的动量关系出发,将管道入射口区域看做一个控制体,分析控制体内流体的动量关系,探讨管内主流的压力与射流速度的关系。

选取控制体如图 8 中 $a-b-d-c-a$,主流与射流分别经面 ac 、 ab' 进入控制体,后经面 bd 流出。 L 为射流入侵横流的影响深度, h ($h > L$) 为控制体高度,此时控制体内射流已完全发展至顺流扩散段,底面 cd 至管道下底面间的流体为平行直线流。

设射流入口断面压力为 p'_2 ,并假定其与管内顶部压力相等,记控制体内流体的压力为 p ,射流速度为 v_s ,管道下底面 cd' 的面积为 A_2 , $d'd$ 面积为 A_2 ,忽略 h 深处压力 p 沿 x 方向的变化。在竖直方向上,由动量平衡关系有:

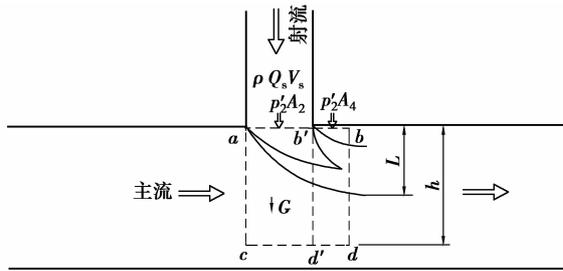


图 8 入射口区域控制体

$$P'_2 A_{ab'} + \rho Q_s v_s + P'_2 A_{b'b} + G = p A_{cd}. \quad (1)$$

考虑到 $A_{ab'} = A_{cd} = A_2$, $A_{b'b} = A_{d'd} = A_4$, $A_{cd} = A_2 + A_4$; 控制体高度为 h , h 必须满足 $h > L$, 以保证 cd 面不受射流的卷吸作用的影响。 $G = \rho g h A_{cd}$, $Q_s = v_s A_2$, 则有

$$P = P'_2 + \rho g h + \left(\frac{A_2}{A_2 + A_4} \right) v_s^2, \quad (2)$$

令 $\alpha = \frac{A_2}{A_2 + A_4}$, 则

$$P = P'_2 + \rho g h + \alpha v_s^2, \quad (3)$$

式(3)中的 $P'_2 + \rho g h$ 为线性项, 与无射流时的压力分布一致; αv_s^2 为射流使控制体内流体的压力 p 产生的增量, 说明该压力增量与主流速度无关。

由实验结果可看出, 在主流速度改变时, 实验段内流体的压力分布情况几乎没有变化, 压力的变化很小; 而射流速度变化时, 实验段内流体的压力发生较大幅度的增加, 这与式(3)的结论基本吻合。

3 结 论

1) 沿有压管路断面方向射入小股同种液体, 在入射口附近存在 1 个向下游偏斜的射流核心区;

2) 在该射流核心区之外, 管内流体压力产生较大幅度的提升, 该压力提升向上下游 2 个方向传递。

3) 该射流引起的压力增量与射流速度的二次方成正比, 与主流速度无关。

参考文献:

- [1] 平浚. 射流理论基础及应用[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- [2] Reynolds A J. Observations of a liquid-into-liquid jet[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1962, 14: 552-556.
- [3] McNaughton K J, Sinclair C G. Submerged jets in short cylindrical flow vessels [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1966, 25: 367-375.
- [4] List E J, Imberger J. Turbulent entrainment in buoyant jets and plumes[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99(9): 1461-1474.

- [5] 熊熬魁, 詹德新, 全贵均, 等. 近水面淹没喷嘴射流流场特性的实验研究[J]. 水动力学研究与进展, 1995, 10(4): 429-433.
XION Aokui, ZHAN Dexin, QUAN Guijun, et al. Experimental study on jet flow beneath a free surface[J]. Journal of Hydrodynamics, 1995, 10(4): 429-433.
- [6] 槐文信, 那宇彤, 童汉毅, 等. 静止浅水环境中铅垂紊动射流的试验研究[J]. 水利学报, 2002(9): 32-36.
HUAI Wenxin, NA Yutong, TONG Hanyi, et al. Experimental study on vertical turbulent jet discharged from the bottom of shallow water [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 32-36.
- [7] 夏丽萍, 林杰明, 杨志峰, 等. 圆射流在非恒定横向流中的掺混扩散[J]. 水利学报, 2001(5): 82-88.
XIA Liping, LIN Jieming, YANG Zhifeng, et al. Mixing of round jet in unsteady crossflow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(5): 82-88.
- [8] Xia L P, Lam K M. Velocity and concentration measurements in initial region of submerged round jets in stagnant environment and in coflow [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2009, 3(1): 21-34.
- [9] 田中, 许唯临, 王伟, 等. 高速淹没冲击射流的压强特性[J]. 水利学报, 2005, 36(4): 401-404.
TIAN Zhong, XU Weilin, WANG Wei, et al. Experimental study on impinging pressure caused by high velocity submerged jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 401-404.
- [10] 胡鹤鸣, 陈永灿, 李玲, 等. 旋转水射流冲击压强的实验分析[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 42-47.
HU Heming, CHEN Yongcan, LI Ling, et al. Experimental study on the impact pressure of swirling water jets [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007, 16(1): 42-47.
- [11] Subramanya K, Porey P D. Trajectory of a turbulent cross jet [J]. Journal of Hydraulic Research, 1984, 22(5): 343-354.
- [12] Rajaratnam N, Langat J K. Mixing region of circular turbulent wall jets in cross flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995, 121(10): 694-698.
- [13] Dey S, Sarkar A. Characteristics of submerged jets in evolving scour hole downstream of an apron [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(11): 927-936.
- [14] Sun J H, Hsu C T. Flow visualization of submerged jets in narrow channels [J]. Modern Physics Letters B, 2009, 23(3): 377-380.
- [15] 马健. 纯射流在非恒定横流中的流动特性研究[D]. 浙江: 浙江大学博士学位论文, 2006.
- [16] Serre M L. A study of energy loss at combining pipe

- junction in fish bypass systems [D]. Iowa: The University of Iowa, 1992.
- [17] Zhu W M. Characteristics of dividing and combining flows [D]. Montreal, Canada: Concordia University, 1995.
- [18] 茅泽育, 罗昇, 罗以. 圆形管道 90° 汇流口局部能量损失 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 387-391.
MAO Zeyu, LUO Sheng, LUO Yi. Local energy loss at right-angle junction of circular pipes [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(4): 387-391.
- [19] 茅泽育, 赵凯, 赵璇, 等. 管道汇流口局部阻力试验研究 [J]. 水利学报, 2007, 38(7): 812-818.
MAO Zeyu, ZHAO Kai, ZHAO Xuan, et al. Experimental study on local flow resistance at junctions of circular pipes [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 812-818.
- (编辑 陈移峰)
-
- (上接第 61 页)
- [5] Mago P J, Chamra L M, Srinivasan K, et al. An examination of regenerative Organic Rankine Cycles using dry fluids [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(8/9): 998-1007.
- [6] Wei D H, Lu X S, Lu Z, et al. Dynamic modeling and simulation of an Organic Rankine Cycle (ORC) system for waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(10): 1216-1224.
- [7] Wei D H, Lu X S, Lu Z, et al. Performance analysis and optimization of Organic Rankine Cycle (ORC) for waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(4): 1113-1119.
- [8] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al. Working fluids for low-temperature Organic Rankine Cycles [J]. Energy, 2007, 32(7): 1210-1221.
- [9] Chen Y, Lundqvist P, Johansson A, et al. A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an Organic Rankine Cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17/18): 2142-2147.
- [10] Zhang X R, Yamaguchi H, Uneno D. Experimental study on the performance of solar Rankine system using supercritical CO₂ [J]. Renewable Energy, 2007, 32(15): 2617-2628.
- [11] Zhang X R, Yamaguchi H, Uneno D. Thermodynamic analysis of the CO₂-based Rankine cycle powered by solar energy [J]. International Journal of Energy Research, 2007, 31: 1414-1424.
- [12] Zhang X R, Yamaguchi H, Fujima K, et al. Theoretical analysis of a thermodynamic cycle for power and heat production using supercritical carbon dioxide [J]. Energy, 2007, 32(4): 591-599.
- [13] Karellas S, Schuster A. Supercritical fluid parameters in Organic Rankine Cycle applications [J]. International Journal of Thermodynamics, 2008, 11(3): 101-108.
- [14] Srinivasan K K, Mago P J, Krishnan S R. Analysis of exhaust waste heat recovery from a dual fuel low temperature combustion engine using an Organic Rankine Cycle [J]. Energy, 2010, 35(6): 2387-2399.
- [15] Hung T C, Wang S K, Kuo C H, et al. A study of organic working fluids on system efficiency of an ORC using low-grade energy sources [J]. Energy, 2010, 35(3): 1403-1411.
- [16] Wang J L, Zhao L, Wang X D. A comparative study of pure and zeotropic mixtures in low-temperature solar Rankine cycle [J]. Applied Energy, 2010, 87(11): 3366-3373.
- [17] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. Refprop version 7.1, Nist standard reference database 23, version 7.1 [DB], America, Washington DC: The US Secretary of Commerce, 2003.
- (编辑 陈移峰)