

# 螺旋管内汽水两相流摩擦阻力特性实验研究

毛宇飞 郭烈锦 甄飞强 郭萌 张文斌 白博峰

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

**摘要** 在宽广的实验参数范围内 (压力  $p = 8 \sim 21$  MPa, 质量流速  $G = 1200 \sim 4000$  kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 壁面热流密度  $q = 0 \sim 1000$  kW·m<sup>-2</sup>) 对立式螺旋管内汽水两相流摩擦阻力特性进行了实验研究。实验段由内径为 10 mm 的不锈钢管弯制而成, 其螺旋直径为 301 mm, 节距为 49 mm。通过研究, 获得了压力、干度、质量流速及热流密度等参数对汽水两相摩擦阻力的影响规律; 并在实验数据的基础上, 采用 Chisholm 的  $B$  系数法, 给出了一个适用于螺旋管高压高质量流速工况汽水两相摩擦阻力的计算关系式。

**关键词** 螺旋管; 汽水两相流; 摩擦阻力

**中图分类号:** O359.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2010)03-0443-04

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF FRICTIONAL RESISTANCE FOR STEAM-WATER TWO-PHASE FLOW IN HELICAL COILS

MAO Yu-Fei GUO Lie-Jin ZHEN Fei-Qiang GUO Meng ZHANG Wen-Bin BAI Bo-Feng  
(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract** The frictional pressure drop characteristics of steam-water two-phase flow were experimentally studied in a vertical-upward helical coiled tube, which was constructed of a 10 mm ID stainless steel tube with 301 mm coil diameter and 49-mm pitch. Experiments were performed in a wide range of system pressure 8~21 MPa, mass velocity 1200~4000 kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> and wall heat flux 0~1000 kW·m<sup>-2</sup>. Effects of various control variables (pressure, steam quality, mass velocity and heat flux) on the frictional resistance were systematically investigated. Based on the experimental data, a new correlation for the calculation of the frictional pressure drop of steam-water two-phase flow at high pressures and high mass velocities in helical coils was obtained using the Chisholm's  $B$ -coefficient method.

**Key words** helical coil; steam-water two-phase flow; frictional resistance

## 0 引言

因换热高效、结构紧凑、可自由膨胀及重心低等优点, 螺旋管式的热交换器和蒸汽发生器在能源、动力、化工、及航空等工业领域中得到了广泛应用。汽液两相摩擦阻力是两相流研究领域中最重要课题之一, 也是汽液两相流动设备设计和运行时确定流动系统泵及相关动力设备的重要依据。目前, 已有不少学者对螺旋管内的汽水两相摩擦阻力特性进行了研究<sup>[1~4]</sup>, 积累了一定的实验资料, 也发表了一些计算关系式, 但关于高压高质量流速条件下螺旋管内汽水两相摩擦阻力的研究仍很缺乏。

随着应用领域日益拓展和技术不断进步, 一些先进的热动力装置对螺旋管内的流动工况提出了更宽更高的参数要求。针对这一情况, 本文以蒸汽-水为工质, 在宽广的参数范围内对立式螺旋管内两

相摩擦阻力特性进行了实验研究, 得到了高参数工况汽水两相摩擦阻力的变化规律, 从而为相关设备的设计计算和安全运行提供依据。

## 1 实验系统和实验方法

实验回路系统如图 1 所示, 其运行流程为: 工质水箱中的去离子水经高压柱塞泵升压分成两路进入实验系统, 一路作为系统旁路, 满足压力和流量调节的需要, 另一路经流量调节阀和孔板后进入回热器吸收由(螺旋管)实验段出来的高温工质的热量, 然后经预热段加热至实验工况所需要的入口温度, 再进入(螺旋管)实验段, 从实验段出来的高温工质先经回热器, 然后进入冷凝器冷却, 最后以接近常温的状态返回工质水箱, 循环使用。

**收稿日期:** 2009-12-21; **修订日期:** 2010-02-02

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (No.50536020); 创新群体项目 (No.50821604)

**作者简介:** 毛宇飞 (1979-), 男, 江苏宜兴人, 博士, 主要从事超临界流体传热与螺旋管内汽液两相流的研究。

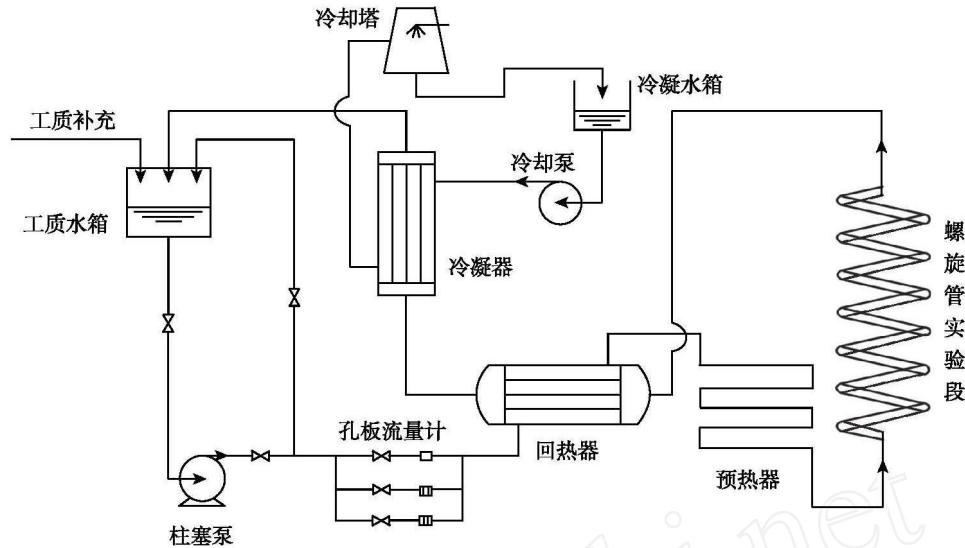


图 1 实验回路系统简图

Fig.1 Schematic diagram of the test loop

螺旋管实验段由 $\text{O}14 \times 2 \text{ mm}$ 的1Cr18Ni9Ti不锈钢管弯制而成,其螺旋直径 $D$ 为301 mm,节距为49 mm;摩擦阻力实验段总长为2480 mm,在其前后各布置了较长的流动稳定段;实验段入口和出口工质的温度采用 $\text{O}3 \text{ mm}$ 的K型铠装热电偶测量,加热管壁的温度采用 $\text{O}0.5 \text{ mm}$ 的K型热电偶丝测量;流动阻力采用环室取压的方式,实验中根据不同的工况参数,前后共选用了三种不同量程的压差变送器(ST3000型0~99.6 kPa和0~686 kPa以及DP1151型0~1500 kPa)来测量实验段的压降。实验参数范围为:压力 $p = 8 \sim 21 \text{ MPa}$ ;质量流速 $G = 1200 \sim 4000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;壁面热流密度 $q = 0 \sim 1000 \text{ kW}/\text{m}^2$ 。

## 2 实验结果与分析

工质流经实验段管道的沿程总压降由摩擦压降、重力压降和加速压降组成。对于本文的实验工况,重力压降和加速压降在总压降中所占份额很小,它们对最终处理结果的影响不是很大。本文按均相模型来计算重力压降和加速压降。同时,采用全液两相摩擦乘子来整理实验数据:

$$\phi_{10}^2 = \Delta P_{TP} / \Delta P_{10} \quad (1)$$

式中, $\Delta P_{TP}$ 为两相摩擦压降; $\Delta P_{10}$ 为全液相单相摩擦压降,由Ito关系式<sup>[5]</sup>计算。按Ito关系式,螺旋管内单相紊流流动Darcy摩擦阻力系数计算如下:

$$f_c = 0.304 Re^{-0.25} + 0.029 \sqrt{d/D} \quad (2)$$

本文主要研究压力、干度、质量流速和热流密

度对两相摩擦阻力的影响,相应的实验结果如图2~图4所示。从这些图中可看出,当工质被加热至饱和后,两相摩擦乘子/压降急剧增大,但随着干度的增大,压降的增幅逐渐趋于平缓,压降的这种变化规律是与汽液两相流流型的转变联系在一起的。

通常,只有对低质量流速工况,壁面热流密度才会对两相摩擦阻力产生一定的影响,而本文在实验中采用了较高的质量流速,从图2可以看出,热流密度对两相摩擦阻力的影响不大,故在拟合关系式时可以不考虑它的影响。

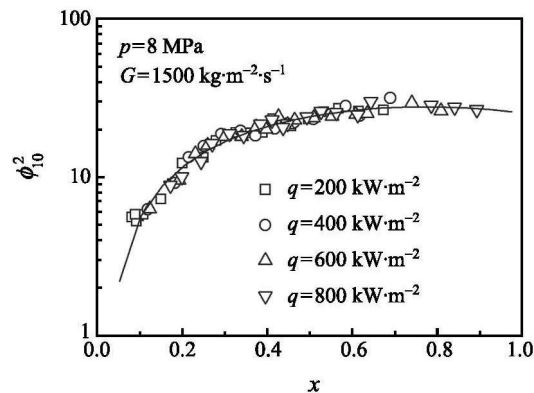


图 2 不同热流密度条件下两相摩擦乘子随干度的变化

Fig. 2 Effect of heat flux on two-phase frictional multiplier

图3给出了不同压力下两相摩擦乘子随干度的变化特性。由图可知,在干度一定的条件下,两相摩擦乘子随压力的升高而减小,随着压力向临界压力靠近,两相摩擦乘子随干度的变化曲线越来越平坦,其值也越来越趋近于1。这是因为随着压力升高,汽

液间的密度差减小,且理论上当压力达到临界压力以上时,工质将处于汽液不分的状态,可作为单相流动处理。

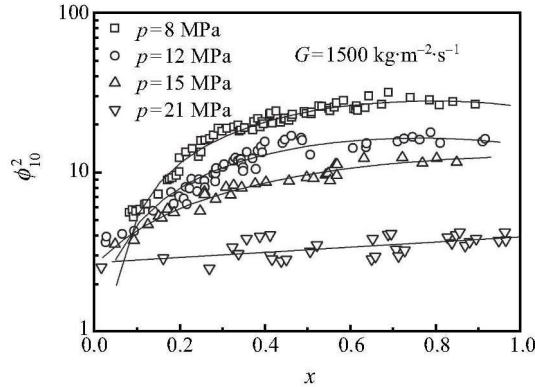


图3 不同压力条件下两相摩擦乘子随干度的变化  
Fig. 3 Effect of pressure on two-phase frictional multiplier

质量流速对两相摩擦阻力的影响较为复杂,目前尚未取得一致的结论,这是因为质量流速的影响可能是与管壁粗糙度的影响耦合在一起的,对于螺旋管,可能也与两相摩擦阻力实验数据的处理方法有关。从本文实验结果看(见图4),在干度小于0.3的区域,两相摩擦乘子随质量流速的增大而有所增大,但也不是很绝对;当干度在0.3以上时,质量流速对两相摩擦阻力的影响已基本可忽略。与压力和干度对两相摩擦乘子的影响相比,质量流速的影响要小得多,故在前人发表的一些螺旋管内两相摩擦阻力关系式中一般也不考虑质量流速的影响。

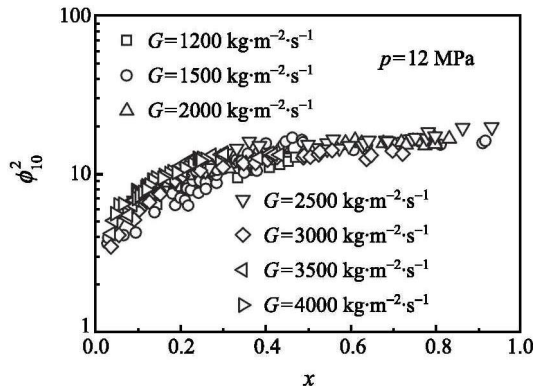


图4 不同质量流速条件下两相摩擦乘子随干度的变化  
Fig. 4 Effect of mass velocity on two-phase frictional multiplier

### 3 实验关系式

目前,不同学者得到的两相摩擦阻力关系式通常只在很小的参数范围内彼此相符,而在较大的范

围内,它们之间的差别往往很大,这是由于两相流动问题本身的复杂性,还没有方法能将有关的实验结果和理论分析归纳起来并概括到理论的高度,没有一种关系式能将各影响因素准确地耦合在一起。

结合均相模型和分相模型的特点,Chisholm<sup>[6]</sup>提出了一种两相摩擦阻力的计算方法,即B系数法。然而系数B是空泡份额的函数,故为便于关联实验数据,毕勤成<sup>[3]</sup>对该方法略作修正,得到如下形式的两相摩擦乘子计算关系式:

$$\phi_{10}^2 = 1 + (\rho_l/\rho_v - 1)(C + x^2) \quad (3)$$

式中,C是由实验数据确定的拟合系数,它受到干度、压力和质量流速的影响,根据实验数据,采用多元线性回归,得到:

$$C = 1.738x^{0.679}(1-x)^{0.458}(\rho_l/\rho_v)^{-0.302}Re_{10}^{0.091} \quad (4)$$

式中, $Re_{10}$ 为全液相Re数,该式共关联了635组干度 $x = 0.1 \sim 0.96$ 的实验数据,其计算值与实验值的比较如图5所示,有626个数据点的偏差落在 $\pm 30\%$ 以内,554个数据点的偏差落在 $\pm 20\%$ 以内。

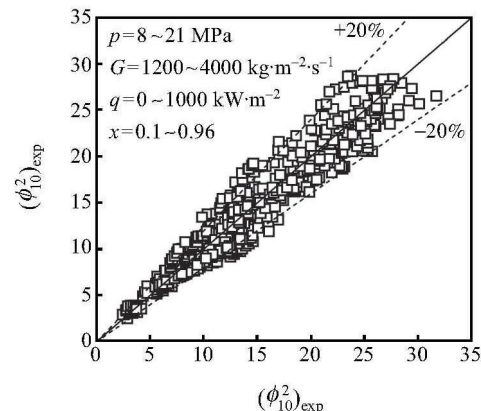


图5 本文关系式计算值与实验值的比较  
Fig. 5 Comparison of present correlation with experimental results

选取两个有代表性的关系式与本文关系式及实验数据进行比较,分别是郭烈锦关系式<sup>[2]</sup>:

$$\phi_{10}^2 = 1 + (4.25x - 2.55x^{1.5})G^{0.34} \quad (5)$$

毕勤成关系式<sup>[3]</sup>(与式(3)配合使用):

$$C = \begin{cases} 1.955x^{0.698}(1-x)^{0.291}, & p = 4 \sim 12 \text{ MPa} \\ 1.378x^{0.277}(1-x)^{0.0738}, & p = 12 \sim 18 \text{ MPa} \end{cases} \quad (6)$$

比较结果如图6所示。当工况参数基本处于这



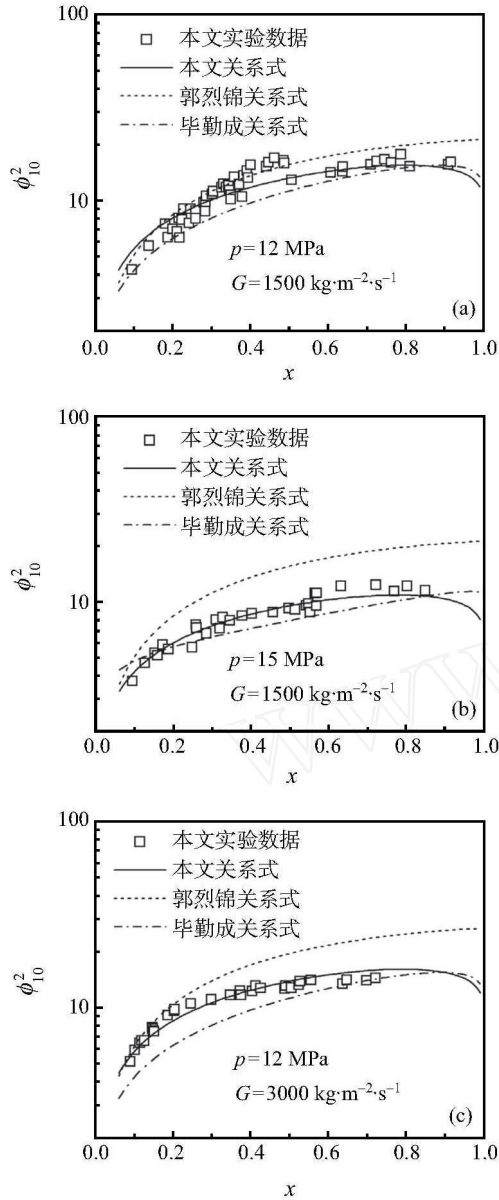


图6 本文关系式与前人关系式的比较

Fig. 6 Comparison of present correlation with former correlations

两个关系式的适用范围内时 (郭:  $p = 3 \sim 14$  MPa,  $G = 250 \sim 1400$  kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。毕:  $p = 4 \sim 18$  MPa,  $G = 400 \sim 1400$  kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>), 它们与本文关系式及实验数据之间的偏差并不大, 如图 6(a)。郭烈

锦关系式考虑了质量流速的影响, 但没有考虑压力的影响, 故当压力超出其适用范围时, 该式的预测值与本文实验数据之间的偏差较大, 如图 6(b); 毕勤成关系式考虑了压力的影响, 但没有考虑质量流速的影响, 当质量流速较高而超出其适用范围时, 该式的预测值与本文实验数据之间也开始出现较大的偏差, 如图 6(c)。

## 4 结 论

(1) 影响螺旋管内汽水两相流摩擦阻力的主要因素是系统压力和工质干度; 壁面热流密度对两相阻力的影响可以忽略; 质量流速对两相阻力有一定的影响, 但要比压力和干度的影响小得多。

(2) 本文给出的螺旋管内高压汽水两相流摩擦阻力计算关系式在较为宽广的参数范围内有着良好的预测精度, 而前人的关系式一般不适用于高压高质量流速工况。

## 参 考 文 献

- [1] Owahdi A, Bell K J. Forced Convection Boiling inside Helically-Coiled Tubes [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1968, 11(12): 1779-1793
- [2] 郭烈锦, 陈学俊, 黎耘. 卧式螺旋管内汽水两相摩擦阻力特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 1990, 24(增刊 1): 25-36  
GUO Liejin, CHEN Xuejun, LI Yun. Frictional Pressure Drop Characteristics of Steam-Water Two-Phase Flow in Horizontal Helically Coiled Tubes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1990, 24(S1): 25-36
- [3] 毕勤成, 陈听宽, 田永生, 等. 高温气冷堆蒸汽发生器螺旋管汽水两相流摩擦阻力特性实验研究 [J]. 核动力工程, 1996, 17(5): 425-430  
BI Qincheng, CHEN Tingkuang, TIAN Yongsheng, et al. Investigations on Frictional Pressure Drop of Steam-Water Two-Phase Flow in Helical Coils Used in Steam Generator of High Temperature Gas-Cooled Reactor [J]. Nuclear Power Engineering, 1996, 17(5): 425-430
- [4] GUO L J, FENG Z P, CHEN X J. An Experimental Investigation of the Friction Pressure Drop of Steam-Water Two-Phase Flow in Helical Coils [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2001, 44(14): 2601-2610
- [5] Ito H. Friction Factors of Turbulent Flow in Curved Pipes [J]. ASME, J. Basic Engineering, 1959, 81(2): 123-134
- [6] Chisholm D. Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers [M]. London: George Godwin, 1983: 64-67