

中国工程热物理学会

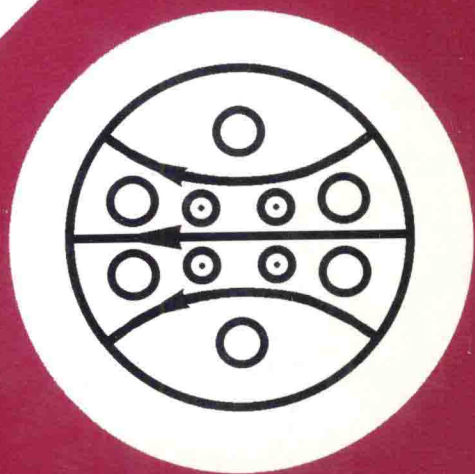
多相流学术会议

论文集

二〇〇四

上海

中国工程热物理学会编



多相流学术会议论文目录

一. 气液两相流与沸腾传热传质

- 046001 大管径油气两相流流型变化机理的研究.....王 经 贾志海 牛 刚(1)
- 046004 水平微翅管内二元混合物两相流阻力特性研究.....马虎根 蔡祖恢(10)
- 046007 气泡初始尺寸对泡-弹状流型转换的影响.....赵建福(16)
- 046015 水合物形成的诱导时间及其影响因素.....
.....潘云仙 刘道平 黄文件 徐新亚 周文铸(20)
- 046021 油-水两相水平管流表观粘度的实验研究.....姚海元 宫 敬(28)
- 046022 管内流动沸腾 CHF 与极限干度现象.....
.....彭仕文 D.C. Groeneveld 刘 伟 S.C. Cheng(35)
- 046023 两相流层的 Marangoni-Bénard 不稳定性分析.....刘 荣 刘秋生(41)
- 046024 分形多孔介质两相非线性渗流的定量解释.....
.....李留仁 赵艳艳 李忠兴 焦李成 徐明海(48)
- 046025 井下旋流器内油滴轨迹数值模拟.....曲占庆 徐明海 博启炜 张 琪(56)
- 046027 细管内氮气一过冷水环状流传热特性实验.....易 杰 刘振华(62)
- 046029 新型高效汽水分离器的试验研究.....王晓墨 黄素逸(66)
- 046030 水平空气-水两相管流段塞特性参数计算.....赵京梅 宫 敬(71)
- 046032 R22 水平双侧强化管外大容器沸腾换热试验研究.....
.....刘启斌 张定才 何雅玲 陶文铨(77)
- 046033 R22 饱和蒸气在水平双侧强化管外凝结换热的试验研究.....
.....张定才 刘启斌 陶文铨 何雅玲(82)
- 046037 水平管空气/水段塞流压力波动特性分析.....赵庆军 何利民 徐建中(87)
- 046038 水平管空气/水段塞流压差波动特性分析.....赵庆军 何利民 徐建中(97)
- 046044 核沸腾传热过程的动力学分析.....王 军 刘 芸 苗 君 沈自求(104)
- 046048 窄间隙通道内上升和下降流动沸腾传热特性研究.....
.....卢冬华 黄彦平 白雪松 徐显启(113)
- 046049 缝隙抽吸对二次水滴直径影响的试验研究.....王新军 高铁瑜 徐廷相(120)
- 046060 气液两相流压力波传播特性的实验研究.....白博峰 黄 飞 郭烈锦(126)
- 046062 直管中粘弹性流体的振荡输运.....方 晨 彭晓峰 张 舒(134)
- 046063 多孔介质内两相流汽液间相互作用分析.....方 晨 彭晓峰 杨 震(139)
- 046064 通过文丘里喷嘴的气液两相流流型和压降研究.....
.....梁法春 张修刚 王 栋 林宗虎(143)
- 046065 蛇形管内强制流动沸腾流型观察.....叶 萍 吴海玲 彭晓峰(148)
- 046066 超音速汽液两相流极限升压能力的理论与试验研究.....
.....邵树峰 严俊杰 刘继平(152)
- 046069 两管平行通道管间脉动建模及程序编制.....
.....黄 军 黄彦平 王 飞 卢冬华 赖 举(157)
- 046070 基于多尺度信息熵特征的气液两相流流型识别方法.....
.....孙 斌 程旭丽 王锦峰 赵雪峰(163)
- 046071 垂直上升管内气-液两相环状流截面含气率的数学模型.....
.....周云龙 刘 巍 杨 静 孙 斌 张 玲 洪文鹏(168)
- 046077 有气流扰动下管流油水混合物粘度的实验测量与计算模型.....
.....刘文红 郭烈锦 张西民(173)

- 046078 中国先进研究堆自然循环两相流动不稳定性研究.....郭 赟 田文喜 王甲强 贾斗南(181)
- 046079 中国先进研究堆自然循环特性研究.....田文喜 秋穗正 郭 云 王甲强 贾斗南 刘天才 张建伟(190)
- 046080 水平矩形小通道内气-液两相流摩擦压降的初步研究.....李 卓 俞 坚 夏国栋 马重芳(197)
- 046085 水平螺旋微肋管内基于分层流流型沸腾传热理论模型研究.....王跃社 白博峰 陈永利 本田博司(201)
- 046086 N_2 泡沫压裂液的流变特性试验研究.....段白齐 王树众 沈林华 管保山 慕立俊 周晓群 王 亮 赵 威(208)
- 046087 氮气泡沫压裂液管流对流换热特性研究.....沈林华 王树众 段百齐 管保山 慕立俊 周晓群 赵 威 王 亮(214)
- 046088 基于分时原理的多相流体比例分配方法.....王 栋 张修刚 梁法春 林宗虎(221)
- 046090 表面活性剂添加对水平管内气液两相流含液率的影响.....夏国栋 赵庆国 程伟良 马重芳 麦维斯(226)
- 046094 超音速汽液两相流激波的理论研究.....刘继平 严俊杰 邢泰安 陈国慧(231)
- 046097 油气集输管路上升管系统严重段塞流实验研究.....王 鑫 郭烈锦 张西民 顾汉洋 林长志 赵冬建 黄 飞(235)
- 046098 水平管气液段塞流液塞平移速度实验研究.....王 鑫 郭烈锦 张西民 林长志 赵冬建 郭富德(240)
- 046099 泡状流局部界面浓度实验与理论研究.....赵冬建 郭烈锦 林长志 张西民(246)
- 046101 高参数小管径下煤油的传热特性研究.....罗毓珊 陈听宽 胡志宏 郑建学(252)
- 046103 气液两相流动的二维矩两相湍流模型与欧拉-拉氏模型的比较.....肖洪伟 周力行 李荣先(259)
- 046106 重力场中绕汽泡的热毛细对流分析.....姚响成 张西民 郭烈锦(263)
- 046109 圆形微小通道内流动沸腾换热特性研究.....赵鹏飞 毕勤成 杨朝初(271)
- 046111 气藏水平井过平衡钻进期间地层与井筒气液两相流动规律研究.....齐明明 李相方 覃 斌 刘一江(276)
- 046112 天然气井生产井筒气液两相流体动态分布研究.....穆 林 李相方 刘一江(281)

二. 气固两相流

- 046005 气粒并流上行流动中颗粒聚集的机理研究.....刘春嵘 郭印诚(286)
- 046006 稀疏气粒两相流动颗粒浓度的小波分析.....王 兵 张会强 王希麟(295)
- 046012 PM 型浓淡燃烧器内气固两相流动的数值模拟.....施 健 杨 荣 林宗虎(301)
- 046016 自由分子区布郎碰撞作用下颗粒尺寸分布变化.....耿 珺 柳朝晖 郑楚光(306)
- 046018 非等温气固两相湍流的直接数值模拟.....贺 铸 柳朝晖 刘亚明 郑楚光(312)
- 046019 柱状粒子气力输送系统中压降的研究.....陈宜民 林建忠(317)
- 046020 使用扩散模型数值模拟二维湍流气固两相流.....杨瑞昌 巨泽建 刘若雷 尚 智(323)
- 046026 高含沙水流的紊动粘性系数研究及其应用.....黄远东 张红武 吴文权(331)
- 046028 街道峡谷内汽车尾气污染特征与模拟分析.....王远成 吴文权 李 宋 张 懿(338)
- 046036 基于拟颗粒的气固两相曳力模型研究.....刘春嵘 郭印诚(345)

046043	颗粒碰撞率的实验研究·····	赵海亮	由长福	祁海鹰	徐旭常(352)
046050	下降管中稠密两相湍流的数值模拟·····	于 勇	蔡飞鹏	周力行	时铭显(357)
046051	提升管内稠密气固两相流动的数值模拟·····				
	·····	蔡飞鹏	于 勇	周力行	时铭显(363)
046052	气固两相湍流颗粒对气相流动的影响·····	崔金雷	容 易	王希麟	(367)
046067	高温小球下落冷池运动机理的实验研究·····	胡志华	詹经祥	杨燕华	(372)
046075	水平管内栓塞流气力输送的动理学模拟·····	顾正萌		郭烈锦	(378)
046081	出料阀内气固两相流动的数值模拟·····	陈丽华	杨 森	邵雪明	(385)
046082	微观一介观双尺度模型研究稠密气固两相宏观流动·····				
	·····	陆慧林	王淑彦	刘文铁	赵云华 李 响(392)
046083	循环流化床收集器内颗粒团聚流动特性的研究·····				
	·····	郑建祥	刘文铁	陆慧林	王淑彦 沈志恒(397)
046084	纳米颗粒二次团聚物流化过程的研究·····				
	·····	何玉荣	刘文铁	陆慧林	李 巍 刘国栋(402)
046095	风沙跃移中颗粒与多粒径床面碰撞的数值模拟·····	亢力强		郭烈锦	(407)
046096	对风沙输运中起跳沙粒运动状态分布的讨论·····	邢 茂		郭烈锦	(413)

三. 多相流数理模型和数值方法

046002	两相湍流 PDF 模型相空间维数约化问题·····	徐江荣(420)
046003	理想两相流 PDF 模型有限分析/颗粒混合方法数值模拟·····	
	·····	徐江荣 张 平 李昭祥(427)
046009	各向同性湍流内有限惯性颗粒碰撞的直接数值模拟研究·····	
	·····	李瑞霞 柳朝晖 贺 铸 陈胤密 郑楚光(435)
046011	水力旋流器变参数对高炉污泥脱锌的影响·····	
	·····	杨 荣 耿丽萍 章立新 林高平 林宗虎(441)
046017	考虑多分散性颗粒沉积的多重 Monte Carlo 算法·····	
	·····	赵海波 郑楚光 徐明厚(446)
046031	对火焰 CVD 法造粒的数值模拟—用不同颗粒动力学计算结果的比较·····	
	·····	王利希 陈 石 谢洪勇 马世虎(453)
046034	高温金属颗粒落入水中的瞬态数值模拟·····	
	·····	尚 智 李小燕 杨燕华 胡志华 徐济望(463)
046039	可吸入颗粒物在有热泳力作用时近壁运动的直接数值模拟·····	
	·····	李光辉 由长福 祁海鹰 徐旭常(468)
046041	常温与中温脱硫过程的数值模拟·····	
	·····	吴新华 李 晨 由长福 祁海鹰 徐旭常(473)
046042	无网格方法中的背景积分方案及单颗粒下降过程的数值模拟·····	
	·····	仇 轶 由长福 祁海鹰 徐旭常(478)
046047	直接模拟离散颗粒对湍流射流的影响·····	罗 坤 樊建人 刘 兰 岑可法(484)
046054	气固两相平面混合层的直接数值模拟·····	李文春 胡桂林 樊建人 岑可法(493)
046056	凝析油气井沿井筒压力梯度计算方法·····	李明忠 石 锋 崔红霞(502)
046057	稠密两相流中二阶矩湍流模型下的一种改进算法·····	曾卓雄 江叔通(510)
046058	非等温相变问题的双倒易边界元法求解·····	刘 捷 卢文强(516)
046059	静止水中单个上升气泡的直接数值模拟·····	
	·····	陈 斌 T. Kawamura Y. Kodama(521)

046093	变形液滴直接模拟中的非结构网格生成	邓树升 耿继辉(526)
046102	稠密两相流动的双尺度二阶矩湍流模型	曾卓雄 周力行(531)
046108	空气搅拌式种分槽内多相流动的数值解析及结构参数的优化	闫红杰 周萍 周子民 吕子剑 周怀敏(537)
046110	蒸汽-冷流体接触冷凝流动的数值模拟	李会雄 邓晟 李良星 陈听宽 王飞(543)
046113	凝析气藏高速多相渗流规律数值模拟研究	康晓东 李相方 覃斌 程时清(550)

四. 多相流测量技术及其它

046010	轻质分散相双锥旋流器的压降模型	赵庆国 夏国栋 王彦玲(555)
046013	两相流瞬时浓度场和速度场的同时图像测量方法研究	李宋 吴文权 王远成(561)
046014	均匀电场作用下离散相行为研究	董伟 李瑞阳 郁鸿凌 黄烜(567)
046035	低风速条件下沙粒起动的 PIV 研究	席兵 祁海鹰 由长福 程旭 徐旭常(573)
046040	同时测量细颗粒速度和尺寸的 PIV/PTV 系统	赵海亮 由长福 祁海鹰 徐旭常 山本富士夫(578)
046045	强烈段塞流特征参数测量方法试验研究	何利民 赵越超 陈振瑜(583)
046046	双面加热环形通道内干涸点的确定	田文喜 秋穗正 贾斗南 吴埃敏 李浩(591)
046053	冻土块石路堤的斜坡边界条件对于路堤保冷效果数值计算研究	姜凡 刘石 王海刚 阎润生(599)
046055	消光起伏相关光谱法测量原理	沈建琪 蔡小舒 郭小爱(607)
046061	多管陶瓷过滤器内瞬态流场的计算	李海霞 姬忠礼 吴小林(617)
046068	两相自然循环系统静态流量漂移及其实验验证	匡波 陈宏 胡志华 徐济鋈(623)
046072	气力输送系统中基于神经网络及机理分析的固相流量软测量研究	许传龙 赵延军 王式民(630)
046073	一种网丝电容多相流层析成像方法	张修刚 梁法春 王栋 林宗虎(636)
046076	主燃区 α 对再燃区速度场特性影响的 PDA 试验研究	王国忠 吴少华 陈立哲 刘艳丽 邱朋华 秦裕琨(641)
046089	离散固液两相流中的对流换热强化与参数分析	赵镇南 郝睿(648)
046091	空隙波的传播与两相流相态非均质性研究	刘磊 周思怡 龚圣捷 周芳德(652)
046092	高炉瓦斯泥旋流脱锌理论分离粒径的确定方法	章立新 杨莱 邹宽 林高平 王敏 林宗虎(658)
046100	反应堆压力容器安注过程瞬态传热特性研究	陈听宽 罗毓珊 王海军 吴海玲 卢冬华(662)
046104	密封舱内再生氧的模拟计算	于志家(670)
046107	操作参数对 PEM 燃料电池中水迁移的影响	孙红 郭烈锦 刘洪潭(676)
046114	二次气流速度对水平输送管速度场的湍流扰动影响研究	林江 楼建勇 林建忠(683)
046115	智能型多相流量计测系统现场试验研究	林军 董守平(690)

大管径油气两相流流型变化机理的研究

王经 贾志海 牛刚

上海交通大学 机械与动力工程学院 工程热物理研究所

200030 上海

电话: 021-62932279 E-mail: wangj@sjtu.edu.cn

摘要: 本文对大直径水平和不同倾角的倾斜管道内油气混输流动的流型及流型转换进行了研究, 探讨大直径油气混输管道不同倾斜度油气两相流动过程中段塞流的形成机理。与大庆油田测井技术研究所合作, 在大型多相流流动模拟实验装置上, 通过实验的方法模拟了油气在大直径管道内的流动。通过改变倾斜角度, 研究了在倾角改变分别为 1° 、 2° 、 3° 、 5° 以及 10° 下的流型及流型转换的现象, 根据实验结果分析了在油气混输流动工程中倾角对段塞流产生的影响。研究表明, 倾斜角度对流型变化影响显著。

关键词: 油气混输, 两相流动, 段塞流, 流型变化

1 简介

油气混输技术在石油工业中正发挥着日益重要的作用。在海底、滩海以及陆地的油气输送中, 油气混输技术以其高效率、低成本、环境适应性强等特点受到行业的广泛重视。世界各国十分重视采用混输技术及对油气输送关键技术的研究攻关[1], 油气混输技术正在成为石油行业研究发展的热门课题。油气混输过程中存在着关键性制约难题, 即人们还没有根本掌握油气水多相流动的特性及如何防止输送过程的段塞流的发生。为了提高油气混输的效率并减少事故的发生, 加强对油气混输流动特性的研究极为重要[2]。油气混输流动是典型的多相流动, 与普通的多相流动相比, 油气混输有以下特点: 油气混输的管道直径较大, 一般在 75mm 以上; 受地形起伏的影响, 管道在很多情况下是倾斜的。这两个因素影响不仅使得油气混输流动特性的研究难度大, 更造成进行该领域的实验装置庞大, 建设投资大, 运行费用高等困难。目前, 针对大直径倾斜管道内油气混输流动特性的研究还很不充分,

油气混输过程属于典型的两相流动问题, 流型作为研究的基础是本文研究的重要内容。流型图是建立多相流理论模型的重要理论基础, 流型和流型图对确定多相流的组分、分相流动压降以及传热系数等十分重要。

相分布即流型 (Flow Pattern) 是多相流流动特性以及传热特性研究重要的计算依据[3]。由于相分布的差别, 不同的流型具有其独特的流动以及传热特征, 管道中流型的变化往往会引发流阻的改变、流动的稳定性以及传热特征变化。工程上油气混输管道系统, 不仅由于流量和介质成分的变化等因素干扰, 会引起管道截面空泡份额的变化, 而且由于管道的起伏、倾角的变化, 也会造成管道截面空泡份额的变化, 从而引起各种

不同的流型。工程上对很多多相流系统事故的分析时，常常发现是由于流型的不明确而造成误算或误操作的结果，因此，流型的准确识别十分必要，根据准确的流型图确定流型，对选用流阻计算公式，稳定性判据以及传热计算公式具有特别重要的实用意义。

目前对流型的划分多是建立在试验观察的基础上，流道的布置、介质的选取、观察者的主观因素都给流型的划分带来许多人为的影响，因此流型的划分以及得到的流型图也多种多样[4, 5, 6, 7]。本文研究主要通过实验和理论分析方法探讨大直径(内径 125mm)水平和倾斜管道内油气混输流动流型种类的划分;在此基础上根据所采集流动参数绘制出不同倾角的流型图;通过分析探讨大直径油气混输管道倾斜角度对段塞流发生的影响,为进一步的深入研究奠定基础。

2 实验装置与实验过程

本文实验是在大庆油田生产测井研究所的油气水三相流动模拟实验装置上完成的(图1)。该实验装置能够高精度、全自动实现油、气、水、聚合物等多种流体体积流量配比的精确调节，从而模拟各种介质在不种流量下的流动实验。

2. 1 油气两相流动模拟实验段

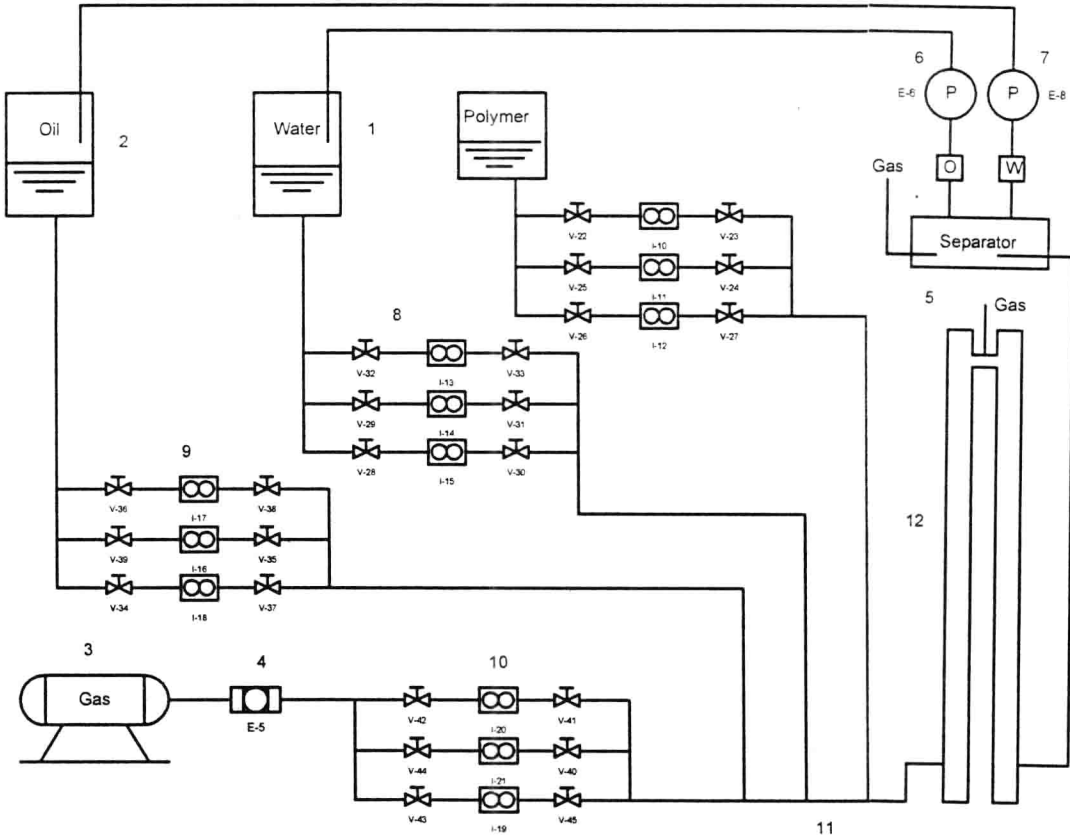


图 1 油气水多相流模拟实验装置

- 1、水箱 2、油箱 3、空气压缩机 4、空气过滤器 5、油水分离器
6、油泵 7、水泵 8、9、10、流量计 11、油气水混和器 12 实验管路

本模拟实验装置主要包括：实验介质源及稳定部分、流量调节管排、流量计量显示部分、流量调节控制系统、模拟管道、实验介质分离部分以及仪表气源等。

倾斜管道模拟系统由有机玻璃管道和液压控制系统组成，有机玻璃管道固定在金属架梁上。金属架梁在液压缸伸缩时，沿弧形导轨作 $0\sim 90^\circ$ 滑动，每隔 5° 有一个定位销，依靠夹紧缸的夹紧块把金属架梁紧固在导轨上。金属架梁的倾角由数字表显示。

油路和水路系统由纯油罐（油源）、纯水罐（水源）及管道组成。油和水被连续泵入到高的油水稳压罐，经过液相管线和过滤器后流入流量计量调节管排。为了提高流量计量精度，油水计量调节管排分为 DN4mm、DN6mm、DN10mm、DN15mm、DN25mm 和 DN50mm 等六路，每一路分别调节，计量不同的流量范围和液体。各流量计前至少有 30 倍的直管发展段，使得各路流量具有较高的计量、调节精度；相邻两路具有一定的流量覆盖区，以保证流量调节不出现死区。每个调节管路均安装有流量计和流量调节阀，用于测量、调节当前管路内的流量。油水小流量的计量分别选用椭圆齿轮流量计和电磁流量计，经流量计量调节管排调节后的油水经各自管线流向模拟管道，并在模拟井筒管道汇合，然后流入模拟管道。

本文设计的实验段由透明的有机玻璃管与差压传感器、压力传感器以及电容传感器组成，采集管路上的差压、压力以及空泡份额信号，使得较准确的获取油气混输过程的各种流动参数，进行综合研究。选取合理的差压距离是保证实验成功的关键。根据 G. Matsui 的实验分析，取压距离不同导致差压波动曲线有较大差别，较小的间距使得差压波动曲线比较复杂，较大的间距则会使液塞之间相互作用时间延长，曲线的规律性也降低。本文取 8 倍的管直径距离作为取压间距，即 1000mm。图 2 为实验段传感器布置示意图，BP9356 型差压传感器（宝鸡恒通电子有限公司生产）量程为 $0\sim 16\text{KPa}$ ，精度为 1 级。压力传感器 BY-HM-B0.40000 厚膜变送器（上海调节阀厂生产），量程为 $0\sim 0.5\text{MPa}$ ，精度为 1 级。电容传感器为自主开发研制的 12 极板电容传感器，精度为 1 级。

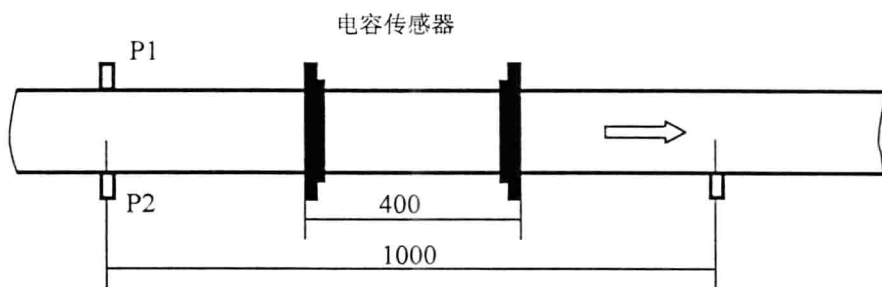


图 2 实验段传感器布置示意图

信号采集卡为研华公司生产的 12 位 PCI1710L 型多功能数据采集卡，具有 16 路单端或 8 路差分模拟量或组合输入方式，采样速率可达 100kHz。本次实验所有传感器均采用差分接法。

2. 2 实验过程

实验过程为：（1）实验前预准备。安装实验设备及调试，包括传感器的安装（电容、差压、压力等），数码相机等；（2）将实验管道调整至所要求的角度，本实验从水平管

道（0度），然后依次调整 0°、1°、2°、3°、5°和 10°倾斜管道；（3）根据实验工况安排（表 2）调节柴油流量，然后调节气相流量，待其稳定后，观察油气流动流型并拍摄流动过程，同时采集相应的电容、差压、压力和流量信号，分析信号的合理性；

本实验的主要参数如下：

表 1 油气混输流动流型确定试验参数

试验参数	取值	单位
管道内经	125	mm
液相密度	825	kg/m ³
气相密度		kg/m ³
液相粘度	3×10 ⁻³	kg/m/s
气相粘度		kg/m/s
表面张力	28.62	mN/m
液相表观速度	0.472×10 ⁻² ~0.283	m/s
气相表观速度	0.472×10 ⁻² ~1.415	m/s

表 2 油气混输流动实验工况安排

柴油流量			倾斜角度 θ° （0°、1°、2°、3°、5°和 10°）					
Q_d	/m ³ /d	50	80	120	160	200	250	300
氮气流量 Q_g	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	50	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	80	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	700	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	900	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1100	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

3 实验结果与分析

多相流流型划分主要分为分离（Separated）流型与弥散（Dispersed）流型两种。分离流动是指两相均处于连续区域，在连续区域内各相的各部分都是相连通的。弥散流动是指一相均匀地分布于另一相中，从全局看也可看作准均相（Quasi-Homogeneous）混合物或乳状流（Emulsion）。目前学术界公认的对大直径油气混输水平管道以及倾斜管道内的流型划分为平滑层流（Stratified Smooth Flow），波状层流（Stratified Wavy Flow），气泡流（Bubble Flow），拉长气泡流（Elongated Bubble Flow）和段塞流（Slug Flow）5种，实验中所观测到的各种不同类型的典型流动如图 3 所示。

(1) 平滑层流 (Stratified Smooth Flow) 的特点是在连续的液相上部存在连续的气相, 气相在液相上部运动, 液相和气相呈现明显的层状结构, 气液界面平稳光滑, 这种流型一般在气相和液相流量都较小时出现。在倾斜管道中, 气层中会生成大量的泡沫, 上面的泡沫和液相组成泡沫状层流。

(2) 波状层流 (Stratified Wavy Flow) 的特点是当气体流量增大时, 在气液分界面上掀起扰动的波浪, 分界面由于受到沿流动方向运动波浪的影响而变得波动不止, 气液分界面仍较为平滑, 且涌起的波浪不和管道上壁接触,

(3) 气泡流 (Bubble Flow) 的特点十分明显, 连续的液相占据管道的大部分, 气相以分离小气泡形式沿管道的上半部运动, 本次试验在水平管道中没有出现, 而气相流量较低时的倾斜管道中则大量出现。

(4) 拉长气泡流 (Elongated Bubble Flow) 的特点是在顶部气泡流的基础上, 随着气相流量的增大, 顶部的小气泡逐渐合并增大延长, 发展成更大的气泡, 并且在大气泡尾部有许多小气泡跟随,

(5) 段塞流 (Slug Flow) 的特点是随着气相流量的进一步增大, 流型转变为段塞流, 此时气液分界面上掀起的波浪和管道上壁接触, 并形成以高速沿管道向前运动的液塞, 这种流型称为段塞流。

为简化研究, 一般将平滑层流和波状层流统称为层状流; 拉长的气泡流和段塞流称之间歇流 (Intermittent Flow), 则上述五种流型简化划分为三类, 即层状流, 气泡流以及间歇流。这三种流型是油气混输过程中最为常见的。

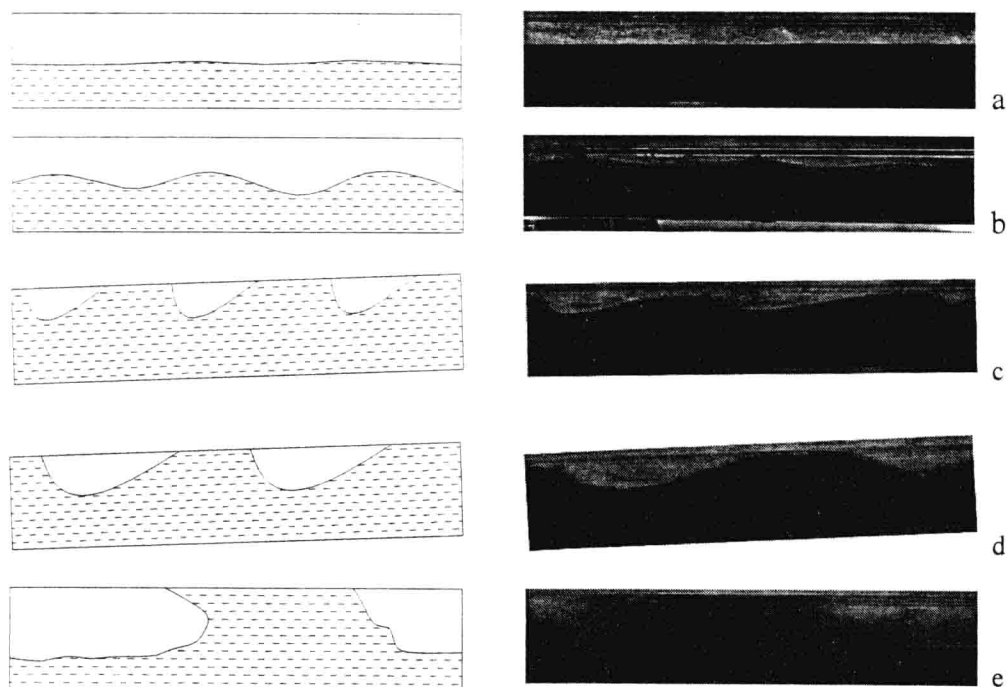


图3 典型的油气混输流动流型

a. 平滑层流; b. 波动层流; c. 泡状流; d. 延长泡状流; e. 段塞流

依据实验观察和所获参数计算, 本文得到的水平管道以及倾角为 1° 、 2° 、 3° 、 5° 、 10° 倾斜管道内相应的流型图图 4, 5, 6, 7, 8, 9.

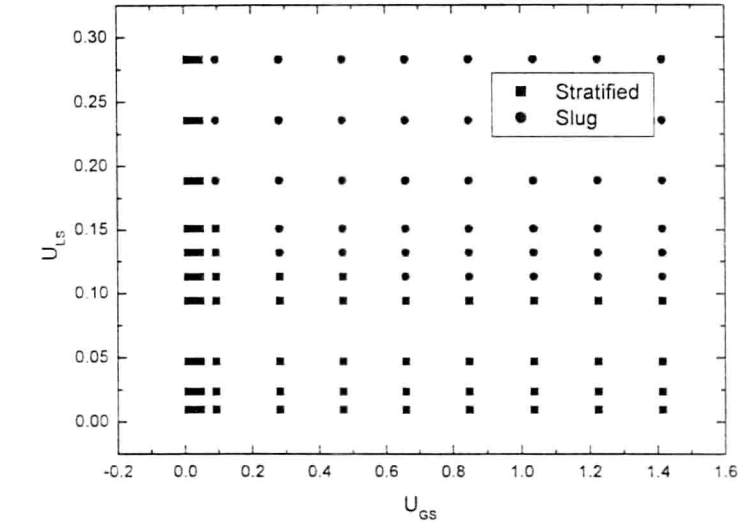


图 4 水平 (0°) 管道油气流动流型图

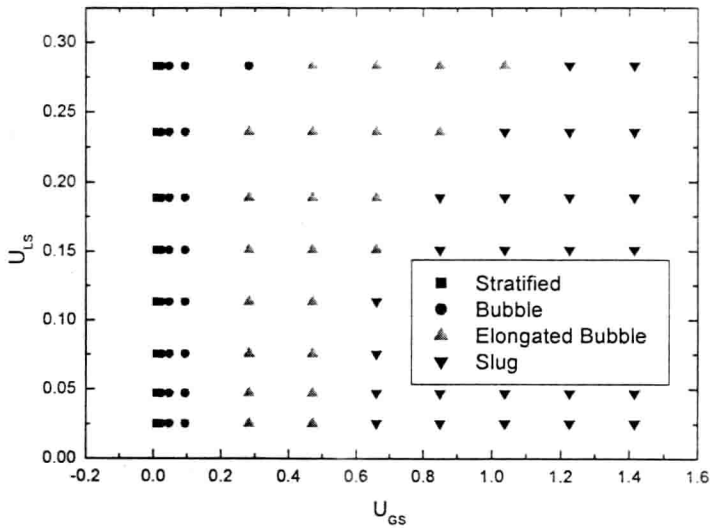


图 5 1° 倾斜管道油气流动流型图

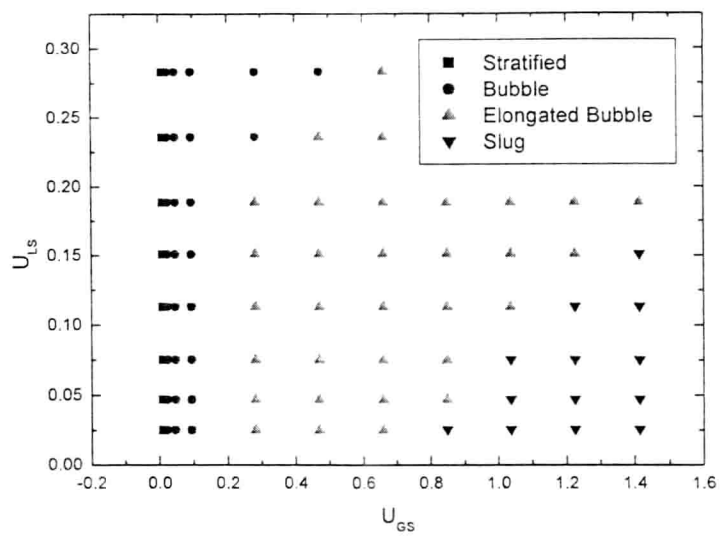


图 6 2° 倾斜管道油气流动流型图

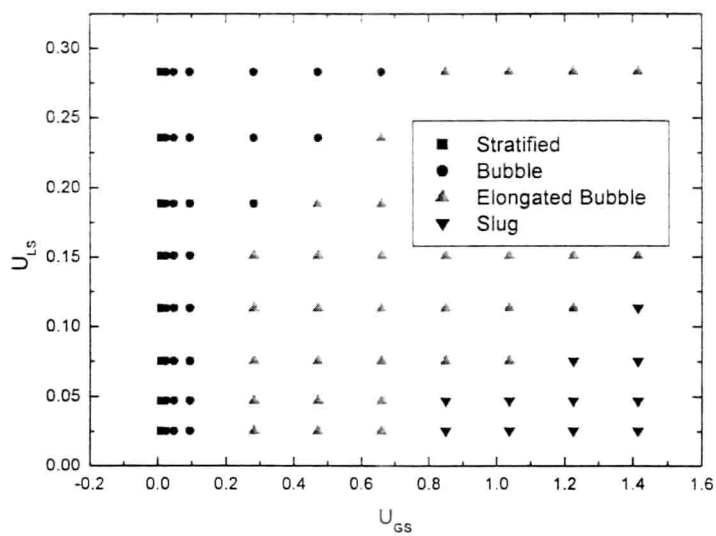


图 7 3° 倾斜管道油气流动流型图

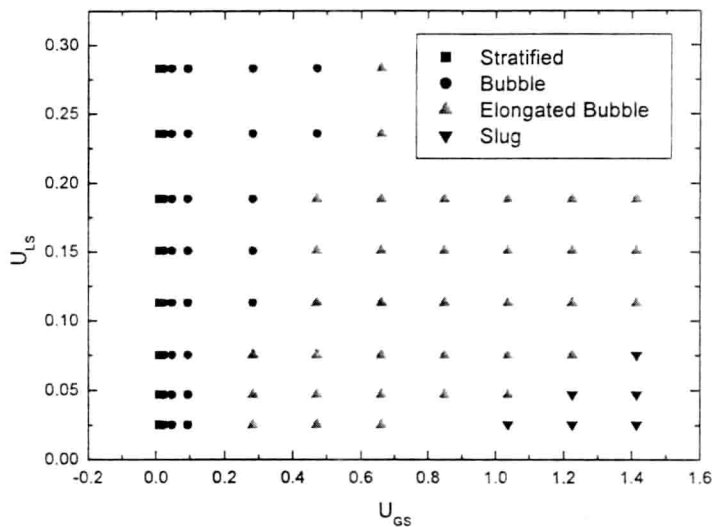


图 8 5° 倾斜管道油气流动流型图

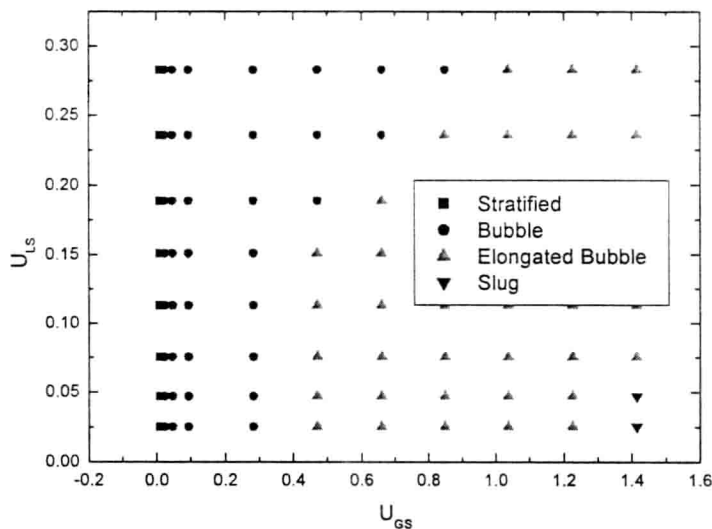


图 9 10° 倾斜管道油气流动流型图

4 结论

本文通过实验的方法模拟了油气在大直径管道内的流动，通过改变倾斜角度，研究了倾角改变对流型及流型转换的影响。结论如下：

（1）根据实验结果所总结绘制的流型图表明，倾斜角度对流型变化影响显著。在水平管道内只观察到层状流和段塞流的出现，而在倾斜管道内流型则依次发生从层状

流、泡状流、延长泡状流到段塞流的转变，且随着倾角的增大，流型图上流型转变的边界随之发生改变。在水平管道中，当液相流量较小时，即使气相流量很大也很难发生段塞流。而在倾斜管线中，管道内形成段塞流的液相流量显著降低，当气相流量达到一定程度时，就会形成段塞流。流型图还表明，随着倾角的增大，形成段塞流所要求的气相流量也逐渐增大。将所获流型图与所研究的理论模型对流型的预测进行比较，结果表明，该模型可以比较好的实现对油气流动流型的预测。

(2) 探讨了段塞流在水平及不同倾角下的流动特性。段塞流是油气混输管线中最常见的一种流型，严重的段塞流会给混输管线以及沿程设备造成相当大的危害，甚至造成混输停止。控制段塞流的形成，是该领域学者研究的重点问题。根据不同工况下段塞流的差压信号，分析了段塞流的液塞和差压的对应关系，发现差压信号能够很好的反映液塞的特征变化。液塞长度、液塞速度、液塞频率以及液塞的持液率是段塞流的几个关键特征参数，本文利用实验结合模型计算的方法，研究了段塞流在水平管道和不同倾角的倾斜管道内段塞流的流动特性。结果表明，倾角的改变显著影响着段塞流的特性，在水平管线中，段塞流的液塞单元长度较长，速度较快，发生频率低，液塞的持液率大。在倾斜管线中，液塞单元长度降低，液塞速度也随之降低，而频率升高，液塞的持液率降低；随着倾角的增大，液塞单元长度随之降低，速度和频率下降，持液率降低。研究还表明，无论在水平还是倾斜管线中，液塞长度都是变化的，但其均值的变化很小。

感谢:本文是国家高技术研究发展专项经费(863)资助项目(No.2002AA616050)。作者特别感谢大庆油田测井技术研究所的合作，不仅提供了大型多相流流动模拟实验装置，且给予了具体实验技术指导和协助。

参考文献

- [1] Oddie G, Shi H, Durlofsky L. J, Aziz K, Pfeiffer B, Holmes J. A. Experimental study of two and three phase flows in large diameter inclined pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, 2003, 29: 527-558.
- [2] 宋承毅. 石油工业多相流混输技术进展. 中国工程热物理学会 2002 年学术会议论文, 大连, 2002. 10
- [3] D. C. Lowe, K. S. Rezkallah. Flow regime identification in microgravity two-phase flows using void fraction signals [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1999, 25: 433-457.
- [4] Y. Mi, M. Ishii, L. H. Tsoukalas. Investigation of vertical slug flow with advanced two-phase flow instrumentation [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2001, 204: 69-85.
- [5] Lefteri H., Tsoukai A. S., Mamoru Ishii, Ye Mi. A neurofuzzy Methodology for impedance-based multiphase flow identification [J]. *Engng. Artif. Intell.*, 1997, 10, : 545-555.
- [6] N Petalas, K Aziz. A mechanistic model for multiphase flow in pipes. *Journal of Canadian petroleum technology*, 2000, 39(6), 43-55.
- [7] Jepson W. P., Taylor R. E.. Slug flow and its transitions in large diameter horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, 1993, 19(3), 411-420

水平微翅管内二元混合物两相流 阻力特性研究

马虎根 蔡祖恢

(上海理工大学热工程研究所, 上海 200093)

021-65681990 E-mail: mahugen406@hotmail.com

摘要: 本文对非共沸混合工质 R32/R134a 在水平微翅管内流动沸腾阻力特性进行了实验研究, 分析了影响压特性的一些因素, 讨论了混合物在水平微翅管内流动沸腾的流动阻力特点和规律。通过对试验数据的拟合, 按分相模型计算了加速阻力, 并建立了预测摩擦阻力的关联式, 计算结果与实验较吻合。

关键词: 水平微翅管, 流动沸腾, 阻力特性

在动力、制冷设备的设计及运行过程中, 阻力特性也是设计者所必须掌握的技术数据。预测两相流压降, 不仅可以确定设备中动力驱动特性及泵送功率, 而且还可以按沿程压力变化的规律来计算物性, 后者对非共沸混合工质来讲尤为重要。早先的两相流研究主要针对的是绝热流动, 而许多工程实际问题却是在加热条件下进行的, 两者最大的差别在于加速压降。在绝热流动中, 加速压降为零, 而在流动沸腾过程中, 特别是当系统处于高热负荷下时, 加速压降在总压降中的比例将上升, 在有些场合下甚至可以达到与总压降的大小可相比的程度。自上世纪六十年代以来, 核能得到广泛利用, 人们首先对汽水混合物在竖管中非等温两相流动的阻力特性进行了研究, 并建立了多种工况下的压降关联式, 同时将这一工作扩展到了其他场合。最近一、二十年以来, 对低沸点工质在水平光管内流动沸腾阻力性能的进行了一些研究工作, 但对微翅管开展的工作还很少, 特别是非共沸混合工质的有关数据及关联式更是鲜见。

Singal^[1]较早报道了混合物 (R13/R12) 在水平光管内流动沸腾阻力特性的研究, 他发现 Martinelli-Nelson^[2]关系式在计算混合物 R13/R12 的压降时偏小, 且偏差随着 R13 组分的增加而增加, 这说明压降与混合物成分有关。Singal 用两个成分修正参数分别对 Martinelli-Nelson 模型中的总压降和摩擦压降进行修正, 但其关系式对特定成分适用, 不能外推。Jung^[3]等将混合物 R22/R114 和 R12/R152a 的实验数据对 Martinelli-Nelson (分相模型) 和 Bo Pierre^[4] (均相模型) 关联式进行了比较后认为: Bo Pierre 关联式在高热流密度和低质量流量下不适用, 故有一半数据不能关联; 而 Martinelli-Nelson 关联式对全部数据适用, 但计算值偏大 20% (这与 Singal 的结果相反), 并对式中的两相因子 Φ_p^2 进行了修正, 最后得到的平均偏差仅 8.4%。Torikoshi^[5]对 R32/R134a 的研究工作也值得注意, 在他的实验结果中, 非共沸混合物的压降遵循各组分配按理想混合原则的线性插值结果, 这与混合物的换热特性大不相同。

Miyama^[6]对 R22/R114 在水平微翅管中流动蒸发的压降特性进行研究后发现: 混合物的摩擦压降与摩尔成分无关。Murata^[7]用 R123/R134a 在微翅管内进行了实验, 他将结果整理成分液相摩擦压降折算因子 ϕ_l 与 X_{ll} 的函数关系, 但他的摩擦系数采用的

是 Colburn 用于光管的公式，关联误差仅±7%。Murata 是从流动沸腾两相流总压降中减去加速压降（用公式计算，其数值小于总压降的 30%），由此得到的摩擦压降与绝热流动的压降的实验结果非常一致。在 C.S.Kuo^[8]的试验中（工质为 R407C），用相同方法整理了实验结果，并对加速压降进行了测试，发现约占总压降的 10%。Takamatsu^[9]则采用分汽相压降折算因子 ϕ_v 与 X_{tt} 来关联实验数据（工质为 R22/R114），且此关系与工质容积成分无关。另外，他得到的数据表明，加速压降的份额应在 15-25%之间。

综上所述，对混合物在水平管（包括光管和强化管）内流动蒸发换热的两相压降的研究还远未达到工程实用要求，有关的实验数据还不全面，尚有许多机理还不太清楚，这都有待进一步的研究。

1 实验系统和实验方法

实验系统（见图 1）由独立的制冷系统和工质循环系统两部分组成。制冷系统主要由 3 台制冷压缩机和三个冷媒水箱组成，为实验提供所需冷量。实验工质循环系统主要由循环泵、过冷调节器、预热段、实验段、冷凝器和储液器组成。实验工质从储液器中抽出，经屏蔽泵加压，流经质量流量计、过冷调节器，进入实验段。加热方式采用电加热，工质受热蒸发后成为气液混合物，再进入冷凝器冷凝成液体，回到储液器内完成一个循环。试件的进出口均装有可视段以观察流型。

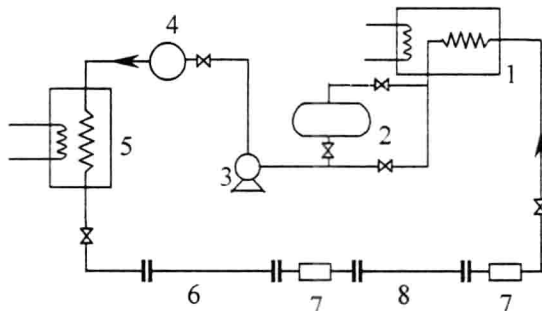


图 1 实验装置系统图

1. 冷凝器 2.储液罐 3. 泵 4.质量流量计 5. 过冷器 6. 预热器 7. 可视镜 8.试件
试件尺寸见表 1。

表 1 试件的几何尺寸

试件	内 径 /mm	外 径 /mm	长 度 /m	翅 高 /mm	翅 数	螺旋角
M1	10	12	1.46	0.13	60	13°
M2	10	12	2	0.15	60	18°
M3	10	12	2	0.15	60	22°
M4	10	12	2	0.15	60	30°
M5	10.6	12	2	0.25	74	18°

2 阻力特性

通常认为，两相流的总压降由三部分组成，即其可以表示为：

$$\Delta p_{tp} = \Delta p_f + \Delta p_a + \Delta p_g \tag{1}$$

式中等号右边三项依次为摩阻压降、加速压降和重力压降。对于水平管而言，重力压降为零。在剩下的两项中，摩阻压降一般占据主要地位。

本文中，对 R32/R134a 在水平微翅管内流动沸腾的阻力特性进行了实验测定，部分结果（试件 M2）示于图 2 中。从图 2 中可以看出，微翅管单位长度总压降随干度和质量流量的增加而增加，并且质量流量越大，压降的增长速率越大。按图中数据测算，压降随质量流量的变化约成 $\Delta p = f(G^{2.2})$ 的关系。另外，作者还对混合物在微翅管内绝热流动（即仅对预热段加热）的压降进行了测试。结果表明，绝热流动压降比换热情况下低约 20%-30% 左右。

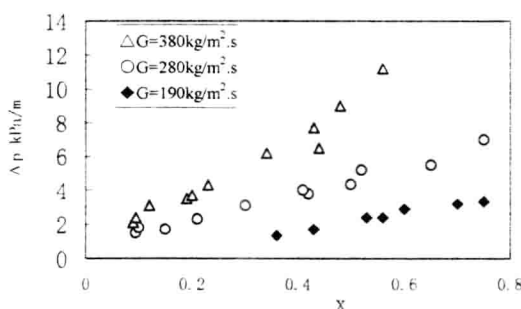


图 2 混合工质在水平微翅管中流动沸腾阻力特性（试件 M2）

3. 压降关系式

用于两相流中压降计算的主要有两种模型，即均相模型和分相模型。一般认为，只有当质量流量 $G > 2000 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 时，均相模型才是合适的，而在质量流量 $G < 1360 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ 的较低流速范围内，分相模型的压降预测较为准确。本实验中工质的流量全部低于 $1360 \text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ ，故本文采用分相模型计算。

分相模型人为地将汽水混合物分成液体流动和蒸汽流动，且每股流动都假定以一平均速度运行着。其基本假设为：

- (1) 汽相和液相的速度是常量，但不一定相等；
- (2) 相之间保持着热力平衡；
- (3) 应用经验公式或简化的概念表示双相摩擦因子（ ϕ^2 ）及真实容积含汽量与流动独立变量之间的关系。

在目前的流动沸腾压降特性的有关实验研究中，由于实验方法的限制，只能测出流动过程中的总压降，因此，本文采用的对压降数据的处理方法是：用现有的理论模型计算出加速压降，再从实验所测得的总压降 Δp_{tp} 中减去加速压降 Δp_a （不考虑重力压降），所得便为摩擦压降 Δp_f ，即：

$$\Delta p_f = \Delta p_{tp} - \Delta p_a \quad (2)$$

然后用分液相折算因子 ϕ_l^2 来关联摩擦压降数据。

对混合工质在水平等截面圆管中的流动沸腾，设：