

两相流与传热

——原理及应用

陈学俊 著 原子能出版社

**LIANGXIANGLIU
YU CHUANRE**

**yuanti ji
yingyong**

两相流与传热

——原理及应用

陈学俊 著

原子能出版社

内 容 简 介

两相流与传热是在流体力学与传热传质学基础上发展起来的一门新的学科,已广泛应用于动力、石油、化工以及许多工业部门的换热设备中。近20多年来,由于核电厂与高技术的发展,两相流与传热又得到了进一步的发展,研究成果显著,直接关系到各种换热设备及其系统的优化设计、安全运行与控制。

本书作者,中国科学院学部委员、西安交通大学陈学俊教授,结合生产实际长期从事两相流与传热特性的应用基础研究工作。本书是由作者将其在国内外发表的论文中有关部分选编而成。内容包括两相流流型及流型转换、截面含气率、两相流动阻力特性、沸腾传热与传热强化、临界热负荷、两相流不稳定性、两相流测试以及两相流与传热的应用等部分,其中不少内容是国内外首次研究的成果。本书是一本比较系统的研究专著,它将为我国动力、石油、化工、核电以及有关过程工业中的蒸汽发生器与换热设备提供设计数据和理论基础,既可为经济建设服务,又可作为高等学校与研究院、所培养有关专业研究生的教材,也可供有关工厂、设计单位及工业部门的工程技术人员参考。

两相流与传热

——原理及应用

陈学俊 著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

地质出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售



开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张16.125 ·字数405千字

1991年6月北京第一版·1991年6月北京第一次印刷

印数1—2000

ISBN7-5022-0267-6

TB·9 定价: 16.00元

序

两相流与传热是在流体力学与传热传质学基础上逐步形成起来的一门新的学科分支。它广泛应用于动力、石油、化工、核电以及各种过程工业中的热交换设备。特别是近20多年来，由于核电厂、大型火电机组以及高技术的发展，两相流与传热方面的研究成果显著。这些成果不仅关系到上述设备及系统的经济和优化设计，而且关系到设备的运行安全与控制。

中国科学院学部委员、西安交通大学教授陈学俊同志，从事教育、科研工作50年，长期以来进行两相流动特性与沸腾传热的应用基础研究，现将其研究成果中40余篇在国内外发表的论文编成专著出版。这一专著无疑将促进两相流与传热这一门新学科的发展，并将对我国动力、石油、化工、核电以及有关过程工业提供有益的设计数据及理论基础。本人很高兴地看到这本书的出版，并乐为之序。

周培源

1988年11月2日

前言

一年多以来, 交大一些校友建议在我从事教学、科研工作50年的时候, 出版一本专著, 总结一下我的研究成果。为此我将在国内外发表的论文中有关内容进行系统整理, 并编辑成书。

两相流与传热是在流体力学与传热传质学基础上发展起来的一门新的学科, 现已广泛应用于动力、石油、化工以及多种过程工业中, 特别是近20多年来, 由于核电与高技术的发展, 更引起各国的重视, 研究成果显著。进行两相流与传热方面的研究工作与我所从事的事业有关。1939年我大学毕业后, 在重庆经济部中央工业试验所参加锅炉设计制造工作。1944年赴美, 在燃烧工程公司工作, 以后在普渡大学研究院攻读蒸汽动力工程。1947年回国, 一方面在中央工业试验所热工试验室搞研究工作, 同时在交通大学兼任教授。1950~1956年在上海交通大学、1957年起在西安交通大学专任教授迄今。

1952年起全国高校学习苏联, 我深深感到像我们这样一个大国, 要发展动力工业培养高级建设人才, 仅仅依靠苏联的设计计算标准不行, 必须结合我国实际, 开展理论研究, 才能真正独立自主地发展我国动力工业, 培养出优秀的动力工程人才。因此, 从1955年起, 我开始进行气固两相流方面的研究工作, 1960年开始进行气液两相流与传热方面的研究工作。党的十一届三中全会以来, 教学、科研形势很好。为了适应动力、化工、石油及核电的发展, 和培养硕士、博士研究生工作的需要, 我重点地对气液两相流与沸腾传热, 进行了系统的研究。1984年及1989年在西安主持召开了两次两相流与传热国际学术会议, 进行了国际学术交流, 促进了国内这方面研究工作的进展。

这本专著内容包括两相流流型及流型转换、截面含气率、两相流流动与阻力特性、两相分布规律与截面含气率、两相流不稳定性、临界热负荷、两相流测试以及两相流与传热的应用。不少研究内容在当时是国内外首次进行研究的课题。书中不仅有我个人的工作, 而且多数是在我主持下与历届的研究生共同研究的成果。他们现在已成为专家、教授或教学科研中的骨干, 如浙江大学教授屠传经, 西安交通大学教授林宗虎与陈听宽, 上海机械学院副教授孙家庆, 上海电站设备成套设计研究所高级工程师朱才广, 西安交通大学副教授陈立勋、周芳德与张鸣远, 讲师田永生与陈宣政, 博士王芊、郭烈锦与刘尧奇以及硕士张旭、许保华等。

特别应当提出的是, 国际著名物理学家、流体力学家、北京大学原校长、中国科学技术学会名誉主席周培源学部委员在百忙中为本书作序, 我向周老表示衷心的感谢。

再者, 本书之所以得以完成, 与爱妻袁旦庆副教授的长期支持和帮助分不开的, 在此深表谢意。

陈学俊

1989年9月5日

目 录

序	I
前言	II
一、两相流流型及流型转换	1
(一) 流型概述	1
(二) 弯管内气液两相流流型	2
(三) 螺旋管内气液两相流流型	4
(四) 螺旋管内气液两相流流型转换	5
1. 实验设备	5
2. 螺旋管流型转换的理论分析	6
3. 实验及观察结果	7
4. 螺旋管中两相流流型转换准则关系式	8
(五) 立式螺旋管内气液两相向下流动流型及转换	10
1. 实验设备与试验范围	10
2. 实验观察及其结果分析	10
3. 流型转换的理论模型及判别关系式	11
(六) 卧式螺旋管内气液两相流流型及转换	14
1. 实验设备与试验步骤	14
2. 流型分类及试验结果	15
3. 理论分析及流型转换准则关系式	16
(七) 卧式螺旋管内气液两相环状流转换特性	18
1. 实验设备与试验结果分析	19
2. 理论模型和转换准则关系式	20
二、截面含气率	23
(一) 含气率概述	23
(二) 管内两相流截面含气率理论模型	25
1. 理论模型	25
2. 关系式及其比较	29
(三) 垂直管内两相混合物向下流动特性与截面含气率	32
1. 试验研究方法	32
2. 试验数据处理	34
(四) 螺旋管内截面含气率	35
1. 工作简述	35
2. 理论分析	36
3. 测量方法及试验装置	38
4. 试验结果分析	41
三、两相流动特性与流动阻力	44
(一) 管内气液两相流动摩擦阻力	44
1. 试验装置及试验方法	44

2. 试验结果及处理	45
(二) 螺旋管内气水两相摩擦阻力	49
1. 工作简述	49
2. 理论分析	49
3. 试验装置与试验方法	51
4. 试验结果与讨论	51
(三) 螺旋管内气水两相摩擦阻力特性	52
1. 螺旋管内气水两相摩擦阻力特性分析	54
2. 试验装置	55
3. 试验结果与数据处理	56
(四) 螺旋管内气水两相摩擦阻力随管长的变化特性	61
1. 理论分析	61
2. 试验装置	62
3. 试验结果与分析	63
(五) 内螺纹管气水两相摩擦阻力特性	64
1. 试验设备与试验方法	64
2. 试验结果与分析	65
(六) 管内气水两相混合物转弯阻力	70
1. 管内气水两相混合物转弯流动特性准则方程	70
2. 试验装置与阻力测定	73
3. 试验结果与数据处理分析	74
(七) 螺旋管内气液两相流中二次回流	81
1. 数学模型及解	82
2. 试验装置	85
3. 试验结果与讨论	87
(八) 分叉管两相流分配特性	90
1. 试验设备及试验方法	91
2. 试验结果及其整理方法	91
3. 分析讨论	93
4. 分叉管中流量与压降关系式的建立及比较	94
四、沸腾传热与传热强化	97
(一) 内螺纹管近临界压力下沸腾传热	97
1. 试验方法	97
2. 光管传热特性	98
3. 内螺纹管传热特性	100
(二) 水平管干涸后传热	104
1. 试验设备	104
2. 试验结果与分析	105
(三) 螺旋管内两相强制对流沸腾和干涸后传热	108
1. 试验装置与试验结果分析	108
2. 强制对流沸腾传热数据整理	109
3. 螺旋管干涸后传热特性	110
(四) 稳定流动时管内强制对流沸腾强化传热	114

1. 试验设备及试验方法	114
2. 试验结果及数据处理	115
3. 数据分析和讨论	117
(五) 表面式换热器强化传热技术评价方法	118
1. 近似的评价方法	118
2. 考虑成本及运行费用的评价方法	121
五、临界热负荷	123
(一) 临界热负荷值模化方法研究	123
1. 工质的热力学性质相似性	123
2. 模化方法的推导	125
3. 试验验证	126
(二) 水平管内的临界热负荷	127
1. 试验设备和试验方法	128
2. 理论分析	128
3. 试验结果和讨论	132
(三) 螺旋管内的临界热负荷	133
1. 试验装置和试验过程	133
2. 理论分析	134
3. 试验结果和讨论	136
(四) 水平管临界热负荷——上下温度飞升点的计算	138
1. 试验装置	139
2. 分析讨论	141
六、两相流不稳定性	146
(一) 两相流不稳定性研究工作概述	146
(二) 过冷度、热负荷与出口节流对压力降型脉动的影响	147
1. 实验装置	148
2. 实验范围及试验方法	149
3. 试验结果及讨论	149
(三) 垂直管中两相流压力降型不稳定性	155
1. 实验装置与试验方法	155
2. 试验结果	155
3. 理论分析	155
4. 数值计算与试验结果比较	159
5. 各参数对压力降型不稳定性的影响	159
(四) 水平U型管中压力降型不稳定性的理论分析	161
1. 控制方程	162
2. 稳态流动特性的理论分析	162
3. 压力降型不稳定流动特性的理论分析	165
(五) 水平U型管中压力降型不稳定性的试验研究	169
1. 试验系统	170
2. 试验结果和讨论	171
七、两相流测试	175

(一) 孔板测量高压汽水混合物流量与干度	175
1. 理论分析和推导	176
2. 试验系统及测量方法	177
3. 试验结果及讨论	178
(二) 用锐缘孔板对亚临界压力两相流测量	181
1. 理论分析	181
2. 试验装置	183
3. 试验结果及讨论	183
(三) 用电导法测定两相流平均截面含气率	185
1. 试验装置和测量原理	185
2. 试验结果	186
八、两相流与传热的应用	188
(一) 螺旋管式蒸汽发生器的流动与传热特性	188
1. 螺旋管中单相介质的流动特性	188
2. 螺旋管中单相介质的换热特性	189
3. 螺旋管中两相介质的流动特性	190
4. 螺旋管中两相介质的传热特性	192
(二) 直流锅炉上升下降管圈布置水动力特性	194
1. 超高压直流炉上升下降管圈布置的水动力特性	195
2. 超临界压力直流炉上升下降管圈布置的水动力特性	202
(三) 筛孔板漏液规律	208
1. 试验装置	208
2. 试验结果	209
3. 理论分析与试验结果比较	211
(四) 回转式空气预热器的传热特性	215
1. 回转式空气预热器的热力特性分析	215
2. 试验方法及试验装置	216
3. 试验结果	219
4. 试验结果的分析	220
(五) 锅炉受热面含灰气流磨损与烟气流速	222
1. 磨损原理	223
2. 磨损试验装置与试验结果	224
3. 烟气允许流速	228
(六) 一次上升直流炉水冷壁设计中的几个问题	230
1. 关于水动力特性问题	230
2. 关于热偏差问题	233
3. 关于膜态沸腾问题	237
(七) 大型火电厂主力机组锅炉循环方式与锅内特性分析	239
1. 自然循环锅炉	240
2. 一次上升直流锅炉	243
3. 低倍率循环锅炉	245
4. 复合循环锅炉	246

一、两相流流型及流型转换

(一) 流型概述

两相混合物在管内流动时,表现出有不同的相分界面的几何图形。当液体在受热管道中蒸发时,液体及其所产生的蒸气也具有不同的流动结构。两相流的主要特性是在两个相之间存在有分界面,而在气液两相流中,分界面有多种形状。一般来说,表面张力的作用有助于产生弯曲的界面,导致成球形(例如液滴或气泡)。在连续相中夹附的不连续相愈大,则与球形相差愈远。因此,在空气流中小的液滴易成球形,而较大的液滴常易变形,液流中的气泡也是如此。总之,在两相流动中,这种两相界面分布成不同几何图形或不同结构形式,我们称之为两相流流型,或简称流型。但应指出,这种分类虽然很有用,但仍然是定性的,而且常常是很主观的。流型目前已采用了各种各样的名称,本书选用的是比较公认的一些定义,也是比较能够清晰区分的流型。

在单相流动中,我们对层流和紊流采用不同的物理模型来进行理论分析。在两相流动中,流型与它每一个相的流量、热负荷、压力、通道的几何形状和位置等因素均有关。因此,在两相流动中,必须先了解流动属于何种流型,才有可能比较好地作出合适的理论模型,以进行流动特性和传热特性的研究。

从工程的观点看来,一般研究两相流的最终目的是要求得在一种给定流动工况下的传热特性和压降特性。流型及其转换研究是一项基础性工作。在有热量输入的情况下,两相流是一个传热学和流体动力学的综合问题:一方面热量的输入引起相的变化,因而引起了两个相分布的变化,也即流型的变化;另一方面由于沿程压降引起了流体动力特性的变化,又会反过来影响传热的特性。在水平或垂直管道中,单组分两相流沿管道必然发生的压力变化,连续地改变流体的状态,因而也改变相的分布和流型。此外,还存在有两相间热力平衡偶然的破坏和流体动力的不稳定性问题。这说明了在有热量输入的两相流中存在着内在的复杂性,某一局部或某一点现象的描述是不足以说明问题的实质的。

尽管有上述种种的复杂性,但是通过许多简化的分析和实验研究工作,已取得了一定的成功。这些研究工作常常是在假定各种流型业已形成,而又在绝热的基础上作出的,因此已积累了有关绝热流动的各种流型、相的分布和压降方面的大量资料,可以在工业上应用。

有很多测试方法可用来研究受热和不受热管道中的两相流流型。低速低压时,在透明管道中可以直接用肉眼观察各种流型;高速时,为了相对地减缓流动并扩大观察范围,可采用高速摄影。但许多分界面处的反射和折射,常易造成肉眼观察与摄影照片的解释有相当大的失真,在高速下这一现象更为显著。X光摄影的发展,有助于降低这种失真程度,并可在不透明的受热管道中进行研究。另外一种在受热管道中的测试方法是在透明管子上涂一层非常薄的金属导电层,此导电层可作为加热用而对透明度影响不大。还有各种类型

的探针都可以用来研究流型, 由这些探针所得到的信息可提供间接资料, 根据这些资料能够推算及判断属于何种流型。

目前对各种流型以及从一种流型转换到另一种流型, 虽然了解得还不够, 但普遍感到需要有一些简单的方法, 以便能够知道在一组给定的局部流动参数下可能发生的一定流型。表示各种流型转换的方法之一是用流型图的形式。图上的区域可以分别表示相应的流型, 图上坐标取相折算速度或包括这些速度的通用参数。一些次要变量也会影响流型, 但仅用二维图形不可能将它们的影响表示出来。采用相折算速度作为图形坐标系, 其适用范围仅限于某个特定情况, 而选择一个更通用参数, 有可能恰当地表示某个特定的转变, 但要求这个参数也适用于表示由其它的力平衡决定的其它转变是不大可能的。克服这个困难的另一可行方法, 是对每一种流型转换单独进行试验, 并推导出适用于该特定转换的准则, 不过后一种方法到现在还处于研究阶段。

流型图是二维的图形, 表示各种流型存在的范围。各作者采用的坐标系不相同, 还没有一个取得一致同意的最佳坐标系。选择一组流型图是不容易的, 还不能作出推荐, 没有一种方法是很完善的。

目前对水平管中两相流及垂直管中两相流的流型及其转换研究较多, 而对于曲线管, 如弯管及螺旋管中的流型及其转换研究较少, 作者提供这一方面的研究成果。

(二) 弯管内气液两相流流型

本试验台利用空气-水两相混合物在略高于大气压力下进行试验, 在透明玻璃管内对水平、垂直上升、垂直下降等两相流动在转弯处的流型进行直接观察。

从流动结构来看, 与直管中有相同之处, 具有直管中的典型的几种流型, 而且随着含气量的增加逐步地过渡。但是由于流体转弯时, 流向发生改变, 要受离心力的作用, 所以流动结构中还表现了自己的特点。

气水两相混合物向上流动转弯 180° 时的气泡状流动有两种形式: 当水速小时, 气泡由于受浮力作用沿上壁流过 (图1-1a); 水速增加后, 由于离心力作用而迫使气泡沿下壁流过 (图1-1b)。气弹状流动时, 气弹在开始转弯时就由上升时的对轴线对称运动而过渡为不对称运动, 随着含气量的增加, 气弹四周的水膜就要起沫, 而使水中含有更多的气泡。当气弹通过弯头时, 在开始部分, 管壁上能保持有一定的水膜, 通过弯头的中部后, 就开始分层, 水沿管子的下部流过, 而气沿上部流过 (图1-1c及d)。环状流动时, 由于离心力的作用, 水被抛向上壁 (图1-1e)。随着含气量的增加, 最后进入雾状流动 (图1-1f)。

气水两相混合物向下流动转弯 180° 时的流动结构。在向下流动时, 离心力和浮力的作用是一致的, 都要使气泡沿管子上壁流过, 不论水速如何, 气泡状流动只有一种形式。环状流动时与向上流动相同, 也要分层, 但大部分水沿管子下壁流过。参见图1-2。

气水两相混合物水平流动转弯时的流动结构见图1-3。气泡状流动也有两种不同形式: 水速小时, 气泡沿管子上部外边流过 (图1-3a); 水速大时, 由于离心力作用气泡被迫沿管子上部内边流过 (图1-3b)。分层流动时, 由于水速很低, 在转弯时离心力作用不大, 所以仍保持原状。弹状流动时与垂直管中情况有所不同, 在水平直段中气弹本身是不对称的, 水在管子下部流过, 当转弯时由于离心力作用, 这部分水将沿管子外边上升。

若将各种流向转弯 90° 时的流动结构与转弯 180° 时的流动结构相比较,其流动结构是与转弯 180° 时的前 90° 相同,较为特别的只是向下流动中的气泡状流动,在转弯后气泡要自行集聚成气弹,如图1-4所示。

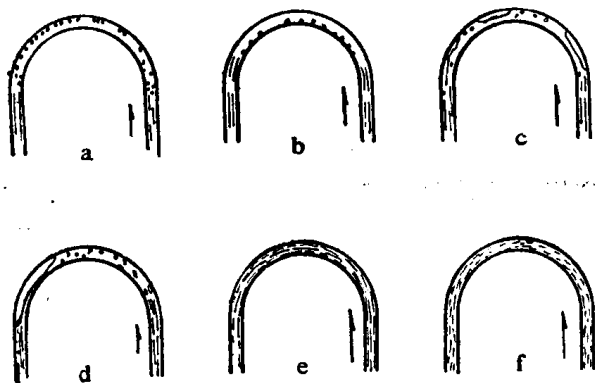


图 1-1 气水混合物向上流动转弯 180° 的流型

a、b——气泡状；c、d——弹状；e——环状；f——雾状。

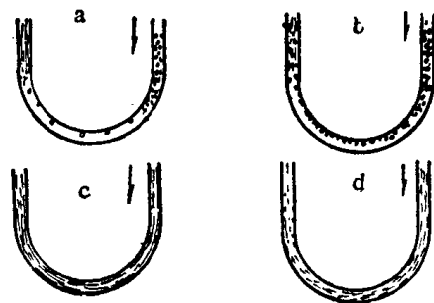


图 1-2 气水混合物向下流动转弯 180° 的流型

a、b——气泡状；c——环状；d——雾状。

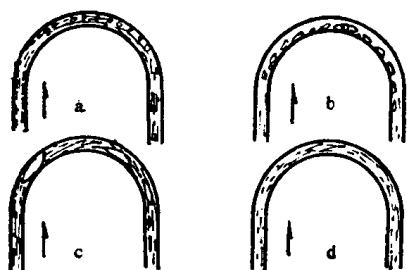


图 1-3 气水混合物水平流动转弯 180° 时的流型

a、b——气泡状；c——弹状；d——环状。

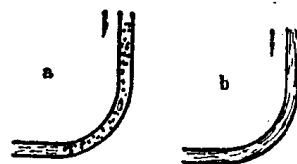


图 1-4 气水混合物向下流动转弯 90° 时的流型

a——气泡状；b——环状。

气水两相混合物向上流动转弯 45° 时,气泡在通过弯头时都变成细长形,如图1-5所示,这就引起该处混合物的重度增加,且气弹通过时产生很大的扰动,这都要引起局部阻力系数的增加。

当向下流动转弯 45° 时,由于离心力和浮力的作用,在转弯后,气泡集聚在管子上部,环状流动也有同样的情况,因此局部阻力系数也要增大,如图1-6所示。



图 1-5 气水混合物向上流动转弯 45° 时的流型

a——气泡状；b——弹状；c——环状。

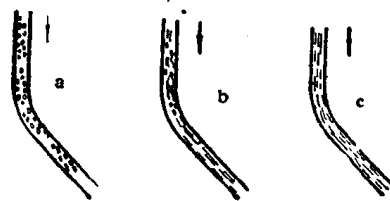


图 1-6 气水混合物向下流动转弯 45° 时的流型

a——气泡状；b——弹状；c——环状。

以上流动结构的观察,有助于对局部阻力系数试验结果的理解。

(三) 螺旋管内气液两相流流型

利用空气-水两相混合物在 $1\sim 3\text{ atm}^*$ 下进行试验,在水泵后装置了稳压器,依靠容器上部压缩的空气起稳压作用。在空气压缩机后装有储气筒,使空气流量稳定。此外,在空气回路中还装有螺旋管恒温器,使空气温度和水温度相一致。

螺旋管内气液两相流流型的观察用 $d=12\text{ mm}$, $d/D=1/24$, 倾斜角 $\alpha=0.01$ 的玻璃管圈进行。其流型大致和水平直管内的流型相似,但也有差别。改变空气和水的流量可以观察到分层流、波状流、柱塞状流、块状流、分散泡状流和环状流等流型。

分层流

在空气流量、水流量均小时,出现分层流,这时气相、液相都是连续相,相的分界面清楚。在空气流量稍大、水流量稍大时,由于离心力的作用,两相分界面发生向内倾斜,呈现月牙状,见图1-7。气相趋向内上侧,液相趋向外下侧。

在气水混合物从水平直管段进入螺旋管段处时,由于因惯性产生的离心力的作用,可以看到界面发生的变化。

柱塞状流

当水折算速度增大,气折算速度较小时,气相以气泡状分散在连续的液相中,形成长气泡状,见图1-8。在螺旋管内由柱塞状流转变为块状流时的空气折算速度比水平直管内的要低。

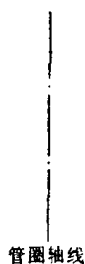


图 1-7 分层流, 两相界面发生倾斜

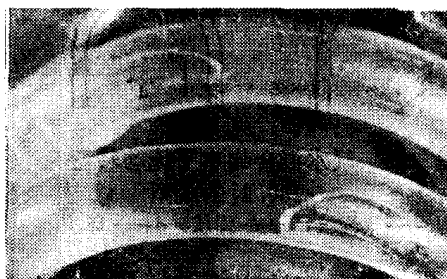


图 1-8 柱塞状流

波状流

当水折算速度较低,空气折算速度增高,在气液两相的交界面处产生激烈的扰动,形成波状流,波浪向前推进的频率也增高,并且在气相中含有小水滴,见图1-9。在螺旋管内波状和分层流转变点处的空气折算速度比水平直管内的低。

块状流

在柱塞状流情况下,当空气折算速度继续增高,在液相中形成大气泡,气泡长度较长,但气相是不连续的,见图1-10,同时液相中含有小气泡。螺旋管内的块状流动区要比水平直管内的窄。

分散泡状流

当水折算速度继续增高,气泡变成细微小气泡分散于液相中,见图1-11。由于这时气

* $1\text{ atm} = 101325\text{ Pa}$ 。



图 1-9 波状流



图 1-10 块状流

水两相混合物受到惯性离心力较大，内侧所含的气泡比外侧所含的气泡要多，气泡并不是均匀地分散于液相中。

环状流

当空气折算速度很高时，空气在管内中心流动形成气柱，液相趋向贴管壁流动，见图 1-12。

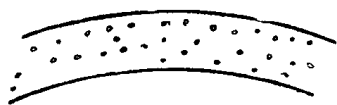


图 1-11 分散泡状流

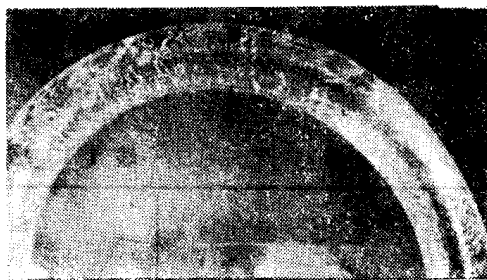


图 1-12 环状流

实验表明，随着空气流量和水流量的变化，流型在不断地发生变化。不同的流型使得空气和水之间相互作用的方式不同，其作用力的大小也不同，因此在不同的流型下，其流动阻力也各不相同。同时也表明，在同一流动情况下，沿着螺旋管不同长度处的流型也不同，这是由于流动参数随长度变化而变化所造成的。

(四) 螺旋管内气液两相流流型转换

在核电厂中，蒸汽发生器是十分重要的主设备，而螺旋管式蒸汽发生器是经常采用的一种型式。到目前为止，对螺旋管内单相流体的流动和传热规律已作了大量的研究工作，但对气液两相在螺旋管内的流动规律，特别是气液两相流型及其相互转换的规律，国内外进行的研究工作却很少。由于对螺旋管内气液两相流的流型及其转换进行了实验研究，根据实验结果绘制了流型图；系统地研究了螺旋管结构参数，螺旋直径 D 和螺旋上升角 α 对流型转换的影响；在实验基础上，通过量纲分析及数据处理对三条主要流型转换边界曲线提出了准则关系式。

1. 实验设备

实验装置如图1-13所示。

实验管圈使用内径22mm、壁厚4mm的有机玻璃管弯制而成，其结构参数见表1-1。各种流型及其转换可直接观察确定。

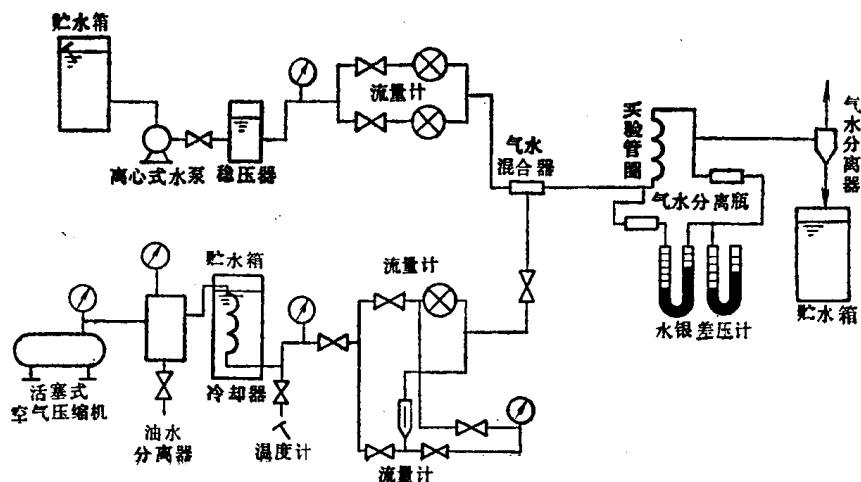


图 1-13 实验装置示意图

实验气、水速度范围：水折算速度 u_{LS} 为0.04~2.7m/s，空气折算速度 u_{GS} 为0.2~18m/s。

表 1-1 螺旋管圈结构参数表

螺旋直径 D (m)	螺旋上升角 α (°)	圈数
0.623	1.2	2
0.623	3	2
0.623	12	2
0.910	5	2
0.213	5	5
0.129	5	6

2. 螺旋管流型转换的理论分析

本文把螺旋管气液两相流流型区分为五种：波状流、柱塞状流、弹状流、环状流和分散泡状流。实验中观察到的流型类似于在水平管中观察到的流型。

气液两相流各种流型的出现及其转换是由作用在气液两相上的各种力的相互作用及平衡引起的。在管内气液两相流动情况下，当取管子内径 d 作为特性尺寸，则作用在流体上的力可分别表示为：惯性力—— $\frac{1}{2}\rho u^2$ ；粘性力—— $\mu u/d$ ；重力—— $\rho g d$ ；表面张力—— σ/d 。

由量纲分析可得以下无量纲数组：雷诺数 $Re = \rho d u / \mu$ ；韦伯数 $We = \rho u^2 d / \sigma$ ；弗劳德数 $Fr = u^2 / (g d)$ 等。再加上折算速度比 u_{LS}/u_{GS} ，密度比 ρ_L/ρ_g ，粘性系数比 μ_L/μ_g ，螺旋管结构参数 D/d 、 α 等，即可比较全面地来描述各种流型之间的相互转换了。在研究特定的转换时，并不需要考虑上述所有的准则数。

如果把柱塞状流和弹状流看作统一的间歇状流，那么需要考虑的流型转换边界曲线有

三条:

(1) 波状流向间歇状流或环状流的转换 由实验观察, 螺旋管中发生这一转换时, 流动工况与水平管中的情况极其相似, 其流型图中转换边界曲线的形状和变化趋势也与倾斜直管的大致相同。因此可以认为发生这一转换的机理, 螺旋管与水平管、微倾斜管是相同的。为考虑气相惯性力与液相重力的作用, 引入准则数 $Fg = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \times \frac{u_{GS}}{\sqrt{dg}}$ 来描述, 螺旋上升角 α 的影响作为一个独立因素考虑。伯努利效应力的大小还与管道中的液位高低有关, 而螺旋管中波状流的液位高低与 u_{GS}/u_{LS} 、 D/d 及 α 等因素有关。因此, 这一转换边界曲线的准则关系式可表示为

$$f_1(Fg, u_{GS}/u_{LS}, D/d, \alpha) = 0 \quad (1.1)$$

(2) 间歇状流向环状流的转换 螺旋管中在不同水流量下, 间歇状流向环状流转换的空气折算速度大致保持为一常数。这说明, 在螺旋管中向环状流的转换与水平管一样, 主要是由于气流惯性力克服液相重力作用引起的, 同时还受到表面张力的影响。为考虑气相惯性力、液相重力及表面张力的相互作用, 引入

$$Fg = \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}} \frac{u_{GS}}{\sqrt{dg}}, Ku = \frac{u_{GS} \rho_G^{1/2}}{[g(\rho_L - \rho_G) \sigma]^{1/4}}$$

两个准则数。实验观察还表明, 转换还受 D 和 u_{L0} 变化的影响, 而螺旋上升角 α 则几乎没有影响。因此需再引入 D/d , u_{GS}/u_{LS} 。这样该转换的边界曲线准则方程式可写作

$$f_2(Ku, Fg, D/d, u_{GS}/u_{LS}) = 0 \quad (1.2)$$

(3) 间歇状流向分散泡状流的转换 螺旋管中该转换的情形要比水平管复杂。此时流体不仅受到重力作用, 同时还受到离心力的作用, 这将促使气液两相分离; 另一方面, 水的流速比较高时, 在螺旋管中导致比较剧烈的二次流, 这和紊流脉动一样, 又将促使气液两相混合。当气液两相混合趋势足以克服两相分离趋势时, 就会向分散泡状流转换, 螺旋管中二次流的强弱直接影响到摩擦压降的大小, 因此本文仍采用准则数 $\frac{|(d\phi/dx)_{L,0}|^*}{[(\rho_L - \rho_G)g]}$ 来描述这一转换, 但 $|(d\phi/dx)_{L,0}|$ 应当根据螺旋管的有关公式来计算。该转换还应考虑表面

张力及管径的影响, 用准则数 $\frac{\sigma}{[g(\rho_L - \rho_G)d^2]}$ 来表示。实验结果表明, u_{GS} 、 D 也有影响。

综合以上分析, 向分散泡状流的转换边界曲线可表示为

$$f_3\left(\frac{|(d\phi/dx)_{L,0}|}{[(\rho_L - \rho_G)g]}, \frac{\sigma}{[g(\rho_L - \rho_G)d^2]}, u_{GS}/u_{LS}D/d\right) = 0 \quad (1.3)$$

3. 实验及观察结果

六根螺旋管的实验观察结果已绘成流型图, 示于图1-14。

流型图中各转换边界区域的形状大致相似。以图1-14(a) 为例可以看出:

弹状流向柱塞状流以及弹状流向环状流转换的边界在图中均大致为一垂直带状区域, 即转换主要取决于空气引用速度, 而水引用速度影响不大。当 $u_{GS} = 0.3 \sim 0.5$ m/s 时发生向柱塞状流的转换, $u_{GS} = 11 \sim 13$ m/s 时向环状流转换。弹状流向分散泡状流的转换边界为一微倾斜的带状区域, u_{GS} 增加时, 发生转换的 u_{LS} 也略有增加, 发生转换时的 $u_{LS} > 1.3$ m/s

* 实验转换点; $\equiv$ 实验转换区 —— 由准则关系式作出。

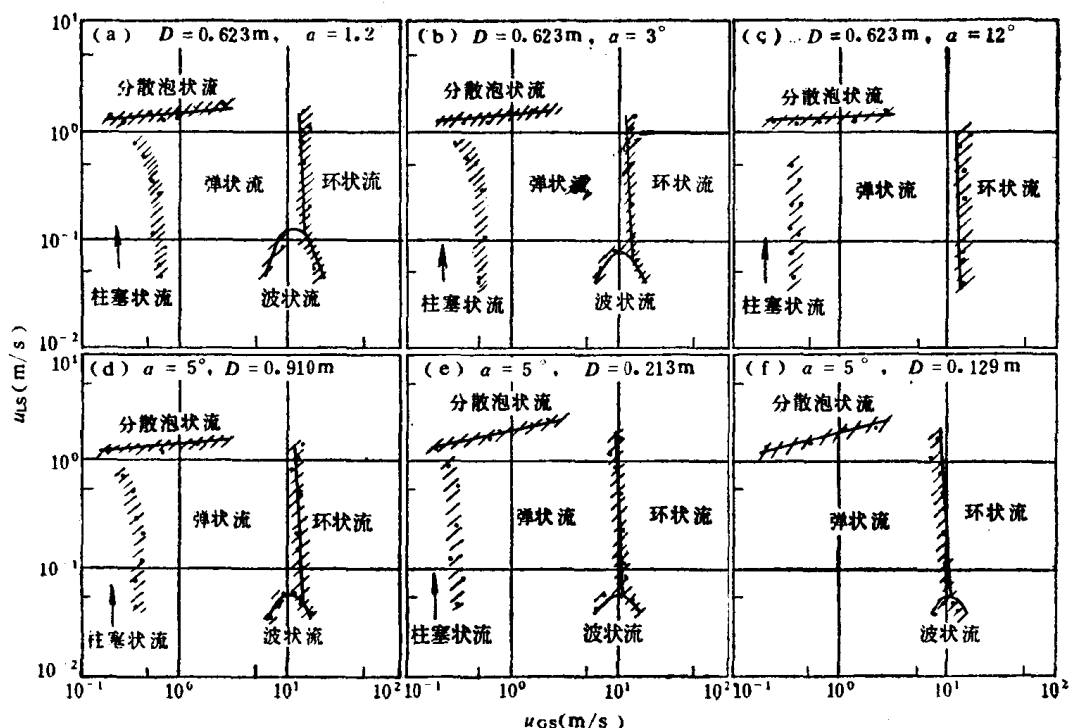


图 1-14 螺旋管流型图

(实验中 $u_{gs} < 2.5 \text{ m/s}$)。波状流向弹状流或环状流的转换发生在一个钟形的带状区域内，波状流区域的范围相对于水平管大为缩小。

螺旋管流型图非常类似于Barnea等人所作的倾斜直管(向上流动)流型图，只是转换边界的位置及流型区域的大小互有差异而已。

螺旋上升角 α 对流型转换的影响：由图1-14(a)~(c)可以看出， α 角对向环状流和向分散泡状流的转换边界几乎没有什么影响。但波状流向弹状流或环状流转换的钟形边界曲线对 α 角比较敏感。当 α 角增加时，整个钟形曲线向着水流量较小的方向缩小， $\alpha = 12^\circ$ 时，在实验气、水流量范围内已经不能看到波状流。与Barnea等人的实验结果比较，如果把他们的所谓波环状流看作弹状流，那么两者这一相应转换边界曲线的变化趋势是一致的，只是螺旋管中，该转换边界曲线随 α 角增加而缩小的速率不及倾斜管的快。随 α 角增大，柱塞状流与弹状流之间的转换边界向气流量较小的方向移动。

螺旋直径 D 对流型转换的影响： D 对流型转换的影响可通过图1-14(d)~(f)说明。随着 D 的减少，弹状流与环状流，柱塞状流与弹状流之间的转换边界曲线向空气流量小的方向移动(前者移动幅度较小)，在 $D = 0.129 \text{ m}$ 时，在实验气、水流量范围内，柱塞状流不再出现；波状流与环状流或弹状流之间的钟形转换边界曲线向水流量较小的方向略有缩小。随着 D 的减小，在同样气流量下向分散泡状流转换的水流量增加，转换边界曲线在流型图上的斜率也有增加的趋势。

4. 螺旋管中两相流流型转换准则关系式

根据前述的(1.1)、(1.2)、(1.3)式，对实验数据进行分析 and 归纳，得出以下具体函数关系式：