

“十五”国家重点图书

西安交通大学学术专著出版基金资助

# 两相流与传热研究

陈听宽 著



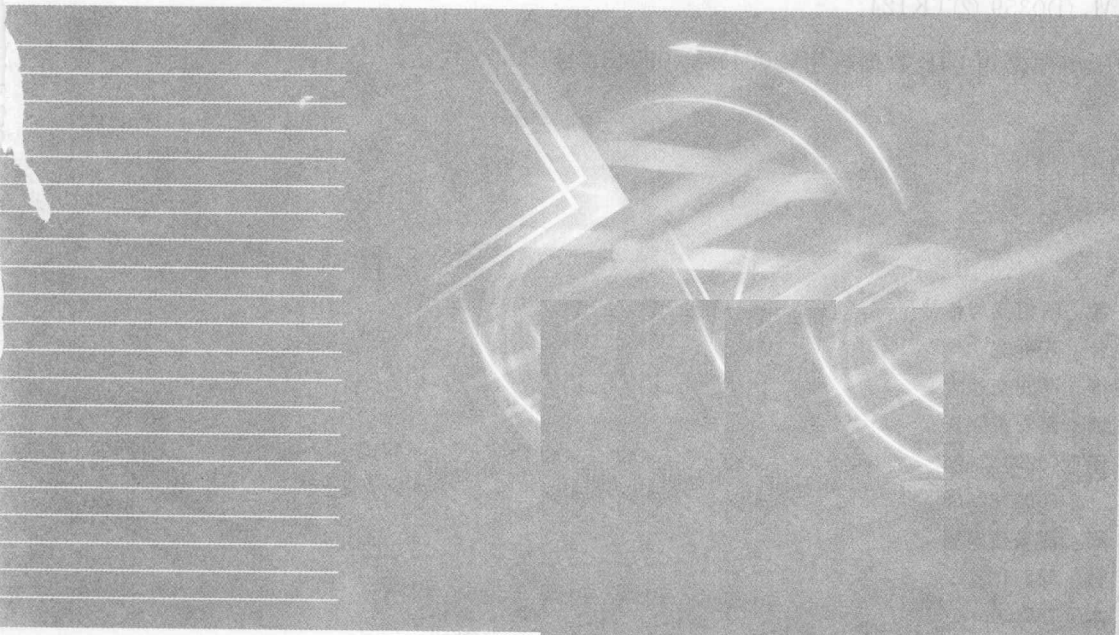
西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

“十五”国家重点图书

西安交通大学学术专著出版基金资助

# 两相流与传热研究

陈听宽 著



TK120  
ch3



西安交通大学出版社

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书系统地阐述了作者及其研究集体在两相流与传热学科所进行的研究工作。其内容包括两相临界流、两相流不稳定性、受热沸腾管传热恶化、相变传热及传热强化、反应堆失水事故冷凝回流、热冲击瞬态传热、油水气两相及多相流、两相流测量等。研究工作的重点针对超临界锅炉传热与水动力、核电站安全的热工与水力、石化系统换热设备传热强化及油气生产与输运中的两相与多相流。书中阐明的研究成果对上述领域的设计与运行有重要的应用价值,对其他相关领域也有重要的参考作用。本书可供从事两相流与传热的工程技术人员、科学研究人员和高校相关专业的师生及研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

两相流与传热研究/陈听宽著. —西安:西安交通大学出版社,2004.12  
ISBN 7-5605-1892-3

I. 两... II. 陈... III. ①二相流动-研究②传热-研究 VI. ①O359 ②TK124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 085432 号

书 名 两相流与传热研究  
著 者 陈听宽  
出版发行 西安交通大学出版社  
地 址 西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)  
电 话 (029)82668315 82669096(总编办)  
(029)82668357 82667874(发行部)  
印 刷 西安建筑科技大学印刷厂  
字 数 585 千字  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
彩 页 1  
印 张 24.5  
版 次 2004 年 12 月第 1 版 2004 年 12 月第 1 次印刷  
书 号 ISBN 7-5605-1892-3/TK·88  
定 价 38.00 元(精装本定价:48.00 元)

---

版权所有 侵权必究



## 作者简介

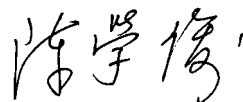
**陈听宽**，西安交通大学教授，博士生导师。1935年1月出生于江苏省常州市，1956年交通大学动力机械系本科毕业，1960年西安交通大学研究生毕业，留校任教至今。曾任西安交通大学锅炉教研室主任、多相流与传热研究室主任、动力工程多相流国家重点实验室主任等职。并曾兼任教育部科技委热能机电仪学部委员、国家自然科学基金委能源利用与工程热物理学科组成员、全国锅炉专业教材编审委员会委员、中国动力工程学会理事、中国工程热物理学会能源分会委员及多相流专业委员会秘书长、西安能源研究会副理事长、工程热物理学报编委等职务。长期从事两相流与传热、电站锅炉锅内过程、核电站安全传热、换热器传热强化及节能技术等方面的研究，至今已完成重要研究课题80余项，获国家科技进步二等奖和三等奖1项，获国家自然科学基金三等奖各1项，获省、部级科技成果奖15项，出版“锅炉原理”、“新能源发电”、“节能原理与技术”、“工业锅炉”等著作12部，发表学术论文350余篇，1988年获国家有突出贡献中青年专家称号，1992年获陕西省科技精英称号，1993年获陕西省优秀教师称号，1991年起享受国务院政府特殊津贴。



# 序

两相流与传热是在流体力学与传热学基础上发展形成的新的学科分支。近 30 年来,随着大型火电、核电、石油化工及油气开采等工业的发展,两相流与传热研究在国际上得到了迅速地发展。我校从 20 世纪 80 年代起,在两相流与传热方面开展了大量地研究工作,建设了高温高压两相流与传热试验系统等试验设备,引进了一批先进的测试仪器,取得了显著的研究成果。1989 年经国家计委批准建成动力工程多相流国家重点实验室,使我校在两相流与传热的研究方面取得了长足的进步,为我国大型电站锅炉的传热与水动力、核电站安全传热、石油化工换热器传热强化以及油气开采与输运中的两相与多相流等方面的发展做出了重要贡献。实验室在 2003 年的评估中被评为优秀国家重点实验室。目前我国正在发展百万千瓦级超临界和超超临界大型火电机组、百万千瓦级先进压水堆大型核电机组、大型炼油与石化设备、大型陆上和海上油田以及航天与电子工业技术,在两相流与传热方面有许多新的课题等待研究,两相流与传热学科的发展将对我国国民经济的发展起到十分重要的作用。

陈听宽教授长期从事两相流与传热方面的研究工作,取得了显著的科研成果,曾获国家科技进步二等奖和三等奖各 1 项,获国家自然科学基金三等奖 1 项,获省、部级科研成果奖 15 项,被评为国家有突出贡献的中青年专家,陕西省优秀教师等。陈听宽教授将其科研成果进行系统的总结并予以正式出版,内容包括两相临界流、两相流不稳定性、受热沸腾管传热恶化、相变传热及传热强化、反应堆失水事故冷凝回流、热冲击瞬态传热、油水气两相与多相流、两相流测量等。这些内容在两相流与传热学科中十分重要,在国民经济中有十分重要的应用价值。这一著作的出版,将为两相流与传热学科的发展及有关工业部门提供有益的设计数据和理论基础。为此,在本书出版之际,我很高兴为之作序,并将其推荐给从事两相流与传热方面工作的高等学校教师和学生及广大工程技术人员和研究人员。



西安交通大学教授,中国科学院院士

2004 年 10 月 1 日

# 前 言

两相流与传热学在国民经济中已有广泛的应用,特别是在电站锅炉、核电站安全、石化换热设备、油气生产与输运等方面有着重要的作用。近 20 年来,作者及其研究集体和历届研究生一起,在两相流与传热方面进行了大量地研究工作,共承担科研项目 80 余项,取得了一批科研成果,其中:“高压汽水两相流与传热试验研究”获 1991 年国家科技进步二等奖;“管内汽液两相流与沸腾传热研究”获 1987 年国家自然科学三等奖;“超临界锅炉关键技术的研究”获 1996 年国家科技进步三等奖。共有 15 个项目获省、部级科技成果奖。至今在国内、外已发表研究论文 350 余篇,培养博士 19 名、硕士 47 名,在读博士生 12 名,硕士生 6 名。在研究过程中,建设了试验压力达 40 MPa 的高温高压汽水两相流与传热试验系统、大流量水力试验台、油水气两相与多相流及传热试验系统、大型传热风洞等试验设备,能模拟大型电站锅炉、核电站安全、石化换热设备、油气生产与输运等实际工作条件进行试验研究,并通过试验研究开发了一批计算软件,为国民经济的发展做出了显著的成绩。

本书以这些研究工作为基础,系统地阐述了作者及其研究集体 20 余年来在两相流与传热研究方面所取得的成果,其内容包括两相临界流、两相流不稳定性、受热沸腾管传热恶化、相变传热及传热强化、反应堆失水事故冷凝回流、热冲击瞬态传热、油水气两相及多相流、两相流测量等。这些研究工作紧密结合我国国民经济的发展,着重于超临界电站锅炉的传热与水动力;核电站小破口失水事故中的临界流与冷凝回流;高温气冷堆蒸汽发生器的传热与两相流不稳定;核电站安全注水过程中的瞬态传热;石化加氢换热器、再沸器、冷凝器等的传热与传热强化;油气生产与输运中的两相及多相流等。书中紧密结合这些工业的发展阐述研究工作所取得的成果,并结合这些研究成果阐述相应的基本理论,尽量做到理论与实际相结合,既在理论上有所发展,又有重要的实用价值,使本书不仅对上述各部门有重要的参考价值,而且对其他相关领域也有重要的参考作用。

在研究工作中,我们得到了原国家计委、教育部、科技部、国家自然科学基金委、原机械部、核工业总公司、石化总公司、国家核安全局、上海市重点办、华东电力公司、陕西电力公司等部门的大力支持,并与上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂、四川东方锅炉厂、西安热工研究院、中国核动力研究设计院、清华大学核能技术设计研究院、武汉核动力运行研究所、北京核安全中心、洛阳石化工程公司、南京金陵石化公司化肥厂、航天六院第 11 研究所、河南油田设计院、大庆油田设计院、广州黄埔发电厂、陕西蒲城发电厂等许多单位进行了科研合作,并得到了他们的大力支持与帮助,有不少同志参加了我们的试验研究工作。在此,特向所有关心、支持和帮助过我们的单位和同志表示衷心的感谢,并希望在今后的工作中继续得到他们的支持与帮助,为我国两相流与传热学科及国民经济的发展做出更大的贡献。

在本书即将完稿之际,作者特别感谢作者的导师陈学俊院士长期的关心、支持与指导;感谢课题组同志及历届研究生的合作与配合;感谢学校有关部门的支持与帮助;感谢动力工程多相流国家重点实验室及能源与动力工程学院的领导与支持;感谢兄弟教研室的协助与配合;感

谢西安交通大学学术专著出版基金的资助;感谢西安交通大学出版社对本书出版的支持。在本书编写过程中,作者一直得到罗毓珊研究员、王海军博士及部分研究生的协助与支持,作者表示诚挚的感谢。

由于本书涉及的领域较广,作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者不吝指正。

陈听宽

于西安交通大学 2004年9月

# 主要符号表

主要符号	名称	单位
符号		
$A$	面积	$m^2$
$a$	面积	$m^2$
$a$	声速	$m \cdot s^{-1}$
$C$	系数	--
$C$	常数	--
$c_p$	定压比热容	$kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$D$	直径	$m$
$d$	直径	$m$
$d$	密度比(比重)	--
$F$	两相对流强化因子	--
$f$	摩擦阻力系数	--
$G$	质量流速	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$H$	高度	$m$
$h$	高度	$m$
$h$	焓	$kJ \cdot kg^{-1}$
$h$	换热系数	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$h_{gl}$	汽化潜热	$kJ \cdot kg^{-1}$
$K$	传热系数	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$K$	稠度系数	--
$k$	紊动能	$m^{-2} \cdot s^{-2}$
$k$	粗糙度	$mm$
$L$	长度	$m$
$l$	长度	$m$
$M$	分子量	$kg \cdot mol^{-1}$
$m$	质量	$kg$
$m$	混合函数	--
$N$	热不平衡数	--
$N$	汽核密度	--
$n$	折射率	--
$p$	压力	$Pa$
$Q$	容积流量	$m^3 \cdot h^{-1}$



符号	名称	单位
$Q$	载热量	W
$q$	热流密度(热负荷)	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$
$q_m$	质量流量	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$R$	半径	m
$r$	半径	m
$S$	核态沸腾抑制因子	--
$s$	熵	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
$s$	滑动比	--
$T$	热力学温度	K
$t$	摄氏温度	$^{\circ}\text{C}$
$t$	时间	s
$u$	流速	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
$V$	体积	$\text{m}^3$
$v$	比体积	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
$X_{11}$	Martinelli 参数	--
$x$	质量含气率(干度)	--
$Bo$	沸腾准则数	--
$Co$	冷凝准则数	--
$Fr$	弗劳德数	--
$Nu$	努塞尔数	--
$Pr$	普朗特数	--
$Re$	雷诺数	--
$Ta$	Taylor 数	--
$\alpha$	倾角	--
$\alpha$	空泡份额(截面含汽率)	--
$\alpha$	流量系数	--
$\beta$	倾角	--
$\beta$	容积流量含气(汽)率	--
$\Gamma$	蒸发(冷凝)速率	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
$\Delta$	差值	--
$\delta$	厚度	mm
$\epsilon$	耗散率	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
$\epsilon_w$	油水混合物含水率	--
$\eta$	临界流压力比	--
$\theta$	角度	--
$\theta$	无因次温度	--
$\lambda_f$	摩擦阻力系数	--
$\lambda$	导热系数	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

符号	名称	单位
$\mu$	动力粘度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
$\nu$	运动粘度	$\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
$\rho$	密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
$\sigma$	表面张力	$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$
$\tau$	切应力	$\text{Pa}$
$\Phi$	两相流压降倍率	--
$\varphi$	角度	--

**主要角标**

符号	名称	单位
a	加速;环状流;环腔;空气	--
av	平均	--
B	沸腾	--
b	气泡;泡状流;背压;主流体	--
c	临界;对流;连续相	--
cr	临界	--
d	排放	--
down	下降	--
e	出口;平衡;有效	--
f	摩擦;流体	--
g	重位;气体	--
h	加热	--
i	入口;内;安注;相界面	--
in	进口	--
l	液体;层流	--
m	金属;平均	--
nb	核沸腾	--
o	外;油;孔板	--
SP	单相	--
s	过冷;脉冲箱	--
sat	饱和	--
sub	过冷	--
sup	过热	--
t	总;喉口	--
TP	两相	--
tp	两相	--
up	上升	--
v	蒸汽;文丘利管	--
w	壁;水	--
0	入口;初始;总	--

# 目 录

序

前言

主要符号表

<b>第 1 章 两相临界流研究</b> .....	(1)
1.1 两相临界流试验研究 .....	(1)
1.1.1 两相临界流试验系统和方法 .....	(2)
1.1.2 锐边直管与孔板临界流试验结果与分析 .....	(3)
1.1.3 缩放喷嘴临界流试验结果与分析 .....	(8)
1.2 两相临界流的热力学非平衡两流体模型数值计算研究.....	(15)
1.2.1 非平衡两流体临界流数学模型.....	(16)
1.2.2 模型的数值求解.....	(21)
1.2.3 模型预测与试验结果的比较.....	(24)
1.3 汽液两相流中的声速研究.....	(27)
1.3.1 两流体数学模型.....	(27)
1.3.2 模型求解.....	(30)
1.3.3 计算结果与分析.....	(30)
1.4 水平管顶部破口临界流研究.....	(33)
1.4.1 水平管顶部破口液体起始夹带.....	(34)
1.4.2 水平管顶部破口入口蒸汽含汽率.....	(39)
1.5 穿透裂缝的泄漏率计算研究.....	(44)
1.5.1 核反应堆管道和压力容器的破前漏(LBB)分析简述.....	(44)
1.5.2 穿透裂缝泄漏率计算模型.....	(46)
1.5.3 穿透裂缝泄漏率计算程序.....	(54)
1.5.4 穿透裂缝泄漏率计算分析.....	(57)
参考文献 .....	(60)
<b>第 2 章 两相流不稳定性研究</b> .....	(63)
2.1 试验系统与方法.....	(64)
2.2 两相流不稳定性类型及特征.....	(65)
2.2.1 两相流多值性流量偏移.....	(65)
2.2.2 沸腾起始点脉动.....	(66)

2.2.3	压力降型脉动	(67)
2.2.4	密度波型脉动	(69)
2.2.5	热力型脉动	(70)
2.2.6	并联管管间脉动	(71)
2.3	两相流不稳定性试验结果与分析	(72)
2.3.1	600 MW 超临界压力锅炉水冷壁水动力不稳定性研究	(72)
2.3.2	高温气冷堆蒸汽发生器两相流不稳定性研究	(76)
2.3.3	并联管两相流不稳定性研究	(77)
2.4	压力降脉动数值模拟	(80)
2.4.1	理论模型	(80)
2.4.2	计算结果及讨论	(82)
2.5	并联管管间脉动预报模型	(85)
2.5.1	控制方程	(86)
2.5.2	控制方程的求解	(89)
2.5.3	并联管特征方程	(92)
2.5.4	系统稳定性的判别方法	(94)
2.5.5	计算程序简介	(95)
2.5.6	计算结果及讨论	(95)
	参考文献	(100)

<b>第3章</b>	<b>受热沸腾管传热恶化研究</b>	(102)
3.1	超临界锅炉螺旋管圈水冷壁沸腾传热恶化研究	(102)
3.1.1	前言	(102)
3.1.2	试验系统与方法	(103)
3.1.3	内壁温度和内壁热负荷的计算	(104)
3.1.4	亚临界压力传热特性试验结果与分析	(107)
3.1.5	超临界压力传热特性试验结果与分析	(110)
3.2	超临界锅炉垂直内螺纹管沸腾传热恶化研究	(113)
3.2.1	前言	(113)
3.2.2	试验装置与方法	(114)
3.2.3	内壁温度和内壁热负荷的计算	(115)
3.2.4	全周加热试验结果与分析	(118)
3.2.5	半周加热试验结果与分析	(120)
3.2.6	内螺纹管摩擦压降试验结果	(121)
3.3	高温气冷堆蒸汽发生器螺旋管圈沸腾传热恶化研究	(122)
3.3.1	前言	(122)
3.3.2	试验系统与方法	(122)
3.3.3	试验结果与分析	(123)
3.3.4	10 MW 高温气冷试验堆小盘管蒸汽发生器传热恶化研究	(126)

3.4	垂直 U 型管沸腾传热恶化研究	(127)
3.4.1	试验系统与amp;方法	(128)
3.4.2	试验结果与分析	(128)
3.5	水平放置 U 型管及 V 型管沸腾传热恶化研究	(134)
3.5.1	试验系统与amp;方法	(134)
3.5.2	试验结果与分析	(135)
	参考文献	(141)
<b>第 4 章</b>	<b>相变传热及传热强化研究</b>	<b>(142)</b>
4.1	载气煤油的沸腾与amp;冷凝传热研究	(142)
4.1.1	煤油及煤油蒸汽的物性	(142)
4.1.2	水平管管内载气煤油无相变换热与amp;压降特性的研究	(146)
4.1.3	载气煤油沸腾换热研究	(151)
4.1.4	载气煤油在水平管管内的amp;冷凝换热研究	(156)
4.1.5	载气煤油在水平管管束外的amp;冷凝换热研究	(161)
4.2	沸腾传热强化研究	(165)
4.2.1	内螺纹管管内沸腾强化传热研究	(165)
4.2.2	波纹管管内沸腾强化传热研究	(170)
4.2.3	微槽管管内沸腾强化传热研究	(175)
4.2.4	多孔表面管管内沸腾强化传热研究	(178)
4.2.5	多孔表面管管外池沸腾强化传热研究	(180)
4.2.6	高热流条件下超临界压力煤油传热特性研究	(181)
4.3	冷凝传热强化研究	(185)
4.3.1	垂直 V 型纵槽管管外冷凝传热强化研究	(185)
4.3.2	水平螺旋管管外 V 型槽管冷凝传热强化研究	(186)
4.3.3	波纹管管外冷凝传热强化研究	(188)
4.3.4	内绕丝管水平管管内冷凝传热强化研究	(192)
	参考文献	(193)
<b>第 5 章</b>	<b>反应堆失水事故冷凝回流研究</b>	<b>(195)</b>
5.1	冷凝回流概述	(195)
5.2	试验系统和amp;方法	(197)
5.3	冷凝回流流动特性的研究	(204)
5.3.1	U 型管管内冷凝回流流动极限的研究	(204)
5.3.2	水平热管段逆流流动极限	(205)
5.3.3	冷凝回流流动结构研究	(205)
5.4	冷凝回流传热研究	(207)
5.4.1	稳态冷凝回流传热的数值模拟	(208)
5.4.2	冷凝回流传热时的夹带影响	(212)

5.4.3	不凝结气对传热的影响 .....	(214)
	参考文献 .....	(215)
<b>第6章</b>	<b>热冲击瞬态传热研究 .....</b>	<b>(216)</b>
6.1	反应堆压力容器安注热冲击瞬态传热研究 .....	(216)
6.1.1	流动可视化试验研究 .....	(216)
6.1.2	安注射流传热特性试验研究 .....	(222)
6.1.3	安注射流混合特性试验研究 .....	(232)
6.1.4	高温高压瞬态传热特性试验研究 .....	(240)
6.1.5	安注过程三维数值模拟研究 .....	(253)
6.2	反应堆主管道上充管横向射流瞬态传热研究 .....	(264)
6.2.1	流动可视化试验研究 .....	(264)
6.2.2	上充管横向射流传热特性试验研究 .....	(271)
6.2.3	带热套管横向射流传热特性试验研究 .....	(280)
6.2.4	上充管横向射流数值模拟研究 .....	(286)
6.2.5	带热套管横向射流数值模拟研究 .....	(289)
6.3	稳压器波动接管瞬态传热研究 .....	(293)
6.3.1	流动可视化研究 .....	(293)
6.3.2	传热特性试验研究 .....	(297)
	参考文献 .....	(306)
<b>第7章</b>	<b>油水气两相及多相流研究 .....</b>	<b>(308)</b>
7.1	试验系统和试验方法 .....	(308)
7.2	圆管内油水乳状液流动特性的研究 .....	(311)
7.2.1	油水乳状液基本概念 .....	(311)
7.2.2	油水乳状液流变特性 .....	(311)
7.2.3	油水乳状液粘度计算 .....	(315)
7.2.4	油水乳状液相转变条件 .....	(317)
7.2.5	油水乳状液摩擦压降研究 .....	(318)
7.3	圆管内空气-油水乳状液流型转变研究 .....	(321)
7.3.1	水平管内空气-油水乳状液流型转变研究 .....	(321)
7.3.2	垂直上升管内空气-油水乳状液流型转变研究 .....	(325)
7.3.3	垂直下降管内空气-油水乳状液流型转变研究 .....	(327)
7.4	圆管内空气-油水乳状液摩擦压降研究 .....	(330)
7.4.1	水平管内空气-油水乳状液摩擦压降研究 .....	(330)
7.4.2	垂直上升管内空气-油水乳状液摩擦压降研究 .....	(333)
7.4.3	垂直下降管内空气-油水乳状液摩擦压降研究 .....	(336)
7.5	圆管内空气-油水乳状液截面含气率研究 .....	(338)
7.5.1	垂直上升管内空气-油水乳状液截面含气率研究 .....	(339)



7.5.2	垂直下降管内空气-油水乳状液截面含气率研究	(340)
7.6	环空管内流动特性的研究	(343)
7.6.1	环空管内单相流体摩擦压降研究	(344)
7.6.2	环空管内油水乳状液流动特性研究	(345)
7.6.3	垂直上升环空管内气液两相流流动特性的研究	(346)
7.7	内管旋转环空管内流动特性的研究	(346)
7.7.1	内管旋转环空管内单相流体流动特性的研究	(347)
7.7.2	内管旋转环空管内油水乳状液流动特性的研究	(349)
7.7.3	内管旋转垂直上升环空管内气液两相流流动特性的研究	(352)
	参考文献	(353)
<b>第8章</b>	<b>两相流测量研究</b>	<b>(355)</b>
8.1	高压湿蒸汽两相流流量测量研究	(355)
8.1.1	汽液两相流流经节流元件理论分析	(355)
8.1.2	试验研究与分析	(358)
8.1.3	高压湿蒸汽两相流载热量测量	(359)
8.1.4	湿蒸汽两相流热量计的应用	(361)
8.1.5	稠油热采系统注汽参数测量的建议	(362)
8.2	光纤探针测量汽水两相流截面含汽率的研究	(364)
8.2.1	光纤探针测量原理	(364)
8.2.2	试验段结构与参数	(365)
8.2.3	快关阀门法测量原理	(365)
8.2.4	原始模拟信号波型及阈值的选取	(366)
8.2.5	截面含汽率的分布和平均截面含汽率的计算	(368)
8.3	油井产出物在线不分离测量技术的研究	(370)
8.3.1	气体-油水乳状液截面含气率测量	(371)
8.3.2	气体-油水乳状液流量测量	(372)
	参考文献	(372)
<b>第9章</b>	<b>两相流与传热研究展望</b>	<b>(373)</b>
	参考文献	(375)

# 第 1 章

## 两相临界流研究

### 1.1 两相临界流试验研究

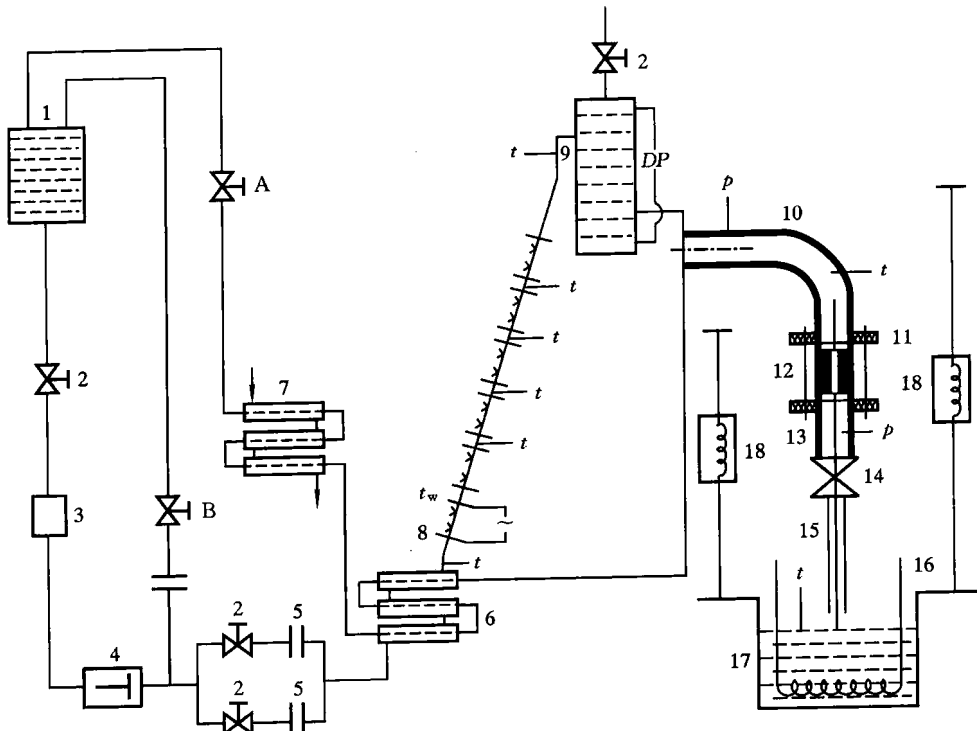
核电站反应堆压力容器或管道发生破裂时,回路中的循环水从破口向外喷射,高温高压水在很大的压力差作用下发生闪蒸,形成汽水混合物,并很快达到喷射最大流量,此时下游压力变化时,流量不受影响,称为临界流。对于单相流体,临界流的研究已十分清楚,通常发生在最小截面处的流速达到声速即马赫数为 1,此处流量达到最大值。对于两相流动,由于两相之间存在着质量、动量与能量的交换,以及动力学和热力学的不平衡,即速度滑移和温差,而两相之间的界面又十分复杂,因而使两相临界流的研究十分困难,至今尚不很完善。

小破口失水事故是发生几率比较高的反应堆事故之一。失水事故时的两相临界流对反应堆安全有重要意义。这是因为破口的临界流量决定了堆芯冷却剂的丧失速度和一回路系统的泄压速度,它的大小不仅直接影响到堆芯的冷却能力,而且还决定各种安全和应急系统的动作时间。反应堆失水事故的安全研究大大推动了两相临界流研究的发展。从 20 世纪 60 年代以来,已经进行了大量研究,文献[1]对已有研究工作进行了评述。在试验研究工作的基础上,形成了反应堆安全瞬态分析程序,如 RELAP, RETRAN 等。但有关临界流量的预测与一些大型台架的瞬态实验数据之间尚存在差距,影响分析程序的预报精度。同时两相临界流现象在电站锅炉、石油、化工等系统中同样广泛存在,因而对两相临界流进行更深入的研究具有重要的意义。

根据已有的研究成果,两相临界流除取决于上游流体的滞止参数外,还与破口的型式与尺寸有关,而现有程序对后者考虑尚不完善,同时已有的试验大多在低压下进行,因而不够充分。为此,我们在西安交通大学高压回路上对喷嘴、孔板、短管、长管等多种破口型式,进行了系统的试验研究。

## 两相临界流试验系统和方法

瞬态临界流试验在西安交通大学高压汽水两相流试验台上进行。该试验主要研究强制循环回路发生破口后的瞬态特性及通过破口排放的临界流特性。试验系统如图 1-1 所示。去离子水经高压柱塞泵升压后分成两路，一路作为旁路起调节流量的作用；另一路为主回路，首先经流量测量孔板，然后依次通过再生式换热器和内径为 16 mm 的电加热管，加热到设定参数后进入压力容器，其容积为 0.125 m<sup>3</sup>，再由压力容器通过再生式换热器和冷却器回到水箱，形成一循环回路。为了进行临界流试验，在压力容器和再生式换热器的连接管上接入一模拟热端破口的试验段，包括连接管、破口段、高温高压球阀和排放管。试验时，当压力容器内流体的压力和温度及回路的流量达到要求时，快速开启高温高压球阀，该阀从全关到全开状态所需时间小于 0.5 s。从破口排放的汽水混合物被集水箱收集。水箱由两支弹性膜片质量应变仪悬吊在支架上，通过这两支质量应变仪，可以获得水箱质量随时间的变化曲线，通过对质量-时间曲线的微分处理，可得到通过破口的临界流质量流量。压力的测量误差为 ±0.05 MPa，温度的测量误差为 ±1℃，流量的测量误差为 ±0.98%。



1—水箱；2—调节阀；3—过滤器；4—高压柱塞泵；5—流量测量孔板；6—再生式换热器；  
7—冷却器；8—电加热电极板；9—压力容器；10—破口上游接管；11—法兰；12—破口段；  
13—破口下游接管；14—球阀；15—排放管；16—铜管冷却器；17—集水箱；18—质量应变仪；  
 $p$ —压力测点； $DP$ —差压； $t$ —流体温度测点； $t_w$ —壁温测点；A, B—调节阀

图 1-1 临界流试验系统