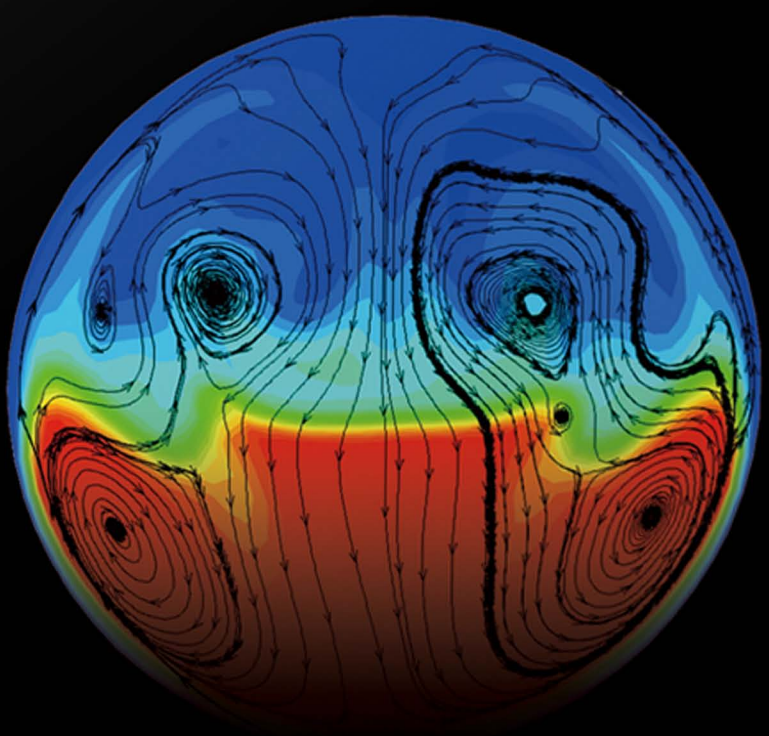
深低温过程中的两相流动与传热

Flow and Heat Transfer in Cryogenic Two-Phase Flow

陈建业◎著



華中科技大學出版社
http://www.hustp.com

深低温过程中的两相流动与传热

陈建业　著

华中科技大学出版社

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

深低温过程中的两相流动与传热/陈建业著. —武汉:华中科技大学出版社,2021.9
ISBN 978-7-5680-7548-0

Ⅰ. ①深… Ⅱ. ①陈… Ⅲ. ①工程热物理学—研究 Ⅳ. ①TK121

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 191459 号

华中科技大学出版社

深低温过程中的两相流动与传热 陈建业 著

Shen Diwen Guocheng zhong de Liangxiang Liudong yu Chuanre

策划编辑:金 紫 杜 雄
责任编辑:叶向荣
责任校对:曾 婷
封面设计:原色设计
责任监印:朱 玢
出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913
武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223
录 排:华中科技大学惠友文印中心
印 刷:湖北新华印务有限公司
开 本:787mm×1092mm 1/16
印 张:11 插页:10
字 数:254 千字
版 次:2021 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
定 价:78.00 元

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前　言

Preface

深低温流体的两相流动广泛发生于航天技术、大科学装置、超导和氢能利用等快速发展领域，而深低温两相流动会影响传热效率，并造成流动和传热的不稳定，如超导系统的冷却过程、因为漏热导致的失超过程、低温液体火箭发动机燃烧室内喷雾燃烧过程等。因此，深刻理解深低温两相流动与传热问题对于保障低温流体输送、贮存和利用有着至关重要的作用。然而，两相流动与传热本身是工程热物理领域极具挑战性的研究课题之一，低温流体的特殊性使得深低温两相流动与传热问题更加复杂。流动过程体现出跨尺度特性，传热过程的温差巨大，而流动与传热过程往往耦合。

基于上述的认识，本书通过分析和研究低温系统中广泛发生的四个典型两相流现象，去揭示深低温两相流动与传热的特性；通过对低温管路预冷过程中的单管和管路系统的两相流的探讨，分析其中剧烈的流态和传热变化过程，以期对低温系统预冷提供些许指导；通过对低温液击现象的阐述和分析，描述低温系统中液击的成因、发展及其对系统的影响，并简要分析了低温系统中抑制液击的方法；归纳和总结了低温射流雾化现象在理论和实验方面的研究进展，可为低温推进剂等的射流雾化的研究提供借鉴；分析和探讨了低温罐内两相晃动的流动与蒸发，并以 T 型防波板为例，从两相流动和受力角度，简要分析了防波板对抑制晃动的作用。

本书的特点在于书中所选取的典型两相流现象具有典型性，所涉及的研究成果均来自研究者和课题组成员的科研实践。作者在此真诚感谢课题组成员的付出。感谢华中科技大学谢军龙研究员，正是谢老师的敦促和引导，才促使作者下决心完成此书。感谢课题组的学生们：曾锐锐的课题与推进剂管路预冷相关；鲍松龄、禹云星和丁月的课题与

华中科技大学出版社

液氮雾化相关;王柳和李鑫坤的课题为液击相关内容的完成提供了支撑;黄清妙和张瀚月对低温罐的晃动等相关内容的研究有着较大的贡献。感谢课题组的所有成员,原谅作者不能在此一一致谢。感谢华中科技大学出版社杜雄等编辑的辛勤工作,最终使本书得以出版。

限于作者的学识水平和能力,关于深低温两相流动与传热这一复杂而又极具挑战的课题,本书肯定存在不足之处,恳请读者和专家学者不吝赐教,批评指正。

谨以此书献给我的母校——华中科技大学。

陈建业

2021 年 6 月于西四楼

华中科技大学出版社

目　录

Contents

第 1 章　低温两相流基础理论 …… 1
1.1　气液两相流及基本方程 …… 2
1.2　两相流流型 …… 5
1.3　两相流压降 …… 8
1.4　低温两相流流动不稳定性 …… 13
本章参考文献 …… 17
第 2 章　低温管路中的预冷 …… 21
2.1　低温管路预冷过程 …… 22
2.2　单管预冷过程流动与传热特性 …… 30
2.3　管路系统预冷沸腾模型 …… 46
2.4　管路系统预冷过程影响因素分析 …… 52
本章参考文献 …… 61
第 3 章　低温流体液击现象研究 …… 65
3.1　液击及液击现象的成因 …… 66
3.2　液击理论研究 …… 69
3.3　液击理论计算模型及其改进 …… 72
3.4　液击现象的影响因素研究 …… 75
3.5　基于 AMESim 的低温流体管路液击仿真计算 …… 81
3.6　低温流体供给系统液击现象抑制研究 …… 86
本章参考文献 …… 93
第 4 章　深低温流动中的射流雾化 …… 97
4.1　射流雾化现象 …… 98
4.2　射流雾化理论模型 …… 109
4.3　低温射流雾化实验 …… 119
本章参考文献 …… 128
第 5 章　低温流体晃动过程的两相流动与传热 …… 133
5.1　低温流体晃动 …… 134
5.2　晃动过程守恒方程 …… 136
5.3　低温流体晃动过程流态分析 …… 137
5.4　低温流体防晃过程研究 …… 141

华中科技大学出版社

5.5 低温流体晃动罐受力研究…… 149
5.6 低温流体晃动过程蒸发率研究…… 158
本章参考文献 …… 168
彩色插图 …… 171

华中科技大学出版社

第 1 章　低温两相流基础理论

华中科技大学出版社

1.1 气液两相流及基本方程

1.1.1 气液两相流基本概念

两相流是指固体、液体、气体三相中的任何两相组合在一起，具有相间界面的流动体系。两相流可以由气体-液体、液体-固体或固体-气体组合构成，是自然界和工业应用中一种常见的流体流动现象。例如，液体沸腾、蒸气冷凝、血液流动及石油输送等，都是一些普通的两相或多相流动体系[1]。

两相流介质的分布状况，即流型，极大地影响着两相流流动过程中的流动压降以及传热等特性。自 18 世纪瓦特发明蒸汽机以来，由于缺乏气液两相流和传热的知识，发生过不少事故。近几十年来，传统工业和新兴工业，如化学工程、冶金工程、核工程、航空与航天工程等迅速发展，促进了气液两相流的研究和应用。

1.1.2 气液两相流基础方程

1. 均相流模型

均相流模型是一种简单的模型分析方法，其基本思路是将气液两相视为可以任意相互穿插的两相混合物，定义两相混合物的平均值，并认为两相流具有平均特性。因此，两相流可视为遵守单相流基本方程的均匀介质。在没有相对运动的情况下，无黏均匀流动的控制质量和动量守恒方程可简化为单相形式。

连续性方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{m}})+\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}})=0 \tag{1-1}$$

其中，$\vec{v}_{\mathrm{m}}$是质量平均速度，ρ_{m}是混合密度。

$$\vec{v}_{\mathrm{m}}=\frac{\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\vec{v}_k}{\rho_{\mathrm{m}}} \tag{1-2}$$

$$\rho_{\mathrm{m}}=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k \tag{1-3}$$

其中，α_k 是第 k 相的体积分数。

混合相的动量方程可以通过将各相的动量方程相加得到，可以表示为：

华中科技大学出版社

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}})+\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}}\vec{v}_{\mathrm{m}})=-\nabla p+\nabla\cdot[\mu_{\mathrm{m}}(\nabla\vec{v}_{\mathrm{m}}+\nabla\vec{v}_{\mathrm{m}}^{\mathrm{T}})]+\rho_{\mathrm{m}}\vec{g}+\vec{F}-\nabla\cdot\left(\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\rho_k\vec{v}_{\mathrm{dr},k}\vec{v}_{\mathrm{dr},k}\right) \tag{1-4}$$

其中，n 为相数，$\vec{F}$ 为体力，μ_{m} 为混合物黏度：

$$\mu_{\mathrm{m}}=\sum_{k=1}^{n}\alpha_k\mu_k \tag{1-5}$$

其中，$\vec{v}_{\mathrm{dr},k}$ 为第二相的漂移速度：

$$\vec{v}_{\mathrm{dr},k}=\vec{v}_k-\vec{v}_{\mathrm{m}} \tag{1-6}$$

能量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}\sum_k(\alpha_k\rho_k E_k)+\nabla\cdot\sum_k[\alpha_k\vec{v}_k(\rho_k E_k+p)]=\nabla\cdot\left(k_{\mathrm{eff}}\nabla T-\sum_k\sum_j h_{jk}\vec{j}_{jk}+(\bar{\tau}_{\mathrm{eff}}\cdot\vec{v})\right)+S_h \tag{1-7}$$

其中，k_{eff} 是有效导热系数：

$$k_{\mathrm{eff}}=\sum\alpha_k(k_k+k_t) \tag{1-8}$$

2. 分相流模型

分相流模型是把两相流看成分开的两股流体流动，把气液两相分别按单相流进行建模，随后通过相间作用相互耦合，最终可将各相的方程合并起来。

分相流模型中气液两相各自拥有一套方程，以第 q 相为例，连续性方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q)+\nabla\cdot(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)=\sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pq}-\dot{m}_{qp})+S_q \tag{1-9}$$

其中，$\vec{v}_q$ 是第 q 相的速度，$\dot{m}_{pq}$、$\dot{m}_{qp}$ 分别表征了第 p 相向第 q 相的传质、第 q 相向第 p 相的传质，S_q 为质量源项。

第 q 相动量方程为：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q)+\nabla\cdot(\alpha_q\rho_q\vec{v}_q\vec{v}_q)=-\alpha_q\nabla p+\nabla\cdot\bar{\bar{\tau}}_q+\alpha_q\rho_q\vec{g}+\sum_{p=1}^{n}(\vec{R}_{pq}+\dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq}-\dot{m}_{qp}\vec{v}_{qp})+(\vec{F}_q+\vec{F}_{\mathrm{lift},q}+\vec{F}_{\mathrm{wl},q}+\vec{F}_{\mathrm{vm},q}+\vec{F}_{\mathrm{td},q}) \tag{1-10}$$

其中，$\bar{\bar{\tau}}_q$ 是第 q 相的应力-应变张量，$\vec{F}_q$ 是外体积力，$\vec{F}_{\mathrm{lift},q}$ 是升力，$\vec{F}_{\mathrm{wl},q}$ 是壁面润滑力，$\vec{F}_{\mathrm{vm},q}$ 是虚拟质量力，$\vec{F}_{\mathrm{td},q}$ 是湍流扩散力，$\vec{R}_{pq}$ 是相间相互作用力。

$$\bar{\bar{\tau}}_q=\alpha_q\mu_q(\nabla\vec{v}_q+\nabla\vec{v}_q^{\mathrm{T}})+\alpha_q\left(\lambda_q-\frac{2}{3}\mu_q\right)\nabla\cdot\vec{v}_q\bar{\bar{I}} \tag{1-11}$$

第 q 相能量方程为：

华中科技大学出版社

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q h_q)+\nabla\cdot(\alpha_q \rho_q \vec{u}_q h_q)=\alpha_q \frac{\mathrm{d}p_q}{\mathrm{d}t}+\overline{\overline{\tau}}_q:\nabla\vec{u}_q-\nabla\cdot\vec{q}_q+S_q+\sum_{p=1}^{n}(Q_{pq}+\dot{m}_{pq}h_{pq}-\dot{m}_{qp}h_{qp})-\nabla\cdot\sum_j h_{j,q}\vec{J}_{j,q} \tag{1-12}$$

其中，h_q 是第 q 相的焓，$\vec{q}_q$ 是热通量，Q_{pq} 代表第 q 相和第 p 相之间的热交换，热交换必须满足局部热平衡条件，即 $Q_{pq}=-Q_{qp}$，h_{pq} 是相间焓。

1.1.3 深低温两相流特性

低温技术的逐渐发展，促使低温流体在航空航天、超导冷却、生物医疗方面的应用越来越广泛。低温流体的低沸点特性，以及低温液体系统始终存在的漏热情况，使低温气液两相流流动这一现象广泛存在于能源、空分、航空航天等领域中。

如表 1.1 所示，低温流体与室温流体相比，不仅沸点较低，而且还有以下几方面的特殊性。①在表面张力和黏度两方面，低温流体比室温流体小得多。根据相关研究，表面张力的增大有助于气液界面的稳定，由此造成低温两相流动界面稳定性更低。②低温流体在饱和状态下的气液相密度比室温流体小，较小的气液相密度意味着气体惯性力较小，于是对于相同流率的液体，较小的气相流率便可对其界面产生影响。对低温流体来说，气体流速对两相流流型的影响更明显，因而低温气液两相流流型变化会比常温流体更为复杂。

华中科技大学出版社

表 1.1 常压下饱和液氮物理性质与 R-11 制冷剂和水的比较

物理性质	液氮	R-11 制冷剂	水
饱和温度/K	77.35	296.85	373.12
表面张力/(mN/m)	8.8753	17.885	58.918
接触角/(°)	13	35	45
液相密度/(kg/m^3)	806.09	1479.3	958.37
气相密度/(kg/m^3)	4.611	5.8514	0.59752
液相动力黏度/(μPa·s)	160.47	403.65	281.84

在气液两相流流动中，两相介质都是流体，各自都有相应的流动参数。另外，由于两相介质之间的相互作用，还出现了一些相互关联的参数。然而，气液两相流流动系统属于一种随机的多变量非线性系统，其流动的复杂性和随机性等相关特性，增加了其参数的检测难度。探索实现两相流高效率、高精度检测的方法已成为现代工业国家的一个热点，属于国际上亟待解决的难题之一。

1.2　两相流流型

1.2.1　流型表征参数

气相介质含量是最常用的两相流流型表征参数。它表示两相流中气相所占的份额，它有质量含气率、热力学含气率、容积含气率以及截面含气率四种表示方法。截面含气率也称空泡率，是指两相流中某一截面上，气相所占截面面积与总流道截面面积之比。其表达式为：

$$\alpha = \frac{A''}{A} = \frac{A''}{A' + A''} \tag{1-13}$$

其中，A''、A' 分别为气相和液相所占的流道截面面积。多相流科学的理论和实验研究表明，气液两相在流动过程中，各种流型的发生和转变、流动压降、多相流量、流动不稳定的产生以及界面波的产生、成长等都与空泡率密切相关。

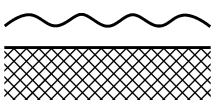
华中科技大学出版社

1.2.2　两相流流型分类

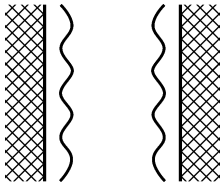
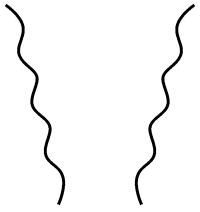
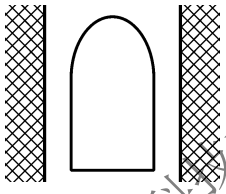
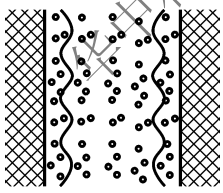
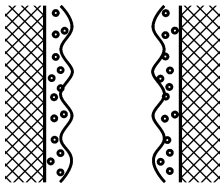
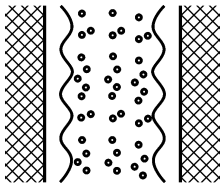
两相流流型（也称流态）以气液相界面的形态变化为特征指标。而流型与系统的压力、流量、含气率、壁面热流密度、通道的布置和几何形状以及流体流动方向等都有着密切的联系，因此，流型分类标准也较多。

（1）根据气液相界面的结构和尺度，气液两相流流型一般可分为分离流、混合流（也称过渡流）和离散流[2]。分离流指的是气液相界面基本处于分层流动状态，具有大尺度和相对完整的气液相界面。混合流从相界面尺度角度而言，是一种过渡流态，两相流系统中同时存在大尺度和小尺度的气液相界面。而离散流指的是气液相界面均为小尺度，存在大量液滴或气泡。表 1.2 为典型气液两相流流型。

表 1.2　典型气液两相流流型

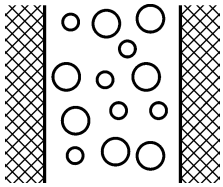
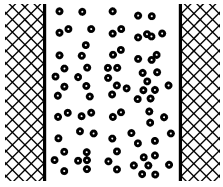
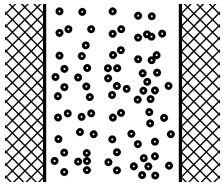
分类	典型流态	图示	特征	例子
分离流	分层流		气体中的液膜，液体中的气膜	膜态凝结，膜态沸腾

续表

分类	典型流态	图示	特征	例子
分离流	环状流		多存在于圆管内，环壁面出现	管内膜态沸腾
	射流		气相中出现液柱	射流雾化，喷射式冷凝器
混合流或过渡流	弹状流		液体出现气穴	强制对流中的钠沸腾
	搅混流		气核中带有液滴，液膜中带有气泡	核反应堆沸腾通道
	气泡环状流		中心为气核，液膜带有气泡	壁面成核的蒸发器
	液滴环状流		壁面形成液膜，气核中带有液滴	蒸气发生器

华中科技大学出版社

续表

分类	典型流态	图示	特征	例子
离散流	泡状流		液体中形成气泡	化学反应器
	滴状流		气体中含有液滴	喷雾冷却
	颗粒流		气体或液滴中含有固体颗粒	粉末运输

华中科技大学出版社

(2) 气液两相流在不同气液流量组合下表现出不同的流型。Baker[3] 给出了用于各种介质的水平管流型分布图，如图 1.1 所示。水平管内气液两相流主要包括六种：泡状流(bubbly flow)、分层流(stratified flow)、波状分层流(stratified-wave flow)、段塞流(plug flow)、弹状流(slug flow)和环状流(annular flow)，如图 1.2 所示。

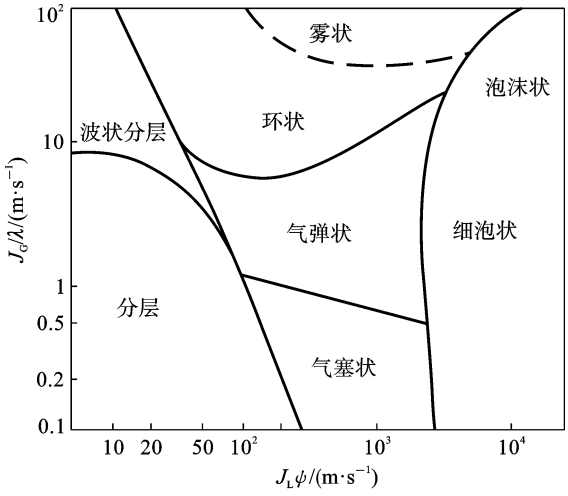


图 1.1　水平管流型分布图

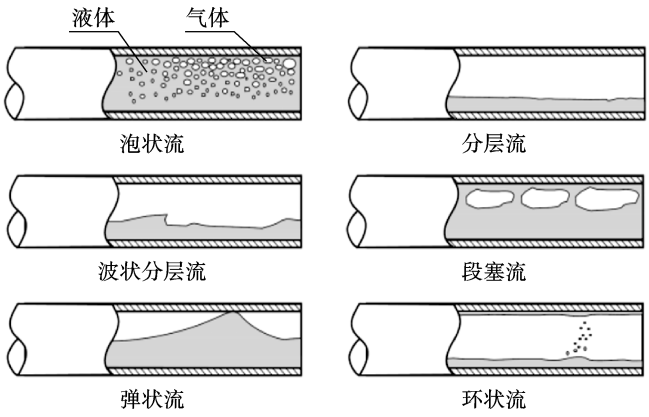


图 1.2　水平管内流型分类

然而，实际的两相流系统的流态远比上述分类复杂。例如，射流喷雾过程中，气液两相流态经历了从分层流到过渡流，最后到离散流的变化。

华中科技大学出版社

1.3　两相流压降

气液两相流的总压力降包含三个主要部分：重力压降（由于管道高程），管壁和气液界面的摩擦压降，加速度压降（由于两相混合物的比容的变化）。这三个部分对总压降的贡献取决于流动模式、流体性质、管道方向和管道直径。例如，在垂直向上的泡状流的情况下，与取决于管径的摩擦压降相比，流体静压降占主导地位，而对于环状流，摩擦压降在总压降中所占比重较大，重力压降可以忽略不计。单位管道长度的总两相压降为其三个分量之和。如上文所述，描述气液两相流通常使用均相和分相模型建模，下面简要介绍这些模型。

1.3.1　均相流压降计算方法

考虑均质流模型，采用均质两相混合物密度ρ_M计算重力两相压降，如式(1-14)所示。两相混合物密度可以用两相流动质量 x 或气体体积流动分数 λ 表示，如式(1-15)所示。

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_h = \rho_M g \sin\theta \tag{1-14}$$

$$\rho_M = \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1} = \lambda\rho_G + (1-\lambda)\rho_L \tag{1-15}$$

两相混合物因加速而引起的压降如式(1-16)所示。对于两组分两相流(非沸腾、非冷凝),在较短的管道长度内两相流质量保持不变,两相混合物比体积变化引起的压降大小可以忽略,因此加速度压降可以忽略。

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{a}}=G^{2}\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{M}}}{\mathrm{d}z}=G^{2}\left(v_{\mathrm{LG}}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}z}+x\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{G}}}{\mathrm{d}p}\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right) \tag{1-16}$$

最后,两相压降的摩擦分量可用两相摩擦系数表示,摩擦压降如式(1-17)所示。两相摩擦因子f_{M}是根据两相雷诺数Re_{M}计算的,Re_{M}是两相混合动力黏度μ_{M}的函数,如式(1-18)所示。两相流文献提供了几种计算两相动态黏度作为两相流质量函数的模型。关于不同两相动态黏度模型的详细信息,请参考相关文献[4]。

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{f}}=\frac{2f_{\mathrm{M}}G^{2}}{D\rho_{\mathrm{M}}} \tag{1-17}$$

$$Re_{\mathrm{M}}=\frac{GD}{\mu_{\mathrm{M}}} \tag{1-18}$$

采用 Blasius[5] 和 Churchill[6] 单相范宁摩擦因子关联式式(1-19)、式(1-20)计算两相摩擦因子f_{M}。

$$f_{\mathrm{j}}=\begin{cases}16/Re_{\mathrm{j}}, Re_{\mathrm{j}}\leqslant 2300\\ 0.079/Re_{\mathrm{j}}^{0.25}, Re_{\mathrm{j}}>2300\end{cases} \tag{1-19}$$

$$f_{\mathrm{j}}=2\left[\left(\frac{8}{Re_{\mathrm{j}}}\right)^{12}+\frac{1}{(a+b)^{\frac{3}{2}}}\right]^{\frac{1}{12}} \tag{1-20}$$

均匀流模型把复杂的两相流作为单相流处理,掩盖了两相流中许多复杂问题。因此这种模型是比较粗糙的,它适用于两相质量流密度较大和压力较高的情况,符合泡状流型、沫状流型和雾状流型。

华中科技大学出版社

1.3.2　分相流压降计算方法

基于分离流动模型的关联假设两相分开流动,并且两相之间有一个确定的连续的界面,与均质流动模型不同的是,它考虑了气液界面的滑移。在两相分离流动模型中,基于空隙率(α_{G})的两相重力压降计算如式(1-21)所示,其中两相混合物密度如式(1-22)所示。

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{h}}=\rho_{\mathrm{M}}g\sin\theta=[\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}+(1-\alpha_{\mathrm{G}})\rho_{\mathrm{L}}]g\sin\theta \tag{1-21}$$

$$\rho_{\mathrm{M}}=\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}+(1-\alpha_{\mathrm{G}})\rho_{\mathrm{L}} \tag{1-22}$$

两相压降的加速度分量由式(1-23)计算,该表达式适用于除环形流型外的所有带大量液体夹带的流型。对于环形流动,当大量液滴进入中心气核时,可能造成与可忽略的加速度压降假设相关的误差较大。在带液体的环形流动中,夹带过程也会导致两相压降,因此不可忽视。对于这样的特殊情况(带液体的环形流动),可以将式(1-23)

修正为式(1-24)：

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{a}}=G^{2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left[\frac{x^{2}}{\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}}+\frac{(1-x)^{2}}{(1-\alpha_{\mathrm{G}})\rho_{\mathrm{L}}}\right] \tag{1-23}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{a}}=G^{2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}\left[\frac{x^{2}}{\alpha_{\mathrm{G}}\rho_{\mathrm{G}}}+\frac{(1-E)^{2}(1-x)^{2}}{\beta\rho_{\mathrm{L}}}+\frac{E^{2}(1-x)^{2}}{(1-\alpha_{\mathrm{G}}-\beta)\rho_{\mathrm{L}}}\right] \tag{1-24}$$

其中，与液含率 α_{L} 不同，液膜所占体积分数 β 没有考虑气芯中夹带的液滴的分数，如式(1-25)所示。当满足条件 $E\approx 0$ 时，液膜的体积分数等于含液率，即 $\beta=\alpha_{\mathrm{L}}$。注意式(1-25)基于一个有效假设，即夹带的液滴以与气体相同的速度运动。

$$\beta=1-\alpha_{\mathrm{G}}-\frac{\alpha_{\mathrm{G}}E(1-x)}{x\left(\frac{\rho_{\mathrm{L}}}{\rho_{\mathrm{G}}}\right)} \tag{1-25}$$

最后两相压降的摩擦分量计算如式(1-26)所示。

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{f}}=\Phi_{f}^{2}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{j}} \tag{1-26}$$

两相摩擦压降倍率 Φ_{f}^{2} 可以用几种不同的形式表示，取决于假设哪一相单独流过管道。广义上，两相摩擦压降倍率的四种不同情况可定义为如式(1-27)～式(1-30)所示。

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{f}}=\Phi_{\mathrm{LO}}^{2}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{LO}},\text{其中}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{LO}}=\frac{2f_{\mathrm{LO}}G^{2}}{D\rho_{\mathrm{L}}} \tag{1-27}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{f}}=\Phi_{\mathrm{L}}^{2}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{L}},\text{其中}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{L}}=\frac{2f_{\mathrm{L}}G^{2}(1-x)^{2}}{D\rho_{\mathrm{L}}} \tag{1-28}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{f}}=\Phi_{\mathrm{GO}}^{2}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{GO}},\text{其中}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{GO}}=\frac{2f_{\mathrm{GO}}G^{2}}{D\rho_{\mathrm{G}}} \tag{1-29}$$

$$\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{f}}=\Phi_{\mathrm{G}}^{2}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{G}},\text{其中}\left(\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}\right)_{\mathrm{G}}=\frac{2f_{\mathrm{G}}G^{2}x^{2}}{D\rho_{\mathrm{G}}} \tag{1-30}$$

两相流相关的文献提供了几种基于不同的两相摩擦压降倍率的摩擦压降关联式，下面简要介绍一些使用较为广泛的压降关联式。

1. Lockhart-Martinelli 关联式

Lockhart 和 Martinelli[7] 于 1949 年在水平管道内完成了空气-液体等温两相流的摩擦压降实验，并率先提出了压降关联式。他们的关联式将两相摩擦压降倍率定义为参数 X 的函数，如式(1-31)所示，参数 X 可由式(1-32)确定，其中的摩擦因子采用适当的单相摩擦因子。

$$\Phi_{\mathrm{L}}^{2}=1+\frac{C}{X}+\frac{1}{X^{2}(\Phi_{\mathrm{G}}^{2})}=1+CX+X^{2} \tag{1-31}$$

$$X=\left[\frac{(\mathrm{d}p/\mathrm{d}z)_{\mathrm{f,L}}}{(\mathrm{d}p/\mathrm{d}z)_{\mathrm{f,G}}}\right]^{0.5}=\frac{1-x}{x}\left[\frac{f_{\mathrm{L}}}{f_{\mathrm{G}}}\frac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{L}}}\right]^{0.5}=\frac{U_{\mathrm{SL}}}{U_{\mathrm{SG}}}\left[\frac{f_{\mathrm{L}}}{f_{\mathrm{G}}}\frac{\rho_{\mathrm{L}}}{\rho_{\mathrm{G}}}\right]^{0.5} \tag{1-32}$$

式(1-31)中 C 的值分别取决于气相和液相的层流或湍流性质，如表 1.3[8] 所示。

修订稿 科技大学出版社