

# 目 录

## 符号表

### 第一篇 若干基本概念, 单颗粒运动和一维二相流

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| 第一章 绪论 .....                                      | 2  |
| § 1.1 二相流与多相流 .....                               | 2  |
| § 1.2 二相流发展简史 .....                               | 3  |
| § 1.3 各种流动形态的二相流, 流型图<br>(flow-pattern map) ..... | 4  |
| § 1.4 稀疏的和稠密的悬浮体二相流 .....                         | 10 |
| § 1.5 二相流与非牛顿流, 二相流与渗流 .....                      | 11 |
| 第二章 二相流的非平衡流动特点, 弛豫过程 .....                       | 16 |
| § 2.1* 非平衡流动的特点 .....                             | 16 |
| § 2.2 单颗粒的弛豫过程 .....                              | 25 |
| § 2.2.1 在流体中运动颗粒的受力分析 .....                       | 26 |
| § 2.2.2 单颗粒运动方程式 .....                            | 33 |
| § 2.3 颗粒群的弛豫过程 .....                              | 35 |
| § 2.3.1 颗粒群的阻力 .....                              | 35 |
| § 2.3.2 颗粒群的弛豫时间 .....                            | 38 |
| § 2.4 流体-颗粒间的热交换, 温度弛豫 .....                      | 43 |
| § 2.5 流体-颗粒间的质量交换 .....                           | 47 |
| § 2.6 平衡流与冻结流 .....                               | 50 |
| 第三章 单颗粒动力学 .....                                  | 55 |
| § 3.1 具有初速度的颗粒在静止流场中的阻尼运动 .....                   | 55 |
| § 3.2 重力沉降 .....                                  | 56 |
| § 3.3 颗粒在恒速流场中运动 .....                            | 58 |

|            |                                        |            |
|------------|----------------------------------------|------------|
| § 3.4      | 颗粒在匀加速流场中的运动 .....                     | 59         |
| § 3.5      | 颗粒在匀加速流场中同时经受重力时的运动 .....              | 60         |
| § 3.6      | 以距离 $x$ 为自变量重新考察 § 3.1—§ 3.3 各例 .....  | 61         |
| § 3.7      | 颗粒在振荡流中的运动 .....                       | 62         |
| § 3.8      | 颗粒引射到平直均匀流场后的运动 .....                  | 66         |
| § 3.9      | 颗粒在旋转流场中的运动 .....                      | 69         |
| <b>第四章</b> | <b>二相混合介质的平衡热力学性质和平衡声速 .....</b>       | <b>75</b>  |
| § 4.1      | 平衡体系的热力学关系, 等熵声速与等温声速 .....            | 76         |
| § 4.2      | 二相混合物体系统中的密度、比容、内能<br>和焓, 压强和分压强 ..... | 81         |
| § 4.2.1*   | 关于压强和分压强 .....                         | 82         |
| § 4.3      | 无相间传质的二相系的平衡热力学关系和声速 .....             | 90         |
| § 4.4      | 有相变的一元二相系的平衡热力学关系和声速 .....             | 95         |
| § 4.5      | 有相变的二元二相系的平衡热力学关系和声速 .....             | 99         |
| <b>第五章</b> | <b>一维二相流方程 .....</b>                   | <b>106</b> |
| § 5.1      | 悬浮体二相流方程 (无相变) .....                   | 109        |
| § 5.2      | 悬浮体二相流方程 (有相变) .....                   | 117        |
| § 5.3      | 悬浮体方程中各相间作用项的物理意义的讨论 ...               | 129        |
| § 5.4      | 一般的二相流一维运动方程组 .....                    | 137        |
| § 5.5      | 一维二相流方程组的封闭问题的讨论 .....                 | 144        |
| § 5.5.1    | 两相速度平衡的流动 .....                        | 147        |
| § 5.5.2    | $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 为常数的流动 .....       | 155        |
| § 5.5.3    | 冻结流动 .....                             | 156        |
| § 5.5.4    | 悬浮体二相流 .....                           | 156        |
| § 5.5.5    | 无壁面效应的一维二相流 .....                      | 156        |
| <b>第六章</b> | <b>一维二相流方程组的应用 .....</b>               | <b>159</b> |
| § 6.1      | 声波的传播——速度、衰减和色散 .....                  | 160        |
| § 6.1.1    | 声波的传播速度和衰减 .....                       | 160        |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 6.1.2 声速公式的讨论 .....                                                        | 173        |
| § 6.1.3 声波的色散, 扰动波前的传播速度与能量传播速度 ...                                          | 176        |
| § 6.2 含灰气体激波 .....                                                           | 180        |
| § 6.2.1 弥散的含灰气体激波 (dispersed shock wave) .....                               | 191        |
| § 6.3 悬浮体一维定常无粘性喷管流动 .....                                                   | 193        |
| § 6.3.1 平衡流动 .....                                                           | 197        |
| § 6.3.2 非平衡流动 .....                                                          | 205        |
| § 6.3.3 等温喷管流动 .....                                                         | 220        |
| § 6.4 充分发展的一维定常管流 .....                                                      | 223        |
| § 6.4.1 若干定义和基本关系 .....                                                      | 224        |
| § 6.4.2 用动量方程解压降和空隙率 .....                                                   | 230        |
| § 6.4.3 计算摩擦压强梯度 $\left(-\frac{\partial p}{\partial z}\right)_F$ 的经验公式 ..... | 236        |
| § 6.5 环状流 .....                                                              | 245        |
| § 6.5.1 核心流的动量方程 .....                                                       | 247        |
| § 6.5.2 液膜动量方程及积分 .....                                                      | 249        |
| § 6.5.3 相界面粗糙度的经验关系 .....                                                    | 250        |
| § 6.5.4 液膜流量 $W_{IF}$ 的变化 .....                                              | 251        |
| § 6.5.5 本书的专用符号 .....                                                        | 254        |
| <b>第七章 一维非定常悬浮体二相流方程组的</b>                                                   |            |
| <b>特征理论初步, 冻结声速 .....</b>                                                    | <b>259</b> |
| § 7.1 一维非定常二相流方程组的特征值 .....                                                  | 260        |
| § 7.1.1 $F_p$ 中不含对自变量的偏导数 .....                                              | 263        |
| § 7.1.2 $F_p$ 中计入附加质量力 .....                                                 | 268        |
| § 7.2 气-固二相流中的特征值和相容性关系 .....                                                | 278        |
| § 7.2.1 近似处理 I — $\alpha_d \ll 1$ 的情况 .....                                  | 280        |
| § 7.2.2 近似处理 II .....                                                        | 281        |
| § 7.2.3 近似处理 III .....                                                       | 284        |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| § 7.2.4 近似处理IV .....                        | 287 |
| <b>第八章 含灰气体激波管中的流动, 压力波的传播</b> .....        | 289 |
| § 8.1 激波管在非平衡流动研究中的意义 .....                 | 290 |
| § 8.2 高压段含灰的激波管流动 .....                     | 292 |
| § 8.3 低压段含灰的激波管流动 .....                     | 306 |
| § 8.4 本章的符号说明 .....                         | 320 |
| <b>第二篇 流体力学基础</b>                           |     |
| <b>第九章 流体力学基本方程组</b> .....                  | 326 |
| § 9.1 用 Lagrange 型控制体建立流体力学方程组 .....        | 327 |
| § 9.2 用 Euler 型控制体建立流体力学方程组 .....           | 331 |
| § 9.3* 用气体分子动理学方法建立气体动力学方程 ...              | 336 |
| § 9.3.1 气体分子速度分布函数与气体<br>速度、压强、温度、内能等 ..... | 336 |
| § 9.3.2 Boltzmann 方程与气体动力学方程 .....          | 342 |
| § 9.3.3 稠密气体中的压强张量和热流通量 .....               | 347 |
| § 9.4 一维形式的流体力学方程组 .....                    | 349 |
| § 9.5 流体湍流运动的方程组 .....                      | 354 |
| <b>第十章 均相二元混合物运动的描述</b> .....               | 357 |
| § 10.1 用双流体模型描写二元混合物的运动 .....               | 358 |
| § 10.2 用扩散模型描写二元混合物的运动 .....                | 364 |
| § 10.2.1 扩散速度 $V_2$ 的本构关系 .....             | 368 |
| § 10.3 关于随体微商 .....                         | 371 |
| § 10.4 扩散模型与双流体模型的比较 .....                  | 372 |
| § 10.4.1 分压强和压强在不同模型中的不同定义 .....            | 373 |
| § 10.4.2 内能、温度和热流通量在不同模型中的不同定义 .....        | 376 |
| § 10.4.3 扩散系数与组元间作用力的关系 .....               | 380 |
| § 10.4.4 关于扩散的几个例子 .....                    | 385 |

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| § 10.4.5 小结和关于能量方程的评注 .....                | 396 |
| § 10.5* 用气体分子动理学方法研究混合气体运动 .....           | 399 |
| § 10.5.1 关于压强、内能、温度和热流通量的物理意义 .....        | 399 |
| § 10.5.2 从 Boltzmann 方程出发建立混合气体的运动方程 ..... | 406 |
| § 10.5.3 稠密混合气体的运动方程 .....                 | 408 |
| § 10.6 二元混合物的湍流运动方程和湍流扩散 .....             | 420 |
| § 10.6.1 分子扩散速度与湍流扩散速度 .....               | 422 |
| § 10.6.2 扩散模型 .....                        | 425 |
| § 10.6.3 双流模型 .....                        | 427 |
| § 10.6.4 分子扩散与湍流扩散的扩散势的比较 .....            | 435 |
| § 10.6.5 分子热运动与湍流脉动, 分子输运与湍流输运 .....       | 437 |

### 第三篇 二相流基本方程

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 第十一章 连续介质模型 .....                      | 444 |
| § 11.1 若干数学公式 .....                    | 446 |
| § 11.2 积分形式的守恒方程 .....                 | 448 |
| § 11.3 瞬时的、局部的相守恒方程,<br>相界面的间断关系 ..... | 452 |
| § 11.3.1 瞬时的、局部的相守恒方程 .....            | 454 |
| § 11.3.2 相界面的间断特性 .....                | 456 |
| § 11.4 时间平均的二相流方程和空间平均的<br>二相流方程 ..... | 462 |
| § 11.4.1 时间平均法 .....                   | 463 |
| § 11.4.2 空间平均法 .....                   | 469 |
| § 11.4.3 平均的二相流方程, 各种相间作用表达式 .....     | 472 |
| § 11.4.4 相间作用项对 $k$ 求和是否为零的讨论 .....    | 479 |
| § 11.4.5 悬浮体二相流方程 .....                | 480 |
| § 11.5 三种流动制式的悬浮体二相流, 多尺度分析 .....      | 485 |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| § 11.5.1 二相流中的多个特征尺度, 多种尺度        |            |
| 内的平均速度、脉动速度和应力 .....              | 486        |
| § 11.5.2 悬浮体二相流的三种流动制式 .....      | 494        |
| § 11.5.3 层流的和准层流的二相流方程 .....      | 497        |
| § 11.5.4 湍流二相流方程 .....            | 498        |
| § 11.5.5 主要结论 .....               | 500        |
| § 11.5.6 本节的符号说明 .....            | 501        |
| § 11.6 一维形式的二相流方程的推导 .....        | 502        |
| § 11.6.1 一维近似中几种平均量的定义 .....      | 502        |
| § 11.6.2 一维二相流方程的推导 .....         | 522        |
| § 11.6.3 讨论 .....                 | 528        |
| <b>第十二章 分子动理学模型和颗粒群模型 .....</b>   | <b>534</b> |
| § 12.1* 分子动理学模型 .....             | 534        |
| § 12.1.1 气体-颗粒流是一种特殊的稠密混合气体       |            |
| ——两种分子质量相差悬殊 .....                | 535        |
| § 12.1.2 计入颗粒“分子”内部自由度能量和         |            |
| 非弹性碰撞效应所作的修正 .....                | 537        |
| § 12.1.3 讨论 .....                 | 538        |
| § 12.2 颗粒群模型 .....                | 539        |
| § 12.2.1 颗粒群模型所采用的体系 .....        | 541        |
| § 12.2.2 用颗粒群模型建立的悬浮体二相流方程 .....  | 542        |
| <b>第十三章 三种模型的比较和某些专题的讨论 .....</b> | <b>549</b> |
| § 13.1 三种模型中同类量的换算关系 .....        | 550        |
| § 13.2 三种模型中同类量换算关系的物理解释 .....    | 554        |
| § 13.3* 表面张力对悬浮体流动的影响 .....       | 560        |
| § 13.4 悬浮体二相流方程的各种恒等变换 .....      | 570        |
| § 13.5 轨道模型与拟流体模型 .....           | 577        |
| § 13.6 固相作为拟流体处理时单颗粒性质所起的作用 ..... | 579        |

|                                                  |     |
|--------------------------------------------------|-----|
| § 13.7 关于碰撞力的讨论 .....                            | 583 |
| 第四篇 湍流悬浮体流动某些专题的讨论                               |     |
| 第十四章 二相流中的扩散理论 .....                             | 588 |
| § 14.1 引言 .....                                  | 588 |
| § 14.2 离散的稀疏微粒群的扩散 .....                         | 590 |
| § 14.2.1 微粒的热运动引起的扩散 .....                       | 590 |
| § 14.2.2 微粒的湍流扩散——陈善谟理论 .....                    | 594 |
| § 14.3 扩散速度的定义, 组元的质量守恒方程 .....                  | 600 |
| § 14.4 扩散速度的本构式, 各种扩散势 .....                     | 605 |
| § 14.4.1 经典理论 .....                              | 605 |
| § 14.4.2 推导扩散速度本构式的一种新方法 .....                   | 606 |
| § 14.4.3 悬浮体二相流中扩散速度的本构式 .....                   | 607 |
| § 14.5 悬浮体扩散理论的应用 .....                          | 625 |
| § 14.5.1 铅垂管道的湍流悬浮体流动中颗粒浓度的径向分布 ...              | 628 |
| § 14.5.2 二维明渠的湍流流动中颗粒浓度的垂向分布 .....               | 638 |
| § 14.6 多种尺度意义上的扩散 .....                          | 646 |
| § 14.7 二相流研究中应用扩散模型的局限性 .....                    | 647 |
| § 14.8 扩散(diffusion)与弥散(dispersion) .....        | 648 |
| 第十五章 湍流悬浮体流动和相间作用力本构式 .....                      | 653 |
| § 15.1 相间作用力本构式和湍流二相流方程 .....                    | 653 |
| § 15.2 用双流体模型分析水平流动中<br>颗粒浓度垂向分布 .....           | 661 |
| 附录 A 关于各种物理模型的小结 .....                           | 674 |
| 附录 B Hamilton 算符 $\nabla$ 的运算法则 .....            | 675 |
| 附录 C 在直角坐标系、圆柱坐标系和球坐标系中一些<br>矢量、张量表达式的展开形式 ..... | 679 |
| 附录 D 光滑弹性球的二体碰撞动力学 .....                         | 687 |

---

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 附录 E 混合气体两组元之间的作用力与传热率表达式         | 690 |
| 附录 F 不同尺度的平均量、脉动量之间<br>的一些关系式 (一) | 699 |
| 附录 G 不同尺度的平均量、脉动量之间<br>的一些关系式 (二) | 703 |
| 人名索引                              | 707 |
| 主词索引                              | 709 |
| 英文内容介绍、目录                         | 721 |

# 第一篇 若干基本概念, 单颗粒运动和一维二相流

---

# 1

## 绪论

---

### § 1.1 二相流与多相流

---

除了等离子体以外，物质有三态：气体、液体和固体。若不计电磁特性，可把等离子体归入气体类内。经典的流体力学只研究纯气体（或混合气体）和纯液体（或溶液）的运动规律。二相流则研究气—液、气—固、不相溶的液—液、液—固等各种混合物的运动规律。

以气—固流动为例，称它为二相流，是因为在物理上它包括气、固两个相。如果气—固混合物中，固体颗粒大小很分散，为了研究方便，可把所有颗粒按其大小分成几个组，每一组内各颗粒大小相近，动力学性质相似，可以用一组动力学方程来描述；对于不同的组用不同的动力学方程描述，因此，有时也称这样的气—固混合物的流动为多相流。显然，这里所说的相是动力学意义上的相。

由此可见，在多数情况下二相流与多相流实际上内容基本上相同，只是对相的理解不同而已。

物理上是多相的流动也是有的，如采油过程中的气—油—沙和油—水—沙等三相流，甚至还有像气—油—水—沙那样的四相流。

## § 1.2 二相流发展简史

二相流的现象不论在自然界或在生产实践中到处都有。虽然二相流学科是近年来才形成,可是同二相流有关的问题很早以前就在生产中遇到,并提出了各种解决办法,积累了许多经验。早在1877年, Boussinesq<sup>(1)</sup>就已较系统地研究过明渠水流中泥沙的沉降和输运,1910年 Mallock<sup>(2)</sup>研究过声波在泡沫液体中传播时强度的衰减。但是许多经验和研究成果分散在各个生产部门,交流不多。有意识地总结归纳所遇到的各种现象,用二相流的统一观点系统地加以分析和研究,则是本世纪四十年代才开始。二相流(two-phase flow)的名词在1949年已见诸文献<sup>(3)</sup>。五十年代以后论文数量显著地增加,内容包括二相流边界层<sup>(4,5)</sup>,激波在二相混合介质中的传播<sup>(6,7)</sup>,空化理论<sup>(8)</sup>,流态化技术<sup>(9)</sup>,喷管流动<sup>(10)</sup>等。1956年 Ingebo<sup>(11)</sup>研究了颗粒群阻力系数与单颗粒阻力系数的差别,总结出描述颗粒群阻力系数的经验公式。1961年 Streeter 主编的流体动力学手册<sup>(8)</sup>有专门一节介绍二相流。六十年代以后,越来越多的学者探索描述二相流运动规律的基本方程。早期的工作有 Marble (1963)<sup>(12)</sup>, Murray (1965)<sup>(13)</sup>, Panton (1968)<sup>(14)</sup>等。有关二相流的专著也在六十年代以后陆续出版,如 Yih (1965)<sup>(15)</sup>, Soo (1967)<sup>(16)</sup>, Wallis (1969)<sup>(17)</sup>, Ishii (1975)<sup>(18)</sup>, Pai (1977)<sup>(19)</sup>等。Rudinger 于1976年以“气体-颗粒流基础”为题在比利时的 von Karman 流体动力学实验室作了专题系列讲座,并于1980年整理成书出版<sup>(20)</sup>。国际多相流杂志(Int. J. Multiphase Flow)也于1974年创刊。1982年出版了多相流手册<sup>(21)</sup>。因此,二相流作为一门独立的学科,可以说已经形成。

并开始了迅猛的发展,但是总的说还不很成熟,尚处于发展初期,很多方面都要依赖于经验数据,而且数据的分散性很大。

### § 1.3 各种流动形态的二相流, 流型图(flow-pattern map)

二相流有气-固流、液-固流和气-液流等。气-液流中最重要的有空气-水流动和蒸汽-水流动;对于上述流动中的每一种,又可能有许多不同的流动形态(简称流型)。例如管道内固体物料的气力输送可能出现如图 1.1 所示的几种不同的流动形态。在气+液流动中,流动形态更加丰富。图 1.3 给出了水平管道中的几种可能的流动形态:泡状流(bubble flow),塞状流(plug flow),分层流(stratified flow),波状流(wavy flow),弹状流(slug flow),环状流(annular flow)等。竖管中的几种典型流型示于图 1.4,有泡状流,弹状流,乳沫状流(churn flow),环状流和液丝环状流(wispy annular flow)等。图 1.2 是汽-水二相流在加热管道中自下而上流动过程中出现的几种典型流型,以及它们之间的过渡。

流型和流型之间转换规律的研究很重要,因为不同的流型有着完全不同的流动规律。例如,在均匀弥散的悬浮体流动——泡状流、雾状流(mist flow)和大多数的气-固流、液-固流——中,相间阻力和传热率远大于分层流和波状流情况。在不同流型中,有完全不同的相间阻力和传热规律,壁面阻力规律也不相同。在一种流型下得到的流动规律,一般说不能随意推广到别的流型,正像单相流中湍流中的阻力与层流中的阻力有完全不同的规律一样。

既然流型的确定很重要,人们自然很关心:在已知的管道中对于每一种流量组合——相 1 和相 2 的质量流量分别为  $W_1$  和  $W_2$



图 1.1 气体-颗粒流中的  
几种典型流型

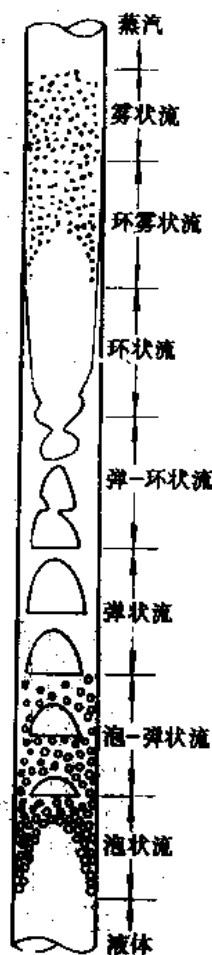


图 1.2 在垂直的蒸发管中的各类  
流型的大致次序

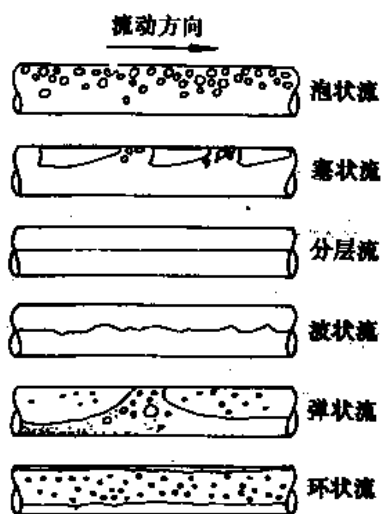


图 1.3 水平流动中的几种典型流型

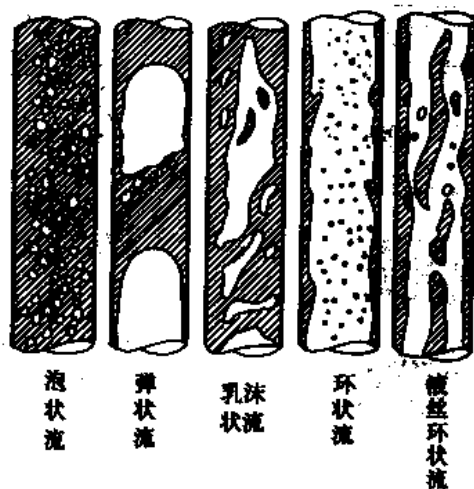


图 1.4 竖管流动中的几种典型流型

——管内流动是什么流型, 并由此可推算出流动压降等数据。或者用另一种提问方式: 在给定的气体流量下选用什么形状的管道, 可以在提升液体或固体颗粒最有效的流型下的工作。

事实上, 二相流的流动形态几乎有无穷多, 尤其是气-液流。除了图 1.2 或图 1.3 所列的几种典型流型外, 还有许许多多可能的流动形态。对这许多形态的分类在很大程度上带有主观的成分; 对于某些典型流型的命名也没有完全统一。图 1.2 和图 1.3 所列的几种典型流型的定义是目前比较公认的。

对于某一特定的几何形状及流体的组合, 用实验的方法可以确定其流型。如用两个相的速度、或流量、或两个其它有关量来表征一个二相流, 在这两个量的坐标平面上标明各种流型分布的图叫流型图, 如图 1.5—图 1.8。流型图非常有用。但目前还不是对各种流动介质, 在各种流动条件下都能给出比较可靠的流型图。图 1.5 是 Bennett<sup>(22)</sup> 得到的、压强为 6.89MPa 时的汽-水流型图, 图中还标出了对于长 3.66m、内径为 12.5mm 的管子的烧毁曲线。坐标  $G$  是流过管子的混合物质量通量,  $x_g$  是气相的流量分数 (近似等于含气率)。图 1.6 是最初由 Baker<sup>(23)</sup> 给出、后经 Scott<sup>(24)</sup> 修正的流型图, 纵坐标变量是  $x_g G / \lambda$ , 横坐标变量是  $(1 - x_g) \lambda \Psi / x_g$ , 其中  $\lambda$  和  $\Psi$  的定义为

$$\lambda = \left[ \frac{\rho_g}{\rho_a} \frac{\rho_l}{\rho_w} \right]^{1/2}$$

$$\Psi = \frac{\sigma_w}{\sigma} \left[ \frac{\mu_l}{\mu_w} \left( \frac{\rho_w}{\rho_l} \right)^2 \right]^{1/3}$$

$\rho_l$ 、 $\mu_l$  和  $\sigma$  分别为工作介质中液相的相密度、动力粘性系数和表面张力,  $\rho_g$  和  $\mu_g$  是工作介质中气相的相密度和动力粘性系数, 标准状态下空气 (下标 a) 和水 (下标 w) 的有关参数 (相密度、粘性系数和表面张力) 作为参考量。显然, 对空气-水二相

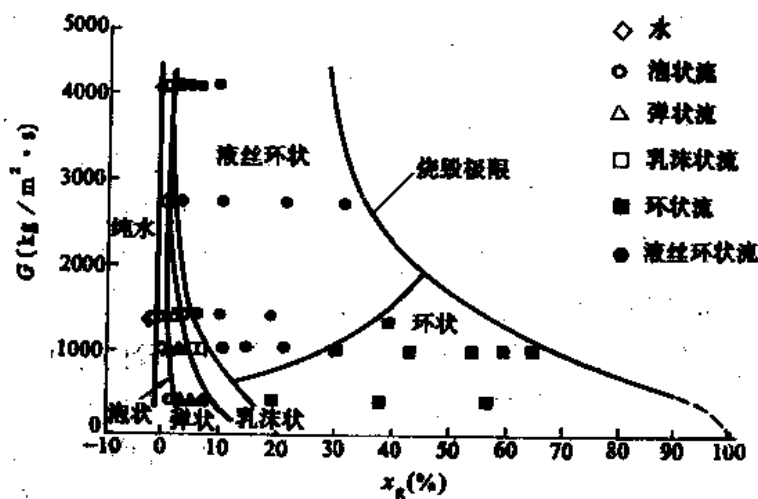


图 1.5 压强为 6.89MPa 的汽-水流型图

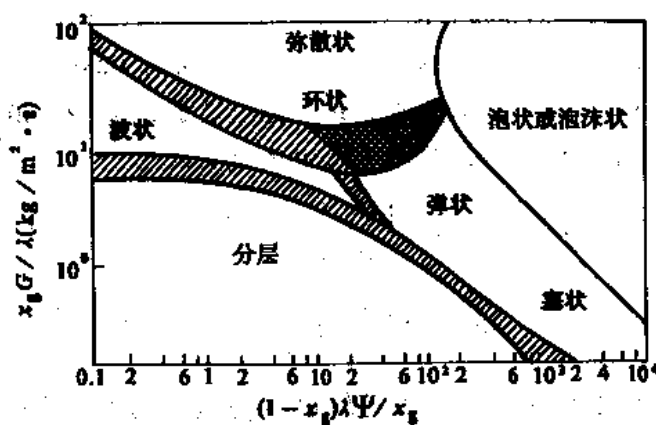


图 1.6 Scott 修正后的 Baker 流型图

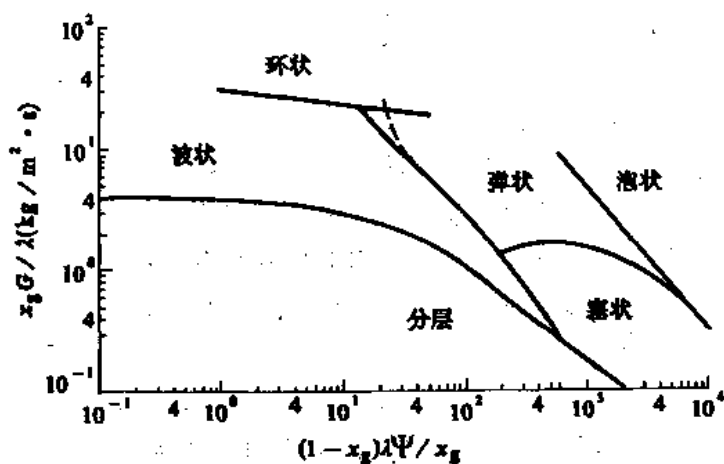


图 1.7 Schicht (1969) 作的水平二相流的流型图

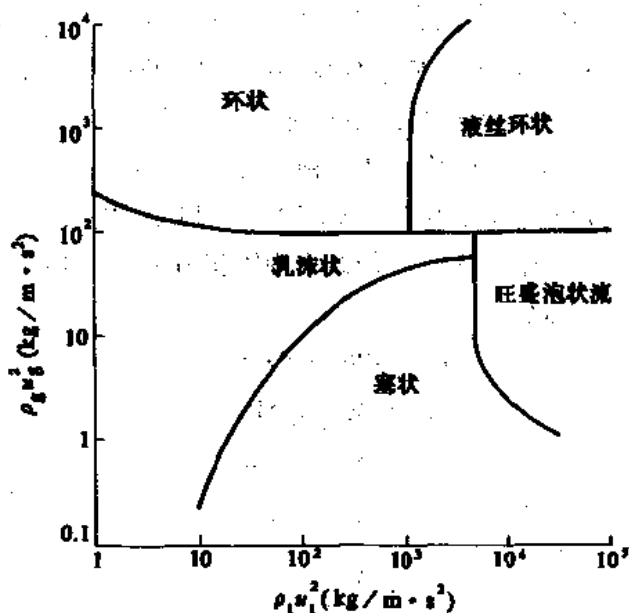


图 1.8 Hewitt 与 Roberts (1969) 的竖管二相流的流型图