

# 复杂混合物 在管道中的流动

上册

〔加拿大〕G. W. 戈威尔 K. 阿济兹 著

石油工业出版社

81.178

157

1-2

# 复杂混合物在管道中的流动

上 册

〔加拿大〕 G.W. 戈威尔 K. 阿济兹 著

权忠興 叶良溪 译 陈家琅 校

石油工业出版社

# 目 录

|                             |        |
|-----------------------------|--------|
| 序 .....                     | ( 1 )  |
| 符号一览表 .....                 | ( 4 )  |
| <b>第一章 复杂混合物的分类及特点</b>      |        |
| 第一节 引言 .....                | ( 10 ) |
| 第二节 复杂混合物的分类 .....          | ( 11 ) |
| 第三节 相的分离和沉降特性 .....         | ( 12 ) |
| 3-1 概述 .....                | ( 12 ) |
| 3-2 最终沉降速度 .....            | ( 13 ) |
| 3-2-1 固体颗粒 .....            | ( 13 ) |
| 3-2-2 流体颗粒 .....            | ( 18 ) |
| 3-2-3 不规则形状颗粒 .....         | ( 19 ) |
| 3-2-4 器壁效应 .....            | ( 21 ) |
| 3-3 浓度影响和干扰沉降速度 .....       | ( 22 ) |
| 3-4 假均匀流体 .....             | ( 29 ) |
| 3-5 推荐设计步骤 .....            | ( 32 ) |
| 第四节 单相和假均匀多相混合物的分类 .....    | ( 33 ) |
| 4-1 概述 .....                | ( 33 ) |
| 4-2 与时间无关的粘性流体 .....        | ( 38 ) |
| 4-2-1 牛顿流体 .....            | ( 38 ) |
| 4-2-2 假塑性流体 .....           | ( 40 ) |
| 4-2-3 胀流型流体 .....           | ( 44 ) |
| 4-2-4 宾汉(Bing-ham) 流体 ..... | ( 48 ) |
| 4-2-5 屈服-假塑性体 .....         | ( 50 ) |
| 4-3 与时间有关的粘性流体 .....        | ( 52 ) |
| 4-3-1 概述 .....              | ( 52 ) |
| 4-3-2 触变性流体 .....           | ( 54 ) |

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| 4-3-3 流凝性流体 .....     | ( 59 ) |
| 4-4 粘弹性流体 .....       | ( 61 ) |
| 4-4-1 概述 .....        | ( 61 ) |
| 4-4-2 本构方程 .....      | ( 66 ) |
| 第五节 流变性度量和数据的解析 ..... | ( 70 ) |
| 5-1 粘度测量仪器 .....      | ( 70 ) |
| 5-2 流变性度量的解析 .....    | ( 72 ) |
| 参考资料 .....            | ( 79 ) |

## 第二章 流体的流动性质

|                           |         |
|---------------------------|---------|
| 第一节 引言 .....              | ( 83 )  |
| 第二节 密度 .....              | ( 84 )  |
| 2-1 单组分流体 .....           | ( 84 )  |
| 2-1-1 概述 .....            | ( 84 )  |
| 2-1-2 气体 .....            | ( 88 )  |
| 2-1-3 液体 .....            | ( 94 )  |
| 2-2 多组分流体 .....           | ( 99 )  |
| 2-2-1 概述 .....            | ( 99 )  |
| 2-2-2 气体 .....            | ( 99 )  |
| 2-2-3 液体 .....            | ( 105 ) |
| 2-3 假均匀多相体系 .....         | ( 106 ) |
| 第三节 牛顿粘度 .....            | ( 106 ) |
| 3-1 单组分流体 .....           | ( 106 ) |
| 3-1-1 概述 .....            | ( 106 ) |
| 3-1-2 气体 .....            | ( 107 ) |
| 3-1-3 液体 .....            | ( 113 ) |
| 3-2 多组分气体 .....           | ( 114 ) |
| 3-3 多组分可混溶液体 .....        | ( 116 ) |
| 3-4 球形颗粒在液体中的假均匀悬浮液 ..... | ( 117 ) |
| 第四节 普通非牛顿体的稠度 .....       | ( 118 ) |
| 4-1 概述 .....              | ( 118 ) |
| 4-2 宾汉塑性体 .....           | ( 120 ) |
| 4-2-1 均匀物料 .....          | ( 120 ) |

|                        |         |
|------------------------|---------|
| 4-2-2 假均匀物料 .....      | ( 120 ) |
| 4-3 假塑性体 .....         | ( 126 ) |
| 4-3-1 均匀物料 .....       | ( 126 ) |
| 4-3-2 假均匀物料 .....      | ( 127 ) |
| 第五节 表面张力与界面张力 .....    | ( 130 ) |
| 5-1 表面张力与界面张力的关系 ..... | ( 130 ) |
| 5-1-1 气-液界面 .....      | ( 130 ) |
| 5-1-2 液-液界面 .....      | ( 130 ) |
| 5-2 单组分液体的表面张力 .....   | ( 131 ) |
| 5-2-1 由密度进行预测 .....    | ( 131 ) |
| 5-2-2 由折射率进行预测 .....   | ( 131 ) |
| 5-2-3 由粘度进行预测 .....    | ( 132 ) |
| 5-2-4 由对应态进行预测 .....   | ( 132 ) |
| 5-2-5 温度的影响 .....      | ( 133 ) |
| 5-2-6 压力的影响 .....      | ( 133 ) |
| 5-3 多组分液体的表面张力 .....   | ( 134 ) |
| 参考资料 .....             | ( 135 ) |
| <b>第三章 牛顿流体流动的基本概念</b> |         |
| 第一节 引言 .....           | ( 139 ) |
| 第二节 状态方程 .....         | ( 140 ) |
| 第三节 本构方程 .....         | ( 140 ) |
| 第四节 连续性方程 .....        | ( 141 ) |
| 第五节 动量方程 .....         | ( 143 ) |
| 第六节 能量方程 .....         | ( 146 ) |
| 第七节 机械能量方程 .....       | ( 149 ) |
| 第八节 流动方式 .....         | ( 151 ) |
| 第九节 层流流动 .....         | ( 153 ) |
| 第十节 紊流流动 .....         | ( 153 ) |
| 参考资料 .....             | ( 158 ) |
| <b>第四章 牛顿流体在管道中的流动</b> |         |
| 第一节 引言 .....           | ( 160 ) |
| 第二节 层流、过渡流或紊流的判据 ..... | ( 160 ) |

|       |                                                                |         |
|-------|----------------------------------------------------------------|---------|
| 2-1   | 远离入口处层流和紊流的判据 .....                                            | ( 161 ) |
| 2-2   | 为发展成稳定流动从入口算起所需的距离 .....                                       | ( 163 ) |
| 第三节   | 稳态层流流动 .....                                                   | ( 166 ) |
| 3-1   | 哈根-泊谟叶(Hagen-Poiseuille)关系式 .....                              | ( 166 ) |
| 3-2   | 摩阻系数概念 .....                                                   | ( 167 ) |
| 3-3   | 入口效应 .....                                                     | ( 168 ) |
| 3-4   | 压降方程的一般形式 .....                                                | ( 174 ) |
| 第四节   | 稳态紊流流动 .....                                                   | ( 175 ) |
| 4-1   | 光滑壁(SW)紊流流动 .....                                              | ( 176 ) |
| 4-1-1 | 摩阻系数经验关系式 .....                                                | ( 176 ) |
| 4-1-2 | 速度分布关系式 .....                                                  | ( 177 ) |
| 4-1-3 | 以速度分布分析为基础的摩阻系数<br>关系式 .....                                   | ( 181 ) |
| 4-2   | 壁面粗糙度及其作用 .....                                                | ( 185 ) |
| 4-3   | 完全粗糙壁 (FRW) 紊流流动 .....                                         | ( 188 ) |
| 4-4   | 部分粗糙壁 (PRW) 紊流流动 .....                                         | ( 190 ) |
| 4-5   | 摩阻系数图表 .....                                                   | ( 192 ) |
| 4-6   | 压降方程的一般形式 .....                                                | ( 193 ) |
| 第五节   | 推荐设计方法 .....                                                   | ( 202 ) |
| 5-1   | 概述 .....                                                       | ( 202 ) |
| 5-2   | 入口效应 .....                                                     | ( 202 ) |
| 5-3   | 弯头和管件等的影响 .....                                                | ( 203 ) |
| 5-4   | 位能或静液压头的影响 .....                                               | ( 203 ) |
| 5-5   | 加速度或动能的影响 .....                                                | ( 203 ) |
| 5-6   | 不可压缩流体 (液体以及 $\Delta P < 0.10P_1$ 时的<br>气体或蒸汽) 稳态流动的压力梯度 ..... | ( 204 ) |
| 5-6-1 | 当D和Q(或V)已知时, 计算 $\Delta P$ 的步骤 .....                           | ( 204 ) |
| 5-6-2 | 当Q(或V)和 $\Delta P$ (或 $\Delta P_f$ )已知时,<br>计算D的步骤 .....       | ( 204 ) |
| 5-6-3 | 当D和 $\Delta P$ 已知时, 计算Q(或V)的步骤 .....                           | ( 205 ) |
| 5-7   | 可压缩流体 (当 $\Delta P > 0.10P_1$ 时的气体或<br>蒸汽) 稳态流动的压力梯度 .....     | ( 205 ) |

|                                      |         |
|--------------------------------------|---------|
| 参考资料 .....                           | ( 205 ) |
| <b>第五章 与时间无关的非牛顿流体在管道中的流动</b>        |         |
| 第一节 引言 .....                         | ( 209 ) |
| 第二节 稳态层流流动 .....                     | ( 210 ) |
| 2-1 Rabinowitsch-Mooney关系式 .....     | ( 210 ) |
| 2-2 假塑性流体的关系式 .....                  | ( 213 ) |
| 2-2-1 幂定律流体 .....                    | ( 213 ) |
| 2-2-2 Ellis流体 .....                  | ( 219 ) |
| 2-2-3 Powell-Eyring流体 .....          | ( 221 ) |
| 2-2-4 Meter流体 .....                  | ( 222 ) |
| 2-2-5 Sisko关系式 .....                 | ( 223 ) |
| 2-3 宾汉流体的关系式 .....                   | ( 224 ) |
| 2-4 屈服-假塑性流体的关系式 .....               | ( 228 ) |
| 2-5 粘弹性流体 .....                      | ( 231 ) |
| 2-6 Metzner和Reed的普遍化处理 .....         | ( 232 ) |
| 2-7 入口效应 .....                       | ( 234 ) |
| 2-8 压降方程的一般形式 .....                  | ( 241 ) |
| 第三节 从层流向紊流的过渡 .....                  | ( 243 ) |
| 第四节 稳态紊流流动 .....                     | ( 248 ) |
| 4-1 概述 .....                         | ( 248 ) |
| 4-2 假塑性流体的关系式 .....                  | ( 248 ) |
| 4-2-1 Dodge和Metzner关系式 .....         | ( 248 ) |
| 4-2-2 Tomita关系式 .....                | ( 251 ) |
| 4-2-3 Clapp关系式 .....                 | ( 252 ) |
| 4-2-4 Torrance关系式 .....              | ( 255 ) |
| 4-2-5 Lord, Hulsey和Melton的放大方法 ..... | ( 256 ) |
| 4-3 宾汉流体的关系式 .....                   | ( 257 ) |
| 4-3-1 Tomita关系式 .....                | ( 258 ) |
| 4-3-2 Torrance关系式 .....              | ( 260 ) |
| 4-3-3 Thomas的关联式 .....               | ( 262 ) |
| 4-3-4 Hanks和Dadia的分析 .....           | ( 263 ) |
| 4-4 屈服-假塑性流体的关系式, Torrance           |         |

|                                             |         |
|---------------------------------------------|---------|
| 关系式 .....                                   | ( 266 ) |
| 4-5 粘弹性流体的关系式 .....                         | ( 270 ) |
| 4-5-1 概述 .....                              | ( 270 ) |
| 4-5-2 Kilbane和 Greenkorn 关联式 .....          | ( 273 ) |
| 4-5-3 对数关系式 (Meyer、Seyer和<br>Metzner) ..... | ( 274 ) |
| 4-5-4 Astarita 等人的关系式 .....                 | ( 280 ) |
| 4-6 异常流体 .....                              | ( 281 ) |
| 4-7 入口效应 .....                              | ( 282 ) |
| 4-8 压降方程的一般形式 .....                         | ( 285 ) |
| 第五节 纤维状物料悬浮液的流动 .....                       | ( 285 ) |
| 5-1 概述和典型数据介绍 .....                         | ( 285 ) |
| 5-2 压力梯度的预计 .....                           | ( 287 ) |
| 第六节 推荐设计方法 .....                            | ( 292 ) |
| 6-1 概述 .....                                | ( 292 ) |
| 6-2 入口效应 .....                              | ( 293 ) |
| 6-3 弯头和管件的影响 .....                          | ( 294 ) |
| 6-4 位能或静液压头的影响 .....                        | ( 295 ) |
| 6-5 加速度或动能的影响 .....                         | ( 295 ) |
| 6-6 稳态流动的压力梯度 .....                         | ( 295 ) |
| 参考资料 .....                                  | ( 298 ) |
| <b>第六章 与时间有关的非牛顿流体在管道中的流动</b>               |         |
| 第一节 引言 .....                                | ( 302 ) |
| 第二节 层流流动 .....                              | ( 303 ) |
| 2-1 定性描述 .....                              | ( 303 ) |
| 2-2 普遍方程 .....                              | ( 307 ) |
| 2-3 普遍方程的积分 .....                           | ( 309 ) |
| 2-3-1 Govier和Ritter方法 .....                 | ( 309 ) |
| 2-3-2 Ritter和 Batycky 方法 .....              | ( 311 ) |
| 2-4 入口效应 .....                              | ( 316 ) |
| 2-5 压降方程的一般形式 .....                         | ( 319 ) |
| 第三节 从层流向紊流的过渡 .....                         | ( 320 ) |

|      |                               |         |
|------|-------------------------------|---------|
| 第四节  | 紊流流动 .....                    | ( 321 ) |
| 4-1  | 概述 .....                      | ( 321 ) |
| 4-2  | 近似处理 .....                    | ( 321 ) |
| 4-3  | 入口效应 .....                    | ( 322 ) |
| 4-4  | 压降方程的一般形式 .....               | ( 322 ) |
| 第五节  | 推荐设计方法 .....                  | ( 323 ) |
| 5-1  | 概述 .....                      | ( 323 ) |
| 5-2  | 入口效应 .....                    | ( 323 ) |
| 5-3  | 弯头和管件的影响 .....                | ( 324 ) |
| 5-4  | 位能或静液压头的影响 .....              | ( 324 ) |
| 5-5  | 加速度的影响 .....                  | ( 324 ) |
| 5-6  | 稳定距离 $L_c$ 以外的稳态流动的压力梯度 ..... | ( 324 ) |
| 参考资料 | .....                         | ( 324 ) |

附录

## 序

本书的写作是为了对非牛顿流体和其他复杂混合物管道流动的广泛而又分散的资料作一完整的介绍。近年来已经得出了许多新的数据、新的经验关系式，并且对流动机理和理论的了解方面也有了重大的进展。最近二十年间写成的技术论文和评述文章其数量之大简直惊人，大大超出了一般大学生和工程技术人员可能指望查阅的数量。虽然在已经出版的几本优秀书籍当中，或者在书里的有些章节当中，已经论述了这一综合性论题的某些方面，但是对那些想要从中得到理论背景和切合实际、能达到应用地步的最新知识的工程技术人员来说，即便把它们汇集起来也仍不敷需要。作者则希望本书将切合上述那些读者的需要，并对大学工科高年级学生和研究生，以及工程技术人员均能确有裨益。

本书的基本思想是要以统一而有条理的阐述方式介绍非牛顿流体和各种多相复杂混合物管道流动这门学科的现况。这些物料的流动与单相流体流动有关，而各种复杂体系之间也互有联系。

本书的宗旨是在理解的基础上去应用。为了在实践与理论——经验与对机理的理解之间取得协调的结合，作者做了认真的努力，尽可能地把基本原理和理论推导到可以用来解决实际问题的地步。包括符合最终实用需要的那些经验关系式在内，没有一个是勉强代用的。

本书是一门同名的大学学位课程的自然产物和较大的扩充。这门课程已为作者之一的G·W·戈威尔教授在阿尔伯达大学和卡尔加里大学开设多年。这也反映出作者们长期的研究兴趣。作者广泛地利用了北美、欧洲和亚洲的技术文献，同时也不回避参考他们自己在这一领域内的研究成果。作者相信这种做法是完全恰

当的。全书的编排和各章的材料都力求明确肯定，并希望它们能够符合逻辑和便于应用。

本书有两方面的论述多少有些新奇独特。这就是系统地介绍了典型的实际数据以及在大部分章中有推荐设计方法一节。作者相信，介绍实际数据能有助于真正完全理解主题。事实上，理论和经验关系式虽然重要，而研究有代表性的实际数据更可增进对主题的领会。在许多章中包括了推荐设计方法的讨论，这有两方面的意图：首先，在某种意义上，它是工程技术人员在实际中必须参考的本章最重要论述的内容提要 and 目录；其次，它列出一般设计问题中所需的各主要步骤和供参考的各基本关系式。当有替换方法可用或在它们之中有一最佳选择时，书中均予注明。

第一章介绍了复杂混合物的大致分类，包括对不同类型流体的初步实际研讨，以及对有关流变性度量与解析的讨论。所考虑的复杂混合物是指气体-液体、不可混溶液体、气体-固体和液体-固体的混合物。这些又可分为假均匀混合物和非均匀混合物。前者可按单相流体处理，后者则必须认识其独特的行为特点与两相分离的倾向。

流体流动性质及其与压力、温度的关系在第二章论及，并给出了预测它们的通式。这部分论述的意图，一方面是用来复习，以便理解有哪些物理性质影响流体和混合物的流动特性；另一方面是为了帮助读者无需通过测量即能做出定性的估计。

第三章回顾了单相牛顿流体流动的基本概念。第四章则给出了它们在管道流动方面的实际应用。这两章是含有新的表达方式的复习性章节，作为进一步讨论复杂混合物的基础，这也是很重要的。第五章和第六章研讨了非牛顿流体或混合物的管道流动。在第五章中，分别研究了主要的几种与时间无关的流体。为了预测其管道流动的特性，介绍了理论公式，并遴选出一些经验关系式。第六章进一步论述了与时间有关的流体，并且介绍了当流变性随时间变化占主导地位时一些可用的方法。

第七章论述了用于所有多相非均匀体系——包括气-液、液-液、气-固和液-固相混合物的基本概念。第八、九、十和十一章分别论述了多相混合物管道流动的最重要的应用实例。第八章详细研讨了气-液、液-液相混合物在垂直管道中的流动，对各种流型逐一进行了讨论。第九章论及有关液-固、气-固相混合物在垂直管道中的流动（即垂直水力输送和气动输送）。在第十章中，作者研讨了气-液、液-液相混合物在水平管道中的流动，并对不同流型分别加以论述。第十一章涉及液-固和气-固相混合物的水平流动（即水平水力输送和气动输送）及与其有关的流型。第十章和第十一章还简要地论述了在倾斜管道中的流动问题。最后，第十二章综合介绍了包裹在管道中流动的最新知识，这是阿尔伯达研究委员会最近几年的一项研究进展。

作者对其所选择的课题确定了范围。首先，论述仅限于圆形管道中稳态的、基本上等温的流动。对于非等温流动，若把所讨论的关系式与近似的热平衡一起考虑，并且采用积分或逐次求解，那么也可以进行计算。其次，复杂混合物中有关的传热、传质问题虽未涉及，但所论及的基本的流体力学必会与其有一定的联系。本书论及了复杂混合物在圆形管道中流动的流体力学的所有重要情况，但也仅限于考虑这些问题而已。

G.W.戈威尔 K.阿济兹

# 符 号 一 览 表

表中规定了贯穿全书（中译本上册）最常用符号的意义。仅在个别章节中出现的专门术语和常数，则在文中加以定义和解释而不在此列出。当同一符号具有一种以上含意时，就把最常用的那些含意都规定出来，并注明用到它们的章节或方程。

|                              |                                                                                         |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$ 垂直于速度的面积或管道的截面积          | $d_{.}$ 由筛目或测定所得出的颗粒平均直径                                                                |
| $C$ 附加无因次压降（式5—64）           | $d_s$ 与颗粒或气泡同体积的球体直径                                                                    |
| $C$ 由式（2—27）定义的液体压缩系数        | $e$ 自然对数的底，等于2.7183                                                                     |
| $C_D$ 由式（1—2）定义的阻力系数         | $\exp$ 表示 $e$ 的幂次                                                                       |
| $C_s$ 饱和液体的压缩系数              | $Fr$ 弗鲁德准数， $Fr = V/\sqrt{gD}$                                                          |
| $c$ 浓度或颗粒的体积分数（第一章）          | $F_s$ 器壁效应系数（式1—16和1—17）                                                                |
| $c$ 压缩系数修正因子（图2—8）           | $f$ 或 $f_a$ 由方程（4—24）定义的，当 $Re_a = DV_a\rho_a/\mu_a$ 或 $D_E V_a\rho_a/\mu_a$ 时测定的单相摩阻系数 |
| $c_s$ 体积分数（第二章）              | $f_{.}$ 在整个入口段长度上的平均摩阻系数                                                                |
| $(c_s)_{\dots}$ 可达到的最大体积浓度   | $f_{BT}$ 由式(5—107)定义的Tomita宾汉摩阻系数                                                       |
| $c_s$ 重量或质量分数（第二章）           | $f_s$ 等于 $4f$ 的摩阻系数                                                                     |
| $D$ 管道直径                     | $f_{LM}$ 基于 $Re_{LM} = DV_M\rho_L/\mu_L$ 的单相液体流动摩阻系数                                    |
| $De$ 德博拉 (Deborah) 准数(式1—63) | $f_{Lr}$ 由式(5—86)定义的Tomita                                                              |
| $D_s$ 当量直径，等于四倍截面积除以湿周长      |                                                                                         |
| $d$ 颗粒直径                     |                                                                                         |
| $d_{.}$ 由式（2—76）给出的表观颗粒直径    |                                                                                         |

- ta 幂定律摩阻系数
- $G$  质量流速,  $G = V\rho$
- $G$  气体相对于空气的比重 (第四章)
- $g$  重力加速度
- $g.$  因次变换系数,  $g. = 32.2$  磅 (质) 英尺/磅 (力) 秒<sup>2</sup>
- He 赫斯特罗姆 (Hedstrom) 准数,  $He = D^2 \tau \rho g. / \eta^2$
- $i$  压力梯度,  $i = \Delta P / \rho_w \Delta z$ , 英尺水柱/英尺
- $K$  幂定律方程中的常数 (稠度系数) (式1—40或1—48)
- $K$  由式(4—7)定义的 Hanks 稳定系数
- $K$  Kozney 常数 (式1—22)
- $K'$  由式(5—61)定义的 Metzner-Reed 修正幂定律系数
- $k$  粗糙度, 等于能对管道流动造成粗糙影响的、尺寸大小相对一致的砂粒高度 (第四章)
- $L$  管道长度
- $L$  从管道入口算起的运行距离 (第六章)
- $L.$  对于与时间有关的流体来说, 超出这一  $L$  值,  $dP/dL$  即与  $L$  无关 (第六章)
- $L..$  对于与时间有关的流体来说, 超出这一  $L$  值,  $dP/dL$  即与  $L$  及流动持续时间均无关
- $L.$  管道的当量长度,  $L_e = L + L.$
- $L.$  管道中任何阀门、管件的当量长度
- $l$  由式(3—46)定义的普兰德 (Prandtl) 混合长度
- $\ln$  以  $e$  为底的对数
- $\log$  以10为底的对数
- $M$  质量流量,  $M = V\rho A$
- $\mathcal{M}$  体积为  $\mathcal{V}$  的体系中的总质量
- $m$  分子量
- $n$  幂定律指数 (流动特性指数) (式1—40或1—48)
- $n$  单位质量颗粒的表面积与直径为  $d..$  的球体表面积之比 (第一章)
- $n'$  由式(1—68)或(5—61)定义的 Metzner-Reed 修正幂定律指数
- $P$  压力
- $P.$  临界压力
- $P.$  由式(2—36)定义的假临界压力
- $P.$  对比压力, 等于  $P/P.$
- $P_{11}$  平行于流动方向的法向应力 (图1-24)
- $P_{22}, P_{33}$  垂直于流动方向的法向应力 (图1-24)
- $\Delta P$  整个长度  $L$  或  $\Delta z$  上的压降
- $p$  管子周长
- $Q$  体积流量
- $R$  管子半径
- $R$  通用气体常数 (式2—5)
- $Re$  雷诺数,  $Re = DV\rho/\mu$

- $Re^*$  摩擦速度雷诺数,  $Re^* = R \times U^* \rho / \mu$  或  $DU^* \rho / \mu$   
 $Re_B$  宾汉雷诺数,  $Re_B = DV \rho / \eta$   
 $Re_{BT}$  由式(5—106)定义的Tomita 宾汉雷诺数  
 $Re_{KC}$  由式(5—125)定义的 Kilbane-Greenkorn 雷诺数  
 $Re_c$  由式(4—63)定义的粗糙雷诺数  
 $Re_{LM}$  基于  $V_M$  的液相雷诺数,  $Re_{LM} = DV_M \rho_L / \mu_L$   
 $Re_M$  基于混合物性质的雷诺数  
 $Re_{MR}$  由式(5—63)定义的 Metzner-Reed 雷诺数  
 $Re_{LCC}$  由式(5—97)定义的 Clapp 幂定律雷诺数  
 $Re_{LTC}$  由式(5—87)定义的 Tomita 幂定律雷诺数  
 $Re_{L1}$  由式(5—29)定义的幂定律雷诺数  
 $Re_{L2}$  由式(5—30)定义的幂定律雷诺数  
 $r$  径向距离  
 $r_s$  宾汉流体或屈服-假塑性体层流塞状物的半径  
 $S$  熵 (式3—26)  
 $S$  由式(4—83)定义的静水压头  
 $\dot{S}$  剪切速率的绝对值, 对于管道中层流来说,  $\dot{S} = -du/dr$   
 $s$  密度比,  $\rho_s / \rho_r$  或  $\rho_s / \rho$   
 $s$  由式(1—71)定义的旋转粘度计的直径比  
 $s_p$  颗粒的比表面, 等于单位体积实际颗粒的表面积 (第一章、第二章)  
 $T$  绝对温度  
 $T$  旋转粘度计的扭矩 (第一章 5-2)  
 $T_b$  正常沸点温度  
 $T_c$  临界温度  
 $T_c$  由式(2—35)定义的假临界温度  
 $T_r$  对比温度,  $T_r = T / T_c$   
 $U^*$  由式(1—31)定义的摩擦速度,  $U^* = \sqrt{\tau_w g_c / \rho} = V \sqrt{f/2}$   
 $U_{M1}^*, U_{M2}^*$  对应于  $V_{M1}$  和  $V_{M2}$  的摩擦速度  
 $u$  局部轴向速度  
 $u^+$  无因次局部速度,  $u^+ = u / U^*$  (式4—38)  
 $V$  截面平均速度  
 $V$  颗粒的上升或沉降速度 (第一章)  
 $V_c$  在浓度为  $c$  的混合物中固体的最终沉降速度  
 $V_c$  在低浓度中固体的最终沉降速度  
 $V_{max}$  最大容许沉降速度 (第一章)  
 $v$  比容, 等于  $1/\rho$   
 $v_c$  在  $T_c$  时液体的克分子体积 (第二章)  
 $v_c$  临界比容 (第二章)  
 $v_m$  克分子体积 (第二章)

- $v$ , 颗粒体积
- $v$ , 长度为  $L$  的管子体积
- $W$  单位质量流体体系所做的功
- $We$  韦伯 (Weber) 准数, 等于  $\rho V^2 D / \sigma g$ .
- $Ws$  韦森堡 (Weissenberg) 准数,  $Ws = (P_{11} - P_{22}) / \tau_{11}$  (式1—57)
- $X$ , 从管道入口到速度分布发展完全处的运行距离 (第四章、第五章)
- $X_{10}, (X_{10}')_{\dots}, X_{1\infty}$  基于  $\theta = 0, \theta'_{\dots}$  和  $\infty$  时流变性的入口段长度 (第六章)
- $x$  从中心到中心的颗粒距离 (第一章)
- $x$  等于  $\tau_1 / \tau_2$  (第五章)
- $Y$  屈服准数,  $Y = D \tau_{1g} / V \eta$  (第五章)
- $y$  从管壁算起的距离,  $y = R - r$
- $y^+$  从管壁算起的无因次距离, 或管壁距离雷诺数,  $y^+ = U^* \times \rho y / \mu$  (式4—39)
- $Z$  由式 (2—6) 定义的压缩因子
- $Z$  由式 (4—5) 定义的 Ryan-Johnson 稳定性参数
- $Z_c$  在临界点的压缩因子
- $Z^{(1)}, Z^{(2)}$  用于 Pitzer 等人压缩因子关系式中
- 的因子 (第二章)
- $\alpha$  动能项中的速度分布校正因数 (式3—20和5—67)
- $\alpha_r$  Riedel 因数 (式2—86)
- $\beta$  由式 (5—134) 定义的部分摩阻系数
- $\gamma$  由式 (5—63) 定义的 Metzner-Reed 稠度,  $\gamma = g \cdot K' 8^{1/3}$
- $\delta$  层流底层的厚度
- $\xi$  从管壁算起的无因次距离, 等于  $y/R$
- $\eta$  宾汉流体的刚度系数 (式1—47)
- $\eta_r$  表观刚度系数
- $\theta$  剪切持续时间 (第一、六章)
- $\theta$  弹簧的偏转或测量装置的扭矩 (第一章5-2)
- $\theta_r$  入口流体的流变龄 (第六章)
- $\theta_r$  流动持续时间 (第六章)
- $\theta_r$  过程的时间规模 (式1—63)
- $\theta_r$  物料的松弛时间 (式1—58)
- $\lambda$  阻力系数 (式1—20)
- $\mu$  流体或连续流动相的粘度
- $\mu_r$  由式 (1—39) 定义的表现粘度
- $\mu_r$  在临界压力、温度下的流体粘度
- $\mu_m$  气相混合物的粘度
- $\mu_0$  低压下纯气体的粘度
- $\mu_{0m}$  低压下气体混合物的粘度
- $\mu_r$  流体颗粒的粘度
- $\mu_\infty$  当  $\dot{S}$  趋于  $\infty$  时  $\mu_r$  的极限值
- $\nu$  运动粘度, 等于  $\mu/\rho$

$\xi$  无因次液膜厚度  
 $\xi$  由式 (2—48) 定义的 Stiel 和 Thodos 气体粘度相关因数  
 $\xi_w$  由式 (2—59) 定义的 Dean 和 Stiel 气体粘度相关因数  
 $\pi$  3.1416  
 $\rho$  密度  
 $\Delta\rho$  密度差, 等于  $\rho_\beta - \rho_\alpha$   
 $\rho_{L,L}$  液相克分子密度  
 $\rho_{V,V}$  蒸汽相克分子密度  
 $\rho_0$  在标准或参考压力  $P_0$  和温度  $T_0$  下的密度  
 $\rho_{L,L}$  饱和液体密度  
 $\sigma$  表面张力或界面张力  
 $\tau$  剪切应力  
 $\tau_y$  宾汉流体或屈服-假塑性流体的屈服值 (式 1—47 或 1—48)  
 $\Phi$  被 Gill 和 Scher 以式 (4—58) 重新定义的 Van Driest 管壁衰减量  
 $\psi$  由式 (1—15) 定义的颗粒形状因数  
 $\psi_L$  由式 (2—71) 定义的颗粒形状因数  
 $\psi_V$  由式 (2—73) 定义的颗粒形状因数  
 $\omega$  由式 (2—10) 定义的 Pitzer 等人的无中心因数  
 $\omega_w$  由式 (2—41) 定义的假无中心因数  
 $\nabla$  在笛卡儿坐标系中分量为

$\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$  的矢量算符

上横线:

—— 表示在短时间内的平均值

肩注:

• 化为无因次形式

' 紊流波动分量 (式 3—34)

脚注:

av 表示平均值

c 表示层流与紊流之间的过渡

c 表示临界压力与临界温度条件 (第二章)

E 表示入口段

eff 表示有效的

F 表示流体 (气体或液体)

f 表示不可逆或摩擦分量

FRW 表示完全粗糙壁紊流 (第四章)

G 表示气相

i 表示界面条件

i 表示分量 i

L 表示液体

l 表示层流条件或层流底层

M 表示混合物

m 表示克分子 (第二章)

m 或 max 表示最大值 (第四、五章)

min 表示最小值

0 表示管道中心, 即该处  $r=0$

0 表示参考或标准压力、温度, 或密度