

复杂混合物在管道中的流动

下 册

【加拿大】 G.W.戈威尔 K.阿济兹 著

权忠興 译 陈家琅 校

石油工业出版社

内 容 提 要

全书共有十二章,译本分为上、下两册。下册包括第七章至第十二章,论述了多相非均匀体系——包括气-液、液-液、气-固和液-固相混合物的基本概念,以及多相混合物在管道中垂直和水平流动的最重要的应用实例和各种流型,并综合介绍了包裹在管道中流动的知识。本书是一本较全面的理论专著。

The Flow of Complex Mixtures in Pipes

G.W.GOVIER K.AZIZ

VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY 1972

复杂混合物在管道中的流动

下 册

〔加拿大〕G.W.戈威尔 K.阿济兹著

权忠奥 译 陈家琅 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

轻工出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

850×1168毫米32开本16³/8,印张416千字 印1—2,250

1986年3月北京第1版 1986年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2556 定价: 3.10元

目 录

符号一览表 (续)	(1)
第七章 多相混物流动的基本概念	
第一节 引言	(9)
第二节 一般两相体系的描述	(10)
第三节 连续性方程	(12)
3-1 总体系的连续性方程	(12)
3-2 各单独组分的连续性方程	(16)
第四节 动量方程	(17)
第五节 总能量方程	(19)
第六节 机械能量方程	(21)
6-1 根据动量方程的推导	(21)
6-2 根据总能量方程的推导	(24)
6-3 不可逆量 dP_i	(25)
第七节 滑移或滞留效应	(29)
7-1 平均滑移速度	(29)
7-2 平均就地速度比 (滞留率或滑移率)	(30)
7-3 Bankoff因数K和Armand因数C	(32)
7-4 影响滞留的因素	(33)
7-4-1速度分布和浓度分布的影响	(34)
7-4-2两相间局部相对速度的影响	(35)
7-4-3滞留随管长的变化	(39)
参考资料	(42)
第八章 气-液及液-液混合物在管道中的垂直流动	
第一节 引言	(44)
第二节 典型的流型、滞留和压力梯度	(45)
2-1 流型	(45)
2-2 滞留	(53)
2-3 压力梯度	(53)

第三节 经验的整体相关规律	(58)
3-1 流型	(59)
3-2 滞留	(62)
3-3 压力梯度	(65)
3-3-1 不涉及估算就地浓度或密度的分析或相关规律	(65)
3-3-2 涉及估算就地浓度或密度的分析或相关规律	(77)
3-3-3 Orkiszewski 的预计方法	(87)
第四节 泡状流型	(88)
4-1 概述	(88)
4-2 在浸没小孔处泡的产生	(90)
4-3 在静止液相中单个气泡的上升速度	(92)
4-4 管壁的影响	(96)
4-5 气泡之间径向和轴向相互作用的影响	(99)
4-5-1 径向相互作用	(99)
4-5-2 轴向相互作用——对稳定化的探讨	(101)
4-6 在静止液相中连续气泡群的上升速度	(102)
4-7 在流动液相中气泡的断面分布	(105)
4-8 在流动液相中气泡速度的断面分布	(105)
4-9 在流动液相中气泡的平均绝对上升速度	(107)
4-10 泡状流型的整体力学	(111)
4-11 流型详情	(112)
4-12 滞留	(114)
4-13 压力梯度	(115)
4-14 从泡状流向段塞流的转变	(115)
第五节 段塞流型	(117)
5-1 概述	(117)
5-2 整体连续性的考虑	(118)
5-3 Taylor 泡在静止液相中的流动	(122)
5-4 Taylor 泡在流动液相中的流动	(128)
5-5 液相段塞中的小泡	(130)
5-6 泡长度和段塞长度 (泡间隔距离) 之间的关系	(130)

5-7 泡之间的轴向相互作用	(131)
5-8 环绕着Taylor泡的液膜流动	(131)
5-9 流型详情	(136)
5-10 滞留	(137)
5-11 压力梯度	(138)
5-12 从段塞流向泡沫流的转变	(139)
第六节 泡沫流型	(142)
第七节 环雾流型	(144)
7-1 概述	(144)
7-2 整体连续性的考虑	(146)
7-2-1 纯环状流——无载带情况	(146)
7-2-2 环雾流	(147)
7-3 动量的考虑	(148)
7-3-1 纯环状流——无载带情况	(148)
7-3-2 环雾流——载带的影响	(159)
7-4 流型详情	(172)
7-4-1 纯环状流——无载带情况	(172)
7-4-2 环雾流	(172)
7-5 滞留	(173)
7-6 压力梯度	(174)
第八节 推荐设计方法	(175)
8-1 概述	(175)
8-2 入口影响	(176)
8-3 弯头和管件的影响	(177)
8-4 位能或静液头的影响	(177)
8-5 加速度或动能的影响	(177)
8-6 不可压缩混合物 ($\Delta P < 0.10 P_s$ 时的液-气混合物)	
稳态流动的流型、滞留和压力梯度	(177)
8-6-1 按一般方法预测	(177)
8-6-2 按特定流型方法进行校核	(178)
参考资料	(179)
第九章 气-固及液-固混合物在管道中的垂直流动	

第一节	引言	(186)
第二节	典型数据	(189)
2-1	流型	(189)
2-2	滞留	(194)
2-3	压力梯度	(195)
第三节	一般相关规律	(202)
3-1	流型	(202)
3-2	滞留	(203)
3-3	压力梯度	(210)
3-3-1	概述	(210)
3-3-2	不涉及估算就地浓度或密度的分析或相关规律	(211)
3-3-3	涉及估算就地浓度或密度的分析或相关规律	(216)
3-3-4	机械学方法	(227)
第四节	推荐设计方法	(233)
4-1	概述	(233)
4-2	入口影响	(234)
4-3	弯头和管件的影响	(234)
4-4	位能或静液头的影响	(234)
4-5	加速度或动能的影响	(234)
4-6	不可压缩混合物(液-固混合物及 $\Delta P < 0.10 P_1$ 时的 气-固混合物) 稳态流动的流型、滞留和压力梯度	(235)
参考资料		(236)
第十章	气-液及液-液混合物在管道中的水平流动	
第一节	引言	(239)
第二节	典型的流型、滞留和压力梯度	(240)
2-1	流型	(240)
2-2	滞留	(249)
2-3	压力梯度	(251)
第三节	经验的整体相关规律	(255)
3-1	流型	(255)

3-2	滞留	(263)
3-3	压力梯度	(271)
3-3-1	Lockhart和Martinelli的以及有关的相关规律	(271)
3-3-2	Bertuzzi、Tek和Poettmann的相关规律	(281)
3-3-3	Baxendell的相关规律	(282)
3-3-4	Hoogendoorn的以及有关的相关规律	(283)
3-3-5	Dukler、Wicks和Cleveland的相关规律	(286)
3-3-6	Chawla的相关规律	(288)
3-3-7	其他相关规律	(288)
3-4	管道倾斜度的影响	(289)
第四节	泡状流型	(295)
4-1	概述	(295)
4-2	整体连续性的考虑	(297)
4-3	近似处理	(298)
4-3-1	泡之间的相对速度	(298)
4-3-2	滞留	(299)
4-3-3	压力梯度	(299)
4-4	Brown和Kranich对分散泡的处理	(300)
4-5	其他相关规律	(301)
4-6	向层状流型或段塞流型的转变	(301)
第五节	层状流型	(301)
5-1	概述	(301)
5-2	整体连续性的考虑	(302)
5-3	动量的考虑	(305)
5-3-1	层流-层流情况	(306)
5-3-2	层流-紊流或紊流-紊流情况	(310)
5-4	流型、滞留和压力梯度	(315)
5-5	向环雾流型和波状流型的转变	(316)
第六节	波状流型	(317)
第七节	段塞流型	(318)
7-1	概述	(318)

7-2	整体连续性的考虑	(319)
7-3	整体动量的考虑	(320)
7-3-1	Kordyban模式	(320)
7-3-2	Hubbard和Dukler模式	(321)
7-4	其他相关规律	(328)
7-5	流型、滞留和压力梯度	(329)
7-6	向环雾流的转变	(330)
第八节	环雾流型	(331)
8-1	概述	(331)
8-2	整体连续性的考虑	(333)
8-2-1	纯环状流——无载带情况	(333)
8-2-2	环雾流	(333)
8-3	动量的考虑	(333)
8-3-1	同心膜状流动——无载带情况	(334)
8-3-2	膜厚度沿周边变化的情况	(343)
8-3-3	膜的波动	(345)
8-3-4	载带效应	(349)
8-4	其他相关规律	(351)
8-5	流型详情	(351)
8-6	滞留	(353)
8-7	压力梯度	(353)
第九节	推荐设计方法	(353)
9-1	概述	(353)
9-2	入口影响	(354)
9-3	弯头和管件的影响	(354)
9-4	位能或静液头的影响	(354)
9-5	加速度或动能的影响	(354)
9-6	不可压缩混合物($\Delta P < 0.10P_1$ 时的气-液混合物)	
	稳态流动的流型、滞留和压力梯度	(354)
9-6-1	按一般方法预计	(354)
9-6-2	按特定流型方法进行校核	(355)
参考资料		(357)

第十一章 气-固及液-固混合物在管道中的水平流动	
第一节 引言	(362)
第二节 典型的流型、滞留和压力梯度	(364)
2-1 概述	(364)
2-2 流型	(366)
2-3 滞留	(376)
2-4 压力梯度	(379)
第三节 一般相关规律	(387)
3-1 概述	(387)
3-2 流型	(387)
3-2-1 简述	(387)
3-2-2 转变速度	(389)
3-2-3 速度分布和浓度分布	(408)
3-3 滞留	(413)
3-4 压力梯度	(415)
3-4-1 简述	(415)
3-4-2 所有的流型	(418)
3-4-3 浓度对称分布流型	(428)
3-4-4 浓度非对称分布流型	(434)
3-4-5 移动床和固定床流型	(439)
第四节 推荐设计方法	(455)
4-1 概述	(455)
4-2 入口影响	(455)
4-3 弯头和管件的影响	(456)
4-4 位能或静液头的影响	(456)
4-5 动能或加速度的影响	(457)
4-6 不可压缩混合物(液-固混合物以及 $\Delta P < 0.10P_1$ 时的气-固混合物) 稳态流动的流型、滞留和压力梯度	(457)
4-6-1 按一般方法预计	(457)
4-6-2 按特定流型方法进行校核	(458)
参考资料	(459)

第十二章 包裹在管道中的流动

第一节 引言	(464)
第二节 典型的流型、滞留和压力梯度	(466)
2-1 流型	(466)
2-2 滞留	(469)
2-2-1整体连续性的考虑	(469)
2-2-2典型的滞留数据	(471)
2-3 压力梯度	(476)
第三节 一般分析和相关规律	(478)
3-1 球形包裹	(478)
3-2 同心的圆柱形包裹	(479)
3-2-1速度和滞留分析——层流情况	(479)
3-2-2速度和滞留分析——紊流情况	(481)
3-2-3压力梯度分析——层流及紊流情况	(483)
3-3 非同心的圆柱形包裹	(487)
3-3-1层流流动——以间隙表示的分析	(487)
3-3-2层流和紊流流动——近似的力平衡分析	(495)
第四节 初步的推荐设计方法	(508)
4-1 概述	(508)
4-2 入口影响	(508)
4-3 弯头和管件的影响	(508)
4-4 位能或静液头的影响	(508)
4-5 加速度或动能的影响	(509)
4-6 包裹稳态流动的压力梯度和滞留	(509)
参考资料	(510)

符号一览表 (续)

表中规定了贯穿本书中译本下册(第七章至第十二章)最常用符号的意义。凡在上册表中已列出过的符号一般不再重复,请读者参照上册。

- A_b α 与 β 相之间相界面的面积(第七章)。
- A_b Taylor泡的横截面积(第八章)。
- A_c 气相芯子的横截面积。
- A_c 外界面的面积, $A_c = A_1 + A_2 + A_w$ (第七章)。
- A_f 液膜的横截面积。
- A_G 气相占据的管道横截面积。
- A_L 液相占据的管道横截面积。
- A_S 固相占据的管道横截面积。
- A_u 固相床层上面的管道横截面积。
- C 在入口(或出口)混合物中一相的体积分数。
- C_L 抬升系数(式12—70)。
- C_w 固相在入口(或出口)混合物中的质量分数, $C_w = M_s/M_M$
- C_{w1}, C_{w2} 分别为在悬浮物中流动的和在床层中的固相质量分数(第十一章3—3—2)。
- C_o 由式(7—102)定义的分布系数。
- c 无因次间隙, 管壁与包裹壁之间最小距离同管道直径之比。(第十二章)
- D_G 气相占据管子截面的当量直径。
- D_L 液相占据管子截面的当量直径。
- D 小孔直径。
- D_s 固相占据管子截面的当量直径。
- d_{85} 85%重量的颗粒直径均比其小的颗粒直径。
- d_s 与颗粒或泡同体积的球体直径。
- E α 相的截面平均就地体积分数。

$\bar{E}_0$ 在有限管长内 E_0 的平均值。
 E_0 Eotvos 准数, $E_0 = g \Delta \rho d^3 / \sigma$ 或为 $g \Delta \rho D^3 / \sigma$ 。
 E_H 由式 (10—64) 定义的液压头因子。
 e 在气芯中载带液相的就地体积分数 (第八、十章)。
 e_m 由式 (11—40) 定义的动量传递系数。
 e_s 由式 (11—38) 定义的沉淀传递系数。
 F' 由式 (8—218) 和 (8—219) 定义的 Levy 函数。
 Fr 弗鲁德准数, 形为 $V / \sqrt{gD}$ 。
 $\hat{Fr}$ 弗鲁德准数, 形为 $V^2 / gD = Fr^2$ 。
 Fr_b 气泡弗鲁德准数, $V_b / \sqrt{gD}$ 。
 Fr_M Gaessler 采用的弗鲁德准数, $V_M / \sqrt{gD}$ (第十一章)。
 $\hat{Fr}_M$ 弗鲁德准数, V_M^2 / gD 。
 Fr_0 Gaessler 采用的弗鲁德准数, $V_0 / \sqrt{gD}$ (第十一章)。
 $Fr_{s\alpha}$ 基于 α 相表观速度的弗鲁德准数, $V_{s\alpha}^2 / gD$ 。
 Fr_a 基于 α 相平均速度的弗鲁德准数, V_a^2 / gD 。
 Fe 在气相中载带的流动液相的分数 (式 8—163)。
 f_{ann} 由式 (12—62) 定义的环形空间摩阻系数。
 f_B Baxendell 摩阻系数, $f_B = \frac{1}{2} f_{BTF}$ (式 10—51)。
 f_{BTF} 由式 (10—50) 定义的 Bertuzzi, Tek 和 Poettmann 摩阻系数。
 f_{eff} 由式 (12—79) 定义的有效摩阻系数。
 f_{PC} 由式 (8—8) 定义的 Poettmann-Carpenter 摩阻系数。
 f_R 按照式 (8—22) 定义的 Ros 摩阻系数。
 f_s 由式 (9—53)、(9—58) 或 (11—65) 定义的固相摩阻系数。
 f_{SN} 由式 (8—184) 定义的 Shearer-Nedderman 摩阻系数。
 f_{sa} 在 $Re = DV_{sa}\rho_a/\mu_a$ 和适当的相对粗糙度下确定的单相摩阻系数。
 f_{LPO} 、 f_{LPB} 、 f_{LPM} 由式 (7—63)、(7—64) 和 (7—65) 定义的两相摩阻系数。
 H 滞留率, $H = V_a/V_b = C_a E_b / C_b E_a$ (式 7—19)。

He Hedstrom 准数 $He = D^2 \tau_0 \rho g_0 / \eta^2$.
 h 水平管道中下层相的最大深度。
 h_G 水平管道中气-液界面上方气相的高度。
 i_w 水单独以速度 V_M 流动时的压力梯度, $i_w = (\Delta P / \rho_w \Delta z)_w$, 每英尺长度上的英尺水柱。
 j_M 混合物的局部体积流通密度, $j_M = j_a + j_b$, (式7—91)。
 K 由式(7—83)定义的 Bankoff 因数。
 $\mathcal{K}'$ von Kármán 常数, $\mathcal{K}' = l/y$, 对于气-固流动它是 $\mathcal{K}'$ 的函数。
 K_z' 由图(8—37)给出的管壁校正因子。
 k 液膜的有效粗糙度。
 k 按式(8—15)定义的气-液质量比。
 k 包裹与管道直径比(第十二章)。
 ΔL 管道中包裹之间从端到端的间距(第十二章)。
 L_s Taylor 泡的长度。
 L_G 包裹的长度(第十二章)。
 L_S 液相段塞的长度。
 l_v 对速度的普兰德混合长度(第八章)。
 $l_{\rho u}$ 对动量的普兰德混合长度(第八章)。
 M' 由式(8—12)定义的伴随每桶原油的流动混合物的质量。
 M_L 载带液相的质量流量。
 N_D 由式(10—11)定义的 Ros 直径准数。
 N_L 由式(10—13)定义的 Ros 液相粘性准数。
 N_{LB} 由式(8—113)定义的 Brown 液相粘性准数。
 N_w 由式(8—115)定义的 Wallis 液相粘性准数。
 N_S 由式(8—19)定义的 Ros 滑移速度准数。
 N_{VG} 由式(10—10)定义的 Ros 气相速度准数。
 N_{VL} 由式(10—9)定义的 Ros 液相速度准数。
 N_L 按式(11—20)定义的流型指数。
 n 在一个水平面上泡的平均数目(第八章)。
 n 小孔数目(式8—31)。
 P_B Bagnold 弥散力(式11—46)。
 ΔP^* , ΔP_G^* , ΔP_L^* 由式(8—195)、(8—196)和(8—197)定

义的无因次压降。

dP_f 、 ΔP_f 由式 (7—57) 或 (7—60) 定义的摩擦压降。

ΔP_f^* 由式 (7—73) 或 (7—74) 定义的摩擦压降。

dP_{fa} 、 ΔP_{fa} α 相以 V_a 速度单独流动的摩擦压降。

dP_{fsa} 、 ΔP_{fsa} α 相以 V_{sa} 速度单独流动的摩擦压降。

ΔP_{GM} 如果气相以质量流速 G_M 单独流动时将产生的压降。

ΔP_{HH} 由式 (7—72) 定义的压降静液头分量。

ΔP_{KE} 由式 (7—60) 定义的动能或加速度影响造成的压力变化。

ΔP_{LM} 如果液相以质量流速 G_M 单独流动时将产生的压降。

ΔP_{PE} 由式 (7—60) 定义的位能所造成的压力变化。

ΔP_s 由式 (9—52) 定义的因固相存在而造成的附加压降。

ΔP_{sa} α 相以 V_{sa} 速度单独流动时的总压降。

ΔP_τ 在长度 L 上的总压降 (式9—4)。

Q_c 载带液相的体积流量。

Q_f 膜中液相的体积流量。

$\mathcal{R}'$ 由式 (9—2) 定义的质量流量比。

Re_{aaa} 由式 (12—65) 定义的环区雷诺数。

Re_{BTP} 由式 (8—15) 定义的 Bertuzzi, Tek 和 Poettmann 雷诺数。

Re_b 按式 (8—39) 定义的气泡雷诺数。

Re_{EA} 由式 (10—3) 定义的 Eaton 等人的雷诺数。

Re_f 按式 (8—126) 定义的液膜雷诺数。

Re_H 由式 (8—5) 定义的 Hughmark 雷诺数。

R_p 由式 (12—39) 定义的压力梯度比。

R_p^* 同心流动包裹的压力梯度比。

Re_{PC} 由式 (8—14) 定义的 Poettmann-Carpenter 雷诺数。

Re_{SF} 表观流体相雷诺数, $DV_{SF}\rho_F/\mu_F$ 。

Re_{SG} 表观气相雷诺数, $DV_{SG}\rho_G/\mu_G$ 。

Re_{SL} 表观液相雷诺数, $DV_{SL}\rho_L/\mu_L$ 。

Re_a 基于 a 相平均速度的雷诺数, $DV_a\rho_a/\mu_a$ 。

$\mathcal{R}_s'$ 第八章7-3-2段定义的 Wicks 和 Dukler 载带准数。

R_L 由图 (8—64) 给出的密度比 ρ_L/ρ_a 的 Levy 函数。

R_V 速度比, $R_V = V_C/V_M$ (第十二章).
 r_i 环状流中液-气界面的半径.
 S 按式 (11—101) 定义的 Wicks 改进雷诺数.
 S 由式 (7—76) 定义的滑移速度.
 S_b 泡之间心到心的轴向间距.
 U_{M1}^* 、 U_{M2}^* 对应于 V_{M1} 、 V_{M2} 的摩擦速度.
 $\mathcal{V}'$ 被混合物占据的总体积, $\mathcal{V}' = \mathcal{V}'_a + \mathcal{V}'_p$.
 V_b 主流中泡的平均速度.
 V_{b0} 在静液中泡的最终上升速度.
 V_c 由式 (12—4) 定义的包裹速度.
 V_c 载带液滴的平均速度.
 V_f 环雾流中液膜的平均速度.
 V_L 由式 (12—5) 定义的环绕包裹的液相平均速度.
 V_{L1} V_L 的启动下限值 (第十二章).
 V_M 混合物的平均速度, $V_M = V_{sa} + V_{sb}$.
 V_{ML} 抬升速度 (第十二章).
 V_{M1} V_M 的启动下限值 (第十二章).
 V_{M1} 在该值以上颗粒即处于对称悬浮的平均混合物速度 (第十一章).
 V_R “滑动”速度 (第十二章 3-2-2 段).
 V_{sa} 、 V_{sb} 、 V_{sf} 、
 V_{sg} 、 V_{sl} 、 V_{ss} } 由第二个脚注指示的某项表观速度—该相体 积
 流量除以总截面积.
 V_{sf}^* 由式 (8—145) 定义的无因次表观液膜速度.
 V_{sg}^* 由式 (8—146) 定义的无因次表观气相速度.
 V_{sg}' 在泡状流-段塞流过渡时的表观气相速度.
 $\mathcal{V}_a$ α 相占据的体积.
 V_{a1} 由式 (7—103) 定义的 α 相相对于混合物的按体积分数加权平均
 的偏差速度.
 v_b 一个泡的体积.
 v_{b0} 在产生位置上的平均泡体积 (式 8—31).
 v_{b0}^* 外推到零产生频率时的 v_{b0} 值.
 v_{b01} v_{b0} 的理想值 (式 8—32).
 v_f 环绕 Taylor 泡的液膜体积.

v_r 颗粒体积。
 v_r 由式 (7—94) 定义的局部滑移速度。
 v 一个液相段塞的体积。
 v 管长 L 段的体积。
 $v_{a,}$ 由式 (7—95) 定义的 α 相局部偏差速度。
 We 由第八章 7-3-2 段定义的气相临界韦伯准数。
 We_{EA} 由式 (10—4) 定义的 Eaton 等人的韦伯准数。
 W^* 按式 (8—183) 定义的无因次液相流量。
 W_B 一个包裹的漂浮重量, $W_B = (\pi/4) d^2 L (\rho_c - \rho) (g/g_0)$ (第十二章)。
 W_c 一个包裹的重量, $W_c = (\pi/4) d^2 L \rho_0 (g/g_0)$ (第十二章)。
 W_L 环区流体的重量, $W_L = (\pi/4) L (D^2 - d^2) \rho (g/g_0)$ (第十二章)。
 w 层状流中界面的深度 (式 10—89)。
 X Govier 流体性质参数, $X = (\rho_G/\rho_A)^{1/3} Y$ (第八章 3-1 段)。
 X 由式 (10—5) 定义的 Lockhart 和 Martinelli 参数。
 X' 由式 (8—3) 定义的 Hughmark 和 Pressburg 参数。
 Y 由式 (10—114) 定义的液相铲起速率。
 Y Govier 的流体性质参数, $Y = (\rho_L \sigma_{WA}/\rho_W \sigma)^{1/4}$ (第八章 3-1 段)。
 Y White 和 Beardmore 性质参数, $Y = g \mu_L^4 / \rho_L \sigma^3$ (第八章 5-3 段)。
 y 由界面波动或波纹造成的“粗糙”高度。
 $\mathcal{E}'$ 由式 (8—4) 定义的 Hughmark 相关因子。
 Δz^* 上坡的高程变化式 (10—64)。
 Δz_0 垂直流动中泡的轴向心到心间距。
 Δz_c Δz_0 的临界值式 (8—58)。
 α 表示某一相, 一般指稀疏相 (第七章)。
 β 表示某一相, 一般指稠密相 (第七章)。
 β 由式 (11—50) 定义的 Gaessler 比例因数。
 β^* 由式 (11—56) 定义的 Gaessler 物料常数。
 $\mathcal{Z}$ 由式 (11—31) 定义的 Zenz 流体-颗粒性质函数。
 δ 液膜厚度, 一般为平均值。
 δ^* 按式 (8—127) 定义的无因次膜厚度。
 δ^+ 由式 (8—181) 定义的无因次膜厚度。

ε 以管道半径分数表示的包裹与管道轴线之间的距离, 即不同心度 (第十二章)。

$\varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta$ α 或 β 相的局部就地体积分数。

ε_c 由式 (10—16) 定义的 Chawla 因数。

η 在式 (12—54) 中的比例系数。

η_m 滑动摩擦系数。

η_s 静摩擦系数。

θ 管轴同水平线之间的夹角 (向上流动为正, 向下流动为负)。

$\theta_s = \frac{\pi - r}{2}$ 由图 (11—58) 定义的夹角。

λ 由式 (10—1) 定义的 Baker 流体性质参数。

ν_s 由式 (9—73) 定义的涡旋运动粘度。

ξ 无因次膜厚, δ/R 。

ρ_T 按式 (11—57) 定义的流体和悬浮固相混合物的整体密度。

Φ 由式 (11—137) 定义的 Graf 和 Acaroglu 输送参数。

ϕ_s 按式 (11—57) 定义的 Gaessler 床层填实因数。

ϕ_α, ϕ_β Lockhart 和 Martinelli 参数, 分别为 $\sqrt{dP_f/dP_{f,\dots}}$, $\sqrt{dP_f/dP_{fs\beta}}$ 式 (7—61) 和 (7—62)。

Ψ 由式 (11—136) 定义的 Graf 和 Acaroglu 剪切强度参数。

Ψ 由式 (10—2) 定义的 Baker 流体性质参数。

Ψ 由式 (11—101) 定义的 Wicks 相关因数。

ω 按式 (11—31) 定义的 Zenz 流体-颗粒性质函数。

ω 泡产生频率式 (8—31)。

肩注

表示其于式 (7—73) 或 (7—74) 的 ΔP_f 。

脚注

ann 表示环状。

asym 表示非对称悬浮流动中的颗粒。

b 表示固相床层。

b 表示泡。

c 表示气相芯子 (第八、十章)。

c 表示包裹 (第十二章)。