

化学工程中的两相流

[美] 大卫·阿兹贝尔 编著

化学工业出版社



化学工程中的两相流

〔美〕 大卫·阿兹贝尔 编著

沈庆阳 戴擎镰 单寅生 孙光林 译

陈甘棠 审校

化学工业出版社

本书是论述化工中两相流的一本专著。着重用解析的方法来
分析气-液和液-固系统，以得出尽可能具有通用性和实用性的结
果，充分反映了作者本人的成就和风格。

全书分三篇十章。第一篇共六章，叙述两相流的流体力学，
包括一般的基本概念、单气泡和密集鼓泡、动态两相流、液体的
夹带和固体粒子在液体中的运动等。第二篇共两章，分别讲述
气-液和液-固相间的传质问题。第三篇的两章则分别介绍两相流
的理论在烃类液相氧化和微生物反应过程中的应用。

本书的译者为：1~4章，沈庆阳；5，6章，戴擎镰；7，8章，
单寅生；9，10章，孙光林。全书由陈甘棠审校。

本书可作为有关高等学校研究生的教材，也可作为有关科研
人员及工程技术人员的自学或参考用书。

David Azbel

Two-Phase Flows in Chemical Engineering

Cambridge University Press 1981

化学工程中的两相流

沈庆阳 戴擎镰 单寅生 孙光林 译

陈甘棠 审校

责任编辑：苗延秀
徐世峰

封面设计：任 辉

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本850×1168¹/₃₂印张10¹/₈字数274千字印数1—2,120

1987年11月北京第1版1987年11月北京第1次印刷

统一书号15063·3934定价2.70元

译者前言

两相流广泛存在于自然界和许多工程技术之中，在化工方面尤其具有其多样性和复杂性，这主要是由于伴随着两相的流动，往往还同时存在着相间的物质传递或化学反应。对于这样复杂的问题，目前实用上还往往依靠大量的经验关联方法来解决。然而科学的发展要求人们能对气泡、液滴和固体颗粒这种“细”观物质的运动进行分析，并在此基础上深入阐明两相流的宏观性质。在这一方面，尽管本书的涉及范围还相当有限，但却充分反映了作者本人在把工程实际问题与基础理论的研究结合起来方面所作的努力和取得的重要成就。我们期望本书的翻译出版将对我国的科技工作者在把他们的工程研究引向深入和用基础理论来指导实践方面起到重要的促进作用。

译者

1984年5月于杭州

前 言

近三十年来化工领域两相流的流体力学、传质和传热过程中的诸问题已得到广泛研究。在写本专著时，我并不企图包罗全部现已有的专门解，也不图在广度和深度方面概括无遗。所考虑到的问题在某种程度上乃是反映迄今我在研究气-液和固-液系统离散流方面的发展。大多数的解析方法是为了能具有一般性和得出对工程中感兴趣的参数有实用性的结果而选择的。

我希望这本专著既可用作研究生课程的教材，也对那些不仅要解决涉及两相流的流体力学和传质的问题，而且又想对更先进的分析方法有更深了解的工程师在自修中 useful。本书也可以作为进一步深入研究的出发点。

这本书分成三篇。第一篇是两相流的流体力学，包括六章。

第一章综述了两相流的现象和讨论了为以后处理更复杂问题中所需的基本概念。

在第二章里，我考虑了在宽广的范围内，单孔鼓泡这简单情况下的气泡形成现象，以及气泡串流区到连续气流(喷射)区的过渡。

第三章是关于大量鼓泡时的流体动力学的问题。在已有的各向同性湍流理论的基础上导出了一个计算受约束流动中气泡上升速度的方程。得出了由于液体和气体间动态的相互作用导致气泡的破裂和聚并而形成的气泡尺寸。在考虑到气泡系统的多分散性(用分布函数作总体的统计)的基础上研究了相际接触表面。

第四章论及动态两相流的形成。因为一相流动的流体力学方程不能用于两相流动计算(特别是气体分散在液体中的系统)，我发展了一个描述动态两相层内物理机理的理论和各个参数对该层形成的影响。

提出了气泡层的最小总能量的原理，这个能量被认为是沿层高

的气体密度分布的函数。从这个原理出发，我推导出适用于计算气泡层的流体动力学特性的方程。

气泡层内不均匀的速度场影响粘性力的强度并导致对流加速和惯性效应。把这些影响计及在内，考虑了在工业用的鼓泡过程中的物理模型：相当于没有粘性的理想气泡层的“快”鼓泡，具有粘性力、浮力和表面力的“慢”鼓泡和考虑到粘性力和惯性力综合影响的“混合”鼓泡。

第五章分析了两个问题：锥体稳定性和液滴夹带。对于低粘度液体，在鼓泡流动过程的气速范围内，开式气体喷射锥体的型态实际上是不能实现的。

从均匀的各相同性的湍流模型提出确定液体夹带量的方程，作为确定鼓泡器的正常操作条件的判断准则。我也研究了对在蜂窝状泡沫的条件下夹带机理的简化模型和在此情况下计算液体夹带量的方程。

在第五章中，我还叙述了在鼓泡层液滴逸出速度的分布是正态的并与液滴大小无关的假定的基础上得出的一个夹带的统计模型。

在第六章中，我研究了固体粒子在液体里稳定和均匀运动的问题。我考察了在稀薄悬浮液里系统壁面对粒子速度的影响并获得了悬浮于湍流中的微粒子和大粒子运动的基础方程。

第二篇是两相流的质量传递，包括第七章和第八章。

在第七章里，给出了对气-液系统质量传递动力学参数的研究结果。再一次运用发展了的各向同性湍流的概念，提出了确定一个单气泡的速度和悬浮在湍流液流里的气泡群速度的方程。应用这些方程，可计算向表面的扩散流量和从气泡群来的扩散流量，包括对流量随气泡尺寸分布的考虑在内。

在第八章里，我研究了在液-固颗粒系统的湍流传质现象。利用各向同性湍流的概念，可以获得计算固体颗粒速度的方程，这些颗粒的尺寸可显著地小于或大于湍流的内部尺度。根据扩散边界层理论，获得了计算这些颗粒的传质系数的方程，计算中考虑到了它们随粒子尺寸的分布。

第三篇是化学和生化过程中的应用，包括两章。

第九章是关于鼓泡型化学反应器的设计。液相氧化反应被认为是二级的支化终止反应。这使我能用由不同常数的数值来表征的单元反应的组合来描述这复杂的烃类氧化化学过程。

我还研究了氧分压对氧化速率和焦油生成速率的影响，并以一个无量纲的过程参数的函数形式表示。

为了消除分子氧的传递施加于过程的扩散限制，对液相里烃氧化的宏观动力学也作了研究。

考虑气体反应物的物料平衡，我建立了一个在液相内进行烃氧化的鼓泡反应器的设计方法。提供了在动力学区的工业过程的放大方法。

在第十章里，这些方法用来考察微生物反应器（发酵罐）的设计。我表明了微生物的培养是和强烈搅拌有关的，强烈的搅拌使微生物在培养介质主体内均匀分布、使空气分散并传递到细胞表面以供利用。搅拌亦促使新陈代谢的产物从反应区移去。通过对细胞内过程的分析，证明了向反应表面的质量传递是整个过程的控制阶段。

为确定有机体的生长比速率，提出了一个方程式。它是介质的物理性质、颗粒的尺寸和密度、溶液主体中物质的浓度、液体速度和产生湍流的设备特征尺寸的函数。基于这些研究提出了对生化反应器的设计方法。

本专著中包括了一些实际方面的东西作为其整体的一个部分，它是对化学工程基础理论的补充而不是替代。

作为个人的情况，我愿和读者谈一下这本书的历史。本专著最初是在作者为申请离开苏联等候出国签证而被除职后，在苏联写就的。手稿是一页一页地通过不同途径送到伦敦 Q.C.M.P 的 Greville Janner 先生那里，再由他转给皇家协会会员和伊里莎白学院的院长 Kenneth Denbeigh 教授。当我还留在莫斯科时，Janner 先生和 Denbeigh 教授便鼓励和帮助我，为这本书找到了一个出版者。万分感谢他们，因为没有他们的帮助这本书将是不可能问世的。

也应感谢帮助把原稿传递到英国去的那许多人，但不幸需要隐其姓名。

我还要感谢编辑Philip Kemp-Pritchard先生，他帮助我使此专著完成成为最终文本。

对于明尼苏达大学的Edward Fletcher 和 Herbert Isbin 教授对我写手稿的帮助和提出的宝贵建议，以及明尼苏达大学和纽约州立大学石溪分校为支持我的工作而提供的尽可能的实际帮助深表感谢。

我还要感谢给予我帮助的密苏里大学Rolla 分校化工系的教师们。我感谢M. E. Findley, A. I. Liapis, G. K. Patterson和D. J. Siehr 教授对手稿提出的有益的意见。我特别要感谢化工系主任J. W. Johnson 教授他阅读了全部原稿并提出了有益的建议。

符号一览表

A	局部横截面积, 界面接触面积	Ho	谐时数
A_b	气泡的横截面积	K	液滴自由上升速度校正因子; 呼吸系数
A_m	膜的横截面积	K_E	能量系数
A_L	实验室反应器的横截面积	K_f	摩擦因子
Bo	<i>Bond</i> 数	K_{tb}	再生催化剂
C_D	阻力系数	K_{tox}	氧化催化剂
C_w	常数, 在数值上等于最大反应速率	L_d	克服阻力所作的功
D	管直径; 扩散系数	L_K	气泡的动能
D_m	混合器直径	L_σ	气泡的表面张力能
D_0	锐孔直径	M	邻-二甲苯的加料; 质量流量/混合物面积; 质量扩散速率
D_{turb}	湍流扩散系数	M_b	带走的液体质量/气泡
$\overline{D}$	纵向混合系数	M_c	催化剂质量
E	注入气体的总动能; 混合物的总能量; 频谱能量密度/质量/波数	M_f	液滴质量
E_b	气泡的能量	M_g	气体质量流量
E_f	液体的能量	M_{ij}	质量通量张量
Eu	欧拉数	N	金属的价; 气泡数/时间; 气泡的总数; 涡流数/质量/波数; 细胞数
F_b	浮力	N_{max}	最大的细胞数
F_D	阻力	N_0	初始的细胞数
F_σ	表面张力	N_c	液体锥数
F_0	形状阻力	N_s	<i>Stokes</i> 数
Fo	傅立叶扩散数	P	功率输入/容积; 功率消耗; 空间因子
Fr	弗鲁德数		
Ga	伽利略数		

P_{O_2}	氧分压	Y_c	与高度无关的带出物组份/ 面积/时间
Pe	彼克列数	Y	带出系数/面积/时间
Q	气体流量; 粒子体积流量	Z	碰撞因子
Q_c	液体体积; 液体流量	a	比表面积
Q'	氧溶解速率	a_n	涡流加速度
R	液体锥的当量半径	a_f	流体加速度
Re	雷诺数	a_p	颗粒加速度
$R\cdot$	游离基	a_r	相对加速度
S	平板表面积; 总气泡表面积; 总 粒子表面积; 总小池表面积	b	堰长
Sc	施米特数	c	局部浓度; 溶质或烃的浓度
Sh	舍伍德数	c_0	容积浓度
T	容器直径	c_e	排气中的氧浓度
U	流动的特征速率; 液体流量; 有效滑移速度	c_{eq}	平衡浓度
V	气泡体积, 粒子体积; 设备 的工作体积	c_i	初始烃浓度; 在壁处的浓度
V_a	等效于附加质量的液体体积	c_{in}	在界面处的浓度
V_{av}	平均气泡体积	c_k	催化剂浓度
V_d	置换的气泡体积	c_p	颗粒浓度; 产品的浓度
V_E	最终气泡体积	c_s	饱和溶液的浓度; 气体里声 音的速度
V_F	初始气泡体积	c'	反应产物浓度
V_f	液体体积	d	液滴直径; 管、设备及反应 器的直径
V_t	混合物体积	d_{av}	平均气泡直径
W	氧化速率	d_b	气泡直径; 释放时的气泡直 径
W_e	酶反应速率	d_m	叶轮直径
W_t	引发速率	d_p	颗粒直径
$W_{t,f}$	焦油生成速率	d_{pr}	螺旋桨直径
W'	氧扩散的速率; 氧化速率/ 系统容积; 催化氧化速率	$\overline{d}$	无量纲气泡直径
We	韦伯数	dE	薄层的总能量
Y	带出液滴的总质量/面积/时间	dE_1	薄层的位能
Y_0	总带出量/面积/时间	dE_2	薄层的动能; 在薄层里的耗

散		p_l	液体压力
dE_s	表面张力能	p_g	气体压力
e	涡流能量; 总的气泡能量密度	p_o	锐孔处气体压力
e_b	气泡能量耗散	$\overline{p}$	平均压力
f	颗粒通过横截面的频率; 概率密度	$\overline{p_g}$	时间平均气体压力
h	液柱高度	p'	起伏压力
k	悬浮功; 表观附加质量系数; 传质系数	q	相对气体流量; 进入气泡的平均气体流量
k_d	设备直径的校正因子	r	旋涡大小
k_f	液体传质系数	r_b	瞬时气泡半径
k_{fs}	液体表面传质系数	r_c	小池半径; 临界气泡大小
k_{fv}	液体容积传质系数	r_d	粘滞作用的旋涡大小; 液滴半径
k_g	气体传质系数	r_s	脱开时气泡半径; 含有能量的旋涡大小
k_h	对设备高度的校正因子	r_o	带走旋涡流的最大半径
k_l	反应速率常数; 解吸的速率常数	r_p	颗粒半径
k_s	传质系数/有效面积	r^*	游离基的尺寸
k_v	传质系数/有效容积	s	在表面下的气泡中心的距离; 基元更新分率
l	流动特征长度	S_{av}	平均气泡表面积
l_c	轴比例	S_b	气泡表面积
m	气泡瞬时质量; 气泡的扩散质量; 在小池模型中扩散的质量	S_o	气泡的沾染面积
m_i	扩散到颗粒的质量流量	u	平行于表面的速度
$\dot{m}$	质量传递/时间	u_{f1}	流体速度向量
m'	质量传递/面积	u_i	速度向量
$\dot{m}'$	质量传递/面积/时间	u_o	边界层外侧速度
n	旋转速率; 旋转数; 湍动频率; 气泡数/体积	u_p	颗粒速度向量
p_a	环境压力	u_r	颗粒终端速度
p_o	排气压力	u'_i	起伏速度向量
		$\overline{u_i}$	平均速度向量
		v	瞬时局部气体速度; 垂直于表面的速度; 在环隙里的

	气体速度	δ_{eff}	有效膜厚
v_b	气泡速度	δ_0	粘滞底层
v_d	液滴绝对速度	ϵ	能量耗散/质量/时间
$v_{d\infty}$	在无限介质内的液滴 绝对速度	$\overline{\epsilon}$	平均粘滞能量耗散/质量/时间
v_e	小旋涡特征速度	ϵ_t	耗散的湍流能量
v_f	液体速度	ξ	无量纲细胞计数
v_g	气体速度	η	Kolmogoroff 长度量度; 无量纲的相对焦油生成速度; 对氧的反应速率的级数
v_{gr}	相对于液体的气泡表观速度	θ	相对输出/反应器容积
v_i	速度向量	θ_k	活性中心“密度”
v_o	在锐孔处气体平均速度	κ	波数
$v_{o(\text{crit})}$	锐孔处临界平均速度	κ_a	含有能量旋涡的波数
v_p	颗粒速度	κ_d	有粘滞效应的涡流的波数
v_r	相对于液体的气泡速度; 液滴或颗粒的相对速度	λ	湍流旋涡的微量度
v_s	气体表观速度; 固体的表观速度; 流体的表观速度	μ	无量纲细胞生长速率; 混合物动力粘度
v_{sf}	液体的表观速度	μ_f	液体动力粘度
v^i	理想流体流动速度	μ_g	气体动力粘度
v_r	定义湍流运动的速度	μ_{max}	微生物生长的最大速率
v^*	剪切速度	ν	运动粘度; 无量纲氧化速率
$\overline{v_p}$	平均颗粒速度	ν_f	液体运动粘度
x_1	两相混合物的高度	ν_{tf}	焦油生成速率
y_e	基元的厚度	ν'	无量纲催化氧化速度
α	轴向湍流强度; 对于化学反应的加速系数	ρ	无量纲游离基浓度; 混合物密度
β	通用常数; 焦油形成时游离基消耗的度量	ρ_f	流体密度
γ	通用常数	ρ_g	气体密度
δ	膜厚; 扩散底层; 边界层厚度	ρ_p	颗粒密度
δ_b	湍流缓冲层厚度	$\overline{\rho}$	混合物平均密度
δ_c	临界膜厚	ρ'	混合物的起伏密度
		σ	无量纲催化剂浓度; 表面

	张力	ϕ_{av}	平均气体空隙率
σ_b	气泡直径标准偏差	$\overline{\phi}$	平均空隙率
σ_{b_s}	气泡表面积标准偏差	ϕ'	起伏的空隙率
σ_{b_v}	气泡体积标准偏差	ψ	流函数；泡沫的比重
τ	特征时间；在表面上的涡流持续时间	ω	无量纲氧浓度
τ_f	气泡形成时间	ω_n	气体运动的自然频率
τ_{ij}	应力张量	Δ	行列式
τ_0	气泡间的时间	Δc	浓度梯度
τ_s	剪切应力	Δp	压力差
ϕ	气体空隙率；混合物的固体含量；速度势	ΔE	活化能
		ΔU	平均速度的变化
		Ω_n	薄膜的自然频率

目 录

前言

符号一览表

第一篇 两相流的流体动力学

第一章 两相流的现象	1
参考文献	7
第二章 单气泡的形成	8
2.1 引言	8
2.2 仅有浮力和表面张力的情况	9
2.3 有浮力、阻力、表面张力和惯性力并存的情况	11
2.4 依时的气体流量	16
2.5 由于表面张力和阻力而引起的能量损失	18
2.6 向连续气流（喷射流）的转变	21
参考文献	23
第三章 密集鼓泡	25
3.1 引言	25
3.2 密集鼓泡中的湍流	26
3.3 湍流中一个气泡的最大速度	28
3.4 密集鼓泡中的气泡尺寸	30
3.5 比相接触表面积	37
参考文献	46
第四章 动态两相流	49
4.1 引言	49
4.2 理想液体中的快速鼓泡	51
4.3 真实液体中的快速鼓泡	59
4.4 慢速鼓泡区中两相流的主要参数	63
4.5 伴有耗散和惯性的两相流的主要参数	69

4.6 静止液高和设备直径对空隙率的影响	75
参考文献	76
第五章 液体夹带的方式	78
5.1 引言	78
5.2 液锥的稳定性	78
5.3 湍动涡流的夹带	83
5.4 鼓泡时液体自由表面上的夹带	89
5.5 液滴动力学	99
5.6 液滴统计学	106
5.7 相似分析	110
参考文献	118
第六章 固体粒子在液体中的运动	120
6.1 引言	120
6.2 平均粒子流速和在液流中粒子的平均分率	120
6.3 固体粒子在层流粘滞流动中的定常运动	122
6.4 固体粒子的不均匀运动	124
6.5 系统壁面对稀薄悬浮液中粒子速度的影响	128
6.6 湍流中固体粒子运动的基本方程式	129
6.7 悬浮在湍流中的微粒子	141
6.8 微粒子在强烈鼓泡流中的运动	146
6.9 在带有搅拌器的鼓泡设备中微粒子的运动	147
6.10 悬浮在湍流中的大粒子运动	149
参考文献	152

第二篇 两相流中的传质

第七章 在有气泡和液滴的过程中相界面上的传质	154
7.1 引言	154
7.2 膜模型	155
7.3 渗透模型	158
7.4 修正的渗透模型	159
7.5 传质系数和接触面积的影响	166
7.6 液相传质系数的计算	167

7.7	表观气速对传质系数的影响	177
7.8	空隙率对传质系数的影响	178
7.9	单个气泡的传质	178
7.10	传质系数 k_L 随气泡年龄的衰减	186
7.11	真实传质系数和接触表面积	187
7.12	悬浮在湍流中的单个气泡的传质	189
7.13	气泡群的传质	192
7.14	向液相传质的实验数据	194
	参考文献	206
第八章	液-固粒子系统中的传质	210
8.1	引言	210
8.2	用于计算传质系数的参数	213
8.3	向悬浮在湍流中的微粒的传质	219
8.4	对悬浮在湍流中大粒子的传质	229
	参考文献	238

第三篇 在化学与生物化学过程中的应用

第九章	在化学中的应用	241
9.1	引言	241
9.2	非催化氧化	243
9.3	烃类的催化氧化	250
9.4	烃类液相氧化的宏观动力学	254
9.5	对动力学区域内的过程所需空气量的估算	257
9.6	烃类液相氧化的理想置换和理想混合的反应器	262
9.7	烃类液相氧化的连续鼓泡反应器中最佳供气 和供液量的计算	269
9.8	烃类液相氧化鼓泡型反应器的计算	274
9.9	烃类液相氧化鼓泡反应器放大计算的影响	279
	参考文献	280
第十章	微生物过程中的反应器设计	282
10.1	引言	282
10.2	生化过程中的控制步骤	282

10.3 混合强度和空气进料对氧气溶解速率的影响 285

10.4 各种参数对酶活性积累的影响 288

10.5 生化过程动力学中的质量传递作用 293

10.6 理论方程的实验验证 297

10.7 生化反应器的设计方法 302

参考文献 304