



ELSEVIER



国家自然科学基金研究成果专著

NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

撞击流

——原理·性质·应用

伍沅 著



化学工业出版社



国家自然科学基金研究成果专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE FOUNDATION OF CHINA

撞击流

——原理·性质·应用

伍沅 著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

撞击流——原理·性质·应用/伍沅著. —北京:
化学工业出版社, 2005. 11
ISBN 7-5025-7957-5

I. 撞… II. 伍… III. 撞击反应 IV. TQ052

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 142105 号

国家自然科学基金研究成果专著
NATIONAL NATURAL SCIENCE
FOUNDATION OF CHINA
撞击流——原理·性质·应用

伍 沅 著

责任编辑: 戴燕红

文字编辑: 贾 婷

责任校对: 周梦华

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 17¼ 字数 281 千字

2006 年 2 月第 1 版 2006 年 2 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7957-5

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

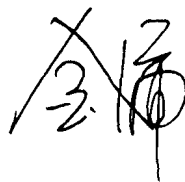
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

近年来过程强化是化学反应工程与传递工程重要的发展趋势之一，通过两股或多股多相流体对撞使其动能骤变，由此引发的物理过程和化学过程的强化，是近年来在化学工程中引起广泛兴趣的研究课题之一。

本书分别从气体连续相和液体连续相撞击流多相流体力学分析入手，对其连续相的流体力学、微观混合、颗粒行为、颗粒停留时间分布、撞击流的流体阻力和压力波动等现象进行了分析和讨论，进而对撞击流装置潜在的工程应用领域如干燥、吸收、燃烧、研磨、超细粉制备等方面进行论述。它既反映了作者多年潜心研究和工程开发的成果，也是对国外学者在本领域研究成果的综述，是迄今为止国内第一本系统介绍撞击流装置的科学研究、工程开发方面的专业书籍。本书的出版为推广撞击流技术作出了重要贡献，可供有关研究工作者深入工作、研究生学习和工业界技术开发参考。

清华大学化工系



2005. 8

前 言

本书系国家自然科学基金资助项目（项目编号 20424002）研究成果。

撞击流是较新颖的技术方法。作为科学概念，首先于 1961 年由苏联 Elperin 提出；但这类技术的最早面世，应追溯到 1953 年 Koppers-Totzek 粉煤气化炉的研发和应用。

最初的基本构思，是使两股气-固两相流高速相向流动撞击。目标非常明确：强化相间传递。无独有偶，工业上首先应用的 K-T 粉煤气化炉，其核心也是成功地解决了强化气固相间传递的问题。毫无疑问，撞击流对此非常有效。已经有大量研究结果表明，其中的气-固相间传递系数可以比传统装置中提高十几倍甚至数十倍。由于相间传递现象的普遍性，撞击流受到普遍关注，进行了广泛的研究。

从概念提出至今 40 多年间，有关撞击流的研究大致可分为三个阶段。第一阶段从 20 世纪 60 年代初到 70 年代初，是初创时期。工作主要集中在苏联，研究对象基本上以气体为连续相。这很自然，因为最初就是针对这类问题提出的。分散相则由固体逐渐扩展到包括液体。

第二阶段从 1974 年 Elperin 去世到 90 年代中期，研究的重心转移到以色列，研究人员主要是由 A. Tamir 领导的集体。研究对象的大部分，约 80%~90%，仍然是以气体为连续相。虽然做了一些液体连续相的研究，例如盐的溶解、乳化、溶剂萃取等，但其思想基本上都是出于简单类比，追求的目标仍然是强化相间传递，研究的深度和广度远不能与以气体为连续相的研究相比。

最近十几年来的研究可以认为处于第三阶段。从事研究的地域已扩展到包括中国、美国、加拿大、德国等在内的 20 多个国家和地区；相比之下，俄罗斯和以色列的工作已不十分突出；研究的重点则明显转向以液体为连续相。

作为一种技术方法，撞击流当然不可能是万能的。气体连续相撞击流固然在强化相间传递方面非常有效，但也存在活性区中停留时间很短（约 1s）的致命弱点；其流动安排的要求与传统装置相比也较高。某些非常快速的过程如粉状固体或雾化液体燃料的燃烧等，可以在撞击流中迅速完成并大大提

高效率。然而,还有许多过程,即使在显著强化相间传递的条件下也不可能瞬间完成,需要持续相当长的时间;而安排多级撞击流又会使系统大大复杂化,难以实现工业应用。因此,上述缺陷在很大程度上限制了单纯撞击流技术的应用。或许由于偏爱,这些明显的问题在相当长的时期内没有引起注意。这可能是撞击流的工业应用长期进展缓慢的基本原因。当然,还可能有其他原因。

一种流体作为连续相,是实施撞击流的必要条件。它可以是气体或是液体;如果以液体为连续相,分散相一般只能是固体或另一种不相溶混的液体。否则,采用撞击流意义不大。

液体和气体性质有极大的差异。一般情况下,液体密度与固体具有相同的数量级,而比气体大3个数量级;黏度比气体大两个数量级。其结果,在气体连续相撞击流中发现的那些强化相间传递的因素,例如相间相对速度极大、颗粒在两股相向流体间往复渗透振荡运动等,在液体连续相撞击流中变得无足轻重,以致传递系数与其他传统方法相比没有明显的差异。其实,很早就有数据,包括其本人的数据,显示了这样的情况。然而,由于偏爱,Tamir仍认为撞击流接触器优于其他装置,自然也就没有进一步研究两种撞击流性质和性能的差异。

另一方面,液体的高密度又为连续相的撞击流带来了新的特性。20世纪90年代发现液体连续相撞击流具有显著强化微观混合的优越性质,是撞击流领域研究最重要的进展。新近研究还发现撞击区产生相当强烈的压力波动。这些性质显然与下述事实有关:两股高密度流体撞击时,相向流体的流团间发生更加强烈的相互作用。微观混合和压力波动对在分子尺度上发生的过程,尤其是涉及化学反应的过程,具有重要意义。因此,上述性质的发现使得撞击流的应用领域大大扩展。事实上,已经有一系列研究结果表明,液体连续相撞击流在化学沉淀法制取超细粉体等方面显示了巨大的应用潜力。

此前专门讨论撞击流的书共有两本。第一本是Elperin的俄文专著《相向射流中的传递过程》,1972年由苏联明斯克科学技术出版社出版。它总结了1970年以前该领域的研究工作,深度和广度基本上与撞击流研究初创时期取得的成果相适应。第二本是Tamir的专著《撞击流反应器——原理和应用》,以英文写成,1994年由Elsevier出版,是第二阶段研究的系统总结;笔者已将它译成中文,介绍给中国同行(化学工业出版社,1996)。在“……几乎所有化工过程都可以用撞击流来实施”这一认识的指导下,该书著者的研究几乎遍及所有化工单元过程。全书内容繁浩,实验数据翔实。母

庸讳言，它对笔者近乎是启蒙教材。然而，在迅速发展的十几年之后，其内容就显得不足了。如没有充分认识气体连续相撞击流的固有缺陷，进行了一系列基本上没有希望成功的应用研究；以及很少涉及液体连续相撞击流，更没有注意到微观混合和波动特性极其可贵的应用价值等。

笔者对撞击流的研究始于 1992 年，最初也是从气体连续相撞击流开始的。后来，由于注意到其停留时间极短等缺陷，并发现了液体连续相撞击流的优越性质，研究的重心转向后者。它自然也就成为本书讨论的重点之一。明确说明气体连续相撞击流的优、缺点及其在应用方面的优势和局限性；着重阐述液体连续相撞击流的优越性质及其应用，这大概就是本书区别于前两本专著的基本特点。

科学技术总是在不断发展、进步，人们的认识水平也在不断提高。本书不可能是、也不应该是最后一本有关撞击流的图书。笔者期望并相信，当第四本专著问世时，撞击流的工业应用将已有突破性进展，并已相当普遍。

限于水平，本书偏颇、错误之处在所难免。恳切地希望读者批评指正，俾使有所进步。

感谢国家自然科学基金研究成果专著出版基金资助本书的出版。

编者

2005 年 6 月

于武汉化工学院

致 谢

笔者在撞击流领域的研究先后两度获得国家自然科学基金资助 (No. 29276260, No. 20176043); 此外还先后得到中国科学院化工冶金研究所 (现更名为过程工程研究所) 多相反应开放研究实验室、浙江省自然科学基金、浙江大学聚合反应工程国家重点实验室开放研究基金和湖北省教育厅重大科技项目等多项资助和支持。显然, 没有这些支持, 就不可能进行撞击流领域多项课题的研究; 而没有这些项目的研究, 就不可能写出这本书。

在从事撞击流研究的十多年间, 武汉化工学院周玉新、吴高安、徐建民、李德树、舒安庆、包传平、贺小平、汪铁林, 浙江工业大学杨阿三、孙勤、程榕、陈运根、刘华彦, 北京化工大学徐静年等同仁与著者长期或较长时间合作, 分别承担子课题或参与研究, 使研究取得重要进展; 博士研究生孙怀宇、李勤、张建伟和硕士研究生黄凯、陈煜、肖杨、李国朝、陈振、李芳等直接以撞击流问题为其学位论文选题, 通过勤奋工作, 实质性地推进了撞击流的基础研究和应用技术开发; 还有许多本科生参加了研究, 取得一批非常有用的实验数据; 伍笑晞博士因与我有较多交流机会, 对本书涉及的多项研究提出过许多好的意见和建议。所有这些都为本书作出了贡献。

本书完稿时, 金涌院士慨然应允为本书作序, 其鼎力支持使著者深为感动。

最后必须提到夫人黄玉琼高级工程师。为支持工作, 基本上放弃了自己事业上的追求, 以贤妻良母操持家政, 使著者得以集中精力进行学术研究和技术开发。对于完成本书, 其间接贡献不可磨灭。

在此一并谨致谢忱!

伍 沅

2005 年 6 月

于武汉化工学院

目 录

绪论	1
0.1 相间传递强化和撞击流的缘起	1
0.2 撞击流的基本原理	3
0.3 强化相间传递的实验证据	5
0.4 撞击流的其他性能	6
0.5 撞击流的扩展	7
0.5.1 流动结构的扩展	7
0.5.2 物系相态的扩展	9
0.6 应用现状和展望	10

第一篇 气体连续相撞击流

第一章 连续相的流动	15
1.1 流动特性	15
1.2 层流撞击流的速度场	19
1.2.1 一般方程	19
1.2.2 平面二维撞击流	20
1.2.3 轴对称撞击流	22
1.2.4 一般三维撞击流	23
1.2.5 黏性撞击流	23
1.3 撞击流中速度场的实验结果	25
1.4 湍流撞击流	28
第二章 颗粒的行为	31
2.1 同轴水平撞击流中单颗粒的运动	31
2.1.1 概述	31
2.1.2 颗粒运动的基本关系式	33
2.1.3 不同阶段运动方程的解析	33
2.1.4 撞击区中颗粒的停留时间	38
2.2 水平撞击流中单颗粒行为的实验结果	39

2.3 同轴垂直撞击流中单颗粒的行为	41
2.3.1 运动现象描述	41
2.3.2 运动方程及其解析	42
2.3.3 终末速度	43
2.4 撞击流中颗粒群的行为	44
2.4.1 撞击流中的颗粒浓度分布	45
2.4.2 进料颗粒浓度的影响	47
2.4.3 关于颗粒间碰撞的影响	49
第三章 颗粒停留时间及其分布	50
3.1 理论分析	50
3.1.1 撞击流装置	50
3.1.2 停留时间及其分布的构成	51
3.1.3 总停留时间分布模型	56
3.2 颗粒停留时间分布的实验测定方法	57
3.2.1 输入信号	57
3.2.2 实验数据关联方程	59
3.3 实验数据拟合关系式	62
3.4 颗粒停留时间分布的主要实验结果	64
3.4.1 示踪剂浓度的测定	64
3.4.2 实验测定和模拟计算结果比较	64
3.4.3 颗粒平均停留时间	65
3.5 结语	66
第四章 撞击流装置的流体阻力	68
4.1 理论考虑	68
4.1.1 通过加速管的流动	69
4.1.2 两流体撞击	70
4.1.3 撞击流装置的结构阻力	70
4.1.4 撞击流装置的总阻力	71
4.2 实验装置和方法	71
4.2.1 实验装置	71
4.2.2 实验方法	72
4.3 实验研究的主要结果	73
4.3.1 压降分布的基本特征	73
4.3.2 加速管对纯空气流的阻力	73

4.3.3 颗粒加速和碰撞引起的压降	75
4.3.4 装置结构阻力	76
4.3.5 总压降模型	76
4.4 动力消耗评价和相关的應用问题	78
第五章 流体撞击对液体分散度的影响	80
5.1 问题陈述	80
5.2 实验装置和方法	81
5.2.1 撞击流装置	81
5.2.2 粒径分布测定方法	81
5.2.3 采样安排	82
5.3 主要研究结果	83
5.3.1 雾滴群粒径分布	83
5.3.2 平均粒径	86
5.4 结语	88
第六章 撞击流干燥	89
6.1 导引	89
6.2 早期的研究与开发	90
6.2.1 撞击流喷雾干燥	91
6.2.2 颗粒物料撞击流干燥	92
6.2.3 组合作用撞击流干燥	95
6.3 循环撞击流干燥	99
6.3.1 装置设计的基本思想	100
6.3.2 装置结构和工作原理	100
6.3.3 CISD 模型实验装置流程和实验方法	102
6.3.4 模型实验主要结果	103
6.3.5 结构和操作参数的影响	105
6.3.6 CISD 准工业实验简介	110
6.4 结语	111
第七章 撞击流吸收	113
7.1 GIS 对气液相反应体系的适应性	113
7.2 早期的研究	114
7.2.1 关于吸收强化模型	114
7.2.2 吸收装置	115
7.2.3 主要研究结果	118

7.3 烟气湿法脱硫 I——以色列的研究	119
7.3.1 导引	119
7.3.2 实验装置和方法	120
7.3.3 主要结果	122
7.4 烟气湿法脱硫 II——著者的研究	124
7.4.1 实验装置	124
7.4.2 实验流程和方法	126
7.4.3 数据关联	128
7.4.4 结果和讨论	129
7.4.5 结论	136
7.5 大气量气液反应装置设计	136
第八章 撞击流燃烧和研磨	140
8.1 滴粒和颗粒燃烧模型	140
8.1.1 单个液滴蒸发-燃烧方程	140
8.1.2 单个颗粒燃烧方程	142
8.2 撞击流对燃烧过程的强化	144
8.3 撞击流燃烧装置	145
8.3.1 液体和气体燃烧炉	145
8.3.2 Koppers-Totzek 粉煤气化炉	147
8.4 撞击流研磨	148

第二篇 液体连续相撞击流

第九章 连续相性质的差异和撞击流分类	153
9.1 液体连续相撞击流研究的发展	153
9.2 连续相性质的差异及其对撞击流性能的影响	154
9.2.1 液体与气体性质的差异	154
9.2.2 连续相性质差异对撞击流性能的影响	154
9.3 撞击流补充分类	155
第十章 液体连续相撞击流中的微观混合	157
10.1 宏观混合与微观混合	157
10.2 混合问题的研究方法	158
10.2.1 宏观混合	158
10.2.2 微观混合	158
10.3 SCISR 中的流动与宏观混合	160

10.3.1	SCISR 基本设计思想和结构	160
10.3.2	宏观混合时间	161
10.3.3	流动结构和停留时间分布	161
10.4	SCISR 中的微观混合	164
10.4.1	实验装置流程	164
10.4.2	控制变量及其实验测定	165
10.4.3	实验方法	166
10.4.4	主要结果	167
10.4.5	SCISR 和 STR 微观混合性能的比较	169
10.4.6	理论预测与实验结果的比较	170
10.4.7	SCISR 中宏观混合与微观混合的关系	171
10.5	无循环撞击流反应器中的微观混合	171
10.6	LIS 中微观混合研究的比较暨结语	173
第十一章	浸没循环撞击流反应器中的压力波动	175
11.1	压力波动的意义和研究方法	175
11.1.1	压力波动的意义	175
11.1.2	压力波动的研究方法	175
11.2	实验装置和方法	177
11.2.1	实验装置	177
11.2.2	撞击速度的控制	178
11.2.3	测定点安排和测定频度	178
11.2.4	实验数据的预处理	178
11.3	实验结果和讨论	179
11.3.1	压力波动强烈区	179
11.3.2	波动强度的容积分布	181
11.3.3	撞击区的界定	181
11.3.4	撞击速度对波动强度的影响	182
11.3.5	压力波动的功率谱分析	183
11.4	研究结论和讨论	185
第十二章	液体连续相撞击流对动力学的影响	187
12.1	压力波动和微混混合影响的定性分析	187
12.2	磷酸二钠结晶成长动力学	188
12.2.1	理论基础	188
12.2.2	实验研究	190

12.3 乙酸乙酯皂化反应动力学	195
12.3.1 化学反应和实验方法	195
12.3.2 主要结果	196
12.4 结论和讨论	196
第十三章 撞击流反应-沉淀法制超细粉体：I “超细”白炭黑	198
13.1 撞击流对制取超细粉体的适应性	198
13.2 白炭黑的性质及其制备化学反应	199
13.3 实验装置和方法	201
13.3.1 实验装置	201
13.3.2 实验方法	201
13.4 实验结果和讨论	202
13.4.1 半间歇实验	202
13.4.2 SCISR 连续操作实验	205
13.4.3 半间歇操作比较实验	205
13.4.4 反应产物后处理研究	206
13.5 研究结论	206
第十四章 撞击流反应-沉淀法制超细粉体：II 纳米铜粉及其表面 抗氧化改性	208
14.1 导引	208
14.2 纳米铜粉的性质和主要用途	209
14.3 原理和实验研究方法	210
14.3.1 还原-沉淀法制取纳米铜粉的化学反应	210
14.3.2 实验装置和方法	211
14.4 制取纳米铜粉的实验结果和讨论	212
14.4.1 第一阶段的主要结果	212
14.4.2 各种因素影响的实验结果	213
14.4.3 最优条件下的制备实验	217
14.4.4 不同工艺和设备制备结果的比较	217
14.5 纳米铜粉表面改性——铜银双金属粉的制取	218
14.6 研究结论	219
第十五章 撞击流反应-沉淀法制超细粉体：III 纳米二氧化钛	221
15.1 纳米二氧化钛的性质和制备化学反应	221
15.2 实验装置和方法	222
15.3 实验结果和讨论	224

15.3.1 第一阶段实验及主要结果	224
15.3.2 第二阶段实验及主要结果	225
15.3.3 批量制备实验和结果	227
15.3.4 氨水中和实验	228
15.3.5 最终条件优化实验和结果	229
15.3.6 与搅拌反应器的对比实验结果	230
15.4 研究结论	230
第十六章 液体连续相撞击流装置研发和应用展望	232
16.1 立式循环撞击流反应器	232
16.2 撞击流结晶器	235
16.3 液体连续相撞击流应用展望	237
跋	240
参考文献	241
符号表	255

绪 论

0.1 相间传递强化和撞击流的缘起

在化学和石油化学工业乃至其他许多过程工业中，多相体系中相间热量和质量传递，尤其是质量传递，是众多加工单元过程中都会涉及的普遍问题。传递速度对这些单元过程的效率和技术经济指标有重要影响。因此，自20世纪30年代后期以来，在化学工程科学技术中，强化相间传递一直是备受关注的问题之一。在寻找强化相间传递新方法方面，进行了大量理论和实验研究。

根据熟知的传递速度理论，单位时间传递的热量或质量可用下列关系式表示：

$$\text{单位时间传递量} = \frac{\text{推动力} \times \text{相界面积}}{\text{比阻力}} \quad (0-1)$$

因此，要增加单位时间传递量，可以采用以下三种措施之一或它们的组合：提高推动力；增加相界面积；减小比阻力。这三种措施都是有效的，但在工业实践中，它们强化传递的潜力和实施的难度有很大差异。

热、质传递过程的推动力就是温度差和浓度差，它们在很大程度上受到具体过程特性如原料、热源以及设备材质等因素的限制。在大多数情况下，允许提高的幅度是有限的。

相对而言，增加相界面积即增大液相或固相的分散度是可以在较宽范围内采取的措施，事实上已用于诸如喷雾干燥、冷却等工业过程。然而，该措施的应用也受到一定限制。比如，喷雾干燥只能用于生产粉状产品，而且过细的分散还会带来诸如产品收集困难等方面的问题；喷雾冷却只能用于气体允许增湿的场合。另一方面，在一般的装置系统中，相间最大相对速度就等于颗粒的终末速度（terminal velocity）即自由沉降速度。该速度随粒径缩小而急剧降低，导致传递比阻力增大。这可能部分地抵消增加相界面积对增大总传递速度的作用。

降低传递比阻力则是具有很大潜力的强化相间传递的有效途径。

在气-固、气-液、液-液和液-固相体系传递过程中，一般认为有三种阻力串联。对于气体-颗粒或液滴体系，它们是：气侧阻力或称外阻力、界面阻力、颗粒或液滴的内阻力，其中界面阻力通常是当杂质在界面上积累时可能引起的阻力。降低上述三种阻力中的任何一种，都可以强化传递过程。

热、质传递过程的总比阻力分别是传热系数 U 和传质系数 K 的倒数。 U 和 K 是表征相间传热和传质速率的通用参数，定义为：

$$U = \frac{Q}{A \Delta T} \quad (0-2)$$

$$K = \frac{n_A}{A \Delta c_A} \quad (0-3)$$

其意义为单位温度或浓度梯度下单位时间内通过单位相界面积的热量或物质的量。因此，可以认为是比传热速度或比传质速度。

数十年来，遍及干燥、吸收、冷却、燃烧等各种单元过程的大量研究结果表明，除体系本身的性质（包括分散程度）以外，对传热系数和传质系数影响最主要的操作参数是相间相对速度。增大相间相对速度可以增强扰动、减小边界层厚度，还有利于液侧表面更新，从而减小气侧或/和液侧的传递阻力。

综合各种传统化工单元过程的实验研究结果可以得出，相间传递系数与相对速度之间有指数函数关系：

$$U = u_r^{n'} \quad K = u_r^n$$

依物系、设备形式和操作条件范围不同，幂指数 n' 或 n 大致可在 $1/3 \sim 4/5$ 之间变动。例如，对于球形颗粒，Ranz-Marshall^[1] 获得的计算传热膜系数的关系式为：

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (0-4)$$

对于粒径小于 2.5mm 的气泡或颗粒悬浮体，Calderbank 和 Moo-Yong^[2] 推荐用 Levich 公式计算：

$$Sh = 1.01 \left(\frac{d_p u_r}{D_{AB}} \right)^{1/3} \quad (0-5)$$

上述结果导致下述简单而明确的结论：提高相间相对速度是强化传递过程最有效的途径之一。

在传统的过程装置中，提高相间相对速度受到种种限制。例如，塔设备中的气流速度必须小于液泛速度；一般气-固或液-固悬浮体中相间相对速度的极限是终末速度等。看来，要使相间相对速度达到更高水平，必须寻求新的途径。