

射流气动旋流雾化 及其应用

全学军 程治良 赵清华 著

SHELIU QIDONG XUANLIU WUHUA
JI QI YINGYONG



化学工业出版社

射流气动旋流雾化 及其应用

全学军 程治良 赵清华 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《射流气动旋流雾化及其应用》将液体射流与空气旋流场耦合,借助气体旋流场的超重力作用将液相射流充分雾化,同时实现雾化液滴的旋流分离,将气液传质和液滴分离有机地融合在一起,从而提出了射流气动旋流雾化的概念,并探讨了该体系的气液传质性能及其应用。

全书分为10章,主要内容包括:射流气动旋流雾化原理,水力喷射空气旋流器压降特性及其压力场模拟,射流气动旋流雾化的流型、气液传质特性、过程模拟及雾化机理,水力喷射空气旋流器的结构优化,射流气动旋流雾化技术的应用,包括用于烟气脱硫、用于含铬废水处理、强化废水脱氮除磷和除尘等。

《射流气动旋流雾化及其应用》可供化工、冶金、能源、环境工程等相关领域从事教学、科研、生产的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

射流气动旋流雾化及其应用/全学军,程治良,赵清华著.

北京:化学工业出版社,2018.6

ISBN 978-7-122-31920-3

I. ①射… II. ①全…②程…③赵… III. ①旋流-气动雾化

IV. ①TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 066424 号

责任编辑:徐雅妮 丁建华 马泽林

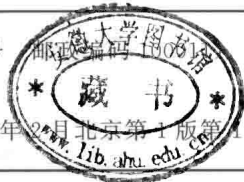
装帧设计:关 飞

责任校对:边 涛

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号)

印 装:中煤(北京)印务有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张13½ 字数224千字 2019年2月北京第1版第1次印刷



购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:59.00 元

版权所有 违者必究

前言

液体射流在横向气流中的雾化已被用于航空航天等技术领域，其雾化过程与机理也得到了比较充分的研究。从化学工程角度看，液体射流气动雾化的结果产生了大量微小的液滴和新鲜的液滴表面，同时气流场中液滴的各种复杂运动强化了表面更新频率，为强化气液相间传质提供了条件。本书根据射流气动雾化强化传质这一特性，将液体射流和气体旋流场相耦合，实现了液体射流在气体旋流场中的雾化分散和离心分离，从而实现了射流雾化和旋流场强化传质的有机结合；提出了射流气动旋流雾化的概念，并研发了射流气动旋流雾化设备——水力喷射空气旋流器。

本书反映了重庆理工大学资源环境化工团队多年来在该领域的探索研究工作，内容涉及射流气动旋流雾化原理、水力喷射空气旋流器压降特性及其压力场模拟、射流气动旋流雾化的流型、射流气动旋流雾化的气液传质特性、射流气动旋流雾化过程模拟及雾化机理、水力喷射空气旋流器的结构优化，以及射流气动旋流雾化体系在烟气脱硫、含铬废水处理、废水脱氮除磷、气体除尘等领域的应用研究。

本书由重庆理工大学金学军、程治良、赵清华著。重庆理工大学王富平副教授、叶长英工程师、熊彦淇工程师、吴京平实验员，以及邱发成、徐飞、代黎、晏云鹏、李瑞恒等研究生参与了本书的编写工作，秦险峰、叶鹏、成臣、黄小雪等同学对全部书稿进行了校对。因此，本书是集体智慧和辛勤劳动的结晶。值本书出版之际，我们向为本书出版做出贡献的所有同志表示最诚挚的谢意！

由于水平有限，对一些探索性的问题研究还不够深入、系统，因此书中难免存在不全面甚至疏漏之处，敬请读者批评指正。

著者

2018年9月

目录

第1章

射流气动旋流雾化原理 / 1

1.1 横向射流气动雾化	2
1.1.1 横向射流气动雾化简介	2
1.1.2 横向射流运动轨迹和穿透深度数学模型	3
1.1.3 横向射流气动雾化破碎机制	7
1.2 气液传质过程及其强化方法	9
1.2.1 气液传质理论	9
1.2.2 气液传质过程强化方法	14
1.3 射流气动旋流雾化的提出	16
参考文献	17

第2章

水力喷射空气旋流器压降特性及其压力场模拟 / 21

2.1 实验装置与测试方法	22
2.1.1 实验装置与 WSA 结构	22
2.1.2 测试方法	23
2.2 气相压降数值模拟	24
2.2.1 数学模型的选择	24
2.2.2 数值模拟条件	24
2.2.3 网格无关性验证	25
2.2.4 数学模型验证	25

2.3	气相压降特性和液相含率	26
2.4	液相流型特性	28
2.5	气相压降数学模型	29
2.5.1	量纲分析	29
2.5.2	经验公式的拟合	30
2.6	压力场数值模拟结果	31
2.6.1	各个截面的压力分布规律	31
2.6.2	各个截面的湍动能分布规律	33
2.6.3	耦合空间环隙区域压力场分布规律	34
本章小结		37
参考文献		37

第3章 射流气动旋流雾化的流型 / 39

3.1	流型观察系统构建及测试方法	40
3.1.1	WSA 装置与实验流程	40
3.1.2	WSA 液相射流流型观察	41
3.1.3	WSA 有效比相界面积 α 的测定	42
3.2	射流流型演变过程的观察	43
3.3	射流流型转化图	45
3.4	不同流态下气-液传质有效比相界面积 α 的变化	46
本章小结		47
参考文献		48

第4章 射流气动旋流雾化的气液传质特性 / 49

4.1	实验测试系统构建及方法	51
4.1.1	实验装置与 WSA 结构	51
4.1.2	实验流程	52
4.1.3	有效相界面积 α 、液膜传质系数 k_L 和增强因子 E 的计算	53

4.2 液相无微粒时 WSA 的传质性能	54
4.2.1 传质系数数量纲分析	54
4.2.2 传质系数经验公式的拟合	54
4.2.3 进口气速对 a 、 k_L 和 $k_L a$ 的影响	55
4.2.4 液体喷射速度对 a 、 k_L 和 $k_L a$ 的影响	56
4.2.5 WSA 中气-液传质机理探讨	57
4.3 微粒对 WSA 气液传质强化的影响	58
4.3.1 气液传质强化微粒的筛选	58
4.3.2 固含率对 a 、 k_L 、 $k_L a$ 和 E 的影响	59
4.3.3 固体微粒在不同进口气速下对 a 、 k_L 、 $k_L a$ 和 E 的影响	60
4.3.4 固体微粒在不同液体喷射速度下对 a 、 k_L 、 $k_L a$ 和 E 的影响	61
4.3.5 微粒强化射-旋流体体系气液传质机理探讨	62
本章小结	64
参考文献	65

第 5 章

射流气动旋流雾化过程模拟及雾化机理 / 68

5.1 数值模拟几何模型与边界条件	69
5.1.1 几何模型	69
5.1.2 数学模型	70
5.1.3 边界条件	70
5.1.4 网格划分及无关性验证	70
5.2 雾化液滴尺寸测试系统与方法	71
5.3 气相压降突变特性数值模拟	72
5.3.1 WSA 气相压降与液相回流比模拟值与实验值对比	72
5.3.2 WSA 的压降特性及其特征值	72
5.4 WSA 中射流的雾化过程及其机理分析	74
5.5 不同压降区域比传质面积变化规律	77
5.6 雾化液滴尺寸变化规律	78
本章小结	79
参考文献	79

第6章

水力喷射空气旋流器的结构优化 / 81

6.1 理论分析	82
6.1.1 喷孔排列方式及射流与空气旋流场相互作用分析	82
6.1.2 临界喷孔间距的定义及其计算方法	83
6.1.3 废水脱氮传质系数计算	84
6.2 WSA 结构优化实验设计及测试方法	86
6.2.1 实验装置	86
6.2.2 WSA 结构优化实验设计及取值	87
6.2.3 脱氮实验流程	91
6.2.4 WSA 分离空间结构数值模拟	91
6.3 喷孔排列方式优化	93
6.4 喷孔间距优化	96
6.5 喷孔直径优化	98
6.5.1 量纲分析	99
6.5.2 实验数据拟合	99
6.5.3 喷孔直径对脱氮传质系数 $K_L a$ 的影响	100
6.5.4 喷孔直径设计取值讨论	101
6.6 排气管直径和深度优化	103
6.6.1 排气管直径对传质系数和气相压降影响	103
6.6.2 排气管深度对传质系数和气相压降影响	106
6.6.3 排气管直径和深度优化取值讨论	108
6.7 分离空间结构优化	110
6.7.1 分离空间结构对 WSA 内气液传质性能的影响	110
6.7.2 分离空间结构对 WSA 内部气相压降的影响	113
6.7.3 分离空间结构对射-旋流耦合状态的影响	113
6.7.4 分离空间结构对 WSA 中切向速度分布的影响	115
6.7.5 分离空间结构对 WSA 中轴向速度分布的影响	116
6.7.6 分离空间结构对 WSA 中径向速度分布的影响	118
6.7.7 分离空间结构对 WSA 耦合场内湍动能的影响	119
6.7.8 分离空间结构对 WSA 有效比相界面积的影响	119

6.8 进气口位置和底部挡板结构优化	120
6.8.1 进气口位置对传质效率和气相压降的影响	120
6.8.2 底部挡板结构对传质效率和气相压降的影响	123
6.8.3 底部挡板结构对回流比的影响	127
本章小结	128
参考文献	129

第7章

射流气动旋流雾化用于烟气脱硫及其过程机理 / 133

7.1 实验体系构建及实验流程	134
7.1.1 实验装置与 WSA 结构	134
7.1.2 实验流程	135
7.2 过程参数对脱硫率的影响规律	136
7.2.1 回流比的影响	136
7.2.2 进口气速的影响	137
7.2.3 液体喷射速度的影响	138
7.2.4 吸收剂中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度的影响	138
7.2.5 烟气中 SO_2 进口浓度的影响	139
7.3 WSA 湿法脱硫过程中的传质机理	140
7.3.1 湿法烟气脱硫的物理化学过程	140
7.3.2 WSA 中湿法烟气脱硫传质过程分析	141
本章小结	145
参考文献	146

第8章

射流气动旋流雾化用于含铬废水处理 / 147

8.1 理论分析	148
8.1.1 SO_2 还原法处理含铬废水反应过程分析	148
8.1.2 SO_2 还原含铬废水的传质吸收过程分析	150
8.2 实验体系构建及测试方法	151

8.2.1 实验装置	151
8.2.2 实验过程与方法	151
8.3 废水初始 pH 的影响	153
8.4 液相射流速度的影响	155
8.5 SO_2 浓度的影响	156
8.6 废水中初始 Cr(VI) 浓度的影响	157
8.7 SO_2 还原含铬废水处理工艺对比	158
本章小结	160
参考文献	160

第 9 章

射流气动旋流雾化强化废水脱氮除磷 / 162

9.1 实验装置及测试方法	164
9.1.1 水力喷射空气旋流器的设计	164
9.1.2 水力喷射空气旋流器脱氮除磷实验系统	165
9.1.3 高浓度氨氮废水脱氮实验流程	166
9.1.4 厌氧消化猪场废水样品	166
9.1.5 猪场废水沉淀吸附平衡脱除氮、磷和 COD 实验	166
9.1.6 猪场废水同时脱除氮、磷和 COD 实验流程	167
9.1.7 废水吹脱脱氮氨氮率和体积传质系数的计算	167
9.2 射流气动旋流雾化脱氮效果	168
9.2.1 氨氮废水初始浓度对脱氮效果的影响	168
9.2.2 液相射流流速的影响	170
9.2.3 空气流量的影响	170
9.2.4 液相温度的影响	172
9.2.5 WSA 与传统吹脱氮设备综合对比	173
9.3 射流气动旋流雾化用于猪场废水脱氮除磷效果	174
9.3.1 平衡实验去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 效果和机理	174
9.3.2 Ca(OH)_2 用量对在 WSA 中同时去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 效果的影响	177
9.3.3 进口气速对同时去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 的影响	178
9.3.4 悬浮浆液射流流速对同时去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 的影响	180

9.3.5 沉降过程对同时去除 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和 COD 的影响	182
本章小结	183
参考文献	184

第 10 章

射流气动旋流雾化除尘 / 186

10.1 实验体系构建及测试方法	187
10.1.1 细颗粒物样品	187
10.1.2 实验装置	188
10.1.3 实验过程与方法	190
10.1.4 WSA 总除尘率的计算	191
10.2 射流气动旋流雾化除尘规律	191
10.2.1 粉尘初始浓度对除尘率的影响	191
10.2.2 液相射流流速对除尘率的影响	192
10.2.3 进口气速对除尘率的影响	193
10.2.4 除尘率与操作参数之间数学关系模型	194
10.2.5 粉尘脱除前后粒径分布变化规律	195
10.3 润湿剂强化射流气动旋流雾化除尘效果	196
10.3.1 润湿剂水溶液的表面张力分析	196
10.3.2 不同润湿剂对粉煤灰去除率的影响	197
10.3.3 细颗粒物捕集前后粒径变化规律	201
10.3.4 细颗粒物捕集前后形貌特性变化规律	201
本章小结	202
参考文献	203

◀ 第 1 章 ▶

射流气动旋流雾化原理

气液两相作用的射流雾化过程，广泛存在于化工、冶金、环保以及航空等工业中。将液相射流喷射入高温高速的垂直气流中的横向射流气动雾化过程，有利于燃料的雾化和蒸发，其在航空发动机、汽车内燃机、冲压发动机等领域得到了广泛的应用。重庆理工大学资源环境化工团队根据射流雾化的特性，将液相射流和空气旋流进行耦合，旋流产生的超重力场将液相射流充分雾化，射流雾化为细小的液滴，加快了表面更新频率，气液传质速率大大增加，用于废水脱氮、烟气脱硫、含铬废水处理等领域时取得了良好效果。本章首先介绍了横向射流气动雾化过程的实验研究、数值模拟和过程分析，然后从气液传质角度，阐述了射流气动雾化与旋流场的耦合，提出了射流气动旋流雾化的概念。

1.1 横向射流气动雾化

1.1.1 横向射流气动雾化简介

图 1.1(a) 所示为最简单的横向射流形式，即单根液相射流柱射入均匀垂直流动的气流中。气动力使得液相射流在气流方向上发生偏折。偏折的程度是空气和射流相对动量的函数，由于射流上气动力的作用，射流横向截面也发生了变形，由圆形变为椭圆形，如图 1.1(b) 所示。射流横向截面的变形显示射流出现了震荡和不稳定，并导致其在 x_b 位置发生了破裂，在此定义 x_b 为射流柱破碎点 (column breakup location, 简称 CBL 点)。在 CBL 点，射流柱解体为大量的液滴，液滴进一步破裂、分散，最终雾化。

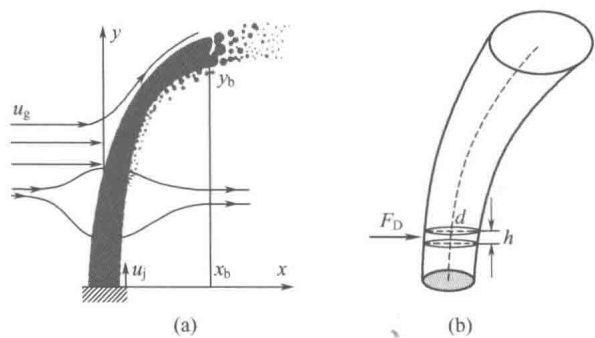


图 1.1 均匀气流中单根横向射流示意图 (a) 和简单横向射流截面单元示意图 (b)

从喷孔到 CBL 点, 只要作用于液相射流的横向气流的相对速度足够大, 就可以使液滴和液丝从射流柱上脱落, 分散至气相中, 脱落的液滴又可以进行二次破裂, 最后形成极小的雾化液滴。事实上, 横向射流气动雾化的优势在于将射流喷入气流后, 气流可以很快使液相射流变形、破裂为细小的液滴。在雾化过程中, 喷射的角度是一个非常重要的参数。实际应用中燃气涡轮机、航空发动机等通常采用多重射流构造。另一种方式是通过不同射流相互撞击来快速产生雾化液滴, 称为撞击流雾化过程。本节主要介绍如图 1.1 所示的横向射流气动雾化过程。另外, 关于横向射流雾化的一个重要概念是穿透深度, 即射流离开喷射壁面最远的距离。穿透深度是一个重要的设计参数, 涉及射流室的尺寸设计限度。

1.1.2 横向射流运动轨迹和穿透深度数学模型

横向射流雾化过程中的射流运动轨迹和液滴尺寸分布主要取决于三类变量: 第一类是液相参数, 包括射流流速 u_j 、液相密度 ρ_j 、液相表面张力 σ 、液相动力黏度 μ_j ; 第二类为气相参数, 分别为气体密度 ρ_g 、气体流速 u_g 和气体黏度 μ_g ; 第三类是几何参数, 主要是喷孔直径 d 。对于倾斜射流而言, 还需要考虑喷孔的倾斜角度的影响。

依据 Buckingham π 定理和量纲分析法则, 通过以上变量中的 7 个, 可形成无量纲的 4 个参数。横向射流气动雾化特性 (如射流轨迹、液滴尺寸分布等) 可以表示为:

$$C = f\left(\frac{\rho_j}{\rho_g}, \frac{u_j}{u_g}, \frac{\rho_g u_g^2 d}{\sigma}, \frac{\rho_j u_j d}{\mu_j}\right) \quad (1.1)$$

将以上式子变项转化, 可得到下式:

$$C = f(q, We_g, Re_j) \quad (1.2)$$

式中, $q = (\rho_j u_j^2) / (\rho_g u_g^2)$, 为液相动量和气相动量之比; $We_g = (\rho_g u_g^2 d) / \sigma$, 为基于喷孔直径和液相表面张力定义的气相韦伯数; $Re_j = \frac{\rho_j u_j d}{\mu_j}$, 为射流雷诺数。 q 是射流运动轨迹的关键参数, 当 q 值较大时, 射流弯曲小, 穿透深入; 而当 q 值较小时, 射流弯曲大, 穿透较浅。气相韦伯数 We_g 用来表示气相惯性与液相表面张力的相对重要性, 是研究不同破碎机理形成液丝和液滴尺寸的重要参数。

为了建立一种预测射流轨迹的模型, 可把液相射流看成是大量相互堆积

在一起的圆柱形微元,如图 1.1(b) 所示,每个微元的无穷小厚度为 h 。然后,可以把微元的运动看成是 y 方向上速度为 u_j 和 x 方向速度为 0 的抛射物。在此进行简化假设,认为作用于微元的力只有气动阻力,则有:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_g u_g^2 A_F C_d \quad (1.3)$$

式中, A_F 为微元迎风面积, $A_F = dh$; C_d 为阻力系数。将阻力和微元的质量与加速度之积关联起来,可以得到下式:

$$\frac{1}{2} \rho_g u_g^2 A_F C_d = \rho_j A_c h \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1.4)$$

式中, t 为时间; A_c 为微元的横截面积, $A_c = \pi d^2/4$, 将 A_c 和 A_F 的值代入式(1.4)中,可以得到:

$$\frac{x}{d} = \frac{1}{\pi} C_d \frac{\rho_g}{\rho_j} u_g^2 \frac{t^2}{d^2} \quad (1.5)$$

假设射流微元从喷孔中喷出时没有 x 方向上的速度,以 $y = u_j t$ 替代 t ,可以得到:

$$\frac{x}{d} = \frac{1}{\pi} C_d \frac{\rho_g}{\rho_j} \left(\frac{u_g}{u_j} \right)^2 \left(\frac{y}{d} \right)^2 \quad (1.6)$$

上式变形可得:

$$\frac{y}{d} = \sqrt{\frac{\pi}{C_d} q \left(\frac{x}{d} \right)} \quad (1.7)$$

式(1.7)成立,需要如下几点假设:①忽略射流微元的变形,并假设其从喷孔到 CBL 点的运动过程中始终保持为圆形;②忽略微元在运动过程中的质量损失;③忽略射流微元间的黏滞力。这三个假设对射流运动轨迹研究至关重要。与射流运动轨迹相比,研究人员对射流穿透深度更感兴趣,因为它代表着射流在 y 方向上的长度。目前,针对射流穿透深度,开展了大量研究,总结的经验关系式主要形式为:

$$\frac{y}{d} = C q^\alpha \left(\frac{x}{d} \right)^\beta \quad (1.8)$$

式中, C 、 α 、 β 均为常数。也有学者提出的关系式中还包含有韦伯数,以体现气相压力(或空气密度)变化的影响,然而,置信度并不高,动量比 q 才是关键参数。Wu 等通过实验,研究了横向射流雾化的多种特性,并对射流轨迹提出了如下关系式:

$$\frac{y}{d} = 1.37 \sqrt{q \left(\frac{x}{d} \right)} \quad (4 < q < 148) \quad (1.9)$$

对比式(1.9)和式(1.7),非湍流射流阻力系数的平均值 C_d 为1.67,这个值也可以通过数值模拟证实,有些研究还提出了更大的非湍流射流阻力系数。与前者相比,湍流射流阻力系数变化较大,这是因为随着射流雷诺数 Re_j 的增大,射流表面平滑度降低所致。

一般说来,绝大部分横向射流雾化应用都与高动量比 q 有关。在这种情况下,可以假设在CBL点形成的液滴在 x 方向上的初始速度为0(因其与射流分离),初始向上的速度为 u_j 。由于这些液滴脱离了射流,从而失去垂直方向速度,并在气流流动方向上加速,最终达到其在 x 方向上的最终速度。当然,所有这些结论都基于液滴之间没有相互作用的情况,同时忽略蒸发效应的影响。基于这些假设,液滴运动方程式可表示为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = A \rho_g \left(u_g - \frac{dx}{dt} \right)^2 C_{dx} \quad (1.10)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -A \rho_g \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 C_{dy} \quad (1.11)$$

式中, m 为液滴的质量, $m = \rho_j (4/3) \pi r^3$; A 为液滴的迎峰面积, $A = \pi r^2$; C_{dx} 和 C_{dy} 分别为 x 和 y 方向上相应的阻力系数。分别以 $t=0, y=0$ 和 $t=0, dy/dt=u_j$ 为初始条件,解式(1.11),可以得到:

$$y = \frac{1}{k_1} \ln(1 + k_1 u_j t) \quad (1.12)$$

以 $x=0$ 和 $t=0, dx/dt=0$ 为初始条件,解式(1.10),可以得到:

$$x = k_2 u_g t + \ln(1 - u_g k_2 t) \quad (1.13)$$

式(1.12)中 $k_1 = (A \rho_g C_{dy})/m$,式(1.13)中 $k_2 = (A \rho_g C_{dx})/m$ 。由于 u_g 一般比较大,液滴从CBL点运动至终点所需时间很短,因此可认为 t 远小于1。同样, k_2 也是一个非常小的数,由于 $\rho_g \approx 1, C_{dx} \approx 1, A \approx r^3$,一般 $r < 1\text{mm}$ 。所以式(1.13)中第二项的自然对数的值远小于1, x 的值主要由第一项决定,所以:

$$x \approx k_2 u_g t \quad (1.14)$$

将式(1.14)代入式(1.12)可得:

$$y = \frac{1}{k_1} \ln \left(1 + \frac{k_1}{k_2} \times \frac{u_j}{u_g} x \right) \quad (1.15)$$

由 $k_1/k_2 = C_{dy}/C_{dx}$,液滴在 x 和 y 方向上的阻力系数是相应雷诺数的函数,则有:

$$\frac{k_1}{k_2} \propto \frac{C_{dy}}{C_{dx}} \propto \frac{Re_x}{Re_y} \propto \frac{u_g}{u_j} \quad (1.16)$$

所以 $k_1 u_j / (k_2 u_g)$ 在式 (1.15) 自然对数第二项中的系数为常数。值得注意的是 $1/k_1$ 和 $C_{dy} \rho_g / \rho_j$ 成正比, C_{dy} 是 u_j 和 u_g 的函数。所以 $1/k_1$ 可以认为是动量比 q 的函数。射流穿透深度的一般函数形式, 可以写成:

$$y=Cq^\alpha \ln(1+\beta x) \tag{1.17}$$

式中, β 为常数。Inamura, Lakhamraju 和 Jeng 等学者采用式 (1.17) 拟合了不同流动参数下的实验数据, 得到的射流穿透深度经验式中的 $\beta \approx 1$, α 值在 $0.3 \sim 0.5$ 。Wu 等通过研究横向射流气动雾化的不同特性, 提出了最大射流穿透深度的关系式:

$$\frac{y}{d}=4.3q^{0.33}\left(\frac{x}{d}\right)^{0.33} \tag{1.18}$$

尽管不同学者提出的射流穿透深度表达式基于 y/d 的函数形式不同, 但大部分研究得出的 q 指数均在 $0.3 \sim 0.5$ 。这种较小的指数次方是合理的, 因为液滴形成的喷雾上边界主要在 CBL 点处, 且由射流解体而产生。由于与气流直接作用, 液滴迅速失去了初始垂直方向速度 (数值接近 u_j), 它们的运动更多的是液滴动量和气体动量相互作用的函数, 而不是射流和气流动量比 q 的函数。不同学者采取不同的实验方法和技术得到了一系列射流穿透深度经验关系式, 总结如表 1.1 所示。

表 1.1 射流穿透深度经验关系式总结

年份	作者	实验条件	射流穿透深度经验关系式
1973	Kush E A 和 Schetz J A	$Ma=4.0, 2.0$	$\frac{y}{d}=6q^{-0.49}$
1977	Schetz J A 和 Padhye A	$Ma=0.75, 0.45$, 室温	$\frac{y}{d}=C\sqrt{q}C_{ds}\left(\frac{d_{eq}}{d}\right)$
1993	Chen T H 等	$3<q<45$, $0.1\text{MPa}<p<0.2\text{MPa}$	$\frac{y}{d}=9.91q^{0.44}\left[1-\exp\left(\frac{-x/d}{13.1}\right)\right]\times$ $\left[1+1.67\exp\left(\frac{-x/d}{4.77}\right)\right]\times\left[1+1.06\exp\left(\frac{-x/d}{0.86}\right)\right]$
1993	Inamura T 等	对表面波和射流特性进行了实验研究	$\frac{y}{d}=(1.18+0.24d)q^{0.33}\ln\left(1+(1.56+0.48d)\frac{x}{d}\right)$
1996	Wu P K 等	室温, $p=0.14\text{MPa}$	$\frac{y}{d}=1.37\sqrt{q(x/d)}$
1998	Wu P K 等	室温, $p=0.16\text{MPa}$	$\frac{y}{d}=4.3\left(q\frac{x}{d}\right)^{0.33}$
2002	Becker J 和 Hassa C	$1<q<40$, $0.15\text{MPa}<p<1.5\text{MPa}$	$\frac{y}{d}=1.48q^{0.42}\ln\left(1+3.56\frac{x}{d}\right)$