

927399

湍浮力射流与羽流

〔联邦德国〕W·罗迪 主编



海洋出版社

X52
46035

399

7'52

46035

湍浮力射流与羽流

[联邦德国] W. 罗迪 主编

刘兰芬 王能家 译

朱 威 倪浩清 校

海 洋 出 版 社

1991年·北京

内 容 提 要

近年来, 由于工业及生活废水排入江河、湖泊、水库及海湾而造成的污染日趋严重, 准确预报污染物或废热对环境的影响成为国家有关部门极为关注的问题。本书详细讨论了环境问题中的湍浮力射流与羽流的基本机理、物理实验及数学模型的精细模拟。

全书共分四部分。第一部分为前言; 第二部分详述了湍浮力射流和羽流的物理概念及力学原理; 第三部分着重对浅流体层中的湍浮力射流特性进行研究; 第四部分介绍了应力代数湍流模型与其在垂直浮力射流中的应用。

本书可供从事湍流力学理论、实验和模拟技术等方面工作的研究人员、工程技术人员、研究生和大专院校师生参考。

湍浮力射流与羽流

[联邦德国] W. 迈迪 主编

刘兰芬 王能家 译

朱 康 倪洁清 校

*

海洋出版社出版 (北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 昌平建华印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/32 印张: 8.5 字数: 160千字

1991年4月第一版 1991年4月第一次印刷

印数: 1—700

*

ISBN 7-5027-1057-4/X·18 定价: 5.90元

译校者的话

《传热传质科学与应用》(The Science & Applications of Heat and Mass Transfer)丛书是关于传热传质科学与应用方面研究成果的大型论文集。《湍浮力射流与羽流》一书为丛书的第六卷,由联邦德国卡斯路(Karlsruhe)大学著名湍流力学教授W.罗迪主编。W.罗迪教授在近代湍流数值模拟研究方面有着重要贡献。

本书特点是理论性较强,数据资料丰富,数值模拟方法先进,具有较高的学术水平,其理论分析和数学模型已处于该研究领域的前列。

译校者结合本院已开展的“湍浮力回流数学模拟”专题研究翻译此书,受益匪浅,愿将译本奉献给读者。

W.罗迪教授为本书的中译本撰写了序言。译文幸得清华大学工程力学系周力行教授和水利水电科学研究院陈惠泉高级工程师的精心审阅,在此一并表示谢意。

译校者

1988年9月

前 言

流动中的浮力效应产生于密度变化，而密度变化则是由于温度或物质组分浓度的不同，或由于颗粒或气泡的存在所致。在许多工程和环境流动情况下，这种浮力效应是重要的。当废流体排入大气或水域时，废流体的密度往往与环境流体的密度不同，以至产生浮力。浮力对混合和稀释都有着决定性的影响。通常，环境本身是分层的，所以浮力效应又起着重要的作用。在化学、机械及核工程的各种设备中，不同温度或不同物质组分浓度的流体的混合常常伴随着浮力效应。与受热表面有关的自由对流现象也发生于这些设备中，这种自由对流现象在室内通风和防火问题中起着显著的作用。由于密度差而产生的浮力不仅影响平均流本身，而且更主要地影响湍流及受湍流影响的动量、热量和质量的交换，因此，浮力效应必须在湍流模型中加以考虑，而湍流模型则是湍流计算程序的根本部分。本书描述了已得到广泛应用的 $k-\epsilon$ 模型的一个扩展模型，它计及了浮力效应的影响。这个扩展模型是通过对一个较复杂的模型进行简化而推导出的。这个较复杂的模型包含着各湍流应力分量及各热量通量、质量通量分量的微分输运方程。根据其推导过程，这些微分输运方程自动包含有浮力项。首先对于一般流动情况给出这种浮力扩展的 $k-\epsilon$ 模型，然后推导出适合垂向浮力射流的特殊形式，并且将其应用到下述诸流动中加以检验。这些流动包括从纯

CAE/9/10

动量射流到纯羽流以及具有环境分层情况的广大范围。《湍浮力射流和羽流》一书是英国牛津Pergamon出版公司1982年以英文出版的,我很高兴地看到其中文译本,这将大大增加本书的发行量。

W.罗迪

卡斯路, 1986年10月

目 录

一、序言.....	(1)
二、湍浮力射流与羽流力学.....	(4)
致谢.....	(4)
符号对照表.....	(4)
2.1 引言	(8)
2.2 湍射流	(11)
2.2.1 射流近区	(11)
2.2.2 试验量测	(19)
2.2.3 平面射流	(36)
2.3 湍羽流	(43)
2.3.1 引言	(43)
2.3.2 稳定羽流	(46)
2.4 湍浮力射流(强迫羽流)	(58)
2.4.1 密度分层环境	(66)
2.4.2 横向流中的射流和羽流	(72)
2.4.3 横向流和分层环境中的射流和羽流	(78)
2.4.4 倾斜射流、负浮力与旋转流动	(81)
2.5 结论与评述	(82)
三、浅层流体中的湍浮力射流.....	(85)
致谢	(85)
符号对照表.....	(85)

3.1 引言	(88)
3.2 基础知识	(91)
3.2.1 无浮力平面射流	(91)
3.2.2 水平表面射流所受的浮力作用	(96)
3.2.3 受限空间的影响	(114)
3.3 浅层流体中的淹没浮力射流	(117)
3.3.1 平面射流的几何形式	(118)
3.3.2 圆形射流的几何形式	(129)
3.3.3 进一步的评论	(133)
3.4 浅层流体中的水平表面或交界面射流	(133)
3.4.1 径向表面射流及平面表面射流	(135)
3.4.2 径向及平面交界面射流	(138)
3.4.3 三维表面射流	(140)
3.5 结论	(142)

四、浮力流动的湍流模型及其在垂向浮力射流中的

应用	(145)
致谢	(145)
符号对照表	(145)
4.1 引言	(148)
4.1.1 湍浮力流动的计算问题	(148)
4.1.2 现有的计算方法及其限制条件	(150)
4.1.3 本文贡献	(153)
4.2 数学模型	(155)
4.2.1 平均流方程	(155)
4.2.2 在本节中将介绍速度相关 $\overline{u_i u_j}$ 、速度和 温度相关 $\overline{u_i T'}$ 及温度脉动相关 $\overline{T'^2}$ 的精 确方程	(158)

4.2.3	模型假设.....	(163)
4.2.4	应力通量代数模型.....	(174)
4.3	垂向浮力射流的计算.....	(180)
4.3.1	流动形态.....	(180)
4.3.2	垂向浮力射流的模型方程.....	(183)
4.3.3	计算程序及边界条件.....	(191)
4.3.4	结果与讨论.....	(194)
4.4	结论.....	(213)
附录	纯射流和纯羽流中速度和温度扩展的说明 ...	(216)
参考文献		(220)
技术词汇索引		(242)

一、序 言

来自工业、农业或生活中的废弃流体排放到环境中,不论是排入水域还是排入大气,通常都会产生湍射流和羽流。废弃流体的弥散和污染物相应的稀释,均由射流或羽流的时均流动和湍流特性所控制,而射流和羽流本身又取决于环境条件。在许多情况下,由于温度或化学成分的不同,或由于存在悬浮颗粒,排放流体的密度往往与环境流体密度不同。由此产生的浮力,对时均流动与混合特性会有很大作用,从而影响排放污染物的弥散。为了控制和减少废物排放的影响,需要弄清控制湍浮力射流和羽流的基本物理机理,还需要掌握预报这些流动的方法。本书旨在满足这些要求,详细论述了有关的基本机理,并介绍了估计不同条件下湍浮力射流与羽流性能的公式和计算这些性能的数学模型。

《传热传质科学与应用》从书的第四卷与本书有着密切的联系,它对垂向浮力射流和羽流部分的试验资料作了评述。这些内容本想收入本书,但该评论文章比本书的论文完成得早得多,所以将其作为单独一卷先行出版更为合适。本书首篇List的论文对先前发表的评论做了补充,它增添了新的试验数据,并以此为基础详细论述了湍浮力射流和羽流(包括处于横向流中的)的物理特性。射流机理的描述按照下列顺序:从具有剪切层不稳定性的孔口初始排放,到大尺度涡旋的发展,直到随之发生的充分发展的湍流。在此,讨论了体积力对射流发展的影响,特别是对决定稀释度的掺混的影

响；用已发表的实验数据对射流内部的湍流结构进行了检验，并阐述了浮力对此结构的影响；简略总结了环境密度分层和横向流对湍射流与羽流发展的影响。借助于量纲分析，将实验结果归纳成简单公式，用以描述诸如射流宽度和掺混量这样的主要积分参数。这些公式通常已足够用来估算射流和羽流的实用性能。

List的论文只论及无限大受纳水体中的射流与羽流，Jirka的文章则专门论述射流、羽流与水平壁、自由面或交面这些流体边界之间的相互作用。首先回顾了半无限空间中水平浮力表面射流的特性，着重注意了浮力对射流发展的影响；而后导出了一个掺混关系式，并与试验数据进行了对比；还讨论了形成水跃的可能。Jirka论文的主要部分是关于排入浅层、垂向受限流体中浮力射流的发展问题。研究了有重要实际意义的各种流动形态，例如同表面相互作用的淹没排放以及表面排放或密度交面排放。其中，主要受关注的是受限层中稳定或非稳定流动的发展问题，前者同沿界面的浮力扩展运动有关，后者则同回流区的形成有关。对不同流动形态的积分分析，推导出描述流动发展的简单公式，其中包括层状流稳定性准则。这些公式还可用于计算稀释度，通常也足以用来估算有实际意义的主要参数。

最后一篇论文是由Hossain和Rodi撰写，讨论了一个更为复杂的数学模型。这一模型适用于流动的精细计算，不仅能计算积分参数，还能计算流速、温度等的分布。这些物理量的分布是由基本微分方程所控制，例如，包含湍流输运项的时均Navier-Stokes方程和时均能量方程。能量方程可能受到浮力的强烈影响，因而在求解之前需要引入合适的湍流模型。Hossain和Rodi描述了这样一个模型，它是由对

湍流输运项采用微分输运方程的二阶模型进行简化而推导出的，湍流输运项即雷诺应力和湍流热通量或质量通量。得出的应力/通量代数模型适用于一般的浮力流动，但对那些具有逆梯度输运延伸区的浮力流动则不适用，所谓逆梯度输运即湍流输运与输运量的梯度反向。这个模型应用于垂直浮力射流的情形已得验证，关于垂直浮力射流的试验数据情况已在《传热传质科学与应用》丛书第四卷中做过综述。该模型在水平表面射流（见Jirka的论文）中的应用则在他文中叙述。根据这些验证可以判断，这一模型确能真实模拟湍浮力射流和羽流最重要的特性，应该是详细模拟这类流动的有用工具。

W·罗迪

1982年1月于联邦德国

卡斯路(Karlsruhe)

二、湍浮力射流与羽流力学

E. J. List¹⁾

致谢

本文写于加利福尼亚州帕萨迪纳(Pasadena)的加州理工学院。如无学院当局、教师、学生及职工们的支持, 本文将难以问世。几年来, 很多资助者对于W. M. Keck试验中心所开展的这项研究课题给予了支持。本文便是取材于在这些研究基金支持下所进行的研究工作。笔者尤其对美国国家科学基金会、南加利福尼亚Edison公司和学院的Ford能源计划所给予的支持表示感谢; 作者对Joan Matthews和Melinda Hendrix-Werts在准备本文的工作中给予的帮助衷心致意。

符号对照表

A	射流孔口横截面积
a	无量纲常数
B	单位浮力通量
$b(x)$	射流中心至边界的横向尺寸

1) 就职于美国加利福尼亚州帕萨迪纳的加州理工学院。

- b^* 射流热通量为最大时均值的37%处的横向尺寸
 b_u 射流流速为最大时均值的37%处的横向尺寸
 b_c 射流浓度为最大时均值的37%处的横向尺寸
 C_1, C_2, C_3, C_4 射流轨迹方程中的无量纲常数
 C_p, C_f 羽流和射流的不变量
 C_p 定压比热
 D 孔口处射流尺寸
 D_1, D_2 射流稀释方程中的无量纲常数
 E 热源释放的能量
 F_* 浮力
 G_r Grashof数
 g 重力加速度
 H 能量释放率
 h_M 密度分层环境中射流的长度尺度
 h_H 密度分层环境中羽流的长度尺度
 k_m, k_n, k_R, k_L 无量纲常数
 L 密度分层环境横向流中的水平长度尺度
 l_n 浮力射流长度尺度
 l_0 射流孔口尺度($=A^{\frac{1}{2}}$)
 M 射流孔口处的单位动量通量
 m 当地单位动量通量
 N Brunt—Väisälä 频率
 $\bar{P}$ 射流内部的时均压力
 $\bar{P}(\infty)$ 环境时均压力
 Q 孔口处射流单位质量通量
 q^* 单位质量湍动能
 R 浮力射流的当地Richardson数
 $R(\tau)$ 自相关函数
 R_p 羽流Richardson数(不变量)

r	柱坐标中横向尺寸
$r_{\frac{1}{2}}$	射流或羽流中流速为最大流速的一半处的横向位置
S	分层环境中的无量纲浮力射流参数
t	时间
t_0	参照时间
T'	温度脉动
T_m	射流轴线上的最大时均温度
T_∞	环境温度
U	横向流平均流速
U_0	射流孔口处的平均流速
U_m	射流轴线上的最大时均流速
$\overline{u}$	沿射流或羽流轴向的时均流速
u'	在 x 方向上相对于 $\overline{u}$ 的当地流速脉动
$\overline{V}$	横向时均流速
v'	相对于 $\overline{v}$ 的当地横向流速脉动
W	横向流中的射流轴线上的时均垂向流速
x	直角坐标系的顺流方向
Y	射流或羽流的示踪物质量通量
y	平面射流或羽流的横向坐标
$y_{\frac{1}{2}}$	平面射流或羽流中流速为最大流速的 $\frac{1}{2}$ 处的横向位置
Z	垂向坐标
$\overline{z}(x)$	横向流中射流的轨迹函数
z_t	横向流中羽流的特征长度尺度
z_c	横向流中射流过渡的特征长度尺度
z_s	横向流中射流的特征长度尺度

希腊符号对照表

α 掺混系数

α_1, α_2	无量纲常数
α_j, α_i	射流和羽流的掺混系数
β	当地单位浮力通量
δ_u	湍流动量通量系数
δ_z	压力系数
ε	单位湍流动能耗散率
ξ	无量纲坐标
κ	热扩散系数
θ	组分浓度
θ_m	最大时均组分浓度
$\overline{\theta}$	时均组分浓度
$\hat{\theta}$	通量加权的时均浓度
θ'	相对于时均组分浓度的当地偏差
λ	即 b_θ/b_u , 无量纲常数
λ_f, λ_z	微尺度
$\Lambda, \Lambda_\theta, \Lambda_u, \Lambda_f$	积分长度尺度
μ	当地单位质量通量
ν	运动粘性系数
π	3.1415927
ρ	流体密度
ρ_0	参照密度
ρ_a	环境流体密度
σ	体积热膨胀系数
τ	时间参数
τ_{xx}, τ_{xz}	粘性应力

上、下标说明

—	时间平均
/	相对于时间平均量的偏差
m	射流和羽流横断面上的最大时间平均值

2.1 引言

对于淹没式湍射流力学的研究虽然已有50多年的历史，但直到近期才受到更多的关注。这项研究已使得对射流随环境流体掺入而发展的过程有了更好的了解。这不仅有直接的科学意义，而且也有实际意义，这项工作受到那些关心利用射流概念进行系统设计的工程师们的关注。例如，对于现代社会的大部分废弃物的恰当的处理方法，就是把它们排放到环境中去进行地质化学性质的再循环。另外，在某些情况下，浮力射流会自然发生，美国当代历史上最大破坏性的自然事件之一就是圣·海伦斯（St. Helens）火山爆发，见图2-1。图上所示或许就是记录在案的最大Reynolds数的湍浮力射流了。

在本文中，如果流体运动的动能通量和动量通量主要来源于通过孔口的压力降低，我们便称这种流体运动为射流；若动能通量和动量通量主要来源于体积力，我们则称之为羽流。从射流到羽流的过渡流动，称为强迫羽流或浮力射流。以后读者会看到：几乎所有密度与环境流体密度不同的射流最终都要变成羽流。

在本文中，我们将试图包括那些自动与环境产生相互作用的射流和羽流流力学问题。还要尽力研讨环境的变化，诸如环境流体的密度分层、环境流体的均匀运动或环境流体内部湍流运动等如何对射流和羽流产生影响。随着讨论的进行可以看清楚，对这些影响的大部分还未进行详细研究，我们难