

土壤风蚀

测试与控制技术

麻硕士 陈 智 著



科学出版社

www.sciencep.com

土壤风蚀测试与控制技术

麻硕士 陈 智 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以土壤风蚀为主线,系统介绍了土壤风蚀理论及其测试与控制技术。本书共6章,主要包括:流体与大气边界层的基本特性;土壤风蚀颗粒起动与输送、风沙流结构、输沙率和输沙量、磨蚀与沉积、土壤风蚀影响因素、土壤风蚀方程等土壤风蚀的基本理论;用于土壤风蚀测试的相关工程测试方面的基本理论与技术方法;以移动式风蚀风洞原位测试为主要内容的土壤风蚀测试技术及其应用,包括移动式风蚀风洞测试系统的构建、风洞大气边界层模拟技术和移动式风蚀风洞原位测试技术;针对农田与草地的各种土壤风蚀控制技术,提出了截留率与抗风蚀效率2个土壤抗风蚀能力评价指标,建立了农田与草地抗风蚀模型,确立了干旱半干旱地区农田抗风蚀耕作尺度以及相应的土壤风蚀控制技术指标。

本书既可作为土壤风蚀研究专业技术人员的参考资料,也可作为农业工程学科与水土保持学科本科生、研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

土壤风蚀测试与控制技术/麻硕士,陈智著. —北京:科学出版社, 2010

ISBN 978-7-03-026811-2

I. 土… II. ①麻…②陈… III. ①土壤-风蚀-测试-研究-中国②土壤-风蚀-控制-研究-中国 IV. S157.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 025939 号

责任编辑:王志欣 汤 枫 / 责任校对:林青梅

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年2月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2010年2月第一次印刷 印张: 18

印数: 1—2 000 字数: 341 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

土壤风蚀是导致干旱、半干旱地区土地退化的主要原因之一,对自然和社会发展的影响十分巨大,相应的研究工作已越来越引起国际社会的高度重视。

用工程测试手段研究土壤风蚀问题,提高测试精度并根据测试结果研究土壤风蚀发生、发展规律,提出控制措施及有关技术对策参数,是近几年来土壤风蚀研究的热点问题。由于以往研究人员主要是依靠观测和简单仪器手段和专业知识从事土壤风蚀的分析研究,在一定程度上制约了土壤风蚀研究的深度与广度。事实上,研究土壤风蚀问题涉及农业工程、生态建设、水土保持、耕作学和土壤学等多学科综合交叉知识,需要集成多学科交叉融合技术的支持。

基于新的科学技术手段研究土壤风蚀测试与控制技术及装备具有重要意义。《土壤风蚀测试与控制技术》是该书作者指导下的研究团队在多项科学研究项目,即国家自然科学基金项目“西部地区地表土层抗风蚀能力测试与评估系统研究”(30260092)和“阴山北麓农牧交错区农田耕作尺度及其抗风蚀机理研究”(40861013)、内蒙古农业与社会发展科技攻关项目“地表土壤抗风蚀能力测试研究”(20030703)以及教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目“利用移动式风蚀风洞开展农田地表抗风蚀效应的测试研究”(20050129007)等研究成果的基础上,将农业工程领域中工程测试技术与土壤风蚀控制技术融为一体,形成了比较系统的土壤风蚀测试和控制的理论与技术体系。该研究成果对干旱半干旱地区防治土壤风蚀实践具有重要的指导价值。

该书共分6章,从基础理论到测试与控制技术自成体系,具有以下四大特点:一是完整性。该书比较全面地描述了干旱半干旱地区土壤风蚀的理论、工程测试技术基础和土壤风蚀测试与控制技术。该书以土壤风蚀为主线,内容翔实,观点鲜明,既有比较全面的土壤风蚀测试技术,又有科学严谨的实验数据支撑的土壤风蚀控制措施。二是可读性。该书语言通畅,用词严谨,数据翔实,循序渐进,综合了国内外土壤风蚀研究的最新理论成果,其中,许多内容都是作者多年的研究成果,这对于指导生产实践具有重要参考价值。三是知识性。该书是存储多种知识的跨学科文献,既有流体与大气物理、工程测试、农田耕作、生态建设等内容,又涉及农田和草地环境控制方法与技术,内容丰富多彩,博采众长,开卷有益。四是实用性。该书不仅可供相关研究教学人员参考,还可以对农田、草地土壤风蚀测试与控制的实际工作者提供技术与知识支持。

该书的出版对于研究干旱、半干旱和荒漠化地区土壤风蚀动态监测与控制技

术,实现基于信息和知识研究生态环境保护,实现农牧业可持续发展具有重大的现实意义。对从事相关研究的科技工作者和专业人才培养具有重要参考价值。

特此为序。

中国工程院院士

汪懋华

2009年11月1日

前 言

土地荒漠化、全球气候变化和生物多样性构成了当今世界三大科学前沿课题。三者所研究的对象各有侧重,但相互之间又有紧密联系。其中,荒漠化既是全球气候和生物多样性变化的结果,也是制约全球气候和生物多样性变化的重要因素。当然,荒漠化过程极为复杂,包括物理过程、生物过程和风沙地貌形成过程等方面。而土壤风蚀又是土地荒漠化与土地退化过程的重要组成部分和首要环节,是许多国家和地区亟需解决的一个主要环境问题。

严重的土壤风蚀不仅直接引起土壤质地变粗,结构变坏,土壤肥力下降,可持续生产能力降低,也导致沙尘暴、扬沙等天气灾害,从而污染空气和水质,损坏交通、通信、建筑等设施,影响人类身体健康。目前,全球有 9 亿多人口、100 多个国家和地区深受其害,每年因风蚀荒漠化造成的经济损失达 400 多亿美元。中国受土壤风蚀及土地沙漠化影响的面积占国土总面积的 1/2 以上,主要分布于北方干旱、半干旱地区,这些土地都不同程度地遭受着风蚀的严重影响,其中 60% 已经严重退化。风蚀引起了世界各国的广泛关注,各国政府投入了大量的人力、物力和财力以研究风蚀发生的机理、影响因素和有效防治风蚀的方法。

20 世纪 30~40 年代,美国大平原发生了灾难性“黑风暴”,土地被刮去 5~30cm 厚的表土层,土壤肥力衰竭,农田毁坏无法耕种。灾害的发生引起了科学界对风蚀问题的极大关注。1941 年,拜格诺(Bagnold)借助室内风洞对稳定地表和被侵蚀地表上的风速剖面、沙粒移动的起动风速、沙粒的跃移蠕动和风沙流地表沉积特性等问题进行了一系列试验研究,凭借其深厚的专业功底和丰富的试验资料,创造性地应用和发展了由冯·卡门(von Karman)、普朗特(Prantl)以及谢尔德(Shield)创立的流体力学理论,建立了“风沙物理学”,其代表著作《风沙和荒漠沙丘物理学》总结了他们多年的研究成果,为土壤风蚀研究提供了理论基础。之后,以切皮尔(Chepil)为代表的美国农业部科学家针对土壤风蚀防治进行了一系列的研究工作,系统地研究了土壤风蚀因子,如土壤颗粒组成、土壤结构、土壤有机质对土壤特性和土壤抗风蚀力的影响以及由风蚀产生尘暴的沉积学特征等,同时,对一系列防风蚀措施进行了试验和评价,包括机械措施、生物措施、农田管理、整治技术等,建立了风蚀流失量定量估计方程,研制了相应的风蚀研究仪器。1965 年,Woodruff 和 Siddoway 提出了著名的土壤风蚀方程(WEQ),标志着土壤风蚀从现状和理论研究向预测和应用研究的转变。随着科学技术的迅速发展,土壤风蚀机理、风蚀危害以及防治理论与技术方面的研究也取得了较大进展,逐渐

形成了比较完整的科学体系。

中国真正意义上的土壤风蚀研究始于 20 世纪 90 年代。进入 90 年代以后,随着北方沙尘暴天气出现的次数逐年增多,科学界将土壤风蚀与沙尘暴的研究紧密地结合起来,一是在研究土壤风蚀因子、土壤风蚀气候指数与可蚀性指数、土壤风蚀预报模型的基础上,重点研究土壤风蚀原理与控制技术等;二是在引进高级测试仪器设备(如粒子动态分析仪和粒子图像测速系统)的同时,针对土壤风蚀研究的特殊需要,自行研制开发了专用仪器设备,如移动式风蚀风洞及其配套测试系统、野外风速廓线采集系统、各种固定和旋转式集沙仪、沙尘水平通量测量仪等;三是在研究思路注重多学科的交叉与融合,注入力学、物理学、数学等思维与方法,涉及农业工程、生态建设、水土保持、耕作学和土壤学等多个领域,特别是用工程测试手段研究土壤风蚀问题,提高了测试精准度并根据测试结果确立了土壤风蚀控制的可靠技术参数,为干旱、半干旱地区控制土壤风蚀的实践提供了重要理论与技术依据。

自从拜格诺的《风沙和荒漠沙丘物理学》一书出版以来,围绕土壤风蚀的国内外相关著作并不很多。比较有代表性的专著有苏联学者兹纳门斯基的《沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题》、雅库波夫的《土壤风蚀及其防止》、中国学者吴正的《风沙地貌学》(1987 年)、刘贤万的《实验风沙物理与风沙工程学》(1995 年)、马玉明的《风沙运动学》(2004 年)等。研究表明,土壤风蚀的作用过程与机理远比风沙运动复杂得多。尽管这些著作多数以风沙为研究对象,但其基本理论对土壤风蚀研究仍具有一定的指导意义。

科学研究是永无止境的。研究土壤风蚀,其最根本的目的是将研究成果应用于控制土壤风蚀的实践。相应的论著也应该从理论研究向工程应用方面有所侧重。纵观国内外土壤风蚀研究的方法、特点和成果,中国的土壤风蚀研究与发达国家相比还有一定差距。特别在不同农牧业生产方式对土壤风蚀的影响以及土壤风蚀测试与控制技术方面还有许多亟待解决的问题。因此,内蒙古农业大学相关研究团队在总结前人研究的基础上,历时 9 个春秋对土壤风蚀测试与控制展开了深入的研究,取得了许多重要成果,发表了数十篇研究论文。

本书是在国家自然科学基金项目、内蒙古农业与社会发展科技攻关项目、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目等研究成果的基础上,专门针对干旱、半干旱地区农田和草原地表土壤风蚀问题,将农业工程领域中的工程测试技术应用于土壤风蚀研究中,把土壤风蚀基本理论与土壤风蚀的测试和控制技术融为一体,并综合了国内外土壤风蚀研究的最新理论成果,试图全面系统地阐述干旱、半干旱地区土壤风蚀的基础理论、测试与控制技术。

全书以土壤风蚀为主线,首先介绍有关流体和大气边界层的基本特性,接着从微观土壤颗粒运动着手探讨土壤风蚀颗粒起动与输送、风沙流结构、输沙率和

输沙量、磨蚀与沉积、土壤风蚀影响因子、土壤风蚀方程等土壤风蚀的基本理论;其次描述用于土壤风蚀测试的相关工程测试方面的基本理论与技术方法,在此基础上,阐述以移动式风蚀风洞原位测试为主要内容的土壤风蚀测试技术及其应用,包括移动式风蚀风洞测试系统的构建、风洞大气边界层模拟技术和移动式风蚀风洞原位测试技术等;最后,针对农田、草地土壤风蚀问题,重点论述各种土壤风蚀控制技术,新提出截留率与抗风蚀效率两个土壤抗风蚀能力评价指标,建立农田与草地抗风蚀模型,确立干旱半干旱地区农田抗风蚀耕作尺度以及相应的土壤风蚀控制技术指标。全书深入浅出,从基础理论到测试与控制技术自成体系。

本书的出版对于指导土壤风蚀研究和防治土壤风蚀的生产实践具有重要应用价值。正如汪懋华院士在序中所写的“全书内容翔实,观点鲜明,既有比较全面的土壤风蚀测试技术,又有科学严谨的实验数据支撑的土壤风蚀控制措施。……对于指导生产实践具有重要参考价值”。

参加本书撰写的人员有内蒙古农业大学机电工程学院麻硕士教授、陈智副教授和内蒙古农业大学职业技术学院赵永来副教授、孙悦超副教授以及内蒙古农业大学机电工程学院童淑敏教授、赵满全教授。陈智副教授负责统稿。

中国工程院院士、中国农业大学教授汪懋华先生为本书撰写了序言。全书由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所研究员、陕西师范大学长江学者特聘教授董治宝先生主审。内蒙古农业大学机电工程学院崔红梅、蔺相东、张云老师为本书绘制了插图。在此一并表示深深的谢意。

在本书的撰写过程中,参考了大量有关论著,引用资料均在各章后的参考文献中注出,在此向原作者表示谢意。由于本书作者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者不吝批评指正。

作者

2010年1月8日

目 录

序

前言

第 1 章 流体与大气边界层基本特性	1
1.1 流体的主要物理性质	1
1.1.1 流体的概念	1
1.1.2 流体的密度	3
1.1.3 流体的黏度	4
1.1.4 流体的压缩性和膨胀性	9
1.2 风速、风向与风力等级分类	10
1.3 大气边界层	12
1.4 大气湍流特性	16
1.4.1 湍流的特征	17
1.4.2 湍流的分类	18
1.4.3 研究湍流的统计平均方法	18
1.4.4 三种平均法之间的关系及各态遍历假说	21
1.4.5 脉动值及其性质	22
1.4.6 湍流强度与湍流积分尺度	22
1.5 混合长度理论	23
1.6 平均风速剖面	25
1.7 非光滑均质地形对平均风速剖面的影响	27
1.8 风沙气固两相流体与两相湍流模型分类	29
参考文献	31
第 2 章 土壤风蚀	32
2.1 基本概念	32
2.2 土壤风蚀颗粒起动与输送	34
2.2.1 土壤颗粒起动学说	34
2.2.2 土壤颗粒作用力	37
2.2.3 颗粒起动风速	41
2.2.4 风蚀颗粒的输送形式	42
2.3 风沙流结构	44

2.3.1	输沙量的垂直分布	44
2.3.2	风沙流中颗粒浓度分布	45
2.3.3	风沙流中土壤粒度组成随高度的分布	47
2.3.4	风沙流结构特征指标及影响因素	48
2.3.5	典型农田地表风沙流结构比较	49
2.4	输沙率和输沙量	51
2.4.1	输沙率沿程变化规律	52
2.4.2	风蚀量与下垫面特性的关系	54
2.5	磨蚀与沉积	56
2.6	土壤风蚀影响因子	57
2.6.1	风蚀气候因子	57
2.6.2	下垫面空气动力学粗糙度	59
2.6.3	植被覆盖度	62
2.6.4	土壤特性	64
2.6.5	人为因素	67
2.7	土壤风蚀方程	68
2.7.1	经验方程	68
2.7.2	半经验方程	69
2.7.3	理论方程	71
2.7.4	风蚀预报系统(WEPS)	72
	参考文献	73
第3章	工程测试技术	75
3.1	工程测试方法与测量误差	75
3.1.1	工程测试方法的分类和测试系统	75
3.1.2	测试技术的发展趋势	77
3.1.3	测量误差及其分类	78
3.2	信号分类与描述	79
3.2.1	信号分类	79
3.2.2	信号的描述	80
3.3	测试系统的特性	84
3.3.1	测试系统静态响应特性	85
3.3.2	测试系统动态响应特性	87
3.3.3	不失真测试的条件	89
3.4	常用传感器工作原理	90
3.4.1	电阻式传感器	90

3.4.2	电容式传感器	91
3.4.3	CCD 图像传感器	93
3.4.4	热电式传感器和霍尔传感器	94
3.4.5	传感器的选用原则	96
3.5	信号的调理	98
3.5.1	电桥电路	98
3.5.2	滤波器	101
3.5.3	数模及模数转换	103
3.6	计算机控制测试系统	106
3.6.1	数据的采集与保持	107
3.6.2	智能仪表	108
3.6.3	虚拟仪器	108
3.7	测试系统的设计步骤	111
	参考文献	111
第 4 章	土壤风蚀测试	113
4.1	野外观测与网络监测	113
4.1.1	野外观测与网络监测的概念及其发展历程	113
4.1.2	野外观测的目的、要求、内容与指标体系	114
4.1.3	土壤风蚀野外观测区的选择	116
4.1.4	土壤与水分的观测	116
4.1.5	风速的观测	123
4.1.6	植物群落的观测	127
4.1.7	风蚀量的观测	128
4.2	风洞构成与种类	135
4.2.1	风洞的构成	135
4.2.2	风洞的种类	136
4.3	风洞测试	138
4.3.1	移动式风蚀风洞的发展动态	139
4.3.2	移动式风蚀风洞的构造、原理与功用	143
4.3.3	移动式风蚀风洞测试系统	149
4.3.4	风洞大气边界层模拟技术	171
4.3.5	移动式风蚀风洞原位测试技术	176
4.4	粒子图像测速仪在土壤风蚀测试中的应用	178
4.4.1	粒子图像测速仪的组成和基本原理	178
4.4.2	颗粒相单相测量	180

4.4.3	气固两相测量	181
4.4.4	Stereoscopic PIV 与 Dynamical PIV	181
参考文献		182
第5章 农田土壤风蚀控制技术		185
5.1	农田防护林	185
5.1.1	防护林疏透度对防风效能的影响	186
5.1.2	林带间距和高度对防风效能的影响	188
5.1.3	农田防护林网防风效能分析	189
5.1.4	干旱半干旱地区农田防护林营造技术	190
5.1.5	农田防护林可持续发展的制约因素	191
5.2	植被覆盖	193
5.2.1	植被覆盖对近地表风速廓线的影响	193
5.2.2	不同植被覆盖度下土壤风蚀模数随风速的变化规律	194
5.2.3	植被覆盖的挡风效果	195
5.3	生物性结皮	197
5.3.1	生物性结皮的分布	198
5.3.2	生物性结皮对土壤风蚀的影响	198
5.3.3	生物性结皮的影响因子	199
5.4	保护性耕作	201
5.4.1	保护性耕作的概念、特点与核心技术	202
5.4.2	保护性耕作对土壤理化性状的影响	204
5.4.3	保护性耕作农田地表土壤风蚀量与高度的关系	206
5.4.4	保护性耕作农田地表对土壤风蚀量的影响	208
5.4.5	播种作业对土壤风蚀的影响	211
5.4.6	保护性耕作农田多因素风蚀模型的建立	212
5.4.7	保护性耕作对作物产量的影响	217
5.4.8	保护性耕作机具选型及存在问题	218
5.5	带状间作	224
5.5.1	麦薯带状间作对近地表风速的影响	225
5.5.2	麦薯带状间作对土壤水分和风蚀量的影响	227
5.5.3	麦薯带状间作对土壤物理机械组成的影响	228
5.5.4	麦薯带状间作对土壤有机质和养分含量的影响	229
5.5.5	麦薯带状间作对风蚀物的拦截效果	229
5.5.6	麦薯带状间作农田抗风蚀宽度的确定	234
5.6	砾石覆盖	237

5.6.1 砾石覆盖地表风蚀量垂向分布规律	237
5.6.2 砾石覆盖传统耕作农田的抗风蚀效率	242
参考文献	244
第6章 草地土壤风蚀控制技术	246
6.1 中国草地资源特点、作用与现状	246
6.2 草地土壤风蚀的物理过程	248
6.2.1 开垦草地加速土壤风蚀的物理过程	248
6.2.2 过度放牧加剧土壤风蚀的物理过程	249
6.3 不同利用强度对草地土壤风蚀的影响	250
6.3.1 不同利用强度草地土壤风蚀量随高度的分布	250
6.3.2 不同利用强度草地的抗风蚀效率	252
6.3.3 草地多因素风蚀模型	253
6.4 网围封育技术	254
6.4.1 网围封育的种类、特点与方法	255
6.4.2 种子库与网围植被恢复	256
6.4.3 网围封育对草地植被的恢复作用	257
6.5 工程修复技术	258
6.6 飞播技术	260
6.6.1 飞播技术进展	260
6.6.2 飞播中的 GPSMAS 导航技术及其定位精度	261
6.7 喷播技术	264
6.7.1 喷播技术进展	264
6.7.2 喷播机械	265
6.7.3 喷播技术应用	268
参考文献	269

第 1 章 流体与大气边界层基本特性

1.1 流体的主要物理性质

1.1.1 流体的概念

1. 流体

流体包括液体与气体两部分,其共同特性是易于流动。任何微小的剪切力都可以使流体发生较大的变形或位移。流体性质是指流体的宏观性质,主要有流动性、压缩性、黏性、热传导性和流体的表面张力等。

液体和气体的特殊性,表现在压缩性的概念上。按照流体的分子结构,液体分子的排列比较紧密,间隙小,分子力相对于气体来说要大得多,在极大的外力作用下其体积只有微小变化,因此,很难压缩,通常称这种液体为不可压缩流体;气体分子排列比较松散,间隙大,分子力比较弱,在较小的外力作用下,其体积可以发生明显的变化,因此,易于压缩,通常称这种气体为可压缩流体。液体的体积有一定的大小并可以形成自由表面,而气体则没有固定的自由表面,总是力图充满它所在的整个空间。

当然,液体和气体的这种特殊性也并非绝对的。例如,在低速、低压的通风管道内,对空气压缩性的影响,计算时可以忽略不计,结果并不会引起太大误差;而在分析液流发生水力冲击现象时,又必须考虑液体本身的压缩性。

液体和气体都是由分子组成的。这些分子不断地做无规则的热运动,分子之间又存在着空隙。因此,从微观角度看,对流体物理量的描述在时间和空间上的分布都是不连续的。但是,标准情况下,在每立方厘米的气体中约有 2.7×10^{19} 个分子,在每立方厘米的液体中约有 3.3×10^{22} 个分子。也就是说,在工程问题中,任何一个宏观体积所包含的分子数目都是非常多的,而人们感兴趣的流体宏观特性就变成了所包含大量分子的统计平均特性。因此,所讨论的流体并不以分子作为对象而是以一个引进的连续介质模型来进行研究。认为流体是由连续分布的流体质点所组成,或者说流体质点完全充满所占空间而没有空隙存在。这样,描述流体运动的宏观物理量,如密度、速度、压力、温度等都可以表示为空间和时间的连续函数,因此,可以充分利用连续函数来研究流体处于平衡和运动状态下的状

态参数问题。

2. 两相流体

两相流体是指两种相在同一个流动系统中同时存在的流动体。它必须考虑物质两相的力学关系问题。按照流场中物质的状态将两相流分为4种,即气体-固体颗粒两相流,如工业上的水泥、粮食的气力输送、自然界的风沙流、风雪流等;液体-固体颗粒两相流,如冰川流动、泥石流和水土流失等;互不相容的液体-液滴两相流,如乳状液的流动;气体-液滴两相流和液体-气泡两相流,如锅炉沸腾时的管内流动、制冷介质液相与气相的混合流动等。

两相流的理论分析比单相流困难得多,大量理论工作采用的是两类简化模型。第一类是均相模型,即把两相介质看成是一种混合非常均匀的混合物,假定处理单相流动的概念和方法仍然适用于两相流,但需对其物理性质和传递性质作合理的假定;第二类是分相模型,即认为单相流的概念和方法可分别用于两相系统的各个相,同时考虑两相之间的相互作用。两相流的试验研究,是掌握两相流规律的基本方法。目前,广泛应用光学法、散射法、示踪法等测定两相流中的重要参数,如压力、孔隙率、运动速度等。

3. 连续介质假定

研究流体在静止和流动状态下的规律时,常将流体视为由无数质点组成的连续介质。所谓流体质点是指含有大量分子的极小单元或微团。

4. 意义和作用

流体质点和连续介质是流体力学中的一个重要假设或理论模型,在流体力学研究中具有重要作用和意义。

流体中每个分子都在不停地做不规则运动,相互碰撞,交换着动量和能量。因此,流体的微观结构和运动在时间和空间上都表现为不均匀性、离散性和随机性。而测量或观察到的流体宏观结构和运动,却又明显地呈现出均匀性、连续性和确定性。有了连续介质的假设,在研究流体的宏观运动时,就可以把一个本来是大量离散分子的运动问题近似为连续且充满整个空间的流体质点运动问题,在空间和时间上都有确定的物理量,都是空间坐标和时间的连续函数,可以用数学分析工具来完成流体的科学假设或理论模型。

有了连续介质的假设,将流体近似看成是由流体质点连续、无空隙的组成后,一般不再考虑流体的分子结构。也就是说,从连续介质力学角度看,流体的形象是宏观的均匀连续体,而不是微观的包含大量分子的离散体。

流体力学中流体质点的位移,不是指个别分子的位移,而是指在流体力学中

应看成是几何点的分子团位移。特别是当流体质点处于静止状态时,就意味着它留在原地不动,尽管那里的分子由于热运动仍在不停地移动位置。

假如在连续介质内某点上取极限时,不管离该点多近的地方都有流体质点存在,并有确定的物理量,但不能认为在取极限时会出现序列点陷入分子间真空区的现象。因为已经将流体看成宏观连续体,不再认为其中有分子结构了。

1.1.2 流体的密度

流体单位体积内所具有的质量称为密度,以 ρ 表示。对于均质流体来说,流体密度是指单位体积内所包含的流体质量,即

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

式中, m 为流体质量(kg); V 为质量是 m 的流体的体积(m^3); ρ 为流体密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, $\Delta m / \Delta V$ 的极限值称为流体内部的某点密度。在任意时刻,空间任意点上流体质点的密度都具有确定的数值,因此,密度是坐标点(x, y, z)和时间 t 的函数,即

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

液体的密度基本上不随压强的变化而变化,随温度的变化略有改变。混合液体的密度,在忽略混合体积变化的条件下,可用下式估算(以1kg混合液为基准):

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \dots + \frac{a_n}{\rho_n}$$

式中, $\rho_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为各纯组分的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 为各纯组分的质量分数。

气体的密度随温度和压强的变化而变化,而且比液体显著得多,因此,要根据温度与压强条件来确定气体的密度。当气体压强不太高、温度不太低时,气体密度可按理想气体状态方程来计算,即

$$P \Delta V = nRT = \frac{\Delta m}{M} RT \quad \text{或} \quad \rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{PM}{RT}$$

式中, P 为气体的绝对压强(Pa); T 为热力学温度(K); M 为气体的摩尔质量($\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$); R 为气体通用常数,其值为 $8.315 \text{ kJ} \cdot (\text{kmol} \cdot \text{K})^{-1}$; n 为气体的摩尔数。

另外,若已知 T_0 、 P_0 下的 ρ_0 ,则 T 、 P 下的 ρ 还可按下式计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{P}{P_0}$$

T_0 、 P_0 和 ρ_0 分别为标准状态下的热力学温度、气体的绝对压强和气体密度。当温度较低,压强较高时,气体的密度应采用真实气体状态方程进行计算。

对于混合气体,可用平均摩尔质量 M_m 代替 M :

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n$$

式中, $y_i (i = 1, 2, \cdots, n)$ 为各组分的摩尔分率(体积分率或压强分率)。

1.1.3 流体的黏度

流体在静止时不能抵抗剪切变形,但当两层流体之间有相对运动时,其接触面上就会产生内摩擦力。运动快的流层对运动慢的流层产生拉力,运动慢的流层对运动快的流层产生阻力。流体具有内摩擦力的特性就是流体的黏性,或者说黏性就是流体具有的抵抗剪切变形的能力。由于存在黏性,流体在运动过程中必须为克服内摩擦力而做功,从而导致能量损失,使流体运动变得更为复杂。

黏度(或黏性系数)是表示流体内部摩擦的物理量,是一层流体对另一层流体做相对运动的阻力,黏度分为绝对黏度与相对黏度。绝对黏度又有动力黏度和运动黏度之分。液体中有两层面积各为 1cm^2 和相距 1cm 的油液,相对移动速度为 $1\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 时所产生的阻力称为动力黏度。在同一温度下液体的动力黏度与其密度的比值即为运动黏度。而相对黏度是在工业生产中用各种特定仪器计量的黏度,如恩氏黏度等。这些数值一般可通过公式转为绝对黏度。

流体的重要特点在于它的流动性,其内部质点之间极易产生相对位移。真实流体质点的相对运动,必然表现出剪切力,称之为内摩擦力。这一性质就是流体的黏性,是其在流动时产生阻力的内在原因。

对于流体,通常可以把它们分为牛顿流体和非牛顿流体两大类。

在流体力学中,牛顿流体也称为理想流体,符合牛顿定律,即两相邻流体层之间单位面积上的内摩擦力(实际上是表面力中的切应力,又称剪应力)与两流体层间的速度梯度 dv/dy 成正比。所有气体和大部分低分子量(非聚合)的液体或溶液均属于牛顿流体。

凡是不符合牛顿流体公式的流体,统称为非牛顿流体。其中,流变行为与时间无关的流体有假塑性流体、胀塑性流体和宾汉(Bingham)流体,而流变行为与时间有关的流体,又分为触变性流体和反触变性流体。

1. 牛顿黏性定律

假定一种流体,它介于面积都为 A 的两块平行平板之间,两平板之间以一很小的距离 Y 分隔开,该系统开始处于静止状态,如图 1.1 所示。

当时间 $t = 0$ 时,将下平板固定,使上平板以恒定速度 v 在 x 方向上运动。紧贴于运动平板下方的一薄层流体也以同一速度运动。当 v 不太大时,板间流体处于流动状态,且靠近运动平板的流体流速较大,而离平板越远的流体其速度越小,