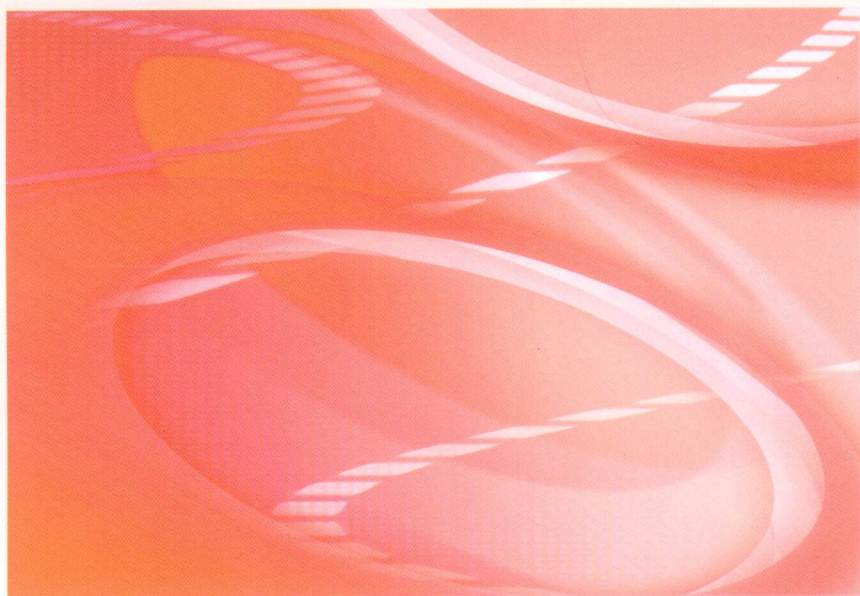


高等学校规划教材
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

传输原理

朱光俊 主编 孙亚琴 副主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

传 输 原 理

朱光俊 主 编
孙亚琴 副主编

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2009

内 容 提 要

本书由动量传输、热量传输、质量传输三篇,共18章组成。动量传输部分有动量传输的基本概念、动量传输的基本定律、管流流动、边界层流动、流体的流出、射流、冶金与材料制备及加工中的动量传输和相似原理与量纲分析等内容;热量传输部分有热量传输基本概念及基本定律、传导传热、对流换热、辐射换热和冶金与材料制备及加工中的热量传输等内容;质量传输部分有质量传输基本概念及基本定律、扩散传质、对流传质、冶金与材料制备及加工中的质量传输以及动量、热量、质量传输的类比等内容。书中各章均设有小结、习题与思考题;书末附有习题参考答案和常用数据。全书注重从三种传输具有类似性的角度,阐述了流体流动过程、传热过程以及传质过程的传输基础理论,并力求将这些基础理论应用于冶金与材料制备及加工工程实践中。

本书可作为冶金工程、材料制备工程、材料加工工程等专业的本科生教材,亦可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

传输原理/朱光俊主编. —北京:冶金工业出版社,
2009.7

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4934-6

I. 传… II. 朱… III. 输运理论—高等学校—教材
IV. 0369

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第097250号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 王 优 宋 良 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4934-6

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009年7月第1版,2009年7月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;20印张;536千字;305页;1-3000册

42.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

传输原理课程是冶金、材料类专业本科生的主要专业基础课程，在学完高等数学和大学物理课程后开设，它是冶金、材料类专业本科生的前期必修课程。通过本课程的教学，可以使学生掌握传输理论的基本概念、基本定律及基本解析方法，理解强化生产过程和改进生产工艺的传输基础理论，同时使学生具备初步分析和解决生产工艺过程中传输实际问题的能力，为进一步学习专业课奠定良好基础。

传输 (transport) 与输送、转移、传递同义，都是指自然界不同条件下的物质或能量随空间及时间的变化。传输现象 (transport phenomena) 普遍存在于各工程技术领域。传输过程是流体的动力过程、传热过程及物质传递过程的统称，也称传递过程或速率过程。传输过程中进行着动量、热量、质量的传递与输送，分别称之为动量传输 (momentum transport)、热量传输 (heat transport) 和质量传输 (mass transport)。传输原理或传递原理主要研究流体的动量、热量、质量传输或传递过程的速率，三者之间具有类似统一性。从 20 世纪中叶以来，传输原理已成为一门独立学科，并广泛应用于冶金、材料、机械、化工、能源、环境等工程领域。随着科学技术的发展，冶金已从狭义的从矿石提取金属，发展为广义的冶金与材料制备及加工过程工程，传输原理在认识冶金过程与材料制备及加工过程的本质，发展冶金与材料制备及加工新理论、新技术、新工艺、新方法、新流程等方面发挥了重要的支柱作用，它已经成为现代冶金与材料制备及加工工程的理论基础。

按照冶金行业“十一五”教材出版规划的要求，根据多年的教学经验和体会，在参考国内外相关资料的基础上，结合培养应用型人才的需要，我们编写了《传输原理》一书。本书由动量传输、热量传输、质量传输三篇，共 18 章组成，书中内容力求体现系统性和实用性。动量传输、热量传输、质量传输统称传输原理，亦称“三传”，它们是冶金与材料制备及加工过程中三个不可分割的物理过程，通常有理论研究、实验研究和数值计算三种方法。本书主要介绍理论研究方法、实验研究方法和部分数值计算方法，即以质量守恒定律、牛顿第二定律和热力学第一定律为依据，注重从“三传”具有类似性的角度阐述了动量传输、热量传输、质量传输的基本概念、基本定律及基本解析方法，并结合冶金、材料学科的新发展及新技术，介绍“三传”在冶金与材料

制备及加工工程实践中的应用。

本书由重庆科技学院朱光俊教授任主编（编写第1篇和第3篇），上海应用技术学院孙亚琴副教授任副主编（编写第2篇），全书习题答案由重庆科技学院杨艳华老师验算。重庆大学博士生导师郑忠教授审阅了全书，对本书的编写提出了许多宝贵意见，在此深表谢意！

本书可作为冶金工程、材料制备工程、材料加工工程等专业的本科生教学用书，亦可供相关专业的工程技术人员参考。教材适用80~90学时，可根据专业需要在内容上加以取舍。为便于学生自主学习，书中各章均附有小结、习题与思考题，书末附有习题参考答案。该课程在重庆科技学院课程中心建立了专门网站，网站中授课课件、授课教案、习题指导、实验指导、参考资料等教学资源全面开放。课程网址：<http://eol.cqust.cn>。

由于编者水平有限，书中不足与不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2009年2月

目 录

第1篇 动 量 传 输

1 动量传输的基本概念	1
1.1 流体的概念及连续介质模型	1
1.1.1 流体的概念	1
1.1.2 连续介质模型	2
1.2 流体的密度、重度及比体积	2
1.3 流体的压缩性及膨胀性	3
1.3.1 液体的压缩性及膨胀性	3
1.3.2 气体的压缩性及膨胀性	3
1.3.3 可压缩流体和不可压缩流体	5
1.4 流体的黏性	5
1.4.1 流体的黏性及黏性力	5
1.4.2 牛顿黏性定律	6
1.4.3 黏度	7
1.4.4 黏性动量传输及黏性动量通量	8
1.4.5 实际流体和理想流体模型	9
1.5 流体上的作用力、能量及动量	9
1.5.1 流体上的作用力	9
1.5.2 作用力、能量及动量之间的关系	10
小结	11
习题与思考题	11
2 动量传输的基本定律	13
2.1 流体流动的基本特性	13
2.1.1 流体流动的分类	13
2.1.2 流体流动的研究方法	13
2.2 流体的质量平衡方程——连续性方程	17
2.2.1 直角坐标系中的连续性方程	17
2.2.2 管流连续性方程	19
2.3 黏性流体的动量平衡方程——纳维-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程	20
2.3.1 动量平衡的定义	20
2.3.2 N-S 方程的推导	20

2.3.3 N-S 方程的讨论	23
2.4 理想流体的动量平衡方程——欧拉 (Euler) 方程	24
2.5 流体机械能平衡方程——伯努利 (Bernoulli) 方程	25
2.5.1 伯努利方程的微分式	25
2.5.2 伯努利方程的积分式	26
2.5.3 伯努利方程在管流中的应用	27
2.6 流体静压力平衡方程	34
2.6.1 静止流体的压力分布方程	34
2.6.2 流体的静压力	35
小结	37
习题与思考题	38
3 管流流动	41
3.1 流体流动状态	41
3.2 圆管层流流动	42
3.2.1 微分方程的建立	42
3.2.2 截面速度分布	43
3.2.3 截面平均速度	43
3.3 圆管紊流流动	44
3.4 管流阻力	44
3.4.1 圆管层流摩阻	45
3.4.2 圆管紊流摩阻	45
3.4.3 非圆形管道的摩阻	47
3.4.4 管流局部阻力损失	48
3.4.5 管流系统阻力损失	50
小结	52
习题与思考题	52
4 边界层流动	54
4.1 边界层概念	54
4.1.1 平板边界层	54
4.1.2 管流边界层	55
4.2 边界层微分方程	56
4.2.1 边界层微分方程的建立	56
4.2.2 边界层微分方程的解	57
4.3 边界层积分方程	57
4.3.1 边界层积分方程的建立	57
4.3.2 层流边界层积分方程的解	58
4.3.3 紊流边界层积分方程的解	59

4.4 流体绕流摩阻	60
4.4.1 平板层流绕流摩阻	60
4.4.2 平板紊流绕流摩阻	61
4.4.3 平板混合边界层绕流摩阻	62
4.4.4 球体绕流摩阻	63
小结	63
习题与思考题	63
5 流体的流出	65
5.1 不可压缩流体自孔口的流出	65
5.1.1 流体经薄壁孔口的流出	65
5.1.2 流体经管嘴的流出	66
5.2 液体自容器底部孔口的流出	68
5.2.1 液面高度不变时的流出速度	68
5.2.2 定量液体的流空时间	68
5.3 可压缩流体自孔口的流出	69
5.3.1 声速和马赫数	69
5.3.2 流速基本公式	70
5.3.3 可压缩气体流出的临界值	71
5.3.4 超声速流动及拉瓦尔管	73
5.3.5 可压缩气体流出的综合分析	74
5.3.6 可压缩气体流出的计算	74
小结	77
习题与思考题	78
6 射流	79
6.1 自由射流	79
6.1.1 自由射流的基本特性	79
6.1.2 自由射流的动量守恒	80
6.1.3 自由射流的速度分布	80
6.2 半限制射流	82
6.2.1 贴壁射流	82
6.2.2 冲击射流	82
6.2.3 附壁效应(柯安达效应)	83
6.3 限制射流	84
6.3.1 限制射流的基本特点	84
6.3.2 限制空间内的流体循环	84
6.3.3 限制空间内的旋涡区	85
6.4 旋转射流	85

6.4.1 旋转射流的特性	85
6.4.2 旋流强度	87
小结	89
习题与思考题	90
7 冶金与材料制备及加工中的动量传输	91
7.1 气液两相流动	91
7.1.1 气体流过液体表面的流动	91
7.1.2 气体喷入液体中的流动	91
7.1.3 气体垂直喷向液体表面的流动	93
7.2 气固两相流动	94
7.2.1 固定料层流动	94
7.2.2 气动输送过程	99
7.3 热气体的流动	102
7.3.1 热气体的压头	102
7.3.2 热气体静力平衡方程	104
7.3.3 热气体管流伯努利方程	104
7.3.4 热气体管流阻力损失计算	105
7.3.5 热气体管流伯努利方程的应用	106
小结	107
习题与思考题	108
8 相似原理与量纲分析	109
8.1 相似的概念	109
8.1.1 几何相似	109
8.1.2 物理相似	109
8.1.3 单值条件相似	110
8.1.4 相似特征数	110
8.2 相似三定理	112
8.2.1 相似第一定理	112
8.2.2 相似第二定理	112
8.2.3 相似第三定理	112
8.3 相似转换及特征数方程	113
8.3.1 相似转换	113
8.3.2 确定特征数方程	114
8.3.3 由特征数方程确定经验公式	115
8.4 量纲分析及 π 定理	116
8.4.1 量纲及量纲和谐原理	116
8.4.2 量纲分析法确定相似特征数	116

8.4.3 π 定理	117
8.5 模型实验法	118
8.5.1 模型实验的相似条件	118
8.5.2 近似模型法	118
8.5.3 模型设计	119
8.5.4 模型比例方程	120
8.5.5 模型实验方法	120
小结	121
习题与思考题	122

第 2 篇 热 量 传 输

9 热量传输的基本概念及基本定律	123
9.1 热量传输的基本概念	123
9.1.1 热量传输的基本方式	123
9.1.2 温度场	125
9.1.3 等温面及等温线	125
9.1.4 温度梯度	126
9.1.5 热通量、热流量和总热量	126
9.1.6 热阻的概念	126
9.2 热量传输的基本定律	127
9.2.1 傅里叶导热定律	127
9.2.2 傅里叶-克希荷夫导热微分方程	129
小结	133
习题与思考题	133
10 传导传热	134
10.1 稳定导热	134
10.1.1 一维平壁稳定导热	134
10.1.2 一维圆筒壁稳定导热	141
10.2 不稳定导热	148
10.2.1 不稳定导热的基本概念	148
10.2.2 第三类边界条件下的薄材加热 (集总参数法)	152
10.2.3 第三类边界条件下有限厚物体的不稳定导热	154
10.2.4 第一类边界条件下有限厚物体的不稳定导热	158
10.2.5 半无限大物体在第一类边界条件下的不稳定导热	160
10.3 导热的有限差分解法	162
10.3.1 有限差分法的基本概念	162
10.3.2 二维稳定导热的差分解法	164

10.3.3 一维不稳定导热的差分解法	167
小结	171
习题与思考题	171
11 对流换热	174
11.1 对流换热的一般分析	174
11.1.1 对流换热简介	174
11.1.2 对流换热的分类	174
11.1.3 对流换热系数	175
11.1.4 影响对流换热系数的因素	175
11.1.5 对流换热的研究方法	176
11.1.6 热边界层概念	176
11.1.7 对流换热系数表达式	177
11.2 流体流过平板时的对流换热	178
11.2.1 边界层对流换热微分方程组	178
11.2.2 平板层流换热微分方程组的解析解	178
11.2.3 平板层流换热的近似积分解	179
11.2.4 流体沿平板紊流流动时的对流换热	180
11.3 流体管内流动对流换热	182
11.3.1 管内流动时的热边界层	182
11.3.2 管内层流时的对流换热	182
11.3.3 管内紊流时的对流换热	183
11.4 流体绕流对流换热	188
11.4.1 流体横向掠过圆管时的对流换热	188
11.4.2 流体流过球体时的对流换热	190
11.5 自然对流换热	191
11.5.1 自然对流换热的特点	191
11.5.2 大空间自然对流换热的特征数方程	192
小结	194
习题与思考题	194
12 辐射换热	196
12.1 热辐射的基本概念	196
12.1.1 热辐射的本质和特点	196
12.1.2 辐射能的吸收、反射和透过	197
12.1.3 辐射力和辐射强度	198
12.2 黑体辐射的基本定律	199
12.2.1 人工黑体模型	199
12.2.2 普朗克 (Planck) 定律	200

12.2.3 斯忒藩-玻耳兹曼 (Stefan-Boltzmann) 定律	201
12.2.4 朗伯定律 (余弦定律)	201
12.3 实际物体的辐射	202
12.3.1 实际物体的辐射特性	202
12.3.2 实际物体吸收辐射的特性	205
12.3.3 基尔霍夫定律	205
12.4 角系数	206
12.4.1 角系数的定义	206
12.4.2 角系数的性质	207
12.4.3 角系数的确定方法	208
12.5 固体表面间的辐射换热	212
12.5.1 两个黑体表面间的辐射换热	212
12.5.2 两个灰体表面间的辐射换热	213
12.5.3 三个灰体表面间的辐射换热	217
12.5.4 有遮热板时的辐射换热	221
12.6 气体与固体表面间的辐射换热	223
12.6.1 气体辐射的特点	223
12.6.2 气体吸收定律 (比尔定律)	225
12.6.3 气体的黑度和吸收率	225
12.6.4 气体与围壁表面间的辐射换热	230
12.7 对流与辐射共同存在时的热量传输	231
小结	231
习题与思考题	232
13 冶金与材料制备及加工中的热量传输	234
13.1 散料层内热交换	234
13.1.1 固定料层内热交换	234
13.1.2 流化料层内热交换	238
13.2 换热器热交换	240
13.2.1 换热器的种类和流体流动方式	240
13.2.2 换热器的工作原理	240
13.2.3 换热器的平均温差	241
13.2.4 换热器的热工计算	243
13.3 蓄热室热交换	247
13.3.1 蓄热室的工作原理	247
13.3.2 蓄热室内传热系数	249
13.4 凝固过程传热	252
13.4.1 连铸凝固传热微分方程	252
13.4.2 连铸凝固传热的数值解法	253

13.5 热处理过程传热	254
13.5.1 物性参数的确定	254
13.5.2 表面传热系数的确定	255
13.6 焊接过程传热	256
13.6.1 瞬时集中点状热源作用下的温度场	256
13.6.2 瞬时集中线状热源作用下的温度场	256
13.6.3 表面散热对温度场的影响	257
小结	257
习题与思考题	258

第3篇 质 量 传 输

14 质量传输基本概念及基本定律	259
14.1 质量传输基本概念	259
14.1.1 浓度及其表示方法	259
14.1.2 浓度场及浓度梯度	261
14.2 质量传输基本定律	261
14.2.1 菲克 (Fick) 第一定律	261
14.2.2 菲克 (Fick) 第二定律	264
小结	265
习题与思考题	266
15 扩散传质	267
15.1 稳定扩散传质	267
15.1.1 气体通过平板的扩散	267
15.1.2 气体通过圆筒壁的扩散	268
15.2 不稳定扩散传质	269
15.2.1 传质微分方程及其边界条件	269
15.2.2 表面浓度为常数时, 有限厚物体的不稳定扩散传质	270
15.2.3 介质浓度为常数时, 有限厚物体的不稳定扩散传质	271
15.2.4 表面浓度为常数时, 无限厚物体的不稳定扩散传质	271
小结	272
习题与思考题	272
16 对流传质	273
16.1 对流传质基本概念	273
16.1.1 浓度边界层	273
16.1.2 对流传质系数	274
16.1.3 对流传质特征数	274

16.2 对流传质特征数方程	275
16.2.1 平板层流对流传质	275
16.2.2 平板紊流对流传质	276
16.2.3 球体绕流对流传质	277
16.2.4 管内紊流对流传质	277
16.3 对流传质系数模型	277
16.3.1 薄膜理论	278
16.3.2 渗透理论	278
16.3.3 表面更新理论	278
小结	278
习题与思考题	279
17 冶金与材料制备及加工中的质量传输	280
17.1 相间平衡与平衡浓度	280
17.2 双膜理论及相间传质	280
17.3 两相反应中的扩散	282
17.3.1 气固两相反应中的扩散	282
17.3.2 气液两相反应中的扩散	283
17.4 多孔材料中的扩散	285
17.4.1 分子扩散	286
17.4.2 克努森 (Knudsen) 扩散	286
17.4.3 表面扩散	286
小结	287
习题与思考题	288
18 动量、热量、质量传输的类比	289
18.1 三种传输概念的类比	289
18.2 三种物性传输的类比	289
18.3 三种对流传输的类比	290
18.3.1 雷诺 (Reynolds) 类比	290
18.3.2 柯尔伯恩 (Colburn) 类比	291
小结	292
习题与思考题	292
部分习题参考答案	293
附录	295
附录 1 大气压下干空气的物理性质	295
附录 2 大气压下水的物理性质	296
附录 3 几种常见气体的物理性质 (20℃)	296
附录 4 几种常见气体的 μ_0 、 C 及 M 值	296

附录 5 大气压下烟气的物理性质	297
附录 6 各种材料的密度、导热系数、比热容	297
附录 7 一些金属材料的导热系数	299
附录 8 几种耐火材料、隔热材料的性质	300
附录 9 各种材料的黑度	301
附录 10 高斯误差函数值	303
附录 11 一些气体在空气中的扩散系数	304
附录 12 一般溶液的相互扩散系数 D_{AB} (25℃)	304
附录 13 固体中的扩散系数 D_{AB}	304
参考文献	305

第1篇

动量传输

物质及能量传输过程,按其产生和存在的条件可分为物性传输和对流传输两大类。物性传输主要由物体本身的传输特性构成,取决于物体的物性,例如,分子扩散取决于扩散系数;而对流传输则是由于物体的宏观运动所产生的,它不仅与物体的物性有关,还取决于物体的运动特性。

动量传输主要研究流体的性质及流动特性,内容涉及流体静力学及动力学等范畴。物性动量传输是由流体分子微观运动所构成的黏性作用而产生的动量传输过程,取决于流体的黏性,亦称黏性动量传输;对流动量传输是在流体流动条件下产生的动量传输过程,取决于流体的密度和流动速度。显然,黏性流体在进行对流动量传输过程中,同时存在着物性动量传输过程。

在冶金与材料制备及加工过程中,动量、热量、质量传输同时存在。例如,换热器中的高温气体把热量传给温度较低的器壁时,器壁受热升温,热量传输的速率与流体的性质及流动形式有关。又如,石墨溶于铁液的过程,其溶解速率与靠近石墨的铁液流动状况有关。所以,动量传输可以被认为是传输现象中最基本的传输过程。本书第1章~第8章将对动量传输基本概念、基本定律及基本解析方法予以系统的介绍。

1 动量传输的基本概念

本章主要介绍流体及流体的基本特性,为后续内容的学习打下基础。首先,介绍流体的概念及连续介质模型,随后介绍流体的物理性质,如流体的密度、比体积等;接下来,介绍流体与固体相区别的力学性质,如流体的流动性、可压缩性和黏性等;最后,介绍作用在流体上的力、能量和动量之间的关系。流体的黏性是本章的重点内容。

1.1 流体的概念及连续介质模型

1.1.1 流体的概念

在自然界中能够流动的物质(如液体及气体)统称为流体。从物体的受力特点看,固体在受剪切力的作用下仅能表现为一定的变形,而且当作用力不变时,该变形就会停止。由于流体内部的内聚力极其微小,相对于拉力及剪切力来讲,它们都可以被认为是没有抵抗力的。当流体受到任何剪切力时,就能连续变形(流动)。流体的流动性就是这种与固体不同的容易变形(即流动)的特性。由于气体分子的平均间距远大于液体,分子间的引力较小而更易自由流动,因此气体分子的自由运动使之能充满容器的空间。液体虽然也具有受容器限制的一定体积,但

在其与气体共存于一定空间时,则存在着一定的自由表面。流体除流动性外,还具有连续性、压缩性(膨胀性)及黏性。

1.1.2 连续介质模型

根据流体的物质结构,流体是由大量的分子组成的,分子做随机的热运动,分子间有比分子尺度大很多的间距。从微观上看,在某一时刻,流体分子分散地、不连续地分布于流体所占有的空间,并随时间不连续地变化。但是在大多数工程应用中,人们关心的是大量分子的统计(即宏观)效应而不是流体单个分子的行为。在讨论流体动量传输问题时,一般不涉及流体的分子结构及内部分子运动,而是将其作为宏观过程来处理,这就是“宏观流体模型——连续介质模型”。

连续介质模型以流体质点为最小的研究对象。所谓流体质点,是指包含有大量流体分子,并能保持其宏观力学性能的微小体积单元。从而可把流体看成是由无数连续分布、彼此无间隙地占有整个空间的流体质点所组成的介质。这样就可以将描述流体流动的一系列宏观物理量(密度、速度、压力、温度等)看成是空间坐标和时间的单值连续可微函数,以便于用数学方法来描述和研究流体流动的规律,这就是连续介质模型的意义所在。

1.2 流体的密度、重度及比体积

流体具有质量和重量,流体的密度、重度及比体积是流体最基本的物理量。

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度(ρ),单位为 kg/m^3 ;单位体积流体所具有的重量称为流体的重度(γ),单位为 N/m^3 。

对质量分布不均匀的流体,某点密度的定义式为:

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV} \quad (1-1)$$

式中, ΔV 为流体微元体积, m^3 ; Δm 为流体微元体积的质量, kg 。

对质量分布均匀的流体(均质流体),某点密度的定义式为:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-2)$$

式中, V 为流体的体积, m^3 ; m 为流体的质量, kg 。

均质流体的重度为:

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1-3)$$

式中, G 为流体的重量, N ; g 为重力加速度, m/s^2 。

单位质量流体所具有的体积称为比体积,用 v 表示,单位为 m^3/kg 。显然,比体积与密度互为倒数,即:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-4)$$

重度的概念一般只在工程单位制中应用,在国际单位制中常用 ρg 来代表,但要注意其单位是 N/m^3 。常用流体的密度值,可参考附录1~附录3。

例 1-1 已知水的密度 $\rho_{\text{水}} = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$, 空气的密度 $\rho_{\text{空}} = 1.293 \text{kg}/\text{m}^3$, 试计算水及空气的