



PRINCIPLE AND EQUIPMENT OF
CENTRIFUGAL COLLECTION

离心捕集原理与设备

薛勇 著



科学出版社

离心捕集原理与设备

薛 勇 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书在实验研究基础上,系统介绍典型离心捕集设备——旋风分离器、旋风预热器和水力旋流器的基本结构、工作原理、性能参数及其影响因素等,并且将笔者的项目研究成果充实其中。另外,还对涉及离心捕集设备的流体力学基础、气溶胶力学基础、离心捕集设备的附属装置等进行介绍,以提高本书内容的系统性和完整性。

本书可供环境、化工、选矿、机械、食品、烟草、冶金等行业的工程技术人员和大专院校师生在从事离心捕集设备的设计、选型和应用时参考。

图书在版编目(CIP)数据

离心捕集原理与设备/薛勇著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-031138-2

I. ①离… II. ①薛… III. ①离心机 IV. ①TQ051.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 093106 号

责任编辑:周 强 于 红 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 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>

装 订 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 5 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 5 月第一次印刷 印张:16

印数:1—2 000 字数:322 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

1986~1990年,我参与了国家“七五”攻关项目“新型低阻高效悬浮预热器”(项目编号:75-33-01-05),负责低阻高效旋风预热器的冷态实验研究工作。经过近五年的时间,克服了资金短缺、场地狭小、工作环境恶劣等一系列困难,最终顺利完成课题研究任务,并通过了项目鉴定。

在整个课题研究过程中,我们先后进行了下述子课题的实验研究:① $\phi 360\text{mm}$ 普通型铁壳旋风筒模型性能实验;② $\phi 800\text{mm}$ 蜗壳改进型有机玻璃旋风筒模型性能实验;③ $\phi 650\text{mm}$ 模块组合透明塑料旋风筒模型结构参数正交优化实验研究;④非结构因素对旋风预热器性能影响的实验研究;⑤预热器旋风筒纯态三维流场的测定及其研究;⑥预热器旋风筒气固两相流浓度场的测定及其研究;⑦旋风预热器入口气流的旋转效应及其研究;⑧新型分散装置的实验研究;⑨ $\phi 300\text{mm}$ 旋风预热器模型热态实验研究等。

在上述实验基础上,我们根据流体力学原理,以最大限度地改善含尘空气在旋风筒内的涡流影响和减少粉尘的二次飞扬为基本思想,广泛收集国内外先进旋风筒的结构特点,采用多因素变动正交设计的实验方法,研究开发了蜗壳为特殊曲线并加导流板,蜗壳与筒体用下倾斜螺旋板光滑连接,筒体、排气管及导流板等诸参数优化配置的新型低阻高效旋风分离器。同时,在优化旋风筒模型,对旋风分离器的纯态气体流场、气固两相浓度场、流体固气比对旋风筒阻力损失的影响、多级串联旋风筒入口气流的旋转效应、旋风除尘器分离效率的理论计算及阻力损失的正确测定等方面,均取得了具有开拓性的研究成果。

本书在实验研究基础上,主要介绍典型离心捕集设备——旋风分离器、旋风预热器和水力旋流器的基本结构、工作原理、性能参数及其影响因素等,尽可能将项目研究成果充实其中。为了提高内容的系统性和完整性,本书还对涉及离心捕集设备的流体力学基础、气溶胶力学基础、离心捕集设备的附属装置等进行了介绍。

本书得以完成,首先感谢黄文熙教授,是他主持的课题给了我这个难得的学习和锻炼的机会,使我有机会按照自己的想法去完成整个科研项目。同时,我也衷心地感谢在这五年里历经艰辛、和我一起完成本科研项目的伙伴:张昌祥,在设计制作模型实验系统和确定测试仪器的过程中给了我很大的帮助;唐中华,唯一从一开始一起干到项目结束的同事,实验的艰辛也许只有我们两人体会最深;夏友明,负责预热器分散装置的研究;蒋友新,负责旋风筒热态实验研究。此外,黄兢、王成端、李显寅、王中琪、陆文、杨顺清等老师都参与了本课题的实验研究,对本项目的

完成起到了重要作用。

感谢康军利老师撰写了第2章的内容。此外,本书参考了大量的相关文献,谨在此对有关作者表示衷心的感谢!

本书的出版得到了西南科技大学环境科学与工程博士点建设项目固体废物处理与资源化方向的经费资助,同时得到了环境与资源学院领导的大力支持,特在此表示感谢!

本书可供环境、化工、选矿、机械、食品、烟草、冶金等行业的工程技术人员和大专院校师生在从事离心捕集设备的设计、选型和应用时参考。

由于撰写时间较为紧促,笔者学识水平和撰写能力有限,书中缺点及不足之处在所难免,真诚希望读者批评指正。

薛 勇

2011年1月

目 录

前言

1 绪论	1
2 流体力学基础	4
2.1 流体的基本物理性质	4
2.1.1 流体的密度和重度	4
2.1.2 流体的压缩性和膨胀性	6
2.2 流体运动的基本方程	9
2.2.1 连续性方程	9
2.2.2 伯努利方程	9
2.2.3 动量方程	11
2.2.4 动量矩方程	12
2.3 流体动力学基础	13
2.3.1 层流与紊流	13
2.3.2 有旋流与无旋流	15
2.3.3 平面势流	19
3 气溶胶力学基础	26
3.1 气溶胶及颗粒粒径分布	26
3.1.1 气溶胶	26
3.1.2 气溶胶颗粒的粒径	26
3.1.3 粒径分布的表示方法	29
3.1.4 粒径分布函数	32
3.2 粉尘颗粒的物理性质	36
3.2.1 密度	36
3.2.2 比表面积	37
3.2.3 颗粒的润湿性	37
3.2.4 颗粒的荷电性与导电性	37
3.2.5 颗粒的休止角	38
3.2.6 颗粒的黏附性	38
3.2.7 颗粒群的爆炸性	38
3.3 颗粒在流体中的运动	39

3.3.1	球形颗粒的阻力	39
3.3.2	滑动修正系数	40
3.3.3	球形颗粒在静止空气中的运动	42
3.3.4	重力沉降	43
3.3.5	离心沉降	44
3.3.6	惯性沉降	45
3.3.7	扩散沉降	47
4	离心捕集设备的主要类型与基本工作原理	50
4.1	干式离心分离设备	50
4.1.1	旋风分离器	50
4.1.2	旋风预热器	52
4.1.3	旋流分离器	53
4.2	湿式离心分离设备	54
4.2.1	湿式旋风分离器	54
4.2.2	水力旋流器	55
5	旋风分离器的流场与浓度场	56
5.1	旋风分离器的流场	56
5.1.1	普通切流反转式旋风分离器的流场	56
5.1.2	CSAG 旋风分离器的流场测定	58
5.1.3	测试结果分析	60
5.2	旋风分离器的浓度场	66
5.2.1	测试系统及工作原理	66
5.2.2	测试仪器及其标定	68
5.2.3	测试结果及其分析	69
5.2.4	关于提高旋风筒分离效率的讨论	71
6	旋风分离器的主要性能参数	73
6.1	旋风分离器的分离效率	73
6.1.1	临界分离粒径	73
6.1.2	分级效率	74
6.1.3	综合分离效率	74
6.2	旋风分离器的阻力损失	82
6.2.1	旋风分离器阻力损失的计算	82
6.2.2	旋风分离器阻力损失的正确测定	84
7	影响旋风分离器性能参数的若干因素	91
7.1	蜗壳形状和尺寸对旋风筒性能参数的影响	91

7.1.1	旋风筒蜗壳内粉体运动动力学方程	91
7.1.2	蜗壳形状的影响	93
7.1.3	蜗壳偏心率的影响	95
7.1.4	蜗壳尺寸的影响	95
7.1.5	流体温度的影响	96
7.2	结构因素对旋风筒性能参数的影响	97
7.2.1	实验装置	97
7.2.2	实验方法	98
7.2.3	实验结果分析	100
7.2.4	旋风筒结构尺寸变化对其性能的影响	101
7.2.5	旋风筒结构尺寸的确定	102
7.3	非结构因素对旋风筒性能参数的影响	103
7.3.1	实验装置和测试方法	103
7.3.2	风速影响	104
7.3.3	含尘浓度的影响	105
7.3.4	流体温度的影响	110
7.3.5	物料循环的影响	111
8	常用旋风分离器的结构及性能特点	114
8.1	干式旋风除尘器	114
8.1.1	XCX 型旋风除尘器	114
8.1.2	XLK 型旋风除尘器	117
8.1.3	XZZ 型旋风除尘器	119
8.1.4	CSAG 型旋风除尘器	121
8.1.5	XNX 型旋风除尘器	123
8.1.6	XLP 型旋风除尘器	125
8.1.7	CLG 型多管除尘器	128
8.1.8	环流式旋风除尘器	129
8.1.9	开孔旋转圆筒式旋风除尘器	129
8.1.10	连续螺旋式旋风除尘器	129
8.1.11	切流直流式旋风除尘器	130
8.2	旋流除尘器	131
8.2.1	典型旋流除尘器	132
8.2.2	旋流除尘器的技术参数	133
8.2.3	旋流除尘器的性能	134
8.3	湿式旋风除尘器	134

8.3.1	中心喷雾旋风除尘器	134
8.3.2	立式旋风水膜除尘器	135
8.3.3	卧式旋风水膜除尘器	137
8.3.4	麻石水膜除尘器	138
9	旋风分离器的组合使用	141
9.1	串联旋风分离器	141
9.2	并联旋风分离器	143
9.2.1	立式多管旋风除尘器	145
9.2.2	斜多管旋风除尘器	146
9.3	选粉机	146
9.3.1	O-Sepa 选粉机	147
9.3.2	转子式选粉机	148
9.4	旋风-过滤捕集设备	149
9.4.1	回转反吹袋式除尘器	149
9.4.2	XHD 袋式除尘器	150
9.4.3	脉冲喷吹袋式除尘器	151
9.5	旋风-电复合收尘设备	152
9.5.1	CKCF 复合式高压静电除尘器	152
9.5.2	JH 型组合式高压静电除尘器	154
9.5.3	SZD 组合电收尘器	155
9.6	旋风预除尘器	157
9.6.1	旋风除尘器排气口流体运动状态	157
9.6.2	旋风预除尘器除尘效率的合理确定	158
9.6.3	其他容易忽视的问题	159
10	旋风预热器	160
10.1	概述	160
10.1.1	旋风预热器的用途	160
10.1.2	旋风预热器的工作原理	162
10.1.3	旋风预热器回转窑的使用特点	163
10.2	旋风预热器的组成及换热原理	164
10.2.1	旋风预热器的组成	164
10.2.2	物料的分散与悬浮	164
10.2.3	旋风预热器的气固相换热	166
10.2.4	气固分离	167
10.3	旋风预热器设计和使用过程中需要注意的若干问题	171

10.3.1	旋风预热器入口气流的旋转效应	171
10.3.2	预热器旋风筒漏风原因和改进措施	178
11	水力旋流器	184
11.1	水力旋流器的原理和特点	184
11.1.1	水力旋流器的工作原理	184
11.1.2	水力旋流器的使用特点	185
11.2	水力旋流器的主要类型和基本构造	185
11.2.1	水力旋流器的分类	185
11.2.2	典型水力旋流器的基本结构	186
11.3	水力旋流器的主要性能参数	189
11.3.1	分离效率	190
11.3.2	压力降	192
11.4	影响水力旋流器性能的主要结构因素	193
11.4.1	柱体直径	193
11.4.2	溢流管直径	193
11.4.3	溢流管插入深度	193
11.4.4	底流口直径	194
12	离心捕集设备的排灰装置	195
12.1	干式间断排灰装置	195
12.1.1	手动卸灰阀	195
12.1.2	手动插板阀	195
12.2	干式连续排灰装置	196
12.2.1	圆锥式闪动卸灰阀	197
12.2.2	翻板式卸灰阀	198
12.2.3	回转式排灰器	199
12.2.4	螺旋卸灰机	200
12.3	湿式排灰装置	202
12.3.1	水封排浆箱	202
12.3.2	满流排灰管	203
12.3.3	水封卸灰阀	203
12.3.4	湿式锥形卸灰阀	203
13	离心捕集设备的动力装置	205
13.1	风机	205
13.1.1	常用风机分类	205
13.1.2	通风机的性能	208

13.1.3 通风机的选型	212
13.2 泵	217
13.2.1 常用泵的分类	217
13.2.2 离心泵的结构、类型和工作原理	218
13.2.3 离心泵的技术特性	220
13.2.4 离心泵的汽蚀	224
13.2.5 泵的型号编制	225
13.2.6 离心泵的选择及使用	226
14 离心捕集系统的设计	228
14.1 离心捕集系统的基本组成	228
14.2 离心捕集系统的设计原则	228
14.3 制造离心捕集装置的常用材料及其磨损	228
14.4 离心捕集设备管道系统的设计	230
14.4.1 管道系统压力损失的计算	230
14.4.2 管道系统的设计计算	233
14.4.3 常用管件的选择与设计	238
14.4.4 管道系统布置的原则与要求	241
主要参考文献	243

1 绪 论

离心捕集设备是利用多相流体(气体、液体、固体)做旋转运动时产生的离心力将固体和液体颗粒从流体中分离并捕集下来的分离设备。典型的离心捕集设备是旋风分离器和水力旋流器。

旋风分离器是一种分离非均相流体混合物的设备,工作介质为气体,利用设备结构形状和流体自身动力,促使气固、气液两相或气液固三相流体高速旋转,产生不同大小的离心力,从而实现气固、气液及气液固分离。

自 1885 年摩尔斯(O. M. Morse)在美国申请并获得旋风分离器的专利以来,旋风分离器到今天已有一百多年的发展历史。随着基础科学理论的建立和发展,尤其是多相流体力学的研究进展,旋风分离器的研究和应用也逐步从初级阶段进入到较高级阶段。从最初仅能捕集分离较粗的物料(数十微米)到能捕集分离超微粉尘($1\mu\text{m}$ 以下)。

大约在 19 世纪 80 年代,旋风分离器首先用于欧美国家的木材、粮食和机械加工厂中收集粉尘颗粒。直到 20 世纪 30 年代,人们还只是根据厂矿生产需要使用旋风分离器来分离捕集粗颗粒的物料,对旋风分离器中的气流运动规律及粉尘颗粒从含尘气流中分离的机理并未进行深入研究。其间,旋风筒的临界分离粒径一直停留在 $50\mu\text{m}$ 左右。

1928 年,波洛克(Prockact)第一次对旋风分离器进行了测定,开始对旋风分离器的系统科学试验和理论分析,发现分离器内部存在着中心为强制涡、外侧为准自由涡构成的双涡旋。不少研究人员通过测定大量数据,深入了解了有关压力损失和除尘效率的影响因素,包括气流进口速度、温度、黏度,粉尘颗粒的密度、分散度、旋风分离器的结构形式尺寸的比例关系等。1948 年,温尼(Umney)研制成功了轴流旋风分离器,使旋风分离器的应用范围进一步扩大。

1949 年,荷兰人特林登(Ter Linden)对旋风分离器进行了流场测定,并根据测定的切向、径向和轴向风速,绘出了旋风筒内流体运动轨迹和流体的三维速度分布。研究表明,旋风筒内不仅有运动方向和数值较为规律的切向风速,而且还有运动方向和数值较为复杂的轴向风速和径向风速。

1956~1964 年,德国人巴特(Water Barth)提出了切流反转式旋风除尘器分离机理的系统理论,并对其进行了验证。颗粒分离机理从开始类比平流沉降的转圈理论发展到类似过滤分离的筛分理论,提出了临界分离粒径的概念。1972 年,莱斯(Leith)与李基特(Licht)类比电力除尘器的分离机理,提出紊流混掺边界层

分离理论,并建立了在该理论基础上的分级除尘效率计算公式。

通过流场测试分析表明,旋风器内的流场大致是以排气管延长面为界,内侧切向风速为强制涡(旋流)、径向风速为由内向外的源流构成的内旋涡(旋源叠加);外侧切向风速为准自由涡(涡流)、径向风速为由外向内的汇流构成的外旋涡(涡汇叠加)。由于普通切流反转式旋风分离器旋源叠加的内旋涡的流体一般会逸出排气管,因此颗粒捕集一般在涡汇叠加的外旋涡中进行。由于径向汇流会妨碍欲分离颗粒向外运动,因此把该区域当做分离空间显然并不理想。

1963年,西门子公司的研究人员在流场分析的基础上发现,如果把旋风器捕集分离的空间移动到旋源叠加的流场内,则旋风器捕集分离的能力将会大为增加,因而研究开发了DSE旋风分离器(又称龙卷风旋流器)。这种旋风分离器的临界分离粒径可达 $0.4\mu\text{m}$,向超微颗粒捕集迈出了第一步。在此之后,美国、日本等以旋源流场为分离空间先后研制了能够捕集超微颗粒的旋风分离器,使旋风分离器进入了超微捕集时代。需要说明的是,该旋风分离器虽然临界分离粒径较小,但由于设备结构复杂、阻力损失较高,所以并未在工业领域大面积推广使用。

随着旋风分离器理论研究的不断深入,其应用范围也在逐步扩大。自1953年德国洪堡公司将旋风分离器用于水泥生料的预热后,大大扩大了它的使用范围。随着20世纪70年代水泥生产窑外分解技术的诞生,悬浮预热-预分解技术已成为新型干法水泥生产的主导技术。研究和开发高效低阻旋风分离器对节能减排有着重要的现实意义。

此外,离心分离原理在粉体分选中也得到了广泛应用。选粉机由英国人于1885年发明,1889年德国人将选粉机应用于水泥工业生产,至今已经有一百多年的历史。从最开始的离心式选粉机,到20世纪60年代德国研制的旋风式选粉机,直至1979年日本小野田公司研制的O-Sepa笼式高效选粉机,性能越来越强,能耗则逐步降低,业内称此笼式选粉机为第三代选粉机。

由于在旋风分离器内由外旋流离心分离到边壁的物料很容易被折返气流带入内旋流而逸出排气管,所以人们将液体喷入或溢入旋风筒,使其在旋风筒内壁上形成一薄层向下流动的液膜吸附固体颗粒并将其带出旋风筒,形成了湿式旋风分离器,减少了已分离物料的返混现象,提高了旋风筒的分离效率。

随着旋风分离器数学模型的不断完善和计算机仿真技术的逐步引入,目前,人们的主要精力放在通过相似理论和量纲分析,采用优选理论研究开发技术经济性能最优化的旋风分离器,以满足生产、节能和绿色经济的要求。

与旋风分离器类似,水力旋流器也是一种分离非均相流体混合物的设备,区别是水力旋流器的工作介质为液体。它是在离心力的作用下根据两相或多相之间的密度差实现两相或多相分离的。由于颗粒在离心力场中的离心惯性力较在重力场中的重力要大得多,因此,水力旋流器比重力分离设备的分离效率要高得多。

早在 1891 年, Bretney 就在美国申请了第一个水力旋流器专利。1914 年, 水力旋流器首先应用于磷肥生产。20 世纪 30 年代后期, 水力旋流器开始用于纸浆工业中水处理。随后, 大容积水力旋流器开始在荷兰广泛应用于选煤和选矿。但此时的水利旋流器还主要用于液固分离。1943 年, 美国原子能委员会的 Tepe 和 Woods 将水力旋流器用于乙醚-水系统的分离。1953 年, Van Rossum 将水力旋流器用于脱出油中的水分。水力旋流器开始进入了液液分离的阶段, 其研究引起了越来越多人的重视, 同时, 旋流器的应用范围也越来越广泛。开始的研究主要集中在关联操作性能以及在各种分离过程中的应用, 而在后续的研究中才比较多地考虑流体力学原理及其分析方法。当时, 水力旋流器已经成为一种标准的固液分离设备。

20 世纪 60 年代以后, 人们开始将水力旋流器用于实验设备以及其他更广泛的工业领域, 主要有矿冶行业中的颗粒分级, 矿物质回收与水处理, 化学工业中液-液萃取、固-液滤取和结晶, 空间技术中的零重力场分离, 机械加工行业中回收润滑油及贵金属, 电子工业中回收稀有金属, 生物化学工程中酶和微生物的回收, 食品与发酵工业中的淀粉、果汁、酵母等与水的分离, 石油工业中的油-水分离, 油-水-气分离与油-水-泥分离等。

水力旋流器应用包括固液分离、液气分离、固固分离(分选)、液液分离、液气固三相同时分离及其他应用。此外, 水力旋流器还可作为一种高效的分选设备, 对固体颗粒进行分级。单个水力旋流器的直径一般为 $0.01 \sim 2.5\text{m}$, 大部分固体颗粒的分离粒度可以小至 $2 \sim 3\mu\text{m}$ 。单个水力旋流器处理能力的范围一般为 $0.1 \sim 7200\text{m}^3/\text{h}$, 其操作压力一般在 $0.034 \sim 0.6\text{MPa}$ 。目前, 许多国家的油田, 尤其是在海洋钻井平台上, 由于空间的限制, 大量使用水力旋流器作为原油脱水或生产用水的水处理设备。根据目前 20 多个国家的统计, 每天用水力旋流器处理的生产用水在 140 万 t 以上。

近二三十年来, 水力旋流分离技术的理论研究有了迅速的发展。随着电测和光测技术的进步, 不少研究人员对水力旋流器内的流场进行了研究, 对旋流器内流体的三维速度进行了测定, 对分散相物体(固体颗粒或液滴)在连续相液体中的受力状况进行了分析, 掌握了颗粒在连续相液体中的运动规律, 并建立了数学模型。比较而言, 由于历史的原因, 目前对液固分离的水力旋流器研究较为深入, 而液液分离的水力旋流器, 由于出现时间较短, 液滴运动规律较为复杂, 且测试手段仍受一定的局限, 所以其理论研究仍需进一步深入开展。

2 流体力学基础

2.1 流体的基本物理性质

2.1.1 流体的密度和重度

2.1.1.1 流体的密度

密度是表征某一流体惯性大小的物理量,惯性是物体维持原有运动状态的能力的性质。对于均质流体,单位体积的流体所具有的质量称为密度,以 ρ 表示:

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

式中: ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

M ——流体的质量, kg ;

V ——该质量流体的体积, m^3 。

对于非均质流体,由于各点的密度不同,要确定空间某点流体的密度,可在该点周围取一微元体积 ΔV ,其密度的定义式为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} \quad (2-2)$$

$$\rho = \rho(x, y, z, t) \quad (2-3)$$

式中: ρ ——在时刻 t 位于某空间点 (x, y, z) 的流体的密度;

ΔM ——微元体积 ΔV 内的流体质量;

ΔV ——包含该点在内的流体体积。

在流体力学中,密度 ρ 不仅是流体惯性的量度,也描述了流体在流场中分布的疏密程度,特别在可压缩气体流动中,它是反映流体质点运动状态的参数之一。

2.1.1.2 流体的重度

密度 ρ 和重力加速度 g 的乘积 ρg 称为重度或容重,用符号“ γ ”表示。对于均质流体,重度的定义为单位体积的流体所具有的重力,其定义式为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-4)$$

式中: γ ——流体的重度, N/m^3 ;

G ——流体的重力, N。

对于非均质流体, 某空间点流体的重度为

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} \quad (2-5)$$

$$\gamma = \gamma(x, y, z, t) \quad (2-6)$$

式中: γ ——在时刻 t 位于某空间点 (x, y, z) 的流体的重度;

ΔG ——微元体积 ΔV 内的流体重力。

密度和重度之间有下列关系:

$$\gamma = \rho g \quad (2-7)$$

在国际单位制中, 密度的单位为 kg/m^3 , 重度的单位为 N/m^3 。在工程单位制中, 密度的单位为 $\text{kgf}^{\text{①}} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$, 重度的单位为 kgf/m^3 。

表 2-1 给出了几种常用流体的密度和重度, 表 2-2 列举了一个大气压下水的密度和重度, 表 2-3 列举了标准大气压下不同温度时空气的重度和密度。

表 2-1 常用流体的密度和重度

流体名称	温度/ $^{\circ}\text{C}$	密度/ (kg/m^3)	重度/ (N/m^3)
蒸馏水	4	1 000	9 807
海水	15	1 020~1 030	10 000~10 100
普通汽油	15	700~750	6 860~7 350
石油	15	880~890	8 630~8 730
润滑油	15	890~920	8 730~9 030
酒精	15	790~800	7 750~7 840
水银	0	13 600	133 400
熔化生铁	1 200	7 000	68 600
空气	0	1.293	12.68
氧	0	1.429	14.02
氮	0	1.251	12.28
氢	0	0.089 9	0.881
一氧化碳	0	1.25	12.27
二氧化碳	0	1.976	19.40
二氧化硫	0	2.927	29.1
水蒸气	0	0.804	7.88

① $1\text{kgf}=9.806\,65\text{N}$ 。

表 2-2 一个大气压下水的重度及密度

温度 /℃	重度 /(kN/m ³)	密度 /(kg/m ³)	温度 /℃	重度 /(kN/m ³)	密度 /(kg/m ³)	温度 /℃	重度 /(kN/m ³)	密度 /(kg/m ³)
0	9.806	999.9	10	9.804	999.7	60	9.645	983.2
1	9.806	999.9	15	9.799	999.1	65	9.617	980.6
2	9.807	1000.0	20	9.790	998.2	70	9.590	977.8
3	9.807	1000.0	25	9.778	997.1	75	9.561	974.9
4	9.807	1000.0	30	9.755	995.7	80	9.529	971.8
5	9.807	1000.0	35	9.749	994.1	85	9.500	968.7
6	9.807	1000.0	40	9.731	992.2	90	9.467	965.3
7	9.806	999.9	45	9.710	990.2	95	9.433	961.9
8	9.806	999.9	50	9.690	988.1	100	9.399	958.4
9	9.805	999.8	55	9.657	985.7			

表 2-3 标准大气压时空气的重度及密度

温度 /℃	重度 /(N/m ³)	密度 /(kg/m ³)	温度 /℃	重度 /(N/m ³)	密度 /(kg/m ³)	温度 /℃	重度 /(N/m ³)	密度 /(kg/m ³)
0	12.70	1.293	25	11.62	1.185	60	10.40	1.060
5	12.47	1.270	30	11.43	1.165	70	10.10	1.029
10	12.24	1.248	35	11.23	1.146	80	9.81	1.000
15	12.02	1.226	40	11.05	1.128	90	9.55	0.973
20	11.80	1.205	50	10.72	1.093	100	9.30	0.947

2.1.2 流体的压缩性和膨胀性

流体受压,体积缩小、密度增大的性质称为流体的压缩性;流体受热,体积膨胀、密度减小的性质称为流体的膨胀性。

2.1.2.1 液体的压缩性和膨胀性

液体的压缩性,是指当压强增加一个单位时液体体积的相对减少值,通常用压缩系数 β 来表示。设 V 为液体原有体积,如压强增加 dp 后,体积减少 dV ,则压缩系数为

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2-8)$$

β 值越大,则流体的压缩性越大, β 的单位是压强单位的倒数,即 m^2/N 。由于