

液化天然气 技术手册

主 编 顾安忠
副主编 鲁雪生

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



液化天然气技术手册

主 编 顾安忠
副主编 鲁雪生
参 编 金国强 巨永林 王 经
 林文胜 陈文煜等
审 校 顾建明



机械工业出版社

本手册较全面地反映了国内外液化天然气的最新应用和技术进展。内容全面、丰富新颖,论述深入浅出,是一本实用性很强的工具书。主要阐述了液化天然气的基本理论、最新技术和工程应用实践。内容包括液化天然气技术理论基础,天然气液化,液化天然气装置的相关设备,液化天然气接收终端,液化天然气的储存和运输,液化天然气设备的制造工艺和材料,液化天然气工厂和接收终端的设计基础,液化天然气应用技术,液化天然气冷能回收技术,以及液化天然气安全技术等。

本手册可供能源领域,尤其是液化天然气专业的工程技术人员阅读使用,也可供大专院校相关专业的师生教学参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

液化天然气技术手册/顾安忠主编. —北京:机械工业出版社, 2010. 1

ISBN 978 - 7 - 111 - 28573 - 1

I. 液… II. 顾… III. 液化天然气 - 技术手册 IV. TE64 - 62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 196830 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 蒋有彩 责任编辑: 蒋有彩 版式设计: 霍永明
封面设计: 姚毅 责任校对: 程俊巧 责任印制: 乔宇
吴美英

北京京丰印刷厂印刷

2010 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm × 260mm · 37.25 印张 · 3 插页 · 1223 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 28573 - 1

定价: 93.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面防伪标均为盗版

前 言

天然气是一种优质洁净的化石能源，在国民经济中具有十分诱人的应用价值。液化天然气是天然气开发利用的一项关键技术，在国内外已形成产业，每年以平均8%的速度增长。近年来在中国能源消费结构中，增长很快。液化天然气是一个产业链，包括液化厂、接收终端、储运设备等。大量的相关设计、生产、施工、研究工作要做，迫切需要相应的著作和手册给予知识上的支持，然而目前相关的书籍非常缺乏。2004年由机械工业出版社出版的《液化天然气技术》一书，得到业界和社会上的广泛欢迎，已经四次印刷，购买踊跃。据此，为以满足该领域研究、设计、运行、管理的需要，编写出版《液化天然气技术手册》是适时和必要的。

上海交通大学低温学科从20世纪70年代开始，就将液化天然气技术作为主要研究目标之一。三十多年来，持续不断地从基础研究到工程实践，从本科专业教学到高层次人才培养，做了大量工作和有了宝贵的积累。在成功奉献了《液化天然气技术》一书的基础上，主编以上海交通大学LNG技术团队为核心，邀请了国内在液化天然气领域从事设计、施工、研究和教学多年，积累丰富经验的专家一起编写本手册。希望此书的出版发行，能让读者对液化天然气技术有更具体、更详尽的了解。这是一本具有实用价值的专业工具书。

本手册除有液化天然气的理论基础外，主要涵盖液化天然气产业链各个环节的工作原理、工程技术、运行管理和应用实例。作为手册，还引入工程实用技术数据、图表、技术标准和规范等。中心内容包括：液化天然气技术理论基础，天然气液化，液化天然气装置的相关设备，液化天然气接收终端，液化天然气的储存和运输，液化天然气设备的制造工艺和材料，液化天然气工厂和接收终端的设计基础，液化天然气应用技术，液化天然气冷能回收技术，以及液化天然气安全技术等。

参加本书编写工作的有顾安忠（上海交通大学教授、博士生导师），鲁雪生（上海交通大学研究员），巨永林（上海交通大学博士、教授、博士生导师），金国强（中石化上海工程公司教授级高级工程师、副总工程师），陈文煜（中海石油气电集团高级工程师），王经（上海交通大学教授、博士生导师），林文胜（上海交通大学博士、副教授）；还有杨晓东（美国康泰斯公司博士），张超（中原理工学院博士），陈煜（上海工程技术大学博士），李品友（上海海事大学副教授），郭怀东（河南中原绿能高科公司高级工程师），唐家雄（张家港圣达因低温设备公司高级工程师），郭揆常（上海石油天然气总公司教授级高级工程师），潘俊兴（青岛中油通用机械有限公司高级工程师），吕谦（中石化上海工程公司高级工程师）等。顾建明教授（上海交通大学博士生导师）为全书审校。本书由顾安忠教授为主编，并承担第2、5、6章的主笔；鲁雪生研究员为副主编，并承担第8、9章的撰写；巨永林教授承担第1章1.4节、第2章2.1节和第6章的撰写；金国强教授级高级工程师撰写第4章；陈文煜高级工程师撰写第3章和第2章的2.3节；王经教授撰写第1章1.1~1.3节；林文胜博士撰写第7章。

编写过程中，还得到能源领域许多企业、低温制造企业的领导、专家和工程技术人员的关心和支持，尤其是得到成都深冷空分设备工程公司、成都星星能源公司、康泰斯（中国）工程有限公司、河南中原绿能高科有限责任公司大力支持和帮助，在此深表感谢。

在本手册的编写中，各位作者查阅了大量文献论文、著作手册、工程设计文件，以及相关的标准、规范和产品样本等，主要参考文献列在各章末尾。在此对所有资料的原作者和提供者

表示感谢。由于液化天然气产业是随着天然气的国际贸易发展起来的，至今已有近半个世纪了，本书采用了一些来自西方发达国家的资料，为了便于行业内国际交流，保留了一些英制线图和英文名称信息，望能给予谅解。

本手册由多位作者联合撰写，在内容深度和全书整体性等方面会存在不协调、不一致和交叉重复的地方，疏漏之处也在所难免，对此恳请读者不吝指正。

编 者

目 录

前言

第1章 液化天然气技术理论基础 1

1.1 工程热力学基础 1

1.1.1 基本概念和定义 1

1.1.2 热力学基本定律 4

1.2 流体力学基础 6

1.2.1 流体的物理性质 6

1.2.2 流体的可压缩性与热膨胀性 7

1.2.3 流体的传输特性 8

1.2.4 表面张力和毛细现象 9

1.2.5 流体的平衡——流体静力学基础 10

1.2.6 理想流体运动的基本方程—— 流体动力学基础 11

1.3 传热学基础 13

1.3.1 导热 13

1.3.2 对流换热的理论基础及计算 14

1.3.3 辐射换热的基础理论 16

1.4 液化天然气的一般特性 20

1.4.1 热力特性 21

1.4.2 传输特性 24

1.4.3 材料特性 31

1.4.4 绝热特性 42

1.4.5 储存特性 46

1.4.6 冷能利用特性 47

参考文献 47

第2章 天然气的液化 49

2.1 液化前原料气处理 49

2.1.1 脱水 50

2.1.2 脱酸性气体 63

2.1.3 脱其他杂质 73

2.1.4 HYSYS 软件模拟工艺过程 75

2.2 天然气液化流程 76

2.2.1 级联式液化流程 76

2.2.2 混合制冷剂液化流程 77

2.2.3 带膨胀机的液化流程 80

2.3 天然气液化装置 83

2.3.1 基本负荷型(基地型)液化 装置 83

2.3.2 典型中小型液化装置 101

2.3.3 浮式液化天然气生产储卸装置 112

2.4 世界各国液化天然气装置汇集 122

参考文献 126

第3章 液化天然气接收终端 128

3.1 液化天然气接收终端概况 128

3.1.1 卸料系统 128

3.1.2 储存系统 128

3.1.3 蒸发气(BOG)处理 128

3.1.4 LNG 输送系统 129

3.1.5 LNG 汽化 129

3.1.6 公用工程 129

3.2 典型的陆岸液化天然气接收终端 129

3.2.1 站址选择 129

3.2.2 规范和标准 129

3.2.3 船和码头设施及建设 139

3.2.4 卸料过程 146

3.2.5 LNG 储罐 147

3.2.6 蒸发气处理 148

3.2.7 输送系统 149

3.2.8 汽化 152

3.2.9 公用工程 152

3.2.10 自控系统 163

3.2.11 安全和消防 167

3.2.12 计量系统 174

3.2.13 分析化验 176

3.3 液化天然气接收终端设备和材料 177

3.3.1 卸料臂和蒸发气返回臂 177

3.3.2 LNG 输送泵 178

3.3.3 蒸发气压缩机 180

3.3.4 再冷凝器 181

3.3.5 汽化器 182

3.3.6 海水泵和消防水泵 184

3.3.7 海水过滤器 184

3.3.8 电解氯装置 185

3.3.9 材料选用 186

3.3.10 保冷工程 186

3.4 性能试验 190

3.4.1 单机/单元功能试验 190

3.4.2 装置性能试验 191

3.4.3 试运行 191

3.5 大型液化天然气储罐 191

3.5.1 储罐设计	191	电器设备的选择	280
3.5.2 储罐材料	193	4.7.3 爆炸性气体环境和火灾危险环境用 电气设备选择	283
3.5.3 全包容储罐的结构建造	193	参考文献	283
3.5.4 干燥、惰化和冷却	195	第5章 液化天然气储存和运输	284
3.6 节能与冷能利用	196	5.1 液化天然气陆上储存	284
3.6.1 节能措施	196	5.1.1 LNG 储罐形式	284
3.6.2 冷能综合利用	196	5.1.2 LNG 储罐的比较及选择	288
3.7 新型液化天然气接收终端	196	5.1.3 储罐结构与建造	289
3.7.1 码头汽化接收终端	196	5.1.4 LNG 储罐的特殊要求与施工	291
3.7.2 海上汽化接收终端	197	5.1.5 大型 LNG 常压储罐	293
3.8 世界各国液化天然气接收终端汇集	197	5.1.6 真空粉末绝热 LNG 储罐	294
参考文献	206	5.1.7 LNG 子母罐	296
第4章 LNG 工厂设计基础	207	5.2 液化天然气陆上运输	299
4.1 LNG 工厂设计	207	5.2.1 液化天然气汽车罐车	299
4.1.1 厂址选择	207	5.2.2 液化天然气罐式集装箱	301
4.1.2 工厂布置	208	5.2.3 运输的运行管理	302
4.1.3 LNG 工程项目组成举例	216	5.3 LNG 海上运输	303
4.2 装置(车间)布置	217	5.3.1 LNG 船在产业链中的作用及世界 LNG 船的现状和发展	303
4.2.1 工艺装置组成	217	5.3.2 LNG 船的技术特征和液货舱 技术	306
4.2.2 布置原则	217	5.3.3 LNG 船的装卸系统	313
4.2.3 布置工作内容	218	5.3.4 LNG 船的安全管理	319
4.3 工程经济	218	5.3.5 LNG 船的典型船例	330
4.3.1 投资估算	218	5.3.6 世界各国 LNG 船汇集	334
4.3.2 融资方案	222	参考文献	345
4.3.3 财务评价	223	第6章 液化天然气设备的主要工艺和 材料	346
4.3.4 国民经济评价	233	6.1 绝热工艺	346
4.3.5 经济分析常用符号中英文对照	234	6.1.1 绝热工艺理论	346
4.4 环境保护	234	6.1.2 绝热材料	357
4.4.1 环境保护标准	235	6.2 焊接工艺	370
4.4.2 工程项目的环境保护编制提纲	239	6.2.1 材料和技术指标	370
4.5 劳动安全卫生	240	6.2.2 坡口形式和焊接参数	371
4.5.1 标准及评价方法	240	6.2.3 焊接接头和焊缝金属力学性能	371
4.5.2 工程项目的劳动安全卫生编制 提纲	249	6.2.4 焊缝无损检测	372
4.6 消防	250	6.2.5 船载 LNG 储罐的焊接	372
4.6.1 消防标准	250	6.3 材料	373
4.6.2 LNG 工程总平面布置的防火 间距	251	6.3.1 金属材料	374
4.6.3 工艺生产装置、储罐布置的相关 安全距离	266	6.3.2 非金属材料	383
4.6.4 消防设施	271	参考文献	389
4.7 电力安全设计	277	第7章 液化天然气冷能利用	390
4.7.1 供电及电气爆炸和火灾危险性环境 区域的划分	277	7.1 液化天然气冷能利用及其焓分析	390
4.7.2 爆炸性气体环境和火灾危险环境用			

7.1.1 LNG冷能利用概述	390	8.4 LNG装卸臂	498
7.1.2 LNG冷能焓分析数学模型	390	8.4.1 LNG装卸臂的类型和规格	498
7.1.3 LNG冷能焓特性分析	392	8.4.2 装卸臂的主要部件	500
7.2 冷能发电	392	8.4.3 装卸臂的流动阻力	502
7.2.1 利用LNG冷能发电的方案	393	8.5 LNG泵	503
7.2.2 日本利用LNG冷能发电概况	402	8.5.1 泵的基本参数	503
7.3 冷能回收用于空气分离	403	8.5.2 LNG泵的特殊性	504
7.3.1 概述	403	8.5.3 潜液式电动泵(SEMP)	505
7.3.2 技术方案	403	8.5.4 潜液泵的电动机与电缆	515
7.3.3 应用实例	406	8.5.5 潜液泵的有关测试项目	518
7.4 冷能回收用于食品冷冻	409	参考文献	519
7.4.1 概述	409	第9章 液化天然气相关的安全	
7.4.2 冷库	409	技术	520
7.4.3 冷媒选择	411	9.1 有关天然气的安全特性	520
7.4.4 冷能利用于冷库方案举例	412	9.1.1 天然气的燃烧范围和着火温度	520
7.5 冷能回收的其他应用	415	9.1.2 天然气的燃烧速度和燃爆	521
7.5.1 液态二氧化碳和干冰生产	415	9.1.3 爆炸	523
7.5.2 低温粉碎	415	9.1.4 LNG的低温特性	523
7.5.3 轻烃回收	419	9.2 液化天然气的泄漏和溢出	524
7.5.4 制冰与空调	420	9.2.1 泄漏	524
7.5.5 海水淡化	423	9.2.2 LNG的溢出	525
7.5.6 相变储能	427	9.2.3 LNG溢出的预防与控制	530
7.5.7 LNG冷能综合利用	431	9.3 安全评价	531
参考文献	432	9.3.1 概述	531
第8章 液化天然气装置的主要设备	437	9.3.2 安全评价	532
8.1 压缩机	437	9.4 消防	540
8.1.1 往复式压缩机	437	9.4.1 概述	540
8.1.2 透平式压缩机	444	9.4.2 液化天然气工程的消防设施	543
8.2 透平膨胀机	467	9.4.3 灭火剂	544
8.2.1 概述	467	9.5 安全规范与相关标准	546
8.2.2 透平膨胀机工作原理	467	9.5.1 国际上有关LNG的标准	547
8.2.3 透平膨胀机结构形式和性能		9.5.2 国内有关的法令、法规、标准	553
参数	468	参考文献	555
8.2.4 气、液两相膨胀机的应用	471	附录	557
8.3 换热器	474	附录A 压力容器与压力管道设计类别、	
8.3.1 概述	474	级别的划分	557
8.3.2 板翅式换热器	475	附录B 计算机辅助设计应用软件	558
8.3.3 绕管式换热器(SWHE)	484	附录C 天然气各组分的热物性图和表	560
8.3.4 LNG汽化器	485		

第 1 章 液化天然气技术理论基础

天然气是一种优质洁净燃料，在能源、交通等领域具有广泛用途和发展前景。天然气的液化和储存是其开发利用的关键技术。进入 21 世纪以来，随着人类对能源需求日益强劲的增长，液化天然气技术已经形成一门高科技技术，并受到越来越多科学技术学科的重视。本章介绍液化天然气开发利用的基础知识，包括工程热力学、传热学、流体力学的基础知识以及液化天然气的一般特性等内容。

工程热力学、传热学与流体力学是研究能量转换、物体内部及其运动过程，包括流体流动过程中的热量传递现象和规律的学科。当不同物体接触或物体发生运动时，只要有温差存在就不可避免地出现热量的转移和交换。在机械工程、天然气技术领域，无论是储存、运输，都会出现涉及到安全、效率、能耗及设备性能的多种相关技术问题。

1.1 工程热力学基础

1.1.1 基本概念和定义

1. 热力学

热力学是研究能量（特别是热能）性质及其转换规律的科学。

自然界中可供大量产生动力的主要能源有风能、水能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。目前利用得最多的仍然是矿物燃料（石油、煤、天然气等）的化学能。各种能源除风能（空气的动能）和水能（水的位能）可以向人们直接提供机械能以外，其他各种能源往往只能直接或间接地（通过燃烧、核反应）提供热能。大量的要通过热机（如蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）使这些热能部分地转变为机械能，或进一步转变为电能，以供人类生产和生活的需求。掌握热能性质及其转换规律具有重要实用价值和理论意义。

2. 热机和工质

热机是将热能转变为机械能的机械设备，载能物质便是工质。热机对外做功时，要求工质有良好的膨胀性和良好的流动性，才能实现持续不断地做功。由于气体同时具备良好的膨胀性和流动性，热机中的工质一般是气态物质。

3. 热力学与工程热力学

工程热力学着眼于根据热力学的两个基本定律，

运用严密的逻辑推理，对物体的宏观性质和宏观现象进行分析研究，并利用所获的定律、结果和公式进行工程设计和计算。

热力学除了宏观研究理论外，还有微观理论研究，即根据热力学的微观理论——统计物理学，从物质的微观结构出发，依据微观粒子的力学规律，应用概率理论和统计平均的方法，研究大量微观粒子（它们构成宏观物体）的运动表现出来的宏观性质。

4. 工程热力学常用的计量单位

国际单位制是我国法定计量单位的基础，一切属于国际单位制的单位都是我国法定计量单位。工程热力学中各常用物理量牵涉到的基本单位有 5 个，即长度、质量、时间、热力学温度和物质的量。

表 1-1 和表 1-2 列出工程热力学中常用的国家法定计量单位的基本单位和导出单位。

表 1-1 国家法定计量单位的基本单位

物 理 量	单 位 名 称	单 位 符 号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol

表 1-2 国家法定计量单位的导出单位（部分）

物 理 量	单 位 名 称	单 位 符 号
力	牛[顿]	N
功、热量、能量	焦[耳]	J
压力	帕[斯卡]	Pa
功率	瓦[特]	W
比热力学能、比焓	焦[耳]每千克	J/kg
比热容、比熵	焦[耳]每千克开[尔文]	J/(kg·K)

5. 热力系

热力系就是具体指定的热力学研究对象。与热力系有相互作用的周围物体通称为外界。为了避免把热力系和外界混淆起来，设想有界面将它们分开。

在作热力学分析时，既要考虑热力系内部的变化，也要考虑热力系通过界面和外界发生的能量交换和物质交换，而外界的变化，一般不予考虑。

根据热力系内部情况的不同,热力系可以分为:①单元系——由单一的化学成分组成;②多元系——由多种化学成分组成;③单相系——由单一的相(如气相或液相)组成;④复相系——由多种相(如气-液两相或气-液-固三相等)组成;⑤均匀系——各部分性质均匀一致;⑥非均匀系——各部分性质不均匀。

根据热力系和外界相互作用情况的不同,热力系又可以分为:①闭口系——和外界无物质交换;②开口系——和外界有物质交换;③绝热系——和外界无热量交换;④孤立系——和外界无任何相互作用。

6. 状态和状态参数

状态是热力系在指定瞬间所呈现的全部宏观性质的总称。从各个不同方面描写这种宏观状态的物理量便是各个状态参数。

在工程热力学中常用的状态参数有6个,即压力、比体积、温度、热力学能、焓和熵。其中压力、比体积和温度可以直接测量比较直观,称为基本状态参数。

(1) 压力 指单位面积上承受的垂直作用力:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中, p 是压力 (Pa); F 是垂直作用力 (N); A 是面积 (m^2)。

气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容积壁频繁碰撞的结果。

1) 绝对压力: 式(1-1)所定义的压力是气体的真正压力,称为绝对压力。

2) 表压力: 由测量压力的仪表在大气环境中所得到的读数。读数为正(负)称为表压力(真空度)。

法定单位制中,压力的单位是 Pa (帕)。表 1-3 列出常见非法定压力单位的换算关系。

表 1-3 常见非法定压力单位的换算关系

单位名称	单位符号	换算关系
标准大气压	atm	1 atm = 101325 Pa
工程大气压	at	1 at = 1 kgf/cm ² = 98066.5 Pa
毫米汞柱	mmHg	1 mmHg = 133.3 Pa
毫米水柱	mmH ₂ O	1 mmH ₂ O = 9.80 Pa
千克力每平方米	kgf/cm ²	1 kgf/cm ² = 98066.5 Pa
磅力每平方英尺	lbf/ft ²	1 lbf/ft ² = 47.8 Pa
磅力每平方英寸	lbf/in ²	1 lbf/in ² = 6894.7 Pa

(2) 比体积 比体积就是单位质量的物质所占有的体积,即

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

式中, v 是比体积 (kg/m^3); V 是体积 (m^3); m 是质量 (kg)。

比体积的倒数就是密度 (ρ)。密度是单位体积的物质所具有的质量,即

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{v} \quad (1-3)$$

密度的单位为 kg/m^3 。

(3) 温度 温度表示物体的冷热程度。法定计量单位中采用热力学温度,符号用 T 表示,单位为 K (开)。摄氏温度用 t 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏度)。它们之间的换算关系如下:

$$t = T - T_0 \quad (1-4)$$

式中, $T_0 = 273.15\text{K}$ 。

(4) 热力学能 热力学能是指热力系本身具有的能量(不包括热力系宏观运动的能量和外场作用的能量),包括分子的动能、分子力所形成的位能、构成分子的化学能和构成原子的原子能等。热力学能的单位为 kJ。

由于在热能和机械能的转换过程中,后两种能量不发生变化,故工程热力学能为

$$\text{热力学能}(U) \begin{cases} \text{分子的动能}(U_k) \\ \text{分子力所形成的位能}(U_p) \end{cases}$$

对于气体,分子动能包括分子的移动能、转动能和分子内部的振动能。

(5) 焓和比焓 焓是一个组合的状态参数,其计算公式如下:

$$H = U + pV \quad (1-5)$$

式中, H 是焓 (J); U 是热力学能 (J); p 是压力 (Pa); V 是体积 (m^3)。

比焓 h 是焓除以质量 (H/m), 单位为 J/kg 。

(6) 熵和比熵 熵是一个导出的状态参数。对简单可压缩均匀系(即只有两个独立变量或自由度的均匀的热力学系),它可以由其他状态参数按下列关系式导出:

$$S = \int \frac{dU + pdV}{T} + S_0, \quad dS = \frac{dU + pdV}{T} \quad (1-6)$$

式中, S 为熵; S_0 为熵常数。

在法定单位制中,熵的单位为 J/K , 在工程单位制中,熵的单位为 kcal/K 。

比熵 s 是熵除以质量 (S/m), 单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

7. 平衡状态

平衡状态是指热力系在没有外界作用的情况下,宏观性质不随时间变化的状态。

处于平衡状态的单相流体(气体或液体),如果忽略重力的影响,又没有其他外场作用,它内部各处的各种性质都是均匀一致的。不仅流体内部的压力均匀一致(这是建立力平衡的必要条件)、温度均匀一致(这是建立热平衡的必要条件),而且所有其他宏观性质,例如:比体积、比热力学能、比焓、比熵等都是均匀一致的。

处于气-液两相平衡的流体,流体内部的压力和温度均匀一致,但气相和液相的比体积(或密度)、比热力学能、比焓、比熵不同。

8. 状态方程和状态参数坐标图

处于平衡(均匀)状态的热力系,两个相互独立的状态参数就可以规定它的平衡状态。在其他状态参数和这两个相互独立的状态参数之间,必定存在某种单值的函数关系。压力、温度、比体积这三个可以直接测量的基本状态参数之间存在 $v=f(p, T)$ 的关系。这一函数关系称为状态方程。状态方程也可以写为如下隐函数的形式:

$$f(p, v, T) = 0 \quad (1-7)$$

9. 热力过程和热力循环

热力过程是指热力系从一个状态向另一个状态变化时所经历的全部状态的总合。

热力循环就是封闭的热力过程,即热力系从某一状态开始,经过一系列中间状态后,又回复到原来状态。

10. 功和热量

热力系通过界面和外界进行的机械能的交换量称为做功量,简称功(机械功)。它们之间的热能的交换量称为传热量,简称热量。功和热量是和热力系的状态变化(即过程)联系在一起的。它们不是状态量而是过程量。

功的符号是 W ,热量的符号是 Q 。对于单位质量的热力系,功用 w 表示,热量用 q 表示。热力学中通常规定:热力系对外界做功为正($W>0$),外界对热力系做功为负($W<0$);热力系从外界吸热为正($Q>0$),热力系向外界放热为负($Q<0$)。

11. 实际气体和理想气体

气体通常具有较大的比体积,气体分子之间的平均距离通常要比液体和固体的大得多。气体分子本身的体积通常比气体所占的体积小得多,气体分子之间的作用力(分子力)也较小,分子运动所受到的约束较弱,分子运动很自由。

在工程计算中,当气体的比体积不很大时,必须考虑气体分子本身体积和分子间作用力的影响时,把气体处理为实际气体。实际气体的性质比较复杂。

为使问题简化,热力学中提出理想气体的概念,即认为理想气体的分子本身不具有体积,分子之间也没有作用力,是由大量相互之间没有作用力的质点组成的可压缩流体。实际气体当比体积趋于无穷大时也就成了理想气体。这时分子间的作用力随着距离的无限增大而消失了,分子本身的体积比起气体的极大体积来也完全可以忽略了。

12. 理想气体状态方程和摩尔气体常数

理想气体的状态方程为

$$\frac{pv}{T} = R_g \quad \text{或} \quad pv = R_g T \quad (1-8)$$

式中, R_g 是气体常数。各种气体的气体常数不同,对于同一种气体, R_g 是一个常数。气体常数的单位在我国法定计量单位中是 $J/(kg \cdot K)$ 。

如果对不同气体都取 1mol ,则式(1-8)变为

$$Mpv = MR_g T \quad \text{或} \quad pV_m = R_m T \quad (1-9)$$

式中, M 是摩尔质量(kg/mol); V_m 是摩尔体积(m^3/mol); R_m 是摩尔气体常数或通用气体常数,与气体种类无关。

13. 理想混合气体

(1) 混合气体的成分 工程上所遇到的气体有许多是若干种不同气体的混合物,例如天然气。如果将各组分的气体都按照理想气体计算,则称之为理想混合气体,简称混合气体。混合气体的成分可以用质量(m)、物质的量(n)、或体积(V)标出。通常都用标准状况下的体积标出。工程上常用相对成分表示(相对成分是各分量占气体总量的比值)。对理想混合气体来说,摩尔分数在数值上等于其体积分数。

(2) 混合气体的平均摩尔质量和气体常数 混合气体的平均摩尔质量可以根据各组成气体的摩尔质量和各相对成分来计算。任何物质的摩尔质量都等于质量除以物质的量。混合气体的平均摩尔质量等于各组成气体的摩尔质量与摩尔分数乘积的总和。

知道了混合气体的平均摩尔质量后,就可以用摩尔气体常数除以平均摩尔质量而得到混合气体的气体常数:

$$R_{g,mix} = \frac{R}{M_{mix}} \quad (1-10)$$

(3) 理想混合气体的压力与各组成气体的分压力 道尔顿定律指出,理想混合气体的压力(p_{mix})等于各组成气体的分压力(p_i)的总和:

$$p_{\text{mix}} = \sum_{i=1}^n p_i \quad (1-11)$$

所谓分压力, 就是假定混合气体中各组成气体单独存在, 并具有与混合气体相同的温度和体积时给予容器壁的压力。

14. 气体的热力性质

(1) 气体的比热容 比热容定义为单位质量的物质发生单位温度变化时所吸收或放出的热量:

$$c_x = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_x \quad (1-12)$$

比热容的法定计量单位是 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 在工程单位制中是 $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。 $1 \text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K}) = 4186.8 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

比热容不仅因物质和过程而异, 而且还和压力和温度有关。对应于定容过程和定压过程, 分别有比定容热容 (c_v) 和比定压热容 (c_p):

$$c_v = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_v = \frac{\delta q_v}{\delta T} \quad (1-13)$$

$$c_p = \left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_p = \frac{\delta q_p}{\delta T} \quad (1-14)$$

气体的比定容热容和比定压热容在计算热力学能、焓、熵及过程的热量等方面很有用。

(2) 理想气体的比热容、热力学能和焓、迈耶公式 理想气体的热力学能仅是温度的函数, $u = u(T)$; 理想气体的比焓也是温度的函数, $h = u + pv = u(T) + R_g T = h(T)$ 。

根据理想气体的比定容热容和比定压热容, 得

$$c_{v0} = \frac{du}{dT}, \quad du = c_{v0} dT \quad (1-15)$$

$$c_{p0} = \frac{dh}{dT}, \quad dh = c_{p0} dT \quad (1-16)$$

根据焓的定义式 $h = u + pv$, 微分后可得 $dh = du + d(pv)$ 。对理想气体可写为

$$c_{p0} = C_{v0} + R_g \quad (1-17)$$

式 (1-17) 称为迈耶公式。它建立了理想气体比定容热容和比定压热容之间的关系。

因为理想气体的热力学能和焓都只是温度的函数, 理想气体的比定压热容和比定容热容也都只是温度的函数。通常可以用三次多项式表示:

$$c_{p0} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad (1-18)$$

$$c_{v0} = (a_0 - R_g) + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 \quad (1-19)$$

对不同气体, a_0, a_1, a_2, a_3 各有不同的经验数值。

需要指出: 单原子气体的比定容热容和比定压热容基本上是定值, 可以认为与温度无关。对双原子气体和多原子气体, 如果温度接近常温, 为简化计算,

也可将比热容看做定值。通常取 298K (25°C) 时气体比热容的值为比定压热容的值。

(3) 理想气体的熵 根据熵的定义式 $ds = \frac{du + p dv}{T}$, 而对理想气体有 $du = c_{v0} dT$, $\frac{p}{T} = \frac{R_g}{v}$, 所

以理想气体的熵为 $ds = \frac{c_{v0}}{T} dT + \frac{R_g}{v} dv$ 。理想气体的熵则不仅是温度的函数, 它还和压力或体积有关。

1.1.2 热力学基本定律

1. 热力学第一定律及其表达式

热力学第一定律表达的是不同形式的能量在传递与转换过程中守恒的原理。

各种不同形式的能量都可以转移 (从一个物体传递到另一个物体), 也可以相互转换 (从一种能量形式转变为另一种能量形式), 但在转移和转换过程中, 它们的总量保持不变。即热能和机械能在转移和转换时, 能量的总量必定守恒。

对一热力系, 其总能量为 E 。所谓总能量是指热力学能 (U)、宏观动能 (E_k)、重力位能 (E_p) 的总和, 即 $E = U + E_k + E_p$ 。

(1) 闭口系的能量方程 若闭口系和外界无物质交换, 与外界只有膨胀功, 即由热力系体积变化所做的功, 则与外界交换的热量 $Q = \Delta U + W = U_2 - U_1 + W$ 。

(2) 开口系的能量方程 在开口系中, 由于工质进出口体系所做的功为技术功, 其定义为

$$W_t = W_{\text{进气}} + W - W_{\text{排气}}$$

开口系工质能量变化为焓值变化, 即

$$H_2 - H_1 = (U_2 - U_1) + (p_2 V_2 - p_1 V_1) \quad (1-20)$$

则有 $Q = H_2 - H_1 + W_t$ (1-21)

(3) 稳定流动的能量方程 稳定流动是指流动中任何位置上流动的流速及其他状态参数都不随时间而变化的流动。各种工业设备处于正常运行状态时, 流动工质所经历的过程都接近于稳定流动。对于稳定流动 1kg 的工质, 其热力学第一定律表达式如下:

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + w_{sh} \quad (1-22)$$

2. 热力学第二定律及其表达式

热力学第二定律是反映自然界各种过程的方向性、自发性、不可逆性以及能量品质、能量转换的条件和限度等的基本规律。自然界所有宏观过程进行时, 必定伴随着熵的产生。

(1) 有关热力学第二定律的基本概念

1) 过程的方向性。过程总是自发地朝着一定的

方向进行：热能总是自发地从温度较高的物体传向温度较低的物体；机械能总是自发地转变为热能；气体总是自发地膨胀；等等。但热量不会自发地从温度较低的物体传向温度较高的物体；热能不会自发地转变为机械能；气体不会自发地压缩；等等。

2) 可逆过程和不可逆过程。任何实际热力过程在作机械运动时不可避免地存在着摩擦（力不平衡），在传热时必定存在着温差（热不平衡）。因此，实际的热力过程在过程沿原路线反向进行，并使热力系恢复到原状态，必然要补偿能量，这就是实际过程的不可逆性。这样的过程统称为不可逆过程。一切实际的过程都是不可逆过程。

所谓可逆过程是在过程进行后，如果热力系沿原过程的路线反向进行并恢复到原状态，不需补偿任何能量。可逆过程必须满足下述条件：①热力系原来处于平衡状；②作机械运动时热力系和外界保持力平衡（无摩擦）；③传热时热力系和外界保持热平衡（无温差）。

(2) 热力学第二定律的表达式——熵方程 热力学第二定律用熵方程来表达。建立熵方程涉及两个影响热力系熵变化的过程量（不是状态量），即熵流和熵产的重要概念。

1) 熵流和熵产。对内部平衡（均匀）的闭口系，在单位时间内熵的变化为

$$\begin{aligned} dS &= \frac{dU + pdV}{T} = \frac{dU + \delta W + \delta W_L}{T} = \frac{\delta Q + \delta Q_g}{T} \\ &= \frac{\delta Q}{T} + \frac{\delta Q_g}{T} = \delta S_f + \delta S_g^{Q_g} \end{aligned} \quad (1-23)$$

式中， δS_f 是熵流， $\delta S_f = \delta Q/T$ ，它表示热力系与外界交换热量而导致的熵的流动量，对热力系而言，当它从外界吸热时，熵流为正，当向外界放热时，熵流为负； $\delta S_g^{Q_g}$ 是热力系内部过程不可逆程度的度量 $\delta S_g^{Q_g} = \delta Q_g/T$ 。

热力系内部过程的不可逆因素引起的耗散效应，使损失的机械功在工质内部重新转化为热能，即产生耗散热被工质吸收，而引起的熵产。因为耗散热恒为正，所以热产引起的熵产亦恒为正，极限情况（可逆过程）为零。

2) 熵方程。设有一热力系，如图 1-1 中虚线（界面）包围的体积所示，其总熵为 S （图 1-1 中 I）。假定在一段极短的时间 dr 内，由于传热，从外界进入热力系的熵流为 δS_f ，又从外界流进了比熵为 s_1 的质量 δm_1 ，并向外界流出了比熵为 s_2 的质量 δm_2 ；与此同时，热力系内部的熵产为 δS_g （图 1-1 中 II）经过这段极短的时间 dr 后，热力系的总熵变为

$S + dS$ （图 1-1 中 III）这时，熵方程为：热力系总熵的增量 = 流入熵的总和 + 热力系的熵产 - 流出的熵的总和。即

$$(\delta S_f + s_1 \delta m_1) + \delta S_g - s_2 \delta m_2 = (S + dS) - S$$

所以 $dS = \delta S_f + \delta S_g + s_1 \delta m_1 - s_2 \delta m_2$ (1-24)

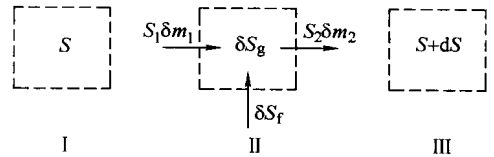


图 1-1 热力系

将式 (1-24) 对时间积分，可得

$$\Delta S = S_f + S_g + \int_{(r)} (s_1 \delta m_1 - s_2 \delta m_2) \quad (1-25)$$

式 (1-24) 和式 (1-25) 是熵方程的基本关系式。式中， $s \delta m$ 也是一种熵流，它是随物质流进或流出热力系的熵流。流进热力系为正，流出热力系为负。热力系的熵的变化等于总的熵流与熵产之和。

熵方程中的核心是熵产，它是热力学第二定律的实质问题。由于能量在转移和转换过程中总是有其他形式的能量转变成热能（功损变为热产），而热能又总是由高温部分传向低温部分，这些都会引起熵产。这正是热能区别于其他能量的特性，也正是一切热力过程的自发性、方向性和不可逆性的根源。

(3) 热力学第二定律各种表述的等效性 热力学第二定律揭示了实际热力过程的方向性和不可逆性，鉴于热力过程的多样性，热力学第二定律有以下表述形式：

1) 克劳修斯表述。“不可能将热量由低温物体传送到高温物体而不引起其他变化”。

2) 开尔文-普朗克表述。“不可能制造出从单一热源吸热而使之全部转变为功的循环发动机”，或者说：“第二类永动机是不可能制成的”。

3) 由于在分析任何具体问题时，都可以将参与过程的全部物体包括进来而构成孤立系，则孤立系的熵增原理作为热力学第二定律的概括表述，即“自然界的一切过程总是自发地、不可逆地朝着使孤立系熵增加的方向进行。”

(4) 卡诺定理和卡诺循环

1) 卡诺定理。卡诺定理：工作在两个恒温热源 (T_1 和 T_2) 之间的循环，不管采用什么工质，如果是可逆的，其热效率均为 $1 - T_2/T_1$ ；如果是不可逆，其热效率恒小于 $1 - T_2/T_1$ 。

2) 卡诺循环。所有工作在两个恒温热源 (T_1 、 T_2) 之间的可逆热机, 不管采用什么工质, 也不管具体经历什么循环, 其热效率都等于 $1 - T_2/T_1$ 。

保证热机进行可逆循环的必备条件是: 工质内部必须是平衡的。当工质从热源吸热时, 工质的温度必须等于热源的温度, 即传热无温差; 当工质在吸热膨胀时无摩擦, 即工质必须进行一个可逆的定温吸热(膨胀)过程。同样, 在向冷源放热时, 工质的温度必须等于冷源温度, 工质必须进行一个可逆的定温放热(压缩)过程。工程在热源温度 (T_1) 和冷源温度 (T_2) 之间变化时, 不能和热源或冷源有热量交换, 如果有热量交换, 必定是在不等温的情况下进行的, 因而是不可逆的。因此, 组成热机可逆循环的只能是可逆绝热(定熵)过程如图 1-2 所示; 或者是吸热、放热在循环内部正好抵消的可逆过程, 如图 1-3 所示。

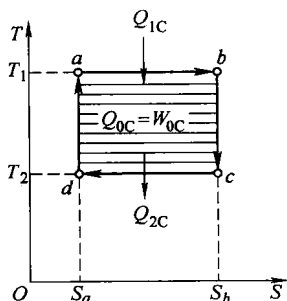


图 1-2 可逆绝热(定熵)过程

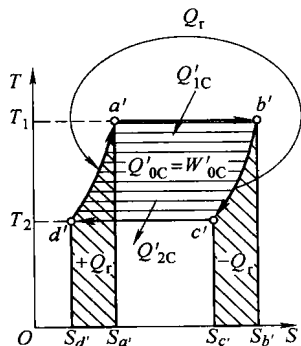


图 1-3 可逆过程

(5) 克劳修斯积分式 克劳修斯积分式包括一个等式和一个不等式:

$$\oint \frac{\delta Q}{T'} \leq 0 \quad (1-26)$$

式中, T' 为外界温度; 等号对可逆循环而言; 不等号对不可逆循环而言。它所表达的意思是: 任何闭口热力系, 在进行了一个循环后, 它和外界交换的微元热量与参与这一微元换热过程时外界温度的比值(商)的循环积分, 不可能大于零, 只能是小于零(如果循环是不可逆的), 或者最多等于零(如果循环是可逆的)。

(6) 热量的可用能及其不可逆损失 热力学第一定律确定了各种热力过程中总能量在数量上的守恒, 而热力学第二定律则说明了各种实际热力过程中, 能量在品质上的退化和贬值, 即能量的可用性降低和可用能减少。

事实上各种形式的能量并不都具有同样的可用性。机械能和电能等具有完全的可用性, 它们全部是可用能; 而热能则不具有完全的可用性, 即使通过理想的可逆循环, 热能也不能全部转变为机械能。热能中可用能所占的比例, 既与热能的温度高低有关, 也与环境温度有关。

1.2 流体力学基础

流体力学是研究流体的平衡和运动规律的科学。在液化天然气技术和工程中, 不仅要解决流体在流动过程中所发生的物理量的变化、转化等问题, 还必须解决流体与固体的相互作用力的计算, 以保证液化、输送设备的安全运行。

1.2.1 流体的物理性质

1. 固态、液态和气态

在常温常压下, 物质有固态、液态和气态三种聚集状态, 它们分别成为固体、液体和气体。液体和气体又合称为流体。固体具有一定的形状, 不易变形; 流体则无一定的形状, 且易于变形, 即具有一定的流动性。流体中气体在受到压力[⊖]或温度变化时, 体积有较大的改变; 液体则存在自由表面。

2. 相变

物质三态在一定的条件下会相互转化。当温度改变到一定程度, 分子热运动足以破坏某种特定相互作用形成的秩序时, 物质的宏观状态就可能发生突变, 形成另一种聚态, 这就是所谓相变。相变中体积会发生变化。相变时会产生潜热, 汽化、溶解、升华时吸热; 凝结、凝固、凝华时放热等。表 1-4 列出一些物质和元素的熔解热及汽化热。

物质形成三态是分子间相互作用的有序倾向及分子热运动的无序倾向共同作用的结果。

⊖ 力学中称为“压强”, 但工程上习惯称为压力。本书统一用“压力”这一名称。

表 1-4 一些物质的熔解热与汽化热

物质名称	正常熔点 /K	熔解热 /(kJ/kg)	正常沸点 /K	汽化热 /(kJ/kg)
水 H ₂ O	273	334	373	2257.0
醋酸 CH ₃ COOH	290	196.7	391	406
苯 C ₆ H ₆	279	126	353	393.9
氧 O ₂	328	13.8	363	213.9
二氧化碳 CO ₂	217	180.8	195(升华)	554.2(升华)
酒精 C ₂ H ₅ OH	159	109.3	351	837.2
氨 NH ₃	195	351.6	240	1366.3
铁 Fe	2081	314.0	3296	6279
硫 S	659	39.1	991	287.2

1.2.2 流体的可压缩性与热膨胀性

1. 流体的密度和比体积

密度与比体积是流体最基本的物理量。流体密度 ρ 是流体中某空间点上单位体积的平均质量，密度是空间位置及时间的函数，其单位为 kg/m^3 。

比体积是密度的倒数，即单位质量流体所占有的体积，以 v 表示： $v = \frac{1}{\rho}$ ，其单位为 m^3/kg 。表 1-5 列出几种常见流体的密度。

表 1-5 几种常见流体的密度

流体名称	温度/K	密度/(kg/m^3)
二氧化碳	300	1.7730
空气	250	1.3947
氧气	300	1.284
氮气	300	1.1233
一氧化碳	300	1.1233
氦气	300	0.1625
氢气	300	0.08078
水蒸气	400	0.5542
L 二醇	300	1111.4
氟里昂	280	1374.4
润滑油	300	884.1
甘油	300	1259.9
水银	300	13529
纯水	288	999.1
纯水	278	1000.0

决定流体密度值大小的因素有：流体的种类、压力和温度，对多组分流体，密度还是各组分含量的函数。如海水是水与各种溶解盐的混合物，海水密度常

认为是压力、温度及盐度（盐度是单位质量海水中溶解盐的质量，以 ζ 表示）的函数： $\rho = \rho(p, T, \zeta)$ ；大气是干空气与水汽的混合物，大气密度是压力、温度及比湿（单位质量空气中含有的水汽质量，以 q 表示）的函数： $\rho = \rho(p, T, q)$ 。

2. 流体的可压缩性与热膨胀性

(1) 流体的压缩性与体积压缩系数 当作用于流体上的压力增加时，其体积将会减小的特性称为流体的压缩性。压缩性用流体的体积压缩系数 β_p 度量。 β_p 定义为流体在温度不变时，增加一个单位压力所引起的体积变化率，即 $\beta_p = -\frac{dV}{V}/dp$ ，其单位是 m^2/N 。

液体的压缩系数很小，故其压缩性一般可以忽略不计。气体的压缩系数远大于液体，且与温度、压力有关。

等温压缩系数是衡量流体可压缩性的物理量，它表示在一定温度下压力增加一个单位时，流体密度的相对增加率。由于比体积 v 为密度 ρ 的倒数： $vp = 1$ ，因此

$$\gamma_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad \gamma_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad (1-27)$$

式 (1-27) 表示，等温压缩系数表示在一定温度下压力增加一个单位时流体体积的相对缩小率。

等温压缩系数 γ_T 的倒数为体积弹性模量 E ：

$$E = \frac{1}{\gamma_T} = \rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \quad (1-28)$$

它表示流体体积的相当变化所需的压力增量。

表 1-6 是一些常见流体的等温压缩系数 γ_T 及体积弹性模量 E 的值。

表 1-6 一些常见流体的 γ_T 及 E 值

流体名称	$\gamma_T / (\times 10^{-11} \text{m}^2/\text{N})$	$E / (\times 10^9 \text{Pa})$
二氧化碳	64	1.56
酒精	110	0.909
甘油	21	4.762
水银	3.7	27.03
水	49	2.04

严格地说，实际流体都是可以压缩的。在流体力学中，为了处理问题的方便，常将压缩性很小的流体近似看做不可压缩流体，其密度可看作为常数。

(2) 流体的热膨胀性与体膨胀系数 流体的膨胀性是指当温度增加时，流体的体积增大的特性。膨胀性的大小用体膨胀系数 α_v 度量， α_v 的单位为 K^{-1} 。 α_v 定义为单位温升所引起的体积的变化率，其数学

表达式为

$$\alpha_v = \frac{dV}{V} / dt \quad (1-29)$$

式中， dt 是温度的增量（℃）。

流体在温度改变时，其体积或密度可以改变的性质，称为流体的热膨胀性，热膨胀系数表示在一定压力下，温度增加 1K 时流体密度的相对减小率。

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (1-30)$$

表 1-7 列出一些液体的热膨胀系数。

表 1-7 一些液体的热膨胀系数

液体名称	温度/K	$\beta / (\times 10^{-3} \text{K}^{-1})$
润滑油	300	0.7
乙二醇	300	0.65
甘油	300	0.48
氟里昂	300	2.75
水银	300	0.181
饱和水	300	0.276

1.2.3 流体的传输特性

流体由非平衡态转向平衡态时物理量的传递性质，称为流体的传输特性。流体的传输特性，主要指动量输运、能量输运、质量输运。从宏观上看，它们分别表现为粘滞现象、导热现象、扩散现象，并具有各自的宏观规律。

1. 动量输运（粘滞现象）

(1) 牛顿粘性定律 对于平行于 x 轴的水平流动，当各层流体的速度不同时，任意两层流体之间将互施作用力以阻碍各层流体之间的相互运动，这种现象称为粘滞现象。

设在两相距 h 的平行平板之间充满粘性流体，若令下平板固定不动，而使上平板在其自身平面内以等速 u 向右运动，则附于上下平板的流体质点其速度分布为 u 及 0。两平板间的速度分布如图 1-4 所示。

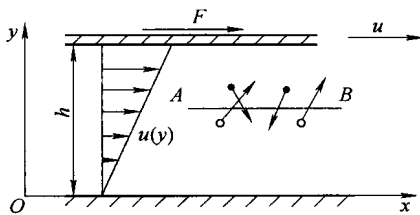


图 1-4 两平板间的速度分布

实验表明，使上平板以速度 u 运动的外力为 F ，则该力与速度 u 及平板面积 A 成正比，与平板间距 h

成反比，即

$$F = \mu \frac{u}{h} A \quad (1-31)$$

或

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{u}{h} \quad (1-32)$$

式中， u/h 是速度梯度。一般而言，当速度分布为 $u(y)$ 时，流体层 y 处的剪切力为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-33)$$

式中， $\frac{du}{dy}$ 是速度梯度； μ 是动力粘度，其值随流体不同而不同。 μ 的法定单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 温度、压力对流体粘度的影响

1) 温度的影响。对于液体，温度升高时，分子间的间隙增大，吸引力减小，定居时间减小，粘度也减小。对于气体，温度增高，热运动加剧，动量交换加快，粘度增大。

2) 压力的影响。压力对流体粘度的影响很小，但在高压作用下，流体的粘度均随压力的增加而增加。

(3) 动力粘度 μ 、运动粘度 ν 工程中除了用动力粘度 μ 外，还常用到运动粘度 ν ，它是动力粘度系数 μ 与流体密度 ρ 之比，即

$$\nu = \mu / \rho \quad (1-34)$$

运动粘度 ν 的法定单位是 m^2/s 。表 1-8 列出一些流体的动力粘度 μ 及运动粘度 ν 值。

表 1-8 一些流体的动力粘度 μ 及运动粘度 ν 值

流体名称	温度/K	动力粘度 $\mu / (\times 10^7 \text{Pa} \cdot \text{s})$	运动粘度 $\nu / (\times 10^6 \text{m}^2/\text{s})$
空气	300	184.6	15.87
氮	300	101.5	14.7
二氧化碳	300	149	8.4
一氧化碳	300	175	15.6
氦	300	199	122
氢	300	89.6	111
氮	300	178.2	15.86
氧	300	207.2	16.14
水蒸气	400	134.4	24.25
润滑油	300	48.6×10^5	550
乙二醇	300	1.57×10^5	14.1
甘油	300	79.9×10^5	634
氟利昂	300	0.0254×10^5	0.195
水银	300	0.1523×10^5	0.1125

(4) 无粘性流动 实际流体都是有粘性的，但

若流体的粘度很小，而且流场中速度梯度不大，这时流场中出现的粘性力很小，可以将这种流体流动近似地认为是无粘性流动。

2. 质量输运 (扩散现象)

当流体的密度分布不均匀时，流体的质量就会从高密度区迁移到低密度区，这种现象称为扩散现象。一般分为两类：一类是在单组分流体中，由于其自身密度差所引起的扩散，称为自扩散；另一类是在两种组分的混合介质中，由于各组分的各自密度差在另一组分中所引起的扩散，称为互扩散。

(1) 自扩散与自扩散系数 自扩散是由于自身密度差所引起的扩散现象。当流体分子进行动量与热能交换时，也同时伴有质量的交换，因此质量输运的机理与动量和热能输运的机理完全相同。

(2) 互扩散与菲克扩散定律 互扩散是指在两种组分的混合介质中，由于各组分各自的密度差在另一组分中所引起的扩散现象。

A、B 组分中每单位面积的质量扩散量及扩散系数分别用 j_{AB} 和 D_{AB} 表示。扩散系数 D_{AB} 的单位为 m^2/s ，它的大小与压力、温度和混合物的成分有关。一般，液体的扩散系数比气体的小几个数量级， j_{AB} 的单位为 kg/s 。表 1-9 与表 1-10 列出几种物质在空气和水中的扩散系数。

表 1-9 几种物质在空气中的扩散系数

溶 质	溶 剂	温度/K	$D_{AB}/(m^2/s)$
水	空气	298	0.26×10^{-4}
二氧化碳	空气	298	0.16×10^{-4}
氧	空气	298	0.21×10^{-4}
丙酮	空气	273	0.11×10^{-4}
苯	空气	298	0.88×10^{-5}
萘	空气	300	0.62×10^{-5}

表 1-10 几种物质在水中的扩散系数

溶 质	溶 剂	温度/K	$D_{AB}/(m^2/s)$
食盐	水	288	1.1×10^{-9}
葡萄糖	水	298	0.69×10^{-9}
酒精	水	298	0.12×10^{-8}
甘油	水	298	0.94×10^{-9}

流体的动量、热能和质量三种传输特性，都是通过分子的热运动及分子的相互碰撞，输运了它们原先所在区域的宏观性质，从而使原先区域的状态不平衡渐渐趋向状态平衡。在宏观上，三种传输特性的规

律、表达式的结构相类似，即

粘性 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ 牛顿定律

热传导 $q = -\lambda \frac{dT}{dy}$ 傅里叶定律

扩散 $j_{AB} = -D_{AB} \frac{d\rho_A}{dy}$ 菲克第一定律

三种输运过程均为不可逆过程，且这些分子输运现象主要在层流流动中考虑。一旦流动为湍流，由于湍流输运远较分子输运强烈，分子输运常常予以忽略。

1.2.4 表面张力和毛细现象

液体表面具有一种不同于液体内部的特殊性质。在液体内部，相邻液体间的相互作用表现为压力；而在液体表面，界面上液体间的相互作用表现为张力。由于这种力的存在，引起弯曲液面内外出现压力差以及常见的毛细现象等。

1. 表面张力

在液体表面（简称液面）有自动收缩的趋势。若在液面上画一截线，截线两边的液面存在着相互作用的力，此力与截线垂直并与该处液面相切，这种力即为液体的表面张力。表面张力的大小与液面截线的长度 L 成正比，即

$$T = \sigma L \quad (1-35)$$

式中， σ 是表面张力系数 (N/m)，它表示液面上单位长度截线上的表面张力，其大小主要由物质种类决定。

表 1-11 列出一些液体的表面张力系数。表 1-12 列出饱和水的表面张力系数与温度的关系。

表 1-11 一些液体的表面张力系数

液体名称	温度/K	$\sigma/(\times 10^{-3} N/m)$
水与空气	291	73
水银与空气	291	490
水银与水	293	472
酒精与空气	291	23
乙醚与空气	293	16.5
肥皂水与空气	293	40

表 1-12 饱和水的表面张力系数与温度的关系

温度/K	$\sigma/(\times 10^3 N/m)$
273	75.5
290	73.7
310	70.0
350	63.2
400	53.6