



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

膨胀湿蒸汽两相高速流动

王新军 李亮 王顺森 编著



西安交通大学出版社
XIAN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

总 序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在学习过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法;把以教师为中心的教学模式转变为以学生为中心、教师为主导的教学模式;把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,也是一项艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

为了配合研究生的教学改革工作,提高研究生的教学质量,培养研究生的创新思维,西安交通大学叶轮机械研究所的三位教师根据多年来透平机械中的两相高速流动及相关课程的教学实践和科研工作的体会,在《湿蒸汽两相流》和《透平和分离器中的双相流》两本书籍的基础上,参考西安交通大学原涡轮教研室(叶轮机械研究所的前身)几十年的研究成果,编写了《膨胀湿蒸汽两相高速流动》这本研究生教材。

《湿蒸汽两相流》一书是西安交通大学原涡轮机教研室的蔡颐年教授、原上海机械学院王乃宁教授合作撰写的学术专著,由西安交通大学出版社于1985年8月正式出版。该书系统阐述了湿蒸汽两相流的基础理论,讨论了水蒸气的凝结过程和蒸汽与水珠两相物质的运动规律。《透平和分离器中的双相流》是根据英国中央电业研究实验室和比利时冯·卡门流体力学研究所联合编写的英文专著,由蔡颐年教授等人翻译,并由机械工业出版社于1983年1月出版。书中论述了湿蒸汽的基本性质和重要概念,湿蒸汽气体动力学的基本方程和凝结理论,湿蒸汽的测量技术以及外部水分离器等内容。《湿蒸汽两相流》和《透平和分离器中的双相流》一直是国内研究湿蒸汽方面的学者、研究生和相关行业技术人员的主要参考书籍,是从事湿蒸汽两相流研究的基础。

西安交通大学原热力涡轮机(蒸汽轮机与燃气轮机)专业创建于1952年,是我国高等院校中最早成立的专业。早在1965年,在蔡颐年教授的倡导下就已开展湿蒸汽两相流方面的研究,先后派出4名教师去英国、美国、德国进修并进行湿蒸汽方面的科研协作,同时也邀请了外籍教授来校讲学。经过蔡颐年等一批教授和课题组成员几代人的不懈努力与持续研究,西安交通大学逐渐形成了湿蒸汽两相流动研究基地。研究内容涉及:膨胀湿蒸汽的自发凝结与成核理论,水珠生长理论,水膜形成机理,气流剪切作用下的水膜运动规律、水膜撕裂形成水滴以及水滴二次雾化的机理,水滴的运动与沉积规律,湿蒸汽的汽水分离特性,湿蒸汽汽轮机动叶的水蚀起因、机理及防护措施,湿蒸汽凝结流动的计算流体动力学等方向。先后建立了膨胀湿蒸汽拉伐尔喷管试验台、汽水分离器试验台、高转速水蚀试验台、湿蒸汽风洞试验台等。几十年来,西安交通大学在湿蒸汽方面的研究取得了卓越成绩,相关研究成果应用于我国火电汽轮机和核电汽轮机的设计中,有力促进了我国汽轮机事业的发展。

近几十年来,科学技术的进步、能量的高效利用及环境保护的要求促进了大功率汽轮机的快速发展,出现了超超临界的火电汽轮机、1400 MW 等级的核电汽轮机以及各种余热利用饱和蒸汽轮机,而各种先进的汽轮机设计理念也广泛应用在汽轮机的设计中。为了适应新形势下研究生的教学和培养需要,本教材结合相关企业和高校调研结果及编者多年的教学与科研经验,较为全面地阐述了叶轮机械中的膨胀湿蒸汽两相流的基本概念、湿蒸汽特性、流动水蒸汽的凝结动力学、湿蒸汽凝结流动的计算流体动力学、汽轮机中的水滴运动与沉积、汽轮机中的湿汽损失、侵蚀防护与除湿技术以及高速湿蒸汽的测量技术。

本书共分八章,参加编写的有西安交通大学能源与动力工程学院叶轮机械研究所的王新军(第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 6 章和第 7 章),李亮(第 4 章和第 5 章),王顺森(第 8 章)。全书由王新军担任主编,负责统稿。

在本书的编写过程中,得到了张峰、周骏飞、费欣阳、周子杰、陆海空、侯伟韬、李炎栋等一些在校研究生的支持和帮助,他们在资料查询、图表处理等方面做出了很多贡献,在此表示衷心的感谢。

西安交通大学能源与动力工程学院丰镇平教授对本教材进行了评审,提出的宝贵意见对提高本书质量起了极大的作用,编者在此深表谢意!

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 基本概念	(1)
1.1 平衡状态	(1)
1.2 相态与两相流	(2)
1.2.1 物质的相态	(2)
1.2.2 相图	(4)
1.2.3 两相流	(6)
1.3 表面张力	(8)
1.3.1 气液界面	(8)
1.3.2 表面张力	(9)
1.3.3 表面张力数据	(10)
1.4 曲界面时的相平衡	(14)
1.5 汽轮机中的湿蒸汽	(16)
1.5.1 湿蒸汽的来源	(16)
1.5.2 湿蒸汽的影响	(19)
1.5.3 湿蒸汽问题的应对措施	(24)
1.5.4 湿蒸汽汽轮机的参数范围	(32)
1.6 湿蒸汽两相流的研究简介	(34)
本章参考文献	(37)
第 2 章 湿蒸汽特性	(38)
2.1 湿蒸汽性质与结构	(38)
2.1.1 湿蒸汽成分与压力	(38)
2.1.2 水和水蒸气的物理数据	(40)
2.1.3 湿蒸汽结构	(46)
2.1.4 液相的空间分布	(52)
2.1.5 过饱和(过冷)现象	(55)
2.2 开尔文公式	(59)
2.2.1 相平衡与开尔文公式	(59)
2.2.2 毛细管现象与开尔文公式	(59)
2.2.3 自由焓与开尔文公式	(60)

2.2.4	化学势与开尔文公式	(63)
2.2.5	开尔文公式的数量级	(66)
2.3	水蒸气-水珠混合物的热力学	(67)
2.3.1	水珠的临界尺寸	(67)
2.3.2	气相中的分子团	(69)
2.4	湿蒸汽的传热传质	(72)
2.4.1	凝结过程中的两种传质模型	(73)
2.4.2	水珠内部温度与闪蒸	(74)
2.4.3	蒸汽和水珠之间的传热系数	(75)
2.4.4	湿蒸汽内的热滞后效应	(76)
2.5	水蒸气-水珠混合物的力学	(78)
2.5.1	水珠阻力与终极沉降速度	(78)
2.5.2	聚合	(80)
2.5.3	冲击与反弹	(84)
2.5.4	沉积	(85)
2.5.5	水膜的流动与撕裂	(93)
2.5.6	水滴的变形及破裂	(94)
2.6	弛复现象	(97)
2.6.1	简单系统的弛复	(98)
2.6.2	湿蒸汽的热弛复	(99)
2.6.3	水珠的惯性弛复	(100)
2.6.4	弛复时间的典型值	(100)
2.7	蒸汽热力性质的近似计算	(102)
2.7.1	过热蒸汽方程组	(102)
2.7.2	湿蒸汽方程组	(103)
2.7.3	过饱和蒸汽图表及其应用	(104)
	本章参考文献	(109)
第3章	流动水蒸气的凝结动力学	(111)
3.1	过饱和蒸汽产生的条件与过程	(111)
3.1.1	过饱和蒸汽在 $p-V-T$ 图上的状态点	(111)
3.1.2	均质性与相变	(112)
3.2	喷管中的蒸汽膨胀与凝结	(114)
3.2.1	从过热区开始的膨胀过程	(114)
3.2.2	从饱和线或湿蒸汽区开始的膨胀过程	(118)

3.2.3	过饱和蒸汽在 $h-s$ 图上的表示方法	(119)
3.3	蒸汽凝结理论	(120)
3.3.1	平衡态下的临界水珠数目	(120)
3.3.2	经典成核率表达式	(121)
3.3.3	成核率的影响因素	(123)
3.3.4	成核过程的延续时间	(126)
3.3.5	经典成核率理论的局限性	(127)
3.4	水珠生长理论	(129)
3.4.1	水珠生长率方程	(129)
3.4.2	水珠生长率的动力表达式	(132)
3.5	一元凝结流动的理论及实验	(135)
3.5.1	拉瓦尔喷管的流动特征	(135)
3.5.2	一元凝结流动的实验装置	(137)
3.5.3	喷管中的一元凝结流动	(139)
3.5.4	理论与实验的比较	(144)
	本章参考文献	(149)
第4章	湿蒸汽流动问题的计算流体力学分析	(154)
4.1	湿蒸汽非平衡凝结流动的气动热力学	(154)
4.1.1	加热对可压缩流动的影响	(154)
4.1.2	湿蒸汽凝结引起的凝结冲波	(156)
4.1.3	湿蒸汽流动中的音速	(156)
4.2	湿蒸汽非平衡凝结流动的数值模型	(158)
4.2.1	汽相流动控制方程	(159)
4.2.2	液相状态分布控制方程	(161)
4.2.3	自发凝结成核及水滴生长模型	(163)
4.3	缩放喷管中的一元湿蒸汽非平衡凝结流动	(164)
4.3.1	流动控制方程	(164)
4.3.2	凝结系数和液滴生长校正系数的确定	(164)
4.3.3	缩放喷管中的一元凝结流动	(168)
4.3.4	一元凝结流中超临界加热引起的自激振荡流动	(169)
4.4	叶栅中的二维湿蒸汽非平衡凝结流动	(176)
4.5	水滴运动与沉积的统计学基础	(182)
4.5.1	概述	(182)
4.5.2	颗粒尺寸的统计平均值	(183)

4.5.3 数据表达和分布曲线	(184)
4.6 叶栅通道中水滴的运动与沉积	(187)
4.6.1 分析水滴运动规律的数值模型与计算方法	(187)
4.6.2 湿蒸汽透平级前水滴参数的分布	(189)
4.6.3 叶栅通道中水滴的运动与沉积	(195)
本章参考文献	(203)
第5章 汽轮机中的湿汽损失	(205)
5.1 估算湿汽损失的经验方法——Baumann 公式	(207)
5.2 湿汽损失的定量计算方法	(208)
5.2.1 水滴运动模型	(209)
5.2.2 湿汽损失模型	(211)
5.2.3 湿汽损失的计算流程	(213)
5.3 湿汽损失的计算实例	(215)
5.3.1 某火电汽轮机低压缸中的湿汽损失	(215)
5.3.2 某核电汽轮机低压缸中的湿汽损失	(219)
5.3.3 湿汽损失定量计算方法的评估	(223)
5.4 多级湿蒸汽汽轮机减小湿汽损失的一个优化实例	(224)
5.4.1 优化策略和优化方法	(225)
5.4.2 以减小湿汽损失为目标的多级透平优化	(226)
本章参考文献	(233)
第6章 湿蒸汽的侵蚀与防护	(235)
6.1 材料侵蚀与防护	(235)
6.1.1 侵蚀过程与机理	(235)
6.1.2 动叶的水蚀	(238)
6.1.3 水蚀特性	(243)
6.1.4 叶片水蚀准则	(245)
6.1.5 侵蚀-腐蚀的估算	(252)
6.1.6 侵蚀的防护	(257)
6.2 叶片表面抗蚀技术	(258)
6.2.1 表面硬化	(259)
6.2.2 镶嵌焊司太立合金护条	(261)
6.2.3 高性能抗侵蚀材料	(261)
本章参考文献	(262)

第7章 汽轮机的除湿技术	(264)
7.1 内部除湿技术	(264)
7.1.1 疏水槽	(264)
7.1.2 空心静叶缝隙抽吸	(276)
7.1.3 空心静叶蒸汽加热	(293)
7.1.4 空心静叶缝隙吹扫	(299)
7.1.5 动叶除湿	(304)
7.1.6 除湿级	(305)
7.1.7 蜂窝汽封除湿	(310)
7.1.8 加大静动叶栅的轴向距离	(311)
7.1.9 级间除湿再热器	(313)
7.1.10 其他除湿方法的考虑	(316)
7.2 外部除湿技术	(320)
7.2.1 水分离器的工作原理	(322)
7.2.2 汽水分离再热器	(332)
7.2.3 弯管式汽水分离器	(341)
本章参考文献	(346)
第8章 高速湿蒸汽流的测量技术	(349)
8.1 压力测量	(349)
8.1.1 充水管线	(349)
8.1.2 连续清除的空气管线	(350)
8.1.3 间歇清除的空气管线	(351)
8.1.4 系统对压力波动的响应	(353)
8.1.5 透平中的压力测量	(354)
8.2 湿度测量	(356)
8.2.1 二次水滴测量方法	(358)
8.2.2 蒸汽湿度的光学法测量	(362)
8.2.3 蒸汽湿度的热力学测量方法	(379)
8.2.4 蒸汽湿度的其他测量方法	(389)
本章参考文献	(394)

第 1 章 基本概念

1.1 平衡状态

在热力学中,通常把分析的对象从周围物体中分割出来,研究它与周围物体之间的能量和物质的传递。这种分割出来作为热力学分析对象的有限物质系统叫作热力系统,周围物体则统称外界。系统和外界之间的分界面叫做边界,边界可以是实际存在的,也可以是假想的;可以是固定不动的,也可以有位移和变形。

根据热力系统和外界之间的能量与物质交换情况,将热力系统分为孤立系统、闭口系统和开口系统。当一个热力系统和外界既无能量交换,又无物质交换时,系统中的能量和质量都保持恒定不变,则该系统就称为孤立系统。闭口系统和外界只有能量交换而无物质交换,因而系统内的质量保持恒定不变,所以闭口系统又叫做控制质量。开口系统和外界不仅有能量交换而且还有物质交换,系统中的能量和质量都可以变化,但能量和质量的变化通常是在某一划定的空间范围内进行的,所以开口系统又叫做控制容积或控制体。

将工质在热力变化过程中的某一瞬间所呈现的宏观物理状况称为工质的热力学状态(简称状态)。用来描述工质所处状态的宏观物理量称为状态参数(如压力、温度、密度等)。状态参数是热力系统状态的单值函数,它的值取决于给定的状态。状态参数发生变化即表明物质所处的状态发生了变化,物质的状态变化也必然可由参数的变化标志出来。

如果一个热力系统在不受外界影响的条件下,系统的状态能够始终保持不变,系统的这种状态称为平衡状态。如果组成热力系统的各部分之间没有热量的传递,系统就处于热平衡;各部分之间没有相对位移,系统就处于力平衡。同时具备热平衡和力平衡的系统就处于热力平衡状态。

处于热力平衡状态的系统,只要不受外界影响,其状态就不会随时间改变,平衡也不会自发地破坏。而处于不平衡状态的系统,由于各部分之间的传热和位移,其状态将随时间而改变,改变的结果一定使传热和位移逐渐减弱,直至完全停止。因此,在没有外界影响的条件下,不平衡状态的系统总会自发地趋于平衡状态。

如果系统受到外界的影响,就不能保持平衡状态(如系统和外界间因温度不平

衡而产生的热量交换,或因压力不平衡而产生功的交换,都会破坏系统原来的平衡状态)。系统和外界间相互作用的最终结果,必然是系统和外界共同达到一个新的平衡状态。

只有在系统内部或系统与外界之间的一切不平衡作用都不存在时,系统的一切宏观变化方可停止,此时热力系统所处的状态才是平衡状态。对于处于热力平衡态下的气体(或者液体),如果略去重力的影响,那么气体内部各处的性质是均匀一致的,各处的温度、压力、比体积等状态参数都应相同。如果考虑到重力的影响,那么气体(液体)中的压力和密度将沿高度而有所差别。对于气液两相并存的热力平衡系统,气相的密度和液相的密度不同,所以整个系统不是均匀的。

1.2 相态与两相流

1.2.1 物质的相态

物质的相态也就是物质存在的状态(简称相,也叫物态),物质的一种状态对应一个相态。

相态是物质在一定温度和压强下所处的相对稳定的状态。气态、液态和固态是物质基本三态,相应的物质分别称为气体、液体和固体。相态是以分子或原子为基元的三种聚集状态,如:水蒸气、水、冰是常见的同一物质的三态;氧、氢、氮等在常温下是气态,只在极低温度下才是液态或固态;金、钨等在常温下是固态,只在极高温度下才是液态或气态。

物质各相态具有不同的特点,图 1-1 是三种相态下物质的分子结构示意图。气态物质的分子或原子作无规则热运动,无平衡位置,也不能维持在一定距离,分子间的距离最大(见图 1-1(a)),相应分子间的相互引力也最小,因而没有固定的体积和形状,能够自发地充满容器,容易流动和压缩。液态分子间的距离较小(见图 1-1(b)),分子相互间的引力也较大,所以液体具有一定体积,形状随容器而定,易流动,但不易压缩。固态物质的分子或原子只能围绕各自的平衡位置微小振动,分子间的距离很小(见图 1-1(c)),相互的吸引力大,因此固体物质都有一定的形状和体积。

物质三相的特点可以从物相的分子水平来解释。一般物质的气体密度很小,分子和分子一般相距很远(和分子的直径相比),彼此之间的排列没有规律。气体分子可以自由移动,运动的平均速度与音速有差不多的数量级。偶尔也会有两三个分子相距很近,以至于分子的电子云发生相互重叠从而使分子与分子结合在一起,这种情况在较高的压力下比较常见,但这种分子聚合体存在的时间很短。

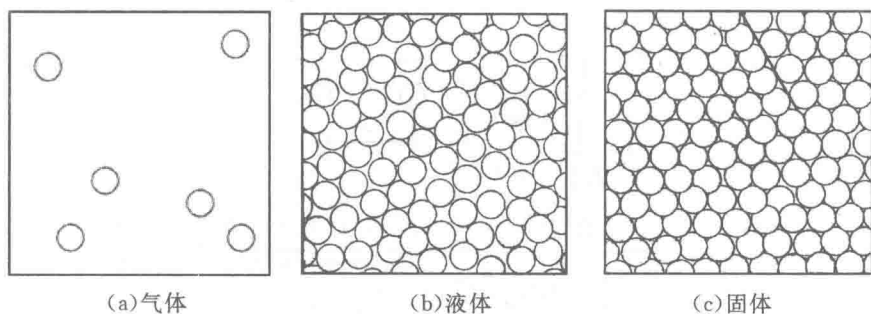


图 1-1 同物质的分子结构示意图

液体的密度比通常状态下气体的密度大约 10^3 倍,但液体分子的尺寸仍然与气体的相同,所以彼此相距较近。液体分子也是在不断地运动,但运动形式是一部分快速振动,一部分移动。因而液体分子的排列情况也在不断地改变。

在相同体积内,一般物质的固体分子数比液体分子数约增加百分之十几,所以固体的密度相比液体略有增加(需要说明的是,水物质比较特殊,当液相水变为固相冰时,密度反而会有所降低),但固体分子排列的规则性则大大超过了液体分子,基本上是按晶格中的固定位置就位的。固体分子与分子之间的结合相当牢固,分子只能在晶格中振动,而不能自由移动。

物质三相的主要区分不在于三相中的分子本身有什么不同,而是三相中分子与分子之间的结构关系有所不同,或者说是分子间的相互作用力不同。众所周知,物质的分子与分子之间存在着两种方向相反的作用力,如图 1-2 所示。一个是分子间的吸引力(图中的 PR 线),也称为范德瓦尔斯(Van der Waals)力;另一个是分子间的排斥力(图中的 ST 线)。吸引力和排斥力的大小均与分子之间的距离有关。当两个分子相距较远时,分子间的吸引力很小,这样才可以把一般压力下的一定空间内的气体分子看作是完全不受其他分子影响的独立运动的球形实体;随着分子之间的距离 r 减小,两个分子间的吸引力按照一定的规律增大;但当分子间距 r 小到一定程度时,虽然分子间的吸引力较大,但分子间的排斥力开始发生作用,且排斥力随 r 的减小急剧增大。吸引力和排斥力的叠加结果就形成了合力曲线 PQR' 。物质中分子间相互作用力的消长情况是与物质的相变过程相对应的,也是研究物质相变的基础。

除上述物质的基本三态外,在极高温下电离的气体成为由离子和电子组成的等离子体,电离的状态是宇宙中普遍存在的物质聚集状态,称为物质第四态(也称为超气态)。在超临界温度和压力下,原子结构被破坏,原子外围的电子被挤压到原子核范围,这种状态称为物质第五态(也称超临界态)。

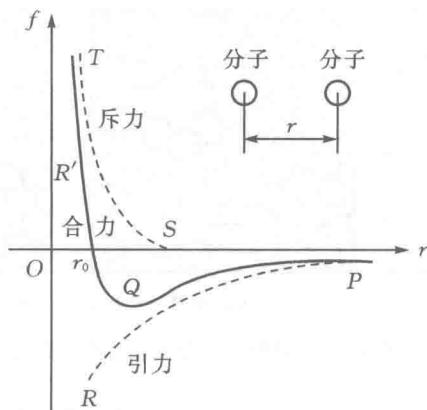


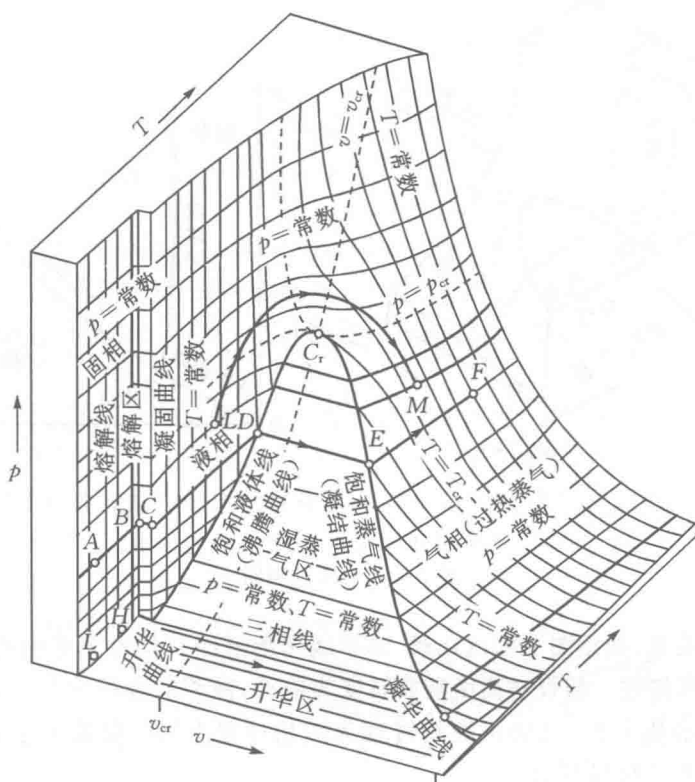
图 1-2 分子间的相互作用力示意图

1.2.2 相图

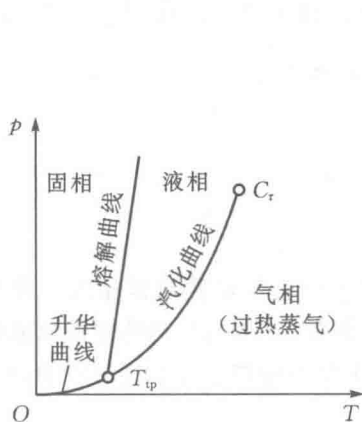
通常用相图来表示物质的不同相态(基本三态)。相图中的坐标是相关的热力学参数,相图上的线被称为“相界”,这是相变发生的地方,没有线的区域属于同一个相态。在研究物质的三相相互转变的问题时,一般采用相关物质的 $p-V-T$ 图(也称为总相图)。根据状态方程 $f(p, V, T) = 0$, 纯物质的平衡状态点在 p, V, T 三维坐标系中构成一个曲面,称为热力学面。图 1-3(a)所示是一般纯物质的总相图,从图中的热力学面上可清晰看到,在不同的参数范围内物质呈现不同的相态以及相态之间的转变过程。将 $p-V-T$ 曲面投影到 $p-T$ 面上可得到 $p-T$ 图(见图 1-3(b)),投影到 $p-V$ 面上得到 $p-V$ 图(见图 1-3(c))。图 1-3 中的点 T_{tp} 就是固、液、气三相共存的状态,即三相点。

图 1-4 是水的相图。水是世界上最常见的物质,也是热力学性质最为特殊的物质。与所有其他已知物质相比,水在常压下由液相转变为固相时的体积大约要膨胀 9%,而其他物质则收缩大约 5%~15%。这个区别反映在相图中就表现为一般物质的溶解曲线的斜率 $\partial p / \partial T$ 为正值(见图 1-3(b)),而水的溶解曲线斜率 $\partial p / \partial T$ 为负值(见图 1-4(b))。也就是说,当某种物质由液相凝固为固相时,如果体积有所收缩,则这种物质的固液表面的 $\partial p / \partial T$ 为正值;反之,如果体积有所膨胀,固液表面的 $\partial p / \partial T$ 为负值。这一现象可以用克劳修斯-克拉贝龙(Clausius-Clapyron)方程来解释。

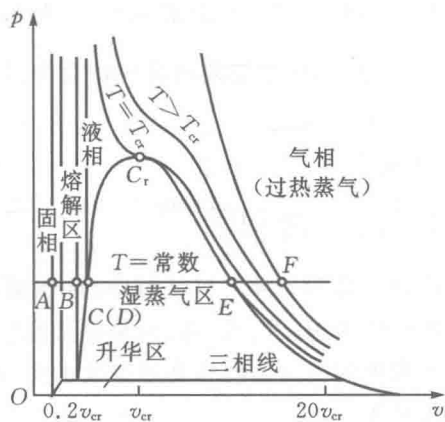
相律指出,纯物质处于两相平衡共存时,其温度和压力彼此不独立,它们之间



(a)



(b)



(c)

图 1-3 一般纯物质的热力学面及投影

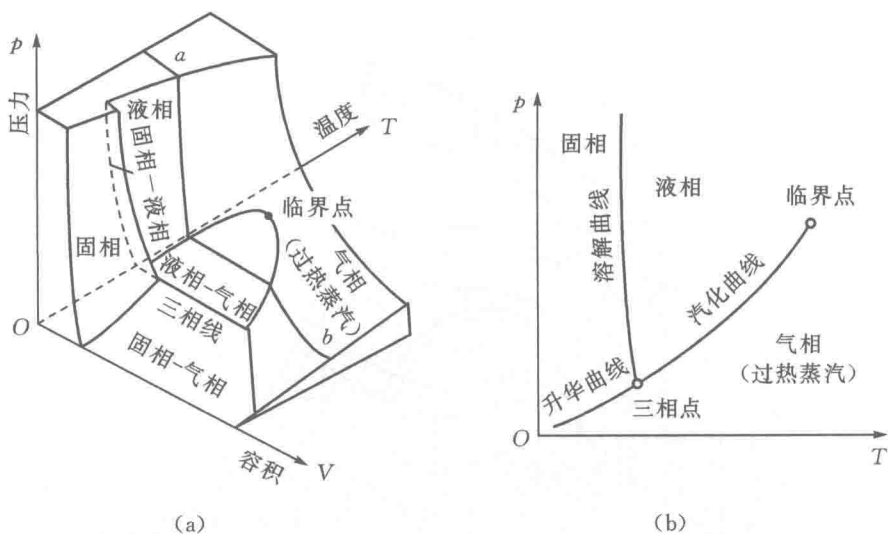


图 1-4 纯水的相图

存在一定的关系(如相图上的汽化线、升华线和熔解线),这种关系由克劳修斯-克拉贝龙方程来描述。假设物质由液相转变为固相,液相的容积为 $V_{\text{液}}$,固相的容积为 $V_{\text{固}}$,相变潜热为 L ,反映由液相转变为固相过程中压力温度关系的 Clausius-Clapyron 方程式可以写为

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\text{液-固}} = \frac{-L_{\text{液-固}}}{T(V_{\text{固}} - V_{\text{液}})} \quad (1-1)$$

对于一般物质,当由液相转变为固相时的体积收缩,有 $V_{\text{液}} > V_{\text{固}}$,所以 $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\text{液-固}} > 0$;而水物质由液相转变为固相时的体积是膨胀的,有 $V_{\text{液}} < V_{\text{固}}$,所以 $\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{\text{液-固}} < 0$ 。

1.2.3 两相流

在自然界和各种工程领域中,两相流动或多相流动是普遍存在的一种现象。如自然界中的雨、雪、云、雾、尘暴以及流沙等的飘流或流动;生物体中的血液循环;水利工程中的泥沙运动和高速掺气水流;环境工程中的烟尘对空气的污染;有相变时的传热等。

在物质的基本三态(气态、液态、固态)中,除固体以外的其他几种物质状态统称为流体。将两相物质(其中至少一相为流体)所组成的流动系统称为两相流;若

流动系统中物质的相态多于两个,则称为多相流。两相流是多相流动中最通常的类型。根据构成系统的相态可以分为气-液两相系统、气-固两相系统、液-液两相系统、液-固两相等。在这里需要说明的是,气相和液相可能以连续的形式(如气体-液膜两相系统)出现;也可能以离散的形式(如气泡-液体两相系统,液滴-液体两相系统)出现。固相则通常以颗粒或团块的形式处于两相流或多相流动中。

在一般的两相流动系统中,两相物质可能有不同的温度,这会带来相间的传热问题;也可能有不同的速度(即存在滑移),这会带来力的问题。因此,研究两相流就是同时研究流动系统中的两相之间的热和力学关系。研究的基本内容主要包括以下三个方面。

(1)判断流动形态及相互转变。两相流动形态不同,则热量与质量传递的机理和影响因素也不同。

(2)分散相在连续相中的运动规律及其对传递和反应过程的影响。如液滴和气泡在运动中的变形、界面上的波动等都会影响传质传热过程。

(3)两相流动系统的摩擦阻力、系统的振荡和稳定性等。

对汽轮机中的膨胀湿蒸汽两相流动来说,除了需要研究上述的一般两相流动问题之外,还应更加关注工质的相变过程以及相变带来的相关问题。

两相流动的理论分析比单相流动困难得多,描述两相流的通用微分方程组至今尚未建立,大量理论工作是采用两类简化的模型,一类是均相模型,即将两相介质看成是一种混合得非常均匀的混合物(即看作单流体),并假定处理单相流动的概念和方法仍然适用于两相流动,同时也对它的物理性质及传递性质作合理的假定。第二类是分相模型,即认为单相流动的概念和方法可分别用于两相流动系统的各个相,同时考虑两相之间的相互作用。实际应用的有双流体模型和分散颗粒群轨迹模型。

两相流动现象在高速旋转的叶轮机械中也广泛存在。如蒸汽轮机中的湿蒸汽(水蒸气-水珠)两相流动,它出现在常规火电汽轮机的低压区域、水冷堆核电汽轮机以及地热汽轮机的高/低压部分、凝汽器的汽侧空间。在超临界或超超临界汽轮机的高压进汽部分,存在有气-固(过热蒸汽-固体颗粒)两相流动。在燃气轮机(含航空发动机)中,则有压缩机内的气-固(空气-固体颗粒)两相流动,透平内的气-固(燃气-固体颗粒)两相流动,以及燃烧室内部的气-液(燃料液滴-空气)两相流动。

本教材主要关注蒸汽轮机中的湿蒸汽两相流动所涉及的相关问题。

1.3 表面张力

1.3.1 气液界面

气液界面是指气体与液体两相之间的分界面,也称为液体表面。从现象上看,气体与液体之间最大的不同,就在于气体永远充满容器,而液体则具有自由表面。液体的自由表面是在地球引力作用下形成的。在一般的分子距离之内,一方面是液体分子间的相互引力起主要作用,因而液体总是集聚在一起并具有一定体积;另一方面是液体的分子结构使它不能抵抗剪切力,所以液体形状随容器而定,并且容易流动。这两个方面的原因就导致了液体在重力作用下形成自由表面。由于气体分子的动能很大,分子间的相互引力很小,所以气体总要飞散,没有固定的体积和形状并具有自发地充满整个容器的特性。但是气体分子也存在一定质量,也受重力的作用,如果从足够大的范围看,地球引力还是能够使大气分子对地球形成一个包围圈,就是说气体也有一个自由表面。

严格来说,在气-液两相系统中,气液界面并不是一个确切明显的界面,应该用界面区的概念来表达。图 1-5 是液体表面附近分子的分布示意图。可以看出,在液体内部,液态分子间的距离相对较小,分子的分布比较密集;在液体表面层,液态分子间的距离增大,分子的分布密集度降低;在液体外部,气态分子间的距离较大,分子的分布密集度也最低。显然,气体与液体的分界面是有一定宽度的区域,气液界面实际上是在密度连续变化区域中人为选定的一个分界面,如图 1-6 所示。图中的横坐标表示从液体内部,经液体表面层,再到气体中的垂直距离,纵坐标表示物质的密度。在纯液体和纯气体之间,有一个过渡区(即表面层),过渡区中的物质密度是连续变化的,由液体密度降低到气体密度。过渡区的宽度很薄,不会超过给定压力下的气体分子平均自由程,因为只要分子间的距离达到一定数值,物质就已经成为气相。

虽然过渡区的厚度很薄,但按照许多不同的条件,在理论上还是可以确定出分界表面在过渡区中的准确位置。分界表面一经确定,过渡区的一部分就看作是液相物质,另一部分看作是气相物质(见图 1-6),分界面两侧的全部液相和气相物质都可以作为均质来处理。在分界面上,均质液相和均质气相的热力学参数是不连续的。在整个气-液两相系统中,系统的总容积等于液相容积与气相容积之和,而其他非广延参数则必须在两部分之外再加上一个代表过渡区差别的修正值。用数学表达式来表示,为