

对流沸腾和凝结

J. E. 科利尔 著

487855

科学出版社

487855

TK12
07

1HK50/08

对流沸腾和凝结

J. G. 科利尔 著

魏先英 等 译

涂光协 校



科学出版社



C0457081

内 容 简 介

本书系统地介绍了对流沸腾和凝结的理论、计算以及试验研究。全书共分十二章。前三章叙述流动结构,基本流动模型及计算双相流动的压降与真实容积含汽量的经验方法。第四至九章介绍沸腾图在沸腾传热问题中的应用,详细研究了过冷沸腾的传热及压降与真实容积含汽量、饱和沸腾传热和临界热负荷。最后三章主要叙述凝结问题、改善沸腾和凝结传热表面特性的措施以及双成分的双相传热与传质。多数章节末尾附有例题和习题。

本书可供动力、制冷、加工工业及其它科学技术部门中从事有关对流沸腾和凝结方面工作的工程技术人员和科研人员参考,同时,也可用作大专院校有关专业的教学参考书。

参加本书翻译的还有:魏先导、许晋寿、陈振斌、周晓青、诸惠民等同志。

John G Collier

CONVECTIVE BOILING AND CONDENSATION

McGraw-Hill, Inc., 1972

对流沸腾和凝结

J. G. 科利尔 著

魏先英 等 译

涂光协 校

责任编辑 陈文芳 唐友群

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1982年1月第一版 开本: 850×1168 1/32

1982年1月第一次印刷 印张: 16 1/8

印数: 0001—2,200 字数: 426,000

统一书号: 13031·1780

本社书号: 2421·13—3

定价: 2.95 元

序 言

本书写作目的在于介绍对流沸腾和凝结领域的研究现状。对流沸腾(或凝结)是指存在着强制流动时的沸腾(或凝结)过程,而本书主要是探讨发生沸腾或凝结时导管中传热系数和压力损失的估算。

本书主要为了协助发电厂和加工工业中的设计工程师。他们面临解决涉及各种流体及混合物沸腾、凝结的困难的技术问题,常须在极有限的资料基础上设计设备。虽然双相流动文献非常丰富,但其中许多资料——如实验室报告和苏联文献——却很难得到。著者好些时以来感到有必要用逻辑方法确立一套基本原则,使尔后的研究工作能沿着正确的方向发展下去。目前,沸腾和凝结领域与其说是一门科学还不如说多半是一门技术,它仍然是,并在今后相当长的一段时间也将继续是实验性强的学科。因此,著者清醒地意识到:所介绍的某些资料不久将过时。希望再版时有机会修订这些内容。

书中的许多资料,曾首次用于塞耶工程学校、达特默思工程学院、新汉普希尔工程学院(1965, 1966, 1968)、加利福尼亚州的斯坦福大学(1967)所举办的关于双相流动和沸腾传热暑期班讲座的一系列讲稿中。这些课程是由沃利斯(G. B. Wallis)教授和著者共同讲授的。沃利斯教授已将他的一些资料发表在他的著作《一元双相流动》中。原讲稿中的资料已作了重新安排和重大修改。

绪论包括术语的定义和对流沸腾与凝结中遇到的流动结构的描述,第二、三两章叙述流体流动基本模型的发展和估算管道以及其它诸如弯头、阀、孔口等的压力损失与真实容积含汽量的经验方法。第四章介绍用“沸腾图”的新概念来解决沸腾传热问题,沸腾图能够清晰地描述对流沸腾的各种机理。这个概念贯穿在以后有

关沸腾的所有各章节之中。大容器沸腾问题在第四章中只慎重地作了简要的说明。熟悉该领域的读者将会理解对其充分叙述的难处；尽管进行了深入的研究工作，由于表征表面泡化特性的固有障碍，仍然难以得到一个全面的认识。第五章和第六章分别讨论了过冷沸腾的传热和流体动力学，以及因偏离热平衡而复杂化了的传热和流体动力学。第七章叙述预测饱和和对流沸腾下的传热系数。第八章和第九章详细讨论了沸腾图最重要的边界范围，其中包括对流沸腾时传热系数急剧恶化的条件——所谓“临界热负荷”条件。第十章讨论凝结问题。第十一章讨论改善沸腾和凝结传热表面特性的各种措施；该章后面部分讨论沸腾条件下传热表面的污垢问题及其对设备热力-水力性能的影响。第十二章讨论了双成分的双相传热和传质，虽然此问题不那么严格地与沸腾和凝结有关。

本书均采用国际制单位 SI，仅在压力单位例外地用巴(1 巴 = 10^5 牛顿/米²)。括号中均为英制工程单位。书中列有一些例题，以表明所推荐的各种方法的应用方式。书末附录刊有常用流体热力特性和传递特性表。

J. G. 科利尔

目 录

序言.....	i
第一章 绪论.....	1
1.1 目的	1
1.2 资料来源	2
1.3 单位	3
1.4 符号	5
1.5 分析方法	8
1.6 流动结构	9
参考文献	23
习题	25
第二章 基本模型.....	27
2.1 引言	27
2.2 双相流动基本方程	27
2.3 均相流动模型	32
2.4 分相流动模型	38
2.5 关于应用均相或分相流动模型的新关系式	56
2.6 外加热负荷对真实容积含汽量和压力梯度的影响	61
参考文献	62
例题	64
习题	73
第三章 双相流动的经验处理方法.....	75
3.1 引言	75
3.2 漂移流动模型	75
3.3 泡状流动	77
3.4 弹状流动	81
3.5 环状流动	82
3.6 环-雾状流动	95

3.7 大口径管子的切诺韦思和马丁关系式	96
3.8 通过扩口、缩口、孔口、弯头和阀门的压力损失	98
3.9 结论	112
参考文献	113
例题	117
习题	121
第四章 对流沸腾引论	123
4.1 引言	123
4.2 汽-液系统的热力学基础	123
4.3 沸腾的基本过程	126
4.4 大容器沸腾	137
4.5 对流沸腾	148
参考文献	154
例题	157
习题	158
第五章 过冷沸腾传热	160
5.1 引言	160
5.2 单相液体传热	160
5.3 过冷泡态沸腾的开始	163
5.4 部分过冷沸腾	172
5.5 稳定的过冷沸腾	178
参考文献	189
例题	191
习题	195
第六章 过冷沸腾的真实容积含汽量和压降	196
6.1 引言	196
6.2 过冷沸腾的真实容积含汽量	196
6.3 过冷沸腾的压降	210
参考文献	218
例题	220
习题	227
第七章 饱和沸腾传热	228
7.1 引言	228

7.2	圆管中的饱和强制对流沸腾	229
7.3	饱和泡态沸腾的消失	231
7.4	双相强制对流区	234
7.5	在超过临界热负荷的区域中的传热	246
	参考文献	261
	例题	265
	习题	268
第八章	强制对流流动中的临界热负荷——1. 垂直均匀受热管	269
8.1	引言	269
8.2	在承受均匀热负荷的圆导管中水的强制对流流动的临界热负荷	271
8.3	有关临界热负荷的一些重要的二阶效应	291
	参考文献	296
第九章	强制对流流动中的临界热负荷——2. 一些更复杂的情况	299
9.1	引言	299
9.2	非均匀加热圆管中的临界热负荷	299
9.3	非圆形几何结构中的临界热负荷	311
9.4	水以外的流体强制流动时的临界热负荷	321
9.5	通道入口处为液-汽混合物状况的临界热负荷	324
9.6	动态条件下的临界热负荷	326
9.7	临界热负荷工况的机理	328
	参考文献	335
	例题	340
	习题	344
第十章	凝结	346
10.1	引言	346
10.2	凝结的基本过程	346
10.3	在平的液-汽界面上蒸发和凝结的机理	349
10.4	平表面上的膜状凝结	362
10.5	界面剪切的影响	368
10.6	液态金属的凝结	382

10.7 滴状凝结	385
10.8 凝结系统中的压力梯度	388
参考文献	392
例题	397
习题	398
第十一章 影响沸腾和凝结系统性能的条件	399
11.1 引言	399
11.2 改善泡态沸腾过程中传热系数的方法	399
11.3 改善凝结过程中传热系数的方法	405
11.4 强制对流沸腾中影响临界热负荷的条件	409
11.5 热负荷为应变量时沸腾系统的设计	422
11.6 沸腾表面的结垢和腐蚀	424
参考文献	431
习题	436
第十二章 双成分双相传热	438
12.1 引言	438
12.2 双成分泡状流动中对液相的传热	438
12.3 双成分弹状流动中的传热	443
12.4 双成分环状流动中的传热	452
12.5 双相双成分流动中缺液工况的开始	463
12.6 横向流动中的双相双成分传热	464
参考文献	465
习题	466
附录	467
表 A.1 换算因子	467
表 A.2 水蒸汽的粘性系数	469
表 A.3 水蒸汽表	470
表 A.4 固体的热物性(金属)	472
表 A.5 某些常用低熔点金属的物性	474
表 A.6 饱和液体的热物性	475
表 A.7 大气压下气体的热物性	478
表 A.8 扩散系数	482
符号表	483

第一章 绪 论

1.1 目 的

在自然对流或强制对流条件下,水平或垂直导管中的沸腾和凝结,是一个非常重要的课题。水管锅炉、管式蒸馏器、冷冻设备、水冷核反应堆、蒸发器以及化学工程和发电厂的许多重要部件的设计,都依赖于对流沸腾和凝结时所发生的流体动力学与换热过程方面的知识。

对流沸腾定义为加热于流动的液体以使其产生蒸汽。因而此定义不包括仅因系统压力下降而产生蒸汽的闪蒸过程。然而,在许多应用中,这两个过程却是同时发生的,因而不能截然分开。凝结的定义正好相反,它指的是从系统取热而使蒸汽变为液体。

本书主要涉及单成分系统,即纯液体及其蒸汽。提供的很多资料是叙述水-蒸汽系统的。但是,在工业上还有许多其他重要的流体系统,它包括有机液体、低温液体(例如氧、氮等)及液态金属。多成分系统有重要的应用——尤其在化学工业过程中。但能够获得的关于多成分系统沸腾和凝结过程的有价值的公开文献资料非常少,因此,本书不拟对这一问题作任何探索。

本书主要目的是用严密的逻辑方式说明对流沸腾和凝结中的一些主要工程参数估算技巧的现状。一般说来,主要设计变量是在特定范围内的传热(或传质)速度和压力损失。获知那些会限制设备特殊部件性能的现象——如在水动力学、传热过程或流态方面的变化,常常是重要的。在沸腾和凝结中,水动力学和传热过程是紧密地联系在一起的。这种联系比单相流动中的联系要密切得多。对双相流动加热,或从双相流动中取热,都会引起各相数量和分布的变化,并引起流动结构或流动形状的变化。这些改变随即

引起局部传热过程的变化。因为流动的全部热力特性和水力特性都是连续变化的,所以,在通道中沿轴向任一点的状态,或在热力方面,或在水力方面,决不能达到稳定。以后在许多场合要反复指出这一事实。另外,由于局部状态不是一个平衡状态,这就要求知道考察点上游流动特性的变化资料,这一资料在确定偏离平衡状态的数值和方向上是需要的。下述情况增加了这些困难:一些状态牵涉到时间变化的特性,另一些状态牵涉到偏离热力平衡的程度,而人们又要着手获得这些正在被解决的问题的数值。

由于这些困难,有关对流沸腾与凝结的研究,至今多半是经验性的,而设计工程师面临大量参考文献,必须仔细琢磨和决定取舍。希望本书对这一方面的各种实际应用能提供一定的基本知识。此外,针对待解决的设计问题选择已发表的最适用的特定处理方法,需要熟练的技巧,以及对问题的深刻理解。很多这样的处理方法只能用于有限范围,不允许超越范围使用。在这方面,本书也将提供在著者直接经验基础上得出的一些指导原则。

本书对沸腾的某些方面将不论述,主要省略了大容器(或自然对流)沸腾、闪蒸、临界流动以及沸腾与凝结系统的稳定性和瞬态特性等部分。之所以省略这些领域,不是因为它们和本书要解决的问题无直接联系,而是因为目前对它们的研究,还不容许作出可以普遍接受的系统论述。

1.2 资 料 来 源

从十九世纪起,就已进行对流沸腾与凝结问题的考察了,但是,直到第二次世界大战后,由于核技术与火箭技术的出现,这个领域的研究才取得了重大进展。由古斯(Gouse)^[1]首次发表、尔后被引用的一个曲线图,提供了关于沸腾和双相流动文章及报告的逐年累计数。该图指出,可利用的文献数目随时间按指数形式增加。到1940年左右,所发表的文章便成倍地增长,而到1970年,发表的文献总数估计已达10,000篇。尽管大多数发达国家的

许多研究工作者作出了很大的努力,但是,对通道内流动的沸腾力学仍然缺乏深刻理解。

工程师在接触上述大量资料时,就需要某些指导。幸好,古斯^[2,3]和凯普尔 (Kepple)、滕 (Tung)^[4] 提供了很有参考价值的文献索引。这些索引将文献详细地进行了分类。有时也对文献作一些摘要,但是没有指出它们的用处或使用范围。

对整个领域或其中一部分进行一番评述,对力图进入该领域的工程师是很有价值的。本书目的之一就在于进行这样的评述。

其实,在官方和私人试验研究部门的报告中,关于沸腾和双相流动的资料反而比在学会杂志上公开发表的多。而这些报告的分发范围和获得的可能性都是有限的,但这并不妨碍其应用,因为,著者可自由地运用这些资料。

1.3 单 位

本书决定采用国际制单位 (SI)。国际制的基本单位是:

长度 1 米 L

质量 1 千克 M

时间 1 秒 T

力的单位是牛顿,即施加于 1 千克质量并使其产生每秒每秒 1 米加速度的力。

对本书中的方程式可采用任何基于长度、质量和时间的统一单位制。这样,读者得以按习惯使用英尺-磅-秒 (FPS) 制。这种单位制的基本单位是:

长度 1 英尺 L

质量 1 磅 M

时间 1 秒 T

力的单位是磅达,即施加于 1 磅质量并使其产生每秒每秒 1 英尺加速度的力。

在美国的工程领域中还采用一个附加单位,即磅力。这就是

施加于 1 磅质量并使其产生加速度 g (32.2 英尺/秒²)的力。由此，磅力和磅达的关系是

$$1 \text{ 磅力} = 32.2 \text{ 磅达} = 32.2 \left[\frac{(\text{质量磅})(\text{英尺})}{(\text{秒})^2} \right]$$

这个关系式中的常数 (32.2) 经常用 g_c 或 g_o 表示。本书只用质量、长度和时间单位，而重力加速度仅在地球引力场中做功时才涉及到。全书将 FPS 制单位的量都置于括号内。

SI 制的温度单位是摄氏度，通称开氏 (Kelvin) 度，而 FPS 制中是华氏度。SI 制的热量单位是瓦-秒(或焦耳)。一般，热能和机械能必须通过热功当量(J)联系起来。即

$$J \times \text{热能} = \text{机械能}$$

在 SI 制中，热量和功的单位正巧一样，于是 J 等于 1。在 FPS 制中，热量单位是英热单位 (Btu)， J 等于 2.4×10^4 英尺·磅达/磅·°F。

有时，英制时间单位用小时代替秒 (FPH 制)。在这种情况下

$$1 \text{ 磅力} = 4.173 \times 10^8 \left[\frac{(\text{质量磅})(\text{英尺})}{(\text{时})^2} \right]$$

表 1.1 单位

度量	因次	SI	FPS	换 算
质量	M	1 公斤	1 磅	1 磅=0.45359 公斤
长度	L	1 米	1 英尺	1 英尺=0.3048 米
时间	T	1 秒	1 秒	
力	$\frac{ML}{T^2}$	1 牛顿	1 磅达	1 磅达=0.1382 牛顿
温度	θ	1 °C	1 °F	1 °F = 0.555°C
热	$M\theta$	1 焦耳	1 英热单位	1 英热单位=1055.1 焦耳

SI 制的压力单位是牛顿/米²。这是一个颇小的量，故本书全部用巴代替，

$$1 \text{ 巴} = 10^5 \text{ 牛顿/米}^2$$

1.4 符 号

在书的开头已给出全部符号*。这一节介绍全书所用主要变量，并对一元流动导出它们之间的某些简单关系式。

为了区分气相和液相，用下标“g”表示气体，而“f”表示液体。下标“g”照例表示饱和蒸汽相中的参数。选用“f”而不用“l”是为了与水蒸汽表和其他热力特性表的习惯用法一致。下标“fg”表示在某特定条件下(一般为饱和温度下)气体(或蒸汽)与液体物性参数之差。

考察一个具有双相并流的通道。流动是一元的，即在流动的法线方向上，系统物性没有变化。通道流通面积用符号 A 表示，气相和液相流通面积分别用 A_g 和 A_f 表示。气相流通面积与总流通面积之比称为真实容积含汽量，以 α 表示

$$\alpha = \frac{A_g}{A}, (1 - \alpha) = \frac{A_f}{A} \quad (1.1)$$

质量流量用符号 W 表示，它等于各分相流量 W_f 与 W_g 之和。各分相流速用符号 u 表示。容积流量以符号 Q 表示，它等于各分相容积流量 Q_f 与 Q_g 之和。在沸腾与凝结中，采用由汽相或液相组成的对总质量流量的比值常常很方便。这就是蒸汽干度 x ，其定义是

$$x = \frac{W_g}{W_g + W_f}, (1 - x) = \frac{W_f}{W_g + W_f} \quad (1.2)$$

质量流量被流通面积除就得到所谓“质量速度”，并用符号 G 表示。于是，

* 符号表已移至书末。——译者注

$$G = \frac{W}{A} = \rho u = \frac{u}{v} \quad (1.3)$$

$$W_g = GAx, \quad W_f = GA(1 - x) \quad (1.4)$$

$$u_g = \frac{W_g}{\rho_g A_g}, \quad u_f = \frac{W_f}{\rho_f A_f} \quad (1.5)$$

$$u_g = \frac{Q_g}{A_g}, \quad u_f = \frac{Q_f}{A_f} \quad (1.6)$$

或

$$u_g = \frac{Gx}{\rho_g \alpha}, \quad u_f = \frac{G(1 - x)}{\rho_f (1 - \alpha)} \quad (1.7)$$

有时必需采用由蒸汽或液体组成的对总容积流量的比值。这就是容积干度 β ，其定义是

$$\beta = \frac{Q_g}{Q_g + Q_f}, \quad (1 - \beta) = \frac{Q_f}{Q_g + Q_f} \quad (1.8)$$

容积流量被流通截面积除就得到所谓“容积流速”（或称“折合速度”），用符号 j 表示。

于是

$$j = \frac{Q}{A}, \quad j_g = \frac{Q_g}{A}, \quad j_f = \frac{Q_f}{A} \quad (1.9)$$

或由方程(1.1)和(1.6)，

$$j_g = u_g \alpha = j \beta = \frac{Gx}{\rho_g} \quad (1.10)$$

$$j_f = u_f (1 - \alpha) = j(1 - \beta) = \frac{G(1 - x)}{\rho_f}$$

$$G_g = j_g \rho_g = Gx, \quad G_f = j_f \rho_f = G(1 - x) \quad (1.11)$$

$$G = G_g + G_f$$

在以后的章节中要用到的一个关系式，是用蒸汽干度和真实容积含汽量表示的气相速度与液相速度之比（所谓“滑动比”）。

即是

$$\frac{u_g}{u_f} = \frac{W_g \rho_f A_f}{W_f \rho_g A_g} = \left(\frac{x}{1 - x} \right) \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right) \left(\frac{1 - \alpha}{\alpha} \right) \quad (1.12)$$

因已用 x 表示蒸汽干度, 所以坐标符号的选择就受到限制. 拟用 z 表示沿管道轴线流动方向的坐标, 而 r 表示至管轴线的径向距离. y 只限于表示从边界面——如表面或分界面——量度的距离.

静压沿流动方向的变化率以 (dp/dz) 表示. 该量的正值表明沿轴线方向压力升高. 工程师们接触的主要课题是位置变化引起的压力损失, 此损失以符号 Δp 表示. 于是

$$\Delta p = - \int_1^2 \left(\frac{dp}{dz} \right) dz \quad (1.13)$$

在传热情况下, 用符号 ϕ 表示“热负荷”, 即单位时间内通过单位表面积的热量. 符号 T 加上相应的下标表示各种温度, 如壁面用下标 w , 液体用 f , 蒸汽用 g 等. 大多数热力物性表常惯于采用“ h ”表示焓. 本书则用“ i ”表示焓, 以免与传热系数的符号“ h ”混淆. 蒸汽和液体在某一特定压力下并存的热力平衡温度叫饱和温度 (T_{SAT}). 相应的压力是饱和压力 (P_{SAT}). 饱和温度下液体和蒸汽的焓分别用 i_f 和 i_g 表示. 此两值之差数是汽化潜热, 并按惯例用符号 i_{fg} 表示. 如果液相和汽相都处于热力平衡, 即处于饱和温度下, 那么, 对蒸汽干度 x 可给出另一基于热力特性的定义. 即

$$x = \frac{i - i_f}{i_{fg}} \quad (1.14)$$

仅当热力平衡时, 由方程 (1.2) 和 (1.14) 得出的 x 值才相等.

在沸腾和凝结系统中, 以饱和温度为基准, 其它系统温度都参照此基准, 是很方便的. 工质温度高于饱和温度时, 我们说相对于饱和温度是“过热的”, 与基准的温差用符号 ΔT_{SAT} 表示. 工质温度低于饱和温度时, 我们说相对于饱和温度是“过冷的”, 与基准的温差用符号 ΔT_{SUB} 表示. 于是,

$$T - T_{SAT} = \Delta T_{SAT} \quad (1.15)$$

$$T_{SAT} - T = \Delta T_{SUB} \quad (1.16)$$

某些符号不可避免地会重复, 当出现这种情况时, 希望能使其含义

明确。每一新符号在引入时都有定义，而对此定义的注解亦在符号汇总里给出。

1.5 分析方法

分析双相流动的方法是在单相流动中业已充分使用过的那些方法的延伸。其处理方式往往是应用质量守恒、动量守恒和能量守恒等基本方程，并采取一元流动形式，引进各种简化性假设以求解这些方程。有三种主要假设，即：

1. “均相”流动模型。此模型解决问题最简单，将双相流动假定为具有假想物性的单相流动，此假想物性是适当斟酌各单相物性而得到的。

2. “分相”流动模型。此模型是将双相流动人为地分开来进行考察。这样，便能写出分别针对每一相的两组基本方程。此外，还可将方程联立。在任何一种情况下，都必须提供每一相所占有的截面积（或每一相的流速），以及与通道壁面的摩擦作用的资料。对前者，另外还要求相之间摩擦作用的资料。这种资料，或通过各别的经验公式——其中真实容积含汽量和壁剪应力系用主要变量表示，或基于简化的流动模型，而被引入基本方程。

3. 多种“流动结构”模型。在这种更为复杂的方法中，双相流动是置于三或四种既定几何图形中的一种来考虑的。这些几何图形，乃基于当气体和液体一起在通道中流动时所得到的各种流动形态或流动结构。各基本方程都是在这种理想化了的代表性模型的框框内解出的。为了使用这种模型，就要知道应该采用哪一种流动结构，并要能够预测流动结构的转变。

最后一种模型^[5]目前尚处于发展初期，下面各章介绍的大部分资料只以前两种模型作为基础。但可预料，在最近几年内多种流动结构模型一定会得到更大的发展，同时，为了使工程师必将面临的更复杂的设计计算变得容易，必须应用电子计算机。