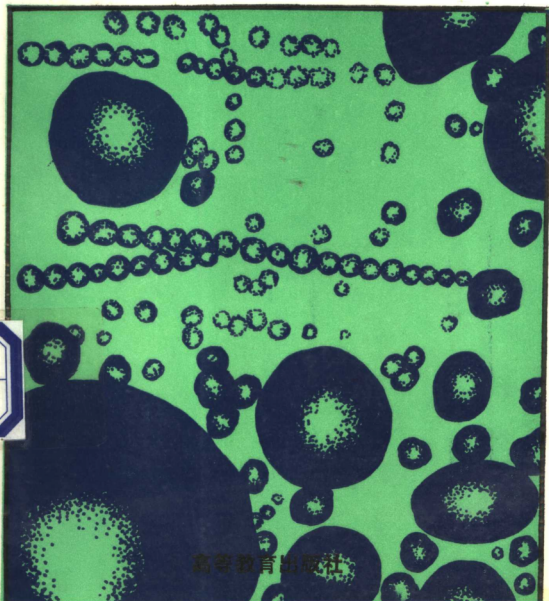


沸腾和凝结

Boiling and Condensation Heat Transfer

施明恒 甘永平 马重芳 编著

王补宣 审校



高等教育出版社

352517



000003 525173

15.10

ISBN 7-04-01298-3/TH·313

定价 15.10 元

(京)112号

内 容 简 介

本书是作者在总结多年教学和科研工作的基础上写成的。书中系统地整理、分析、综合了国内外沸腾和凝结的有关资料和研究成果,对沸腾和凝结的基本概念、基本理论进行了比较系统的分析和讨论,指出了沸腾和凝结尚存在的问题及其发展方向,是关于沸腾和凝结的一本专著,对今后深入开展沸腾和凝结研究具有指导意义。

全书共九章。第一章介绍了沸腾和凝结的发展历史和研究方法。第二至五章系统介绍了沸腾的基本理论。第六至八章系统介绍了凝结换热的有关理论。第九章介绍了沸腾和凝结的最基本的强化技术。全书着重基本概念,基本理论的阐述,并力求内容系统和完整,语言通俗易懂。

本书可作为热能工程、工程热物理等热工类有关专业的大学生、研究生的教学参考书,也可供从事沸腾和凝结研究的科技工作者参考。

沸 腾 和 凝 结

施明恒 甘永平 马重芳 编著
王补宣 审校

*

高等教育出版社出版

新华书店总店科技发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 12.875 字数 310 000

1995 年 6 月第 1 版 1995 年 6 月第 1 次印刷

印数 0001—1 043

ISBN 7-04-004298-3/TH·343

定价 15.10 元

沸腾和凝结

施明恒 甘永平 马重芳 编著

王补宣 审校

高等教育出版社

前 言

沸腾和凝结换热是本世纪中叶以来国际上传热学科中发展最迅速的分支学科之一。这是因为，沸腾和凝结不仅与常规的动力、冶金、石油、化工、机械、轻工、制冷和低温技术等有密切联系，而且对诸如宇航、火箭技术、核反应堆、超导和新能源等现代新技术的发展也有举足轻重的影响。

在沸腾和凝结领域已进行了广泛深入的研究，发表了大量科技论文和研究报告，并出版了一些有价值的学术著作。但是，由于沸腾和凝结现象的复杂性和多变性，以及它们在一定程度上随机行为，使得沸腾和凝结无论在基本理论上还是在实验技术上，都还没有像常规的导热、单相对流和热辐射那样成熟。总的来说，沸腾和凝结的研究仍处于发展阶段，有些问题，例如加热表面对核态沸腾的影响、汽泡的相互作用、热滞后、珠状凝结机理以及沸腾和凝结的瞬态过程等还将经历相当艰难的研究历程。因此，总结和概括现有的研究工作，对沸腾和凝结的基本概念、基本规律进行比较系统的分析和讨论，指出存在的问题和今后的发展方向，以促进沸腾和凝结研究工作的深入发展，是编写本书的主要目的。

本书是一本介绍沸腾和凝结的专门著作，既可作为热能工程和工程热物理等热工类有关专业的本科高年级学生和研究生使用的传热学和高等传热学的教学参考书，也可作为从事传热研究，特别是从事沸腾和凝结研究的科技工作者了解研究动态、掌握基本概念和分析方法、学习现有设计和计算方法、查找有关实验数据的参考书。

全书共九章。第一章比较系统地概述沸腾和凝结的发展历程和研究方法。第二到第五章着重介绍沸腾的基本理论和沸腾的三种主要形态:核态沸腾、膜态沸腾和过渡沸腾的物理机制。第六到第八章叙述凝结换热的基本概念,并对两类基本凝结过程——膜状凝结和珠状凝结作系统的阐述。第九章着重介绍沸腾和凝结换热最基本的强化技术及其原理,并分析它们在工程上的适用性。

本书主要内容取材于作者多年来为研究生开设的相变换热课的讲稿,书中比较系统地搜集、综合了国内外的有关资料和研究成果,其中也包括作者和同事们诸多的研究成果和教学心得。全书着重基本概念的叙述,力求内容系统和完整,语言简炼。但是,由于沸腾和凝结领域的复杂性和多样性,加之作者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,衷心希望读者批评指正。

在本书出版之际,我们衷心感谢所有为本书提供资料、图表和数据的文献作者,没有他们的辛勤劳动和创造性的工作,本书是无法写成的;衷心感谢清华大学王补宣教授,他对本书的写作给予了热情的支持和帮助,在百忙之中对全书作了细致的审校;作者还要感谢有关的同事和研究生们,没有他们的合作和帮助,本书的出版也是不可能的。

作 者

1992年8月

主要符号表

A	面积, m^2 ; 常数; 参数
Ar	阿基米德(Archimedes)准则
a	热扩散率, m^2/s ; 常数
B, b	常数; 参数
C, c	常数; 参数
C_D	阻力系数
C_s	汽泡长大系数
C_{mf}	系数
Co	凝结准则
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$
D, d	直径, m
D	扩散系数, m^2/s ; 直径, m
D_d	汽泡脱离直径, m
D_H	通道水力直径, m
E	蒸汽夹带速率, kg/m^2 ; 系数; 汽化准则
E_D	液体中一个分子扩散所需的活化能, J
EO	脱离直径准则
F	力, N ; 陈氏公式中的系数; 常数
f	参数
G	质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Gr	格拉晓夫(Grashof)准则
g	重力加速度, m/s^2
H, h	高度, m

h_{ig}	汽化潜热, J/kg
i	焓, J/kg
j	j 因子
Ja	雅各布(Jakob)准则
J	临界汽泡核心形成速率, $m^{-3} \cdot s^{-1}$
k	玻尔兹曼(Boltzmann)常数; 系数
L	定性尺度; 长度, m
M	相对分子质量; 质量, kg
$\dot{M}$	质量流量, kg/s
m	沉积速率, kg/m^2 ;
m	液膜中质量流量, kg/s; 指数; 质量, kg
N	单位面积上的活化凹坑数, m^{-2}
N_s	壁面上活化凹坑(液滴)分布密度
Nu	努谢尔特(Nusselt)准则
n	指数; 汽泡密度, m^{-2} ; 管排数
p	压力, Pa
P	湿周, m
Pr	普朗特(Prandtl)准则
Q	热量, J
q	热流密度, W/m^2
R, d	半径, m; 气体常数
$\dot{R}$	汽泡成长速率, m/s
Re	雷诺(Reynolds)准则
S	系数
Sc	施密特(Schmidt)准则
St	斯坦顿(Stanton)准则
T	热力学温度, K

t	摄氏温度, °C
u, U	速度, m/s
V	容积, m ³
v	比容, m ³ /kg
W	浓度
w	流量, m ³ /s; 蒸发速率, kg/s; 无量纲浓度
We	韦伯(Weber)准则
$\dot{X}$	参数
x	干度
y	汽泡高度, 尺度, m; 浓度
α	换热系数, W/(m ² ·°C); 空隙率; 蒸发系数
β	锥形凹坑夹角, 系数
δ	厚度
ε	黑度; 参数; 修正系数; 湍流热扩散系数; 湍流粘度
η	系数; 无量纲变量
θ	接触角; 无量纲温度
λ	导热系数, W/(m·°C); 波长, m
μ	动力粘度, kg/(m·s)
ν	运动粘度, m ² /s
ξ	修正系数; 参数; 无量纲变量
ρ	密度, kg/m ³
τ	时间, s; 切应力
ϕ, φ	系数; 一个汽化中心上的热流密度, W/m ² ; 夹角
σ	表面张力, N/m; 辐射常数, W/(m ² ·K ⁴)
Ω	参数
Π_K	无量纲准则
ψ	流函数

目 录

主要符号表	1
第一章 绪论	1
§ 1-1 研究对象和研究方法	1
§ 1-2 发展简史和现状	3
第二章 沸腾的基本理论	6
§ 2-1 沸腾工况	6
§ 2-2 成核理论	8
§ 2-3 汽泡动力学	21
第三章 池内沸腾	55
§ 3-1 池内核态沸腾换热	55
§ 3-2 临界热流密度	87
§ 3-3 池内膜态沸腾换热	102
§ 3-4 池内过渡沸腾换热	119
第四章 流动沸腾	137
§ 4-1 流型与沸腾工况	137
§ 4-2 流动过冷沸腾	141
§ 4-3 流动饱和沸腾	155
§ 4-4 流动沸腾临界现象	166
§ 4-5 流动膜态沸腾	183
第五章 沸腾换热的专门问题	202
§ 5-1 液态金属的沸腾换热	202
§ 5-2 低温液体的沸腾换热	212
§ 5-3 多组分混合液的沸腾换热	230

第六章 凝结的基本概念	242
§ 6-1 凝结现象.....	242
§ 6-2 凝结成核理论.....	244
§ 6-3 汽液分界面现象.....	251
§ 6-4 在液滴表面上的凝结.....	255
第七章 膜状凝结	258
§ 7-1 竖壁上的膜状凝结.....	258
§ 7-2 水平管外的膜状凝结.....	274
§ 7-3 竖直管内的流动膜状凝结.....	280
§ 7-4 水平管内流动膜状凝结.....	282
§ 7-5 蒸气混合物的膜状凝结.....	289
第八章 珠状凝结	303
§ 8-1 珠状凝结的机理.....	304
§ 8-2 珠状凝结换热.....	310
§ 8-3 珠状凝结促进剂.....	321
第九章 沸腾和凝结的强化	324
§ 9-1 沸腾换热的强化.....	325
§ 9-2 凝结换热的强化.....	348
参考文献	363

第一章 绪 论

§ 1-1 研究对象和研究方法

液体沸腾和蒸气凝结都是伴有相变的对流传热传质过程，其换热特性与无相变的对流换热过程有明显差别。在经历了几十年的研究和发展之后，沸腾和凝结已成为传热传质学科中的一个重要分支。特别是近 30 年来，随着蒸汽动力工程向高温高压、大容量机组方向的发展，核动力在常规动力中所占比例的不断增长，火箭发动机和各种高热负荷壁面冷却的需求，以及石油、化工、食品和低温工程等领域内各类新型蒸发器、凝汽器和相变换热器的出现，都促进了沸腾和凝结领域研究工作的蓬勃发展，至今仍是国际上传热传质研究工作者最热衷的重要研究方向之一。

沸腾和凝结研究的特色是它们的工程性和实用性，绝大部分研究课题出自工程实践的发展需要，沸腾临界热流密度问题便是一个典型的例证。研究经费的很大部分来自企业界，特别是核动力方面。这使得该研究领域与工业界的结合特别紧密，得到了工业界的广泛支持与合作。

沸腾与凝结着重研究在一定的传热温差下出现流体相变过程的基本规律，寻求发生相变后换热强化的物理机制和换热过程的定量计算方法。由于这种相变对流换热过程涉及到热力学、传热学和复杂的两相流体动力学，过程的变量很多，因此使沸腾和凝结过程，特别是流动沸腾和流动凝结过程变得错综复杂。此外，由于表面状况的不确定性以及壁面附近液体或蒸气的湍流特性，常常

使得定量的纯解析研究无法进行,且沸腾换热更甚。因此,沸腾和凝结的研究方法仍以实验研究为主。根据对现象本质的理解,提出过程发展的物理模型和数学模型,把局部的非稳态过程代之以整体的稳态过程,通过分析,并由实验确定经验常数,建立起半经验半理论的计算公式,是目前进行沸腾和凝结研究的主要途径。此外,为了减少研究工作的复杂性,常常把各种影响因素孤立起来进行分析和实验,以弄清它们各自对过程发展的影响和作用机制。

与解决其他物理和工程问题一样,在研究沸腾和凝结现象时,也需要对过程作出适当的假定和理想化处理,保留现象的主要方面,忽略其次要方面。当然,通过一定简化后得出的最终结果必须通过实验进行检验。由此得到的各种计算关系式或准则公式都必须在其规定的条件和参数范围内使用,尤其是各种纯经验公式,更应特别注意其适用范围。

近年来,由于测试技术的发展和计算机的广泛采用,沸腾和凝结过程已开始用计算机进行模拟和数值计算,例如已可用计算机模拟珠状凝结的进程。可以预料,计算技术和精密测试技术相结合,将会使沸腾和凝结的研究开创新的局面。

对核动力装置来说,设备的可靠性是至关重要的。因此,在研究核动力装置内的沸腾换热过程时,常常需要建造工业规模的大型试验装置,甚至是全尺寸的热工-水力试验装置,以获得设计和运行的关键数据。这种研究方法在研究其他换热问题时很少采用。

总之,沸腾和凝结现象的复杂性、不确定性及其工程性,带来了研究方法上的相应特殊性。当然,为了最终弄清沸腾和凝结的机理以及过程的内在演变规律,人们自然还需要探索新的可行的研究方法和测试技术。

§ 1-2 发展简史和现状

液体沸腾和蒸气凝结是日常生活中早已为人们所熟知的物理现象。人们很早就学会了蒸煮食物的方法。公元 300 年,阿基米德提出了利用水的沸腾建造蒸汽船的设计。1678 年我国进行了用蒸汽推动车船的试验。1784 年,瓦特改进了蒸汽机,引起了工业革命,使水的沸腾从民用走向大规模的工业应用。蒸汽凝结总是与沸腾在工业应用中同时并存的。在工业革命的推动下,促进了 18 世纪自然科学的蓬勃发展。

沸腾换热最早的科学研究可追溯到 1756 年。当时,法国科学家莱登夫罗斯特 (Leidenfrost)^[1] 在相变换热的科学史上首次进行了一个非常出色的实验。他把水滴置于高温金属板上,发现水滴完全呈球状而不润湿金属表面,且水滴在高温金属板上完全蒸发的时间反而比水滴在较低温度的金属板上所需的时间长。这个实验被认为是沸腾换热发展的一个里程碑。人们为了纪念他,把他发现的这一现象称为莱登夫罗斯特现象。之后,对这一现象作了一系列的解释。1804 年伦福特 (Rumford) 认为,这一现象是由于水滴与金属板之间存在着一层导热性能很差的空气层而引起的。1841 年经过测量,波根道夫 (Poggendorff) 发现,水滴与高温金属壁面之间是电绝缘的。1843 年,玻汀 (Boutigng) 首次提出了水滴处于“球化”状态 (Spheroidal state) 的概念。此后几十年,沸腾换热的研究没有取得实质性的进展,其间只有过一些零星的实验研究。例如: 1924 年肯立克 (Kenrick)^[2] 等观察了毛细管内水的沸腾过热现象; 1926 年莫斯克 (Moscicki)^[3] 等对浸泡在水中的电加热丝上的沸腾进行了实验。直到 1931 年,著名的传热学先驱雅各布 (Jakob)^[4,5] 才开始了对沸腾换热的系统研究。他利用高速摄影技术研究了加热面上汽泡的生成、成长和脱离的规律。1934

年,拔山四郎(Nakiyama)^[6]利用浸泡在水中的加热铂丝,第一次获得了完整的沸腾曲线。根据沸腾曲线的形状,整个沸腾过程可以划分为核态沸腾、过渡沸腾和膜态沸腾等三种不同的换热工况。此后,沸腾换热的研究进入了一个崭新的发展时期。与此同时,贝克(Becker)^[7]和伏尔姆(Volmer)^[8]等人开始利用经典热力学理论研究过热液体中气泡的生成过程,并逐步形成了经典的均相成核理论^[9]。从1930年到1950年的20年中,主要研究工作集中在池内沸腾方面,着重研究池内核态沸腾的机理和影响因素。从1940年开始,由于石油工业的发展,两相流动的研究逐步开展起来。1948年,马蒂内里(Matinelli)^[10]等提出了两相流压力降的计算方法,从此出现了流动沸腾的研究。

沸腾换热研究史上另一个重要进展是1950年前苏联的库塔捷拉泽(Kutateladze)^[11,12]关于临界现象的研究工作。他首次成功地利用流体动力学的理论研究了沸腾临界热流密度问题,从而推动了沸腾换热的理论研究工作。50年代到60年代中期是沸腾换热研究中的百花齐放时期。在这段时间内,出现了大量的各种各样的沸腾换热机理模型,而且在各国的实验室里进行了大量的实验研究。但是,由于沸腾过程的复杂性,许多问题仍然未能得到完全解决,例如:对于液体在加热面上发生核态沸腾换热的机理还没有一个被普遍接受的统一说法;加热表面状况的影响机制还无法用一个参数来定量地描述;气泡之间的相互作用还缺乏深入研究。60年代中期以后,虽然研究工作仍在继续进行,但在沸腾机理方面仍然未有突破性的进展。从70年代开始,由于动力工业的发展,特别是核动力的发展,推动了两相流和流动沸腾换热的研究工作。目前,沸腾换热的研究已成为传热学科中最活跃的一个分支。

当前,沸腾换热研究的重点有二个方面。一是深入研究各种主要因素对沸腾换热的影响,特别是如加热表面特性的影响以及

汽泡之间相互作用的机制。由于低温液体具有良好的润湿壁面的特性,有可能会对沸腾机理的研究带来新的生机。二是研究各种特殊条件下的沸腾过程,例如:在真空、弱重力场、加速度场和电磁场作用下的沸腾换热;多孔介质中的沸腾换热;薄液膜中的沸腾换热;瞬态过程中的沸腾换热;低温液体、液态金属和多组分混合液中的沸腾换热,等等。从实用的角度看,应着重研究沸腾换热的强化机理、强化技术以及解决与工业应用有关的新问题,如两相流系统的稳定性和安全性的分析和预测等。

与沸腾换热研究相比,凝结方面的研究显得不够活跃,进展较慢。自从1916年努谢尔特^[13]对纯蒸气在竖壁上膜状凝结进行分析以来,其理论长期主宰着凝结领域,其后的研究工作大都是对努谢尔特所作的一系列假设进行修正。由于工程上遇到的凝结过程绝大部分是膜状凝结,努谢尔特理论解又大致能符合实际情况,凝结换热的强度已足够高,所以对膜状凝结的进一步深入研究并没有像沸腾那样引起很大的兴趣。

凝结换热研究中的一个重要事件,是1930年施密特等^[14]首次发现了比膜状凝结换热强度更高的珠状凝结现象。尽管许多人在以后很长的一段时间内致力于珠状凝结机理及其工业应用的研究,且在实验室内可以维持上万小时的珠状凝结过程,但迄今为止,珠状凝结仍然没有得到工业上的具体应用。究其原因,还是由于对维持珠状凝结的机理没有彻底弄清楚。

因此,从凝结换热的现状看,除了继续深入对各种复杂形状和强化表面上的膜状凝结开展研究工作以外,研究的重点似应放在珠状凝结的机理和实现方法上面。

综上所述,由于沸腾和凝结在工程上的重要性以及现象本身的复杂性,在今后相当长的时期内,沸腾和凝结仍将是传热传质学科中重要的,也是最活跃的研究领域之一。

第二章 沸腾的基本理论

液体内部产生汽泡的剧烈汽化过程称为沸腾。按照热力学理论,只要液体内部的温度等于或高于对应压力下液体的饱和温度,该处液体就会发生相变,并可能产生沸腾现象。实际上,液体的沸腾是与外部条件有关的。当不存在外部提供的汽化核心时,液体的沸腾只可能发生在高过热条件下或者压力突然下降时,这将在下面进行分析。

液体的沸腾可以分成两大类。一类直接发生在液体容积内部,且不存在固体加热壁面,称为容积沸腾或均相沸腾(homogeneous boiling)。另一类发生在与液体相接触的加热面上,称为表面沸腾或非均相沸腾(heterogeneous boiling)。后者是工程上和日常生活中最常遇到的和最有实用价值的一种沸腾类型,也是本书研究的重点。

非均相沸腾时,按液体的流动状态,又可分为池内沸腾(pool boiling)和流动沸腾(flow boiling)两类。前者发生在液体处于大容器中,且无外力使其发生定向流动时;后者发生在液体通过管道作定向运动时。这两类沸腾过程在工程上都有重要用途。

本章将着重讨论液体非均相沸腾时的一些基本理论。为了理论上的完整性、系统性以及分析简单,一些最基本的讨论,如成核理论、汽泡动力学等,是从液体均相沸腾开始的。

§ 2-1 沸 腾 工 况

无论是池内沸腾还是流动沸腾,液体沸腾时都存在三种不同