

沸腾换热

林瑞泰 编著

科学出版社

沸 腾 换 热

林瑞泰 编著

科 学 出 版 社

内 容 简 介

沸腾换热是五十年代以来迅速发展起来的一门涉及多种学科的传热学分支,它已在许多工业部门得到了广泛的应用,是现代各国学者十分关注并大力研究的课题之一。

本书较详细地阐述了沸腾换热的基本概念、理论及换热规律,介绍了沸腾换热的模型及计算公式。主要内容包括:汽泡的成核理论;汽泡动力学;大空间泡态沸腾换热、临界热负荷、膜态沸腾;两相流流动特性;流动沸腾换热;沸腾换热的强化。

本书资料丰富,系统性强,理论联系实际,比较充分地反映了沸腾换热的最新研究成果。可供工程热物理、动力、化工、制冷等工业部门的科研人员和工程技术人员阅读,也可供高等院校有关专业的大学生、研究生和教师参考。

沸 腾 换 热

林瑞泰 编著

责任编辑 陈文芳 唐正必

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

1988 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1988 年 9 月第一次印刷 印张: 14 1/4

印数: 0001—1,520 字数: 375,000

ISBN 7-03-000443-4/TB·17

定价: 9.00 元

前 言

半个世纪以来,各国学者十分重视沸腾换热的研究与开发,进行了大量的实验研究和理论分析,发表了许多论文和报告,积累了众多的数据和资料。现在,无论在能源、动力、化工、制冷、机械加工、材料等工业部门中,还是在航天、火箭、核能等技术领域中,沸腾换热都得到了广泛的应用。

但是,由于沸腾现象的多变性与复杂性,它无论在理论上还是在方法上,都尚处于发展阶段,而且在今后相当长的时期内,将继续是一个充满不同见解、实验性强、带有经验色彩的学术领域。六十年代以来,国内外出版了一些具有不同观点和特色的沸腾换热方面的专著,其中有些对沸腾换热的研究和应用起了一定的积极作用。本书则试图从基本概念、基本理论和基本方法上,对沸腾换热过程的各种原理、模型、公式及实验研究结果加以概括和分析,以期更好地继承、利用与发展沸腾换热的研究成果。

本书第一章概括地介绍沸腾换热的由来与发展,沸腾曲线、沸腾换热分类及其研究方法。第二章至第六章介绍大空间沸腾换热的各种过程、工况及其特性:汽泡成核理论,汽泡动力学,大空间泡态沸腾换热机理及关联式,大空间沸腾临界热流密度,大空间膜态沸腾。这几章中所研究的问题排除了流动因素的影响,主要是对液体在加热壁面上的纯沸腾过程进行较深入、细致的考察,因此为进一步研究和解决各种实际沸腾过程奠定了基础。第七、八两章简要地阐述了流动沸腾的基本过程和处理方法。第九章对强化沸腾换热的机理与技术进行了扼要的论述。按照国家规定,本书使用1984年2月27日国务院颁布的法定计量单位。全书以介绍基本概念、基本理论、基本方法为主,把学术讨论与工程应用结合起来,尽可能地反映最新研究与应用成果,力求内容完整、系统、深刻,融汇贯通。语言尽量简练易懂,使从事沸腾换热研究和应用的不同知识层次的人都能理解。

本书是根据作者为研究生讲课的教材编写而成的，全书经过程尚模教授的精心审阅。天津大学热物理工程系、热能研究所的领导同事们给予作者很大的关心和鼓励。在此，作者一并向他们表示衷心的感谢。书中错误与不妥之处，恳请读者批评指正。

作 者

目 录

前言	i
第一章 绪论	1
§ 1-1 沸腾换热的由来与发展	1
§ 1-2 沸腾换热的分类	2
§ 1-3 沸腾换热曲线	5
§ 1-4 沸腾换热的研究内容、方法及应用领域	11
第二章 气泡的形成与核化理论	14
§ 2-1 均质沸腾中气泡成核分析	14
§ 2-2 气泡的经典核化理论	20
§ 2-3 非均质核化——表面沸腾起泡	26
§ 2-4 凹穴内汽核的成长及气泡露出凹穴出口截面 的判断	41
§ 2-5 非均温系统中锥形凹穴的活化分析	46
§ 2-6 表面活化穴密度分布	54
第三章 气泡动力学	57
§ 3-1 概述	57
§ 3-2 初始均温均质液体中气泡的成长过程	66
§ 3-3 加热表面上气泡的成长过程	86
§ 3-4 气泡跃离直径和气泡频率	105
§ 3-5 气泡的重叠与聚合	115
§ 3-6 气泡上升运动过程	117
第四章 大空间泡态沸腾	121
§ 4-1 概述	121
§ 4-2 泡态沸腾换热机理的几种主要模型	128
§ 4-3 大空间泡态沸腾换热的主要影响因素	139
§ 4-4 沸腾换热的综合变量	150
§ 4-5 大空间泡态沸腾换热关联式	153

第五章 大空间沸腾临界热流	164
§ 5-1 概述	164
§ 5-2 沸腾临界点形成机理与沸腾临界热流密度计算式	166
§ 5-3 沸腾临界点的主要影响因素	176
§ 5-4 沸腾最低热流密度	185
第六章 大空间膜态沸腾	191
§ 6-1 概述	191
§ 6-2 稳定膜态沸腾机理	193
§ 6-3 蒸汽膜层内层流流动换热模型及其诱导公式	196
§ 6-4 蒸汽膜层中蒸汽湍流流动的膜态沸腾换热分析	210
§ 6-5 膜态沸腾的主要影响因素	215
第七章 两相流流动特性	222
§ 7-1 概述	222
§ 7-2 两相流流型图谱	223
§ 7-3 两相流的基本特性参数和基本方程	232
§ 7-4 两相流特性参数的确定	243
§ 7-5 摩阻、重力和加速压降的确定	252
§ 7-6 两相流不稳定性简述	267
第八章 流动沸腾换热	278
§ 8-1 概述	278
§ 8-2 过冷泡态沸腾换热	285
§ 8-3 流动饱和泡态沸腾换热的分析	300
§ 8-4 强制对流蒸发换热	305
§ 8-5 流动沸腾临界点	309
§ 8-6 流动膜态沸腾	337
§ 8-7 流动沸腾两相流的空隙率与压降	345
第九章 沸腾换热的强化	355
§ 9-1 概述	355
§ 9-2 主动式强化沸腾换热技术	357
§ 9-3 被动式强化沸腾换热技术	359

§ 9-4 多孔表面强化沸腾换热	369
§ 9-5 强化沸腾换热技术的展望	387
附录	389
I Helmholtz 不稳定性判据的推导	389
II Taylor 不稳定性判据的分析	390
III 沸腾换热关系式	392
本书所使用的法定计量单位	401
符号表	403
参考文献	421

第一章 绪 论

在本章内,除对沸腾换热的由来、现状和发展加以简述外,还将从沸腾换热的物理性质出发,阐明沸腾换热的分类,沸腾换热曲线的特点,以及沸腾换热的应用领域,并扼要介绍沸腾换热的研究内容和研究方法。

§ 1-1 沸腾换热的由来与发展

沸腾换热一词既可表示一种换热方式,又是传热学学科分支的一种名称。

沸腾是通过大量汽泡的形成、成长和运动将工质由液态转换到汽态的一种剧烈蒸发过程。就换热方式的名称而言,沸腾换热就是伴随着液汽相变的热量传递过程。

虽然人类很早就对沸腾现象有所观察并加以利用,但对其本质与性能的探索和认识,据可供考证的史料记载,是在十八世纪中叶才开始的。1756年 Leidenfrost^[1] 观察与测量了液滴在高温金属板上的蒸发速度,1924年 Kenrick 等对毛细管中水的沸腾进行了研究,到了1926年 Moscicki 等人又对电热丝浸没于冷、温水中的沸腾换热进行了实验研究。但总的说来,上述这些工作只是一些零星的、探索性的试验。随着蒸汽动力工业的迅速发展,对揭示沸腾与沸腾换热本质与规律的要求也愈来愈迫切。从二十世纪三十年代起,许多较为系统的实验研究和较有价值的理论探讨都开展起来了。其中比较重要的有:1931年 Jakob 等^[2] 对沸腾换热进行的一系列的实验研究,提出了一些具有启发性的如沸腾液温度过热以及沸腾液换热方式等有关见解和实验结果。1935年 Nakiyama^[3] 将金属丝浸没在大空间液体中进行实验,得到了著名的、沿用至今的沸腾换热曲线。1935年,Becker 等^[4] 提出了在纯液体中的起泡和核化的初步理论。上述研究成果虽然都是沸腾换

热发展史上的著名成果,但这些宏观的、并具有很局限性的试验和研究结果,不能满足设计和改进沸腾换热元、器件的要求,尤其是在大型火力发电、原子能反应堆、火箭技术、深冷技术等出现以后,这种矛盾就更加突出。正是在这种背景下,从五十年代初开始,各国学者,尤其是美、苏等国学者,对沸腾换热作了大量的研究工作,每年发表很多的论文和报告,内容甚为广泛与丰富:既有对汽泡的形成、成长和运动条件与规律的分析,又有对沸腾换热机理、沸腾换热关联式的研究;既对大空间沸腾换热进行了探讨,又对更为复杂的汽液两相流换热进行了研究;既有大量的常压、常温下沸腾换热资料,又有近临界、超临界状态下的沸腾换热数据。迄今为止,对沸腾换热过程的研究已取得了显著成果,这些成果不仅可以用来解决工程技术中所遇到的设计和运行问题,而且奠定了进一步开展研究和探索的基础。因此,沸腾换热现在已发展成为与多种重要工业技术部门有密切联系的、较活跃的一门传热学分支学科。但由于沸腾现象的复杂性和测试手段的局限性,至今在对换热机理、换热计算及许多其它重要现象的分析上,还存在着分歧,这也正是该学科仍处在发展阶段的象征。而它的发展趋势、所要解决的主要或关键问题,都是值得进一步探讨的问题,但愿读者能从本书中找到一点有关这方面的线索。

§ 1-2 沸腾换热的分类

对于沸腾换热,可先按照沸腾发生的不同条件和沸腾特性来进行分类。

就沸腾发生的条件来分,可分为均质沸腾(homogeneous boiling)和非均质沸腾(heterogeneous boiling)两类。前者是指在液体内部没有固定的加热壁面,汽泡是由能量较集中的液体高能分子团的运动与集聚而产生的。这种沸腾通常是采用对液体进行辐射加热的办法来实现的,一般需要较大的液体过热度。对均质沸腾来说,由于无固相表面和异物参与,物理过程比较单纯,所

以便于进行实验研究和理论分析，一些有机液体实际上就存在着这种沸腾现象。非均质沸腾主要是指汽泡在与液体相接触的固体加热面上产生、成长的沸腾过程，故又称表面沸腾。这种沸腾所需液体过热度远低于前者，但由于固体表面的参与，使这种沸腾的影响因素更复杂、多变且不易控制。可是，它又是一种最常见、最有实用价值的沸腾类型。本书主要研究和讨论这一种沸腾。

在非均质沸腾中，按照沸腾液体的流动特性，又可分为大空间沸腾 (pool boiling) 和流动沸腾 (flow boiling) 两种。前者是指沉浸于原为静止的大容器内的加热面上的液体所发生的沸腾。大容器内所有流体的运动是由自然对流和汽泡的成长、运动所形成的对流而引起的，如锅炉的锅筒及某些工业蒸发器中工质的蒸发过程可近似视为大空间沸腾。大空间沸腾排除了外来的强迫流动，因此流体的各种流动和换热现象仅与纯沸腾关联在一起，故可利用它对沸腾现象进行集中研究。而流动沸腾则是指在定向运动的液体中发生的沸腾。这种定向运动既可由外力驱动而致，也可由自然对流所形成。流体既有无相变的强迫或自然对流，又存在着由于大量汽泡成长和运动所引起的对流，锅炉水冷壁内水的蒸发过程就属于流动沸腾过程，约束流体的管壁就是加热面。在管内，汽水混合物一边流动一边进行沸腾换热，故又称沸腾两相流体。流动沸腾包含着两相流体的流动与沸腾换热的相互影响，因而它远较大空间沸腾复杂，但在工业应用中更为重要。

无论是大空间沸腾还是流动沸腾，如按照沸腾换热的性质与机理，又可分为泡态沸腾 (nucleate boiling) 和膜态沸腾 (Film boiling)。在前一种沸腾工况中，大量汽泡在加热面上形成、成长，并跃离到液体主流中运动，于是一方面使液体快速蒸发而带走了潜热，另一方面对液体进行了剧烈的扰动从而增强了加热面与液体间的对流换热。所以，泡态沸腾一般只需要很小的温差，但却具有很高的换热强度。在泡态沸腾中，由于液体主流温度的不同，又可按其是否高于饱和温度而分为饱和沸腾 (saturation boiling) 和过冷沸腾 (subcooling boiling) 两类或两个阶段。前者由于液

温高于饱和温度，汽泡跃离加热壁面到液体主流中后，不但不消失，而且是一边运动一边长大，在液体自由表面或两相流管道中将有大量蒸汽出现。此类沸腾又称主流沸腾(bulk boiling)，而过冷沸腾则指主流液温低于饱和温度的情形，此时在加热面上虽有汽泡产生，但随即凝结在过冷液体中，而在大空间自由液体表面上只有少量蒸汽蒸发。所以这种沸腾又称局部沸腾(local boiling)。而膜态沸腾，若以大空间膜态沸腾为例，则是指当热流密度升高到某特定值后，受热面上的汽泡数量增加且相互合并成为大汽泡，最后形成汽膜将液体与加热面隔开，从而使换热系数显著下降，导致传热恶化的沸腾工况。

若按沸腾液体的组分来区分，可分为单组分液体沸腾和多组分(双组分及双组分以上)液体沸腾。后者在某些领域，如化工过程中是经常出现的。试验结果说明，单组分与多组分液体沸腾相比较，后者的换热系数有所增加，而且多组分液体沸腾临界热流密度也有显著提高。

从不同角度对沸腾与沸腾换热进行分类，大致有上述几种，它们之间的关系如图 1-1 所示。这些分类不仅有助于区别各种不同性质与特点的沸腾过程，而且对沸腾的细致深入的研究也是必要的。

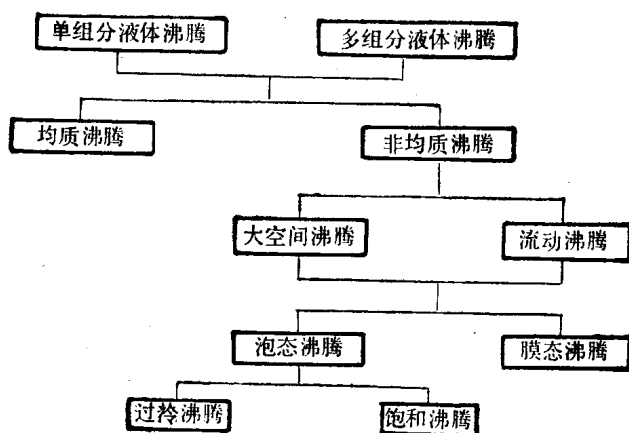


图 1-1 沸腾类型

本书内容将涉及各类沸腾换热, 但主要讨论工业应用中经常遇到的单组分非均质大空间沸腾和流动沸腾。对泡态沸腾、膜态沸腾等各种沸腾工况都将论及, 由于泡态沸腾具有良好的换热性能和实用价值, 故将着重加以阐述。

§ 1-3 沸腾换热曲线

就非均质沸腾而言, 无论是大空间沸腾还是流动沸腾, 热流密度 q 、换热系数 h_b 与换热温差—壁面过热度 $\Delta T_w = T_w - T_s$ (T_w 为壁温, T_s 为液体饱和温度) 之间存在着确定的关系。表示这些关系的沸腾曲线就是对沸腾换热规律的宏观描述。人们为探寻这种关系, 曾作过许多研究。1756 年 Leidenfrost, 1888 年 Lang 都用自己的实验证明过: 沸腾热流密度 q 随 ΔT_w 的变化有最高值与最低值。1935 年 Nukiyama 在较系统、全面的实验基础上得到了 $q-\Delta T_w$, $h_b-\Delta T_w$ 关系曲线^[3]。后来又分别为 Farber, Scoriah, Mc-Adams 等人的实验所证实。现以大气压力下单组分水的大空间沸腾换热为例, 对沸腾曲线作如下的分析和说明。

图 1-2 的横坐标为 $\lg(\Delta T_w)$, 纵坐标为 $\lg q$ 及 $\lg h_b$, 图中实线 ABCDEFG 就是大空间沸腾曲线。由图示曲线可以看出, 随着壁面过热度 ΔT_w 的增加, 热流密度发生变化, 呈现出不同的沸腾工况。

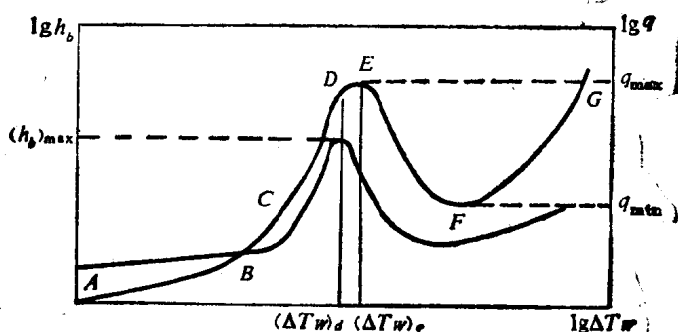


图 1-2 大空间沸腾曲线(图中 $(\Delta T_w)_d = (\Delta T_w)_{DNB}$, $(\Delta T_w)_e = (\Delta T_w)_{\text{onset}}$)

单相自然对流(*AB*)阶段

当壁面过热度 ΔT_w 较低时, 在加热表面上的液体尚未达到饱和温度, 但靠近热壁面的液体温度已高于液体主流温度, 从而形成自然对流。此时, 从加热表面到液体主流, 从液体主流到自由液面, 热量传输均以自然对流方式进行, 而液体的蒸发主要在自由液面上进行。由图线可知, 这一阶段的换热系数与一般自然对流换热相同, 即

$$q \propto (\Delta T_w)^{5/4}$$

并按下列自然对流换热关联式进行换热计算

$$Nu_l = 0.14 (Gr_l Pr_l)^{1/3} \quad (1-1)$$

式中 Nu_l , Gr_l , Pr_l 分别为液体 Nusselt 准数、Grashof 准数及 Prandtl 准数, 且

$$Nu_l = \frac{hL}{k_l} \quad Gr_l = \frac{\beta g \Delta T L^3 \rho_l}{\mu_l} \quad Pr_l = \frac{c_{pl} \mu_l}{k_l}$$

其中 L 为定性尺寸, 若加热器为圆管, 则取 $L = D$ (D 为管外径), k_l , ρ_l , μ_l , c_{pl} , β 分别为液体的导热系数、密度、动力粘度、比热、容积膨胀系数, g 为重力加速度。

泡态沸腾(*BE*)阶段

由图线可知, 曲线 *BE* 段是由 *BC* 与 *OE* 两段组成的。

BC 段是由单相自然对流到完全泡态沸腾的过渡阶段。当 ΔT_w 达到某确定值时, 加热表面上在少数汽化核心处开始形成汽泡, 热流曲线逐渐变陡, 换热系数 h_b 有所增高。但所形成的汽泡或就地破灭或跃离到液体中凝结下来。这便是过冷沸腾阶段。

OE 段称为充分发展泡态沸腾阶段。随着 ΔT_w 的增加, 加热面上汽化核心密度增多, 汽泡频率升高。此时, 液体主流温度达到或超过相应压力下的饱和温度, 在加热壁面上所形成的汽泡不仅不再凝结, 而且跃离到液体主流中还要继续成长。大量汽泡的形成、长大、跃离和运动, 形成了加热壁面与液体之间的强烈对流换热。如对于大气压下水的充分发展泡态沸腾, 其换热系数高达 $67628 [W/(m^2 \cdot ^\circ C)]$ 。一般说来, 充分发展泡态沸腾热流密度 q

与 ΔT_w 的 n 次方成正比

$$q \propto (\Delta T_w)^n \quad (n=2-5)$$

应当指出,如图 1-2 所示,当 $\Delta T_w = (\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ 时,由于加热面上成核密度和汽泡频率的急剧增加,许多汽泡来不及向主流跃动而在表面聚集,部分汽泡互相合并成为离散的大汽泡,从而增加了主流液体向壁面回流的阻力,故使换热系数开始下降,而换热系数的降低必然导致热流密度的下降。但是由于此时尚未在加热表面上形成汽膜,而随着汽泡数量的急剧增多,仍从表面带走大量汽化潜热并对液体进行了扰动,故仍使热流密度有所增高。上述两种效应的综合结果是,后者对热流密度的增强贡献大于前者对热流密度的削弱影响。也就是说,在这一阶段泡态沸腾的作用是主要的,即热流密度随 ΔT_w 的增加仍在升高,但其增长速率较充分发展泡态沸腾为低。对于这一相应的沸腾工况,称之为泡态沸腾偏离点 (departure from nucleate boiling, 缩写为 DNB)。

当 ΔT_w 继续升高到达 $(\Delta T_w)_{\text{crit}}$ 时,加热面上开始形成汽膜,换热情况迅速恶化,而热流密度则达到最高值 q_{max} ,若 ΔT_w 继续增加,热流密度 q 就开始下降,就是说热流曲线出现了转折点。所以,将 q_{max} 称为临界热流密度 q_{crit} 或临界热负荷,也有称之为最高热流密度。苏联文献中还称其为第一临界热流量。对于沸腾热流曲线上这个由泡态沸腾转变为膜态沸腾的 E 点,称沸腾临界点、沸腾危机 (boiling crisis) 或烧毁点 (burn-out)¹⁾,本书将在第五章对其进行更详尽的分析。

这里有必要再次明确指出,沸腾换热的真实物理过程表明,泡态沸腾偏离点是泡态沸腾换热系数达到最高值 $(h_0)_{\text{max}}$ 之时,其相应的壁面过热度为 $(\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ 。而此时热流密度并未到达最高值。当到达沸腾临界点 E 时,热流密度才达到 q_{max} ,其所对应的壁面过热度为 $(\Delta T_w)_{\text{crit}}$ 。实验结果说明, $(\Delta T_w)_{\text{crit}} > (\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ ²⁾。在

1) 也有人提出以泡态沸腾偏离点 DNB 为沸腾临界点,但大多数文献以达到 q_{max} 的沸腾工况为沸腾临界点。

2) 文献[5]中的实验数据表明,对常压下的水, $(\Delta T_w)_{\text{DNB}} = 22.5^\circ\text{C}$, 而 $(\Delta T_w)_{\text{crit}} = 37.8^\circ\text{C}$ 。显然, $(\Delta T_w)_{\text{crit}} > (\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ 。

这里,再利用沸腾曲线极值点的性质对此加以说明.

若以牛顿冷却公式表述泡态沸腾换热,则有

$$q = h_b \Delta T_w \quad (1-2)$$

根据前述定义,当沸腾到达临界点时,其壁面过热度为 $(\Delta T_w)_{\text{crit}}$,此时,热流密度达到极大值,亦即

$$\left. \frac{dq}{d(\Delta T_w)} \right|_{(\Delta T_w)_{\text{crit}}} = 0 \quad (1-3)$$

将式(1-2)对 ΔT_w 求导并以极值条件式(1-3)代入,整理后可得

$$\left. \frac{dh_b}{d(\Delta T_w)} \right|_{(\Delta T_w)_{\text{crit}}} = - \frac{h_b}{(\Delta T_w)_{\text{crit}}} \quad (1-4)$$

同理,根据泡态沸腾偏离点的定义,当 $\Delta T_w = (\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ 时,沸腾换热系数达到最大值,即

$$\left. \frac{dh_b}{d(\Delta T_w)} \right|_{(\Delta T_w)_{\text{DNB}}} = 0 \quad (1-5)$$

将式(1-2)对 ΔT_w 求导,并将极值条件式(1-5)代入,可得到

$$\left. \frac{dq}{d(\Delta T_w)} \right|_{(\Delta T_w)_{\text{DNB}}} = h_b \quad (1-6)$$

在式(1-4)和式(1-6)中,换热系数 h_b 、沸腾临界点壁面过热度 $(\Delta T_w)_{\text{crit}}$ 均为正值.因此,由式(1-4)可知,当到达沸腾临界点时(即 $\Delta T_w = (\Delta T_w)_{\text{crit}}$ 时),其相应的 $h_b - \Delta T_w$ 曲线斜率为负.而由式(1-6)可知,在到达泡态沸腾偏离点,即 $\Delta T_w = (\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ 时,其相应的 $q - \Delta T_w$ 曲线斜率为正.式(1-4)和式(1-6)的分析结论与前述沸腾机理描述和实验结果完全相符.

值得指出的是,有些资料、书籍中,如文献[7]等将 $(\Delta T_w)_{\text{crit}}$ 与 $(\Delta T_w)_{\text{DNB}}$ 混为一点,即认为 $(\Delta T_w)_{\text{crit}} = (\Delta T_w)_{\text{DNB}}$,这不能不说是一个失误.

还应当指出,沸腾过程是否沿图 1-2 所示的 $BCDE$ 曲线进行还取决于其它各种因素,特别是与液体中不凝气的含量及加热表面的润湿特性有关.如对除净不凝气的液体进行低压沸腾实验,则 $q - \Delta T_w$ 曲线将沿图 1-3 中的 ON 进行,即将延长单相自然对流换热阶段,也就是说,在加热表面上形成汽泡需要较高的壁面过

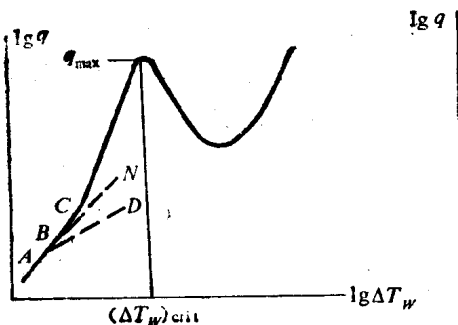


图 1-3 不凝气及不润湿性对沸腾曲线的影响

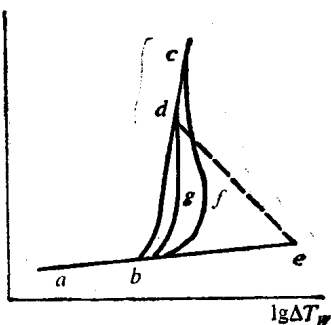


图 1-4 沸腾滞后现象

热度。如果沸腾液体对加热表面不润湿，则 $q-\Delta T_w$ 曲线将沿图 1-3 中的 BD 进行。诚然，上述两种情形都是绝对化的。实际上，当热流密度由低向高对壁面加热进行沸腾换热时，根据液体中不凝气的含量，液固表面非润湿效应的强弱，有可能出现所谓沸腾滞后现象。Cole 和 Foust 在文献 [8] 中发表的实验数据表明，沸腾曲线可沿图 1-4 中 bcd 、 bfc 或 bgd 进行，即泡态沸腾被滞后。但如果沸腾工况由高热流向低热流过渡时，则不会出现上述滞后现象。

因此，可以说图 1-2 $BCDE$ 曲线，表示当含有充足的不凝气，并且液体润湿加热表面时的液体大空间沸腾过程。

膜态沸腾 (EG 或 EFG) 阶段

随着加热或控制方式的不同，在越过沸腾临界点进入膜态沸腾阶段时，沸腾曲线可沿图 1-2 中的实线 EFG 或虚线 EG 进行。如采用蒸汽或高温液体加热时，壁温成为控制因素，沸腾则沿 EFG 进行。而如采用电加热，控制热流密度恒定时，则沸腾曲线将沿虚线从 E 点直接达到 G 点。这是由于为了使热阻很大的汽膜所传递的热流密度不变，则传热温差必然跃增。对于非低沸点液体，到达 G 点时壁面温度可能跃升至壁面材料的熔点以上，以致使壁面遭到破坏，这也就是将临界热流密度 q_{max} 出现时的工况视为沸腾危机及烧毁点的原因所在。

现在，我们就沿实线 EFG 进行的沸腾过程进行分析。由图