

Engineering Industry and Technics

沸騰伝熱和两相流动

Industrie Mécanique et Technique

〔美籍〕汤焱孙 著

きかいこうぎょうぎじゅつとしよ

Industrie und Technologie

Промышленности и Технике

机械工业出版社

本书从阐述基本概念出发，论述有关沸腾传热和两相流动方面理论和实验研究成果。包括：大容积沸腾、流动沸腾、沸腾危机、两相流动的流体动力特性以及流动不稳定性。以沸腾危机和流动不稳定性为重点，对现有的资料作了全面的综述，提供了供工程计算用的关系式。为了使读者方便，译者列出了常用单位换算表。

本书的不少内容系取材于作者在美国卡内奇工学院研究班的讲稿，所以文中详尽地列举了该领域内现有的文献，可作为进一步探索研究的基础。在沸腾传热和两相流动的不少著作和专论中，本书中的观点和意见被广泛地引用。

对于在核动力、电站锅炉、化工机械和石油工艺等领域内工作的科研、设计人员，本书均有参考价值，亦可作为高等院校有关专业的教学参考书和研究生教材。

Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow
L. S. TONG
ROBERT E. KRIEGER PUBLISHING COMPANY
Huntington, New York, 1975

* * *

沸腾传热和两相流动

[美籍] 汤焱孙 著

王孟浩 译 吴恕三 校
徐仁德

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 9³/₄·字数 208 千字

1980年11月北京第一版·1980年11月北京第一次印刷

印数 00,001—3,500·定价1.00元

*

统一书号：15033·4764

符 号 表

- A_c ——通流截面, 英尺²
 A_h ——传热面积, 英尺²
 a ——加速度, 英尺/时²
 a ——单位面积的蒸汽体积, 英尺
 B ——常数
 b ——层的厚度, 英尺
 C ——滑动常数 $C = \alpha/\beta$
 C ——浓度, 磅/磅
 C ——常数
 c_p ——定压比热, 英热单位/(磅·°F)
 D ——扩散常数
 D ——阻尼系数
 D_b ——汽泡直径, 英尺
 D_e ——流道当量直径, 英尺
 D_h ——受热周界当量直径, 英尺
 d ——金属丝或棒的直径, 英尺
 E ——能(功), 磅力·英尺[⊖]
 e —— $e = 2.718$ (自然对数的底数)
 F ——按 D_e 计算的摩擦因数 (据 Weisboch)
 f ——按 r_h 计算的摩擦因数 (按 Fanning $F = 4f$)
 f ——频率, 1/时
 G ——质量流速, 磅/(英尺²·时)
 g ——重力加速度, 英尺/时²
 g_c ——换算系数, 磅·英尺/(磅力·时²)

⊖ 全书凡是力的单位, 磅都改为磅力——译者注。

IV

H ——焓, 英热单位/磅

H_{in} ——进口焓, 英热单位/磅

H_{fg} ——汽化潜热, 英热单位/磅

ΔH_{sub} ——过冷焓 ($H_{sat} - H_{sub}$), 英热单位/磅

h ——传热系数, 英热单位/(时·英尺²·°F)

J ——热功当量 $J = 778$ 磅力·英尺/英热单位

K ——气体常数 $pV = KT$

k ——导热系数, 英热单位/(时·英尺·°F)

L ——受热流道长度, 英尺

M ——质量, 磅

m ——波数 $m = 2\pi/\lambda$

N ——汽核或分子数

n ——汽化核心数

n ——汽泡或汽核数密度, 1/英尺³

P ——功率, 英热单位/时

p ——压力, 磅力/英尺²或磅力/英寸²

Δp ——压力降, 磅力/英寸²

Q ——容积流量, 英尺³/时

q ——传热速度 (率), 英热单位/时

q' ——单位长度热功率, 英热单位/(时·英尺)

q'' ——热流密度, 英热单位/(英尺²·时)

\bar{q}'' ——平均热流密度, 英热单位/(英尺²·时)

q''' ——功率密度, 英热单位/(时·英尺³)

R ——热阻, 时·°F/英热单位

R ——汽泡半径, 英尺

r ——半径, 英尺

r_h ——水力半径 $D_e = 4r_h$, 英尺

S ——滑动比

s ——宽度, 英尺

T ——温度, °F

T_{∞} ——过热液层温度, °F

ΔT_{FDB} ——完全旺盛沸腾开始时的 ΔT_{sat} , °F

$\Delta T_{\text{J\&L}}$ ——Jens-Lottes温差, °F

T_{LB} ——局部沸腾开始处主流工质温度, °F

ΔT_{sat} ——($T_{\text{壁面}} - T_{\text{sat}}$), °F

ΔT_{sub} ——过冷度 ($T_{\text{sat}} - T_{\text{局部}}$), °F

t ——时间, 时

u ——轴向速度, 英尺/时

V ——速度, 英尺/时

v ——法向速度, 英尺/时

ν ——比容, 英尺³/磅

ν_{fg} ——蒸发时比容的变化, 英尺³/磅

W ——质量, 磅

w ——流量, 磅/时

X_{tt} ——Lockhart-Martinelli 参数

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.8} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_f}{\mu_g} \right)^{0.1}$$

x —— x 方向长度, 英尺

Y ——参数组

y —— y 方向长度, 英尺

z ——轴向长度, 英尺

z_b ——从入口到主流沸腾处的距离, 英尺

z_d ——从入口到汽泡离壁点的距离, 英尺

z_{LB} ——从入口到局部沸腾开始处的距离, 英尺

z^* ——从入口到 Bowing 含汽率曲线与 Martinelli-Nelson 含汽率曲线汇合点的距离, 英尺

希腊字母

α ——导温系数 $\alpha = k/\rho c$, 英尺²/时

VI

- α —— 截面含汽率
- β —— 蒸汽容积流量比
- β —— 液体与固体表面间的汽泡接触角
- γ —— 常数
- δ —— 附面层或热附面层厚度, 英尺
- ϵ —— 涡流扩散度, 英尺²/时
- ϵ —— 液体对流传热与汽泡传送潜热之比
- ζ —— 常数
- η —— 波的振幅, 英尺
- θ —— 角度, 度
- θ —— 温差, °F
- κ —— 常数
- λ —— 波长, 英尺
- μ —— 粘度, 磅/(英尺·时)
- ν —— 运动粘度, 英尺²/时
- ξ —— 常数
- π —— 圆周率 $\pi = 3.1416$
- ρ —— 密度, 磅/英尺³
- σ —— 表面张力, 磅力/英尺
- σ —— 斯蒂芬-波尔茨曼常数

$$\sigma = 17.3 \times 10^{-10} \text{英热单位}/(\text{时} \cdot \text{英尺}^2 \cdot ^\circ\text{R}^4)$$
- σ —— 面积比 $\sigma = A_1/A_2$
- τ —— 无量纲时间
- τ —— 剪应力, 磅力/英尺²
- ϕ —— 函数
- ϕ_{LO} —— $(\Delta p_{TPF}/\Delta p_{LO})^{1/2}$
- χ —— 干度, 蒸汽重量百分率
- ψ —— 函数
- ω —— 角速度, 1/时

上角标

- + —— 表示无量纲参数
- —— 表示按时间的平均值或平均值
- * —— 表示临界值

下角标

- B* —— 表示沸腾工况
 - b* —— 表示汽泡性质或主流工况
 - c* —— 表示主流核心部工况
 - d* —— 表示汽泡离壁工况或液滴工况
 - e* —— 表示出口工况
 - f* —— 表示液膜工况
 - g* —— 表示气相工况
 - i* —— 表示内径
 - l* —— 表示饱和液体工况
 - l'* —— 表示局部过冷液体工况
 - m* —— 表示混合物性质
 - o* —— 表示起始条件或外径
 - v* —— 表示饱和蒸汽工况
 - w* —— 表示壁面条件
 - bulk —— 表示主流工况
 - crit —— 表示临界工况
 - conv —— 表示强迫对流分值 (的传热)
 - eff —— 表示有效值
 - GPF 表示只有气相质量流量流过通道时的阻力
 - LB 表示局部沸腾工况
 - LO —— 表示液相以总质量流量流过通道时的阻力
 - LPF —— 表示只有液相质量流量流过通道时的阻力
 - max - 表示最大值
 - rel - 表示相对值
-

VI

sat——表示饱和工况

sub——表示过冷工况

sup——表示过热工况

TP——表示两相

TPF——表示两相摩擦

无量纲准则数组

Bo——沸腾数 $Bo = q'' / H_{fg} \rho_v V$

Fr——弗鲁特 (Froude) 数 $Fr = V^2 / g D_e$

Gr——格拉晓夫 (Grashof) 数 $Gr = L^3 \rho^2 \beta g \Delta T / \mu^2$

Ja——雅可比 (Jacob) 数 $Ja = c_p \rho_l (T_w - T_b) / H_{fg} \rho_v$

Nu——努赛尔特 (Nusselt) 数 $Nu = D_b q'' / \Delta T_w k_l$

Pr——普朗特 (Prandtl) 数 $Pr = c \mu / k$

Re——雷诺 (Reynolds) 数 $Re = D_b G / \mu$

We——韦伯 (Weber) 数 $We = D_b \rho V^2 / \sigma g_c$

原 序[⊖]

近年来，沸腾传热和两相流动主要由于它们在核反应堆和火箭技术中的应用而获得了世界范围的重视。在这一领域里，曾发表过许多论文，提出了许多概念，然而其中有不少是相互矛盾的。本书综述有关沸腾方面的资料，采用的方法是先陈述不同的见解，然后研究它们的一致和差异。这是因为观点的差异往往可以替后来的研究者提供检验真伪的依据。

本书的目的是：

1. 为大学和学院提供一本介绍有关沸腾传热和两相流动现代水平知识的教科书；
2. 为研究工作者提供一本概括这个领域内文献的简明手册；
3. 把关系式和现有实验数据相比较，并尽可能同时指出关系式不可靠之处；应用这样的方法，为设计工作者提供一些有实用价值的关系式。

本书是一本工程教科书，目的在于改进沸腾传热设备的性能。所以它着重讨论沸腾传热恶化和流动不稳定性。前五章的内容，除理论本身的重要性之外，是为理解沸腾传热恶化和流动不稳定性作准备的。

本书有些部分的内容，取材于作者 1961~1964 年间在卡内奇工学院所主持的夜校研究生班的讲稿。

过去发表过很多有价值的有关沸腾传热和两相流动的论

⊖ 序末致谢一节已删节——译者注。

文和报告。其中值得推荐下列综合性的参考文献：

《液体的沸腾 (Boiling of Liquid)》，J.W. Westwater 著，见《化学工程进展 (Advances in Chemical Engineering)》第1辑 (1956年) 和第2辑 (1958年)，T.B. Drew 和 J.W. Hoopes, Jr. 编，美国纽约学术出版社 (Academic Press)。

《沸腾传热 (Heat transfer with Boiling)》，W.M. Rohsenow 著，见《热传导的现代进展 (Modern Development in Heat Transfer)》，W. Ibele 编 (1963年)。

《沸腾 (Boiling)》，G. Leppert 和 C.C. Pitts 著，《两相环状弥散流动 (Two-phase Annular-Dispersed Flow)》，Mario Silvestri 著，均见《热传导进展 (Advances in Heat Transfer)》第1辑，Irvine, Jr 和 J.H. Hartnett 编，学术出版社 (1964年)。

《气液两相系统的传热与水力学，注释书目 (Two-phase <Gas-Liquid> System; Heat Transfer and Hydraulics, An Annotated Bibliography)》，R.R. Kepple 和 T.V. Tung 合著，ANL[⊖]-6734, USAEC[⊖] 报告 (1963年)。

宾夕法尼亚州匹茨堡市

1965年9月 汤焯孙

⊖ 阿尔贡国家实验室 (Argon National Laboratory) ——译者注。

⊖ 美国原子能委员会 (United States Atomic Energy Committee)
——译者注。

目 录

符号表	
原序	
第一章 引论	1
1-1 各种沸腾工况	1
1-2 两相流动	3
1-3 沸腾危机	4
1-4 流动不稳定性	5
第二章 大容积沸腾	6
2-1 引言	6
2-2 单个汽泡的成核和动力学	6
2-3 沸腾过程的流体动力学	27
2-4 大容积沸腾传热	31
第三章 两相流的流体动力特性	57
3-1 引言	57
3-2 绝热流动和不绝热流动的各种流型图谱	58
3-3 受热流动中的截面含汽率和滑动比	70
3-4 不同流型中相、速度和剪力分布	81
第四章 两相流的压降	92
4-1 引言	92
4-2 两相流压降的几种解析模型	93
4-3 各种经验公式和试验数据	109
4-4 两相流的节流压降	117
4-5 两相临界流	125
第五章 流动沸腾	134
5-1 引言	134

II

5-2	流动中的核态沸腾	135
5-3	强制对流蒸发	143
5-4	缺液区域的膜态沸腾和传热	153
第六章	流动沸腾危机	164
6-1	引言	164
6-2	流动沸腾危机分析的理论处理方法	166
6-3	经验关系式和实验数据	187
6-4	各项参数对流动沸腾危机的影响	218
第七章	两相流的不稳定性	243
7-1	引言	243
7-2	流动不稳定的一般描述	245
7-3	一维的基本热力-流体动力方程	250
7-4	并联流道中的流动不稳定	252
7-5	自然循环回路中的流动不稳定	259
参考文献	262
常用单位换算表	283
名词索引	288

第一章 引 论

人们把在液体到蒸汽的相变过程中发生的传热方式定义为沸腾传热。有两种基本的沸腾型式,即:大容积沸腾(pool boiling)和流动沸腾(flow boiling)。浸没在原先静止的液体池里的加热面上发生的沸腾,是大容积沸腾;而运动的液体流中的沸腾是流动沸腾,这时约束流体的通道的壁面,可能就是加热面。沸腾的流体是液体和蒸汽的混合物,因此是一种两相流体,也就是本书论述的主要对象。因为沸腾过程中传热强度通常很高,所以象火箭发动机、核反应堆这种要求传热强度高的设备,往往利用沸腾来冷却。由于沸腾传热在现代工业中的应用是如此重要,所以近年来,许多国家为探索它的机理和工况进行了庞大的研究工作。

1-1 各种沸腾工况

虽然 Leidenfrost 在 1756 年[L9], Lang 在 1888 年[L3]都曾经报导过:沸腾传热强度有它的最大值和最小值。但存在有各种不同的沸腾工况这一事实,是拔山(Nukiyama)在 1934 年首先清楚地论述的[N5]。随后 Farber 和 Scoriah[F3]和 McAdams 等[M14]所报导的,利用浸没在饱和水槽里通电加热的水平导线进行的一些大容积沸腾试验,再次核实了拔山[N5]所提出的各种不同沸腾工况。在大气压力下水中典型大容积沸腾的各种工况示于图 1-1,它是用常用的 log-log 座标表示的热流密度与壁面过热度之间相互关系曲线。

在 $A-B$ 这一段里,水是靠自然对流被加热的,从单相自

然对流的机理可以知道，传热强度 q'' 正比于 $\Delta T_{sat}^{5/4}$ 。在 $B-C$ 这一段里，近壁面的液体达到过热并开始汽化，在壁面上细小坑凹或刻痕等一类可以形成汽化生核的地点，形成汽泡。汽泡带走了相变时的汽化潜热，同时扰动了受热面附近的液体，因而增加了对流传热。这个范围内的机理称为“核态沸腾” (nucleate boiling)，其特点是：只需要一个很小的温差，就能取得很高的传热强度。核态沸腾又有两种情况：局部沸腾 (local boiling) 和主流沸腾 (bulk boiling)。局部沸腾是过冷液体中的核态沸腾，此时在受热面上形成的汽泡，随即在附近凝结。主流沸腾是饱和液体中的核态沸腾，此时汽泡并不消失。在核态沸腾范围内， q'' 随 ΔT_{sat} 而变化，指数 n 一般为 $2\sim 5$ 。但核态沸腾过程中，热流密度不能无限制地增加。在某一高热流密度值时 (图中 C 点)，从受热面上逸出的汽泡数目太多，以致可能阻碍液体的补充。这样，蒸汽

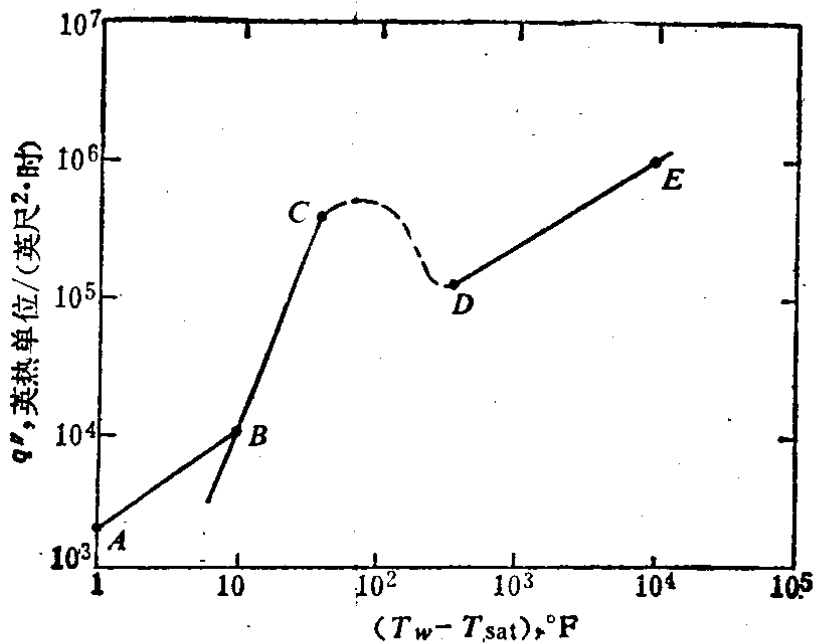


图1-1 大容积沸腾的各种工况

$A-B$ 自然对流 $B-C$ 核态沸腾
 $C-D$ 部分膜态沸腾 $D-E$ 稳定膜态沸腾

就形成一个覆盖受热面的隔绝垫，因而使受热面温度升高，这就称为“沸腾危机”(boiling crisis)。在以往，这个术语并不一致，有些作者把它叫作“烧毁”，而另一些人又称之为“*DNB*”(偏离核态沸腾)。本书中这三个名词是相互可以替换地应用的。

在 *C-D* 段范围里，紧接着达到临界热流密度之后，沸腾变得不稳定，这种机理就称为部分膜态沸腾 (partial film boiling) 或过渡沸腾 (transition boiling)。此时，汽垫和液层交替地覆盖表面，致使表面温度发生波动。假如加热器输入热功率维持不变，则表面温度急速升高，达到 *D* 点，而热流密度则逐步下降。在 *D-E* 这一范围里，受热面上形成稳定的汽膜，而传热强度达到一个最低值，这称为“稳定的膜态沸腾”。随着壁温的进一步升高，传热强度因热辐射也有所提高。但温度过高会使壁面损坏。因此，就实用目的而言，温度受到材料性能的限制。

流动沸腾中也存在上述各种沸腾工况。不过，由于两相流动在沸腾过程中起着重要的作用，因此这些沸腾工况的机理就更为复杂。例如流动的剪切运动能从壁面上把气泡冲走，这样，气泡平均尺寸缩小而气泡脱离频率增加了。沸腾过程和两相流动间其他的相互作用，将在下一节中讨论。无论是大容积沸腾还是流动沸腾，对于大部分实际应用而言，沸腾曲线中有意义的区段是核态沸腾 (*B-C*)，这时在较低的表面温度下即可获得很高的热流密度。

1-2 两相流动

两相流动按气泡的分布情况来分类。气泡分布的主要形式有三种：气泡悬浮在液体流中；液滴悬浮在汽流中；液体

4

和蒸汽相间存在。这些汽泡分布形式在流道中形成的过程中所出现的各种典型组合就称为流型 (flow patterns)。各种不同的流型对于受热壁面附近的流体动力工况起着不同的影响，因而产生了不同的摩擦压力降和不同的传热方式及沸腾危机。

受热壁面附近流动的微观图象，能够用两相附面层流动来描述，但两相流动对于摩擦压降的宏观影响，基本上仍要依赖于经验关系式。

1-3 沸 腾 危 机

沸腾危机是流体动力学和传热相结合的一种现象。由于壁温高得异常，所以在能量输入不变的系统中，沸腾危机往往导致受热面的损坏。因此，在沸腾设备中，必须预计和防止沸腾危机工况的出现。

沸腾危机确切的机理还未清楚。但近年来，经验数据和理论假设不断出现，而且数量迅速增加。描述流动沸腾危机有两种类型的参数。一类是沸腾系统的运行参数，如：事先给定的系统压力、质量流速和流道几何尺寸等。应用这些参数可以整理出能用于设计目的的流动沸腾危机工程计算的关系式，但并不能揭示沸腾危机的机理。另一类是微观参数，如：附面层的流速、局部截面含汽率、工质特性和受热面的表面条件等。第二类参数可用来计算譬如作用在单个汽泡上各种作用力。而这些作用力反过来又可用来组成一些有意义的无量纲准则数，进而可以给出一个能够反映现象本质、揭示沸腾危机机理的关系式，这种关系式在设计工作上也是有实用意义的。

1-4 流动不稳定性

流动不稳定性是兼有流体动力学和热力学特性的一种现象，是由于两相流体沸腾所造成的动量剧变所引起的。在输入功率低的流道中，不稳定性可能以小的恒定振幅的流量波动开始。如果输入功率进一步增加，流动变得不稳定，而振幅增大。在沸腾装置中，会产生三种主要类型的流动不稳定性：平行流道间的流动不稳定性；自然循环回路中的流动不稳定性以及由于流型变换时压降差异所引起的流动不稳定性。

Ruddick[R15]和 Lowdermilk 等[L26]曾发现流体波动会导致沸腾危机提前。再者，在沸水反应堆中，流体波动可能会引起核反应的不稳定性。因此，在设计沸腾系统时，必须预计和避免会产生流体波动的那些运行条件。