

沸腾换热

[德]E.哈恩 U.格里古尔 编

王兴国 华诚生 译 张正纳 校

国防工业出版社

688338

TK12
16

热 换 腾 沸

〔德〕 E. 哈 恩 编
U. 格里古尔

王兴国 华诚生 译

张正纲 校

11K50/02



C0227474

国防工业出版社

内 容 简 介

本书综述了用现代测量技术研究沸腾换热的最新成果。全书分为池沸腾、对流沸腾和物性影响三个部分共19章。书中详细讨论了核态沸腾、沸腾的临界点、向膜态沸腾转化、两相流以及热力状态和物性影响等换热专题，并分别论述了它们的发展概况。书中还给出了大量的试验数据，并对沸腾换热的各种试验结果进行了分析和讨论。

本书可供动力、制冷、化工、航空、航天和其他部门从事沸腾换热工作的工程技术人员和科研人员参考，也可作为大专院校有关专业的教学参考书。

Heat Transfer in Boiling

E. Hahne

U. Grigull

Hemisphere Publishing

Corporation 1977

*

沸 腾 换 热

〔德〕 E. 哈 恩 编
U. 格里古尔

王兴国 华诚生 译

张正纲 校

责任编辑 林国方

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印

*

850×1168 1/32 印张15 395千字

1988年4月第一版 1988年4月第一次印刷 印数：0,001—1,430册

ISBN7-118-00227-5/TK8 定价：5.20元

前 言

本书系根据〔德〕E. 哈恩教授等人所著《沸腾换热》1977年英文版译出的。众所周知，沸腾换热是热力过程中能量转换最有效的方法。多年来各国花费大量的人力、物力致力于沸腾换热的研究，虽然也取得了一定的进展，但是越深入研究，越感到有必要更多地研究那些我们至今还不清楚的东西。鉴此，德国科学研究联合会，为德意志联邦共和国和瑞士一些著名大学的研究所提供了高达430万马克的财政资助，使16位科学家所提出的87项科研申请能够得以实施。本书就是收集上述研究成果而写成的。

全书共19章，分为三部分：池沸腾、流动沸腾和物性的影响。文中详细讨论了核态沸腾、沸腾的临界点、向膜态沸腾的转化、两相流以及热力状态和物性的影响。每章都对该项技术截至目前为止的发展状况作了概述，并给出了大量的参考文献。书中内容广泛、取材十分新颖。

作者们还考虑到沸腾换热的机理目前还处于试验研究阶段，而这些试验却是构成许多理论研究的基础。因此，书中对试验研究的方法、设备、程序、测量技术和广泛地用图表来表示的试验结果等均作了详细的描述。

本书由中国空间技术研究院华诚生、王兴国共同翻译。华诚生译第1~10章和第19章；王兴国译第11~18章。全书由中国空间技术研究院高级工程师张正纲同志校阅。限于译者水平有限，译文中难免有错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

译 者

序 言

沸腾换热是当代换热研究中最为复杂的问题之一。虽然最近几十年人们不论是在理论分析方面还是在试验研究方面都作了大量的工作，但是我们还是必须承认，对于沸腾还缺乏完全的了解，哪怕是对最为简单的情况也是如此。更何况存在许多不同的情况如：不同的沸腾方式、不同的初始状态和边界状态、流体的不同流动状态、不同的流体热力状态、流体和加热壁面的不同原子结构以及不同的几何形状等等。

然而，今天人们对于与沸腾有关的现象要求作深入了解的愿望比以往任何时候都更加强烈。这是因为，沸腾换热是现今在热力过程中能量转换的最有效方法。为了能够最佳利用我们的资源，就必须了解与沸腾过程有关的各个参数间的内在联系，以便能够按所需的精度来预计能量的转换。

自拔山四郎的基础研究以后，由于又花费了大量的人力、物力，所以沸腾研究得到了相当大的进展，随之沸腾换热的文献也日渐丰富。然而，人们已经发现，越是深入研究这些问题，越是感到有必要更多地学习那些我们至今还不懂的东西。因此，可以说我们目前仍然是处于收集资料和数据阶段。

鉴此，德国科学研究联合会为德意志联邦共和国和瑞士的一些著名大学的研究所，研究沸腾换热的五年计划提供了财政经费。

本书的19个章节就是收集上述研究计划的成果而写成的。它所涉及的内容包括从汽泡动力学到二元混合物及液态金属的沸腾。所有的章节都是依据原始试验工作编写的。在把这些报告汇集成本书的过程中，我们尽量解决某一特定专题在各类杂志中资料过于分散和由于篇幅所限资料又非常不足等问题。

因为换热，特别是沸腾换热的实际经验表明，试验是构成许

多理论研究的基础，所以本书的编写宗旨是，以详细描述试验程序、试验测定和广泛地用图表表示等方法来提供这样的基础。本书分为三部分：池沸腾、流动沸腾和物性的影响。书中讨论了核态沸腾、沸腾的临界点、向膜态沸腾的转化、两相流以及热力状态和物性的影响。每章都对技术发展水平作了概述并给出了大量的参考文献。

将原始的试验工作作这样的编写，意味着专家在理论和试验方面的兴趣与从事研究沸腾换热的研究人员或遇到实际问题的工程师们的兴趣是一样的。

现在对于沸腾换热还不能作出通用的描述，但是我们相信将有更多的文章来填补它的空白。

E. 哈 恩

目 录

第一部分 池 沸 腾

第一章 自然对流沸腾中的汽泡形成与换热	1
1. 引言	1
2. 汽泡形成	1
3. 换热	9
4. 临界热通量	14
5. 过渡沸腾与膜态沸腾	15
参考文献	16
第二章 用激光干涉仪观察汽泡生长、汽泡动力学和核态 沸腾中的换热	19
1. 汽泡生长	19
2. 汽泡脱离	25
3. 从加热表面到液体的沸腾换热	34
符号	49
参考文献	51
第三章 水和氯化钠水溶液核态池沸腾时汽泡的脱离直径 和释放频率	52
1. 引言	52
2. 成核地点	53
3. 测量方法及设备	55
4. 试验程序	57
5. 试验数据和结果	57
6. 脱离直径和频率之间的关系	64
7. 试验数据的无因次表达式	69
8. 小结	71
符号	72
参考文献	73

第四章 人造汽泡发生用的空穴表面上池沸腾换热和

汽泡的生长	76
-------------	----

1. 引言	76
2. 试验装置	76
3. 结果	78
符号	82
参考文献	82

第五章 压力直至临界点时, 烧毁点及莱顿弗斯特点的

换热	83
----------	----

1. 引言	83
2. 装置及试验程序	84
3. 结果	85
符号	96
参考文献	96

第六章 池沸腾中流体动力与表面状态对最大热通量的

影响	97
----------	----

1. 引言	97
2. 烧毁关联式	97
3. 试验	101
4. 结果	107
5. 结果讨论	127
6. 结论	132
符号	133
参考文献	134

第七章 饱和压力直至临界值的池沸腾换热

1. 引言	137
2. 试验装置	138
3. 试验结果	142
4. 热物性对 α 的压力依赖关系的影响	151
符号	158
参考文献	159

第八章 热力学临界区内的池沸腾换热: 压力和几何形状

的影响	161
-----------	-----

1. 引言	161
-------------	-----

2. 试验装置和试验方法	161
3. 热物性	164
4. 试验结果	165
5. 物理解释	176
6. 无因次关联式	177
7. 总结	202
符号	203
参考文献	204

第九章 核态沸腾与膜态沸腾区内二元混合物的沸腾换热 208

1. 引言	208
2. 试验装置	209
3. 结果	211
4. 结论	217
符号	217
参考文献	218

第二部分 流动 沸 腾

第十章 在环形湍流中过冷水的沸腾换热 219

1. 引言	219
2. 表面沸腾的换热方程	219
3. 试验装置	222
4. 试验结果的计算	225
5. 测量结果	223
6. 给定方程的修正	230
7. 最小热通量	232
8. 测量的重复性	233
9. 滞后现象	235
符号	236
参考文献	236

第十一章 流速对表面沸腾的影响 238

1. 引言	238
2. 试验装置	238
3. 试验结果	240
4. 受迫对流表面沸腾换热系数关联式	242
符号	248

参考文献	248
第十二章 核态沸腾换热随压力的增加	249
1. 引言	249
2. 设备	249
3. 试验结果	251
4. 因次分析	253
5. 与文献数据的比较	257
符号	260
参考文献	261
第十三章 液氮流过水平管道沸腾时的换热和压降	262
1. 饱和流动沸腾	262
2. 压降	286
符号	303
参考文献	304
第十四章 氦在水平管道内的受迫对流沸腾	307
1. 引言	307
2. 现有资料的评述	307
3. 试验设备	309
4. 试验结果	315
5. 讨论	327
6. 结语	341
符号	342
参考文献	343
第十五章 水平管道内含有惰性气体时的蒸发	345
1. 引言	345
2. 物理问题和定义	345
3. 水平管道内液体-蒸气-惰性气体两相流换热的预计	348
4. 试验设备和试验程序	352
5. 试验结果的描述	353
符号	358
参考文献	359
第十六章 液汞的沸腾	360
1. 引言	360
2. 早先的研究	360

3. 试验设备	361
4. 初期的沸腾试验及其说明	362
5. 小结	385
符号	386
参考文献	387

第三部分 物性的影响

第十七章 液体粘度对汽泡形成和沸腾换热的影响

1. 引言	388
2. 试验计划	389
3. 理论述评	390
4. 试验设备和测量方法	398
5. 试验程序	401
6. 试验结果	402
符号	420
参考文献	421

第十八章 CO_2 、 CClF_3 、 CBrF_3 和 SF_6 的表面张力、共存

曲线和蒸气压同温度的关系

1. 引言	424
2. 试验设备和试验方法	426
3. 试验结果和数据分析	429
4. 比较	443
5. 结语	448
符号	449
参考文献	449

第十九章 液体亚稳态的研究

1. 引言	452
2. 亚稳态的崩溃限	452
3. 亚稳态物性	462
4. 结论	468
符号	468
参考文献	469

第一部分 池 沸 腾

第一章 自然对流沸腾中的 汽泡形成与换热

1. 引 言

广泛而深入地研究沸腾换热已有25年之久了。这门学科在解释许多单独的现象以及收集广泛的资料方面都已取得了成功。然而，正如萨伯斯基⁽¹⁾在他的论文“七十年代的传热学”中所指出的，在大多数情况下，要很准确地预计沸腾换热系数仍然是困难的，甚至是不可能的。为了能够为蒸发器设计提供可靠的数据，还需要进行大量的研究工作。由德国科学研究联合会倡议发起的“沸腾换热”联合计划所进行的研究工作为此提供了大量的新资料。本章概述了该计划在汽泡形成和自然对流沸腾研究方面的全部结果。

2. 汽 泡 形 成

汽泡核的形成、汽泡生长、汽泡脱离和汽泡上升是沸腾中决定沸腾换热机理的一些主要过程。可是要对这些过程进行精确的分析描述是不可能的，或者是只有做出大量的简化假定以后才能做到，而这些假定又要求用试验来检验。

一个众所周知的试验是：汽泡在受热面的某些个别点上产生，它们的数目随着热通量增加而增加。汽泡的形成始于俘获的少量气体或蒸气，它们总是出现在受热面的小空穴中。当液体有足够大的过热时，气体或蒸气开始长大，首先形成微小的汽泡，随后尺寸很快增大。

2.1 成核和汽泡形成

当壁面上形成过热边界层后, 汽泡开始长大。这个成核过程主要由空穴的密度、尺寸和分布这样一些参数决定。在空穴的几何因素及它们的分布对汽泡形成和换热的影响方面, 我们仍然缺乏足够的了解。因此, 大多数试验是用经擦光、车削、抛光、刚玉研磨及酸洗处理的自然表面进行的。在研究这些表面处理对换热的影响时, 由于忽略了空穴尺寸和分布的影响, 只能获得非常粗浅的知识。

希梅尔法恩尼格^[2]提出的新电铸法在这方向前迈进了一步。该法可以在表面上做出给定尺寸、形状及密度的空穴。试验证明, 在 $\dot{q}$ 、 ΔT 图上, 沸腾等压线的形状取决于空穴尺寸分布及形状。

空穴的尺寸分布范围越宽, 则激活一定数量空穴所需的过热度越高。因此当尺寸分布范围变得较宽时, 必定可以预料到在 $\dot{q}$ 、 ΔT 图上等压线有较小的斜率。相反, 当表面上均布着同样形状和尺寸的空穴时, 表面变得容易激活, 因此在 $\dot{q}$ 、 ΔT 图上产生了垂直等压线。于是实际的等压线必定是在自然对流等压线和垂直直线之间。自然对流等压线在双对数坐标图上的斜率为1.2。至今研究过的大多数加热器表面的空穴尺寸分布均是很宽的, 等压线斜率约为10/3。

另一方面, 非常光滑的表面会达到极高的过热度, 因此换热是以自然对流方式进行的。希梅尔法恩尼格^[2]已证明, 垂直等压线是可以产生的。科尔纳^[9]继续了他的试验。作为一个例子, 图1-1表示在一块水平平板上, 水和甲醇沸腾的 $\dot{q}$ 、 ΔT 图。该平板表面上有人造空穴, 其形状也表示在图1-1上。结果与自然空穴表面的试验曲线作了比较。其他一些学者^[3~6]也采用了人造空穴表面, 但得到了与希梅尔法恩尼格和科尔纳数据相反的结果, 其等压线与自然空穴表面的等压线没有差别。按科尔纳的看法, 可用这些空穴是由0.2毫米的小直径钻孔组成这一事实来解释。因钻孔直径太大以至于在孔内的微小空穴变成了成核地点。这些尺

寸较小的呈随机分布的空穴产生了通常的等压线。因此，在今后的试验中值得将产生通常等压线的表面类型以及何时能观察到不

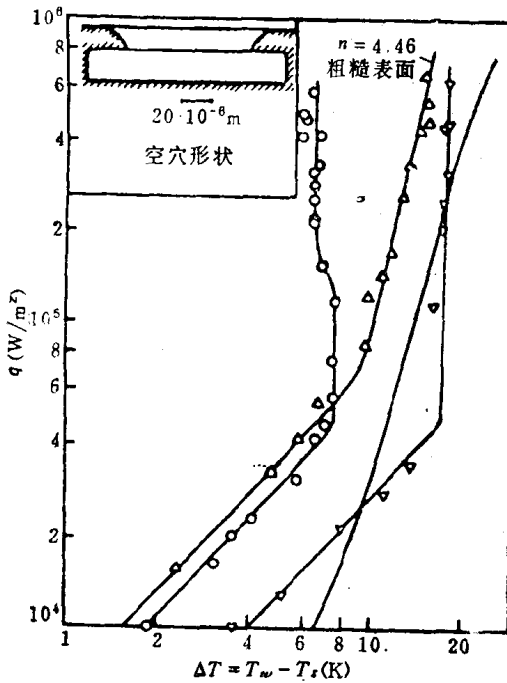


图1-1 自然空穴与人造空穴的 $\dot{q}$ 、 ΔT 图
 ○人造空穴 (CH_3OH)，△人造空穴，以后又弄粗糙 (CH_3OH)，▽人造空穴 (H_2O)，实线—自然空穴 (H_2O)。

规则特性这两个问题弄清楚。甚至通过仔细整理现有的试验数据，我们就能指出，自然表面上空穴的形状及尺寸的变化是很大的，因此个别空穴几何形状对换热没有任何影响。在大多数情况中，等压线有大致相同的平均斜率，这是由于各种因素，特别是空穴尺寸的随机分布和空穴形状以及对流换热三因素的相互作用造成的。对工业设备表面上的蒸发过程，最好采用较大的空穴，因为蒸发是在低过热度下发生，并且可用能的损失变小了。用人造空穴表面做试验，有助于更好地了解沸腾换热的基本原理。此外，

人造空穴表面也可用于提高临界热通量。但目前还不清楚这个效应在技术应用中可利用的程度，进一步的试验工作是必要的。

2.2 汽泡生长

迄今为止还没有理论能确定单个汽泡在随空间和时间生长过程中的热通量。当一个汽核发展成一个汽泡之后，它的生长速度主要由液体位移产生的惯性力决定。由于在过热边界层和生长着的汽泡之间有热通量，交界面附近液体温度下降。随之有一个从过热液体区到交界面的瞬态热通量。在这期间，汽泡直径 D 与时间 t 的平方根成正比增大

$$D = K \Delta T \sqrt{\lambda' \rho' c'} \sqrt{\frac{t}{r \rho''}} \quad (1)$$

在文献中可以找到不同的 K 值

$$K = 2\pi \quad \text{福斯特-朱伯}^{(8)}$$

$$K = \pi \quad \text{科尔-舒尔曼}^{(9)}$$

$$K = 5Pr \quad \text{库珀}^{(10)}$$

在非常详细的分析中，德田[●]⁽¹¹⁾指出，当一个汽核成长为一个汽泡之后，它的生长速度主要由蒸气-液体界面附近的热传导决定。此后不久，径向对流就变得越来越重要。在汽泡脱离壁面之后，控制机理就不仅是热传导和径向对流，也还有轴向对流。经过足够长的时间之后，热传导和轴向对流又变成主要过程。到那时，汽泡直径已变得相当大，以致直径增加很慢，径向对流可以忽略。德田的分析结果表明， D 正比于 $\sqrt{t}$ 的规律只对汽泡生长的较早阶段才成立。

比尔⁽¹²⁾做的试验已经证实，除了热传导以外，液体与蒸气之间的对流换热在汽泡生长中起着重要作用。在汽泡生长时，它们将穿过温度不同的液层，因此引起沿其表面温度的变化。而这又引起了表面张力梯度，产生了称为麦朗哥效应的表面流。这个

● 德田的分析是对二元混合物的。然而，作为一种极限情况，它也包括纯液体。

效应由麦朗哥数来描述

$$M = \frac{(\partial\sigma/\partial T)\dot{q}R^2c}{2}$$

按定义可知, 只要汽泡直径极小, 麦朗哥效应是不重要的。在导热良好或粘性很大的液体中也可以忽略。图 1-2 表示了由麦朗哥效应所引起的流动模式。

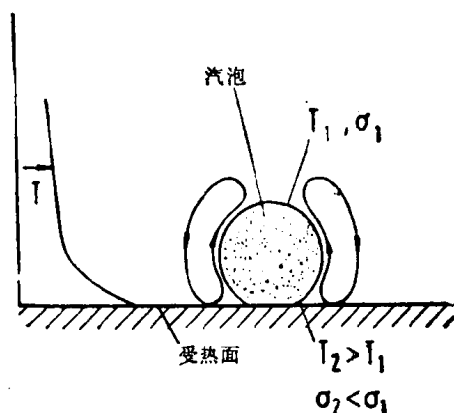


图1-2 麦朗哥效应

比尔的干涉照相表明, 在热力学平衡条件下, 不会发生汽泡的初始生长。只有汽泡的上面部分大多被等温线包围, 而在朝汽泡底部方向, 沿着汽泡的外表面温度有相当大的变化。如果考虑界面处对流, 则 $\sqrt{t}$ 的规律就不再成立。按比尔的分析, 我们得到如下方程

$$D = \left[0.234 \frac{\lambda'}{\rho''r} \left(-\frac{\rho}{\eta'^{1/2}} \frac{\Delta\sigma}{\Delta\phi} \right)^{0.68} \text{Pr}^{1/8} \right]^{0.68} \Delta T^{0.68} t^{0.68} \quad (2)$$

它与方程(1)不同, 但与比尔和其他作者的测量结果很相符。

在最近的试验中, 比尔⁽⁶⁾指出, 在 $D = Kt^n$ 中, 指数 n 随时间而变, 皮恩宁⁽¹⁶⁾也证实了此结果。根据马英厄和霍尔伯恩⁽¹⁷⁾所做的试验, 若采用无因次表示法, 画 $D' = D/D_A$ 为 $\tau^* = t/t_A$ 的函数曲线, 就可基本上消除指数 n 的时间相关性。用这种表示

法, 不同液体的汽泡生长函数曲线较好地重合了, 如图 1-3 所示。作为试验的下一步, 我们应当将汽泡生长的微分方程加以扩充以便将对流的影响也能包括进去。

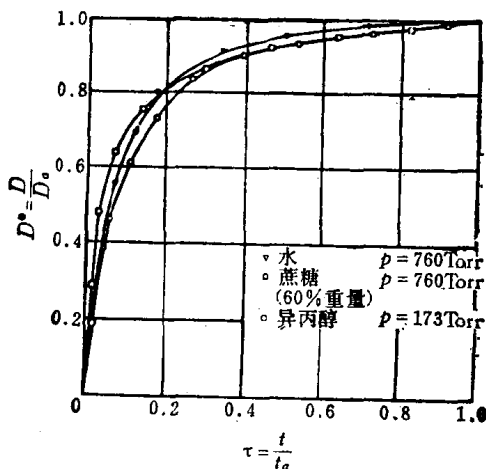


图1-3 汽泡生长, 按马英厄和霍尔伯恩

然后解偏微分方程给出温度分布、热通量分布和汽泡生长率。最近比尔^[15]已开始完成这类计算。

2.3 汽泡的脱离直径

有关汽泡脱离直径的早期研究是基于浮力与附着力之间的平衡假定。弗里茨^[13]的论文即是其中的一例。然而, 从试验知道, 实际的脱离直径要更大一些。图 1-4 表示的冯·科默恩^[14]用高速摄影机测得的脱离直径即为一例。其测量结果与弗里茨的平衡脱离直径进行了比较, 与试验值相反, 弗里茨所预计的脱离直径与温差 ΔT 无关。测量曲线表明, 在足够大的过热度下, 相邻汽泡之间的相互作用变得重要了。冯·科默恩的测量曲线清楚地表明, 过热度对脱离直径有很大的影响。然而, 这些曲线与刻尼格^[45]在人造空穴表面上测得的脱离直径曲线完全不同。该人造空穴表面是利用希梅尔法恩尼格的方法制备的, 其形状表示在图 1-1 上。因此, 我们可以得出如下结论: 显然空穴形状对汽泡的体积有决