

沸腾传热和两相流

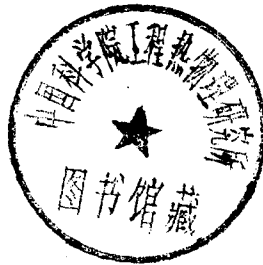
译文集

原子能出版社

4
2

72.54
312

沸腾传热和两相流 译文集



原子能出版社

↓ 100442

内 容 简 介

沸腾传热和两相流是从事热能动力、化工机械和核反应堆等方面工作的研究、设计人员十分关心的一个课题。本文集收集了近年来国外在这方面发表的比较重要的20篇文章。内容包括临界热通量、干涸、子通道交混、过冷沸腾起始点、过冷沸腾空泡份额、两相流动等方面的计算方法和机理研究。

本书可供从事热能动力、化工机械和核反应堆等方面工作的研究设计人员以及大专院校有关专业师生参考。

3 F64/31
06

沸腾传热和两相流译文集

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京印刷一厂印刷

(北京市西便门)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16·印张17 1/2·字数417千字

1981年12月第一版·1981年12月第一次印刷

印数001—1,800·统一书号:15175·337

定价:2.15元

译 者 的 话

沸腾传热和两相流是在许多核反应堆、普通锅炉、换热器和化工设备中都会遇到的热工水力现象。为了使在高热负荷下工作的核反应堆和其他传热设备能有更好的经济性和安全性，人们需要更加深入地掌握这方面的知识，包括更详细的机理、更准确的实验数据和更完善的计算方法。然而，这方面的中文参考书却几乎没有。为了了解近年来国外关于沸腾传热和两相流的研究成果，我们根据核反应堆热工研究设计的需要，收集和翻译了20篇有代表性的文章，内容涉及临界热通量、干涸、子通道交混、过冷沸腾和两相流动压降等各个方面。

这些文章是由孙玉发等20位同志分别译校的。中国科学院原子能研究所陈叔平同志总校了全书，谨在此表示感谢。

目 录

临界热通量——对最近公开文献的评述	1
高压水冷却棒束的临界热通量关系式	40
具有轴向非均匀热通量的高压棒束的DNB数据	51
汽水混合物在圆管内流动时的换热临界研究	72
水-水动力堆(BBΘP)棒束中换热临界的实验研究和数据的统计分析	77
水和汽水混合物冷却管状燃料元件时传热危机的计算方法	83
对全苏热工研究所推荐的圆管传热危机计算公式的意见	92
棒弯曲对临界热通量影响的研究	98
在反应堆运行工况下的干涸后传热	107
均匀加热竖管内环膜流烧干位置的计算模型	135
在单相和两相流动工况下棒束内质量通量和焓的分配	145
过冷沸腾的净蒸汽产生点和汽泡份额	167
水在过冷泡核流动沸腾时的空泡份额和沸腾起始点	174
强迫对流过冷沸腾——空泡份额的计算	190
过冷沸腾中汽泡份额的轴向分布	205
沸腾水在垂直棒束中流动时的压降和传热	218
蒸发通道内不平衡两相流的流体动力学特性和传热特性	227
高压水流动沸腾时泡状流与塞状流工况下漂移速度与空泡份额的确定	235
高压水在加热的四根棒束内的两相流动型式	246
汽水系统两相压降关系式的评价	261

临界热通量——对最近公开文献的评述

V. 马瑞内利 (Marinelli)

近20年来, 虽然对临界热通量(CHF)这个课题已经作了大量工作, 但设计时用来预算圆管、环形管和棒束内CHF的关系式至今仍然都是经验公式, 而且其适用的参数范围一般都有限。最近, 在模拟蒸发器和反应堆的大型试验段上都获得了CHF实验数据。考察这些新的数据和关系式, 再与老的实验结果联系起来, 就给出了其目前工艺水平的概貌。现有的理论分析强调了今后工作的重要性。为了使棒束关系式尽可能完善, 为了使它们对更宽的参数范围和特殊的几何通道也有效, 还需要做一些补充实验。间接加热问题还不很清楚, 因而还必须在理论分析方面继续努力。

一、引言

通常被称为“临界热通量”(CHF)的热危机的现象, 或者烧毁或干涸的现象, 就是局部传热系数的恶化。当含汽量、热通量、比流率等热工水力参数达到某个临界值时, 这种现象就会出现。临界热通量的现行定义是这样一种工况, 在该工况下, 热通量或流体入口温度稍微提高一些, 或入口质量流率稍微降低一些, 都会使系统中的传热过度恶化。^[1]

在诸如核加热、电加热或辐射加热这类由热通量控制的系统中, 热通量是一个独立变量, 伴随着CHF有表面温度的突然增高。然而, 在象热交换器这类由温度控制的系统中, 流体处于正在冷凝或蒸发的状态, 伴随着CHF的却是热流体与冷流体之间的传热下降。

最近20年来, 对CHF这个问题进行了细致的研究, 它对核反应堆的发展特别有帮助, 因为反应堆燃料元件的设计准则规定: 燃料元件必须在远离临界的工况下运行, 以保证包壳温度保持在低的安全值上。因此, CHF限制了从反应堆所能引出的最大功率。由于这个原因, 也由于商业上总是希望尽可能增加反应堆的功率(在反应堆安全容许的条件下), 因此CHF问题一直是一个理论研究和实验研究的课题。由于过去几年中在工艺上取得的进步, 目前已容许在试验段上进行实验, 甚至可以模拟全尺寸的燃料元件。用这些新的数据可以评定老的关系式和计算方法。这方面的一个例子是美国通用电气公司建造的17兆瓦的ATLAS回路和通用电气公司于1975年提出的新的GETAB CHF计算方法。

近几年来, 非核系统中(如蒸发器)的CHF研究工作有所增加, 其特点是采用了20多米长的长垂直管, 还用了其它各式各样的构形, 如水平管、倾斜管、蛇形管和螺旋盘管。这些装置上的运行参数范围也与核反应堆上的不同: 热通量很低(约0.1瓦/厘米²), 而压力很高(150—200巴), 除了几何形状和参数范围不同的问题以外, 对很多这类应用还要解决间接加热的问题。

目前还没有一个纯解析方法能够预算出任意的几何形状、流体和物理参数范围的棒束内乃至简单的垂直圆管内CHF的起始点。这是由于与发现CHF有关的传热和传质过程

极端复杂,而且它所涉及的机理还不完全清楚。对于过冷水的CHF来说,情况尤其如此,它的机理是假设的,与很确定的物理本质并不符合。然而,必须注意在两相环状流型式方面拥有大量的实际资料,特别是由于在英国哈威尔所进行的研究取得了令人鼓舞的初步成功,在那里理论分析工作正在进行中。

CHF问题目前总的工艺水平实质上是经验性的,为了设计应用需要继续提出各种经验关系式,并用实验来校核它。

在这篇评述中,概括了主要的计算方法,叙述了最近发表的成果,其目的在于提供CHF课题一个总的情况。

关于这里没有包括的材料以及其它一些资料,建议读者参看1974年在哈威尔召开的欧洲两相流会议上提出的Hewitt的评论^[1],参看Tong的专著^[2],其中也谈到了池内沸腾CHF和横流CHF。

二、垂直圆管中的对流CHF

被向上液流冷却的垂直圆管代表了所研究的最简单的几何通道,因为在这种情况下不存在棒束中定位架的影响,也不存在与相邻子通道的相互影响,因此可以研究基本的CHF机理。研究圆管中CHF的意义有二:一方面是为了在核燃料元件中应用,因为很多棒束的计算方法是从圆管关系式出发,再加一些修正而成的;另一方面是在几何形状正好是垂直圆管的情况下直接加以采用。

迄今,已经收集了大约20000个圆管的CHF实验点,并且提出了很多经验关系式;其中广泛应用的是Becker^[3]、Thompson和Macbeth^[4]、Tong等^[5]、Tong^[6](W-2和W-3)、Hewitt等^[7]、意大利实验研究资料中心(CISE)^[8]以及Bowring^[9](最新)等人的关系式。

显然,所有关系式的出发点都是CHF的实验数据,并且假设它不受误差的影响。然而,如果将不同实验室中得到的CHF数据加以比较,可以发现相同的名义工况下存在着很大的差别。这意味着某几组数据可能是错误的,或者是因为二次变量不能完全加以控制而使CHF不能完全重复。因此,在评定一个关系式的优缺点以前,必须先知道CHF的重复性。在1970年,全欧洲的实验室在相同的圆管($d=1.0$ 厘米, $L=200$ 厘米)中共得到589个数据点,其参数范围是:压力为30、50、70和90巴,质量流速在200和600公斤/米²·秒之间,入口过冷度在30和450千焦尔/公斤之间。图1将压力为70巴的这些数据作了比较。Gaspari和Hassid^[11]比较了在所有实验室都包括的参数范围内的363个数据点,发现有两个实验室中得到的某几组数据与其它实验室的结果相差高达30%。如果把这些异常的数据略去,他们发现选出的268个数据点的均方根偏差是4.2%,与通过这些数据点的最佳拟合曲线的最大偏差以临界功率来表示是-14%和+19%。如果全部数据都考虑在内,则均方根误差是9.8%,偏差在-26%和+45%之间。这些结果表明,均方根偏差为10%的CHF关系式接近于实验的最佳拟合曲线,并且即使对实验数据进行精选(这常常是一件困难的工作),由于受数据重复性的限制,关系式的均方根偏差也不可能小于5%,而偏差在±15%以内。

Becker^[12]等把米兰的重复性数据与好几个关系式作了比较,得到了表1中所示的结

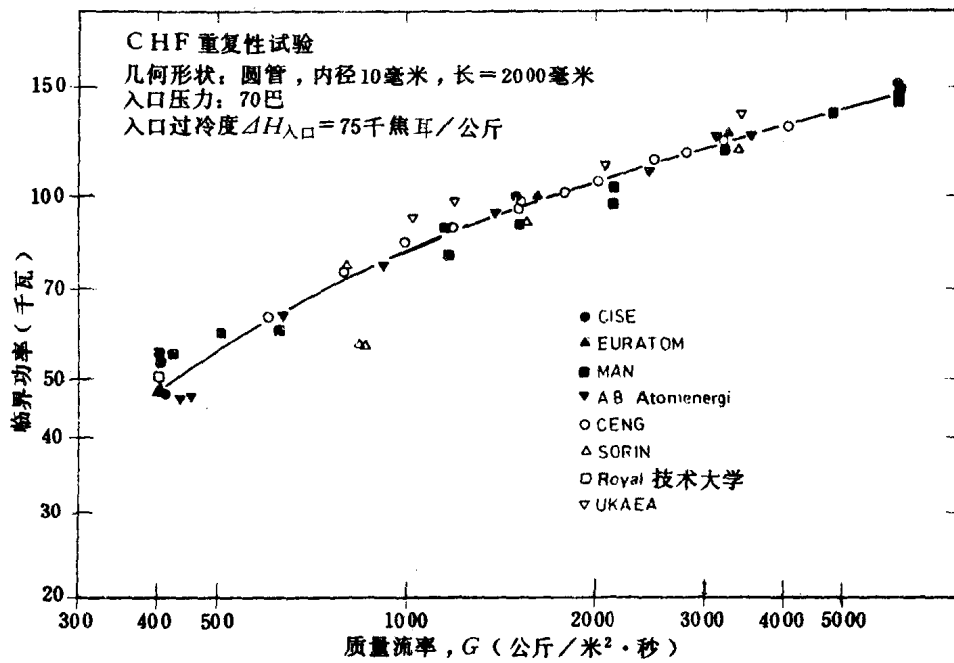


图 1 临界功率与质量流率的关系^[11]

果，它们证实了前面的数字。

每一个实验关系式都是从特定的参数工况下完成的试验得到的；当将关系式外推到其它工况时，误差可能很大，因此作这种外推必须小心。对于小直径管 ($d = 3$ 毫米) 和大长度管 (7100 毫米) 这两种特殊情况，在图2和图3上把数据与某些关系式作了比较，发现大多数

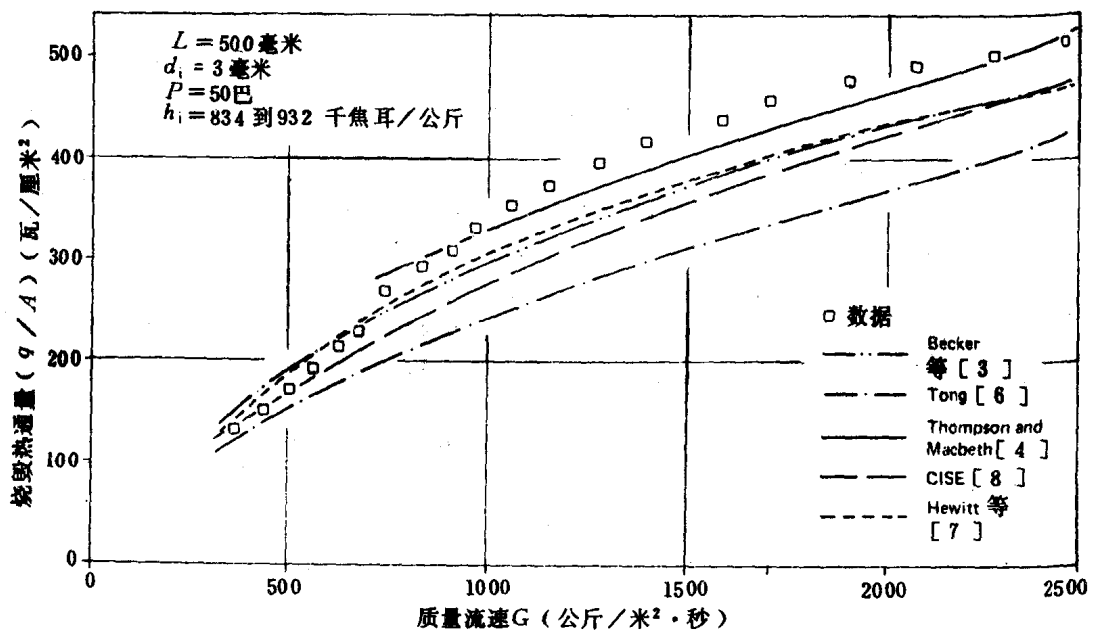


图 2 各烧毁关系式之间的比较^[12]

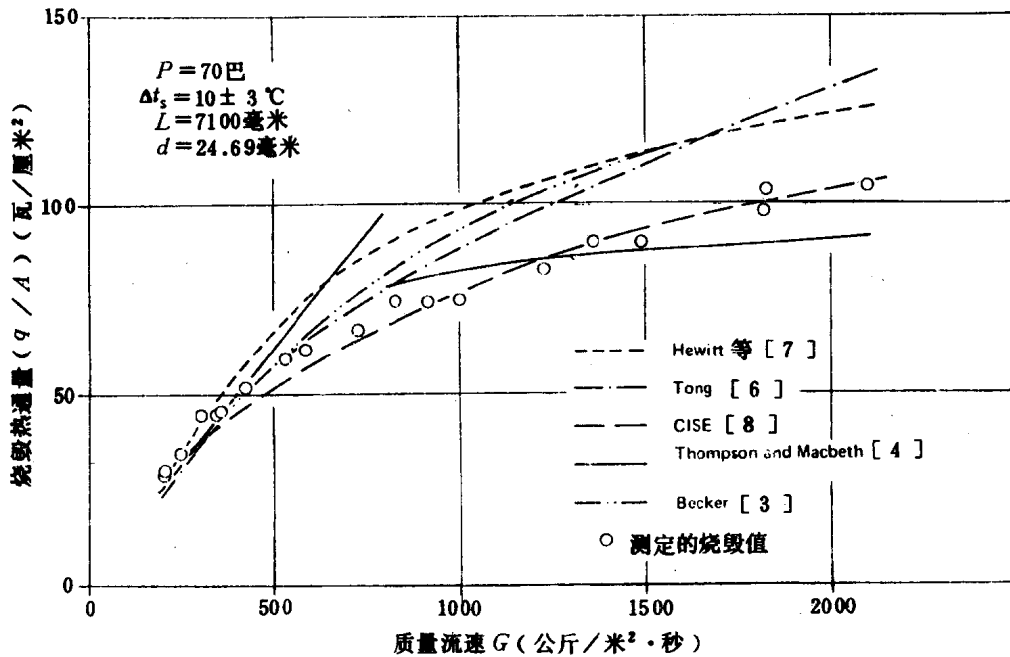


图 3 测定的和预算的烧毁工况^[12]

关系式对它们是不适用的^[12]。

在高压范围 (100—200 巴) 内, Becker 等^[13]得到了管子内径为 10 毫米、长度分别为 2000、3000 和 5000 毫米的数据。他们发现,在低压和中压下使用很成功的 Becker 烧毁参数 ($10^5/G^{0.5}\phi$) 不能用于出现过冷影响的高压情况(图 4)。因此,作者提出了一个新的关系式,它与系统参数有关,并只适用于一定的流速范围,该范围取决于压力。最后这个关系式与 Becker 等的的数据, Herkenrath 的数据 ($d = 10$ 毫米, $L = 5500$ 毫米, $p = 140-205$ 巴) 和 Peskov 的数据 ($d = 8$ 毫米, $L = 1650$ 毫米, $p = 120-200$ 巴) 的比较表明:它的性能很好,均方根误差为 5—7%^[12]。同样的研究也表明:Lee^[14]和 Peskov 等^[15]的高压数据关系式是非常精确的。

Campolunghi 等^[16]在一个长 22 米和内径为 12 毫米的试验段上获得了 CHF 数据,该试验段前 11 米是盘管(盘旋直径 $D = 0.8$ 米),后面 11 米是直管,试验参数是: P 为 50—160 公斤/厘米², G 为 1100—2500 公斤/(米²·秒),热通量为 15—40 瓦/厘米²。在此实验中热通量是外加的,而 CHF 点由壁温分布曲线确定。数据表明了临界含汽量随压力变化特性的趋向。在压力为 90—110 公斤/厘米² 的区间,临界含汽量明显下降(图 5)。从这些试验看

表 1 米兰的数据与各烧毁关系式之间的比较

	均 方 根 误 差 (%)					
	试验次数	Tong ^[6]	CISE ^[8]	Thompson和 Macbeth ^[4]	Hewitt等 ^[7]	Becker ^[3]
$G \leq 4000$ 公斤/米 ² ·秒	340	13.45	11.83	6.99	8.41	5.08
$G \geq 4000$ 公斤/米 ² ·秒	24	41.51	13.58	14.75	11.85	13.75
全部数据	364	16.82	11.94	7.75	8.64	6.05

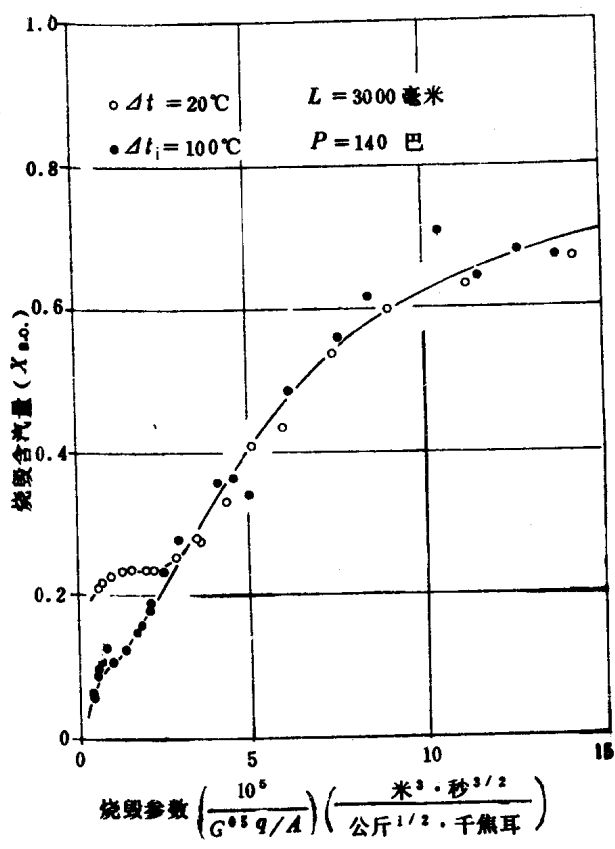


图 4 测定的烧毁工况：过冷的影响^[12]

来，在低压和高压下似乎存在CHF的两种机理。作者将他们的数据与各种关系式通过临界含汽量进行比较(图6)，发现在高压下与Becker等和Lee的关系式符合得很好，而在低压下却出现了大的误差。然而，临界含汽量的曲线图往往会夸大误差，而用临界热通量来表示时误差比较小。

Groeneveld^[17]在4500公斤/米²·秒以上的高质量流速下，在一个垂直均匀加热圆管中，得到了一个轴向延伸很小的上游段CHF。(临界热通量通常是随含汽量下降的函数，因此CHF一般都是先在下游段出现。)换句话说，Groeneveld的结果表明在热通量与含汽量的关系曲线上有一个最小值(图7)。这一实验的入口工况是软的(入口处有正的含汽量)，这可能会造成异常的效应，但是作者提到其他研究者用入口处为过冷氟利昂和过冷水时得到了类似结果。作者解释说(图8)在最小CHF的工况下，管子的上游段两相流型式是泡沫流，而管子的上部可能是环状流。在泡沫流型式下，贴近管壁处的汽泡份额比环状流时要大，这可能使贴近管壁处的热输运特性恶化，从而造成上游段CHF。

最近研究的一些领域涉及很低质量流速下的CHF，这对于自然循环的蒸发器和处于如失水事故(LOCA)这类事故工况下的核反应堆是有意义的。在后一种情况下，质量流速可能显著地减到接近于零，甚至可能发生流动停滞或流向反转(向下流)的情况。因此需要研究在低速下的CHF机理并获得数据和关系式。

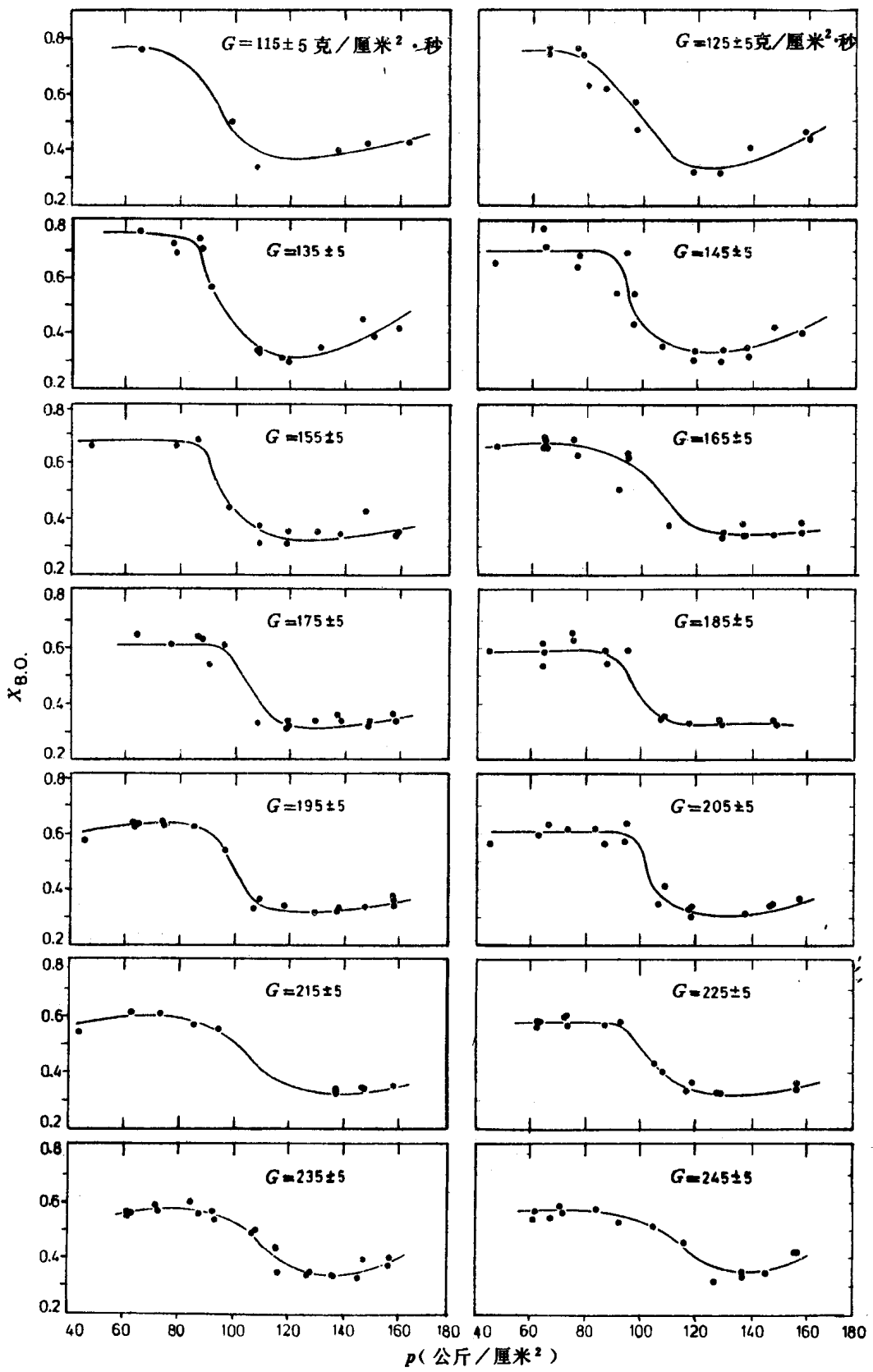


图 5 在不同流率下压力对烧毁含汽量的影响
可以明显看出通过90—100 公斤/厘米² 时有一个阶跃变化

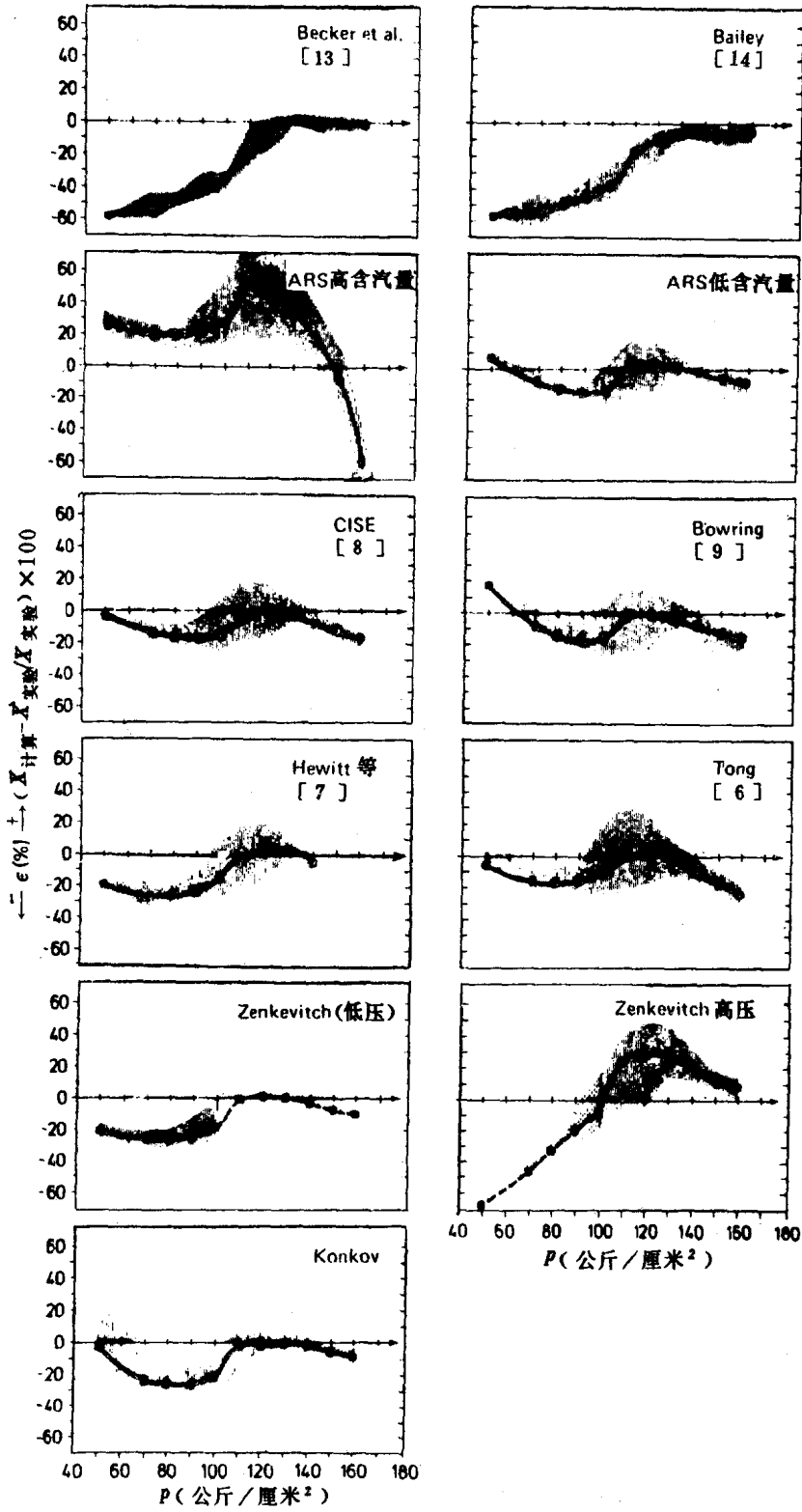


图 6 烧毁关系式与C-N-E-N实验数据的关系 (差值的百分数与 P_{BO} 的关系)
很多曲线都是S型的, 在90至110公斤/厘米²的范围内有剧烈的变化^[15]

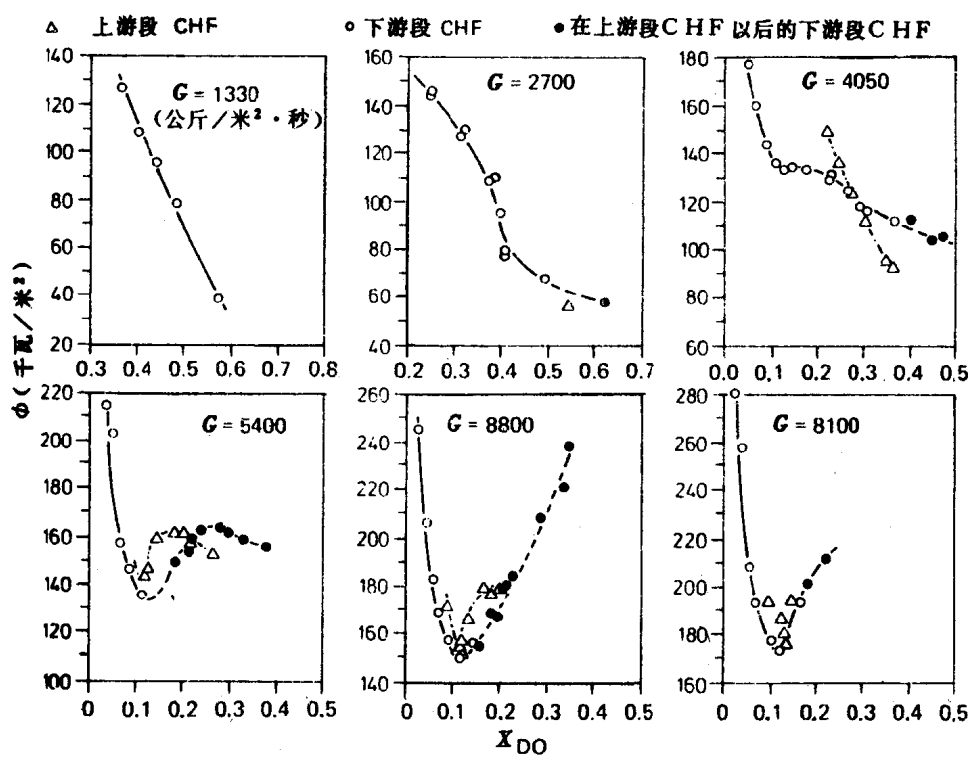


图 7 氟利昂-12在1.07兆帕和几种质量流率下,干涸热通量与局部干涸含汽量的关系^[17]

Barnard等^[18]测量了氟利昂-113在圆管内垂直向上流动时的CHF。圆管内径17.2毫米,长在15和100厘米之间,压力接近大气压,质量流速在0和320公斤/米²·秒之间。速度为零的数据是这样取得的:关闭入口阀,逐渐增加热通量,直到发生CHF为止。他们讨论了在速度为零和低流速下CHF的可能的机理(图9)。如图9所示,入口流速为零时,可能由于池内沸腾机理发生CHF(图9a),也可能由于淹没机理发生CHF(图9b)。在后一种情况下,如果蒸汽的质量流速(其值等于 ϕ/λ)妨碍足够的液体向下流动去润湿加热表面,CHF就发生了。在低的入口流速下,CHF可能发生于100%的含汽量下(没有夹带)(图9d),也可能发生于低于100%的含汽量下(夹带限制了CHF)(图9e),或者当液体向下流时,CHF可能发生于大于100%的含汽量下(图9c)(按入口流率算得)。通过对数据与计算结果比较,这些作者发现,在入口流速为零的情况下,较长管子的数据接近于用Wallis方程算得的淹没CHF值。然而,在较短管子中,数据接近于池内沸腾的Kutateladze-Zuber的关系式。然而,最后这一批数据与计算结果的差别很大,这表明两种机理可能同时并存(图10)。对于流速很低但不等于零的数据,他们发现CHF由于夹带而发生的,它接近于最低流速下的100%含汽量的线。对于这些实验,能发生液体下落的流率是很低的(图11)。

Shiralkar等^[19]假设了一种淹没机理,据此综合了于70公斤/厘米²压力下,在投入-切断-投入的流率瞬态过程中的CHF数据(图12)。

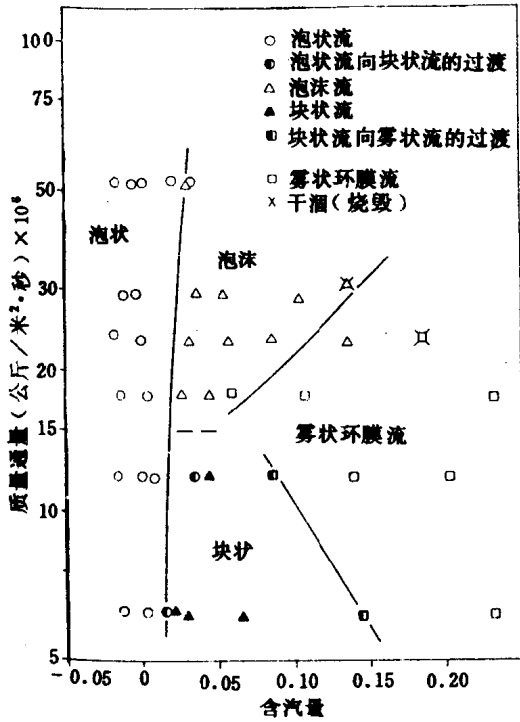


图 8 流动型式图 (引自fergles) 在 7 兆帕下有热量加入的汽水混合物^[7]

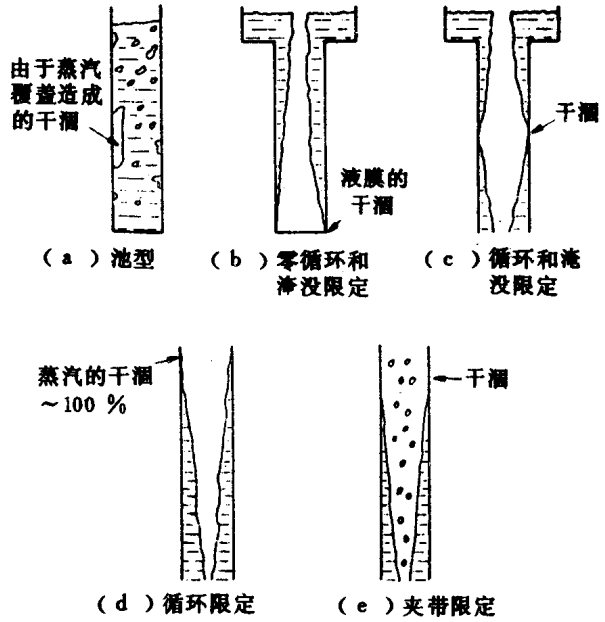


图 9 入口质量流速为零或很低时可能的干涸机理示意图^[18]

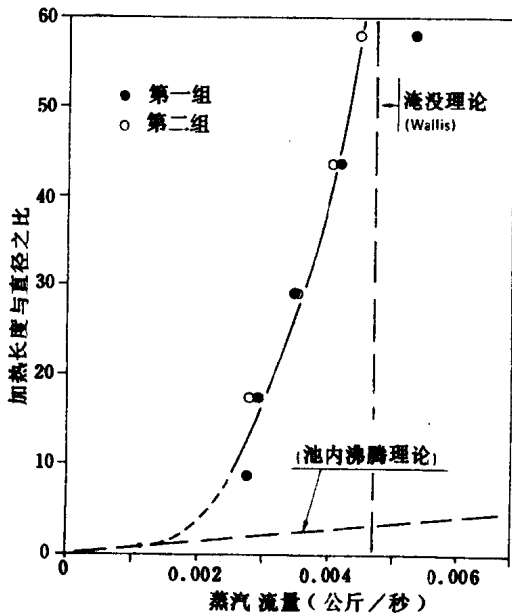


图 10 速度为零时在垂直管中的干涸^[8]

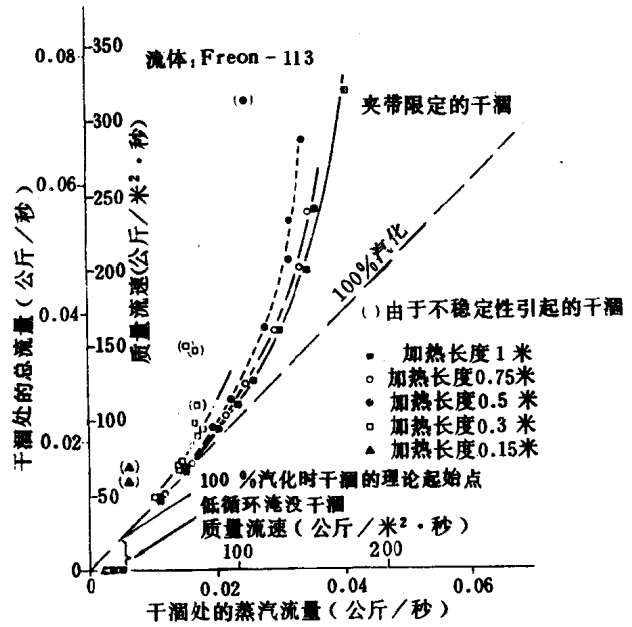


图 11 在垂直管中自然循环的干涸^[18]

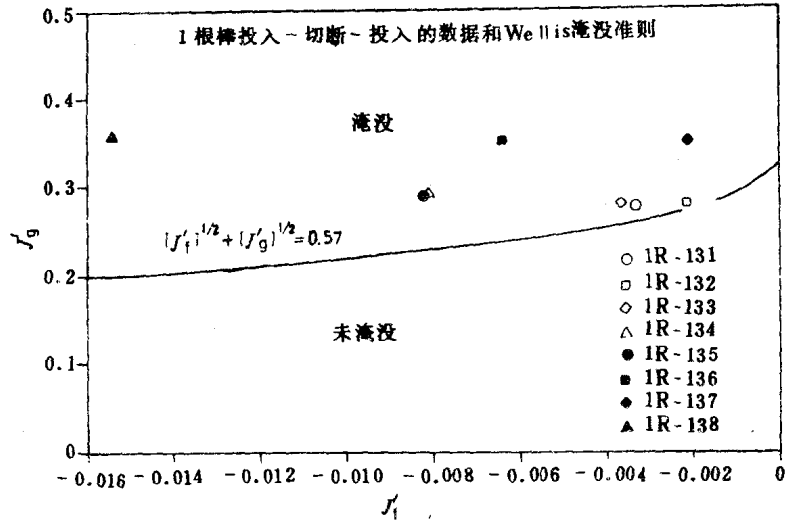


图 12 单棒几何通道的淹没数据和极限曲线

最近 Ceresa 等^[20]在 CISE 用不同直径和长度的管子作了试验，管子的加热段后面接了一个不加热的提升管（图 13），得到了水由顶部下落而汽水混合物反向流动的间接实验证明。他们在低质量流速下 ($G < 800$ 公斤/米²·秒) 得到了大于 1 的临界含汽量（图 14）。事实上，当应用 Wallis 淹没方程时已估算出提升管中的蒸汽流速支持不住下落的液膜，因此后者可能进入加热的试验段中。看来在低流速区需要更好地解释其机理和评价其关系式。对于流动滞止和倒流的工况，例如在压水堆失水事故时发生的情况，目前还没有资料。

三、间接加热

在包含热流体和发生相变的冷流体的蒸发器中，例如在快增殖堆使用的钠-水直流蒸发器中，热通量不是外加的，而是由总热阻（钠侧热阻、金属热阻和水侧热阻之和）和两流体之间的温差决定的， $\phi(Z) = \Delta J(Z)/R(Z)$ 。温差曲线 [如果 $R(Z)$ 是常数，

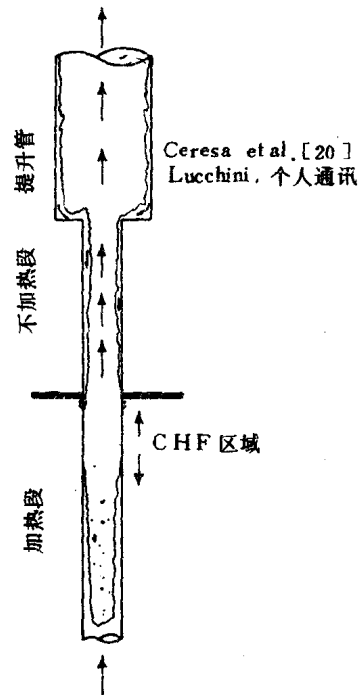


图 13 CHF 管形试验段的出口构形

则温差与热通量成正比] 是不均匀的，近似于梯形，这样造成了轴向不均匀热通量，其最大值与最小值之比可能很大。此外，当管子上某一点达到 CHF 时，水侧热阻的增加使局部热通量大大降低，这可能造成壁面的重新润湿，接着是一次新的干涸，此时壁温来回波动，这种波动还可能扰乱两相流边界层的流体动力特性。对于这种系统，是否能将现有的

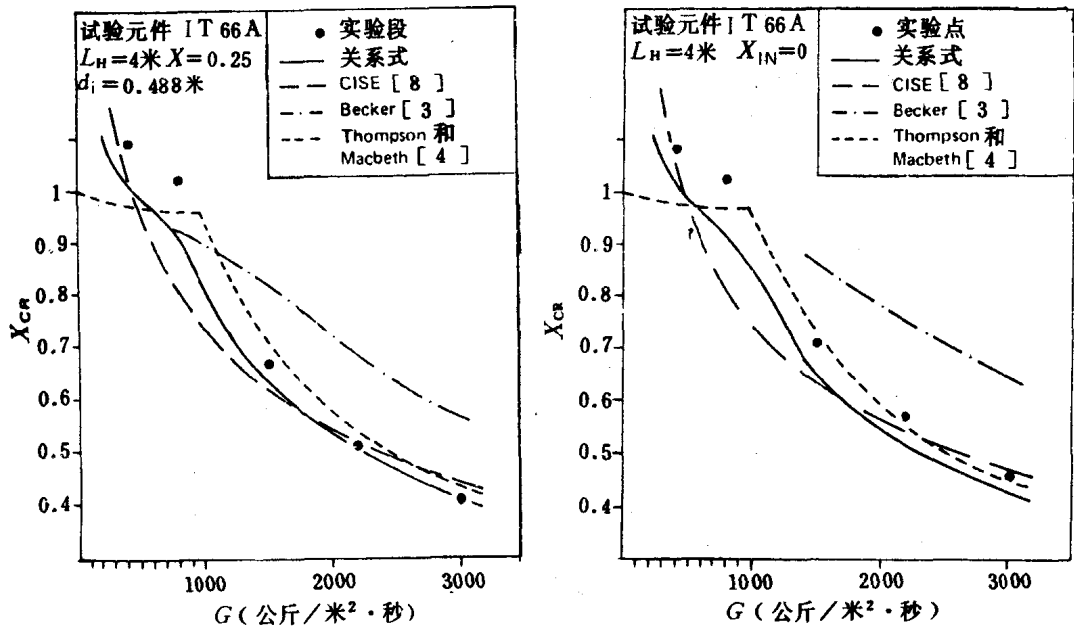


图 14 在 $X_{CR}-G$ 图上数据与所选择的 CHF 关系式之比较

用电加热（外加热通量）得出的 CHF 计算方法加以外推，或是否存在不同的 CHF 机理，目前还不清楚。一看就清楚，假如温度波动不是主要影响因素，则在电加热情况下得出的与轴向通量形式没有多大关系的临界含汽量随沸腾长度参数变化的关系可以采用。然而，现有数据很少，而且似乎是不一致的。

图15表示的是 de Munk^[21]所用的一个钠水试验段，图16给出了他得出的某些结果。他发现局部的实测通量与计算通量之间差别很大，但总传热的误差只有6%。他的结论与 France^[22]和 Cumo等^[23]的结果是不一致的。France用一个 $d = 1.09$ 厘米， $L = 142$ 厘米的试验段作实验^[22]，试验段用氟利昂-12冷却，来模拟70—155公斤/厘米²的水，并且用汞加热来模拟钠加热(图17)。所得的数据在以沸腾区的平均CHF与临界含汽量的关系[这些参数相当于 (x, L_B)] 来表示时，比用电加热得到的数据低得多。按照 France 的结果，这意味着采用一般的 CHF 关系式并不保守。另一方面，Cumo等^[23]得出了相反的结果：用间接加热法得到的临界功率比用直接加热法得到的高。看来在这一领域内需要

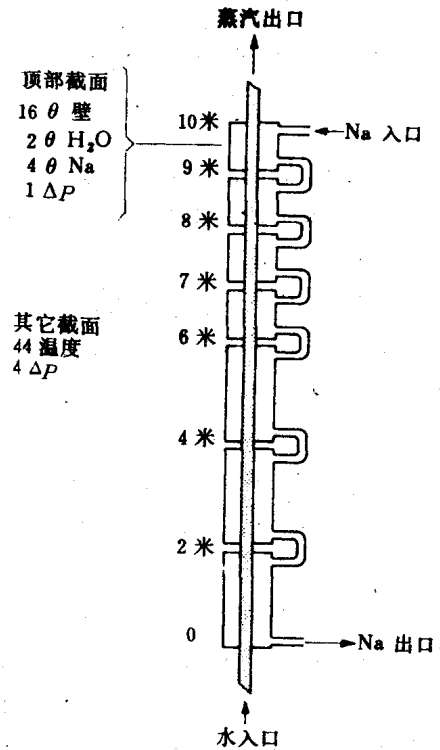


图 15 用于传热和压降测量的试验段^[21]

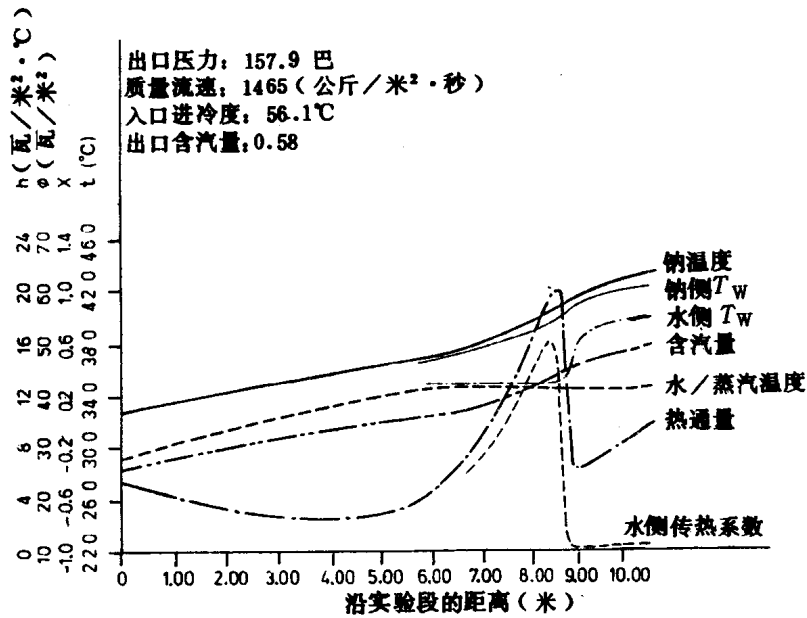


图 16 试验段测量值的图^[21]

作进一步的实验*。

四、在垂直环形通道中的CHF

做环形几何通道实验的意义在于：在棒束中棒周围的流动结构都是环形的，而且棒束外围子通道可以看作是一个环形通道的一部分，这个环形通道内侧是加热棒，外套管是不加热的。对内侧加热的环形通道来说，可用的关系式有 Tong^[2]、Janssen 和 Kervinen^[24]、Bartoletti 等^[25]、Hewitt 等^[7]、Becker^[26] 和 Barnett^[27] 等人的关系式。

Jensen 和 Mannov^[28] 测量了一个环形通道内 69 巴的 CHF 数据，环形通道尺寸为 17 × 26 × 3500 毫米，内外表面都加热。图 18 表明，当外管功率与总功率之比低于 75% 时，CHF 发生在内棒上，高于 75% 时，CHF 就发生在外管上发生。这些数据对于评价 CHF 模型和关系式是很有意义的。

Lee 和 Bowditch^[29] 在一个偏心的环形几何通道中研究了加热棒和不加热平板之间

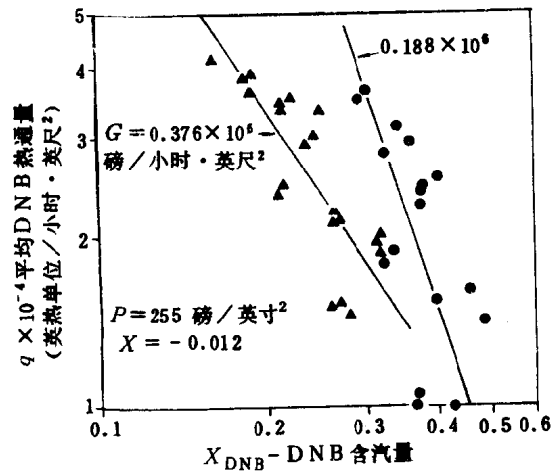


图 17 流率对高压下间接加热 CHF 数据的影响 (氟利昂-12 和汞)^[22]

* Palazzi 在 CNEN 得到的新数据表明：至少在轴向热通量分布不均匀性小于 1.6 的情况下，在 ±20% 的误差以内，两种基本的加热情况实际上给出了相同的烧蚀含汽量。