

流动沸腾核态抑制的实验研究

白博峰¹, 姜 茂¹, 闫 鹏²

(1. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 中国新时代国际工程公司, 陕西 西安 710054)

摘要:通过对水在垂直矩形通道内的流动沸腾实验,研究了流动沸腾核态抑制的规律,确定了不同流动沸腾区域的分布。沸腾抑制点参数,可以用空穴最大和最小半径的比值表示 $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}}$,描述不同的流动沸腾状态。当最大空穴半径趋近于最小空穴半径时,活化核心密度减小,核态沸腾受到抑制。最大空穴半径的变化是决定流动沸腾抑制点参数的主因。流动沸腾的 3 个状态分布如下: $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 40$, 对流沸腾状态; $40 < (r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 120$, 不确定状态; $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} > 120$, 核态沸腾状态。

关键词:流动沸腾;核态抑制;活化核心密度

中图分类号: TK 124

文献标识码: A

文章编号: 1005-9954(2008)09-0015-04

Experimental researches on nucleation restrains in flow boiling

BAI Bo-feng¹, JIANG Mao¹, YAN Peng²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. China New Era International Engineering

Corporation, Xi'an 710054, Shaanxi Province, China)

Abstract: An experimental measurement was conducted with water flow boiling in an upward channel to investigate the nucleation restrain and boiling state. The non-dimensional parameter for nucleation restrains $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}}$ can be defined by the ratio of cavity maximum radius and minimum radius, which is used to describe the flow boiling state. When the maximum radius approaches to the minimum, the active nucleation sites density decreases and the nucleation boiling is restrained. The flow boiling has three states as follows: $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 40$ for counter flow boiling state, $40 < (r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 120$ for uncertain state, $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} > 120$ for nucleation boiling state.

Key words: flow boiling; nucleation restrains; active nucleation sites density

流动沸腾传热存在多种机理,很多学者提出了不同的关联式。应用较广的 Chen 公式^[1]认为沸腾传热主要存在对流传热和蒸发潜热 2 种机理,即沸腾传热系数由主流体混乱流动引起的对流传热系数及由于气泡产生引起的微对流传热系数 2 部分组成。随着研究的深入,学者发现 2 种机理有各自不同的存在区域。Kenning 和 Cooper^[2]进行的饱和流动沸腾实验结果证实了 2 个流动沸腾区域:明显的对流区域和明显的核态沸腾区域。Thomcroft 和 Klausner^[3]实验发现了流动沸腾存在核态抑制现象,并得到了抑制点的分布规律。Jalilouk^[4]黄铜管内 R114 流动沸腾实验以及 Zeng 和 Klausner^[5]镍铬铁合金表

面 R113 水平流动沸腾实验都表明流动沸腾存在 2 种状态,核态沸腾会在某种临界条件下停止。综合研究发现,在对流区域,传热系数与热流密度以及加热表面条件无关,活化核心被完全抑制,传热主要通过主流混乱流动以及液膜蒸发来实现,传热系数可通过关联式预测,误差较小;在核态沸腾区域,传热系数与质量流量、干度等无关,受加热表面条件和气泡产生过程的影响显著,传热主要是通过气泡的生长和脱离来实现,预测困难。

本文通过对水在垂直矩形通道内的流动沸腾实验研究,揭示出流动沸腾核态抑制的规律,确定流动沸腾不同区域的分布。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50476050);新世纪优秀人才计划资助(NCET-04-0923)

作者简介:白博峰(1971—),男,教授,研究方向为多相流热物理, E-mail: bfbai@mail.xjtu.edu.cn

1 实验系统

实验系统见图 1,主要由缓冲水箱、循环泵、流量计、电加热预热器、实验段、冷凝器及相关的连接管路和阀门组成。沸腾工质选用去离子水。实验系统选用变频泵,流量采用孔板流量计测量。

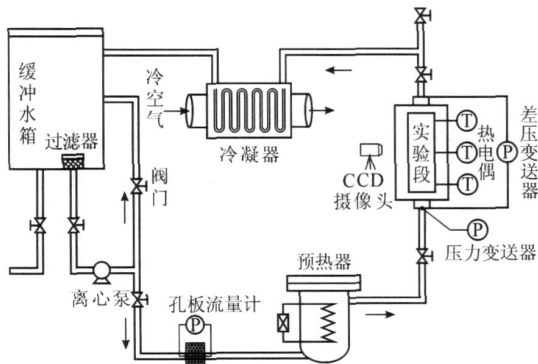


图 1 流动沸腾实验系统示意图

Fig 1 Experimental apparatus of flow boiling

如图 2 所示,实验段为垂直放置单侧电加热的矩形通道,由流道主体和插入的加热板组成。主体采用透光性良好的聚碳酸酯板,宽 13 mm,厚 10 mm。整个实验段长度为 900 mm,其中加热区 300 mm,进口段 450 mm,尾部稳定段 150 mm。加热板采用冷轧不锈钢板,厚度 0.13 mm,宽度 9 mm,长度 298 mm,固定在酚醛塑料上以减少热损失。实验段通过大电流发生器进行加热。在加热板背面 4 mm × 4 mm 的区域上均匀布置 16 对 T 型热电偶以测量瞬态壁温,测点间距为 1 mm,数据采集频率为 2 000 Hz。热电偶直径 0.125 mm,不确定度为 0.1 K。使用高速摄像机对实验过程中加热板表面的气泡形态进行观察和记录。实验参数范围:质量流速 280—670 kg/(m² · s),实验段入口过冷度 - 2— - 25 K,压力 0.11—0.115 MPa。

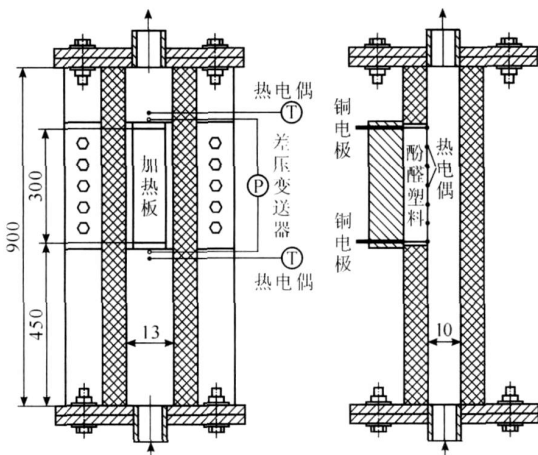


图 2 实验段结构示意图

Fig 2 Configuration of test section

2 核化抑制模型

核化抑制即活化核心(核化点)失去活性。在一定条件下加热面的空穴实现活化,其半径要满足一定条件。定义 r_{max} , r_{min} , 能够产生气泡的最大和最小空穴半径 (m)。当 $r_{max} < r_{min}$ 时,半径在 r_{max} 和 r_{min} 之间的空穴概率减小,活化核心密度减小,核态沸腾减弱。因此可以用这 2 个极限半径来表示核态沸腾的状态^[6]。对流动沸腾的 r_{max} 和 r_{min} 进行计算,考虑表面空穴产生一半球形气泡,同时假设气泡胚芽半径小于热边界层厚度,胚芽周围的温度场近似为线性的,如图 3。

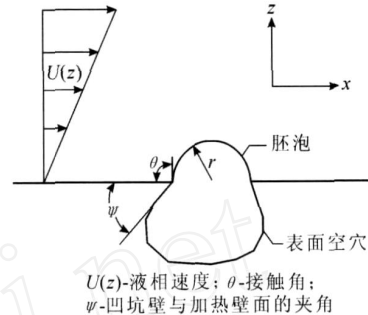


图 3 气泡产生示意图

Fig 3 Sketch of bubble generation

近壁面温度场 $T_L(z)$ 可以表示为^[5]

$$T_L(z) = T_w - \frac{h_{mac} z}{L} T_{sat} \quad (1)$$

式中: T_w 为平均壁面温度, K; h_{mac} 为对流传热系数, W/(m² · K); T_{sat} 为壁面过热度, K; L 为水的导热系数, W/(m · K)。引入 Bergeles 和 Rohsenow^[7] 起气泡产生条件: 只有当半球形气泡顶部的液体温度 T_L 超过气泡的饱和温度 T_v , 气泡才会生长。假设气泡温度均匀, 由 Clapeyron 方程得

$$T_v - T_{sat} = \frac{T_v T_{sat} R}{h_{fg}} \ln \left(1 + \frac{2}{\rho_{sat}} \right) \quad (2)$$

式中: R 为气体常数; p_{sat} 为液体饱和压力, Pa; T_{sat} 为液体饱和温度, K; σ 为表面张力, N/m; h_{fg} 为汽化潜热, J/kg; r 为空穴半径, m。在公式 (1) 中设 $T_L = T_v$, $z = r$, 联合公式 (2) 求解。在大多数情况下, 可以认为 $\ln \left(1 + \frac{2}{\rho_{sat}} \right) \approx \frac{2}{\rho_{sat}}$, 联合理想气体定律求解方程得到

$$\frac{h_{mac} r}{k_L} = 1 - \frac{T_{sat} 2}{h_{fg} T_{sat} r} \quad (3)$$

方程 (3) 为 r 的二次方程, 其解分别对应 r_{max} 和 r_{min} 。在大多数情况下 $T_{sat} 2 / (h_{fg} T_{sat} r)$ 较小, 因此得到 2 个极限半径表达式为

$$r_{max} = \frac{k_L}{h_{mac}}, \quad r_{min} = \frac{T_{sat} 2}{T_{sat} h_{fg}} \quad (4)$$

量纲一参数 k_{max}/k_{min} 表达式为

$$N_B = \frac{k_{max}}{k_{min}} = \frac{T_{sat} k_L v h_{fg}}{h_{mac} T_{sat} 2} \quad (5)$$

当上面方程推导中的近似假设不满足时,可用迭代的方法求解。注意到 Bergeles 和 Rohsenow 起泡泡条件应用的极限是 $k_{max}/k_{min} = 4$ 。可以考虑无量纲参数 $N_B = k_{max}/k_{min}$ 作为活化核心密度的关联参数,表示核态沸腾中活化核心的形成和抑制状态。

3 核态沸腾抑制点的确定

对于流动沸腾,其核态沸腾的抑制点即为对流传热区和核态沸腾区的分界点。由于对流传热区域的传热系数与热流密度无关,传热量正比于壁面过热度,且成线性关系。因此可以通过沸腾曲线,找到线性关系偏离点,即为沸腾的抑制点,图 4 给出了流体入口过冷度 $T_{in} = -10\text{ K}$ 质量流速 $q = 476\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下的沸腾曲线。在 k_{max}/k_{min} 的计算中,主对流传热系数通过对流区域沸腾曲线上壁面热流密度 q_w 对 T_{sat} 的斜率来得到。

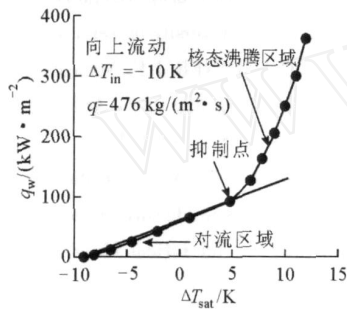


图 4 流动沸腾曲线
Fig 4 Flow boiling curve

4 核态抑制的规律

表 1 为核态沸腾抑制点实验数据。主流过冷度、热流密度以及质量流量对 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 的影响结果见图 5、6。大多数 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 数值都集中分布一小区域内, $65 < (k_{max}/k_{min})_{sup} < 95$, $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 几乎不受质量流量的影响,当质量流量从 $280\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 增大到 $670\text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 都没有发生太大变化; $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 随主流过冷度的减小呈现整体减小的趋势。对于过冷沸腾,当核态沸腾发生,即抑制点出现时,主流区过冷流体通过对流与导热方式影响气泡产生区域,使大空穴上的大气泡受冷却而不能成核,因此过冷度较大的情况下 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 值较大。这样看来 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 中起主导影响的是 k_{max} , 它控制无量纲参数 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 的变化。这和 Thomcroft 和 Klausner^[3] 观点吻合,但是和池沸腾有显著差异。池沸腾由于热边界层没有流动干扰,一

般空穴上的气泡半径可视为无限大,因此计算池沸腾活化核心密度时都假设 k_{min} 无穷大;而在流动沸腾中,由于流动造成热边界层厚度减小, k_{max} 是限制活化核心密度的主要原因。在实验参数范围内,热流密度对 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 的影响不很明显。

表 1 核态沸腾抑制点实验数据

Table 1 Restraining point of nucleation boiling in the experiment

$q / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	T_f / K	$q_w / (\text{KW} \cdot \text{m}^{-2})$	T_{sat} / K	$h_{mac} / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1})$	$(\frac{k_{max}}{k_{min}})_{sup}$
296	-10	24.80	3.85	6292.1	71.28
286	-17	30.00	4.43	6292.1	109.00
281	-23	55.03	3.91	5981.0	91.18
292	-2	22.20	4.32	6417.4	86.95
381	-10	55.36	3.20	6387.1	74.03
383	-16	50.26	3.60	6354.7	78.69
379	-20	72.61	3.12	6845.0	91.49
382	-1	52.56	3.35	7067.5	73.23
475	-15	72.70	3.78	7499.5	83.70
476	-9	82.54	4.31	7877.5	66.46
481	-21	78.60	4.11	7782.5	85.46
472	-2	53.87	3.93	7743.6	69.21
571	-11	53.87	3.56	8357.0	69.26
576	-15	58.21	3.21	8212.3	74.12
569	-19	71.75	3.52	7903.4	90.39
568	-2	56.30	3.32	8545.0	75.36
663	-1	71.16	5.68	8480.2	71.03
666	-16	68.86	4.23	8212.3	86.03
662	-12	51.23	3.20	8616.2	67.02
670	-22	70.62	5.33	8458.6	92.59

T_f 为主流过冷度。

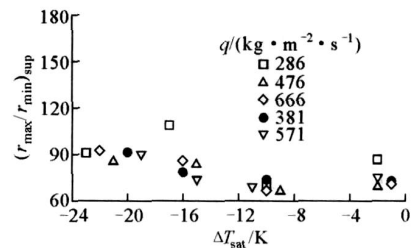


图 5 主流过冷度对 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 的影响
Fig.5 Effect of bulk fluid subcooling on $(k_{max}/k_{min})_{sup}$

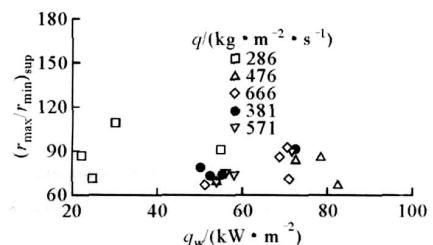


图 6 热流密度对 $(k_{max}/k_{min})_{sup}$ 的影响
Fig.6 Effect of heat flux on $(k_{max}/k_{min})_{sup}$

本文总结了前人相关的工作,包括 Kenning和 Cooper^[2]在垂直白铜管内的水沸腾实验数据、Jalouk^[4]黄铜管内 R114沸腾实验数据、Zeng和 Klausner^[5]镍铬铁合金表面 R113水平流动沸腾数据、以及 Thorncroft和 Klausner^[3]不锈钢表面 FC-87垂直流动沸腾数据。图 7可以看出 $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}}$ 随热流密度的增加略有增大, $40 < (r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 120$ 。 $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}}$ 受到流体的影响, FC-87对应值较小,水的空穴半径比值较大,主要是其加热面上的湿润特性不同。考虑到这些数据涉及了不同湿润性的代表性流体,归纳得到核态沸腾的 3 个状态: $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 40$,对流沸腾区,核态沸腾被抑制; $40 < (r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 120$,不确定状态,核态沸腾存在但不稳定; $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} > 120$,核态沸腾区。

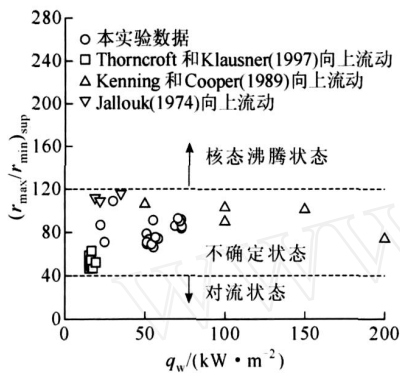


图 7 核态沸腾状态分布

Fig 7 State distribution of nucleation boiling

5 结论

实验得到了不同流动条件下沸腾过程抑制点的规律。过冷流动沸腾下,产生气泡的最大空穴直径 r_{\max} 相比池沸腾条件下要小, r_{\max} 的变化决定了 $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}}$ 的值,这与池沸腾中 r_{\max} 无穷大的假设存在较大

大差异。

综合不同流动条件、加热表面、沸腾工质的相关研究,发现对于不同沸腾介质该空穴尺寸比值差异较大,工质的湿润性对其影响存在较大。按照 $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}}$ 变化范围提出了流动沸腾的 3 个状态: $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 40$,对流沸腾状态; $40 < (r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} < 120$,不确定状态; $(r_{\max}/r_{\min})_{\text{sup}} > 120$,核态沸腾状态。

参考文献:

- [1] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. I&EC Proc Design and Development, 1966, 5 (3): 322-329.
- [2] KENNING D B R, COOPER M G. Saturated flow boiling of water in vertical tubes [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1989, 32 (3): 445-458.
- [3] THORNCROFT G E, KLAUSNER J F, MEIR. Suppression of flow boiling nucleation [J]. Journal of Heat Transfer, 1997, 119 (2): 517-526.
- [4] JALLOUK P A. Two-phase flow pressure drop and heat transfer characteristics of refrigerants in vertical tubes [D]. Knoxville: University of Tennessee, 1974.
- [5] ZENG L Z, KLAUSNER J F. Nucleation site density in forced convection boiling [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1993, 115 (1): 215-221.
- [6] YANG S R, KIM R H. A mathematical model of the pool boiling nucleation site density in terms of the surface characteristics [J]. Int J Heat Mass Transfer, 1988, 31 (4): 1127-1135.
- [7] BERGLES A E, ROHSENOW W M. The determination of forced-convection surface-boiling heat transfer [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1964, 86 (3): 365-372.
- [8] PETUKHOV B S. Heat transfer and friction in turbulent pipe flow with variable properties [J]. Advance in Heat Transfer, 1970 (6): 503-564.

【上接第 11 页】

- [8] EMITR M, REV E, FONYO Z. Economic and controllability investigation and comparison of energy integrated distillation schemes [J]. Chem Biochem Eng Q, 2003, 17 (1): 31-42.
- [9] REV E, EMITR M, SZITKA I Z. Energy-savings of integrated and coupled distillation systems [J]. Computers & Chem Eng, 2001, 25 (6): 119-140.
- [10] ANNAKOU O, MLZSEY P. Rigorous comparative study of energy-integrated distillation schemes [J]. Ind Eng Chem Res, 1996, 35: 1877-1885.
- [11] PARKINSON G. Distillation improvements could save U. S. industry up to \$6 billion/y [J]. Chem Eng, 2003, 110 (1): 15.
- [12] WANKAT P C. Multi-effect distillation processes [J]. Ind Eng Chem Res, 1997, 32 (5): 894-905.
- [13] AGRAWAL R, XU J. Multi-effect distillation for multi-component separation: US, 6263700 [P]. 2001-07-24.
- [14] ENGEL IEN H K, SKOGETAD S. Multi-effect distillation applied to an industrial case study [J]. Chem Eng Proc, 2005, 44: 819-826.