

液态钠临界热流密度实验研究

秋穗正, 张维忠, 廖义香, 贾斗南

(西安交通大学 核能与热能工程系, 陕西 西安 710049)

摘要: 在液钠沸腾试验回路上研究了入口过冷度、质量流量、系统压力和液钠两相流动不稳定性对液态钠临界热流密度(CHF)的影响机理, 并获得了液钠沸腾 CHF 的预测公式。

关键词: 快中子增殖堆; 液钠; 两相流; 临界热流密度

中图分类号: TL333

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2000) S0-0090-04

快堆的比功率大, 燃料元件须承受约比轻水堆高 4 倍的比功率及更大的温度梯度。当反应堆发生失流、失热阱、瞬态超功率、瞬态欠热、局部堵塞等事故时, 一旦冷却剂沸腾, 钠空泡的正反应性效应可能引起燃料元件的熔化和烧毁。燃料元件的熔化烧毁与液钠的临界热流密度密切相关^[1,2]。所以, 液钠沸腾临界热流密度的研究引起人们的极大重视。

1 试验装置及实验工作段

液钠沸腾试验回路系统示于图 1。回路从储钠箱汲取钠, 由电磁泵驱动流经钠-钠热交换器、预热器、实验段, 再流回钠-钠热交换器, 电磁流量计, 进行强迫循环。可置换的钠冷阱同时连续净化回路中的杂质。实验工作段由电加热元件、热块、试验管段、元件密封冷却装置、热电偶等

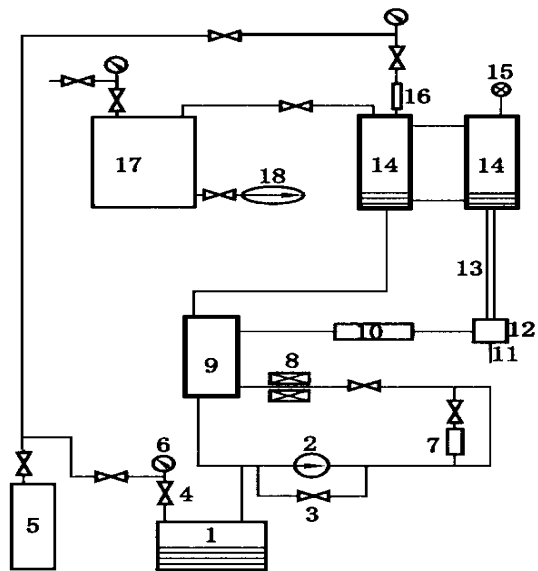


图 1 高温钠沸腾试验回路系统

Fig. 1 High temperature sodium boiling test system

- 1 — 储钠箱; 2 — 电磁泵; 3 — 钠阀; 4 — 真空隔离阀;
- 5 — 氦气瓶; 6 — 真空压力表; 7 — 钠净化冷阱; 8 — 电磁流量计;
- 9 — 钠-钠热交换器; 10 — 预热器; 11 — 电加热元件; 12 — 入口膨胀箱; 13 — 实验工作段; 14 — 出口膨胀箱; 15 — 液位探针;
- 16 — 钠蒸气阱; 17 — 稳压箱; 18 — 真空泵

收稿日期: 2000-01-10; 修回日期: 2000-03-10

作者简介: 秋穗正(1965—), 男, 陕西乾县人, 副教授, 博士, 反应堆工程与安全研究专业

组成。实验工作段最高温度达 1 200 ,最高热流密度为 192 W/cm²。

2 实验结果

液钠沸腾临界热流密度实验热工参数范围为:压力 850 ~ 5 × 10⁴ Pa;质量流速 40 ~ 570 kg/(m²·s);热流密度 0.128 ~ 1.07 MW/m²;入口过冷度 43.2 ~ 307.5 。当加热壁面温度达到 1 400 时,传热恶化,发生临界热流密度现象,加热元件被烧毁。

2.1 入口过冷度对 CHF 的影响

在压力为 3 kPa 和质量流速分别为 40、147 和 200 kg/(m²·s) 工况下,研究入口过冷度对 CHF 特性的影响。实验结果(图 2)表明:CHF 随入口过冷度增加呈明显的升高趋势。在高过冷度、高热流密度下,液钠特性决定了沸腾需要很高的壁面过热度,实验通道内一旦产生气泡,极易发生气泡爆炸性增长,造成局部压力剧增,使后续液钠再润湿气泡发生点受阻,加热壁面恶化,壁温骤升。入口过冷度越高,此效应越强。

2.2 质量流速对 CHF 的影响

在压力为 3 kPa、入口过冷度为 90.5 ~ 105.9 下,研究质量流速对 CHF 影响。实验结果表明:CHF 随质量流速增加而增大(图 3)。

质量流速较低时,易出现因蒸气爆炸机理的临界热流密度传热恶化。质量流速较高时,CHF 的机理是因液膜撕裂和局部蒸干引起的缺液传热恶化。高流速、高过冷度的 CHF 一般发生在块状流向环状流转换过程中,加热壁面的液膜产生的气泡造成气泡发生点干涸,后续液体中恰好有一大块气泡存在,使得气泡发生点干涸斑不能在短时间内再润湿而发生 CHF。高流速、低过冷度下,CHF 多发生在环状流向反向环状流的转换过程中,液膜内产生的大气泡造成局部压力增加,从而阻止后继主流液体再润湿壁面干涸点,甚至引起倒流而使传热恶化。

2.3 压力对 CHF 的影响

在入口过冷度约为 100 、质量流量为 212.5 kg/(m²·s) 的条件下,实验研究不同压力下的 CHF 的变化规律。图 4 所示的实验结果表明:CHF 随压力增加而增大。

压力升高,钠蒸气比热容减小,钠蒸气比热容与液钠比热容的比值减小,环形加热通道内发生如前所述的蒸气爆炸性生成或液膜撕裂和局部蒸干的两种传热机理引起的传热恶化时,

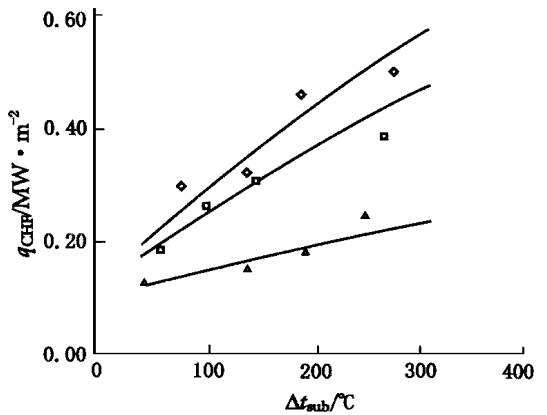


图 2 入口过冷度对 CHF 的影响

Fig. 2 The effects of inlet subcooling on CHF
 p = 3 kPa; G(kg·m⁻²·s⁻¹): —40.0 ~ 60.2, —134.7 ~ 153.5, —180.7 ~ 201.3

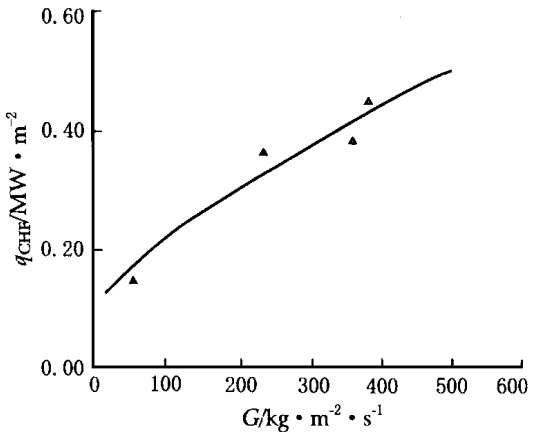


图 3 质量流速对临界热流密度的影响

Fig. 3 The effects of mass flow on CHF

不出现像低压下造成的局部压力急剧上升现象,使后续主流液体或液膜较易再润湿加热壁面的气泡生成点和局部蒸汽干涸区,从而不易发生局部传热恶化而引起 CHF。

2.4 流动不稳定性对 CHF 的影响

低压下的钠蒸气比热容远大于液钠比热容,加热壁上产生的气泡易造成加热环形通道内局部压力的急剧变化,导致流动不稳定性发生,使得加热壁上干涸的气泡生成点和局部蒸汽干点不能及时再润湿,传热恶化的 CHF 过早发生,降低了 q_{CHF} 值。

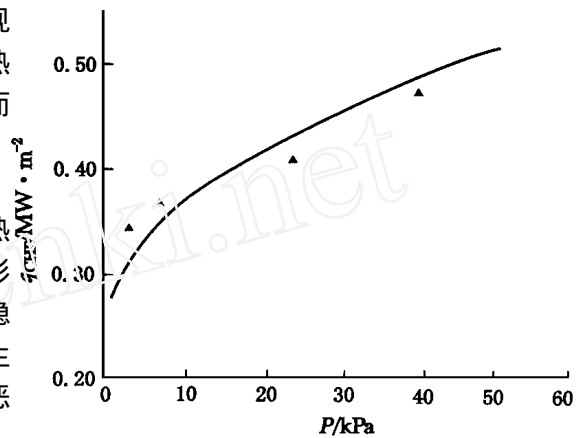


图4 压力对 CHF 的影响

Fig. 4 The effects of pressure on CHF

3 液钠临界热流密度预测公式

已有的预测 CHF 的经验关系式是在不同实验条件和实验参数范围内得出的,液钠 CHF 的实验难度大,影响因素多,因此,这些经验关系式间差异很大,而且低压下的经验关系式很少。M. Ishii^[3]在实验研究的基础上提出了一池内沸腾和圆管内液钠临界热流密度的计算关系式:

对池内沸腾,有

$$q_{CHF} = 0.14 \left[1 + 0.94 \left(\frac{p}{p_{cr}} \right)^{-0.4} \right] g h_{fg} \left[\frac{g(f - g)}{2g} \right]^{1/4} \quad (1)$$

对圆管内强迫对流,有

$$q_{CHF} = G h_{in} + \left(\frac{1}{C_0} - 0.11 \right) h_{fg} l g g (f - g) D J^{1/2} \quad (2)$$

$$C_0 = 1.2 - 0.2 \left(\frac{g}{f} \right)^{1/2}$$

其中: q_{CHF} 为临界热流密度值; p 和 p_{cr} 分别为压力和临界压力; g 为钠蒸气密度; f 为液钠密度; G 为质量流速; h_{in} 为入口过冷焓; D 为圆管内径; C_0 为密度修正系数。

液钠临界热流密度的发生与质量流速、入口过冷度、系统压力等因素有关,系统压力则主要影响液钠和钠蒸气的物性。据此,将液钠临界热流密度计算关系式整理为如下准则关系式:

$$q_{CHF} = A G^B h_{in}^C + D g h_{fg} \left[\frac{g(f - g)}{2g} \right]^{1/4} \quad (3)$$

选取 21 组典型实验数据,用最小二乘法求解非线性方程组,得到其经验系数 A 、 B 、 C 、 D 等,将它们代入式(3),得:

$$q_{CHF} = 0.969 G^{0.728} h_{in}^{0.72} + 0.035 g h_{fg} \left[\frac{g(f - g)}{2g} \right]^{1/4} \quad (4)$$

所选取的 21 组实验数据与式(4)计算值之间的平均离散度为:

$$CHF = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [q_{CHF} - (q_{CHF})_i]^2} / \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_{CHF})_i^2 = 19.7 \% \quad (5)$$

实验数据与计算值的比较示于图 5。

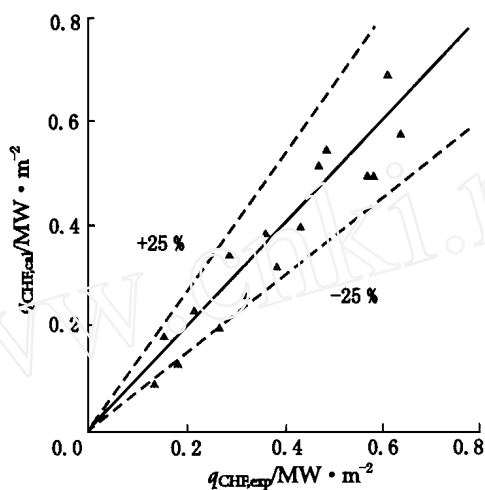


图5 液钠沸腾临界热流密度的计算值与实验值的比较

Fig. 6 The comparison of calculated and experimental results of liquid sodium's boiling CHF

临界热流密度还与几何条件、实验条件及实验方法有关。已发表的少数关于液钠临界热流密度国外实验数据中,实验的系统压力较高,且大都在棒束湍流条件下得到的,所以,测得的实验数据比本文用经验关系式(4)计算出的计算值高得多。

参考文献:

- [1] 秋穗正. 液态金属钠沸腾特性及其两相流动不稳定性研究[D]. 西安:西安交通大学核能与热能工程系,1996.
- [2] Kottowski HM, Savatteri C. Fundamental of Liquid Metal Boiling Thermohydraulics[J]. Nucl Eng Design, 1984, 82:281 ~ 304.
- [3] Ishii M, Fauske HK. Boiling and Dryout Behavior in a Liquid-metal Fast Breeder Reactor Subassembly Bundle Under Low Heat Flux and Low Flow Conditions[J]. Nucl Sci Eng, 1983, 84:131 ~ 146.

Experimental Investigation on Critical Heat Flux of Liquid Metal Sodium

QIU Sui-zheng, ZHANG Wei-zhong, LIAO Yi-xiang, JIA Dou-nan

(Nuclear and Thermal Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The experimental investigation of liquid sodium critical heat flux (CHF) is carried out. From the experimental results, the mechanism of liquid sodium CHF and the effects of inlet sub-cooling, mass flow, system pressure and two-phase flow instability on liquid sodium CHF are studied. The prediction formula for use with liquid sodium CHF is also presented.

Key words: LMFBFR; liquid sodium; two-phase flow; critical heat flux