

# 瞬态情况下的射流冲击 沸腾传热特性的实验研究

俞 坚 马重芳 田淑荣

(热能工程学系)

【摘要】研究了在膜态沸腾、过渡沸腾和临界热流密度处的传热特性。采用淬冷的方式在射流速度为2.5m/s以上，初始壁温约为700°C的情况下，得到了完整的沸腾曲线。从实验结果可以看出，沸腾曲线的位置向右偏移且形状发生了变化， $q_{\max}$ 降低了一个数量级。

关键词：射流冲击，瞬态传热，沸腾传热

射流冲击传热是一种新型、高效的主动型强化传热方式，将其与沸腾相结合，可以获得 $10^7 \text{ W/m}^2$ 以上的高热流密度，是非常有前途的传热方式，目前已在冶金工业、核反应堆的安全保障等方面得到了应用<sup>[1]</sup>。

射流冲击沸腾传热已受到国际传热学界的瞩目。美国、日本、加拿大、英国和我国的科学工作者正在对此进行深入的研究<sup>[2~6]</sup>。目前国际上的研究主要是集中在稳态条件下的临界热负荷区和核态沸腾区。但在实际应用中，绝大多数的工况是处于非稳定状态下的膜态沸腾区和过渡沸腾区，目前这方面的研究成果还非常少，只有美国学者Sakhuja<sup>[7]</sup>和英国学者Owen<sup>[5]</sup>等人给出了少量的不完整的实验数据。因此很有必要对这一传热现象进行详细研究。本文将采用淬冷的方法对射流冲击下的瞬态膜沸腾、过渡沸腾和第一临界热流密度进行研究。

## 1 实验设备和实验方法

本实验中所采用的实验回路如图1所示。在实验中选用蒸馏水作为工质，这是因为水

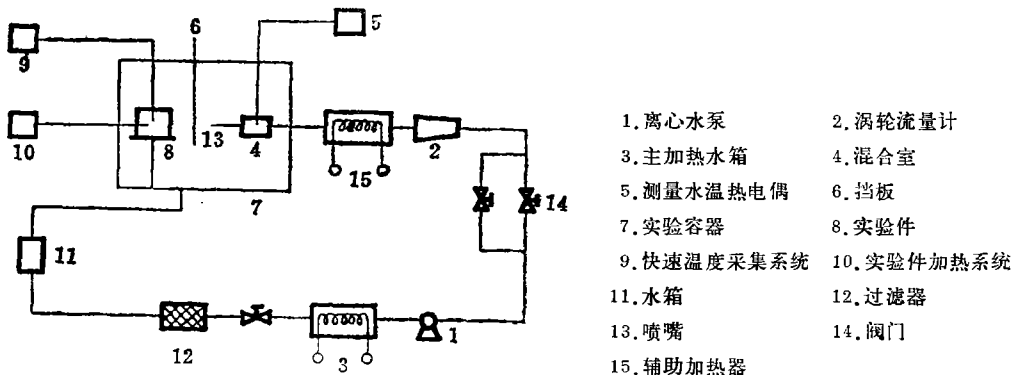
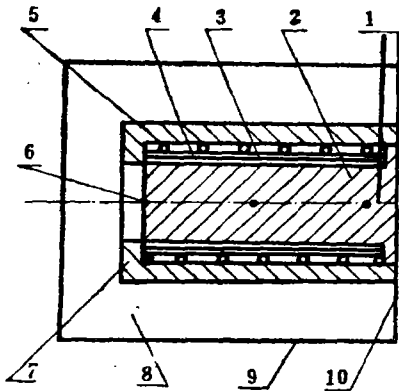


图1 实验回路系统图

是工程实际中普遍采用的冷却剂。实验中所采用的实验件如图 2 所示，其本体是一直径为 10mm 的不锈钢棒，在不锈钢棒的中心线上安放有 3 支镍铬-镍铝热电偶，直径均为 0.1mm。此外，为了测量实验表面的瞬态温度变化，还特别研制了微型高温表面热电偶，其具体结构



- 1. 高温微型表面热电偶
- 2. 不锈钢棒
- 3. 耐高温纸
- 4. 甲级超薄云母
- 5. 镍铬加热丝
- 6. 镍铬-镍铝热电偶
- 7. 可加工陶瓷套
- 8. 硅酸铝纤维棉
- 9. 不锈钢外壳
- 10. 镍箔

图 2 实验件示意图

已在文献[8]中详细描述了。另外，在不锈钢棒的外侧还分别包有两层绝缘体，若干匝加热丝和 4 层绝热防水层。整个实验的过程是按如下程序进行的：水在主加热容器内加热到饱和状态，通过离心泵强制在回路中循环，水射流在喷口处的温度和速度分别由混合室内的热电偶和涡轮流量计进行监测，由辅助加热器和阀门来控制 and 调节。与此同时，实验件内的加热系统对实验件进行加热。当实验表面的温度达到预期值时，将水射流的速度和温度也调整到预定值，这时快速撤离挡板。在水射流喷向实验表面的同时，加热系统停止加热，而快速采集系统（采集速率 100 次/s）立刻开始工作。在采集系统完成指定的采集程序后，实验便结束了。在整个实验中，实验表面通常要经历膜态沸腾，第二临界热流密度区，过渡沸腾，第一临界热流密度区，核态沸腾和单相对流传热等 6 种不同的传热阶段。

## 2 实验结果及分析

图 3 是若干条较为典型的沸腾曲线。从图中可以看出，射流冲击瞬态沸腾传热曲线的  $\Delta T_{max}$  高达 170℃，远远高于稳态池沸腾的情况 ( $\Delta T_{max} = 20$ ℃)。另外，该曲线的  $q_{max}$  值也远低于射流冲击稳态单相传热的值(在  $\Delta T_{max} = 50$ ℃ 时,  $q_{max} = 6 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup>)。由此可以看出，在射流冲击下的瞬态沸腾传热过程中，瞬态变化是一个重要的影响因素，这一影响因素可用表面温度的变化速率来度量。随着表面冷却速率的提高， $q_{max}$  将减小，而  $\Delta T_{max}$  将逐渐增大。造成这一现象的原因可解释如下：实验开始时，由于表面的温度很高，造成一开始在表面附近形成一层汽膜。由于表面温度下降得很快(有时可达 200℃/s)，使得近壁层的汽膜的变化落

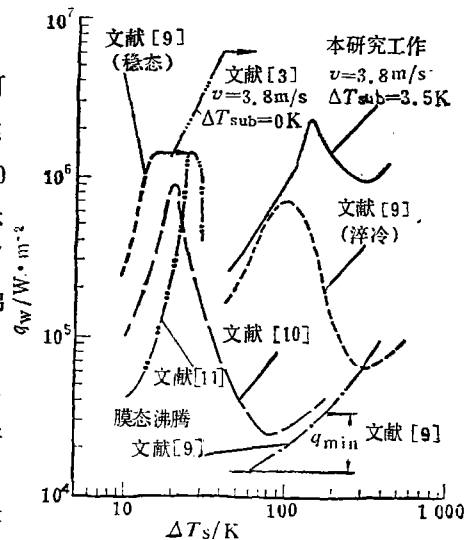


图 3 典型的沸腾曲线

后于表面温度的变化,造成表面的热流密度低于稳态的情况.另外在射流冲击的作用下,膜态沸腾阶段的汽膜因受到外界的干扰和破坏而在壁面温度很高的情况下发生崩溃,提前转变到第二临界点和第一临界点,造成 $\Delta T_{\max}$ 增大.从综合瞬态变化和射流冲击的双重作用可以看出,在壁面温度变化速率很高的情况下,瞬态变化强烈影响着热流密度值,特别是 $q_{\max}$ ;而射流冲击和瞬态变化均会造成 $\Delta T_{\max}$ 的增大.

下面将分3个不同阶段来讨论其传热特性.

### 2.1 膜态沸腾

在射流冲击冷却瞬态膜沸腾的过程中,射流速度的提高可使热流密度 $q_w$ 增大.从文献[8]中的理论分析解中可以看出, $q_w \propto u_{\infty}^{0.5}$ ,且实验的结果与理论值非常接近,为 $u_{\infty}^{0.47}$ .这个结果与美国学者 Holman 等人在稳态情况下的结论也十分接近<sup>[2]</sup>.此外,瞬态的影

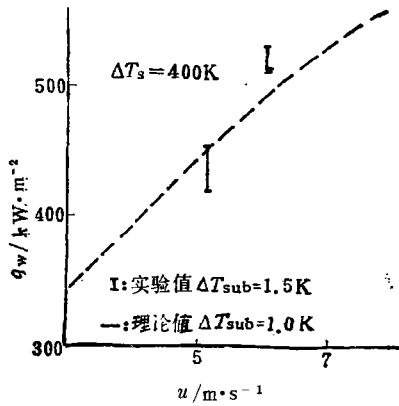


图4 射流冲击速度对膜态沸腾的影响

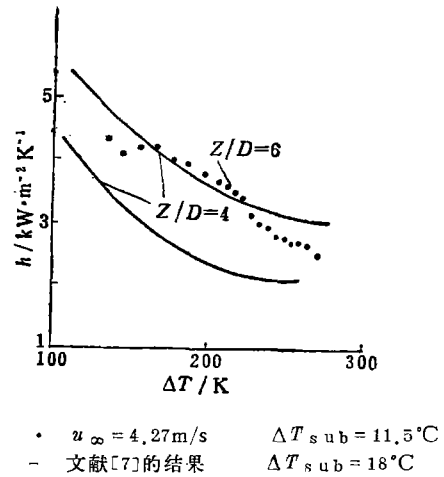


图5 表面温度平均变化速率对瞬态膜沸腾的影响

响在膜态沸腾阶段的作用并不太大.在本实验条件下,膜态沸腾过程中的表面温度平均变化速率大约在 $80 \sim 90^\circ\text{C/s}$ 的范围内.从文献[8]中的理论分析可以发现, $\frac{dT_w}{d\tau}$ 在 $0 \sim 800^\circ\text{C/s}$ 的范围内变化时, $q_w$ 只变化5%.图5是本实验数据与文献[7]结果的比较,从图中可以看出,尽管文献[7]的表面温度变化速率低于 $50^\circ\text{C/s}$ ,但与本实验相比,实验结果相差很小,这也证明了在射流冲击瞬态膜沸腾的情况下, $\frac{dT_w}{d\tau}$ 的影响不是很大.

### 2.2 过渡沸腾的特性

在瞬态冷却的过程中,影响过渡沸腾的主要因素有:表面状况、表面温度变化速率、射流冲击速度、射流过冷度和实验历程.目前对上述这些影响因素的作用还不十分清楚,总的来说,提高射流冲击速度和射流过冷度均可强化过渡沸腾,并缩短了 $q_{\max}$ 与 $q_{\min}$ 之间的差距.下面是将400个实验数据拟合成的公式,实验数据的范围为: $v = 2.6 \sim 8.0 \text{ m/s}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}} = 1.5 \sim 18.5^\circ\text{C}$ .拟合误差为 $\pm 30\%$ .

$$q_{tr} = [641(T_w - T_s)^{-1.55} + 0.677(T_s - T_1)^{0.026}] e^m \times 10^6 \quad (1)$$

其中:  $m = 230 \frac{R}{u_{\infty} T_w} \frac{dT_w}{d\tau}$

### 2.3 临界热流密度处的传热特性

临界热流密度对于核反应堆安全保障是非常重要的数据,所以世界各国对此进行了大量的研究,但这些工作均是在稳态条件下完成的,而实际情况却是不稳定的.对照本文瞬态实验结果和前人稳态情况下的结论可发现:

(1) 瞬态冷却过程的临界热流密度要低于稳态值.

(2) 达到临界热流密度的壁面过热要高于稳态的情况,且随着冷却速率的提高而增大.

此外,实验结果还表明:射流过冷度和射流冲击速度对临界热流密度都有影响.在本实验的条件下,射流冲击下瞬态临界热流密度要比稳态值小一个数量,为 $10^6 \text{ W/m}^2$ 左右,其相应的壁面过热度为 $140 \sim 300^\circ\text{C}$ 之间,远大于稳态值.在图3中可以清楚地看到这一点.下式是在 $\pm 30\%$ 的误差范围内,对27组实验数据所拟合的关系式:

$$\frac{q_w}{\rho_1 u_\infty^2 h_{fg}} = 0.088 \left( 1 - 0.014 \frac{R^2}{\alpha_1 T_w} \frac{dT_w}{d\tau} \right)^{0.248} \left( \frac{\sigma}{\rho_1 u_\infty^2 R} \right)^{0.414} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.514} \quad (2)$$

### 3 结 论

(1) 在瞬态冷却的射流冲击下,沸腾曲线与稳态的结果有很大的差别,随着 $\frac{dT_w}{d\tau}$ 的增大,瞬态冷却所得到的沸腾曲线将向右方偏移,且 $q_{\max}$ 降低了约一个数量级.

(2) 射流冲击下的瞬态膜沸腾与射流冲击速度和壁面温度的变化速率有关,在驻点区范围内, $q_w \propto u_\infty^{2.5}$ .

(3) 射流冲击瞬态冷却过程的临界热流密度随着 $\frac{dT_w}{d\tau}$ 的增大而下降,而 $\Delta T_{\max}$ 则逐渐增大,最高可达 $300^\circ\text{C}$ .

### 参 考 文 献

- 1 Kohring E C. Iron and Steel Engineer, 1985(6): 30~36
- 2 Ruch M A, Holman J P. Int J Heat Transfer, 1975, 18(1): 51~60
- 3 Monde M. Warme and Stoffubertragung, 1985, 19(3): 205~209
- 4 Andrews D G, Mohan Rao P K. Canad J Chem Eng, 1974, 52(6): 323~330
- 5 Owen R G, Pulling D J. Multiphase Trans, v2. Miami Beach Fla. 1979(4): 639~669
- 6 Ma C F, Bergles A E. Int J Heat Transfer, 1986, 29(8): 1095~1101
- 7 Sakhuja R K, Lazgin F S, Owen M J. ASME paper, 80-HT-47
- 8 俞坚. 硕士毕业论文. 北京工业大学, 1988.
- 9 Bergles A E, Thompson W G Jr. Int J Heat Mass Transfer, 1970, 13(1): 55~68
- 10 Bui T D, Dhir V K. J Heat Transfer, Trans. ASME, 1985, 107(4): 756~771
- 11 Sakurai A, Shiotsu M. Proc 5th Int Heat Transfer Conf, Tokyo, 1974(4): 81~85

## Experimental Study of the Characteristics of Boiling Heat Transfer With Water Jets in Quenching

Yu Jian Ma Chongfang Tian Shurong

(Department of Thermal Engineering)

**[Abstract]** The whole boiling curve was obtained by quenching method under the conditions of jet velocity higher than 2.5m/s and initial surface temperature about 700 °C. Significant distortion and displacement of the boiling curves from present investigation are described and explained with possible mechanisms concerning the transient jet impingement boiling. The heat transfer characteristics in the film boiling, transition boiling and CHF were also studied.

**Key Words:** jet impingement, transient boiling, boiling heat transfer