

高温壁面液体射流冲击瞬态 沸腾传热的实验研究

赵耀华¹ 苑中显¹ 马重芳¹ 雷道亨¹ 刘立志¹ 增冈隆士²

(1. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100022; 2. 日本九州大学机械工程系, 日本 九州)

摘要 以水作为冷却介质, 对高温壁面在射流冲击淬冷时的瞬态换热特性进行了实验研究, 获得了介质在不同过冷度、不同射流速度下的完整沸腾曲线。实验结果表明, 无论是增大工质过冷度还是提高射流速度, 总会使得热壁面的冷却速率加大。在一定的过冷度和射流速度下壁温变化呈现快—慢—快的特点。临界热流密度随平均壁温变化率的增大而增大, 二者之间存在线性关系。

关键词 射流冲击; 沸腾; 瞬态传热

中图分类号: TK172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2000)01-0101-04

1 引言

射流冲击冷却和沸腾换热是两种强烈的对流换热方式, 它们各自有着广泛的应用, 如热轧钢过程中为了改善钢的性质对钢带淬冷、核反应堆出现故障时的紧急冷却等。Yao 等指出^[1], 强制对流淬冷是一个复杂的复合传热过程。在高速冷却过程中传热面附近流体流动特性会受到壁面附近残留蒸汽层的强烈影响, 即沸腾与射流冲击之间有着强烈的耦合作用。从现有文献来看, 大多数射流冲击研究中流束断面与换热面面积相比很小, 测得的换热特性是驻点区与壁面射流区的复合值^[2,3]。为了考察驻点区冲击—沸腾换热特性, 需要减小换热面与流束断面之间的相对比值, 使换热面完全置于驻点区内, 这样所测换热系数将只与射流的垂直速度有关。马重芳等采用此种方式对 700°C 高温壁面射流冲击淬冷时的换热特性进行了研究^[4], 考察了射流速度对换热的影响。本文重点探讨流体过冷度、射流速度对冲击—沸腾换热的影响以及临界热流密度 q_c 与壁温变化率 $dT_w/d\tau$ 之间的关系等。

2 实验装置

图 1 为实验回路示意图, 实验工质为水。水箱 11 中的水经过滤器 12 过滤之后进入主加热器 3 进行加热, 循环水泵 1 将水加压后经流量调节阀 14、涡轮流量计 2 送入混合室 4, 混合室除起混合作用外, 还起流体进入喷嘴前的稳压作用。工质在进入混合室之前装有一辅助加热器 15, 用以对水温进行微调, 实现不同的过冷度 T_{sub} 。水经混合室 4 混合后从喷嘴 13 喷出, 进入喷嘴前的水温由镍铬—镍铝热电偶 5 测定。8 为冲击射流实验件。实验件与喷嘴 13 之间有一挡水板 6, 作用是防止水在实验之前射到实验件上。与实验件相联有两组引线, 一组是三对镍铬—镍铝热电偶与数据采集系统 9 相联, 另一组是加热丝与电加热器 10 相联。实验件、喷嘴、混合室及挡水板均置于实验箱 7 内, 水冲击实验件之后汇集在实验箱的底部, 然后流入水箱 11 进行再循环。

图 2 为实验件详图。其主体是一长 40 mm、直径 10 mm 的不锈钢圆柱 2, 其外侧绕

收稿日期: 1999-03-18

作者简介: 赵耀华 (1965-), 男, 湖南常德人, 副教授, 博士, 1986 年北京大学毕业, 主要从事相变传热研究。

有 $\phi 1 \text{ mm}$ 的镍铬加热丝 5，加热丝与不锈钢圆柱体之间设有甲级云母电绝缘层 4，并设有耐高温纸 3 以使热流均匀。将不锈钢圆柱体放入陶瓷套管 7 中再进行保温处理。图 2 中圆柱的右端部为受射流冲击冷却的裸露表面，此表面上用高温扩散焊方式焊有一厚度为 0.01 mm 的镍铬箔 10，它的背部中心部位与一根 $\phi 0.1 \text{ mm}$ 的镍铝丝相焊接，这样镍铬箔和镍铝丝就形成一对薄膜热电偶 1，用来测量冲击表面滞止区的快速温度变化。同时，由于镍铬合金的导热性能较差 ($\lambda = 15 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)，镍铬箔也起到了减小不锈钢圆柱体热损失的作用。为了解实验件内部温度分布，采用侧面钻小孔的方法分别在实验件左端部、中部和距右端部 4 mm 处各设置一对同类热电偶，如图 2 中 6 所示。实验中喷嘴与冲击面之间的距离保持在 $Z/d_n = 10$ ，喷嘴直径 $d_n = 10 \text{ mm}$ 。

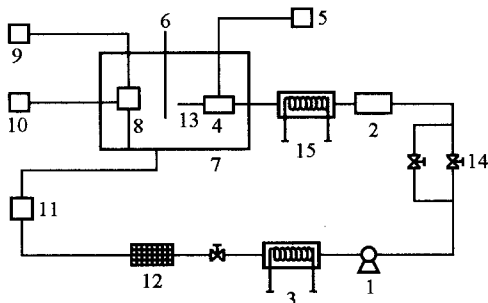


图 1 实验回路示意图

1. 循环泵 2. 涡轮流量计 3. 主加热器 4. 混合室
5. 热电偶 6. 挡板 7. 实验容器 8. 实验件
9. 数据采集系统 10. 电加热器 11. 水箱
12. 过滤器 13. 喷嘴 14. 阀门 15. 辅助加热器

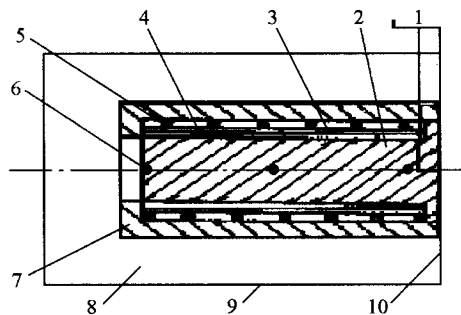


图 2 实验件详图

1. 微型表面热电偶 2. 不锈钢柱 3. 耐高温纸
4. 甲级云母 5. 加热丝 6. 热电偶 7. 可加工陶瓷
8. 硅酸铝纤维棉 9. 不锈钢外壳 10. 镍铬箔

整个实验过程在大气压下进行。首先将实验件加热到某设定温度(实验中约为 700°C)，同时根据所设定的水的过冷度用主加热器对水进行预热。就绪之后启动循环水泵，调节流量至要求值。为保证射流水温读数的精度，工质进入混合室之前再由辅助加热器进行微加热。流量和水温完全达到设定值后迅速除去挡水板，使射流流束突然射到实验件上，同时触发温度快速采集系统，记录表面温度和内部各点温度的变化历程。由于实验件四周与底部绝热良好，此过程可看作是初始温度均匀的半无限大物体在对流边界条件下的瞬态冷却过程。记录下各时刻换热表面的温度，即可算出内部各点温度变化和壁面热流随时间的变化，从而得出表示壁面热流密度 q_w 和壁面过热度 ΔT_w 关系的沸腾换热曲线。

3 实验结果与讨论

3.1 壁温动态变化曲线

图 3 所示为不同射流速度、不同过冷度下射流冲击淬冷时壁温变化曲线，可以看出，射流速度 V_0 和工质过冷度 ΔT_{sub} 对壁温的冷却过程均产生重要影响。由于图中所示四条曲线为不同 V_0 、 ΔT_{sub} 组合时的测量结果，不能单独考察 V_0 或 ΔT_{sub} 对壁温曲线的影响。但是分析图中四条曲线的变化情况可大致得出如下结论：增大射流速度或增大工质过冷度均使壁温冷却速度加快，达到终温时间变短。而过冷度的影响似乎更强烈一些，比较图中曲线 1 和曲线 3 可以看出，速度大致不变时过冷度增大会使壁面冷却时间大大缩短， $V_0 = 2.35 \sim 2.68 \text{ m/s}$ 时 ΔT_{sub} 从 1.8°C 增大到 21.6°C 冷却时间由 37 秒缩短

为 6 秒左右。

由壁温变化曲线还可以看出, 在一定的 V_0 和 ΔT_{sub} 下壁温随时间的变化率是不均匀的, 可以分为三段: 冲击刚开始时的急速变化段、中期的相对缓慢变化段及后期的次急速变化段。此三段大体上与膜态沸腾、过渡沸腾及核态沸腾相对应, 但在高温壁面刚开始接触射流时的传热情况比较复杂, 壁温变化与沸腾分区的确切对应关系有待于进一步研究。

3.2 $q_w - \Delta T_w$ 沸腾曲线

图 4 为壁面过热度 ΔT_w 和用一维瞬态导热方程计算出的壁面热流的对应关系, 图中三条曲线代表三组不同 $V_0 - \Delta T_{sub}$ 组合时的情况。由图可以看出如下两个特点: 一是工质过冷度从 1.6°C (1.8°C) 提高到 21.6°C 后热流曲线大幅度升高, 平均热流密度几乎升高了一倍; 二是沸腾曲线与有些研究结果相比^[5,6] 发生了明显变形, 尤其是过渡区曲线。这里的过渡区曲线变得有些不规则, 膜态沸腾结束后热流密度 q 开始是随壁温过热度下降而上升, 这与一般过渡沸腾的规律相符; 但随后 q 随壁温过热度下降出现缓慢降低的趋势, 当 ΔT_w 小于某一值后 q 又随 ΔT_w 减小而迅速降低, 即进入核态沸腾状态。此种变化规律迄今未见有报道。产生此现象的原因到底是所研究的淬冷 - 沸腾传热过程所固有, 抑或是采用薄膜热电偶测量方法所使然, 现在尚无法进行明确解释。

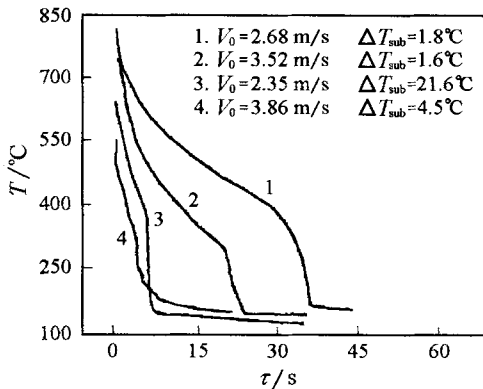


图 3 壁温动态变化曲线

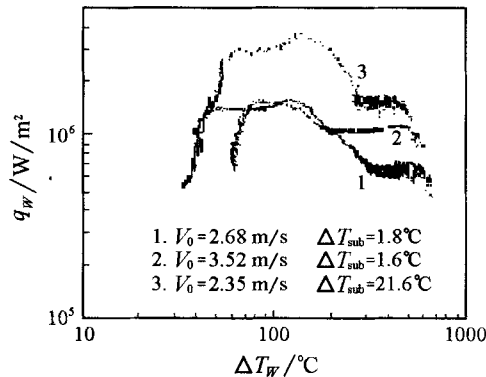


图 4 不同 V_0 和 ΔT_{sub} 时的沸腾曲线

3.3 临界热流密度 q_c 与壁温变化率 $dT_w/d\tau$ 之间的关系

描述沸腾瞬态变化的参数有两种, 一种是“过渡时间”, 它定义为壁温从临界点右侧 (过渡沸腾区) $0.9 q_c$ 处变化到左侧 (核态沸腾区) $0.9 q_c$ 处所需要的时间。另一种参数就是“壁温变化率 $dT_w/d\tau$ ”, 它定义为在过渡时间内壁温的变化量与过渡时间的平均比值。“壁温变化率”的概念最早见于文献 [1], 现已被证明是描述瞬态沸腾换热过程的重要参数。Yao et al 证明, 上述二参数之间存在着的反比关系 [1]。本文采用壁温变化率作为衡量瞬态变化的参数。临界热流密度 q_c 与壁温变化率 $dT_w/d\tau$ 之间的关系示于图 5。可以看到, 临界热流密度 q_c 与平均壁温变化率 $dT_w/d\tau$ 之间在测试参数范围内存在着线性关系, q_c 随 $dT_w/d\tau$ 的增大基本上成正比例

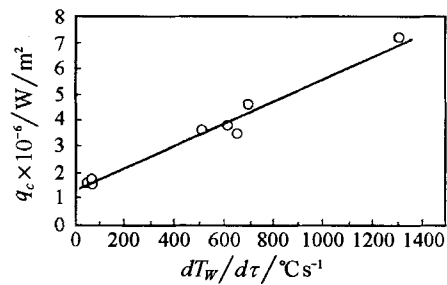


图 5 临界热流密度 q_c 与壁温变化率 $dT_w/d\tau$ 之间的关系

地增大。二者可以拟合如下关系式:

$$q_c = 4.6 \times 10^3 dT_w/d\tau + 1.33 \times 10^6 \quad (\text{W/m}^2)$$

另外,通过整理数据还发现,射流冲击饱和沸腾时的临界热流密度 q_c 与射流速度 V_0 也大致上呈线性关系。

4 结 论

通过过冷水对高温壁面淬冷沸腾换热的实验研究,得出了不同过冷度 ΔT_{sub} 、不同射流速度 V_0 下三个沸腾区域的完整沸腾曲线。实验结果表明,增大射流速度或者增大工质的过冷度均使壁温冷却速度加快;一定 ΔT_{sub} 和 V_0 下壁温变化呈现快-慢-快的特性。介质过冷度 ΔT_{sub} 增大,壁面热流密度亦增大, ΔT_{sub} 从 1.6°C 提高到 21.6°C 后平均热流密度大致增大一倍;过渡区的沸腾曲线存在缓变和速变两个阶段。临界热流密度 q_c 随平均壁温变化率 $dT_w/d\tau$ 的增大而增大,二者之间存在线性关系。

参 考 文 献

- [1] Yao S C, Salehpour A. An Investigation of Transient Boiling Transfer with Conjugate Nature. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1983, 26(6): 901-909
- [2] Katto Y, Moode M. Study of Mechanism of Burn-Out in a Heat-Flux Boiling System with an Impinging Jet. In: *Proc. 5th Int. Heat Transfer Conference, Tokyo, 1974*
- [3] Runch M A, Holman J P. Boiling Heat Transfer to a Freon 113 Jet Impinging Upward onto a Flat Heated Surface. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1975, 18: 51-60
- [4] Ma C F, Yu J, Lei D H et al. Jet Impingement Transient Boiling Transfer on Hot Surfaces. In: *Proc. of the 2nd Xi'an Int. Symposium on Multiphase Flow and Heat Transfer, Xi'an, 1989*
- [5] Bergles A E, Thompson W G Jr. The Relationship of Quench Data to Steady-State Pool Boiling Data. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1970, 13: 55-68
- [6] 者江等. 水喷射淬冷高温壁面的传热实验研究. *工程热物理论*, 1997, 18(5): 629-633

EXPERIMENTAL INVESTIGATION TO TRANSIENT BOILING HEAT TRANSFER OF SUDDEN JET IMPINGEMENT ON A HOT SURFACE

ZHAO Yaohua¹ YUAN Zhongxian¹ MA Chongfang¹

LEI Daoheng¹ LIU Lizhi¹ Masuoka T²

- (1. *School of Environment and Energy Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022, China;*
2. *Department of Mechanics, Kyushu University, Japan*)

Abstract An experimental study has been conducted for the transient boiling heat transfer of a hot surface on the condition of water jet impingement quench cooling. The complete boiling curves on different subcooling degrees of jet fluid, ΔT_{sub} , and different jet velocity, V_0 , have been obtained. The results revealed that increasing either jet velocity or subcooling degree always promotes the hot surface cooling rate. With constant ΔT_{sub} and V_0 the surface temperature varies by fast-slow-fast law. The critical heat flux q_c gets higher as the average transition rate of the surface temperature $dT_w/d\tau$ increases. The relationship between the two variables presents linear characteristic.

Key words jet impingement; boiling; transient heat transfer