

# 钢板超快速冷却条件下换热实验研究

付天亮, 邓想涛, 韩 钧, 王昭东  
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 采用汽雾射流冷却方式,在射流角为 $0^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 时,研究了10 mm厚不锈钢板轧后超快速冷却过程中表面射流流动结构、换热区分布和钢板温降规律,分析了倾斜射流对钢板表面热流密度和冷速的影响.结果表明:射流角通过改变钢板表面滞止区和横向流区面积、水流密度、介质流动形态和流动速度,影响钢板表面换热形式和热流密度分布,进而影响超快速冷却冷速;射流角为 $30^{\circ}$ 时钢板平均冷速和临界热流密度均达到最大值,分别为 $146.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 和 $2.75\text{ MW/m}^2$ .

**关 键 词:** 超快速冷却;汽雾冷却;射流角;热流密度;冷速  
**中图分类号:** TG 156.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1399-06

## Experimental Studies on Heat Transfer of Ultra Fast Cooling for Steel Plate

FU Tian-liang, DENG Xiang-tao, HAN Jun, WANG Zhao-dong  
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: FU Tian-liang, E-mail: futianliang@126.com)

**Abstract:** Spray jet cooling method was used to study the surface jet flow structure, heat transfer zone and plate temperature drop during the ultra fast cooling process for a steel plate with the thickness of 10 mm, and the effects of inclination jet on heat flux and cooling rate of the plate surface were also analyzed, where the spray inclination angle was ranging from  $0^{\circ}$  to  $60^{\circ}$ . The results showed that the spray inclination angle can affect the heat transfer type of plate surface and heat flux distribution by changing plate surface stagnation zone and transverse flow zone's area, water flow density, flow state and flow velocity, so that it will further influence the cooling rate of ultra fast cooling greatly. The average cooling rate and heat flux density reach the maximum values with  $146.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  and  $2.75\text{ MW/m}^2$ , when the spray inclination angle is  $30^{\circ}$ .

**Key words:** ultra fast cooling; spray cooling; spray inclination angle; heat flux density; cooling rate

基于新一代控轧控冷(TMCP)原理的超快速冷却(UFC)技术是轧后钢板组织调控和性能升级的重要手段<sup>[1]</sup>.通过高温连续大变形,得到钢板的硬化奥氏体组织;通过UFC保持这一组织至相变点附近,进而结合复合强韧化机制实施冷却路径控制,得到多样化的组织和更宽泛的产品性能,大幅降低合金用量<sup>[2]</sup>.在UFC过程中,钢板冷速是主要技术指标,直接关系着冷后的组织和性能,所以,如何提高冷速成为UFC技术研发的主要方向.

大流量、高流速汽雾射流冷却与水冷相比,能用较少的冷却介质获得较大的热流量,被认为是低能耗、高效率的高温钢板快速冷却方式<sup>[3]</sup>.在汽雾冷却过程中,气相与水相相互作用形成雾滴,覆盖在钢板表面,热量从钢板表面传递到雾滴中,致使其部分蒸发,通过提升冲击区冷却介质蒸发率提高换热效率<sup>[4]</sup>.蒸发率除与雾滴直径有关外,还与雾滴-钢板表面接触角、射流冲击面积有关<sup>[5]</sup>.文献[6]研究了汽雾冷却换热时表面张力对固-液接触角的影响:通过降低接触角,增加雾

滴与固体表面的接触面积,降低液膜层厚度,提高蒸发率.文献[7]开发了射流角、射流冲击面积和喷射流量关系的理论模型,指出随着射流角的增加,椭圆冲击区长轴变长,短轴变短.文献[8]研究了在固定喷嘴高度的汽雾冷却过程中,射流冲击面积和射流角的增加对换热的影响.

本文以高温钢板表面汽雾射流超快速冷却过程为研究对象,利用开发的汽雾冷却试验装置和钢板温度采集装置实测钢板温降曲线,采用二维非稳态导热方程和反传热法计算钢板表面对流换热系数、温度场、热流密度和冷速,分析射流角对钢板表面流动结构和换热的影响,研究提高钢板超快速冷却过程中表面热流密度和冷速的有效途径.研究结果将为钢板热轧后超快速冷却以较少的冷却介质获得更大的冷速提供新的思路.

1 实验材料及方法

实验钢板选用 AISI304L 不锈钢,化学成分(质量分数,%)为 0.021 C,0.42 Si,1.46 Mn,18.65 Cr,8.4 Ni,0.13 N,0.05 Mo. 钢板规格为 120 mm(*B*) × 120 mm(*B*) × 10 mm(*H*). 钢板冷却过程温度变化通过热电偶实时检测,热电偶一端插入钢板,另一端连接 SMT-14-3000-1250-K 型钢板温度跟踪记录仪(采样周期 0.2 s). 热电偶选用 WRKKT4-171 型,插入及安装位置如图 1 所示,测温点分布在射流区中心截面上(*ABCD*面).  $p_1, p_2$  测温点分别位于射流滞止点上游区和下游区,距滞止点 35 和 25 mm 处;  $p_3$  测温点位于射流冲击滞止点处(*O*点). 将热电偶插入钢板前,测温孔中填充高温导热胶,用于减小接触热阻. 钢板绝热结构如图 2 所示.

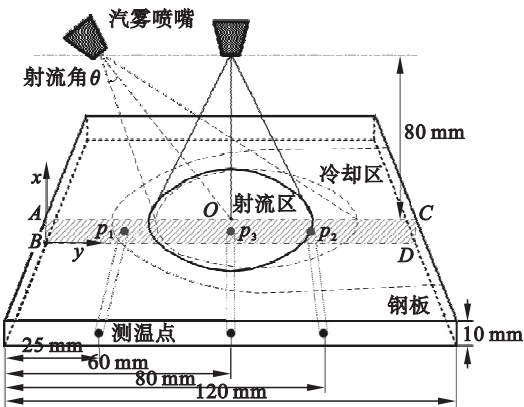


图 1 钢板表面射流区域划分及测温点位置

Fig. 1 Spray area and temperature point position in steel plate surface

图 2 钢板绝热结构

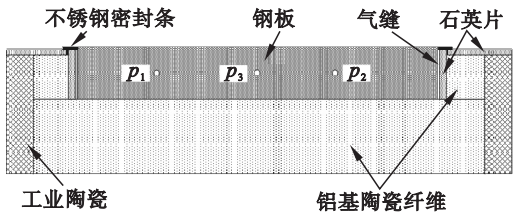


Fig. 2 Heat insulation structure of steel plate

汽雾射流冷却实验装置如图 3 所示. 冷却水和压缩空气分别由水泵和气泵供给,在汽雾喷嘴内混合雾化后喷射到钢板上表面. 供水、供气管路上分别安装有开闭阀、流量计和调节阀,用于控制介质流量和压力,实测压力通过压力计反馈. 测试前,采用集水器测定汽雾喷嘴射流区水流密度.

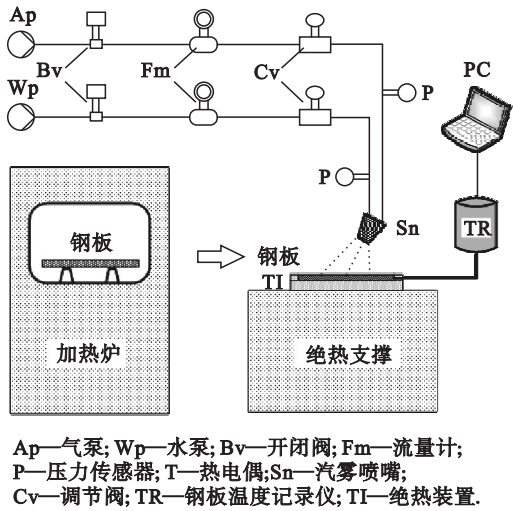


图 3 实验装置原理图

Fig. 3 Principle diagram of experimental equipment

钢板在炉内加热至 1 020 ℃,均质化保温 15 min后放置到汽雾冷却装置上,观测钢板表面射流流动状态,实测钢板测温点温降曲线,利用导热方程及反传热法计算钢板上表面温度场、热流密度分布及冷速. 汽雾喷嘴射流角  $\theta$  分别为 0°, 15°, 30°, 45° 和 60°, 汽雾喷嘴与钢板中心点(*O*点)垂直距离为 80 mm. 测试水温为 20 ℃,压缩空气用量为 35 N·m<sup>3</sup>/h,气压为 0.6 MPa,冷却水用量为 38.89 × 10<sup>-5</sup> m<sup>3</sup>/s,水压为 0.4 MPa.

2 倾斜射流影响因素

2.1 射流冲击面积

汽雾倾斜射流在钢板上将产生椭圆形的射流区,用刻度尺测量椭圆长轴 *a* 和短轴 *b* 长度,计算射流冲击面积 *S*. 图 4 为射流角与长、短轴长度和射流冲击面积的关系曲线. 汽雾倾斜射流时,随射流角的增大,长轴长度增加明显,而短轴长度缓慢

减小,这与钢板表面以高速前向流为主的流动形态有关<sup>[9]</sup>.随射流角的增加,钢板表面冷却介质水平分速度  $v_x$  增加,冷却介质在射流区滞留的时间减少,射流冲击面积增加近 20%.

## 2.2 射流冲击水流密度

基于集水器测试结果,射流区长轴方向水流密度  $q_1$  的计算式为

$$q_1 = \frac{W_1}{m^2 t} \quad (1)$$

式中:  $W_1$  为集水器水量;  $m$  为方形集水器边长;  $t$  为测试时间.

图 5 为射流区长轴方向水流密度曲线. 不论射流角如何变化,都存在由滞止区流向冷却区边缘的横向流,横向流流速向下游侧逐渐增加. 随射流角增加,射流区长轴方向横向流流速增加明显,且横向流随压力梯度在钢板表面传播,此为热量交换提供了充足的时间. 可见,射流角的增加,显著增大了射流区面积,但水流密度并未明显减小,这对提高换热效率有益;而且钢板表面介质流动形态也发生了利于传热的变化.

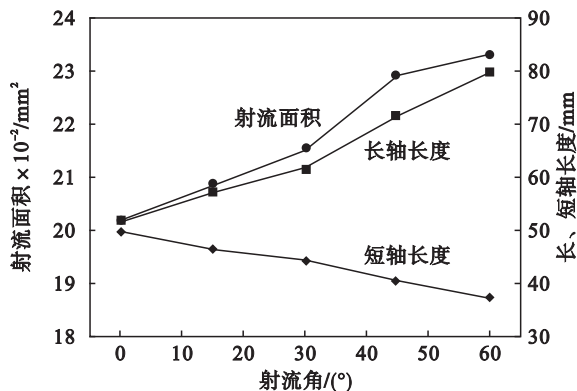


图 4 射流角与冲击区长、短轴长度和射流冲击面积的关系

Fig. 4 Relation among spray inclination angle, long-axis and short-axis lengths, area of spray injection zone

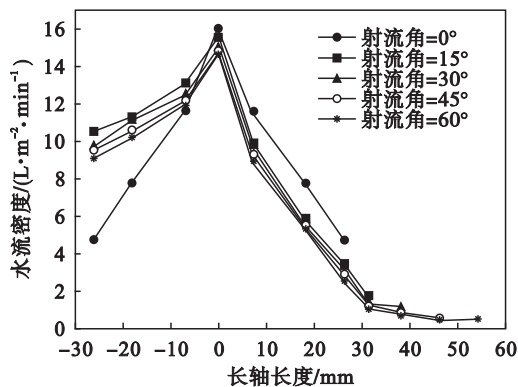


图 5 不同射流角时钢板表面水流密度分布

Fig. 5 Distribution of water flow density for different spray inclination angles

## 3 钢板表面温度场计算

### 3.1 温度场计算模型

基于实测温降曲线,利用导热微分方程,采用反传热法计算热流密度和温度场. 考虑热物性参数随温度的变化,本文建立了沿钢板厚度和宽度方向的二维非稳态导热方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t_\tau} = \frac{\lambda(T)}{c(T)\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad 0 < x < H \quad (H = 10 \text{ mm}), \quad 0 < y < B \quad (B = 120 \text{ mm}), \quad t_\tau > 0 \quad (2)$$

式中:  $T$  为钢板二维温度场;  $\lambda(T)$  为钢板导热系数;  $\rho$  为钢板密度;  $c(T)$  为钢板比热容;  $t_\tau$  为冷却时间;  $H$  为钢板厚度;  $B$  为钢板长度和宽度.

实验过程中,除钢板上表面进行射流快冷外,其余各面均为热绝缘面. 以图 1 中  $B$  点为计算原点,  $B \rightarrow A$  方向为  $x$  方向,  $B \rightarrow D$  方向为  $y$  方向,钢板上表面导热方程的初始条件和边界条件如下:

$$\left. \begin{aligned} T(x, y, 0) &= T_0, \quad t_\tau = 0, \quad 0 \leq x \leq H, \quad 0 \leq y \leq B; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} &= 0, \quad x = 0, \quad 0 < y < B, \quad t_\tau \geq 0; \\ -\lambda(T_H) \frac{\partial T}{\partial x} &= q_x, \quad x = H, \quad 0 < y < B, \quad t_\tau \geq 0; \\ -\lambda(T_B) \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, \quad y = 0, \quad 0 < x < H, \quad t_\tau \geq 0; \\ -\lambda(T_B) \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, \quad y = B, \quad 0 < x < H, \quad t_\tau \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $q_x$  为钢板上表面热流密度;  $T_H$  为钢板上表面温度;  $T_B$  为钢板侧向表面温度;  $T_0$  为计算区间内钢板初始温度,其余同式(2).

在导热方程求解过程中,把式(2)应用于节点  $(i, j)$ :

$$\left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)_{i,j}^{k+1} + \left( \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)_{i,j}^k = \frac{c(T)\rho}{\lambda(T)} \left( \frac{\partial T}{\partial t_\tau} \right)_{i,j}^k \quad (4)$$

对式(4)采用可取得稳定数值解(完全隐式)的 Crank - Nicolson 差分解法,该方法为向前差分向后差分混合的差分方法:

$$\frac{T_{i+1,j}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i-1,j}^{k+1}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i,j+1}^{k+1} - 2T_{i,j}^{k+1} + T_{i,j-1}^{k+1}}{\Delta y^2} = \frac{c(T)\rho}{\lambda(T)} \frac{T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t_\tau} \quad (5)$$

针对二维非稳态导热问题,采用交替方向法求解,它所对应的方程组系数矩阵具有对角线特点,因此采用追赶法求解. 整理成矩阵形式为



$$\begin{bmatrix} 2+f_x & -2f_x \\ -f_x & 2+f_x \\ \vdots & \vdots \\ -2f_x & 1+2f_x+2f_x \frac{h\Delta x}{\lambda(T)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1,j} \\ T_{2,j} \\ \vdots \\ T_{L,j} \end{bmatrix}^{n+1} = \begin{bmatrix} 1-2f_y & -2f_y \\ f_y & 1-2f_y \\ \vdots & \vdots \\ f_y & 1-2f_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i,1} \\ T_{i,2} \\ \vdots \\ T_{i,M} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 2f \frac{h\Delta x}{\lambda(T)} T_\infty \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中: $f_x = \frac{\alpha \Delta t_\tau}{(\Delta x)^2}$ ;  $f_y = \frac{\alpha \Delta t_\tau}{(\Delta y)^2}$ ;  $\alpha = \frac{\lambda(T)}{\rho c(T)}$ ;  $T_\infty$  为冷

却介质温度; $h$  为钢板表面对流换热系数. 热物性参数随温度变化函数基于 Wang 等<sup>[9]</sup> 研究的结果. 将钢板温度跟踪记录仪记录的温度代入导热方程中, 反算钢板上表面温度场和热流密度.

3.2 钢板表面平均换热系数计算模型

钢板出炉至淬火冷却先后经历空冷和汽雾冷两个阶段, 空冷阶段钢板表面换热系数  $h_f$  表示为

$$\left. \begin{aligned} h(w, t_\tau) &= k(t_\tau)w + f(t_\tau), \quad t_\tau \in [0, 5) \cup (10, 25]; \\ h(w, t_\tau) &= C_{d1}(w) - C_{d2}(w)t_\tau + C_{d3}(w)t_\tau^2 - C_{d4}(w)t_\tau^3 + C_{d5}(w)t_\tau^4, \quad t_\tau \in [5, 10]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $k(t_\tau) = D_1 + D_2 t_\tau + \dots + D_n t_\tau^{n-1}$ ;  $f(t_\tau) = E_1 + E_2 t_\tau + \dots + E_n t_\tau^{n-1}$ ;  $D_1 \sim D_n, E_1 \sim E_n$  为系数;  $C_{dn}$  为介质流量对换热系数与冷却时间关系函数系数的影响函数,  $d_1 \sim d_n$  为函数系数;  $w$  为介质流量;  $t_\tau$  为冷却时间. 经计算, 在测试条件下, 汽雾冷却平均换热系数为  $3\,250 \sim 5\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

3.3 钢板温度场计算结果

图 6 为钢板空冷和汽雾冷过程实测与计算温降曲线对比图, 射流角为  $0^\circ$ .  $p_1, p_2, p_3$  测温点温降曲线计算值与实测值吻合较好. 由于测温点不能完全覆盖研究区域, 下文分析均采用计算结果. 分析图 6 可知, 射流边缘区( $p_1$  点)和滞止区( $p_2$  点)测温点冷速减小约 30% (减小  $22.6 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ ). 这与随钢板表面温度降低, 表面与冷却介质间换热形式发生变化, 导致测温区域表面热流密度减小有关.

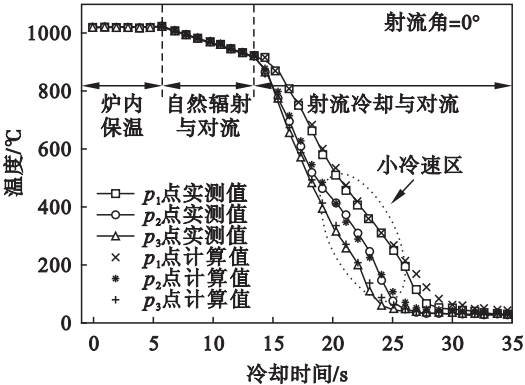


图 6 钢板超快速冷却温降曲线计算值与实测值  
Fig. 6 Calculated and measured temperature drop curves for steel plate during ultra fast cooling process

$$h_f = \frac{A \times \sigma \times \varepsilon \times (T_u^4 - T_a^4)}{(T_u - T_a)}. \quad (7)$$

式中: $\sigma$  为 Stefan - Boltzmann 常数;  $\varepsilon$  为热辐射系数;  $T_a$  为环境温度;  $T_u$  为钢板表面温度;  $A$  为系数. 经计算, 钢板空冷平均换热系数约为  $10.3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

汽雾冷却过程中, 钢板表面对流换热系数  $h$  采用作者前期研究所用的测量和计算方法<sup>[10]</sup>, 由此获得的换热系数计算模型为

4 结果与讨论

图 7 为  $\theta = 0^\circ$  时射流冲击流动结构及钢板表面换热区分布. 冷却介质雾化后, 钢板上垂直于圆孔的射流滞止点向周围几倍水流宽度的扩展区域内形成射流滞止区 (I 区). 随着冷却介质的径向流动, 流体逐渐由层流过渡到湍流, 流动边界层和热边界层厚度增加, 高温壁面附近的冷却介质被加热开始出现沸腾, 形成范围较窄的核态沸腾和过渡沸腾区; 随着表面滞留冷却介质温度的升高, 高温钢板表面上形成稳定的气膜层, 出现膜态沸腾换热区. 上述沸腾换热区由于观测到由滞止点向射流边缘的横向流, 称为横向流区 (II 区). 横向流区之外, 随着冷却介质沸腾汽化, 在表面聚集形成不连续的小液态聚集区 (III 区). 冷却介质未覆盖的地方形成辐射换热区 (IV 区).

图 8 为  $\theta = 0^\circ$  时钢板表面热流密度与温度和射流时间的关系曲线. 结合图 5 ~ 7 可知,  $p_3$  点处于 I 区, 冷却介质由垂直流动转变为水平流动, 形成较大射流冲击力, 实现冷却介质与壁面直接换热; 另一方面, 该区内流动边界层薄, 横向流径向流速高, 过热壁面并未形成稳定气膜, 进一步增加了换热效率, 这与 Hall 等<sup>[11]</sup> 的研究结论一致.  $p_2$  点位于 I 区与 II 区交界处, 此处流动边界层仍较薄, 横向流流速较大, 结合图 7 及 Nukiyama 沸腾曲线可知, 钢板表面依次经历过渡沸腾和核态沸腾换热阶段. 相比于射流冲击换热, 沸腾换热表面热流密度较低, 钢板表面温降及过冷度变化速率也小于  $p_3$  点.  $p_1$  点位于 II 区, 流体逐渐过渡到湍

流,流动边界层和热边界层厚度增加,表面滞留冷却介质温度逐渐提高,结合 Visaria 等<sup>[7]</sup>的分析,将形成膜态沸腾换热区,钢板表面热流密度显著

下降.因此, $p_1$  测温点表面到达临界热流密度 CHF 的时间比  $p_2$  和  $p_3$  点延长近 1 倍,CHF 值也比  $p_3$  点下降近 20% .

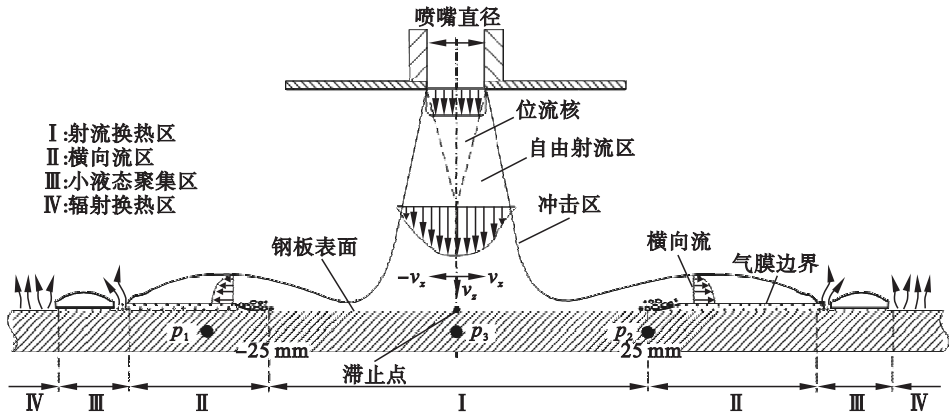


图 7 汽雾射流冲击钢板表面流动结构及换热区分布  
Fig. 7 Spray injection flow structure and heat transfer zone distribution

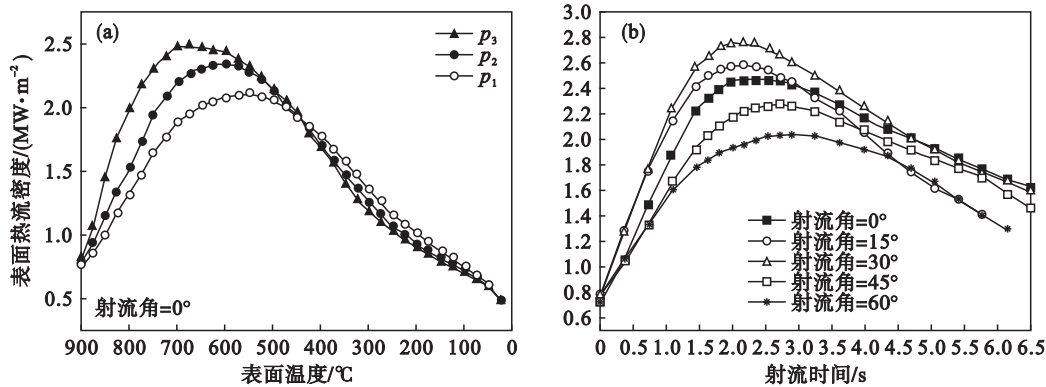


图 8 热流密度与表面温度和射流时间的关系  
Fig. 8 Relation among heat flux density, surface temperature and spray time

图 9 为钢板射流区冷速与射流角的关系曲线.滞止区内冷速变化与该区面积、水流密度分布及该区和横向流区交互作用有关.结合图 5 可知:一方面,随射流角增加,该区向滞止点下游侧偏移( $I_0 \rightarrow I_{60}$ ),致使该区内滞止点下游侧钢板冷速随射流角增加而增大,图 9 中 2#,3#曲线验证了这一分析;另一方面,结合图 8b 可知,射流角由 30°增加至 60°时,随射流面积的增加,冷却介质对过热壁面所形成的微小气泡的冲刷能力减弱,钢板表面提前开始出现沸腾换热区,并最终形成稳定水层.滞止区与横向流区交互作用,显著降低了该区热流密度,进而降低了冷速,图 9 中 4#,5#曲线验证了这一分析.交互作用区的出现,使得滞止点下游侧射流冲击区及横向流区冷速出现先增大、后减小的趋势,也使得 30°作为最优射流角被进一步确认.在图 9 中: $I_0, I_{15}, I_{30}, I_{45}, I_{60}$  分别表示射流角为 0°, 15°, 30°, 45°, 60°时的射流冲击区域; $I \sim \Pi_{45}, I \sim \Pi_{60}$  分别表示射流角为 45°和 60°时,射

流冲击区与横向流区交互作用区域.

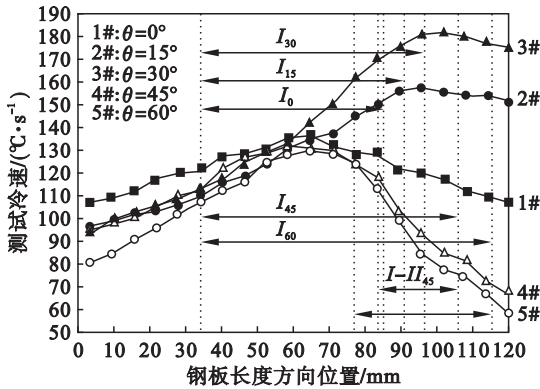


图 9 射流区长轴方向冷速分布与射流角的关系曲线  
Fig. 9 Relation between cooling rate along the long-axis of jet injection zone and spray inclination angle

图 10 为射流角与 CHF 和平均冷速的关系曲线.射流角由 0°增大到 30°时,钢板表面横向流流速增加,横向流区以冷却介质与钢板表面直接换热为主.射流角由 30°增加至 60°时,随着射流区

贴壁流对钢板表面气泡冲刷能力减弱,沸腾换热提前出现,横向流区以气泡传热为主.综上所述,随着滞止区与横向流区交互作用的出现,钢板表面出现了临界热流密度和平均冷速的极大值,对应的射流角为 30°.

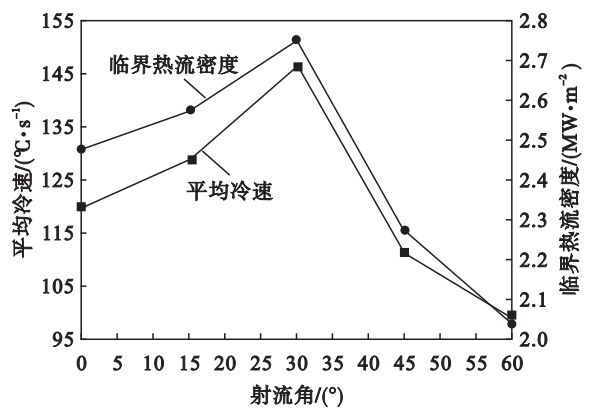


图 10 射流角与临界热流密度和平均冷速的关系  
Fig. 10 Relations among critical heat flux density, average cooling rate and spray inclination angle

5 结 论

1) 汽雾射流冷却时,钢板表面换热区由滞止区(Ⅰ区)、横向流区(Ⅱ区)、小液态聚集区(Ⅲ区)和辐射换热区(Ⅳ区)组成.  $\theta = 0^\circ$  时,Ⅰ区内未形成气膜,钢板表面对流强化换热效果明显,临界热流密度约为  $2.5 \text{ MW/m}^2$ ;Ⅱ区内,钢板表面出现沸腾换热,并逐渐形成稳定气膜.

2)  $\theta = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$  时,横向流区面积缩小,流动边界层减薄甚至消失,形成不稳定水层,冷却介质在钢板表面以滚动传播代替了滑动传播,强化了对流换热效果; $\theta = 30^\circ \rightarrow 60^\circ$  时,滞止区与横向流区交互作用,沸腾换热提前出现在射流区边缘,横向流区形成稳定水层,降低了对流换热效果.

3) 随射流角变化,由于钢板表面交互作用区的出现,钢板滞止点下游侧冷速呈现先增加、后减小的趋势,45°时交互区冷速下降 31.3%,60°时交互区冷速下降 46.3%. 当射流角为 30°时,在钢板超快速冷却过程中平均冷速及临界热流密度均

达到最大值,分别为  $146.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$  和  $2.75 \text{ MW/m}^2$ .

参考文献:

[1] Dou R F, Wen Z, Zhou G, et al. Experimental study on heat-transfer characteristics of circular water jet impinging on high-temperature stainless steel plate [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2): 738 – 746.

[2] Ravikumar S V, Jha J M, Sarkar I, et al. Enhancement of heat transfer rate in air-atomized spray cooling of a hot steel plate by using an aqueous solution of non-ionic surfactant and ethanol [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 64(1/2): 64 – 75.

[3] Mohapatra S, Chakraborty S, Pal S K. Experimental studies on different cooling processes to achieve ultra-fast cooling rate for hot steel plate [J]. *Experimental Heat Transfer*, 2012, 25(2): 111 – 126.

[4] Zhang X, Wen Z, Dou R F, et al. Experimental study of the air-atomized spray cooling of high-temperature metal [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 71(1): 43 – 55.

[5] Bhattacharya P, Samanta A N, Chakraborty S. Spray evaporative cooling to achieve ultra fast cooling in runouttable [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2009, 48(9): 1741 – 1747.

[6] Mao Y J, Zhang Y W. Molecular dynamics simulation on rapid boiling of water on a hot copper plate [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 62(2): 607 – 612.

[7] Visaria M, Mudawar I. Theoretical and experimental study of the effects of spray inclination on two-phase spray cooling and critical heat flux [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, 51(9): 2398 – 2410.

[8] Silk E A, Kim J, Kiger K. Spray cooling of enhanced surfaces: impact of structured surface geometry and spray axis inclination [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49(45): 4910 – 4920.

[9] Wang H M, Yu W, Cai Q W. Experimental study of heat transfer coefficient on hot steel plate during water jet impingement cooling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(9): 1825 – 1831.

[10] Fu T L, Wang Z D, Li Y, et al. Establishment and application of UFC-ACC heat transfer coefficient model [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 21(2): 57 – 62.

[11] Hall D E, Incropera F P, Viskanta R. Jet impingement boiling from a circular free-surface jet during quenching. Part I: single-phase jet [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 2001, 123(5): 911 – 917.