

DOI: 10.7652/xjtuxb201807007

矩形通道内蒸汽射流凝结换热面积的实验研究

宗潇^{1,2}, 刘继平¹, 杨赅石², 严俊杰³

(1. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安; 2. 中国船舶重工集团公司第705研究所, 710075, 西安; 3. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对超声速气液两相流升压装置内高速蒸汽射流凝结现象,在蒸汽质量流率为 $200\sim 600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入口过冷水质量流率为 $4\sim 18\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、入口过冷水温度为 $20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下,使用矩形截面蒸汽喷嘴和混合腔进行了可视化实验研究;采用热平衡相变模型计算了蒸汽射流凝结的换热面积,给出了换热面积随汽水参数的变化规律,并建立了预测归一化换热面积的实验关联式。研究表明:蒸汽喷嘴截面形状对射流凝结流场结构影响不大,气液两相区是蒸汽凝结的主要区域,蒸汽在气液两相区内以小气泡的形式与过冷水完成能量交换,换热面积随蒸汽质量流率和过冷水温度的增加而增加,随过冷水质量流率的增加而减小。实验中测得的换热面积在 $2.4\times 10^{-3}\sim 7.8\times 10^{-3}\text{ m}^2$ 之间,换热面积实验关联式预测值与实验值的误差在 $\pm 10\%$ 以内。本文研究结果对超声速气液两相流升压装置的优化设计和安全运行具有重要意义。

关键词: 矩形通道;蒸汽射流凝结;换热面积;凝结换热系数

中图分类号: TK2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)07-0046-06

Experimental Study on the Interfacial Heat Transfer Area of Steam Jet Condensation in a Rectangular Mix Chamber

ZONG Xiao^{1,2}, LIU Jiping¹, YANG Chengshi², YAN Junjie³

(1. Key Laboratory of Thermal-Fluid Science and Engineering of MOE, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. The 705 Research Institute, China Shipbuilding Industry Corporation, Xi'an 710075, China; 3. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the steam jet condensation phenomenon in a two-phase flow steam injector, a visualized experimental study in a rectangular mix chamber was carried out when the steam mass flux, water mass flux and water temperature were in the range of $200\sim 600\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $4\sim 18\text{ t}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. With a thermal equilibrium phase change model, the interfacial heat transfer area of steam jet condensation was calculated, and its change with the above parameters was investigated. Besides, an experimental correlation for predicting the dimensionless heat transfer area was established. The results indicate that the cross section shape of the steam nozzle has little influence on the structure of condensation flow field, and the two-phase region in the flow field is the dominant area for steam condensation, where the steam phase transfers energy to subcooled water in the form of steam bubbles. The interfacial heat transfer area increases with the steam mass flux and water temperature, while decreases with the water mass flux, in the range of $2.4\times 10^{-3}\sim 7.8\times 10^{-3}\text{ m}^2$. The errors of heat transfer area

between the prediction from the correlation and experimental values are within $\pm 10\%$. This study may provide a reference for design and safe operation of two-phase flow steam injectors.

Keywords: rectangular mix chamber; steam jet condensation; interfacial heat transfer area; condensation heat transfer coefficient

超声速气液两相流升压装置利用超声速蒸汽流作为动力源,在受限的通道内与低压过冷水相遇发生汽水直接接触凝结过程,气液两相流在流动受阻的情况下产生凝结激波,实现压力的突升,得到压力远远高于进口蒸汽压力的高压水流,在提升压力的同时能够加热水流,是一种能够快速启动、具有良好自调节性能、无运动机械部件的特殊升压加热装置,具有高效、节能、可靠性高等特点,在电力、化工、军工等领域有广泛的应用前景^[1-2]。

在超声速气液两相流升压装置内主要发生高速蒸汽射流在过冷水中的直接接触凝结现象,从 19 世纪 70 年代开始,针对蒸汽射流凝结过程,国内外学者进行了大量的研究。Simpson 等对亚声速蒸汽浸没射流凝结进行了可视化研究,观察到了气液界面的周期性运动^[3]。Chun 等在声速蒸汽浸没射流研究中观察到了圆锥形和椭圆形两种稳定的射流凝结形态,并根据实验结果得到了基于过冷水温度和蒸汽质量流率的射流流型图^[4]。Kerney 等对声速蒸汽在过冷水中的水平射流进行了实验研究,假设气液界面为一个光滑的表面,蒸汽的凝结全部发生在气液界面上,得到了汽羽无量纲穿透长度关于蒸汽质量流率和冷凝势的半经验实验关联式^[5]。Weimer 等利用积分形式的动量、能量以及质量守恒方程给出了汽羽穿透长度的表达式,并加入汽水密度比对实验关联式进行修正^[6]。Kim 等提出了 3 种界面传输模型——湍流强度模型、表面恢复模型和剪切力模型以预测平均凝结换热系数^[7]。Eden 等发现蒸汽射流凝结流场中静压的振荡是由汽羽内部产生的压缩波和膨胀波引起的^[8]。Khan 等对超声速蒸汽浸没射流凝结气液界面不稳定性的传播以及耗散进行了实验研究,结果表明气液界面不稳定性的传播与耗散受过冷水温度以及蒸汽入口压力的影响,过冷水温度对界面不稳定性的影响更加显著^[9]。徐强等在蒸汽与低速过冷水竖直同向流动的射流凝结实验中得到的平均凝结换热系数在 $0.34\sim 11.36\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{℃}^{-1}$ 之间^[10]。武心壮等使用热平衡方法计算得到的超声速蒸汽浸没射流平均凝结换热系数在 $0.7\sim 2.5\text{ MW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{℃}^{-1}$ 之间^[11]。李涛等对矩形通道内高速蒸汽与过冷水直接接触凝结形态

进行了可视化研究,实验中观察到了不稳定射流、稳定射流和发散射流^[12]。随着计算机技术的发展,计算流体力学方法成为研究蒸汽射流凝结过程的重要手段。Shah 等采用热平衡相变模型对蒸汽浸没射流现象进行了数值模拟研究,以计算得到的汽羽形状以及温度分布与武心壮等人的试验结果进行了对比,结果吻合良好,从而验证了相变模型的正确性^[13]。在此基础上,周轮等研究了环境压力对蒸汽射流凝结过程的影响,得到了环境压力越高射流凝结穿透长度越短的结论^[14]。

凝结换热界面是气液两相进行质量、动量和能量交换的关键区域,凝结换热面积是影响局部空间内换热强度的重要因素,决定着超声速气液两相流升压装置的升压加热性能。本文通过分析可视化流场,结合实验和数值模拟结果,提出了计算蒸汽射流凝结过程中气液两相换热面积的计算模型,给出了换热面积随实验条件的变化规律。研究结果对揭示蒸汽射流凝结的升压机理,以及超声速气液两相流升压装置的优化设计具有重要意义。

1 实验系统及方法

图 1 为蒸汽射流凝结实验系统图。实验系统主要由锅炉、给水泵、冷却塔、调节阀、流量计、实验段、水箱、可视化系统及数据采集系统组成。锅炉产生的饱和蒸汽通过调节阀以及缩放型蒸汽喷嘴进入实验段,与温度较低的流动过冷水在矩形截面的混合腔中相遇,发生高速蒸汽射流与过冷水的直接接触凝结过程。

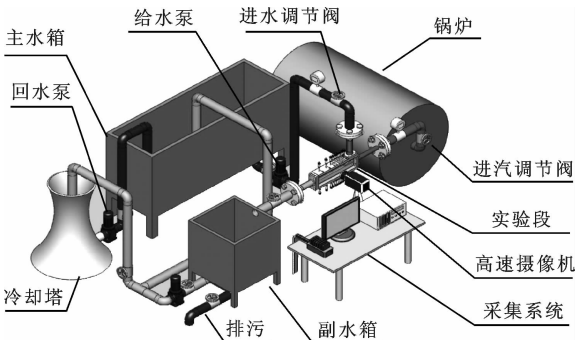


图 1 实验系统图

图 2 为可视化实验段结构和测点布置示意图。实验段采用矩形截面的蒸汽与水喷嘴,高速蒸汽射流的凝结只在与水喷嘴出口相邻的蒸汽喷嘴上方进行,因此其流场为准二维流场。实验段前后壁面安装耐高温玻璃,其与混合腔上下壁面组成矩形混合腔。通过耐高温玻璃构成的可视化窗口可以观察和拍摄混合腔内的凝结流场。实验段主要尺寸和实验条件如表 1 所示。

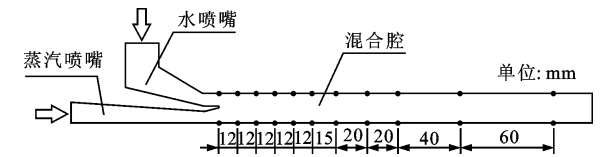


图 2 可视化实验段示意图

表 1 实验段主要尺寸和实验条件

参数	数值
入口过冷水流率 $G_w / t \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	4~18
入口蒸汽流率 $G_s / kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	200~600
入口过冷水温度 / $^{\circ}C$	20~50
蒸汽喷嘴喉部尺寸 / mm $\times$ mm	8 $\times$ 8
蒸汽喷嘴出口尺寸 / mm $\times$ mm	10 $\times$ 10
水喷嘴出口尺寸 / mm $\times$ mm	8 $\times$ 10
混合腔尺寸 / mm $\times$ mm	19 $\times$ 10
混合腔长度 / mm	250

本实验使用全自动电热锅炉产生饱和蒸汽,其额定压力为 0.7 MPa,最大蒸发量为 0.4 t $\cdot$ h $^{-1}$;实验时高速摄像机曝光时间设置为 20 μ s,采样频率为 10 kHz;温度测量使用 K 型热电偶,适用量程为 0~150 $^{\circ}C$,温度不确定度为 1 $^{\circ}C$;入口过冷水流量使用电磁流量计测量,量程为 0~10 t $\cdot$ h $^{-1}$,测量精度为 0.2 级,蒸汽质量流量使用涡街流量计测量,量程为 0~0.27 t $\cdot$ h $^{-1}$,测量精度为 1 级。

2 实验结果和讨论

2.1 蒸汽射流凝结流场

前人对蒸汽射流凝结的研究大多采用圆形截面喷嘴^[7,10-11],其可视化流场如图 3a 所示。圆形喷嘴射流凝结流场主要包括汽羽区、过冷水区、气液两相区和相界面 4 个区域。其中,汽羽为内部纯蒸汽连续流动的区域,过冷水区为外部几乎不受蒸汽凝结影响的单相液态过冷水流动的区域;在汽羽和过冷水区之间为气液两相区;汽羽与气液两相区由相界面隔开。使用圆形截面喷嘴时,蒸汽的凝结在其流

出喷嘴后与过冷水相遇的各个方向同时进行,因此其流场为三维流场。在三维流场中,由于气液两相区的包裹和遮挡,很难观察到汽羽内部与相界面。

本文使用矩形截面的蒸汽喷嘴、过冷水喷嘴以及混合腔,由于过冷水喷嘴布置在蒸汽喷嘴正上方,蒸汽的凝结仅在喷嘴上方进行,形成了准二维流场,如图 3b 所示。同样地,流场也由汽羽、过冷水区、气液两相区和相界面 4 个区域组成。在汽羽内部,蒸汽流速较高,能量较大。在高速蒸汽流出喷嘴进入混合腔时,喷嘴周围会形成一个真空区,对过冷水有引射作用,促使更多的过冷水进入混合腔^[13];过冷水区为温度较低的单相液态水区,随着蒸汽的凝结,其温度沿流动方向逐渐升高。

气液两相区为大量蒸汽雾化形成的小气泡与被卷吸入此区域内的液滴组成的蒸汽-水气液两相混合区。此区域内蒸汽以气泡的形式存在,气液两相均处于强烈的湍流状态,并形成大量的小漩涡,小漩涡会促进气液两相间的换热,同时还会使更多的过冷水液滴与蒸汽卷吸入气液两相区,进一步强化凝结换热过程。因此,气液两相区是蒸汽凝结的主要区域,相界面为气液两相区与汽羽之间只有几个分子或几十个分子厚度的区域,界面的波动特性对汽羽形状和气液两相区内蒸汽的凝结有很大影响^[15]。

通过对比图 3a 和 3b 可以看出,圆形喷嘴射流凝结流场和矩形喷嘴射流凝结流场均由汽羽、过冷水区、气液两相区和相界面组成,各区域流动特征和形成机理也是相同的,矩形喷嘴形成的凝结流场相当于圆形喷嘴时沿蒸汽流动方向纵剖面的上半部分。它们的区别在于,使用圆形截面蒸汽喷嘴时,形成的是一个三维流场,使用矩形截面喷嘴时,形成了准二维流场。因此,蒸汽喷嘴截面形状对射流凝结流场结构影响不大,由此可以推断,不同截面形状喷嘴的蒸汽射流凝结过程均遵守相同的凝结换热机理,圆形喷嘴蒸汽射流凝结结果及结论均可用于研究矩形喷嘴的蒸汽射流凝结过程。

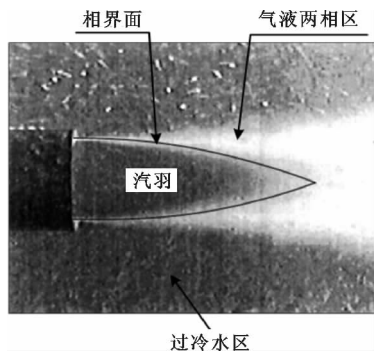
平均凝结换热系数是表征射流凝结换热特性的重要参数,前人学者大多根据汽水间的热平衡计算凝结换热系数

$$h_{ave} = m_s h_{fg} / A_{ave} \Delta t_{sub} \tag{1}$$

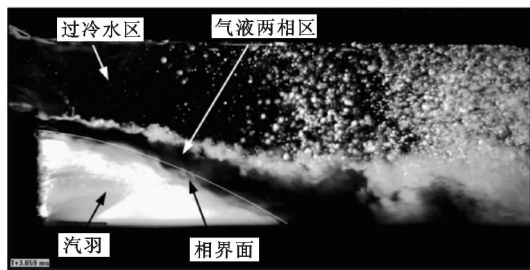
式中: m_s 为蒸汽质量流量; h_{fg} 为蒸汽凝结潜热; Δt_{sub} 为换热温差; A_{ave} 为平均凝结换热面积。

式(1)中蒸汽质量流量、凝结潜热以及换热温差均可由直接测量得到,而对于换热面积,前人学者均假设蒸汽的凝结全部在相界面完成,穿过相界面,蒸

汽全部凝结为液态水。因此,在实验中计算得到了较大的平均凝结换热系数,甚至达 $10 \text{ MW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ [7,10-11]。由流场中各区域的分析可知,汽羽内蒸汽的凝结并不是全部发生在相界面,而是在相界面处雾化成小气泡进入气液两相区逐渐凝结的,因此实际由蒸汽气泡形成的换热面积远远大于实验中测量得到的相界面面积。由于气液两相区内的蒸汽相为大量不同直径的气泡,因此目前很难通过实验直接测量的方法获得气液两相区内的换热面积。



(a) 圆形喷嘴射流凝结流场 [7]



(b) 矩形喷嘴射流凝结流场

图 3 蒸汽射流凝结流场

2.2 换热面积的计算

近些年,一些学者使用热平衡相变模型对蒸汽射流凝结过程进行了三维数值模拟研究,热平衡相变模型示意如图 4 所示。在此模型中,认为气液两相区内的蒸汽均为气泡,在蒸汽侧,蒸汽和界面的能量交换为

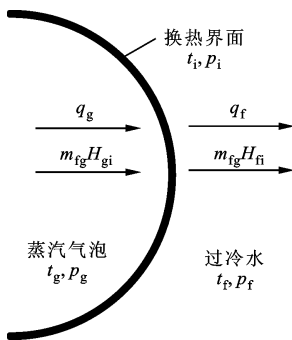


图 4 热平衡相变模型示意图

$$Q_g = q_g - m_{fg} H_{gi} \quad (2)$$

式中: Q_g 为蒸汽传递到换热界面的总能量; q_g 为蒸汽和界面的热量交换; m_{fg} 为质量交换速率; H_{gi} 为蒸汽和界面的焓差。在过冷水侧

$$Q_f = q_f + m_{fi} H_{fi} \quad (3)$$

式中: Q_f 为换热界面传递给过冷水的总能量; H_{fi} 为界面和过冷水的焓差; q_f 为界面和过冷水的换热量

$$q_f = h_f A_i (t_i - t_f) \quad (4)$$

其中 t_i 为界面温度, t_f 为过冷水温度, h_f 为换热界面和过冷水间的换热系数。进行三维数值模拟时,每一计算单元内的换热面积为

$$a_i = 6\alpha_g / d_g \quad (5)$$

式中: α_g 为蒸汽空泡率; d_g 为气泡直径,其与水的过冷度 $\theta = t_i - t_f$ 有关

$$d_g = \frac{d_1 (\theta - \theta_0) + d_0 (\theta_1 - \theta)}{\theta_1 - \theta_0} \quad (6)$$

其中 d_0 和 d_1 分别为参考过冷度下的气泡直径,当 $\theta_0 = 13.5^\circ\text{C}$ 时, $d_0 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ m}$,而当 $\theta_1 = 0^\circ\text{C}$ 时, $d_1 = 1.5 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。界面和过冷水间的换热系数可由下式计算

$$h_f = k_f Nu_f / d_g \quad (7)$$

$$Nu_f = \begin{cases} 2.0 + 0.6 Re_r^{0.5} Pr^{0.33} & 0 \leq Re_r < 776.06 \\ 2.0 + 0.27 Re_r^{0.62} Pr^{0.33} & Re_r \geq 776.06 \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_f 为导热系数; Pr 为过冷水的普朗特数; Re_r 为相对雷诺数

$$Re_r = |U_g - U_f| d_g / \nu_f \quad (9)$$

此外,蒸汽和界面间的换热量为

$$q_g = h_g A_i \alpha_f (t_i - t_g) \quad (10)$$

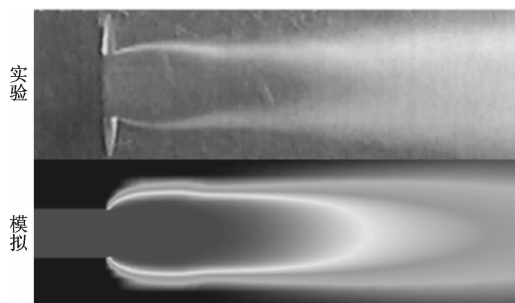
将蒸汽看做气泡的凝结过程时,其换热系数为

$$h_g = 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}) \quad (11)$$

由能量平衡可知 $Q_f = Q_g$, 因此结合式(2)和(3)可得气液间的质量交换速率为

$$m_{fg} = \frac{q_f + q_g}{H_{gi} - H_{fi}} \quad (12)$$

采用热平衡相变模型, Gulawani 等对声速蒸汽射流凝结过程进行了三维数值模拟研究,并将模拟结果与 Kim 等的汽羽穿透长度、轴向和径向温度分布实验结果 [7] 进行了对比,结果符合较好 [16]。近两年,周轮等将热平衡相变模型以自定义函数的方式写入流体力学计算软件来模拟超声速蒸汽浸没设立现象,并将蒸汽空泡率的分布与 Kim 等的实验结果 [7] 进行了对比,如图 5 所示,模拟结果与实验结果吻合较好 [14]。

图5 数值模拟结果^[14]与实验结果^[7]的对比

以上研究结果表明,采用热平衡相变模型,并将蒸汽相看成气泡可以得到很好的数值模拟结果。同时,由式(7)和(8)计算得到的凝结换热系数适用于蒸汽射流凝结过程。因此,在实验研究中,气液两相区内总的换热面积可由下式计算

$$A_i = m_s h_{fg} / h_f \Delta t_{sub} \quad (13)$$

图6~图8分别给出了换热面积随蒸汽质量流量、过冷水质量流量以及过冷水温度的变化规律。可以看出,实验中测得的换热面积在 $2.4 \times 10^{-3} \sim 7.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 之间,换热面积随蒸汽质量流量和过冷水温度增大而增大,随过冷水质量流量增大而减小。这是由于随着蒸汽质量流量的增大,换热系数保持不变,此时需要更多的换热面积使蒸汽凝结,同样地,随着入口过冷水温度的升高,汽水间的换热温差减小,单位面积上的换热总量减少,因此需要更多

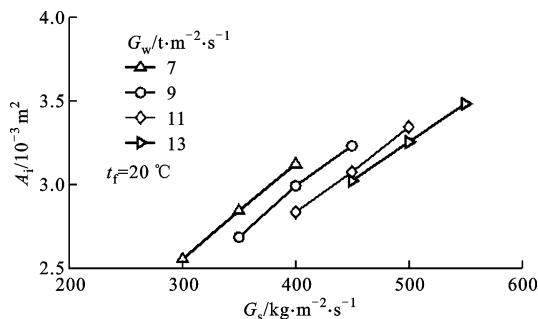


图6 换热面积随蒸汽质量流量的变化

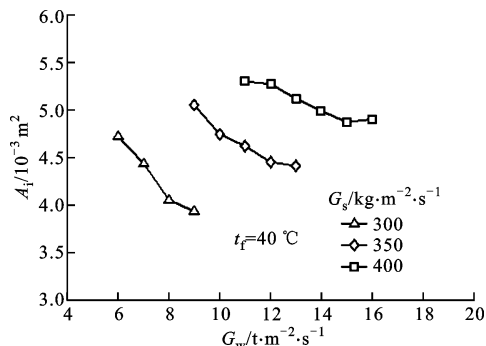


图7 换热面积随过冷水质量流量的变化

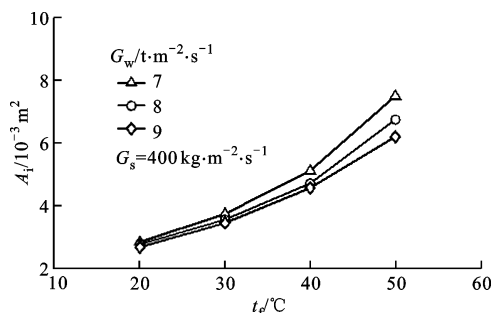


图8 换热面积随过冷水温度的变化

的换热面积,故换热面积增大。随着过冷水质量流量的增大,过冷水流速增大,气液两相区内的扰动增大,换热系数随之增加,因此单位面积上的换热量增加,换热面积随着过冷水质量流量的增大而减小。

使用蒸汽喷嘴喉部面积将换热面积归一化,得到归一化换热面积 $A = A_i / A_{cr}$,以水喷嘴出口雷诺数 Re_w 表示过冷水质量流量的影响,归一化蒸汽质量流量 G_s / G_m 表示蒸汽质量流量的影响,冷凝势 B 表示过冷水温度的影响,得到预测归一化换热面积的实验关联式

$$A = \frac{A_i}{A_{cr}} = 0.304 B^{-1.48} \left(\frac{G_s}{G_m} \right)^{0.606} Re_w^{0.135} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} 0.65 < B < 0.12 \\ 200 < G_s < 600 \\ 54\,000 < Re_w < 230\,000 \end{aligned} \right\}$$

式中: $B = c_p \Delta t_{sub} / h_{fg}$, c_p 为过冷水比定压热容; G_m 为临界蒸汽质量流量, $G_m = 275 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图9给出了归一化换热面积预测值和实验值的对比。从图中可以看出,预测值与实验值吻合良好,预测误差在 $\pm 10\%$ 以内。

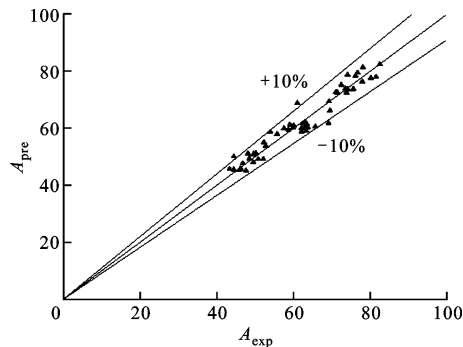


图9 归一化换热面积预测值与实验值的对比

3 结论

本文针对矩形通道内的蒸汽射流凝结过程进行了可视化研究,采用热平衡相变模型获得了换热面积及其随汽水参数的变化规律,主要结论如下:

(1)蒸汽喷嘴的截面形状对射流凝结流场结构影响不大,不同截面形状喷嘴的蒸汽射流凝结过程均遵守相同的凝结换热机理;

(2)流场中的气液两相区是蒸汽凝结的主要区域,蒸汽在气液两相区内以小气泡的形式与过冷水完成能量交换;

(3)蒸汽射流换热面积随蒸汽质量流率和过冷水温度的增加而增加,随过冷水质量流率的增加而减小,实验中测得的换热面积在 $2.4 \times 10^{-3} \sim 7.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ 之间,换热面积关联式预测值与实验值的误差在 $\pm 10\%$ 以内。

参考文献:

- [1] 严俊杰,刘继平,林万超,等. 汽-液两相流喷射升压装置的机理研究 [J]. 核动力工程, 2001, 22(6): 490-493.
YAN Junjie, LIU Jiping, LIN Wanchao, et al. Research on mechanism of steam-water two-phase flow injector [J]. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(6): 490-493.
- [2] 刘继平,严俊杰,林万超,等. 汽液两相流激波升压过程的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(1): 1-8.
LIU Jiping, YAN Junjie, LIN Wanchao, et al. Experimental research on the steam-water two-phase flow shock wave injector [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(1): 1-8.
- [3] SIMPSON M E, CHAN C K. Hydrodynamics of a subsonic vapor jet in subcooled liquid [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1982, 104(2): 271-278.
- [4] CHUN M H, KIM Y S, PARK J W. An investigation of direct condensation of steam jet in subcooled water [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1996, 23(7): 947-958.
- [5] KERNEY P J, FAETH G M, OLSCN D R. Penetration characteristics of submerged steam jet [J]. AIChE Journal, 1972, 18(3): 548-553.
- [6] WEIMER J C, FAETH G M, OLSCN D R. Penetration of vapor jets submerged in subcooled liquids [J]. AIChE Journal, 1973, 19(3): 552-558.
- [7] KIM Y S, PARK J W, SONG C H. Investigation of the steam-water direct contact condensation heat transfer coefficients using interfacial transport models [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2004, 31(3): 397-408.

- [8] EDEN T J, MILLER T F, JACOBS H R. The center-line pressure and cavity shape of horizontal plane choked vapor jets with low condensation potential [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1998, 120(4): 999-1007.
- [9] KHAN A, HAQ N U, CHUGHTAI I R, et al. Experimental investigations of the interface between steam and water two phase flows [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73(6): 521-532.
- [10] XU Q, GUO L J, ZOU S F, et al. Experimental study on direct contact condensation of stable steam jet in water flow in a vertical pipe [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 66(1): 808-817.
- [11] WU X Z, YAN J J, SHAO S F, et al. Experimental study on the condensation of supersonic steam jet submerged in quiescent subcooled water: steam plume shape and heat transfer [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(12): 1296-1307.
- [12] 李涛,宗潇,杨小平,等. 矩形通道内高速蒸汽与过冷水直接接触凝结换热流型的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(5): 50-55.
LI Tao, ZONG Xiao, YANG Xiaoping, et al. Experimental study on flow patterns of direct contact condensation between steam jet and subcooled water flow in rectangular channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(5): 50-55.
- [13] SHAH A, CHUGHTAI I R, INAYAT M H. Numerical simulation of direct-contact condensation from a supersonic steam jet in subcooled water [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 18(4): 577-587.
- [14] ZHOU L, LIU J P, CHEN W X, et al. Numerical investigation on steam jet submerged in subcooled water under different ambient pressures [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2017, 83(4): 48-54.
- [15] ZONG X, LIU J P, LIU J, et al. Experimental study on the interfacial behavior of stable steam jet condensation in a rectangular mix chamber [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 114(1): 458-468.
- [16] GULAWANI S S, JOSHI J B, SHAH M S, et al. CFD analysis of flow pattern and heat transfer in direct contact steam condensation [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(16): 5204-5220.

(编辑 荆树蓉)