

文章编号: 0258-0926(2015)05-0169-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.05.0169

堆芯紧急冷却安注热混合实验研究

任五岳^{1,2}, 边嘉伟^{1,2}, 于国军^{1,2}, 田文喜^{1,2}, 张大林^{1,2},
苏光辉^{1,2}, 秋穗正^{1,2}

1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安, 710049; 2. 西安交通大学核科学与技术系, 西安, 710049

摘要: 以核电厂压水堆中失水事故 (LOCA) 堆芯紧急安注系统 (ECCS) 启动后安注接管与冷管段的 T 型管处冷、热流体混合为研究对象, 进行安注管和主管道内过冷水-高温冷却剂的热混合特性实验以及过冷水-汽水混合物直接接触冷凝特性实验, 通过缩比尺寸实验对热混合相关现象进行研究。结果表明, 单相热混合实验管内温度场随不同射流流型成一定分布; 两相热混合工况安注后冷凝量随主管蒸汽量变化而成线性分布, 并总结实验数据形成适用于本实验直接接触冷凝相关关系式。

关键词: 堆芯紧急安注系统 (ECCS); 安注系统; 热混合; 两相流

中图分类号: TL331 文献标志码: A

Experimental Study on Thermal Mixing in Emergency Core Cooling System

Ren Wuyue^{1,2}, Bian Jiawei^{1,2}, Yu Guojun^{1,2}, Tian Wenxi^{1,2}, Zhang Dalin^{1,2},
Su Guanghui^{1,2}, Qiu Suizheng^{1,2}

1. State Key laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering Department of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. Department of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

Abstract: Through the postulated loss of coolant accident (LOCA) in pressure water reactors (PWRs), the cooling water from the emergency core cooling system (ECCS) start and then inject into the cold leg. The scaling-down experiment aims to study the characteristics of thermal mixing in T-junction, including two subprojects: single phase thermal mixing test and two phase flow direct contact condensation test. The conclusion indicated that: The temperature field in the cross-section of pipes was affected by the jet flow on single phase thermal mixing test; In two phase flow direct contact condensation test, the mass of condensation after cooling goes to linear distribution with the jet flux.

Key words: ECCS, Safety injection system, Thermal mixing, Two phase flow

0 引言

压水堆失水事故 (LOCA) 工况下, 堆芯紧急冷却 (ECC) 系统投入使用, 安注的过冷水与冷管段内的高温冷却水或者汽水混合物在 ECC 安注接管附近发生热混合。ECC 安注管的位置与压水堆堆型密切相关。二代及二代加反应堆, ECC 安注管一般布置在一回路管道上。

在小破口 LOCA 中, 安注水注入冷管段后可

能会发生冷热水热搅浑和直接接触冷凝现象; 随着系统压力降低和蓄压安注的启动, 较高的安注流量使得直接接触冷凝现象更易发生; 而当发生较大破口事故时, 冷腿段安注过程中的冷凝将成为影响堆芯再淹没的重要因素, 有效减少下降段的回流并且提升 ECC 安注的能力。伴随蓄压安注的结束以及低压安注的持续进行, 直接接触冷凝始终贯穿着整个安注过程。对于 ECC 安注热混合

收稿日期: 2015-01-28; 修回日期: 2015-07-10

基金项目: 大型先进压水堆核电站重大专项资助项目 (2011ZX06004-024)

作者简介: 任五岳 (1990—), 男, 在读博士研究生, 现主要从事核热工水力实验及数据分析工作

与直接接触冷凝实验,国外已建立了一些台架^[1-2]并获得了一些实验数据,也分别为不同软件模型提供了实验数据验证。目前热混合研究试验台架均是整体性实验台架,而针对 ECC 安注热混合现象的分离实验台很少。国内也没有相关涉及安注热混合的实验台架。几乎所有的国外整体试验台架在进行两相混合实验时,其主管内设计工况均为纯蒸汽,而现阶段研究发现实际大破口 LOCA 过程中,当安注系统正式进行安注时,从破口时开始计算其持续时间将可能超过 100 s,此时冷管段主管内由于破口泄压很可能出现气-液两相流,故对气-液两相流安注热混合研究具有重要价值。

1 实验原理

关于 T 型管单相安注热混合实验, Naik-Nimbalkar (2010)^[3]对其 T 型接管热混合实验背景和研究方向进行了综述。单相热混合实验采用 T 型管结构,其中支管与主管间设计有一定的安注倾角,主管直径为 D ,支管直径为 d 。主管内为饱和温度点以下高温水,支管温度初始为常温并在实验中增加温度梯度。具体结构如图 1 所示。

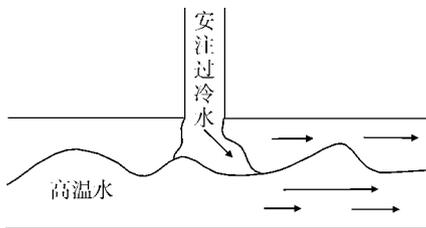


图 1 单相安注示意图

Fig. 1 Scheme for Single Phase Flow Thermal Mixing

关于 T 型管安注热混合现象对管内温度场分布的影响, Seyed Mohammad Hosseini (2008)^[4]针对 90° 安注倾角单相热混合进行研究,得出以下结论。

单相热混合流型主要由射流系数 M_R 确定: $M_R < 0.35$ 为冲击射流; $0.35 < M_R < 1.35$ 为偏转射流; $M_R > 1.35$ 为附着射流及壁面射流。 M_R 定义式如下:

$$M_R = \frac{\rho_m V_m^2 D_m D_b}{\frac{\pi}{4} D_b^2 \rho_b V_b^2} \quad (1)$$

式中, V_m 、 V_b 分别代表主管流速和支管流速;

D_m 、 D_b 分别代表主管直径和支管直径; ρ_m 、 ρ_b 分别代表主管流体密度和支管流体密度。

冲击射流表示支管安注流体直接对主管内单相流体形成冲击,主要表现为影响热混合区域水平管内下壁面温度。

偏转射流表示支管安注流体对主管内单相流体存在冲击,但由于主管内流体动量较大故部分影响热混合区域水平管内下壁面温度。

附着射流及壁面射流表示由于主管内单相流体动量较大并影响支管安注效果,支管的冷却效果主要影响热混合区域水平管内上壁面温度。

两相热混合实验同样采用 T 型管结构,与单相热混合试验段几何尺寸相似。其中一种实验工况为主管内为蒸汽,支管温度初始为常温。具体结构如图 2 所示。

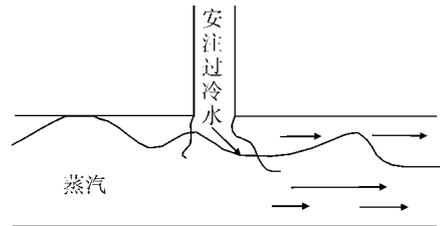


图 2 两相安注示意图

Fig. 2 Scheme for Two Phase Flow Thermal Mixing

Janicot A and Bestion D (1993)^[5]总结的两相相间冷凝可以表达为:

$$Q_{\text{cond}} = h_i A_i \Delta T \quad (2)$$

式中, h_i 为传热系数; A_i 为相间传热面积; ΔT 为管内蒸汽与安注过冷水之间的温差。

Nu 为相间冷凝传热系数,其表达式为:

$$Nu = \frac{Q_{\text{cond}}}{d_{\text{SI}} k_1 \Delta T} \quad (3)$$

式中, k_1 为安注冷却水的热导率; d_{SI} 表示支管直径。

Re_{SI} 表示支管流体的流动特性,其表达式为:

$$Re_{\text{SI}} = \frac{\rho_1 V_{\text{SI}} d_{\text{SI}}}{\mu_1} = \frac{4 \dot{m}_{\text{SI}}}{\pi \mu_1 d_{\text{SI}}} \quad (4)$$

式中, \dot{m}_{SI} 为安注冷却水的质量流量; μ_1 表示安注冷却水的动力粘度。

Westinghouse COSI^[6]实验台架针对 Nu 与 Re 的关系依据其实验数据提出相对应的关系式为:

$$Nu = 1.7 Re_{\text{SI}}^{1.1} \quad (5)$$

2 实验台架介绍

本实验针对压水堆核电厂中可能出现的单相、汽-水两相 ECC 安注热混合原型进行缩比实验研究，实验工况分为：单相热混合实验，即高温冷却剂-安注过冷水热混合实验；两相热混合实验，即汽水混合物-安注过冷水直接接触冷凝实验。实验段示意图如图 3 所示。

同时在热混合前后均按照一定的方式布置有多个热点偶对热混合前后管内流体进行测温。

对于单相热混合实验，试验件直径比按照近似 1:10 选定作为实验用主管和安注支管。通过改变压力、主管入口流量和温度、安注管入口流量和温度研究单相热混合温度场等变化。实验过程发生安注热混合后不使用汽水分离段。

对于两相热混合实验，试验件直径比按照近似 1:10 选定作为实验用主管和安注支管。通过改变压力、主管入口水流量、主管入口蒸汽流量、安注管入口流量研究两相热混合冷凝现象。

3 实验数据处理及结果分析

3.1 单相热混合实验

ECC 安注单相热混合实验中，主管和支管的工质温度分别按核电厂实际工况或者接近实际工况选取，而 2 个管道的尺寸与电厂实际尺寸之比为 1:10，根据相关模化理论，单相实验以 M_R 作为相应准则数进行实验。

在不同 M_R 工况下 T 型试验段安注热混合区域后距离最近的测温截面 I 下壁面温度测点具体

为：主管入口流体温度 90；支管入口流体温度 40~60；主管内流体质量流量 100~1000 kg/h；支管内流体质量流量 100 kg/h。实验结果如图 4、图 5 所示。

3.2 两相热混合实验

ECC 安注两相热混合实验压力为常压；主管

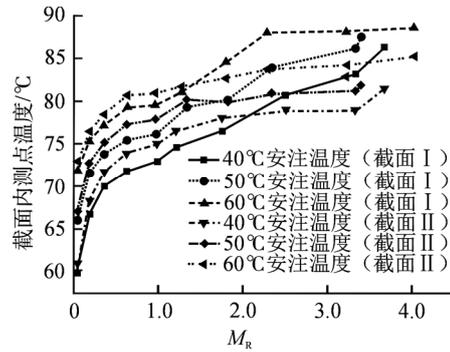


图 4 测温截面 I、II 下底温度受不同 M_R 数射流影响
Fig. 4 Effect of Different M_R in Bottom of Cross-section I and II

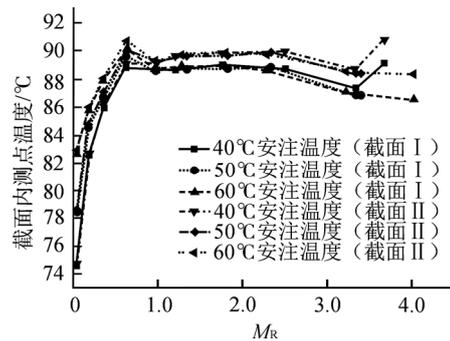


图 5 测温截面 I、II 上部温度受不同 M_R 数射流影响
Fig. 5 Effect of Different M_R in Top of Cross-section I and II

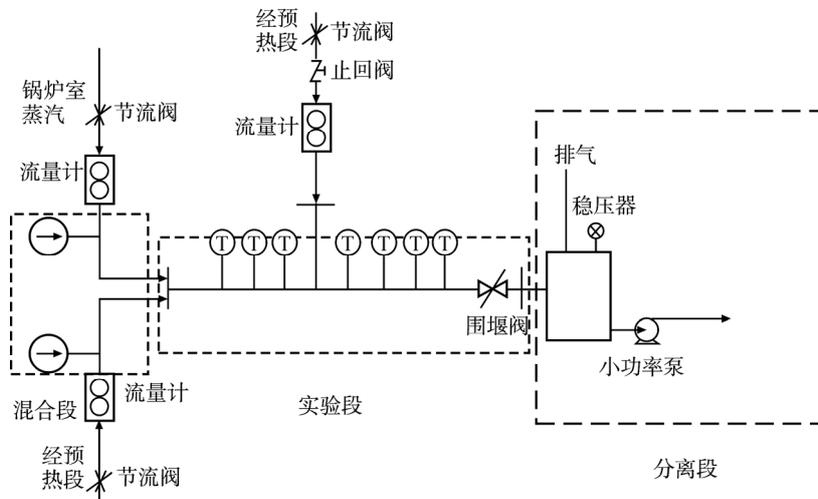


图 3 实验段示意图
Fig. 3 Structure of Test Section

内蒸汽流量 25~125 kg/h; 安注支管流量 100~500 kg/h; 主管内蒸汽温度稍高于饱和温度 (101 °C); 安注支管流体温度为常温 (25 °C)。根据以上实验工况, 获得的实验数据结果如图 6 所示。

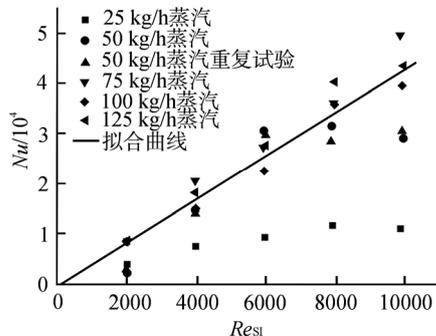


图 6 安注直接接触冷凝关系图

Fig. 6 Experimental Nusselt Number Versus Reynold Shown Direct Contact Condensation in T-Junction

通过对本实验数据进行拟合, 纯蒸汽安注冷凝对应关系式为: $Nu=3.774Re_{si}$ 。

3.3 实验数据分析

实验数据表明, 当 $M_R < 0.3$ 时, 主管内下壁面温度受安注过冷水冷却影响较大, 温度降低; 当 M_R 提高后, 温度以较大的速率上升, 主管内下壁面温度趋近于主管入口温度, 即支管安注过冷水对圆管内下底温度区域冷却的能力降低, 可以判断支管射流由于主管流体动量增加而无法直接冲击至下底管壁面, 这说明安注射流由冲击射流转变为了偏转射流。这与文献[4]中垂直管侧面安注结论相似。

$M_R > 3$ 时, 主管内上壁面温度受到安注过冷水冷却影响而有所降低, 当 M_R 逐渐增大后支管射流被主管较大的动量影响而附着在上壁面附近流动, 这说明安注射流由偏转射流转变为了壁面射流(上壁面射流)。由于实验工况存在安注倾角, 且实验主管为水平圆管, 这与文献[4]中垂直管侧面安注实验工况不同, 故实际单相安注热混合实验结论不同。

两相热混合实验数据表明: 本实验与 COSI 总结的基于 ECC 安注热混合的冷凝关系式系数存在差异。较低的蒸汽流量下, 当出现支管安注

过冷水对主管内蒸气的冷却能力 (R_T) 较大工况时, 安注冷却水有较大的冷却能力, 故在其 Re_{SI} 达到一定的临界值时, 主管内的蒸汽大部分被冷凝, 故 Nu 成平稳趋势, 表征冷凝量将不再线性增加; 当出现 R_T 较小工况时 ($R_T < 1$), 冷凝量与安注过冷水呈线性、正比关系, 即随着安注过冷水的增加, 冷凝量增加, 冷凝现象越明显。由于本实验主管/支管直径比与 COSI 实验不同, 且本实验属于分离效应实验, 与 COSI 整体性实验台不同, 故需要做进一步的不确定性分析。

4 结论

本文通过对 T 型管中单相、两相热混合安注的实验研究, 分析实验中温度场、流动状态以及两相实验安注过后冷凝量, 获得以下符合本实验工况的结论: 当 $M_R < 0.3$ 时为冲击射流; 当 $0.3 < M_R < 3.0$ 时为偏转射流; 当 $M_R > 3$ 时为附着射流及壁面射流; 纯蒸汽安注冷凝对应关系式为: $Nu=3.774Re_{si}$ 。

参考文献:

- [1] Damerell P S, Simons J W, Damerell P S, et al. Reactor Safety Issues Resolved by the 2D/3D Program in International Agreement Reports. General Studies of Nuclear Reactors[R]. 1993.
- [2] Reyes, J N, PTS thermal hydraulic testing in the OSU APEX facility. International Journal Of Pressure Vessels And Piping[J], 2001,78(2-3):185-196.
- [3] Naik-Nimbalkar V S, Patwardhan A W, Banerjee I. Thermal mixing in T-junctions. Chemical Engineering Science[J]. 2010, (65): 5901-5911.
- [4] Seyed M H, Kazuhisa Y, Hidetoshi H. Classification of turbulent jets in a T-junction area with a 90-deg bend upstream. International Journal of Heat and Mass Transfer [J]. 2008, 51, 2444-2454.
- [5] Janicot A, Bestion D. Condensation modeling for ECC injection. Nuclear Engineering and Design[J]. 1993, 145: 37-45.
- [6] Liao J, Frepoli C, and Ohkawa K. Condensation in the Cold Leg as Result of ECC Water Injection during A LOCA: Modeling and Validation. Proceedings of 14th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-14). Toronto, Canada[C]. 2011.

(责任编辑: 张祚豪)