

文章编号: 0258-0926(2018)03-0029-04; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0029

# RELAP5 大空间自然对流管束传热模型 改进及验证

鲜麟<sup>1,2</sup>, 江光明<sup>1,2</sup>, 李捷<sup>1,2</sup>, 王小吉<sup>1,2</sup>,  
杨帆<sup>1,2</sup>, 李峰<sup>1,2</sup>, 冉旭<sup>1,2</sup>

1. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213; 2. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要:** 基于经验证的单相和两相大空间自然对流管束传热模型,对 RELAP5 进行了改进,使得程序具备了模拟单相和两相大空间自然对流管束传热的能力。采用改进后的系统程序 RELAP5 和改进前的系统程序 RELAP5 对试验模拟体进行了对比计算,并采用试验数据对改进后的程序进行了验证,结果表明,改进后的系统程序计算结果与试验数据吻合较好。

**关键词:** RELAP5; 非能动余热排出系统; 大空间自然对流传热

**中图分类号:** TL33 **文献标志码:** A

## Improvement and Validation of Free Convection Heat Transfer Model for Tube Bundle in RELAP5

Xian Lin<sup>1,2</sup>, Jiang Guangming<sup>1,2</sup>, Li Jie<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoji<sup>1,2</sup>,  
Yang Fan<sup>1,2</sup>, Li Feng<sup>1,2</sup>, Ran Xu<sup>1,2</sup>

1. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Chengdu, 610041, China;  
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

**Abstract:** Based on the validated model of single phase and two phase free convection heat transfer from tube bundle, RELAP5 is improved with the ability to simulate the single phase and two phase free convection heat transfer for tube bundle. The test simulation result analyzed with the improved RELAP5 was compared with that from the original RELAP5. The comparison shows good agreements between the experiment data with the simulation result from improved RELAP5.

**Key words:** RELAP5, Passive residual heat removal system, Free convection heat transfer

### 0 引言

日本福岛事故之后,非能动余热排出系统的应用和研究越来越受到重视。在这些先进的非能动设计中,采用了大水池作为系统热阱,在大水池中涉及到了单相和两相的大空间自然对流管束传热。现有的系统程序中缺乏经试验验证的描述单相和两相大空间自然对流管束传热的模型,仅包含早期基于较低热流密度,单根圆管单相自然对流传热试验拟合的传热模型<sup>[1]</sup>。非能动余热排出系统大水池中复杂的换热问题超出了此类模型的适

用范围,因此无法精确计算大水池中的传热问题。随着非能动余热排出系统的发展,关于非能动余热排出换热器在大空间中的自然对流传热试验开始增多,其中既包含试验结合数值模拟机理研究<sup>[2]</sup>,也有对一体化小型反应堆非能动余热排出系统的试验,例如韩国的 SMART<sup>[3]</sup>,也包括了较高功率反应堆非能动余热排出系统的试验,例如 AP600 非能动余热排出研究性试验,华龙一号非能动余热排出验证性试验等。

本研究选取了试验数据较为完备的 AP600 非能动余热排出试验,选取经试验验证改进后的单相自

然对流传热和两相自然对流传热模型,对系统程序 RELAP5 进行改进,包括计算逻辑实现以及传热模型的植入。最后利用改进前和改进后的系统程序模拟了试验工况并采用试验数据进行了验证,得到了改进后的系统程序 RELAP5。

## 1 基准试验数据和模型

### 1.1 AP600 非能动余排试验简介

试验中等高等压模拟了 AP600 非能动余热排出系统的换热器管路和最终热阱水箱,温度流量参数均与系统实际工作参数一致。试验中还研究了水箱壁面、水箱隔板对传热管以及传热管之间的传热影响,最终给出了适用于  $P/D \geq 2$  的单相和两相大空间自然对流管束传热模型<sup>[4]</sup>。此试验温度测点较为丰富,采用管壁预埋热电偶的方式测量管壁面温度,并考虑了多种影响壁温测量的补偿措施,预埋的热电偶也没有影响管内外流场分布,保证了试验测量数据的准确性和独立性。除了精确测量壁温以外,还对管内流体温度分布和流量给出了测量值,这使得此试验成为了较好的研究此类系统传热模型的基准试验。

### 1.2 试验数据和模型

试验方根据多个工况的试验数据,在经典自然对流单相和两相传热模型的基础上,开发了适用于管束传热的单相和两相大空间自然对流传热模型。该传热模型适用与  $P/D \geq 2$  的管束换热器。对于单相大空间自然对流传热模型而言针对水平管束和竖直管束有不同的模型形式,对于两相大空间自然对流传热模型而言则有统一的模型形式。具体传热模型见式(1)~式(3)。

竖直管束单相大空间自然对流传热模型:

$$Nu_L = 0.13(Gr_L Pr_1)^{1/3} \quad (1)$$

适用范围:  $10^7 < Gr_L Pr_1 < 10^{11}$

水平管束单相大空间自然对流传热模型:

$$Nu_D = 0.53(Gr_D Pr_1)^{1/4} \quad (2)$$

适用范围:  $10^5 < Gr_D Pr_1 < 10^9$

式中,  $Gr_D$  为特征长度为管径的格拉晓夫数,表达式为  $Gr_D = \rho_l^2 g D^3 B \Delta T / \mu_l^2$ , 同理可知  $Gr_L$ ,  $\rho_l$  为水密度;  $D$  为特征长度管径;  $B$  为热膨胀率;  $\Delta T$  为壁温和流体温差;  $\mu_l$  为水粘度;  $Pr_1$  为水的普朗特数;  $Nu_D$  为努赛尔数; 表达式为  $Nu_D = hD/\lambda$ ;  $h$  为传热系数;  $\lambda$  为水的热导率, 同理可知  $Nu_L$ 。

两相大空间自然对流传热模型:

$$\left[ \frac{C_{pl} \Delta T}{h_{fg}} \right] \frac{1}{Pr_1} = C_{sfPRHR} \left[ \frac{q}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{g_c \sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \right]^{-0.4523} \quad (3)$$

适用范围:  $0 < \Delta T < 120$

式中,  $C_{pl}$  为水的定压热容;  $\Delta T$  为壁温和流体温差;  $h_{fg}$  为汽化潜热;  $Pr_1$  为水的普朗特数;  $g$  为重力加速度;  $g_c$  为重力加速度常数因子值为无量纲的值;  $\sigma$  为水的表面张力;  $\rho_l$  为水密度;  $\rho_v$  为汽密度;  $q$  为热流密度;  $C_{sfPRHR}$  为经验系数, 试验拟合值为 0.0413。

选取了典型试验工况对改进后的程序进行验证计算。试验工况为单管置于试验水箱中(试验中已证实多管情形下,  $P/D \geq 2$  时管与管之间不会对传热产生显著影响), 管中流量保持定值, 改变管入口温度, 当水箱整体饱和时(试验中选择底部温度测点达到 100 的时刻)记录壁温以及由管内流体焓值变化计算出的外壁面热流密度值。具体试验数据如表 1 所示。

表 1 试验数据  
Table 1 Tests Data

试验工况	入口流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	入口温度/ $^{\circ}\text{C}$	入口压力/MPa
工况 1	0.0639	343.3	16.10
工况 2	0.0726	287.8	10.07
工况 3	0.0631	232.2	7.97
工况 4	0.0650	148.3	3.59
工况 5	0.0646	128.3	3.64
工况 6	0.0602	126.7	3.69

## 2 程序改进

### 2.1 程序简介

RELAP5 是由美国爱德华国家工程试验室为美国核管会(NRC)发展的两流体、非平衡、非均匀、六方程轻水反应堆(LWR)瞬态系统分析程序。RELAP5 自发布以来在世界各国得到了广泛的应用和发展,通过大量的信息反馈和再开发,已使其成为一款功能强大、可靠性高的系统热工水力分析工具。另外由于其超前的程序编制思想,源程序中预留了许多接口用于程序的再开发,使得程序的扩充较为方便。

### 2.2 壁面传热计算流程

RELAP5 中包含了单相自然对流传热、强迫对流传热、过冷沸腾以及池式沸腾传热等全面的

传热计算逻辑和相关模型，通过空泡份额、流体温度以及壁面温度等多个参数判断计算路径，不同的计算路径会导致所选择的传热模型有差异，不同的计算路径下有 MODE0 至 MODE11 共 12 种计算模式<sup>[5]</sup>。

RELAP5 原程序中计算自然对流传热系数采用 Churchill-Chu 关系式，沸腾传热采用 CHEN 关系式，这两类关系式建立的试验数据库中均未包含大空间管束传热的试验数据，不完全适用。

将 AP600 的试验模型植入 RELAP5 中需要在程序中增加相应的计算判断逻辑和相关的传热模型，为尽量不改变程序架构且不影响程序其他模块的计算结果，对类似管束换热器浸泡在大水箱的情形进行了专门的考虑。程序植入只针对 MODE2 和 MODE3 两种模式。

### 2.3 模型植入和程序改进

非能动余热排出系统管束换热器在大水箱中的传热模式对应 MODE2 和 MODE3 两种模式，即包含了单相和两相自然对流传热的 2 种传热模式，在 2 种模式共存的情形下通过选择单相和两相自然对流传热模型所计算出的传热系数的最大值来计算热流密度，此假设在 AP600 的试验中已经证实可以较为准确的计算换热器外壁面的换热量。需要修改的子函数包括处理传热逻辑的 HTRC1、处理自然对流传热的子函数 DITTUS 和处理沸腾传热的子函数 PREDNB 和 PREBUN。在子函数 DITTUS、PREDNB 和 PREBUN 中植入了 AP600 试验验证的关系式。

RELAP5 内置了多种壁面几何形状选择接口，通过在用户输入文件 INPUT 热构件部分指定几何形状，可以对指定位置处的壁面传热进行指定求解。本次模型植入基于该功能实现，借用了 RELAP5 几何形状接口中的 111 和 134，通过在 INPUT 中指定几何形状接口来实现余排换热器外壁面与水箱的传热，其中水平管束部分为 134，竖直管束部分为 111。通过对 HTRC1 逻辑判断入口，以及 DITTUS、PREDNB 和 PREBUN 子函数逻辑和计算模型进行修改，使得程序在计算过程中可识别该接口，并由此进入子函数 DITTUS、PREDNB 和 PREBUN 中对应的计算模块，分别对水平管束和竖直管束的单相和两相大空间自然对流传热进行求解，并输出热流密度供其它子函数进行迭代求解。此改动不会影响非特别指定几

何形状 111 和 134 控制体计算。

图 1 和图 2 分别为 DITTUS、PREDNB 和 PREBUN 中的计算模型修改逻辑简图。

通过以上模型和计算逻辑的改进，得到了改进后的 RELAP5 计算程序，具备了单相和两相大空间自然对流管束传热的计算能力。

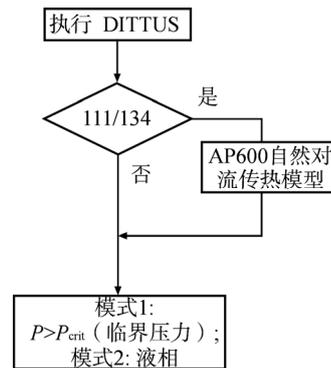


图 1 DITTUS 修改逻辑简图  
Fig. 1 DITTUS Logic Modification

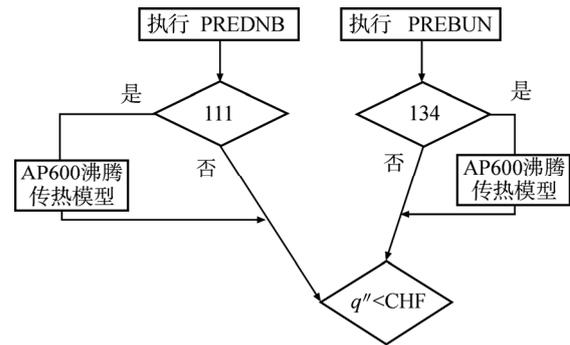


图 2 PREBUN 和 PREDNB 修改逻辑简图  
Fig. 2 PREBUN & PREDNB Logic Modification

### 2.4 用户输入

程序的模型植入最大程度的保留了原程序的计算逻辑，系统输入文件也不需要进行过多的修改，只需要对需要执行相关计算的换热器热构件部分进行指定。假设热构件右边界为换热器外壁面，则 INPUT 中其它位置输入规则与原 RELAP5 输入规则一致，只需要对几何形状指定字进行输入，其中 134 代表水平管束，111 代表竖直管束。

## 3 验证计算

### 3.1 计算模型

对表 1 试验数据所代表的试验工况进行模拟计算，评价改进后的 RELAP5 的计算能力。为此采用 RELAP5 和改进后的 RELAP5 分别对试验工

况进行模拟,采用如图3所示的计算节点模拟。

### 3.2 计算结果

计算中所选取的边界条件与试验工况一致,计算中的数据处理方法也与试验中采用的数据处理方法一致。将 RELAP5 和改进后的 RELAP5 对选取工况的计算结果与试验结果整理在对数坐标图中,选取较为典型的壁面热流密度和传热温差进行对比,结果如图4所示。

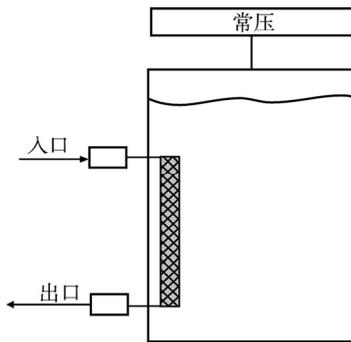


图3 模拟试验的计算节点

Fig.3 Grid of Test Simulation

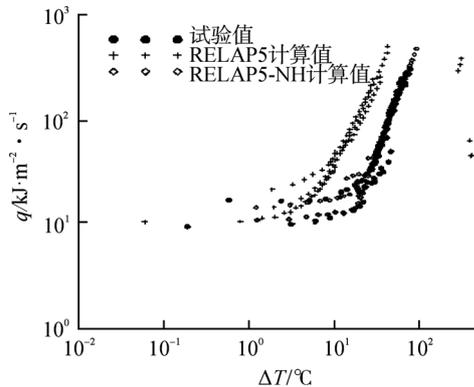


图4 热流密度对比图

Fig.4 Comparison of Heat Flux between Tests Data and Simulation Result

$\Delta T$ —传热管壁温和管外水箱中饱和液体的温差; $q$ —外壁面热流密度

### 3.3 差异性分析

由计算结果可知,改进后的 RELAP5 程序计算结果与试验数据非常吻合,而原 RELAP5 程序计算结果与试验数据差异较大,经核实发现程序在修改前后沸腾传热计算部分有较大差异。原 RELAP5 程序当壁面过热度超过 100 时,会判定此时的沸腾传热为过渡沸腾传热或模态沸腾传热,相关的传热系数计算采用 CHEN 关系式进行

计算。多个试验工况中管入口处过热度均超过了 100,此时 RELAP5 计算出的管入口处传热系数极小,管壁温飙升,所以出现了图4中十字点在较高过热度时有较低的热流密度;在管中下部依据原程序中的判断逻辑,大部分区域处于核态沸腾传热,此时有较高的传热系数,所以管壁热流密度明显高于试验数据;管底部区域依据原程序中的判断逻辑属于单相自然对流传热,此时计算出的热流密度与试验数据相当。而采用试验拟合出的单相和两相大空间自然对流管束传热关系式计算则能较为准确的反映整个传热过程,试验中也并没有监测到局部的模态沸腾而导致的壁温飙升。

## 4 结论

由试验和计算对比也可知,此类传热问题中两相自然对流传热是影响传热过程和现象的重要传热模式,而不同的单相自然对流传热模型计算出的结果均与试验数据较为接近,究其原因在于相对于单相自然对流传热而言,两相自然对流传热过程更为复杂且传热系数更高,是影响此类传热的关键因素。

改进后的 RELAP5 程序有效改善了程序的计算结果,较为吻合试验数据,消除了原 RELAP5 程序计算中出现的明显不合理的现象。

### 参考文献:

- [1] Churchill S W, Chu, H S. Correlation equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1974, 18: 1049-1053.
- [2] Gandhi M S, Sathe M J, Joshi J B, et al. Two phase natural convection CFD simulations and PIV measurement[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66: 3152-3171.
- [3] Chung YJ. Two phase natural circulation and the heat transfer in the passive residual heat removal system of an integral type reactor[J]. Annals of Nuclear Energy, 2006, 33: 262-270.
- [4] Hochreiter, L E, Peters. AP600 Passive Residual Heat Removal Heat Exchanger Test Final Report. WCAP-12980, Revision3[C]. 1997.
- [5] Information Systems Laboratories, Inc. RELAP5/ MOD 3.3 Code Manual. Volume IV: Models and Correlations [M]. 2001.

(责任编辑:张祚豪)