

Analysis on Piping Flow Field of Reactor Coolant System

Yao Li, Jiange Liu

Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan Hubei
Email: hustliyao@126.com

Received: Mar. 20th, 2018; accepted: Apr. 4th, 2018; published: Apr. 11th, 2018

Abstract

Aiming at the problem that the arrangement of flow-meter or surge pipeline would disturb the flow field of the coolant loop, and considering that the instability of the flow field would influence the measurement accuracy, in order to estimate whether the nozzle's position is appropriate or not, the CFD software ANSYS 14.5 is adopted to simulate and calculate the hotleg's three-dimensional flow field of Reactor Coolant System. Without regard to the heat transfer model, velocity and pressure distribution under the operation situation are gained. The results show that there exist large velocity gradient and pressure drop at the elbow of the pipe. Relevant analysis results may offer reference and optimization advice.

Keywords

Reactor Coolant System, Piping, Numerical Simulation, Flow Field

反应堆冷却剂系统主管道流场分析

李 瑶, 刘建阁

武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉
Email: hustliyao@126.com

收稿日期: 2018年3月20日; 录用日期: 2018年4月4日; 发布日期: 2018年4月11日

摘 要

针对流量计等测控仪表的布置及波动管等其他管道接口对主管道流场扰动的问题, 考虑到流场不稳定性对仪表测量精度会有影响, 为了判断接口位置是否合适, 采用商用流场分析CFD软件ANSYS 14.5模拟计算了反应堆冷却剂系统其中一个环路主管道热管段的三维流场, 不考虑传热模型的情况, 得到了在系统

运行参数下主管道热管段的速度场和压力场, 结果表明在管道弯头处存在较大的速度梯度和压降, 相关分析结果为仪控、热工水力设计等提供参考及优化建议。

关键词

反应堆冷却剂系统, 主管道, 数值模拟, 流场

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

设计反应堆冷却剂系统主管道需要解决的一大问题是接口布置问题。在布置流量计时需要考虑测点所得能否真实反映整个管道流场的情况, 因此要了解管道内的流动情况; 另一方面在设计波动管及其他系统管道接口位置时, 要考虑横向射流对主管道原本流场的影响。

在关于 AP1000 反应堆冷却剂系统主管道流场的研究分析中, 采用三维 CFD 软件分析主管道内的流场, 获得了比较准确的主管道阻力计算结果, 并验证了热段弯管流量计布置位置的合理性, 即将热管段弯管流量计上部的管嘴设在偏离垂直方向 30° , 可以有效减少管嘴处的湍流强度, 提高测量的准确性[1]。

本文通过 ANSYS 14.5 三维流场分析软件模拟计算反应堆冷却剂系统主管道热管段的流场, 利用 ICEM 建模并划分网格, 导入 FLUENT 进行数值计算, 以得到热管段内流体的三维速度场和压力场。

2. 计算模型及参数设置

2.1. 物理模型

本文研究对象为反应堆冷却剂系统主管道热管段, 材料为奥氏体不锈钢。

本数值模拟的物理模型是从反应堆压力容器出口管嘴到蒸汽发生器一次侧入口管嘴的管道及其内流体。反应堆压力容器出口即为本物理模型流场的进口, 蒸汽发生器一次侧入口即为本物理模型流场的出口。

主管道热管段的几何尺寸参数暂定如下:

- 1) 热管段管道内径: $\Phi 269$ mm;
- 2) 热管段管道长度: 从反应堆压力容器出口管嘴开始, 各直管段长度依次取为: 1800 mm、750 mm、1657 mm、1153 mm, 三段弯管的曲率半径和弯曲角度均为 R500 mm、 90° ; 其中第一个直管段与第三个直管段的空间夹角为 59° 。

对主管道热管段的几何结构进行简化, 不考虑波动管和测控仪表等接口, 简化为壁面处理。热管段俯视图如图 1 所示。

在 ANSYS ICEM 14.5 中进行三维建模, 简化的几何模型如图 2 所示。

采用非结构化网格对热管段几何模型进行网格划分, 体网格类型选择 Tetra/Mixed, 划分类型选择 Robust-Octree, 同时划分边界层网格(棱柱网格)。在设置中, 初始边界层高度设为 1, 选择指数增长形式, 增长比率设为 1.2, 边界层层数设为 7。

入口处网格如图 3 所示, 由下图可看到, 网格划分具有很好的边界层网格。

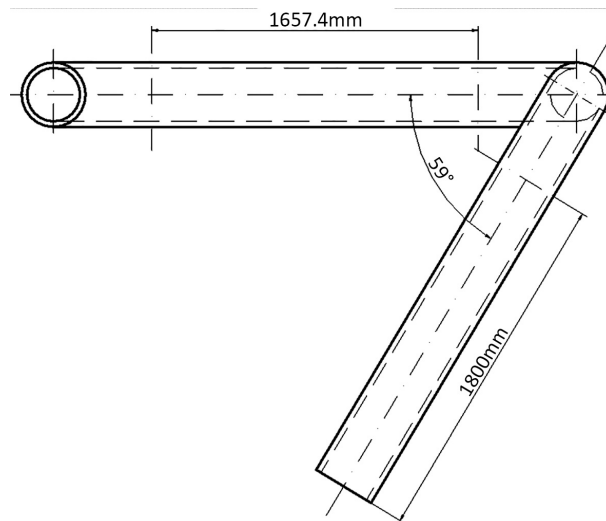


Figure 1. Top view of hotleg
图 1. 热管段俯视图

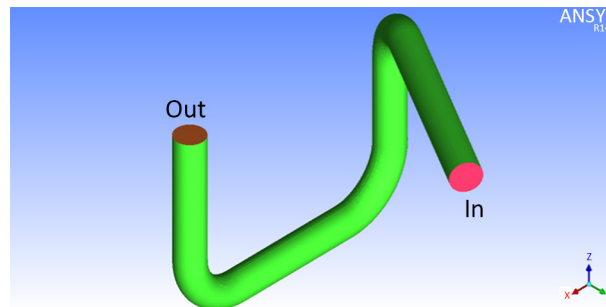


Figure 2. Geometry model of hotleg
图 2. 热管段几何模型

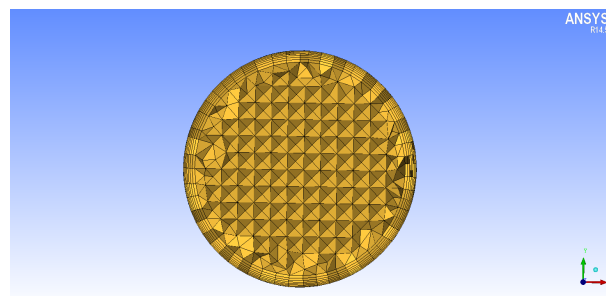


Figure 3. Mesh of pipe's transverse section
图 3. 管段横截面网格

2.2. 数学模型

在 ANSYS FLUENT 14.5 中进行三维管道的数值计算, 选择基于压力的稳态求解器, 并设置重力加速度 g 值为 9.8 m/s^2 。流体温度取 284°C , 压强取 14.0 MPa , 不考虑传热模型, 忽略温度变化对流体物性参数的影响, 流体设为定温。

根据反应堆冷却剂系统的设计参数, 估算热管段流动形态为湍流, 雷诺数为: $\text{Re} = \rho v d / \mu = 754.93 \times 9.07 \times 0.269 / (9.4 \times 10^{-5}) = 1.95 \times 10^7$ 。湍流模型选择 Realizable $k-\epsilon$ 模型, 控制方程包括质量守恒方程和动

量守恒方程, 此处不再列出。

边界条件设置如下:

- 1) 速度进口(velocity-inlet), 流速为 9.07 m/s;
- 2) 压力出口(pressure-outlet), 压强为 14.0 MPa;
- 3) 壁面边界(wall), 无滑移, 粗糙度为 0.03 mm。

3. 计算结果分析

迭代计算得到连续性、速度、湍流脉动动能 k 、动能耗散率 ε 各项残差值均逐步减小, 残差值均接近 10^{-4} , 判断收敛, 输出结果。

3.1. 速度场分析

图 4 所示为管道中心截面的速度分布图, 在管道弯头部分, 局部速度梯度较大, 最高速度达到 12 m/s, 最低速度在 6 m/s 左右。

图 5 所示为图 4 中右侧弯头与管道轴线成 45° 截面处管道横截面的速度分布。由于整个管段不在同一个平面内, 横截面的速度分布并不是对称的。

3.2. 压力场分析

图 6 为管道内流体三维压力(静压)分布情况, 其压强在 14.0 MPa 左右; 流体在出口比入口处略有压降; 整个热管段流场的压降主要发生在弯头部分。热管段进出口压差约为 0.013 MPa。

图 7 为中心截面的压力(静压)分布情况, 流体在弯头处局部最低压强约为 13.975 MPa, 弯头内侧部分; 最高压强约为 14.018 MPa, 弯头外侧部分。

图 8 中所示为弯头处管道横截面压力分布情况(截面线与 X 轴的夹角为 45°)。管道横截面上压力梯度比较均匀, 从弯头内侧向外侧压力逐渐增大, 压差约为 0.04 MPa。若在此处布置弯管流量计, 所测得的

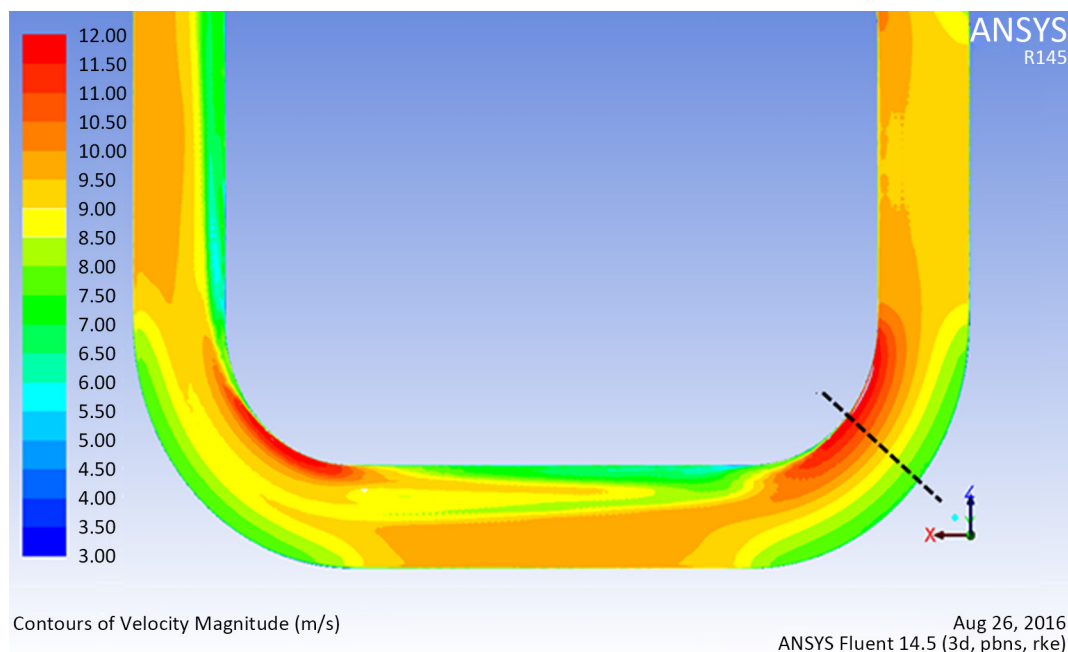


Figure 4. Velocity distribution of pipe's central cross section

图 4. 管道中心截面速度分布图

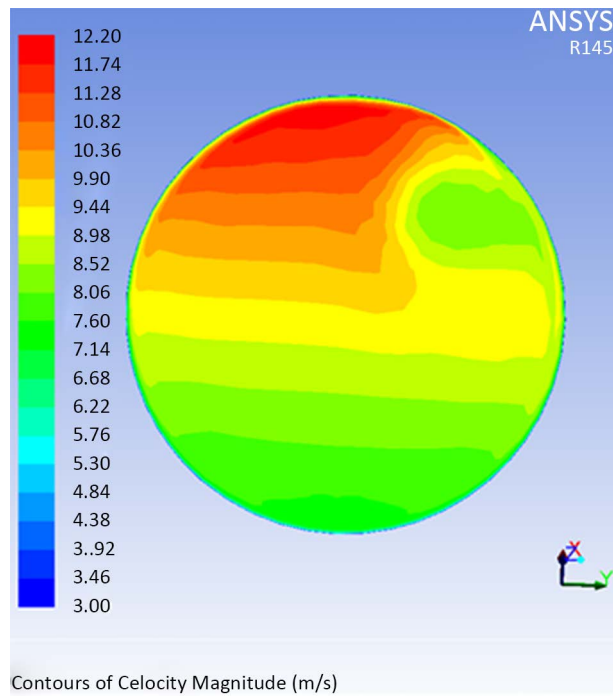


Figure 5. Velocity distribution of pipe's transverse section at the elbow
图 5. 弯头横截面速度分布图

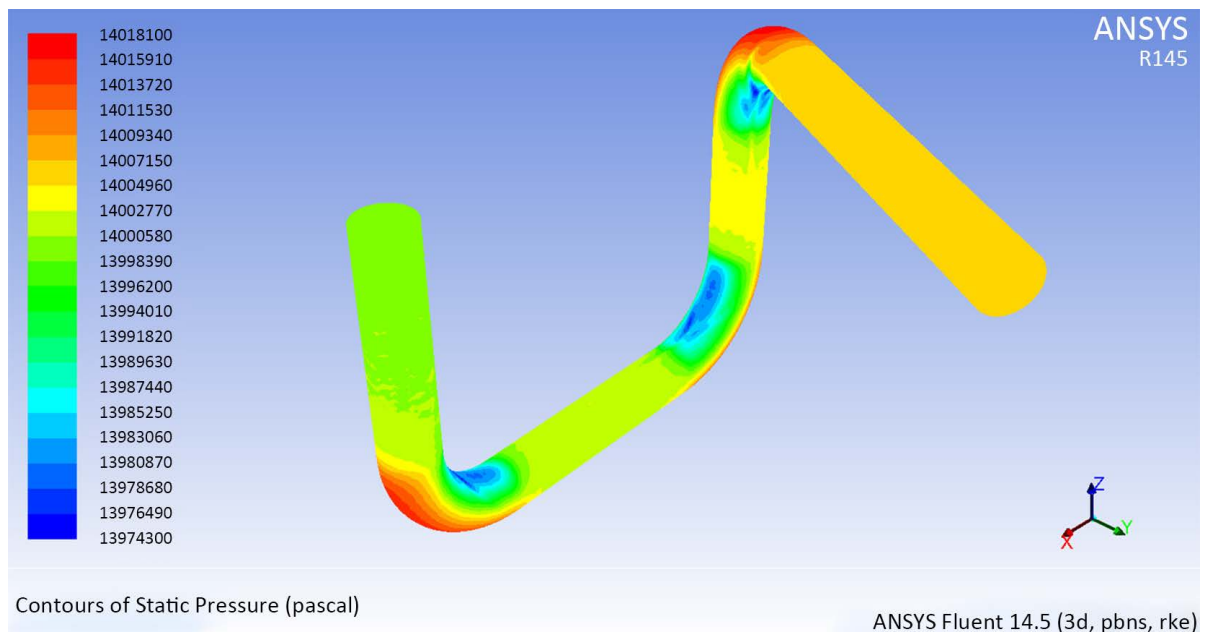


Figure 6. Three-dimensional pressure field
图 6. 三维压力场

数据并不能真实反映流场。

4. 计算结果对比分析

根据水力计算手册, 用公式计算热管段的阻力压降[2]。

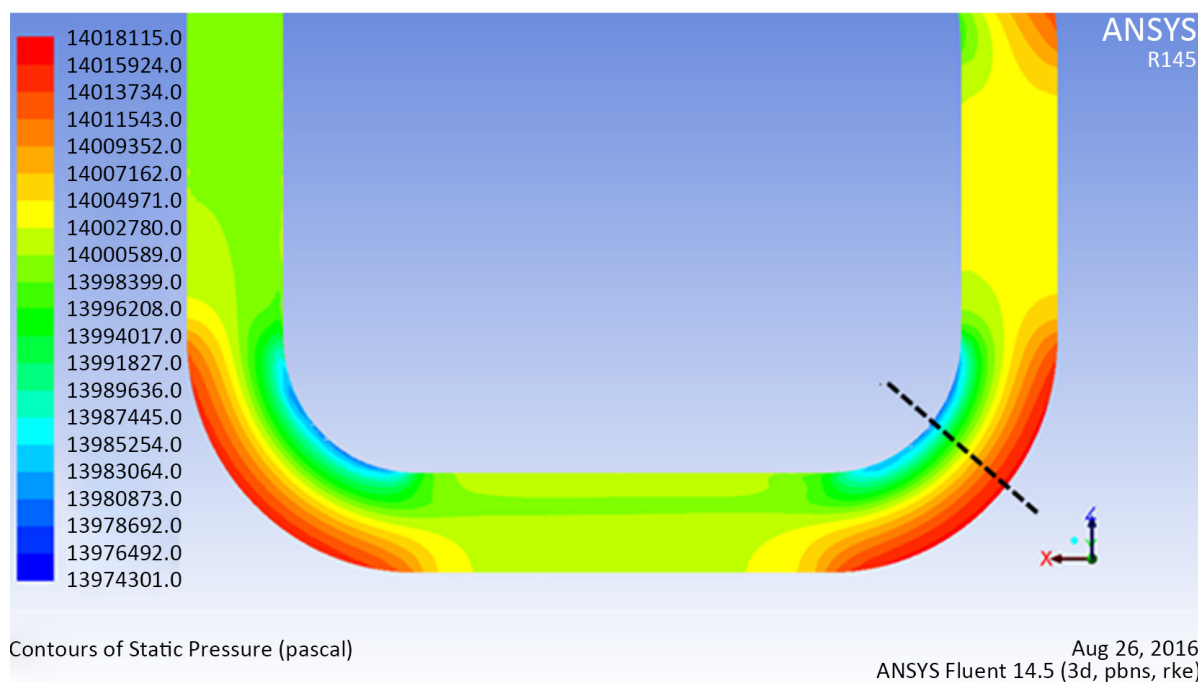


Figure 7. Pressure distribution of pipe's central cross section
图 7. 中心截面压力分布

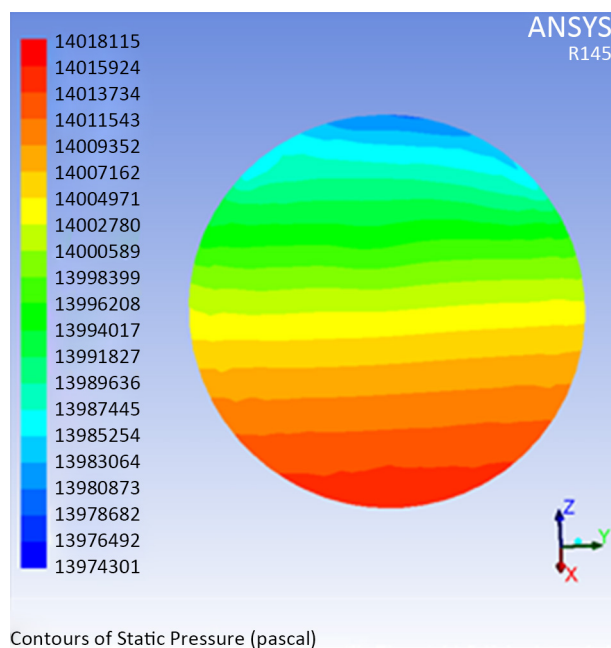


Figure 8. Pressure distribution of pipe's transverse section at the elbow
图 8. 弯头横截面压力分布

1) 由公式 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.14 - 2 \lg \left(\frac{\Delta}{d} + \frac{21.25}{\text{Re}^{0.9}} \right)$

式中 Δ 为管壁粗糙度, 取为 3 mm; d 为管内径, $d = 269$ mm; Re 为雷诺数, $\text{Re} = 1.95 \times 10^7$; 求得沿程阻力系数 $\lambda = 0.012$ 。

$$2) \text{ 由公式 } \zeta = \left[0.131 + 0.1632 \left(\frac{d}{R} \right)^{7/2} \right] \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^{1/2}$$

式中 d 为管内径, $d = 269 \text{ mm}$; R 为弯管曲率半径, $R = 500 \text{ mm}$; θ 为弯管弯曲角度, $\theta = 90^\circ$; 求得各弯头局部阻力系数均为 $\zeta = 0.150$ 。

$$3) \text{ 根据公式 } \Delta P = \sum \left(\lambda \frac{L}{d} \frac{v^2}{2} \rho + \zeta \frac{v^2}{2} \rho \right)$$

式中 d 为管内径, L 为各直管段长度, v 为流速, ρ 为流体密度; 代入已求得的阻力系数 λ 和 ζ , 最终计算得热管段进出口总压降为 0.022 MPa , 且弯头处的局部损失比直管段的沿程损失要大。

本文通过数值模拟计算得到的热管段进出口压差约为 0.013 MPa , 比由以上公式计算得到的进出口压差略小, 这主要是由于公式计算方法考虑了大量的经验公式和保守假设值。

5. 结论

本文通过三维流场分析软件 ANSYS 14.5 模拟计算了反应堆冷却剂系统主管道热管段的流场。利用 ICEM 建模并划分网格, 导入 FLUENT 进行数值计算, 得到了热管段内流体的三维速度场和压力场。

5.1. 速度分布

- 1) 速度场变化梯度较大处主要存在于管道弯头部分;
- 2) 弯头部分最高速度为 12 m/s (发生在弯头内侧区域), 最低速度为 6 m/s (发生在弯头外侧区域)。

5.2. 压力分布

- 1) 压降损失主要发生在管道弯头部分;
- 2) 弯头部分最低压强约为 13.975 MPa (弯头内侧附近区域), 最高压强约为 14.018 MPa (弯头外侧附近区域)。

模拟计算的结果表明管道弯头处的局部流场与其他管段流场存在差异, 在弯头 45° 附近布置弯管流量计所测得的数据并不能真实反映流场, 在布置测点时应尽量避开湍流较强的区域, 同时减少管嘴对流场的影响, 以提高测量精度。

该结果也为反应堆冷却剂系统参数设计与调整提供参考, 其他系统管道接口不适于布置在弯头下游流速较大处。对流动情况进行简单分析也是后续应力分析、热冲击分析的基础。

参考文献

- [1] 夏栓, 徐臻. AP1000 冷却剂回路主管道流场分析[J]. 中国核电, 2015, 8(1): 14-18.
- [2] 李炜. 水力计算手册[M]. 武汉: 中国水利水电出版社, 2006: 3-28.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2332-7111，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：nst@hanspub.org