

核电站中核一级管道的热瞬态分析

陈丽, 田金梅, 曾祥福, 党俊杰

(中国核电工程有限公司 力学室, 北京 100840)

摘要: **目的** 求解管道壁厚方向的温度分布。**方法** 采用 PIPESTRESS 程序, 对某核电站化学和容积控制系统管道的某一瞬态温度曲线进行瞬态热分析。**结果** 得到管道 7 类关键区域的温度场和最不利的温度梯度 ΔT_1 、 ΔT_2 、 T_a 、 T_b , 并将该温度梯度数据与参考电站数据进行对比。**结论** 采用 PIPESTRESS 程序的结果满足工程需要。该工作不仅为管道疲劳分析提供了重要输入条件, 其研究方法也为其他系统管道的热分析提供了重要参考。

关键词: 瞬态曲线; 温度梯度; PIPESTRESS 程序; 疲劳分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.02.018

中图分类号: TL351+6

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)02-0086-04

Thermal Transient Analysis of Nuclear Class 1 Piping in Nuclear Power Plant

CHEN Li, TIAN Jin-mei, ZENG Xiang-fu, DANG Jun-jie

(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China)

ABSTRACT: **Objective** To obtain the temperature distribution across the pipe thickness. **Methods** Transient thermal analysis of one transient temperature curve of RCV piping in one nuclear power plant was done by PIPESTRESS program. **Results** Temperature distribution and temperature gradients ΔT_1 and ΔT_2 、 T_a 、 T_b of 7 key areas of pipe were obtained. Also, the temperature gradients were compared to those of the reference power station. **Conclusion** The results obtained by PIPESTRESS can satisfy the engineering requirements. The investigation method can provide not only the input conditions of piping fatigue analysis, but also the reference of piping thermal analysis of other projects.

KEY WORDS: transient curve; temperature gradient; PIPESTRESS program; fatigue analysis

核电站在整个服役期间, 化学和容积控制系统中核一级管道承受异常复杂多变的温度和压力瞬态, 需要进行疲劳评定。疲劳评定中得到沿管道壁厚的温度分布是进行后续分析的关键步骤。过去参考电站有良好的应用和实践基础, 有参考数据可以用于后续的疲劳分析, 而新的核电站没有完整的数据可以参考, 上游专业提供的参数中部分是瞬态曲线, 部分是温度梯度, 通用管道计算程序 PIPESTRESS^[1-2]无法同时处理两种瞬态情况, 需要转换成统一的输入条件。温度梯度转换成瞬态曲线无法实

现, 所以只能将瞬态曲线转换成温度梯度。同时为验证 PIPESTRESS 程序进行管道热瞬态分析的可行性, 将得到的最不利时刻的温度梯度结果与参考电站数据^[3]进行对比。

PIPESTRESS 程序在国际上被广泛应用于核电行业内核级及非核级管道的力学分析。其涉及的分析类型包括结构静态分析、响应谱分析、时程分析、简化热分层分析、疲劳分析及热棘轮分析等。程序对管道分析可以按照不同的标准规范进行评价, 如美国的 ASME、法国的 RCC-M 和德国的 KTA 规范等^[4]。

1 分析方法

1.1 轴对称传热方程

瞬态热分析用于计算系统随时间变化的温度场及其他热参数。在工程上一般用瞬态热分析计算温度场,并将之作为热载荷进行应力分析。对于管道的疲劳应力评定,必须要求得管道的温度梯度数据。求解温度梯度的关键就是得到沿壁厚的温度分布,并对其进行线性化分解。

假设管道是无限长的轴对称模型,将对象简化成一维热传导问题^[5]。采用直接差分法求解沿壁厚的温度分布,基本过程如下。

管道沿壁厚 x 分成 N 等份, $\Delta x = x/N$, 在壁厚方向共有 $N+1$ 个节点, 用 j 表示壁厚中不同位置点;

采用差分法对 $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ 和 $\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$ 进行近似^[6], 得到

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial t}\right)_j^i = \frac{\varphi_j^{i+1} - \varphi_j^i}{\Delta t} \text{ 和 } \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}\right)_j^i = \frac{\varphi_{j+1}^i - 2\varphi_j^i + \varphi_{j-1}^i}{(\Delta x)^2}, \text{ 代入}$$

热传导方程^[7] $\rho C \frac{\partial \varphi}{\partial t} = K \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}$ 进行迭代求解, 进而得到温度分布。式中: ρ 为流体的密度; C 为流体的比热容; K 为管道热扩散率; Δt 为时间步长; Δx 为管道壁厚增量。

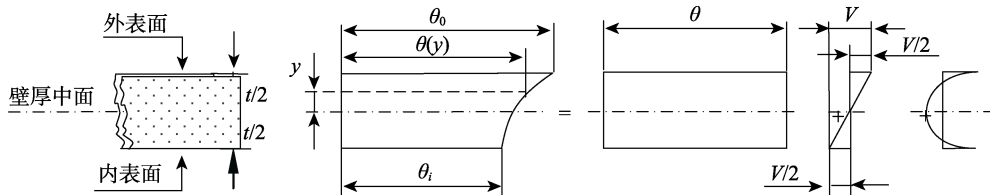


图 1 沿管道壁厚温度分布的分解

1.3 求解总应力幅值

根据规范^[8]的要求, 通过热瞬态分析求得 θ_a 、 θ_b 、 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$, 进而根据以式 (4) 求得总应力变化幅值 $S_p(i, j)$:

$$\begin{aligned} S_p(i, j) = & K_1 C_1 \frac{|P_0(i, j)| D_0}{2t} + \\ & K_2 C_2 \frac{D_0}{2I} M_i(i, j) + \frac{1}{2(1-\nu)} K_3 E \alpha |\Delta\theta_1(i, j)| + \\ & K_3 C_3 E_{ab} |\alpha_a \theta_a(i, j) - \alpha_b \theta_b(i, j)| + \\ & \frac{1}{1-\nu} E \alpha |\Delta\theta_2(i, j)| \end{aligned} \quad (4)$$

式中: K_1 、 K_2 、 K_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 为应力指数; $P_0(i, j)$ 为载荷 i 和 j 的压力差; D_0 为管道外径, m; t 为管道壁厚, m; I 为截面惯性矩, m^4 ; $M_i(i, j)$ 为载荷 i 和 j 的弯矩差; ν 为泊松比; E 为弹性模量, Pa;

1.2 管道壁厚方向温度梯度分解

对沿管道壁厚的温度分布进行分解, 得到沿管道壁厚方向温度梯度, 如图 1 所示。每个瞬态时刻的 $\theta(i, j)(y)$ 温度变化幅值分布可分为以下三部分^[8]。

1) 平均温度分布:

$$\theta(i, j) = \frac{1}{t} \int_{-t/2}^{+t/2} \theta(i, j)(y) dy \quad (1)$$

平均温度分布 $\theta(i, j)$ 用于确定自由热膨胀, 针对管道任意不连续区, a 、 b 两侧的 $\theta_a(i, j)$ 、 $\theta_b(i, j)$ 之差为管道不连续区域的温度梯度。

2) 平均值为 0 的线性分布:

$$\Delta\theta_1(i, j) = \frac{12}{t^2} \int_{-t/2}^{+t/2} y \theta(i, j)(y) dy \quad (2)$$

3) 平均值为 0, 且相对于厚度中面的力矩也为 0 的非线性分布:

$$\Delta\theta_2(i, j) = \begin{cases} |\theta_0(i, j) - \theta(i, j)| - |1/2 \Delta\theta_1(i, j)| \\ |\theta_i(i, j) - \theta(i, j)| - |1/2 \Delta\theta_1(i, j)| \\ 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\theta_0(i, j)$ 为管道外壁温度, $^{\circ}\text{C}$; $\theta_i(i, j)$ 为管道内壁温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由此可见, 求解沿着壁厚方向的温度梯度 $\theta_a(i, j)$ 、 $\theta_b(i, j)$ 、 $\Delta\theta_1(i, j)$ 、 $\Delta\theta_2(i, j)$ 为管道热瞬态分析以及后续管道疲劳分析奠定了理论基础。

α 为线膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; E_{ab} 为室温下不连续区域平均弹性模量, Pa。

热瞬态后进行的疲劳分析主要考虑 RCC-M 规范中一次加二次应力之和的变化幅值方程 10^[8]、总应力变化幅值方程 11^[8]、一次加二次应力之和的变化幅值中不包括热弯矩和热膨胀力矩的应力方程 13^[8]。

2 示例

2.1 计算模型及区域说明

根据化学和容积控制系统管道中涉及的管部件, 总结归纳此类管系关系结构应力变化的 7 类关键区域, 见表 1。

简化管道模型包含这 7 类关键区域, 如图 2 所示。管道为核安全一级, 采用 Z2CN1810 材料, 此简化模型截面参数包含外径壁厚分别为 $\phi 60.3 \text{ mm} \times$

8.74 mm, $\phi 80.02$ mm $\times$ 18.6 mm, $\phi 64.82$ mm $\times$ 11.0 mm, 单元类型有直管单元、三通单元、阀门单元及连接过渡单元。

表 1 7类关键区域

区域	位置	K_3	C_3
1	无焊接	1.0	
2	有焊接	1.7	
3	三通部件中心	1.0	
4	三通端的过渡单元	1.7	1.21
5	阀门端的过渡单元	1.7	1.21
6	有过渡段的三通单元	1.7	1.21
7	无过渡段的三通单元	1.7	0.60

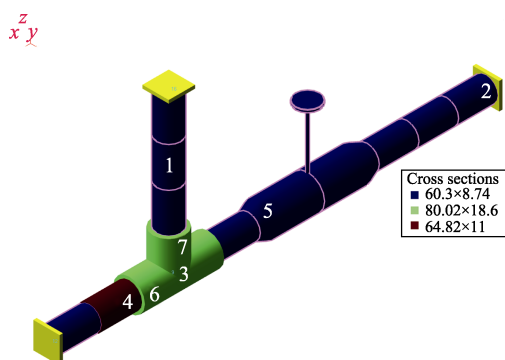


图 2 简化有限元模型

2.2 瞬态条件

以化学和容积控制系统的下泄管道某工况温度瞬态为例, 管道与环境长期自然对流散热直至热平衡, 温度降至 40 °C。后期瞬时恢复取水, 温度瞬间恢复到 293 °C, 流量为 15.7 m³/h。瞬态曲线包含介质的初始状态、最终状态、变化时间、流速等, 如图 3 所示。

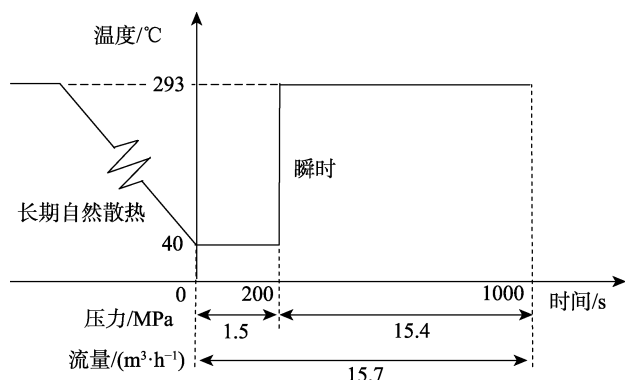


图 3 瞬态条件

2.3 载荷参数

进行热分析^[9]时, 除考虑温度瞬态还需要考虑换热系数^[10]。热工计算输入除结构尺寸以外, 主要为流

体的流量和温度。与温度或压力瞬态一样, 换热系数与结构尺寸、流体的流量和温度有关, 是随时间变化的(温度和流量都是时间的函数)。目前无法得到瞬态换热系数, 而采用对关键温度和流量进行稳态计算得到换热系数, 考虑一定的保守性进行加载。文中计算所采用的材料物理特性和流体特性见表 2。

表 2 计算参数

参数	数值
导热系数/(kJ·hr ⁻¹ ·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	69.12
热扩散系数/(mm ² ·s ⁻¹)	4.44
热膨胀系数/°C ⁻¹	16.4×10 ⁻⁶
杨氏模量/MPa	1.87×10 ⁶
环境温度/°C	20.00
介质流速/(Liters·min ⁻¹)	261.67
外表面膜系数/(kJ·hr ⁻¹ ·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	0.00
介质状态	气液混合

3 结果对比

采用 PIPESTRESS 程序建立模型, 考虑瞬态曲线及相关计算特性参数^[11], 通过热分析得到 7 类关键区域下随时间变化的温度场。选择最不利的情况, 得到方程 10、方程 11、方程 13 中某时刻的 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 θ_a 、 θ_b 相关温度梯度。

3.1 误差说明

采用 PIPESTRESS 程序计算结果与参考电站数据结果见表 3, 可以看到结果有误差。误差原因分析如下。

1) 材料性能特性、对流换热系数选取、管道名义单元尺寸等会对程序处理时间步长有影响, 累计时间步长的误差会导致数据有偏差。

2) 由于参考电站的数据没有区分各方程中应力最不利情况, 此时 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 θ_a 、 θ_b 都是取自同一时间点。PIPESTRESS 是专业的管道计算程序, 根据管道规范要求, 程序会区分各方程应力的最不利情况, 给出温度梯度结果, 此时 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 θ_a 、 θ_b 并不取自同一时间点。现行的处理方法更符合规范要求, 计算结果可以满足工程需要。

4 结语

核一级管道作为核电站中重要组成部分, 对核电站安全运行有着重要作用。文中通过 PIPESTRESS 计算化学和容积控制系统的核一级管道, 根据相关规范要求对某瞬态进行热分析求得温度场, 进而得到结构应力变化的 7 类关键区域下最不利的温度梯度。采用 PIPESTRESS 计算结果和参考电站数据对比, 并对结

表 3 七类关键区域的温度梯度

区域	方程 10				方程 11				方程 EQ13 ^[8]			
	$\Delta\theta_1$		$\theta_a - \theta_b$		$\Delta\theta_1$		$\Delta\theta_2$		$\theta_a - \theta_b$		$\theta_a - \theta_b$	
	PIPESTR ESS	参考数据	PIPESTR RESS	参考数据	PIPESTR RESS	参考数据	PIPESTR ESS	参考数据	PIPESTR RESS	参考数据	PIPESTR RESS	参考数据
1	-198.30	-185.89	—	—	-157.70	-185.89	-38.10	-32.07	—	—	—	—
2	-198.30	-185.89	—	—	-186.20	-185.89	58.60	-32.07	—	—	—	—
3	-198.30	-206.05	—	—	-157.70	-206.05	-76.50	-86.98	—	—	—	—
4	-198.30	-185.89	-40.50	-42.97	-197.30	-185.89	-38.10	-32.07	-40.50	-42.97	-109.70	-96.36
5	-198.30	-185.89	-35.00	-42.97	-198.10	-185.89	-40.00	-32.07	-35.00	-42.97	-97.90	-96.36
6	-213.00	-199.50	-100.00	-86.98	-208.00	-199.50	-41.60	-37.13	-100.00	-86.98	-109.70	-96.36
7	-213.00	-199.50	-87.60	-86.98	-213.00	-206.8	-49.70	-48.68	-87.60	-70.64	-109.70	-96.36

果误差进行解释,说明采用 PIPESTRESS 程序的计算结果可以满足工程需要。

文中结果不仅为相关系统核一级管道疲劳分析提供输入数据,也为管道热瞬态分析提供方法和参考。

参考文献：

[1] DST. PIPESTRESS User Manual[Z]. 2012.
[2] 王红瑾, 李茂云, 张敏. 基于 PIPESRESS 软件的常见支架力学建模分析[J]. 机械工程师, 2016, 1:80-81.
[3] FRAMATOME, HYPOTHESES DE CACUL DES TUYAUTERIES. REV.B [R]. 1992.
[4] 田欣鹭, 李铁萍, 刘锐. 软件 PIPESTRESS 在核级管道应力分析中的应用[J]. 中国核学会 2015 年学术年会会议论文集. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015.
[5] 李兴华, 覃曼青, 杨帆. 基于 PIPESTRESS 的核一级辅

助管道疲劳分析方法研究[J]. 压力容器, 2015, 32(3): 29-35.
[6] 朱兴楚. 管道的热力瞬态分析[J]. 电力技术, 1985(10): 7-11.
[7] (美)皮茨 西索姆. 传热学[M]. 葛新石译. 北京: 科学出版社, 2002.
[8] RCC-M—2007, Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands[S].
[9] 章贵和, 徐晓, 熊光明. EPR 主管道安注接管流体混合区域的传热分析和简化热应力计算[C]// 第十七届全国反应堆结构力学会会议论文集. 北京: 中国力学学会反应堆结构力学专业委员会, 2012.
[10] 周舟, 孟少朋, 包捷. 反应堆冷却系统主管道疲劳暨最小壁厚分析方法研究[J]. 核动力工程, 2014, 35(3): 46-50.
[11] 唐永进. 压力管道应力分析[M]. 北京: 中国石油出版社, 2003.