

文章编号: 0258-0926(2018)03-0071-07; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0071

# 核二级波纹管截止阀在瞬态热冲击作用下的数值模拟

李树勋<sup>1,2</sup>, 雒相垚<sup>1,2</sup>, 吕兴<sup>1,2</sup>, 张丽芳<sup>1,2</sup>, 徐晓刚<sup>1,2</sup>

1. 兰州理工大学, 兰州, 730050; 2. 机械工业泵及特殊阀门工程研究中心, 兰州, 730050

**摘要:** 为研究瞬态承压热冲击对核二级波纹管截止阀的结构强度和疲劳寿命的影响, 基于流固耦合及热边界条件相关理论, 通过Fluent和ANSYS有限元软件对核二级截止阀阀体进行热流固耦合分析, 研究阀体监测点在不同时间点下温度场、热应力和疲劳寿命的变化, 以及热冲击作用时间对疲劳寿命的灵敏度的影响。结果表明: 瞬态承压热冲击对阀体的温度场、结构强度、疲劳寿命和敏感度影响巨大, 必须消除这种影响, 以此来保证核二级波纹管截止阀的高安全性和高可靠性。

**关键词:** 核二级波纹管截止阀; 瞬态热冲击; 热流固耦合; 疲劳寿命; 安全系数; 灵敏度

**中图分类号:** TL353<sup>+</sup>.11 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation of Nuclear Secondary Bellows Globe Valve under Transient Thermal Shock

Li Shuxun<sup>1,2</sup>, Luo Xiangyao<sup>1,2</sup>, Lyu Xing<sup>1,2</sup>, Zhang Lifang<sup>1,2</sup>, Xu Xiaogang<sup>1,2</sup>

1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou, 730050, China;

2. Machinery Industry Pump and Special Valve Engineering Research Center, Lanzhou, 730050, China

**Abstract:** In order to study the effect of the transient thermal shock on the structural strength and fatigue life of the nuclear secondary bellows globe valve, the hot-fluid-solid coupling analysis of the nuclear secondary globe valve body was carried out by Fluent and ANSYS software, based on the theory of fluid-solid coupling and thermal boundary condition. The effects of the temperature field, thermal stress and fatigue life of the monitoring point at different time points and the effect of the thermal shock time on the fatigue life of the degree of sensitivity were studied. The results showed that the effects of the transient pressure on the temperature field, structural strength, fatigue life and sensitivity of the valve body was huge, and have to be eliminated to ensure the high safety of the nuclear secondary bellows globe valve.

**Key words:** Nuclear secondary bellows globe valve, Transient thermal shock, Fluid-solid-heat coupling, Fatigue life, Safety factor, Sensitivity

## 0 引言

核电厂设备内部由于热疲劳而形成微米级的裂纹很难监测。同时, 由于长期在快中子辐照等严苛环境下工作, 会使得设备材料的力学性能下降, 尤其是断裂韧性可能会逐渐降低为一个较低值。此时如果发生严重的承压热冲击事件(PTS)就有可能将内壁处的缺陷无限放大, 击穿容器壁厚引发严重后果<sup>[1]</sup>。

潘科琪等<sup>[2]</sup>研究了复合材料壳体在热冲击作

用下的刚柔耦合动力学响应, 并通过理论和ANSYS软件进行对比, 验证模型的正确性。许杨健等<sup>[3]</sup>通过有限元方法研究了瞬态热应力对功能梯度材料的影响。武小峰、王鹏等<sup>[4]</sup>通过实验和有限元软件研究了陶瓷材料热冲击开裂机理和热冲击裂纹的分布规律。杨风波等<sup>[5]</sup>通过结合弹性变形和域动分层结合的动网格技术, 分析了新型路基同心筒流场机理与热冲击特性。田野<sup>[6]</sup>采用有限元法模拟在-55 ~125 热冲击过程中倒装

收稿日期: 2017-5-31; 修回日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51569012); 甘肃省高校基本科研业务费资助项目(20146302)

作者简介: 李树勋(1973—), 男, 教授, 现主要从事特殊阀门研究工作

微焊点的失效情况。邵秋霞等<sup>[7]</sup>通过有限元方法模拟了经过自增强处理过的厚壁圆筒,在内压和热冲击作用下的温度场和热应力分布情况。郑斌、高增梁等<sup>[8-9]</sup>开展了承压热冲击作用下核反应堆压力容器的相关分析研究,对其寿命进行了估算。对于核电站用核级阀门在承压瞬态热冲击作用下的热疲劳问题,国内外的研究比较空缺。因此,本文将典型工况和典型参数下的核二级波纹管截止阀阀体作为载体,分析瞬态热冲击对阀体强度和疲劳寿命的影响,以及如何降低瞬态热冲击对阀体疲劳寿命的影响,延长阀体使用寿命。

## 1 核二级波纹管截止阀模型的建立

### 1.1 波纹管截止阀模型的建立和网格的划分

为了使得流体充分发展,在阀体两端各添加一直管段(5倍管径的长度)。为保证网格质量和计算速度,忽略波纹管对流场的影响,并且由于整体结构规则且对称,取1/2模型进行有限元分析。热流固耦合模型如图1所示。

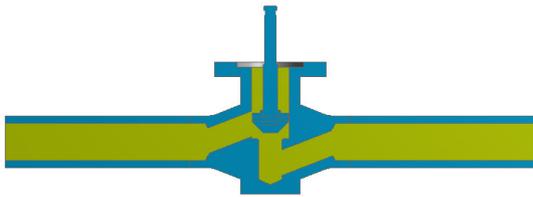


图1 热流固耦合三维模型

Fig. 1 Three-Dimensional Model of Thermal Fluid-Solid Coupling

对划分好的波纹管截止阀热流固耦合网格模型进行网格无关性检验,以5s时截止阀的最大应力值作为评判依据(表1)。通过网格无关性检验后,最终确定网格模型共有1260232个单元。网格模型如图2所示。

表1 网格无关性验证

Table 1 Verification of Grid Independence

单元数目	最大应力值/MPa
85684	76.285
1260232	78.601
1635981	78.638

### 1.2 材料的基本属性

阀体和管道选用F316Ti奥氏体不锈钢材料,它具有良好的抗晶间腐蚀性能,其基本力学性能参数如表2所示,双线性等效强化模型如图3所示,应力疲劳寿命(S-N)曲线如图4所示。

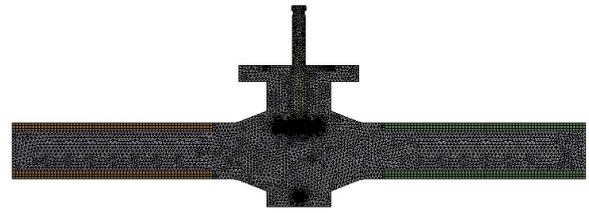


图2 热流固耦合网格模型

Fig. 2 Mesh Model of Thermal Fluid-Solid Coupling

表2 零件材料的力学性能及物性参数

Table 2 Mechanical Properties and Physical Parameters of Part Material

零件	材料	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
阀体、管道	F316Ti	515	205	196	0.30

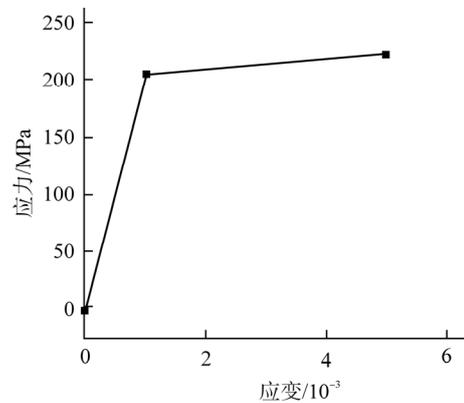


图3 F316Ti材料双线性等效强化模型

Fig. 3 Bilinear Equivalent Enhancement Model for F316Ti Materials

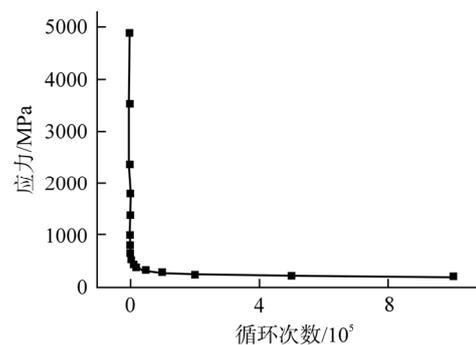


图4 F316Ti材料S-N曲线图

Fig. 4 Graph of S-N of F316Ti Material

## 2 截止阀阀体热冲击有限元分析

对于核级阀门而言,其阀体外壁面一般需要保温来减小热量的损失和保护工作人员的安全。在热流体刚通过阀体的瞬间,其内外壁温差较大,会产生较大的热应力。随着时间的推移,阀内外

壁温度会在短时间内达到热平衡状态。因此，本文将对阀体在 0.01~5 s 时间内受到的承压瞬态热冲击进行研究。

## 2.1 波纹管截止阀热流固耦合方法

对核二级波纹管截止阀阀体进行热流固耦合分析时，采用的是整场求解和顺序耦合的方法。通过将阀体与热流体介质作为一个整体耦合系统进行耦合研究，并将传热方式与能量方程结合，完成流体、固体之间的热交换<sup>[10]</sup>，最终实现温度场、流场和静力场之间的顺序耦合，得到瞬态热冲击作用对核级波纹管截止阀阀体的影响。

**2.1.1 流体域有限元方程** 对于粘性流体，通常用 Navier-Stokes 方程来进行描述，由于模型的复杂性，一般利用流体动力学基本方程进行离散化求解，并对主变量进行转换，进而求解。粘性流体的连续性方程和 *N-S* 方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = -\nabla p + \rho f_i \quad (2)$$

式中， $\rho$  为流体密度； $t$  为时间； $u_i$  为流体速度矢量  $U$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量； $p$  为压力； $\nabla$  为哈密顿算子； $f_i$  为流体所受质量力  $f$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的分量；

由 *N-S* 方程可以看出，其方程求解的关键是寻求流体应力与变形速率之间的关系。

对于粘性流体流动的有限元方程，其总体矩阵方程为：

$$AU + BUU + CP + DU = E + F \quad (3)$$

$$GU = H \quad (4)$$

式中， $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$ 、 $F$  分别为全域的质量、对流、压力、耗损、体积力、面积力总系数矩阵； $G$ 、 $H$  分别为连续、边界速度总系数矩阵； $P$  为由全域各节点压力所组成的列矢量； $U = [uvk]^T$ 。

由式 (3)、式 (4) 的有限元方程可以求解粘性流体流动时的速度分量和压力值。

### 2.1.2 固体域有限元方程

$$M \ddot{\delta} + N \dot{\delta} + K \delta = P' \quad (5)$$

式中， $M$  为固体域的质量； $N$  为固体域的阻尼； $K$  为固体域的刚度； $P'$  为固体域节点处的作用

力； $\ddot{\delta}$  为固体域的加速度； $\dot{\delta}$  为固体域的速度； $\delta$  为固体域的位移。

**2.1.3 热传导方程** 由于阀体外壁面保温，核二级波纹管截止阀阀体在实际工况下，通过阀体内表面与热流体以对流和热传导的方式进行换热，在整个实际运行过程中，都伴随着热量的传递和交换。

$$\rho c_t \frac{\partial T}{\partial t} = \rho Q + \frac{\partial}{\partial x} \left( \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

式中， $c_t$  为物体的定温比热容； $T$  为物体温度； $\kappa_x$ 、 $\kappa_y$ 、 $\kappa_z$  为沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的热传导系数； $Q$  为物体的内热源强度。

**2.1.4 热边界条件** 根据截止阀的实际工况，其阀体内壁与流体介质有复杂的热传导和热对流的传热方式，其热边界条件属于第三类边界条件，即：

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = \alpha (T - T_f) \Big|_r \quad (7)$$

式中， $k$  为物体导热系数； $\frac{\partial T}{\partial n}$  为温度  $T$  沿外法线

方向的方向导数； $n$  为外法线方向；下标  $r$  为全域； $T_f$  为流体介质的温度； $\alpha$  为对流换热系数。 $T_f$  和  $\alpha$  是随时间和位置而变化的函数。

## 2.2 瞬态热流固耦合温度场模拟

运用 Fluent 软件，在 0.01~5 s 时间内，取代表性的时间点 0.01、0.05、0.1、0.5、1、2、4、5 s，其温度场分布如图 5 所示。

在 0.01~0.05 s 时间内，阀体内壁的温度很高，阀体外壁的温度很低；随着时间的推移，在 0.05~1 s 时间内，阀体内壁和外壁的温度也逐步增大，其内外壁之间的温度差值也逐步减小；随着时间的推移，在 1~5 s 时间内，其内外壁温度基本保持恒定，温度场达到了热平衡状态。

## 2.3 瞬态热流固耦合阀体结构强度分析

### 2.3.1 不同时刻阀体边界条件

(1) 载荷输入：由于压力场和温度场是瞬态的，它们随时间点的不同而变化。因此，将 Fluent 软件中得到的不同时间点下的压力场和温度场信息导入到静力场中，作为其载荷的输入。

(2) 边界条件：对阀体两端施加固定位移约

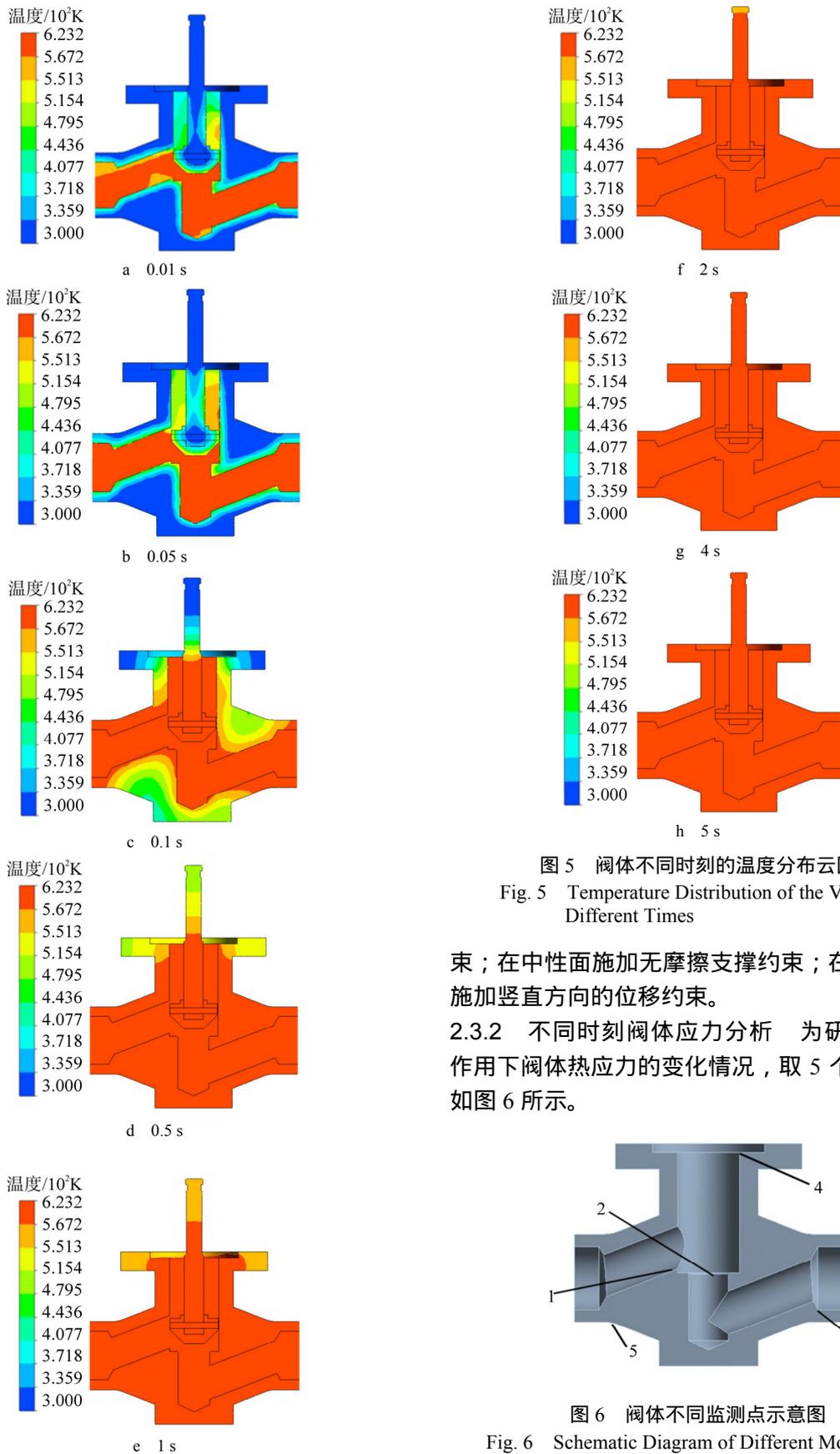


图 5 阀体不同时刻的温度分布云图  
Fig. 5 Temperature Distribution of the Valve at Different Times

束；在中性面施加无摩擦支撑约束；在阀体底端施加竖直方向的位移约束。

2.3.2 不同时刻阀体应力分析 为研究热冲击作用下阀体热应力的变化情况，取 5 个监测点，如图 6 所示。

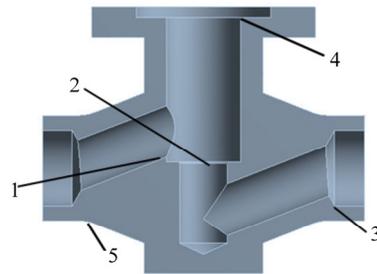


图 6 阀体不同监测点示意图  
Fig. 6 Schematic Diagram of Different Monitoring Points of Valve Body

热冲击对阀体不同监测点热应力的影响见图 7, 在短时间 (0.01~0.1 s) 内当热流体流经阀体时, 由于内外壁温差的存在均使得热应力在短时间内急剧增大到一个峰值然后迅速降低; 当流体进一步充分流经阀体, 随着时间的蔓延和阀体自身的导热性能使得阀体内外壁温差逐渐减小。当温差趋于稳定时, 其应力值也逐步减小达到一个较小值并趋于稳定, 在 1 s 之后阀体的最大应力均小于材料的许用应力 114 MPa, 满足强度要求。该应力变化趋势与文献[11]中核主泵主轴表面热冲击应力分析结果相一致, 均在短时间内热应力瞬时增大并超过其屈服应力, 随着热冲击温度梯度的减小, 其应力值又降为一个较低值。因此, 对于核二级波纹管截止阀而言, 在流通介质为热流体时, 必须避免瞬态承压热冲击现象, 以免形成裂纹、击穿阀体而引发严重后果。实际过程中可用温度梯度递增的方式通入热流体来避免热冲击对阀体强度的破坏, 使得阀体具有良好的安全性、高可靠性和高疲劳寿命。

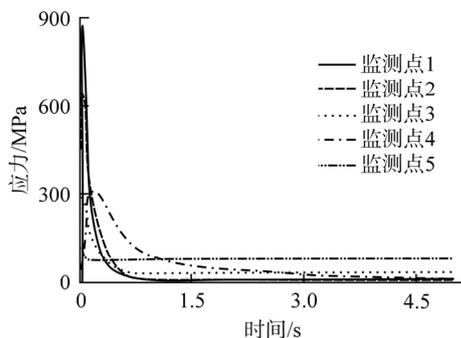


图 7 热冲击作用下阀体不同监测点时间-应力分布趋势  
Fig. 7 Time-Stress Distribution Trend of Different Monitoring Points of Valve Body under Thermal Shock

2.3.3 瞬态热流固耦合疲劳寿命分析 根据技术要求, 核二级波纹管截止阀阀体需要安全工作 30 a 以上。因此, 以无限疲劳寿命 (应力疲劳寿命) 的方式来研究阀体的热疲劳寿命。

不同监测点疲劳寿命随时间点的变化见图 8。对于监测点 1、2 和 3, 在短时间 (0.01~0.1 s) 内当流体流经阀体时, 由于内外温差较大, 其热应力均在屈服阶段, 因此其疲劳寿命值呈现逐渐增大的趋势。流体进一步充分流经阀体, 当温差逐步减小 (在 1 s 之后), 其应力值也逐步减小到线弹性范围内, 疲劳寿命也相对达到较大值。对

于监测点 4, 由于流体刚进入阀体流道时, 中腔处温度较低, 此时该点处的热应力处于线弹性范围内, 疲劳寿命较大; 随着时间的推移, 中腔处的温度逐渐增大, 该点处的温差热应力也逐步趋于屈服阶段, 使得疲劳寿命逐渐减小, 当内外壁温差逐渐减小时, 该点处的热应力又处于线弹性阶段, 疲劳寿命也逐步增大。监测点 5 的热应力小于其许用应力, 且在线弹性范围内, 因此, 其疲劳寿命较大, 且处于一个定值。为提高核二级波纹管截止阀的疲劳寿命, 在流通介质为热流体时, 需尽量减小内外壁的温差, 使其产生的热应力尽量处于线弹性范围内。

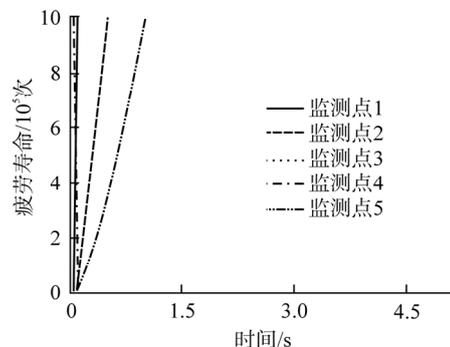


图 8 阀体不同监测点时间-疲劳寿命分布图  
Fig. 8 Time-Fatigue Life Distribution of Different Monitoring Points for Valve Body

2.3.4 热冲击作用下阀体安全系数分析 不同监测点安全系数随时间点的变化见图 9。在短时间 (0.01~0.1 s) 内当流体流经阀体时, 由于内外温差的存在均使得安全系数在短时间内迅速升高, 当流体进一步充分流经阀体 (0.1~5 s) 后, 随着时间的蔓延和阀体自身的导热使得阀体内外

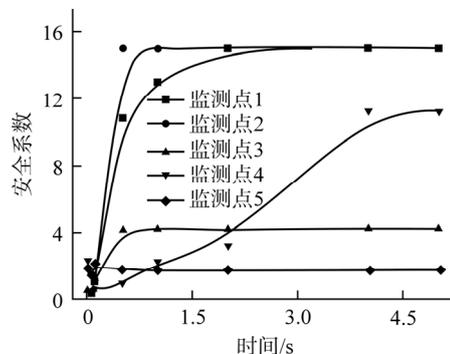


图 9 热冲击作用下阀体不同监测点安全系数分布图  
Fig. 9 Safety Coefficient Distribution of Different Monitoring Points of Valve Body under Thermal Shock

壁温差逐渐减小,其安全系数也逐步增大至大于1,最终均达到一个稳定值。从核二级波纹管截止阀的安全系数方面考虑,在流通介质为热流体时,应避免热冲击对阀体强度的破坏,使其具有较高的安全性。

2.3.5 热冲击作用下阀体灵敏度分析 为准确描述核二级波纹管截止阀疲劳寿命和热冲击作用时间之间的敏感度关系,设定敏感度区间为50%~150%,得到核二级波纹管截止阀在热冲击作用下阀体寿命灵敏度曲线图(图10)。

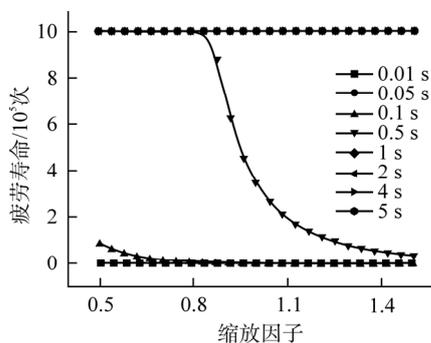


图10 阀体不同时间点对疲劳寿命的灵敏度分析图

Fig. 10 Sensitivity Analysis of Fatigue Life at Different Time Points

由图10可知,在热冲击作用下阀体对不同时间点下的疲劳寿命的敏感程度差异很大。在0.01 s、0.05 s和0.1 s时间点内,阀体的疲劳寿命在50%的缩放因子下就开始出现衰减;在0.5 s时,阀体的疲劳寿命在缩放因子为83.3%时开始出现衰减;在1~5 s时间内,阀体的疲劳寿命并没有随着缩放因子进行衰减。

可见,热冲击时间对阀体疲劳寿命很敏感,在热流体刚接触阀体内壁时,由于内外壁的巨大温差导致热应力过大,随着内外壁温差的减小,热应力随之减小,进而阀体疲劳寿命也逐步提高;在1 s之后,阀体内外壁温差基本趋于稳定,且热应力在稳定之后均处于线弹性范围内,疲劳寿命也趋于安全稳定的范畴。因此,严格控制热冲击作用下的内外壁温差,才能保证核二级波纹管截止阀的高安全性和可靠性。

### 3 结论

(1) 全开状态下阀体的温度场在流体刚流经阀0.01~0.05 s时,阀体内外壁温差较大;随着时

间的推移在0.05~1 s内,其内外壁之间的温度差值逐步减小;在1~5 s时间内,其内外壁温度基本保持恒定,温度场达到了稳态。

(2) 热冲击对阀体强度、疲劳寿命和敏感度的影响巨大。在热流体刚流经阀体时,由于内外壁巨大的温差,使得热应力急剧增加,疲劳寿命、安全系数和敏感度急剧下降;随着时间的推移,当内外壁温差减小并趋于稳定时,热冲击对阀体的作用将不再显著。因此,必须严格控制热冲击的作用,来保证核二级波纹管截止阀的高安全性和高可靠性。

(3) 为解决热冲击所带来的瞬时应力激变和疲劳寿命不可靠等问题,在热流体进入核电厂用阀或承压元件前应进行良好的预热,或者以温度梯度递增的方式来逐步通入热流体。

#### 参考文献:

- [1] 初起宝,刘维平.田湾核电站反应堆压力容器承压热冲击分析[J].原子能科学技术,2015,49(9):1619-1623.
- [2] 潘科琪,刘锦阳.热冲击作用下的复合材料壳刚柔耦合动力学研究[J].振动与冲击学报,2013,32(16):1-7.
- [3] 许杨健,张京军,涂代惠,等.换热边界下变物性梯度功能材料板瞬态热应力[J].机械工程学报,2005,41(7):195-204.
- [4] 武小峰,王鹏,蒋持平.陶瓷材料热冲击开裂机理与裂纹间距预报[J].工程力学学报,2013,30(02):458-463.
- [5] 杨风波,马大为等.新型路基同心筒热冲击机理与热环境影响因子[J].爆炸与冲击学报,2016,36(02):153-160.
- [6] 田野,任宁.热冲击条件下倒装组装微焊点的可靠性-寿命预测[J].焊接学报,2016,37(02):51-54.
- [7] 邵秋霞,黄云云,黄永曙.热冲击与内压耦合下的厚壁圆筒应力分析[J].石油化工设备,2016,45(04):6-11.
- [8] 郑斌,臧峰刚,孙英学.反应堆压力容器承压热冲击分析研究[J].核动力工程学报,2012,33(01):1-3.
- [9] 高增梁,李曰兵,雷月葆.承压热冲击下反应堆压力容器的概率评定进展与案例分析[J].机械工程学报,2015,51(20):67-78.
- [10] 王宇. CFD在多缸柴油机冷却系统设计中的应用[D].大连:大连理工大学,2007.
- [11] 马国军,胡光举,吴承伟.核主泵主轴表面热疲劳分析与寿命评估[J].固体力学学报,2015,36:145-151.

(责任编辑:孙凯)

第 39 卷 第 3 期  
2018 年 6 月

核 动 力 工 程  
Nuclear Power Engineering

Vol.39. No.3  
Jun. 2018

---