

核一级三通管热疲劳研究

胡丽娜 余华金 王月英
(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 钠冷快堆在启动和停止过程中会产生大的热应力,多次循环之后容易产生热疲劳损伤,特别是在三通管连接区域。本文将研究不同角度对三通管热疲劳性能的影响。通过 ANSYS 计算不同角度三通管道的热应力,确定三通管道的热疲劳寿命和疲劳损伤系数。给出了疲劳许用强度与三通管角度的函数关系。结果表明,随着角度的减小疲劳强度降低。此结果对核一级管道设计中选取三通管道的角度具有一定的参考价值。

关键字 热疲劳, 疲劳强度, 三通管, 应力集中系数

中文分类号 TG115.57, TL35

管道在众多领域都是不可缺少的,如动力、化工、机械等,随着高温设备的发展,对管道的要求也越来越高。为满足管道的整体设计要求,需要在管道上连接三通管道等复杂结构,三通管道的连接处正是结构和应力不连续的区域,疲劳损伤的高发区。在核电系统中,钠冷快堆与其他堆型相比,突出的问题就是热疲劳损伤,因为它采用导热性能强的金属钠作为冷却剂。热疲劳损伤是由于温度的变化而引起的,现阶段国内外的研究主要是从以下几方面入手:一是,热疲劳试验的方法研究。如, Sjostrom^[1]对热疲劳试验的工具进行阐述;韩增祥^[2]对金属热疲劳试验方法的探索等。二是,材料热疲劳损伤的研究。如,李贵军^[3]对特种压力容器用钢 2.25CrMo 的中温低周疲劳行为及寿命进行评估;郭冰峰等^[4]对 25Cr12Ni5Mo 钢热疲劳损伤特性进行研究等。对于管道的热疲劳研究国内开展的较少,本文利用有限元分析软件 ANSYS 对不同角度的三通管道进行热应力分析,依据材料在等效温度下的低周疲劳循环曲线,预测不同角度的三通管的疲劳寿命和损伤系数,并给出疲劳许用应力幅值与三通管角度的函数关系。在利用 ASME 规范中的相关公式给出不同角度三通管道的交变应力,与 ANSYS 的计算结果进行比较。

1 三通管道的热疲劳评定

根据 ASME 规范的中 NB-3653.1 至 NB-3653.6 和 NB-3683 规定,1 级部件要满足相应的疲劳分析要求。疲劳评定的依据是系统在一个循环中,由一个载荷组转向另一个载荷组,机械载荷和温度载荷

发生变化。计算中的力、力矩、温度均为两个载荷组的范围。设其中一个载荷组为零压力、零力矩、室温;另一种载荷组要满足相应的强度范围。

1.1 一次加二次应力强度

一次加二次应力强度应该满足:

$$S_n = C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + C_2 \frac{D_0}{2I} M_i + C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \leq 3S_m \quad (1)$$

式中, D_0 —管道外径(mm); S_m —许用应力强度值(MPa); t —名义壁厚(mm); I —惯性矩(MPa); C_1 、 C_2 、 C_3 —研究特定部件的二次应力指数(NB-3680); P_0 —设计压力(MPa); M_i —系统从一个使用载荷组转变到另一个载荷组时产生的合成力矩范围,包括机械载荷和热载荷产生的弯矩(N·mm); E_{ab} —室温下在总体结构不连续或材料不连续的两侧的平均弹性模量(MPa); $T_a(T_b)$ —在总体结构不连续或材料不连续的 a(b)侧上的平均温度(°C); $\alpha_a(\alpha_b)$ —室温下在总体结构不连续或材料不连续的 a(b)侧上的热膨胀系数(1/°C)。

如果为三通管道公式(1)改写为公式(2)的形式:

$$S_n = C_1 \frac{P_0 D_0}{2T_r} + C_{2b} \frac{M_b}{Z_b} + C_{2r} \frac{M_r}{Z_r} + C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| \leq 3S_m \quad (2)$$

其中, T_r —主管的名义壁厚(mm); Z_b 、 Z_r —近似截面模数, $Z_b = \pi(r'_m)^2 T'_b$, $Z_r = \pi(R_m)^2 T_r$; T'_b —支管的名义壁厚(mm); r'_m —与接管座连接的管道平均半

第一作者: 胡丽娜, 女, 1986 年出生, 2011 年于哈尔滨工业大学获硕士学位

收稿日期: 2012-11-05, 修回日期: 2013-02-24

径, $r'_m = (d_0 - T_b)/2$; d_0 —支管的名义外径(mm); M_b —三通支管上的合成力矩(N·mm), $M_b = \sqrt{M_{x3}^2 + M_{y3}^2 + M_{z3}^2}$; M_r —三通主管上的合成力矩(N·mm), $M_r = \sqrt{M_{xr}^2 + M_{yr}^2 + M_{zr}^2}$, M_{ir} ($i=x, y, z$) 数值计算: 如果 M_{i1} 和 M_{i2} ($i=x, y, z$) 有相同的代数符号则 $M_{ir}=0$; 如果 M_{i1} 和 M_{i2} ($i=x, y, z$) 的代数符号不同则 $M_{ir} = \min\{M_{i1}, M_{i2}\}$; M_{ir} 为不同载荷产生力矩的组合。

主管的力矩分量 M_{ij} ($i=x, y, z; j=1, 2$), 计算位置是在主管和支管的中心线的相交处。

支管的力矩分量 M_{i3} ($i=x, y, z$), 如果 $d_0/D_0 \leq 0.5$, 计算位置是在支管中心线上距离主管和支管相交点距离为 $D_0/2$ 的一点, 其他情况计算点位于主管和支管的中心交点处。

一次加二次应力指数, $C_{2b} = 0.67(R_m/T_r)^{2/3}$, 不小于 2; $C_{2r} = 0.67(R_m/T_r)^{2/3}$, 不小于 2。

1.2 峰值应力强度

每一对载荷组的峰值应力强度 S_p 。可用下面的公式计算:

$$S_p = K_1 C_1 \frac{P_0 D_0}{2t} + K_2 C_2 \frac{D_0}{2I} M_i + \frac{1}{2(1-\nu)} K_3 E \alpha |\Delta T_1| + K_3 C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| + \frac{1}{(1-\nu)} E \alpha |\Delta T_2| \quad (3)$$

式中, K_1 、 K_2 、 K_3 : 研究特定部件的应力指数;

$|\Delta T_1|$ 、 $|\Delta T_2|$ 的定量确定详见 NB-3653.2。

如果为三通管道公式(3)改写为公式(4)的形式:

$$S_p = K_1 C_1 \frac{P_0 D_0}{2T_r} + C_{2b} K_{2b} \frac{M_b}{Z_b} + C_{2r} K_{2r} \frac{M_r}{Z_r} + \frac{1}{2(1-\nu)} K_3 E \alpha |\Delta T_1| + K_3 C_3 E_{ab} |\alpha_a T_a - \alpha_b T_b| + \frac{1}{(1-\nu)} E \alpha |\Delta T_2| \quad (4)$$

式中, K_{2r} 、 K_{2b} : 峰值应力指数, $K_{2r}=1$, $K_{2b}=1$ 。

1.3 交变应力强度

疲劳评定的交变应力值为峰值应力的一半, 如

式(5)所示。

$$S_{\text{alternate}} = \frac{S_p}{2} \quad (5)$$

式中, $S_{\text{alternate}}$ 为交变应力。在设计疲劳曲线上, 纵坐标取 $S_{\text{alternate}} = S_a$, 则在横坐标上可找到对应的循环系数。

2 计算模型

利用有限元分析软件 ANSYS, 分析实验快堆一级管道不同角度三通管道疲劳寿命。整个疲劳分析将开堆、停堆作为一个事件、两个载荷步, 启动时温度变化 $250^\circ\text{C}-495^\circ\text{C}$ 作为载荷 1, 停堆时温度变化 $495^\circ\text{C}-250^\circ\text{C}$ 作为载荷 2。边界条件为固定主管道一端的轴向位移, 另一端固定周向和径向的位移; 固定支管的轴向位移。管道的材料为 316L 不锈钢, 材料参数参考 ASME^[5] 第 II 篇材料 D 篇性能, 疲劳设计曲线参考 ASME 规范附录图 I-9.2.1, 管道简化模型如图 1 所示, 规定角 φ 为三通管的支管轴线与 x 轴正方向 (主管道中流体流动的方向) 的夹角。

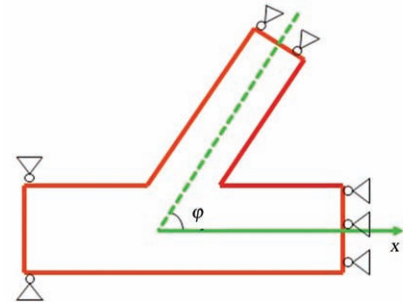


图 1 管道简化模型
Fig.1 Simplified model of three-way pipe.

3 结果分析

三通管道的角度分别取 60° 、 75° 、 90° 、 105° 。数值计算表明在三通管道局部, 支管与主管道连接处的热应力最大。四个角度的三通管的热应力云图具有相似性, 图 2 和图 3 列出 60° 和 105° 三通管道的应力云图。根据热应力的分析结果, 在支管的连接处的内表面和外表面选择应力较大的三个节点, 存储节点应力进行疲劳分析, 表 1—表 4 为不同角度三通管道进行疲劳分析的节点应力值。

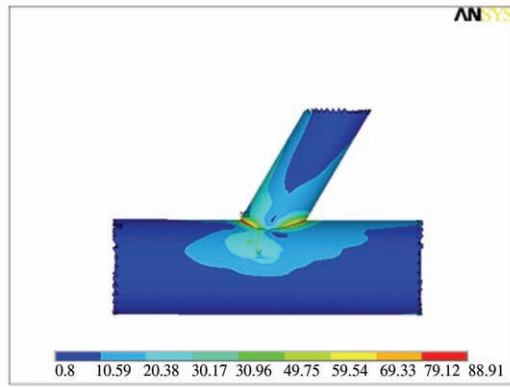


图2 60°三通管道局部热应力云图
Fig.2 The local thermal stress field of three-way pipe with angle of 60°.

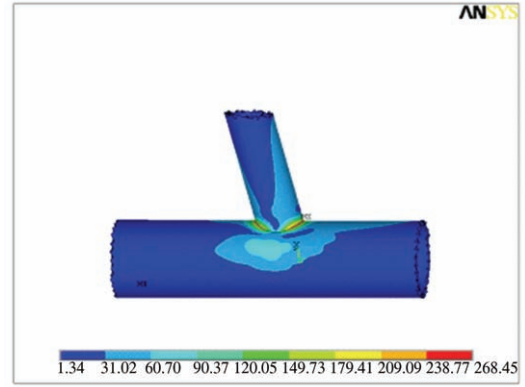


图3 105°三通管道局部热应力云图
Fig.3 The local thermal stress field of three-way pipe with angle of 105°.

表1 支管角度为60°疲劳分析节点的应力值

Table 1 Stress values of three points for fatigue analysis when the three-way pipe with angle of 60°.

应力 / MPa		角度为 60° Angle is 60°					
Stress		S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}
节点 1	Load1	55.457	82.826	65.593	12.463	-7.576	6.956
Point 1	Load2	-55.457	-82.826	-65.593	-12.463	7.576	-6.956
节点 2	Load1	49.483	80.816	66.845	16.509	-6.736	5.951
Point 2	Load2	-49.483	-80.816	-66.845	-16.509	6.736	-5.951
节点 3	Load1	43.070	76.397	58.759	-11.418	-4.1366	-10.060
Point 3	Load2	-43.070	-76.397	-58.759	11.418	4.1366	10.060

表2 支管角度为75°疲劳分析节点的应力值

Table 2 Stress values of three points for fatigue analysis when the three-way pipe with angle of 75°.

应力 / MPa		角度为 75° Angle is 75°					
Stress		S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}
节点 1	Load1	91.547	96.069	87.236	11.559	23.239	6.3274
Point1	Load2	-91.547	-96.069	-87.236	-11.559	-23.239	-6.3274
节点 2	Load1	93.260	118.00	99.358	20.487	24.777	9.145
Point 2	Load2	-93.260	-118.00	-99.358	-20.487	-24.777	-9.145
节点 3	Load1	-69.277	-95.998	-75.782	47.020	-31.382	2.7580
Point 3	Load2	69.277	95.998	75.782	-47.020	31.382	-2.7580

表3 支管角度为90°疲劳分析节点的应力值

Table 3 Stress values of three points for fatigue analysis when the three-way pipe with angle of 90°.

应力 / MPa		角度为 90° Angle is 90°					
Stress		S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}
节点 1	Load1	124.96	139.93	148.32	1.268	0.124	55.197
Point 1	Load2	-124.96	-139.93	-148.32	-1.268	-0.124	-55.197
节点 2	Load1	146.52	99.227	106.227	54.401	4.259	30.140
Point 2	Load2	-146.52	-99.227	-106.227	-54.401	-4.259	-30.140
节点 3	Load1	141.23	145.08	164.89	9.8548	4.1966	62.971
Point 3	Load2	-141.23	-145.08	-164.89	-9.8548	-4.1966	-62.971

表 4 支管角度为 105°疲劳分析节点的应力值
Table 4 Stress values of three points for fatigue analysis when the three-way pipe with angle of 105°.

应力 /MPa		角度为 105° Angle is 105°					
Stress		S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}
节点 1	Load1	172.1	218.2	160.03	51.308	-40.431	8.062
Point 1	Load2	-172.1	-218.2	-160.03	-51.308	40.431	-8.062
节点 2	Load1	158.48	228.32	159.66	-64.609	-33.212	-8.499
Point 2	Load2	-158.48	228.32	-159.66	64.609	33.212	8.499
节点 3	Load1	-135.03	-178.62	-190.17	-79.012	-68.034	5.842
Point 3	Load2	135.03	178.62	190.17	79.012	68.034	-5.842

为了精确计算接管管道的热疲劳寿命, 将 3 个节点的疲劳许用幅值和许用循环次数取平均值。表 5 列出不同角度接管的应力幅值、许用循环次数和疲劳损伤系数。实验快堆设计的启动次数为 800 次, 从表中可以看到接管的角度越大, 热疲劳损伤系数越大, 热疲劳的寿命越低。

有限元计算的三通管道是仅由温度变化而引起的热疲劳, 未考虑管道的压力。根据公式(2)、(4)、(5), 对热疲劳进行评定, 评定的计算中没有压力项, 只考虑温度项和温度变化对主管和支管的弯矩项。最后, 疲劳评定的结果和有限元的计算结果的比较如表 6 所示。

表 5 疲劳寿命和损伤系数
Table 5 Fatigue life and damage coefficient.

疲劳寿命		60°		75°		90°		105°	
Fatigue life		S_a /MPa	N_f /10 ³	S_a /MPa	N_f /10 ³	S_a /MPa	N_f /10 ³	S_a /MPa	N_f /10 ³
节点 1	Point 1	213.17	747	360.67	27.00	470.47	7.711	712.67	1.504
节点 2	Point 2	243.62	354	329.92	42.20	490.71	6.510	679.62	1.466
节点 3	Point 3	226.63	611	342.25	35.15	480.23	7.100	697.39	1.738
均值	Average	227.81	571	343.28	38.12	480.48	7.107	719.49	1.569
疲劳损伤系数	Fatigue damage coefficient	0.00140		0.00233		0.11256		0.50987	

表 6 疲劳许用应力幅值的理论值和有限元计算值比较
Table 6 Compare between the theory and simulation results of the allowable fatigue stress.

应力幅值	交变应力强度 $S_{\text{alternate}}$ /MPa	有限元应力幅值 S_a /MPa	误差 /%
Stress	Alternating stress intensity	FEM simulation results	Error
60°	205.42	227.81	10.89
75°	302.18	343.28	13.60
90°	430.21	480.48	11.68
105°	640.15	719.49	12.30

从表中可以看到, 有限元计算的疲劳许用应力幅值与利用 ASME 规范中应力指数法得到的应力幅值的误差在 10%~14%之间, 而且应力指数法计算的应力幅值整体偏大。主要原因是, 应力指数法计算得到的应力指数 $C_{2h}=3$, $C_{2r}=2.44$, 而有限元计算中取得的应力集中系数为 3.4。所以在设计中, 要根据相应的结构选取正确的应力集中系数, 对于热疲劳的判定是至关重要的。

4 三通管道角度与疲劳的许用强度的关系

不同角度三通管疲劳的许用强度如表 6, 利用 Origin 软件对有限元计算值进行三次样条差值, 得到 28 个数据点。利用指数函数式进行数据拟合, 图 4 表示拟合曲线: $y = a \times \exp(-x/t) + b$, 拟合结果为: $y = 44.63514 \times \exp(x/38.1358) + 20.6314$ 。其中, a 的误差为 1.5%; t 的误差为 6.1%; b 的误差为 16.2%。

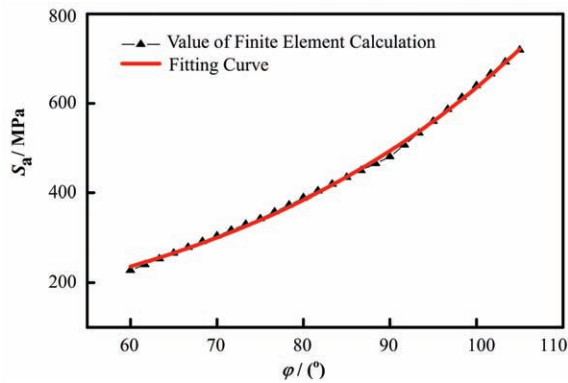


图4 数据拟合曲线
Fig.4 The fitting curve of data.

拟合结果的误差在可以接受的范围内，三通管的角度与热疲劳的许用强度成指数关系，该结果可以为接管的设计提供一定的依据。

5 结论

本文利用 ANSYS 通用有限元软件计算中国实验快堆一级管道不同角度三通管道的热应力，在应力集中区域提取节点，将开停堆作为一个事件进行热疲劳分析。同时，根据 ASME 规范中的 NB-3653.1 和 NB-3683 的相关公式，对三通管道的热疲劳寿命进行评定。得到的结论如下：(1) 热应力的最大值出现在主管道与支管的连接处，随着角度的增加热应力逐渐增大。随着角度的增加管道疲劳寿命降低，疲劳损伤系数增大，疲劳许用强度增加。(2) 有限元计算结果和规范计算的应力强度之间的误差在 10%–14%，主要原因是有限元取得的应力集中系数偏大。(3) 在前面工作的基础上，计算多组角度，拟合支管角度与疲劳寿命成指数关系式，此式可以

为三通管道的选取提供一定的理论根据。

本文给出支管角度与热疲劳寿命的关系式。此结论同样适用于大型容器的不同角度开孔接管问题，将三通管道的支管看似容器的接管。

参考文献

- 1 Johnny Sjostrom. Thermal Fatigue in Hot-Working Tools[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2005, 24(2): 45–49
- 2 韩增祥. 金属热疲劳试验方法的研究[C]. 第九届全国热疲劳学术会议论文集. 2007: 115
HAN Zengxiang. Method of metal thermal fatigue test[C]. Ninth National thermal fatigue of Conference Proceedings. 2007: 115
- 3 李贵军. 特种压力容器用钢 2.25CrMo 的中温低周疲劳行为及寿命的评估技术的研究[D]. 浙江大学博士学位论文. 2004: 46
LI Guijun. Research on intermediate temperature low cycle fatigue behavior and lifetime assessment techniques of special pressure vessel steel 2.25CrMo[D]. Zhejiang University Doctoral Dissertation. 2004: 46
- 4 郭冰峰, 樊永军, 刘宪东, 等. 25Cr12Ni5Mo 钢热疲劳损伤特性研究[J]. 材料热处理学报, 2007, S1: 24–26
GUO Bingfeng, FAN Yongjun, LIU Xiandong, et al. 25Cr12Ni5Mo steel heat fatigue damage characteristics[J]. Materials Science and Technology, 2007, S1: 24–26
- 5 ASME 规范第 II 篇材料 D 篇性能[S]. 2001: 256
ASME Code II Material Part D performance[S]. 2001: 256

Study on the thermal fatigue of tee in the first loop of nuclear reactor

HU Lina YU Huajin WANG Yueying

(Fast Reactor Research Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract Background: Thermal stress will be occurred in the Sodium Cooled Fast Reactor when it starts or stops, after a number of cycles, thermal fatigue damages will be emerged, especially in the connection areas of tees.

Purpose: To study the relations between the angles and the fatigue life in tees. **Methods:** The thermal fatigue life and fatigue damage coefficient of the tees of different angles are computed by the ANSYS software. **Results:** This paper gives a function charactering the relations between the fatigue allowable intensity and the tee angle. **Conclusions:** The fatigue strength is reducing with the decreasing of angle, which can provide certain valuable reference for designing tee nuclear reactor.

Key words Thermal fatigue, Fatigue strength, Tee, Stress concentration factor

CLC TG115.57, TL35