

TMSR-LF1 停堆系统高温螺栓连接结构 应力松弛分析与结构安全评定

林作康^{1,2} 王 雯^{1,2} 樊辉青^{1,2} 蔡茂源^{1,2} 翟利芳^{1,2} 张小春^{1,2}

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院先进核能创新研究院 上海 201800)

摘要 钍基熔盐液态堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel 1, TMSR-LF1)停堆系统螺栓连接结构服役环境约在 650 °C 的高温区域,连接结构包括三种材质的构件;升温过程热膨胀以及高温下寿命内的蠕变效应,对螺栓的预紧力都有很大影响。本文采用 ANSYS 程序,对 TMSR-LF1 停堆系统高温螺栓连接结构,在预紧载荷及热膨胀组合作用下的结构进行了应力分析和寿命内蠕变应力松弛分析。考虑从常温升高至工作温度的过程中,连接构件由于使用不同材料,其热膨胀差导致预紧力发生变化的过程;着重研究分析运行寿命内螺栓结构材料的高温蠕变,所引起应力松弛的变化规律,及其对螺栓连接结构预紧力的影响;并根据 ASME-III-5-HBB 规范对螺栓进行力学分析和应力评定,论证该螺栓连接件全寿命内结构安全可靠。

关键词 高温蠕变, 应力松弛, 螺栓预紧力, 力学分析

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.100601

Analysis and evaluation of stress relaxation for the high temperature bolt connecting structure in scram system of the TMSR-LF1

LIN Zuokang^{1,2} WANG Wen^{1,2} FAN Huiqing^{1,2} CAI Maoyuan^{1,2}

ZHAI Lifang^{1,2} ZHANG Xiaochun^{1,2}

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(Institute of Advanced Nuclear Energy Innovation, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] The temperature of the bolt connecting structure is around 650 °C in the scram system of the thorium molten salt reactor-liquid fuel 1 (TMSR-LF1) and the connecting components include three kinds of material, which have different coefficients of thermal expansion. Thermal expansion during the heating process, from room temperature to 650 °C, and creep in the long lifetime of reactor will affect the bolt pretension, which may touch the safety of the scram system. [Purpose] This study aims to analyse the stress relaxation of the bolting structure, and assess structural safety for the scram system of TMSR-LF1. [Methods] The ANSYS program was employed for the mechanical analysis of the bolt connecting model. The stress analysis and creep stress-relaxation analysis of the structure under the combined action of bolting preload and thermal expansion were performed. [Results] The high temperature creep of bolted structural materials and the variation of stress relaxation caused by the creep and its

中国科学院战略性先导科技专项(No.XDA02010000)资助

第一作者: 林作康, 男, 1984年出生, 2013年于中国科学院大学获博士学位, 核技术及应用

通信作者: 张小春, E-mail: zhangxiaochun@sinap.ac.cn

收稿日期: 2019-07-04, 修回日期: 2019-07-24

Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (No.XDA02010000)

First author: LIN Zuokang, male, born in 1984, graduated from University of Chinese Academy of Sciences with a doctoral degree in 2013, focusing on nuclear technology and application

Corresponding author: ZHANG Xiaochun, E-mail: zhangxiaochun@sinap.ac.cn

Received date: 2019-07-04, revised date: 2019-07-24

influence on the pre-tightening force of bolted connection structures are obtained for the whole lifetime of the reactor. And the evaluation of the bolt is completed under. **[Conclusions]** According to American society of mechanical engineers (ASME) standard in coordinate with ASME-III-5-HBB rules for bolt mechanical analysis and safety evaluation, the connecting bolt structure designed for TMSR-LF1 is demonstrated safe and reliable in the whole lifetime.

Key words High temperature creep, Stress relaxation, Bolt pretension, Mechanical analysis

钍基熔盐液态堆(Thorium Molten Salt Reactor-Liquid Fuel 1, TMSR-LF1)停堆系统的螺栓连接结构位于 650 °C 高温区域。由于螺栓连接通过施加预紧力将零部件连接在一起,而 TMSR-LF1 停堆系统的螺栓连接结构中设计了三种不同材料,该结构件升温过程中发生热膨胀,因其热膨胀率不同,会对螺栓预紧力产生较大影响。同时,高温螺栓连接结构金属材料在反应堆运行寿期内会发生蠕变、应力松弛现象^[1],使得螺栓连接结构预紧力下降,连接性能变差,直接关系到连接部件即控制棒系统的安全可靠性^[2]。因此,对螺栓连接件进行蠕变应力松弛分析十分必要。

目前,一部分学者从试件试验或数值模拟的角度出发,对金属材料蠕变或应力松弛行为进行了相关研究^[3-5]。前人对螺栓的应力松弛进行的研究有:根据高温下金属应力松弛的基本特征,建立预测应力松弛行为动力学方程式,预测不同初应力的应力松弛行为;预紧螺栓在常温下的应力松弛仿真研究;利用高温蠕变试验机对汽轮机螺栓材料进行应力水平试验,为材料选择及初始应力确定提供参考和依据;考虑高温环境服役结构的蠕变松弛作用,计算连接件系统载荷下变形新方法等^[6-9]。

本研究将通过材料高温蠕变实验数据拟合的一种常用蠕变模型——Norton 模型^[10],分析 TMSR-LF1 控制棒系统的螺栓连接结构在不同初始应力条件下,其材料应力松弛行为特点和螺栓预紧力变化规律。通过 ANSYS 有限元软件模拟计算,获得螺栓

连接结构的预紧力在寿期过程中的变化,来验证该连接结构设计合理性;并根据 ASME-III-5-HBB 规范对螺栓结构进行力学分析评定,论证该螺栓件全寿期内结构安全。

1 计算模型

TMSR-LF1 停堆系统连接螺栓是 LF1 停堆系统与堆主容器的连接结构,用于固定停堆系统支撑结构件。连接结构中包含三种材质构件,由于设计上的考虑,上下连接法兰以及螺栓材料各不相同。连接结构由螺栓、螺母、垫圈、主容器法兰和支撑筒法兰组成,见图 1。M16 螺栓组件材料均为 800H 合金;主容器法兰材料为 UNS N10003;支撑筒法兰材料为 316H。材料物性见表 1。其中,800H 及 316H 材料属性数据来源于 ASME 规范;UNS N10003 材料部分参数源自自测数据(TMSR 具有 China National Accreditation Service for Conformity Assessment, CNAS, 中国合格评定国家认可委员会认可资质)。

考虑到连接结构模型为轴对称结构,分析时将结构按轴线四等分,以单根螺栓及连接结构为模型进行计算分析。按照设计结构,三维有限元计算模型的仿真建模如图 2 所示。螺栓光杆结构有限元网格以六面体为主,螺母网格以四面体为主,上下法兰连接结构网格以六面体为主。螺栓部分作为分析过程中关注对象,其网格划分相对细密。经修改网格进行网格无关性分析后,对比螺栓应力结果可知,网格划分所引入计算误差小于 0.7% 以内。

表 1 合金材料基本属性
Table 1 Properties of alloy 800H, UNS 10003, 316H

材料 Materials	温度 Temperature / °C	弹性模量 Modulus of elasticity / GPa	屈服强度 Yield strength / MPa	热膨胀系数 Coefficient of thermal expansion / 10 ⁶ K ⁻¹
800H	22	196	—	14.2
	650	160	139	17.3
UNS N10003	22	218	280	10.0
	650	178	174	13.5
316H	22	195	207	15.3
	650	146	110	19.0

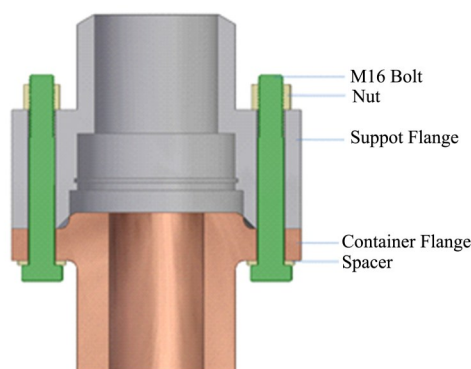


图1 TMSR-LF1 停堆系统支撑筒螺栓连接结构
Fig.1 Bolt connecting structure in scram system of TMSR-LF1

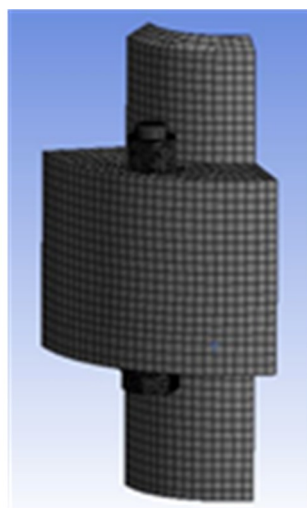


图2 连接结构三维有限元计算模型
Fig.2 Three-dimensional finite element model (FEM) of the bolt connecting structure

2 计算分析方法

TMSR-LF1 停堆系统连接螺栓是在高温环境下服役的结构零部件。在反应堆寿期内,该结构材料蠕变引起应力松弛,会对螺栓连接结构预紧力产生很大影响。基于时间尺度太大,从开展实验的角度进行该问题的研究,并不现实。利用材料蠕变性能,通过仿真模拟的方式,计算分析该问题,是较合理的选择;因此,本文利用 ANSYS,开展数值模拟进行分析。ANSYS 中隐式蠕变模型采用后退欧拉积分法计算蠕变,采用多种应变硬化准则分析蠕变。这种方法是无条件数值稳定的,意味着其不像显式蠕变模型需要很小的时间步,计算时间快,因而采用隐式蠕变法开展计算分析。根据 ASME-III-5-HBB,关于高温应变、变形分析类型,预计蠕变效应明显的部位,一般要求进行非弹性分析,以对变形和应变给出定量评定。TMSR-LF1 停堆系统连接螺栓模型,采

用非弹性分析方法进行高温应变、蠕变及应力松弛分析与评定。

Norton 蠕变模型是经典的蠕变模型,能较准确模拟稳态蠕变行为,其模型如式(1):

$$\dot{\varepsilon} = C_1 \sigma^{C_2} e^{-C_3/T} \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为蠕变应变率; C_1 、 C_2 、 C_3 分别为材料蠕变参数; T 为温度。根据实验数据拟合较为通用的 Norton 蠕变模型,用来预测 TMSR-LF1 螺栓结构在寿期内的应力松弛行为规律。800H 和 316H 参数由 BS-7910^[11] 中获取;UNS N10003 参数,利用 TMSR 材料高温蠕变试验数据拟合获得^[12]。

针对 TMSR-LF1 停堆系统螺栓连接结构,根据不同系数计算设定两组预紧力。连接结构从 22 °C 上升到 650 °C 的温度条件,考虑热膨胀引起的螺栓预紧变化后,开展高温蠕变松弛计算。在 ANSYS-static structural 模块中,将计算分三个分析步:第一步进行螺栓预紧加载分析;第二步加载升温条件;第三步计算反应堆寿期内的螺栓结构的蠕变及应力松弛分析,分析反应堆寿期时间约十万小时。利用材料蠕变模型计算时,如果该结构计算工况下的蠕变率较高,应当设置求解器的求解时间步长尽可能小;而为节约计算成本,又需将求解时间步长设置尽可能大。由于设计计算蠕变时间相对较长,且高温环境中螺栓结构材料在初始预紧状态下蠕变率较大,统一设置步长会导致 creep ratio 超过限值,影响收敛速度。因此,第三步计算过程中再分步设置时间步长,以减小初始状态每个迭代步中的 creep ratio,避免重复计算,从而提高计算速度。

3 计算结果分析

3.1 材料热膨胀导致预紧力变化分析

TMSR-LF1 停堆系统支撑筒上、下连接法兰在设计过程中,基于部件设计选用不同材料,分别为 316H 和 UNS N10003,两种材料热膨胀率相差较大。因此,螺栓与上下连接法兰之间的热匹配是设计分析考虑的重点问题。选用不同螺栓材料进行分析,结果发现:若螺栓材料选用 316H,常温下预紧的连接结构将会在升温到高温时松脱,从而起不到紧固作用;若螺栓选用 UNS N10003,升温后连接结构的预紧力超过 55 kN,螺栓平均横截面应力大大超过其材料屈服强度。设计过程中经多组比对,最终选用热膨胀率在 316H 和 UNS N10003 之间较为合适的材料 800H。根据设计设定两组预紧力,分别为 4 600 N 和 10 920 N 的预紧条件,进行升温热膨胀模拟。构件从常温预紧后升温至 650 °C,其两组螺栓

预紧力随温度变化结果如表2所示。从计算结果可知,温度从22℃上升到650℃,初始预紧力4 600 N,升温膨胀后螺栓预紧力增大到9 169 N;初始预紧力10 920 N,升温后螺栓预紧力增大到14 428 N。

表2 螺栓预紧力随温度变化

Table 2 Bolt pretension in different temperature

温度 Temperature / °C	低初始预紧力 Low preload / N	高初始预紧力 High preload / N
22	4 600	10 920
84.8	4 558	10 789
273.2	5 883	11 793
555.8	8 337	13 803
650	9 169	14 428

3.2 蠕变应力松弛分析

3.2.1 蠕变应力松弛

初始预紧4 600 N与10 920 N两种情况下的螺栓结构应力松弛曲线见图3。低初始预紧力情况下,经热膨胀后,螺栓最大应力强度为106.2 MPa,高初始预紧力情况下,其螺栓最大应力强度为165.1 MPa;两组螺栓的寿期末最终应力分别为29.0 MPa和28.7 MPa。经5 000 h高温服役,在蠕变应力松弛效应作用下,两组螺栓最大应力值,基本达到相近的数值(40.9 MPa和41.1 MPa)。

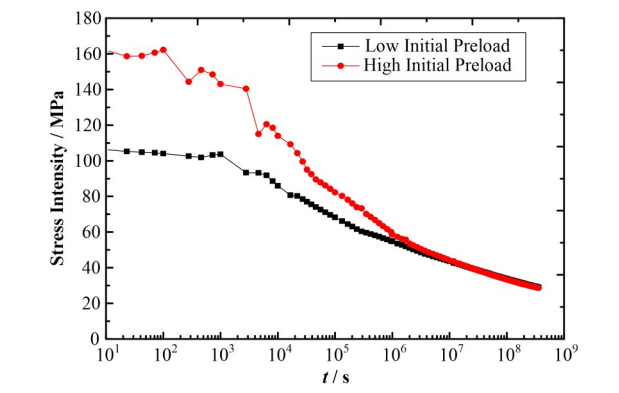


图3 螺栓材料应力松弛曲线
Fig.3 Stress relaxation curves of the bolt material

计算结果说明,不同初始预紧力仅在一定时间范围内,对高温螺栓结构件紧固强弱起效。而初始预紧力越大,螺栓材料的蠕变速率越大,引起应力松弛也越显著;由于不同初始预紧造成的不同蠕变速率,经过一段时间后,两组螺栓达到相同的应力松弛极限。分析案例模型所选材料及服役温度环境条件下,螺栓应力松弛时间约为5 000 h,基本达到相同应力。

3.2.2 螺栓预紧力变化

根据计算分析,650℃高温情况下,螺栓预紧力

随时间变化如图4所示。两组螺栓预紧力在服役过程中,低始预紧条件下,热膨胀过程中预紧力最大增加到9 168.7 N,到寿期末经应力松弛后降为3 620 N;高初始预紧条件下,热膨胀后预紧力最大增加到14 428 N,到寿期末经应力松弛后下降到3 636 N。经5 000 h高温服役,两组不同初始预紧的螺栓,其对应的预紧力基本达到接近的数值(5 524 N和5 675 N)。可见,螺栓预紧力的变化和高温蠕变应力松弛的趋势一致。

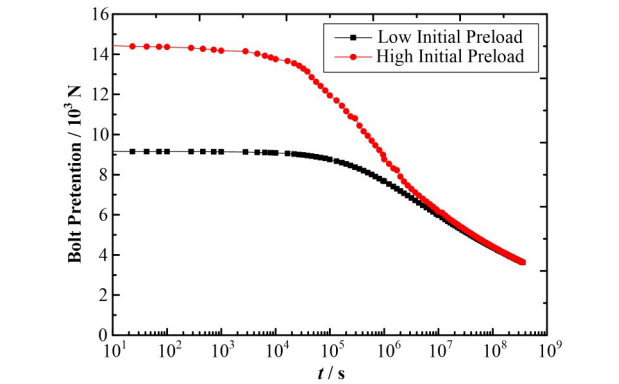


图4 螺栓预紧力变化曲线
Fig.4 Curves of the bolt pretension

长时间高温(650℃)服役,TMSR-LF1连接螺栓经蠕变应力松弛效应,5 000 h之后,两组不同预紧条件的螺栓连接结构,达到相接近的应力和预紧水平。较高的初始预紧力对于高温长寿命螺栓的紧固效果而言,经过一段时间蠕变松弛后,并不能起到加强紧固的作用。同时,根据计算结果分析,螺栓连接结构在4 600 N初始预紧条件下,经运行时间(十万小时)内的高温蠕变应力松弛后,依然保持紧固状态。下文高温螺栓的应力、应变分析评定,将以4 600 N初始预紧条件进行分析。

3.3 应力、应变、蠕变损伤分析与安全评定

寿期内连接结构的总体应力云图和螺栓横截面最大平均应力见图5。初始预紧力情况下,其最大应力53.7 MPa,出现在螺栓、螺母连接头处,该处螺栓横截面平均应力值为19.0 MPa;连接结构中光杆螺柱部分的横截面平均应力值相对较大,横截面平均应力为22.9 MPa。温度上升为650℃,在螺栓、螺母连接头处的最大应力上升为106.2 MPa,该处沿螺栓横截面平均应力值为38.4 MPa;连接结构中光杆螺柱部分,横截面平均应力上升为45.6 MPa。高温下运行十万小时,经蠕变应力松弛效应;最大应力降低到29.0 MPa,光杆螺柱横截面最大平均应力为18.0 MPa。

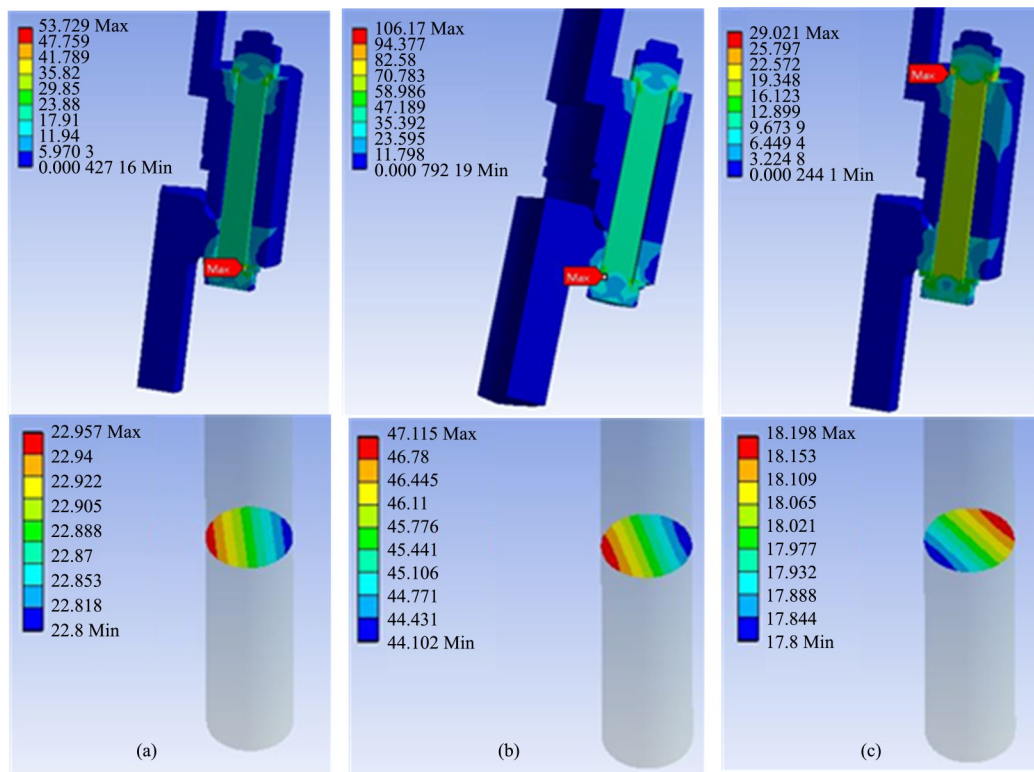


图5 寿期内连接结构应力云图 (a) 初始预紧状态, (b) 升温膨胀后最大应力状态, (c) 寿期末状态

Fig.5 Stress nephogram of the bolt connecting structure

(a) Initial phase, (b) Maximum stress phase after thermal expansion, (c) Ending phase

依据 ASME-III-5-HBB 高温螺栓 A/B 级使用限制要求,对螺栓横截面内的最大应力(沿螺栓横截面平均且不计应力集中)及螺栓周边的最大应力(由拉

伸加弯曲作用产生,且不计应力集中)进行了评定,详见表 3,评定结果满足规范要求。

表 3 高温连接螺栓 A/B 级应力评定
Table 3 Stress evaluation level A/B of the bolt

状态 Stage	横截面平均应力		周边最大应力		评定结果
	Average stress / MPa		Maximum stress / MPa		
	计算值	限值	计算值	限值	
	Calculation	Limit (2 <i>S_{mt}</i>)	Calculation	Limit Min (3 <i>S_{mt}</i> / <i>K_tS_t</i>)	
初始预紧力情况下 Initial phase	22.9	210	22.9	178.2	Pass
升温 650 °C 情况下 Maximum phase	45.6	190	46.8	151.2	Pass
寿期末情况下 Ending phase	18.0	90	18.2	60.8	Pass

表中 S_m 为 S_m (与时间无关) 与 S_t (与时间相关) 两个应力强度限值中的较小值; S_m 为与时间无关许用应力强度; S_t 为与时间相关许用应力强度; K_t 为 $(K+1)/2$; K 为截面系数。

以最严酷工况进行包络分析,在第二设防水准地震动(50 a 超越概率 2% 地震动)载荷下,控制棒停堆系统支撑筒螺栓连接处的载荷(TMSR-LF1 内部报告:2 MWt 液态燃料钍基熔盐实验堆堆本体抗震分析报告提供),取支撑筒中各项最大值,作为保守载荷输入,进行计算分析。依据 ASME-III-5-HBB

高温螺栓 D 级使用限制要求,对螺栓在升温后最大预紧力为 9 176.8 N 和寿期末预紧力 3 620 N 情况下的应力进行了分析评定,分别将螺栓光杆平均应力最大处(路径 1)和螺栓头连接处应力最大值处(路径 2),进行应力线性化。应力限值按保守包络 D 工况的时间 300 h 进行评定,详见表 4,评定结果满足规范要求。

表中 P_m 为一次薄膜应力; P_L+P_b/K_t 组合一次薄膜应力加弯曲应力强度; S_t 为最小断裂应力; S_u 为抗拉强度; S_m 为与时间无关许用应力强度; R 为焊缝减

表4 高温连接螺栓D级应力评定
Table 4 Stress evaluation level D of the bolt

评定标准 Evaluation standard	最大预紧力情况下 Maximum phase		寿期末预紧力情况下 Ending phase		应力限值 Limit / MPa	评定结果 Evaluation result
	路径 1 Path 1 / MPa	路径 2 Path 2 / MPa	路径 1 Path 1 / MPa	路径 2 Path 2 / MPa	$t=300\text{ h}$	
$P_m \leq \min\{0.67S_p, 0.8RS_p, 2.4S_m, 0.7S_u\}$	47.8	23.0	29.4	14.3	67.8	Pass
$P_L + P_b/K_i \leq \min\{0.67S_p, 0.8RS_p\}$	48.0	52.3	31.5	33.6	67.8	Pass
$\sum t_i=300\text{ h}$; 载荷使用系数 Use-fraction factor	$\sum_i \left(\frac{t_i}{t_{ir}} \right) < 300/3 \times 10^4 = 0.01 \leq B_r = 1 \sum_i \left(\frac{t_i}{t_{ibr}} \right) < 300/1 \times 10^4 = 0.03 \leq 1$					Pass

弱因子; t_i 为载荷在高温 T_i 下的总持续时间; t_{ir} 为载荷应力强度 $1.5P_m$ 下许用时间; t_{ibr} 为载荷应力 $1.5(P_L+P_b/K_i)$ 下许用时间; B_r 为使用系数因子。

参考 ASME-III-5-HBB-T-1310 的非弹性应变限制。在预计经受高温的区域,最大累积非弹性应变满足下列要求:1) 沿厚度平均的应变 ϵ_m 不超过1%;2) 应变沿厚度等效线性分布引起的表面应变 ϵ_s 不超过2%;3) 在任何点的局部应变 ϵ_{local} 不超过5%。根据计算分析结果,螺栓结构在高温650℃情况下持续十万小时服役,其总累积变形量仅为0.6%,小于应变最低限值。具体应变云图如图8所示,计算应变值小于应变限制,因此满足非弹性应变限值要求。

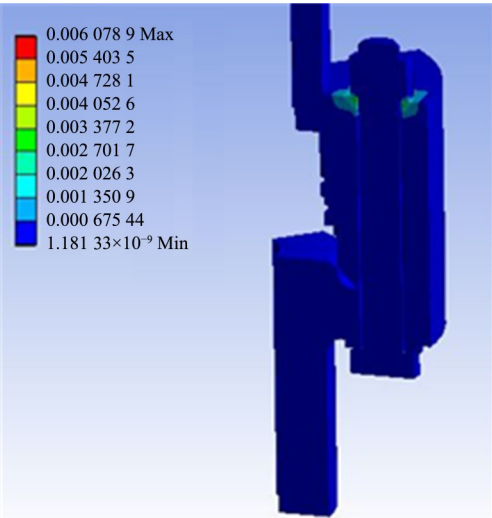


图6 螺栓连接结构应变云图
Fig.6 Strain nephogram of the bolt connecting structure

根据模拟计算结果,可以推导螺栓连接结构的蠕变损伤。参考 ASME-III-5-HBB-T-1433 的蠕变损伤计算方法,定义初始应力 S_j ,按照计算结果,分别提取计算时间为1~100 000 h的应力 S 。对于非弹性分析,系数 K' (分析计算使用保守系数)取0.67,计算 S/K' 。根据材料的最小蠕变应力-断裂曲线查询许用

的时间宽度 T_d ,从而得到非弹性蠕变损伤因子 $\Delta t/T_d$ 。经升温膨胀达到9 168.7 N为起始螺栓预紧条件,进行蠕变模拟计算分析;结果表明:在高温650℃C下服役十万小时,螺栓最大非弹性蠕变损伤为0.213 1;支撑筒法兰最大非弹性蠕变损伤0.203 8;主容器法兰最大非弹性蠕变损伤0.175。ASME 规范评价蠕变疲劳是利用蠕变-疲劳损伤包络线,应用于承受往复载荷循环的构件分析评定。在螺栓连接结构蠕变松弛行为对其紧固功能影响的案例中,并无交变应力影响;因此,该分析案例中以疲劳损伤为0,蠕变评价准则为蠕变损伤小于1.0进行评定,TMSR-LF1 高温螺栓连接结构的蠕变损伤小于规范限值。

4 结语

结合以上升温膨胀、蠕变应力松弛计算分析,得出结论:

- 1)不同初始预紧条件下,初始预紧力较小的螺栓,其热膨胀导致预紧力增加值相对较大。
- 2)650℃下高温蠕变应力松弛效应,导致TMSR-LF1 停堆系统螺栓连接结构服役5 000 h后基本达到相同的应力和预紧力;较大的初始预紧力对经5 000 h应力松弛之后的螺栓连接结构,起不到加强固紧作用。
- 3)初始预紧力加载4 600 N,停堆系统螺栓连接结构从室温22℃上升到650℃温度,预紧力增大到9 168.7 N,螺栓结构横截面平均最大应力为45.6 MPa;经寿期内(十万小时)结构材料高温蠕变和应力松弛,螺栓结构横截面平均最大应力减小到18.0 MPa,最终螺栓预紧力为3 620 N;连接结构全寿期保持紧固状态。

综上所述,TMSR-LF1 停堆系统螺栓连接结构,在全寿期内满足 ASME-III-5 高温规范应力限值要求,同时满足变形和应变限制要求;该螺栓连接结构在运行全寿期内安全可靠。

参考文献

- 1 张维维. 电站高温螺栓松弛力学行为的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
ZHANG Weiwei. Research on stress relaxation behaviour of high temperature bolts in power plants[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- 2 Townsend R D. Performance of high temperature bolting in power plant[A]. Strang A. Performance of bolting materials in high temperature plant applications[C], London, UK: The Institute of Materials, 1995: 15 – 39. DOI: 10.1016/S1044-5803(97)80014-9.
- 3 闫守海. 钢材高温蠕变性能试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
YAN Shouhai. Experimental study on creep behavior in steel at elevated temperature[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- 4 Kodur V K R, Dwaikat M M S. Effect of high temperature creep on the fire response of restrained steel beams[J]. Materials and Structures, 2010, **43**: 1327–1341. DOI: 10.1617/s11527-010-9583-y.
- 5 Poh K W. Stress-strain-temperature relationship for structural steel[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2001, (13): 371–379. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:5(371).
- 6 Ellis F V, Sielski D R, Viswanathan R. An improved analytical method for life prediction of bolting[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2001, **123**: 70 – 74. DOI: 10.1115/1.1344240.
- 7 王娜, 张博. 预紧螺栓常温应力松弛仿真分析[J]. 太原学院学报, 2016, **36**(04): 6–8. DOI: 10.14152/j.cnki.2096-191X.2016.04.002.
WANG Na, ZHANG Bo. Simulation analysis of the stress relaxation of assembly bolt at room temperature[J]. Journal of Taiyuan University, 2016, **36**(04): 6 – 8. DOI: 10.14152/j.cnki.2096-191X.2016.04.002.
- 8 王志武. 高温服役 3×10^5 h 后汽缸螺栓用 20Cr1Mo1V1 钢的应力松弛性能[J]. 机械工程材料, 2013, **37**(02): 74–77.
WANG Zhiwu. Stress relaxation of 20Cr1Mo1V1 steel for cylinder bolt after working for 3×10^5 h at high temperature[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2013, **37**(02): 74–77.
- 9 Woodford D A. Stress relaxation testing of service exposed IN738 for creep strength evaluation[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2000, **122**(7): 451–456. DOI: 10.1115/1.1287345.
- 10 Norton F H. The creep of steel at high temperatures[R]. London: McGraw-Hill, 1929.
- 11 BS 7910:2013+A1:2015. Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures[S]. BSI Standards Publication: The British Standards Institution, 2015.
- 12 Wang X Y, Wang X, Zhang X C. Creep damage characterization of UNS N10003 alloy based on a numerical simulation using the Norton creep law and Kachanov - Rabotnov creep damage model[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(4): 65. DOI: 10.1007/s41365-019-0586-2.