

反应堆冷却剂系统辅助管道缺陷焊缝 疲劳分析与评价

臧峰刚, 王伟, 刘文进, 张毅雄, 曾忠秀, 杨凯, 邹鸣中

(中国核动力研究设计院 核反应堆系统设计技术国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:根据某核电厂反应堆冷却剂系统辅助管道核1级焊缝的在役检查结果和施工设计阶段应力分析结果,确定了疲劳分析与评价的典型缺陷焊缝。依据WRC502的实验结果和RCC-M规范,提出了用于疲劳分析的含热(微)裂纹效应的疲劳曲线。在此基础上,对机组运行5a的瞬变统计次数与设计瞬态次数进行了对比研究,采用优化疲劳分析方法对典型缺陷焊缝进行了疲劳分析与评价。评价结果表明:辅助管道核1级焊缝在核电厂运行10a内不会发生疲劳失效。

关键词:热(微)裂纹;管道;焊缝;疲劳

中图分类号:TB12;TL38;TL353

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)S1-0618-04

Fatigue Analysis and Assessments of Flawed Welds for Auxiliary Piping of Reactor Coolant System

ZANG Feng-gang, WANG Wei, LIU Wen-jin, ZHANG Yi-xiong,
ZENG Zhong-xiu, YANG Kai, ZOU Ming-zhong

(State Key Laboratory of Reactor System Design Technology,
Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the results from the in-service inspection to the auxiliary piping welds of reactor coolant system in a nuclear power plant and the corresponding stress analysis reports in detail design phase, the typical flawed welds were determined to take fatigue analysis and assessments in this paper. According to the experimental results from WRC 502 and RCC-M code, the fatigue curve for considering the microfissure effects was present. Furthermore, the comparison of the transient cycle numbers recorded in the reactor operation in five years with that specified in detail design phase was taken, the fatigue analysis and assessment for the typical flawed weld were performed using the optimized fatigue method. The assessment results show that the fatigue failure of the auxiliary piping weld will not occur in ten years operation of nuclear power plant.

Key words: microfissure; piping; weld; fatigue

某核电厂在停堆检修期间,对核辅助管道役检范围内的核 1、2 级焊缝进行了全面的液体渗透检查(PT)和射线照相检查(RT)。环焊缝 RT 和超声抽查(UT)未发现缺陷,但有部分焊缝存在 PT 超标显示。

通过覆膜金相检查、铁素体测量、逐层打磨及 PT、UT 和 RT 等,对焊缝缺陷的性质和成因的研究表明,焊缝缺陷具有沿柱状晶间开裂的特征,与焊材个别化学成分(如 δ -铁素体)的含量和偏离焊接工艺操作的相关性很大,属典型的热(微)裂纹。

WRC502^[1]研究结果表明,对 316L 焊接试样,热(微)裂纹对屈服强度或拉伸强度几乎无影响,对其延性有一定影响,但对疲劳性能有很大影响。

本工作根据辅助管道核 1 级焊缝的在役检查结果和施工设计阶段应力分析结果,确定疲劳分析与评价的典型缺陷焊缝。依据 WRC502 的实验结果和 RCC-M 规范^[2],提出用于疲劳分析的含热(微)裂纹效应的疲劳曲线。在此基础上,对机组运行 5 a 的瞬变统计次数与设计瞬变次数进行对比研究,采用优化疲劳分析方法^[3]对典型缺陷焊缝进行疲劳分析与评价,并进一步给出辅助管道核 1 级焊缝的疲劳分析与评价结果。

1 分析焊缝选取

根据辅助管道核 1 级焊缝的在役检查结果和辅助管道施工阶段疲劳分析报告,找出 PT 和 RT 未发现缺陷的核 1 级焊缝中疲劳使用系数最大的 3 条焊缝作为疲劳分析与评价的典型缺陷焊缝。本工作仅以其中的稳压器喷雾管线 1RCP013(4")的核 1 级环焊缝为例,进行疲劳分析与评价,其施工阶段简化疲劳分析和优化疲劳分析结果分别为 1.49 和 0.892。

2 分析方法和依据

分析方法采用 RCC-M 规范 ZE300(1993 版)。由于分析的对象是 PT、RT 未发现超标显示的焊缝,根据焊缝逐层打磨后的检查结果,须保守地假设其内部含有热(微)裂纹。因此,在疲劳分析中应采用考虑含有热(微)裂纹效应的疲劳曲线。

图 1 示出 WRC502 热(微)裂纹对 316L 焊缝金属疲劳性能影响的试验结果,循环次数为 87 478~625 216,对应的交变应力为 448~276 MPa。由于 WRC502 研究的焊条牌号与现场使用的牌号一致,两者缺陷的形貌和性质相同、微裂纹的取向相似、裂纹尺寸接近,裂纹的密度较高,焊条化学成分指标劣于现场使用的焊条等。因此,这里采用 WRC502 的疲劳试验结果作为缺陷焊缝的疲劳分析是保守的。

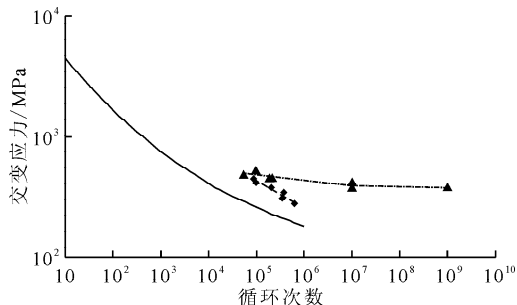


图 1 RCC-M 疲劳曲线与 WRC502 含/不含热(微)裂纹疲劳试验值的比较

Fig. 1 Comparison of RCC-M fatigue curve with test results containing and not containing microfissure from WRC502

实线——RCC-M 疲劳曲线;◆——含热(微)裂纹试件试验值;▲——不含热(微)裂纹试件试验值

2.1 含热(微)裂纹效应的疲劳曲线

基于 RCC-M 规范疲劳曲线和 WRC502 试验结果,构造用于疲劳分析的含热(微)裂纹效应的疲劳曲线。

图 1 示出 RCC-M 规范的疲劳曲线和 WRC502 中 316L 含热(微)裂纹效应的疲劳曲线及不含热(微)裂纹效应的疲劳曲线。从图 1 可看出,含热(微)裂纹效应的疲劳曲线在不含热(微)裂纹效应的疲劳曲线之下,但又均在 RCC-M 规范的疲劳曲线之上。随着循环次数的减少,热(微)裂纹效应对疲劳的贡献逐渐降低,且在某点(如 44 370 次)附近含热(微)裂纹和不含热(微)裂纹试件的试验值基本相同;随着循环次数的增加,含热(微)裂纹对疲劳的影响逐渐增大。

根据 RCC-M 规范附录 Z III 220 由循环试验结果绘制疲劳曲线的相关规定,对 WRC502 中 316L 含热(微)裂纹效应的疲劳试验结果,

分别进行应力值除以因数 2、循环次数除以因数 20 的修正,再进行下包络,绘制用于疲劳分析的含热(微)裂纹的疲劳曲线(图 2)。

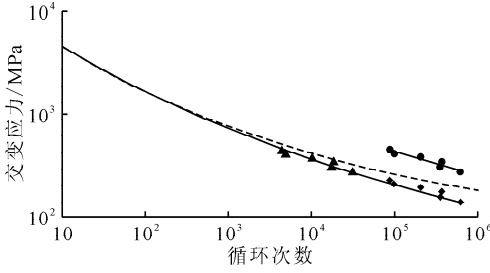


图 2 含热(微)裂纹效应的包络疲劳曲线
Fig. 2 Fatigue envelope curves containing microfissure

实线——下包络曲线;虚线——RCC-M 疲劳曲线;
●——含热(微)裂纹试件试验值;
◆——试验值的交变应力除以 2;
▲——试验值的循环次数除以 20

2.2 疲劳分析方法

根据 RCC-M 规范 ZE300,疲劳分析包括简化疲劳分析和优化疲劳分析。简化疲劳分析简单、计算效率高,但保守性较大;优化疲劳分析则较为复杂、计算效率较低,但保守性较小。工程上通常首选简化疲劳分析,若分析结果不能满足规范要求,则采用优化疲劳分析方法进一步计算分析。

2.2.1 简化疲劳分析方法

RCC-M 规范 ZE300 描述了管道的简化疲劳分析法。计算疲劳使用系数的步骤如下。

1) 每一工况的载荷状态可用下述方法之一选择。

(1) 在所分析的工况中,将各种载荷均作为独立载荷来考虑,并根据应力幅值函数 $G_X(i, j)$ 各种变量的最大 1 组值或最小 1 组值来确定假想载荷状态。

(2) 在进行工况分析时,在上述(1)所列方法中,将应力幅值函数 $G_X(i, j)$ 达到极值时对应各种变量的数值来代替其极值。

在每个选择的载荷状态 i 中,对应有 1 个出现次数 n_i ,它等于所分析工况出现的次数。

2) 按上述 1) 的方法选择载荷组 i 和 j ,它们可能属于同一工况,也可能不属于同一工况。对应于这一组合的 $S_{alt}(i, j)$ 值可用下列关

系式确定:

$$S_{alt}(i, j) = K_e(p, q) \frac{G_P(i, j)}{2} \quad (1)$$

式中: $G_P(i, j)$ 为在瞬时 i 和 j 之间的总应力变化幅值,且有:

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

弹塑性应变修正系数 $K_e(p, q)$ 由下述方式确定:

$$K_e = \begin{cases} 1.0 & (S_n \leq 3S_m) \\ 1.0 + \frac{1-n}{n(m-1)} \cdot \left(\frac{S_n}{3S_m} - 1\right) & (3S_m < S_n < 3mS_m) \\ \frac{1}{n} & (S_n \geq 3mS_m) \end{cases}$$

其中: S_n 为一次应力加二次应力变化幅值; S_m 为材料许用应力强度; $n=0.3$; $m=1.7$ 。

交变应力 S_{alt} 的出现次数为:

$$n(i, j) = \min(n_i, n_j)$$

按步骤 1) 成对地选择所有载荷组合,由 $S_{alt}(i, j)$ 建立矩阵。

3) 从 $S_{alt}(i, j)$ 的组中选取最大值,其相应的出现次数不为零,令 $S_a = S_{alt}(k, l)$ 为纵坐标,在材料的疲劳曲线上查取对应的循环次数。

假定所研究的循环为单一循环,根据疲劳曲线可确定许用循环次数,令 $N(k, l)$ 为许用循环次数。

由 $S_{alt}(i, j)$ 得出的使用系数为 $\frac{n(k, l)}{N(k, l)}$ 。

如果 $N(k, l) > 10^6$, 则此使用系数可取为零。

4) 若 $n_k < n_l$, 则去除载荷组 k 的所有载荷组合后,1 组新的 $S_{alt}(i, j)$ 及包含载荷组 l 的组合的出现次数 $n(l, j)$ 由下式修正:

$$n'(l, j) = n(l, j) - n_k$$

重复上述 3), 直到这些载荷组构成的全部出现次数均被考虑为止。

5) 总使用系数等于上述方法确定的各部分使用系数之和。

2.2.2 优化疲劳分析方法

优化疲劳分析法即为对弹塑性应变修正系数 $K_e(p, q)$ 进行优化后重新计算交变应力 S_{alt} 。

$$S_{alt}(i, j) = \frac{1}{2} \left[(K_{emeca})_{pq} (S_{pmeca})_{ij} + (K_{ether})_{pq} (S_{pther})_{ij} \right]$$

式中: K_{emeca} 为与机械载荷有关的弹塑性应变修正系数, 与简化疲劳分析定义的 K_e 相同; K_{ether} 为与热应力有关的弹塑性应变修正系数, $K_{ether} = \max\left(1, 1.86\left(1 - \frac{1}{1.66 + S_n/S_m}\right)\right)$; S_{pmeca} 为简化疲劳分析中式(2)定义的前两项; S_{pther} 为简化疲劳分析中式(2)定义的后3项。

3 分析载荷

分析考虑的载荷主要有:地震载荷(OBE)和二类工况所有瞬态(温度瞬态、压力瞬态)。这里,二类工况所有瞬态(温度、压力)的循环次数(包括地震载荷的循环次数),根据核电厂40 a设计瞬态次数分别按5、8、10 a折算。

机组运行5 a的瞬变统计结果表明,实际累计瞬变次数在设计范围内,且远小于同期设计的瞬态次数。因此,疲劳分析中所用瞬态次数按核电厂40 a设计瞬态次数折算,具有足够的保守性。

4 疲劳分析与评价结果

对稳压器喷雾管线的核1级环焊缝,分别考虑核电厂运行5、8、10 a所承受的设计循环载荷(包括地震载荷),根据绘制的含热(微)裂纹效应包络疲劳曲线,分别进行优化疲劳分析与评价。

表1列出该环焊缝在考虑核电厂运行5、

8、10 a的疲劳分析结果。为便于对比说明,还给出该焊缝基于RCC-M规范疲劳曲线的疲劳分析结果。分析结果表明,该焊缝在核电厂运行10 a的疲劳使用系数小于1.0,满足RCC-M规范的要求。

表1 焊缝疲劳分析结果

Table 1 Fatigue analysis results of flawed weld

采用疲劳曲线方案	不同运行时间下的疲劳使用系数			RCC-M 限值
	5 a	8 a	10 a	
包络疲劳曲线	0.131 4	0.210 3	0.262 7	1.0
RCC-M	0.111 5	0.178 4	0.223 0	1.0

其它两条典型环焊缝按上述方法进行疲劳分析与评价,亦满足RCC-M规范的要求。

5 结论

对辅助管道核1级缺陷焊缝,考虑核电厂运行5、8、10 a的设计瞬态次数,采用依据WRC502试验结果绘制的含热(微)裂纹效应的包络疲劳曲线,焊缝的疲劳使用系数小于1,满足规范的要求;采用RCC-M规范疲劳曲线,焊缝的疲劳使用系数小于1.0,满足规范的要求。

以上计算分析说明,在核电厂运行10 a内,辅助管道核1级缺陷焊缝不会发生疲劳失效。

参考文献:

[1] LUNDIN C D, CUI Yan. Effect of microfissures on austenitic stainless steel weld metals (WRC Bulletin 502)[R]. USA: The Welding Research Council, Inc., 2005.
 [2] RCC-M[S]. France: AFCEN, 1993.