

# 定量热像法预测焊接接头的 $S-N$ 曲线和残余寿命

Predictions of  $S-N$  Curve and Residual Life of Welded  
Joints by Quantitative Thermographic Method

樊俊铃, 郭杏林, 赵延广, 吴承伟

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116023)

FAN Jun-ling, GUO Xing-lin, ZHAO Yan-guang, WU Cheng-wei

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,  
Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China)

**摘要:** 在恒定的平均应力作用下, 考虑焊接接头的实际工况, 利用红外热像技术建立了快速预测焊接接头疲劳参数和残余寿命的模型, 实现了定量热像法对非均质焊接接头疲劳性能的评估。通过红外热像仪监测焊接接头表面局部热点的变化, 定性分析了损伤演化状态。结果表明: 定量热像法克服了传统疲劳实验方法的局限性, 可快速、准确地确定非均质焊接接头的疲劳性能。同时, 通过对疲劳损伤过程中热点区域的实时监测说明其是一种有效的检测方法。

**关键词:** 定量热像法;  $S-N$  曲线; 十字焊接接头; 损伤累积; 残余寿命

**中图分类号:** TG407 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2011)12-0029-05

**Abstract:** With the specific nominal mean stress, considering the real operating situations of welded joints, the model for fast assessing the fatigue parameters and the residual fatigue life, was established by the infrared thermographic technique, realizing the fatigue performance evaluation of inhomogeneous welded joints using quantitative thermographic method. The damage evolution status was qualitatively analyzed by monitoring the hot-spot variation on the welded joint surface. The results show that limitations of the traditional method are avoided, and that fatigue behavior parameters of inhomogeneous welded joints can be determined fast and accurately by quantitative thermographic method. Moreover, it is proved to be an effective way for health detection resorting to the hot-spot variation detected real-timely during the fatigue process.

**Key words:** quantitative thermographic method;  $S-N$  curve; cruciform welded joint; damage accumulation; residual life

焊接接头疲劳强度的评估是焊接结构设计过程中的一个重要环节。焊缝区域可能存在潜在的热裂纹、高度的应力集中和拉伸残余应力等, 往往是焊接结构中最薄弱的环节。因此加强对焊接接头疲劳性能的研究对焊接结构的断裂安全设计具有重要的意义。目前焊接结构正向大型化和高参数方向发展, 对结构寿命的预测要求更准确可靠, 所以急需发展新的焊接结构性能评估方法, 以解决传统方法的不足<sup>[1]</sup>。

当前, 对焊接构件的研究主要有 4 种方法<sup>[2]</sup>: (1) 名义应力法; (2) 热点应力法; (3) 缺口应力法; (4) 断裂力学法。它们在得到应用的同时, 也有一些局限性<sup>[3-6]</sup>。名义应力法和热点应力法是目前工程设计中较为普遍采用的焊接结构性能评定方法, 但是名义应

力法对几何形状复杂的构件, 名义应力不易确定, 选择时具有很强的主观色彩, 而且费时费力, 很不经济; 焊缝区组织的不均匀性和不连续性, 使得热点应力法受到有限元网格划分尺寸的影响, 同时它还忽略了焊缝尺寸效应和厚度效应。缺口应力法考虑了局部焊缝细节的影响, 通过有限元分析获得局部缺口的参数化公式, 但是受到有限元网格密度的限制, 且焊趾半径很难精确确定, 焊趾几何往往在分析中被理想化。断裂力学法对初始裂纹尺寸较敏感, 尽管利用 Paris 公式可以实现对含裂纹构件寿命的预测, 但其计算量要比前几种方法大得多, 并且无法确定裂纹萌生前的寿命。

焊接结构的疲劳寿命受到多种因素的影响, 如构件尺寸、焊接工艺参数、母材和焊材性能及使用工况

等,要综合考虑各种因素的影响,合理地预测焊接构件的疲劳性能,就必须对构件的整体受力状态进行全场实时的监测和研究,寻找控制结构寿命的关键区域。交变载荷会引起试件表面温度场的变化,红外热像技术通过监测这种温度场的变化,以试件外表面热点区域的初始温度梯度或稳定温升作为损伤指标,可以实现对局部疲劳损伤状态和疲劳性能参数的快速评定<sup>[7-10]</sup>,克服传统疲劳实验方法的一些局限性。

本工作基于定量热像法用有限根焊接构件评估其疲劳性能,并与传统结果相对比,建立一种新的线性损伤累积法则预测残余寿命,以期说明定量热像法在研究非均质焊接接头疲劳性能时的合理性、可靠性和优越性。最后通过实时监测构件表面局部热点区的变化,定性分析疲劳损伤过程,为后期宏、微观疲劳机理的研究铺设基础。

表 1 FV520B 不锈钢化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of stainless steel FV520B (mass fraction/%)

| Element     | C     | Si    | Mn    | P      | S     | Ni        | Cr        | Cu        | Nb        | Fe  |
|-------------|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|
| Base metal  | ≤0.07 | ≤1.00 | ≤1.00 | ≤0.035 | ≤0.03 | 3.00-5.00 | 15.5-17.5 | 3.00-5.00 | 0.15-0.45 | Bal |
| Welding rod | 0.02  | 0.30  | 0.50  | 0.016  | 0.007 | 6.2       | 12-13     |           | 0.20-0.30 | Bal |

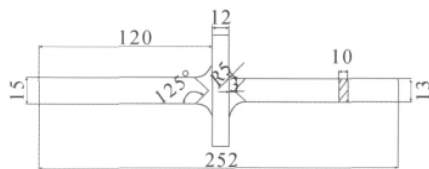


图 1 十字焊接接头几何尺寸

Fig. 1 Geometry and dimension of cruciform welded joints

## 1.2 实验方法

### 1.2.1 传统实验法

实验用 MTS810 伺服液压试验机,在室温环境中进行。考虑焊接接头的实际工况,即离心机叶轮在旋转工作时由于离心力的作用,受到的平均应力  $\sigma_m = 471\text{MPa}$  保持不变,这意味着每次实验的应力比是变化的,与之前的实验研究有很大不同。在单轴应力下采用力控制的模式,正弦交变载荷的频率  $f_1 = 18\text{Hz}$ 。实验之前利用细砂纸对所有焊接接头的棱角及焊趾局部区域进行打磨处理,以减小截面过渡和表面粗糙度导致的应力集中程度,随后在表面喷涂一层黑色亚光漆,提高表面热辐射率。疲劳实验中用红外热像仪对部分承载构件表面温度场的变化进行实时监测,用于对焊接接头损伤演化状态和疲劳参数的预测。红外相机的响应光谱范围为  $3 \sim 5\mu\text{m}$ ,空间分辨率为  $320 \times 240$  像素,热分辨率在  $25^\circ\text{C}$  时达到  $0.02^\circ\text{C}$ 。

## 1 实验材料、试件及实验方法

### 1.1 实验材料及试件

实验用材料是 FV520B 马氏体沉淀硬化不锈钢,经碱性电炉冶炼并经电渣重熔,其化学成分如表 1 所示。为了提高材料的机加工和焊接性能,焊接之前,将所需板材在  $(1050 \pm 10)^\circ\text{C}$  经  $1.5 \sim 2.5\text{h}$  的空冷固溶化处理,  $(850 \pm 10)^\circ\text{C}$  经  $1.5 \sim 2.5\text{h}$  中间调质处理油冷后,在  $(480 \pm 10)^\circ\text{C}$  经  $2 \sim 3\text{h}$  的空冷时效处理。由拉伸实验得到此时材料的极限强度为  $1309\text{MPa}$ ,塑性应变为  $0.2\%$  时所对应的屈服极限为  $1080\text{MPa}$ 。利用手工电弧焊技术进行焊接,焊缝过渡区采用圆弧过渡,提高焊接接头的疲劳强度,接头的几何形状如图 1 所示。焊后热处理围绕上述热处理工艺进行,以消除焊接残余应力对其力学性能的不利影响。

利用传统成组法确定焊接接头的 S-N 曲线和疲劳极限时,规定当循环次数超过  $5 \times 10^6$  时停止实验,更换试件在下一级应力水平进行<sup>[2]</sup>。由于疲劳实验结果本身具有较大的分散性,故每一级应力水平下要对足够多的试件进行实验,以合理地描述疲劳实验的特征。实验假设疲劳曲线在  $10^6$  以上时具有相同的形状,然后通过外推到  $2 \times 10^6$  获得相应的疲劳强度(Fatigue Class, Fat),并以  $5 \times 10^6$  处的应力水平为焊接接头的疲劳极限<sup>[9]</sup>。

### 1.2.2 定量热像法

#### 1.2.2.1 热像法

材料的疲劳损伤是能量耗散的过程<sup>[11]</sup>。当应力水平高于疲劳极限时,温度变化呈现出明显的 3 个阶段:初始温升阶段、温度相对稳定阶段和断裂前的快速温升阶段<sup>[8]</sup>。某些材料在低于其疲劳极限的交变载荷作用下,由于滞弹性效应和热噪声等非塑性效应,会引起微小的温升,但相比于与材料损伤状态相关的塑性耗散可以忽略。基于这种实验事实,Fargione 等<sup>[8]</sup>认为从物理意义上来说,使材料温升为零的最大交变应力即对应着材料的疲劳极限,随后提出极限能假设,建立了理论上只需有限根试件就能快速确定材料的整个 S-N 曲线的方法,缩短了实验周期,节省了实验费用。

Crupi<sup>[9,10]</sup>等借助红外热像技术通过实验研究和

理论推导证明:材料表面的稳定温升  $\Delta T_s$  与相应的应力范围平方  $\Delta\sigma_a^2$  之间具有如下关系:

$$\begin{cases} \Delta T_s = 0, \Delta\sigma_a < \Delta\sigma_0 \\ \Delta T_s = a\Delta\sigma_a^2 + b, \Delta\sigma_a > \Delta\sigma_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta\sigma_0$  为疲劳极限;  $a$  和  $b$  为材料常数。通过拟合  $(\Delta\sigma_a^2, \Delta T_s)$ , 并将所得回归直线外推至横轴即可快速确定材料的疲劳极限, 此时所对应的最大温升为零, 这就是快速确定疲劳极限的热像法。

本工作利用红外实验系统, 在平均应力  $\sigma_m = 471\text{MPa}$  的实际工况下, 采用阶梯式连续加载的方法<sup>[7,8]</sup>, 快速确定焊接接头的疲劳参数。为了减少实验过程中疲劳损伤的累积, 应力水平的施加由低到高。应力幅从  $60\text{MPa}$  开始, 在每一级应力水平下循环  $40000$  周次, 待试样表面温度场稳定后进行采样, 作为疲劳性能评估的热像数据。然后增加  $20\text{MPa}$  在下一级应力水平循环同样周次。如此顺序进行, 直到试件断裂为止。为了更好地应用热像法, 减小环境扰动、仪器灵敏度等带来的误差, 采用差分热像技术来计算试件表面热点区的稳定温升  $\Delta T_s$ , 即  $t$  时刻热像图  $\text{Image}(t)$  - 初始时刻的热像图  $\text{Image}(t_0)$ 。实验对三根试件采用同样的实验方式, 取温升结果的平均值, 以减少分散性和随机性带来的实验误差。

### 1.2.2.2 能量法

从能量累积的角度来看, 单位体积的材料疲劳破坏时所吸收的能量是一个与加载历程无关的常数, 那么当材料在交变载荷的持续作用下所耗散的能量达到临界门槛值  $E_c$  时就会发生疲劳失效<sup>[12]</sup>。临界门槛值  $E_c$  越大, 则材料疲劳极限就越大, 抗疲劳性能就越强。Fargione<sup>[8]</sup> 等证明, 材料在疲劳损伤演化过程中的极限能  $E_c$  与能量参数  $\phi$  之间存在如下的关系:

$$E_c \propto \phi = \int_0^{N_f} \Delta T(N) dN \quad (2)$$

式中:  $N_f$  为疲劳寿命。通常在疲劳失效的过程中, 温度稳定阶段占据了疲劳寿命的  $90\%$  左右, 故这里忽略温度变化的第 1 和 3 阶段, 则有:

$$\phi \approx \Delta T_s \cdot N_f \quad (3)$$

随后的实验中利用阶梯式连续加载方式, 通过记录多根试件的  $\Delta T$ - $N$  曲线获得材料的平均能量参数  $\phi$ 。同时也得到了不同应力范围  $\Delta\sigma_a$  下的稳定温升  $\Delta T_s$ , 由式(3)计算相应的疲劳寿命  $N_f = \phi / \Delta T_s$ , 由数组  $(N_f, \Delta\sigma_a)$  可拟合导出材料的整个 S-N 曲线。

### 1.2.2.3 能量损伤模型

能量参数  $\phi$  是一个材料常数<sup>[7-10]</sup>, 基于定量热像法和极限能理论<sup>[12-14]</sup>, 对同一根试件施加不同的交变

载荷, 记录并计算其表面的相对稳定温升  $\Delta T_s$ , 有:

$$\phi = \sum_{i=1}^k \Delta T_{si} \cdot N_i \quad (4)$$

式中:  $k$  为交变应力级数;  $\Delta T_{si}$  为应力范围  $\Delta\sigma_{ai}$  下试件表面热点区的稳定温升;  $N_i$  为  $\Delta\sigma_{ai}$  下的循环数。将式(4)两边同除以材料常数  $\phi$ , 就导出线性累积损伤理论的能量模型:

$$\sum_{i=1}^k \frac{\Delta T_{si} \cdot N_i}{\phi} = 1 \quad (5)$$

后面实验用式(5)对在三级应力水平下的焊接接头残余寿命进行了预测。

## 2 结果与讨论

通过对断口的观察分析发现: 大部分焊接接头的疲劳破坏发生在热影响区附近, 即焊缝与母材的交界处, 这主要是由于焊接工艺导致该区域的材料成分、组织和力学性能发生了较大的变化, 加之截面过渡引起应力集中, 使得疲劳微裂纹易于在位向有利的晶粒处萌生。个别试件断裂于十字交叉处, 由于未焊透和未熔合等焊接缺陷, 应力集中程度严重, 使疲劳裂纹萌生速度比热影响区更快。但是所有失效接头均具有典型的疲劳破坏的断口特征, 断面分为裂纹源、裂纹扩展区和瞬断区<sup>[15,16]</sup>。

### 2.1 传统实验结果分析

以概率为基础的统计分析方法是处理疲劳实验数据分散性和随机性的有效手段<sup>[17,18]</sup>。利用二元线性回归分析处理成组法实验数据, 得到了焊接接头在双对数坐标下存活率为  $50\%$  和  $97.7\%$  时的 S-N 曲线<sup>[7]</sup> 及相应循环周次时的疲劳强度 FAT 和疲劳极限  $\sigma_{fsn}$  (图 2)。其中应力范围  $\Delta\sigma$  为纵坐标, 疲劳寿命  $N_f$  为横坐标。可以发现: 两条存活率不同的 S-N 曲线具有相同的斜率  $m = 2.7138$ , 小于国际焊接学会的  $m = 3$  (应力比  $R = 0.5$ )<sup>[2]</sup>, 这是因为拉伸平均应力加快了微

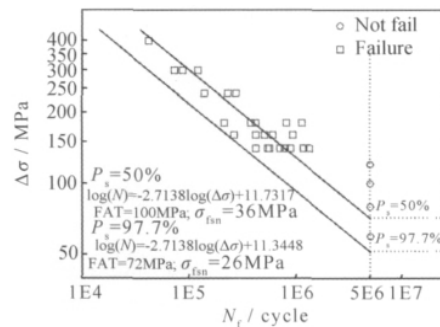


图 2 传统法得到的 S-N 曲线

Fig. 2 S-N curves by the traditional method

裂纹成核、萌生和主裂纹扩展的速度,使得疲劳寿命降低。由于对数疲劳寿命满足高斯分布,故两条  $S-N$  直线是平行的。接头存活率越高,则相应的疲劳强度和疲劳极限就会下降,可靠性及安全性就越高,但不利于焊接接头潜能的充分发挥。

## 2.2 定量热像法结果分析

### 2.2.1 疲劳性能参数的预测

图 3 是基于阶梯式连续加载的方式下一根试件表面热点区域稳定时的热像图,应力幅分别为 80, 100,

120MPa 和 140MPa。较大的温度变化主要是由疲劳损伤过程中的不可逆变化(塑性效应)引起的,塑性变形越大,温度升高就越大,损伤就越严重<sup>[19]</sup>。通过热像图发现在热影响区附近的温升明显高于其他区域,说明该处的损伤较严重,主要因为这里材料的物理力学性能较复杂,有明显的应力集中,易于疲劳微裂纹的成核、萌生、合并和扩展。定量热像法对交变载荷作用下构件表面热点演化过程的实时监测,可对疲劳过程中构件局部的损伤状态做出定性分析,防止疲劳事故的突然发生。

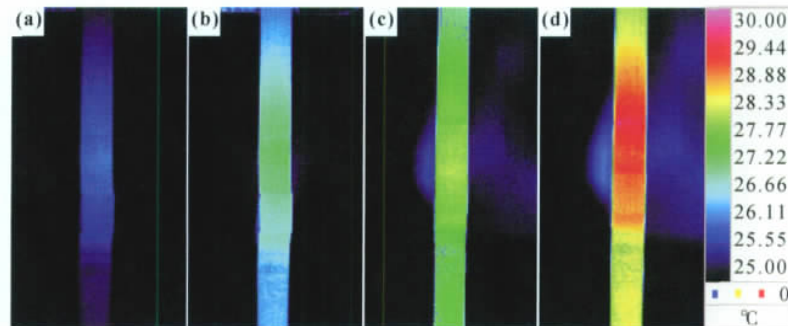


图 3 热点变化 (a)80MPa; (b)100MPa; (c)120MPa; (d)140MPa

Fig. 3 Hot-spot evolution (a)80MPa; (b)100MPa; (c)120MPa; (d)140MPa

基于上述红外热像图,利用 1.2.2.1 节中的差分热像法获得了三根试件在不同应力范围  $\Delta\sigma$  时的稳定温升  $\Delta T_s$ 。根据前述的定量热像法原理,通过最小二乘法拟合,可快速获得焊接接头的疲劳极限  $\sigma_{lim} = 33.5\text{MPa}$ ,如图 4 所示。

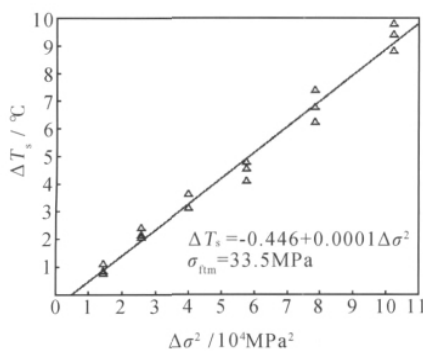


图 4 热像法的疲劳极限

Fig. 4 Fatigue limit by the thermographic method

图 5 是基于定量热像法,采用能量理论预测的焊接接头在双对数坐标下存活率为 50% 和 97.7% 时的  $S-N$  曲线及相应的疲劳强度和疲劳极限  $\sigma_{FEA}$ 。可以看到:两条回归直线中的材料常数与传统疲劳实验所确定的  $S-N$  曲线中的常数结果十分接近。在给定平均应力水平下,定量热像法综合考虑了构件局部应力状

态对构件疲劳损伤的影响,通过对热像数据分析,可实现疲劳寿命的预测,克服了传统实验方法的一些局限性,而且由图 5 中可知预测结果的分散性和随机性相对较小,稳定性更好。

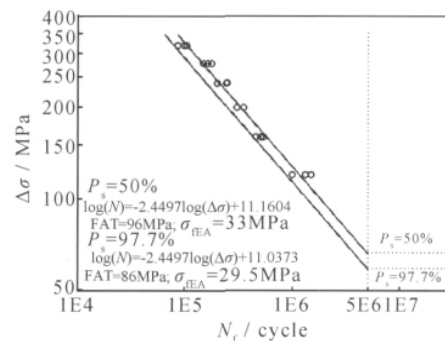


图 5 能量法得到的  $S-N$  曲线

Fig. 5  $S-N$  curves by energy approach

接头形状和尺寸的不一致,实验环境的偶尔变迁及系统有限的分辨率等因素导致了微小的误差,但误差均小于 10%,如表 2 所示。定量热像法仅利用三根构件在一天时间内就快速确定了其疲劳性能,且从数理统计学的角度来说预测的结果是较为准确的,在工程实际中具有良好的发展前景。

### 2.2.2 残余寿命预测

为了验证在 1.2.2.3 节中所建立的线性损伤能量

表 2 疲劳参数的比较 ( $P_s=50\%$ )  
Table 2 Comparison of fatigue parameters ( $P_s=50\%$ )

|                      | Fatigue limit | Error | Fatigue strength | Error |
|----------------------|---------------|-------|------------------|-------|
|                      | /MPa          | /%    | /MPa             | /%    |
| Traditional method   | 36.0          |       | 100              |       |
| Thermographic method | 33.5          | 6.9   |                  |       |
| Energy approach      | 33.0          | 8.3   | 96               | 4     |

模型在预测焊接构件残余疲劳寿命时的合理性和正确性,实验在保持平均应力水平  $\sigma_m=471\text{MPa}$  不变的条件下,预测一根焊接接头在三级应力水平下的残余寿命,并与真实结果进行对比。

首先,在应力幅为  $60\text{MPa}$  时,循环  $1.24\times10^5$  周次,利用红外热像仪监测记录实验过程中试样表面相对稳定的温升为  $1.29^\circ\text{C}$ ;然后在  $80\text{MPa}$  下,循环  $2.1\times10^5$  周次,其相对稳定温升为  $2.30^\circ\text{C}$ ,最后在  $100\text{MPa}$  下循环直至试件断裂,其相对稳定温升为  $3.17^\circ\text{C}$ 。通过传统疲劳实验方法对多根试件利用式(3)确定的平均能量参数  $\phi=1.057\text{E}6^\circ\text{C}\cdot\text{Cycle}$ ,则由式(5)计算得到接头的残余寿命为  $1.31\times10^5$  周次,而在  $100\text{MPa}$  下实际经历了  $1.23\times10^5$  周次,预测结果和真实结果之间的误差仅为  $6.5\%$ 。

3 结论

(1)以试件表面的稳定温升作为损伤指标,定量热像法不仅能预测均质材料的疲劳性能参数,而且能评估非均质焊接接头的疲劳参数。

(2)考虑焊接构件实际工况时,即在恒定平均应力、变应力比的条件下,定量热像法依然能快速准确地预测焊接接头的 S-N 曲线、疲劳极限和疲劳强度等性能参数。实验周期短,资源耗费少,平均拉应力的存在加速了微裂纹的萌生和扩展,降低了接头的疲劳寿命。

(3)疲劳过程中,交变载荷越大,试件表面稳定温升就越高,损伤程度就越严重。热影响区附近由于其复杂的物理力学性能,会优先形成疲劳热点区,利用热像法可实时监测该区的温度变化,定性分析损伤状态,为安全性评估提供形象直观的依据。

(4)施加平均应力时,能量参数  $\phi$  也是材料常数,由此建立的线性损伤能量模型,简单明了,能够较为准确地预测多级载荷作用下焊接接头的残余寿命。

参考文献

[1] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京:机械工业出版社,2000.

[2] International insititute of welding. Fatigue design of welded joints and components [M]. UK: Abington Publishing,1996.

[3] 杨新歧,张艳新,霍立兴,等. 焊接接头疲劳评定局部法研究现状[J]. 焊接学报,2003,24(3):82-86.

[4] 彭凡,姚云建,顾勇军. 热点应力法评定焊接接头疲劳强度的影响因素[J]. 焊接学报,2010,31(7):83-86.

[5] FRICKE W. Fatigue analysis of welded joints; state of development [J]. Marine Structure,2003,16(3):185-200.

[6] MADDOX S J. Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures [J]. International Journal of Fatigue, 2003,25(12):1359-1378.

[7] GUO X L, FAN J L, ZHAO Y G. Fatigue behavior analysis of cruciform welded joints by infrared thermographic method [J]. Advanced Materials Research,2011,197-198:1395-1399.

[8] FARGIONE G, GERACI A, LA ROSA G, et al. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method [J]. International Journal of Fatigue,2002,24(1):11-19.

[9] CRUPI V, GUGLIELMINO E, MAESTRO M, et al. Fatigue analysis of butt welded AH36 steel joints; thermographic method and design S-N curve [J]. Marine Structures,2009,22(3):373-386.

[10] CRUPI V. An unifying approach to assess the structural strength [J]. International Journal of Fatigue,2008,30(7):1150-1159.

[11] 刘浩,曾伟,丁桦,等. 利用红外热像技术快速确定材料疲劳极限[J]. 力学与实践,2007,29(4):36-40.

[12] KALETA J, BLOTNY R, HARIG H. Energy stored in a specimen under fatigue limit loading conditions [J]. Journal of Testing and Evaluation,1991,19(4):326-333.

[13] FAN J L, GUO X L, WU C W, et al. Research on fatigue behavior evaluation and fatigue fracture mechanisms of cruciform welded joints [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(29-30):8417-8427.

[14] LA ROSA G, RISITANO A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components [J]. International Journal of Fatigue,2000,22(1):65-73.

[15] 钟群鹏,赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.

[16] CHAN K S. Roles of microstructures in fatigue crack initiation [J]. International Journal of Fatigue,2010,32(9):1428-1447.

[17] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.

[18] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社,1986.

[19] UMMENHOFER T, MEDGENBERG J. On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints [J]. International Journal of Fatigue,2009,31(1):130-137.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11072045);国家“973”计划资助项目(2011CB706504)

收稿日期:2011-04-15;修订日期:2011-08-30

作者简介:樊俊铃(1985—),男,博士研究生,研究方向:材料性能、疲劳断裂性能与可靠性分析,联系地址:辽宁省大连理工大学运载工程与力学学部工程力学系(116023),E-mail: fanjunling@mail. dlut. edu. cn