

# 基于红外热象技术的金属材料疲劳性能研究方法<sup>\*</sup>

## FATIGUE CHARACTERISTICS EVALUATION OF METALS BASED ON INFRARED THERMOGRAPHIC TECHNIQUE

曾伟<sup>\*\*1</sup> 韩旭<sup>1</sup> 丁桦<sup>2</sup> 刘浩<sup>3</sup>

(1. 湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

(2. 中国科学院力学研究所 工程科学部, 北京 100080)

(3. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

ZENG Wei<sup>1</sup> HAN Xu<sup>1</sup> DING Hua<sup>2</sup> LIU Hao<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

(2. Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

(3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

**摘要** 金属材料的疲劳极限或疲劳寿命等性能是长寿命机械和结构抗疲劳设计的基本数据, 探讨效率高、成本低而又准确的试验新方法, 成为相关研究者十分感兴趣的课题。材料在循环载荷作用下产生的塑性变形经不断累积会引起疲劳破坏, 这个过程所耗的塑性功绝大部分以热量形式耗散, 因此寻找热耗散温度变化过程与疲劳极限及寿命之间的关系很有意义。就此问题, 文中引入利用先进的红外热象技术确定金属材料疲劳性能的试验研究方法, 主要从原理和试验方法两方面进行介绍, 并对 45 钢的试验过程和现象作较为详细地阐述, 得到较准确的疲劳极限值和基于红外热象技术确定疲劳寿命的重要参量  $M$ 。

**关键词** 金属疲劳 疲劳极限 寿命预测 红外热象技术 热耗散

**中图分类号** O346.2 TGI13.255

**Abstract** Fatigue characteristics is the basic data for designing long span machines and structures. However the fatigue characteristics evaluation using the conventional methods is time and cost consuming. Searching a novel fatigue testing method which can be more exact, efficient is attracting more and more researchers. The fracture of material under cyclic loading generally due to the accumulation of material plastic deformations, also, the plastic work is dissipated mainly in the heat energy. Therefore it is significant to find the relationship between temperature change of heat dissipation and the fatigue characteristics, such as fatigue limit and fatigue life. A novel fatigue testing method is presented based on the infrared thermographic technique by measuring the temperature change on the surface of specimens. The main principles and test process of this method has been outlined, as an example, the process and phenomenon of the 45 steel experiment using the infrared thermographic technique are reported in detail. It has been shown that the fatigue limit with high reliability and the important parameter "  $M$  " of fatigue life have been obtained.

**Key words** Fatigue of metals; Fatigue limit; Life prediction; Infrared thermographic technique; Heat dissipation

Corresponding author: ZENG Wei, E-mail: csweige88@26.com, Tel: +86-731-8828460, Fax: +86-731-8822051

The project supported by the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of China (No. 531105050037).

Manuscript received 20061204, in revised form 20070111.

## 1 引言

疲劳是在实验基础上发展起来的一门学科, 疲劳研究的试验方法很多, 从不同的角度分类也不一样。如

对于测定金属材料疲劳性能的试验, 按其断裂寿命和应力高低不同, 可分为, 低周疲劳试验, 常采用轴向或径向应变控制的方法, 研究低周疲劳从裂纹萌生与扩展, 主要有 SEM(scanning electron microscope) 原位

<sup>\*</sup> 20061204 收到初稿, 20070111 收到修改稿。教育部长江学者与创新团队发展计划资助(531105050037)。

<sup>\*\*</sup> 曾伟, 男, 1981 年 11 月生, 湖南邵阳人, 汉族。硕士研究生, 主要研究方向为材料疲劳及结构优化。通信地址: 湖南长沙岳麓山, 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 402。

疲劳试验<sup>[1-2]</sup>等。高周疲劳试验<sup>[3]88-91</sup>,包括多幅测定法、成组试验法、升降法、增幅试验等。超高周疲劳试验,主要有超声疲劳试验技术<sup>[4]</sup>。纵观这些试验方法,不少都历时长、耗费大,如确定  $S-N$  曲线的成组试验法,通常需要在每级(至少 3~4 级)应力水平下使用一组(一般 6~10 个)试样,测定疲劳极限的多幅测定法(试样至少 50 个)或升降法(试样要求 13 个以上,一般为 30 个,试验时间较长<sup>[3]89-90</sup>)。因此,在满足能够比较准确地确定材料的疲劳强度、寿命等性能的情况下,探讨缩短试验时间、减少试验成本的试验新方法,成为相关研究者十分感兴趣的课题;对于疲劳试样太昂贵或者材料供应受到限制的情况则更是如此,特别是长寿命的疲劳试验。

能量方法是疲劳研究的重要方法之一,金属材料的疲劳是一个耗散能量的过程,而温度变化则是研究疲劳过程能量耗散极为重要的参量<sup>[5]</sup>。红外热成像技术是一种波长转换技术,即将目标的热辐射转换为可见光的技术,利用目标自身各部分热辐射的差异获取二维可视图象,用计算机图象处理技术和红外测温标定技术,实现对物体表面温度场分布的显示、分析和精确测量<sup>[6]</sup>。作为一种非接触、实时、全场的无损检测手段,红外热成像技术已经在电力、钢铁、航天、建筑、石化、医学等行业里得到广泛应用。在疲劳研究中,过去由于测量精度等问题,红外仪器作为非接触测量手段应用于早期实验研究中并没有取得很大成就。但是近年来,由于制造水平的极大提高,与计算机等工具配合使用后实时、直观等优点,除了在结构和部件完整性评价应用以外,不少研究人员也将其应用于材料疲劳破坏研究之中。上世纪 80 年代以来,在疲劳与断裂研究领域里应用红外技术,国外已经取得不少试验成果,如法国国家科学研究中心(The French National Center for Scientific Research, C. N. R. S)力学与声学实验室研制的整套红外热象测试技术,得到有关疲劳裂纹尖端应力和能量耗散的重要分析结果,借助于热弹性耦合,能测出应力张量的一阶不变量<sup>[7]</sup>。A. Risitano 等人提出确定材料疲劳极限的 Risitano 法<sup>[8]65-73</sup>,M. P. Luong 指出尽管在试验载荷对应应力水平低于疲劳极限时,材料疲劳破坏过程中的热量耗散很少,却也不能忽略<sup>[9]160-161</sup>,并测定了一个 XC55 钢试样和一个连杆的疲劳极限。国内黄毅等根据疲劳过程不同阶段的热图,由弹塑性有限元建立温度场与应变场的关系,确定了利用热图测量金属变形的方<sup>[10]</sup>,并将红外热象技术应用于压力容器疲劳损伤的无损检测,对几百支宇航用薄壁压力容器在打压考核过程中进行热弹性红外图象安全评估<sup>[11]</sup>。童小燕等<sup>[12]</sup>通过红外热象仪监测不同的控制循环应变水平下试样在低周疲劳过程中的温升变

化规律,并确定试样表面的温度分布与循环数、控制应变水平的关系。本文就如何通过红外热象技术确定材料疲劳极限及初步分析疲劳寿命作一些探讨。

## 2 红外技术确定疲劳特性的原理

### 2.1 疲劳极限的确定

材料在循环载荷作用下,一些区域产生塑性变形、逐渐萌生和发展微(细)观裂纹,其演化过程是一个远平衡态不可逆热力学相容或耦合的能量耗散过程,其中绝大部分能量以热的形式耗散<sup>[13]</sup>,热量通过对流、辐射的方式与外界发生交换,同时由于热传导的作用,材料本身形成温度场。因此,温度作为材料疲劳破坏过程中一个重要的物理表征量,微观上可以通过研究材料疲劳过程中的热响应——温度变化规律研究疲劳破坏过程中的物理、材料状态变化,了解和解释疲劳的基本现象;宏观流变学上可以从试验与理论两方面寻找温度变化、塑性功与应力之间的合理关系,以求能对疲劳强度和寿命作出较好的估计。

一般认为,没有外部热源作用时,材料在疲劳破坏过程中的温度变化主要受热弹性响应、塑性响应和热传导三方面的影响。其中热弹性响应表现为在弹性范围内,当应力(或应变)增大时温度降低,当应力(或应变)减小时温度升高。即据 Biot 公式描述,在绝热条件下

$$T_e = T - T_0 = -KT \frac{E}{1-2\nu} \epsilon_i = -KT \sigma_i \quad (1)$$

式中, $K$ 是材料常数, $T_e$ 为温度 $T$ 时的热弹性温度变化, $T$ 为 $t$ 时刻温度, $T_0$ 为初始时温度, $\epsilon_i$ 和 $\sigma_i$ 分别表示主应变和主应力的增量, $\nu$ 为泊松比, $E$ 为弹性模量。循环载荷作用下,材料温度在每个循环内都会出现这种波动现象,但这种周期性温度波动并不会影响材料的平均温度,且试验表明,单个循环内的温度波动幅度很小(用做压力容器的 SA553B112 钢被试验证明不超过 0.5<sup>[14]</sup>)。

热弹性响应将材料的温度变化与材料弹性范围内的应力—应变状态联系起来,材料疲劳过程中的塑性响应,则将温度变化与材料塑性变形(塑性功)联系起来,它和热传导作用共同主导疲劳破坏过程中材料表现的平均温度的变化。那么,试验中这种温度变化与材料表现的宏观疲劳性能特征之间的关系是怎样的呢?

研究人员<sup>[8]67[15]</sup>从大量的实验中(笔者曾对 Q235 钢和 45 钢做过试验,亦证实了规律)发现,在疲劳机制中塑性功占主导地位的情况下,若加载频率一定,当载荷对应的应力水平低于材料相应的疲劳耐久极限。时,材料表现的宏观温度变化不太明显;当高于。时其温度变化出现三个特征明显的阶段(见图 1,  $T_i$  为

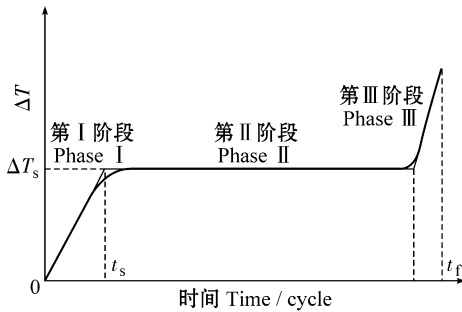


图1 疲劳试验过程中试样表面温升变化示意图  
Fig. 1 Schematic of temperature changes in specimen surface during a fatigue test

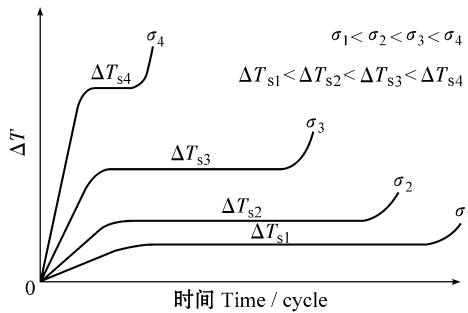


图2 不同载荷作用下试样表面温升变化示意图  
Fig. 2 Schematic of temperature changes in specimen surface under fatigue loading at different applied stresses

实验过程中试样表面最高温度  $T_f$  和加载初的始温  $T_0$  之差)。

第一阶段(Phase I)——初始温升阶段。在此阶段试样与环境的温差较小,对流过程中的热量损失较少,大部分热量耗散用于提高试样的温度,试样表面温度上升较快,直至温度稳定。其温度上升的时间与破坏时的循环周次相比,只占整个疲劳寿命很小的一部分。通常,在应力不接近屈服强度的时候,它在试样整个寿命中占有的比例不会超过 10%。

第二阶段(Phase II)——温度稳定阶段。这一阶段中由于试样的热量耗散同它与环境的热量交换大致相当,因此温度变化相对缓慢,温度值趋于稳定,其稳定时间的长短则因载荷不同而变化很大。当施加的载荷对应的应力水平高于疲劳极限时,越大,达到稳定阶段时所需时间  $t_s$  越短而温度越高,即第一阶段温度上升的速率  $\dot{T}$  和第二阶段的稳定温度值  $T_s$  相应越大;但当应力接近材料屈服强度时,温度稳定阶段的时间非常有限或者几乎没有(图 2)。

第三阶段(Phase III)——温度快速升高阶段。这一阶段时试样中裂纹进入扩展阶段,由于裂尖的能量快速释放<sup>[16]</sup>,导致试样表面温度在很短时间内快速上升,直至试样发生破坏。

实验还发现,在载荷对应的  $\sigma$  高于疲劳极限  $\sigma_f$  作用下,材料疲劳破坏过程中初始阶段(即 Phase I)温

升速率(或称梯度)  $\dot{T}$ 、温度稳定阶段(即 Phase II)的温度值  $T_s$  均与载荷(对应  $\sigma$ ) 大小有近似的线性关系。那么,材料的疲劳极限可以通过绘制不同应力水平下温度稳定阶段的温升值(或第一阶段温升梯度)与应力之间的变化曲线确定,疲劳极限应力就是曲线与横轴(载荷对应的  $\sigma$ ) 的交点,此法为“单线法”(one curve method, OCM)。

M. P. Luong<sup>[9]160</sup> 在对 XC55 钢做相关试验时发现,在应力水平略低于疲劳极限  $\sigma_f$  时,试样表面有超过 0.5 的温升。因此,对于有粘性效应的材料或其他情况,由于产热机制的多元化,疲劳极限的确定将不再按无初始温升的临界点,而是温升规律发生变化的转折点,表现在  $T-\sigma$  图中是两线的交点(图 7),此法为“双线法”(two curves method, TCM)。

## 2.2 疲劳寿命的确定

从能量观点看,任何材料的破坏都需要一定的能量,疲劳破坏时可以用材料在这个过程中释放的热量衡量,而具体到用热象法确定材料  $S-N$  曲线的方法中,可以定义温升对周次的积分  $M = \int_0^{N_f} T dN$  作为参数。若疲劳破坏所耗总塑性功是一定的,则理论上不论加载级数如何,对于同一类试件,不考虑材料本身、加工制造等条件所致的分散性时,在相同的试验情况下  $M$  是一定值。这样,通过测量不同载荷作用下材料温度变化值  $T_i$ ,经过简单的推导可以获得材料的疲劳寿命,也就确定了材料的  $S-N$  曲线。需要指出的是,只有在应力高于材料疲劳极限而又不接近屈服极限的范围内,材料在循环加载过程中才有这三个特征明显的温度变化阶段<sup>[17]</sup>,这时才能比较准确地确定出  $M$  值。

进一步,从图 3 中看出,  $M$  实际上是温升—时间(周次)曲线末端作  $N$  轴的垂线后,垂线、曲线、横轴所围图形面积,则对于每级试验时间稍超过  $t_s$  的多级加载,基于 Miner 累计损伤法则,  $M$  能由下式计算得出

$$M = \sum_{i=1}^n \left[ T_{si} N_{si} / 2 + T_{si} (N_{ei} - N_{si}) \right]$$

其中,  $T_{si}$  表示第  $i$  级载荷下试样表面温度达到稳定阶段时的温度,  $N_{si}$  表示第  $i$  级载荷下试验至温度稳定阶段出现时的周次数,  $N_{ei}$  表示第  $i$  级载荷下试验时的周次总数,  $n$  为总的加载级数。

考虑到试验不可避免的分散性,可以通过做一定量试验取得  $M$  的平均值  $M_{mean}$ ,作为确定材料某一类试件疲劳寿命的基本参量,通过测量不同载荷作用下试样表面温度稳定阶段时的温升值  $T_{si}$ ,经过简单计算即可获得材料相应应力水平下的疲劳寿命,即作出材料的  $S-N$  曲线。

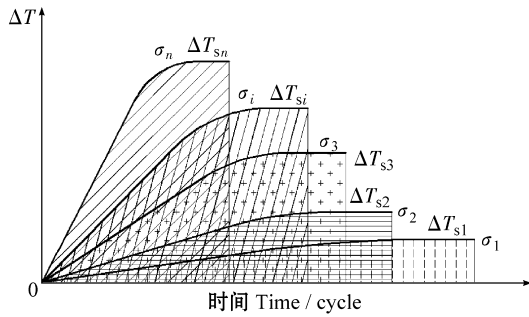


图 3 确定疲劳寿命参量  $M$  的示意图

Fig. 3 Schematic illustration of determining the parameter  $M$  of fatigue life



图 4 试验中的 45 钢试样热象图

Fig. 4 Thermogram of a 45 steel specimen in experiment

### 3 试验系统

试验用材料是表面镀锌、850 °C 正火处理的 45 钢,其化学成分及力学性能参数见表 1,为增大金属表面的比辐射率,试验时在试样表面涂上很薄的一层红外透射涂料(图 4)。试样按疲劳试验机的正规板样要求及红外热象测试需要设计,符合国家标准<sup>[18]</sup>《金属轴向疲劳试验方法》(GB 3075—82),尺寸形式如图 5 所示。

试验在力创 100 kN 高频疲劳试验机(PLG-100)上进行,红外热象仪型号为 ThermalCAM<sup>TM</sup> E65(精度:低

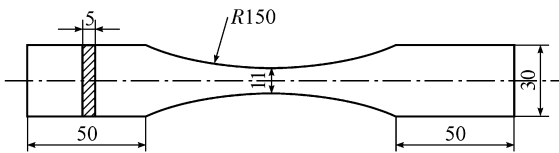


图 5 45 钢试样的尺寸(mm)

Fig. 5 Geometrical characteristics of the 45 steel specimens(dimensions in mm)

表 1 正火 45 钢的化学成分及力学性能参数<sup>[19]</sup>

Tab. 1 Chemical composition and mechanical properties of normalized 45 steel

化学成分	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
Chemical composition (质量分数)	0.44	0.66	0.28	0.014	0.02	0.25	0.25
Mass fraction (%)							
力学性能参数	$E$ /GPa	$b$ /MPa	$s$ /MPa	$s_0$	$s_1$	$s_2$	$s_3$
Mechanical properties	190	610	370	28.4	64		

于 100 时为 0.1);加载频率和应力比  $R$  等试验参数见表 2。

### 4 试验结果分析

#### 4.1 试验结果描述

不同载荷( )下试样表面温升最大值随时间(周次)变化曲线见图 6;考虑多元产热机制,多点拟合确定疲劳极限见图 7。

#### 4.2 结果分析

单、双线两种处理方法以及它们与常规试验所得疲劳极限( )值的比较列于表 2 中。

从试验结果可以看出,红外热象法试验得到的材料疲劳极限,不论是双线法还是单线法,均与常规的升降法所得结果相差不大,比较而言,对于 45 钢双线法相差更小。对于确定疲劳寿命的重要参量  $M$ ,从两组试验(9ime-06、9ime-08)值的比较中看到,加载级数、大小均不相同(见图 6a、图 6b)的情况, $M$  值相差不大(6.0%),可以认为是常量;但是,对于其他材料以及不同类型试件, $M$  值是否还是常量,有待通过更多试验证实。

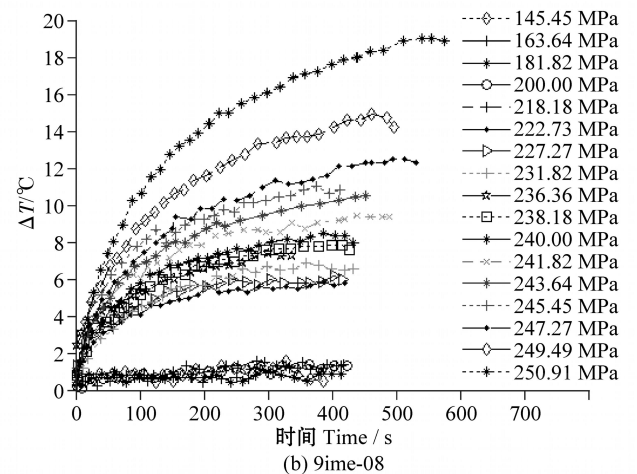
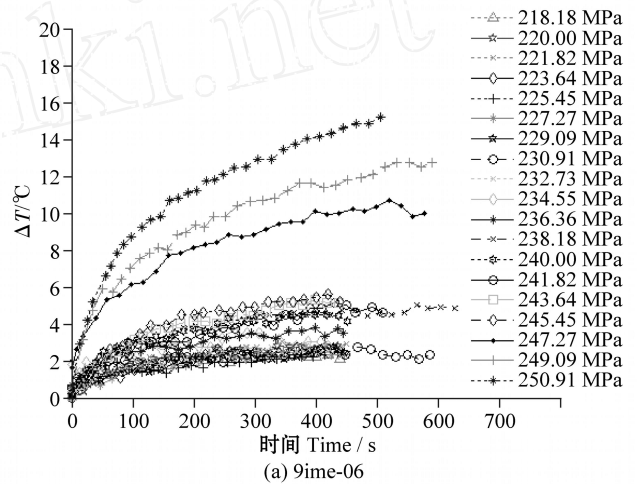


图 6 不同载荷下 45 钢试样表面温升最大值变化曲线

Fig. 6 The curve of maximum temperature increments in 45 steel specimen surface under fatigue loading at different applied stresses

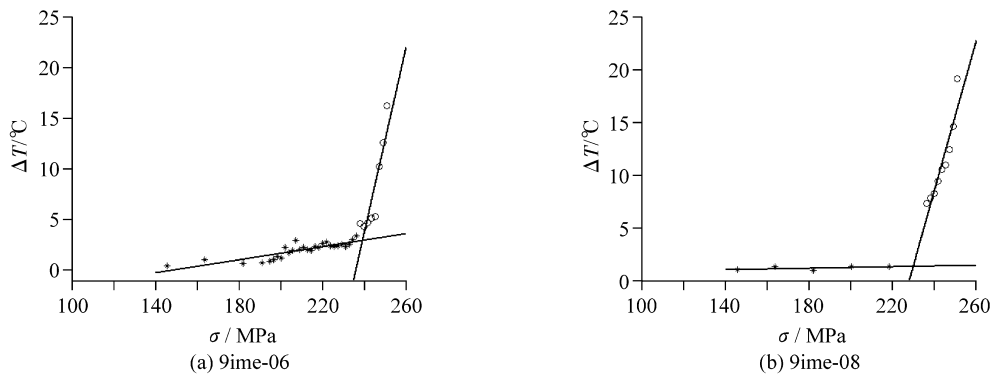


图7 确定45钢疲劳极限的拟合曲线

Fig. 7 Graphical determination of the fatigue limit of 45 steel

表2 单/双线热象法处理结果及与常规方法所得疲劳极限的比较

Tab. 2 Comparison between the thermographic (one curve / two curves) method and the conventional method

试样编组 Specimens	加载频率 Load frequency Hz	应力比 Stress ratio $R$	$M$	升降法 Up and down method $\sigma_c^0$ /MPa	单线法疲劳极限 Fatigue limit obtained by OCM		双线法疲劳极限 Fatigue limit obtained by TCM	
					$\sigma_c^1$ /MPa	差异 Difference (%)	$\sigma_c^2$ /MPa	差异 Difference (%)
9ime-05	137.2	-1	-	241	247	2.5	250	3.7
9ime-06	136.6	-1	$3.062 \times 10^6$	241	236	-2.1	239	-0.8
9ime-08	141.4	-1	$3.259 \times 10^6$	241	228	-5.4	230	-4.6

## 5 结语及展望

基于红外热象技术的金属材料疲劳性能研究方法通过定量测量试样在交变载荷下的温度变化,只需少量的试样试验即可快速、准确地确定材料的疲劳极限等性能,同时,红外仪器可以实时、直观地观测到构件可能发生疲劳破坏的危险断面。本文具体介绍利用红外测温试验确定正火45钢的疲劳极限,以及应用该法确定疲劳寿命的重要参量 $M$ 。尽管给出的数据是针对一种具体材料的,但文中所述的原理、方法和得到的主要结论会有普遍意义。

此外,可以看到,试验中利用红外热象仪器观测试样表面温度变化分析和确定材料疲劳性能,具有一些常规方法所不具备的许多优点,这一方法技术上已经成熟,但尚未见形成一定的系统或规范,下一步工作可考虑以下方面:

1) 由于材料疲劳裂纹的萌生、破坏是在一个小区域内(对应图4中试样中心小截面区域),其具体位置和数量不可预知,那么,取区域内温升均值或许会更能表征和预测疲劳极限和寿命。

2) 对于有粘性效应的材料或其他情况,考虑产热机制的多元化,材料在低于疲劳极限时的温度变化规律所体现的耗散能量 $W_c$ ,应该可以找到它与塑性功 $W_p$ 之间的变化关系,如各自对 $\sigma$ 的变率,二者是否存在

在线性关系。

3) 确定疲劳寿命的重要参量 $M$ 得出后,通过测量不同载荷作用下材料达到温度稳定阶段的温升值 $T_s$ ,确定材料的 $S-N$ 曲线的下一步工作还需细化。

4) 在疲劳机制中塑性功占绝对主导地位条件下的疲劳分析系统基础上,针对不同材料、不同载荷特性和工作环境进行一定的试验数据积累,形成数据库,并在此基础上建立考虑多元产热机制的疲劳分析系统,对产热机制中各个特征量进行刻画,最终形成红外热象技术确定金属材料疲劳性能的系统标准。

### 致谢

中科院力学所的阚常珍老师参与了本文部分试验,此外,试验时与柳春图老师的讨论也使作者受益匪浅,在此一并表示感谢。

### 参考文献 (References)

- [1] 肖林,白菊丽. Zr-4合金单调和循环变形结构的扫描电镜原位观察[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 26(5): 526-533.  
XIAO Lin, BAI JuLi. In situ SEM observation of monotonic and cyclic deformed structure in Zircaloy-4[J]. Raremetal Materials and Engineering, 1999, 28(2): 97-100 (In Chinese).
- [2] 钟群鹏,赵子华,张峥. 断口学的发展及微观断裂机理研究[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 358-370.  
ZHONG QunPeng, ZHAO ZiHua, ZHANG Zheng. Development of "Fractography" and research of fracture micromechanism[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(3): 358-370 (In Chinese).

- [3] 曾春华, 邹十践. 疲劳分析方法及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 88-91.  
ZENG ChunHua, ZOU ShiJian. Analysis methodology and application of fatigue[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991: 88-91 (In Chinese).
- [4] 周承恩, 谢季佳, 洪友士. 超高周疲劳研究现状及展望[J]. 机械强度, 2004, 26(5): 526-533.  
ZHOU ChengEn, XIE JiJia, HONG YouShi. Retrospect and prospect of very high cycle fatigue [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(5): 526-533 (In Chinese).
- [5] 童小燕, 姚磊江, 吕胜利. 疲劳能量方法研究回顾[J]. 机械强度, 2004, 26(S): 216-221.  
TONG XiaoYan, YAO LeiJiang, LV ShengLi. Review on fatigue energy theory[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(S): 216-221 (In Chinese).
- [6] 赵红怡, 王景中, 曾凡峰. 红外热成像在线测温系统的研究及其应用[J]. 基础自动化, 1998, 2: 45-47.  
ZHAO HongYi, WANG JingZhong, ZENG FanFeng. The research and application of infrared thermovision on-line temperature-measuring system [J]. Basic Automation, 1998, 2: 45-47 (In Chinese).
- [7] Bouc R, Nayrols B. 固体红外热像测试方法和结果[J]. 力学进展, 1987, 17: 551-557.  
Bouc R, Nayrols B. A method & the result for the infrared thermographic of solid [J]. Advances In Mechanics, 1987, 17: 551-557 (In Chinese).
- [8] Rosa GLa, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 22: 65-73.
- [9] Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique[J]. Mechanics of Materials, 1998, 28: 155-163.
- [10] Huang Y, Lin X, Xu J. Thermographic study on fatigue fracture of metals[J]. Acta Metall, 1988, 24(3): B207-213.
- [11] 黄毅. 热弹性红外图像安全检测系统[J]. 中国科学院院刊, 2003(3): 202-205.  
Huang Y. Thermoelastic infrared image safe testing system[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2003(3): 202-205 (In Chinese).
- [12] 童小燕, 王德俊, 徐灏. 低周疲劳损伤过程的自热温升变化特征[J]. 金属学报, 1991, 27(2): A149-A152.  
TONG XiaoYan, WANG DeJun, XU Hao. Infrared detection of self-heating process during low cycle fatigue damage [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1991, 27(2): A149-A152 (In Chinese).
- [13] 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 关于疲劳能量理论若干问题的讨论[J]. 机械强度, 2004, 26(S): 278-281.  
YAO LeiJiang, TONG XiaoYan, LV ShengLi. Discussion on several questions about the fatigue energy theory [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(S): 278-281 (In Chinese).
- [14] Yang B, Liaw P K, Wang H, et al. Thermographic investigation of the fatigue behavior of reactor pressure vessel steels[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A314: 131-139.
- [15] Liaw P K, Wang H, Jiang L, et al. Thermographic detection of the fatigue damage of pressure vessel steels at 1 000 Hz and 20 Hz[J]. Scripta Materialia, 2000, 42: 389-395.
- [16] Griffith A A. The phenomena of rupture and flow in solids[M]. London: Philosophical Transactions of the Royal Society, 1921, A221: 163-197.
- [17] Fargione G, Geraci A, Rosa GLa, et al. Rapid determination of the fatigue curve by thermographic method [J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 11-19.
- [18] 冶金部钢铁研究总院. GB 3075—82 金属轴向疲劳试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1982: 119-130.  
Center Research Institute of Steel, Ministry of Metallurgy of the People's Republic of China. GB 3075—82 Method of axial force controlled fatigue testing of metals[S]. Beijing: Standards Press of China, 1982: 119-130 (In Chinese).
- [19] 王雷, 王德俊. 疲劳损伤过程的计算机仿真[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2001, 22(6): 678-681.  
WANG Lei, WANG DeJun. Computer simulation study of fatigue life [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2001, 22(6): 678-681 (In Chinese).