

疲劳热像法研究综述

郭杏林[†] 王晓钢

大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024

摘 要 能量方法是疲劳研究的重要方法, 新兴的红外热像技术则是实现这一方法的重要手段. 红外热像法作为一种无损、实时及非接触的测试技术, 已被广泛地应用于疲劳研究中. 近年来, 提出了一些用于快速确定材料及构件疲劳极限的热像法, 并得到了很好地开发与推广. 文中介绍了疲劳热像法的兴起、发展与深入研究, 讨论了该领域出现的主要问题及当前的研究热点, 并展望了疲劳热像法的研究前景.

关键词 疲劳, 疲劳极限, 热像法, 能量耗散, 疲劳损伤

1 引言

疲劳与断裂是引起工程结构与构件失效的最主要的原因. 19 世纪中叶以来, 人们为认识和控制疲劳破坏进行了不懈的努力, 在疲劳现象的观察、疲劳机理的研究、疲劳寿命的预测和抗疲劳设计技术的发展等方面积累了丰富的知识. 疲劳理论得到了不断地发展, 并出现了多个分支, 其中疲劳能量方法是疲劳学科的一个重要的研究方向.

能量理论很早就被应用于疲劳研究中^[1], 经过 100 多年的发展, 能量方法已成为一种重要的疲劳研究方法, 为人们从热力学角度来解释疲劳现象提供了重要依据. 疲劳能量方法的研究经历了从机械能耗阶段到能量耗散阶段的发展过程^[2], 研究手段也从单纯的力学方法发展至以热力学方法为核心的多学科交叉研究手段. 近年来, 随着人们对疲劳问题认识的不断深入, 基于能量耗散的疲劳研究取得了很大进展.

疲劳是一个能量耗散的过程. 这里所说的能量包括了储能与热耗散, 其中储能是材料内部缺陷与损伤状态的体现, 可通过材料微观结构的变化来描述, 但其大小则需要借助材料的热耗散间接获得^[3]. 疲劳热像法即借助于红外热像仪等测试手段, 通过记录试件在循环应力作用下的热像数据, 并结合相关理论进行分析, 进而估算出材料

或构件的疲劳特性. 简而言之, 疲劳热像法即将热像法应用于疲劳研究中.

近年来, 疲劳热像法引起了学术界的广泛关注, 欧洲及北美的众多高校与科研机构纷纷展开了对该领域的研究工作. 这些努力在最近 10 年取得了显著的成果, 疲劳热像法的潜能得到了很好地开发, 并引起了力学、材料、物理、机械等相关学科的交叉, 为更加深刻地揭示疲劳机理提供了全新的思路与方法.

2 疲劳热像法的兴起^[4]

疲劳是一门实验学科, 疲劳试验是疲劳理论建立与发展的重要基础. 通过疲劳试验, 可以得到材料或构件的疲劳极限、断裂韧性等重要的疲劳指标. 然而, 传统的疲劳试验方法却存在试验周期长、成本高、数据离散等不足, 这些都为准确获取材料或构件的疲劳特性带来了一定的困难. 近年来, 无损检测技术被应用于疲劳研究中, 如预测材料或构件的疲劳寿命, 进行结构完整性评估及疲劳失效的预防等. 常见的无损检测技术主要有超声检测、射线检测、涡流检测、磁粉检测及渗透检测等. 红外热像法作为一种新兴的无损检测技术, 也被广泛地应用于工程领域, 并开始成为一种重要的疲劳研究手段.

收稿日期: 2008-01-21, 修回日期: 2008-10-27

[†] E-mail: xlguo@dlut.edu.cn

红外热像法是一种实时、全局、及非接触的无损检测技术,用来记录观测对象的温度变化.红外热像技术最初被用在军事领域,通过热像仪来观察敌人的夜间活动,后来这项技术也被应用于临床医学中.随着人们对材料力学行为与温度变化之间关系认识的不断深入,热像技术开始被应用于科学研究与工程实践中,并发展成为一种重要的无损检测技术.

1853年, Kelvin^[5] 阐述了温度变化与材料变形之间的关系,提出了著名的热弹性效应.该理论在20世纪50年代得到了 Biot^[6], Rocca 与 Bever^[7] 等人的改进与发展,已形成较完善的理论体系. Dillon 与 Kratochvil^[8,9] 将温度变化与材料内部的应力应变状态联系在一起,提出热塑性效应,并用于解释材料及构件的疲劳断裂行为.1956年, Belgen 提出用于测量温度变化的红外辐射测量技术,即通常所说的红外热像技术.该技术通过测量固体材料表面的红外辐射,进而计算出材料在应力应变作用下的温度变化.但由于当时技术水平的限制,该类仪器的热灵敏度比较低,还不能达到科学研究与工程应用的要求.

20世纪60年代,疲劳能量方法主要集中在热塑性效应的研究,许多学者都尝试在循环滞回能与材料低周疲劳之间建立关系,而当时闭路电动液压实验系统的建立为精确测量疲劳过程中所消耗的应变能提供了可能.许多基于应变能耗的疲劳损伤模型被提出^[10~12],这些模型的共同特点是:以某种形式的应变能表征疲劳损伤,当这种形式的应变能积累到某个极限值时,材料将发生破坏.而一些研究发现^[13~16],疲劳过程中所消耗的应变能与加载状态有关,并不能直接与疲劳损伤之间建立某种关系.于是人们开始关注于疲劳过程中的能量耗散现象,尝试从非平衡热力学的角度重新认识疲劳问题^[17].

20世纪80年代,伴随着光机电技术与信号处理技术的高速发展,红外热像技术得到了极大的提升.先进的红外热像系统的温度分辨率可达 10^{-3} °C,空间分辨率可达 10^{-3} mm,进而大大提高了热像数据的精确度.随着高精度红外摄像机的普及,人们开始借助于红外热像技术研究疲劳过程中的热耗散. Reifsnider 与 Williams^[18] 通过红外热像仪记录了含缺陷的复合材料板在循环加载过程中的温度变化,进而研究了热耗散与循环滞回

能之间的关系.而另一些研究则表明^[19]:热像法作为一种无损检测技术,在疲劳裂纹扩展的研究中具有很大的应用价值.

一些学者也通过热电偶^[20],热敏电阻^[21~23]等测试手段研究了疲劳过程中的热耗散.相比于这些方法,红外热像法显然具有实时、全局及非接触等优点.而且,先进的红外测试系统通常还配置了应力测试的功能,这就为分析局部区域内的应力-热响应提供了便捷.

3 疲劳热像法的发展

20世纪90年代前后,一些疲劳极限快测法的相继问世,极大地提升了疲劳热像法的应用价值.根据该方法,通过采用红外热像技术,最少只需1根试件,花1天时间便可准确测定材料或构件的疲劳极限.

3.1 Risitano 法

Curti 等人^[24]最早提出了一种快速确定材料疲劳极限的热像法,该方法后来被命名为 Risitano 法. La Rosa 与 Risitano 在文献^[25]中对 Risitano 法进行了详细的阐述.

对于许多材料尤其是金属材料,当加载的应力幅高于材料的疲劳极限时,试件表面温度通常都会经历3个变化阶段:阶段 I 为初始温升阶段;阶段 II 为温度稳定阶段;阶段 III 为快速温升阶段.如果应力幅在疲劳极限之下,则很难观察到温度变化.通过采取应力水平逐级升高的加载方式,将阶段 II 的稳定温升值与相应的应力幅值一一对应起来,绘制应力-温升图,见图 1^[25].在该图中,通常都能观察到一个现象,即当应力幅值达到一定水平时,温升就会发生陡增,而此前的温升值几乎为零.将温升突变出现后的离散点经线性拟合成一条直线,该直线与应力横轴的交点即对应着材料的疲劳极限.

在高于材料疲劳极限的常幅载荷作用下,材料表面温升往往很快就能达到一个稳定值,即前述的阶段 II.所以 Risitano 法显然具有快速的特点,是一种疲劳极限快测法. Risitano 总结了其15年来利用 Risitano 法所得到的共计23次试验数据,每次试验都与传统疲劳试验方法(如阶梯法)进行了对比,误差基本控制在10%以内,平均误差仅为4.7%.测试对象包括了金属材料、玻璃纤维、连杆

及对接焊缝 [25].

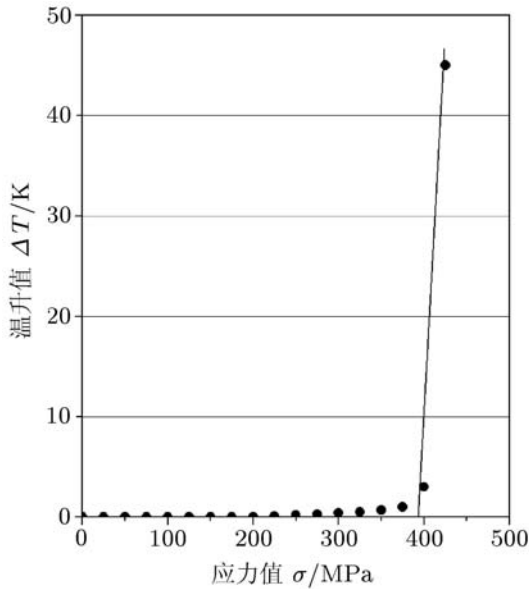


图 1 使用 Risitano 法确定疲劳极限

Fargione 等人 [26] 进一步发展了 Risitano 法, 将 Risitano 法从单纯测定材料或构件的疲劳极限扩展至绘制其 S-N 曲线. Fargione 首先提出了极限能量的概念, 认为材料的储能是有容限的, 当疲劳损伤积累到某一极限值时, 材料将会发生破坏. 然后将耗散能作为表征储能的指标, 并认为两者之间存在着正比关系, 那么对于统一规格的试件, 材料在疲劳过程中所释放的耗散能也将是一个常量. 在这样的假设下, Fargione 提出了几个经验公式, 通过材料表面的温升值与循环周次构建的函数来表征这个热耗散总量. 通过这样的经验公式, 就可由应力 - 温升关系换算出应力 - 循环周次关系, 即而得到材料的 S-N 曲线.

最近, Crupi 等人 [27] 将 Risitano 法推广至焊接结构的疲劳研究中, 并与有限元分析方法进行了比较. 研究表明, Risitano 法不仅快速准确, 且并不需要事先获取一些材料参数. 该文还通过试验发现, 由于红外热像法只能获取材料表面的温升数据, 对于材料内部存在热源的情况, 就不能直接利用热像数据, 而需要进行更深入的分析. 所以, 目前热像法主要适用于疲劳破坏发生在试件表面的情况, 并不能很好地预测由内部缺陷所导致的疲劳失效.

3.2 Luong 法

Luong 法由 Luong [28~31] 提出, 是继 Risitano

法之后的又一种疲劳极限快测法, 也是目前比较流行的方法.

由热力学第一定律、热力学第二定律及材料的本构方程, 可推演出材料在疲劳过程中的热力学耦合方程

$$\rho C_v \dot{T} = r_0 + K \nabla^2 T - (\beta : \overset{4}{D} : \dot{E}^e) T + S : \dot{E}^I \quad (1)$$

其中 ρ 为材料密度, C_v 为等体比热容, T 为试件表面的温度, \dot{T} 为试件表面的温度变化率, r_0 为热源, K 为热传导率, β 为线膨胀系数矩阵, $\overset{4}{D}$ 为 4 阶弹性张量, S 为二阶应力张量, \dot{E}^e 为弹性应变张量, \dot{E}^I 为非弹性应变张量.

从公式 (1) 中可以看出, 引起试件表面温度变化的原因有 4 个, 他们分别是: 热源、热传导、热弹性源及固有耗散源. 他们的含义或作用分别为: 热源表示由于一些内部或外界因素所引起的热噪声. 热传导将改变试件表面的温度场, 使其趋于均匀分布. 热弹性源是由材料的弹性效应所引起的可逆的热力学现象. 固有耗散源是由材料的非弹性效应所引起的不可逆的热力学现象, 它所产生的能量绝大部分会以热耗散的形式释放出去.

根据先前一些学者 [32~35] 关于循环荷载、塑性应变与疲劳损伤的相关论述, Luong 认为材料的能量耗散与疲劳损伤之间存在着密切联系, 可以通过材料的固有耗散率来表征其疲劳损伤状态. 由于材料的固有耗散率无法直接获取, Luong 用固有耗散效应所引起的温升值, 即材料在疲劳中的不可逆力学行为所引起的温度变化来对其进行表征. Luong 研究了金属在逐级加载过程中的耗散现象, 发现即便在较低的载荷下, 也会存在能量耗散, 而当载荷加到一定水平时, 材料的固有耗散率就会发生突变, 进而引起温度的骤增. Luong 认为导致材料固有耗散率突变的应力幅即对应着材料的疲劳极限, 并给出一种几何方法, 用以直接确定其疲劳极限, 见图 2 [28]. 图 2 描述的是一根金属连杆的应力 - 温度曲线, 横坐标表示施加的应力幅值, 纵坐标表示由固有耗散所引起的温度变化. 图中可以发现一个明显的拐点, 将拐点前后的离散点分别进行线性拟合, 两条拟合直线的交点即对应着材料的疲劳极限. 单从最终获取疲劳极限的几何方法上讲, Risitano 法被称为一线拟合法, 而 Luong 法被称为二线拟合法.

相比于 Risitano 法, Luong 法从生热机理上进

行了较深入的分析, 将固有耗散率作为疲劳评估指标, 进而排除了可逆的热弹性效应, 只考虑由不可逆力学行为所引起的固有耗散效应. 而且通过实验作出了更为细致的观察, 所提出的“拐点”现象具有重要的科学价值.

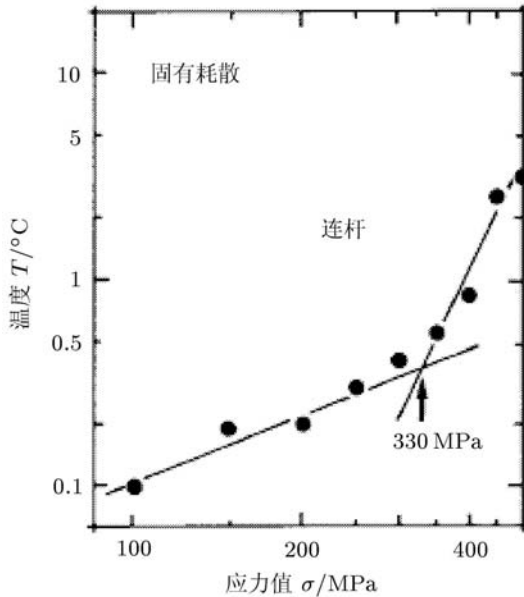


图 2 使用 Luong 法确定疲劳极限

国内一些学者已开展对该方向的实验与机理研究工作. 刘浩等人^[36~38]通过试验快速测定了 Q235 钢、45 钢的疲劳极限, 并从生热机理的角度上进行了分析. 刘浩认为 Luong 图中拐点的出现是由于温升机制的转变, 并认为只有疲劳损伤机制 (如塑性累计) 会使得温升机制出现转折, 而非损伤机制 (如黏性效应) 不会导致温升机制的转折. 文中还对现有的热像法进行了改进, 提出将塑性能耗的起点定义为材料疲劳极限的新方法.

3.3 锁相热成像技术

锁相热成像技术 (lock-in thermography technology) 作为一种新兴的红外热像技术, 可用于评估材料或构件在周期、随机及瞬变载荷下的应力. Brémond 与 Potet^[39]提出了与锁相热成像技术相配套的数据处理模式 D-MODE, 用于逐个循环地提取疲劳试验中材料的耗散效应. 该方法是伴随着红外热像仪的高精密度的发展而提出来的, 它需要二维的红外焦平面摄像机的锁相热成像技术与先进的数据处理手段, 才能够将耗散效应从热弹性源中分离出来^[40].

Krapez 等人^[41~43]利用锁相热成像技术测

试了多种合金材料的疲劳特性, 并研究了基于 D-MODE 下的疲劳极限评估方法.

在 D-MODE 下, 给出模式温度 $T_{\text{mod}}(t)$ 的表达式

$$T_{\text{mod}}(t) = T_0 + \Delta T f t + T_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) \quad (2)$$

式中 $f = \omega/2\pi$ 为加载频率, T_0 是试件表面的初始温度, ΔT 是每次循环加载所引起的平均温升值, T_1 与 φ_1 对应着频率为 f 的傅立叶成分的幅值与相位, T_2 与 φ_2 对应着频率为 $2f$ 的傅立叶成分的幅值与相位.

根据热弹性理论, T_1 是由热弹性效应所引起的温升幅值, 那么 T_1 的理论计算值

$$T_1 = \frac{\alpha T_0}{\rho C_p} \sigma_a \quad (3)$$

式中 α 为线膨胀系数, ρ 为材料密度, C_p 为等压比热容, σ_a 为应力幅值. 由于耗散效应, T_1 的实测值往往大于其理论值, 即试验中会出现频率为 f 的耗散噪声.

上述模式温度 $T_{\text{mod}}(t)$ 中的 6 个参数都可由锁相红外系统测得, 其中 3 个参数可作为评估材料疲劳极限的指标, 它们分别是 ΔT 、 T_1 与 T_2 . 先前的许多研究都是利用平均温升 ΔT 来评估材料疲劳极限的, 而试验发现^[42], 对于一些金属材料, 以 ΔT 作为评判指标, 可能会导致疲劳极限快测法的失效, 即在应力-温升图中无法观察到明显的拐点, 而以 T_1 作为评判指标则更加准确、可靠. 在应力-温升图中, 频率为 f 的耗散噪声的骤增可视为温升机制的转变, 可在图中直接获取材料的疲劳极限.

可以看出, 与前述 Luong 法不同的是, 锁相热像法并不是将耗散效应作为一个整体进行考虑的, 而是通过数据处理手段, 只考虑热弹性源中的耗散效应, 将热弹性效应所引起温度变化的实测值相对于其理论值的漂移值作为疲劳评估指标. 该方法的提出具有一定的创新性, 经大量试验表明^[41~43], 通过采用锁相热成像技术可以很好地提高疲劳极限快测法的准确度与可靠性.

4 疲劳热像法的深入研究

虽然热像法具有实时、无损及非接触等优点,

并经试验验证, 被认为是一种快速准确的疲劳测试方法, 但目前在学术界还存在着一些分歧与争议, 就某些问题还未能达成共识. 近年来, 许多学者就相关问题展开了深入的研究, 疲劳热像法的潜能也得到了更好地开发.

4.1 热像数据处理

在使用热像法时, 通常所采集的温度数据是试件上某个区域内的平均温度, 并直接将其用于估算材料的疲劳极限. 一些学者认为这种做法并不合理, 可能会导致一些可疑的结果^[44]. 因为试件表面的温度变化不仅取决于热源的强度与分布, 还与热传导以及热边界条件有关. 因此, 试件表面的温度数据并不能完全反映材料所固有的耗散特性. 一些学者建议通过建立特殊的热传导模型对引起温度变化的热源、热传导因素及热边界条件进行分析, 并在此模型的基础上, 由试件表面的温度变化计算出各部分热源所产生的热量, 进而得到与疲劳损伤相关的能量部分. Chrysochoos 与他的团队在该方向上做了大量的研究工作.

Chrysochoos 等人^[45,46] 假设疲劳试验可以在微扰假说下的准静态过程框架内描述, 且不可逆过程的典型热力学概念与结果可用于构建局部热力耦合方程. 在这样的热力学框架内, 每单位体积材料的平衡状态可由一组 n 个状态变量表征. 所选择的状态变量是绝对温度 T 、应变张量 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 以及用于表征材料微观组织状态的内部变量 $\boldsymbol{\alpha}$ 的 $n-2$ 个标量成分 $(\alpha_1, \dots, \alpha_{n-2})$. 在此框架下, 热力学势能设为赫尔姆霍茨 (Helmholtz) 自由能 Ψ . 通过热力学第一定律与热力学第二定律的结合, 得到金属材料在疲劳破坏过程中热力耦合的局部热态方程

$$\begin{aligned} \rho C \dot{T} - \operatorname{div}(\mathbf{k} : \operatorname{grad} T) &= (\boldsymbol{\sigma} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}) : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \\ &\rho \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\alpha}} \cdot \dot{\boldsymbol{\alpha}} + \rho T \frac{\partial^2 \Psi}{\partial T \partial \boldsymbol{\varepsilon}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \\ &\rho T \frac{\partial^2 \Psi}{\partial T \partial \boldsymbol{\alpha}} \cdot \dot{\boldsymbol{\alpha}} + r_e \end{aligned} \quad (4)$$

方程式的左边项是描述温度的微分算子, 右边项则表示不同类型的热源. ρ 代表材料质量密度, C 是材料比热, \mathbf{k} 是热传导张量, $\boldsymbol{\sigma}$ 是柯西应力张量. 不同的热源依次是

固有耗散源 d_1

$$d_1 = \left(\boldsymbol{\sigma} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\varepsilon}} \right) : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \rho \frac{\partial \Psi}{\partial \boldsymbol{\alpha}} \cdot \dot{\boldsymbol{\alpha}} \quad (5)$$

热弹性源 S_{the}

$$S_{\text{the}} = \rho T \frac{\partial^2 \Psi}{\partial T \partial \boldsymbol{\varepsilon}} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \quad (6)$$

内耦合源 S_{ic}

$$S_{\text{ic}} = \rho T \frac{\partial^2 \Psi}{\partial T \partial \boldsymbol{\alpha}} \cdot \dot{\boldsymbol{\alpha}} \quad (7)$$

以及外热源 r_e .

在一系列假设条件下, 可对一维热传导问题进行如下简化

$$\rho C \left(\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau_{\text{eq}}} \right) \approx S \quad (8)$$

这里, $\theta = T - T_0$ 表示试件中心一小块区域内的温度变化, $S = S_{\text{the}} + d_1$ 代表热弹性效应与耗散效应的总和, τ_{eq} 表示试件边界的热损失量.

根据热弹性理论, 可计算热弹性源引起的温度变化 θ_{the} , 将其从总的温升 θ 中分离出去, 就可以得到固有耗散源所引起的温升值 θ_d . 实现这一点还需要借助于锁相热成像系统, 该技术可以保证获取到准确的热弹性源, 而上述方法也正是锁相热像法进行疲劳评估的理论依据. 固有耗散源所引起的温升值 θ_d 与材料的耗散效应及疲劳损伤机制密切相关, 可用于进行材料或构件的疲劳评估.

通过试验发现, 在较高应力水平下的初始循环阶段, 热耗散从高位骤然下降, 然后便趋于稳定. 而在试件表面出现局部应力集中后, 热耗散又会有显著的上升. Chrysochoos 认为该现象不易从材料特性的角度进行解释, 而与热源在疲劳过程中分布的非均匀性有关. 测量区域的温度变化显然会受到应力集中区热源的影响, 尤其在试件表面已形成疲劳裂纹后, 见图 3^[46]. 热传导方程 (8) 是在疲劳过程遵循均质性的假设下提出的, 显然该假设条件是不能成立的. 那么这就需要通过建立一个合适的一维或二维热传导模型展开进一步的分析.

Morabito 与 Berthel 等人^[47~49] 通过一维与二维热传导模型, 分别对铝合金及钢材的热弹性效应与耗散效应进行了较深入的研究. 试验证实了材料在疲劳过程中的非均质性, 应力与应变分布的非均匀性导致了热源分布的非均匀性. 采用热传导模型进行数值分析, 发现热弹性效应总是可以得到很好的验证, 而耗散效应则要取决于耗

散量的大小与材料的热传导率. 材料的耗散量不仅取决于材料的固有耗散特征, 同时也与作用的应力水平有关. 许多情况下, 热传导模型均显示出了良好的适用性. 但对于固有耗散率低, 而热传导率相对较高的情况, 这将导致较低的信噪比, 因而无法给出令人信服的结果. 鉴于此, 锁相热像法已成功获取多种钢材的疲劳极限, 而对于一些固有耗散率较低的金属材料 (如铝合金), 目前还存在一定的困难.

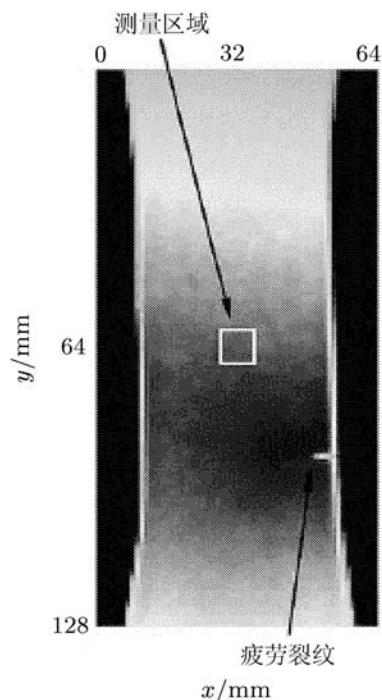


图 3 疲劳裂纹形成后的热像图

疲劳过程中的热耗散现象往往与材料本身物理性质的改变相联系. 在一些静力或准静力的实验研究中, 上述方法已被成功用于跟踪某些局部区域的演化状况, 如应力集中区^[50,51]、相变区^[52]、吕德斯带扩展^[53]及微塑性变形^[54]等.

4.2 疲劳损伤评估

在循环载荷作用下, 不可逆的宏观或局部微观塑性变形及内部缺陷会引起能量耗散, 使得部分滞回能以热交换形式耗散掉. 疲劳损伤的能量定义通常都采用循环滞回能作为参量, 一些学者尝试通过疲劳损伤过程中的热像分析, 寻找循环滞回能与热耗散之间的联系.

童小燕与姚磊江等人^[55~59]通过建立疲劳损伤的能耗结构, 并在试验的基础上, 系统地研究了循环过程及循环内的疲劳损伤热能耗散变化规律.

研究表明: 热能耗散参量对疲劳损伤的循环与状态特征以及材料微观显微结构变化都有很强的描述能力, 能够反映材料的疲劳损伤特征.

Yang 等人^[60]在对反应堆压力容器的疲劳研究中, 将产生及影响热源的强度与分布的因素归为 3 类: 热弹性效应、热塑性效应及热传导条件. 在低周疲劳研究中, 将由塑性应变能计算出的温升数据与红外热像仪采集到的温升数据进行对比, 发现两条温升曲线是基本吻合的, 可见塑性变形是低周疲劳的主要原因. 在此研究的基础上, Jiang 等人^[61]提出了一种用于预测材料低周疲劳寿命的热像法. 将塑性应变能作为疲劳损伤指标, 可先根据热耗散数据估算材料在疲劳过程中所消耗的应变能, 然后利用 Coffin-Manson 方程估算材料的低周疲劳寿命.

Rösner 等人^[62,63]对钛合金无损伤试件与预疲劳试件进行了对比实验, 发现两者的塑性效应是很接近的, 而耗散效应却表现出显著的差异性. 试验发现: 在特定的载荷下, 当循环周次接近钛合金低周疲劳寿命的一半时, 预疲劳试件出现了很大的热量耗散, 约为无损伤试件的 17 倍. 这些能量可能来自于微塑性应变等原因, 与钛合金在疲劳过程中的亚显微结构、显微结构的变化紧密相连.

最近, 一些学者对疲劳过程中的能量耗散与微观结构变化的相关性展开了研究.

Yang 等人^[64]利用热像法观察了矩形试件在低周疲劳中的吕德斯带扩展过程. 发现当试件表面出现局部应力集中时, 热源分布将变得很不均匀, 并出现局部化的特征. 为得到准确的热像数据, 这时应考虑热传导因素的影响, 将原始的热像图转化为热耗率图. 该文通过一个二维热传导方程将热像图转化为热耗率图

$$Q = \rho C_p \frac{T(t+dt) - T(t)}{dt} - k \left[\frac{T(x+dx) + T(x-dx) - 2T(x)}{dx^2} + \frac{T(y+dy) + T(y-dy) - 2T(y)}{dy^2} \right] \quad (9)$$

这里, Q 表示热耗散率, 单位为 J/m^3s .

由方程 (9), 热像图可转化为热耗散率图, 见图 4^[64]. 其中图 4(a)、(b) 是原始的热像图与温度

在试件标距内沿中线的分布, 图 4(c)、(d) 是转化后的热耗散率图与热耗散率在试件标距内沿中线的分布. 可以看出, 转化后的热耗散率图在消除了热传导因素的影响后, 可以更加清晰地显示出吕

德斯带的位置. 该方法可以用于吕德斯带演化状况的定性描述与定量分析, 可计算出吕德斯带的扩展速率等. 上述方法在冶金与材料学中已得到很好的应用 [65~69].

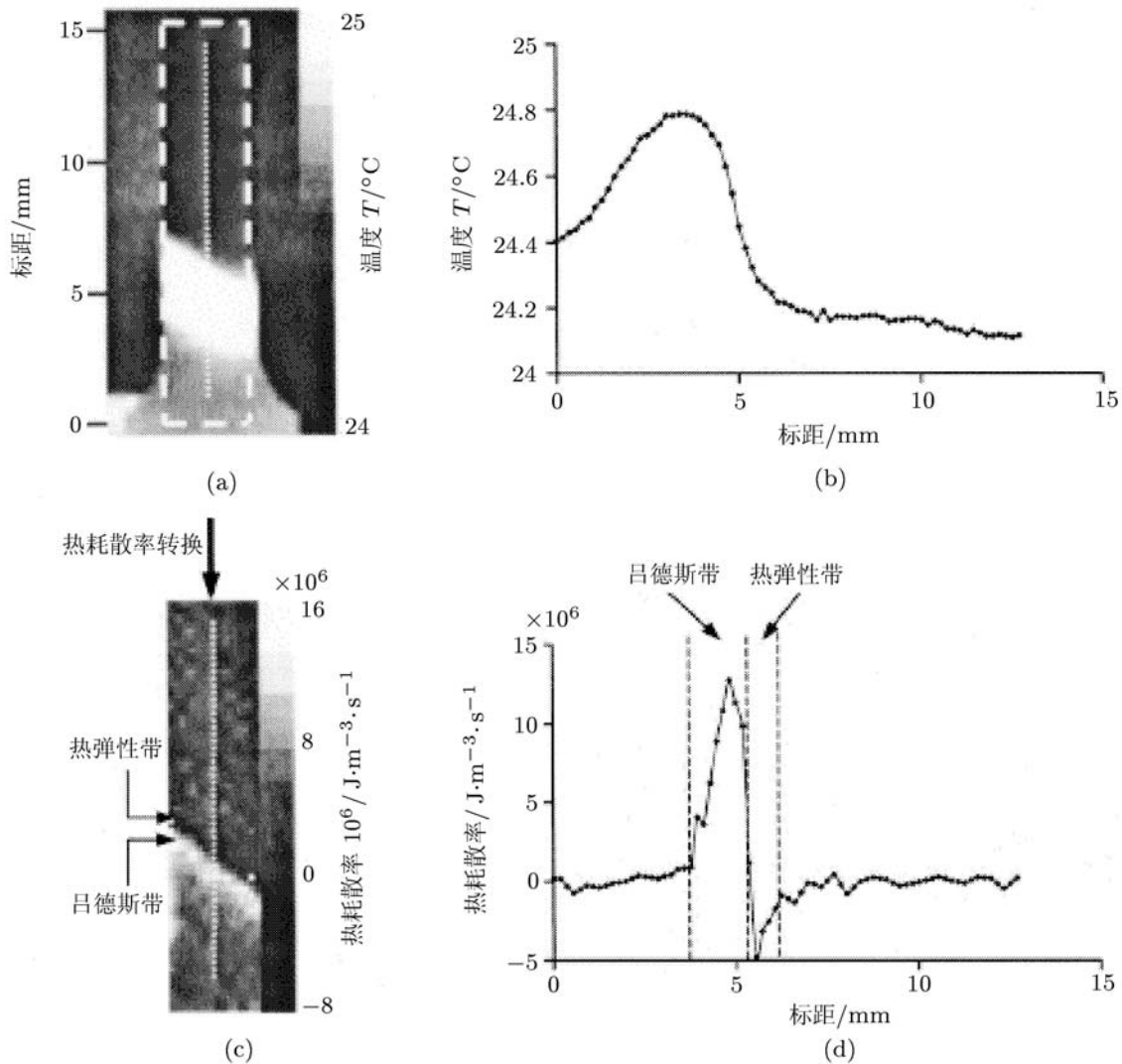


图 4 热像图转化为热耗散率图

姚磊江等人 [70~72] 同时使用红外热像仪与远距离高倍显微镜对纯铜低周疲劳试验过程进行了观察. 对于纯铜光滑试件与缺口试件, 均发现表面温度变化与微观形貌演化之间存在着密切的关联性. 红外热像图能够清晰地反映塑性应变集中区域、裂纹萌生和扩展等过程, 与表面形貌的显微图像具有一致性. 结合热像图, 该文采用“挤入挤出”模型对疲劳损伤演化过程与试件表面温度变化特征进行了解释, 并指出在热耗散与显微结构演化之间进行定量描述将是未来研究工作的重点.

最近, Chrysochoos 等人 [73] 采用数字图像相关 (digital image correlation) 与红外热像法相结合的方法对钢材的疲劳过程进行了研究. 利用数字图像相关技术与红外热像法可分别计算出材料表面各个点处的应变能与热耗散量. 将每个点处的应变能减去其热耗率量就可以得到该点处储能的大小, 进而用于材料的疲劳评估. 该方法不同于传统测量循环滞回能的方法, 而是基于材料疲劳过程的非均质性而提出的一种新方法, 因此具有很好的研究前景与科学价值.

研究能量耗散与疲劳损伤及材料微观结构演化之间的关系,有助于从热力学角度来重新认识疲劳现象,进而更加深刻地揭示金属疲劳机理,同时这也为金属材料学的研究提供了崭新的实验与分析手段。

4.3 疲劳极限快测法的改进

目前,疲劳极限快测法还未能形成统一的使用规范。一方面,加载状态、测试条件及信号处理方法等都会影响到所采集的热像数据;另一方面,如何对热像数据进行处理,进而评估材料或构件的疲劳特性,尚没有建立统一的方法或模型。

红外摄像机的热灵敏性、空间分辨率等技术指标对测试精度的影响是显而易见的,尤其当采用锁相技术时,这种影响会变得更为显著。此外,一些学者发现加载状态对耗散现象会有显著的影响,尤其是加载频率,它的取值将会直接影响到试件与外界的热交换。Boulanger 等人^[46]在试验中观察到试件在疲劳过程中的热耗散与加载频率近似地呈线性关系。

一些学者在运用疲劳极限快测法时,都直接采用了由实验测得的热像数据,而没有对数据进行预处理,即考虑热传导等因素对实验结果的影响。如何考虑热传导等因素的影响,进而采用合适的数值模型进行数据处理,显然会影响到最终结果。

在使用二线拟合法时,对于一些温升机制转变并不是很明显的情况,在应力-温升图中就很难找到一个所谓的拐点,这可能导致结果的不确定性。最近,Curà 等人^[74]提出一种迭代算法,采用该方法不仅可以保证评估结果的唯一性,而且通过与传统疲劳实验的对比,发现其准确度也较前述两种方法有所提高。Crupi^[75,76]同样对Risitano 法进行了一些改进。

随着研究的深入,疲劳热像法同时得到了很好地推广应用。目前,疲劳热像法已被应用于裂纹扩展^[77~81]、多轴疲劳^[82]及复合材料^[83,84]等研究领域,并很好的结合了有限元分析^[85]、超声波探伤^[86,87]等技术。

5 结束语

本文着重阐述了疲劳热像法的兴起、发展与深入研究,讨论了该领域出现的主要问题及当前

的研究热点。经过 30 多年的发展,疲劳热像法已取得了长足的进步,成为疲劳研究中最活跃、最为活跃的领域之一。虽然该方法目前还存在着这样或那样的不足,但疲劳热像法作为一种疲劳测试方法,它所同时具备的快速、无损、实时及非接触等诸多优点却是其他方法所无可比拟的。

疲劳热像法已经被用于确定金属材料或结构的疲劳极限、疲劳寿命及 S-N 曲线,其快速、准确的特点得到了大量试验的验证。然而,疲劳热像法的潜能还远没有得到充分挖掘。

疲劳热像法借助于先进的红外测试技术,并基于疲劳能量理论,通过研究材料在疲劳过程中的能量耗散特征,在微观的显微结构与宏观的疲劳行为之间搭建了桥梁,为更加深刻地揭示疲劳机理提供了强有力的研究手段。

参考文献

- 1 Bell J. The Experimental Foundations of Solid Mechanics. New York: Springer-Verlag, 1973. 42~107
- 2 童小燕,姚磊江,吕胜利. 疲劳能量方法研究回顾. 机械强度, 2004, 26(S): 216~221
- 3 李娜,童小燕,姚磊江. 纯铜低周疲劳中的温度响应与微观形貌变化. 材料科学与工程学报, 2006, 24(5): 754~757
- 4 Yang B, Liaw P K, Wang H, et al. Thermography: a new nondestructive evaluation method in fatigue damage. *JOM-e*, <http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0301/Yang/Yang-0301.html>, 2003-01
- 5 Todhunter I, Pearson K. A History of the Theory of Elasticity and of the Strength of Materials. Cambridge: Cambridge University Press, 1886. 291~364
- 6 Biot M A. Thermoelasticity and irreversible thermodynamics. *Journal of Applied Physics*, 1956, 27: 240~253
- 7 Rocca R, Bever M B. The thermoelastic effect in iron and nickel as a function of temperature. *Transaction of the American Institute of Mechanical Engineers*, 1950, 188: 327~333
- 8 Dillon O W. Coupled thermoplasticity. *Journal of Mechanics and Physics in Solids*, 1963, 11: 21~23
- 9 Kratochvil J, Dillon O W. 9 Kratochvil J, Dillon O W. Thermodynamics of elastic-plastic materials as a theory with internal state variables. *Journal of Applied Physics*, 1969, 40 (8): 3207~3218
- 10 Esin A, Jones W J D. A theory of fatigue based on the microstructural accumulation of strain energy. *Nuclear Engineering and Design*, 1966, 6(4): 292~299
- 11 Chang C S, Pimbley W T, Conway H D. An analysis of metal fatigue based on hysteresis energy. *Experimental Mechanics*, 1968, 8(3): 133~140
- 12 童小燕,杨庆雄,孙秦等. 拉平均应变对循环非弹性响应的影响. 西北工业大学学报, 1992, 10(4): 441~447

- 13 Halford G R. The energy required for fatigue. *Journal of Materials*, 1966, 1(1): 3~16
- 14 Lefebvre D, Ellyin F. Cyclic response and inelastic strain energy in low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 1984, 6(1): 9~16
- 15 Tong X Y, Wang D J, Xu H. Investigation of cyclic energy in fatigue failure process. *International Journal of Fatigue*, 1989, 11(5): 353~358
- 16 Tong X Y, Wang D J, Xu H. Cyclic hysteresis energy of carbon and alloy steels. *Acta Metallurgica A*, 1990, 3(1): 123~126
- 17 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 关于疲劳能量理论若干问题的讨论. *机械强度*, 2004, 26(S): 278~281
- 18 Reifsnider K L, Williams R S. Determination of fatigue related heat emission in composite materials. *Experimental Mechanics*, 1974, 14(12): 479~485
- 19 Charles J A, Appl F J, Francis J E. Using the scanning infrared camera in experimental fatigue studies. *Experimental Mechanics*, 1975, 14(4): 133~138
- 20 Woodward R L, Baxter B J, Pattie S D, et al. Direct measurement of temperature in high speed torsion test. *Journal of Engineering Materials and Technology* (Trans ASME), 1987, 109(2): 140~145
- 21 Gross T S, Weertman J. Calorimetric measurement of the plastic work of fatigue crack propagation in 4140 steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1982, 13(12): 2165~2172
- 22 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 低周疲劳过程中的非弹性响应和热响应. *西北工业大学学报*, 2003, 21(1): 83~86
- 23 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 金属低周疲劳的能量耗散与热发射. *机械科学与技术*, 2003, 22(5): 799~801
- 24 Curti G, La Rosa G, Orlando M, et al. Analisi tramite infrarosso termico della temperatura limite in prove di fatica. In: Proceedings of the 14th Conference on the Italian Society for Stress Analysis, 1986-09-23~27, Catania, 1986. 211~220
- 25 La Rosa G, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22: 65~73
- 26 Fargione G, Geraci A, La Rosa G, et al. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method. *International Journal of Fatigue*, 2002, 24: 11~19
- 27 Crupi V, Guglielmino E, Risitano A, et al. Different methods of fatigue assessment of T welded joints used in ship structures. *Journal of Ship Research*, 2007, 51(2): 150~159
- 28 Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. *Nuclear Engineering and Design*, 1995, 158: 363~376
- 29 Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique. *Mechanics of Materials*, 1998, 28: 155~163
- 30 Luong M P. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock. *Engineering Fracture Mechanics*, 1990, 35: 291~301
- 31 Luong M P. Introducing infrared thermography in soil dynamics. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 49: 306~311
- 32 Irwin G R. Fracture. In: Flügge S, ed. *Encyclopedia of Physics*. New York: Springer-Verlag, 1958. 1~551
- 33 Morrow J D. Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals. In: *Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1965. 45~87
- 34 Mroz Z, Raniecki B. On the uniqueness problem in coupled thermoplasticity. *International Journal of Engineering Science*, 1976, 14(2): 211~221
- 35 Ellyin F, Kujawski D. Plastic strain energy in fatigue failure. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1984, 106(4): 342~347
- 36 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. *力学与实践*, 2007, 29(4): 36~39
- 37 刘浩, 赵军, 丁桦. 疲劳过程中生热机理的实验探讨. *实验力学*, 2008, 23(1): 1~8
- 38 曾伟, 韩旭, 丁桦, 刘浩. 基于红外热象技术的金属材料疲劳性能研究方法. *机械强度*, 2008, 30(4): 658~663
- 39 Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: A tool to analyze and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures. In: Rozlosnik A E, Dinwiddie R B, eds. *Proceedings of the 23th International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications*, Orlando, 2001-04-16~19. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2001. 560~566
- 40 郑中兴. 评估材料疲劳损伤和疲劳极限的新方法. 无损探伤. 2004, 28(5): 11~14
- 41 Krapez J C, Pacou D, Bertin C. Application of lock-in thermography to a rapid evaluation of fatigue limit in metals. In: Grinzato E, ed. *Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Infrared Technology and Applications*, Venezia, 1999-09-29~30. Pisa: Information Science & Technology Institute, 1999. 379~385
- 42 Krapez J C, Pacou D, Gardette G. Lock-in thermography and fatigue limit of metals. In: Balageas D, Beaudoin J L, Busse G, Carlomagno G M, eds. *Proceedings of the 5th International Conference on Quantitative Infrared Thermography*, Reims, 2000-07-18~21. Lodz: Quantitative InfraRed Thermography, 2000. 277~282
- 43 Krapez J C, Pacou D. Thermography detection of damage initiation during fatigue tests. In: Maldague X P, Rozlosnik A E, eds. *Proceedings of the 24th International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications*, Orlando, 2002-04-01~04. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2002. 435~449
- 44 Morabio A E, Dattoma V, Galietti U. Energy-analysis of fatigue damage by thermographic technique. In: Maldague X P, Rozlosnik A E, eds. *Proceedings of the 24th Thermosense Conference*, Orlando, 2002-04-01~04. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2002. 460~467
- 45 Boulanger T, Chrysochoos A, Mabru C, et al. Analysis of heat sources induced by fatigue loading. In: Farahani A V, Brebbia C A, eds. *Proceedings of the 1th International*

- Conference on Fatigue Damage of Materials - Experiment and Analysis, Toronto, 2003-07-14~16. Southampton: Wessex Institute of Technology Press, 2003. 255~262
- 46 Boulanger T, Chrysochoos A, Mabru C, et al. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels. *International Journal of Fatigue*, 2004, 26: 221~229
- 47 Morabito A E, Chrysochoos A, Dattoma V, et al. Analysis of heat sources accompanying the fatigue of 2024 T3 aluminium alloys. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29: 977~984
- 48 Berthel B, Wattrisse B, Chrysochoos A, et al. Thermographic analysis of fatigue dissipation properties of steel sheets. *Strain*, 2007, 43: 273~279
- 49 Berthel B, Chrysochoos A, Wattrisse B. Infrared image processing for calorimetric analysis of fatigue phenomena. *Experimental Mechanics*, 2008, 48: 79~90
- 50 Chrysochoos A, Louche H. An infrared image processing to analyse the calorific effects accompanying strain localisation. *International Journal of Engineering Science*, 2000, 38: 1759~1788
- 51 Wattrisse B, Chrysochoos A, Muracciole J M, et al. Analysis of strain localisation during tensile test by digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 2000, 41: 29~38
- 52 Balandraud X, Chrysochoos A, Leclercq S, et al. Influence of the thermomechanical coupling on the propagation of a phase change front. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences Series IIB Mechanics*, 2001, 329(8): 621~626
- 53 Louche H, Chrysochoos A. Thermal and dissipative effects accompanying Lüders band propagation. *Materials Science & Engineering*, 2001, A307: 15~22
- 54 Cugy P, Galtier A. Microplasticity and temperature increase in low carbon steels. In: Blom A F, ed. Proceedings of the 8th International Fatigue Congress, Stockholm, 2002-06-03~07. West Conshohocken: American Society of Testing Materials, 2002. 549~556
- 55 童小燕, 王德俊, 徐灏. 碳钢和合金钢的循环滞回能实验研究. *金属学报*, 1989, 25(5): A359~363
- 56 童小燕, 王德俊, 徐灏. 低周疲劳损伤过程的自然温升变化特征. *金属学报*, 1991, 27(2): A149~152
- 57 童小燕, 王德俊, 徐灏. 疲劳损伤过程的热耗散分析. *金属学报*, 1992, 28(4): A163~169
- 58 姚磊江. 疲劳损伤过程中的能量耗散分析及基于能量耗散的疲劳损伤模型: [博士论文]. 西安: 西北工业大学, 2001. 1~138
- 59 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 基于能量耗散的疲劳损伤模型. *机械强度*, 2004, 26(5): 522~525
- 60 Yang B, Liaw P K, Wang H, et al. Thermographic investigation of the fatigue behavior of reactor pressure vessel steels. *Materials Science & Engineering*, 2001, A314: 131~139
- 61 Jiang L, Wang H, Liaw P K, et al. Temperature evolution and life prediction in fatigue of superalloys. *Metallurgical and Materials Transaction*, 2004, A35: 839~848
- 62 Rösner H, Sathish S, Meyendorf N. Nondestructive characterization of fatigue damage with thermography. In: Baaklini G Y, Boltz E S, eds. *Nondestructive Evaluation of Materials and Composites V*. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2001. 167~175
- 63 Rösner H, Sathish S, Meyendorf N. Thermographic characterisation of fatigue. In: Thompson D O, Chimenti D E, eds. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. New York: American Institute of Physics, 2001. 1702~1709
- 64 Yang B, Liaw P K, Huang J Y, et al. Stress analyses and geometry effects during cyclic loading using thermography. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 2005, 127: 75~82
- 65 Yang B, Liaw P K, Wang G, et al. Thermal-imaging technologies for detecting damage during high-cycle fatigue. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2004, A35: 15~23
- 66 Yang B, Liaw P K, Wang G, et al. In-situ thermographic observation of mechanical damage in bulk-metallic glasses during fatigue and tensile experiments. *Intermetallics*, 2004, 12: 1265~1274
- 67 Yang B, Morrison M L, Liaw P K, et al. Dynamic evolution of nanoscale shear bands in a bulk-metallic glass. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 141904~141906
- 68 Chen L J, Liaw P K, Wang H, et al. Cyclic deformation behavior of HAYNES HR-120 superalloy under low-cycle fatigue loading. *Mechanics of Materials*, 2004, 36: 85~98
- 69 Jiang L, Wang H, Liaw P K, et al. Characterization of the temperature evolution during high-cycle fatigue of the ULTIMET superalloy: experiment and theoretical modeling. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 2001, 32: 2279~2296
- 70 姚磊江, 李斌, 童小燕. 疲劳过程热耗散与表面微观结构演化相关性的试验研究. *西北工业大学学报*, 2008, 26(2): 225~228
- 71 李娜. 基于能量耗散理论的疲劳试验研究: [硕士论文]. 西安: 西北工业大学, 2006. 1~64
- 72 陈胜红. 疲劳损伤过程热耗散与微观形貌的同步测量: [硕士论文]. 西安: 西北工业大学, 2007. 1~61
- 73 Chrysochoos A, Berthel B, Latourte F, et al. Local energy approach to steel fatigue. *Strain*, 2008, 44: 327~334
- 74 Curà F, Curti G, Sesana R. A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels. *International Journal of Fatigue*, 2007, 27: 453~459
- 75 Crupi V. An Unifying Approach to assess the structural strength. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30(7): 1150~1159
- 76 Audenion A L, Crupi V, Zanetti E M. Correlation between thermography and internal damping in metals. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 343~351
- 77 Plekhov O A, Palin-Luc T, Saintier N, et al. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2005, 28: 169~178
- 78 Klingbeil N W. A total dissipated energy theory of fatigue crack growth in ductile solids. *International Journal of Fatigue*, 2003, 25: 117~128

- 79 Daily J S, Klingbeil N W. Plastic dissipation in mixed-mode fatigue crack growth along plastically mismatched interfaces. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28: 1725~1738
- 80 Sakagami T, Kubo S, Teshima Y. Fatigue crack identification using near-tip singular temperature field measured by lock-in thermography. In: Dinwiddie R B, LeMieux D H, eds. Proceedings of the 22th Thermosense Conference, Orlando, 2000-04-25~27. Bellingham: International Society for Optical Engineering, 2000. 174~181
- 81 Ju S H, Lesniak J R, Sandor B I. Numerical simulation of stress intensity factors via the thermoelastic technique. *Experimental Mechanics*, 1997, 37(3): 278~284
- 82 Doudard C, Poncelet M, Calloch S, et al. Determination of an HCF criterion by thermal measurements under biaxial cyclic loading. *International Journal of Fatigue*, 2007, 29: 748~757
- 83 Steinberger R, Valadas Leitão T I, Ladstätter E, et al. Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28: 1340~1347
- 84 Gagel A, Lange D, Schulte K. On the relation between crack densities, stiffness degradation, and surface temperature distribution of tensile fatigue loaded glass-fibre non-crimp-fabric reinforced epoxy. *Composites Part A*, 2006, 37: 222~228
- 85 Tarigopula V, Hopperstad O S, Langseth M, et al. A study of localisation in dual-phase high-strength steels under dynamic loading using digital image correlation and FE analysis. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45: 601~619
- 86 Meyendorf N, Rösner H, Kramb V, et al. Thermo-acoustic fatigue characterization. *Ultrasonics*, 2002, 40: 427~434
- 87 Meyendorf N, Rösner H, Frouin J, et al. Acousto-Thermal microstructure characterization. In: Thompson D O, Chimenti D E, eds. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. New York: American Institute of Physics, 2003. 517~524

OVERVIEW ON THE THERMOGRAPHIC METHOD FOR FATIGUE RESEARCH

GUO Xinglin[†], WANG Xiaogang

State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract Energy method is an important method in the study of fatigue damage, and the emerging thermography technique can lend substantial support to its implementation. Infrared thermographic method as a non-destructive, real-time and non-contact testing technology has been widely applied to fatigue research. In the recent years, some thermographic methodologies for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components have been proposed and well developed and extended. This paper elucidates the emergence, evolution and further development of fatigue thermographic method, and presents main problems and current hot topics in the field. The future trends of this method are also discussed.

Keywords fatigue, fatigue limit, thermographic method, energy dissipation, fatigue damage

[†] E-mail: xlguo@dlut.edu.cn