

力学

基于锁相热像法的金属疲劳性能研究

郭杏林 张传豹 *

(大连理工大学运载工程与力学学部, 大连 116024)

摘要 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。基于能量耗散理论, 借助于先进的锁相热像技术, 快速地测定含盲孔的 Q235 钢的疲劳极限。该研究还表明, 在测量结构的疲劳极限时应同时兼顾材料和结构两种效应。

关键词 锁相 疲劳极限 固有耗散

中图法分类号 O346.2 TG111.8; **文献标志码** A

疲劳(Fatigue)是引起工程结构和构件失效的最主要的原因。人们认识和研究疲劳问题, 已经有 150 多年的历史。提出来许多确定材料疲劳极限或材料寿命的方法, 但是这些方法大多以统计学为基础, 普遍存在需要大量试件、耗费众多时间来确定一种材料的疲劳极限或寿命。随着能量理论被引入到疲劳研究中, 许多学者开始尝试从能量角度对金属的疲劳行为作出解释。经过大量的理论研究和实验验证, 人们发现: 金属疲劳过程中的热耗散对疲劳损伤的循环与状态特征和材料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^[1]。随着近代红外技术的发展和红外系统的开发和完善, 通过红外系统测量金属疲劳过程中热耗散的方法, 即疲劳热像法开始兴起, 并逐渐成为金属疲劳研究的新方法之一。

由于西方国家具有先进的科学技术和完善的实验室条件, 疲劳热像法最早在欧洲和北美得到研究

2009年10月9日收到

第一作者简介: 郭杏林(1955—), 男, 广西南宁人, 壮族。大连理工大学教授, 研究方向: 振动与强度测试。

*通信作者简介: 张传豹(1982—), 男, 河南新乡人, 汉族, 大连理工大学研究生, 研究方向: 热像法金属疲劳性能。E-mail: chuanbao111@163.com。

和应用, 进一步完善了疲劳理论, 并提出了一些利用红外技术确定疲劳极限的方法和数据处理技术。1986 年 Risitano^[2]首先提出了采用热像法快速确定疲劳极限的方法, 该方法被命名为 Risitano 法(如图 1), 并于 1998 年获取专利证书。随后在文献[3]中提出“温升三阶段”理论, 及在能量容限的基础上绘制出 S-N 曲线, 并与传统的沃勒曲线进行了对比。由此人们找到一种快速确定金属疲劳极限的新方法, 即通过一根试件, 花费一天时间便可测定金属材料或构件的疲劳极限, 为了提高测量数据的准确度, 常将三根试件的测量平均值作为该材料的疲劳极限, 进而极为显著地提高了工作效率和缩短了研究周期。M. P. Luong^[4,5]等人利用红外热像仪对钢试件和其他构件疲劳破坏过程中的温度变化进行了研究。他们发现, 尽管在试验载荷低于疲劳极限时, 材料不会发生疲劳破坏, 但非塑形效应(如黏性)引起的热量耗散会引起温度变化, 不能忽略不计, 如图 2。因此, Luong 提出对测得的试验数据分别对在疲劳极限之上和疲劳极限之下的两组温度值进行线性拟合, 这两条直线的交点就是材料的疲劳极限。国内刘浩等^[6]也对疲劳过程中不同的黏或/和塑性效应主导的生热机制进行了探讨。

在本文中, 利用法国 CEDIP 公司开发的锁相红

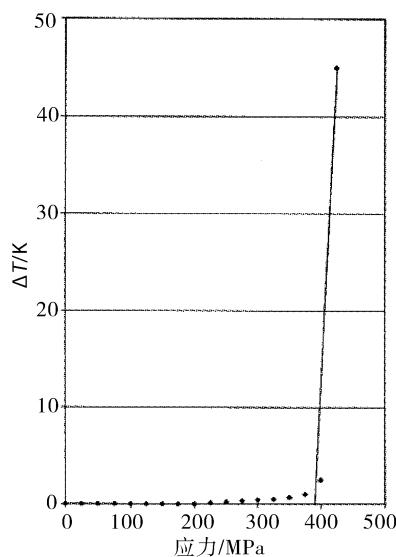


图 1 Risetano 法测定 C30 钢的疲劳极限

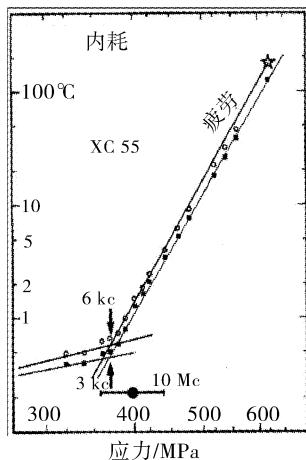


图 2 Luong 法测定 XC55 钢的疲劳极限

外热像系统中的 D-MODE 模块对材料疲劳试验过程中含盲孔的 Q235 钢构件的耗散能进行了测定。并运用 Luong 法对数据进行处理得出了构件的疲劳极限。

1 基本理论

1.1 锁相热像理论

Pierre Brémond 与 Pierre Potet^[7]针对法国 CEDIP 公司开发的锁相红外热像系统提出了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。该模式的提出是基于 Chryschoos 教授等提出的热-力耦合方程:

$$\rho CT - k \nabla^2 T = r + w'_{ctm} + w'_c \quad (1)$$

式(1)中 k 为热传导系数, ρ 为物质密度, C 为比热, T 为温度。

1.1.1 外热源

式(1)右端第一项 r 表示容积之外的热源, 如焦耳效应、红外辐射、超声等。在无损评估中采用外部加热来显现材料内部的缺陷, 在此, 材料温度的变化取决于内部热传导系数 k 的值。在材料疲劳试验中一般没有外部热源。

1.1.2 热-力耦合源

式(1)右边第二项为热-力耦合项, 它由热-弹性耦合和热-非弹性耦合两部分组成, 其表达式为:

$$w'_{ctm} = \rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \varepsilon} \dot{\varepsilon}^e + \rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \alpha_j} \dot{\alpha}_j \quad (2)$$

式(2)中 $\dot{\varepsilon}^e$ 为弹性应变张量, $\dot{\alpha}$ 为隐藏变量, ψ 为自由能, $\frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \varepsilon}$ 和 $\frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \alpha_j}$ 为两个系数张量, 前一个为热弹性耦合源, 它表示物体在弹性范围内, 受压时温度升高, 受拉时温度降低; 第二个代表其他形式的耦合源。

1.1.3 固有耗散能

等式右边第三项 w'_c 表示固有耗散能的强度, 可认为是滞弹性能和阻塞能的差值:

$$w'_c = w'_a - w'_b \quad (3)$$

式(3)中 $w'_a = \sigma \dot{\varepsilon}^p$ 为滞弹性能, $\dot{\varepsilon}^p$ 为滞弹性应变速率, $w'_b = \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_j} \dot{\alpha}_j$ 为阻塞能, φ 为潜在的耗散能, $\frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_j}$ 为系数张量, w'_c 为非线性耦合热力学效应。 w'_c 可看作是不可逆现象的描述, 它发生在微观结构领域, 包括组织损伤、应变硬化和塑性变形等。同时也意味着滞弹性能一部分转化为热, 另一部分用来改变材料的显微组织结构。

为便于进行图像处理, 假设由疲劳试验引起的温度变化对微观组织状态没有任何影响。这样, 式(2)和式(3)的第二项趋于零, 疲劳被考虑为纯耗散

机制。这样我们可以得到有疲劳损伤引起的温升为:

$$\Delta T_1 = |T_{1\text{exp}} - T_1| \quad (4)$$

这里, ΔT_1 表示热弹性效应所引起的实际温度变化相对于其理论值的漂移值, 即我们所谓的固有耗散指标。在载荷水平逐级增高的试验程序下, 可借助于红外热像仪得到材料或构件的应力—固有耗散图。在该图中, 耗散噪声 ΔT_1 的骤增被视为疲劳损伤机制的转变, 可通过“Luong 法”在图中直接获取材料的疲劳极限。

2 材料和疲劳试验

2.1 材料和试验测试系统

本文采用的是常见的结构钢 Q235, 主要化学成分如下: 0.17% 碳、0.51% 锰、0.23% 硅、0.021% 磷、0.026% 硫。由于此次试验主要考虑结构件的疲劳, 所以试件为一组含盲孔的平板式样, 盲孔深度分别为: 1 mm、4 mm, 其它几何尺寸如图 3 所示。

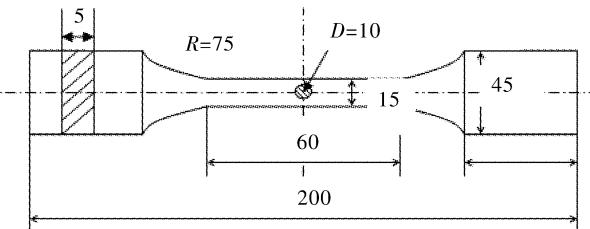


图 3 试件图

该试验为拉-压疲劳试验, 试验在 MTS810 液压伺服低频材料试验机上进行, 并采用 Altair Li 非接触式红外测试系统实时对数据进行采集和处理。测试系统如图 4。试验尽量在绝热的条件下进行, 在试验过程中为排除环境温度的干扰, 每次加载前先对环境的温度(初始温度)进行记录, 然后用最后测得的温度减去环境温度作为结构净升高温度。同时在试件表面涂上一层发射率大于 0.95 的黑色亚光漆, 以避免发射光的干扰。

2.2 试验方法

试验参数设置如下: 循环特性 $R = -1$, 加载频

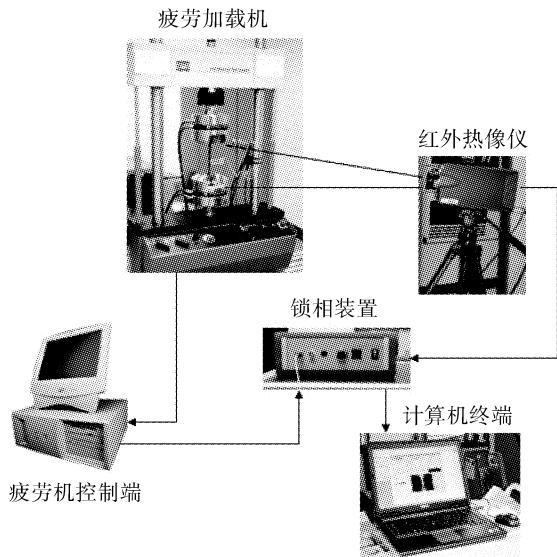


图 4 测试系统

率 20 Hz, 采样频率为 137 Hz。

试验采取载荷水平逐级增高的加载方式。加载幅值从低于材料比例极限的应力水平开始, 每循环几千个周次, 当材料表面温度达到平衡态时, 应力水平就增高一级。如此循环, 直到试件表面出现显著的热耗散现象, 试验停止。值得注意的是, 整个加载过程并不是连续的。每级应力加载结束后要有几分钟的散热时间, 以确保试件在下一级应力加载开始前能恢复到初始温度。

3 结果分析

根据上述方法采集含盲孔 Q235 平板试件的热像数据, 并采用 Luong 提出的“双线法”对数据进行分析得出(图 5, 图 6): 深度为 1 mm、4 mm 的疲劳极限分别为 152.96 MPa、146.56 MPa。分析以上结果知含盲孔的 Q235 结构件的疲劳寿命随盲孔深度的增加, 疲劳极限降低, 即此时测得的疲劳极限为构件的疲劳极限, 而非材料的疲劳极限; 深孔构件在比较低的应力水平就出现比较大的温升, 说明此时应力集中效应比较明显, 即结构效应对温升影响明显。所以在实际应用中除了考虑材料本身的材料效应外, 还需同时兼顾结构效应。

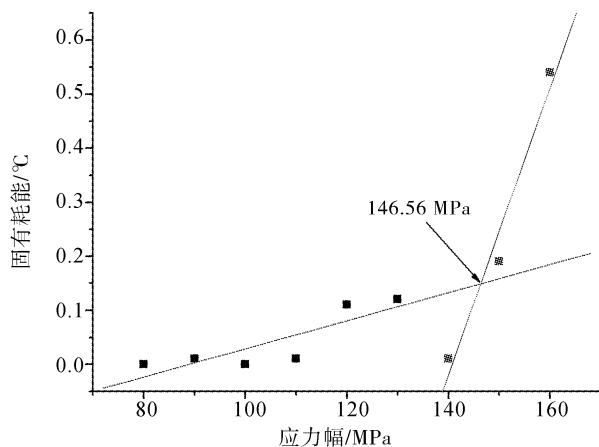


图 5 盲孔深度为 4 mm 时的 Q235 板的疲劳极限

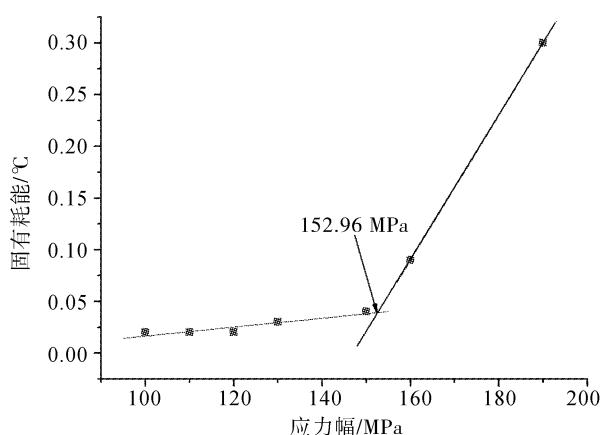


图 6 盲孔深度为 1 mm 时的 Q235 板的疲劳极限

参 考 文 献

- 1 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
- 2 La Rosa G, Risitano A. Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components. Int J Fatigue, 2000;(22):65—73
- 3 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
- 4 Luong M P. Nondestructive evaluation of fatigue limit of metals using

infrared thermograph. Nondestructive Characterization of Materials in Aging Systems. Mater Research Society, Warrendale, PA, 1998; 275—288

- 5 Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals. Nuclear Engineering Design, 1995;158 (223):363—368
- 6 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
- 7 Brémond P, Potet P. Lock-in thermography: a tool to analyze and locate thermo-mechanical mechanisms in materials and structures. In: Proceedings of the 23th International Conference on Thermal Sensing and Imaging Diagnostic Applications, Orlando. 2001;560—566

Research of Metal Fatigue Properties Based on Lock-in Thermography

GUO Xing-lin, ZHANG Chuan-bao *

(Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, P. R. China)

[Abstract] Infrared thermographic method as a non-destructive, real-time and non-contact testing technology has been widely applied to fatigue research. Some thermographic methodologies for rapid determination of the fatigue limit of materials and components were proposed, which have already been well developed and extended. The fatigue limit of steel Q235 with a blind hole is determined rapidly by the advanced lock-in thermographic technology based on energy dissipation theory. The research indicates that the effects of material and structure are both taken into account in the measurement of fatigue limit.

[Key words] lock-in fatigue limit intrinsic dissipation