

文章编号: 1001-4888(2013)01-0068-09

红外热像法快速确定45#钢的疲劳性能*

王青志, 黄芳, 丁桦

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要: 红外热像法作为一种无损、实时及非接触的测试技术, 在疲劳研究领域得到广泛的应用。该方法克服了传统试验方法周期长、所需试验试件和费用多的困难。本文利用红外热像仪测量了疲劳试验中45#钢试件表面温升变化, 根据红外疲劳极限快测法得到疲劳极限, 并由累积塑性功和塑性温升之间的相关假设, 推导出了试件疲劳寿命的计算公式。试验结果表明, 红外热像法可以快速、准确地确定材料的疲劳极限和 $S-N$ 曲线。

关键词: 疲劳能量原理; 热耗散; 疲劳极限; $S-N$ 曲线

中图分类号: O346.2 文献标识码: A DOI: 10.7520/1001-4888-12-021

0 引言

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。但传统的疲劳实验方法却存在着很大的缺陷, 这些方法通常基于概率统计理论, 试验周期长, 所需试验试件和费用多, 一直以来都是材料疲劳试验难以克服的困难^[1], 因此人们一直在探寻能快速得到材料疲劳性能的方法。

随着疲劳理论不断地发展, 疲劳能量方法成为研究疲劳的一种重要方法。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]。前一阶段主要提出基于机械能耗的疲劳失效判据, 这些损伤模型和失效准则的共同思想是: 用某种形式的能量来表征疲劳损伤, 当这种形式的能量累积达到某个极限值时, 材料发生破坏。后一阶段着重研究疲劳过程中的热耗散现象, 从热力学的角度去解释疲劳问题。因为一些研究发现疲劳过程中消耗的应变能与加载状态有关, 因而以应变能为基础的疲劳表征模型具有不确定性和不完整性, 且外部提供的机械能与疲劳损伤之间没有直接的关系。而每个循环所损失的热是不可忽略的, 因为它占输入能量中最大的一部分。于是人们利用疲劳过程中的能量耗散现象, 尝试从热力学的角度重新认识疲劳问题^[3]。

疲劳是一个能量耗散的过程。通常认为, 局部的循环塑性应变是产生疲劳损伤的根本原因^[4]。疲劳过程中, 绝大部分累积的塑性功以热量的形式释放出来, 热量通过对流、辐射的方式和外界发生交换, 同时由于热传导的作用, 在材料的内部形成温度场。由热耗散引起的温度场的变化是材料形变过程中热耗散的标志和度量, 因此对温度进行精确测量是研究疲劳过程能量耗散现象的实验基础^[5]。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, 为研究疲劳过程中材料的温度变化规律提供了便利, 大大提高了热像数据的精确度。

红外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。本文基于前人的研究, 通过红外热像技术快速确定了材料疲劳极限, 并以塑性变形产生的塑性功作为材料疲劳失效判据, 通过相关假设推导得到能够预测疲劳寿命 $S-N$ 曲线的方程。

* 收稿日期: 2012-02-21; 修订日期: 2012-05-31

通讯作者: 丁桦(1960-), 男, 研究员, 研究领域为结构碰撞、结构分析等。E-mail: hdning@imech.ac.cn

1 红外热像法快速确定材料疲劳特性的原理

1.1 疲劳极限的确定

20 世纪 90 年代前后, 学者将红外热像技术应用到了研究疲劳破坏中, 相继提出一些疲劳极限快测法, 极大地提升了红外热像法的应用价值。

La Rosa 与 Risitano^[6] 从大量试验中总结出在载荷频率一定的条件下, 当应力超过材料的疲劳极限 σ_0 时, 材料疲劳过程中温度变化可以分为 3 个特征明显的阶段, 如图 1^[7]: 第 I 阶段是初始温升阶段, 这一阶段由于试件和环境的温差较小, 对流过程中的热量损失比较少, 大部分热量耗散用于提高试件的温度, 试件表面温度上升较快; 第 II 阶段是温度稳定阶段, 这一阶段, 由于试件的热量耗散和试件与环境的热量交换大致相当, 因此温度变化相对缓慢, 温度相对稳定; 第 III 阶段是温度快速升高阶段, 这一阶段试件中的裂纹进入扩展阶段, 由于裂尖的能量快速释放, 导致裂尖温度快速上升。

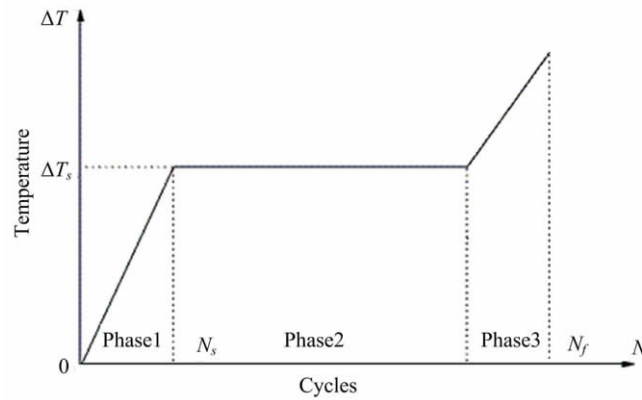


图 1 试件疲劳破坏过程中表面温度变化简化图

Fig. 1 Abridged general view of change in temperature of specimen during fatigue failure

Risitano 等人^[8] 在对多种材料(铁、铝合金、玻璃纤维材料)和一些构件(焊接件等)的红外疲劳试验时, 将不同载荷水平下第 II 阶段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, 发现当应力幅值达到一定水平时, 温升会发生陡增, 而此前的温升值几乎为零。离线点拟合的直线与应力横轴的交点即对应着材料的疲劳极限。该方法称为一性拟合法。

20 世纪 90 年代中期, M. P. Luong^[9-12] 等人由能量平衡方程、热力学方程和材料的本构关系, 推导出在材料疲劳过程中耦合了热、弹性、塑性的平衡方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = r_0 + k \nabla^2 T - (\beta : D : E^e) T + S : E^l \quad (1)$$

其中 ρ 为材料的密度; c 为比热容; k 为热传导系数; β 为线膨胀系数矩阵; D 为四阶弹性张量; S 为二阶应力张量; E^e 为弹性应变张量; E^l 为非弹性应变张量。

式(1)揭示了疲劳破坏过程中温度变化规律。等号左边项表示单位时间单位体积的材料温度变化所需要的热量。等号右边第一项表示由于一些化学反应或光照等内部或外界因素所引起的热源; 第二项表示热传导, 热传导将改变试件表面的温度场, 使其趋于均匀分布; 第三项表示材料的热-弹性响应, 是由材料的弹性效应所引起的可逆的热力学现象, 表现为材料温度随载荷变化而变化。最后一项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, 宏观上可以用温升来反映。

Luong 发现即便在较低的载荷下, 试件表面的温度也会发生变化, 即存在能量耗散, 不能忽略。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, 如图 2。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。

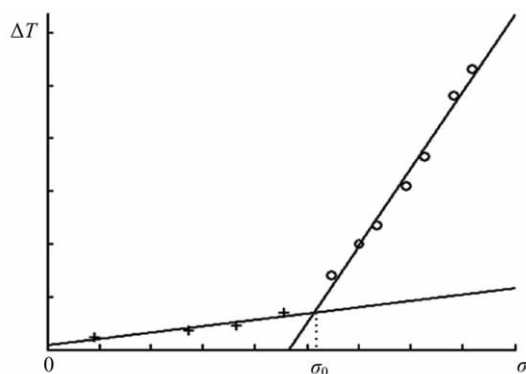


图2 Luong法确定疲劳极限

Fig. 2 A method to determine the fatigue limit by Luong

Luong法被称为双线拟合法。结果表明, Luong法测定的材料或构件的疲劳极限误差不大, 可以满足设计应用。

刘浩^[13]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, 认为Luong图中拐点的出现是由于温升机制的转变。闫志峰^[14]利用Luong法测得AZ31B镁合金板材的疲劳极限, 与常规试验进行了比较, 发现结果吻合, 且合金表面温度变化可以预测疲劳断裂位置。

1.2 疲劳寿命 $S-N$ 预测曲线

假设^[15]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。且假设材料的密度和比热为常数, 与其热力学状态无关; 热传导系数保持常数, 且材料在疲劳试验过程中各向同性; 不考虑热对流现象; 忽略热外源, 即 $r_0 = 0$ 。此外, 这里认为由疲劳试验引起的温度变化对材料微观组织状态没有任何影响。这样, 内耦合源为零。而热弹性响应致使在每一循环内材料温度的微幅度周期性变化, 引起的平均温升几乎为零。根据上述假设, 热力耦合方程可以改写为:

$$k \nabla^2 T + Q = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

黄芳^[16]认为弹性作用导致的温度波动非常低, 可以不予考虑。非弹性作用包括塑性和非塑性(如黏性), 而非塑性作用会引起温升但并不会导致疲劳破坏, 因此, 用温升表示累积的塑性功进而表征疲劳损伤的程度, 有必要去除非塑性作用的影响。

当考虑边界条件和初始条件时, 热力耦合方程变为:

$$k \nabla^2 \Delta T + Q^p + Q^{ip} = 0 \quad (3)$$

式中 Q^{ip} 是非塑性功作用引起的热耗散, Q^{ip} 对应的稳定非塑性温升是 ΔT^{ip} ; Q^p 是塑性功引起的热耗散, Q^p 对应的稳定塑性温升是 ΔT^p 。显然, 温升 ΔT^{ip} 和 ΔT^p 满足上式。综合边界条件以及齐次线性偏微分方程的性质得:

$$\begin{cases} c_1 k \nabla^2 \Delta T^p + c_1 Q^p = 0 \\ c_1 \Delta T^p / \Gamma = 0 \end{cases} \quad (4)$$

与

$$\begin{cases} k \nabla^2 (c_1 \Delta T^p) + c_1 Q^p = 0 \\ c_1 \Delta T^p / \Gamma = 0 \end{cases} \quad (5)$$

等价。

则可以推出塑性作用引起热耗散在单位体积内的耗散率 Q^p 与对应的稳定温升 ΔT^p 成线性关系, 即:

$$c_1 \Delta T^p = Q^p \quad (6)$$

其中 c_1 是与材料属性和试件几何特征相关的常数。

假设所有塑性损伤转化为热耗散,或塑性功率与由塑性功引起的热耗散率成正比,即:

$$w^p = c_2 Q^p \tag{7}$$

结合式(6)得到:

$$w^p = c_2 Q^p = c_1 c_2 \Delta T^p = \varphi \Delta T^p \tag{8}$$

温升 ΔT^p 是不同应力作用时由塑性作用引起的温升值。 φ 为与材料属性和试件几何特征相关的常数。

设载荷加载频率为 f ,因为单周塑性功 W^p 与塑性功率 w^p 有如下式的关系:

$$W^p \cdot f = w^p \tag{9}$$

所以得到单周塑性功:

$$W^p = \frac{\varphi \Delta T^p}{f} \tag{10}$$

在线性损伤累计假说下,设试件是在载荷序列 $(\sigma_1, n_{\sigma_1}), (\sigma_2, n_{\sigma_2}), \dots, (\sigma_N, n_{\sigma_N})$ 下破坏,累积塑性功为:

$$\bar{W}^p = \sum_{i=0}^{n_{\sigma_1}} W_{\sigma_1}^p(i) + \sum_{i=n_{\sigma_1}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}} W_{\sigma_2}^p(i) + \dots + \sum_{i=n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\dots+n_{\sigma_{N-1}}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\dots+n_{\sigma_N}} W_{\sigma_N}^p(i) \tag{11}$$

式中 n_{σ_i} 是应力 σ_i 作用下总的循环周次。

则由式(10),累积塑性功可以表示为:

$$\begin{aligned} \bar{W}^p &= \sum_{i=0}^{n_{\sigma_1}} \frac{\varphi}{f} \Delta T_{\sigma_1}^p + \sum_{i=n_{\sigma_1}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}} \frac{\varphi}{f} \Delta T_{\sigma_2}^p + \dots + \sum_{i=n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\dots+n_{\sigma_{N-1}}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\dots+n_{\sigma_N}} \frac{\varphi}{f} \Delta T_{\sigma_N}^p \\ &= \frac{\varphi}{f} \left(\sum_{i=0}^{n_{\sigma_1}} \Delta T_{\sigma_1}^p + \sum_{i=n_{\sigma_1}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}} \Delta T_{\sigma_2}^p + \dots + \sum_{i=n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\dots+n_{\sigma_{N-1}}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\dots+n_{\sigma_N}} \Delta T_{\sigma_N}^p \right) \end{aligned} \tag{12}$$

假设试件破坏时消耗的累积塑性功 \bar{W}^p 为常数,即:

$$\bar{W}^p = \sum W_{\sigma_i} = \text{const} \tag{13}$$

则

$$\sum \Delta T_{\sigma_1}^p + \sum \Delta T_{\sigma_2}^p + \dots + \sum \Delta T_{\sigma_N}^p = \text{const} \tag{14}$$

如果假设一定应力下,单位体积内单周塑性功 W^p 为常数,则由式(10)得到一定应力下,单周塑性功引起的塑性温升 ΔT^p 为常数,如图 3 表示了不同级载荷加载时塑性温升和循环周次的关系。

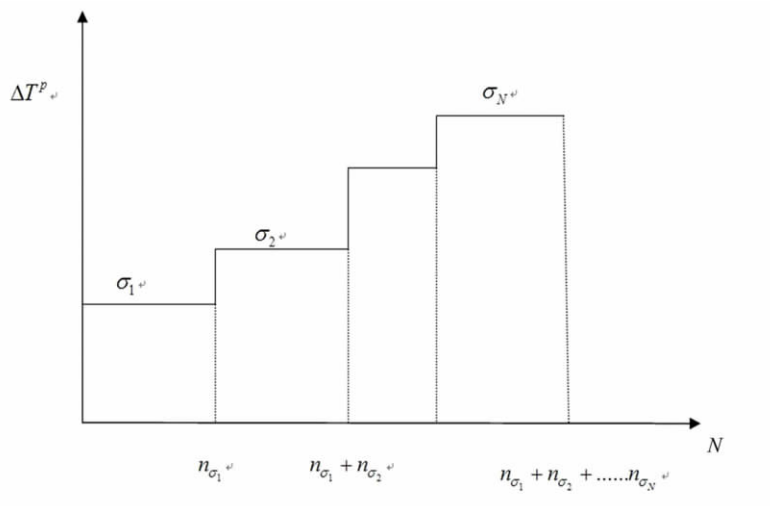


图 3 塑性温升与循环周次的变化趋势

Fig. 3 The curve of plastic temperature and cyclic number

则有以下关系:

$$\sum \Delta T_{\sigma_i} = \Delta T_{\sigma_i} n_{\sigma_i} \quad (15)$$

累积塑性功可以表示为:

$$\begin{aligned} \bar{W}^p &= \frac{\varphi}{f} \left[\sum_{i=0}^{n_{\sigma_1}} \Delta T_{\sigma_1}^p + \sum_{i=n_{\sigma_1}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}} \Delta T_{\sigma_2}^p + \cdots + \sum_{i=n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\cdots+n_{\sigma_{N-1}}}^{n_{\sigma_1}+n_{\sigma_2}+\cdots+n_{\sigma_N}} \Delta T_{\sigma_N}^p \right] \\ &= \frac{\varphi}{f} [\Delta T_{\sigma_1}^p n_{\sigma_1} + \Delta T_{\sigma_2}^p n_{\sigma_2} + \cdots + \Delta T_{\sigma_N}^p n_{\sigma_N}] \\ &= \frac{\varphi}{f} \sum_{i=1}^N \Delta T_{\sigma_i}^p n_{\sigma_i} = \text{const} \end{aligned} \quad (16)$$

如果假设 σ_i 级载荷对应的疲劳寿命为 N_i 有

$$W_{\sigma_i} N_i = \frac{\varphi}{f} \Delta T_{\sigma_i}^p N_i = \frac{\varphi}{f} \sum_{i=1}^N \Delta T_{\sigma_i}^p n_{\sigma_i} \quad (17)$$

所以,有红外热像法确定 $S-N$ 曲线的公式:

$$N_i = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_{\sigma_i}^p n_{\sigma_i}}{\Delta T_{\sigma_i}^p} \quad (18)$$

上式就是某一 σ_i 应力作用下,由红外热像法测得温升值预测疲劳寿命 N_i 的计算公式。

该理论推导主要是基于线性累积损伤和关于塑性功的假设,童小燕^[17]指出 45#钢在循环过程中循环滞回能,即塑性功在寿命期间随循环的变化不大。所以,上述红外热像法中关于塑性功为常数的假设是合理的。

2 红外热像法疲劳试验

2.1 试验条件

试验在高频疲劳试验机上进行,用 ThermoVision A40M 红外热像仪测量疲劳过程中试件表面的温度变化规律,所采用的红外热像仪的温度精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$,计算机终端显示载荷加载和温度变化情况。对 45#钢在室温下进行了五组红外热像试验,试验载荷比 $R=0.1$,加载频率分别为 142.1Hz, 142.9Hz, 139.4Hz, 142.5Hz, 140.5Hz,波形为正弦波。为了减少疲劳寿命的分散性和随机性带来的试验误差,试验时控制加载的应力,尽量使不同试件采用的各级应力值相同,方便统计各级应力作用下疲劳寿命的平均值。

试验采用 45#钢试件的形状和详细尺寸如下图 4 所示(单位为 mm)。

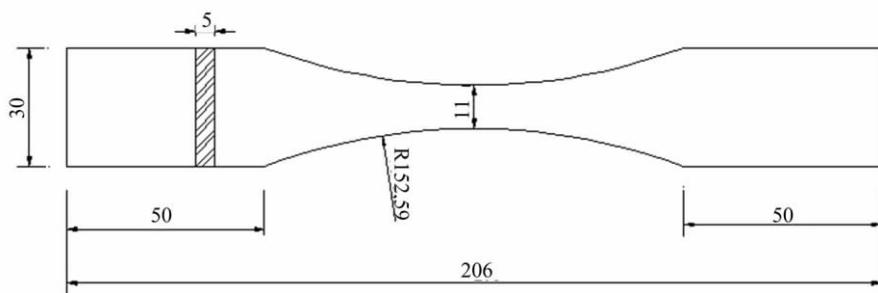


图 4 45#钢试验试件(单位: mm)

Fig. 4 The testing specimen of 45# steel

2.2 试验结果

采用逐步增加试件工作应力的方法得到一系列载荷步和与其对应的稳定温升值,如图 5 所示。第一组材料试验结果见表 1。

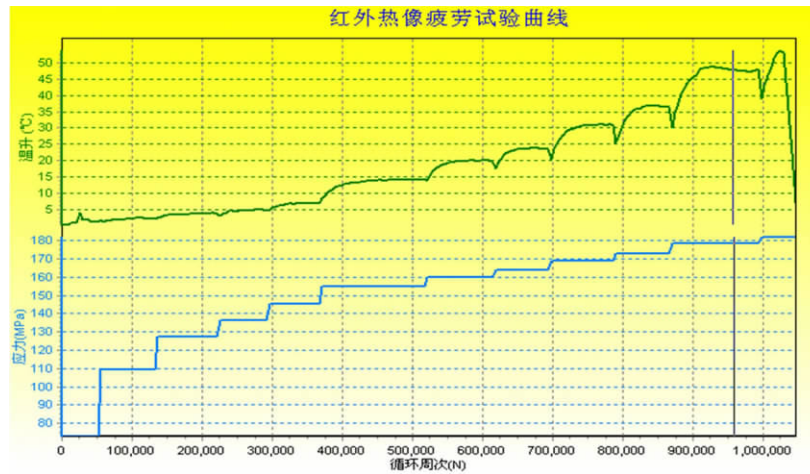


图 5 步载荷下 45#钢的温升 - 循环周次曲线

Fig. 5 The temperature rise-cycles curve of 45# under stepped loading

表 1 第一组 45#钢的红外试验结果(试件编号 1 $R=0.1$ 频率 $f=142.1\text{Hz}$)

Tab. 1 The experiment data and calculated result of 45# steel

载荷 (kN)	最大载荷 (kN)	应力幅值 (MPa)	最大应力 (MPa)	温升 ΔT	塑性温升 ΔT^p	寿命 N
7	15.56	155.56	345.68	0.5	0	
8	17.78	177.78	395.06	1.3	0	
8.9	19.78	197.78	439.51	3.5	0	
9.1	20.22	202.22	449.38	4.2	0	
9.3	20.67	206.67	459.26	5.3	0	
9.4	20.89	208.89	464.20	7.6	2.15	2174300
9.5	21.11	211.11	469.14	10.8	5.35	873400
9.6	21.33	213.33	474.07	13.5	8.55	546500
9.7	21.56	215.56	479.01	16.2	11.74	397600
9.8	21.78	217.78	483.95	18.9	14.94	312500
9.9	22.00	220.00	488.89	26	18.14	257400

根据表 1 数据 绘制第一组 45#钢应力 - 温升曲线 通过 Luong 法拟合两条直线求材料疲劳极限 ,如图 6。

在图 6 中 ,两条直线的方程分别为 $\Delta T_1 = 0.0906\sigma - 14.0712$ 和 $\Delta T_2 = 1.5300\sigma - 312.6$,故第一组 45#钢的疲劳极限 $\sigma_{0.1}$ 为 207.40MPa。类似地 ,由各组试验数据 采用 Luong 法得到 45#钢的疲劳极限平均值 $\sigma_{0.1}$ 为 204.96MPa。

得到试验数据(表 1) 后 ,用寿命预测公式(18) 求得各级应力对应的疲劳寿命。根据表中的数据绘制载荷比 $R=0.1$ 时第一组 45#钢的 $S-N$ 曲线 ,如图 7。

其他各组红外试验相关数据如表 2。

归纳五组红外疲劳试验数据 ,以不同试件最大应力幅为表征 统计结果如表 3。

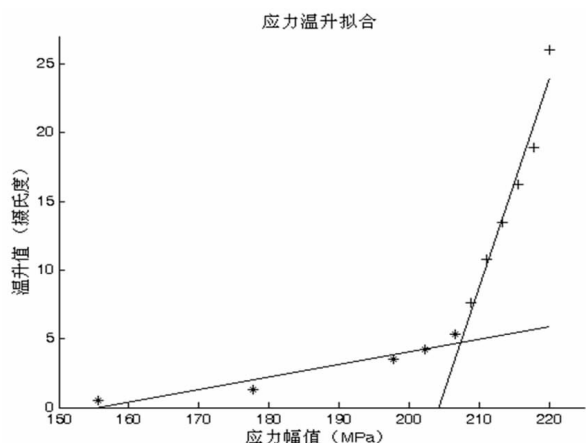


图6 45#钢应力-温升拟合

Fig. 6 The stress-temperature fitting of 45# steel

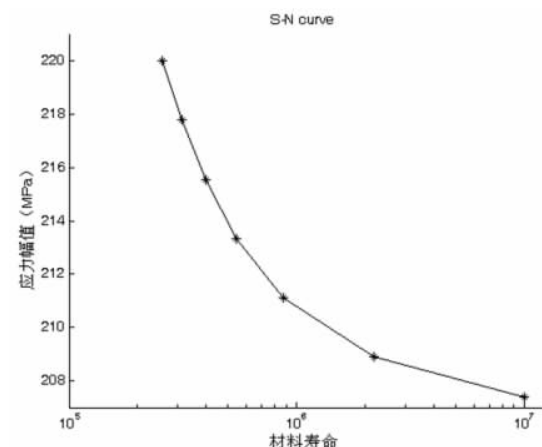


图7 45#钢的S-N曲线1(R=0.1)

Fig. 7 The S-N curve of 45# steel

表2 45#钢试验结果对比

Tab. 2 The experiment result compare of 45# steel

第一组 $\sigma_{0.1} = 207.4\text{MPa}$	应力 σ (MPa)	206.67	208.89	211.11	213.33	215.56	217.78	220.00
	寿命 $N(10^6)$	10	2.1743	0.8734	0.5465	0.3976	0.3125	0.2574
第二组 $\sigma_{0.1} = 206.28\text{MPa}$	应力 σ (MPa)	204.44	208.89	211.11	215.56	222.00	224.44	228.89
	寿命 $N(10^6)$	10	2.2955	1.2406	0.6465	0.4371	0.3302	0.2653
第三组 $\sigma_{0.1} = 211.19\text{MPa}$	应力 σ (MPa)	208.89	213.33	217.78	222.22	226.67		
	寿命 $N(10^6)$	10	1.7258	0.5605	0.3346	0.2385		
第四组 $\sigma_{0.1} = 201.36\text{MPa}$	应力 σ (MPa)	188.89	204.44	208.89	213.33	217.78	222.22	226.67
	寿命 $N(10^6)$	10	2.7758	1.1358	0.7149	0.5206	0.4096	0.3377
第五组 $\sigma_{0.1} = 198.57\text{MPa}$	应力 σ (MPa)	188.89	204.44	211.11	215.56	220.00	222.22	
	寿命 $N(10^6)$	10	1.4326	0.6707	0.4591	0.3924	0.3555	

说明: 五组数据在疲劳极限处的寿命认为是无限长, 以 10^7 表示。

表3 红外疲劳试验结果统计

Tab. 3 The fatigue results by infrared thermography

最大应力幅 (MPa)	寿命 1	寿命 2	寿命 3	平均寿命
508.64	265300			265300
503.70	238500	337700		288100
498.77	330200			330200
493.83	334600	409600	355500	366567
488.89	257400	437100	392400	362300
483.95	520600	560500	312500	464533
479.01	459100	646500	397600	501067
474.07	714900	1725800	546500	995733
469.14	670700	1240600	873400	928233
464.20	1135800	2295500	2174300	1868533
454.32	1432600	2775800		2104200

由表 3 的试验结果,求每级应力得到的不同寿命的平均值,用平滑的曲线连接各个平均值即是疲劳热像法得到的 45#钢的 $S-N$ 曲线,如图 8。该曲线忽略了明显偏离总体规律的数据点。图中标志相同的点是由同一根试件得到的。

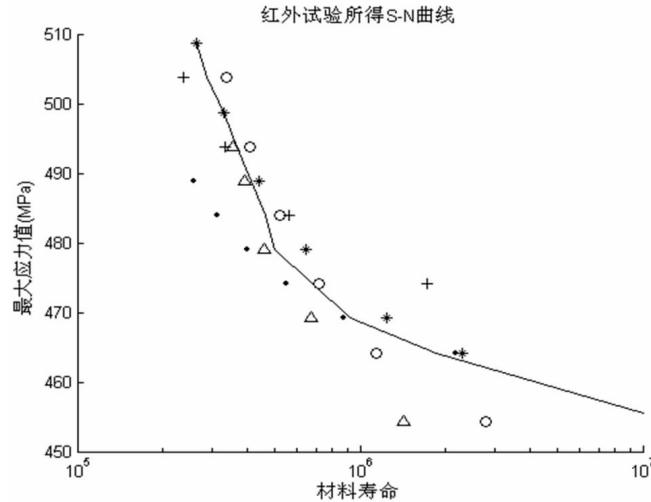


图 8 红外试验所得 $S-N$ 曲线

Fig. 8 $S-N$ curve from infrared experiment

黄芳^[16]指出,对于疲劳极限来说,红外方法与传统方法得到的结果误差很小,而红外试验方法所得的 $S-N$ 曲线整体来说偏于保守。应力越大,红外结果与传统试验的结果差距越小。红外试验产生这种误差的主要原因是没有考虑加载历史对疲劳寿命的影响。

3 结论

本文对红外热像法几种疲劳极限进行了简要阐述与总结,经过大量疲劳试验,由 Luong 法测得了 45#钢的疲劳极限;基于线性累积损伤和关于塑性功的两个假设,通过累积塑性功、塑性温升和循环周次的关系,推导了红外热像法预测材料疲劳寿命的计算公式:

$$N_l = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta T_{\sigma_i} n_{\sigma_i}}{\Delta T_{\sigma_l}^p}$$

由此确定材料的疲劳寿命给出材料的 $S-N$ 曲线。经过和传统试验方法比较发现,红外热像法得到的 $S-N$ 曲线可以为工程设计提供依据。该方法克服了传统试验方法周期长、所需试验试件和费用多的困难。

参考文献:

- [1] 郭杏林,王晓钢. 疲劳热像法研究综述[J]. 力学进展, 2009, 39(2): 217-227 (GUO Xinglin, WANG Xiaogang. Over view on the Thermographic Method for Fatigue Research[J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(2): 217-227(in Chinese))
- [2] 董小燕,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. Riview on fatigue energy theory [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(S): 216-221(in Chinese))
- [3] 姚磊江,董小燕,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))
- [4] Suresh S 著,王中光等译. 材料的疲劳(第二版) [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999 (Suresh S. Fatigue of Materials (Second Edition) [M]. Beijing: National Defenses Industry Press, 1999 (in Chinese))
- [5] Woodward R L, Baxter B J, Pattie S D, et al. Direct measurement of temperature in high speed torsion test [J]. Journal

- of Engineering Materials and Technology (Trans ASME) , 1987 , 109(2) : 140 – 145.
- [6] 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: 65 – 73.
- [7] Curti G , La Rosa G , Orlando Metal. Annalisa termite infrared stermicodella temperature limit in prove didactical [C]// in: Proceedings of the 14th Conference on the Italian Society for Stress Analysis , Catania , 1986 , 09: 211 – 220.
- [8] 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: 65 – 73.
- [9] Luong M P. Infrared thermographic scanning of fatigue in metals [J]. Nuclear Engineering and Design , 1995 , 158: 363 – 376.
- [10] Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique [J]. Mechanics of Materials , 1998 , 28: 155 – 163.
- [11] Luong M P. Infrared thermovision of damage processes in concrete and rock [J]. Engineering Fracture Mechanics , 1990 , 35: 291 – 301.
- [12] Luong M P. Introducing infrared thermography in soil dynamics [J]. Infrared Physics & Technology , 2007 , 49: 306 – 311.
- [13] 刘浩 , 赵军 , 丁桦. 快速确定 45 钢疲劳极限的试验方法 [J]. 物理测试 , 2008 , 26(2) : 8 – 42 (LIU Hao , ZHAO Jun , DING Hua. Experimental method of high-speed determination of fatigue limit for 45 Steel [J]. Physics Examination and Testing , 2008 , 26(2) : 8 – 42(in Chinese))
- [14] 闫志峰. 红外热像法预测镁合金的疲劳性能 [J]. 机械工程材料 , 2012 , 36(2) : 72 – 75 (YAN Zhi-feng. Infrared thermography technology predicting fatigue property of AZ31B magnesium alloy [J]. Materials for Mechanical Engineering , 2012 , 36(2) : 72 – 75(in Chinese))
- [15] 郭杏林 , 王晓钢. 基于锁相热象法的金属疲劳特性评估方法研究 [J]. 机械强度 , 2009 , 31(2) : 1 – 7 (GUO Xinglin , WANG Xiaogang. Research on the evaluation method of metal fatigue properties based on lock-in thermography [J]. Journal of Mechanical Strength , 2009 , 31(2) : 1 – 7 (in Chinese))
- [16] 黄芳. 利用红外热像技术快速预测材料的 S – N 曲线 [J]. 实验力学 , 2009 , 23(3) : 45 – 51 (Huang Fang. On the Use of Thermography Method for the Prediction of S – N Curve of Materials [J]. Journal of Experimental Mechanics , 2009 , 23(3) : 45 – 51(In Chinese))
- [17] 董小燕. 碳钢和合金钢的循环滞回能实验研究 [J]. 金属学报 , 1989 , 25(5) : 358 – 363 (TONG Xiaoyan. Experiment investigation of cyclic hysteresis energy of carbon and alloy steels [J]. Acta Metallurgica Sinica , 1989 , 25(5) : 358 – 363(in Chinese))

On the Rapid Determination of 45# Steel Fatigue Behavior Based on Infrared Thermography

WANG Qing-zhi , HUANG Fang , DING Hua

(Institute of Mechanics , Chinese Academy of Science , Beijing 100190 , China)

Abstract: As a non-destructive , real-time and non-contact testing technology , infrared thermography is widely applied in fatigue research area. This new method solves the problems of traditional test method , such as long cycle of experiment , huge amounts of specimen and high cost. Measurement of temperature variation on surface of 45# steel was carried out , the fatigue limit was established by rapid measuring method , and fatigue life equation was obtained by constructing relation between the accumulated plastic work and the plastic temperature rise.

Keywords: fatigue energy theory; thermal dissipation; fatigue limit; prediction of fatigue life S – N curve