

红外热像技术快速确定 0.45C 钢疲劳极限的试验方法

李 飞¹ 马 贇¹ 刘 浩²

(1 江苏省特种设备安全监督检验研究院常州分院,常州 213002; 2 太原科技大学应用科学学院,太原 030024)

摘 要 分析了材料疲劳过程的能量耗散-热耗散,并用红外热像仪研究了高频疲劳试验机疲劳试验过程具有颈缩部分的 0.45C 钢表面温度变化,快速确定 0.45C 钢疲劳极限。结果表明,红外热像法确定的正火 0.45C 钢的疲劳极限为 219 MPa,与理论计算法得出的该钢疲劳极限相一致。该试验方法具有非接触、便捷、低成本等优点。

关键词 红外热像仪 能量耗散 0.45C 钢 疲劳极限

An Experimental Method to Fast Determine Fatigue Limit of 0.45C Steel by Infrared Thermal Sensor Technology

Li Fei¹, Ma Yun¹ and Liu Hao²

(1 Changzhou Branch Institute, Jiangsu Province Institute of Special Equipment Safety Supervise and Check, Changzhou 213002; 2 School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

Abstract The dissipation of energy - dissipation of heat during fatigue process of materials has been analyzed, and the surface temperature change of 0.45C steel with necking part in fatigue test process by using high frequency fatigue test machine was studied by infrared thermal sensor to fast determine fatigue limit of 0.45C steel. Results showed that the fatigue limit of normalized 0.45C steel determined by infrared thermal sensor was 219 MPa, it was showing no difference with the fatigue limit of steel obtained by theoretical calculation. This method has the merits such as non-contact, convenience and low-cost.

Material Index Infrared Thermal Sensor, Dissipation of Energy, 0.45C Steel, Fatigue Limit

材料的疲劳损伤过程伴随着其内部状态的非平衡不可逆变化,这种变化必须由外界提供能量才能实现。能量耗散在宏观上通常表现为热耗散,对热耗散的直接测量是非常困难的,往往可以通过热响应来间接研究。

1 疲劳研究中的能量理论

疲劳能量理论研究主要包括两个方面^[1]:机械能耗和能量耗散。

1.1 机械能耗

机械能耗的疲劳损伤理论的主要思想是用某种形式的能量表征疲劳损伤,当它累积到某个极限值时,材料发生破坏。即^[2]:

$$\sum_{i=1}^{N_f} W_i = W_f \quad (1)$$

式中: W_i - 第 i 个循环累积的能量; W_f - 疲劳失效时的累计总能量; N_f - 疲劳失效循环数。用来表征疲劳损伤的能量形式包括循环滞回能、部分循环滞回能、总应变能等^[3-6]。

1.2 能量耗散

热耗散是材料疲劳过程中的主要能量耗散形

式,可通过材料疲劳过程中的温度变化,来研究其物理状态的变化。Luong 等人给出了材料疲劳破坏过程中的热-力学耦合方程^[7]为:

$$\rho C_v \dot{T} = r_0 + k\Delta T^2 - (\beta : \dot{D} : E^e) T + S : \dot{E}^l \quad (2)$$

式中: ρ - 材料的密度; C_v - 等体比热容; r_0 - 热源; k - 热传导系数; β - 线膨胀系数矩阵; \dot{D} - 四阶弹性张量; S - 二阶应力张量; E^e 、 \dot{E}^l - 分别表示弹性应变和非弹性应变张量; T - 试件的温度; \dot{T} - 温度随时间的变化率; ΔT - 相对外部环境温度差。

式(2)等号左边项表示单位体积的材料温度每升高一度需要吸收的热量。等号右边第一项 r_0 表示由于内摩擦引起的热源强度;第二项表示材料内部热传导作用,热传导使材料内部的温度趋于稳定平衡;方程右边第三项表示材料的热-弹性响应,当载荷在弹性范围内变化的时候,变形和温度会发生相互转化,其表现就是材料温度会随着载荷变化而变化。热弹性响应将材料的温度变化和材料弹性范围内的应力-应变状态联系起来,它致使在每一个循环内,材料温度的周期性变化,且这种周期性温度变化幅度非常小,并不影响材料的平均温度;方程右边

最后一项表示材料破坏过程中由于塑性变形所引起的能量耗散,即消耗的机械能,绝大部分能量耗散又以热量形式释放出来。

2 0.45C 钢疲劳过程中的温度研究及其应用

疲劳过程温度变化不仅能用来确定疲劳损伤的位置,并能够直观的监测其演化过程。由于红外热像仪具有全场、实时、快速、非接触测温等特点,现已将其用于材料疲劳破坏的研究^[7-9]。

3 疲劳试验

3.1 试验条件

试验用材料为表面镀锌、850 °C 正火处理的 0.45C 钢,其化学成分和力学性能参数^[10,11]见表 1。试件尺寸(图 1)和形式设计按照国家标准《金属轴向疲劳试验方法》(GB3075-1982)。

试验在力创 100 kN 高频疲劳试验机 (PLG-100) 上进行,加载频率为实验台的激振频率 137.8

表 1 正火 0.45C 钢的化学成分和力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of normalized 0.45C steel

化学成分/%							力学性能				
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	E/GPa	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ_5 /%	ψ /%
0.44	0.66	0.28	0.014	0.020	≤0.25	≤0.25	190	624	370	28.4	64

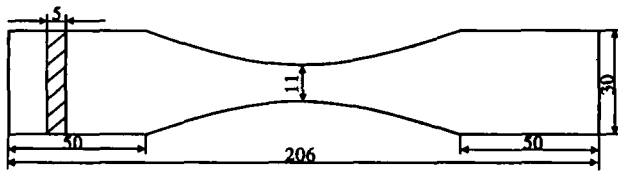


图 1 0.45C 钢高频疲劳试件

Fig. 1 Specimen of 0.45C steel for high frequency fatigue test

Hz。循环特征为 $R = -1$ 。采用 ThermalCAM™ E65 红外热像仪(精度为 0.1 °C)记录试验过程中试件表面的温度变化,试验在室温空气介质中进行。

3.2 试验结果

试验中分别采集了不同载荷水平下不同时刻的热像图(图 2)以获得试件表面的温度。

试验中采集了不同时刻不同载荷水平下的热像图以获得试件表面的温度。由于在确定材料的疲劳极限时关心的仅仅是试件表面的温升,故需要利用试件表面的温度减去环境温度来得到试件的温升值。图 3 为将记录到的所有数据按照不同载荷水平时的循环周次与温升的对应关系用 Matlab 处理后

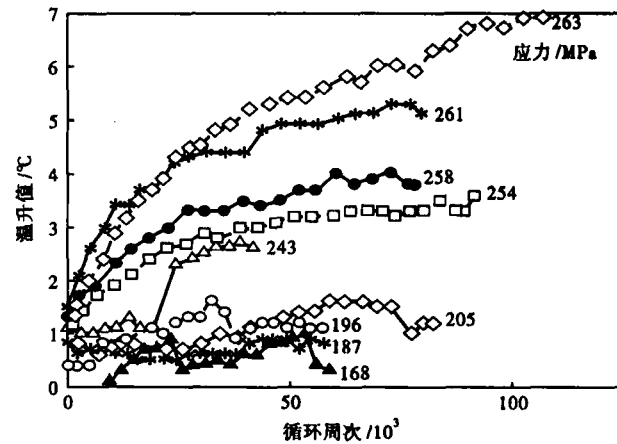


图 3 0.45C 钢表面温升值与疲劳循环次数的关系

Fig. 3 Relationship between 0.45C steel surface temperature rise value and fatigue cycles

得到的部分曲线,其中的横坐标为循环周次(等于经历的时间与加载频率的乘积),纵坐标为试件温升值(等于试件表面温度与环境温度的差值)。

Luong 提出,在材料的疲劳过程中,疲劳极限之下的载荷引起温升与疲劳极限之上的载荷引起的温升主导机制不一样,应分别考虑来确定材料的疲劳极限。因此将图 3 中温升稳定阶段的温升值与对应的应力幅值读出如表 2 所示。

为了直观比较不同温升阶段的不同温升规律,将表 2 中的数据列于图中(图 4),图 4 中横坐标为应力幅值,纵坐标为温升值。

从图 4 中可以看出,前 5 个点和后 6 个点有不同的线性关系,不同的线性关系来源于不同的温升机制,为了确定材料的疲劳极限,将前 5 个点和后 6 个点分别利用最小二乘法进行线性拟合^[12],得到图 5 中的两条直线。按照 Luong 确定材料疲劳极限的

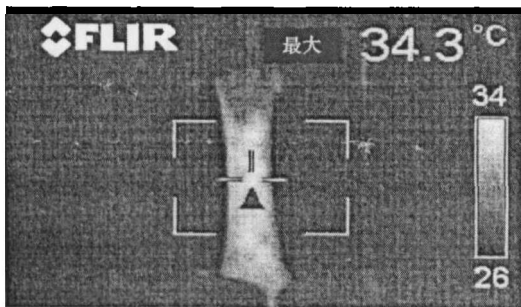


图 2 高频疲劳试验时 0.45C 钢表面热像图

Fig. 2 Thermography of 0.45C steel surface during high frequency fatigue test

表 2 0.45C 钢高频疲劳试验的工作载荷与对应的温升值
 Table 2 Service load and corresponding temperature rising value of 0.45C steel during high frequency fatigue test

工作应力/MPa	温升值/℃	工作应力/MPa	温升值/℃
133.9	0.4	217.6	3.1
150.6	0.6	220.9	2.9
167.4	0.8	224.3	3.1
175.7	1.1	227.6	3.3
184.1	1.4	230.9	3.8
192.5	2.6	234.3	5.1
200.8	3.2	240.0	6.8
209.2	3.4		

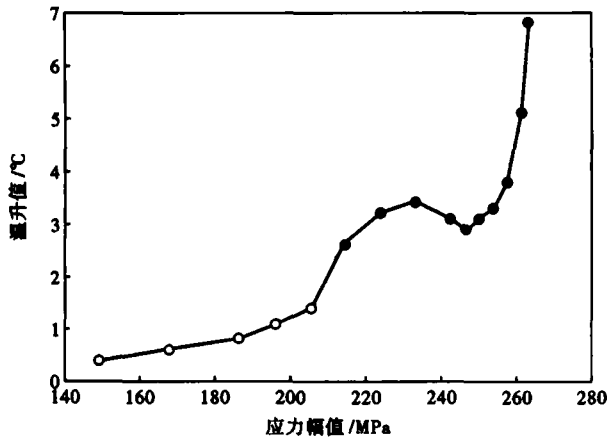


图 4 0.45C 钢表面温升值与对应工作载荷的关系
 Fig. 4 Relationship between 0.45C steel surface temperature rise value and corresponding load

方法,两条直线之间的交点即为材料的疲劳极限,故得到材料的疲劳极限为 219 MPa。

单轴疲劳载荷作用下,材料的疲劳极限约为抗拉强度的 0.35 倍^[13],故通过计算得到材料的疲劳极限为 $624 \times 0.35 = 218$ MPa。根据 Gerber 估算公式^[14],得 $\sigma_m = 224$ MPa 时的疲劳极限为 189 MPa。

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
- 2 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
- 3 Tchankov D S, Vesselinov K V. Fatigue Life Prediction Under Random Loading using Total Hysteresis Energy. Pressure Vessel Piping, 1998, 75(13): 955
- 4 Colos K, Ellyin F. A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage. Pressure Vessel Technology, ASME, 1988, 110(1): 36
- 5 Colos K, Ellyin F. Total Strain Energy Density Theory as a Fatigue Damage Parameter. Advance in Fatigue Science and Technology, Proc. NATO Advanced Study Institute, Alvor, Portugal, 1989: 849
- 6 童小燕,杨庆雄,孙 秦,等. 拉平均应变对称循环下非弹性响应的的影响. 西北工业大学学报, 1992, 10(4): 441
- 7 Luong Minh Phong. Fatigue Limit Evaluation of Metals using an Infrared Thermographic Technique. Mechanics of Materials, 1998, 28: 155
- 8 La Rosa G, Risitano A. Thermographic Methodology for Rapid Determination of the Fatigue Limit of Materials and Mechanical Compo-

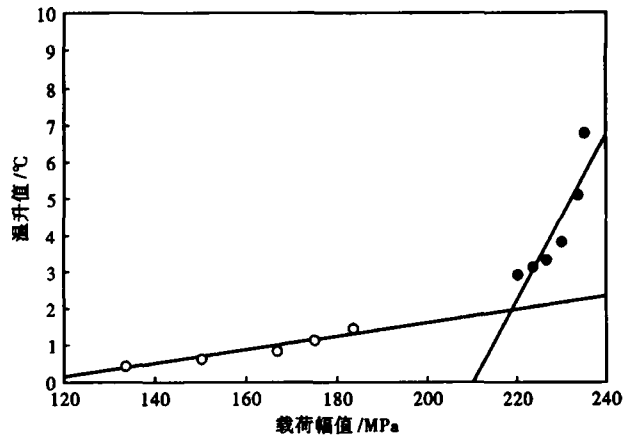


图 5 0.45C 钢疲劳极限的确定
 Fig. 5 Determination of 0.45C steel fatigue limit

表 3 0.45C 钢材疲劳试验结果
 Table 3 Results of fatigue test for 0.45C steel

载荷特征	强度极限/ MPa	疲劳极限/MPa		估算值与实验值的 最大相对误差/%
		计算值	试验值	
$R = -1$	624	218	219	3.7
$\sigma_m = 224$ MPa	624	189	163	13.7

实验结果与计算结果有较好的一致性(表 3)。

4 结论

(1) 根据能量原理,利用材料疲劳过程中的温度变化这种直观的热响应方式,快速确定了材料的疲劳极限。该方法所测得的疲劳极限在误差范围之内,能满足工程应用要求。

(2) 红外热像仪作为实时的温度采集方式,能连续观察、记录温度响应,已广泛应用于化工、电力、钢铁等行业的设备运行状况诊断和在线故障检测。

- nents. International Journal of Fatigue, 2000, 22: 65
- 9 Luong M P. Infrared Thermographic Scanning of Fatigue in Metals. Nuclear Engineering and Design, 1995, 158: 363
- 10 王 雷,王德俊. 疲劳损伤过程的计算机仿真. 东北大学学报, 2001, 22(6): 678
- 11 赵少汗,王忠保. 抗疲劳设计-方法与数据. 北京:机械工业出版社, 1997
- 12 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
- 13 陈传尧. 疲劳与断裂. 武汉:华中科技大学出版社, 2002
- 14 Suresh S. 材料的疲劳. 第 2 版. 王中光 译. 北京:国防工业出版社, 1999

李 飞(1979-),男,助理工程师,2003 年太原科技大学毕业,特种设备检测及工程设备疲劳研究。