

红外热像仪测定 45 钢常温黏性系数

刘浩¹ 赵军²

(1 太原科技大学应用科学学院, 太原 030024; 2 北京化工大学机电工程学院, 北京 100029)

摘要 通过高频疲劳试验机, 用红外热像仪采集 45 钢疲劳过程的热像图。记录 3 种工况下(I - 载荷比 $r = -1$; 26.2 °C, 加载频率 137.8 Hz; II - 拉伸平均应力 $\sigma_m = 224$ MPa, 22.1 °C, 加载频率 141 Hz; III - $\sigma_m = 187$ MPa, 27 °C, 加载频率 138 Hz) 试样表面温度的变化。求出不同频率疲劳过程非塑性效应下工作载荷与温升值的关系, 得出常温下 45 钢黏性系数 $F = 1496.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

关键词 45 钢 疲劳试验 常温黏性系数

Determination of Viscosity Coefficient of 0.45C Steel by Infrared Thermographic Sensor at Ambient Temperature

Liu Hao¹ and Zhao Jun²

(1 College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;
2 College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029)

Abstract The thermographic figure of 0.45C steel during fatigue testing has been measured by high frequency fatigue testing machine using infrared thermographic sensor. The change of surface temperature of test sample was recorded at three load conditions - No1- load ratio $r = -1$; loading frequency 137.8Hz at 26.2 °C; No2- average tensile stress $\sigma_m = 224$ MPa, loading frequency 141 Hz at 22.1 °C; No3- $\sigma_m = 187$ MPa, loading frequency 138 Hz at 27 °C. The relation between temperature rise value and service load below fatigue limit with different frequency during non-plastic test was derived and it was obtained that the viscosity coefficient of 0.45C steel $F = 1496.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Material Index 0.45C Steel, Fatigue Test, Ambient Temperature Viscosity Coefficient

材料疲劳过程中的能量耗散, 在宏观上表现为热耗散。热量耗散的多少不仅反映了材料不同破坏过程的差异, 也体现了材料破坏过程不可逆特征。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。因此, 可以通过研究材料疲劳过程中的温度变化规律, 来研究材料疲劳破坏过程中的物理状态变化。

1 红外热像仪在疲劳研究中的应用

红外热像技术最初在疲劳破坏研究中的应用是通过观测构件表面温度变化来确定裂纹位置。Charles 等人^[1]首先利用红外热像仪对疲劳破坏过程中构件的危险断面进行预测, 监测裂纹扩展以及描绘应力集中区域附近的温度场。Reifsnider 和 Williams^[2]利用红外热像仪对循环载荷作用下含缺陷板的热量耗散进行了研究。通过记录循环加载过程中试样的表面温度变化, 系统研究了疲劳过程热量耗散和循环滞回能之间的关系。

Risitano^[3]将红外热像仪应用铁、铝合金和玻璃纤维材料疲劳极限的测定中, 并对一些简单的构件(含缺陷试件、焊接头)进行了试验。试验表明, 当

在高于疲劳极限的载荷作用下, 材料疲劳破坏过程中温度稳定阶段的温升值和载荷大小有近似的线性关系。材料的疲劳极限可以通过绘制不同载荷水平下温度稳定阶段的温升值与载荷之间的关系曲线来确定, 疲劳极限就是曲线与载荷横轴的交点。

Luong 等人^[4]利用红外热像仪对钢试样和其他构件疲劳破坏过程中的温度变化进行了研究。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, 但非塑性效应引起的热量耗散会引起温度变化, 不能忽略不计。因此提出对测得的试验数据分别在疲劳极限之上和之下的两组温升值进行线性拟合, 这两条直线的交点就是材料的疲劳极限。

2 利用红外热像仪研究 45 钢疲劳过程中的温度变化

试验在高频疲劳试验机上进行, 利用红外热像仪采集疲劳过程中的热像图。试样材料为 45 钢, 试样形状如图 1 所示, 试验在室温中进行。

进行 3 种载荷工况下的试验, 记录各种工况下试样表面的温度变化, 并利用 Luong 的方法^[5]给出 3 种工况下 45 钢的疲劳极限。

工况 1: 载荷比 $r = -1$, 环境温度 26.2 °C, 加载

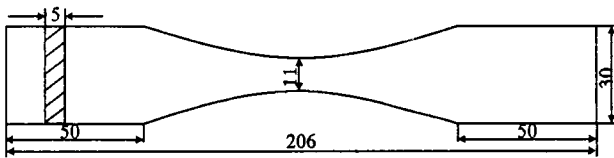


图 1 45 钢试样简图

Fig. 1 Schematic of test sample of 0.45C steel

频率 137.8 Hz, 试验结果如图 2(a,b) 所示。

工况 2: 拉伸平均应力 $\sigma_m = 224$ MPa, 环境温度 22.1 °C, 加载频率 141 Hz, 试验结果如图 2(c,d) 所示。

工况 3: 拉伸平均应力 $\sigma_m = 187$ MPa, 环境温度 27 °C, 加载频率 138 Hz, 试验结果如图 2(e,f) 所示。

图 2(a,c,e) 分别是 3 种载荷工况下试样表面

温度变化与循环周次的关系曲线, 图 2(b,d,f) 分别是 3 种载荷工况下利用 Luong 的方法确定的材料疲劳极限。

3 45 钢黏性系数的确定

由图 2(b,d,f) 中可以看出, 疲劳极限之下的载荷引起的温升与疲劳极限之上的载荷引起的温升线性规律是不一致的, 可以分别用不同斜率的直线拟合, 原因在于引起温升的机制在疲劳极限附近总是会出现转折。工作载荷高于疲劳极限时的塑性应变能的累计是导致材料疲劳破坏的主要因素; 工作载荷低于疲劳极限时的非塑性效应引起的热耗散会导致温度变化, 但不会导致材料疲劳破坏^[5]。

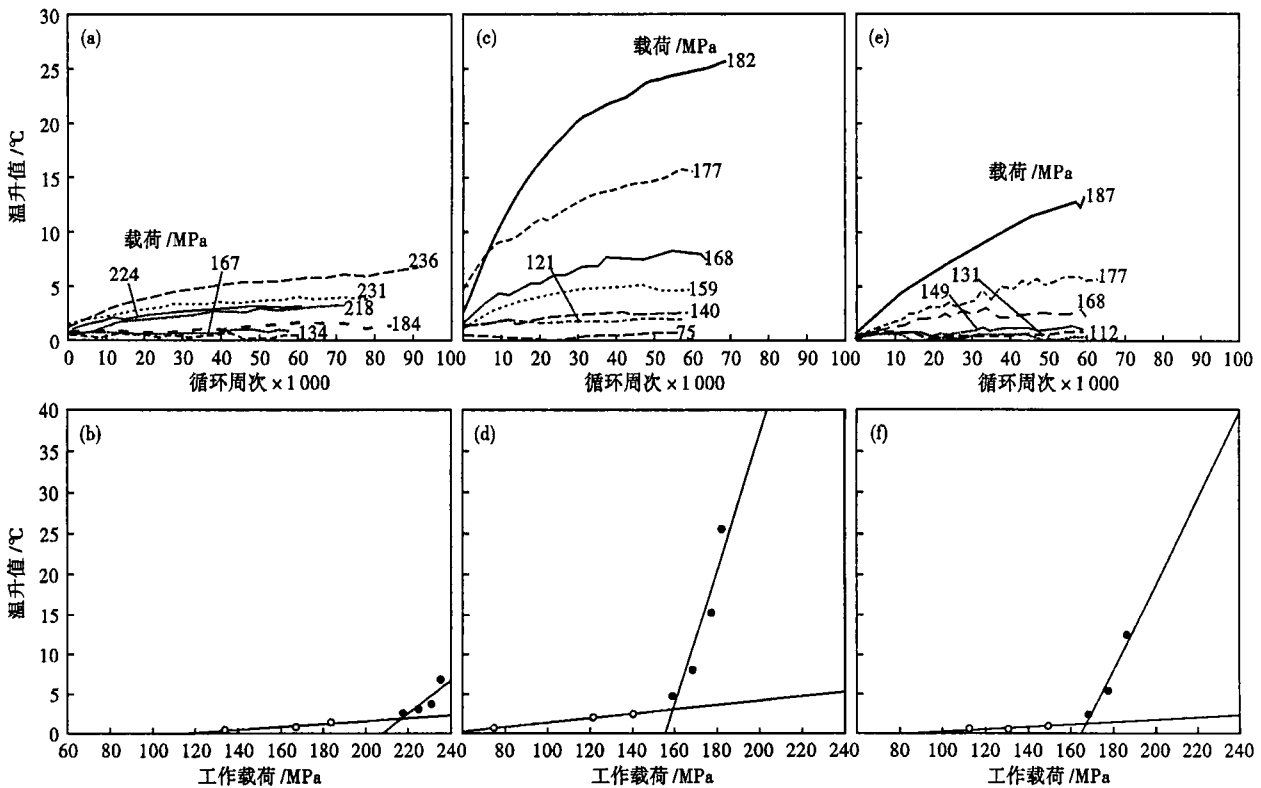


图 2 45 钢试样温度变化与循环周次关系曲线(a,c,e); 利用 Luong 的方法确定疲劳极限(b,d,f): (a,b) 工况 1; (c,d) 工况 2; (e,f) 工况 3

Fig. 2 Curves of relation between temperature rise value of 0.45C steel sample and test cycles (a, c, e); Fatigue limit determined by Luong's method (b, d, f): (a, b) - load condition No1; (c, d) - load condition No2; (e, f) load condition No3

假定材料是线性黏、弹塑性材料^[6]。为了探讨温升机理, 将图 2(b,d,f) 中的疲劳极限之下的载荷引起的温升与载荷之间的关系曲线列于一起, 并在图中给出 3 条直线对应的方程 (图 3)。

从图 3 中可以看出, 非塑性效应下, 材料疲劳过程中的温升规律主要与加载频率有关。加载频率越接近, 直线的斜率越接近。频率是与时间有关的量, 在所讨论的材料性质中, 只有黏性是与时间有关的

量, 因此认为工作载荷低于材料疲劳极限时引起材料温升的机制来自于材料的黏性效应。下面通过推导给出刻画材料黏性的物理参数。

首先选取常用来刻画固体黏弹性的 Voigt-Kelvin 模型, 其本构方程为:

$$\sigma = E\varepsilon + F \dot{\varepsilon} \tag{1}$$

式中: σ - 应力; E - 材料的弹性模量; ε - 应变; F - 材料的黏性系数; $\dot{\varepsilon}$ - 应变率, 表示单位时间的应变变量,

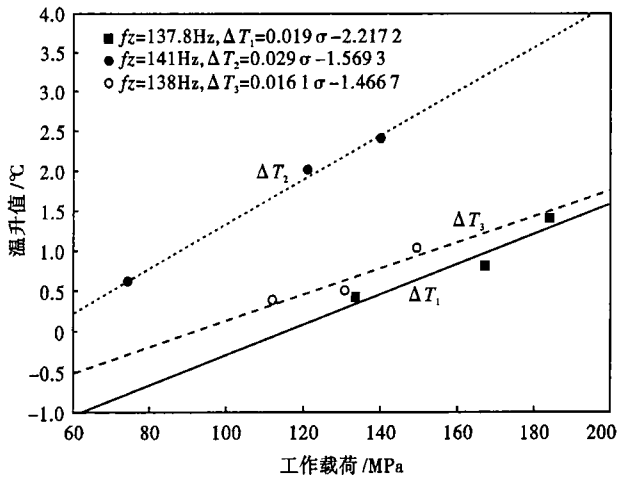


图 3 给定频率疲劳过程非塑性效应下 45 钢的工作载荷与温升值关系

Fig. 3 Relation between temperature rise value and service load for 0.45C steel during fatigue test with non-plastic effect at given frequency

疲劳载荷作用时为加载频率与应变的乘积。

图 3 中的 3 条直线都是温升与应力之间的关系,可以用下式统一写为:

$$\Delta T = f(\sigma) = k\sigma - b \quad (2)$$

由于都是线性关系,可以用最简单的直线方程来表达上式。将(1)式代入(2)式,经整理后得:

$$\Delta T + b = k \times E \varepsilon + k \times F \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

(3)式中等式右边第 1 项是弹性项,第 2 项是黏性项,式中 k 是直线斜率。由于弹性范围之内,热-弹性效应引起的平均温升为 0。因此(3)式中等式右边的第 1 项为 0,可以略去。(3)式即为:

$$\Delta T + b = k \times F \dot{\varepsilon} = k \times F \times \varepsilon \times fz \quad (4)$$

上式即为表述材料的黏性效应与温升的关系式。

工作载荷低于材料的疲劳极限时,应力与应变之间的关系满足胡克定律,故按(4)式的形式给出图 3 中的 3 条直线方程为:

$$\Delta T_1 + 2.2172 = 0.019F \times (\sigma_1/E) \times 137.8 \quad (5)$$

$$\Delta T_2 + 1.5693 = 0.029F \times (\sigma_2/E) \times 141.0 \quad (6)$$

$$\Delta T_3 + 1.4667 = 0.016F \times (\sigma_3/E) \times 138.0 \quad (7)$$

上面的 3 条直线是通过试验数据的线性拟合得到的,拟合这 3 条直线的数据分别见表 1。

将表 1 中数据引入相应的方程之中,可以计算得到关于黏性系数的 12 个值,分别是通过相互独立的实验得到的。因此对上面的结果进行加权平均得到该种材料的黏性系数。

表 1 给定频率疲劳过程 45 钢的不同工作载荷与对应的温升值

Table 1 Different service load to corresponding temperature rise value for 0.45C steel during fatigue test at given frequency

137.8 Hz		141 Hz		138 Hz	
应力/MPa	$\Delta T_1/^\circ\text{C}$	应力/MPa	$\Delta T_2/^\circ\text{C}$	应力/MPa	$\Delta T_3/^\circ\text{C}$
134	0.4	75	0.6	112	0.4
167	0.8	121	2.0	131	0.5
184	1.4	140	2.4	149	1.0

$$F = \frac{1}{3} \times \left[\frac{1}{5} \times (1568 + 1500.2 + 1446.1 + 1514.1 + 1576) + \frac{1}{3} \times (1507.2 + 1422 + 1560.6) + \frac{1}{7} (1491.5 + 1303.2 + 1684.4 + 1434.3 + 1445.5 + 1480.9 + 1456.1) \right] = 1496.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

所以 45 钢的黏性系数在常温下为 $F = 1496.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

4 结论

(1)利用红外热像仪研究了 45 钢疲劳过程中的温度变化,给出了按照 Luong 的方法快速确定的 3 种载荷工况下材料的疲劳极限,该方法考虑了疲劳极限之下的工作载荷引起的热量耗散。

(2)工作载荷低于疲劳极限时,黏性效应是影响温升的主要因素,45 钢常温下的黏性系数 $F = 1496.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

参考文献

- Charles J A, Appl F J, Francis J E. Using the Scanning Infrared Camera in Experimental Fatigue Studies. 1975 SESA Spring Meeting to be Held in Chicago, on May:11
- Reifsnider K L, Williams R S. Determination of Fatigue-related Heat Emission in Composite Materials. 1973 SESA Fall Meeting Held in Indianapolis, on October:16
- 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
- Minh Phong Luong. Fatigue Limit Evaluation of Metals Using an Infrared Thermographic Technique. Mechanics of Materials, 1998, 28:155
- 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
- 周光泉,刘孝敏.粘弹性理论.合肥:中国科学技术大学出版社,1996

刘浩(1980-),男,硕士(北京化工大学),2002年太原重型机械学院毕业,过程设备的强度和安全研究。

收稿日期:2007-10-31