第 23 卷 第 1 期
2008 年 2 月

实 验 力 学
JOURNAL OF EXPERIMENTAL MECHANICS

Vol. 23 No. 1
Feb. 2008

文章编号:1001-4888(2008)01-0001-08

疲劳过程中生热机理的实验探讨*

刘 浩[1,2], 赵 军[1], 丁 桦[3]

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 太原科技大学 应用科学学院, 山西 030024;
3. 中国科学院 力学研究所工程科学部, 北京 100080)

摘要: 传统的疲劳试验方法确定材料的疲劳极限时试验周期长、需要试件多, 故高试验成本成为疲劳试验中一个难以解决的问题。文中利用具有准确、快速、便捷、低成本等优点的热像法测定了多种载荷工况下 Q235 钢的疲劳极限, 并对不同的黏或/和塑性效应主导的生热机制进行了探讨。材料疲劳过程中, 疲劳极限之下的载荷引起的温度波动来源于热弹性效应, 温升来源于材料的非弹、塑性效应(如黏性效应); 而疲劳极限之上的载荷引起塑性功累计, 导致疲劳损伤产生, 使得温升机制出现转折。通过对试验数据的分析, 求出了材料的黏性系数, 给出了利用塑性能耗的起点确定材料疲劳极限的方法。

关键词: 疲劳试验; 热像法; 黏性效应; 塑性能耗

中图分类号: O346.2 **文献标识码**: A

0 引言

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。疲劳过程中的 Bauschinger 效应和迟滞现象都证明疲劳过程耗散了能量, 因此能量理论是研究材料的疲劳行为微观机理和宏观现象的桥梁。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。

一般实验要获得精确可靠的温度数据有许多困难, 尤其是需要记录微小的连续温度变化时, 温度测量系统的灵敏度、环境温度扰动等会严重影响测量的精度。红外热像仪因其全场、实时、快速、非接触测温特点满足了疲劳过程的温度测量的特殊要求, 而被一些国外学者应用于疲劳研究中。J. A. Charles 等人[1]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。K. L. Reifsnider 和 R. S. 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件的表面温度变化, 系统地研究了疲劳过程热量耗散和循环滞回能之间的关系。G. Fargione 等人[3]利用红外热像仪实现了快速确定材料的整个 $S-N$ 曲线的目的。

G. La Rosa, A. Risitano[4], G. Fargione[5]等人利用红外热像仪研究了材料疲劳过程中的温度变化, 并得出结论: 在载荷频率一定的条件下, 当应力超过材料的疲劳极限时, 材料疲劳过程中温度变化可以分为三个特征明显的阶段。第一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; 第二阶段是温度

* 收稿日期: 2007-07-10; 修订日期: 2007-12-17
通讯作者: 赵军(1956 -), 男, 副教授, 研究方向为工程结构的力学计算及数值仿真。E - mail: zhaoj @mail. buct. edu. cn

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

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;第三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。而在低于疲劳极限载荷作用下,材料的温度变化很小。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度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(图 1)。M. P. Luong[6]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,但非塑性效应(如粘性)引起的热量耗散会引起温度变化,不能忽略不计。因此,Luong 提出对测得的试验数据分别对在疲劳极限之上和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(图 2)。

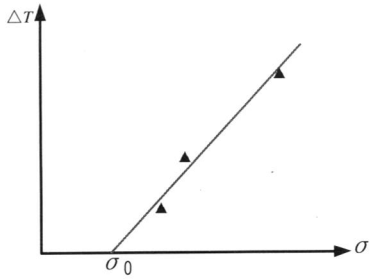

图 1 Risitano 确定材料疲劳极限的方法

Fig. 1 A method to determine materials' fatigue by Risitano

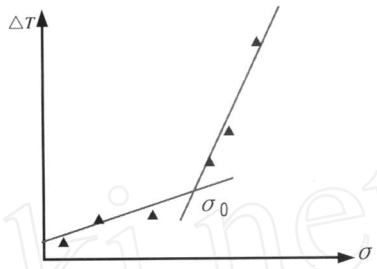

图 2 Luong 确定材料疲劳极限的方法

Fig. 2 A method to determine materials' fatigue by Luong

试验结果表明,上面的方法(即热像法)测定的材料或构件的疲劳极限和升降法相比误差不大,可以满足工程应用要求。

对于疲劳机理,国内外学者分别从微观和宏观角度出发取得了很大进展。姚国文等人[7]以碳纤维薄板(CFL) 增强 RC 梁为研究对象,通过对循环载荷作用下增强梁的三点弯曲疲劳试验研究,得到了增强梁的线性对数疲劳寿命曲线和跨中挠度的演化规律,外推得到了极限疲劳强度和抗弯刚度的演化规律,揭示了增强梁的疲劳破坏机理。朱正宇等人[8]综述了近年来国内外在非比例载荷下多轴疲劳微观机理研究的进展和现状,着重从材料微结构变化方面讨论了附加强化理论及其影响因素。于海生等人[9]采用透射电镜(TEM) 对钛合金 BT9 的疲劳位错亚结构进行了观测和分析,发现非比例载荷下钛合金 BT9 中的局部高密度位错是其低周疲劳损伤程度加剧及寿命降低的主要因素。姚磊江等人[10]通过低周疲劳试验,研究了 40CrNiMoA 在循环加载过程的软化/硬化规律以及机械能耗规律,并利用细小热敏电阻测量了试样在加载过程中的温度变化以及温度涨落规律。本文利用红外热像仪测量了疲劳过程的温度变化,对疲劳过程的温升机制进行了探讨。

1 利用热像法确定 Q235 钢的疲劳极限

1.1 试验装备

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。试验装置如图 3 所示,采集到的热像图如图 4 所示,试件形状如图 5 所示,试验在室温中进行。

1.2 试验结果

对该种材料该种形状的试件进行了三种载荷工况下的试验,利用 Luong 的方法给出了材料的疲劳极限。

第一个试件的工况为载荷比 $r = -1$。试验环境温度为 21.5 ℃,加载频率为 141.7 Hz。试验结果如图 6。从图 6b 中可以看出此种载荷工况下材料的疲劳极限为 161MPa。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

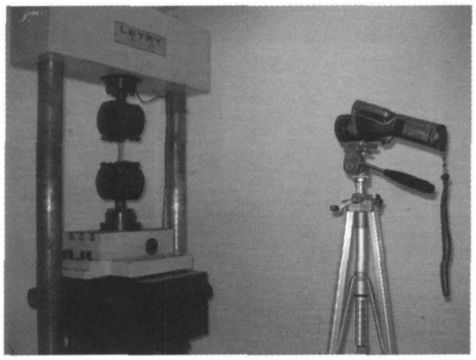

图 3　试验装置

Fig. 3　The device for fatigue test

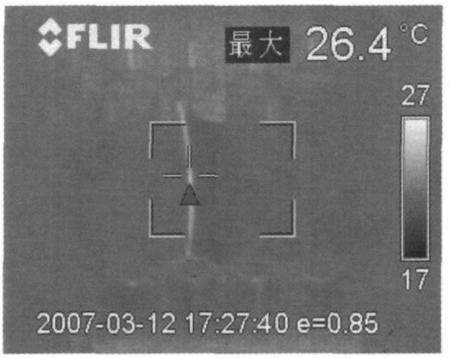

图 4　热像图

Fig. 4　The picture of thermography

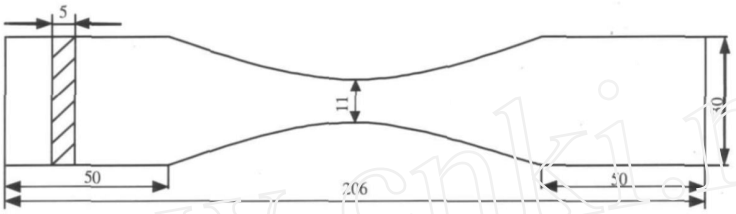

图 5　试验试件

Fig. 5　The specimen for fatigue testing

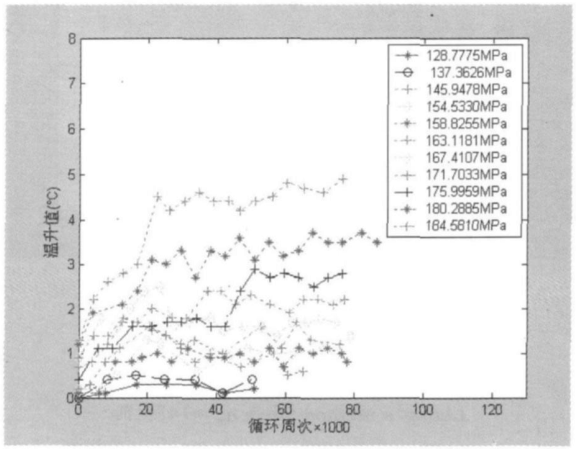

图 6a　$r=-1$ 时，不同载荷水平下温升与循环周次关系

Fig. 6a　The relationship between temperature rise and cycles under different fatigue loads when $r=-1$

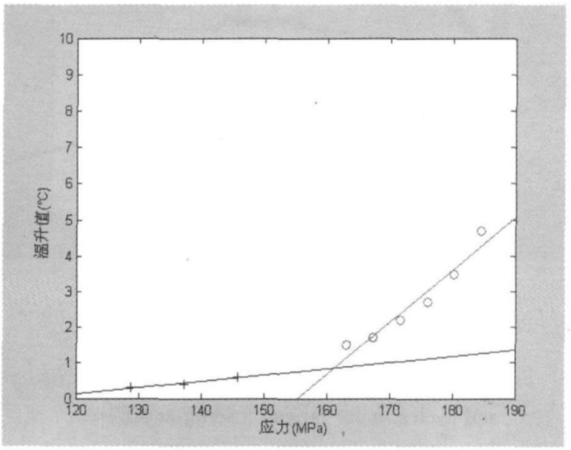

图 6b　$r=-1$ 时，利用 Luong 的方法确定材料的疲劳极限

Fig. 6b　Determination of fatigue by Luong's method when $r=-1$

第二个试件的工况为载荷比 $r=0$。试验环境温度为 22.1 ℃，加载频率为 142.5 Hz。试验结果如图 7。从图 7b 中可以看出此种载荷工况下材料的疲劳极限为 154MPa。

第三个试件的工况为拉伸平均应力 $\sigma_m=143$MPa。试验环境温度为 22 ℃，加载频率为 133.6 Hz。试验结果如图 8。从图 8b 中可以看出此种载荷工况下材料的疲劳极限为 119MPa。

在确定材料的疲劳极限时我们利用的是 Luong 的方法，该方法由于考虑了疲劳极限之下的工作载荷引起的热耗散，更加符合实际的情况，因此确定的材料疲劳极限更加准确。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

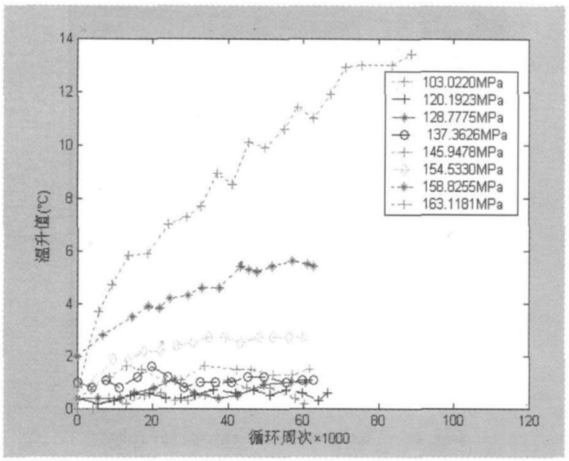

图 7a $r=0$ 时,不同载荷水平下温升与循环周次关系

Fig. 7a The relationship between temperature rise and cycles under different fatigue loads when $r=0$

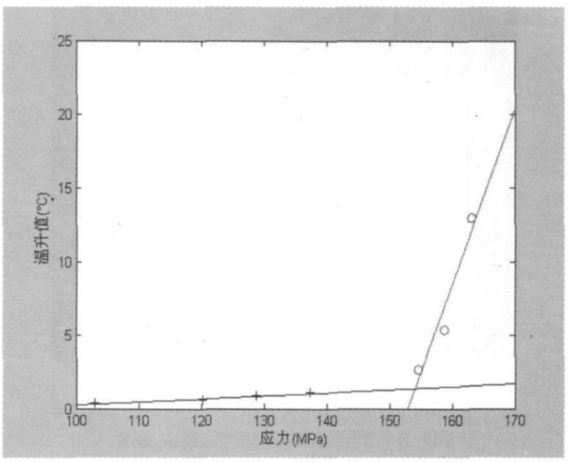

图 7b $r=0$ 时,利用 Luong 的方法确定材料的疲劳极限

Fig. 7b Determination of fatigue by Luong's method when $r=0$

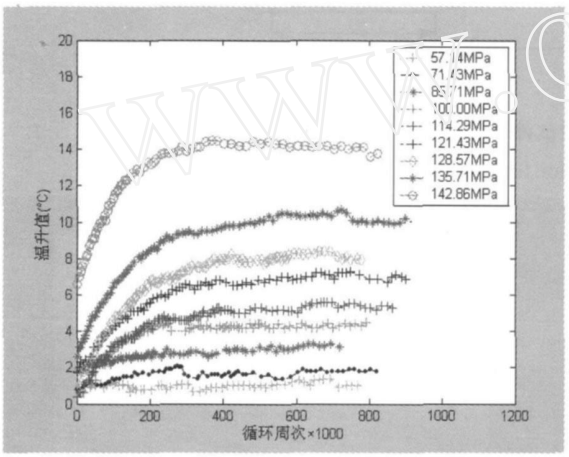

图 8a $\sigma_m=143$MPa,不同载荷比下的温升值与循环周次关系

Fig. 8a The relationship between temperature rise and cycles under fatigue loading at different load ratioes when $\sigma_m=143$MPa

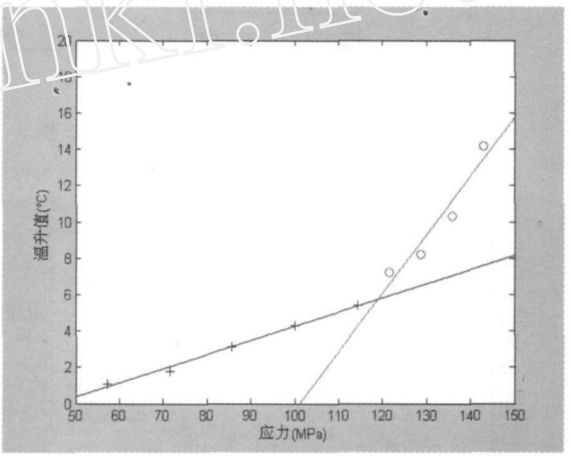

图 8b $\sigma_m=143$MPa 时,利用 Luong 的方法确定材料的疲劳极限

Fig. 8b Determination of fatigue by Luong's method when $\sigma_m=143$MPa

2 关于 Q235 钢生热机理的探讨

上面讨论了热像法确定 Q235 钢的疲劳极限的方法。由图 6b ,图 7b ,图 8b 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(如黏性) 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。

为了探讨温升机理 ,我们将图 6b ,图 7b ,图 8b 中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 ,并在图中给出三条直线对应的方程 ,见图 9。

从图 9 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

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

导给出刻画材料黏性的物理参数。

2.1　材料黏性生热机理探讨

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

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

图 9 中的三条直线都是温升与应力之间的关系,根据图形,可以用下式的直线方程表温升与应力幅的关系:

$$\Delta T = k \times \sigma - b \tag{2}$$

其中,σ为应力幅,将(1)式代入(2)式:

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

经过处理,可写为:

$$\Delta T + b = k \times E\varepsilon + k \times F\dot{\varepsilon} \tag{4}$$

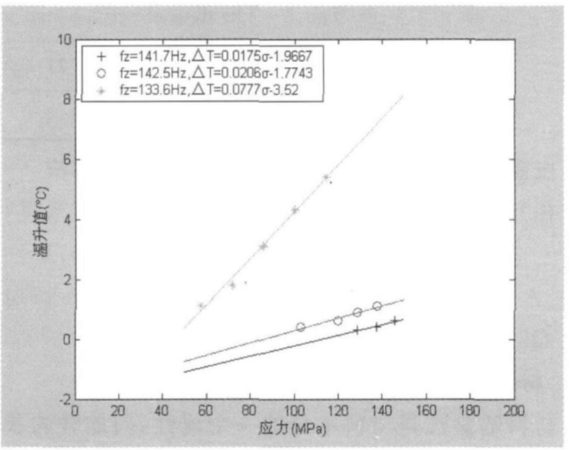

图 9　不同频率时载荷与非塑性效应下的温升关系

Fig. 9　The relationship between temperature rise due to non-plasticity effect and corresponding

(4)式中等式右边第一项是弹性项,第二项是黏性项。式中,k 是直线斜率; E 和 F 分别是弹性系数和黏性系数; ε 和 $\dot{\varepsilon}$ 分别表示应变和应变率。由于热 - 弹性效应引起的平均温升为零,因此(4)式中等式右边第一项为零。(4)式变为:

$$\Delta T + b = k \times F\dot{\varepsilon} \tag{5}$$

(5)式中的应变率 $\dot{\varepsilon}$ 表示单位时间内材料的应变量,考虑在疲劳载荷作用下,一个周期的平均应变率可近似认为等于每循环内的应变量与加载频率的乘积,故(5)式为:

$$\Delta T + b = k \times F\dot{\varepsilon} = k \times F \times \varepsilon \times f_z \tag{6}$$

上式即为表述材料的黏性效应与温升的关系式。

按(6)式的形式写出图 9 中的三条直线方程为:

$$\begin{cases} \Delta T_1 + 1.9667 = 0.0175 F \times (\sigma_1 / E) \times 141.7 & \text{(a)} \\ \Delta T_2 + 1.7743 = 0.0206 F \times (\sigma_2 / E) \times 142.5 & \text{(b)} \\ \Delta T_3 + 3.52 = 0.0777 F \times (\sigma_3 / E) \times 133.6 & \text{(c)} \end{cases} \tag{7}$$

上面的三条直线是通过对试验数据的线性拟合得到的,拟合第一条直线的数据见表 1。

表 1　工作载荷与对应的温升数据

Tab. 1　The data of service load to corresponding temperature rise

应力 MPa	128.78	137.36	145.95
温度(℃)	0.3	0.4	0.6

将这些数据代入(7a)式:

$$0.3 + 1.9667 = 0.0175 \times F \times \frac{128.78 \times 10^6}{201 \times 10^9} \times 141.7, \text{得到 } F = 1426.7\,\text{Pa} \cdot \text{s};$$

$$0.4 + 1.9667 = 0.0175 \times F \times \frac{137.36 \times 10^6}{201 \times 10^9} \times 141.7, \text{得到 } F = 1396.6\,\text{Pa} \cdot \text{s};$$

$$0.6 + 1.9667 = 0.0175 \times F \times \frac{145.95 \times 10^6}{201 \times 10^9} \times 141.7, \text{得到 } F = 1425.5\,\text{Pa} \cdot \text{s}$$

拟合第二条直线的数据见表 2。

表 2　工作载荷与对应的温升数据

Tab. 2　The data of service load to corresponding temperature rise

应力 MPa	103.02	120.19	128.78	137.36
温度(℃)	0.4	0.6	0.9	1.1

拟合第三条直线的数据见表 3。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 工作载荷与对应的温升数据

Tab. 3 The data of service load to corresponding temperature rise

应力 MPa	57.14	71.43	85.71	100	114.29
温度(℃)	1.1	1.8	3.1	4.3	5.4

按照拟合第一条直线的数据的相同处理方法,一共可以计算得到黏性系数的 12 个值,它们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。

$$F = [(1426.7 + 1396.6 + 1425.5)/3 + (1425.2 + 1335.5 + 1406 + 1417.8)/4 + (1565.5 + 1442.1 + 1495.5 + 1514.2 + 1511.2)/5]/3 = 1439.3\,\text{Pa}\cdot\text{s}$$

所以 Q235 钢的黏性系数 $F = 1439.3\,\text{Pa}\cdot\text{s}$。

2.2 材料塑性生热机理探讨

材料的黏性是材料本身的一个属性,与加载的状态无关。假定材料的本构关系是线性的,为了对不同的生热机理进行区分,简单起见,认为同一加载频率下黏性效应引起的温升只与加载的水平有关,即在疲劳极限之下与疲劳极限之上的黏性效应引起的温升与加载水平之间是保持同一直线关系。从疲劳极限之上的温升机理中去除黏性效应的部分剩下的就是塑性效应部分,故对拟合直线进行简单的"相减"操作,就可以将黏塑性耦合效应中的黏性效应与塑性效应分离。

图 6c,图 7c,图 8c 中疲劳极限之上的温升来自于黏塑性耦合效应。三条有黏塑性耦合效应生热机理的直线为:

$$\begin{cases} \Delta T_1 = 0.1458\sigma_1 - 22.6248,\ f_z = 141.7\,\text{Hz} & \text{(a)} \\ \Delta T_2 = 1.1997\sigma_2 - 183.5167,\ f_z = 142.5\,\text{Hz} & \text{(b)} \\ \Delta T_3 = 0.3276\sigma_3 - 33.34,\ f_z = 133.6\,\text{Hz} & \text{(c)} \end{cases} \tag{8}$$

从(8)式中去掉黏性生热部分,得到:

$$\begin{cases} \Delta T_1 = 0.1283\sigma_1 - 20.6581,\ f_z = 141.7\,\text{Hz} & \text{(a)} \\ \Delta T_2 = 1.1791\sigma_2 - 181.7424,\ f_z = 142.5\,\text{Hz} & \text{(b)} \\ \Delta T_3 = 0.2499\sigma_3 - 29.82,\ f_z = 133.6\,\text{Hz} & \text{(c)} \end{cases} \tag{9}$$

(9)式就是材料疲劳试验中塑性效应与温升的关系。当 $\Delta T = 0$ 时,由(9)式求得的应力值即为前面三种试验情况下 Q235 钢的疲劳极限。(9)式表示的三条直线在图 10 中给出。

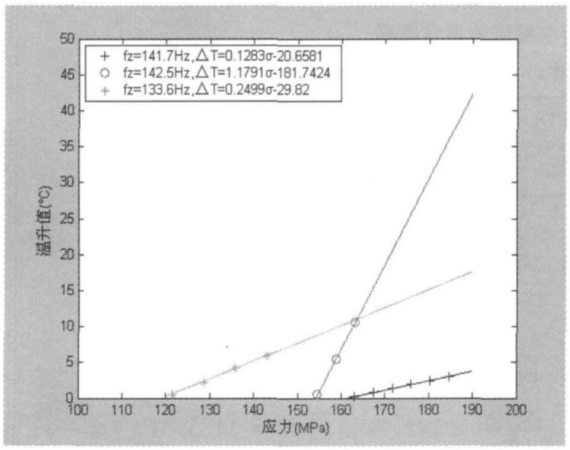

图 10 不同频率时载荷与塑性效应下的温升关系

Fig. 10 The relationship between temperature rise due to plasticity viscosity effect and corresponding service load at different frequency

图 10 中的温升机制来自塑性效应,如前所述,材料疲劳过程中的塑性能耗是导致疲劳破坏的因素,黏性效应会引起温度的变化,但不导致疲劳损伤的出现。因此可以考虑按照图 10 的方法利用塑性能耗的起点作为材料的疲劳极限。

3 结论

利用红外热像仪快速确定材料疲劳极限时,Luong 的方法由于考虑了疲劳极限之下的工作载荷引起的热量耗散,使得结果更精确。文中对 Q235 钢进行了疲劳实验,利用 Luong 的方法给出了几种循环特征下材料的疲劳极限,并对疲劳极限之下和之上的工作载荷引起的温升机理进行了探讨。由于温升趋势与加载频率有关,认为疲劳极限之下的温升来自于材料的黏性效应,通过推导计算,给出了材料的黏性系数;疲劳极限之上的温升是黏塑性耦合效应引起的,

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

黏性效应不引起疲劳损伤的发生,正确区分黏塑性效应在温升机制中的不同作用有助于对疲劳机理进一步理解。文中最后提出了利用塑性能耗的起点作为材料疲劳极限的新方法,该方法与 Luong 的方法得到的结果一致,但比 Luong 的方法更加简洁明了,能明确刻画材料的疲劳机理。Q235 钢的旋转弯曲疲劳极限为 209MPa[11],轴向疲劳极限为 154MPa[12]。本文的实验数据对比总结如表 4。

表 4　Q235 钢疲劳试验结果总结

Tab. 4　The generalization of result from fatigue testing of Q235 steel

载荷特征	强度极限 (MPa)	疲劳极限(MPa)				最大相对误差
		旋转弯曲疲劳实验	轴向疲劳实验	Luong 的方法	新方法	
$R = -1$	439	209	154	161	161	4.5 %
$R = 0$	439			154	154	
$\sigma_m = 143$	439			119	119	

参考文献:

[1] Charles J A, Appl F J, Francis J E. Using the Scanning Infrared Camera in Experimental Fatigue Studies[C]. 1975 SESA Spring Meeting to be held in Chicago, on May 11 - 16, 1975.

[2] Reifsnider K L, Williams R S. Determination of Fatigue-related Heat Emission in Composite Materials[C]. 1973 SESA Fall Meeting held in Indianapolis, on October 16 - 19, 1973.

[3] Fargione G, Geraci A, La Rosa G, et al. Rapid determination of the fatigue curve by thermographic method[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 11 - 19.

[4] 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.

[5] Fargione G, Geraci A, La Rosa G, et al. Rapid determination of the fatigue curve by thermographic method[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24: 11 - 19.

[6] Minh Phong Luong. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique[J]. Mechanics of Materials, 1998, 28: 155 - 163.

[7] 姚国文, 黄培彦, 牛鹏志, 郑小红. 循环载荷下碳纤维薄板增强 RC 梁的疲劳性能试验研究[J]. 实验力学, 2005, 20(3): 349 - 353 (YAO Guo-wen, HUANG Pei-yan, NIU Peng-zhi, ZHENG Xiao-hong. Experimental Study on Fatigue Behavior of RC Beam Strengthened with Carbon Fiber Laminate under Cycle Loading. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(3): 349 - 353 (in Chinese))

[8] 朱正宇, 何国球, 张卫华, 刘晓山. 非比例载荷下多轴疲劳微观机理的研究进展[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(11): 1510 - 1514 (ZHU Zhengyu, HE Guoqiu, ZHANG Weihua, LIU Xiaoshan. Recent Advances in Micromechanisms of Multiaxial Fatigue Under Nonproportional Loading [J]. Jounal of Tongji University (Natural Science, 2006, 34 (11): 1510 - 1514 (in Chinese))

[9] 于海生, 丰崇友, 王兴国等. 多轴低周载荷下钛合金 BT9 疲劳损伤的微观机理[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(2): 282 - 285 (YU Hai-sheng, FENG Chong-you, WANG Xing-guo, et al. Micromechanism of Damage in Titanium Alloy BT9 under Multiaxial Low Cycle Loadings. Journal of Materials Science & Engineering. 2006, 24(2): 282 - 285 (in Chinese))

[10] 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[J]. 西北工业大学学报, 2003, 20(1): 83 - 86 (YAO Leijiang, Tong Xiaoyan, Lu Shengli. Inelastic and Thermal Response during Low Cycle Fatigue Process. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2003, 20(1): 83 - 86 (in Chinese))

[11] 赵少汴, 王忠保. 抗疲劳设计 - 方法与数据[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997 (ZHAO Shao-bian, WANG Zhong-bao. Anti-fatigue Design-Methods and Data. Beijing: Machinery Industry Press, 1997 (in Chinese))

[12] 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). Beijing: National Defence Industry Press, 1999 (in Chinese))

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Experimental Study on Heat Production Mechanism during Fatigue Process

LIU Hao[1], ZHAO Jun[1], DING Hua[2]

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China;
2. College of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Shanxi 030024, China;
3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

Abstract: Traditional fatigue-testing method to determinate material's fatigue limit has defects such as long test period and a great quantity of requisite specimens, so high testing cost has become a difficult problem in material fatigue test. In this paper, thermography method, which has merits such as high accuracy, short test time, convenience and low cost is applied to determine the fatigue limit of Q235 steel under several load-cases, and the heat generation mechanism resulted from viscosity or/and plasticity effect during the fatigue was explored. During the process of material fatigue, temperature fluctuation appeared when loading is lower than fatigue limit results from thermo-elastic effect, and temperature rising comes from non-elasticity and non-plasticity effects (such as viscousness). On the other hand, the cumulated plasticity work produced when loading is above limit leads to the fatigue damage and changes the heat generation mechanism. After experimental data processing, material's viscousness coefficient was acquired and a new method to determine fatigue limit by the threshold of plasticity energy dissipation was given.

Keywords: fatigue test; thermography method; viscose effect; plastic energy dissipation

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net