

快速确定 45 钢疲劳极限的试验方法

刘浩¹, 赵军², 丁桦³

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

摘要:材料的疲劳过程是能量耗散的过程, 在宏观上表现为热耗散, 能量理论是研究材料疲劳行为微观机理和宏观现象的桥梁。文中利用红外热像仪对具有颈缩部分的 45 号钢试件疲劳过程中的温度变化进行了研究, 探讨了影响温度变化的机制, 并介绍了快速确定 45 号钢疲劳极限的方法。实验结果表明, 该方法所测得的疲劳极限合理, 且该方法具有非接触、便捷、低成本等优点。

关键词:能量原理; 疲劳试验; 温度变化; 疲劳极限

中图分类号: TG113.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0777(2008)02-0038-05

Experimental Method of High-speed Determination of Fatigue Limit for 45 Steel

LIU Hao¹, ZHAO Jun², DING Hua

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

Abstract: The materials' fatigue process is one of energy dissipation, which is presented as the heat dissipation on the macroscopy. The energy theory which is applied in the study of materials' fatigue behavior is a bridge between micro-mechanism and macro-phenomenon. In this paper, the infrared thermal sensor is utilized to study the temperature changes during the fatigue test of the 45 # steel specimen with necking part, and the mechanism of temperature change has been discussed, and a new method to determine the fatigue limit of 45 # steel fast is introduced. The experiment indicates that the result of 45 # steel's fatigue limit from infrared thermography technique is reasonable, and this method has such merits as non-contact, convenience and low-cost.

Key words: energy theory; fatigue test; temperature changes; fatigue limit

通常认为, 疲劳是由于材料在循环载荷作用下产生的微塑性变形不断累积引起的, 塑性变形在疲劳过程中发挥着非常重要的作用。事实上, 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了在疲劳过程中耗散了能量。能量的累积过程使得能量具有可加性, 并能很方便的用来描述材料的损伤过程, 能量耗散与显微结构的密切联系使得这种描述具有明确的物理含义。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。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。

1 疲劳研究中的能量理论

能量方法是疲劳研究中重要的方法之一, 也是最活跃的领域之一。经过多年发展, 目前疲劳能量理论体系已基本形成, 对疲劳理论的完善起到了积极的推动作用。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

基于机械能耗的疲劳损伤理论是在能够精确地测量疲劳过程中消耗的应变能的基础上建立和发展起来的。这一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 为第 i 个循环累积的能量, W_f 为疲劳失效时的累计总能量, N_f 表示疲劳失效循环数。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]。

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。近些年随着非平衡热力学、耗散结构理论等非线性基础学科的迅速发展, 能量理论在疲劳研究中得到不断深入和细化, 人们开始用热力学方法而不仅是力学方法研究疲劳问题。

1.2 能量耗散

热耗散是伴随着所有不可逆热力学过程而必然产生的, 疲劳过程也不例外。目前已经知道, 热耗散是材料疲劳过程中的主要能量耗散形式。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。在材料的疲劳破坏过程中, 绝大部分塑性功以热量形式释放出来。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。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。

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

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

式中, ρ 为材料的密度, C_v 为等体比热容, r_0 为热源, K 为热传导系数, β 为线膨胀系数矩阵, \dot{D} 为四阶弹性张量, S 为二阶应力张量, E^e, E^l 分别表示弹性应变和非弹性应变张量。

式(2)揭示了材料疲劳破坏过程中温度变化规律。上式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1项 r_0 表示由于内摩擦引起的热源强度; 第2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3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 疲劳过程中的温度研究及其应用

温度变化是研究疲劳过程的重要参量。它不仅能够确定疲劳损伤的位置, 并能够直观的监测其演化过程。

2.1 疲劳过程中的温度变化

研究人员^[8]从大量的实验中总结出: 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(图1)。

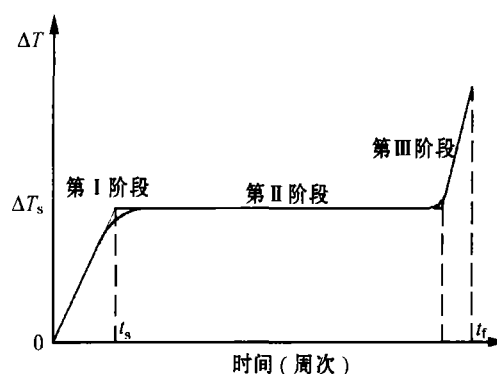


图1 试件疲劳破坏过程中表面温度变化示意图

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

第1阶段——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样的温度, 试件表面温度上升较快, 直至温度稳定。其温度上升的时间, 和破坏时的循环周次相比, 只占整个疲劳寿命的很小一部分。通常, 在载荷不接近屈服极限的时候, 它在试件整个寿命中占有的比例不会超过10%。

第2阶段——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。温度稳定阶段时间的长短, 由于载荷的不同, 会变化很大。载荷越大(高于疲劳极限时), 材料达到稳定阶段时温度值越高, 而时间越短(图2)。当施加的载荷接近材料屈服极限时, 温度稳定的这个阶段时间非常有限或者几乎没有。载荷越高, 第一阶段温度上升的速率和第二阶段稳定时的温度值相应越高。

第3阶段——温度快速升高阶段。这一阶段试件中裂纹进入扩展阶段, 由于裂尖的能量快速释放,

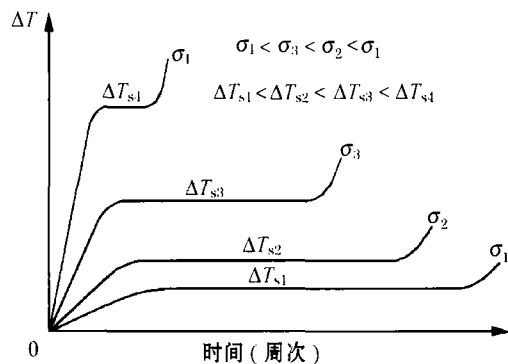


图 2 不同载荷作用下试件表面温度变化示意图

Fig. 2 Abridged general view of change in temperature of specimen under different loads

导致裂尖温度快速上升。温度在很短时间内快速上升,直至发生破坏。

而在低于疲劳极限 σ_0 载荷作用下,材料的温度变化非常小。

2.2 对疲劳过程中的温度变化的应用

A. Risitano 等人^[8]对疲劳过程中的温度变化进行了研究,提出了一种快速确定材料疲劳极限的新方法,并对多种材料(铁、铝合金、玻璃纤维材料)的一些简单构件(含缺陷试件、焊接头)进行了实验。实验表明,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。该方法确定的材料的疲劳极限和升降法相比,误差的范围在工程上是可以接受的。

M. P. Luong^[9]等人也对铁试件和其他构件疲劳破坏过程中的温度变化进行了研究。研究发现,尽管在实验载荷低于疲劳极限时,材料疲劳破坏过程中的热量耗散很少,但也不能忽略不计。考虑到材料疲劳过程中生热机制的多样性,尽管导致材料疲劳破坏的塑性应变能的累积是材料温升的主要因素,但是非塑性的影响一直存在,在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,但此时的温度变化与导致材料疲劳破坏的机制有本质区别,故应该区别对待。因此,Luong 提出对测得的实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。和 Risitano 的方法相比,Luong 的实验方法进一步提高了测定材料疲劳极限的精度。

3 疲劳试验

疲劳过程中的温度响应的测量需要比较高的精确度和响应速度,对于接触式测温方法,还要求接触面积尽量小。由于红外热像仪具有全场、实时、快速、非接触测温等特点,故本文利用其来测量疲劳过程中的温度响应。近年来,国外一些学者已将红外热像仪应用于材料疲劳破坏研究之中。

3.1 试验条件

试验用材料为表面镀锌、850 °C 正火处理的 45 号钢,其化学成分(质量分数,%)及力学性能参数见表 1。试样尺寸和形式设计按照国家标准^[10] GB3075-82 金属轴向疲劳试验方法。尺寸形式见图 3。

表 1 正火 45 钢的化学成分及力学性能参数^[11,12]

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of normalized 45 steel

化学成分/%	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
	0.44	0.66	0.28	0.014	0.02	≤0.25	≤0.25
力学性能参数	E/GPa	R _m /MPa	R _e /MPa	A/%	Z/%		
	190	624	370	28.4	64		

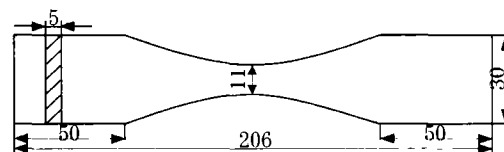


图 3 45 钢试样的尺寸

Fig. 3 Geometrical characteristics of the 45 steel specimen

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 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。室温空气介质中进行。

3.2 试验结果

试验设备如图 4 所示。试验中分别采集了不同载荷水平下不同时刻的热像图(图 5)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。将记录到的所有数据按照不同载荷水平时的循

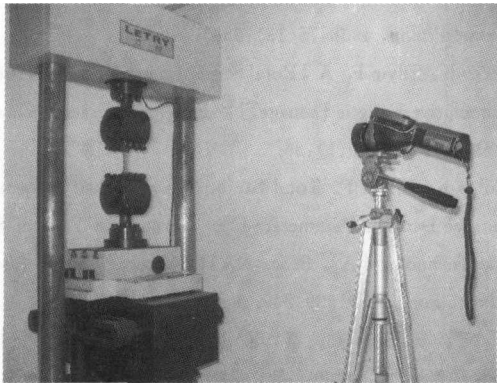


图 4 试验系统

Fig. 4 The testing system

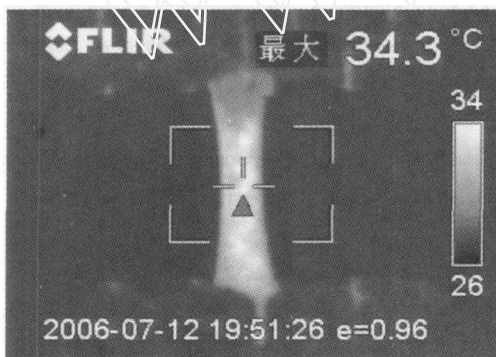


图 5 热像图

Fig. 5 The picture of thermography

环周次与温升的对应关系用 Matlab 处理后得到图 6 中所示的曲线,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,分别考虑来确定材料的疲劳极限。因此将图 6 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,

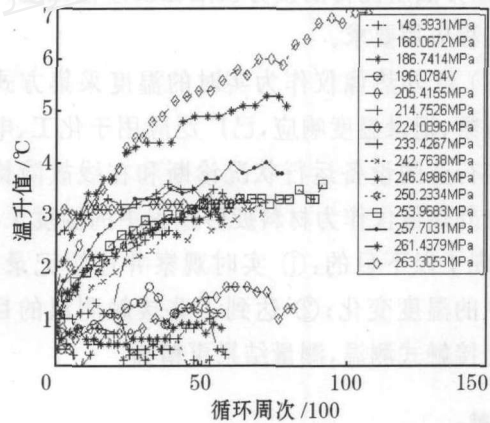


图 6 温升值与循环次数关系曲线

Fig. 6 The relationship between temperature rise and cycles

表 2 工作载荷与对应的温升数据

Table 2 The data of service load corresponding to temperature rise

工作应力/MPa	133.9	150.6	167.4	175.7	184.1	192.5	200.8	209.2	217.6	220.9	224.3	227.6	230.9	234.3	240
温升值/°C	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	2.6	3.2	3.4	3.1	2.9	3.1	3.3	3.8	5.1	6.8

将表 2 中的数据列于图中如图 7 所示,图 7 中横坐标为应力幅值,纵坐标为温升值。

从图 7 中可以看出,前 6 个点和后 6 个点有不

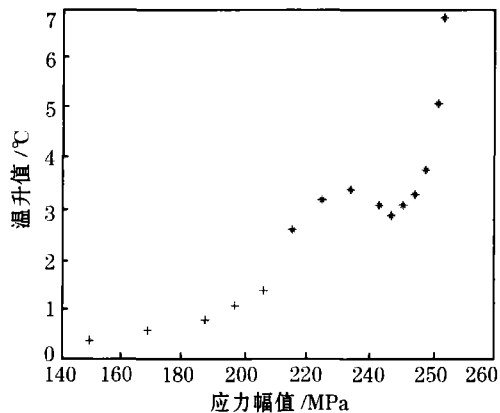


图 7 温升值与对应工作载荷关系曲线

Fig. 7 The relationship between temperature rise and corresponding load

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^[13],得到图 8 中的两条直线。按照 Luong 确定材料疲劳极限的方法,两条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。

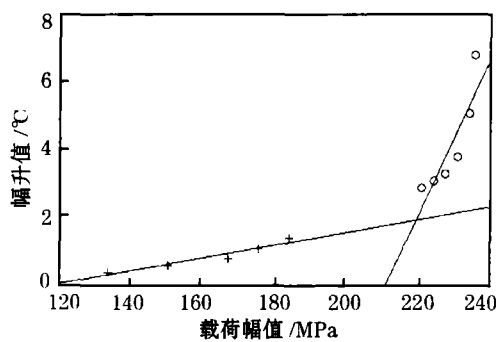


图 8 45 钢疲劳极限的确定

Fig. 8 The determination of fatigue limit for 45 steels

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^[14],故通过计算的方法得到材料的疲劳极限为 $624 \times 0.35 = 218$ MPa。实验结果与计算结果具有非常好的一致性。

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。相对于诸如升降法、成组法等传统疲劳试验方法,该方法具有快速、低成本的优点。试验结果表明,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。利用红外热像仪作为材料疲劳过程中的温度采集手段,实现了以下目的:① 实时观察并连续记录疲劳过程中的温度变化;② 达到了非接触测温的目的,相对于接触式测温,测量结果更精确。

参考文献:

- [1] 童小燕,姚磊江,吕胜利. 疲劳能量方法研究回顾[J]. 机械强度, 2004, 26(增刊): 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[J]. 机械强度, 2004, 26(增刊): 278.
- [3] Tchankov D S, Vesselinov K V. Fatigue Life Prediction Under

Random Loading Using Total Hysteresis Energy[J]. Pressure Vessel Piping, 1998, 75(13): 955.

- [4] Colos K, Ellyin F. A Total Strain Energy Density Theory for Cumulative Fatigue Damage[J]. Pressure Vessel Technology, ASME, 1988, 110(1): 36.
- [5] Colos K, Ellyin F. Total Strain Energy Density Theory as a Fatigue Damage Parameter[C]. Advance in Fatigue Science and Technology[A], Proc. NATO Advanced Study Institute, Alvor, Portugal, 1989. 849.
- [6] 童小燕,杨庆雄,孙 奏,等. 拉平均应变对称循环下非线性响应的影响[J]. 西北工业大学学报, 1992, 10(4): 441.
- [7] Minh Phong Luong. Fatigue Limit Evaluation of Metals Using an Infrared Thermographic Technique[J]. Mechanics of Materials, 1998, 28: 155.
- [8] G La Rosa, Risitano A. Thermographic Methodology for Rapid Determination of the Fatigue Limit of Materials and Mechanical Components[J]. International Journal of Fatigue, 2000, 22: 65.
- [9] Loung M P. Infrared Thermographic Scanning of Fatigue in Metals[J]. Nuclear Engineering and Design, 1995, 158: 363.
- [10] GB3075-82 金属轴向疲劳试验方法[S].
- [11] 王 雷,王德俊. 疲劳损伤过程的计算机仿真[J]. 东北大学学报, 2001, 22(6): 678.
- [12] 赵少汗,王忠保. 抗疲劳设计-法与数据[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [13] 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[J]. 力学与实践, 2007, 29(4): 36.
- [14] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2002.

(上接第 37 页)

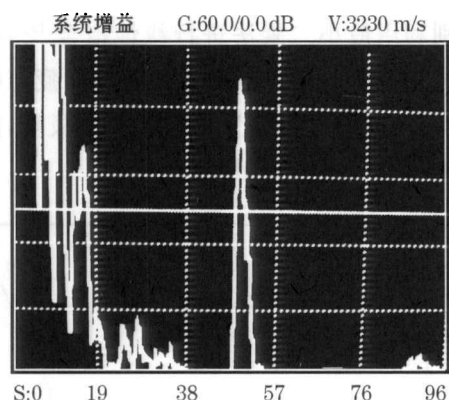


图 6 厚壁钢管超声波检测波形

Fig. 6 UT signal of tube with thick wall

4 结语

在冶金钢管生产企业中,承压无缝钢管的生产

制造以每天数百吨计。如何实现厚壁无缝钢管的快速自动化超声波探伤,确保承压钢管的产品质量,为冶金无损检测专业提出新的课题。由钢铁研究总院研制的厚壁承压无缝钢管自动超声波探伤方法和设备成功地解决了这一难题,并将这项技术应用于以北方重工铸锻有限公司为代表的一批钢管生产企业。这些企业的应用实践表明,该厚壁钢管的超声波检验方法和设备的探伤灵敏度高、可靠性好,完全满足钢管产品检验的需要。

参考文献:

- [1] 胡天明等. 超声波探伤[M]. 北京:劳动人事出版社, 1989.
- [2] 李克明等. 超声波探伤[M]. 北京:电力工业出版社, 1980.
- [3] 李家伟等. 无损检测手册[M]. 北京:机械工业出版社, 2002.
- [4] 张 克,岳东平,童 凯. 钢管超声自动探伤系统中组合探头的设计[J]. 冶金分析, 2006, 26(增刊): 228.