

文章编号: 1001-4888(2009)04-0291-08

利用红外热像技术快速预测材料的 $S - N$ 曲线*

黄芳¹, 聂雪媛¹, 江增荣², 丁桦¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 第二炮兵装备研究院 第二研究所, 北京 100085)

摘要: 研究材料疲劳一般采用试验的方法, 但试验周期长, 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, 人们一直在探寻能快速得到材料疲劳性能的方法。本文在前人研究的基础上, 采用红外热像技术, 确定了材料的疲劳极限, 并在“同种试件疲劳破坏消耗的塑性功不变”的假设下, 通过建立塑性温升、热耗散、塑性功之间的关系给出了试件疲劳寿命的计算公式。由此经过简单的试验, 理论上用一根试件, 试验几个小时就可以快速确定材料的疲劳寿命, 给出材料的 $S - N$ 曲线。

关键词: 红外热像技术; 稳定温升; 热耗散; 塑性功; $S - N$ 曲线

中图分类号: O346.2 **文献标识码:** A

0 引言

通过研究材料疲劳过程中的温度变化规律, 来研究材料的疲劳损伤是一种热力学的方法, 这种方法是随着红外热像技术的发展而逐步发展起来的。红外热像技术是一种全场、实时、快速、非接触的无损测温技术, 应用该技术可以获得精确可靠的温度数据。近年来, 提出了一些用于快速确定材料及构件疲劳极限的热像法, 并得到了很好的开发与推广^[1], Risitano^[2]、Luong^[3]、刘浩^[4]等利用该方法获得了材料的疲劳极限。但对于运用红外热像技术获得材料的疲劳寿命方面的研究却还很少, Fargione^[5]通过试验获得了逐步递增的应力与各级应力对应的温升曲线, 在“材料屈服产生的能量达到一个定常的极限值时材料就会发生破坏”的假设下, 他用温升曲线对循环周次的积分值来表征材料的热耗散总量, 并认为“积分得到的热耗散总量与屈服产生的能量成比例”, 在此基础上通过一系列推导得到了材料的寿命。但“积分得到的热耗散总量与屈服产生的能量成比例”只适用于温度稳定阶段占据疲劳寿命绝大部分的高周疲劳区, 且他们的工作没有排除非塑性效应(如黏性)导致的温升, 也没有探讨引起材料温度改变的温升机制。

本文直接用屈服产生的能量也即塑性变形产生的塑性功来衡量材料的损伤程度。在前人研究的基础上利用红外热像技术快速确定了材料的疲劳极限, 得到了材料的 $S - N$ 曲线。

1 原理和方法

1.1 基本原理

疲劳是指材料在反复应力或应变作用下发生的性能变化^[6], 包括材料的损伤和破坏。当材料承受高于疲劳极限的应力时, 每一循环都使材料产生一定量的损伤, 这种损伤是能累积的, 当损伤累积到临界值时, 材料就会发生破坏^[7]。材料的疲劳极限一般低于其弹性极限, 在低于弹性极限的载荷作用下也会发生破坏, 是由于材料中产生了局部塑性应变, 因此, 局部的循环塑性应变是产生疲劳损伤的根本原

* 收稿日期: 2009-03-10; 修订日期: 2009-06-10

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: hdng@imech.ac.cn

因。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,在材料内部形成温度场,当试件承受某一超过材料的疲劳极限的应力作用时,通过红外热像仪可以观测到其表面的温度变化大致可分为三个阶段:初始温升阶段、温度稳定阶段、温度快速升高阶段,而且不同应力水平,温度稳定阶段的温升值不同。Yang^[18]、Liaw^[19]认为引起温升的主要因素是非弹性效应如塑性变形和内摩擦,Luong^[3]发现即便在较低的载荷下,也会存在能量耗散,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,因此他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,并给出一种直接确定疲劳极限的几何方法,如图 1。两条拟合直线的交点即对应着材料的疲劳极限。事实上,可以从温升机制转变的角度来解释温升的突变。材料在低于疲劳极限的循环载荷作用下,温升主要是非塑性效应(如黏性)引起的,而在疲劳极限之上,温升由非塑性和塑性作用共同引起,两者的温升机制不一样。非塑性作用能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。这样,再在一定假设下可以建立塑性温升、耗散的热量、塑性功以及材料的应力之间的关系从而得到材料的疲劳寿命。

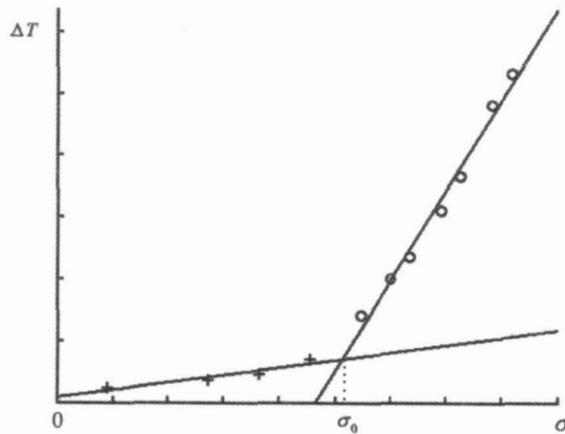


图 1 Luong 法确定疲劳极限

Fig. 1 A method to determine fatigue limit by Luong

1.2 S - N 曲线的确定方法

在图 1 中,可设两直线的方程分别为:

$$T^{ip} = A \tag{1}$$

$$T = (A + B) \sigma + b \tag{2}$$

去除非塑性作用引起的温升,可令:

$$T^p = T - T^{ip} = B \sigma + b \quad (\sigma \geq \sigma_0) \tag{3}$$

T^{ip} 是非塑性作用引起的温升值; T 是总温升; T^p 是由塑性功引起的温升值; A, B, b 为常数。

由热力耦合方程:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T - (\rho D : \dot{\epsilon}^e) T + S : \dot{\epsilon}^l \tag{4}$$

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

由式(4)可见,引起温度变化的原因有弹性和非弹性作用。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),因此(4)式可进一步写成:

$$c \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + Q^{ip} + Q^p \tag{5}$$

其中 Q^{ip} 和 Q^p 分别代表非塑性作用和塑性作用引起热耗散在单位体积内的耗散率,所以 Q^p 对应的稳定温升是 T^p 。因为热传导方程是线性偏微分方程,当温度稳定后, Q^p 与 T^p 成正比,有:

$$Q^p = \rho T^p \tag{6}$$

其中 C_1 是与材料属性和试件几何特征相关的常数。

而对温升起主导作用的是塑性功,可以假设:

1) 应力一定时,单位体积内的单周塑性功 W^p 是常数,所以当频率 f 一定时,单位体积内的塑性功率 w^p 也是常数;

2) 试件疲劳破坏消耗的总塑性功是常数。即:

$$W^p \times f = w^p = C_1 \tag{7}$$

$$W_i^p N_i = C_2 \tag{8}$$

W_i^p 为应力水平 σ_i 作用下单位体积内单周产生的塑性功; N_i 为试件在该应力下的疲劳寿命。 C_1, C_2 是材料常数。因此有:

$$W_j^p n_j = W_i^p N_i = C_2 \tag{9}$$

试件在不同应力作用下破坏, n_j 为 j 级应力对应的循环周次。假设塑性功率与由塑性功引起的热耗散率成正比,因此:

$$w^p = Q^p \tag{10}$$

结合式 (9),得到:

$$w_i^p = Q_i^p = T_i^p = T_i^p \tag{11}$$

T_i^p 是 $\sigma_i (\sigma_i \geq 0)$ 作用时由塑性作用引起的温升值。 T_i^p 为与材料属性和试件几何特征相关的常数。

将式(11)代入式(9),得到:

$$T_j^p n_j / f = T_i^p N_i / f \tag{12}$$

从而:

$$N_i = \frac{T_j^p n_j}{T_i^p} \tag{13}$$

这样就确定了材料在某一应力 σ_i 作用下的疲劳寿命 N_i 。不同应力可以得到不同的疲劳寿命值,因此用此方法可以快速确定试件的 S - N 曲线。

2 试验

2.1 试验方法

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。由试验温度数据可得等温线图 2。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 3 所示。

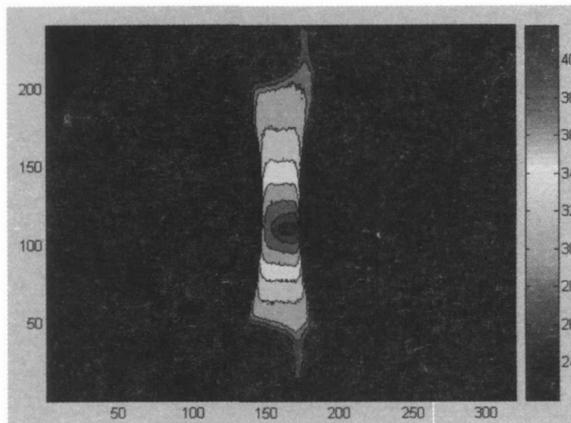


图 2 试件的等温线图

Fig. 2 The isothermal map of specimen

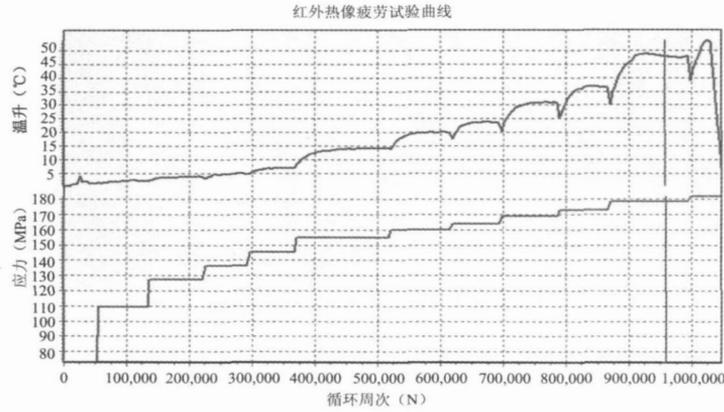


图3 步载荷下的温升 - 循环周次曲线

Fig. 3 Temperature rise-cycles curve under stepped loading procedure test

2.2 试验结果

试验获得了45#钢、Q235的疲劳极限和疲劳寿命。下面具体介绍45#钢试验数据的处理过程，Q235给出计算结果。

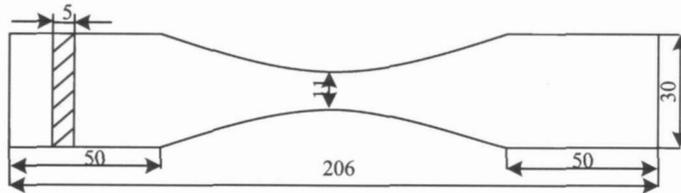


图4 45#钢试验试件(单位:mm)

Fig. 4 The testing specimen of 45# steel

2.2.1 45#钢的试验结果

对该种材料在室温下进行了三组试验。试验载荷比 $R = 0$, 加载频率分别为 143 Hz, 146 Hz, 144 Hz, 给出一组试验的计算过程: 结果如表 1, 数据点如图 5, 利用 Luong 法得到疲劳极限如图 6, $S - N$ 曲线如图 7。

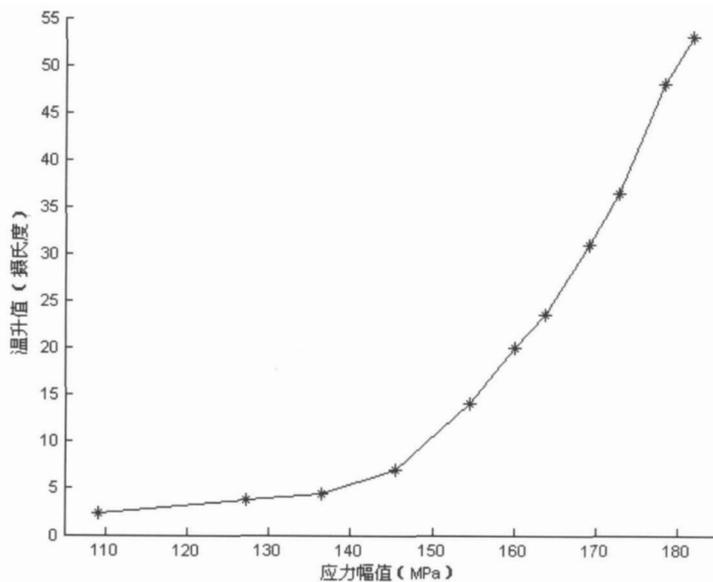


图5 45#钢应力 - 温升曲线

Fig. 5 Stress-temperature curve of 45# steel

表 1 45 # 钢的试验数据和计算结果

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

载荷 $F(\text{kN})$	6	7	7.5	8	8.5	8.8	9	9.3	9.5	9.8	10
应力幅 (MPa)	109.09	127.27	136.36	145.45	154.55	160	163.64	169.09	172.73	178.18	181.82
$T(^\circ\text{C})$	2.3	3.7	4.5	7	14	20	23.5	31	36.5	48	53
循环次数 ($\times 10^2$)	802	913	805	774	1515	990	816	949	811	1289	424
T^p					4.43	11.74	16.62	23.94	28.82	36.13	41.01
寿命 $N(\times 10^6)$					3.2071	1.2088	0.8540	0.5930	0.4926	0.3928	0.3461

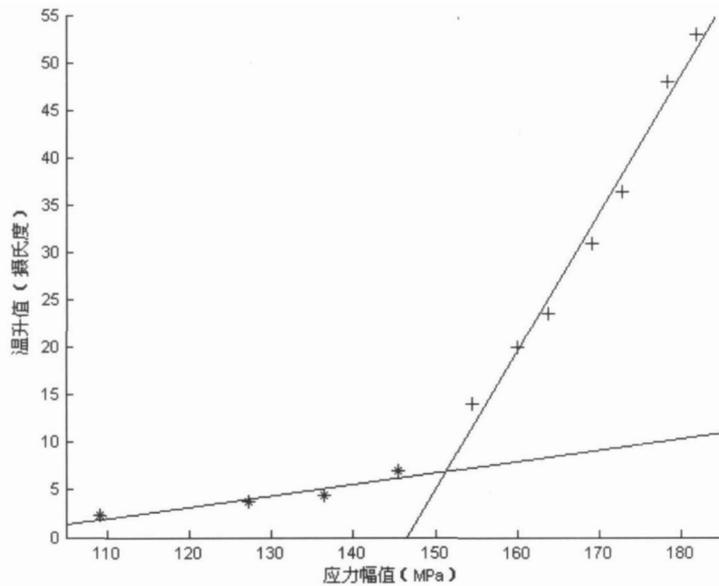


图 6 45 # 钢应力 - 温升拟合

Fig. 6 Stress-temperature fitting of 45 # steel

在图 6 中,两条直线的方程分别为 $T^p = 0.1197 - 11.1371$ 和 $T = 1.4612 - 214.0338$,两条直线的交点为 (151.2461, 6.9671),故 45 # 钢的疲劳极限 σ_0 为 151.2461MPa。

做了三组试验,得到的结果如表 2。

表 2 45 # 钢试验结果对比

Tab.2 The experiment result compare of 45 # steel

第一组 $\sigma_0 = 151.2461\text{MPa}$	应力幅 (MPa)	151.25	154.55	160	163.64	169.09	172.73	178.18	181.82
	寿命 $N(\times 10^6)$	10	3.2071	1.2088	0.8540	0.5930	0.4926	0.3928	0.3461
第二组 $\sigma_0 = 148.2097\text{MPa}$	应力幅 (MPa)	148.21	150.91	154.55	160.00	163.64	169.09		
	寿命 $N(\times 10^6)$	10	3.1690	1.350	0.725	0.554	0.410		
第三组 $\sigma_0 = 151.4049\text{MPa}$	应力幅 (MPa)	151.40	154.55	160.	163.64	169.09	172.73		
	寿命 $N(\times 10^6)$	10	1.860	0.679	0.477	0.330	0.274		

说明:三组数据在疲劳极限处的寿命认为是无限长,以 10^7 表示。

根据以上数据绘制双对数 $S - N$ 曲线如图 7。

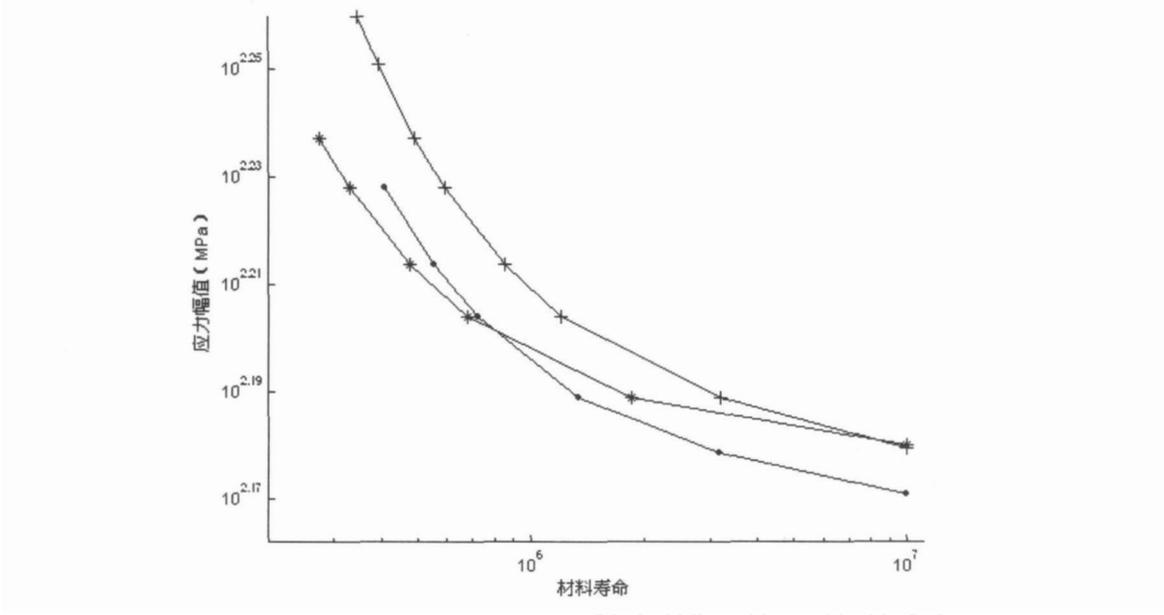


图 7 45 # 钢的 $S - N$ 曲线比较

Fig. 7 $S - N$ curve compare of 45 # steel

2.2.2 Q235 试验结果

试验载荷比 $R = 0$, 加载频率依次为 158 Hz, 164 Hz, 160 Hz。计算结果如表 3, $S - N$ 曲线如图 8。

表 3 Q235 的试验结果对比

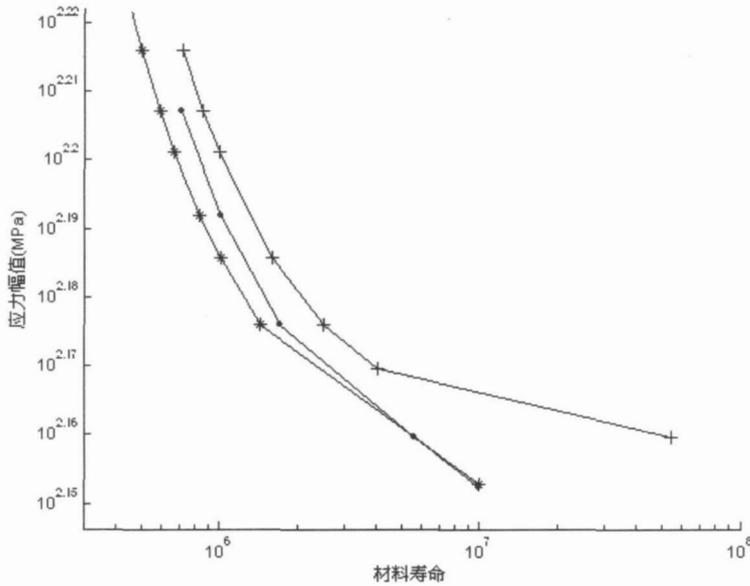
Tab. 3 The experiment result compare of Q235 steel

第一组 $\sigma = 142.04\text{MPa}$	应力幅 (MPa)	142.04	144.44	150.00	155.56	161.11			
	寿命 N ($\times 10^6$)	10	5.6049	1.6997	1.0017	0.7101			
第二组 $\sigma = 144.18\text{MPa}$	应力幅 (MPa)	144.44	147.78	150.00	153.33	158.89	161.11	164.44	
	寿命 N ($\times 10^7$)	5.4661	0.4041	0.2499	0.1589	0.0989	0.0859	0.0718	
第三组 $\sigma = 142.18\text{MPa}$	应力幅 (MPa)	142.18	150.00	153.33	155.56	158.89	161.11	164.44	166.67
	寿命 N ($\times 10^6$)	10	1.4305	1.0027	0.836	0.6692	0.5906	0.5021	0.4566

说明:第一和第三组数据在疲劳极限处的寿命认为是 10^7 。

根据以上数据绘制 Q235 钢的双对数 $S - N$ 曲线如图 8。

每次试验获得的疲劳极限相差很小, $S - N$ 曲线的离散性也不大,说明应用红外热像技术获得材料的 $S - N$ 曲线具有良好的稳定性。理论上,每个试件只需在高频试验机上试验几个小时,得到试件表面温度稳定阶段的温升值和对应的循环周次就可以得到材料的 $S - N$ 曲线,比传统的疲劳试验节省了大量的时间以及用于试验的试件和费用。

图 8 Q235 的 $S-N$ 曲线比较Fig. 8 The $S-N$ curve compare of Q235 steel

3 结论

借助测温工具红外热像仪,在塑性功不变的假设下,以温升、塑性功、热耗散等这些宏观量作为研究材料疲劳的重要参数,由此确定材料的疲劳寿命给出材料的 $S-N$ 曲线,可以为工程设计提供依据。

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] 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.
- [3] Minh Phong Luong, Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique[J]. Mechanics of Materials, 1998, 28(1-4):155-163.
- [4] 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))
- [5] Fargione G, Geraci A, La Rosa G, et al. Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(1):11-19.
- [6] 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 Defence Industry Press,1999 (in Chinese))
- [7] 徐灏著. 疲劳强度 [M]. 北京:高等教育出版社,1988 (XU Hao. Fatigue Strength [M]. Beijing: Higher Education Press,1988(in Chinese))
- [8] Yang B, et al. Thermographic detection of fatigue damage of reactor pressure vessel (RPV) steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003. 12(3):345-353.
- [9] Liaw P K, et al. Thermographic detection of fatigue damage of pressure vessel steels at 1000 Hz and 20 Hz[J]. Scripta Materialia, 2000, 42(4):389-395.

On the Use of Infrared Thermography Method for Material S - N Curve Prediction

HUANG Fang¹, NIE Xue-yuan¹, JIANG Zeng-rong², DING Hua¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. The Second Research Department, Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery, Beijing 100085, China)

Abstract : It is a general way to study material fatigue by fatigue test. An unsolved problem for fatigue test is long-term experiments, huge amounts of specimen and high cost. People are always seeking for a rapid method to obtain material fatigue properties. On the basis of predecessor's studies, the fatigue limit was established by using infrared thermographic method in this paper. Moreover, on the assumption that "a specific specimen depletes the same energy of plastic deformation", fatigue life equation was obtained by constructing the relationship among plastic temperature rise, heat dissipation and plastic work. Thus, material fatigue life and S - N curve can be theoretically determined by a simple experiment, which needs only one specimen and several hours.

Keywords : Infrared Thermography; stable temperature rise; heat dissipation; plastic work; S - N curve