

# 金属过载荷疲劳过程中的红外发射

黄 毅 李守新 林雪荣

(中国科学院金属研究所)

**摘要**——本工作采用红外传感方法研究几种金属材料在高速旋转弯曲疲劳过程中红外辐射能量的变化。实验结果表明,红外技术是研究金属材料过载荷疲劳动力学的有效手段,并有可能用于运转状态下超载和疲劳断裂报警。

金属材料的疲劳损伤过程,概括说来就是从裂纹成核到裂纹扩展的过程,而且在多数情况下裂纹的扩展过程占疲劳寿命的绝大部分<sup>[1]</sup>。

现在,红外技术已开始用于材料科学的研究<sup>[2~4]</sup>。红外技术的重要特点是实时和非接触。本工作是在高速旋转弯曲疲劳试验机上对试样进行红外动态监测,力图开拓疲劳实时无损监测的新方法。

金属材料内部若存在各种缺陷和组织结构不均匀,在承受交变负荷作用时,外界输入的机械功会使金属材料产生塑性变形、裂纹萌生和扩展,结果有很大部分的能量转变为热能耗散。利用红外技术可以探知这个过程的变化,从而为我们了解材料的疲劳行为提供一种动态的监测手段。

## 一、实 验 方 法

实验在 PW0510WG 型高速旋转弯曲疲劳试验机上进行,转速 5000 rpm。试样标距的直径为  $\phi 7.52$  mm,材料为 924 高强不锈钢、GH33 镍基高温合金和 GH135 铁基高温合金三种。

采用改装的 JWH-3 型红外测温仪对试样标距部位进行监测,其工作原理见图 1。

试样受载后发射的红外辐射经锗透镜聚焦,由调制盘调制成 30 Hz 交流信号,射至热释电红外探测器上。探测器将信号转变成幅值随所接收的红外辐射能量大小变化的电信号,经过放大,由程序控制器控制,进行实时记录。为突出标距部位的红外辐射能量变化,使用一块中心孔径为 9 mm 的红外反射镜(见图 1 零件 2),将其标距以外的红外辐射能量反射掉。因此,这套系统用来监测试棒

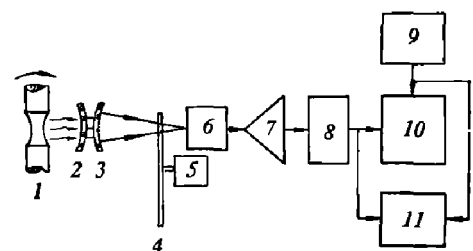


图 1 用于疲劳实验的红外监测系统原理图

1—试样; 2—红外反射镜; 3—红外透镜;  
4—调制盘; 5—马达; 6—红外探测器; 7—前置放大器; 8—鉴相器; 9—程序控制; 10—数字显示(打印); 11—X-Y 记录

本文 1982 年 8 月 31 日收到。修改稿 1983 年 8 月 15 日收到。

中心部位  $0.8 \text{ cm}^2$  的区域。仪器的工作波段为  $2 \sim 14 \mu\text{m}$ 。

首先对试样进行温度与红外辐射能量的定标,由电加热系统对标定试样提供热源,然后一方面以红外探测器接收红外辐射能量,一方面由焊接在标定试样上的温差电偶同时测定温度,两者进行对比标定。红外测温仪可分辨的最小温差为  $0.3^\circ\text{C}$ 。

为增大金属的表面比辐射率,试样采用了红外透射涂料<sup>[5]</sup>,它既能增大比辐射率,又能便于观察表面裂纹。试验在室温下进行,红外锗透镜距试棒中心为  $5 \text{ cm}$ 。为了尽量减少夹具与试样间热传导的影响,安装接口处涂以脂剂,以增强隔热的作用。

实验目的是监测高塑性材料(924 不锈钢)及较低塑性材料(GH135 和 GH33)的疲劳行为,观察裂纹的形成和发展与红外辐射能量之间的关系。

## 二、实验结果

实验测定了室温下用来冷却运转轴承的冷却油温度在疲劳试验过程中对试棒标距部位的红外辐射能量变化的影响(图 2)。发现,在恒定室温的条件下,在通循环油冷却直到加荷的过程中,因轴承摩擦生热所致,冷却油温明显升高,然而在标距部位的红外辐射值仍基本保持不变。可见红外测温仪测得的信号电压变化只反映标距部位在疲劳过程中的辐射能量变化。

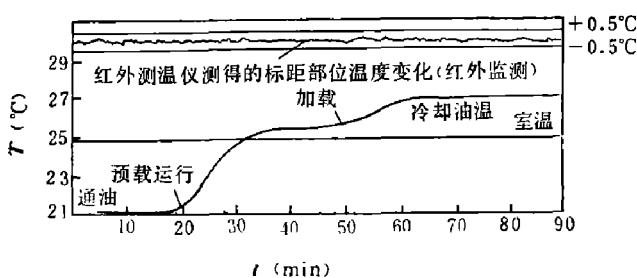


图 2 疲劳试验环境对标距部位红外辐射能量变化的影响

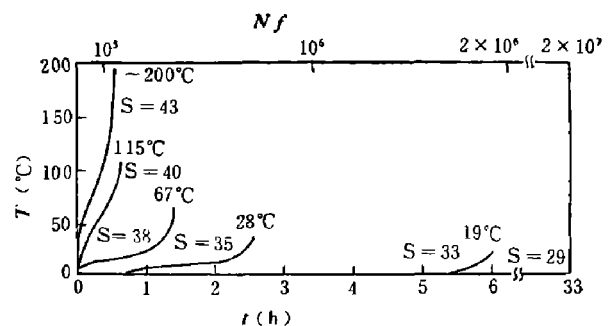


图 3 924 不锈钢疲劳温升曲线  
S—循环断裂应力 ( $\text{kg f/mm}^2$ )

图 3 表示 924 不锈钢疲劳温度的增升情况,从中可以看出,大应力时,加载一开始即出现温升;随着应力的减小,温升速率渐趋平缓。应力进一步降低时(即疲劳寿命  $N_f > 10^5$  时),试样起初并不出现温升,只有到疲劳寿命的中、后期才观察到温升,而通过  $10^7$  次循环尚未断的试样没有红外发射能量变化。

疲劳试验断裂时的最终温度增升,由大应力时的几百度到小应力时的十几度,变化幅度大,其变化的幅度随着应力的降低而下降。

以循环断裂应力的增量  $\Delta S$  对经过  $N_f$  次循环断裂的温升对数  $\log T$  作图,显然成直线关系(见图 4),其方程式为

$$T = Ae^{B\Delta S}, \quad (1)$$

常数  $A$  与  $B$  由材料性能和实验条件确定。式(1)中  $A$  的物理意义在于当  $S = S_0$  时,  $A = T_0$  (室温),即样品所处的环境温度。由此表明,当通过疲劳极限循环时金属材料没有红外发射能量变化,即材料经受的疲劳应力等于或小于疲劳极限的情况下,材料不产生范性形变,这样的疲劳载荷是安全的。

式(1)中  $B$  值的大小反映了疲劳断裂温升随疲劳应力变化的快慢, 它与材料的性能有关。从图 4 可以看出 GH33 和 GH135 合金也存在类似的规律, 仅  $B$  值不一样而已。表 1 列出这三种合金的  $B$  值与材料的性能数据。

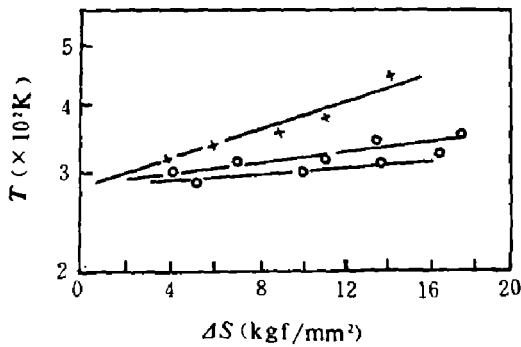


图 4 几种金属材料的疲劳断裂温度  $T$  和  
疲劳断裂应力增量  $\Delta S$  的关系曲线  
×(上)—924 不锈钢; ○(中)—GH135 合金;  
□(下)—GH33 合金

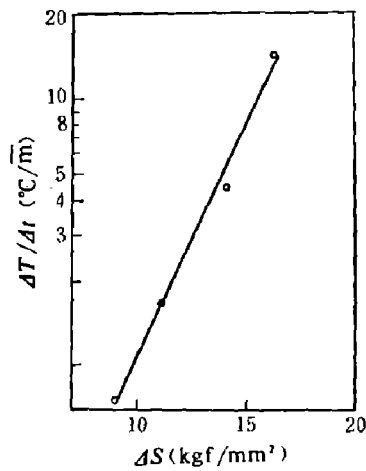


图 5 924 不锈钢初始疲劳的温度变化  
速率( $\Delta T/\Delta t$ )和疲劳断裂应力增量 ( $\Delta S$ )  
的关系曲线

表 1 合金的性能与  $B$  值

合 金 牌 号	极 限 强 度 $\sigma_b$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	延 伸 率 $\delta$ (%)	面 缩 率 $\psi$ (%)	导 热 系 数 (100°C) $\lambda$ (cal·cm/cm <sup>2</sup> ·s·°C)	计 算 的 $B$ 值
924 不 锈 钢	85	50	70	0.030	0.020
GH135	122	25.6	37	0.026	0.007
GH33	104	20	21	0.032	0.003

由表 1 看出, 塑性指标正比于  $B$  值, 即塑性高的金属材料在疲劳循环过程中产生的热量也较大。

就疲劳过载荷的监测而言, 若已知使用材料的疲劳极限和疲劳应力的过载量, 就可以求出疲劳断裂时的温度增升值。这对疲劳过载寿命的监测将具有实际意义。

924 不锈钢在大应力疲劳 ( $N_f < 10^5$ ) 循环的情况下, 加载一开始就产生温升, 并与时间的变化呈近似线性关系, 而且温度变化速率  $\Delta T/\Delta t$  ( $t$  为时间) 对疲劳断裂应力的增量  $\Delta S$  也满足指数关系(见图 5)。

$$\frac{\Delta T}{\Delta t} = C e^{D \Delta S}, \tag{2}$$

式中  $C$ 、 $D$  是与材料和实验条件有关的常数。

这种材料若过载应力较大, 根据实验初期红外辐射能量的变化就可预报超载。应力接近疲劳极限时, 疲劳寿命的前期和中期很少有红外辐射能量的变化, 但当接近断裂时热效应明显, 籍此也可作疲劳断裂的报警。例如, 高塑性 924 不锈钢可提前十分钟, 较低塑性 GH33 合金也可提前五分钟左右。

为研究红外辐射能量变化与疲劳损伤的关系, 测定了疲劳红外辐射能量变化的曲线。试样经过轴向精细抛光, 在试验的各个阶段不断停机作光学观察。图 6 和图 7 是两种典型合金的疲劳红外辐射能量变化曲线。

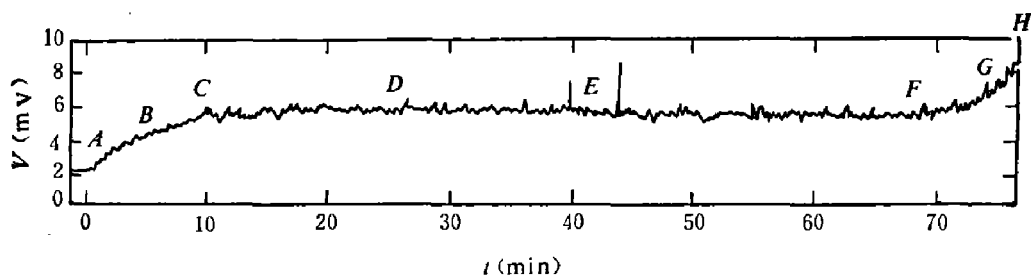


图6 924 不锈钢的疲劳红外辐射能量变化曲线 ( $S=38 \text{ kg f/mm}^2$ )

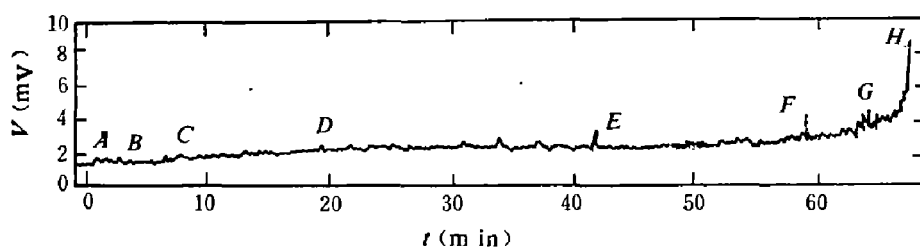


图7 GH33 合金的疲劳红外辐射能量变化曲线 ( $S=52 \text{ kg f/mm}^2$ )

图中  $A$  表示加载开始,  $H$  表示疲劳断裂点。试样在运转过程各阶段的光学观察表明, 其标距部位在  $A$ 、 $B$ 、 $C$  阶段均未发现裂纹; 在  $C$ 、 $D$  阶段发现很小的裂纹萌生。 $D$ 、 $E$  则是微观裂纹向宏观裂纹转化的阶段, 此时的裂纹长度已大于  $0.02 \text{ mm}$ , 但仍需用高倍显微镜才能观察到。 $E$ 、 $F$  是裂纹缓慢扩展时期。在高应力情况下, 裂纹开始连接, 直到此时其长度才接近  $0.1 \text{ mm}$ 。上述各阶段占据了疲劳寿命的绝大部分时间。 $F$ 、 $G$  是裂纹稳步扩展阶段, 此时疲劳裂纹已经连接成片, 对应红外辐射能量也发生显著变化。随着红外辐射能量的急增, 疲劳过程进入寿命的最后阶段  $G$ 、 $H$ , 即疲劳裂纹快速扩展直到发生断裂的过程。

### 三、讨 论

经验方程式(1)仅适用于疲劳载荷大于疲劳极限应力的情况。各种转动部件在实际运行中由于启动、加力或加速、停车等因素, 总要受到不同程度的疲劳过载, 这些过载在某些场合下将导致部件过早损坏。通过对过载疲劳部件的红外无损监测, 有可能估算出过载使用的疲劳寿命。

已经知道, 疲劳  $S-N_f$  曲线绝大部分的有用范围都可近似地绘成双对数坐标图的直线。图8示出 924 不锈钢  $S-N_f$  的简化曲线。因此, 过载疲劳应力  $S$  与疲劳断裂寿命  $N_f$  的关系可写成

$$S = E' \frac{1}{N_f^{1/b}} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 得 924 不锈钢过载条件下, 疲劳初期材料温度增升的速率与过载疲劳寿命的函数关系为

$$\frac{\Delta T'}{\Delta t} = c' \exp [G/N_f^{1/b}], \quad (4)$$

式中  $G$  和  $b$  都是与材料性能和实验条件有关的常数。

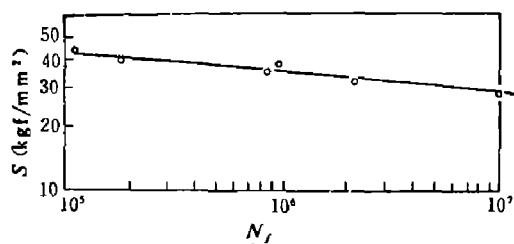


图8 924 不锈钢的  $S-N_f$  曲线

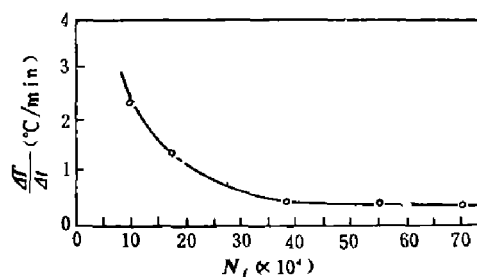


图9 924 不锈钢疲劳初期温升速率  $\Delta T/\Delta t$  与  
过载疲劳寿命  $N_f$  的关系曲线

实线为计算值,  $\circ$  为实验数据  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta t} = 0.038e^{14.24N_f^{-0.4}}\right)$

图9 给出 924 不锈钢过载疲劳初期温升速率与过载疲劳寿命的试验数据和计算结果。由此可见一致性较好。

实验证明, 金属材料经受过载荷时, 红外辐射能量的产生大大超前于疲劳裂纹的产生, 借此可形成一种监测过载疲劳损伤的可行手段。

## 四、结 论

红外技术具有非接触、无损伤和实时性的特点, 是研究金属材料疲劳过程的有力手段, 有可能提供研究金属材料疲劳动力学过程的细节。

在过载荷条件下, 待研究的几种金属材料的疲劳断裂温度增升与疲劳断裂应力增量存在指数关系。

高塑性金属在大应力疲劳循环开始时的温升速率与疲劳断裂寿命有联系, 因此有可能利用红外技术来进行运行状态下的超载和疲劳断裂报警。

致谢——本文经师昌绪先生指导和修改, 作者表示衷心感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Laird C., *Mat. Sci. & Eng.*, **22**(1976), 231~236.
- [2] 黄毅、徐军, 无损检测技术, (1980), 2: 6.
- [3] Talug A. et al., *Proceedings of the Third Biennial Information Exchange*, AGA Co., 1978, c29.
- [4] Huang Y. et al., *Materials Evaluation*, **38**(1980), 12:77.
- [5] 黄毅等, 中国科学院金属研究所, 金情 **80-088**(1980).

# INFRARED EMISSION OF THE OVERLOADED METALS DURING THE FATIGUE PROCESS

HUANG YI, LI SHOUXIN, LIN XUERONG

*(Institute of Metal Research, Academia Sinica)*

## ABSTRACT

The variation of the infrared radiation energy of some steels is studied by the method of infrared sensing during high-speed revolving-bending fatigue test. The experimental results show that the fatigue overloading and the initial crack during fatigue test can be detected, and warning may be given before fracture.