

LY12CZ 铝合金疲劳试验热耗散能研究

Research on Heat Dissipation in Fatigue Test of Aluminum Alloy LY12CZ

西北工业大学中法虚拟设计与制造技术联合研究室 夏哲陶华

西北工业大学国防科技研究院 李斌 童小燕

[摘要] 基于热力学第一定律,以试样瞬时冷却速率为参量,建立了一个单个循环单位体积材料的热耗散能模型。利用红外热像仪对 LY12CZ 铝合金试样疲劳过程进行非接触式连续测量,研究结果表明:LY12CZ 硬铝合金试样表面温度的变化历经明显上升、相对稳定、迅速上升至断裂 3 个阶段;循环稳定阶段试样表面温度出现波动,波动幅值随应力幅的增加而增大;单位体积材料单个循环的热耗散能随应力幅的增加而增大。

关键词: 能量耗散 热耗散能模型 温度响应 应力幅

[ABSTRACT] Based on the first law of thermodynamics, a theoretical model is developed in order to calculate the thermal energy dissipated per unit volume and per cycle, in which the cooling rate of the specimen is a parameter obtained from the test. According to the continuous noncontact measurement during the fatigue test of LY12CZ aluminum alloy by using infrared thermography, the surface temperature of material increases at the beginning of the test, then tends to a stationary value and rapidly increases till fracture finally. The surface temperature oscillates around the stationary value with small amplitude which increases with the increase of stress amplitude. The higher the stress amplitude applies, the higher the thermal energy dissipates per unit volume and per cycle.

Keywords: Energy dissipation Heat dissipation model Temperature response Stress amplitude

热耗散是疲劳损伤过程中的重要能耗现象,它在疲劳过程中的各种能量耗散形式中占有很重要的地位。通过计算热耗散能,就可以分析疲劳过程中的能量耗散规律。然而实际上,热耗散能不可能直接测得。所以,还需寻找其他能表征这种能量耗散规律的参量。

O.PLEKHOV^[1]运用红外热成像法,以温度的标准

偏差(SDT)为参量,研究了中周疲劳试验中的疲劳裂纹萌生和扩展规律。A.L.Audenino^[2]运用红外温度测量法和自由衰减曲线非线性分析法验证了循环加载试样的温度变化和阻尼比之间的现有关系。T.Boulanger^[3]采用量热法,基于简单热学公式进行数据处理,估算出 DP60 钢疲劳过程中的能量耗散和热弹性源。Blotny^[4]等用电流模拟材料疲劳自热源,用电热源强度来表征热耗散能量。姜菊生等^[5-6]提出电阻和韧性都可以作为表征材料损伤的参量,并给出了估算材料寿命的公式。

本课题引入试样瞬时冷却速率作为参量,建立了一个单位体积材料单个循环的热耗散能模型。它是一个与试验频率、试样几何形状和热边界条件有关的常数,更适合作为用于工程材料疲劳强度分析的参数。通过对 LY12CZ 铝合金进行疲劳试验,计算某一时刻单位体积材料单个循环的热耗散能,分析应力幅对它的影响,从而研究疲劳损伤过程中的能量耗散规律。

1 热耗散能模型的建立

材料的疲劳损伤源于循环过程中塑性应变能的累积。疲劳过程中累积的塑性应变能,一部分由于材料显微结构发生不可逆变化而消耗,其余以各种形式耗散,其中绝大部分由于内摩擦而转化为热能。如果忽略诸如声发射、电、磁之类的能量耗散,由能量守恒(热力学第一定律)可知,外界输入的机械能应该等于热耗散能与材料内部能量增量(储能)之和,即如下的能量平衡方程:

$$W=Q+U \quad (1)$$

假设时刻 t 在 (x,y,z) 处的温度场为 $T(x,y,z,t)$,如图 1 所示,体积为 V 的材料外表面 S 可以分成 3 个部分: S_{cd} 、 S_{cn} 、 S_r , 分别表示热量 Q 传递到环境中的 3 种方式:热传导、热对流、热辐射。由传热学原理^[7-8]得到如下能量耗散模型:

$$\int_V \left(\oint_{ij} \cdot d_{ij} \right) \cdot f \cdot dV = \int_{S_{cd}} - \cdot \text{grad}T \cdot n \cdot dS_{cd} +$$

$$\int_{S_s} h \cdot (T - T_0) dS_{cv} + \int_{S_s} \sigma_b k (T^4 - T_0^4) dS_r + \int_V \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) dV, \quad (2)$$

式中, σ_{ij} 、 ϵ_{ij} 表示单位体积材料的应力和应变, f 为加载频率, k 为热传导系数, h 为对流换热系数, σ_b 为表面发射率, T_0 为室温, σ_b 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$, c 为比热, ρ 为材料密度。

\dot{E}_p 是单位体积材料临界破坏能, $\text{grad}T$ 表示某一时刻沿温度增加方向上的温度变化率, 即温度梯度。由高斯公式得,

$$\int_{S_{cd}} \text{grad}T \cdot n \cdot dS_{cd} = \int_V \text{div}(\text{grad}T) \cdot dV = \int_V \nabla^2 T \cdot dV,$$

式中, $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \text{div}(\text{grad}T)$, ∇^2 即拉普拉斯算子。则式(2)可简化为

$$\int_V \left(\sigma_{ij} \cdot d_{ij} \right) \cdot f \cdot dV = \int_V \rho \cdot c \cdot \nabla^2 T \cdot dV + \int_{S_s} h \cdot (T - T_0) dS_{cv} + \int_{S_s} \sigma_b k (T^4 - T_0^4) dS_r + \int_V \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right) dV. \quad (3)$$

一般工程结构采用的金属材料对流传热能力比热传导能力低, 因此对于矩形截面光滑平板试样(见图2), 可以认为材料内部温度在截面上是均匀分布的。

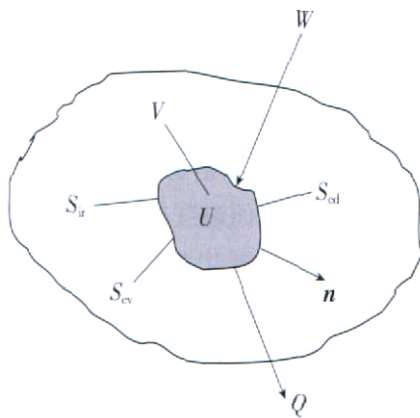


图1 疲劳加载过程中材料的能量平衡
Fig.1 Energy balance for a material during fatigue loading process

微元体积和侧面积可由下式得到:

$$dV = A \cdot dz,$$

$$dS = dS_{cv} = dS_r = p \cdot dz = \sum_i l_i \cdot dz, \quad (4)$$

其中, A 表示截面面积, p 表示截面周长, l_i 表示截面第 i 条边的长度。代入式(3)并整理得

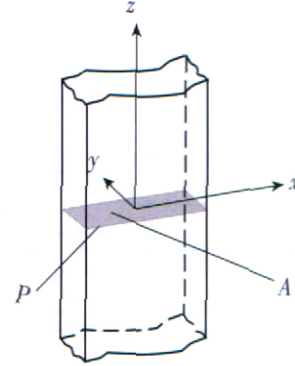


图2 矩形截面光滑平板试样
Fig.2 Plain specimen with a rectangular cross section

$$\left(\sigma_{ij} \cdot d_{ij} \right) \cdot f = \rho \cdot c \cdot \nabla^2 T + h \cdot (T - T_0) \cdot \frac{p}{A} + \sum_i (k_i \cdot l_i) \cdot \frac{p}{A} \cdot (T^4 - T_0^4) + \left(\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \dot{E}_p \right). \quad (5)$$

假定在时刻 t^* 疲劳试验突然停止, 试样表面某一点温度为 T , 如图3所示。在这一时刻, 外部输入机械能为零, 塑性变形停止累积, 因此式(5)可简化为

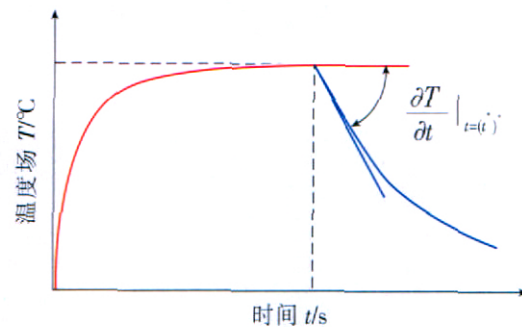


图3 通过 $t=(t^*)^+$ 试样冷却速率估算 Q 值
Fig.3 Determination of Q by experimental measurement of the cooling rate at $t=(t^*)^+$

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=(t^*)^+} = - (H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}). \quad (6)$$

在时刻 t^* , 试样表面温度和室温都是定值, 与其有关的 H 也是常量。因此, 试样表面给定点的单位体积热耗散能(即 $H = H_{cd} + H_{cv} + H_{ir}$) 可以通过测量疲劳试

表 1 材料力学性能

抗拉强度 σ_b /MPa	屈服极限 σ_s /MPa	延伸率 δ /%
457~460	336~343	14.8~17.4

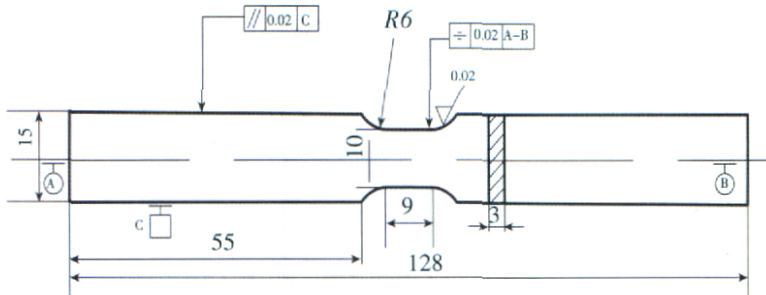


图 4 试样尺寸

Fig.4 Size of the specimen

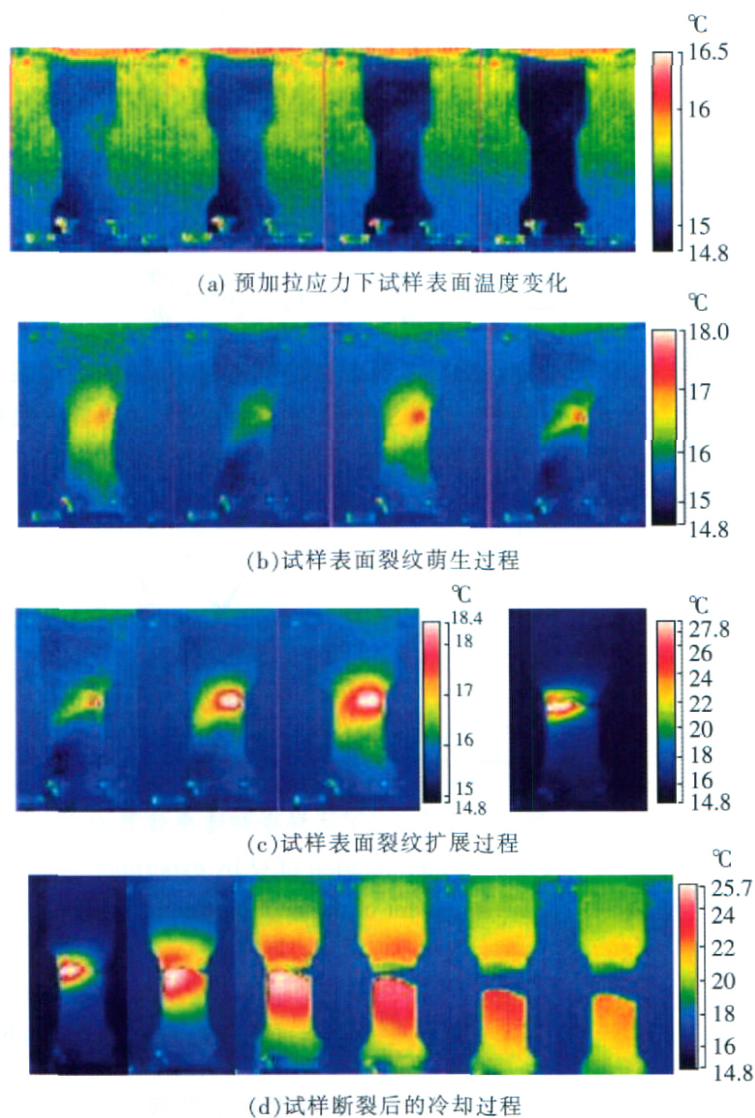


图 5 疲劳过程中试样的热像图

Fig.5 Infrared photos of specimens during fatigue process

验突然停止时该点的冷却速率 $\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=(t)^*}$, 结合式(6)估算得到。已知试验频率 f , 可由式(7)估算出 t^* 时刻单位体积材料单个循环的热耗散能 Q 的值:

$$Q = \frac{H}{f} = -\frac{c}{f} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{t=(t)^*} \quad (7)$$

2 试验方法

试验材料选用 LY12CZ 铝合金, 其力学性能见表 1。试样为光滑板试样, 其形状和尺寸如图 4 所示, 表面喷漆。试验在 Instron8801 材料试验机上完成, 采用应力控制方式, 控制波形为正弦波, 应力比为 0.1, 频率为 10Hz。为了同步测量试样表面在疲劳过程中的变化, 试验采用 ThermoCAMSC3000 型红外热像仪对试样表面温度进行测量, 该热像仪具有极高的热灵敏度, 其测量精度可达到 0.02。

3 试验结果与分析

从不可逆热力学过程来看, 疲劳过程中有大量热能产生。其中大部分的热能是由内摩擦引起的, 即晶体(晶粒)的一部分相对于另一部分作晶内剪切移动时引起的。另外, 在塑性变形期间, 运动位错将原子震荡, 使得能量大部分转换为热。因此, 在材料的不同部位, 由于缺陷分布和运动的差异, 各材料体积单元中产生的热能不相等, 使得试样内部发生热传导, 并且在试样与环境之间产生热交换。

图 5 显示了铝合金试样在恒幅循环加载过程中的表面温度场变化。同图 6 所示的试样表面温度变化曲线结合在一起来分析, 可以发现, 在开始阶段, 给试样施加预拉应力, 由于材料处于弹性范围, 塑性应变能和热耗散的量很小, 热弹性效应占主导地位, 试样温度不断降低。尔后, 对试样进行循环加载, 随着塑性应变能的累积, 材料的温度不断升高。循环初期, 材料内部显微结构的稳定平衡状态遭到破坏并发生较剧烈的变化, 产生大量诸如空穴增长、位错增殖等不可逆的畸变并释放热能, 由于此时试样和环境之间温度差比较低, 显微结构变化时释放

的热能对流损失少,使产生的热量几乎都用于提高试样的温度,所以温度上升较快。进入稳定循环阶段后,材料具有相对较稳定的晶格缺陷,显微结构的变化趋于稳定,试样的热耗散和试样与环境之间的热交换量也大致相当,所以试样表面温度的变化比较稳定。在宏观裂纹扩展阶段,随着材料塑性变形的快速增加,裂尖处的能量要快速释放,使试样表面温度急剧上升,试样右侧出现微裂纹并向左侧扩展,直至试样断裂。

随着应力的循环变化,试样的温度相应地出现循环变化,在图6中显示为曲线的波动。这种现象可以定性解释为:在一个加载循环内,塑性应变能并不总是增加的。在很长的时间段内,由于材料处于弹性加载状态,塑性应变能速率接近于零。在这一阶段,由于试样温度高于环境温度,热能不断向环境耗散而试样内部没有新的热能产生,致使试样温度降低;而在材料进入塑性加载后,大量塑性应变能转化为热能,使试样温度升高。于是出现循环内试样温度的循环变化。在整个稳定循环阶段,试样表面温度波动幅值基本保持不变,比较图7中5个应力幅下该波动幅值的变化情况发现,试样温度随着应力幅的增加而增大。

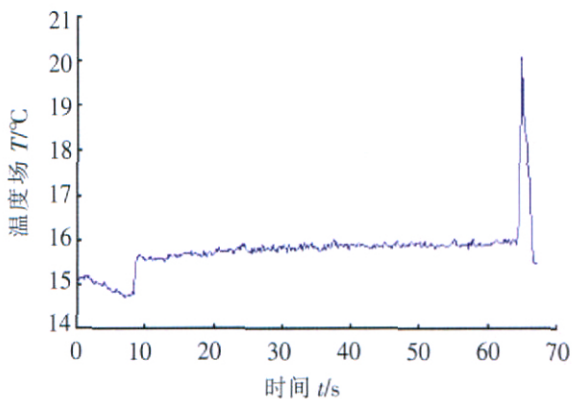


图6 疲劳过程中试样表面温度变化
Fig.6 Surface temperature change of a specimen during fatigue process

图8显示了同一时刻停止加载后,试样冷却速率的变化。比较不同应力幅下试样的冷却曲线发现,应力幅值越大,试样冷却速率越快。LY12CZ硬铝合金的密度 $\rho=2780\text{kg/m}^3$,比热容 $c=0.92\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,对图8中的曲线进行多项式拟合计算时刻 t^* 处的斜率,结合式(7)计算出单位体积材料单个循环的热耗散能 Q 的值,结果见表2。不难发现, Q 值随着应力幅的增加而增大

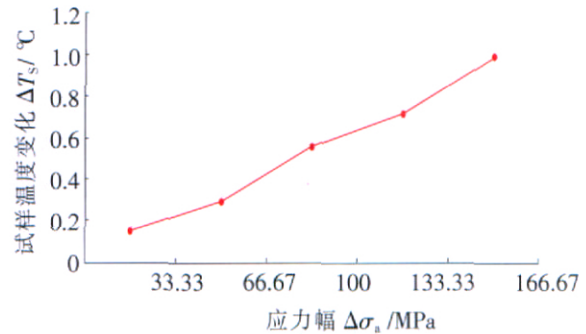


图7 不同应力幅对试样温度波动幅值的影响
Fig.7 Influence to the oscillated amplitude of specimen temperature by different stress amplitude

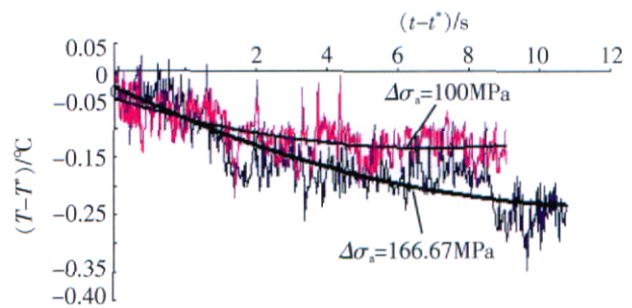


图8 不同应力幅下试样冷却速率图
Fig.8 Cooling rate of specimens in different stress amplitude

表2 对应不同应力幅的 Q 值

σ_a/MPa	Q/kJ
33.33	3.146
66.67	4.041
100	4.911
133.33	6.062
166.67	7.494

4 结论

(1) LY12CZ硬铝合金疲劳损伤过程中,试样表面温度的变化历经3个阶段:在循环初期,温度变化较快,进入稳定细观裂纹扩展阶段后,温度变化相对稳定。在失稳扩展阶段,温升变化突然加快,并在疲劳失效时出现失稳。

(2) 随着应力的循环变化,试样的温度相应地出现循环变化。在稳定循环阶段,试样表面温度出现波

动,波动幅值基本保持不变,并且随着应力幅的增加而增大。

(3)通过计算某一时刻试样的冷却速率,结合给出的热耗散模型,计算出相应时刻单位体积材料单个循环的热耗散能,发现热耗散能随着应力幅的增加而增大。

参 考 文 献

[1] PLEKHOV O, PALIN - LUC T, SAINTIER N, et al. Fatigue crack initiation and growth in a 35CrMo4 steel investigated by infrared thermography. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 2005, 28:169~178.

[2] Audenino A L, Crupi V, Zanetti E M. Correlation between thermography and internal damping in metals. *International Journal of Fatigue*, 2003,25: 343~351.

[3] Boulanger T, Chrysochoos A, Mabru C ,et al. Calorimetric analysis of dissipative and thermoelastic effects associated with the fatigue behavior of steels. *International Journal of Fatigue*, 2004,26:221~229.

[4] Kaleta J, Blotny R, Harig H. The accumulated internal energy in the fatigue strength region. *Advances in Fracture Research. Proc 7th International Conference on Fracture (ICF7)*, Pergamon, 1989.1 195~1 202.

[5] 姜菊生,许金泉.金属材料疲劳损伤的电阻研究法. *机械强度*, 1999(9): 232~234.

[6] 姜菊生,张伟根,郭乙木,等.金属材料疲劳损伤的定量研究. *材料科学与工程*. 2000(3): 43~46.

[7] 胡汉平,程文龙. *热物理学概论*. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.219~292.

[8] Meneghetti G. Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation. *International Journal of Fatigue*, 2007,29: 810~94.

[9] 马庆芳,方荣生,项立成,等. *实用热物理性质手册*. 北京:中国农业机械出版社, 1986: 668. (责编 金卯)

(上接第 83 页)

4 结束语

资源建模是制造网格实现的前提和关键技术。构造的制造资源层次模型既包含了资源的所有信息,又(屏蔽了资源内部交互的细节,只是通过接口向用户提供标准化的访问方式,很好地满足了制造网格体系结构下从资源到服务的抽象对服务共享的要求。基于Web 服务技术对模型的实现有效地利用了Web 服务面向服务架构的优势,有利于网格体系结构下制造资源的全面集成和动态共享。最后对软件资源库类资源

和设备类资源进行了建模验证。

参 考 文 献

[1] Ian F, Carl K, Steve T. The anatomy of the grid: enabling scalable virtual organizations. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2001, 15: 200- 222.

[2] Fan Yushun, Zhao Dazhe, Zhang Liqin, et al. Manufacturing grid: needs, concept, and architecture. *GCC 2003, LNCS3032*, 2004, 653- 656.

[3] Qiu G. Manufacturing grid: a next generation manufacturing mode. *IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics*, 2004, 4 667- 4 672.

[4] Li Chen, Deng Hong, Deng Qianni, et al. Research on the framework of grid manufacturing. *GCC 2003, LNCS3032*, 2004, 19- 25.

[5] Shi Shengyou, Mo Rong, Yang Haicheng, et al. An implementation of modeling resource in a manufacturing grid for resource sharing. *International Journal of Computer Integration Manufacturing*, 2007, 20: 169- 177.

[6] 石胜友,莫蓉,杨海成等.面向网格服务的标准件库系统集成. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, 18 (4): 551- 555.

[7] 刘丽兰,俞涛,施战备.制造网格中基于服务质量的资源调度研究. *计算机集成制造系统*, 2005, 11(4): 475- 480.

(责编 依然)

“汽车零部件及批生产工艺技术研讨会”在 杭州圆满落幕

2008年6月20日,由德国巨浪公司与瑞典山特维克可乐满联合举办的“汽车零部件及批生产工艺技术研讨会”在杭州市召开。近50个公司的80位代表参加了本次技术研讨会,众多与会公司皆为汽车零部件制造行业的知名企业。

本次交流会重在机床和刀具制造厂商与使用方单位之间的双向交流,重在研讨。贯穿研讨会始终的是以典型汽车零部件为线索的工艺技术方面的交流,重点关注的零件包括:转向节、差速器壳体、变速箱壳体、制动钳体、油泵壳体、增压器壳体等。

巨浪机床的先进功能和品质以及山特维克可乐满刀具的过人品质在工件的加工过程展示中得以充分的体现。巨浪机床重点展示了加工过程中在一台机床上实现多工位、集中工序的高效加工能力;山特维克可乐满则重点展示了Coromill490等新产品及其他一些汽车零部件加工的专用刀具。(本刊记者 依然)