

保证试验对陶瓷试件疲劳强度的影响

吕宝桐 王 弘

(西北工业大学材料科学与工程系, 西安, 710072)

EFFECT OF PROOF TESTING ON FATIGUE STRENGTH OF CERAMICS

Lu Baotong, Wang Hong

(College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

摘 要 应用断裂力学理论分析了保证试验对陶瓷试件造成的损伤及其对疲劳强度的影响。保证试验后试件的最低强度可根据材料的亚临界裂纹扩展参量、保证应力和保证试验的卸载速率估算。采用惰性试验环境和高的卸载速率可获得较高的试件最低剩余强度值。

关键词 陶瓷 疲劳 强度 保证试验

中图分类号 V215.5, V254.2

Abstract The effect of proof testing on the fatigue strength of ceramic specimens is analyzed by means of the fracture mechanics approach. It is shown that the damage during proof testing is hard to avoid and the minimum specimen strength after the testing can be assessed by the proof stress, the unloading rate in the proof-test and the subcritical-crack-growth parameters of material in the environment where the test is carried out. Higher minimum strength can be obtained by adopting the inert testing environment and the high unloading rate.

Key words ceramics, fatigue, strength, proof-test

为提高陶瓷构件的可靠性,在其投入使用前一般要通过保证试验,即对构件施加远高于服役载荷的应力(保证应力)以淘汰批量产品中较弱的个体^[1]。试验过程同时也可能造成存活构件的损伤^[2,3]。损伤主要来自材料中缺陷(裂纹)的亚临界扩展^[4]。一般认为采用快速加载卸载方式或惰性试验环境可避免造成损伤^[2,3]。但已发现某些陶瓷材料在真空中的亚临界裂纹扩展^[5]。实验表明^[6],抑制陶瓷材料的亚临界裂纹扩展所需加载速率只有在高速冲击加载的条件下方可实现。这对实际操作中准确控制保证应力造成困难。因此,保证试验造成损伤是更普遍的情况,有必要进一步研究其规律。

1 理论分析

陶瓷材料的亚临界裂纹扩展速率 V 可表示成应力强度因子 $K_I (= YR\sqrt{a})$ 的函数^[4]

$$V = da/dt = V_c (K_I / K_{IC})^n \quad (1)$$

亚临界裂纹扩展参量 V_c 和 n 为实验常数。陶瓷试件断裂时的裂纹尺寸 a 很小, Y 可视为常数。在外力 R 的作用下, t 时刻的试件强度 R 因裂纹扩展随时间的衰减速率为^[2]

$$\dot{R} = - \frac{K_{IC} V}{2Ya^{3/2}} = - \frac{Y^2 V_c}{2K_{IC}} \left(\frac{R}{R_c} \right)^n R_c^2 \quad (2)$$

令 $R_c = R_{I=0} = K_{IC} / Y\sqrt{a_0}$, a_0 为裂纹原始尺寸。对式(2)积分可得

$$R_{c,t}^n = \int_0^t \dot{R} dt = B (R_c^2 - R^2) \quad (3)$$

其中: $B = 2K_{IC}^2 / (Y^2(n-2)V_c)$, 等效应力 R_{eq} 的定义如下^[7]

$$R_{eq} = g R_{max} \quad (4)$$

R_{max} 为最大外加应力, 无量纲因子 g 由下式给出,

$$g = \left[\int_0^1 (R_0 / R_{max})^n d(S/t) \right]^{1/n} \quad (5)$$

当 $t = t_f$, $R = R_0 = R_0(t_f)$, 试件断裂。对于陶瓷试件, $R_0 \propto m R_f^{2-m}$ 。代入式(3)得

$$R_{eq} t_f = B R_f^{2-m} \quad (6)$$

保证试验的典型加载历程包括: 加载至保证应力 R_0 (加载速率 \dot{R}); 在 R_0 保持一段时间 t_H ; 卸载(卸载速率 \dot{R})。保证试验时间 t_p 及等效保证应力 $R_{eq,p}$ 由下式给出,

$$t_p = \frac{R_0}{\dot{R}} + t_H + \frac{R_0}{\dot{R}} \quad (7)$$

$$R_{eq,p} t_p = R_0 \left[\frac{R_0}{(n+1)\dot{R}} + t_H + \frac{R_0}{(n+1)\dot{R}} \right] \quad (8)$$

令 R_{CR} 为保证试验后试件剩余强度, 根据式(3)应有

$$R_{eq} t_p = B (R_f^{2-m} - R_{CR}^{2-m}) \quad (9)$$

将 R_{CR} 代入式(6) 得出保证试验后试件在 R_{eq} 下的剩余寿命 t_R 与其原始寿命 t_f 的关系为

$$t_R / t_f = 1 - R_{eq} t_p / (R_0 t_f) = 1 - B \quad (10)$$

同理, 若令 $R_{eq,R}$ 为保证试验后试件寿命仍是 t_f 时的等效疲劳强度, 则

$$R_{eq,R} / R_{eq} = (1 - B)^{1/n} \quad (11)$$

对于同批试件, 个体的固有强度是随机变量。根据以上分析, 只有部分试件通过保证试验才具有实际意义。因而必存在 R_p 使得 $R < R_p$ 的试件被淘汰。将 R_p 代入式(9)得

$$R_{eq,p} t_p = B (R_p^{2-m} - R_{CR,min}^{2-m}) \quad (12)$$

$R_{CR,min}$ 为保证试验后试件的最低强度。令 R_{pf} 为 $R = R_p$ 的试件在保证试验中的临界断裂应力。该试件在保证试验中只可能在卸载点或卸载过程中发生断裂。根据式(8)和式(12)得

$$R_{eq,p} t_p - \frac{R_0^3}{B(n+1)\dot{R}} = B (R_p^{2-m} - R_{pf}^{2-m}) \quad (13)$$

其中: $R_0 \geq R_{pf} \geq 0$ 。由式(12)和式(13)中消去 $R_{eq,p}$, t_p 和 R_p ,

$$R_{CR,min} = R_{pf} \left[1 - \frac{R_{pf}^3}{B(n+1)\dot{R}} \right]^{1/(n-2)} \quad (14)$$

对于 $R = R_p$ 的试件, 在发生断裂时处于能否通过保证试验的临界状态。此刻在 $R = R_{pf}$ 的同时试件强度衰减速率与保证试验的卸载速率也相等, 即 $\dot{R} = -\dot{R}$ 。由式(2)可知

$$\left. \begin{aligned} R_{pf} &= [B(n-2)\dot{R}]^{1/3} & \dot{R} < \dot{R}_C \\ R_{pf} &= R & \dot{R} \geq \dot{R}_C \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$\dot{R}_C = \dot{R}_0^3 / [B(n-2)]$ 。代入式(14)得

$$R_{CR,min} = [B(n-2)\dot{R}]^{1/3} \left[\frac{3}{n+1} \right]^{1/(n-2)} \quad \dot{R} < \dot{R}_C \quad (16)$$

$$R_{CR,min} = R_{pf} \left[1 - \frac{R_{pf}^3}{B(n+1)\dot{R}} \right]^{1/(n-2)} \quad \dot{R} \geq \dot{R}_C \quad (17)$$

当 $R_{CR,min} \leq R_{max}$, 将 $R_{CR,min}$ 替代式(5)中的 R 即给出保证试验后的试件最低寿命。 <http://>

2 实验工作

试件材料是纯度为95%的氧化铝陶瓷^[8]。三点弯曲试件的尺寸也与文献[8]相同。材料的 $R_c = 210\text{MPa}$; $K_{Ic} = 4\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 。实验在电液伺服疲劳试验机上进行, 介质为蒸馏水。保证试验参数为: $R_0 = 190\text{MPa}$; $\dot{R} = 16.4\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$; $t_H = 0$; $\dot{R} = 1, 100\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。保证试验存活试件在 $\dot{R} = 16.4\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件测定其动疲劳强度。

3 保证试验对疲劳强度分布的影响

根据实验结果^[8], 氧化铝试件的固有强度服从 Weibull 分布

$$P = 1 - F = \exp[-(R/R_0)^m] \quad (18)$$

其中: P 和 F 分别为试件的存活概率及失效概率; $R_0 = 220\text{MPa}$; $m = 11.8$ ^[8]。将式(6)代入式(18)得任一指定寿命下的等效疲劳强度分布(SPT图)的表达式^[9]

$$\ln[-\ln P] = \frac{m}{n-2} \ln(R_{eq, tp}) - m \ln R_0 - \frac{m}{n-2} \ln B \quad (19)$$

如将样本数为 N 的试件强度按降秩排列, 试件序号记做 $j = 1, \dots, N$, 其对应的存活率可表示为

$$P = 1 - \frac{j}{N+1} = \frac{N-j+1}{N+1} \quad (20)$$

设保证试验中有 n_p 个试件被淘汰, 则保证试验的淘汰率 F_p 或存活率 $P_p = 1 - F_p$ 为

$$P_p = 1 - \frac{n_p}{N+1} = \frac{1-n_p+1}{N+1} \quad (21)$$

如 N 较大, 则 $R_p \approx R_c(P_p)$ 。将存活试件的强度按降秩排列, 其序号记做 $j^* = 1, \dots, N - n_p$; 存活试件在保证试验前后的序号关系为 $j = N - n_p + j^*$ 。保证试验后存活试件的存活率为

$$P_R = 1 - \frac{j^*}{N+1} = \frac{N-j^*+1}{N+1} \quad (22)$$

比较式(20)~式(22)可得

$$P = P_p P_R \quad (23)$$

将式(6)、式(11)、式(12)、式(22)代入式(18)可得保证试验后在给定寿命下的剩余疲劳强度分布

$$P_R = \exp[-(R_{eq, RTR} + R_{eq, ptp})^{m(n-2)} + (R_{eq, ptp} + BR_{Rmin}^2)^{m(n-2)}] \quad (24)$$

式(24)与图1中的实验结果(图中的指定寿命为1000s)符合得很好。

4 保证试验参数的影响

R_{Rmin} 是衡量保证试验效果最重要的参数。根据式(16)、式(17)取决于保证应力 R_c 、保证试验中的卸载速率 \dot{R} 及材料的亚临界裂纹扩展参量(n, V_c)。采用高的卸载速率和惰性试验环境(高 n , 低 V_c) 可提高 R_{Rmin} 值。对于本文的实验, $\dot{R} = 1\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $R_{Rmin} = 31\text{MPa}$, $F_p = 84\%$; $\dot{R} = 100\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $R_{Rmin} = 147\text{MPa}$, $F_p = 47\%$; 图1中 \dot{R} 较低的试件剩余疲劳强度较高的原因是因其淘汰率高。在最低强度一定时, 根据式(23), 提高保证试验的淘汰率有助于提高存活试件的可靠度。根据式(24), 两条剩余疲劳强度分布曲线向高存活率方向延伸时会出现交叉。图2表示了淘汰率为50%时卸载速率对氧化铝试件剩余疲劳寿命的影响。可见提高卸载速率是有益的。出于技术原因, 实用最短卸载时间 t_u 为秒量级^[1]。因此, 可实现的最快卸载速率 $\dot{R}_{max} \approx R/t_u$ 。将 \dot{R}_{max} 代入式(16)即可算得给定实验环境下可能获得的最

高 R_{CRmin} 值以及达到这一目的所需要最低保证应力 $R_p^* = [B(n-2)R_{Umax}]^{1/3}$ 。试验中选择高于 R_p^* 的保证应力无助于进一步提高 R_{CRmin} 值。

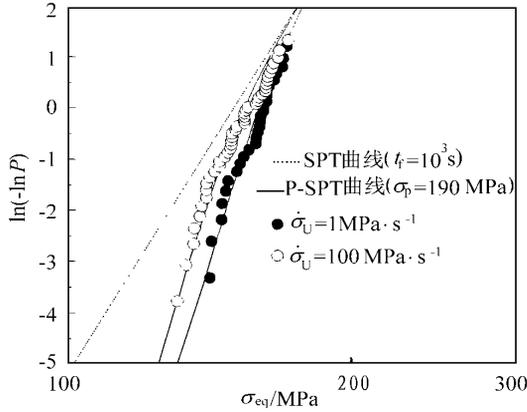


图1 保证试验后剩余疲劳强度分布估算曲线与实验结果

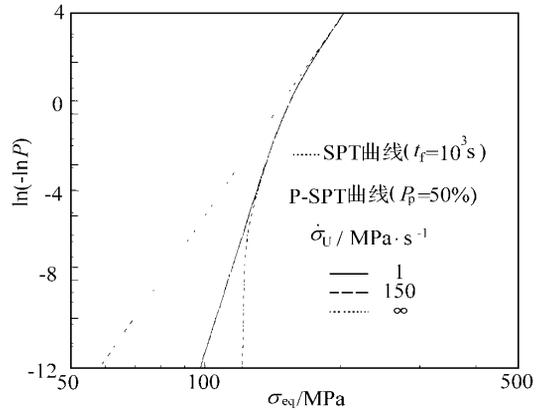


图2 卸载速率对保证试验后氧化铝试件剩余疲劳强度的影响(淘汰率为50%)

5 结论

(1) 保证试验在陶瓷构件中造成的损伤难以避免,在陶瓷构件的寿命估算和强度分析需考虑其影响。

(2) 保证试验中的卸载速率、保证应力和材料在实验环境中的亚临界裂纹扩展行为是影响保证试验效果的关键参量。高的卸载速率和惰性试验环境有助于在保证试验后获得较高的最低剩余强度值。保证应力可根据实用卸载速率及材料的亚临界裂纹扩展参量估算。

参 考 文 献

- 1 Evans A G, Wiederhorn S M. Proof testing of ceramic materials- An analytical basis for failure prediction. Eng Frac Mech, 1986, 26(3): 355~368
- 2 Ritter J E Jr, Daters P B, Fuller E R, et al. Proof testing of ceramics. J Mater Sci, 1980, 15(9): 2275~2290
- 3 宋显辉, 张泽华. 陶瓷材料验证试验后的强度和疲劳分析. 固体力学学报, 1993, 14(30): 25~29
- 4 张清纯. 陶瓷材料的力学性能. 北京: 科学出版社, 1986
- 5 包亦望, 金宗哲, 孙立. 陶瓷材料的本征强度. 机械强度, 1994, 16(3): 29~32
- 6 Wiederhorn S M, Johnson H, Diness A M, et al. Fracture of glass in vacuum. J AM Ceram Soc, 1974, 57(8): 336~341
- 7 Lü Baotong. Fatigue strength prediction of Soda-Lime glass. Theor Appl Fract Mech, 1997, 27: 107~114
- 8 吕宝桐. 预加载对陶瓷试件动疲劳强度的影响. 材料科学与工艺, (正在评审)
- 9 Davidge R W, McLaren J R, Tappin G. Strength-probability-time (SPT) relationships in ceramics. J Mater Sci, 1973, 8(7): 1699~1703