

弯曲疲劳裂纹萌生过程的细观实验与分析*

洪宝宁

(淮海大学土木工程学院 南京 210098)

摘 要 基于细观实验 ,对夹杂物附近疲劳裂纹萌生的形式、方向和过程等进行了分析 .结果表明 :夹杂物与基体弹塑性、热性上的差异导致不同萌生形式 ,表面层应变状态与表面法向间的取向决定萌生方向和扩展平面 ,萌生过程以小裂纹汇合方式进行 .

关键词 细观实验 疲劳 裂纹萌生

中图分类号 TB302

大量实验观察表明 ,在弯曲疲劳中 ,夹杂物附近是主要的裂纹萌生源 .早在 50 年代 ,Pettick 便已意识到这个问题 ,并进行了一些研究工作 .此后 ,不断有人用力学理论和实验分析来研究这类问题^[1] ,但由于数学上的困难和实验手段的限制 ,至今仍未完全解决 .本文从细观层次上作了进一步观察和分析 .

1 试样和实验设备

试样选用电子器件的常用材料铜(牌号 TU₁) ,其形状和几何尺寸如图 1 所示 .(加载是在可进行振幅为 4 mm ,6 mm ,8 mm 和 10 mm 的自制弯曲疲劳机上完成 .实验记录是通过 HP7046BX-Y 函数记录仪(记录宏观力学量如 $\Delta\sigma$, $\Delta\epsilon$ 等) ,扫描电镜 SEM(采集的显微图像)和计算机数字图像处理系统(定量计算)实现 .

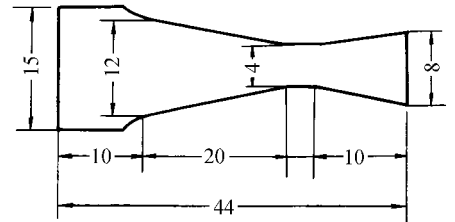


图 1 试样的形状和尺寸(mm)

Fig.1 Size and shape of specimen(mm)

2 试验观察和分析

2.1 夹杂物附近疲劳裂纹萌生形式

夹杂物造成不同形式的疲劳裂纹萌生 ,主要原因是夹杂物与基体弹塑性和热力学性质上存在差异 .

热膨胀系数大于基体的夹杂物 ,在热处理后比周围材料收缩得快 ,使基体与夹杂物交界处产生应力 ,削弱了夹杂物与基体的结合强度 ,易导致夹杂物与基体脱开 ,造成应力应变集中而萌生疲劳裂纹 .实验观测试样表面夹杂物附近发现 ,此处萌生的疲劳裂纹 ,受夹杂物形状、晶粒取向等因素的随机影响 ,裂纹初始角的方向表现出较大的随机性 .一旦晶粒上产生晶体学裂纹 ,它将扩展到邻近的晶粒中 ,此时 ,裂纹在剪应力作用下扩展 ,受夹杂物与基体脱开形成孔穴增大的影响 ,裂纹达到某一长度时 ,扩展受外加应力影响 .按球形夹杂物分析 ,裂纹易在赤道线附近与轴向约成 45°角方向的滑移带上萌生 .然而 ,实验观测发现 ,对于形状与球形相差较大的夹杂物 ,一般也在靠近赤道线附近处萌生裂纹 ,参见图 2(a) .

若夹杂物的热膨胀系数小于基体 ,在冷却过程中 ,它比周围基体收缩得慢 ,造成夹杂物受压应力作用 ,使夹杂物与基体的交界面能够传递应力 ,此时夹杂物自身的弹塑性将影响疲劳裂纹的萌生形式 .(a)夹杂物的弹性模量大于周围的基体 ,在加载过程中 ,夹杂物将承受较大的载荷 ,易发生自身断裂 ,萌生疲劳裂纹 .此时裂纹的扩展受局部应力影响 ,最大应力靠近夹杂物的极点 .(b)夹杂物的弹性模量小于基体 ,在加载过程中 ,它承受较小的载荷而使其周围基体的应力升高 ,易引发滑移带的产生而使基体开裂萌生疲劳裂纹 .此时若外

加应力是拉应力,夹杂物极点附近所有的主应力均为拉应力,最大主应力大于远场应力,由于夹杂物形状一般不对称,因而裂纹的萌生和扩展也不对称,侧重在夹杂物两极点附近应力大的一边.实验观测发现,试样表面这种类型的夹杂物虽有疲劳裂纹萌生,但一般不成为疲劳破坏源,参见图 2(b).



(a) (b)
图 2 铜试样恒振幅弯曲疲劳细观实验中观测的结果

Fig.2 Results of copper specimen in microscope experiment of fatigue bent

夹杂物对疲劳裂纹萌生的影响,不仅与夹杂物的弹塑性和热力学性质有关,而且与其大小和形状有关.在低周疲劳(振幅为 8 mm 宏观应变 $\epsilon = 3.2273 \times 10^{-3}$)中,疲劳裂纹倾向于在较大夹杂物附近萌生,在高周疲劳(振幅为 4 mm 宏观应变 $\epsilon = 2.3164 \times 10^{-3}$)中,夹杂物的大小对附近应力场分布影响不大,夹杂物形状上的差异对应力集中系数影响较大,从而影响疲劳裂纹的萌生.

2.2 裂纹萌生方向

设三个主应变满足 $\epsilon_1 \geq \epsilon_2 \geq \epsilon_3$,能够与试样表面垂直的主应变只有 ϵ_2 或 ϵ_3 ,如图 3 所示.下面分别考虑这两种情况.

a. 主应变 ϵ_2 垂直于试样表面,此时最大剪应变作用在表面层,因而与表面平行方向易形成滑移带,疲劳裂纹也易在此方向上萌生.实验观察表面夹杂物附近萌生疲劳裂纹的过程中发现,夹杂物与基体的交界面上,疲劳裂纹形核类似于 II 型方式沿表面进行,按类似 III 型方式向内部延伸(反映在显微图上为清晰度降低),见图 3(a),沿表面扩展速度远大于向内部的扩展速度.裂尖到达晶界后,以类似于 I 型和 II 型的混合方式扩展,裂尖方向逐步转向与外加最大主应力垂直的方向.

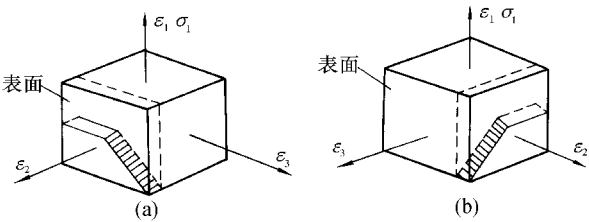


图 3 裂纹萌生方向及扩展平面

Fig.3 Spread plane and initial orientation of fatigue crack

疲劳裂纹形核类似于 II 型方式沿表面进行,按类似 III 型方式向内部延伸(反映在显微图上为清晰度降低),见图 3(a),沿表面扩展速度远大于向内部的扩展速度.裂尖到达晶界后,以类似于 I 型和 II 型的混合方式扩展,裂尖方向逐步转向与外加最大主应力垂直的方向.

b. 主应变 ϵ_3 垂直于试样表面,此时最大剪应变作用面与表面法向成 45° 角,滑移带易在该方向形成,疲劳裂纹也易在此方向萌生.疲劳裂纹通过沿最大剪切作用面首先以类似于 II 型方式向内部扩展,接着以 I 型和 II 型混合方式进一步向内部扩展,完成萌生阶段,见图 3(b).受实验手段限制,目前,还无法做到连续观测疲劳裂纹萌生的全过程.

疲劳裂纹的萌生方向及扩展平面取决于应变状态与自由表面法向之间的取向,不同的取向导致不同的开裂系统和疲劳寿命.在实验中观测发现,夹杂物附近萌生的疲劳裂纹的最初裂纹角与外加应力方向一般在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 之间,并随循环次数的增加,裂纹角不断改变.然而,不论裂纹角初始角度如何,对裂纹最初扩展寿命影响不大,对于其他材料和工况是否有同样的结论还有待于进一步研究.

2.3 裂纹萌生过程

在振幅为 4 mm、放大倍数为 3 000 的实验中,观察试样表面夹杂物附近疲劳裂纹萌生过程,看到如下现

象：

a. 在夹杂物附近产生应力应变集中,最先出现疲劳裂纹.随着循环载荷的不断作用,小裂纹数量增加,并使相邻晶粒内的滑移系开动萌生小裂纹.

b. 小裂纹在各自的滑移系内扩展达到晶界,决定哪条裂纹将继续扩展完全是随机的,与该裂纹和相邻晶粒内已有的小裂纹的取向有关.只有比较合适的取向,裂纹才能汇合.因此,在疲劳裂纹萌生阶段,裂纹扩展是以小裂纹汇合的方式进行.塑性应变大,引起的小裂纹数目多,适合裂纹汇合的几率也大,这说明应力应变集中处易萌生疲劳裂纹.

c. 在开始阶段,穿越晶界的裂纹并非一条,这与夹杂物的几何形状和外加应力的作用方向等有关.裂纹穿越晶界后,造成更大的不均匀性,引起更大的应力应变集中,在外应力场的作用下,能与前方晶粒内小裂纹再次汇合的裂纹将继续扩展,扩展速率呈振荡形式.随着裂纹长度的增加,晶界对裂纹扩展的影响逐步减小,最终只有一条裂纹继续扩展形成主裂纹.

3 结 论

a. 除夹杂物形状、大小和外载作用影响外,夹杂物导致不同形式的疲劳裂纹萌生,主要原因是夹杂物与基体在弹塑性、热性上的差异.热膨胀系数大于基体的夹杂物,裂纹易在其赤道线附近萌生和扩展.热膨胀系数小于基体夹杂物,其自身的弹塑性影响着周围材料的力学行为,裂纹易在夹杂物极点附近萌生和扩展.

b. 疲劳裂纹萌生方向及扩展平面取决于表面层应变状态与表面法向之间的取向,不同的取向导致不同的萌生方向和开裂系统.夹杂物附近萌生的疲劳裂纹,受夹杂物形状、晶体取向等因素的影响,萌生方向表现出较大的随机性,且随循环次数的增加,裂纹扩展方向不断改变,直至与最大主应力作用方向近似垂直.

c. 受晶界、晶体取向影响,疲劳裂纹萌生过程以小裂纹汇合方式进行.夹杂物附近易产生较大的塑性应变,引起产生小裂纹的数目相对较多,适合裂纹汇合的几率也大,因此,疲劳裂纹易在此处萌生和扩展.

参 考 文 献

- 1 Liu Xuehui, Erdogan F. The crack inclusion interaction problem. Engng Frac Mech, 1986, 5: 821 ~ 832
- 2 Miller K J, Mohamed H J, Rios E R. The behaviour of short fatigue crack mechanical engineering. Publications Ltd London, 1986. 491 ~ 511
- 3 Navarro A, Rios E R. Fatigue Fracture. J Engng Mater Struct, 1987(10): 169 ~ 186

Analysis and Observation of Bending Fatigue Crack Initiation with Microscope Experiment

Hong Baoning

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098)

Abstract On the basis of the observation of microscopic experiment, the process, orientation and form of the fatigue crack initiation near the inclusion are studied and analyzed. The result shows that the different initiation forms are caused by different heat expansion coefficients and elasto-plasticities that the orientation of initiation and growth of fatigue crack depend on the orienting strain state and surface, and that the crack length is expanded by crack convergence.

Key words micromechanical experiment; fatigue; crack initiation