

铜长条薄板在疲劳载荷下裂纹聚合的 试验研究和一个新发现

王芳文, 陈宜亨

(西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安)

摘要: 对铜长条薄板在疲劳载荷下 2 条相邻裂纹的聚合进行了详细的试验研究. 按照经典的断裂力学分析, 最初预计初始的疲劳裂纹应该在 2 条相邻裂纹之间产生, 并且导致 2 条相邻裂纹聚合为一个复杂的新缺陷. 但是试验发现: 在某些情况下初始的疲劳裂纹扩展产生在远离 2 条相邻裂纹之间区域的裂纹外尖端上, 即不是发生在 2 条相邻裂纹的内尖端上. 只有当这个外裂尖在疲劳载荷下自相似扩展一定长度并止裂一段时间后, 2 条相邻裂纹之间的内部区域才产生第二条曲线裂纹, 该曲线裂纹的扩展才引起聚合的发生, 而在第二条裂纹扩展期间, 第一条扩展裂纹始终处于止裂状态. 这个现象超出了经典的疲劳裂纹萌生的基本理论, 也无法用经典的应力集中理论来解释.

关键词: 疲劳载荷; 裂纹萌生; 裂纹扩展; 裂纹聚合; 铜薄板

中图分类号: O346.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)02-0121-04

A New Find in Experimental Research on Coalescence Between Two Neighbor Cracks in a Copper Strip under Cyclic Tensile Loadings

WANG Fangwen, CHEN Yiheng

(School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This note reports an interesting phenomenon found in authors' experimental investigation into the coalescence between two neighborly located cracks in a long copper strip under cyclic tensile loadings. Unlike expected, under some conditions the initial fatigue crack growth was found not to nucleate in the center region between the two cracks, where the stress concentration is much stronger than that in other positions and the stress intensity factor is much larger than the others. The initial fatigue crack growth was always found at the crack tip located outside the center region. The coalescence between the two cracks always occurred far after the initial fatigue crack growth. This phenomenon cannot be explained by the classical theories.

Keywords: cyclic loading; crack nucleation; crack propagation; crack coalescence; copper strip

国内外对于韧性材料疲劳性能的研究多采取单缺陷形式, 例如单边缺口或双边缺口. 这样的试验已经被研究得非常充分, 理论预期和试验研究结果吻合较好. 按照经典的应力集中理论, 疲劳裂纹的产生往往在应力集中严重的地方, 例如缺口或孔洞的边缘, 然后在疲劳裂纹驱动力的作用下疲劳裂纹扩

展^[1-20], 构件的承载能力因此大为减小, 最终导致整体破坏而产生灾难性后果. 薄铜板在集成电路等领域有着广泛的应用, 其疲劳裂纹的萌生、扩展、聚合直接影响着设备的使用效能和寿命. 本文对铜长条薄板在疲劳载荷下 2 条相邻裂纹的聚合进行了详细的试验研究. 按照经典的断裂力学分析, 2 条相邻裂

纹之间是应力集中最大的区域,而相邻的裂纹尖端的应力强度因子最大,因此最初我们的预计是初始的疲劳裂纹应该在 2 条相邻裂纹之间产生,并且导致 2 条相邻裂纹聚合为一个复杂的新缺陷.但是,本文的试验却发现,在某些情况下,初始的疲劳裂纹扩展产生在远离 2 条相邻裂纹之间区域的裂纹外尖端上,即不是发生在 2 条相邻裂纹的内尖端上,只有当这个外裂尖在疲劳载荷下自相似扩展一定长度并止裂一段时间后,2 条相邻裂纹之间的区域才产生第二条曲线裂纹,该曲线裂纹的扩展才引起裂纹聚合的发生,而在第二条裂纹扩展期间,第一条扩展裂纹始终处于止裂状态.这个现象超出了经典的疲劳裂纹萌生和扩展的基本理论,也无法用经典的应力集中理论来解释.本文希望通过公布这个试验结果,为相关的研究者提供一个理论探讨的目标或反例.

1 试件尺寸和试验研究结果

试验所用材料为纯铜薄板(代号 T3,Cu 的质量分数为 99.7%,20℃冷轧),抗拉强度 $\sigma_b=410$ MPa,屈服点 $\sigma_s=375$ MPa,延伸率 $\delta=8.4\%$,截面收缩率 $\psi=51.5\%$.试件的几何尺寸如图 1 所示,其中 $w=50$ mm, $h=60$ mm, $t=0.1$ mm, $a=2$ mm, $F=80\sim 800$ kN, $\alpha=11.25^\circ$.此时,2 条裂纹处于强干涉状态.

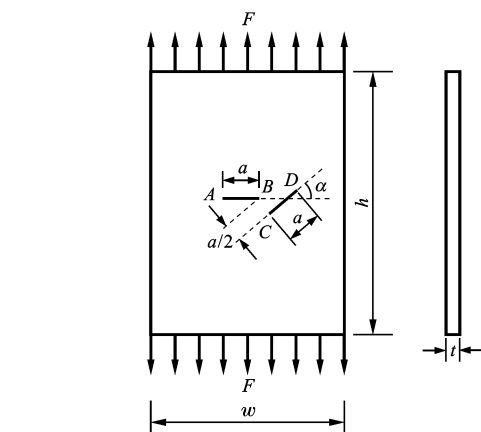
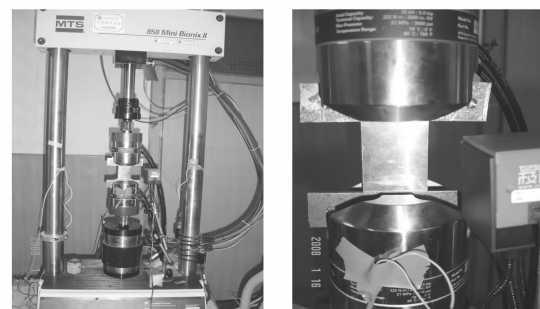


图 1 长条铜薄板试件的尺寸和结构

图中的 A、B、C、D 点分别代表 2 条裂纹的 4 个尖端点.试件被固定在 MTS-858 疲劳试验机上(见图 2),加载采用低周拉伸,频率为 1 Hz,载荷范围为 80~800 kN(对应的最大载荷应力为 160 MPa,约相当于屈服应力的 43%).根据应力集中理论,2 条裂纹的内尖端点 B 或 C 的环向最大应力远大于 2 条裂纹外尖端点 A 或 D 的最大环向应力(至少大

50%,即 B 或 C 点达到屈服应力时,A 或 D 点尚未达到屈服应力).按照应力强度因子理论,B 或 C 点的应力强度因子至少比 A 或 D 点的高 50%.从理论上预计,初始的疲劳裂纹扩展应该在 B 或 C 点发生,然后导致 2 条裂纹曲线聚合,产生一条复杂的单一裂纹,这条复杂的单一裂纹的 A 和 D 点在疲劳载荷下才能进一步扩展,最终导致试件整体破坏,即:疲劳裂纹的扩展应该首先发生在 2 条裂纹中间区域的左裂纹 B 点或者右裂纹 C 点上,由此确定疲劳裂纹萌生的初期寿命,然后确定裂纹萌生后到 2 条裂纹连通后的疲劳裂纹扩展寿命,再确定外区域上 A 或 D 点的疲劳裂纹萌生的初期寿命,最后确定尖端点 A 或 D 的疲劳裂纹扩展寿命.这 4 个阶段的寿命总和就是疲劳寿命.通常的单边缺口或双边缺口试件只有 2 个疲劳寿命:疲劳裂纹萌生的初期寿命和疲劳裂纹的扩展寿命.本文的试验研究涉及 2 条裂纹间的聚合,以及聚合后新的裂纹在其他地点产生,应该至少分上述 4 个阶段.



(a)疲劳试验机 (b)加载情况
图 2 MTS-858 疲劳试验机和疲劳加载情况

但是,铜薄板上 2 条裂纹(实际上是 2 个扁平椭圆孔)的干涉结果却是令人惊奇的.图 3 显示,疲劳裂纹的扩展首先发生在左裂纹外区域的裂尖 A 点附近,而不是在预先估计的 2 条裂纹中间区域的左裂纹的右裂尖 B 点(或者右裂纹的左裂尖 C 点)上,即疲劳裂纹扩展的初期寿命发生在外区域的 A 点(或者 D 点).随着这条裂纹的疲劳扩展直到止裂,B 和 C 点没有新疲劳裂纹产生,这段时间也是疲劳裂纹扩展寿命的一部分.这条裂纹疲劳扩展直到止裂后,经过一段时间,才在 B 点有新的疲劳裂纹萌生(第 2 条曲线疲劳裂纹),图 4 显示了这条裂纹的出现和第 1 条裂纹止裂的情况.

图 4 和图 5 的结果出乎我们的预料:2 条扁平的椭圆缺陷(近似看作裂纹)的初始疲劳裂纹没有发生在应力集中最大(或应力强度因子最大)的内区域

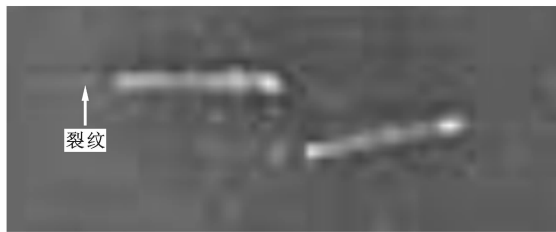


图 3 左裂纹的左裂尖首先扩展

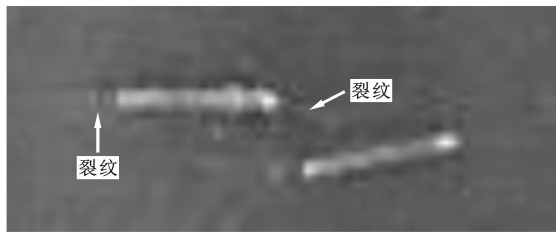


图 4 左裂纹的左裂尖止裂而右裂尖曲线扩展

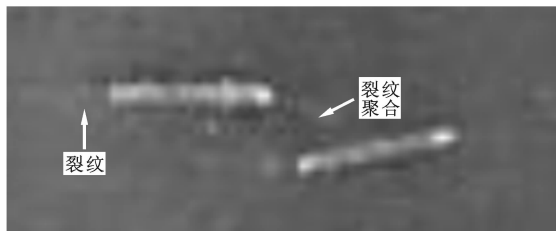


图 5 左裂纹的左裂尖始终止裂而右裂尖扩展并与右裂纹聚合

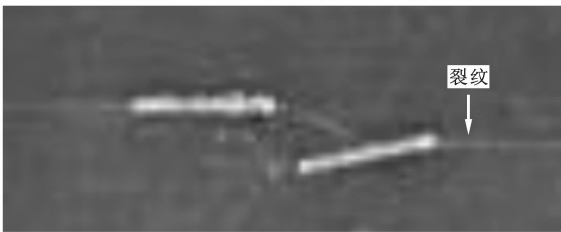


图 6 右裂纹外侧扩展到和左裂纹外侧的扩展长度相当后,左裂纹外侧重新扩展

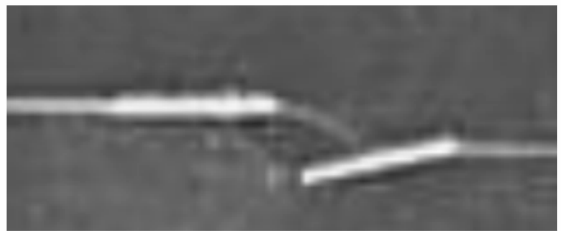


图 7 左裂纹的左裂尖和右裂纹的右裂尖同时扩展至破坏

有相似的结果发表. 这个结果完全超出了经典的应力集中理论预期、经典的疲劳裂纹驱动力 dK/dN 预期和现有的疲劳裂纹寿命理论预期,因而从理论上给予恰当的解释是具有现实意义的. 出现这一结果的一个可能的原因是裂纹间距离太近,导致裂纹中间区域出现位错饱和,使得中间区域处于塑性安定状态,位错难以运动造成疲劳裂纹萌生的困难,而左裂纹的左裂尖外区域尽管应力集中状态没有内区域严重,却处于非塑性安定状态,位错可以更自由地运动,使得初始疲劳裂纹的扩展更容易些.

作者公布这个试验结果的目的,是为了引起人们对宏观多缺陷疲劳损伤演化过程新现象的注意,因为它和常规的单缺陷疲劳损伤演化大不相同. 我们将对此进行更进一步的探讨和后续的理论研究,待研究结果成熟后另文发表.

参考文献:

[1] SCHÜTZ W. The prediction of fatigue life in the crack initiation and propagation stages: a state of the art survey [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1979, 11 (2): 405-421.

[2] BUCH A. Prediction of fatigue life under aircraft loading with and without use of material memory rules [J]. International Journal of Fatigue, 1989, 11(2): 97 -106.

[3] KAJAWSKI D, ELLYIN F. A unified approach to mean stress effect on fatigue threshold conditions [J]. International Journal of Fatigue, 1995, 17(2): 101-106.

B 点或 C 点附近,而是发生在外区域的 A 点附近. 图中包括了 4 个疲劳寿命过程:第 1 条外疲劳裂纹萌生的时间;此疲劳裂纹扩展直到止裂的时间;从它的止裂到第 2 条内裂纹萌生的时间;第 2 条裂纹疲劳扩展直到贯通 2 个扁平椭圆的时间.

图 6 显示,第 2 条裂纹疲劳扩展直到贯通 2 个扁平椭圆孔后,第 3 条疲劳裂纹才在右边外区域 D 点附近产生. 第 3 条疲劳裂纹的萌生时间和扩展时间也应该计入总疲劳寿命中. 在这个阶段,左边的第 1 条疲劳裂纹始终处于止裂状态,仿佛在等待其他裂纹的萌生和扩展,直到第 3 条裂纹扩展到和第一条裂纹的长度近似相等时,二者才开始共同扩展(见图 6 和图 7),直至长条试件整体断裂破坏. 这样,总体的损伤演化过程和疲劳寿命过程可以分为 7 个阶段:①左裂纹的萌生;②左裂纹的扩展到止裂;③中间区域裂纹的萌生;④中间区域裂纹的扩展到 2 条裂纹聚合;⑤右裂纹的萌生;⑥右裂纹扩展到和左裂纹长度相当;⑦左、右裂纹共同扩展直到总体破坏.

2 讨 论

本文的试验研究结果是出乎预料的,未见前人

- [4] SOCIE D. Multiaxial fatigue damage models [J]. ASME J Eng Mater Technol, 1987, 109(3): 293-298.
- [5] GOLOS K, ELLYIN F. Total strain-energy density theory for cumulative fatigue damage [J]. ASME J Press Vess Tech, 1988, 110(1): 36-41.
- [6] ZHENG Xiulin. A further study on fatigue crack initiation life; mechanical model for fatigue crack initiation [J]. International Journal of Fatigue, 1986, 8(1): 17-21.
- [7] DUPART D, DAVY A, BOETSCH R, et al. Fatigue damage calculation in stress concentration fields under uniaxial stress [J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(4): 245-253.
- [8] SOCIE D, WAILL L A, DITTMER D F. Biaxial fatigue of Inconel 718 including mean stress effects [M] // MILLER K J, BROWN M W. Multiaxial Fatigue, ASTM STP 853. Philadelphia, PA, USA: ASTM, 1985: 463-481.
- [9] MADI Y, MATHERON P, RECHO N, et al. Low cycle fatigue of welded joints; new experimental approach [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 228(1/3): 161-177.
- [10] MADI Y, RECHO N, MATHERON P. Low-cycle fatigue of welded joints; coupled initiation propagation model [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 228(1/3): 179-194.
- [11] HURLEY P J, WHITTAKER M T, WILLIAMS S J, et al. Prediction of fatigue initiation lives in notched Ti 6246 specimens [J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(4): 623-634.
- [12] DUPART D, CAMPASSENS D, BALZANO M, et al. Fatigue life prediction of interference fit fastener and cold worked holes [J]. International Journal of Fatigue, 1996, 18(8): 515-521.
- [13] 吕宝桐, 张建国, 凌超, 等. 15MnVN 钢疲劳性能的实验研究[J]. 机械强度, 1992, 14(4): 70-75.
- LÜ Baotong, ZHANG Jianguo, LING Chao. Experimental investigation into fatigue behaviour of 15MnVN steel [J]. Journal of Mechanical Strength, 1992, 14(4): 70-75.
- [14] LÜ Baotong, ZHENG Xiulin, LI D. Fatigue crack initiation and propagation in butt welds of an ultrahigh strength steel [J]. Welding Research Supplement, 1993, 2(2): 79-86.
- [15] LÜ Baotong, ZHENG Xiulin. Predicting fatigue crack initiation life of an aluminum alloy below room temperature [J]. Fatigue Fract Eng Mater Struct, 1992, 15(12): 1213-1221.
- [16] TAY C J, TAY T E, SHANG Huaimin, et al. Fatigue crack initiation studies using a speckle techniques [J]. International Journal of Fatigue, 1994, 16(6): 423-428.
- [17] ZHENG Xiulin, LING Chao. On the expression of fatigue crack initiation life considering the factor of overloading effect [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1988, 31(6): 959-966.
- [18] ZHENG Xiulin. Modeling fatigue crack initiation life [J]. International Journal of Fatigue, 1993, 15(6): 461-466.
- [19] THAUVIN G. Influence of surface roughness on fatigue and corrosion fatigue behavior of 0.12C-12Cr-2.5Ni-1.8Mo-0.3V steel [C] // Proceedings of the 7th International Fatigue Congress, FATIGUE'99. Beijing, China: Higher Education Press, 1999: 2347-2352.
- [20] SCHOELER K, CHRIST H J. Influence of prestraining on cyclic deformation behavior and microstructure of a single-phase Ni-base superalloy [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(9): 767-775.

(编辑 葛赵青)

本刊实行开放免费阅读, 阅读全文请登录

<http://www.jdxb.cn>