

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0476- 05

LY12/ Cu 双金属层合板的疲劳性能(I)^① ——面裂纹

崔建国¹, 付永辉², 李 年², 孙 军², 何家文², 马莒生¹

(1. 清华大学 材料科学与工程系, 北京 100084; 2. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

[摘 要] 考察了爆炸复合层状双金属板 LY12/ Cu 界面两侧材料弹塑性失配对面裂纹疲劳扩展行为的影响。结果表明, 界面两侧材料的弹塑性失配对复合板面裂纹的扩展驱动力具有重要影响。当裂纹由弹性模量、屈服强度高的一侧向低的一侧扩展时, 实际驱动力大于外加名义值; 当裂纹由弹性模量、屈服强度低的一侧向高的一侧扩展时实际驱动力小于外加名义值, 从而造成裂纹扩展的加速或止裂, 其影响离界面越近效果越显著。但弹性失配在裂纹开始扩展直至界面的整个过程都起作用, 而强度失配只在裂尖距界面一定距离内(R_p)才起作用。

[关键词] 金属层合板; 疲劳裂纹扩展; 弹塑性失配

[中图分类号] TB 331; TB 302. 3

[文献标识码] A

金属/金属层合板以其优越的面裂纹(裂纹面及其扩展方向都垂直界面的裂纹)疲劳扩展性能在汽车、航天航空、国防、能源化工等领域显示了广阔的应用前景。这种优越的疲劳性能与其界面结合状况及界面两侧材料的性能密切相关。以往的实验和理论研究多针对相同弹性模量金属构成的层合板^[1~6], 而在实际工程中由弹性模量不同的金属构成的层合板也获得了广泛应用, 如铜-钢、铝-钢、铜-铝等。研究这类层合板中疲劳裂纹的扩展具有更为重要的理论和工程实际意义。迄今为止, 这方面的工作多是理论研究并且大都是针对静载或一次性加载^[7~12], 针对面裂纹疲劳扩展的实验研究一直未见有公开文献报导。为此本文作者考察了爆炸复合双层金属板 LY12/ Cu 中面裂纹的疲劳扩展行为, 并利用相关弹塑性断裂力学理论对实验结果进行了分析讨论。

1 实验

双层金属复合板 LY12/ Cu 由厚度 10 mm 的退火态包覆硬铝板(LY12) 和铜板(Cu) 利用爆炸焊接方法复合而成, 其性能如表 1 所示。包覆硬铝板表面 0.25 mm 厚的纯 Al 层没有去除, 这样既易于保证焊合质量又易于保持焊合界面的平直。疲劳实验采用四点弯曲试样在 Amsler 高频疲劳试验机上进

行, 频率 50~ 60 Hz, 正弦波加载, 应力比 0.1。裂纹长度采用直流电势法测量, 精度为 0.01 mm。疲劳试样如图 1 所示, 尺寸 100mm × 16mm × 12 mm, 分别在两侧组元中开缺口, 且缺口一侧尺寸略小于另一侧($h_1=6\text{ mm}$, $h_2=10\text{ mm}$), 文中用“1→2”表示面裂纹由材料 1 向材料 2 疲劳扩展。

表 1 复合板各组元的性能

Table 1 Properties of laminate's components

Component	σ_y /MPa	σ_b /MPa	E /GPa
LY12	210	260	70
Cu	160	200	110

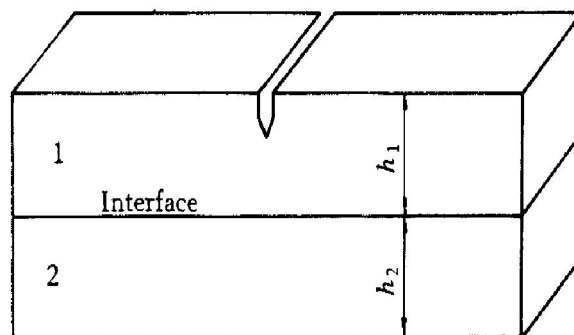


图 1 面裂纹疲劳扩展试样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of face crack fatigue growth specimen

2 实验结果

图 2 和 3 所示分别为裂纹由不同组元中向界面

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59731020)

[收稿日期] 2001- 09- 25; [修订日期] 2001- 12- 17

[作者简介] 崔建国(1972-), 男, 博士。

扩展时的金相照片和对应的把复合板作为整体材料计算的 $\Delta K - da/dN$, $a - da/dN$ 曲线, 可见二者明显不同。当 LY12 $\rightarrow$ Cu 时, 在距界面约 0.5 mm 处裂纹扩展路径开始发生了稍稍的偏折, 而扩展速率 da/dN 随 ΔK 的上升在距界面约 1.0 mm 时即开始出现下降趋势, 且距界面越近, 扩展速率越低, 扩展至与铜的爆炸复合界面后即发生了裂纹扩展的完全止裂。而当 Cu $\rightarrow$ LY12 时, 在距界面大约 1.2 mm 处裂纹扩展路径开始偏折, 扩展速率 da/dN 随 ΔK 的上升而逐渐下降。裂尖到达爆炸复合界面后也发生了裂纹扩展的完全止裂。

实验过程中, 为观察裂纹止裂后的扩展行为,

当其在界面处发生完全止裂后, 将平均载荷升高 10%, 其它条件不变, 继续实验, 观察裂纹变化情况。15 万次循环后, 若裂纹仍不扩展, 即再次将平均载荷升高 10%, 如此逐级进行。结果由 LY12 $\rightarrow$ Cu 的裂纹在平均载荷比原始值高出约 60% 后, 裂纹又重新开始扩展, 沿界面略微偏折后即折入下层 Cu 中。而由 Cu $\rightarrow$ LY12 的裂纹, 则在平均载荷比原始值高出约 50% 后, 裂纹就在界面层中逐渐开始横向扩展, 并一直进行最终导致试样整体分层。

图 4 所示为 LY12/Cu 复合板不同侧面和其相应整体材料中疲劳裂纹扩展 $\Delta K - da/dN$ 曲线。可见, 当由 LY12 $\rightarrow$ Cu 时, 复合板 LY12 侧裂纹扩展

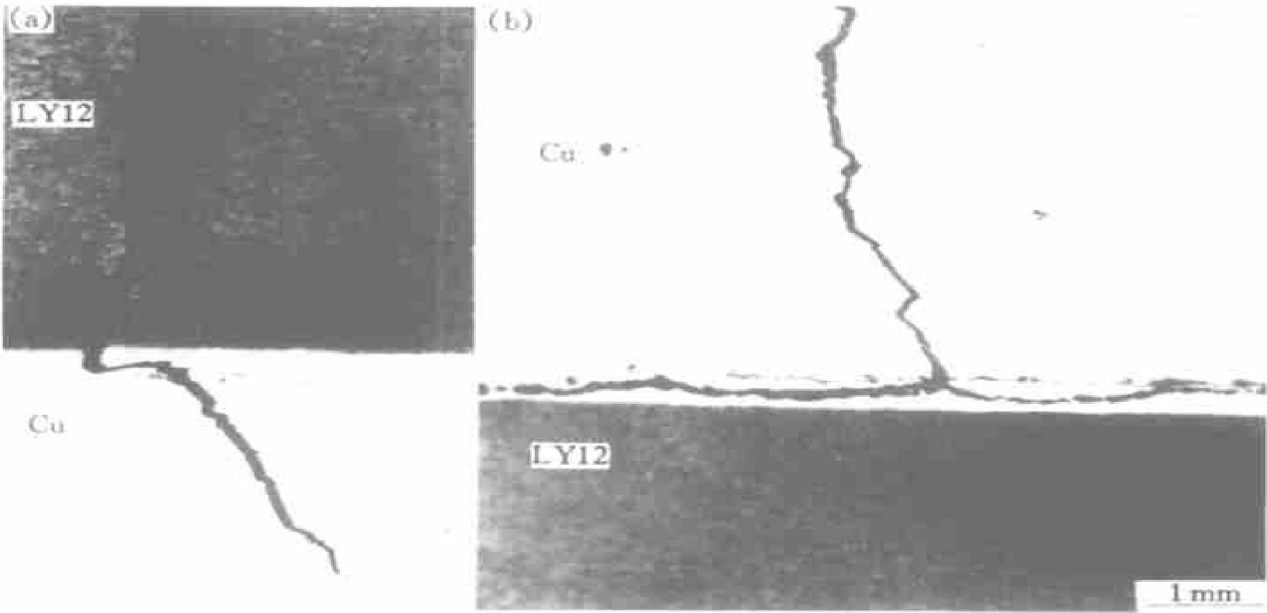


图 2 LY12/Cu 复合板面裂纹形貌

Fig. 2 Optical micrographs of fatigue crack profile
(a) —LY12 $\rightarrow$ Cu; (b) —Cu $\rightarrow$ LY12

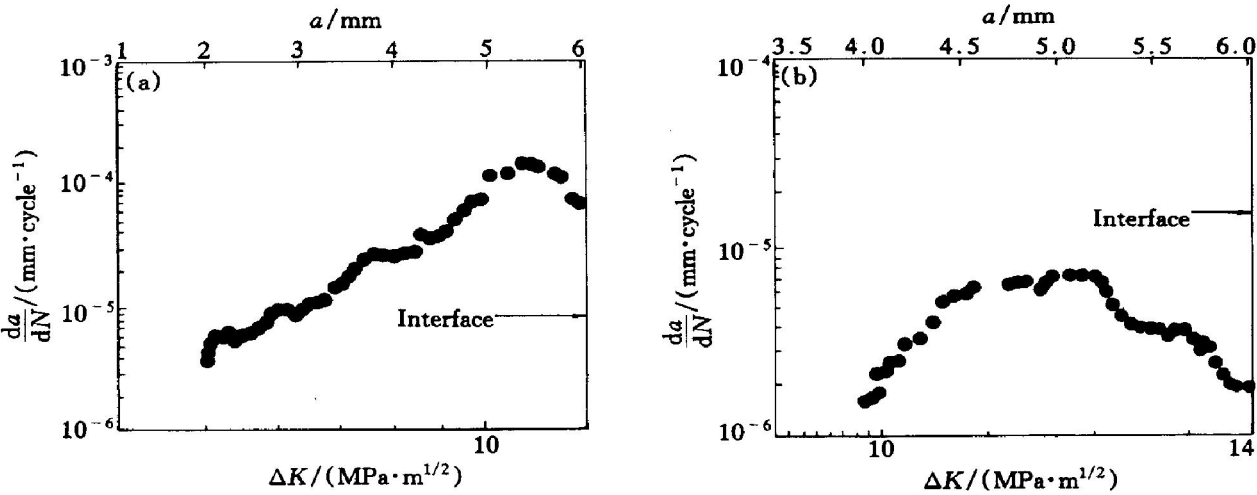


图 3 LY12/Cu 复合板疲劳裂纹扩展的 $\Delta K - da/dN$, $a - da/dN$ 曲线

Fig. 3 Fatigue crack propagation rate as function of ΔK , a for LY12/Cu laminate
(a) —LY12 $\rightarrow$ Cu; (b) —Cu $\rightarrow$ LY12

$\Delta K - da/dN$ 曲线比整体材料 LY12 的右移, 并且随着裂纹的扩展, 两曲线逐渐靠近, 最终在同样的外加 ΔK 下, 复合板 LY12 侧 da/dN 超过了其整体材料的, 其后随裂纹的继续扩展, LY12 侧的 da/dN 又出现了下降趋势。当由 Cu $\rightarrow$ LY12 时, 复合板 Cu 侧的 $\Delta K - da/dN$ 曲线比整体材料 Cu 的左移, 并且在界面附近 da/dN 随 ΔK 升高急剧下降。两种整体材料 LY12 和 Cu 中的裂纹扩展速率 da/dN 符合常规规律随 ΔK 的升高而一直上升。

由上面的实验结果可见, 同一复合板的面裂纹由两侧向界面扩展时, 其扩展速率和到达界面后的扩展方向都明显不同, 并且与相应整体材料中的疲劳裂纹扩展也有着很大差异。尽管在裂纹接近界面时裂纹扩展路径的偏折也会影响 $\Delta K - da/dN$ 曲线的趋势, 但这显然不是主要因素, 复合板的界面结合及界面两侧材料的弹塑性失配在此起着决定作用。由于篇幅所限, 关于裂纹在界面处是穿入下一层还是沿界面发生转折, 以及穿入下层的角度、沿界面发生转折时的扩展行为等将在另文进行详细分析。本文中重点讨论界面两侧材料弹塑性失配对面裂纹疲劳扩展驱动力的影响。

3 分析与讨论

3.1 弹性模量失配对裂纹扩展驱动力的影响

结合本实验所用试样的几何尺寸, 建立如图 5 所示的材料模型。弹性模量分别为 E_1 和 E_2 的两完全弹性材料 1 和 2 构成双层复合板, 层间为理想界面, 两组元体积分数分别为 f_1 和 f_2 , 引入一长度为 a 的面裂纹, 裂尖前方两组元的体积分数分别

为 f_1 和 f_2 。根据混合法则复合板的弹性模量为

$$E_c = f_1 E_1 + f_2 E_2 \quad (1)$$

纯 I 型载荷作用下裂纹由 1 $\rightarrow$ 2 扩展。裂尖实际应力 σ_{tip} 与把复合板视为一整体材料, 忽略其结构不对称性计算所得的外加平均应力 σ_{app} 分别为

$$\sigma_{tip} = E_1 \varepsilon \quad (2)$$

$$\sigma_{app} = E_c \varepsilon (f_1 E_1 + f_2 E_2) \varepsilon \quad (3)$$

根据整体材料中裂尖应力强度因子范围 ΔK 计算式:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = Y(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \sqrt{\pi a} = YE(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

式中 Y 为试样几何修正系数, ε , ε_{max} 和 ε_{min} 分别表示裂尖的应变及其最大值和最小值, 则复合板试样中裂尖实际的应力强度因子范围 ΔK_{tip} 及由平均应力计算所得的裂尖名义应力强度因子范围 ΔK_{app} 分别为

$$\Delta K_{tip} = YE_1(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

$$\Delta K_{app} = YE_c(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \sqrt{\pi a} = Y(f_1 E_1 + f_2 E_2)(\varepsilon_{max} - \varepsilon_{min}) \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

以上两式相比得

$$\frac{\Delta K_{tip}}{\Delta K_{app}} = \frac{E_1}{f_1 E_1 + f_2 E_2} \quad (7)$$

可见界面两侧材料的弹性模量及其所占体积分数对裂尖实际应力强度因子范围有着明显影响。当 $E_1 > E_2$ 时, $\Delta K_{tip} / \Delta K_{app} > 1$, 裂尖的实际应力强度因子范围比名义值变大, 有利于裂纹扩展, 导致在同样的名义外载下进行比较, 复合板试样组元 1 中的裂纹扩展将快于整体材料 1 中的裂纹扩展。而随着裂纹的扩展, 裂尖前方承担应力组元 1 的体积分数的变小, 比值 $\Delta K_{tip} / \Delta K_{app}$ 逐渐变大, 放大作用

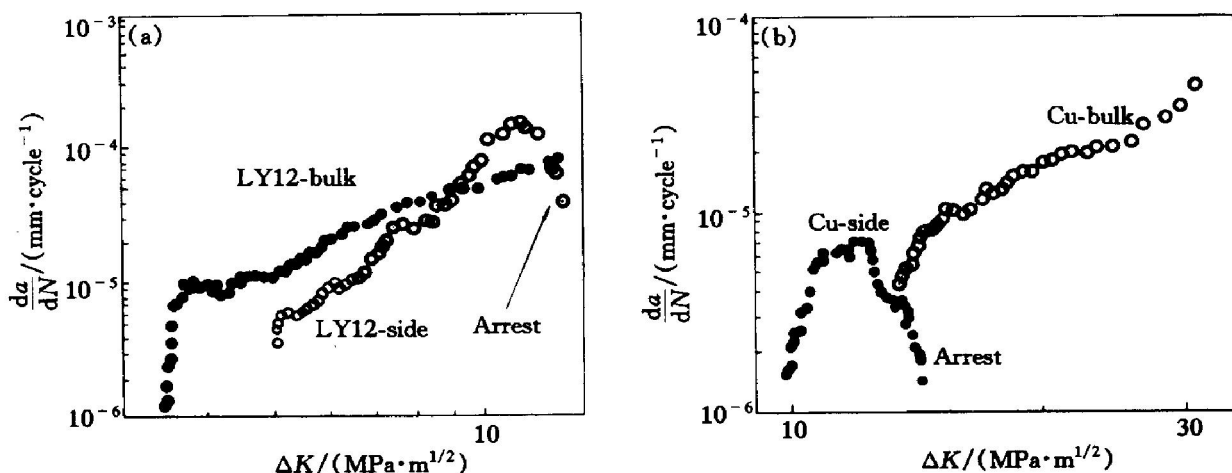


图 4 LY12/Cu 复合板不同侧面组元和其相应整体材料中疲劳裂纹扩展的 $\Delta K - da/dN$ 曲线

Fig. 4 Fatigue crack propagation rate as function of ΔK for different components of LY12/Cu laminate side and bulk

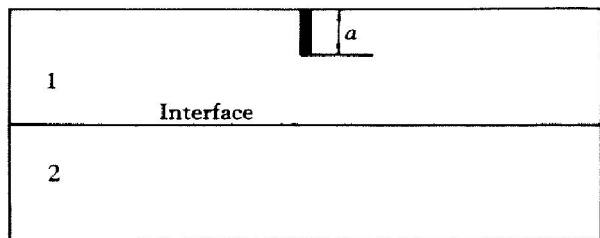


图 5 弹性错配对疲劳裂纹扩展驱动力影响分析模型

Fig. 5 Mechanical model of elastic mismatch effect on fatigue crack growth

越益明显, 其极值为 $E_1/E_2 (f_1 = 0)$ 。当裂纹进入组元 2 后, 即不再受材料 1 的影响, 变为均匀材料 2 中的裂纹扩展了; 而当 $E_1 < E_2$ 时, 其影响正好相反, $\Delta K_{tip}/\Delta K_{app} < 1$, 裂尖的实际应力强度因子范围比名义值小, 裂纹扩展受到屏蔽。裂尖离界面距离越近, 屏蔽作用越明显, 因而在同样的名义外载下进行比较, 复合板试样组元 1 中的裂纹扩展将慢于整体材料 1 中的裂纹扩展。

上述情况用 $f_2 \cdot \Delta K_{tip}/\Delta K_{app}$ 曲线表征如图 6 所示, 反映了不同弹性模量失配程度对裂纹扩展驱动力 ΔK_{tip} 的影响, 其中 $k = E_1/E_2$ 。对于本实验过程中裂纹到达界面前的扩展有

1) LY12 $\rightarrow$ Cu: $k = E_1/E_2 = 70/110 = 0.64 < 1$, $f_2 = 0.7 \sim 1.0$, $\Delta K_{tip}/\Delta K_{app} = 0.71 \sim 0.63$

2) Cu $\rightarrow$ LY12: $k = E_1/E_2 = 110/70 = 1.57 > 1$, $f_2 = 0.7 \sim 1.0$, $\Delta K_{tip}/\Delta K_{app} = 1.35 \sim 1.57$

可见界面两侧材料弹性模量差别越大, 对裂纹扩展驱动力的放大和屏蔽作用也越明显。

3.2 强度失配对裂纹扩展驱动力的影响

用 J_{app} 和 J_{tip} 分别表示外加载荷引起的远场 J 积分和裂尖局部 J 积分即裂纹扩展的名义驱动力和实际驱动力。强度失配对裂纹扩展驱动力的影响如图 7 所示^[2], 当裂尖离界面距离 $L > R_p$ (R_p 为裂尖塑性区尺寸) 时, 界面两侧材料强度失配对面裂纹扩展没有影响; 当裂尖与界面距离 $L < R_p$ 时, 若裂纹由屈服强度低的一侧向高的一侧扩展则 $J_{tip}/J_{app} < 1$, 并且裂尖离界面距离越近, J_{tip}/J_{app} 越小, 即此时促使裂纹扩展的实际驱动力小于名义驱动力, 裂纹扩展受到屏蔽, 并且随裂尖离界面距离的变近屏蔽作用越来越强, 对裂纹扩展的止裂效果也就越明显; 而反之若裂纹由屈服强度高的一侧向低的一侧扩展则 $J_{tip}/J_{app} > 1$, 其影响也正好相反, 裂纹扩展将被加速。

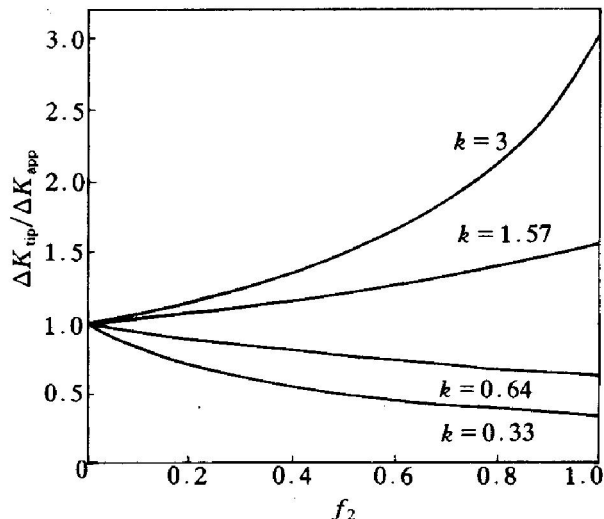


图 6 弹性错配对裂纹扩展驱动力的影响

Fig. 6 Effect of elastic mismatch on driving force of fatigue crack growth

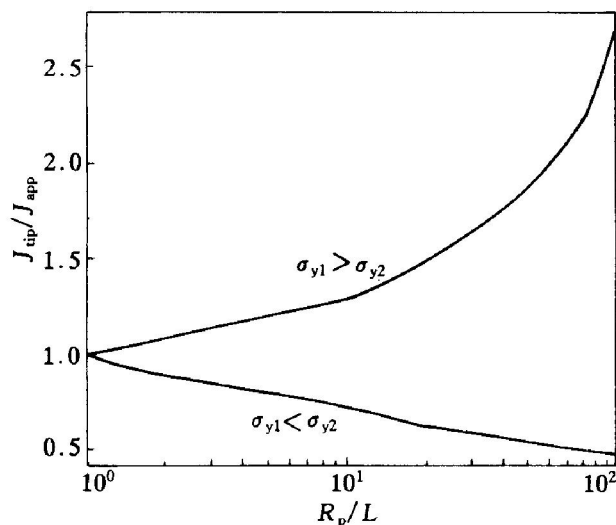


图 7 强度错配对裂纹扩展驱动力的影响

Fig. 7 Effect of strength mismatch on driving force of fatigue crack growth

在循环加载条件下裂尖塑性区尺寸为

$$R_p = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta K}{\sigma_y} \right)^2 \quad (8)$$

实验过程中裂纹由 LY12 $\rightarrow$ Cu 时比由 Cu $\rightarrow$ LY12 时所用的 ΔK 值要小得多, 而 LY12 的屈服强度 σ_{yLY12} 又大于 Cu 的屈服强度 σ_{yCu} , 因此有 $R_{pLY12} < R_{pCu}$, 即塑性失配对 Cu 侧的影响范围要更大一些。并且计算结果表明, 上述两取向扩展的裂纹, 满足条件 $L < R_p$ 时, R_p 比界面纯铝层的厚度要大得多, 因此尽管界面纯 Al 层的屈服强度比两侧材料都低, 对裂纹扩展也起着一定的加速或屏蔽作用, 但强度失配的影响将主要来自下层的 Cu 或 LY12。

[REFERENCES]

- [1] Suresh S, Sugimura Y, Tschegg E K. The growth of a fatigue crack approaching a perpendicularly oriented bimaterial interface [J]. Scripta Metall Mater, 1992, 27: 1189– 1194.
- [2] Sugimura Y, Lim P G, Shih C F. Fracture normal to a bimaterial interface: effect plasticity on crack-tip shielding and amplification [J]. Acta Metall Mater, 1995, 43 (3): 1157– 1169.
- [3] Kim A S, Suresh S. Plasticity effects on fracture normal to interfaces with homogeneous and graded compositions [J]. Int J Solids Struct, 1997, 34(26): 3415– 3422.
- [4] Wappling D, Gunnars J, Stahle P. Crack growth across a strength mismatched bimaterial interface [J]. Int J Fract, 1998, 89: 223– 243.
- [5] Pippan R, Riemelmoser F O. Fatigue of bimaterial: investigation of the plastic mismatch in case of cracks perpendicular to the interface [J]. Computational Mater Sci, 1998, 13: 108– 116.
- [6] 崔建国, 付永辉, 李 年, 等. LY12 爆炸复合板疲劳性能研究 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(2): 170 – 174.
- CUI Jiar-guo, FU Yong-hui, LI Nian, et al. Fatigue crack propagation of explosive bonded laminate LY12 plate [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(2): 170– 174.
- [7] He M Y, John W Hutchinson. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials [J]. Int J Solids Struct, 1989, 25: 1053– 1067.
- [8] Delfin P, Gunnars J. Effect of elastic mismatch on the growth of a crack initially terminated at an interface in elastic plastic bimaterials [J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1995, 18(10): 1201– 1212.
- [9] Romeo A, Ballarini R. A cohesive zone model for cracks terminating at a bimaterial interface [J]. Int J Structures, 1997, 34(11): 1307– 1326.
- [10] Wang T C, Stahle P. Stress state in front of a crack perpendicular to bimaterial interface [J]. Engng Fract Mech, 1998, 59(4): 471– 485.
- [11] Chen D H. A crack normal to and termination at a bimaterial interface [J]. Engng Fract Mech, 1994, 49 (4): 517– 533.
- [12] Fenner D N. Stress singularities in composite materials with an arbitrarily oriented crack meeting an interface [J]. Int J Fracture, 1976, 12(6): 705– 721.

Fatigue crack propagation in LY12/ Cu double-layer metal laminate(I)

——Face crack

CUI Jiar-guo¹, FU Yong-hui², LI Nian², SUN Jun², HE Jia-wen², MA Ju-sheng¹

(1. Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University,

Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University,

Xi'an 710049, China)

[Abstract] The fatigue face-crack growth behavior in explosive bonded double-layer metal composite plate (LY12/Cu) was investigated. The results indicate that, the elastic-plastic mismatch of components has significant influence on the near-tip “driving force” of fatigue crack growth. It is demonstrated that the crack-tip is “shielded” from the remote loads when it approaches the interface from the weaker material whose yielding strength and elastic module are lower. And the effective “driving force” at the crack tip is greater than the remote loads when it approaches the interface from the stronger material whose yielding strength and elastic module are higher. The shielding and amplification of the near-tip “driving force” from the components’ elastic-plastic mismatch are more and more obvious with the crack-tip approaching the interface. However, the ranges of elastic mismatch and plastic mismatch taking effect are not the same. The elastic mismatch acts from the fatigue crack starting growth to crack-tip contacting interface, the plastic mismatch only acts after the crack-tip plastic zone contacting the interface.

[Key words] metal laminate; fatigue crack propagation; elastic-plastic mismatch

(编辑 何学锋)