

文章编号: 1673-5196(2016)05-0163-04

铝/钢爆炸焊复合板界面裂纹的扩展路径

李有堂, 李浩勇, 宋 鸣

(兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 以双向受均匀拉伸的铝/钢爆炸焊复合板为研究对象, 采用应变能密度因子理论, 分析表面对称中心的 I 型裂纹扩展到复合板结合处时的扩展方向, 讨论泊松比 μ 和裂纹尺寸对裂纹扩展路径的影响. 结果表明: 双向受均匀拉伸的铝/钢爆炸焊复合板中垂直于表面对称中心的 I 型裂纹扩展到复合板结合处时, 其扩展方向存在两种可能, 一是裂纹继续沿着垂直于复合板结合处的方向扩展, 二是裂纹扩展方向发生改变, 沿着平行于复合板结合处的方向扩展, 对此起决定性作用的是铝/钢爆炸焊复合板结合处熔化层材料的泊松比 μ , 并且当 $|\mu - 0.25|$ 越大, 复合板的板宽 w 越小、裂纹长度 a 越大, 这种作用就越明显.

关键词: 爆炸焊复合板; 界面融化层; 裂纹扩展路径; 泊松比

中图分类号: O34 **文献标志码:** A

Propagation path of interface crack on aluminum/steel explosively welded composite plate

LI You-tang, LI Hao-yong, SONG Ming

(College of Mechano-Electronic Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: Taking the aluminum/steel composite plate with explosive welding and subjected to two-way uniformed tension as investigation object, the propagation direction of I-type crack at surface symmetric center and propagation to the juncture of the composite plate is analyzed with strain-energy density factor theory and the influence of Poisson's ratio μ and crack size on the crack propagation path is discussed. The result shows that the propagation of the I-type crack in above-mentioned composite plate and perpendicular to the surface symmetric center and propagating to the juncture of composite plate will have two possible directions, one being that the crack continues to grow along the direction perpendicular to the juncture of composite plate and the other being that the crack extends along the direction of the juncture of the composite plate. The poisson's ratio of melting layer materials at the junction will play a decisive role. The larger the $|\mu - 0.25|$, the shorter the width and the longer the length of crack is, the more obvious this effect will be.

Key words: explosively welded composite plate; interface melting layer; crack propagation path; Poisson's ratio

通过各种不同的工艺方法把两种不同的材料连接在一起使用的结构称双材料, 其连接处称为界面. 由于将各种材料的优势集中在一起, 双材料的应用范围不断扩大, 其界面力学的研究也蓬勃发展. 爆炸焊金属复合板做为双材料的一个重要分支, 在航天、航空、航海中显示了广泛的引用前景^[1]. 例如阿

波罗号航天飞机上的钛/铝过渡接头、核电站中换热器的管板都是通过爆炸焊复合技术制作. 铝的密度小, 强度、耐蚀能力强, 塑性、韧性、导热和导电性好; 钢的强度高, 延展性好, 通过爆炸焊将他们连接起来组成铝/钢复合板兼具二者的物理和化学特性, 具有良好的综合性能, 是一种具有广泛用途的宏观复合材料.

铝/钢爆炸复合板在化学物理条件的共同作用下容易在复合板表面产生源裂纹. 崔建国等^[2], 余历

收稿日期: 2015-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(71461018)

作者简介: 李有堂(1963-), 男, 甘肃定西人, 博士, 教授, 博导.

军等^[3]通过实验发现铝/钢爆炸复合板表面裂纹扩展到界面时裂纹的扩展路径存在三种情况,在载荷足够大的情况下裂纹的扩展路径只存在两种情况:裂纹或者穿过界面继续扩展,或者在界面处发生垂直便折继续扩展.崔建国等^[4]提出裂纹扩展方向在界面处的便折是裂纹的重新萌生.狄建华^[5]提出结合界面产生的加工硬化效应是爆炸焊接界面的一个共同特征.爆炸焊接过程中界面金属发生强烈的塑性变形,在如此强烈的塑性变形及高应变率下,材料将产生高密度位错并发生动态再结晶,这种变化必然导致界面处金属硬度的提高,抗脆断能力下降^[6].

断裂力学中有一个假说: I 型裂纹总是沿原平面扩展,这点已被最大拉应力理论所证实.但在实际中人们发现,有时这个假说与实验事实不符^[7].爆炸焊过程中界面会发生金属冶金反应,生成 Al、Fe 的金属间化合物,这种金属间化合物是一种硬度极高的脆性材料,同时界面金属发生强烈的塑性变形,必然导致界面产生“加工硬化效应”^[5-6],其融化层厚度约为基板厚度的 1/100^[8].当 I 型裂纹扩展至此界面时,通过崔建国等^[2]的实验,上述假说显然是不成立的.对于垂直于界面裂纹问题的研究始于 Williams^[9],其后部分学者^[10-11]对此问题进行了深入研究,但研究的对象大都限于二维半无限裂纹问题,本文旨在通过应用应变能密度因子理论对双向受均匀拉伸的铝/钢爆炸焊复合板中垂直于表面对称中心处的 I 型裂纹扩展到复合板结合处时,裂纹可能存在的扩展方向进行理论研究,同时找出决定其扩展方向的主要因素.

1 纯 I 型裂纹的应变能密度因子

断裂的三种形式中,最常发生的是 I 型裂纹^[7],铝/钢爆炸焊复合板在其表面产生的源裂纹也可以近似为 I 型裂纹,所以本文只研究垂直于铝/钢爆炸焊复合板界面 I 型裂纹的扩展路径,对于受双向均匀拉伸的铝/钢爆炸焊复合板中任意的裂纹形式如图 1 所示.

由应变能密度理论可知应变能密度因子为

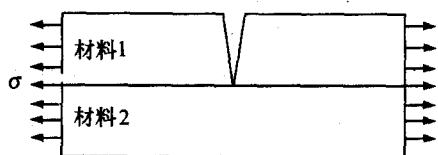


图 1 受力模型及加载方式

Fig. 1 Force-action model and loading mode

$$S = a_{11}K_I^2 + 2a_{12}K_I K_{II} + a_{22}K_{II}^2 + a_{33}K_{III}^2 \tag{1}$$

式中

$$a_{11} = \frac{1}{16\pi G} [(3 - 4\mu - \cos \theta)(1 + \cos \theta)]$$

$$a_{12} = \frac{1}{16\pi G} 2 \sin \theta (\cos \theta - 1 + 2\mu)$$

$$a_{22} = \frac{1}{16\pi G} [4(1 - \mu)(1 - \cos \theta) + (1 + \cos \theta)(3 \cos \theta - 1)]$$

其中:G 为剪切模量;θ 为极角;μ 为泊松比;K_I, K_{II}, K_{III} 分别是 I, II, III 型裂纹的应力强度因子.

对于 I 型裂纹:

$$K_{II} = 0 \quad K_{III} = 0 \tag{2}$$

根据断裂力学:

$$K_I = C\sigma\sqrt{\pi a} \tag{3}$$

式中:C 为布朗系数,

$$C = 1 + 0.256\left(\frac{a}{w}\right) - 1.152\left(\frac{a}{w}\right)^2 + 12.2\left(\frac{a}{w}\right)^3$$

a 为裂纹的长度一半;w 为板宽.

将式(3)代入式(1)得

$$S = \frac{C^2 \sigma^2 \pi a}{16\pi G} [(3 - 4\mu - \cos \theta)(1 + \cos \theta)] \tag{4}$$

2 界面融化层材料泊松比 μ 对界面裂纹扩展路径的影响

从物理意义上来说,裂纹不可能倒扩展,所以在式(4)中,θ ∈ [0, π/2], 则 cos θ ∈ [0, 1].

根据应变能密度因子理论基本假设:裂纹沿着应变能密度因子最小的方向开始扩展,为了得到 I 型裂纹在铝/钢爆炸焊复合板界面上最容易扩展的方向,只需求式(4)中应变能密度因子 S 的最小值.即

$$S_{\min} = \frac{\sigma^2 \pi a}{16\pi G} [(3 - 4\mu - \cos \theta)(1 + \cos \theta)] \quad \theta \in [0, \pi/2] \tag{5}$$

只需求

$$w_{\min} = \frac{\sigma^2 \pi a}{16\pi G} [(3 - 4\mu - x)(1 + x)] \quad x \in [0, 1]$$

根据数学知识,由于 μ ∈ (0, 0.5)^[12], w_{min} 只能在 w(1) 或 w(0) 中取,即 S_{min} 只能在 S(0) 或 S(π/2) 中取.

$$S(0) = \frac{C^2 \sigma^2 a}{16G} (4 - 8\mu) \tag{6}$$

$$S(\pi/2) = \frac{C^2 \sigma^2 a}{16G} (3 - 4\mu)$$

根据材料力学知识 μ ∈ (0, 0.5) 运用数学比较法可

得

$$\begin{aligned} S(0) \geq S(\pi/2) & \quad \mu \in (0, 0.25] \\ S(0) \leq S(\pi/2) & \quad \mu \in [0.25, 0.5) \end{aligned}$$

由此可知,当泊松比 $\mu \geq 0.25$ 时裂纹沿着 $\theta=0$ 的方向扩展,即裂纹沿着垂直界面的方向扩展.当 $\mu \leq 0.25$ 时裂纹沿着 $\theta=\pi/2$ 的方向扩展,即裂纹沿着平行于界面的方向扩展.

由于爆炸焊后的界面融化层材料的硬度增大、脆性增强,导致泊松比 μ 降低^[13].钢爆炸焊复合板中合金钢的泊松比 $0.25 \leq \mu \leq 0.30$,铝合金的泊松比一般为 0.33 ^[14].可以看出与铝合金相比较,靠近合金钢一侧的界面融化层泊松比 μ 最容易小于临界值 0.25 ,也就是说裂纹从合金钢的表面扩展至界面时,裂纹扩展路更容易发生便折,从而沿着平行于界面的方向扩展,这也与实验结果相吻合.

3 裂纹长度与板宽 w/a 对复合板界面裂纹扩展路径的影响

结合崔建国实验结果^[4],对式(7)中的各个参数分别取值 $a=10, w=100, G=81 \text{ GPa}, \sigma=220 \text{ MPa}$,在 $0.249 \leq \mu \leq 0.251$ 的范围内,结合式(7)利用软件 Matlab 计算裂纹尖端的应变能密度因子 $S(0)$ 和 $S(\pi/2)$,计算结果如图 2 所示.通过计算可知 $|\mu - 0.25| < 0.1$ 时 $|S(0) - S(\pi/2)| \leq 0.005$,即 $|\mu - 0.25|$ 值越小, $|S(0) - S(\pi/2)|$ 越接近,也就是说界面融化层材料泊松比 μ 在 0.25 上下很小范围内摆动时,其对复合板界面裂纹,路径选择的决定作用并不明显.

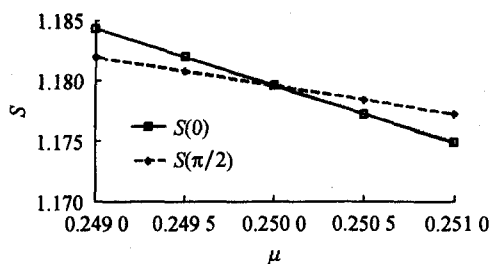


图 2 μ 在 0.25 左右很小范围内摆动时的 $S(0)$ 和 $S(\pi/2)$
Fig. 2 $S(0)$ and $S(\pi/2)$ in case of small fluctuation of μ about 0.25

分别对式(7)中各个参数取如下值: $\mu=0.3, a=10, G=81 \text{ GPa}, \sigma=220 \text{ MPa}$,在 $10 \leq a \leq 50$ 的范围内,结合式(7)利用软件 Matlab 计算裂纹尖端的应变能密度因子 $S(0)$ 和 $S(\pi/2)$,计算结果如图 3 所示.随着 a 的增大, $|S(0) - S(\pi/2)|$ 的值不断增大,即在 $|\mu - 0.25|$ 取较大值时,随着 a 的增大,界面融化层材料泊松比 μ 对复合板界面裂纹路径选择的

决定性作用不断加强.

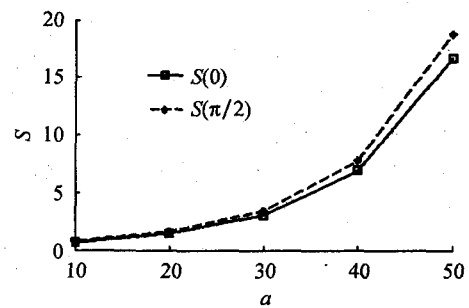


图 3 a 对 $S(0)$ 和 $S(\pi/2)$ 的影响
Fig. 3 Influence of a on $S(0)$ and $S(\pi/2)$

分别对式(7)中各个参数取如下值: $\mu=0.3, a=10, G=81 \text{ GPa}, \sigma=220 \text{ MPa}$,在 $20 \leq w \leq 100$ 的范围内,结合式(7)利用软件 Matlab 计算裂纹尖端的应变能密度因子 $S(0)$ 和 $S(\pi/2)$,计算结果如图 4 所示.随着 w 的增大, $|S(0) - S(\pi/2)|$ 的值不断减少,即在 $|\mu - 0.25|$ 取较大值时,随着 w 的增大,界面融化层材料泊松比 μ 对复合板界面裂纹路径选择的决定性作用不断削弱.

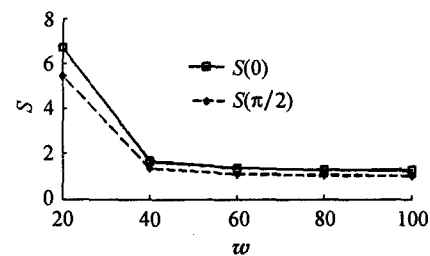


图 4 w 对 $S(0)$ 和 $S(\pi/2)$ 的影响
Fig. 4 Influence of w on $S(0)$ and $S(\pi/2)$

综上所述,铝/钢爆炸焊复合板界面融化层材料的泊松比 μ 对界面裂纹的路径选择起决定性作用,但是如果界面融化层材料泊松比在 0.25 很小范围内左右摆动时,其对复合板界面裂纹路径选择的决定作用并不明显,只有当 μ 在 0.25 很大范围内摆动时,随着 a 的增大、 w 的减少,铝/钢爆炸焊复合板界面融化层材料泊松比 μ 对其界面裂纹路径选择的决定性作用才不断加强.

4 结论

1) 在载荷足够大的情况下,垂直于铝/钢爆炸焊复合板的表面中心的 I 型裂纹扩展到复合板界面时,如果界面融化层材料泊松比 $\mu \geq 0.25$,裂纹沿着 $\theta=0$ 的方向扩展,即裂纹沿着垂直界面的方向扩展;如果界面融化层材料泊松比 $\mu \leq 0.25$,裂纹沿着 $\theta=\pi/2$ 的方向扩展,即裂纹沿着平行于界面的方向

扩展.

2) 铝/钢爆炸焊界面熔化层材料泊松比 μ 可以表示为 $\mu = 0.25 \pm \Delta\delta$, 当 $\Delta\delta < 0.1$ 时, 其对复合板界面裂纹路径选择的决定作用并不明显, 只有当 $\Delta\delta > 0.1$ 时, 随着 a 的增大、 w 的减少, 复合板界面熔化层材料泊松比 μ 对其界面裂纹路径选择的决定性作用不断加强.

参考文献:

- [1] 曹睿, 余斯亮, 王岑, 等. 铝钢异种金属 CMT 焊接温度场的数值模拟 [J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(5): 19-22.
- [2] 崔建国, 马莒生, 傅永辉, 等. 爆炸复合 LY12/20g 双金属板疲劳裂纹扩展行为研究 I 面裂纹 [J]. 金属学报, 2001, 37(12): 1261-1265.
- [3] 余历军, 雷闫盈, 陈立宇, 等. 复合层板 L-T 取向疲劳裂纹的扩展行为 [J]. 机械工程材料学报, 2007, 31(12): 15-19.
- [4] 崔建国, 贾敏, 李年, 等. 铝/钢爆炸复合板界面的钝化作用 [J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(1): 76-81.
- [5] 狄建华. 金属材料的爆炸焊接与硬化技术的研究 [D]. 太原: 华北工学院, 2001.
- [6] 廖华刚. 爆炸焊接参数对复合板界面组织及力学性能的影响 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2003.
- [7] 魏庆同, 郎福元. 机械加工中的断裂设计概论 [J]. 甘肃工业大学学报, 2002, 8(1): 16-19.
- [8] 李晓杰, 闫鸿浩, 奚进一, 等. 在不同碰撞角度下爆炸焊接界面熔层厚度计算 [J]. 科学技术与工程, 2002, 2(5): 29-32.
- [9] WILLIAMS M L, ZAK A R. Crack point stress singularities at a Bi-material interface [J]. Journal of Applied Mechanics, 1963, 30(1): 142-144.
- [10] COOK T S, ERDOGAN F. Stresses in bonded materials with a crack perpendicular to the interface [J]. International Journal of Engineering Science, 1972, 10(6): 677-697.
- [11] CHEN D H A. Crack normal to and terminating at a bimaterial interface [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1994, 49(4): 517-532.
- [12] 冯劲梅, 连之伟, 孙云. 材料泊松比对塑性屈服的影响 [J]. 东北石油大学学报, 2003, 7(3): 74-76.
- [13] 石玢, 何翠翠, 黄健康, 等. 铝钢焊接界面金属间化合物形成的热力学分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(4): 5-7.
- [14] 徐灏. 机械设计手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.