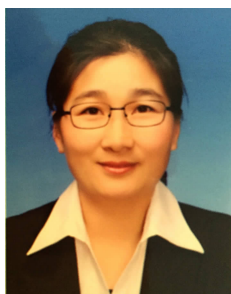


# Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料层间断裂性能研究

王泽明, 周培俊, 汪恩浩, 袁丁, 姜凤春, 果春焕

(哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 超轻材料与表面技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)



果春焕

**摘要:** 金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 是采用 Ti-6Al-4V 箔和 Al 箔按照一定顺序叠加后, 在真空环境下热压烧结成由韧性金属 Ti 和金属间化合物 Al<sub>3</sub>Ti 组成的叠层结构。利用 ENF (End-Notch-Flexure) 和 MMF (Mixed-Mode-Flexure) 测试方法, 对 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的 II 型及 I+II 型层间断裂能、层间断裂行为以及能量释放率等方面进行了研究。结果表明, Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层间断裂时, 裂纹在复合材料界面处发生起裂, 而在传播过程中发生偏转, 最终导致 Al<sub>3</sub>Ti 层开裂。由此可见, 在实验过程中裂纹的表现形式是在 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 界面及 Al<sub>3</sub>Ti 层中共同扩展; I+II 型层间起裂能量释放率  $G_{I+II}$  为 46 J/m<sup>2</sup>, II 型层间起裂能量释放率  $G_{II}$  为 1453 J/m<sup>2</sup>, 表明 II 型层间断裂比 I+II 型层间断裂更困难。

**关键词:** 层状复合材料 Ti/Al<sub>3</sub>Ti; I+II 型层间断裂; II 型层间断裂; 层间断裂研究; 层间能量释放率

**中图分类号:** TB331 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)02-0155-06

## Research on Interlayer Fracture Properties of Ti/Al<sub>3</sub>Ti Layered Composite

WANG Zeming, ZHOU Peijun, WANG Enhao, YUAN Ding,  
JIANG Fengchun, GUO Chunhuan

(Key Laboratory of Superlight Materials and Surface Technology, Ministry of Education,  
College of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Metal-Intermetallic Laminate (MIL) composite Ti/Al<sub>3</sub>Ti, which is a class of laminated material and consists of ductile Ti layers and intermetallic Al<sub>3</sub>Ti layers, is sintered using both Ti-6Al-4V foils and Al foils. In this paper, the methods of ENF (End-Notch-Flexure) test and MMF (Mixed-Mode-Flexure) test are used to investigate the interlaminar fracture energy of two fracture types (type II and type I + II), the interlaminar fracture behavior and the energy release rate of MIL composite Ti/Al<sub>3</sub>Ti. The results show that the crack initiation occurred at the interface between the layers, and the deflection occurred in the course of the crack propagation, which led to the crack of Al<sub>3</sub>Ti layer. Therefore, the cracks finally appeared to propagate at both the interface of composite and the Al<sub>3</sub>Ti layer. The interlaminar fracture energy release rates  $G_{I+II}$  and  $G_{II}$  are 46 J/m<sup>2</sup> and 1453 J/m<sup>2</sup>, respectively, which show that type II interlaminar fracture crack requires more energy than that of type I + II.

**Key words:** metal-intermetallic laminate (MIL) composite; I+II interlaminar fracture; II interlaminar fracture; interlaminar fracture behavior; inter-layer energy release rate

## 1 前言

金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 由于其具有

低密度、高比强度和比弹性模量, 且在高温时仍可保持足够高的强度和刚度等优异性能, 使其在航空航天、舰船、地面武器装备等领域受到极大的重视<sup>[1-3]</sup>。Vecchio 等<sup>[4]</sup>首先在无真空条件下用 Ti 箔和 Al 箔烧结制备出了界面结合良好、无杂质、结构致密的 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料, 利用 Ti 的韧性大幅提高了金属间化合物 Al<sub>3</sub>Ti 的室温塑性。国内哈尔滨工程大学也利用无真空烧结制备技术制备出了高性能金属间化合物基层状复合材料 Ti/Al<sub>3</sub>Ti, 并开展了装甲防护性能方面的研究<sup>[5-6]</sup>。

收稿日期: 2015-9-02

基金项目: 国家科工局基础科研项目 (B2420133004); 国家自然科学基金 (11402060)

第一作者: 王泽明, 男, 1989 年生, 硕士研究生

通讯作者: 果春焕, 女, 1980 年生, 讲师, 硕士生导师, Email: guochunhuan@hrbeu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.02.11

目前,对这种 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料研究大多集中在制备工艺或断裂失效方面<sup>[7,8]</sup>,而对 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料界面方面的研究鲜见报道。本文利用真空热压烧结方法制备 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料,并利用 MMF (Mixed Mode Flexure) 和 ENF (End-Notch-Flexure) 方法测定 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料 I+II 型层间混合断裂和 II 型层间断裂的能量释放率,来探究该材料的层间裂纹扩展方式。

## 2 实验

### 2.1 复合材料 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 的制备

在 ZRT-60-30 型真空热压炉上进行真空热压烧结 Ti/Al<sub>3</sub>Ti, 选用厚度为 0.60 mm 的 Ti-6Al-4V 箔片和 0.90 mm 的 Al 箔片(纯度为 99.99%)为原料。试样尺寸为 100 mm(长)×100 mm(宽)。对金属箔片进行预处理,即去除其表面的氧化皮、污物等,并使其表面保持干燥。然后把 Ti, Al 箔片交替叠加,叠加后要保证最外层为 Ti 层,最后放入真空热压炉中,按照一定烧结工艺进行烧结,具体详见文献<sup>[9]</sup>。

### 2.2 I+II 型层间混合断裂实验

对 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料,采用电火花线切割加工试样尺寸为 60 mm(长)×10 mm(宽)×4 mm(高),并在第 3 层 Ti 和 Al<sub>3</sub>Ti 的层间处预制裂纹,保证试样预制的裂纹在试样厚度的中间位置,试样跨距为 40 mm,加工后的 I+II 型层间混合断裂试样几何形状如图 1 所示。

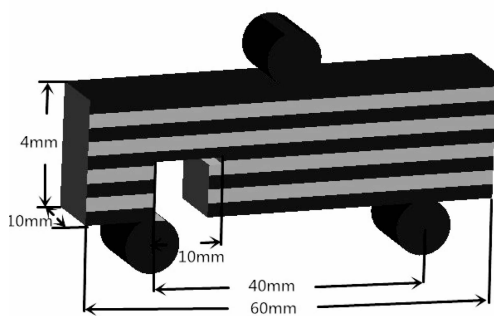


图 1 I+II 型层间混合断裂实验用的试样几何尺寸示意图

Fig. 1 The specimen geometry diagram of type I+II interlaminar fracture experiment

根据试验过程中获得的载荷-位移曲线,并结合式(1)<sup>[10]</sup>,可计算出层状复合材料在受载过程中的能量释放率:

$$G_{I+II} = \frac{42C}{b(2L^3 + 7a^3)} \cdot \left(\frac{Pa}{2}\right)^2 \quad (1)$$

其中  $P$  是加载应力(N),  $C$  为柔度(位移/应力,  $\delta/P$ ),  $a$  为裂纹长度(mm),  $W$  为试样宽度(mm),  $L$  为试样跨距

(mm),  $G_{I+II}$  为能量释放率(J/m<sup>2</sup>)。

### 2.3 II 型层间断裂实验

II 型层间断裂试样几何尺寸和预裂纹位置及长度与 I+II 型层间混合断裂实验一致,区别在于 II 型层间断裂试样预制的裂纹直接从试样的一侧开起,且裂纹端部与支座之间无空隙,加工后的试样几何尺寸如图 2。

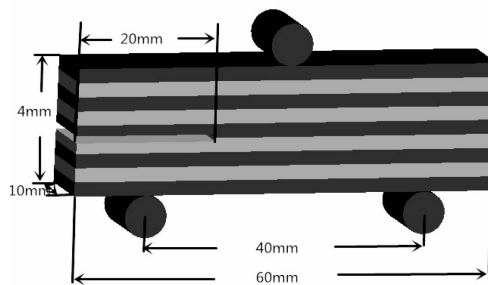


图 2 II 型层间断裂实验用的试样几何尺寸示意图

Fig. 2 The specimen geometry diagram of Type II interlaminar fracture experiment

对于 II 型断裂的计算能量释放率的公式见式(2)<sup>[11,12]</sup>:

$$G_{II} = \frac{P^2}{2W} \frac{dC}{da} \quad (2)$$

其中  $P$  是加载应力(N),  $C$  为柔度(位移/应力,  $\delta/P$ ),  $a$  为裂纹长度(mm),  $W$  为试样宽度(mm)。

柔度的计算方式<sup>[13]</sup>为式(3):

$$C = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_f W h^3} \quad (3)$$

其中  $L$  为试样跨距的一半长度,  $E_f$  为弯曲模量,  $h$  为试样厚度的一半。由公式(2)~(3)可得式(4):

$$G_{II} = \frac{9a^2 P^2}{16E_f W^2 h^3} \quad (4)$$

进而计算得到 II 型能量释放率表达形式,见式(5):

$$G_{II} = \frac{9a^2 P \delta}{2W(2L^3 + 3a^3)} \quad (5)$$

### 2.4 不同加载速率下的 I+II 型层间混合断裂实验及 II 型层间断裂实验

采用 Instron5500R 电子万能材料试验机,载荷由 2 kN 的载荷传感器输出,挠度变形由放在加载点下的变形传感器测定,载荷和挠度的变化由 X-Y 记录仪记录。在加载速率 1~5 mm/min 条件下,对 I+II 型层间混合断裂及 II 型层间断裂试样进行测试,并由载荷-位移曲线结合公式(1)和(5)得到相应的 I+II 型及 II 型层间断裂的能量释放率。

## 3 结果

### 3.1 载荷-位移及起裂能量释放率

I+II 型混合型断裂试样在加载速率为 1 mm/min 条件

下获得的载荷-位移曲线如图3所示。由图3可见,试样受载的起始阶段,随着位移的增加,载荷不断增加,二者呈线性关系;但当曲线上出现第一个转折点时,试样开始起裂,试样起裂时所对应的载荷约为200 N;试样开裂后,载荷有短暂的下降,随后又继续增加。由获得的载荷-位移曲线(图3)和公式(1),可计算得到 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的 I+II 型混合层间断裂的起裂能量释放率, I+II 型混合断裂试样起裂时对应的载荷及能量释放率列于表1所示。由此可见,在加载速率 1 mm/min 的条件下, Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料的平均起裂载荷为 196 N,而能量释放率  $G_{I+II}$  为 46 J/m<sup>2</sup>。

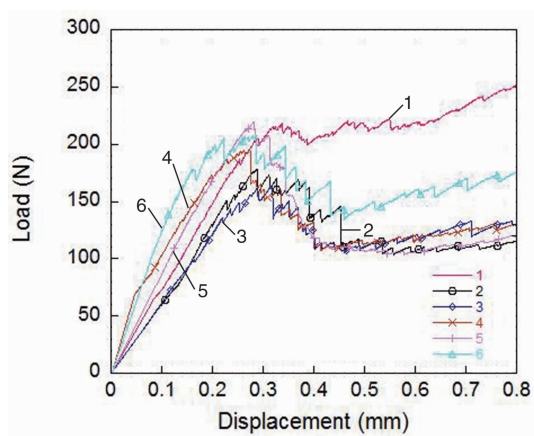


图3 I+II 型混合断裂实验的载荷-位移曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of I+II type mixed fracture experiment

表1 I+II 型混合断裂实验起裂时对应的载荷及能量释放率

Table 1 Load and energy release rate of I+II type mixed fracture experiment

Specimen	1	2	3	4	5	6	Average value
Load(N)	204	179	162	196	219	205	196
Displacement (mm)	0.31	0.32	0.32	0.30	0.32	0.23	0.30
Energy release rate(J/m <sup>2</sup> )	50	44	41	47	55	37	46

图4则为 II 型断裂获得的载荷-位移曲线,可见,试样在加载速率为 1 mm/min 的作用下,随着载荷的增加,位移量变大;达到最高点后,载荷迅速下降,此点对应试样的起裂。对比图3和4的曲线,可以看出, II 型断裂实验过程中试样起裂所需载荷明显高于 I+II 型混合断裂实验。同样,通过载荷-位移曲线(图4)及公式(5),可获得 II 型断裂实验能量释放率。II 型断裂实验裂纹起裂时的能量释放率,列于表2所示。可以看出,试

样开始起裂所对应的平均载荷为 1053 N,而此时的能量释放率为 1453 J/m<sup>2</sup>。

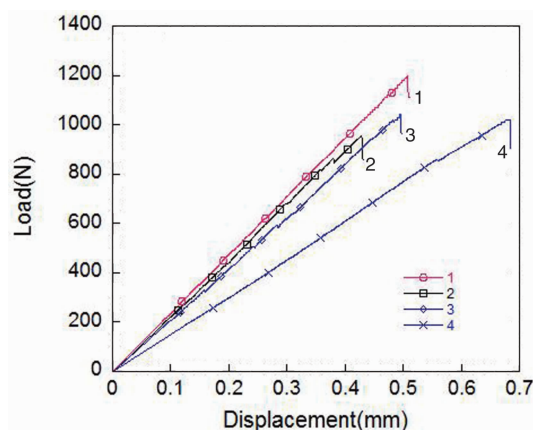


图4 II 型断裂实验的载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-Displacement curve of II type mixed fracture experiment

表2 II 型层间混合断裂实验起裂时对应的载荷及能量释放率

Table 2 Load and energy release rate of II type mixed fracture experiment

Specimen	1	2	3	4	Average value
Load (N)	1 200	1 150	1 040	1 020	1 053
Displacement (mm)	0.56	0.73	0.53	0.78	0.55
Energy release rate(J/m <sup>2</sup> )	1 598	2 023	1 315	1 909	1 453

### 3.2 加载速率对能量释放率的影响

在加载速率分别为 1 mm/min, 2 mm/min, 3 mm/min, 4 mm/min 和 5 mm/min 的条件下,得到了不同加载速率 I+II 型和 II 型层间断裂载荷-位移曲线,相应的载荷-位移曲线和能量释放率-位移曲线如图5和图6所示。

由不同加载速率下 I+II 型层间断裂实验载荷-位移曲线和能量释放率曲线(如图5所示),可以看出,能量释放率随着位移的增大而增大,在裂纹起裂时开始下降,随后由于载荷的上升,再次增加。在 1~5 mm/min 加载速率的条件下,起裂能量释放率为 85~35 J/m<sup>2</sup>。

由载荷-位移曲线图6a和裂纹扩展的能量释放率-位移曲线图6b可以看出,能量释放率随着位移的增大,而不断增加,在到达起裂时最高,随后开始下降。在 2~5 mm/min 情况下,起裂能量释放率  $G_{II}$  平均数基本维持在 2400 J/m<sup>2</sup>;在 1 mm/min 情况下,能量释放率偏低,平均只有 1250 J/m<sup>2</sup>。

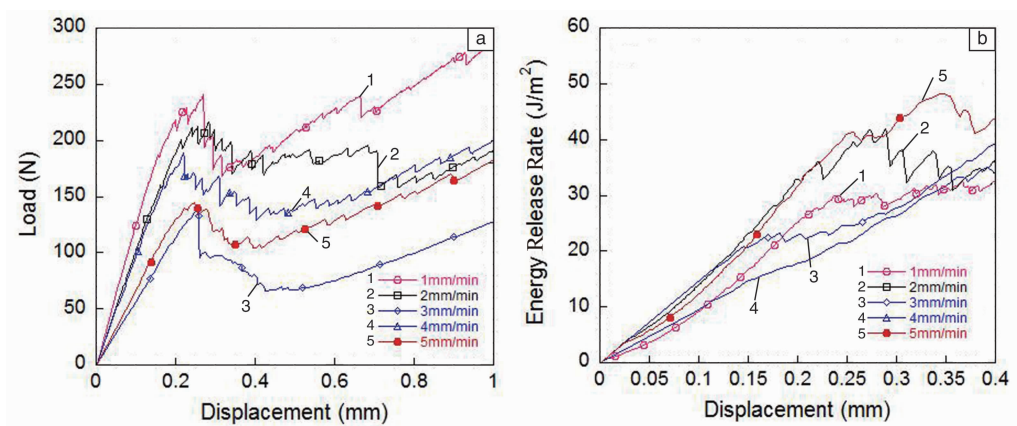


图 5 不同加载速率下 I+II 型层间断裂实验载荷-位移曲线 (a) 和能量释放率曲线 (b)

Fig. 5 Load-displacement (a) and energy release rate (b) curve of I+II type mixed fracture experiment

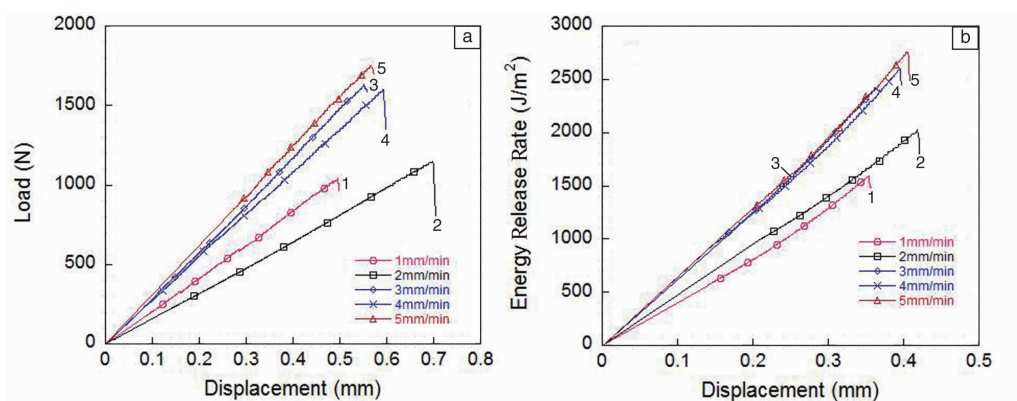


图 6 不同加载速率下 II 型层间断裂实验载荷-位移曲线 (a) 和能量释放率曲线 (b)

Fig. 6 Load-displacement (a) and energy release rate (b) curve of II type mixed fracture experiment

## 4 讨论

### 4.1 断裂裂纹在界面处扩展方式

利用 SEM 对 I+II 型层间断裂实验及 II 型断裂实验的

断口进行观察,如图 7 所示,可以看到裂纹起裂发生在 Ti/ $Al_3Ti$  层间界面处预制裂纹尖端。在裂纹扩展过程中,由于  $Al_3Ti$  具有脆性,在受弯曲过程中比层间界面更易发生断裂,从而使得裂纹扩展进入  $Al_3Ti$  材料,由于 Ti 具有

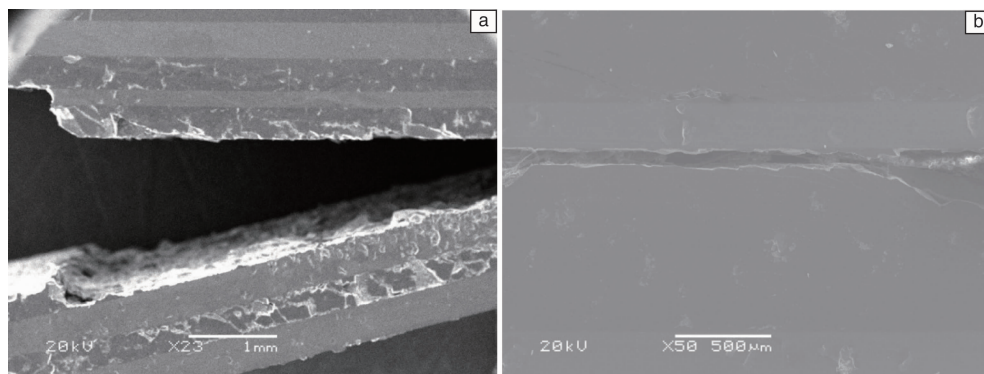


图 7 I+II 型层间混合断裂 (a) 和 II 型层间混合断裂 (b) 试样断裂后 SEM 照片

Fig. 7 SEM images of type I+II (a) and type II (b) specimens fracture



韧性,从而使裂纹在 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层间处及靠近界面处的 Al<sub>3</sub>Ti 中开始扩展。这表明在弯曲实验中, Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料不会完全沿界面开裂,而是在界面和 Al<sub>3</sub>Ti 层中混合开裂,如图 8。由此可以看出 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料界面的破坏方式属于混合应力破坏,即内聚力破坏和界面破坏共存的破坏方式。

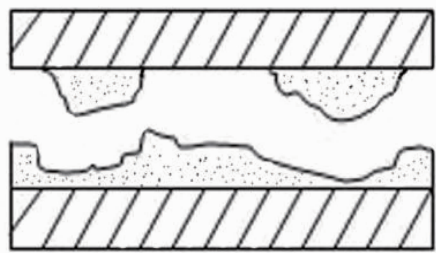


图8 界面处裂纹扩展示意图

Fig. 8 Schematic diagram of crack growth at the interface

在 1 mm/min 速率下, I+II 型层间断裂起裂能量释放率  $G_{I+II}$  为 46 J/m<sup>2</sup>, 而 II 型层间断裂实验起裂能量释放率  $G_{II}$  平均数为 1453 J/m<sup>2</sup>。造成这两种实验结果巨大差距的原因,主要是由于两种试样的断裂方式和试样的几何形状不同导致的。II 型层间断裂实验是滑移型撕裂,而 I+II 型层间断裂实验是混合型断裂。由图 1 和图 2 对比可见, I+II 型层间断裂试样在预裂纹到支座之间有间隙,即没有 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 材料,而 II 型层间断裂试样则无间隙。在三点弯曲时,试样中心受到压力, I+II 型层间断裂试样,由于预裂纹到支座之间没有材料,导致预裂纹更容易发生起裂和扩展,从而致使张开型和滑移型断裂共同存在,相应地起

裂能量释放率  $G_{I+II}$  偏小;而 II 型层间断裂试样的预裂纹到支座之间存在材料,所以断裂时只发生滑移型撕裂,预裂纹的起裂比 I+II 型层间断裂更加困难,从而导致起裂能量释放率  $G_{II}$  比  $G_{I+II}$  大 50 倍以上。

II 型层间断裂能量释放率  $G_{II}$  明显高于  $G_{I+II}$ , 且 II 型层间断裂起裂所需的载荷也明显高于 I+II 型层间断裂,由裂纹起裂所需的能量释放率及载荷来考虑,裂纹受张开型和滑移型断裂比单纯受到滑移型断裂更危险。Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层状复合材料裂纹扩展是在界面和 Al<sub>3</sub>Ti 层中共同进行,由裂纹在 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层间扩展方式可知 Ti/Al<sub>3</sub>Ti 层间结合处在弯曲过程中比 Al<sub>3</sub>Ti 强度更好。

#### 4.2 速率与能量释放率关系

在加载速率为 1 ~ 5 mm/min 的条件下, I+II 型层间断裂实验和 II 型断裂实验,由于同种实验的加载速率的不同,导致了起裂时载荷及能量释放率的变化。

根据载荷-位移曲线及相应的公式,可得到 I+II 型和 II 型断裂起裂时的能量释放率。由图 5 和图 6 以及相应的公式 (1) 和 (5),获得的不同类型层间裂纹起裂时不同加载速率下的能量释放率,如图 9 所示。由加载速率变化引起的起裂能量释放率的变化可以看出, II 型层间能量释放率随加载速率的变化呈上升趋势,而 I+II 型层间能量释放率随加载速率的变化则呈下降趋势。且根据曲线可以导出能量释放率随速率增加的关系,二者之间的关系见式 (6):

$$\begin{cases} G_{I+II} = 76.49 - 63.10 \times \log v (R = 0.93) \\ G_{II} = 1451.4 + 2194.3 \log v (R = 0.96) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $G_{I+II}$ 、 $G_{II}$  是能量释放率 (J/m<sup>2</sup>),  $v$  是速率 (mm/min)。

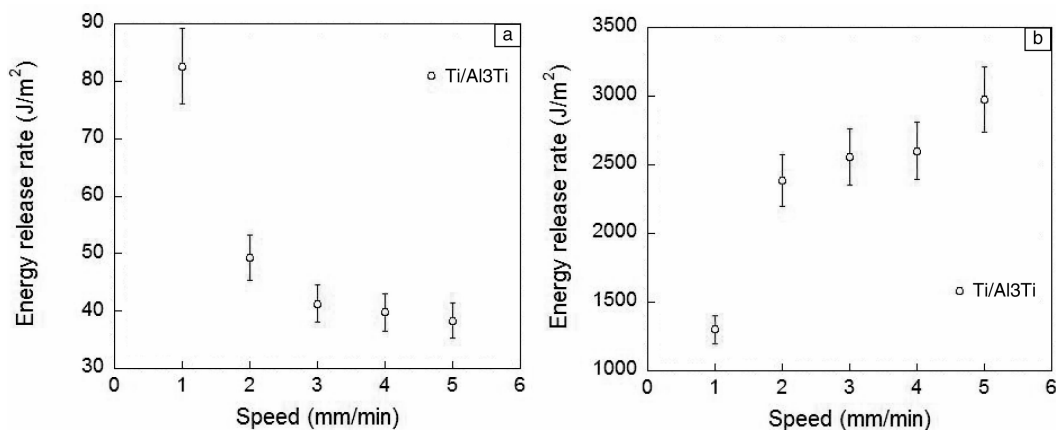


图9 不同加载速率下 I+II 型层间断裂 (a) 和 II 型断裂 (b) 裂纹起裂时能量释放率

Fig. 9 Energy release rate curve of I+II (a) and II (b) type mixed fracture experiment at different speeds

## 5 结 论

(1) 在加载速率为 1 mm/min 的条件下, I+II 型层间

断裂能量释放率  $G_{I+II}$  为 46 J/m<sup>2</sup>, II 型层间断裂能量释放率  $G_{II}$  为 1453 J/m<sup>2</sup>, II 型层间断裂起裂比 I+II 型层间断裂起裂需要更多的能量。

(2) 当层状材料  $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$  承受垂直于表面的外部载荷时, 在预裂纹处很容易导致裂纹起裂和扩展, 在受力过程中, 裂纹先在界面处起裂, 随后扩展至  $\text{Al}_3\text{Ti}$  层, 最后裂纹在  $\text{Al}_3\text{Ti}$  层和  $\text{Ti}/\text{Al}_3\text{Ti}$  界面处共同扩展。

(3) 随着加载速率的增加, I+II 型层间裂纹起裂时的能量释放率趋于减小; 而 II 型的起裂能量释放率则呈现增加趋势。

#### 参考文献 References

- [1] Kong Fantao (孔凡涛), Chen Yuyong (陈玉勇), Tian Jing (田竞), *et al.* *Materials Science and Technology* (材料科学与工艺) [J], 2003, 11 (4): 441–444.
- [2] Kim Y W. *Jom* [J], 1995, 47 (7): 39–42.
- [3] G. Sauthoff. In *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment* [M] // Robert W Cahn, Edward J Kramer, eds., VCH, New York, NY, 1995, vol. 8.
- [4] Harach D J, Vecchio K S. *Metallurgical & Materials Transactions A* [J], 2001, 32 (6): 1493–1505.
- [5] Cao Yang (曹阳), Zhu Shifan (朱世范), Guo Chunhuan (果春焕), *et al.* *Ordnance Material Science and Engineering* (兵器材料科学与工程) [J], 2014, (6): 122–128.
- [6] Cao Yang (曹阳), Zhu Shifan (朱世范), Jiang Fengchun (姜凤春). 金属间化合物基层状复合材料装甲防护性能的数值模拟 [C] // *The Abstract of 5<sup>th</sup> National Conference on Calculating Explosion Mechanics in China* (第五届全国计算爆炸力学会议论文摘要), 2012.
- [7] Peng L M, Wang J H, Li H, *et al.* *Scr Mater* [J], 2005, 52: 243
- [8] Peng L M, Li H, Wang J H. *Mater Sci Eng A* [J], 2005, 406: 309
- [9] Change Yunpeng (常云鹏), Ha Jinfen (哈金奋), Dang Chao (党超), *et al.* 金属间化合物基层状复合材料  $\text{Ti}-\text{Al}_3\text{Ti}$  制备及其力学行为 [C] // *The 17<sup>th</sup> National Academic Conference on Composites Materials in China* (第 17 届全国复合材料学术会议), 2012.
- [10] Kusaka T. *JSME International Journal Series: A Solid Mechanics and Material Engineering* [J], 2003, 46 (3): 328–334.
- [11] Irwin G R, Kies J A. *Spie Milestone Series Ms* [J], 1997, 137: 136–141.
- [12] Friedrich K, Walter R, Carlsson L A, *et al.* *Journal of Materials Science* [J], 1989, 24 (9): 3387–3398.
- [13] Russell A J, Street K N. *Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP* [J], 1985, 876: 349–370.

(编辑 盖少飞)