

基于 VCCT 技术的粘胶脱粘过程数值仿真研究

王闪帅¹ 赵 萧² 何腾峰³ 李淑慧¹

(1 上海交通大学,上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室,上海 200240)

(2 上海航天技术研究院,上海 200233)

(3 上海航天设备制造总厂,上海 200245)

文 摘 由于粘胶位于两层材料中间,胶粘结构的内部脱粘过程通常难以检测。本文通过制备三种粘胶的粘胶片体试样以及 U 型件试样,对粘胶在拉伸及剪切状态下的力学性能进行测试,并计算获得对应的应变能释放率。采用 VCCT 技术,预设断裂及脱粘区域,对粘胶在单拉及剪切受力状态下的开裂及脱粘过程进行数值仿真。通过对比数值仿真与实验获得的最大应力及最大位移,验证了 VCCT 技术能有效获得这三种粘胶的断裂临界载荷,并表明这种方法能获得脱粘区域的扩展过程,为研究复杂结构的脱粘过程奠定了基础。

关键词 胶粘,VCCT 技术,数值仿真

中图分类号: V257

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2014.06.002

Numerical Simulation of Adhesive Debonding Process Based on VCCT

WANG Shanshuai¹ ZHAO Xiao² HE Tengfeng³ LI Shuhui¹

(1 Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-Walled Structures,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

(2 Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 200233)

(3 Shanghai Spaceflight Manufacture(Group)Co.,Ltd, Shanghai 200245)

Abstract Since the adhesive is located between two layers of material, the internal structure of the adhesive debonding process is often difficult to detect. In this paper, three kinds of adhesives' plate samples and the U-shaped samples were made, the mechanical properties of tensile and shear state were tested and the corresponding strain energy release rate were calculated. VCCT technology was used, the fracture and debonding area were predefined, the cracking and debonding process of the adhesive in a tensile and shearing state were simulated. By contrasting the maximum stress and maximum displacement obtained by numerical simulation and experiments, it was indicated that the VCCT technology could effectively predict fracture critical load of these three adhesive, and show that this method could obtain the expansion process of debonding area. This laid a good foundation for the study of complex structures' debonding process.

Key words Adhesive, VCCT, Numerical simulation

0 引言

现代的热防护系统研究中,金属热防护系统(MTPS)是高超飞行器热防护系统的理想候选方案^[1]。金属面板夹层结构由于其较高的比刚度和比

强度,可灵活调节的隔热、抗振、降噪功能,在航空、航天、船舶、军事、交通等多个领域中被广泛使用。夹层结构的面板和芯层通常使用粘胶连接。由于粘胶本身胶接强度不够,或制造过程中存在的漏涂、涂胶不

收稿日期:2014-08-06

基金项目:上海航天技术研究院-上海交大航天先进技术联合研究中心资助项目;国家973计划项目(2010CB731703)

作者简介:王闪帅,1984年出生,博士研究生,研究方向为夹层结构的承载稳定性。E-mail: wangshanshuai@hotmail.com

表 1 三种黏胶固化条件

Tab. 1 Curing conditions of three adhesives

| 黏胶 | 固化温度/°C | 固化压力/MPa | 固化时间/h |
|-------|---------|----------|--------|
| DW-1 | 室温 | - | 72 |
| DW-3 | 60 | - | 8 |
| J-154 | 125 | 0.1 | 3 |

均等原因,胶粘结构在承载过程中会出现脱粘缺陷,局部脱粘面积扩大,引起更严重的结构失效。因此,胶粘夹层结构在承载过程中,结构是否安全可靠,使得胶粘脱粘扩展过程的监测十分重要,另外,从抑制脱粘扩展的角度出发,也需要分析发生脱粘现象的结构如何进行改进。在实际情况中,由于夹层结构的特殊形式,往往无法观测到胶粘结构内部的脱粘过程。

早在 1971 年, Wooley 等人^[2]就提出了将胶层受力情况简化为平面应力状态,并采用有限元的方法,对单层胶粘接头的应力状态进行求解。F. Shen 等^[3]用 VCCT 技术,建立了层合复合材料的分层数值模型,并对比了 1/4 模型和完整模型的计算结果。D. Xie 等^[4]提出采用 VCCT 技术对一个“几”字形胶粘件的脱粘失效进行预测,并与实验进行对比。S. K. Panigrahi 等^[5]采用三维非线性有限元方法,研究了粘接搭接接头中胶粘内部失效扩展的过程,并采用 VCCT 方法对胶粘开裂过程中的应变能释放率进行了计算。张佳佳等^[6]通过数值仿真的方法,对比了有和无黏胶剂蜂窝夹层板在均布载荷作用下的变形,指出黏胶剂在蜂窝夹层板面板和壁板较薄的情况下对结构有明显的加强作用。Y. Xia 等^[7-8]对胶焊接头的静态及动态性能的数值仿真技术进行了研究,对比了六种模拟胶粘失效的模型,并确定采用 MISW 模型能有效模拟胶焊接头上胶粘失效的过程。I. Nuin 等^[9]对风力涡轮机上的胶粘结构的失效机理进行了研究,通过基本力学实验,获得胶粘失效的相关参数,并对目标结构建立数值模型进行分析。杨欣^[10]在对胶焊接头的研究过程中,建立了胶粘接头的有限元模型,通过准静态和动态下的简单结构件实验,获得了胶层的失效参数,采用 UMAT 来预报胶层的变形和失效。

本文通过对三种粘胶进行单向拉伸以及剪切实验,计算获得对应的应变能释放率,并以此为基础建立基于 VCCT 技术的预测脱粘数值模型,并通过与实验结果对比进行验证。

1 粘胶试样的固化制备

1.1 粘胶片体的固化

DW-1、DW-3 和 J-154 三种粘胶在使用过程中都需要经过固化,其固化条件如表 1 所示。固化完成后,粘胶 DW-3 与 J-154 会与金属材质的模具产生不同程度的粘合,因此在固化模具表面需要使用脱模剂或脱模膜。对比了三种不同的脱模方式,分别为 PET 膜、脱模剂以及聚四氟乙烯膜,其中只有聚四氟乙烯膜能满足所有三种粘胶的脱模要求,因此在粘胶片体的制备过程中均采用了聚四氟乙烯膜作为脱模方式。

1.2 粘胶单拉实验及剪切实验的试样

粘胶单拉实验的试样依据 ASTM D638—10 塑料拉伸性能实验标准制备。粘胶经固化-脱模-切割后得到单拉试样。为了保证粘胶剪切试样在剪切过程中更接近纯剪切的受力情况,采用图 1 所示的双 u 型件结构^[11],粘胶将两个 u 型件粘接在一起,通过一个特制的蝶形夹具进行实验,如图 2 所示。由于试样与夹具支撑盘接触的侧壁增加了试样的刚度,使得试件在拉剪过程中接触区域的变形受到抑制,保证试件上胶层受到纯剪作用。

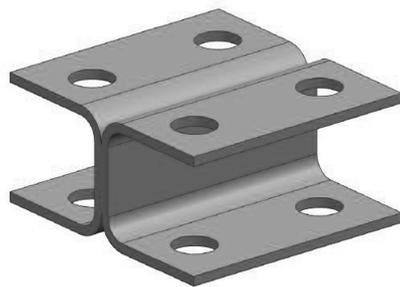


图 1 剪切 u 型件试样

Fig. 1 U-shaped shearing specimen



图 2 剪切实验蝶形夹具

Fig. 2 Butterfly fixture for the shearing experiment

2 应变能释放率的计算

2.1 本构模型及失效准则

采用双线性内聚力模型来拟合粘胶的本构模型。如图 3 所示,在双线性内聚力本构模型中,认为当材料变形在 δ_0 之前,材料处于弹性变形阶段,刚度为 K ,当材料变形超过 δ_0 而小于 δ_{max} ,材料处于线性软化阶段,当材料变形超过 δ_{max} 时,材料发生断裂。对于粘胶,可以认为当变形超过 δ_{max} 时,发生脱粘,如图 4 所示,0 点处粘胶未承载,1 点处粘胶处于弹性变形阶

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2014 年 第 6 期

段,2 点处粘胶发生屈服,3 点处粘胶发生软化,4 点处粘胶发生破坏脱粘,5 点处完全脱粘。

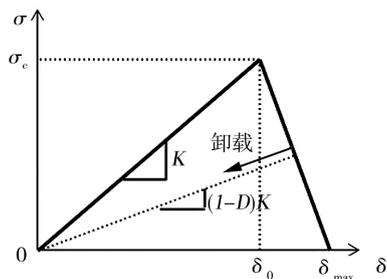


图3 双线性内聚力模型
Fig. 3 Bilinear cohesive zone model

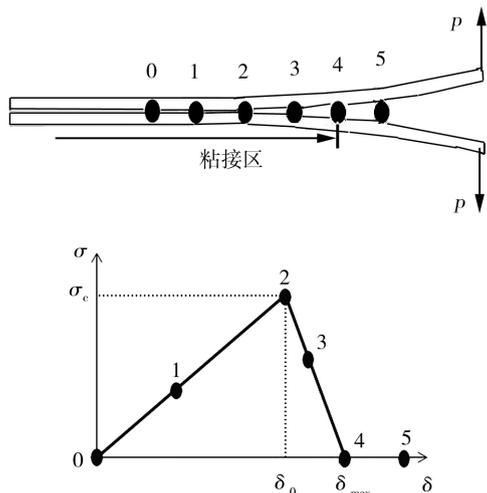


图4 脱粘发生区域典型力学行为
Fig. 4 Typical mechanical behavior of debonding area

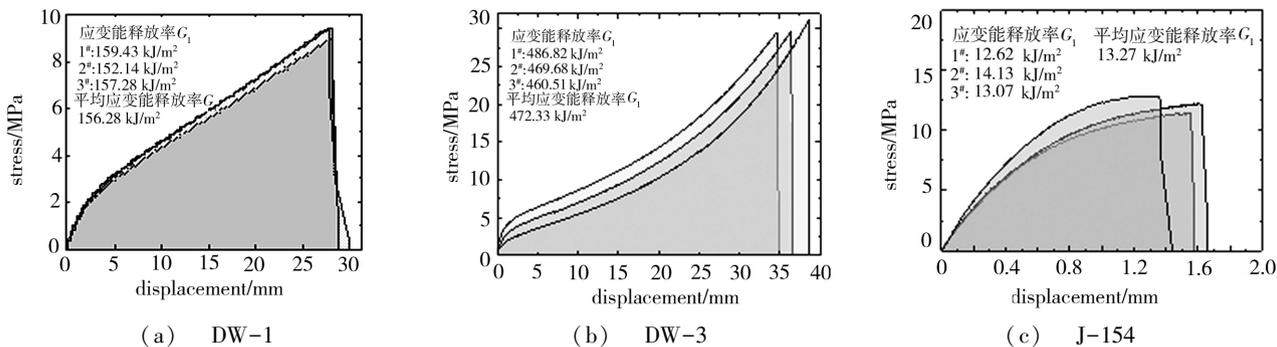


图5 粘胶单向拉伸应力—位移关系
Fig. 5 Relationship of the stress and strain under tensile condition of adhesives

2.3 II 型、III 型应变能释放率的计算

通过三种粘胶的剪切实验,来获取粘胶发生 II 型断裂的应变能释放率。具体的方法是,通过剪切实验,获得材料在剪切状态下的应力—位移关系,通过计算曲线所围的面积,获得 II 型断裂的应变能释放率。需要指出的是,由于 III 型断裂模式在实际中难以获取,其对应的应变能释放率通常认为与 II 型断裂情况下的应变能释放率相同。

对于三种粘胶的脱粘行为,均采用 *B-K* 断裂准则来定义裂纹扩展的临界应变能释放率,并通过对粘胶的单拉以及剪切实验计算得到 I、II、III 型应变能释放率。*B-K* 开裂准则具体形式如(1)式所示。

$$G^c = G_I^c + (G_{II}^c - G_I^c) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \quad (1)$$

式中, η 为与材料相关的系数,在此取 2; G 为材料的应变能释放率。

2.2 I 型应变能释放率的计算

通过三种粘胶的单拉实验,来获取粘胶发生 I 型断裂的应变能释放率。通过单拉实验,获得材料在单拉状态下的应力—位移关系,通过计算曲线所围的面积,获得 I 型断裂的应变能释放率。

通过单拉实验,可以看到三种粘胶有明显不同的力学性能,其中粘胶 DW-1 与 DW-3 具有较好的弹性,可有较大的变形量,而粘胶 J-154 则呈现明显的脆性,能承受的变形量很小。三种粘胶在变形过程中,强度的变化也有所不同。粘胶 DW-1 在初始阶段随着变形量的增加,其强度基本不变,当应变达到 0.05 左右,发生软化,强度逐渐下降,当应变达到 0.1 左右,材料的强度基本保持,直至发生断裂。粘胶 DW-3 在承受载荷的一开始就发生软化,强度迅速减小,但应变达到约 0.4 左右,其强度明显增加,直至发生断裂。而粘胶 J-154 在整个变形过程中,强度均逐渐减小。

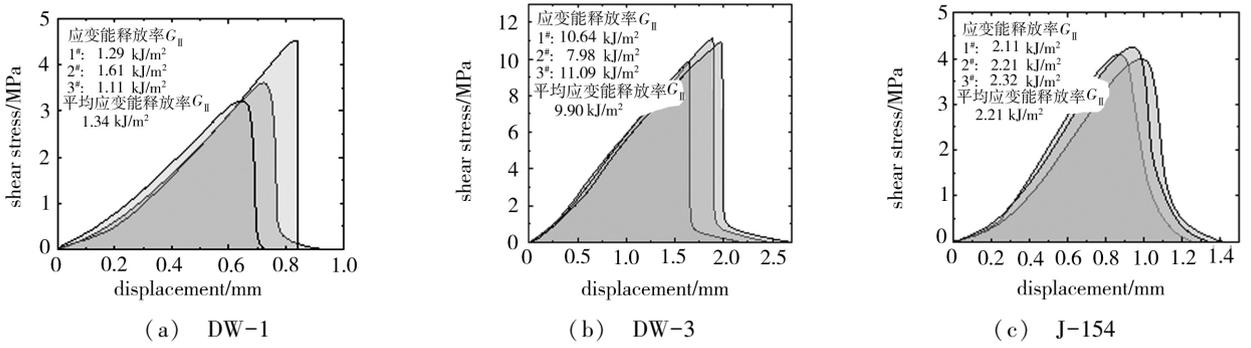


图6 粘胶剪切应力—位移关系

Fig. 6 Relationship of stress and strain under shearing condition of adhesives

3 VCCT 粘胶脱粘过程仿真

采用虚拟裂纹闭合技术 (VCCT) 对粘胶的脱粘过程进行数值仿真的模拟,通过有限元软件 ABAQUS 中嵌入 VCCT 模块实现。通过之前的实验得到了三种粘胶 I 型、II 型及 III 型应变能释放率,将所得结果作为参数输入,确定每种粘胶 $B-K$ 开裂准则对应的临界应变能释放率。

3.1 单向拉伸数值仿真

在此进行粘胶单拉实验过程数值仿真的目的是验证 VCCT 技术能否准确预测粘胶的断裂临界载荷,结果与实验进行比较。由于 VCCT 技术需要预先设定断裂发生的区域,因此在建立单拉数值模型时,将断裂发生区域设置在试样的中间,如图 7 所示。

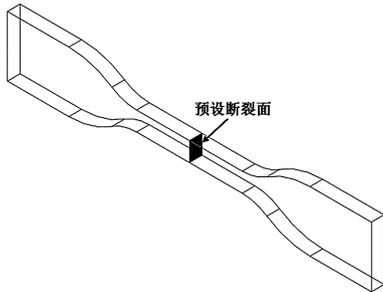
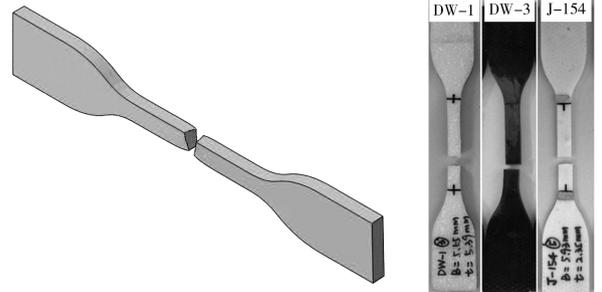


图7 粘胶单拉仿真模型

Fig. 7 Simulation model of adhesives under tensile condition

图 8 为粘胶单拉的实验与数值仿真断裂后的试样对比图,三种粘胶断裂后的状态基本一致,因此在此只

展示了一个数值仿真的结果。由实验结果可知,试样的断裂面基本垂直于试样轴线方向,且其宽度与厚度方向的变形量很小。在数值仿真结果中,试样沿着预设的断裂面发生断裂,但断裂面发生了一定的扭曲。造成这种结果的原因是,在预设断裂面上的节点,在周向拉力的作用下,逐渐一个个断开,最后几个节点断开时,端面上瞬间释放载荷,造成材料的回弹。图 8(b) 中的试样,在实验完成后,已经完成了回弹过程,因此其断裂面较为整齐。从对比结果来看,采用 VCCT 技术能预测粘胶的断裂过程。图 9 中对比了三种粘胶单向拉伸状态下实验及数值仿真获得的应力—位移关系。对比结果可以看到,三种粘胶数值仿真所获得的最大拉伸应力及最大位移与实验结果基本一致。



(a) 数值仿真结果 (b) 实验结果

图8 单拉实验与仿真断裂的粘胶试样

Fig. 8 Cracked adhesive specimens of tensile experiments and simulations

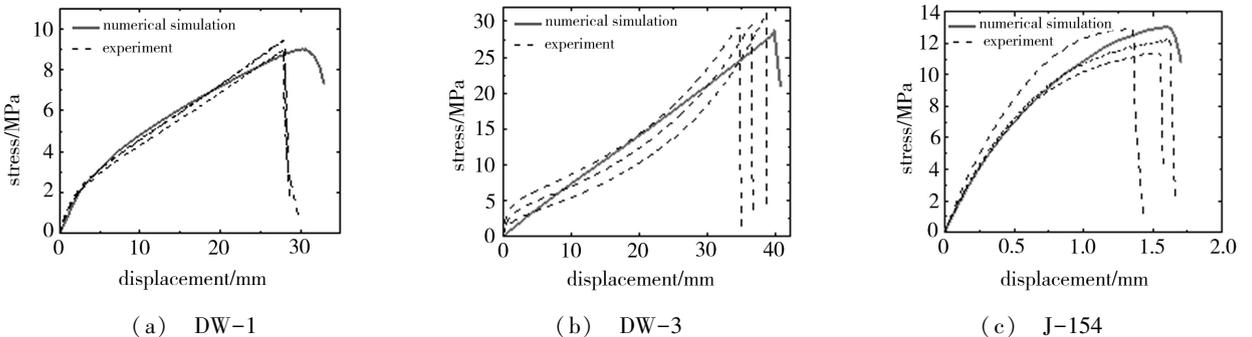


图9 粘胶单向拉伸应力—位移关系

Fig. 9 Relationship of stress and strain under tensile condition of adhesives

3.2 剪切数值仿真

在建立剪切实验数值仿真模型时,在接触面上定

义了预设断裂面,如图 10 所示。

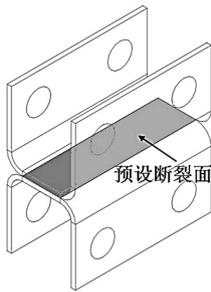
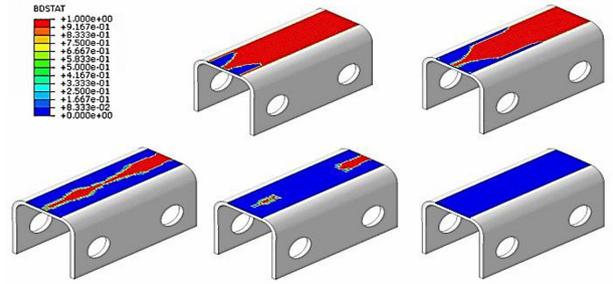


图 10 粘胶剪切仿真模型

Fig. 10 Simulation model of adhesives under shearing condition

图 11 中对比了剪切实验与数值仿真断裂后的试样,图 11(a)展示了数值仿真中得到的粘胶脱粘过程。在图 11(a)中,粘胶的脱粘过程首先是从一端的边缘发生,并在两侧沿着拉伸方向开始扩展,边缘贯穿整个试样后,逐渐向中间区域扩展,直至整个试样的两个 U 型件分离。从剪切实验的结果来看,因为 U 型件材料为钢材,强度远远超过粘胶的强度,因此试样的断裂一定发生在粘接面上,所以在粘接面上预设断裂面的方法也是符合实际情况的。图 12 中对比了三种粘胶剪切状态下实验及数值仿真获得的应

力—位移关系。对比结果可以看到,三种粘胶数值仿真所获得的最大剪切应力及最大位移与实验结果基本一致。



(a) 数值仿真结果

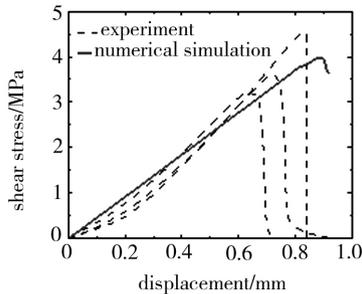


DW-1 DW-3 J-154

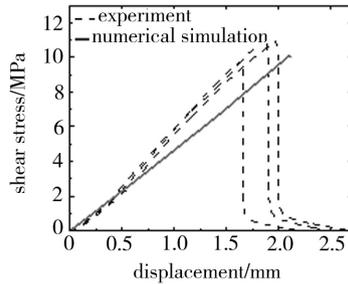
(b) 实验结果

图 11 剪切实验与仿真断裂的粘胶试样

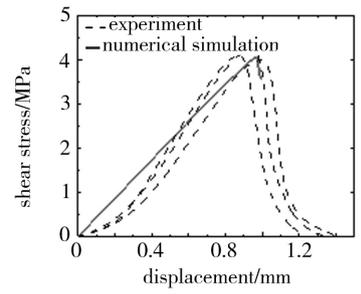
Fig. 11 Cracked adhesive specimens of shearing experiments and simulations



(a) DW-1



(b) DW-3



(c) J-154

图 12 粘胶剪切应力—位移关系

Fig. 12 Relationship of the stress and strain under shearing condition of adhesives

4 结论

(1) 通过制备粘胶片体以及 U 型件试样,对粘胶在单向拉伸以及纯剪切状态下的力学性能进行测试,并进一步计算获得了应变能释放率。

(2) 采用 VCCT 技术对粘胶的脱粘过程进行数值仿真,对比了单拉以及剪切受力状态下三种粘胶的实验和数值仿真结果。结果表明,通过 VCCT 技术能预测粘胶的最大拉伸应力以及最大剪切应力,以及断裂时刻的最大位移,与实验相比,最大应力的相符程度更高。

(3) 通常实验仅能看到最终的脱粘结果,采用数值仿真脱粘的方法能提取到脱粘扩展的中间过程,因此这种方法对于一些复杂的构件,能更有效地指导控制脱粘面积扩展的方法和手段。

参考文献

- [1] 王亮,陈怀海,贺旭东. 金属热防护系统动力学建模研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(5): 639-643
- [2] Carver D R, Wooley G R. Stress concentration factors for bonded lap joints[J]. Journal of Aircraft, 1971, 8(10): 817-820
- [3] Shen F, Lee K H, Tay T E. Modeling delamination growth in laminated composites [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(9): 1239-1251
- [4] Xie D, Chung J, Waas A M, et al. Failure analysis of adhesively bonded structures: from coupon level data to structural level predictions and verification [J]. International Journal of Fracture, 2005, 134(3/4): 231-250
- [5] Panigrahi S K, Pradhan B. Adhesion failure propagation in adhesively-bonded single-lap laminated FRP composite joints[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21(5/6): 379-398

(下转第 13 页)