

基于VCCT、CZM和XFEM的 复合材料I型分层扩展数值模拟 方法研究



龚愉, 缪昌磊, 单泽宇, 唐伟, 刘浩, 张建宇
重庆大学, 重庆 400044

摘要:建立复合材料分层扩展数值模拟方法并掌握其特性对结构剩余强度预测具有重要意义,可为复合材料结构损伤容限设计与分析提供技术支撑。虚拟裂纹闭合技术、内聚力模型和扩展有限元方法是三种常见的分层数值模拟方法,但是针对这三种方法在复合材料层合板分层建模方面的特性仍缺乏深入的对比研究,这给数值方法的使用者带来极大困惑。本文以I型分层为研究对象,采用三种方法分别建立了二维或三维有限元模型,对三种模拟方法进行全面的比较,并最终分析每种方法的优点和局限性。研究结果可为分层扩展数值模拟方法的运用提供理论支撑。

关键词:复合材料;层板;分层;有限元;数值模拟

中图分类号:V214.8

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.06.003

复合材料与传统材料相比,具有比强度和比刚度高、抗疲劳性能和可设计性好、减振性能良好、耐高温、安全系数高等优点,在很多领域都有广泛的用途和极好的发展前景,尤其是在航空航天领域^[1]。随着飞行器设计技术的发展,飞行器结构不断优化,对飞行器的结构强度要求不断提高,复合材料的应用部位逐渐从次承力结构发展到机身和机翼等主承力结构。通过正交各向异性单向层板铺叠而成的复合材料层合板被广泛应用。但是复合材料层合板在厚度方向上缺乏加强,层间性能远比面内性能低,导致结构的自由边、变厚度区域和孔边等几何不连续处,以及机械连接处等易产生高层间应力集中的区域极易发生分层损伤^[2]。分层的发生和扩展对结构整体性和安全构成极大威胁,因此,深入研究复合材料层合板结构的分层损伤问题具有重要意义。

研究者提出了各种可以用来模拟分层扩展的有限元方法,目前最常用的方法包括虚拟裂纹闭合技术(VCCT)、内聚力模型(CZM)和扩展有限元法(XFEM)。VCCT由Irwin^[3]首次提出,原理比较简单,在复合材料分层扩展模拟

中应用广泛。Krueger^[4]总结了VCCT的历史、发展现状和应用情况,VCCT可以很好地分析不同材料之间的分层扩展行为。Rybicki等^[5]提出了一种计算应力强度因子的改进方法并使用算例验证了所提方法的适用性。Shivakumar等^[6]基于他们的方法提出了一种三维的虚拟裂纹闭合技术,假设任何连续函数都可以用有限数量的直线段来近似。通过该方法对有和无凹口的表面裂纹板获得的结果与试验结果一致。Xie De等^[7]针对裂纹的直线扩展形式进行改进研究,提出了一种可在工程上通用的分层扩展分析方法。这种方法的一个重要特征是它不需要使用与分层前缘正交的网格。因此,该方法避免了在分层扩展模拟中可能导致大量计算代价的自适应重新网格技术。之后学者基于上述基础开展了很多复杂扩展问题的研究,参考文献[8]采用VCCT方法对纤维增强复合材料T形结构的断裂行为进行了模拟分析,发现倾斜载荷会影响裂纹尖端的应变能释放率,从而改变此类结构的断裂行为,因此,建议进行敏感性分析以提高预测精度。Magi等^[9]将VCCT应用于疲劳振动,分析了损伤发生时刻的响应,结果表明,响应相位的变

收稿日期: 2024-12-26; 退修日期: 2025-03-05; 录用日期: 2025-04-03

基金项目: 航空科学基金(2022Z0570Q9002)

引用格式: Gong Yu, Miao Changlei, Shan Zeyu, et al. Numerical simulation method for mode I delamination growth of composite materials based on VCCT, CZM and XFEM[J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(6): 23-32. 龚愉, 缪昌磊, 单泽宇, 等. 基于VCCT、CZM和XFEM的复合材料I型分层扩展数值模拟方法研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(6): 23-32.

化与能量释放率之间存在很强的相关性。虽然 VCCT 发展至今已经比较完善,可以很好地解决很多工程问题,但其只能模拟裂纹扩展而不能模拟分层萌生,在使用时必须设置初始裂纹。

在 CZM 方法中,分层界面的力学响应采用黏聚力—相对位移本构模型来表征,使用能量准则评估裂纹扩展,无须设置初始裂纹就可以模拟分层从萌生到扩展的全过程,这使得它在复合材料分层扩展分析中具有很高的应用价值。Elices 等^[10]对 CZM 在预测混凝土、玻璃化聚合物和钢等不同材料裂纹扩展时的准确性进行了研究,发现 CZM 可以很好地运用于对这些材料的断裂分析。Nusom 等^[11]提出了一种使用细观代表性体积单元的方法来获得 Ti-6Al-4V 和碳纤维热塑性复合材料之间结合的 I 型界面失效的内聚参数,实现了异种材料界面响应的准确模拟。Abdel-Monsef 等^[12]提出基于统一相场的内聚区模型的方法来预测碳纤维增强聚合物复合材料的界面分层。该方法基于能量最小化的经典相场方法,具有理性退化函数和多项式型裂纹几何函数。通过选择最佳本构函数来整合各种牵引—分离行为,并使该理论能够预测脆性断裂。为了考虑纤维桥接对分层扩展行为的影响,Gong Yu 等^[13-14]从分层失效机理出发,提出了修正的三线性 and 四线性内聚力本构模型,实现了复合材料多向层板 I 型分层扩展的模拟。Gong Yu 等^[15-17]进一步建立了确定内聚力本构中桥联法则的半解析方法,该方法仅需要试验记录的载荷位移数据。

扩展有限元法是传统有限元方法的有效扩展,越来越多的研究人员和学者开始关注并不断补充和完善这种方法。Karapurath 等^[18]使用 XFEM 对金属纤维层合板的分层问题进行了数值模拟,并将得到的结果与标准有限元法的模拟结果进行了对比。结果表明,XFEM 是一种有前景的复合材料结构失效分析技术。Mohammadi 等^[19-20]提出了可用于正交各向异性材料双材料界面裂纹的扩充函数,同一网格可用于分析不同的层间裂纹或分层扩展,很好模拟了复合材料在面外载荷作用下的分层现象。将 XFEM 与 CZM 结合起来运用,不需要重新网格划分或将网格与界面对齐,Bouhala 等^[21]研究了长纤维增强复合材料界面脱黏行为,发现所提出的方法对纤维之间的相互作用敏感。因此,可以准确且方便地追踪裂纹。Wells 等^[22]在 XFEM 和 CZM 结合的基础上提出了一种模拟复合材料层合板分层的新模型,实现了材料结构与有限元网格之间的解耦,结果表明,该模型可以解决分层和几何不稳定问题。Samimi^[23]和 Guiamatsia^[24]等为了避免 CZM 对内聚区网格尺寸的要求而

导致的高计算成本,扩充了传统的内聚力单元格式,可以在采用较粗糙网格的同时得到合适的计算结果。也有学者将 XFEM 与 VCCT 结合运用,如 van Der Meer 等^[25]认为在大尺度变形问题中,要多加注意裂纹扩展过程中所耗费的总能量,而不仅仅是内聚力区域的一部分情况。因此,用 VCCT 代替 CZM 来避免对裂纹尖端单元尺寸大小的限制。随着 XFEM 方法被越来越多的学者运用,这一方法不断发展并已经被整合到商用有限元分析软件的隐式分析模块,但仍需要进一步完善。XFEM 使用时的一个关键问题是如何构造富集函数,而这还需要进一步研究。

对于上述三种常见的分层模拟方法,本文以典型的复合材料层合板 I 型分层扩展为例,在某有限元分析软件中进行试件建模,采用虚拟裂纹闭合技术、内聚力模型和扩展有限元技术开展 I 型分层扩展的二维、三维数值模拟。最后对比数值结果与试验结果,并讨论三种模拟方法的优缺点。

1 分层扩展数值模拟方法介绍

1.1 虚拟裂纹闭合技术

虚拟裂纹闭合技术的基本原理是假设裂纹张开和闭合相同微量时,所需要的能量相同。图 1 为 VCCT 原理示意图,裂纹尖端应变能释放率通过式(1)、式(2)计算

$$G_I = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2B\Delta a} \int_0^{\Delta a} \sigma_{yy} \Delta v dx, \quad \Delta v = W_I - W_{I'} \quad (1)$$

$$G_{II} = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{1}{2B\Delta a} \int_0^{\Delta a} \tau_{xy} \Delta u dx, \quad \Delta u = U_I - U_{I'} \quad (2)$$

式中, G_I 、 G_{II} 分别为 I 型、II 型应变能释放率; Δa 为裂纹尖端单元的长度; B 为模型厚度; σ_{yy} 为裂纹面上的法向应力; τ_{xy} 为裂纹面上的切向应力; W_I 和 U_I 为上裂纹面节点位移; $W_{I'}$ 和 $U_{I'}$ 为下裂纹面节点位移,因此, Δv 和 Δu 代表裂纹面上的相对位移分量。当 Δa 足够小时,可以用节点上的力来代替应力积分,由此可得到简化的应变能释放率公式,如式(3)、式(4)所示

$$G_I = Z_i \Delta v / (2B\Delta a) \quad (3)$$

$$G_{II} = X_i \Delta u / (2B\Delta a) \quad (4)$$

式中, Z_i 和 X_i 为裂纹尖端即节点 i 上的力。当裂尖应变能释放率达到临界值时,裂纹向前扩展一个单元长度。

1.2 内聚力模型方法

内聚力模型是用于描述界面力学行为的一种模型,可以实现分层从萌生到扩展的全过程模拟。CZM 的概念由 Dugdale^[26]和 Barenblatt^[27]在解决金属材料的断裂问题时首次提出,并构建了 D-B 模型,以此来消除裂纹尖端的奇异

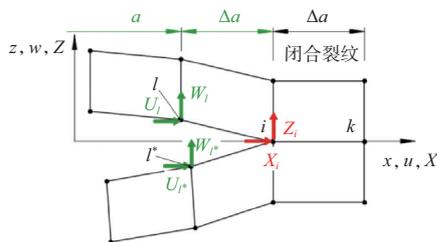


图1 VCCT原理示意图

Fig.1 Sketch of VCCT principle

性。随后越来越多的学者在他们的基础上进行完善补充，Hillerborg 等^[28]将 CZM 引入有限元计算。Needleman^[29]提出了一种多项式本构模型，并对黏性材料裂纹扩展进行了分析。基于 Needleman 的本构模型，后来的学者建立了更多的适用于不同情况的本构模型，如 Tvergaard 等^[30]提出的分段线性 CZM，Allix 等^[31]提出的抛物线型 CZM。目前为止，已经提出的主要本构模型包括多项式模型、D-B 模型、梯形模型、双线性模型和三线性模型等。其中，如图 2 所示的双线性本构模型相对简单，且有明确的物理意义。双线性本构模型的单元损伤分为三个阶段；O~C 阶段：该阶段单元没有损伤，力学行为遵循胡克定律，斜率代表初始界面刚度 K_0 。C~A 阶段：该阶段单元处于软化阶段，发生部分损伤，还可以承载但刚度已经下降。A 点以后：单元发生完全失效，刚度退化为零。此时单元应变能释放率达到断裂韧性 G_c ，大小为本构关系中曲线与坐标轴围成的面积。图 2 中， $\delta_0 = \sigma_0 / K_0$ 为分层萌生时的张开位移， $\delta_f = 2G_c / \sigma_0$ 为单元完全失效时的张开位移。由此得到双线性本构模型表达式，如式(5)所示

$$\sigma = (1-D)K_0\delta, D = \begin{cases} 0, & \delta < \delta_0 \\ (\delta - \delta_0)\delta_f, & \delta_0 < \delta < \delta_f \\ (\delta_f - \delta_0)\delta, & \delta_0 < \delta < \delta_f \\ 1, & \delta = \delta_f \end{cases} \quad (5)$$

式中， K_0 为初始刚度； D 为损伤变量，范围为 0~1； δ 为开口位移。

CZM 本构关系一般是通过试验结果得到的半经验唯像模型，因此，除了本构模型种类繁多以外，模型中的参数也往往依靠经验来确定。双线性本构模型中主要参数有三个：初始界面刚度、界面强度以及断裂韧性。此外，还需要考虑黏性系数和网格尺寸等。

1.3 扩展有限元法

扩展有限元法对间断特征的描述具有独特优势，可以克服一些有限元方法在某些问题上的局限性，如应力场或

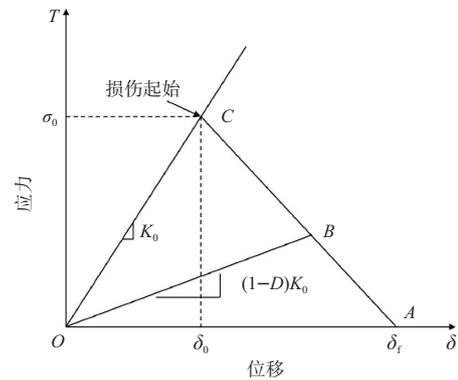


图2 双线性本构内聚力模型

Fig.2 Cohesive zone model with bilinear constitutive law

应变场局部梯度较大等问题。扩展有限元法通过使用特殊位移函数丰富自由度，如不连续跳跃函数 $H(x)$ 和近尖端渐近函数 $F_\alpha, \alpha = 1, 2, 3, 4$ ，允许单元中存在不连续性。二维裂纹周围位移矢量函数 \mathbf{u} 的近似值如式(6)所示

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[\mathbf{u}_i + H(x)\mathbf{a}_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_\alpha(x)\mathbf{b}_i^\alpha \right] \quad (6)$$

式中， $N_i(x)$ 为节点形状函数， \mathbf{u}_i 为与有限元解的连续部分相关的位移矢量。 \mathbf{a}_i 为扩展自由度矢量， \mathbf{b}_i^α 为节点扩展自由度矢量， $F_\alpha(x)$ 为裂尖函数。 $H(x)$ 是描述裂纹面不连续性的 Heaviside 形函数，如式(7)所示

$$H(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } (x - x^*) \cdot \mathbf{n} \geq 0 \\ -1, & \text{if } (x - x^*) \cdot \mathbf{n} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中， x 为高斯点， x^* 为裂纹面上距离 x 最近的点， \mathbf{n} 为 x^* 垂直于裂纹面的法矢量。在使用扩展有限元法进行分层扩展的数值模拟时，需要选定裂纹萌生准则和损伤演化模型。当裂纹萌生发生后，裂纹扩展将通过损伤演化模型来表征单元的内聚刚度退化行为。其中裂纹萌生准则通常是基于应力和应变的，常见的有最大名义应力准则、二次名义应力准则、最大名义应变准则、二次名义应变准则。而损伤演化模型通常是基于能量的，常见的有幂法准则、B-K 准则和 Reeder 准则。

2 复合材料层合板分层扩展的二维数值模拟研究

本节主要开展基于 VCCT、CZM 和 XFEM 的 I 型分层扩展数值模拟研究。以 HTA/6376C 层合板为研究对象，在二维有限元模型有限元软件中建立，模型的几何参数和材料参数、试验结果来自参考文献[32]–[33]。DCB 试件形式如图 3 所示，试件长 150mm、宽 20mm、高 3.1mm、预制裂纹

长度 35mm, 铺层顺序为 $[0_{12}/(\pm 5/0_4)]$ 。材料参数见表 1。采用四节点单元进行网格创建和划分。通过在试件右侧上下端点沿 y 向各施加 3mm 位移来模拟边界条件。

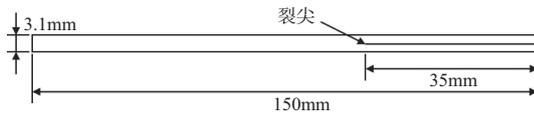


图3 DCB 试件的尺寸

Fig.3 Geometric dimensions of DCB specimen

表1 HTA/6376C 材料参数

Table 1 Material parameters of HTA/6376C

E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa
120	10.5	10.5	5.25	5.25	3.48
ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	σ_c/MPa	$G_{Ic}/(\text{N/m})$	$G_{IIc}/(\text{N/m})$
0.3	0.3	0.51	40	260	1002

VCCT 数值模拟时需要在相互作用界面定义具有接触属性的相互作用, 并设置断裂准则。设置初始裂纹时, 在裂纹尖端前方设置一个沿裂纹扩展路径的节点区如图 4 所示, 并设置接触, 网格尺寸选用 0.1mm。DCB 试件由上下两个部分组成, 中间部分设置了连接节点区。图 4 显示了连接节点区和初始裂纹, 模型其他区域的网格尺寸设置为 0.5mm。有限元分析得到的 DCB 试件载荷一位移曲线与试验结果对比如图 5 所示。从图 5 可以看到, 有限元模拟结果与试验结果的初始斜率, 以及扩展阶段的载荷下降阶段均有较好的一致性。

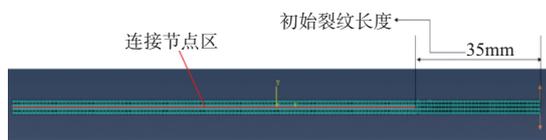


图4 二维 DCB 模型中的连接节点区和初始裂纹长度

Fig.4 Connection node area and initial crack length in 2D DCB model

基于 CZM 的 DCB 试件二维有限元模型如图 6 所示。在上下板之间定义了一层厚度为 0.01mm 的内聚单元层 (cohesive 层), 单元类型为 COH2D4。图 6 中给出了模型的网格划分情况: cohesive 层采用四边形扫掠网格, 尺寸为 0.1mm; 上下板沿 y 方向设置 5 个单元, 长度方向的网格尺寸为 0.2mm。初始界面刚度为 10^4N/mm^3 , 界面强度为 25MPa。采用最大名义应力准则作为裂纹萌生准则, B-K 准则作为损伤演化准则。模拟的载荷一位移曲线与试验结果对比如图 7(a) 所示, cohesive 单元损伤状态如图 7(b) 所

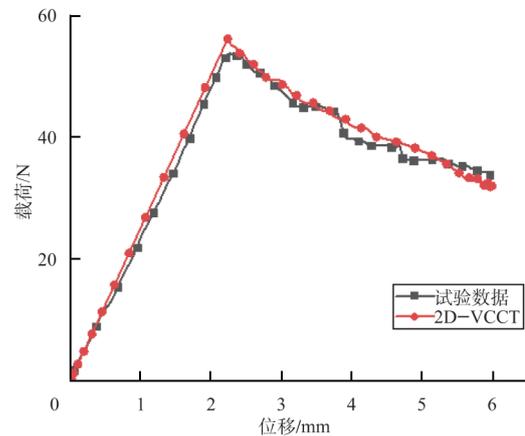


图5 基于 VCCT 的 DCB 试件二维模型的数值模拟与试验结果对比

Fig.5 Numerical simulation of 2D model of DCB specimen based on VCCT and experimental results

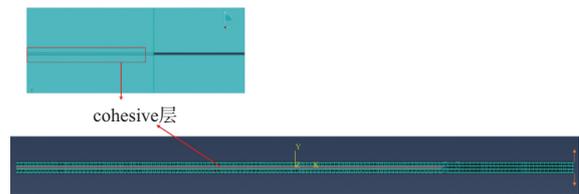


图6 含 cohesive 层的 DCB 试件二维有限元模型

Fig. 6 2D model with cohesive layer of DCB specimen

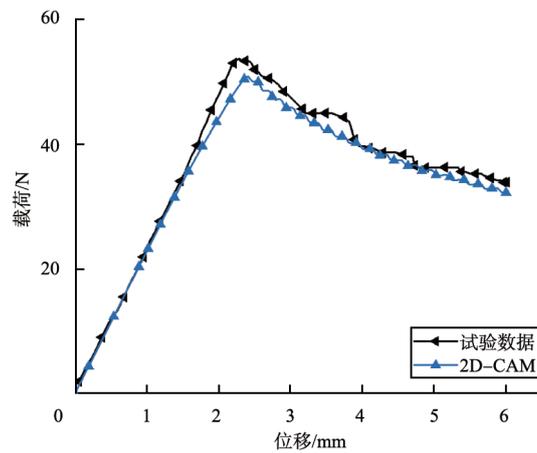
示。可以看到有限元模拟结果与试验结果的初始斜率以及扩展阶段的载荷下降阶段均有较好的一致性。

基于扩展有限元方法的数值模拟中, 单元类型为 CPE4R, 网格尺寸选用 0.5mm。裂纹萌生准则和损伤演化准则与基于 CZM 的二维有限元模型相同。图 8 给出了基于 XFEM 的二维有限元模型的模拟结果, 并与试验结果进行了对比。可以看到, 模拟结果与试验结果在线弹性阶段吻合较好。在后阶段的非线性部分, 虽然载荷一位移响应的变化趋势一致, 但是数值模拟结果整体上比试验结果偏大。

3 复合材料层合板分层扩展的三维数值模拟研究

DCB 试件的三维有限元建模采用实体单元。试件厚度方向上设置 6 个单元, 载荷设置与二维模型不同, 需要在相互作用界面设置耦合, 如图 9 所示, 将参考点 1、参考点 2 分别与模型的上边缘和下边缘进行耦合, 并将载荷设置在两个参考点上。

基于 VCCT 方法的三维有限元建模中, 施加载荷的大



(a) 基于CZM的DCB试件二维模型的数值模拟与试验结果对比



(b) cohesive单元损伤状态

图7 基于CZM的DCB试件二维模型的数值模拟与试验结果对比和cohesive单元损伤状态

Fig.7 Comparison between numerical simulation of 2D model of DCB specimen based on CZM and experimental results, and cohesive element damage state

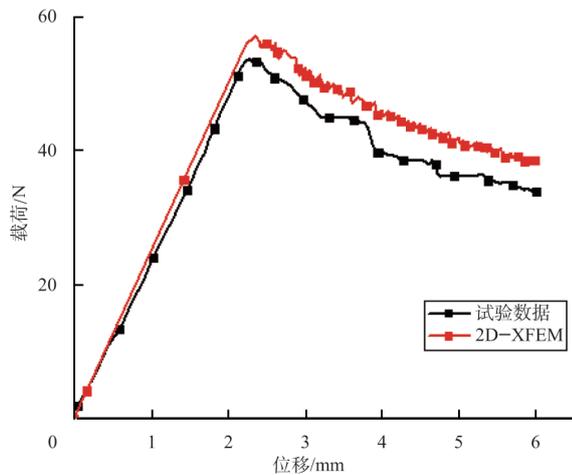


图8 采用XFEM建立DCB试件二维模型的分层扩展数值模拟与试验结果比较

Fig.8 Comparison between numerical simulation of 2D model of DCB specimen based on XFEM and experimental results

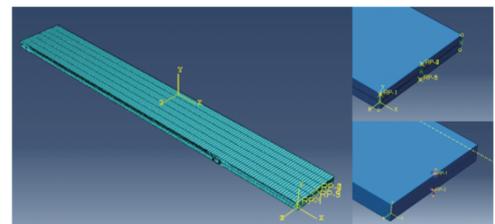


图9 DCB试件三维有限元模型以及载荷施加
Fig.9 3D FE model of DCB specimen and applied load

比。可以看出,与二维模型相同,线性部分相应与试验结果一致性较好但极限载荷略高于试验结果,分层扩展阶段的非线性载荷也略高于试验值。

基于CZM的三维有限元建模与二维建模方法基本相同,cohesive单元类型为COH3D8,试样宽度方向设置6个单元,有限元模型如图11所示。模拟的载荷—位移曲线与试验结果对比如图12(a)所示,cohesive单元损伤状态如图12(b)所示。有限元模拟结果与试验结果的初始斜率以及扩展阶段的载荷下降阶段均有较好的一致性。整体看来,模拟结果与试验结果比较吻合。

小,网格尺寸选择与二维模型相同。图10给出了三维DCB试件在VCCT方法下得到的数值模拟结果与试验数据的对

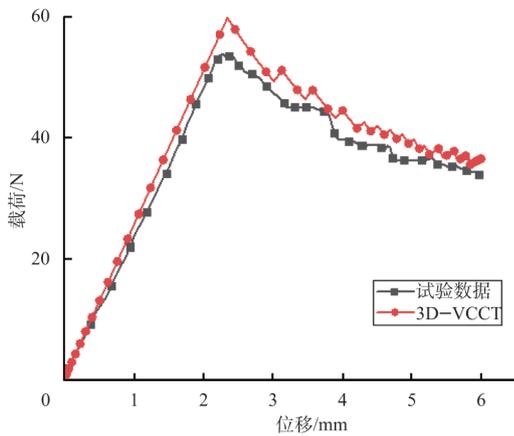


图10 基于VCCT的DCB试件三维有限元模型的分层扩展数值模拟与试验结果对比

Fig.10 Comparison between numerical simulation of 3D model of DCB specimen based on VCCT and experimental results

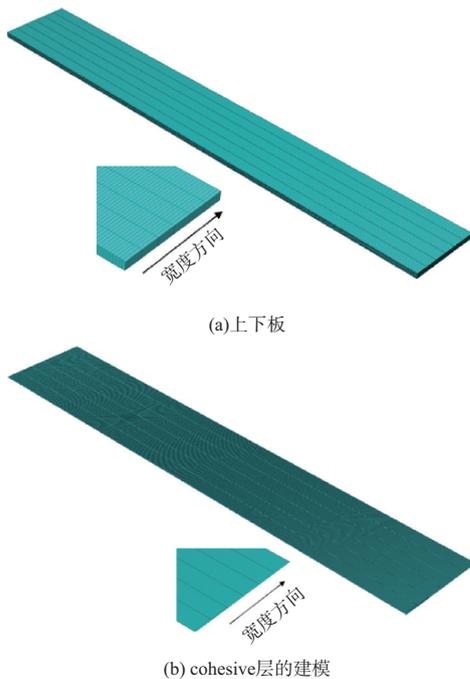
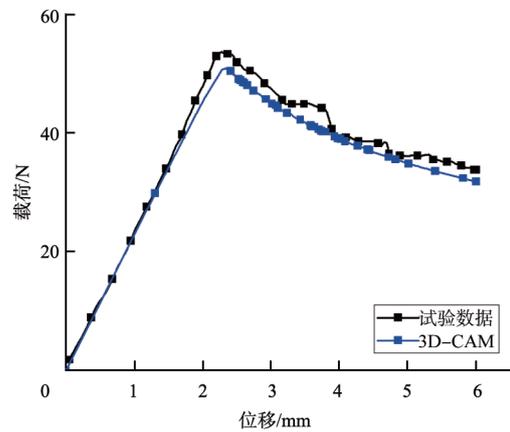


图11 三维DCB试件的上下板和cohesive层的建模
Fig.11 Upper and lower arms, cohesive layer of 3D model of DCB specimen

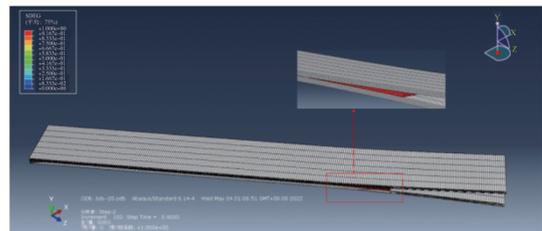
基于扩展有限元的三维模型采用的单元类型为C3D8R。图13为有限元模拟结果与试验结果的对比,两者在线弹性阶段和分层扩展阶段均吻合很好。

4 二维和三维有限元模拟方法对比分析

使用VCCT的数值模拟与试验结果的对比如图14(a)所示。具体的极限载荷结果列于表2中。从图14(a)中可



(a) 基于CZM的DCB试件二维模型的数值模拟与试验结果对比



(b) cohesive单元损伤状态

图12 基于CZM的DCB试件三维模型的数值模拟与试验结果对比和cohesive单元损伤状态

Fig.12 Comparison between numerical simulation of three-dimensional model of DCB specimen based on CZM and experimental results, and cohesive element damage state

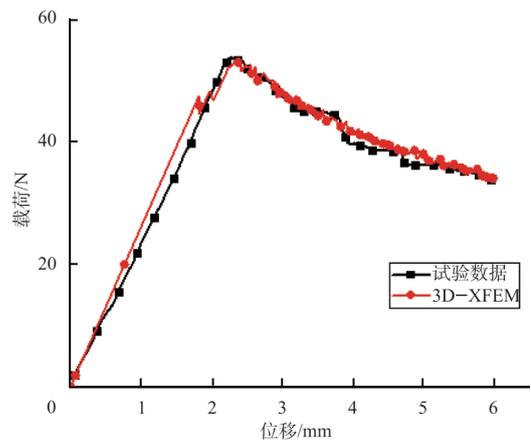


图13 基于XFEM的DCB试件三维有限元模型的分层扩展数值模拟与试验结果对比

Fig.13 Comparison between Numerical simulation of 3D model of DCB specimen based on XFEM and experimental results

以看出,无论是线性阶段还是裂纹扩展阶段的模拟结果均与试验符合得很好,但二维模型模拟的极限载荷略高于试验值,在三维模型中该偏差更明显,相对误差为11.22%。

因此,在运用 VCCT 进行数值模拟时推荐使用二维模型,可降低计算成本,提高计算效率。图 14(b)给出了采用 CZM 方法的二维、三维有限元模拟结果与试验结果的对比。从图 14(b)中可以看出,二维和三维有限元模拟结果一致且与试验结果吻合较好,相对误差均小于 6%。在使用内聚力模

型方法时,是二维还是三维建模并不影响结果。但从计算成本来看,二维模型无论是在模型建立还是运行时间方面均比三维模型高效。因此,在使用内聚力模型进行分层模拟时,优先推荐采用二维模型。图 14(c)给出了 XFEM 方法的模拟结果与试验结果的对比,二维有限元模拟结果比试

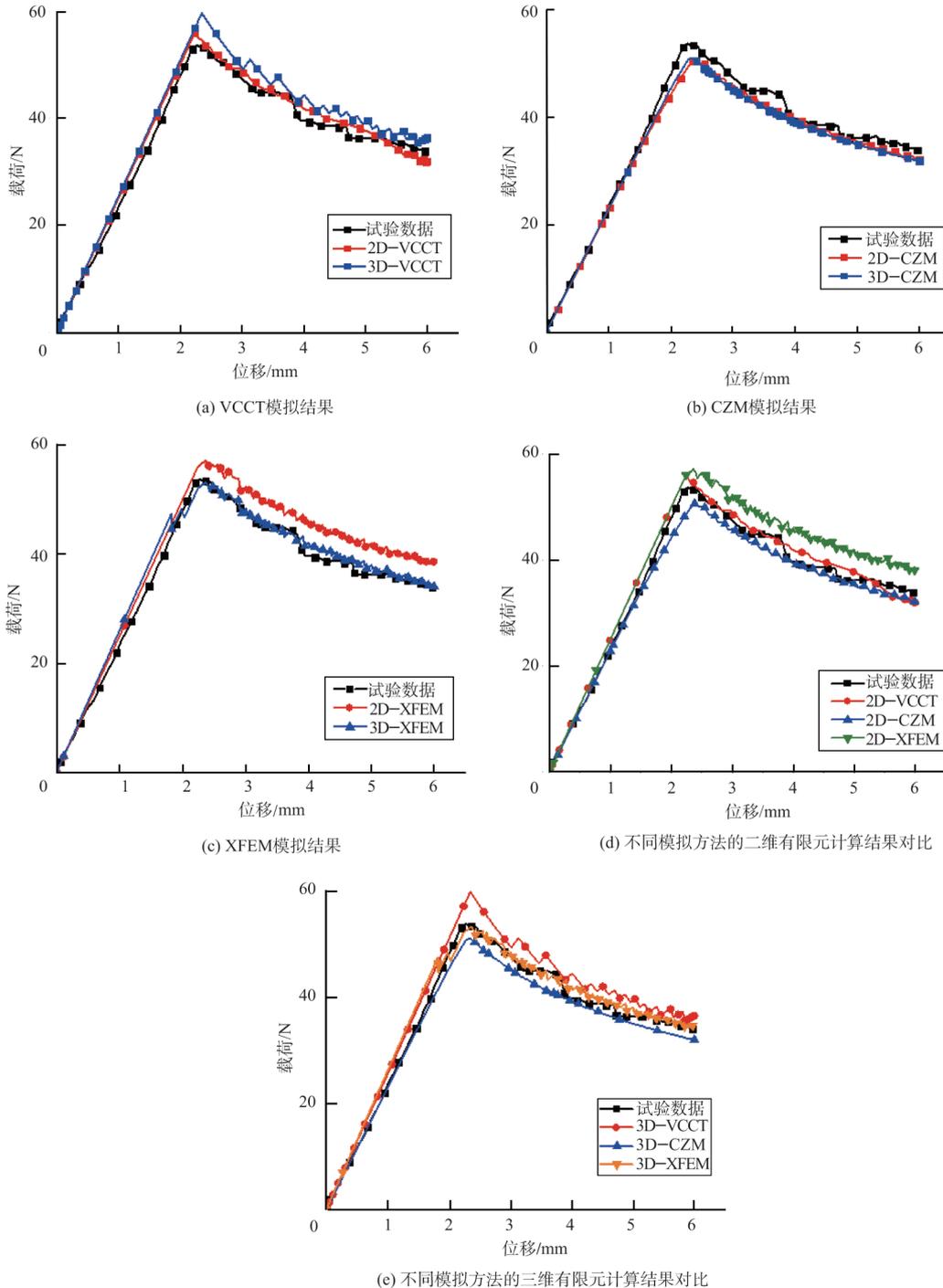


图 14 不同模拟方法在二维与三维有限元模型下的数值模拟与试验结果对比

Fig.14 Comparison between numerical simulation of 3D and 2D model of different simulation methods and experimental results

验结果偏大,而三维有限元结果与试验结果吻合较好,因此,在使用XFEM方法时,为保证模拟准确度需使用三维模型。

图14(d)为采用二维有限元模型时,不同模拟方法的模拟结果与试验结果的对比。可以看出,VCCT和CZM方法都可以很好地模拟载荷位移响应,因此,建立二维有限元模型时可以考虑使用VCCT和CZM方法。图14(e)为采用三维有限元模型时,不同模拟方法的模拟结果与试验结果的对比。可以看出,基于XFEM的三维有限元模型的模拟结果与试验结果最为吻合。与XFEM方法相比,VCCT的模拟结果偏大,而CZM的模拟结果偏小。因此,在建立三维有限元模型可以考虑采用CZM和XFEM方法。但是基于XFEM的三维有限元模型运行时间久,计算成本高。因此,在分层扩展数值模拟时,优先考虑建立二维有限元模型。

表2 试验极限载荷与不同方法的模拟结果对比

Table 2 Comparisons between experimental ultimate load values and numerical results from different simulation methods

	试验	2D- VCCT	3D- VCCT	2D- CZM	3D- CZM	2D- XFEM	3D- XFEM
极限载荷/N	53.65	56.00	59.67	50.79	50.91	56.06	53.13
相对误差/%	—	4.38	11.22	5.33	5.11	4.49	0.97

5 结论

本文采用三种常用的分层模拟方法,分别建立了二维和三维有限元模型对I型分层扩展进行了数值模拟。可得出如下结论:

(1) 基于虚拟裂纹闭合技术的二维有限元模型相比三维模型,可以更好地模拟分层扩展,但是均无法对裂纹萌生进行模拟,在建模时需要预设初始裂纹。

(2) 基于内聚力模型的二维和三维有限元模型的模拟结果与试验结果都吻合较好,而且可以模拟裂纹从萌生到扩展的全过程,但是在建模时需要根据经验确定关键界面参数。

(3) 基于扩展有限元的二维有限元模拟结果比试验结果偏大,而三维有限元结果与试验结果吻合较好,因此,在使用扩展有限元方法时,为保证模拟结果的准确度需要建立三维模型。但基于扩展有限元的有限元模型的计算时间要长于另外两种方法。

总体看来,三种方法各有优点和局限性。而基于内聚力模型的有限元模型计算效率相对高,无论二维还是三维

建模都可以得到较好的模拟结果,建议优先采用。

AST

参考文献

- [1] 啜明月,姚辽军,果立成,等. 复合材料疲劳分层扩展数值仿真分析研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(10): 58-65.
Chuai Mingyue, Yao Liaojun, Guo Licheng, et al. Numerical investigation on fatigue delamination growth in composite laminates[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(10): 58-65. (in Chinese)
- [2] 徐建新,宋依良,郭巧荣. 一种考虑脆性断裂的三线性内聚力模型[J]. 航空科学技术, 2023, 34(3): 97-103.
Xu Jianxin, Song Yiliang, Guo Qiaorong. A trilinear cohesive model considering brittle fracture[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(3): 97-103. (in Chinese)
- [3] Irwin G R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate[J]. Journal of Applied Mechanics, 1957, 24: 361-364.
- [4] Krueger R. Virtual crack closure technique: History, approach, and applications[J]. Applied Mechanics Reviews, 2004, 57(2): 109-143.
- [5] Rybicki E F, Kanninen M F. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1977, 9(4): 931-938.
- [6] Shivakumar K N, Tan P W, Newman J C. A virtual crack-closure technique for calculating stress intensity factors for cracked three dimensional bodies[J]. International Journal of Fracture, 1988, 36(3): 43-50.
- [7] Xie De, Biggers S B. Strain energy release rate calculation for a moving delamination front of arbitrary shape based on the virtual crack closure technique. Part I: Formulation and validation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 73(6): 771-785.
- [8] Li H C H, Dharmawan F, Herszberg I, et al. Fracture behaviour of composite maritime T-joints[J]. Composite Structures, 2006, 75(1): 339-350.
- [9] Magi F, Di Maio D, Sever I. Validation of initial crack propagation under vibration fatigue by finite element analysis [J]. International Journal of Fatigue, 2017, 104: 183-194.
- [10] Elices M, Guinea G V, Gómez J, et al. The cohesive zone model: advantages, limitations and challenges[J]. Engineering

- Fracture Mechanics, 2002, 69(2): 137-163.
- [11] Nusom Y, Srimanosaowapak S, Uthaisangsuk V. Prediction of effective cohesive parameters for mode I failure behavior of LPBF Ti-6Al-4V/CFRTP interface using meso-scale modelling [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 297: 109897.
- [12] Abdel-Monsef S, Tijss B H A H, Renart J, et al. Accurate simulation of delamination under mixed-mode loading using a multilinear cohesive law[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 284: 109233.
- [13] Gong Yu, Hou Yixin, Zhao Libin, et al. A modified mode I cohesive zone model for the delamination growth in DCB laminates with the effect of fiber bridging[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 176: 105514.
- [14] Yin Shihao, Gong Yu, Li Wangchang, et al. A novel four-linear cohesive law for the delamination simulation in composite DCB laminates[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 180: 107526.
- [15] Tian Dingli, Gong Yu, Zou Luohuan, et al. Determining cohesive parameters in an n-segment constitutive law of interfaces through DCB tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 289: 109395.
- [16] Ding Zhaohu, Gong Yu, Wang Ziming, et al. A semi-analytical method for the determination of fracture toughness and bridging law in ELS test[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 123: 103712.
- [17] Gong Yu, Zhang Hexiang, Jiang Linfeng, et al. Determination of mixed-mode I/II fracture toughness and bridging law of composite laminates[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 127: 104060.
- [18] Curiel Sosa J L, Karapurath N. Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method[J]. Composites Science and Technology, 2012, 72(7): 788-791.
- [19] Esna Ashari S, Mohammadi S. Delamination analysis of composites by new orthotropic bimaterial extended finite element method[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2011, 86(13): 1507-1543.
- [20] Esna Ashari S, Mohammadi S. Fracture analysis of FRP-reinforced beams by orthotropic XFEM[J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(11): 1367-1389.
- [21] Bouhala L, Makradi A, Belouettar S, et al. Modelling of failure in long fibres reinforced composites by X-FEM and cohesive zone model[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 55: 352-361.
- [22] Wells G N, De Borst R, Sluys L J. A consistent geometrically non-linear approach for delamination[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2002, 54(9): 1333-1355.
- [23] Samimi M, van Dommelen J A W, Geers M G D. An enriched cohesive zone model for delamination in brittle interfaces[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2009, 80(5): 609-630.
- [24] Guiamatsia I, Ankersen J K, Davies G A O, et al. Decohesion finite element with enriched basis functions for delamination [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(15-16): 2616-2624.
- [25] van Der Meer F P, Moës N, Sluys L J. A level set model for delamination Modeling crack growth without cohesive zone or stress singularity[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 79: 191-212.
- [26] Dugdale D S. Yielding of steel sheets containing slits[J]. Journal of Mechanics and Physics of Solids, 1960, 8: 100-104.
- [27] Barenblatt G I. The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture[J]. Advances in Applied Mechanics, 1962, 7: 55-129.
- [28] Hillerborg A, Modeer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements[J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781.
- [29] Needleman A. An analysis of decohesion along an imperfect interface[J]. International Journal of Fracture, 1990, 42(1): 21-40.
- [30] Tvergaard V, Hutchinson J W. The relation between crack growth resistance and fracture process parameters in elastic-plastic solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1992, 40(6): 1377-1397.
- [31] Allix O, Corigliano A. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens [J]. International Journal of Fracture, 1996, 77(2): 111-140.
- [32] Asp L E, Sjögren A, Greenhalgh E S. Delamination growth and thresholds in a carbon/epoxy composite under fatigue loading

[J]. Journal of Composites, Technology and Research, 2001, 23 (2): 55-68.

simulations of composite delamination[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(16): 4774-4792.

[33] Harper P W, Hallett S R. Cohesive zone length in numerical

Numerical Simulation Method for Mode I Delamination Growth of Composite Materials Based on VCCT, CZM and XFEM

Gong Yu, Miao Changlei, Shan Zeyu, Tang Wei, Liu Hao, Zhang Jianyu

Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract: Establishing a numerical simulation method for delamination growth in composite materials and mastering its characteristics is of great significance for predicting the residual strength of composite structures, which can provide technical support for the design and analysis of damage tolerance in composite structures. Virtual crack closure technology, cohesive zone model, and extended finite element method are three common numerical methods. However, there is a lack of in-depth comparative research on the characteristics of these three methods in modeling the delamination of composite laminates, which greatly confuses the use of numerical methods. This paper takes mode I delamination as the research object, establishes two-dimensional and three-dimensional finite element models using three methods, comprehensively compares the three simulation methods, and finally analyzes the advantages and limitations of each method. The research results can provide theoretical support for the application of numerical methods for delamination simulation.

Key Words: composite materials; laminates; delamination; finite element method; numerical simulation

Received: 2024-12-26; **Revised:** 2025-03-05; **Accepted:** 2025-04-03

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2022Z0570Q9002)