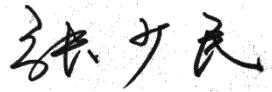


## 本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在指导老师教导下，进行研究工作所产生的结果。除文中已注明援引的内容外，本学位论文的研究成果不包括任何别人创作的、已公然发出或没有公然发出的作品内容。对本论文所触及的研究工作做出成果的其他人和团体，均已在文中详细标出。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：  
年 月 日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经核阅过论文的全部内容，并能够确保题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

学位论文指导教师签名：  
年 月 日

## 摘 要

热塑性碳纤维复合材料具有高抗冲击性、高韧性、良好的耐热性和导电性，是继热固性碳纤维复合材料在航空航天领域应用后的又一款高性能材料。碳纤维复合材料结构间连接中具有多种方式，其中机械连接和胶接连接方法是最常见的两种。机械连接常用螺栓连接方法，此方法需要多个螺栓对复合层板进行连接以减少集中应力，因此会导致复合材料层板间结构件重量的增大。胶接连接方法相对简单，然而由于其耐久性对于温度、湿度的要求比较敏感，常常不能单独使用于复合材料层板的连接。因此，胶螺混合连接方法在复合材料层合板连接中是非常有必要的，尤其是在热塑性碳纤维层板连接中。因此，本文利用有限元分析的方式，对热塑性碳纤维复合材料层板接头搭接进行失效仿真。

本文使用 ABAQUS 有限元分析软件，对热塑性碳纤维复合材料进行建模，对胶螺混合连接和胶接连接接头在拉伸载荷下进行有限元分析。另外，还分析了搭接长度对胶螺接头拉伸性能的影响。

**关键词：**有限元仿真；螺栓连接；胶接连接；混合连接

## ABSTRACT

Thermoplastic carbon fiber composites have high impact resistance, high toughness, good heat resistance and electrical conductivity, and are another high-performance material following the application of thermosetting carbon fiber composites in the aerospace field. There are many ways to connect carbon fiber composite structures, among which mechanical connection and glue connection are the two most common. The bolt connection method is commonly used in mechanical connection. This method requires multiple bolts to connect the composite laminates to reduce the concentrated stress, which will lead to an increase in the weight of the structural parts between the composite laminates. The adhesive connection method is relatively simple, but because its durability is sensitive to the requirements of temperature and humidity, it is often not used for the connection of composite material laminates alone. Therefore, the glue-screw hybrid connection method is very necessary in the connection of composite laminates, especially in the connection of thermoplastic carbon fiber laminates. Therefore, in this paper, the finite element analysis method is used to simulate the failure of the lap joint of thermoplastic carbon fiber composite laminates.

In this paper, the ABAQUS finite element analysis software is used to model the thermoplastic carbon fiber composite material, and the finite element analysis of the glue-screw hybrid connection and the glued connection joint under tensile load is carried out. In addition, the effect of the lap length on the tensile properties of the glue-screw joint was also analyzed.

**Key words:** Finite Element Simulation; Bolted Connections; Glued Connections; Hybrid Connections;

# 目 录

|       |                               |    |
|-------|-------------------------------|----|
| 第一章   | 绪论 .....                      | 1  |
| 1.1   | 课题的研究背景和意义 .....              | 1  |
| 1.2   | 国内外研究进展 .....                 | 1  |
| 1.2.1 | 螺栓连接 .....                    | 1  |
| 1.2.2 | 胶接连接 .....                    | 3  |
| 1.2.3 | 胶螺混合连接 .....                  | 5  |
| 1.3   | 本文的主要工作内容简介 .....             | 6  |
| 第二章   | 有限元仿真实论基础 .....               | 7  |
| 2.1   | 三维 Hashin 失效准则 .....          | 7  |
| 2.3   | ABAQUS 复合材料渐进损伤分析方法 .....     | 8  |
| 2.4   | 胶层间内聚力模型 .....                | 8  |
| 2.5   | ABAQUS/Explicit 显式准静态分析 ..... | 9  |
| 2.6   | 本章小结 .....                    | 9  |
| 第三章   | 复合材料双搭接层合板有限元分析 .....         | 15 |
| 3.1   | 胶螺混合连接拉伸载荷有限元分析 .....         | 15 |
| 3.1.1 | 模型铺层及尺寸设计 .....               | 15 |
| 3.1.2 | 复合材料参数 .....                  | 15 |
| 3.1.3 | 约束与载荷 .....                   | 16 |
| 3.1.4 | 单元与网格 .....                   | 17 |
| 3.1.5 | 分析步及结果输出 .....                | 17 |
| 3.1.6 | 应力与损伤 .....                   | 17 |
| 3.2   | 胶接连接拉伸有限元分析 .....             | 19 |
| 3.2.1 | 层合板胶接连接受拉伸载荷有限元分析 .....       | 19 |
| 3.2.2 | 对比分析 .....                    | 20 |
| 3.3   | 本章小结 .....                    | 21 |
| 第四章   | 搭接长度对胶螺接头拉伸性能影响分析 .....       | 22 |
| 4.1   | 有限元模型 .....                   | 22 |
| 4.1.1 | 几何尺寸 .....                    | 22 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 4.1.2 材料参数 .....             | 23 |
| 4.1.3 约束与载荷 .....            | 23 |
| 4.1.4 单元与网格 .....            | 24 |
| 4.1.5 分析步及结果输出 .....         | 25 |
| 4.2 不同搭接长度下胶接接头的损伤破坏 .....   | 26 |
| 4.2.1 搭接长度 15mm 损伤失效分析 ..... | 27 |
| 4.2.2 搭接长度 20mm 损伤失效分析 ..... | 28 |
| 4.2.3 搭接长度 30mm 损伤失效分析 ..... | 29 |
| 4.2.4 搭接长度 40mm 损伤失效分析 ..... | 31 |
| 4.3 对比分析 .....               | 32 |
| 4.5 本章小结 .....               | 32 |
| 结 论 .....                    | 34 |
| 参考文献 .....                   | 35 |
| 致 谢 .....                    | 37 |

## 第一章 绪论

### 1.1 课题的研究背景和意义

材料在人类科技成长提高中起到至关重要的作用，尤其是复合材料。碳纤维复合材料分为热塑性碳纤维复合材料和热固性碳纤维复合材料。热塑性碳纤维复合材料（Thermoplastic Carbon Fiber Composite，简称：TCFC）具有高抗冲击性、高韧性、杰出的耐热性和导电性是继热固性碳纤维复合材料在航空航天中应用后的又一款高性能材料。其中航空航天级热塑性复合材料基体，如聚苯硫醚（PPS）碳纤维增强聚醚醚酮（PEEK）和聚醚酮酮（PEKK）等，在医疗，可再生农业材料，现代航空航天领域的应用前景最为广阔。但是学术界对于如今的热塑性碳纤维复合材料层合板接头的研究却发展缓慢。

热塑性碳纤维复合材料从生产设备到制造工艺都没有现成的储备可以利用，一切都要自己从头摸索。仅仅出现了复合材料与金属间结合激光连接接头和焊接接头的相关文献。虽然障碍重重，但是市场对热塑性碳纤维复合材料的客观需求促使国内企业放眼未来，积极开展热塑性碳纤维复合材料的开发和利用。开展针对热塑性碳纤维的研发项目，在多年的热固性碳纤维复合材料运用的应用基础上，向着高性能热塑性碳纤维复合材料进行研究，而本文也基于热塑性碳纤维接头研究方面的不足，对于热塑性碳纤维层合板接头进行失效仿真的研究。热塑性碳纤维复合材料以其独特的经济、性能、环保和易储存等优势正逐步走向当前大环境下的材料运用主导地位。

本文使用 ABAQUS 有限元分析软件，对热塑性碳纤维复合材料进行建模，对胶螺混合连接和胶接连接接头在拉伸载荷下进行有限元分析。另外，还分析了搭接长度对胶螺接头拉伸性能的影响。

### 1.2 国内外研究进展

热塑性复合材料的连接方式分为四种：螺栓、胶接、激光烧接、焊接和混合连接。螺接和胶接最为普遍。然而螺栓连接由于其特殊的连接方式对层合板产生的应力集中难以控制，胶接由于其对环境的敏感性不能做单独使用。所以选择哪一种连接方式成为了科研工作者在理论、实验、数据方面研究的重点。

#### 1.2.1 螺栓连接

就现阶段发现，复合材料螺栓连接头最主要的几种损毁失效有六种，分别是拉伸损毁、剪切损毁、挤压损毁、撕裂损毁、劈裂损毁和拉脱损毁如图 1-1 所示剪切失效和拉伸失效是两种低强度的灾难性损毁的模式。挤压损毁是一种缓慢发生，逐渐形成的塑性损毁模式而撕裂损毁、劈裂损毁和拉脱损毁在一般情况下发生概率较低且相关论文文献研究较少。基于对六种损毁模式。研究设计者开始偏向于使自己设计出来的组合紧固件的连接结构最终是以挤压损毁的形式失效

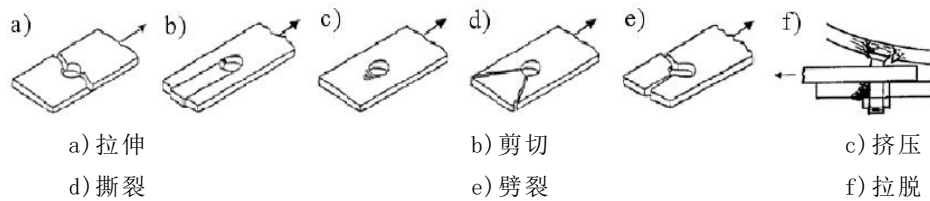


图 1-1 机械连接典型破坏形式

复合材料螺接因搭接板的工作与否可分为对接和搭接。因连接头受力可分为双剪和单剪。不同类别又有等截面和变截面两种情况具体机械连接连接形式如图 1-2 复合材质尤其是热塑性碳纤维复合质料螺接头强度和效能的影响主要有连接件的连接方式、尺寸参数、质料参数、紧固件参数及载荷方式。其多样性和复杂性远比金属及其他复合质料高很多。目前国内外针对于复合材料连接的科研工作者通过实物模型实验和有限元仿真对此作了大量的工作。

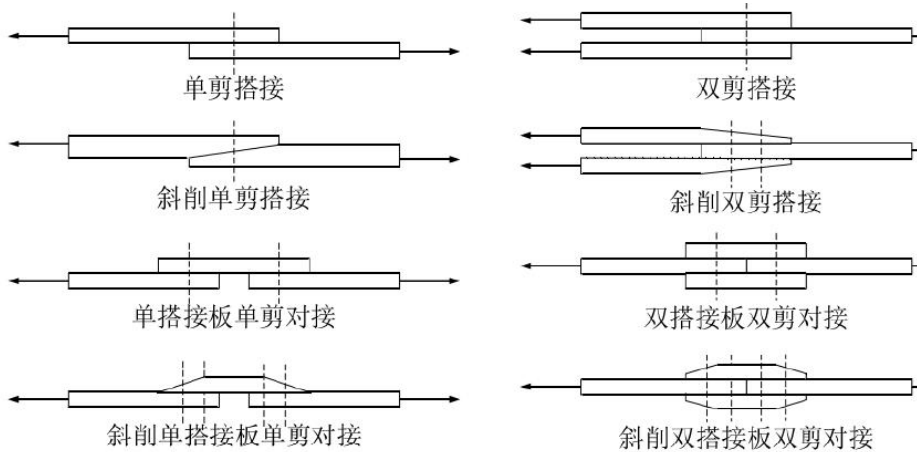


图 1-2 机械连接的主要连接方式

Cao 等通过中断测试的方法研究了薄层层压板螺栓连接拉伸失效过程的机理变化发现单搭接与双搭接螺栓连接的两种连接结构失效过程几乎一致，如图 1-4 所示为单搭接渐进失效过程清楚的表达了失效过程中材质的结构变化，如图 1-3 所示是双搭接接头失效渐进损伤过程展现从剪切、挤压到失效过程

材料的变化而在最终失效时单搭接多以螺母和钉头入侵层压板内部引起失效，双搭接则以接头孔永久发生挤压变形作为主要特征<sup>[1]</sup>。

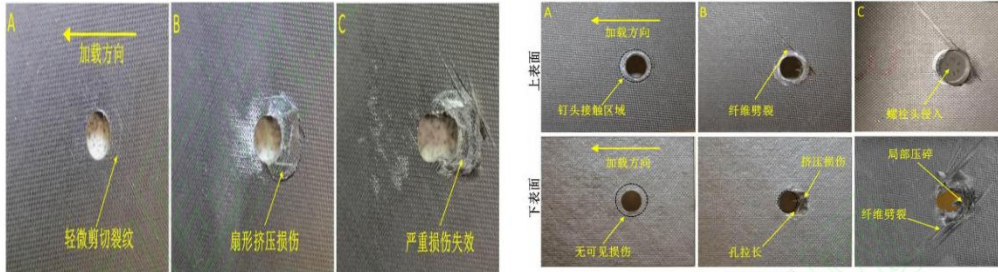


图 1-3 双搭接层压板渐进挤压失效变化 图 1-4 单搭接渐进损毁失效

Cooper 和 Turvey 通过试验研究了在拉伸载荷作用下几何参数尺寸 ( $W/D$ 、 $E/D$ ) 边距与孔径比、板宽与孔径比和预紧力对拉挤纤维增强塑料，单螺栓双剪切搭接连接接头损伤初始载荷、刚度和最终破坏失效载荷的影响。分析实验结果表明，几何临界值 ( $W/D$  和  $E/D$ ) 随着螺栓预紧力载荷的增加而增加，但是结构刚度对  $E/D$  的变化不敏感，不会随着  $W/D$  的增加而增加<sup>[2]</sup>。

周松 针对螺栓 T 型接头探究了接触面不同接触属性对接头的影响，发现：适当增加接触面摩擦系数对提高接头载荷传递的效率有很大的影响，改变螺栓预紧力则未明显的影响螺栓孔周边的应力分布情况，同时，增加螺栓个数不会对接头强度产生影响，只是减少的接头的失效位移<sup>[3]</sup>。

### 1.2.2 胶接连接

胶接连接接头是复合材料连接中常用的一种连接形式与螺栓连接相比较在破损失效安全、绝缘、结构减振、流线型气动力学方面具有很好的性能在连接时工作效率高、结构质量轻、抗疲劳且耐腐蚀。在工程上的应用极度广泛，但在连接上往往不能独自使用，因此其在各种不同的复杂结构和层合板材料中都有着大量的应用，如图 1-5 所示为胶接连接方式下各种典型的破坏形式，为了研究胶接连接的性能，研究人员也开始大量的投入到对胶接连接的研究中来，尤其是运用有限元分析和参数分析的方法。

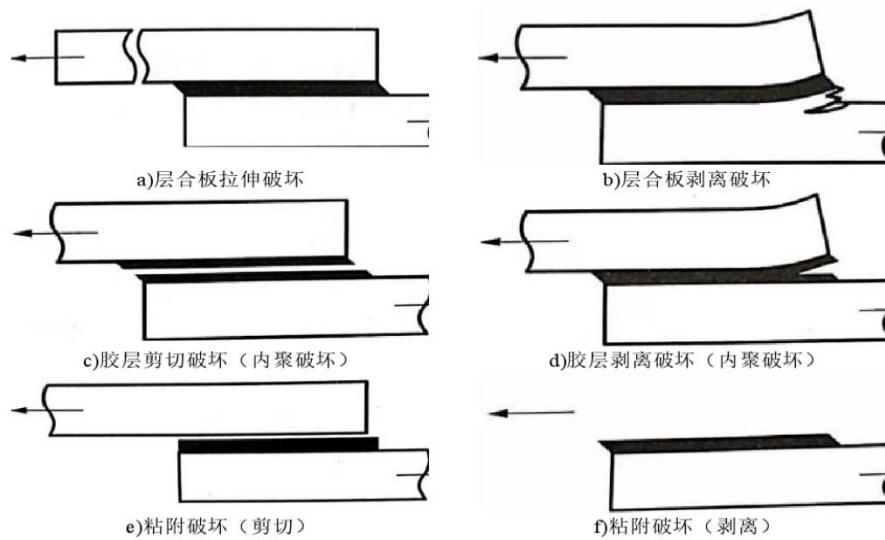
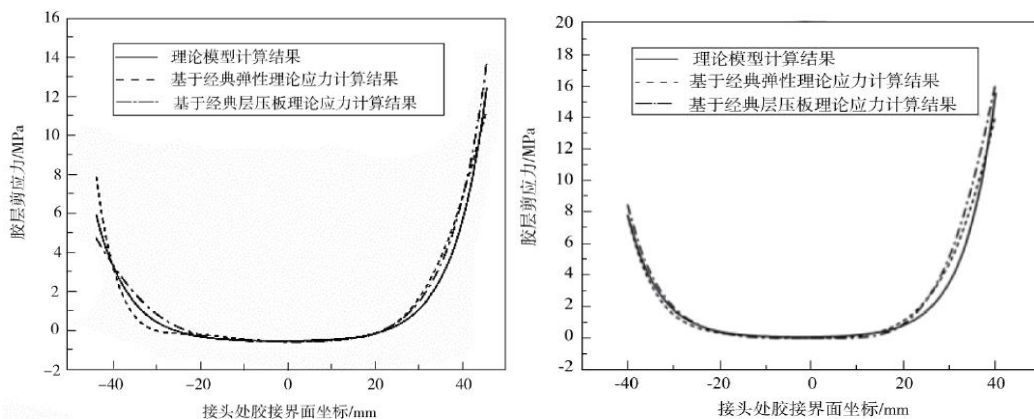


图 1-5 胶接连接的几种典型破坏形式

Feng 等研究了搭接形式、胶黏剂、被粘结结构、环境以及缺陷对接头的影响，研究结果显示，搭接结构决定粘结件之间载荷的传递路径和失效形式，同时也是影响胶接粘结强度的最主要的因素，同时在黏合剂中接入增强相可以有效地提高断裂韧性和接头的力学性能，除此之外改变搭接长度也可提高接头之间的强度，而改变胶层的厚度则对接头之间的强度影响规律不是很明显且影响程度也较低，当湿度环境和温度环境同时变化时其造成的综合影响要比其中任意一种的都大<sup>[4]</sup>。

Shao J T , Zhou W L 等通过对应力计算结果的对比，验证了 Classic alelasticity theory, 在此基础上提出了 Classical elasticity theory 和 Classical laminate theory 的应力计算方法，发现运用控制变量法在层合板胶层连接长度相同的情况下，胶接接头层间剪应力会随着载荷的增大而不断增大而在控制载荷不变得情况下层间搭接长度到达一定量后，胶层层间剪应力的最大值基本不会再变大<sup>[5]</sup>。



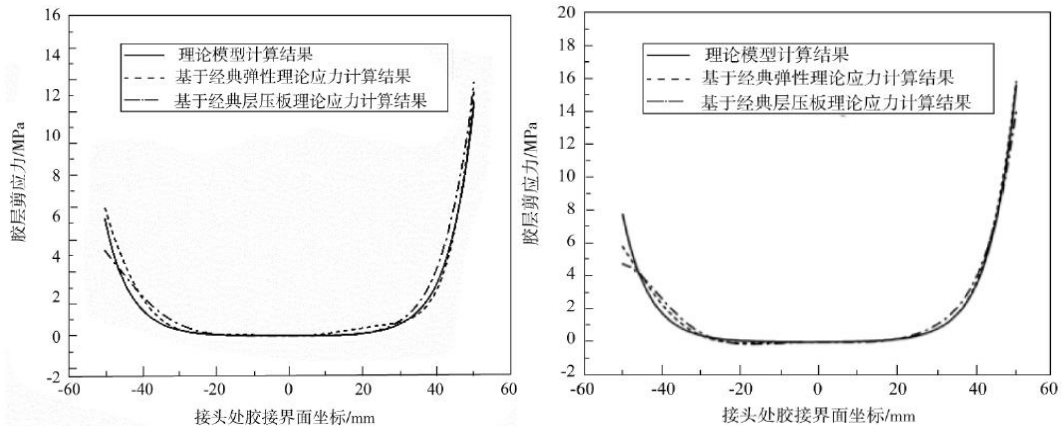


图 1-6 不同分析方法得到的接头处胶层剪应力分布

原文慧研究发现了超声振动对提高液体胶粘剂的流动性有着重要的作用，在最佳的预处理时间和最佳的超声功率下层合板表面会粘连的更加紧密，运用某种纳米颗粒 CNTs 会减少胶粘剂中的气泡使接头的失效载荷变大。

### 1.2.3 胶螺混合连接

由于螺栓连接与胶接连接各自都有较突出的缺点，研究员开始将研究重点向胶螺混合连接接头上转移，胶螺混合连接结构能够巧妙地将螺栓连接应力集中的缺陷和胶接连接不能单独使用且对环境敏感性强烈的缺陷进行消除。

石坡坡 等通过 ABAQUS/Explicit 仿真软件运用 Hashin 三维失效判据结合断裂韧性为标准的刚度退化模型研究了如图 1-7 机械连接和胶接混合连接对 SS 型——（单螺栓单剪切搭接模型）、SD 型——（单螺栓双剪切搭接模型）、DD 型——（双螺栓双搭接模型）接头承载力的影响，研究发现混合接头的承载力显著增强<sup>[6]</sup>。

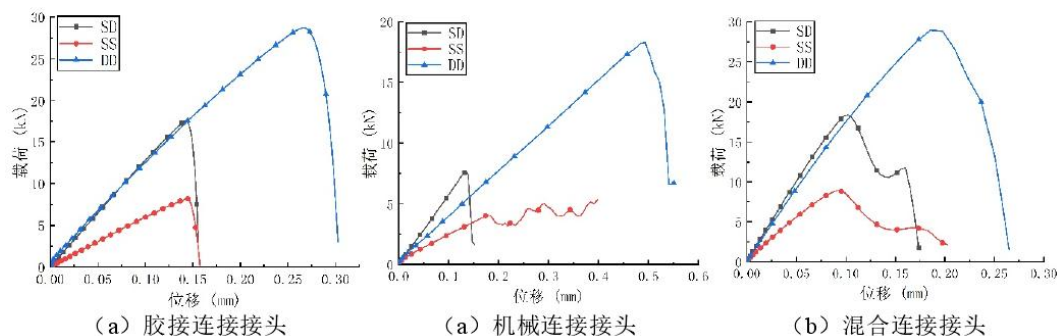


图 1-7 三种接头的载荷位移曲线

Liu L P, Duan K H 等通过有限元三维分析法研究了如图 1-8 双螺栓单搭

接胶螺混合连接接头刚度、强度受参数不同的影响和二次弯曲对接头的影响，以及接头的失效机制，研究发现搭接长度成为了影响层合板强度的重要参数而与螺栓连接位置关系不大<sup>[7]</sup>。

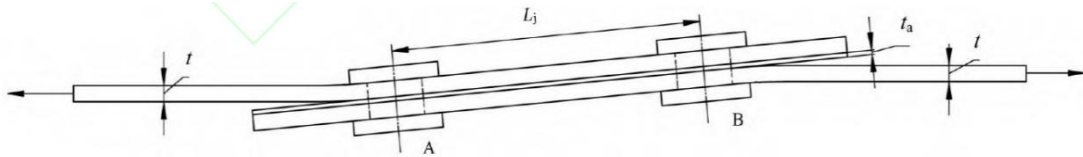


图 1-8 单搭接双螺栓胶螺混合连接接头二次弯曲变形和临界示意图

### 1.3 本文的主要工作内容简介

本文研究在拉伸载荷作用下不同搭接长度对热塑性碳纤维层合板接头的影响，主要使用 ABAQUS 软件对热塑性碳纤维层合板进行建模，分析热塑性碳纤维层合板双搭接胶螺混合连接相较于热塑性碳纤维层合板双搭接胶接连接的优劣，而后选择较优模型，改变模型搭接长度仿真研究不同搭接长度在拉伸载荷作用下对热塑性碳纤维层板胶螺混合连接接头的影响。为复合材料混合连接接头今后的改进制造提供条件。

本文的研究内容如下：

1.运用 ABAQUS 有限元仿真软件对模型进行建模分析，在复合材料建模进行材料属性赋值时需使用 ABAQUS 自带 Hashin 三维失效判据赋予复合材料模型相应材料强度和弹性参数，而后划分单元及网格，施加固定载荷与拉伸载荷，设定分析步最后进行结果输出，查验受力分析云图得出结论。

2.对热塑性碳纤维层合板胶接结构和热塑性碳纤维层合板胶螺混合连接结构进行对比分析确定出两模型的优劣，以便进行下一步仿真研究时确定模型。

3.确定较优模型即胶螺混合连接接头，保持模型材料参数，载荷参数，几何参数不变的情况下改变模型双搭接搭接长度，仿真研究不同搭接长度在拉伸载荷作用下对热塑性碳纤维层板胶螺混合连接接头的影响

## 第二章 有限元仿真实论基础

### 2.1 三维 Hashin 失效准则

本文在使用 ABAQUS 软件对复合材料进行建模时，由于复合材料的特殊性，在赋予材料弹性参数和强度参数时须使用 Hashin 三维失效判据单元对复合材料属性进行赋值，Hashin 失效准则和 Chang-Chang 失效准则是当今世界上操作最为普及的两种复合材料失效判据，其中 Hashin 失效准则是 1980 年提出的一种复合材料失效判据，此种主要有四种失效模式：纵向拉伸失效模式、横向拉伸失效模式、纵向压缩失效模式、横向压缩失效模式等，在 ABAQUS 引入 Hashin 单元三维失效判据进行分析时该单元理论计算公式如下：本文引用石坡坡在碳纤维复合材料层合板胶螺混合连接接头损伤失效模拟分析中 Hashin 计算公式。

纵向拉伸失效模式( $\sigma_{11} \geq 0, \alpha = 0$ )

$$f_{Y,T} = \frac{\sigma_{11}^2}{X_T^2} + \alpha \left( \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \right) \quad (2-1)$$

横向拉伸失效模式( $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \geq 0$ )

$$f_{Y,T} = \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_T} \right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{(S_{12})^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{(S_{23})^2} \quad (2-2)$$

纵向压缩失效模式( $\sigma_{11} < 0$ )

$$f_{X,C} = \frac{\sigma_{11}^2}{(X_C)^2} \quad (2-3)$$

横向压缩失效模式( $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$ )

$$f_{Y,C} = \left[ \left( \frac{Y_C}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_C} + \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{23}} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} \quad (2-4)$$

式中： $\sigma$ ——表示剪应力；

$S$ ——表示面内剪切强度；

$X_T$ ——纵向拉伸强度；

$Y_T$ ——横向拉伸强度；

$X_C$ ——纵向压缩强度；

$Y_C$ ——横向压缩强度；

$S_{12}$ ——面内剪切强度；

$S_{23}$ ——面外剪切强度。

### 2.3 ABAQUS 复合材料渐进损伤分析方法

本文在仿真过程中软件会对模型复合材料进行渐进损伤分析，其本质上是一种科学的探究复合材质结构强度破坏的方法，首先，进行建模、设定参数、应力分析、设定分析步；在分析步中仿真软件会对模型进行初次计算首先对结构进行应力进行分析，而后带入 Hashin 三维失效判据进行判断，判断材料是否失效，如果失效则仿真结束得出结论，如果无结构失效则重新进行结构应力分析增大载荷模量重复步骤。

无论是哪种模型三维又或是二维，其渐进损伤模型分析的方法步骤均以下步骤分析。

- (1) 建模热塑性碳纤维层合板有限元模型并施加边界约束及初始位移载荷；
- (2) 进行结构应力分析，得出应力分布结果；
- (3) 将各层间应力分布结果带入失效准则，进入失效判断；
- (4) 材料失效，模量不变，增加载荷强度，接入步骤 2；
- (5) 无材料失效，进入结构判断；
- (6) 无结构失效，选取材料退化模型进行刚度退化，增加载荷，接入步骤 2；
- (7) 结构失效，流程结束。

### 2.4 胶层间内聚力模型

研究复合材料层合板胶接连接接头是常常会运用到内聚力模型计算分析，内聚力模型即 ABAQUS 软件中 Cohesive 单元，其目的是在创建胶层模型后对该模型进行胶层参数赋值、划分胶层网格，内聚力模型研究计算已经有了相当成熟的计算体系，本文引用复合材料学报，刘礼平等在研究碳纤维增强树脂基复合材料层合板胶螺混合连接失效机制时引入的内聚力模型计算公式。

复合材料层合板之间双线性本构关系 Cohesive 单元具体表达式如下：

$$\begin{Bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-d)k_{nn} & & \\ & (1-d)k_{ss} & \\ & & (1-d)k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (10) \quad (2-5)$$

该式中： $K_{nn} = \frac{E_{nn}}{T_0}$ ， $K_{ss} = \frac{E_{ss}}{T_0}$ ， $K_{tt} = \frac{E_{tt}}{T_0}$ 。

式中： $\sigma_n$ ——纯正态模式下的名义应力；

- $\sigma_s$ ——第一剪切方向的名义应力；  
 $\sigma_t$ ——第二剪切方向的名义应力；  
 $\delta_n$ ——表示方向相对位移；  
 $\delta_s$ ——表示切向一相对位移；  
 $\delta_t$ ——表示切向二相对位移；  
 $T_0$ ——表示初始厚度；  
E——表示杨氏模量；  
K——表示单元刚度。

## 2.5 ABAQUS/Explicit 显式准静态分析

ABAQUS 有限元软件是一款综合的集建模和仿真于一体的复合材料分析软件。该软件存在两种分析模式分别为 ABAQUS/Explicit 和 ABAQUS/Standard，其中 ABAQUS/Standard 隐式求解往往针对于轻微非线性问题来使用，其求解积分步较长，求解速度相对较快。然而，针对于复合材料这种连接复杂程度较高，损伤复杂程度较为严重的问题往往使用 ABAQUS/Explicit 显示分析更为容易一些。相对于 ABAQUS/Standard 隐式，显式的系统资源占用较少，且不存在收敛。本文研究中无论是复合材料层合板螺栓连接对孔壁的挤压破坏，还是拉伸载荷下层合板的损伤断裂都会发生严重的非线性问题。因此本文采用 ABAQUS/Explicit 显式分析来求解螺栓连接下受拉伸载荷影响层合板的损伤变化情况。

## 2.6 本章小结

介绍了 ABAQUS 有限元分析软件带入 Hashin 三维失效判据单元的目的以及在软件使用 Hashin 三维失效判据时其计算所用公式。描述了软件在进行复合材料渐进损伤分析时的步骤。

为研究复合材料搭接结构还必须引入 Cohesive 单元进行胶层内聚力分析，并且清楚的说明了 Cohesive 单元引入的目的作用及单元理论计算依据。

最后介绍了 ABAQUS 两种分析模块及本文分析时所选模块的原因。

### 第三章 复合材料双搭接层合板有限元分析

#### 3.1 胶螺混合连接拉伸载荷有限元分析

基于第二章理论分析，本章运用 ABAQUS 有限元分析方法，对复合材料双搭接开孔板进行拉伸行为作用下的有限元分析。

##### 3.1.1 模型铺层及尺寸设计

本章分析的开孔板几何尺寸如图 3-1 所示

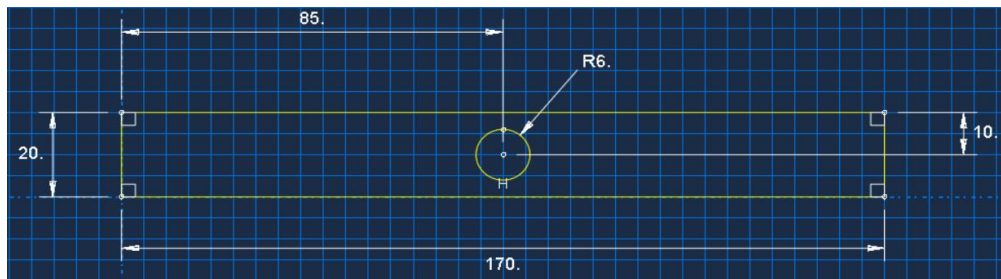


图 3-1 开孔板几何尺寸

复合材料铺层厚度为每一单层板厚度  $t = 1\text{mm}$ 。

表 3-1 层合板铺层顺序

| 序号 | 铺层顺序                          | 厚度 (mm) |
|----|-------------------------------|---------|
| A  | $[0/45/-45/90/-45/45/0/45]_s$ |         |

##### 3.1.2 复合材料参数

本单元开孔板采用碳纤维预浸料 T800/X850，设定开孔板横向各向同性，可得  $V_{12} = V_{21}$ ， $G_{12} = G_{21}$ ， $S_{12} = S_{21}$ ，其中  $V_{23}$  根据式 (3-1) 确定， $G_{23}$  根据式 (3-2) 确定。即可得： $S_{13} = S_{31} = S_{12}$ ， $Z_C = Y_C$ ， $Z_T = Y_T$  再次单层板弹性参数与强度属性参考表 3-2 所示。计算公式引用哈尔滨工业大学石坡坡 碳纤维复合材料层合板胶螺混合连接接头损伤失效模拟分析中的计算，用来计算单层板弹性参数。

$$V_{23} = \frac{V_{12}(1 - V_{12} \times E_2/E_1)}{1 - V_{12}} \quad (3-1)$$

$$G_{23} = \frac{E_2}{2 \times (1 + V_{23})} \quad (3 - 2)$$

式中：V——表示泊松比；  
 ； G——表示剪切模量；  
 ； E——表示弹性模量。

T800/X850 单层板弹性参数与强度属性引用哈尔滨工业大学石坡坡 等人的文献参数。

表 3-2 T800/X850 单层板弹性参数与强度属性

| $E_1$  | $E_2$ | $V_{12}$ | $G_{12}$ | $G_{13}$ | $G_{23}$ |
|--------|-------|----------|----------|----------|----------|
| 195000 | 8580  | 0.33     | 4570     | 4570     | 2888     |
| $X_T$  | $X_C$ | $Y_T$    | $Y_C$    | $S_{12}$ |          |
| 3071   | 1747  | 88       | 271      | 143      |          |

式中：E——表示弹性模量；  
 ； G——表示剪切模量；  
 ；  $V_{12}$ ——表示泊松比；  
 ；  $X_T$ ——表示纵向拉伸强度；  
 ；  $X_C$ ——表示纵向压缩强度；  
 ；  $Y_T$ ——表示横向拉伸强度；  
 ；  $Y_C$ ——表示横向压缩强度；  
 ； S——表示剪切强度；  
 ；  $G_{12}$ 、 $G_{13}$ 、 $G_{23}$ ——表示三个面内剪切弹性模量。

面内韧性参数对开孔板搭接失效仿真起着至关重要的效果，本章采用北京航空航天大学赵丽滨课题组相关数据如表 3-3 所示韧性参数。

表 3-3 T800/X850 单层板面内韧性

| $G_{1c}^t$ | $G_{1c}^c$ | $G_{2c}^t$ | $G_{2c}^c$ |
|------------|------------|------------|------------|
| 55         | 35         | 0.368      | 1.84       |

式中： $G_{1c}^t$ ——表示纵向拉伸断裂能；  
 $G_{1c}^c$ ——表示纵向压缩断裂能；  
 $G_{2c}^t$ ——表示横向拉伸断裂能；  
 $G_{2c}^c$ ——表示横向压缩断裂能。

### 3.1.3 约束与载荷

如图 3-2 所示将双搭接模型右端固定，在左端施加 20mm 纤维拉伸位移载荷，为模拟螺栓连接效果，如图 3-3 所示在开孔处固定观测孔壁周围载荷变化状态。

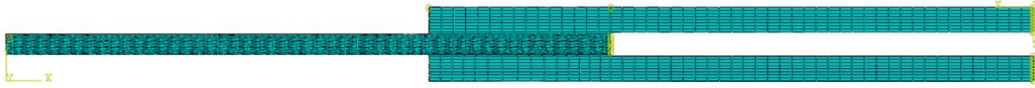


图 3-2 开孔板侧视图

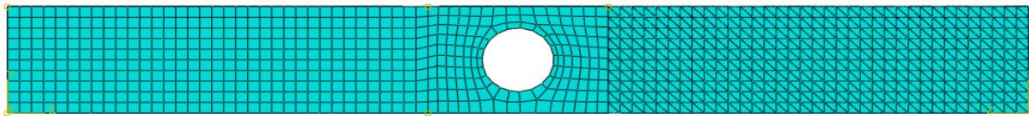


图 3-3 开孔板俯视图

### 3.1.4 单元与网格

如图 3-4 为网格示意图，网格 2mm 尺寸，各层细化布种，每边两种。同时对 Cohesive 单元指派网格控制属性六面体形并运用中轴性算法设置扫略网格，最后改变扫略方向沿铺层方向。同时 Cohesive 静态且粘性分析。在建模时根据表 3-1 画出三维实体模型切分单层板并设置胶层。

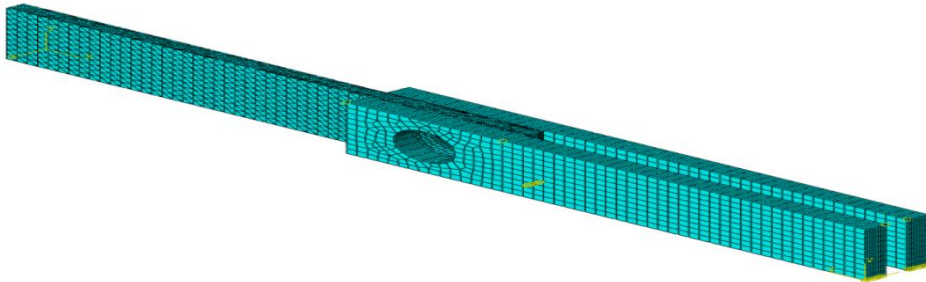


图 3-4 网格划分后整体示意图

### 3.1.5 分析步及结果输出

添加分析步，打开非线性分析，并设置增量步 0.001 起始最大为 1。同时在场输出选择默认。Cohesive 结果输出 SDEG 刚度下降率和 DMICRT 损伤输出准则。

### 3.1.6 应力与损伤

根据第二章渐进损伤理论分析，结合结构模型载荷的施加，得出了

Cohesive 单元胶层在胶螺混合连接下胶层受拉后的刚度下降初始损伤, 过程损伤及完全损伤情况如图 3-5、图 3-6、图 3-7 所示

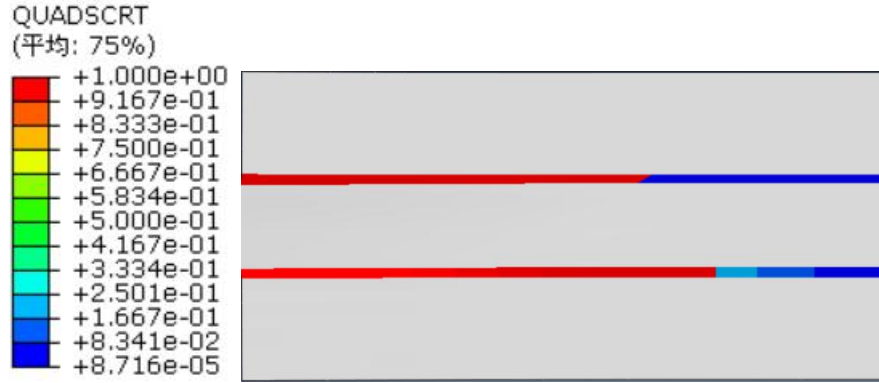


图 3-5 胶层起始损伤云图

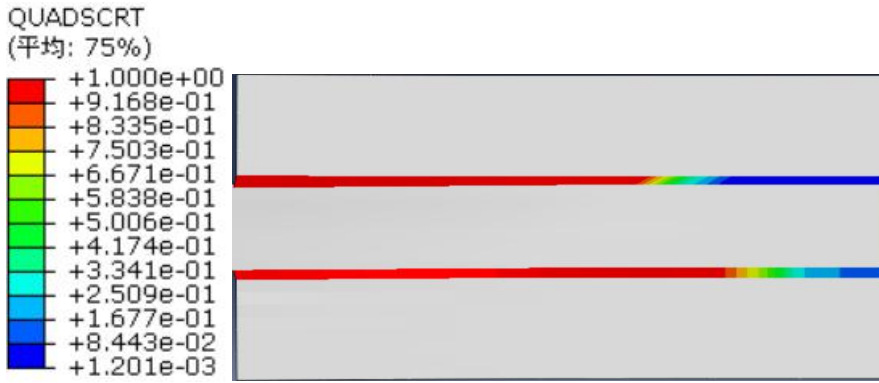


图 3-6 胶层过程损伤

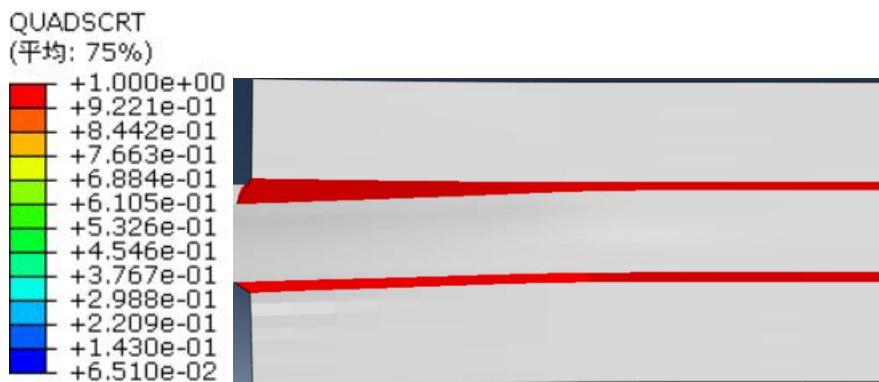


图 3-7 胶层完全损伤

根据受力云图受向左的拉伸载荷影响, 胶层首先单边出现损伤紧接着双边依次发生向后衍生并逐渐达到最大应力。胶层的损伤是慢慢形成的。当胶层退

化断裂，进入最后阶段，胶层屈服极限，仿真完成。

如图 3-5 表示胶螺混合连接胶层受拉伸载荷后初始损伤云图在分析发生到  $t=0.03125s$ ,  $X=0.92mm$ ,  $f=0.25KN$  时胶层边缘损伤大于 0.916KN 时可认为损伤开始出现，如图 3-7 在  $t=0.1894s$ ,  $X=5.68mm$ ,  $f=0.922KN$  时胶层所有损伤（SDEG）均大于 0.916 时认为胶层完全失效。

### 3.2 胶接连接拉伸有限元分析

为更清楚的了解胶螺混合连接对胶层受拉伸载荷后的影响，设立普通层合板双搭接胶接结构来更加直观的了混合连接的优点。本节设置均与 3-1 小节参数相同，运用控制变量法只改变层合板结构取消开孔。

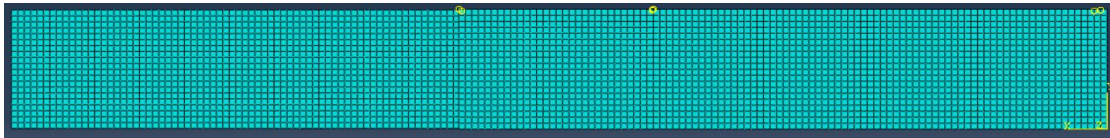


图 3-8 层合板胶接结构图

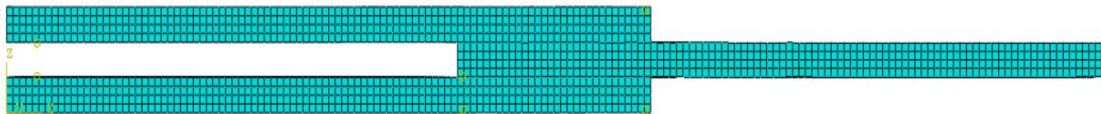


图 3-9 层合板胶接结构图侧视图

#### 3.2.1 层合板胶接连接受拉伸载荷有限元分析

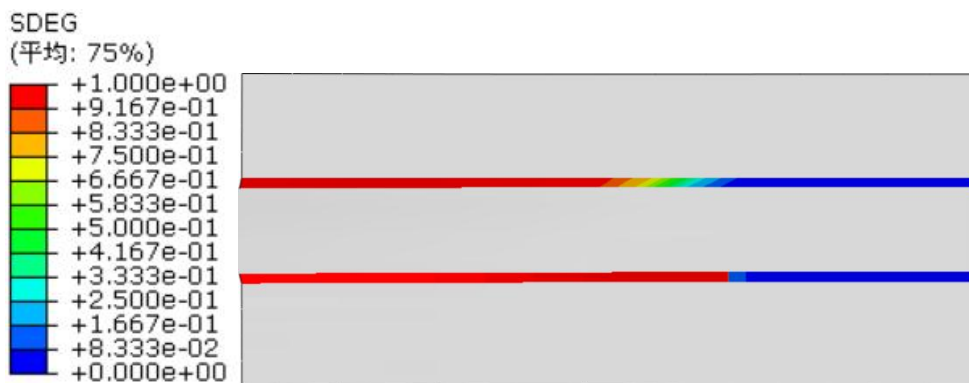


图 3-10 层合板胶接初始损伤云图

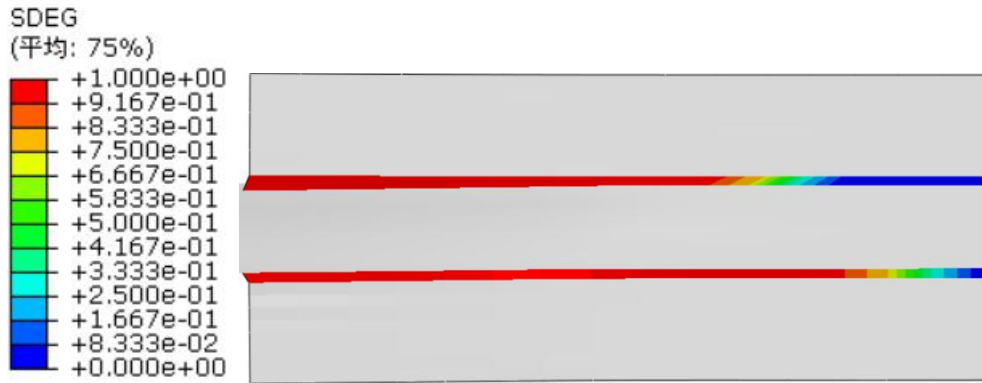


图 3-11 层合板胶层过程损伤云图

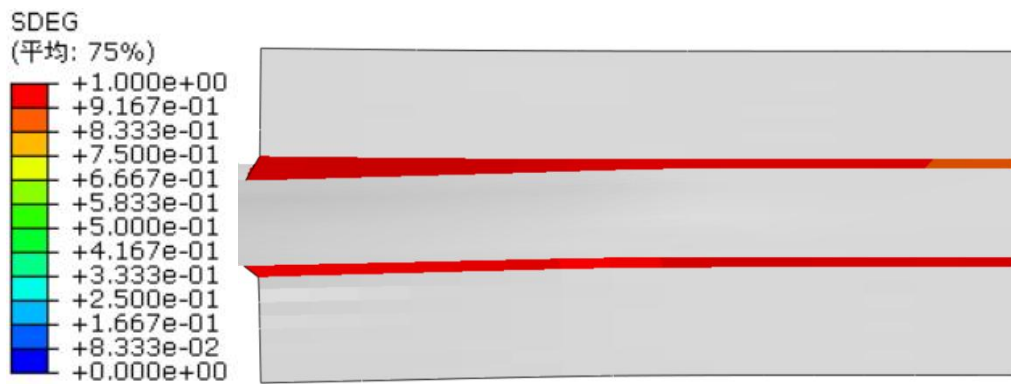


图 3-12 层合板胶层完全损伤云图

根据受力云图受向左的拉伸载荷影响，胶层从左向右刚度依次出现破坏而不是达到最大应力值后突然失效。本次分析为对比分析。

如图 3-10 层合板胶层受拉伸载荷后初始损毁云图在发生到  $t=0.025s$ ， $X=0.74mm$ ， $f=0.1667KN$  时胶层边缘大于  $0.916KN$  时可认为损伤开始出现，如图 3-12 在  $t=0.1526s$ ， $X=4.5mm$ ， $f=0.833KN$  时胶层所有损伤（SDEG）均大于  $0.916$  时胶层完全失效。

### 3.2.2 对比分析

根据表 3-4 及表 3-5 对比实验发现，层合板双搭接胶接接头受拉伸载荷损伤行为无论是初始损伤、过程损伤还是完全损伤，胶层的损伤破坏都比胶螺混合连接层合板胶层损伤行为要提前。

表 3-4 开孔层合板胶层损伤数据

|      | 时间 (t)   | 位移 (x) | 应力 (f)  |
|------|----------|--------|---------|
| 初始损伤 | 0.03125s | 0.92mm | 0.25KN  |
| 完全损伤 | 0.1894s  | 5.68mm | 0.922KN |

表 3-5 层合板胶层损伤数据

|      | 时间 (t)  | 位移 (x) | 应力 (f)   |
|------|---------|--------|----------|
| 初始损伤 | 0.025s  | 0.74mm | 0.1667KN |
| 完全损伤 | 0.1526s | 4.5mm  | 0.833KN  |

### 3.3 本章小结

本章主要以胶层为研究对象,详细介绍了有限元分析模型参数,基于第二章的理论采用 ABAQUS/Explicit 显示准静态分析办法研究了其在拉伸载荷作用下的渐进损伤破坏。仿真结果表明复合材料层合板胶螺混合连接结构受到拉伸载荷时胶层损伤破坏要比复合材料层合板胶接结构缓慢的多,且在发生损伤时胶螺混合连接结构能够更好的抵抗破坏,无论在初始阶段还是完全破坏阶段,其需要的位移量、时间、都要长结构性能都要好,并且在即将破坏时混合连接结构承受的应力都要大。因此,热塑性碳纤维复合材料层合板胶螺混合连接接头对接胶层强度更优于复合材料层合板胶接结构。

## 第四章 搭接长度对胶螺接头拉伸性能影响分析

本章主要研究复合材料层合板胶螺混合连接在拉伸载荷作用下在不同搭接长度对胶层破坏的影响。基于第三章胶螺混合连接的性能无论从渐进损伤强度，还是损伤时间，又或是抵抗破坏的性能都要比单个胶层接头要好。所以本章设计为第三章延伸性仿真，鉴于第三章胶螺混合连接的优越性。我们发现双搭接结构搭接长度本身可能会对整体结构造成影响，所以本章尝试改变搭接长度进行复合材料有限元分析，材料参数不变只改变搭接长度及分析所需的载荷强度。

### 4.1 有限元模型

#### 4.1.1 几何尺寸

三种搭接长度混合连接的几何示意图如图 4-1~4-4 所示。

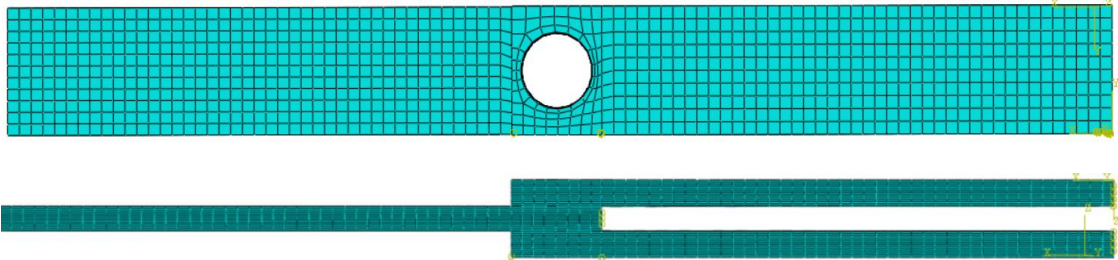


图 4-1 搭接 15mm 几何示意图

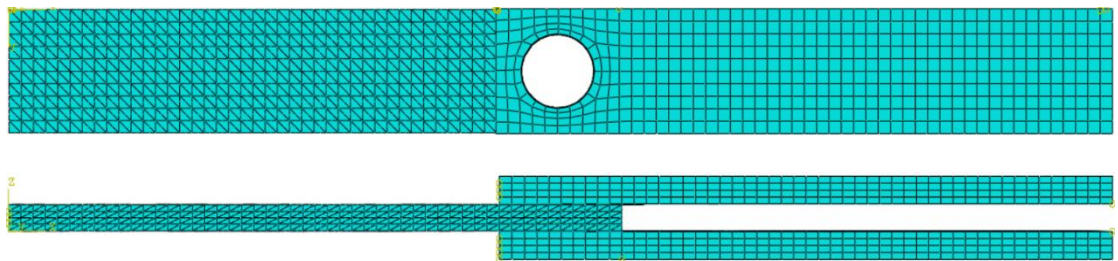


图 4-2 搭接 20mm 几何示意图

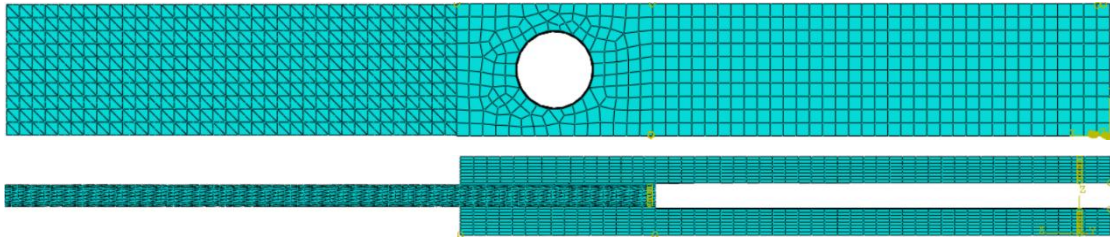


图 4-3 搭接 30mm 几何示意图

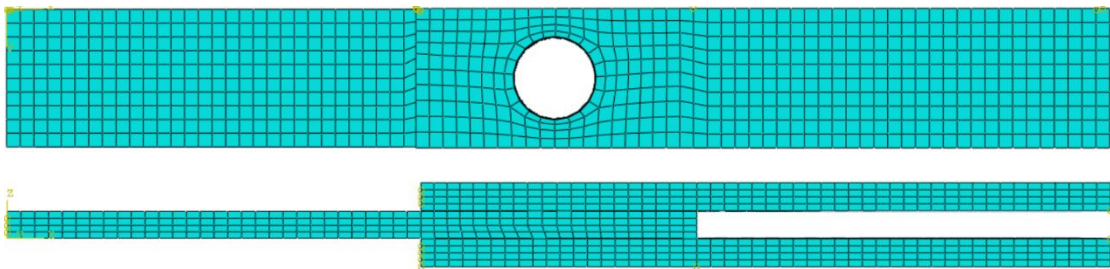


图 4-4 搭接 40mm 几何示意图

三种搭接长度混合连接接头尺寸如表 4-1 所示，层合板的参数选择满足复合材料混合连接被连接层合板的参数基本要求。

表 4-1 混合连接层合板几何参数

|      | 模型长度<br>(a) | 模型宽度<br>(b) | 板厚<br>(t) | 孔径<br>(d) | 层数 |
|------|-------------|-------------|-----------|-----------|----|
| 15mm | 185         | 20          | 1         | 12        | 4  |
| 20mm | 180         | 20          | 1         | 12        | 4  |
| 30mm | 170         | 20          | 1         | 12        | 4  |
| 40mm | 160         | 20          | 1         | 12        | 4  |

#### 4.1.2 材料参数

本章复合材料层合板采用第三章所选碳纤维树脂预浸料 T800/X850，其接头层合板材料参数见表 3-2，其面内韧性见表 3-3。其性能设定及假设均与第三章相同不变。

#### 4.1.3 约束与载荷

为方便分析我们设置了四个部位的边界条件位置 1 为拉伸载荷赋予的表面大小为 20mm，位置 2 为上下层合板左端我们赋予完全约束，位置 3 为模拟螺栓连接我们将孔内完全约束以达到预期效果，位置 4 为上下层合板右端我们

赋予完全约束条件见表 4-2，模型如图 4-4

表 4-2 模型载荷具体参数

|      | 位置 4 | 位置 3 | 位置 2 | 位置 1 |
|------|------|------|------|------|
| 15mm | 完全固定 | 完全固定 | 完全固定 | 20mm |
| 20mm | 完全固定 | 完全固定 | 完全固定 | 20mm |
| 30mm | 完全固定 | 完全固定 | 完全固定 | 20mm |
| 40mm | 完全固定 | 完全固定 | 完全固定 | 20mm |

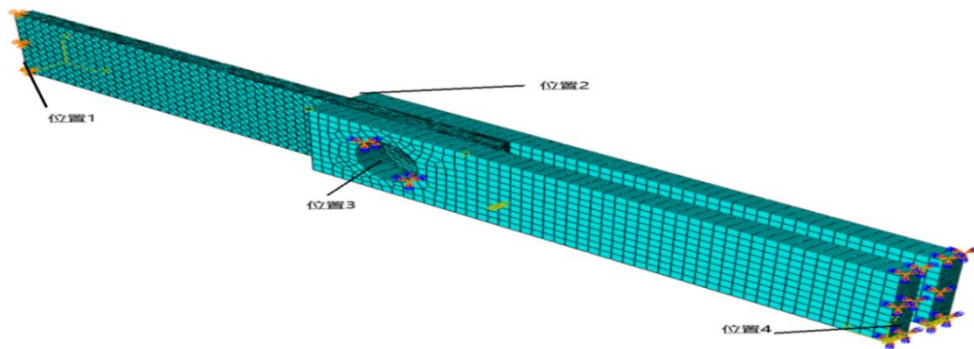


图 4-5 施加载荷后模型示意图

#### 4.1.4 单元与网格

网格划分是首先如图 4-6 指派网格使胶层六面体扫掠并中轴性算法铺设网格对其扫掠方向定义为厚度方向,其次如图 4-7 对中间层合板安尺寸布种 2, 如图 4-8 边层合板每层按个数 2 布种。再次如图 4-9 全局布种 2 个近似单位并进行网格布局划分。最后如图 4-10 胶层指派粘结。

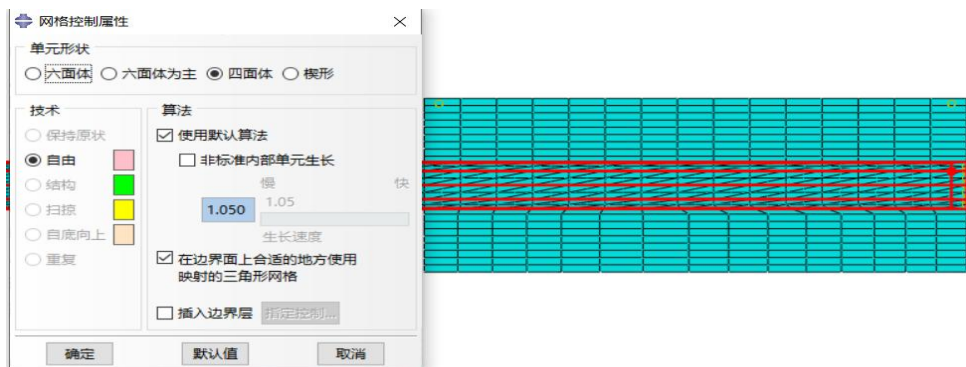


图 4-6 胶层网格属性指派

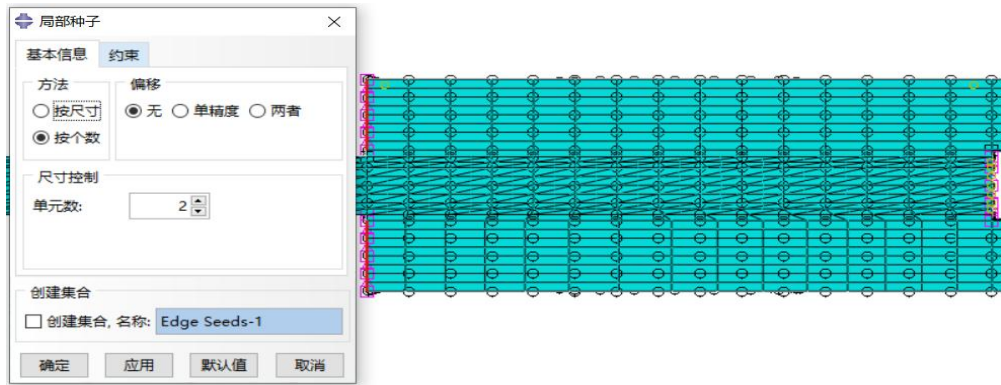


图 4-7 中间层合板种子设置

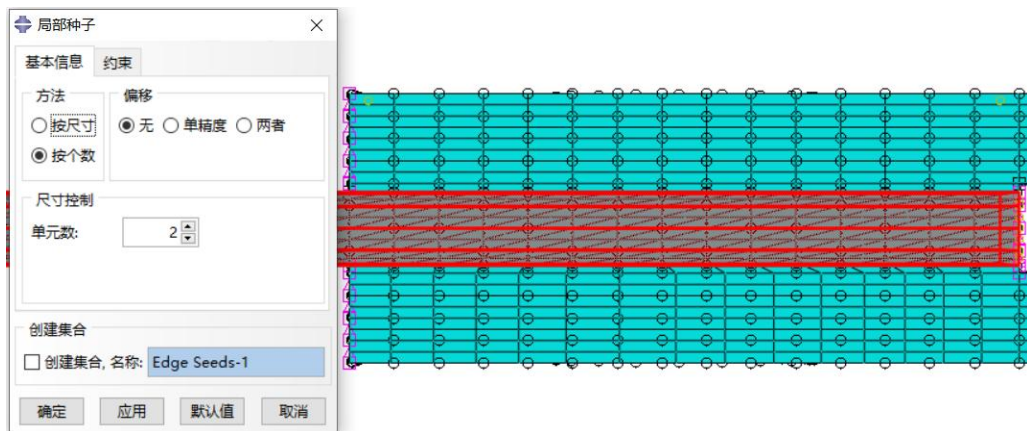


图 4-8 上下层合板种子设置

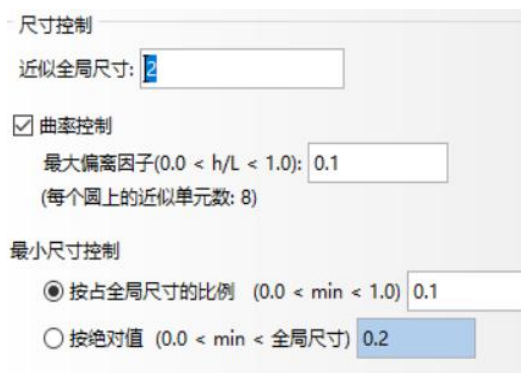


图 4-9 全局布种设置

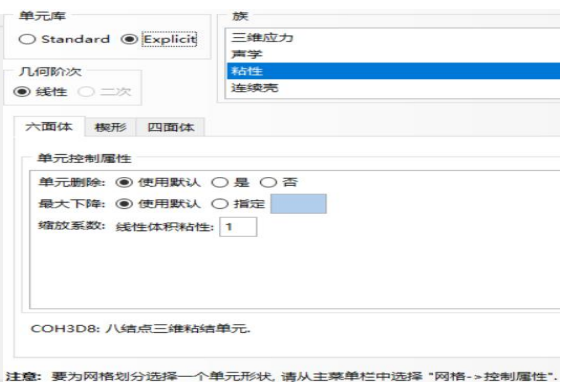


图 4-10 胶层单元类型指派

#### 4.1.5 分析步及结果输出

添加分析步非线性分析，并设置增量步 0.4 起始最大为 1，最小为 1E-009。同时在场输出中默认输出类型。输出 SDEG 刚度下降率和 DMICRT 损伤输出准则。为方便看清胶层破坏我们还设置输出破坏和损伤。

## 4.2 不同搭接长度下胶接接头的损伤破坏

搭接长度的选择在碳纤维复合材料的使用中是至关重要的,而恰恰这一选择也对本文混合连接接头有限元分析产生着巨大的影响,本章改变搭接长度施加拉伸载荷,探究该变量元素对混合连接接头的影响。为更清楚地展示不同搭接长度下胶层的损伤结果。如图 11-图 14 位移曲线图中三条平滑曲线从左向右依次为胶层靠近拉伸载荷点、胶层中段及胶层远离拉伸载荷点。可以清楚地发现 20mm-40mm 搭接长度下随搭接长度变大胶层初始损伤时间逐渐变短,而 15mm 搭接长度胶层初始损伤时间较 20mm 搭接长度基本不变,但位移曲线更为平滑。且基本上所有搭接长度下胶层的损伤都是从靠近拉伸点向后逐步延伸,在损伤达到 0.916KN 时曲线开始出现峰值,胶层失效破坏。

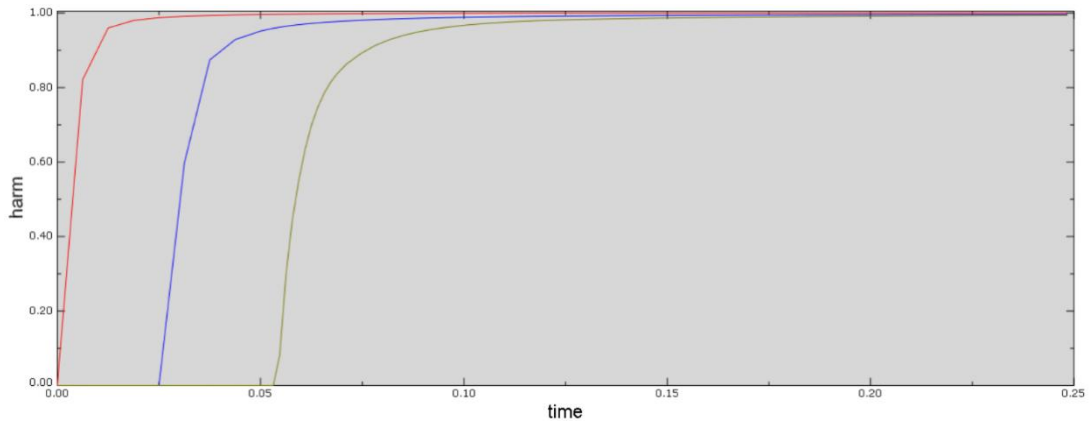


图 4-11 15mm 胶层损伤载荷位移曲线

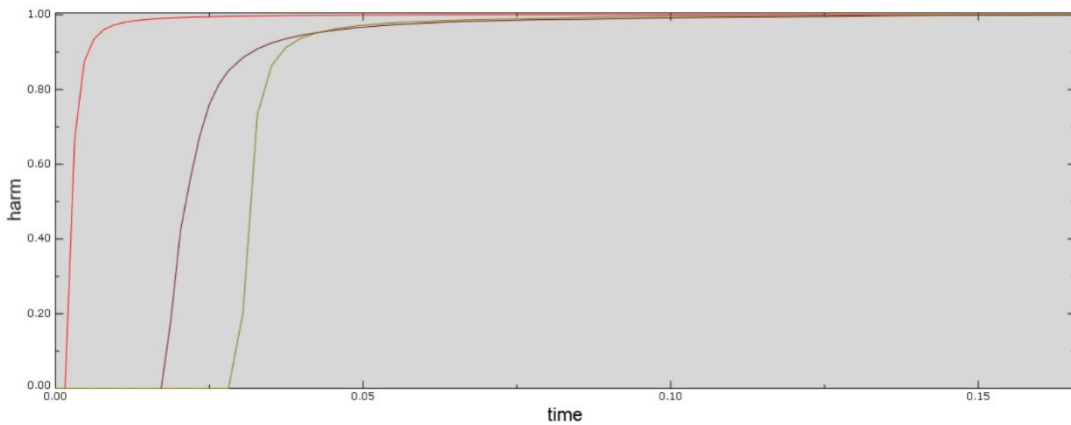


图 4-12 20mm 胶层损伤载荷位移曲线

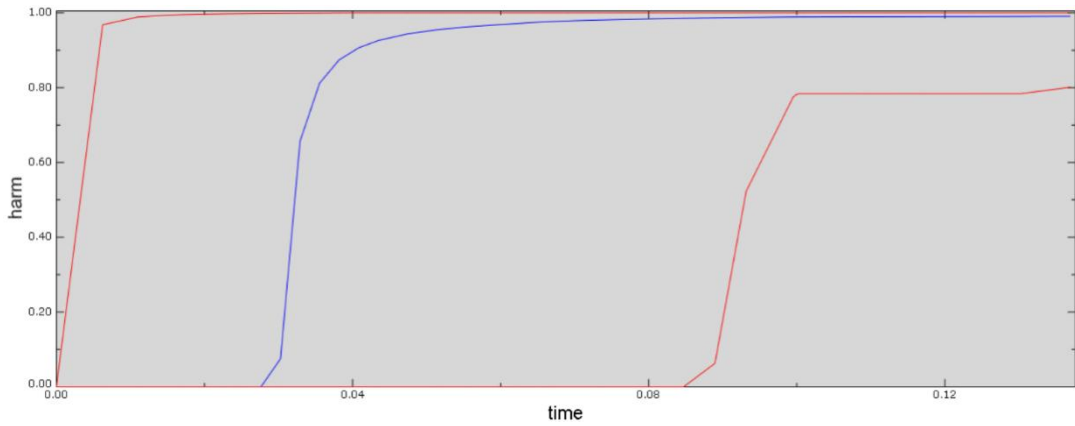


图 4-13 30mm 胶层损伤载荷位移曲线

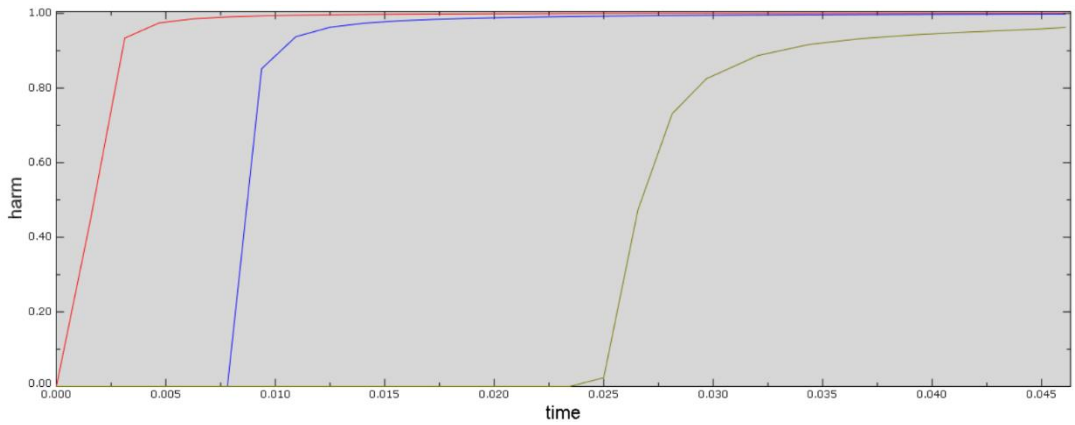


图 4-14 40mm 胶层损伤载荷位移曲线

#### 4.2.1 搭接长度 15mm 损伤失效分析

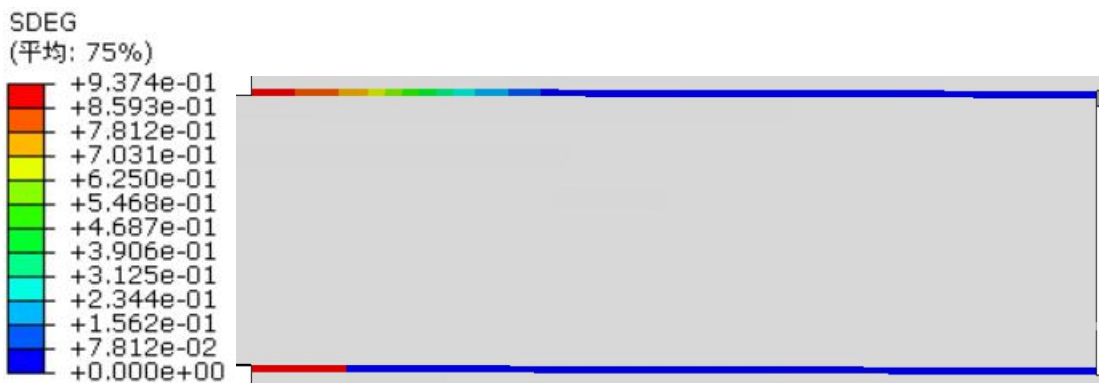


图 4-15 15mm 搭接长度胶层完全损伤云图

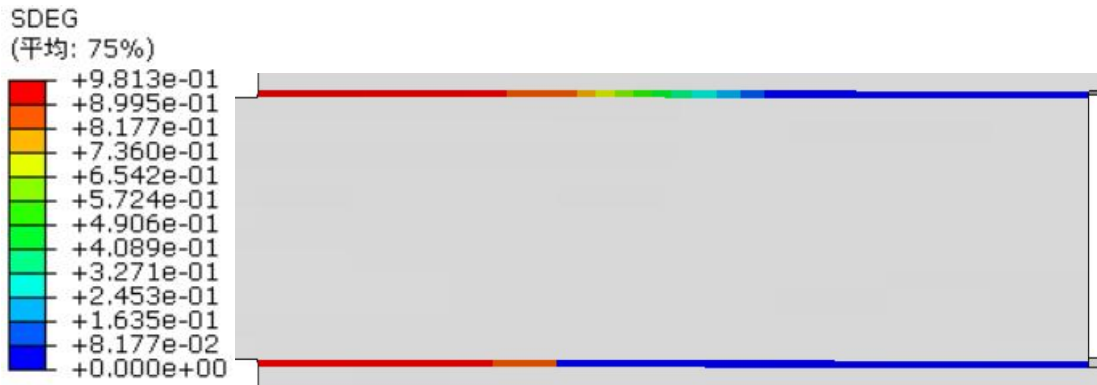


图 4-16 15mm 搭接长度胶层完全损伤云图

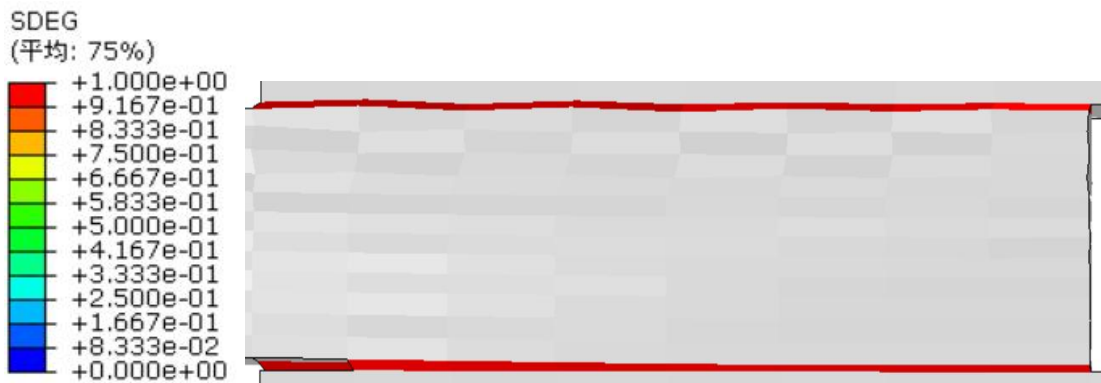


图 4-17 15mm 搭接长度胶层完全损伤云图

根据受力云图受向左的拉伸载荷影响，胶层首先单边出现损伤紧接着双边依次发生向后衍生并逐渐达到最大应力。胶层的损伤是慢慢形成的。当胶层退化断裂，进入最后阶段，胶层屈服极限，实验完成

如图 4-15 层合板胶层受拉伸载荷后初始云图在  $t=0.000625s$ ， $X=0.09mm$  时大于  $f=0.1562KN$  时损毁开始，如图 4-17 在  $t=0.1142s$ ， $X=1.712mm$ ， $f=0.916KN$  时胶层出现断裂，模型基体出现严重变形，认为胶层完全失效，分析结束。

#### 4.2.2 搭接长度 20mm 损伤失效分析

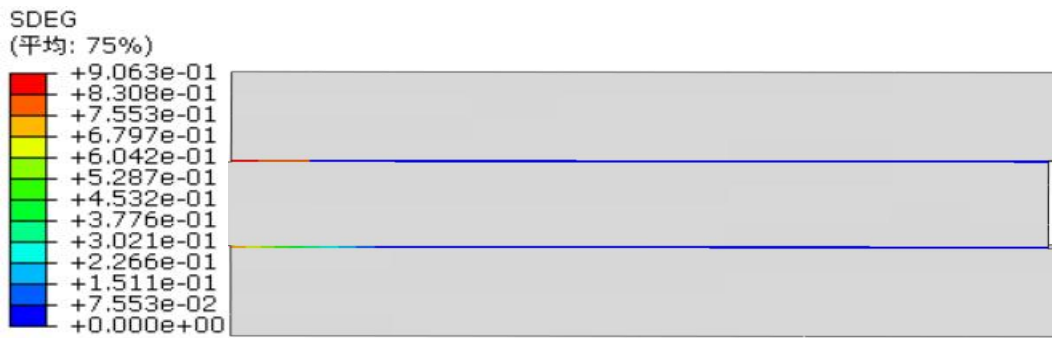


图 4-18 20mm 搭接长度胶层初始损伤云图

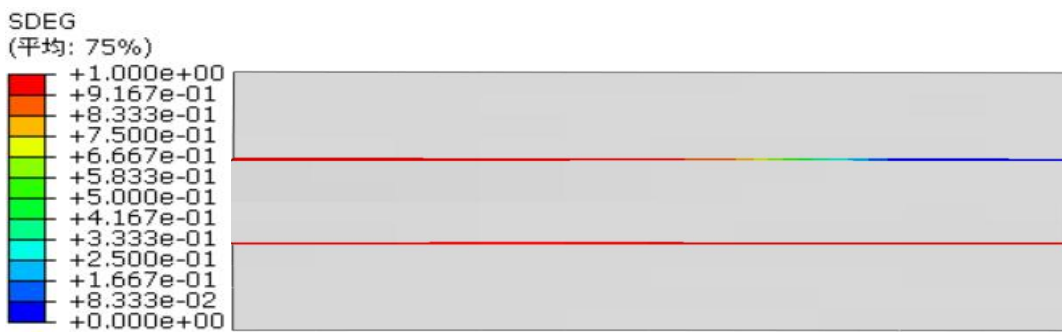


图 4-19 20mm 搭接长度胶层过程性损伤云图

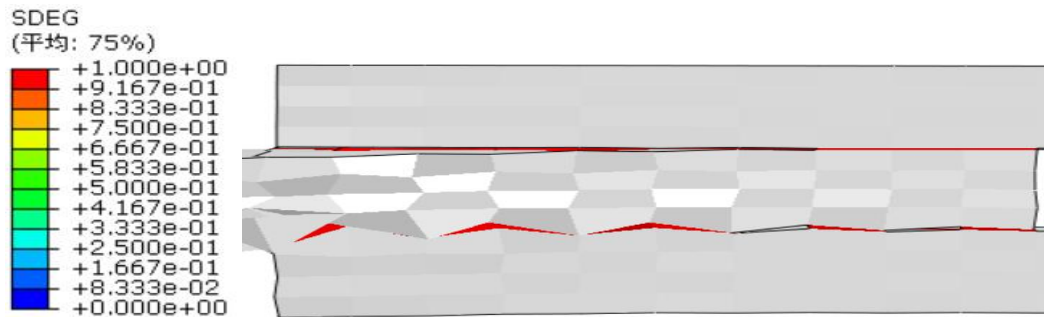


图 4-20 20mm 搭接长度胶层完全性损伤云图

根据受力云图受向左的拉伸载荷影响，胶层首先单边出现损伤紧接着双边依次发生向后衍生并逐渐达到最大应力。胶层的损伤是慢慢形成的。当胶层退化断裂，进入最后阶段，胶层屈服极限，实验完成

如图 4-18 层合板胶层受拉伸载荷后初始云图在  $t=0.003125s$ ,  $X=0.014mm$  时大于  $f=0.146kN$  时损毁开始，如图 4-20 在  $t=0.165s$ ,  $X=3.298mm$ ,  $f=0.916kN$  时胶层出现断裂，模型基体出现严重变形，认为胶层完全失效，分析结束。

### 4.2.3 搭接长度 30mm 损伤失效分析

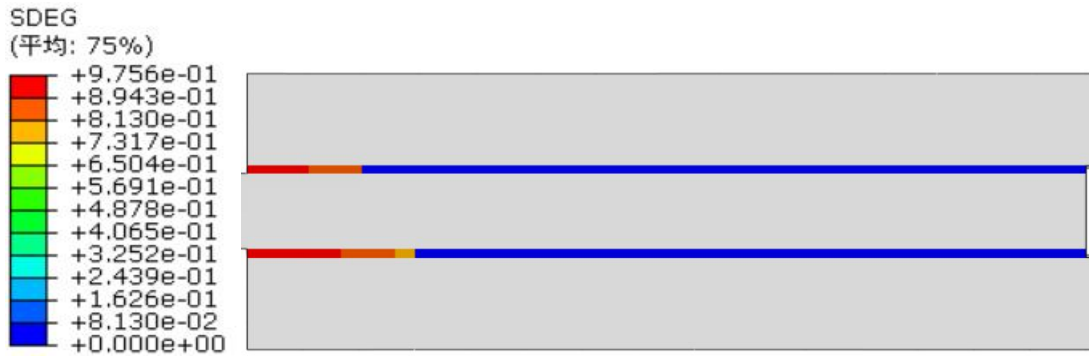


图 4-21 30mm 搭接长度胶层起始损伤云图

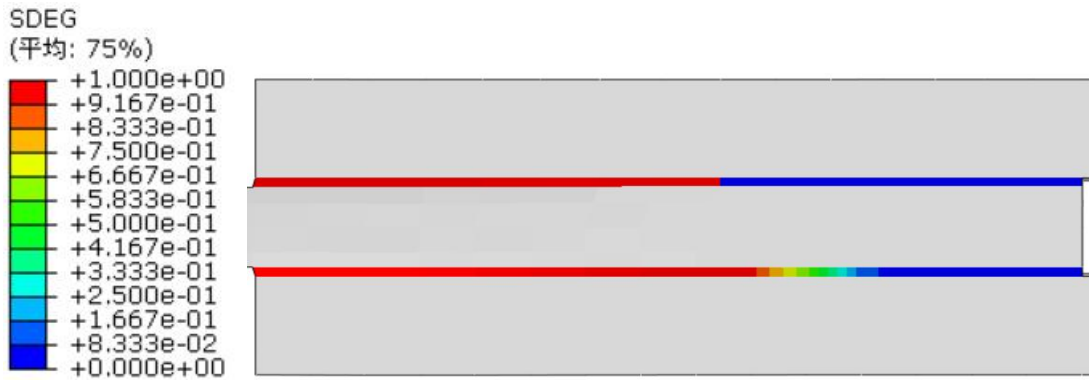


图 4-22 30mm 搭接长度胶层过程损伤云图

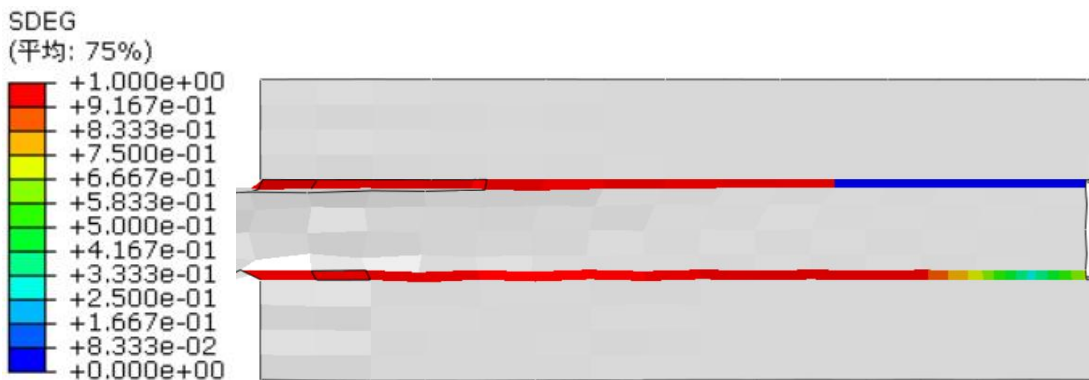


图 4-23 30mm 搭接长度胶层完全损伤云图

根据受力云图受向左的拉伸载荷影响，胶层首先单边出现损伤紧接着双边依次发生向后衍生并逐渐达到最大应力。胶层的损伤是慢慢形成的。当胶层退化断裂，进入最后阶段，胶层屈服极限，实验完成

如图 4-21 层合板胶层受拉伸载荷后初始云图在  $t=0.00062s$ ,  $X=0.125mm$

时大于  $f=0.1626\text{KN}$  时损毁开始,如图 4-23 在  $t=0.1370\text{s}$ ,  $X=2.74\text{mm}$ ,  $f=0.916\text{KN}$  时胶层出现断裂,模型基体出现严重变形,认为胶层完全失效,分析结束。

#### 4.2.4 搭接长度 40mm 损伤失效分析

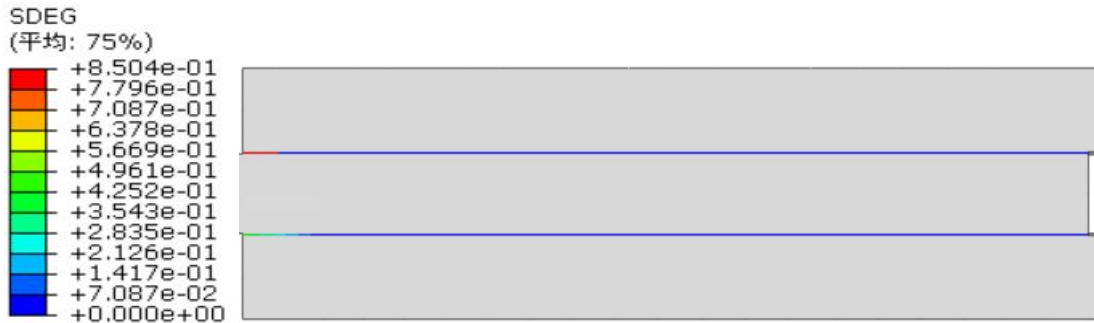


图 4-24 40mm 搭接长度胶层初始损伤云图

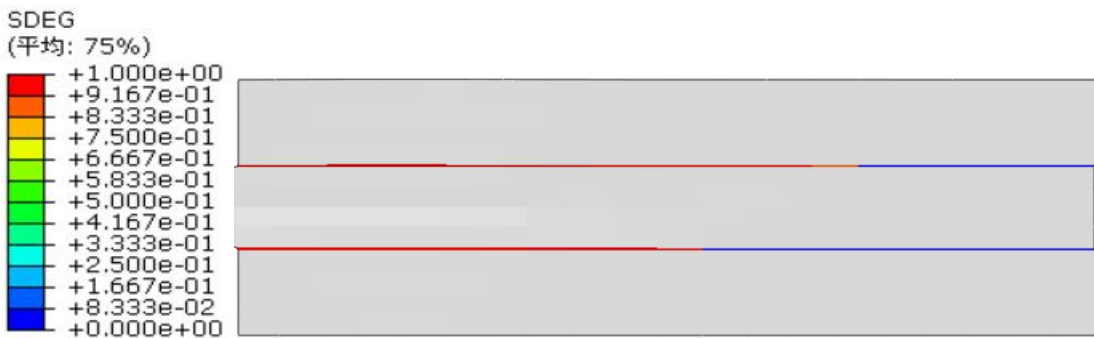


图 4-25 40mm 搭接长度胶层过程性损伤云图

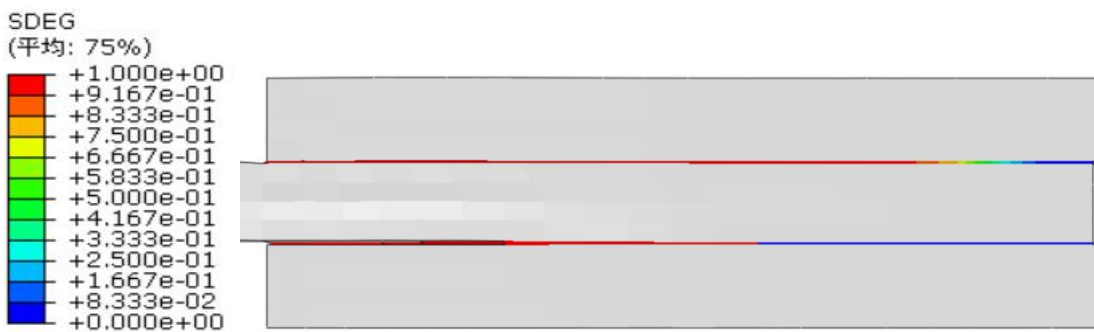


图 4-26 40mm 搭接长度胶层完全损伤云图

根据受力云图受向左的拉伸载荷影响,胶层首先单边出现损伤紧接着双边依次发生向后衍生并逐渐达到最大应力。胶层的损伤是慢慢形成的。当胶层退化断裂,进入最后阶段,胶层屈服极限,实验完成

如图 4-24 层合板胶层受拉伸载荷后初始云图在  $t=0.0015\text{s}$ ,  $X=0.0325\text{mm}$

时大于  $f=0.141\text{KN}$  时损毁开始,如图 4-26 在  $t=0.046\text{s}$ ,  $X=0.92\text{mm}$ ,  $f=0.916\text{KN}$  时胶层出现断裂,模型基体出现严重变形,认为胶层完全失效,分析结束。

### 4.3 对比分析

表 4-3 不同搭接长度层合板胶层初始损伤对比表

|      | 时间 (t)    | 位移 (X)   | 应力 (f)   |
|------|-----------|----------|----------|
| 15mm | 0.00625s  | 0.09mm   | 0.1562KN |
| 20mm | 0.007125s | 0.14mm   | 0.176KN  |
| 30mm | 0.0062s   | 0.125mm  | 0.1626KN |
| 40mm | 0.0015s   | 0.0325mm | 0.141KN  |

表 4-4 不同搭接长度层合板胶层完全损伤对比表

|      | 时间 (t)  | 位移 (X)  | 应力 (f)  |
|------|---------|---------|---------|
| 15mm | 0.1142s | 1.712mm | 0.916KN |
| 20mm | 0.165s  | 3.298mm | 0.916KN |
| 30mm | 0.1370s | 2.74mm  | 0.916KN |
| 40mm | 0.046s  | 0.92mm  | 0.916KN |

通过数据对比不难发现搭接长度对胶层是有一定程度的影响的,不同搭接长度下接头的损伤发生时间、损伤发生位移量、损伤发生应力大小都会出现不同的结果。

如表 4-3、表 4-4 对比了不同搭接长度下复合材料层合板受拉伸载荷影响时其损伤开始及退化的时间、模型开始的位移量以及一瞬间的应力载荷。仿真结果表明:搭接长度越长初始损伤开始所需时间越短,其胶层开始退化时的屈服应力越小,搭接长度逐渐变短时初始损伤开始所需时间变长,胶层开始退化时的屈服应力逐渐变大,但在减至 15mm 搭接时初始损伤开始所需时间又变短,胶层开始退化时的屈服应力也出现减小。不过无论搭接长度怎么变化都不会影响胶层在最终完全失效时候的应力大小,由此搭接长度的大小在胶螺混合连接接头当中只会影响到结构在正常状态下的效果,一旦结构发生破坏搭接长度就不在决定结构的性能。

### 4.5 本章小结

本章以第三章为延伸。详细介绍了 15mm、20mm、30mm、40mm 层合板胶层连接强度受层合板搭接长度在拉伸载荷作用下的影响。在四种搭接长度中

20mm 搭接长度胶层初始损毁最慢,胶层开始退化时的初始应力最大,而 40mm 搭接长度胶层初始损毁最快,胶层开始退化时的初始应力最小,猜想搭接长度越长胶层初始损毁时间越快,胶层开始退化时的初始应力越小;搭接长度越短胶层初始损毁时间越慢,胶层开始退化时的初始应力越大。但 15mm 搭接时初始损伤开始所需时间又变短,胶层开始退化时的屈服应力也出现减小,由此表明 15mm-20mm 搭接长度之间可能存在最优搭接。

在本章中详细介绍了模型的各项参数数据,同时分析过程中对所用到的载荷施加形式、分析步设置参数、网格划分方、结果输出要求以及不同搭接长度模型示意图也进行了详细的说明。

## 结 论

本文以热塑性复合材料层合板混合连接接头为对象,以理论基础和有限元仿真为条件,探究了不同层合板搭接长度在拉伸载荷作用下对层合板连接接头性能的影响,具体结论如下。

1.层合板胶接连接头的机能要弱于层合板螺胶混用连接头的性能。使用混合连接方法其抗拉性能更强,接头抗损伤性能更好,在发生胶层损伤时其所需应力更大。因此层合板螺胶混用连接头承载力更优

2.在四种搭接长度中 20mm 搭接长度其连接接头无论是胶层初始损毁所需时间,还是胶层开始退化时所需的初始应力,都要比 15mm、30mm 和 40mm 搭接多。因此认为 20mm 搭接长度其接头的抗拉伸性能,抗损伤破坏性能,以及层合板结构抗破坏性能都要优于更长的搭接长度。

3.设置 15mm 搭接长度损伤失效分析验证了搭接长度过短或是搭接长度过长都会使连接结构的抗损伤破坏性能变弱,且在 15mm-20mm 搭接长度之间存在最优搭接

展望:

1.本文基于有限元分析方法研究了胶螺混合连接接头在拉伸载荷作用下的渐进损伤失效,但缺少对螺栓连接中螺栓的建模分析只是对孔进行了完全固定以达到螺栓模拟效果。

2.在仿真过程中只施加了单一方向上固定载荷拉伸量,缺少螺栓预紧力和垫片强度的影响。

3.有限元仿真过程中只观察研究了在拉伸载荷作用中胶层受拉破坏的情况以此来分析接头的破坏而忽略了螺栓接头的破坏如果考虑到这些因素并施以分析,结果将会变得更加贴近现实,更加具有实际的参考价值和科研价值。

## 参考文献

- [1] 曹跃杰, 魏凌峰, 张铭豪, 曹增强.薄层复合材料螺栓连接结构渐进失效机理研究[J/OL].航空学报:1-15[2021-11-25].
- [2] Cooper C, Turvey G J.Effects of joint geometry and bolt torque on the structural performance of single bolt tension joints in pultruded GRP sheet material[J]. Composite Structures, 1995, 32(1-4): 217-226.
- [3] 周松. 复合材料螺栓连接渐进损伤的实验及数值分析[D].哈尔滨工程大学, 2013.
- [4] 冯闯, 赵广慧.复合材料胶接接头力学性能的研究进展[J].中国塑料, 2021, 35(11): 144-160.
- [5] Shao Jintao, Zhou Wanlin, Li Peng, Qiu Xiaojin, Zhu Suwei. Stress analysis and experimental study of composite double-lap bonded structure [J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2020, 49 (04): 20-23.
- [6] 石坡坡. 碳纤维复合材料层合板胶螺混合连接接头损伤失效模拟分析[D].哈尔滨工程大学, 2020.
- [7] 刘礼平, 段科好, 徐卓, 冯振宇, 蔺越国, 郑亦媚, 宋肖肖. 碳纤维增强树脂基复合材料层合板胶螺混合连接失效机制[J/OL]. 复合材料学报:1-11[2022-05-04].
- [8] 赵东宇, 李滨耀, 余赋生, 丁彦滨.碳纤维长度及其分布对复合材料力学性能的影响[J].黑龙江大学自然科学学报, 1997(04):85-88.
- [9] 碳纤维热塑性复合材料研发成功[J].塑料科技, 2019, 47(02):85.
- [10] 董特. 连续碳纤维增强热塑性树脂基复合材料的制备及其激光连接技术研究[D].上海交通大学, 2018.
- [11] 耿正. 碳纤维增强热塑性树脂基复合材料与 6061-T6 铝合金的连接方法探究[D].上海交通大学, 2018.
- [12] Olmedo A, Santiuste C, Barbero E. An analytical model for predicting the stiffness and strength of pinned-joint composite laminates[J]. Composites Science and Technology, 2014, 90: 67-73.
- [13] 周松. 复合材料螺栓连接渐进损伤的实验及数值分析[D].哈尔滨工程大学, 2013.
- [14] 唐玉玲. 碳纤维复合材料连接结构的失效强度及主要影响因素分析[D].哈尔滨工业大学, 2015.
- [15] 梁祖典, 燕瑛, 张涛涛.复合材料单搭接胶接接头试验研究与数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(12):1786-1792.
- [16] 唐玉玲.碳纤维复合材料连接结构的失效强度及主要影响因素分析[D]. 哈尔滨:

哈尔滨工业大学，2015.

[17] 原文慧. 碳纤维层合板胶接增强技术与接头性能研究[D].天津工业大学，2020.

[18] 冯鹏. FRP 加固与增强金属结构的研究进展[C]. 中国力学学会结构工程专业委员会、中国力学学会《工程力学》编委会、新疆大学.第 22 届全国结构工程学术会议论文集第 I 册.中国力学学会结构工程专业委员会、中国力学学会《工程力学》编委会、新疆大学:中国力学学会工程力学编辑部，2013:65-84.

## 致 谢

光阴如梭，几度梦起，沉浮四载，昔日庸庸之才，幸得师长之不弃以成今日之大势。敦敦教诲，历历在目，而今即将别离心中怅然。

生，拜谢母校之学业指导，人生道路之引领。绿水环绕，轻柏拂面，绮丽风光可见，庄严校府，甚沁吾心。兢兢之学术氛围，专业之科研设备助吾求索之路久已。每逢佳节时常得到校府之温暖与鼓舞以励吾心。

感谢诸位老师在学业中对我得帮助，你们是我人生道路之起步阶段的灯塔，是我未来道路上的启明星。特别感谢张健老师对我的不懈教导，是您不惜朝暮言传身教，有错必纠，有识必教，教会了我如何在自己的事情上沉下心来一步一印，面对困难敢于进取，不断开拓。在我日益进取的路上少不了您的指点与帮助。而后我一定会向您一样坚毅，奋进。

感谢舍友殷硕峰四年来学业上的帮助以及生活上的关心，捧书之余，一起陶冶情操，强身健体，提升心智。感谢余沛哲，刘俊宏，唐加富，闫国鹏同学在课余时间，我们一起讨论，一起实践，一起锐意进取。感谢你们让我本内向的心如冬日里的暗室照进了一缕阳光。谢谢你们让我懂得了在人生道路上还有这样一种正直，善良，团结的生活。让我清楚的认识到了如何正视自己正视他人。

谢，此间良师，益友，为我一生之福。