



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

阶梯层数对 CF/PPS 复合材料焊接接头抗拉弯性能影响研究
**Study on the effect of the number of step layers on the tensile
bending properties of cf/pps composite welded joints**

姓 名 王荫宇

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 荆楠

职 称 讲 师

完成时间 2022年6月3日



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计

阶梯层数对 CF/PPS 复合材料焊接接头抗拉弯性能影响研究
**Study on the effect of the number of step layers on the tensile
bending properties of cf/pps composite welded joints**

姓 名 王荫宇

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造工程

指导教师 荆楠

职 称 讲师

完成时间 2022年6月3日

天津中德应用技术大学

本科生毕业设计（论文）选题申报表

学 院	航空航天学院		申 报 人	姓 名	王荫宇		
专 业	飞行器制造工程		技术职务	正高	副高	中级	
√							
题目名称	阶梯层数对 CF/PPS 复合材料焊接接头抗拉弯性能影响研究						
题目类型	自拟	题目来源	其他项目				
课题来源、背景及意义	<p>随着中国航空业的高速发展，复合材料已经被广泛应用于航空航天等工程中，碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS)复合材料在航空器结构上有着广泛的应用，CF/PPS 非常好的继承了 PPS 的热性能，因为其可熔融的特性，所以在焊接的高温环境下，能够很好的保证热稳定性所以本文选择了热塑性复合材料。近年来国内研究学者对热塑性复合材料的焊接工艺开展了许多实验，而他们使用的连接方式使用的是最简单的单搭接的连接方式，而在胶接实验当中阶梯式的连接方式有着更好的力学性能，而焊接是否也能有更强的力学性能，并且设置对照组来进行对比阶梯数的变化对力学性能的影响，对此我将展开研究。</p>						
任务及要求	<p>(1) 确定不同的阶梯层数设对照组，进行工件的打磨与焊接处理，对工件进行抗拉和抗弯性能测试并记录数据进行比较。</p> <p>(2) 利用 SolidWorks 软件建模，并进行力学分析。</p> <p>(3) 利用 ABAQUS 软件进行有限元分析。</p> <p>(4) 得出结果与实验记录比较并得出结论。</p>						
工作条件	SolidWorks 软件、ANSYS 软件、复合材料板。						
知识与能力要求	充分了解复合材料焊接的相关知识，熟练掌握 SolidWorks 软件和 ABAQUS 软件，并对复合材料板做出分析。						
系（教研室）审查意见：							
同 意							
负责人(签名)：张健							
2021 年 12 月 1 日							



天津中德应用技术大学

Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

毕业设计（论文）任务书

题 目：阶梯层数对 CF/PPS 复合材料焊接
接头抗拉弯性能影响研究

学 院： 航空航天学院

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 王荫宇

学 号： 18414020205

起止日期： 2021 年 12 月 3 日~2022 年 6 月 3 日

指导教师： 荆 楠

任务书下达日期：2021 年 12 月 3 日

任务书填写要求

1. 毕业设计（论文）任务书由指导教师根据各课题的具体情况填写，经专业负责人审查签字后生效。此任务书应在毕业设计（论文）开始前一周内填好并发给学生；
2. 任务书内填写的内容，必须和学生毕业设计（论文）完成的情况相一致；
3. 任务书内有关“学院”、“专业”等名称的填写，应写中文全称，不能写数字代码。学生的“学号”要写全号（如：16014010101）；
4. 有关年月日等日期的填写，应当按照国标 GB/T 7408—94《数据元和交换格式、信息交换、日期和时间表示法》规定的要求，一律用阿拉伯数字书写。如“2004 年 3 月 21 日”或“2004-03-21”。
5. 本毕业设计（论文）课题成果的要求，内容要具体化和数量化。如“毕业设计（论文）一套；A0 号装配图纸 1 张；A2 号电气控制原理图纸 2 张；实物样机 1 台；产品 2 件”等。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

随着中国航空业的高速发展，复合材料已经被广泛应用于航空航天等工程中，碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS)复合材料在航空器结构上有着广泛的应用，CF/PPS 非常好的继承了 PPS 的热性能，因为其可熔融的特性，所以在焊接的高温环境下，能够很好的保证热稳定性所以本文选择了热塑性复合材料。近年来国内研究学者对热塑性复合材料的焊接工艺开展了许多实验，而他们使用的连接方式使用的是最简单的单搭接的连接方式，而在胶接实验当中阶梯式的连接方式有着更好的力学性能，而焊接是否也能有更强的力学性能，并且设置对照组来进行对比阶梯数的变化对力学性能的影响，对此我将展开研究。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

- (1) 确定不同的阶梯层数设对照组，进行工件的打磨与焊接处理，对工件进行抗拉和抗弯性能测试并记录数据进行比较。
- (2) 利用 SolidWorks 软件建模，并进行力学分析。
- (3) 利用 ABAQUS 软件进行有限元分析。
- (4) 得出结果与实验记录比较并得出结论。

3. 毕业设计（论文）课题成果（包括毕业设计论文、图表、实物样品等）：

(1) 毕业设计论文一套

(2) 力学分析对比图一套

4. 推荐参考资料：

[1] 谢鸣九.主编.复合材料连接技术[M]上海交通大学出版社,2016.

[2] 罗伟豪. 碳纤维复合材料修复补强技术研究[D].湖南大学,2020.DOI:10.27135/d.cnki.ghudu.2020.001254.

[3] 曹双辉,高弄玥,刘斌.飞机复合材料阶梯式胶接结构的疲劳损伤与寿命[J].复合材料科学与工程,2020(02):81-84+96.

[4] 刘斌. 碳纤维/树脂基复合材料阶梯式胶接结构的拉伸、弯曲、冲击及疲劳问题[C]//2018年全国固体力学学术会议摘要集（上）.[出版者不详],2018:4.

[5] 余芬,郭拓,刘武帅,安伯宁,邓殿凯,何振鹏.复合材料层合板阶梯型胶接修补斜度有限元数值模拟研究[J].航空材料学报,2020,40(04):99-108.

[6] 王露晨,陆晓华,左洪福.基于力学解析的复合材料胶接修理技术[J].兵器装备工程学报,2020,41(10):178-182+202.

[7] 乔玉,周光明,刘伟先,陶伊凡.复合材料阶梯形胶接接头渐进损伤分析[J].南京航空航天大学学报,2014,46(04):632-637.DOI:10.16356/j.1005-2615.2014.04.003.

[8] 杨冠侠,杨涛,杜宇.三维编织复合材料胶接接头力学性能试验研究[J].玻璃钢/复合材料,2018(02):66-69+27.

[9] 路鹏程,李志歆,王志平,邱运朋.CF/PPS 复合材料层板电阻焊接研究[J].塑料工业,2021,49(01):60-64+88.

刘圣洋,姜文辉,李东辉.全复合材料通用飞机机翼胶接方式应力分析研究[J].科技创新导报,2013(23):71-72+74.DOI:10.16660/j.cnki.1674-098x.2013.23.053.

所在专业审查意见：

同意

负责人：张健

2022年12月3日

毕业设计（论文）任务书



天津中德应用技术大学
Tianjin Sino-German University of Applied Sciences

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目： 阶梯层数对 CF/PPS 复合材料焊
接接头抗拉弯性能影响研究

学 院： 航空航天大学

专 业： 飞行器制造工程

学生姓名： 王荫宇

学 号： 18414020205

起止日期： 2021 年 12 月 3 日~2022 年 6 月 3 日

指导教师： 荆 楠

开题日期： 2022 年 3 月 5 日

一、开题报告内容（课题的目的意义、与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势、课题主要研究内容、参考文献等）

（一）选题目的和意义

1、选题意义：

目前，国内外对层合复合材料斜面胶接修补进行了大量研究，而对复合材料焊接接修补及阶梯修补的研究很少。为了探究不同搭接形式接头的修复效果，本人打算研究复合材料阶梯型和焊接接头的力学性能，将不同阶梯层数的接头的拉伸强度和弯曲强度与完好试件进行比较，并对其实验数据进行有限元分析。

2、选题目的：

在诸多焊接方式中，电阻焊操作简单、加热时间短、效率高，因此作为此次焊接的方式。探究复合材料的阶梯层数的多少能够使焊接接头性能最好，对优化飞机性能有着至关重要的作用。所以本课题进行不同阶梯层数对复合材料焊接接头的性能影响的研究，选出最优配合。

（二）国内外研究现状及发展趋势

阶梯形搭接连接早已经成功应用于 F14、F15、F16、F18 的尾翼和 F18 的机翼。此后还有众多应用和发展。以碳纤维为代表的先进复合材料因其比强度高、比刚度高、抗疲劳性能优良和材料铺层可设计性等优异特性而成为改善产品性能的关键材料，并在航空航天飞行器结构中得到了广泛应用。目前，先进复合材料在飞机结构中的应用已经从次承力结构发展到机翼和机身等主承力结构，其用量业已成为衡量飞机先进性的重要标志之一。应用场合也由刚开始的不承力结构慢慢演变成为次承力结构和主承力结构，比如飞机舱门、安定面等结构中，随着共固化、整体成型等技术的广泛应用，零件和紧固件数目大大降低，剩余的部位传递的载荷更大，因此，复合材料结构的连接是不可避免的，此时连接结构就成为复合材料整体结构的关键部位。随着复合材料连接及修理结构对传力效率的提高，阶梯式的焊接结构也遇到挑战。而且阶梯形状有较好地工艺性在工程中容易接受。在民航飞机的制造和修理中，焊接技术已经成为主导工艺方法之一，焊接技术不仅能够减轻飞机的重量，还可以为飞机结构设计提供结构支持，促进飞机性能的提高。

（三）研究的主要内容

对阶梯型 CF/PPS 复合材料进行研究，得到不同阶梯个数接头拉伸强度的影响，做出实物进行实验，并通过三维有限元法验证实验结果。

（1）确定不同的阶梯层数设对照组，进行工件的打磨与焊接处理，对工件进行抗拉和抗弯性能测试并记录数据进行比较。

（2）利用 SolidWorks 软件建模，并开始进行力学分析。

（3）利用 ANSYS 软件进行有限元分析。



(4) 得出结果与实验记录比较并得出结论。

参考文献

- [1]谢鸣九. 主编. 复合材料连接技术[M]上海交通大学出版社, 2016.
- [2]罗伟豪. 碳纤维复合材料修复补强技术研究[D]. 湖南大学, 2020. DOI:10. 27135/d. cnki. ghudu. 2020. 001254.
- [3]曹双辉, 高弄玥, 刘斌. 飞机复合材料阶梯式胶接结构的疲劳损伤与寿命[J]. 复合材料科学与工程, 2020(02):81-84+96.
- [4]刘斌. 碳纤维/树脂基复合材料阶梯式胶接结构的拉伸、弯曲、冲击及疲劳问题[C]//2018年全国固体力学学术会议摘要集(上). [出版者不详], 2018:4.
- [5]余芬, 郭拓, 刘武帅, 安伯宁, 邓殿凯, 何振鹏. 复合材料层合板阶梯型胶接修补斜度有限元数值模拟研究[J]. 航空材料学报, 2020, 40(04):99-108.
- [6]王露晨, 陆晓华, 左洪福. 基于力学解析的复合材料胶接修理技术[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10):178-182+202.
- [7]乔玉, 周光明, 刘伟先, 陶伊凡. 复合材料阶梯形胶接接头渐进损伤分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(04):632-637. DOI:10. 16356/j. 1005-2615. 2014. 04. 003.
- [8]杨冠侠, 杨涛, 杜宇. 三维编织复合材料胶接接头力学性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(02):66-69+27.
- [9]路鹏程, 李志歆, 王志平, 邱运册. CF/PPS 复合材料层板电阻焊接研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(01):60-64+88.
- [10]刘圣洋, 姜文辉, 李东辉. 全复合材料通用飞机机翼胶接方式应力分析研究[J]. 科技创新导报, 2013(23):71-72+74. DOI:10. 16660/j. cnki. 1674-098x. 2013. 23. 053.
- [11]胶接及非金属材料的焊接[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 1996(03):42-43.
- [12]. 《焊接》入编 2020年版《中文核心期刊要目总览》[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2021, No. 296(06):10.

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021. 12. 3- 2021. 12. 15	查阅文献, 收集文献, 学习相关知识	查阅到相关资料, 并且掌握了部分知识
2021. 12. 16 -2022. 1. 29	对查阅的论文、文献进行分析, 详细的了解其内容并根据论文题目, 完成开题报告与任务书	完成开题报告与任务书
2022. 1. 30- 2022. 3. 1	根据收集到的知识来进行工件制作思路, 起草论文主题框架	确定工件加工工艺的数据

2022.3.2-2022.3.10	完成工件的第一步打磨，为下一步焊接做准备	尽量做到标准，方便焊接也使实验更加准确
2022.3.11-2022.3.20	完成工件的焊接，同时进行有限元分析的学习	完成焊接，能做一些简单的有限元分析
2022.3.21-2022.3.31	开始工件抗拉抗弯强度拉伸实验进行有限元分析	选出强度最高的，并且找到规律
2022.4.01-2022.5.18	撰写论文	完成论文
2022.5.19-2022.6.19	优化论文	完成论文的优化
完成课题的 现有条件	1.复合材料材料板。 2.熟练运用三维画图软件。 3.自主学习能力强能够快速学习力学分析软件。 4.拥有自我监督的能力。 5.有着明确的思路。	
指导教师 意见	同意开题 指导教师：  2022年3月5日	
开题答辩 小组意见	同意开题 组 长：  2022年3月5日	

天津中德应用技术大学
本科生毕业设计（论文）的声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或没有公开发表的作品内容。对本设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

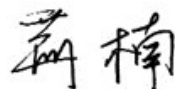
毕业设计（论文）作者签名：



2022年6月3日

本人声明：该毕业设计（论文）是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过设计（论文）的全部内容，并能够保证题目、关键词、摘要部分中英文内容的一致性和准确性。

毕业设计（论文）指导教师签名：



2022年6月3日

摘 要

碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料在航空器结构上有着广泛的应用, 碳纤维/聚苯硫醚 CF/PPS 复合材料非常好的继承了 PPS 的热性能, 熔点可达到 280℃, 变形温度可达到 260℃。在 200℃ 的高温下可以长期使用, 那再结合一些特殊的高温环氧树脂温度可以达到 350℃ 以上, 所以在一些高温环境下, 能够很好的保证热稳定性所以本文选择了热塑性复合材料; 同时热塑性复合材料也有着非常好的耐辐射、耐腐蚀的能力。因此, 热塑性复合材料随着工业技术的发展下越来越受到青睐。

本文以碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料为研究对象, 研究不同阶梯层数对焊接接头力学性能的影响规律。首先确定了阶梯形连接的接头连接形式, 并设置了 1、2、3 等阶梯数, 研究阶梯连接对接头连接力学性能的影响及不同阶梯数的影响规律; 使用电阻焊焊接工艺, 采用 CF/PPS 复合材料的混编织物作为电阻元件, 制备了 CF/PPS 复合材料层板电阻焊接接头; 对其进行拉伸、弯曲力学试验。再使用 ANSYS 软件进行受力分析对实体的实验结果进行验证; 通过拉伸、弯曲试验和 ANSYS 验证结果表明: 以碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料采用阶梯型焊接后的力学性能相比单搭连接有明显提升, 接头力学性能随阶梯数增加而增加提高, 阶梯层数越多, 材料能够承受的力会更大, 但是同时, 也会增加接头的加工难度。

关键词: 碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS); 热塑性复合材料; 电阻焊接; ANSYS; 受力分析

ABSTRACT

Carbon fiber/polyphenylene sulfide (CF/PPS) composites are widely used in aircraft structures. The CF/PPS composites inherit the thermal properties of PPS very well, with melting point up to 280°C and deformation temperature up to 260°C. In the high temperature of 200°C can be used for a long time, that combined with some special thermal high temperature epoxy resin temperature can reach more than 350°C, so in some high temperature environment, can very good to ensure the thermal stability, so this paper chooses thermoplastic composite materials; At the same time, thermoplastic composites also have very good radiation resistance and corrosion resistance. Therefore, thermoplastic composites are more and more popular with the development of industrial technology.

In this paper, carbon fiber/polyphenylene sulfide (CF/PPS) composites were taken as the research object to study the influence of different number of steps on the mechanical properties of welded joints. Firstly, the joint connection form of step connection is determined, and step number 1, 2 and 3 are set to study the influence of step connection on mechanical properties of joint and the influence rule of different step number. The CF/PPS composite laminate resistance welding joint was prepared by resistance welding process using CF/PPS composite composite fabric as resistance element. The tensile and bending mechanical tests were carried out. Then use ANSYS software for stress analysis to verify the experimental results of the entity; The results of tensile and bending tests and ANSYS verification show that: The mechanical properties of carbon fiber/polyphenylene sulfide (CF/PPS) composites with stepped welding are significantly improved compared with the single lap joint. The mechanical properties of the joints increase with the increase of the number of steps. The more the number of steps, the more the material can bear more force, but at the same time, it will increase the difficulty of joint processing.

Key words: carbon fiber/polyphenylene sulfide (CF/PPS); Thermoplastic composite materials; Resistance welding; ANSYS; Stress analysis

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	1
1.3 研究思路	1
第二章 阶梯型焊接接头的制备.....	2
2.1 试验板材的制备	2
2.2 焊接接头的选择	2
2.3 手工制备	3
2.4 气动装置制备	3
2.5 自动装置制备	4
2.6 焊接设备	6
2.7 本章小结	8
第三章 力学实验.....	9
3.1 实验设备	9
3.2 实验准备	9
3.3 实验开始	10
3.4 实验结果	10
3.5 本章小结	13
第四章 仿真力学分析.....	14
4.1 仿真思路	14
4.2 建模	14
4.3 有限元分析的准备	15
4.4 网格数量与节点数	17
4.5 拉伸	18
4.6 弯曲	21
4.7 本章小结	24
第五章 结论.....	25
参考文献.....	26
致谢.....	26

第一章 绪论

1.1 研究背景

CF/PPS 也就是碳纤维/聚苯硫醚，聚苯硫醚是一种热塑性树脂，通过大量的研究资料表明，热塑性的树脂一般都拥有较高耐热性，并且韧性会比热固性树脂高，如果应用在结构上这有利于提高结构的断裂韧性和抗冲击性。热塑性树脂可以再成型、再加工，可以快速自动化成型，而热固性树脂则不可以。以避免手工铺层、热压罐的消耗。目前，热固性复合材料是飞机结构上主要应用的高性能复合材料，但热固性树脂成本较高，使用完的废料不能够再次熔融进行二次利用所以不利于环保，工艺周期较长，结合这些因素影响了其在飞机上的广泛应用。而热塑性复合材料（Thermoplastic Composites）是指以短纤维或连续纤维增强热塑性树脂复合而成材料的统称（简称 FRTP）。由此可见，在现代航空器主流的结构材料中，热塑性复合材料已逐步取代热固性复合材料成为当今最具有潜力的高性能复合材料之一最具潜力的焊接方法主要有超声波焊接^[13]、感应焊^[14]、电阻焊^[15]和激光焊^[16]等

1.2 研究现状

阶梯形搭接连接早已经成功应用于 F14、F15、F16、F18 的尾翼和 F18 的机翼^[1]。相信阶梯式搭接连接在此后还有众多应用和发展。复合材料有着比强度高、比刚度高的优秀的特性，抗疲劳的性能也非常的好，材料铺层还可进行 DIY 设计性，这些优异的特性结合到一起成为改善产品性能的关键材料，并且在航空航天飞行器的结构中应用非常广泛。目前，由于复合材料的优异性，先进的复合材料在飞机结构中的应用已经从次承力结构快速发展应用到机翼和机身等主承力结构，复合材料的使用将会越来越多，越来越普遍，其用量也已成为衡量飞机先进性的主要标志之一^[1]。

1.3 研究思路

经研究发现焊接接头大多数是使用单搭的方法来进行连接，本文将单搭改进为阶梯式搭接，相对于单搭，阶梯式搭接能在满足 X 轴的接触面积基础上增加 Z 轴的接触面积，以增加更多的接触面积来验证是否能够拥有更好的力学性能提升连接强度由此进行研究。本文准备在接头搭接长度相同的情况下设置不同的对照组，得到不同阶梯层数接头焊接完对拉伸强度的影响，进行工件的打磨与焊接处理，做出实物进行实验，并通过三维有限元分析验证实验结果。

第二章 阶梯型焊接接头的制备

2.1 试验板材的制备

AS43K5HSCF/PPS 复合材料混编织物的混编方式如图 2-1 所示, PPS 树脂薄膜由日本东丽公司提供, PPS 树脂膜厚度为 $50\mu\text{m}$ 。最终成型的尺寸为 $100\text{mm}\times 25\text{mm}\times 1.8\text{mm}$ 如图 2-2 所示^[5]。碳纤维/聚苯硫醚(CF/PPS)复合材料层压板是利用加拿大 Barrday 公司提供的 AS43K5HSCF 织物/PPS 树脂预浸料在 XLB-660.660.3 型平板硫化机上热压成型; 热压工艺为: 温度为 $320^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 30min, 压力为 2MPa, 冷却速率为 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 压制过程排气两次; 试板铺层结构为 $[0]_8$, 试板厚度为 2mm, CF 体积分数约为 54vol%^[5]。

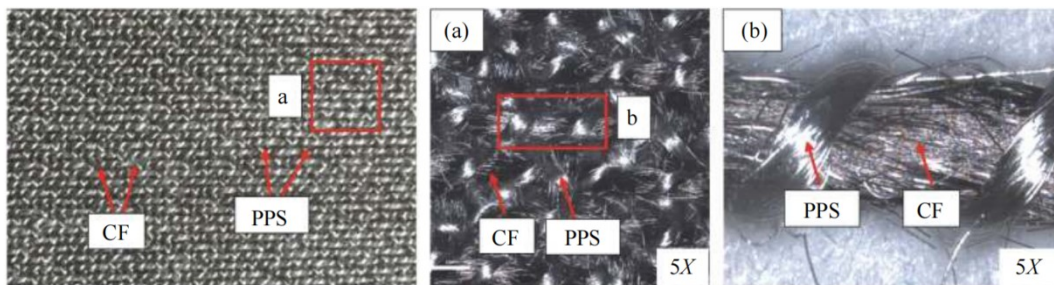


图 2-1 CF/PPS 复合材料混编织物



图 2-2 碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料板材

2.2 焊接接头的选择

复合材料的连接接头类型有很多种类, 现举例四种不同的接头类型, 其有着各不相同的特点, 具体如下:

- (1) 单搭接: 使用次数最多, 在所有搭接形式中最简单, 但容易失效, 强

度不稳定。

(2) 双搭接：在单搭接的基础上，增加一层复合材料板进行搭接，有效的增强了其抗剪切力的强度。

(3) 阶梯连接：更为精细的一种连接形式，可内嵌使板材受力在同一条直线上，增强了其抗拉弯的性能。

(4) 斜坡连接：与阶梯连接类似，使板材受力在同一条直线上，可增强板材的抗拉弯性能，且工艺上更简单方便，易处理。

本次实验选用阶梯式的接头类型，采用的板材尺寸如下表 2-1 所示（单位：mm）。

表 2-1 复合材料板打磨尺寸

	阶梯层数	长度	宽度	厚度	搭接长度	阶梯高度
A	1	100	25	1.8	24	0.9
B	2	100	25	1.8	24	0.6
C	3	100	25	1.8	24	0.45

2.3 手工制备

确定好尺寸后在 CF/PPS 复合材料板两测用笔画线，方便后续打磨加工过程中的精度把控，然后使用虎头钳固定好复合材料板材，使用平锉开始打磨。后再使用砂纸打磨，在打磨过程中发现几个问题：

- (1) 手工制备无法精确控制尺寸，容易将复合材料板材打磨报废。
- (2) 打磨过程中发现容易将碳纤维打磨错位。
- (3) 打磨过程中由于没有设备将碎屑吸出，经常打磨出一些碎屑进行干扰。
- (4) 此方法由于干扰问题过多并且打磨后尺寸不精确，所以改用其他方法。

2.4 气动装置制备

在吸收了 2.3 失败的经验下我将使用气动打磨风钻（如图 2-3）以及复合材料打磨台（如图 2-4）进行打磨。同样，在 CF/PPS 复合材料板两测用笔画线，方便后续打磨加工过程中的精度把控。然后进行打磨加工过程，初始打磨工具为打磨风钻，在复合材料打磨台里进行连接打磨，打磨过程中要注意打开复合材料打磨台的排风装置，以防止复合材料碎屑飞出。打磨时一只手通过一个玻璃孔手持复合材料板，另外一只手通过另外一个孔使用气动打磨风钻打磨复合材料板。注：由于使用的设备是自动设备所以使用时一定要做好防护，带上口罩，手套等，使用过程中也要小心不要伤害到手。



图 2-3 气动打磨风钻



图 2-4 复合材料打磨台

在打磨过程中还是发现了一些问题：

- (1) 由于打磨时是手持复合材料板以及气动打磨风钻，没有固定设备，所以打磨时不稳定，经常晃动，导致打磨面不平整。
- (2) 还是无法精确把握好尺寸，容易将复合材料板材打磨报废。
- (3) 打磨时由于打磨风钻转速过高，复合材料板摩擦生热形成高温，导致材料温度过高而变形。

此方法由于干扰问题过多并且打磨后尺寸不精确，所以改用其他方法。

2.5 自动装置制备

在吸取了 2.3 和 2.4 的经验后，我将使用数控机床进行机械加工车铣。此次使用的设备是 CNC 数控机床（如图 2-5 所示），使用机械加工的工艺方法，首先使用电脑在软件上建模，选定车铣的地方确定车铣尺寸，编好程序设置三轴，主轴正转，转速：6000/s。（如图 2-8 所示）等待加工；然后将制备好的板材横向放在加工台上，使用双面胶固定住板材（如图 2-6 所示），此次采用的刀具为硬度非常高的钨钢铣刀（如图 2-7 所示）；最后加工完成（如图 2-9）。



图 2-5 CNC 数控机床



图 2-6 使用胶带固定复合材料板



图 2-7 钨钢铣刀

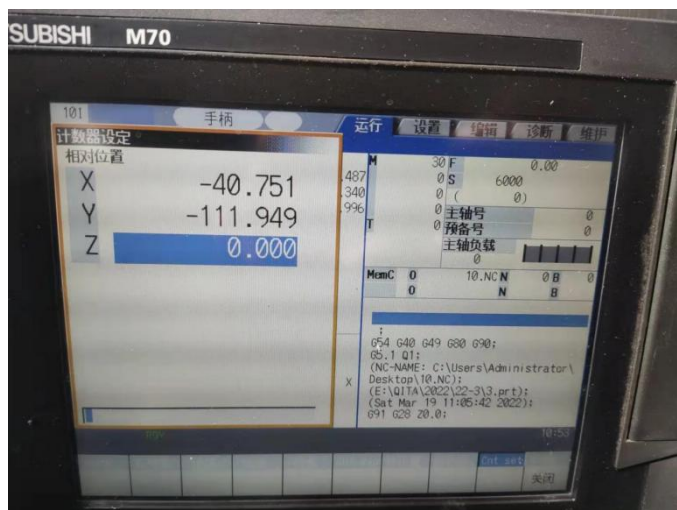


图 2-8 转速 6000/s

下图为 CNC 数控机床机械加工后的复合材料板材如图 2-9。

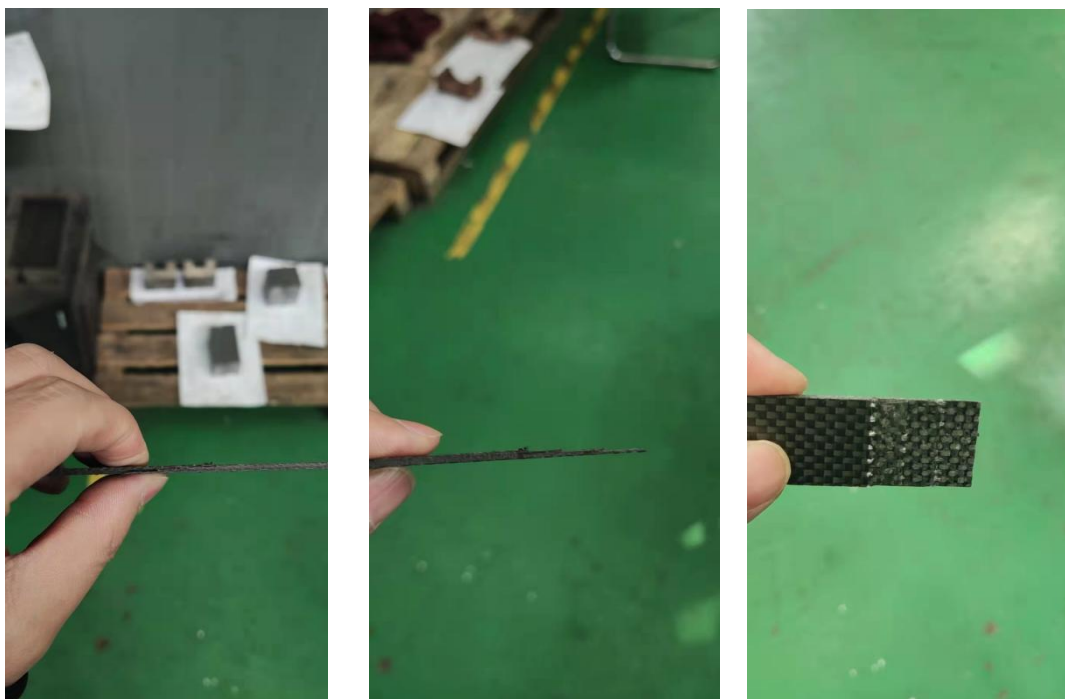


图 2-9 机械加工后的复合材料板材

2.6 焊接设备

本文使用的焊接设备是中国民航大学自主研制的复合材料焊接设备 (CAUC-CW100)^[5], 图 2-10 所示, 此设备可以进行直流电、交流电和脉冲电流等电载荷施加^[8], 使用的是伺服电子在压力缸里进行多段的恒位移或压力压装控制, 数据采集器可进行焊接件的焊接接头温度、压力和位移变化的信息实时采集等功能^[3]。电阻焊接: 利用 CF 电热特性, 在试样的焊接表面放置 CF 混编织物, 并在焊接件上下焊接表面放置 PPS 树脂薄膜, CF 在电热作用时产生焦耳热, 熔融被焊接的焊接表面及 PPS 树脂薄膜, 并在压力作用下形成焊接接头。在焊

缝中间布置 K 型伯劳焊点热电偶，对焊缝温度检测^[12]。

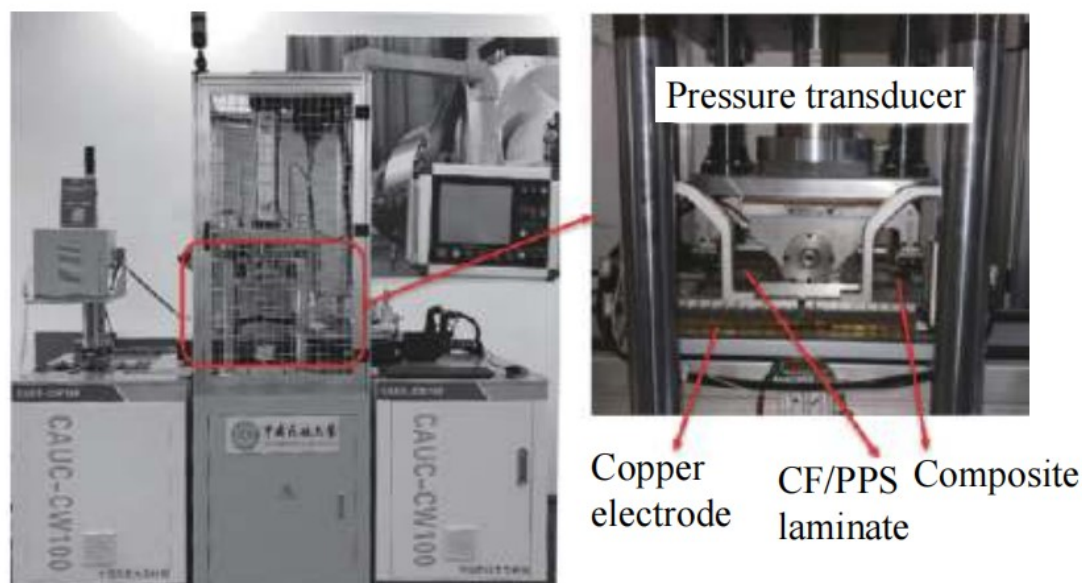


图 2-10 热塑性树脂基复合材料焊接设备

经研究：

(1) 焊接温度是影响 CF/PPS 焊接接头质量和性能的显著因素^[12]。焊接温度从 360℃ 升至 390℃ 时，接头内树脂熔融越来越充分，其剪切强度随之上升，当焊接温度为 390℃ 时，接头的剪切强度达到最高值，其接头质量也为最佳。当焊接温度超过 390℃ 时，接头内树脂开始出现热降解现象，温度越高热降解现象越严重，导致其剪切强度大幅下降。所以焊接温度选择 390℃。

(2) 焊接压力对 CF/PPS 焊接接头质量和性能同样有着重要影响。焊接压力从 0.4MPa 升至 0.6MPa 时，接头内熔融树脂的流动性越来越好，对碳纤维织物的浸润程度越来越高，接头剪切强度不断上升，焊接压力为 0.6MPa 时，焊接接头具有最佳的质量和性能。当焊接压力从 0.6MPa 到 0.8MPa 时，接头边缘树脂被挤压溢出，致使焊接区树脂含量降低，导致其剪切强度随焊接压力的升高而下降。所以焊接压力选择 0.6MPa。

(3) 焊接冷却速率是影响 CF/PPS 焊接接头力学性能的因素之一。焊接冷却速率从 5℃/min 增加到 20℃/min，接头内较大晶体逐渐减少，其剪切强度随之上升，当焊接冷却速率为 20℃/min 时，接头的剪切强度达到峰值；焊接冷却速率超过 20℃/min 时，接头的结晶度较小，导致其剪切强度下降。所以冷却速率选择 20℃/min。

表 2-2 最佳焊接参数

焊接温度 (°C)	焊接压力 (MPa)	冷却速度 (°C/min)
390	0.6	20

完成焊接后得到三组不同阶梯层数连接的复合材料层合板材，如图 2-11 所示。



图 2-11 三组不同阶梯层数连接的复合材料板材

2.7 本章小结

完成了碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料板材的制作、打磨、焊接。最开始使用热压成型的方法制作了复合材料板件，然后介绍了各种配合接头的特点，确定了对照组的尺寸数据；在打磨时遇到了许多的麻烦，但是及时吸取了失败的经验，快速的找到了另外更好的方法；打磨完成后开始焊接，采用的设备是中国民航大学自主研发的复合材料焊接设备，找到最佳的焊接温度，压力，冷却速度，最后完成焊接，为后续拉伸，弯曲实验做好了准备。

第三章 力学实验

3.1 实验设备

本文力学实验所使用的设备是微机控制电子万能试验机，设备型号：WDW-030。设备如图 3-1 所示，将使用此台机器对上文所制作的复合材料板材进行拉伸试验。



图 3-1 微机控制电子万能试验机

拉伸试验是指在承受轴向拉伸载荷下测定材料特性的试验方法。利用拉伸试验得到的数据可以确定材料的弹性极限、伸长率、弹性模量、比例极限、面积缩减量、拉伸强度、屈服点、屈服强度和其它拉伸性能指标。从高温下进行的拉伸试验可以得到蠕变数据。

3.2 实验准备

在拉伸实验前需要做一些准备工作：

(1) 首先对所有要进行拉伸实验的复合材料板（三组）的外观进行检查，观察是否保存完整，没有磨损。

(2) 由于复合材料板表面光滑，所以我们需要在进行拉伸实验前对复合材料板的端头进行预处理，即使用砂纸对端头进行略微的打磨，活化，使其表面粗

糙一些，但不能损伤纤维，防止拉伸过程中出现夹持不严、端头滑移的情况出现。

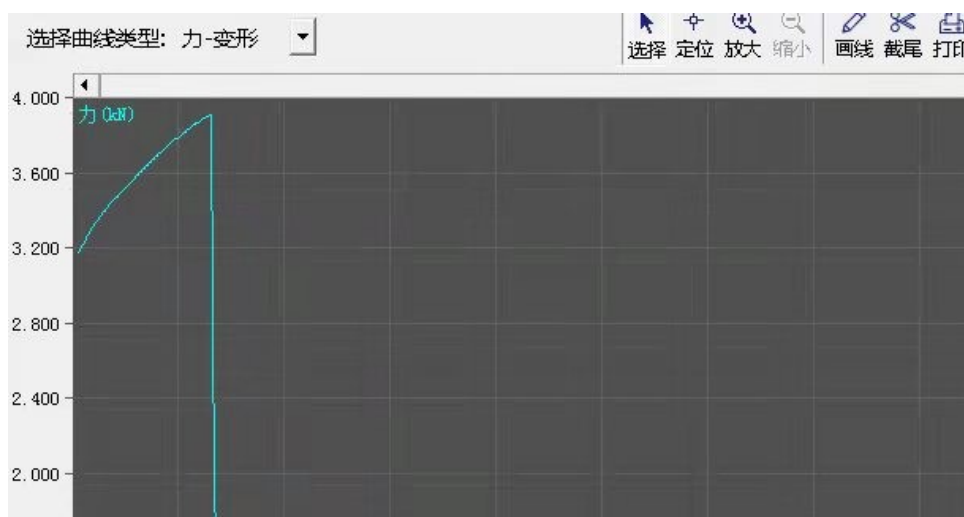
3.3 实验开始

将不同阶梯数连接的复合材料层合板按照层数为一层，二层，三层的顺序依次夹持，夹持过程中复合材料板的中心线与上、下两个夹头的中心线保持一致。

在夹持住复合材料层合板后进行预加载，施加载荷大小约为计算破坏载荷的 5%左右，保证试件和装置处于正常工作状态。

3.4 实验结果

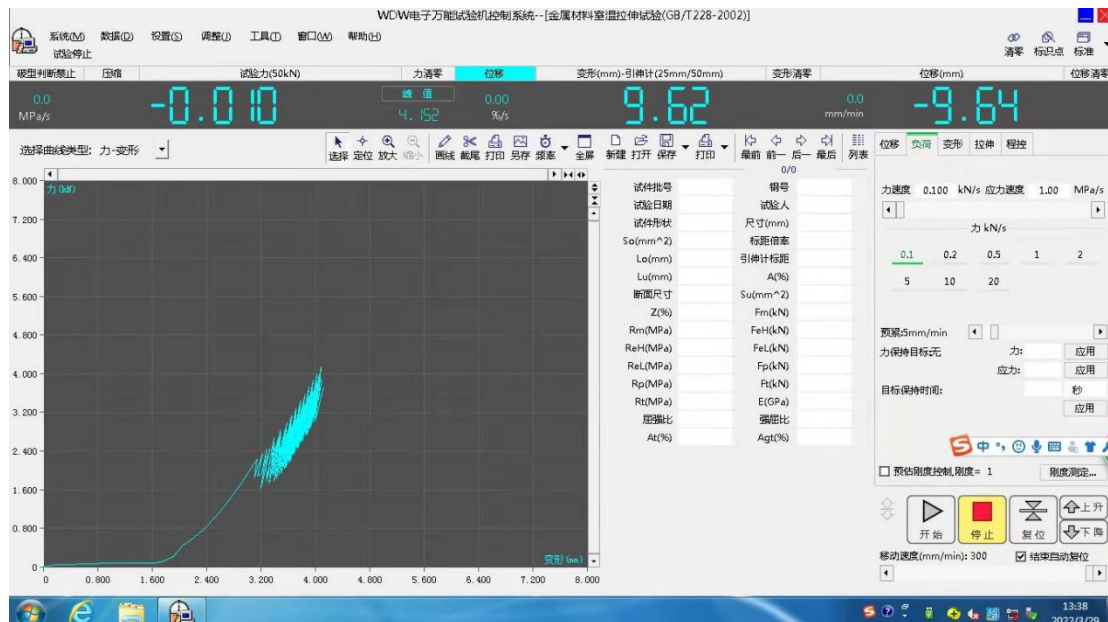
加载试件的阶梯层数分别为：（A）一层阶梯（如下图 3-2）；（B）两层阶梯（如下图 3-3）；（C）三层阶梯（如下图 3-4）记录好相应的试验数据。结果如下表 3-1 所示。三组不同阶梯层数连接的复合材料层合板拉伸实验图表数据如下图所示。



	A	B	C	D	E	F	G	H
100	时间(秒)	力(kN)	变形(mm)	位移(mm)	扩展	应力(MPa)	应变(%)	
101	6.873000145	3.817199945	0.107000001	131.0912933	3.817199945	38.17200089	0.214000002	
102	6.973999977	3.825200081	0.108000003	131.0895996	3.825200081	38.2519989	0.216000006	
103	7.073999882	3.832799911	0.109999999	131.0877991	3.832799911	38.32799911	0.219999999	
104	7.172999859	3.840800047	0.112000003	131.085907	3.840800047	38.40800095	0.224000007	
105	7.274000168	3.847599983	0.114	131.084198	3.847599983	38.47600174	0.228	
106	7.373000145	3.855200052	0.115999997	131.0823059	3.855200052	38.55199814	0.231999993	
107	7.473000005	3.862400055	0.116999999	131.0805969	3.862400055	38.62400055	0.233999997	
108	7.572999954	3.869199991	0.119000003	131.078598	3.869199991	38.69200134	0.238000005	
109	7.672999859	3.876800006	0.120999999	131.0767059	3.876800006	38.76800156	0.241999999	
110	7.772999763	3.883199993	0.123000003	131.074707	3.883199993	38.83200073	0.246000007	
111	7.872000217	3.889600039	0.125	131.0726929	3.889600039	38.89599991	0.25	
112	7.973000005	3.895200014	0.127000004	131.0708008	3.895200014	38.95199966	0.254000008	
113	8.072999954	3.900399923	0.128999993	131.0686951	3.900399923	39.00400162	0.257999986	
114	8.171999931	3.904799938	0.130999997	131.0666046	3.904799938	39.04800034	0.261999995	
115	8.272999763	1.867599964	0.135000005	131.0628052	1.867599964	18.67600006	0.270000011	
116	8.371999741	0.0004	0.152999997	131.0453033	0.0004	0.004	0.305999994	
117	8.472000122	0.0012	0.179000005	131.0189056	0.0012	0.012	0.358000001	
118	8.571999955	0	0.206	130.991806	0	0	0.412	
119	8.671999921	0	0.222000007	130.9628077	0	0	0.467000005	

图 3-2 一层阶梯实验结果

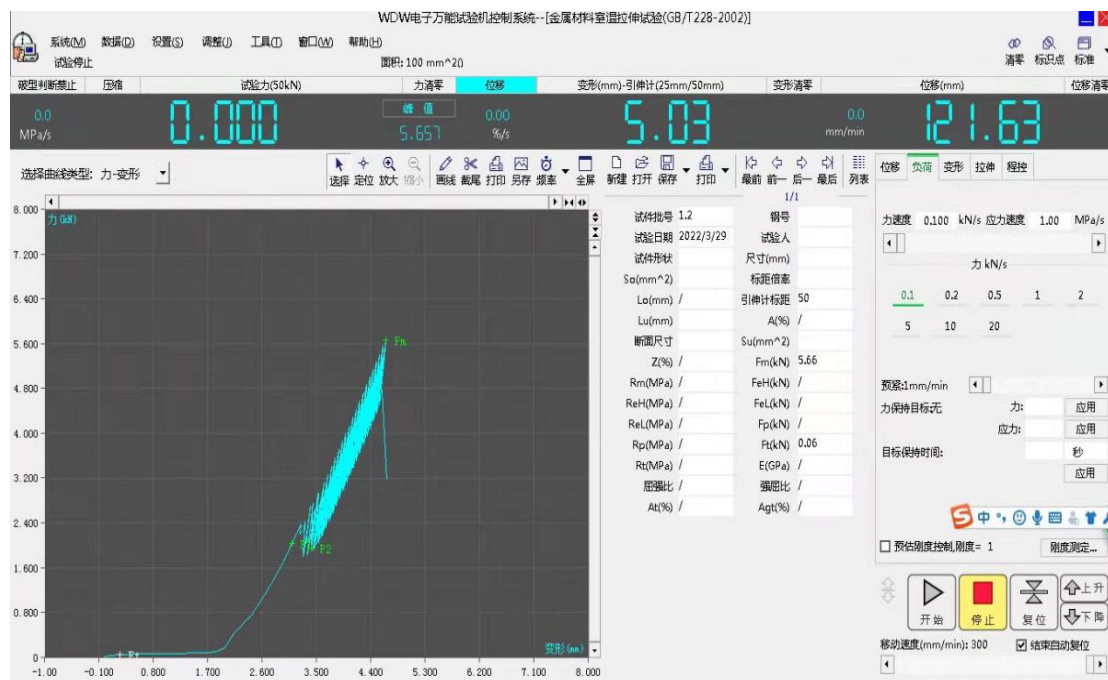
分析：A. 拉伸试验的持续时间只有 10.5699 秒，而且没有产生形变幅度，在 8.172 秒时拉伸载荷达到 3904N 复合材料组合板直接被拉断了，应力也是在那一瞬间从 39.048MPa 下降到 18.676MPa，然后马上到 0MPa，最终计算出来的应变百分比为 0.012%和 0.262%。



270	23.756	2.896	3.913	-3.927	2.896	28.96	7.826	
271	时间(秒)	力(kN)	变形(mm)	位移(mm)	扩展	应力(MPa)	应变(%)	
272	23.956	3.1316	3.901	-3.9156	3.1316	31.316	7.802	
273	24.055	3.1184	3.952	-3.9668	3.1184	31.184	7.904	
274	24.156	4.0052	4.023	-4.037	4.0052	40.052	8.046	
275	24.256	2.95	3.899	-3.9133	2.95	29.5	7.798	
276	24.355	3.422	3.997	-4.0112	3.422	34.22	7.994	
277	24.456	3.9228	4.012	-4.026	3.9228	39.228	8.024	
278	24.555	2.8536	3.909	-3.9234	2.8536	28.536	7.818	
279	24.655	3.714	4.036	-4.0505	3.714	37.14	8.072	
280	24.755	3.7484	3.994	-4.0079	3.7484	37.484	7.988	
281	24.855	2.8884	3.934	-3.9484	2.8884	28.884	7.868	
282	24.955	3.9656	4.065	-4.0791	3.9656	39.656	8.13	
283	25.054	3.51	3.974	-3.9883	3.51	35.1	7.948	
284	25.155	3.0388	3.971	-3.9856	3.0388	30.388	7.942	
285	25.255	4.1164	4.08	-4.0948	4.1164	41.164	8.16	
286	25.354	3.27	3.962	-3.9759	3.27	32.7	7.924	
287	25.455	3.2656	4.013	-4.0276	3.2656	32.656	8.026	
288	25.554	4.152	4.084	-4.0981	4.152	41.52	8.168	
289	25.654	3.0932	3.961	-3.975	3.0932	30.932	7.922	
290	25.755	3.5704	4.059	-4.0731	3.5704	35.704	8.118	
291	25.854	4.0712	4.072	-4.0868	4.0712	40.712	8.144	
292	25.954	2.9968	3.969	-3.9836	2.9968	29.968	7.938	
293	26.053	3.8528	4.096	-4.1099	3.8528	38.528	8.192	

图 3-3 两层阶梯实验结果

分析：B. 拉伸试验的时间持续了 26.3530 秒，其形变幅度从第 0.07999 秒所对应的 0.008 毫米一直变为第 25.254999 秒的-4.0947 毫米，测得的应力分别为 0.0320MPa 及 4.1163MPa，最终计算出来的应变百分比分别为 0.0160%与 8.1599%，达到的力峰值为 4.152KN。



818	时间(秒)	力(kN)	变形(mm)	位移(mm)	扩展	应力(MPa)	应变(%)
819	78.603	4.36	4.488	122.1686	4.36	43.6	8.976
820	78.703	5.514	4.601	122.056	5.514	55.14	9.202
821	78.803	4.6604	4.483	122.1739	4.6604	46.604	8.966
822	78.903	4.6032	4.53	122.1267	4.6032	46.032	9.06
823	79.004	5.5608	4.603	122.0537	5.5608	55.608	9.206
824	79.102	4.4552	4.479	122.1785	4.4552	44.552	8.958
825	79.203	4.9096	4.574	122.0833	4.9096	49.096	9.148
826	79.303	5.478	4.593	122.0642	5.478	54.78	9.186
827	79.402	4.3492	4.489	122.1679	4.3492	43.492	8.978
828	79.502	5.2388	4.615	122.0421	5.2388	52.388	9.23
829	79.602	5.2876	4.574	122.0828	5.2876	52.876	9.148
830	79.702	4.3784	4.514	122.1429	4.3784	43.784	9.028
831	79.802	5.5096	4.645	122.0122	5.5096	55.096	9.29
832	79.902	5.0356	4.554	122.1032	5.0356	50.356	9.108
833	80.002	4.5112	4.549	122.1084	4.5112	45.112	9.098
834	80.101	5.6572	4.659	121.9983	5.6572	56.572	9.318
835	80.202	4.7892	4.541	122.1162	4.7892	47.892	9.082
836	80.302	4.7692	4.592	122.0653	4.7692	47.692	9.184
837	80.401	3.1672	4.664	121.9934	3.1672	31.672	9.328

图 3-4 三层阶梯实验结果

分析：C. 拉伸试验时间持续到 80.4010 秒，其形变幅度从第 0.07999 秒所对应的 0 毫米一直变为第 80.1009 秒的 5.6571 毫米，测得的应力分别为 0MPa 及

5.6571MPa，最终计算出来的应变百分比分别为-0.002%与 9.317999%，达到的力峰值为 5.657KN。

表 3-1 拉伸实验结果

	拉伸时间 (s)	极限载荷 (KN)
A	10.5699	3.904
B	26.3530	4.152
C	80.4010	5.657

通过三组试验对比，很显然 A 一个阶梯的复合材料组合板都没有产生形变幅度直接拉断，B 两个阶梯的复合材料组合板产生了形变幅度最终最高达到了 4.152KN 比 A 一个阶梯的复合材料组合板好一点，C 三个阶梯的复合材料组合板光看持续时间就可以看出来性能非常好，远超另外两组，最终最高载荷达到 5.657KN。可以得出最终的结论，CF/PPS 复合材料层合板连接的阶梯层数越多，实际上可达到的抗拉伸性能越好。

3.5 本章小结

针对不同阶梯层数连接的复合材料层合板，使用拉伸设备对其依次进行拉伸实验，最后得出使其断裂的极限载荷与加载时间，经过对比可得出，不同阶梯层数连接的复合材料层合板，阶梯层数越大，加载时间越大，极限载荷越大，抗拉伸的性能越好。由于复合材料板材短缺本次试验只做拉伸试验，抗弯试验在有限元分析章节进行。

第四章 仿真力学分析

4.1 仿真思路

本文为了对之前试验的数据进行验证，所以使用有限元分析软件进行分析，此次使用有限元分析软件是 ANSYS，将使用此软件对复合材料板进行模拟拉伸、弯曲实验。首先使用 soildworks 软件进行建模、装配后导入 ANSYS 中再设置参数，使用控制变量法来验证实物实验的实验结果是否正确。

4.2 建模

本文使用的建模软件是 SolidWorks。先使用 Soildworks 建模装配再使用 ANSYS 软件进行有限元分析。

表 4-1 复合材料板建模尺寸

	阶梯层数	长度	宽度	厚度	搭接长度	阶梯高度
A	1	100	25	1.8	24	0.9
B	2	100	25	1.8	24	0.6
C	3	100	25	1.8	24	0.45

阶梯高度是根据阶梯数平均分而得的，即保证每层阶梯高度长度一样。

1. 一层阶梯

建模过程：根据建模尺寸，使用 soildworks 画出两个一层阶梯数的板材模型，再将两个模型进行装配（如图 4-1 所示），以及细节图（如图 4-2 所示）。

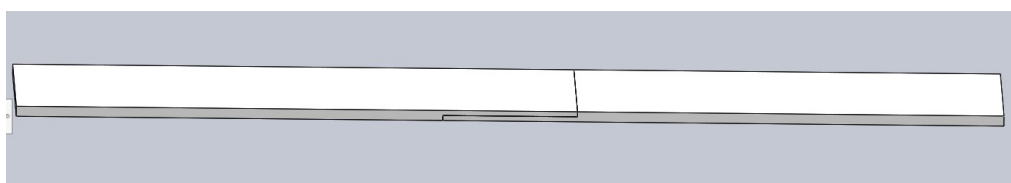


图 4-1 阶梯层数为一层装配图

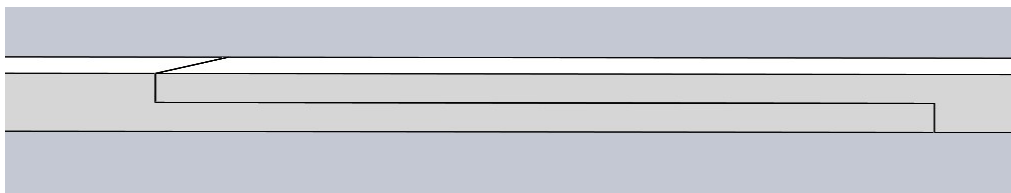


图 4-2 阶梯层数为一层装配细节图

2. 二层阶梯

建模过程：根据建模尺寸，使用 soildworks 画出两个二层阶梯数的板材模型，再将两个模型进行装配（如图 4-3 所示），以及细节图（如图 4-4 所示）。

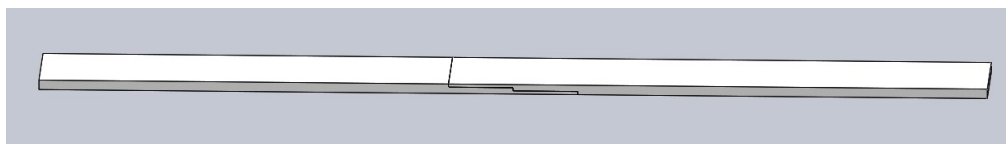


图 4-3 阶梯层数为二层装配图

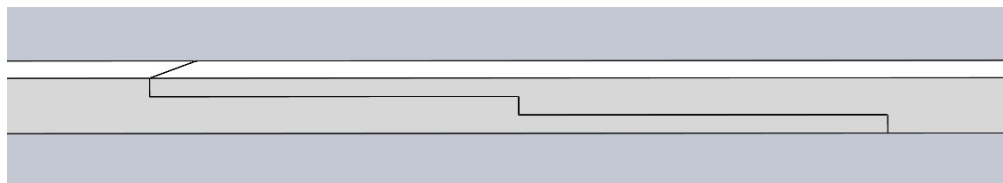


图 4-4 阶梯层数为二层装配细节图

3. 三层阶梯

建模过程: 根据建模尺寸, 使用 soildworks 画出两个三层阶梯数的板材模型, 再将两个模型进行装配 (如图 4-5 所示), 以及细节图 (如图 4-6 所示)。

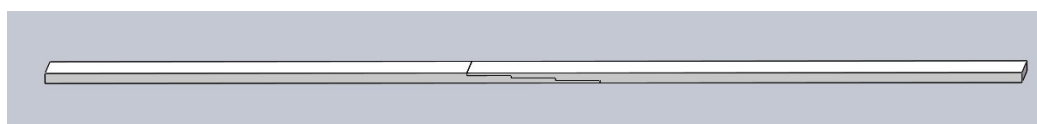


图 4-5 阶梯层数为三层装配图

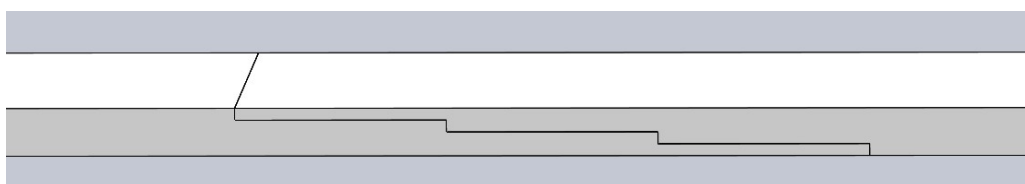


图 4-6 阶梯层数为三层装配细节图

4.3 有限元分析的准备

1. 在 ANSYS Workbench 中新建项目, 建立静力学分析模块:
2. 设置材料属性—CF/PPS
3. 导入模型
4. 采用自动化六面体网格划分算法进行网格划分 (如图 4-7, 4-8, 4-9 所示)

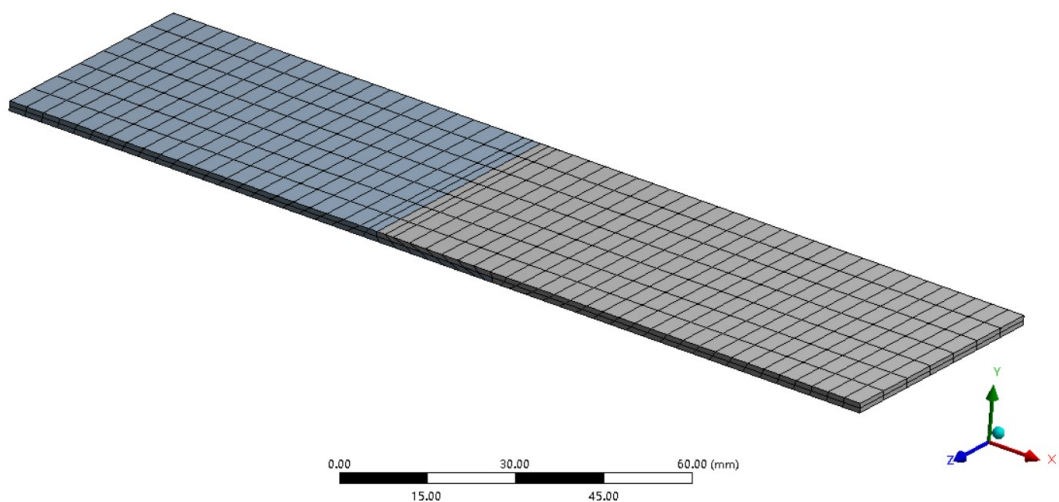


图 4-7 一层阶梯复合材料组合板网格划分

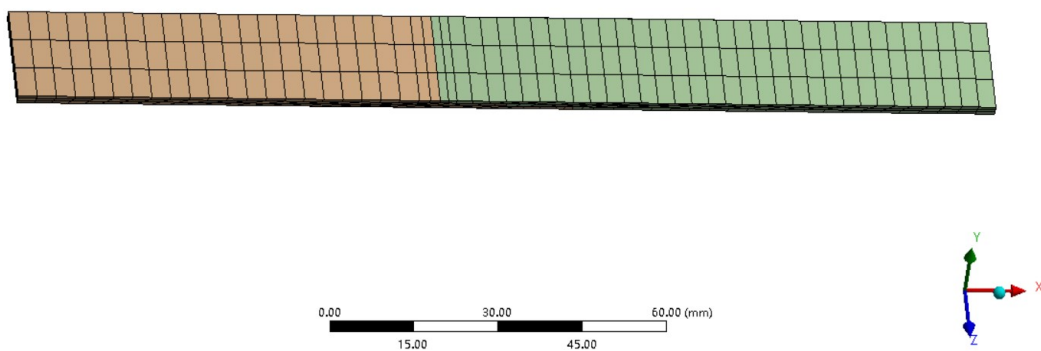


图 4-8 二层阶梯复合材料组合板网格划分

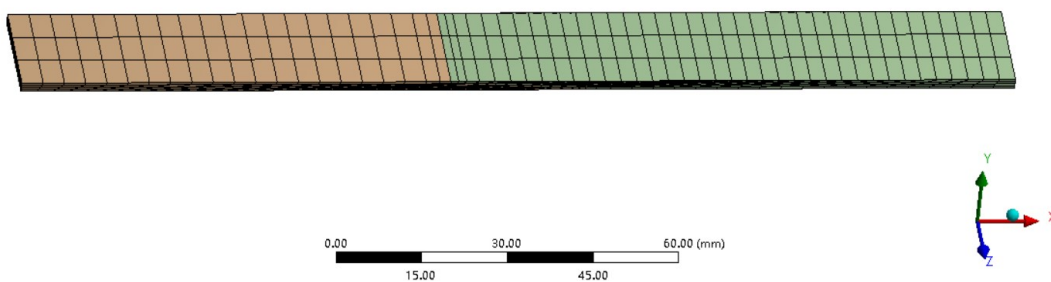
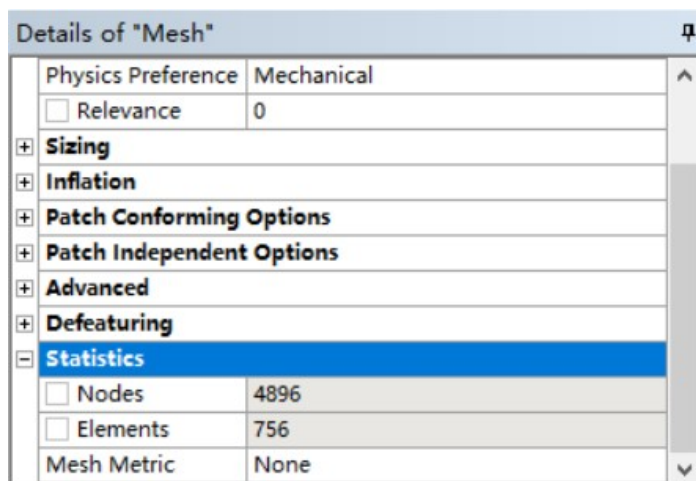


图 4-9 三层阶梯复合材料组合板网格划分

4.4 网格数量与节点数

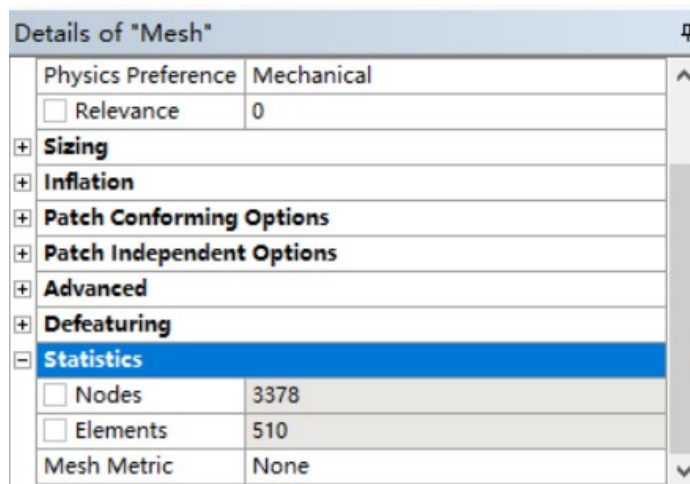
一层：如图 4-10 所示



Details of "Mesh"	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	4896
<input type="checkbox"/> Elements	756
Mesh Metric	None

图 4-10

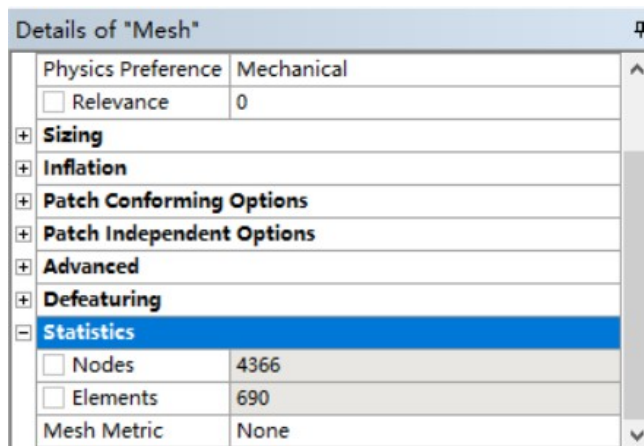
二层：如图 4-11 所示



Details of "Mesh"	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	3378
<input type="checkbox"/> Elements	510
Mesh Metric	None

图 4-11

三层：如图 4-12 所示



Details of "Mesh"	
Physics Preference	Mechanical
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Inflation	
Patch Conforming Options	
Patch Independent Options	
Advanced	
Defeaturing	
Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	4366
<input type="checkbox"/> Elements	690
Mesh Metric	None

图 4-12

4.5 拉伸

拉伸时是给予两端同时向外的载荷（如图 4-13 所示）

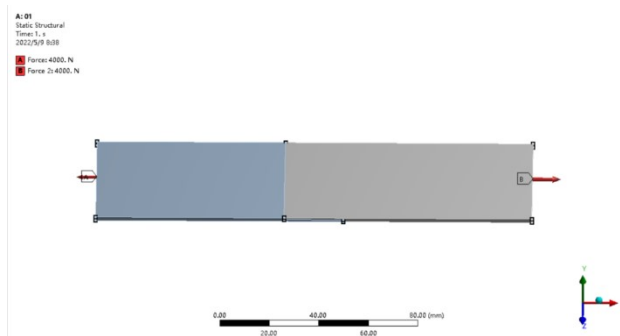


图 4-13 加载时的载荷方向

1. 一层阶梯复合材料组合板的拉伸

拉伸实验是将载荷、加载时间统一，来观察不同层数板材变形的位移结果。载荷是 4KN，加载时间为 1s。下图 4-14、4-15、4-16 为静力学分析图。

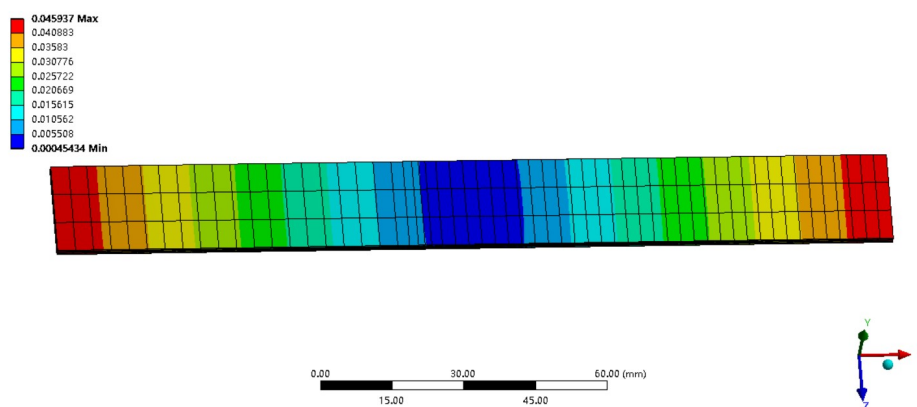


图 4-14 等效位移云图

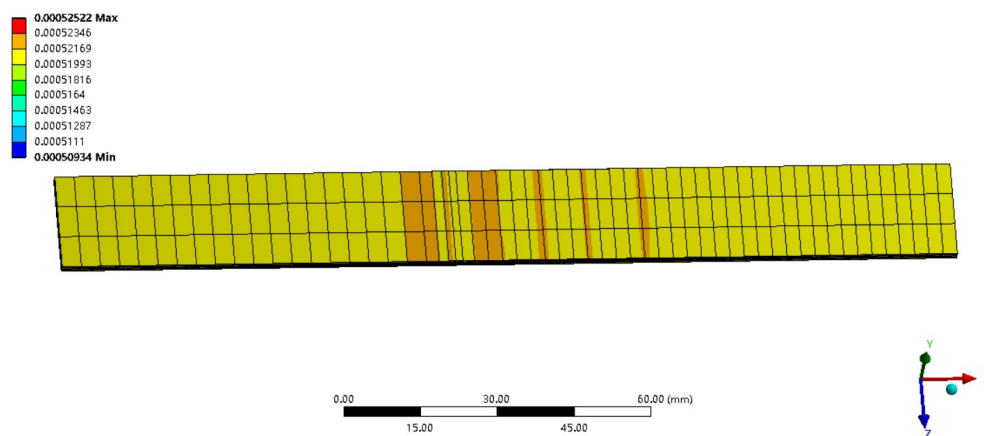


图 4-15 等效应变云图

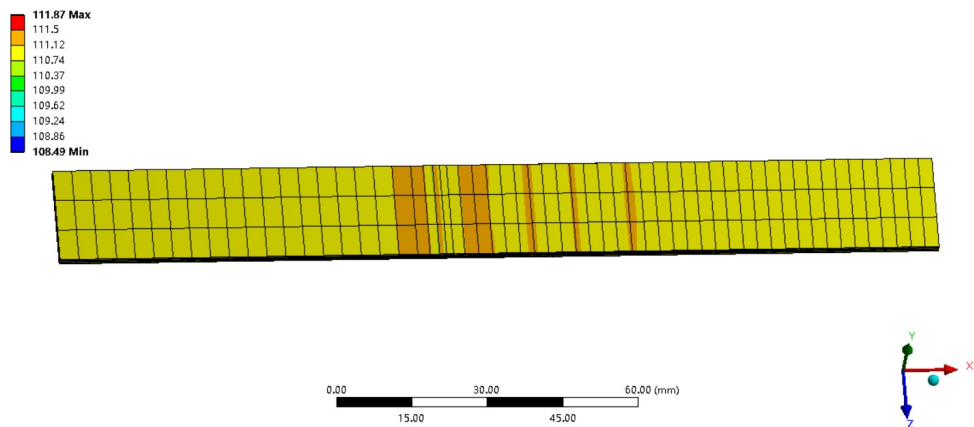


图 4-16 等效应力云图

2. 二层阶梯复合材料组合板的拉伸

载荷是 4KN，加载时间为 1s。

下图 4-17、4-18、4-19 为静力学分析图。

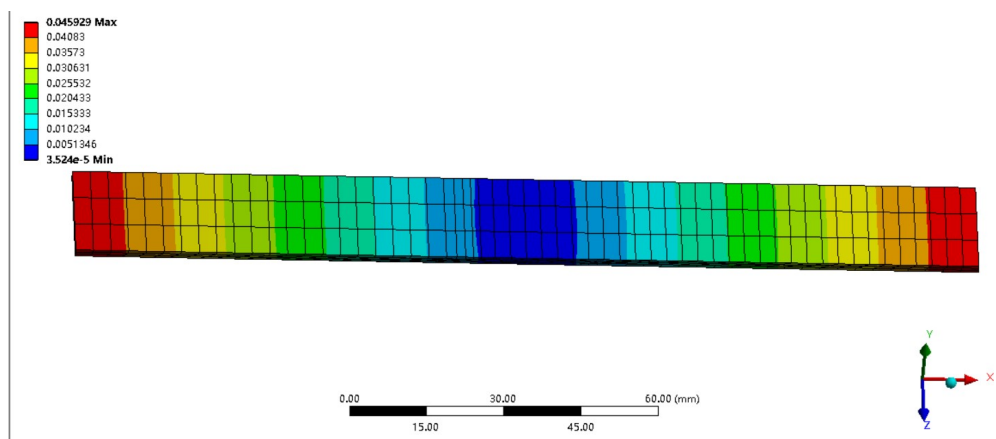


图 4-17 等效位移云图

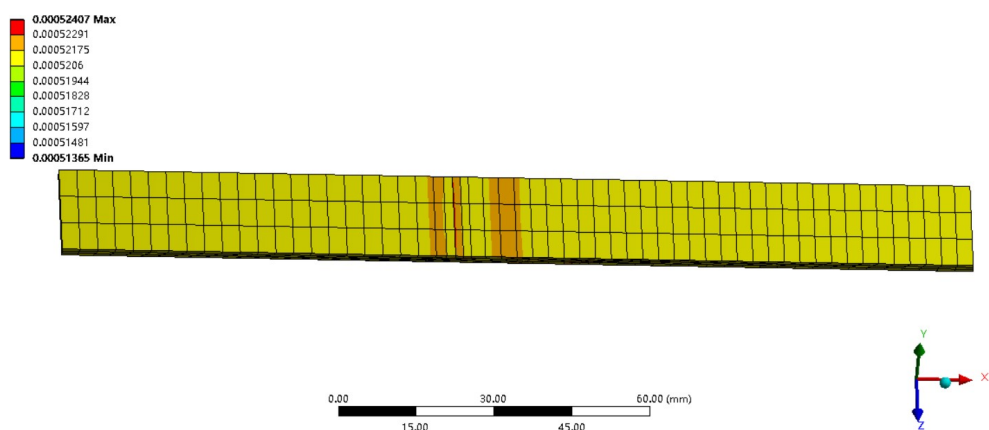


图 4-18 等效应变云图

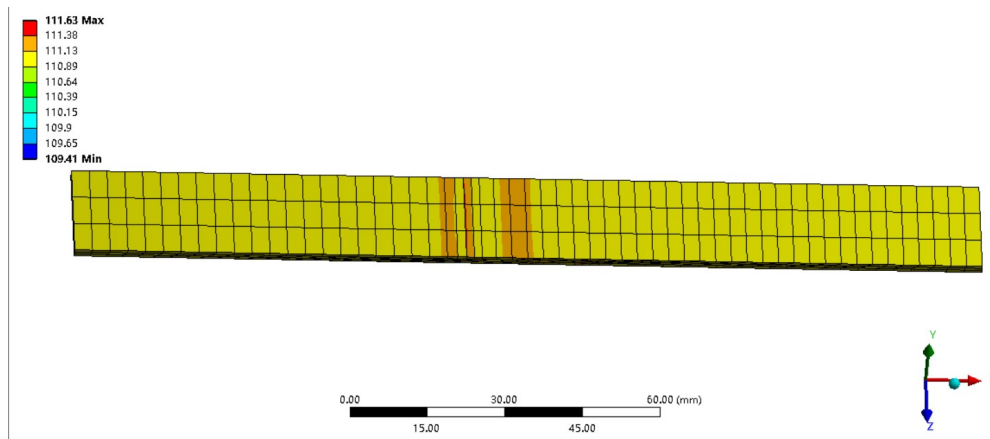


图 4-19 等效力云图

3. 三层阶梯复合材料组合板的拉伸

载荷是 4KN，加载时间为 1s。

下图 4-20、4-21、4-22 为静力学分析图。

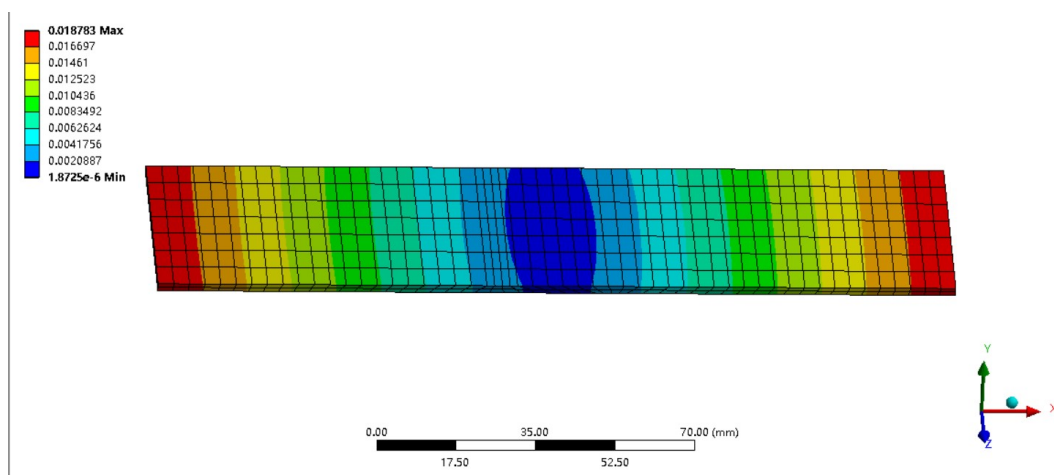


图 4-20 等效位移云图

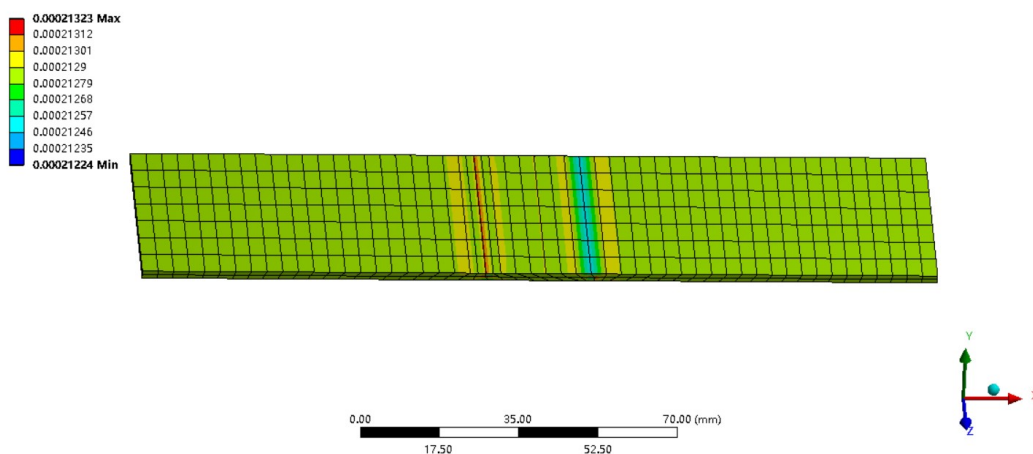


图 4-21 等效应变云图

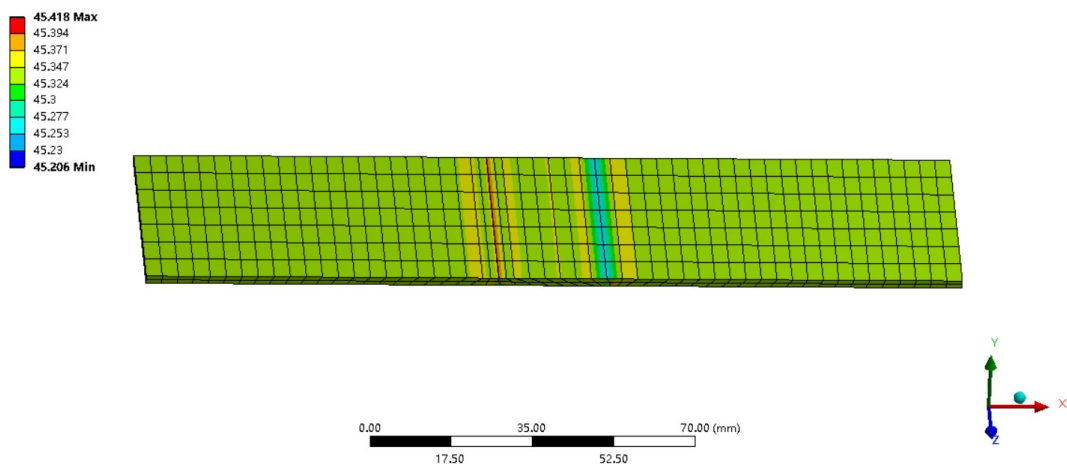


图 4-22 等效应力云图

表 4-1 阶梯数复合材料组合板的拉伸数据汇总表

阶梯层数	加载时间 (s)	加载载荷 (KN)	形变位移 (mm)
一	1	4	0.045937
二	1	4	0.045929
三	1	4	0.018783

4.6 弯曲

弯曲则是固定两边给予中间一个垂直向下的载荷。

1. 一层阶梯复合材料组合板的弯曲

弯曲实验是将载荷、加载时间统一，来观察不同层数板材变形的位移结果。载荷是 500N，加载时间为 1s。下图 4-23、4-24、4-25 为静力分析图。

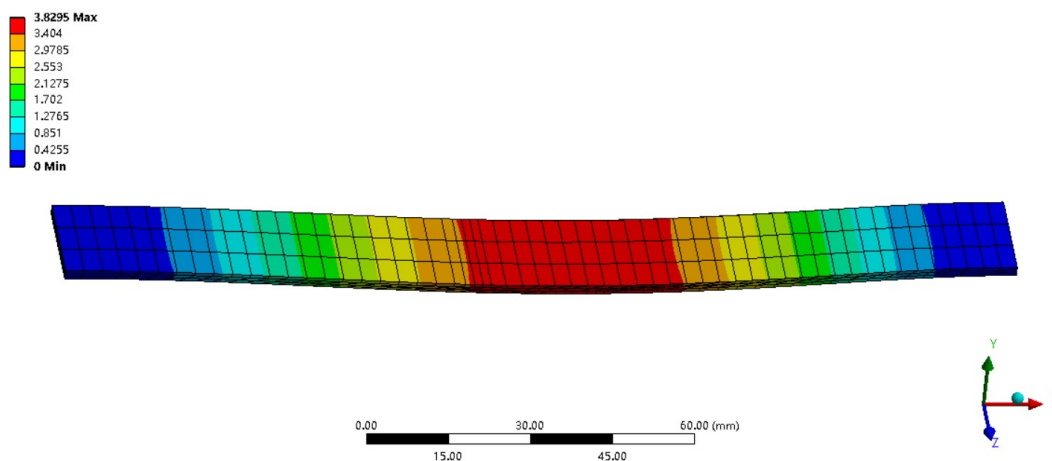


图 4-23 等效位移云图

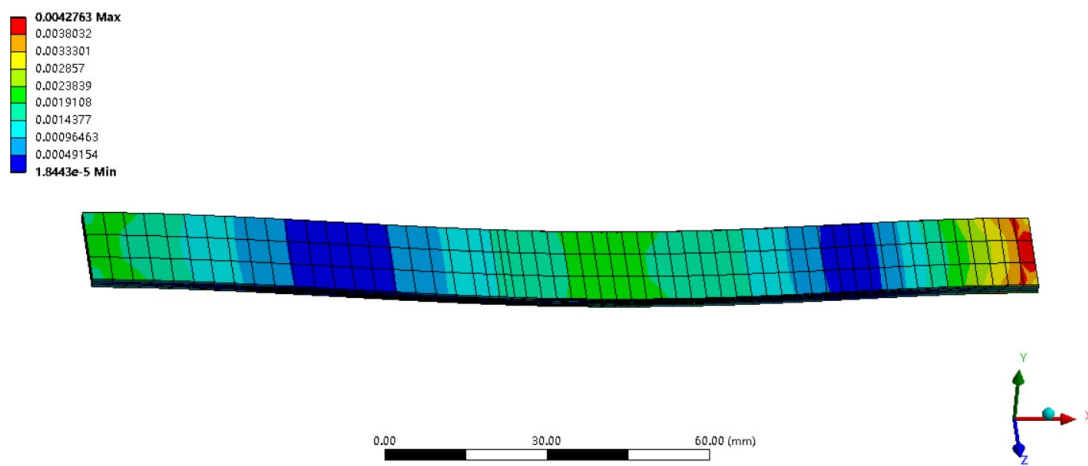


图 4-24 等效应变云图

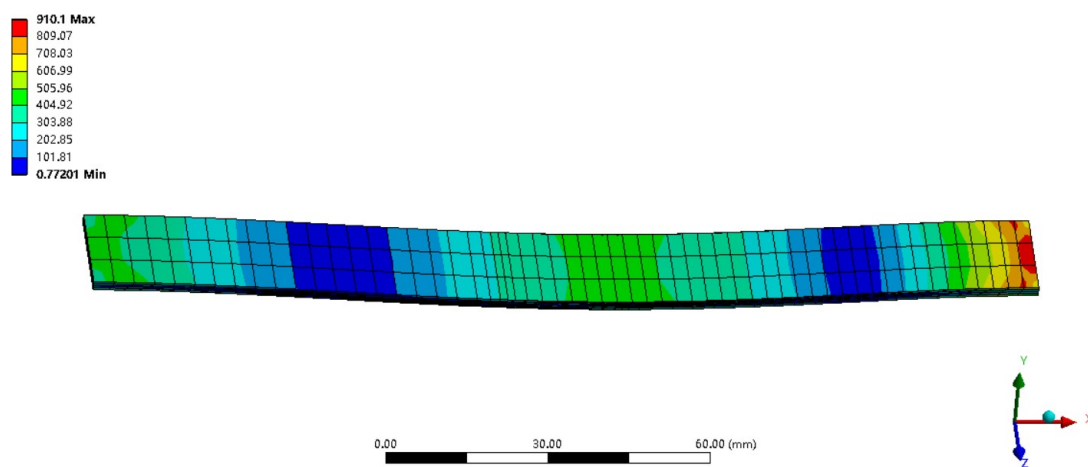


图 4-25 等效应力云图

2. 二层阶梯复合材料组合板的弯曲

载荷是 500N，加载时间为 1s。

下图 4-26、4-27、4-28 为静力分析图。

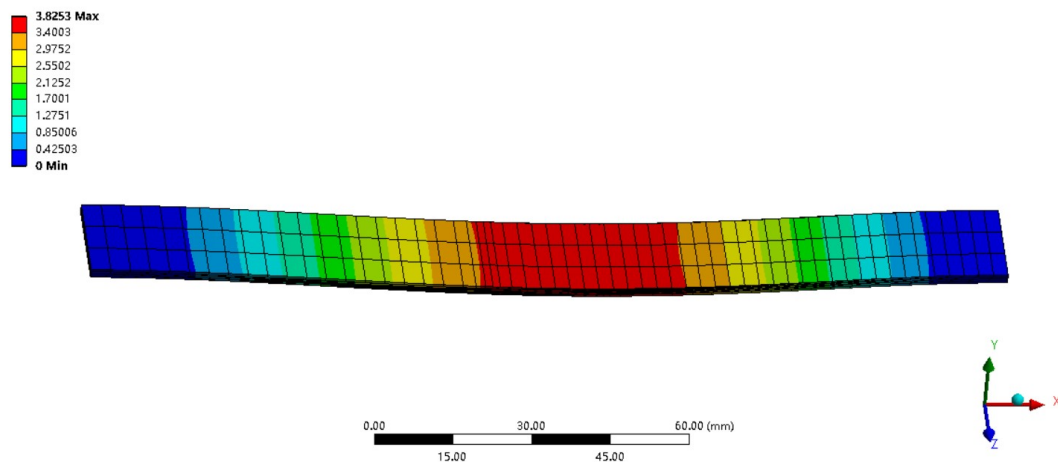


图 4-26 等效位移云图

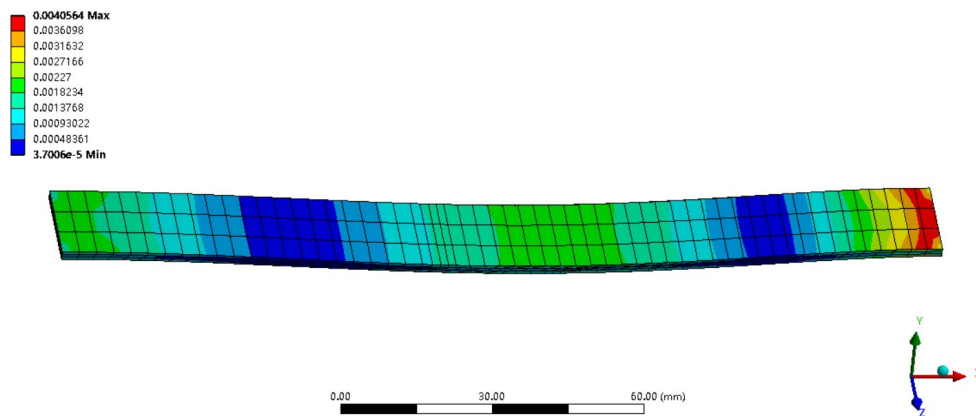


图 4-27 等效应变云图

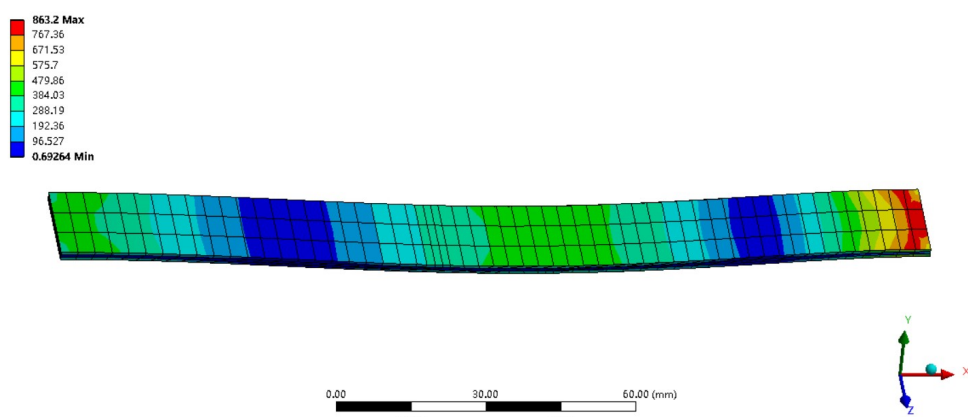


图 4-28 等效应力云图

3. 三层阶梯复合材料组合板的弯曲

载荷是 500N，加载时间为 1s。

下图 4-29、4-30、4-31 为静力分析图。

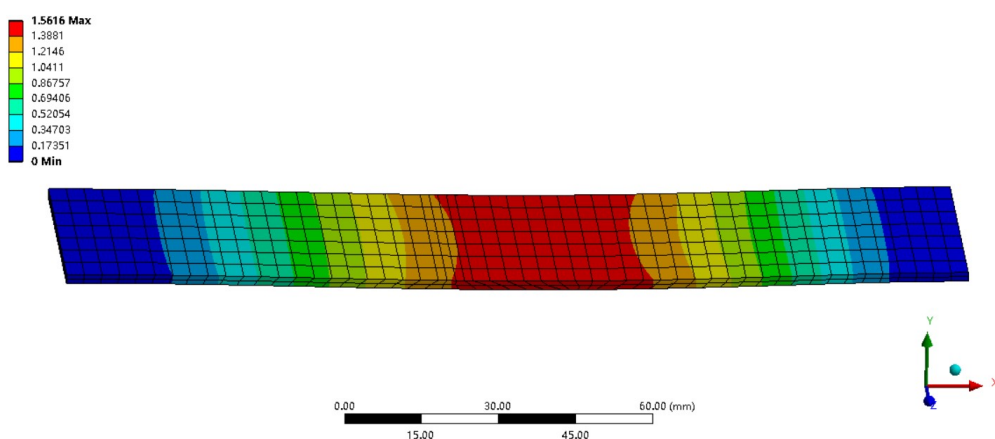


图 4-29 等效位移云图

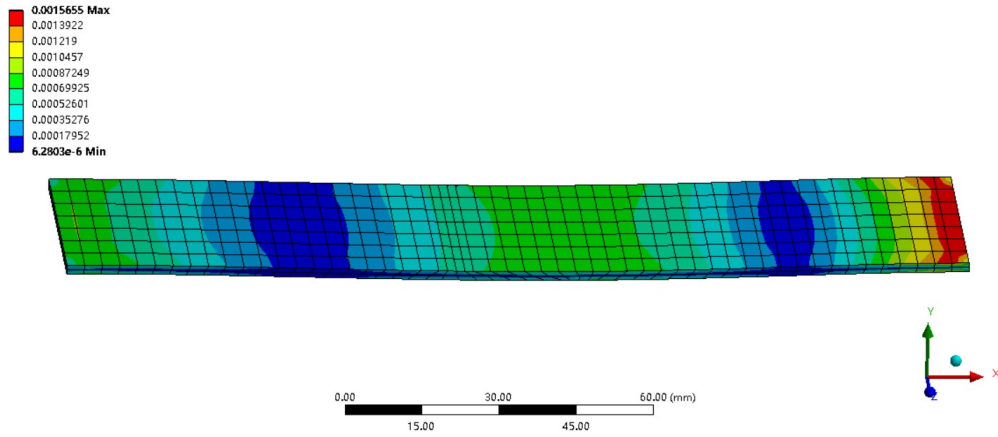


图 4-30 等效应变云图

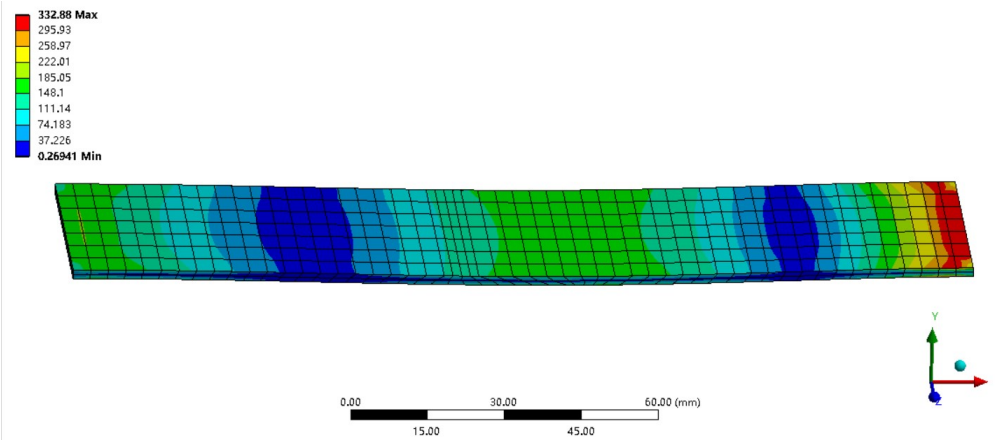


图 4-31 等效应力云图

表 4-2 阶梯数复合材料组合板的弯曲数据汇总表

阶梯层数	加载时间 (s)	加载载荷 (KN)	形变位移 (mm)
一	1	0.5	3.8295
二	1	0.5	3.8253
三	1	0.5	1.5616

通过上述结果可以得到，在相同约束作用下，阶梯数越大的，造成的位移越小，由此可以得出，复合材料层合板连接的阶梯数越大，连接效果越好，抗拉弯性能更好。

4.7 本章小结

针对不同阶梯数连接的复合材料层合板对照组，通过 ANSYS 有限元仿真分析软件，对其进行建模、划分网格、定义材料属性、添加载荷等系列操作，使其在被拉伸弯曲相同载荷的条件下，对比其载荷状态下的位移，从而判断出最佳的工艺，即阶梯数越大，抗拉弯性能越好。

第五章 结论

本文进行了碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料板材的制作、打磨、焊接。一开始使用了平板硫化机热压的方法制备了 CF/PPS (碳纤维/聚苯硫醚) 复合材料层合板, 之后设立不同阶梯层数的搭接方式进行焊接, 通过拉伸实验以及有限元仿真, 揭示了不同阶梯层数连接对 CF/PPS 复合材料层合板搭接处抗拉弯性能的影响规律, 探究出了三组中最佳的工艺方式。本文主要内容如下:

(1) 热塑性复合材料比热固性复合材料更易焊接, 因为其可熔融。焊接技术相较于传统的机械连接技术速度更快、成本更低, 使用与母材性质相同的碳纤维作为电阻元素, 可以得到质量较高、设计性强的碳纤维—树脂接头, 同时还有这抗腐蚀, 抗辐射的能力。

(2) 拉伸实验中, 得到的三组极限载荷分别为 3.904KN、4.152KN、5.657KN。通过对比可以明显看出, 阶梯层数越大, 抗拉伸性能越好。

(3) ANSYS 有限元分析软件可以非常方便的进行模拟仿真, 通过对复合材料层合板的建模及后处理, 得到了三组应力云图及载荷-位移曲线, 得出的结果为在造成相同的位移情况下, 连接的阶梯层数越大, 所需要的力就越大, 由此可判断出阶梯层数越大的抗拉弯性能就越好。

(4) 最后通过拉伸实验以及有限元仿真分析的验证可得, CF/PPS 复合材料层合板的焊接接头连接的阶梯层数越大, 其抗拉弯性能越好。

最后本文也存在着许多不足, 比如对照组不够多, 没有更多的对照组来支持所得的结论, 其次在打磨过程中的工艺方式一再碰壁, 此次在打磨过程中经常会出现板材因温度过高而导致弯曲的现象, 预想可以使用更精细的打磨设备或者减少打磨时间也可以, 或者一直用水降温, 改为多次短时的方式更好。如果有机会也可以对单搭, 双搭, 斜率式的也设置对照组, 控制一下变量, 来对比一下这些搭接形式的性能变化规律。

参考文献

- [1] 谢鸣九. 主编. 复合材料连接技术[M]上海交通大学出版社, 2016.
- [2] 罗伟豪. 碳纤维复合材料修复补强技术研究[D]. 湖南大学, 2020.
- [3] 王宏洋. CF/PPS 复合材料的碳纤维电阻热连接技术研究[D]. 中国民航大学, 2018.
- [4] 刘斌. 碳纤维/树脂基复合材料阶梯式胶接结构的拉伸、弯曲、冲击及疲劳问题[C]//2018 年全国固体力学学术会议摘要集(上). [出版者不详], 2018:4.
- [5] 路鹏程, 陈栋, 王志平. 碳纤维/聚苯硫醚热塑性复合材料电阻焊接工艺[J]. 复合材料学报, 2020, 37(05):1041-1048. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20190807.002.
- [6] 王露晨, 陆晓华, 左洪福. 基于力学解析的复合材料胶接修理技术[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10):178-182+202.
- [7] 乔玉, 周光明, 刘伟先, 陶伊凡. 复合材料阶梯形胶接接头渐进损伤分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(04):632-637. DOI:10.16356/j.1005-2615.2014.04.003.
- [8] 杨冠侠, 杨涛, 杜宇. 三维编织复合材料胶接接头力学性能试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2018(02):66-69+27.
- [9] 路鹏程, 李志歆, 王志平, 邱运册. CF/PPS 复合材料层板电阻焊接研究[J]. 塑料工业, 2021, 49(01):60-64+88.
- [10] 刘圣洋, 姜文辉, 李东辉. 全复合材料通用飞机机翼胶接方式应力分析研究[J]. 科技创新导报, 2013(23):71-72+74. DOI:10.16660/j.cnki.1674-098x.2013.23.053.
- [11] 胶接及非金属材料的焊接[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 1996(03):42-43.
- [12] 《焊接》入编 2020 年版《中文核心期刊要目总览》[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2021, No. 296(06):10.
- [13] PALARDY G, SHI H, LEVY A, et al. A study on amplitude transmission in ultrasonic welding of thermoplastic composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 113: 339-349.
- [14] AHMED T J, STAVROV D, BERSEE H E N, et al. Induction welding of thermoplastic composites: An overview[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2006, 37(10): 1638-1651.
- [15] PANNEERSELVAM K, ARAVINDAN S, NOORUL H A. Study on resistance welding of glass fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Materials & Design, 2012, 41: 453-459.
- [16] BRODHUN J, BLASS D, DILGER K. Laser transmission welding of thermoplastic fasteners: Influence of temperature distribution in a scanning based process[J]. Procedia CIRP, 2018, 74: 533-537

致谢

总觉得来日方长，却不知在敲下“致谢”两字时，才反应过来，目之所及，皆是过往，心之所想，皆是难忘，落笔写下大学四年的青春时光，有遗憾但不后悔，即使万般不舍，但仍心怀感激。

首先，我要感谢我的导师荆楠老师。荆楠老师为人谦和，平易近人，在我大学的学习生涯中荆楠老师在我的就业方面给了非常多的建议，也让我在步入社会前知道了更多关于职场的事情。我的论文也是在荆楠老师悉心指导下完成的。从论文选题到写作，老师都给予了细心指导。在我初稿完成之后，XX 老师又在百忙之中抽出空来对我的论文进行指导修改把关，给我提出很多建设性的指导意见，在我遇到问题时老师总能为我提出关键性的建议，使我能顺利的完成论文。荆楠老师严谨的治学之风和对事业的孜孜追求将影响和激励我的一生，他对我的关心和教诲我更将永远铭记。借此机会，我谨向荆楠老师致以深深地谢意。

感谢大学期间航空航天学院的所有老师对我在专业学习中的指导和无私的帮助，尤其是本班班主任朱雅乔老师，感谢你对我们孜孜不倦的教导和告诉我们很多做人做事的道理，也感谢你们对我们学生平日里、生活上的关心、关爱和关怀，是那么的无微不至，不是父母却如父母般的厚重。四年的专业学习，我将永远铭记在中德大学四年的生活，也将会是我生命里无法忘记的珍贵记忆和记忆的电影无法剪辑掉的胶片。

感谢大学期间给予我关心和帮助的小伙伴们，尤其是 18 飞行器制造工程 2 班的小伙伴们，四年的相伴不长不短，时间刚刚好，是你们让我在大学中拥有珍贵的友情和回忆，感谢你们四年来对我的帮助和带给我的欢乐。

感谢大学期间的各位室友，感谢你们四年来的包容和理解，是你们让我知道了很多是非道理，也明白了每个人都会有或大或小的故事，而关键在干这些小故事里的主角是怎么去活化自己的角色、怎么在人生的道路上演绎自己的角色、做好自己的本分。

感谢审阅这篇文章的各位老师，你们的指导和批评是我今后继续深造和学习的动力。

最后感谢我的亲人和朋友，是你们的支持和默默的奉献，才给了我完成学业的信心和动力，没有你们，就没有我这四年的学习生涯，更不可能有今天的学有所成。亲情、友情永远是我生活和学习不断奋进的最大动力源泉。不管人生的下一站将驶向何方，在大学四年的读书生活却是令我永难忘怀的。