



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

本科生毕业设计

斜坡斜率对 CF/PPS 复合材料焊接接头抗拉弯性能影响研
究

姓 名 徐振然

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

斜坡斜率对 CF/PPS 复合材料焊接接头抗拉弯性能影响研
究

姓 名 徐振然

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	荆楠		
专 业	飞行器制造工程			技术职务	正高	副高	中级
题目名称	斜坡斜率对 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	科研课题				
课题来源、背景及意义	<p>随着中国民航业的高速发展,复合材料已经被广泛应用于航空航天等工程应用中,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。随着复合材料的应用推广,热塑性复合材料制造技术成熟度增加,制造成本降低,而且热塑性复合材料具有较好的强度和刚度,耐热、耐腐蚀性强,在航空制造技术领域的应用将会显著提高。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。而在诸多焊接方式中,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。探究怎样的斜率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斜率对复合材料焊接接头的性能影响,并利用 SolidWorks 软件进行建模,用 ABAQUS 软件进行有限元分析,最后得出结论。</p>						
任务及要求	<p>(1) 确定不同的斜率设对照组,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、ABAQUS 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，并对复合材料层合板电阻焊接接头抗拉弯性能做出分析
<p>系（教研室）审查意见：</p> <p style="text-align: center;">同 意</p> <p style="text-align: right;">负责人(签名)：张健 2022 年 12 月 1 日</p>	



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： 斜坡斜率对 CF/PPS 复合材料
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： 徐振然

学 号： 18414020112

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

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

1. 毕业设计（论文）课题背景及意义

随着中国民航业的高速发展，复合材料已经被广泛应用于航空航天等工程应用中，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。随着复合材料的应用推广，热塑性复合材料制造技术成熟度增加，制造成本降低，而且热塑性复合材料具有较好的强度和刚度，耐热、耐腐蚀性强，在航空制造技术领域的应用将会显著提高。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。而在诸多焊接方式中，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。探究怎样的斜率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。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

论文内容：

- （1）确定不同的斜率设对照组，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。

论文要求：

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。

毕 业 设 计（论 文）任 务 书

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) 一篇毕业设计论文
- (2) 一套力学分析对比图

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]钱和平.基于神经网络铝基复合材料焊接接头力学性能分析[J].电焊机,2014,44(11):103-105+115.
- [3]陶永强,矫桂琼,王波,常岩军.搭接长度对 Z-pins 增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响[J].材料科学与工程学报,2008(04):593-598.
- [4]李嘉禄,焦亚男,孙其永. 搭接长度对缝合连接三维编织复合材料弯曲性能的影响[C]. 中国力学学会.第十五届全国复合材料学术会议论文集（上册）.中国力学学会:中国力学学会,2008:441-444.
- [5]邹田春,秦嘉徐,李龙辉,符记,刘志浩,牟浩蕾.搭接长度对钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头胶接性能的影响[J].中国塑料,2020,34(01):17-21.
- [6]余海燕,李佳旭,周辰晓.碳纤维复合材料与高强度钢板螺栓连接拉伸性能[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(05):680-686+700.
- [7]孙洋. 碳纤维复合材料连接结构的强度分析及其影响因素[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [8]刘坤良. 复合材料连接结构强度研究与失效分析[D].郑州大学,2014.

所在专业审查意见：

同 意

负责人：张 健

2021 年 12 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（论文）开题报告

题 目：斜坡斜率对 CF/PPS 复合材料
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： 徐振然

学 号： 18414020112

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）课题的目的意义

随着中国民航业的高速发展，复合材料已经被广泛应用于航空航天等工程应用中，应用场合也由刚开始的不承力结构慢慢演变成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。随着复合材料的应用推广，热塑性复合材料制造技术成熟度增加，制造成本降低，而且热塑性复合材料具有较好的强度和刚度，耐热、耐腐蚀性强，在航空制造技术领域的应用将会显著提高。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。而在诸多焊接方式中，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。探究怎样的斜率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。

（二）与本课题有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势

先进复合材料诞生于 20 世纪 60 年代末，70 年代初即应用于飞机结构。近年来，飞机制造技术整体朝着结构轻量化、隐身、高可靠性、长寿命、短周期、低成本、及绿色先进制造技术方向发展，复合材料的独有特性能很好满足这个需求，因此复合材料在航空工业中的应用越来越广泛。早在 1974 年美国的 F-15A 战斗机就使用了复合材料，使用复合材料比例为 2%。1995 年首飞的 F/A-18E/F 战机，复合材料的比例达到了 22%，襟翼采用碳碳复合材料，机翼蒙皮也采用碳纤维-环氧复合材料。这时复合材料在飞机中的使用已经到了第二阶段，复合材料开始应用于承力较大的部件。但民用飞机相隔 20 年才出现大型飞机的复合材料机翼和机身，在民用运输类飞机中，波音 777 的垂尾，平尾、后气密框、客舱地板梁、襟翼、副翼、发动机整流罩和各种舱门等均使用了飞虎材料，总质量达 9.9t，占结构总重的 25%。新研制的波音 787，机翼、机身等主承力结构均有复合材料制成，复合材料用量达全机结构总重的 50%以上，其中约 45%为碳纤维复合材料，5%为玻璃纤维复合材料，是世界时第一架采用复合材料机身，机翼的大型商用飞机。空客 A320，A330 等机型也大量采用了复合材料，用量占结构总质量的 13%，A380 更是达到了 22%。热塑性复合材料具有较高的强度和刚度，相比于热固性复合材料具有较好的耐热性，被广泛应用于航空航天等领域。电阻焊是传统的压焊技术，其发展较早，技术比较成熟，在保证焊接强度的同时，兼具效率高、成本低、可靠性好等优势，在某些领域已经取代了胶接、机械紧固等技术。

（三）课题主要研究内容

1、复合材料焊接在飞机上的应用背景及使用现状，热塑性复合材料的使用优点，电阻焊的使用优点，确定研究方向（确定不同斜坡斜率，对复合材料连接抗拉弯的性能影响）。

2、设立 3-4 组不同斜坡斜率的复合材料连接方式，对工件进行打磨、连接处理。

3、使用有限元分析软件，对工件进行有限元分析。

4、对工件进行拉伸弯曲处理，记录数据并与模拟结果进行比较，得出结论。

（四）参考文献

[1]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.

[2]纪朝辉,王宏洋,孙凌丰,路鹏程,王志平. PPS/CF 复合材料电阻焊接工艺及性能评价[J]. 焊接学报, 2020, 41(03):80-85+101.

[3]邹田春,秦嘉徐,李龙辉,符记,刘志浩,牟浩蕾. 搭接长度对钛合金-芳纶纤维复合材料单搭接接头胶接性能的影响[J]. 中国塑料, 2020, 34(01):17-21. DOI:10.19491/j.issn.1001-9278.2020.01.004.

[4]周利,秦志伟,刘杉,陈伟光,李高辉,宋晓国,冯吉才. 热塑性树脂基复合材料连接技术的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(19):3177-3183.

[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.

[7]余海燕,李佳旭,周辰晓. 碳纤维复合材料与高强度钢板螺栓连接拉伸性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(05):680-686+700.


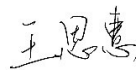
[8]孙洋. 碳纤维复合材料连接结构的强度分析及其影响因素[D]. 哈尔滨工业大学, 2016.

[9]钱和平. 基于神经网络铝基复合材料焊接接头力学性能分析[J]. 电焊机, 2014, 44(11):103-105+115.

[10]陶永强,矫桂琼,王波,常岩军. 搭接长度对 Z-pins 增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2008(04):593-598.

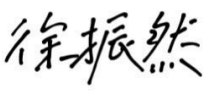
[11]. 搭接长度对缝合连接三维编织复合材料弯曲性能的影响[C]//. 第十五届全国复合材料学术会议论文集(上册)., 2008:441-444.

[12]谢鸣九,主编. 复合材料连接技术[M]. 上海交通大学出版社, 2016.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2020 年 12 月 3 日 - 2021 年 6 月 3 日	<p>1、复合材料焊接在飞机上的应用背景及使用现状，热塑性复合材料的使用优点，电阻焊的使用优点，确定研究方向（确定不同斜坡斜率，对复合材料连接抗拉弯的性能影响）。</p> <p>2、设立 3 组不同斜坡斜率的复合材料连接方式，对工件进行打磨、连接处理。</p> <p>3、使用有限元分析软件，对工件进行有限元分析。</p> <p>4、对工件进行拉伸弯曲处理，记录数据并与模拟结果进行比较，得出结论。</p>	<p>1. 明确设计方向，完成开题报告。</p> <p>2. 得到打磨并焊接好的复合材料板。</p> <p>3. 完成有限元分析。</p> <p>4. 得到拉伸弯曲曲线图，得出结论。</p> <p>5. 完成论文。</p>
完成课题的 现有条件	<p>1. 复合材料打磨台</p> <p>2. 复合材料成型热压机</p> <p>3. ABAQUS 软件等有限元分析软件</p>	
指导教师 意见	<p style="text-align: center;">同意开题</p> <p style="text-align: right;">指导教师:  2022 年 3 月 5 日</p>	
开题答辩 小组意见	<p style="text-align: center;">同意开题</p> <p style="text-align: right;">组 长:  2022 年 3 月 5 日</p>	

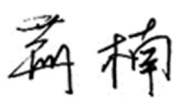
天津中德应用技术大学
本科生毕业论文（设计）的声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，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，本学位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：

2022年6月3日

本人声明：该学位论文是本人指导学生完成的研究成果，已经审阅过论文的全部内容，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

随着中国民航业的高速发展，CF/PPS（Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide）热塑性复合材料在民用航空上的应用越来越广泛。本文的研究目标是通过自行设计不同的搭接斜率，进行复合材料板的制备与焊接，通过对板材进行拉伸实验与有限元仿真分析的方法，对比数据后揭示哪种斜率的力学性能更加优秀，提出最佳的焊接工艺。

在选材方面，本文所使用的复合材料层合板为热塑性复合材料，因为热塑性的复合材料可以熔融进行焊接，而且相较于热固性复合材料，热塑性复合材料的耐热性、耐腐蚀性更好，其重量更轻，同时也具有较好的强度和刚度，在民航飞机的制造和维修中更具有发展前景。在实验方面，首先使用平板硫化机完成复合材料层合板的制备，然后使用中国民航大学自主设计并优化的焊接设备与其探究的最佳工艺参数完成复合材料层合板的焊接，之后对其分组进行拉伸实验，完成拉伸实验后记录数据，通过对比极限载荷强度的峰值与加载时间长短，可分析出复合材料焊接接头的连接斜率越大的，抗拉伸性能更好。之后再使用 ABAQUS 有限元分析软件进行仿真分析，在中间压力载荷的作用下，比较不同斜率的试件在接头处产生相同位移的情况下，所需的载荷大小，最终得出斜率越小的连接方式所需要的载荷越大，即抗弯性能更好，两次实验结合可得出本文结论，即斜坡斜率越小的焊接方式，复合材料板的抗拉弯性能越好。

关键词：热塑性复合材料；有限元；电阻焊接；力学性能

ABSTRACT

With the rapid development of China's civil aviation industry, CF/PPS (Carbon Fiber/Polyphenylene Sulfide) thermoplastic composites are more and more widely used in civil aviation. The research goal of this paper is to design different lap slopes by designing themselves, prepare and weld composite plates, and through the tensile experiments and finite element simulation analysis methods of the plates, compare the data to reveal which slope has better mechanical properties, and propose the best welding process.

In terms of material selection, the composite laminate used in this paper is a thermoplastic composite material, because the thermoplastic composite material can be melted for welding, and compared with thermoset composite material, the thermoplastic composite material has better heat resistance and corrosion resistance, its weight is lighter, and it also has better strength and stiffness, which has more prospects for development in the manufacture and maintenance of civil aviation aircraft. In terms of experiments, the preparation of composite laminates was first completed by using a flat vulcanizing machine, and then the welding equipment independently designed and optimized by the Civil Aviation University of China was used to complete the welding of composite laminates with the best process parameters it explored, and then the tensile experiment was carried out in its grouping, and the data was recorded after completing the tensile experiment, and by comparing the peak of the ultimate load strength and the length of the loading time, it could be analyzed that the greater the connection slope of the composite welding joint, the better the tensile performance. Then use ABAQUS finite element analysis software for simulation analysis, under the action of intermediate pressure load, compare the specimen with different slopes in the case of the same displacement at the joint, the required load size, and finally conclude that the larger the slope of the connection method, the greater the load required, that is, the bending resistance is better, the combination of the two experiments can draw the conclusion of this paper, that is, the welding method with the greater the slope slope, the better the tensile bending performance of the composite plate.

Key words: thermoplastic composites; Finite element analysis; resistance welding; mechanical properties

目 录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	1
1.3 论文研究内容	2
第二章 实验材料及成型工艺	3
2.1 热塑性复合材料的制备	3
2.2 焊接接头的设计	3
2.3 焊接接头的打磨	5
2.4 焊接接头的焊接	6
2.5 本章小结	8
第三章 拉伸实验	9
3.1 拉伸实验设备	9
3.2 拉伸实验准备工作	9
3.3 拉伸实验结果	10
3.4 本章小结	12
第四章 有限元分析研究	13
4.1 ABAQUS 软件	13
4.2 建模与划分网格	13
4.3 结果分析	16
4.4 本章小结	18
第五章 结论与不足	19
参考文献	20
致 谢	21

第一章 绪论

1.1 研究背景

当今先进复合材料广泛应用在现代航空器上,如波音 787 飞机复合材料用量达到了 50%,国产大飞机 C919 机身结构复合材料用量也已经超过 10%^[1]。随着民用航空领域的不断发展,人们对减轻结构质量、节约经济成本、保证产品安全性能的要求越来越高,这使得“轻质轻量化”的概念应运而生,即在保证结构性能的同时将其由繁变简,由重变轻,采用轻合金或高强树脂等材料代替钢铁,可以在满足结构强韧性、耐疲劳性等的同时,减轻结构质量^[2]。

先进复合材料很早就开始使用,在 20 世纪 60 年代,热塑性复合材料就引起欧洲、美国、日本的重视并取得大量的突破性进展,波音以及空客公司在飞机蒙皮、整流罩、平尾等部件上应用了热塑性复合材料;20 世纪 70 年代美国 Philips 公司开发出聚苯硫醚(PPS)并进行产业化生产;20 世纪 80 年代,热塑性复合材料预浸料的研究在美国有了重大突破,同时连续纤维的出现进一步提高了产品的力学性能,这都为热塑性复合材料在飞机上的应用奠定了坚实基础^[1]。

复合材料具体可分为热固性复合材料和热塑性复合材料,热固性复合材料是当今飞机制造与维修中主要应用的高性能复合材料,但其成本高,不利于环保等因素,所以并不适合在飞机上大量使用。而热塑性复合材料的成型速度快,且耐热性与耐腐蚀性也更优异,也有着不逊色于热固性复合材料的强度与韧性,因此,在航空航天领域,热塑性复合材料得到广泛关注。

目前在飞机上最可行的连接方法是机械连接,但这种连接不可避免的带来应力集中以及结构增重的问题,更引入对结构整体性破坏和分层等损伤,上述问题已成为促进热塑性复合材料替代热固性复合材料在飞机上应用的主要因素之一,且热塑性复合材料可进行熔融连接,从而可摒弃传统的机械连接^[3]。所以想更好的连接热塑性复合材料,最优选为焊接,其优点有成本低、速度快且具有较高的可控性和可靠性。

1.2 研究现状

1989 年剑桥大学 Taylor N.S 提出了热塑性复合材料电阻焊的可行性,这一可行性的提出为热塑性复合材料焊接提供了新的发展方向。80 年代的 Hou M 和 Yarlagadda S 等人,以及 90 年代初 Beevers A 都使用金属网作为电阻元素焊接热塑性复合材料,是因金属网的导电性稳定,热扩散速度较快,有利于热塑性复合材料实现快速焊接。Arias M 和 Ziegmann G 共同研发了为防止在焊接过程中出现局部过热而导致试件损伤的脉冲式电阻焊接技术;姜庆斌等人优化了热塑性复合材料电阻焊接的工艺路线^[1]。

热塑性复合材料的焊接方法有激光焊、电磁感应焊、超声焊以及电阻焊等，每种焊接方法的优缺点具体如下：

(1) 激光焊适合用与复杂的试件，原理与电阻焊接相似。这种焊接方法速度会很快，但要求焊接设备精度高，操作复杂。

(2) 感应焊的焊接界面需要植入电磁感应器，这种焊接方法能量传输集中，升温快，但其会使焊接面的温度分布不均匀，影响植入物焊接强度。

(3) 超声焊的操作简单，时间短，不需要做复杂的表面处理，但其稳定性和可靠性还存在很多问题。

(4) 电阻焊工艺简单且成本低，技术比较成熟，在很多方面已经取代机械连接和胶接，在复合材料的领域具有广阔应用前景。

单搭接的应用最为广泛，但是，固有的载荷偏移和载荷路径的突然变化，剪应力和法向应力在连接的两端附近都是很高的，于是常规的单搭接连接的效果并不好。Zeng QG 和 Sun CT 提出并研究一种新型波浪连接，其突出特点是界面法向应力在连接的两端处是压缩，界面剪应力的分布也更均匀，他们的实验结果表明，波浪形连接的强度比常规搭接的强度高很多^[4]。所以本文采用与其相似的斜坡连接，意在模拟其增大两板之间的接触面积，达到增强其性能的作用。

1.3 论文研究内容

本文采用电阻焊的方法，研究不同斜率对复合材料抗拉及抗弯性能强度的影响。具体内容如下：

- (1) CF/PPS 热塑性复合材料焊接接头的设计与制备。
- (2) 对不同斜率连接的复合材料层合板进行拉伸试验。
- (3) 使用有限元分析的方法，探究了不同斜率对抗弯性能影响的研究。
- (4) 总结不同斜率连接的抗拉弯强度变化规律，得出结论。

第二章 实验材料及成型工艺

2.1 热塑性复合材料的制备

碳纤维/聚苯硫醚 (CF/PPS) 复合材料层压板是使用了加拿大 Barrday 公司提供的 AS4 3K 5HS CF 织物/PPS 树脂预浸料, 在 XLB-660.660.3 型平板硫化机上热压成型; 其热压工艺为: 温度为 $320^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 30 min, 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 2 mm, CF 体积分数约为 54vol%, PPS 树脂薄膜由日本东丽公司提供, PPS 树脂膜厚度为 $50\ \mu\text{m}^{[2]}$ 。

本文的具体工艺方法如下:

(1) 模具: 在单向带预浸料铺层的前面, 要在模具上均匀涂抹上脱模剂。模具尺寸为 $100\text{mm}\times 25\text{mm}\times 1.8\text{mm}$ 。

(2) 铺层: 将 CF/PPS 复合材料单向带预浸料依照模具的尺寸进行裁剪, 铺层方向和层数选择为 $[0]_8$ 。

(3) 热压成型: 要先让平板硫化机的上下夹具加热到 CF/PPS 复合材料单向带预浸料的成型温度, 然后再将铺层后的模具放到其中热压成型, 压制过程排气两次, 保温一定时间后, 等待冷却, 即完成制备。

材料成型后打磨抛光, 材料样式为图 2-1 所示。



图 2-1 复合材料层合板

2.2 焊接接头的设计

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。

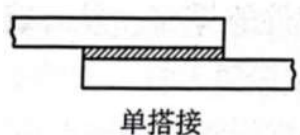


图 2-2 单搭接示意图

(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。

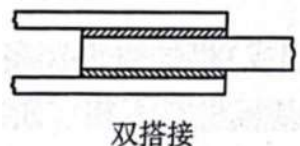


图 2-3 双搭接示意图

(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。



图 2-4 阶梯连接示意图

(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。

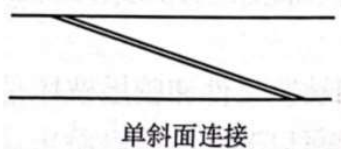


图 2-5 斜坡连接示意图

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

表 2-1 板材尺寸

	长度	宽度	厚度	斜率	搭接长度
A	100	25	1.8	1/5	9
B	100	25	1.8	1/10	18
C	100	25	1.8	1/15	27

2.3 焊接接头的打磨

首先，在 CF/PPS 复合材料板两测用笔画线，方便后续打磨加工过程。然后进行打磨加工过程，初始打磨工具为打磨抛光机，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。打磨设备如图所示。



图 2-6 打磨抛光机



图 2-7 复合材料打磨台

打磨过程为手持复合材料板，用打磨抛光机进行缓慢打磨，在工作中需注意做好防护措施，以免被复合材料碎屑刮伤。在打磨复合材料试验件时发现以下几点问题：

- (1) 手持打磨不稳定，会使复合材料板晃动导致打磨不平整。
- (2) 打磨抛光砂轮转速过快，会导致复合材料板温度过高出现变形。

(3) 很难满足所需的精度要求。

为了解决以上问题，选取另一种手持打磨抛光砂机，能满足更高精度要求且转速慢，如图 2-8 所示。



图 2-8 手持打磨抛光机

经过打磨后，得到三组不同斜坡斜率的 CF/PPS 复合材料层合板，如图 2-9 所示。

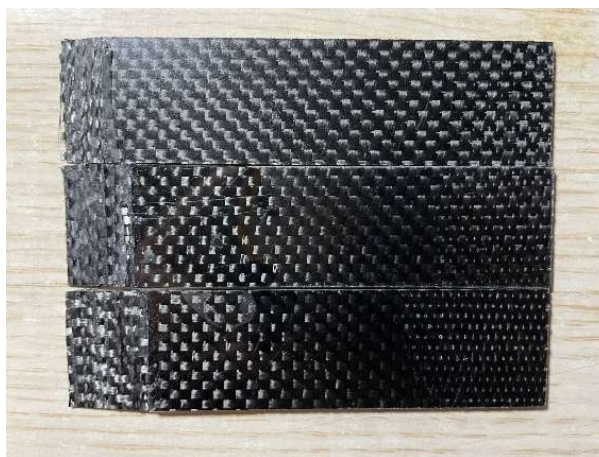


图 2-9 打磨好的复合材料层合板

2.4 焊接接头的焊接

2.4.1 电阻焊接原理

热塑性复合材料的焊接就是利用了热塑性高分子材料的温度达到了熔融温度时，会产生一定的流动性能，它们的流动性能产生的主要原因是由于热塑性高分子材料随着温度的升高，其分子运动的能力也增加，分子链的次键合力减小了，施加了外力可相对运动。等温度下降，材料冷切后，可成为玻璃态高分子材料，进而能够形成具有较好力学性能且完整的焊接接头。连接技术原理如图所示。

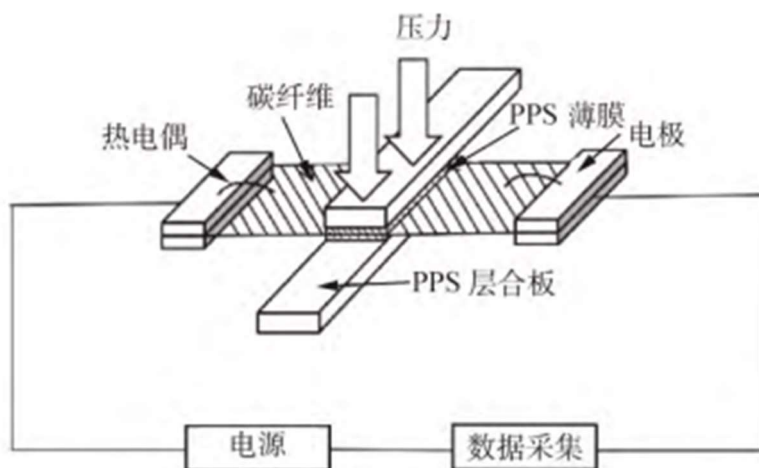


图 2-10 CF/PPS 层合板电阻焊原理图

2.4.2 电阻焊接的装置

本次实验采用的是中国民航大学自主设计并优化的热塑性复合材料电阻焊接装置，设备如图 2-11 所示。此实验装置采用交流可变电压电源，同时由于其为交流电，所以要加入半导体整流器将交流电变为直流电，再继续工作。然后，选有良好导电性的铜片作为电极，在选好的电极上连电源导线，同时在接触位置加入具有导电性的银胶保证其良好接触，再将全部用耐高温的绝缘胶布粘上。最后，将碳纤维丝均匀分布在 CF/PPS 复合材料层合板待焊接面之间，并用重物压在 CF/PPS 复合材料层合板的搭接区域，确保其压紧对齐，然后将热电偶放置于碳纤维丝上，即可开始实验。

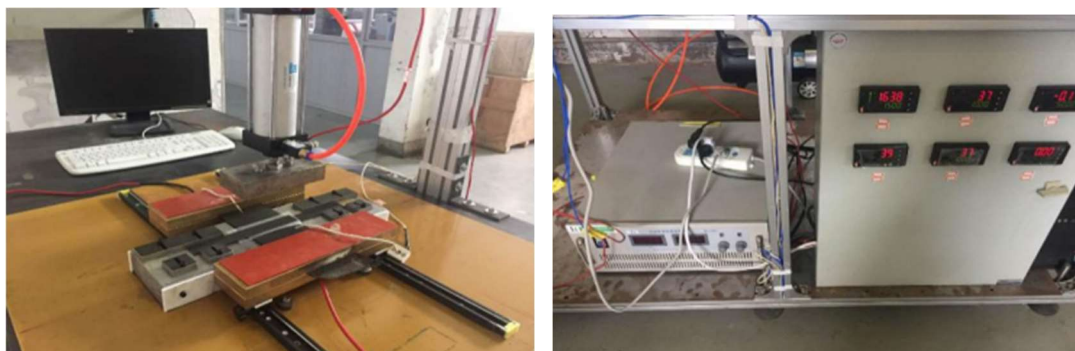


图 2-11 热塑性复合材料电阻焊接装置

2.4.3 焊接参数

通过民航大学对其设备的优化研究^[1]，可得最优的焊接参数如下表所示：

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斜坡斜率连接的复合材料层合板,如图 2-12 所示。



图 2-12 三组不同斜率连接的复合材料板

2.5 本章小结

针对不同连接方式的复合材料层合板,首先介绍了原材料的制备工艺过程,为采用平板硫化机热压成型的方法。然后介绍了不同连接方式种类的特点,确定本文所采用的连接方式为斜坡连接。针对所建立的对照组,待板材冷却后进行裁剪与打磨处理。最后采用中国民航大学自主研发的焊接装置,完成板材的焊接,得到三组对照组,进行后续的实验。

第三章 拉伸实验

3.1 拉伸实验设备

本次拉伸实验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。



图 3-1 微机控制电子万能试验机

3.2 拉伸实验准备工作

首先要进行拉伸前的准备工作。进行拉伸实验具体如下:

(1) 三组 CF/PPS 复合材料层合板的外观检查,确保试件均无磨损,保存完整。

(2) 对焊接好的三组 CF/PPS 复合材料层合板端头预处理,由于表面光滑,为了防止拉伸过程中出现夹持不严、端头滑移的情况,将两端略微打磨粗糙(打磨不能损伤纤维)。

(3) 将不同斜坡斜率连接的复合材料层合板按照斜率由小到大的顺序依次夹持,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。

(4) 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。

3.3 拉伸实验结果

加载试件的斜坡斜率分别为：(A) 1/5 (B) 1/10 (C) 1/15 记录好相应的试验数据。结果如下表 3-1 所示。三组不同斜坡斜率连接的复合材料层合板拉伸实验图表数据如下图所示。

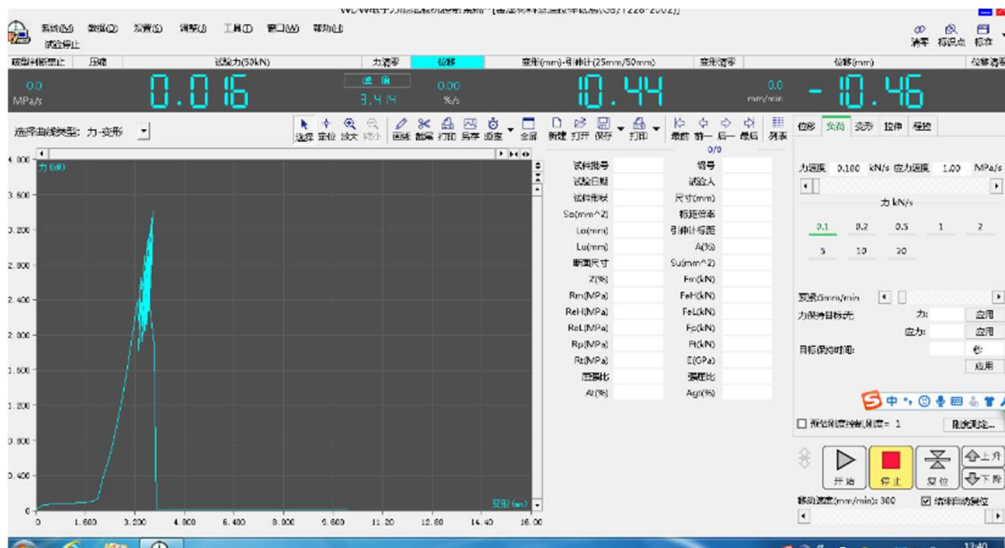


图 3-2 斜率 1/5

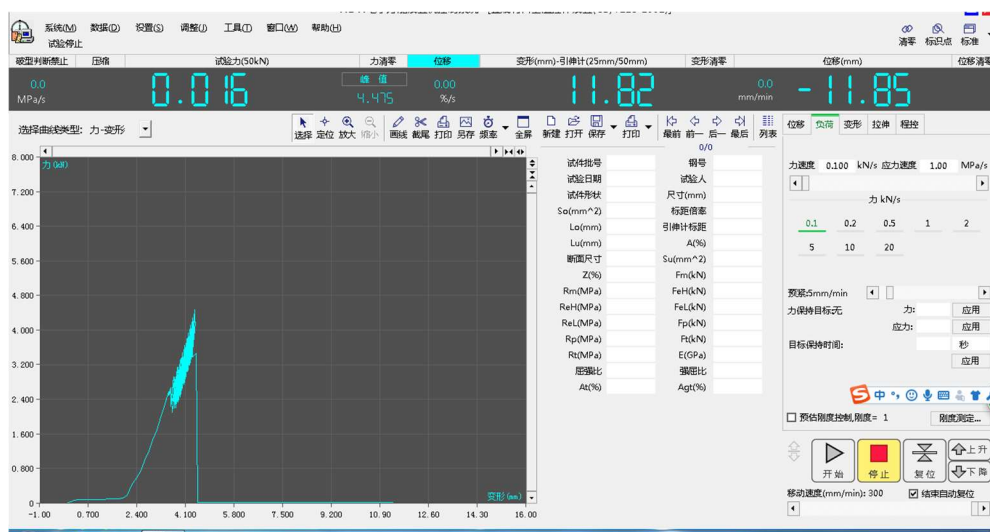


图 3-3 斜率 1/10

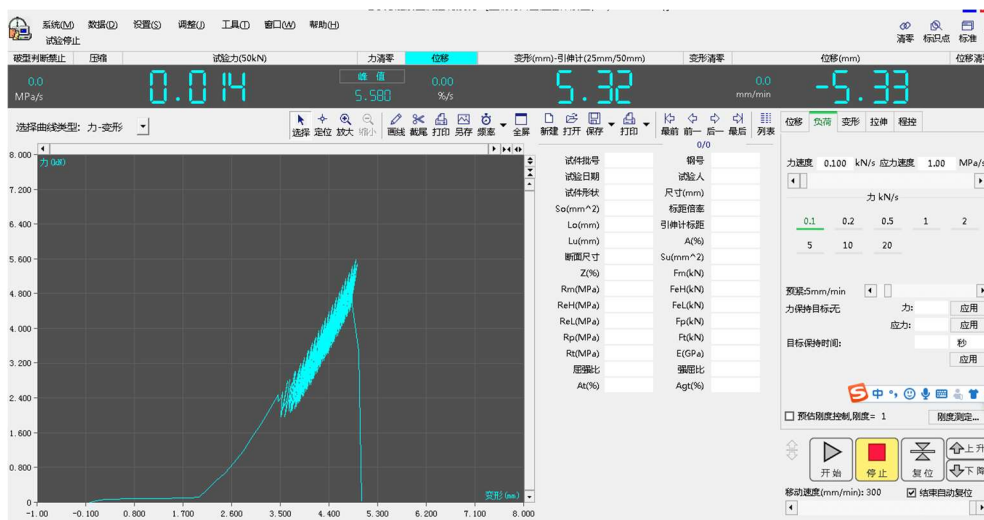


图 3-4 斜率 1/15

表 3-1 拉伸实验结果

	拉伸时间 (s)	极限载荷 (KN)
A	21.36	3.414
B	33.64699	4.475
C	39.84099	5.580

首先，对于 A 中提到的斜坡斜率情况，拉伸试验时间持续到 21.36 秒，其形变幅度从第 0.079999 秒所对应的 0.009 毫米一直变为第 21.36 秒的 10.1 毫米，测得的应力分别为 0.068MPa 及 0.159999MPa，最终计算出来的应变百分比分别为 0.018%与 20.2%，达到的力峰值为 3.414KN。接下来，对于 B 中提到的斜坡斜率情况，可以看到，拉伸试验时间持续到 33.64699 秒，其形变幅度从第 0.079999 秒所对应的-0.017 毫米一直变为第 33.64699 秒的 11.37899 毫米，测得的应力分别为 0.1MPa 及 0.159999MPa，最终计算出来的应变百分比分别为-0.034%与 22.75799%，达到的力峰值为 4.475KN。最后，对于 C 中提到的斜坡斜率情况，我们有，拉伸试验时间持续到 39.84099 秒，其形变幅度从第 0.079999 秒所对应的-0.014 毫米一直变为第 39.84099 秒的 5.011 毫米，测得的应力分别为 0.02MPa 及 0.112MPa，最终计算出来的应变百分比分别为-0.028%与 10.022%，达到的力峰值为 5.580KN。

很明显，通过三组试验对比可以得出最终的结论，CF/PPS 复合材料层合板连接的斜坡斜率越小，实际上可达到的抗拉伸性能越好。

3.4 本章小结

针对不同斜率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,不同斜坡斜率连接的复合材料层合板,斜率越小,加载时间越大,极限载荷越大,抗拉伸的性能越好。

第四章 有限元分析研究

4.1 ABAQUS 软件

为了进一步验证结论，本文使用 ABAQUS 有限元仿真分析，基于 Hashin 失效准则和内聚力单元，建立了复合材料层合板渐进损伤有限元分析模型。基于有限元模型，两端固定，对连接中间部位施加压力载荷，在造成相同位移的情况下，将所需要的力做比较，进而得到哪种斜率连接的抗弯效果更好。复合材料渐进损伤问题是一个非线性问题，ABAQUS 软件是基于有限元方法功能强大的工程模拟软件，可以解决从相对简单的线性问题到富有挑战性的非线性问题^[5]。

本次主要研究复合材料层合板在不同的斜坡斜率连接下，给予压力载荷，在造成相同位移的前提条件下，比较其所需的极限载荷强度大小。

4.2 建模与划分网格

4.2.1 模型的建立

建立有限元模型，层合板尺寸为 $100 \times 25 \times 1.8\text{mm}^3$ ，单侧斜坡斜率为 1/5、1/10、1/15。建立的模型如图所示。

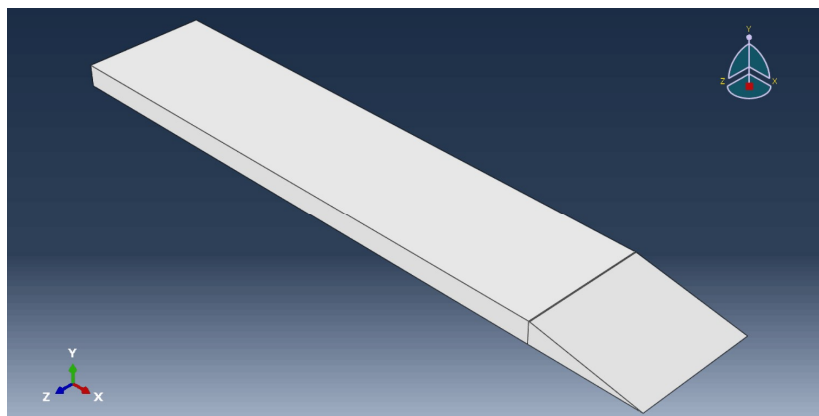


图 4-1 斜率 1/5

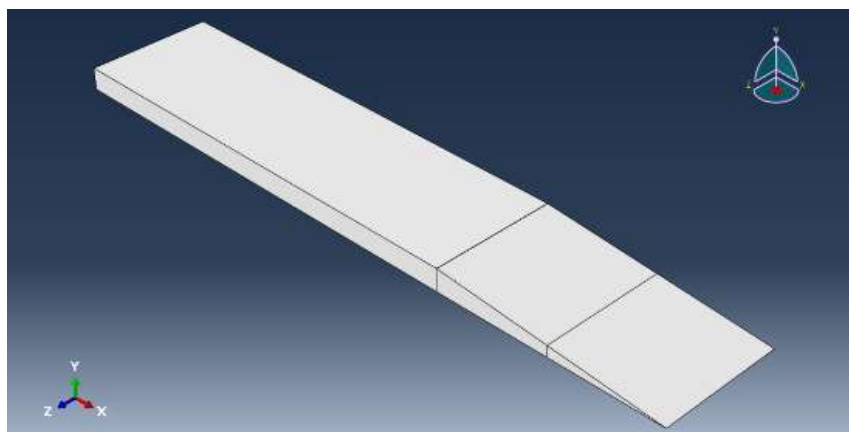


图 4-2 斜率 1/10

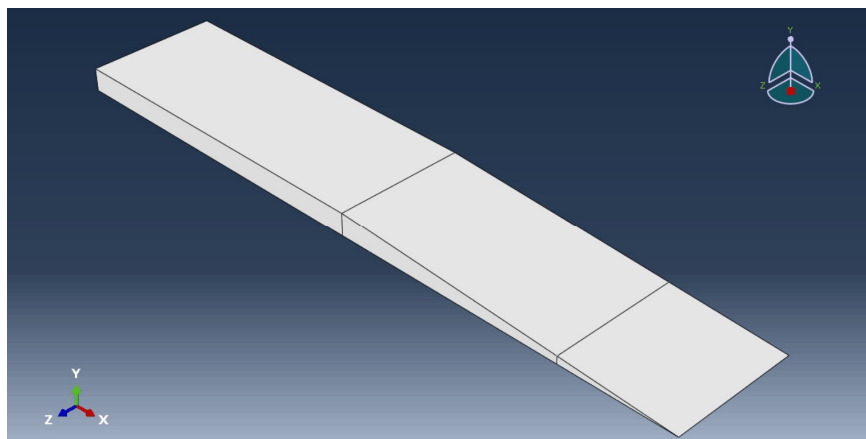


图 4-3 斜率 1/15

4.2.2 材料性能的定义

主要定义复合材料层合板的性能，在前面建立的模型定义铺层信息，铺层信息为 $[0]_8$ ，每一层的材料参数如表 3-2 所示。

表 4-2 材料参数 (MPa)

E_1	E_2	ν_{12}	G_{12}	X_t	X_c	Y_t	Y_c	S	ν_{12}	g_{12}	g_{13}	g_{23}
131000	9000	0.307	5000	1600	1200	70	200	90	0.307	5000	5000	4500

4.2.3 装配

将定义好性能参数的三组复合材料层合板装配，装配好的部件如图 3-4 所示。

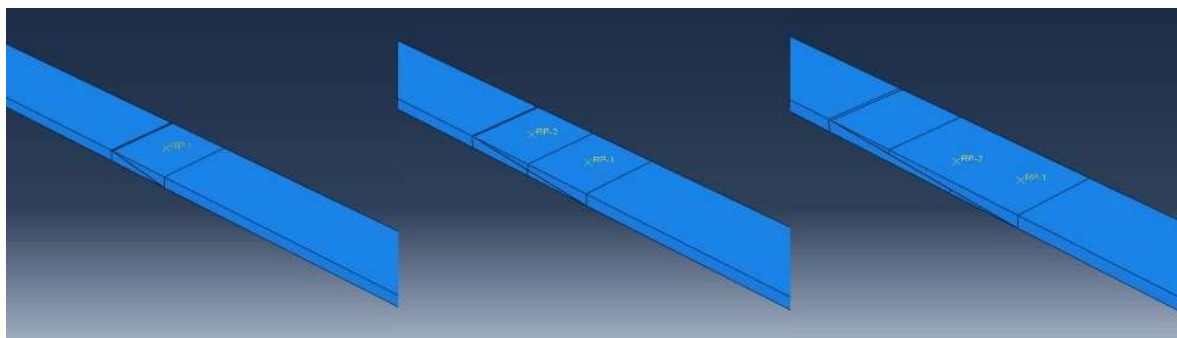


图 4-4 三组装配好的复合材料层合板

4.2.4 约束和加载

本次仿真是在两端固定，在搭接处施加压力载荷，来模拟仿真弯曲。

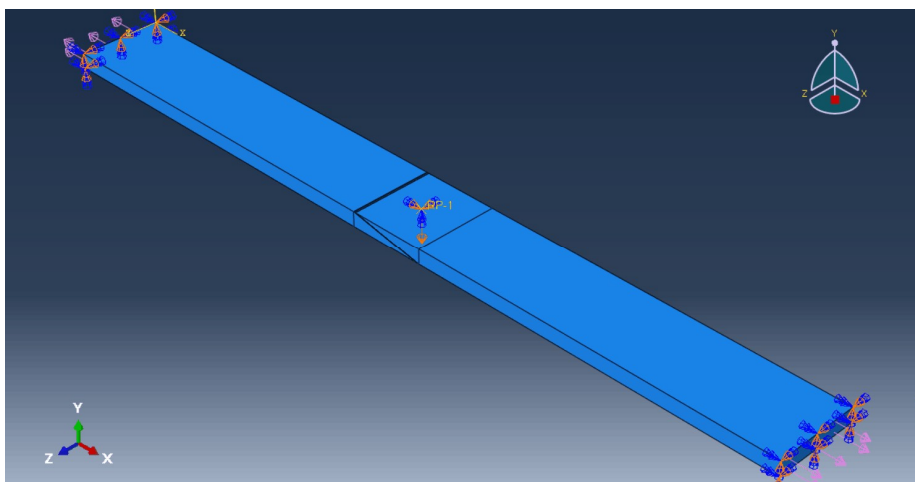


图 4-5 有限元分析模型的约束以及加载示意图

4.2.5 网格的划分

设定网格尺寸为图 4-6、4-7 所示，划分网格后如图 4-8、4-9、4-10 所示。

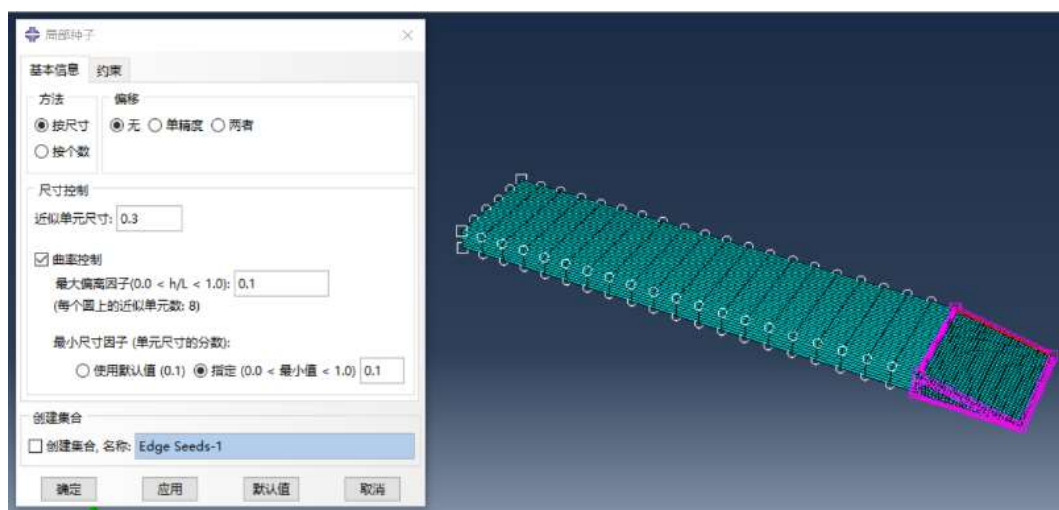


图 4-6 网格尺寸

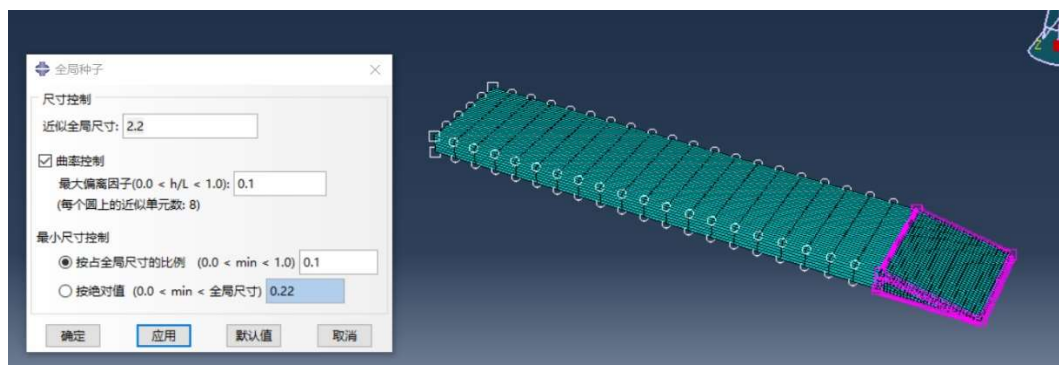


图 4-7 网格尺寸标准

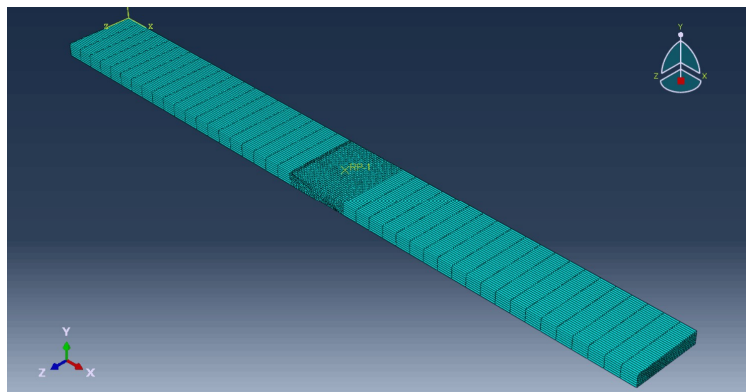


图 4-8 斜率 1/5

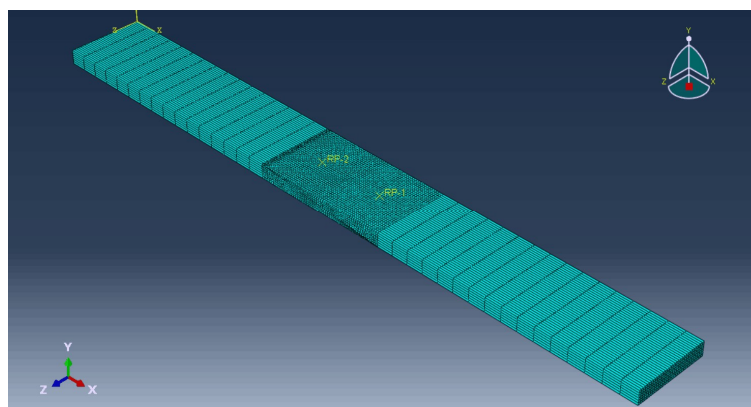


图 4-9 斜率 1/10

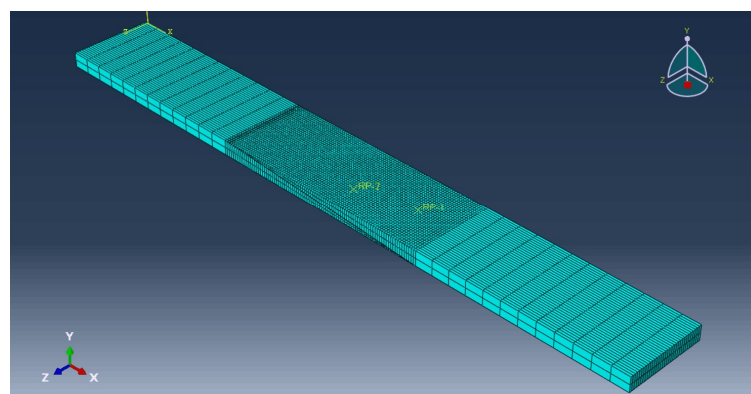


图 4-10 斜率 1/15

4.3 结果分析

本文采用 Hashin 准则来预测复合材料，其表达式如下：

纤维拉伸失效 ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (\text{式 4-1})$$

纤维压缩失效 ($\sigma_{11} < 0$):

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X^c}\right)^2 \quad (\text{式 4-2})$$

基体拉伸失效 ($\sigma_{22} \geq 0$):

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y^T}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\sigma_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (\text{式 4-3})$$

基体压缩失效 ($\sigma_{22} < 0$):

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S^T}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y^c}{2S^T}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y^c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S^L}\right)^2 \quad (\text{式 4-4})$$

式中, X^T 表示单层纵向拉伸强度, X^C 表示单层纵向压缩强度, Y^T 表示单层横向拉伸强度, Y^C 表示横向压缩强度, S^L 表示纵向剪切强度, S^T 表示横向剪切强度, α 为表征剪应力对于纤维拉伸失效的贡献系数, σ_{11} , σ_{22} , τ_{12} 分别表示有效应力张量分量, σ 用来评估损伤有效起始有效应力^[5]。

通过计算得到复合材料层合板的三组应力云图和载荷-位移曲线, 如下图所示。得到的结果如表 4-2 所示。

表 4-2 试验分析数据

	加载时间 (s)	位移 (cm)	所需载荷 (N)
A	0.9213	1.5	48
B	1.000	1.5	75
C	0.7268	1.5	200

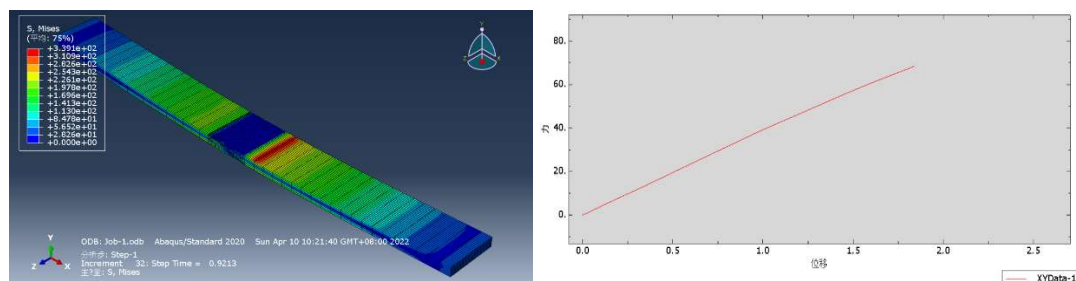


图 4-11 斜率 1/5

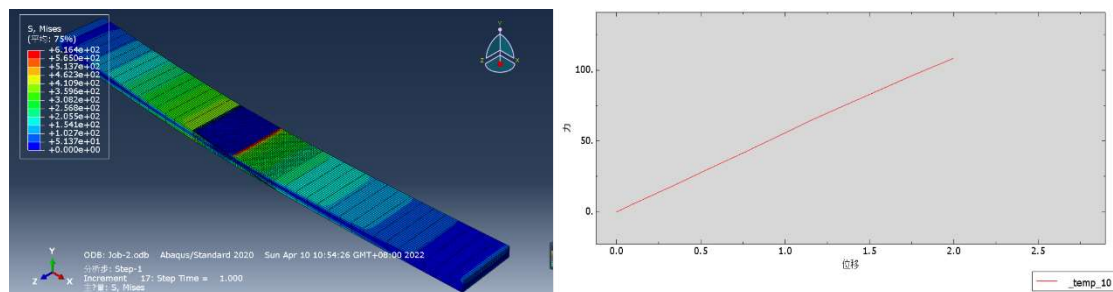


图 4-12 斜率 1/10

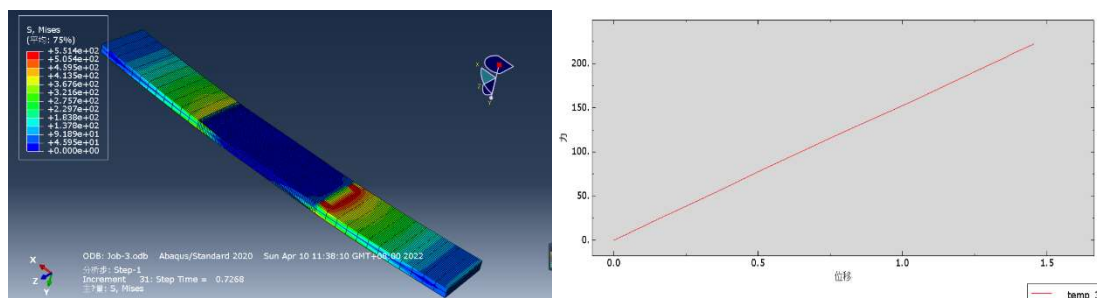


图 4-13 斜率 1/15

通过上述结果可以得到，在相同约束作用下，斜率越小的，造成相同位移所需要的力越大，由此可以得出，复合材料层合板连接的斜率越小，连接效果越好，抗弯性能更好。

4.4 本章小结

针对不同斜坡斜率连接的复合材料层合板对照组，通过 ABAQUS 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，使其在被弯曲相同位移的条件下，对比所需的力的大小，从而判断出最佳的工艺，即斜率越小，抗弯性能越好。

第五章 结论与不足

本文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，之后设立不同斜坡斜率的焊接方式，通过拉伸实验以及有限元仿真，揭示了不同斜坡斜率连接对 CF/PPS 复合材料层合板搭接处抗拉弯性能的影响规律，得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。

（2）拉伸实验中，得到的三组极限载荷分别为 3.414KN、4.475KN、5.580KN。通过对比可以明显看出，斜率越小，抗拉伸性能越好。

（3）ABAQUS 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，连接的斜坡斜率越小，所需要的力就越大，由此可判断出斜坡斜率越小的抗弯性能就越好。

（4）最后通过拉伸实验与有限元仿真分析可得，CF/PPS 复合材料层合板的焊接接头连接的斜率越小，其抗拉弯性能越好。

同时本文也存在些许不足，首先样板数量不够多，选择更多组数进行实验对比得到的结论更有说服力。其次在打磨过程中的工艺方式也可以进一步改进，此次打磨过程中会出现复合材料层合板因温度过高弯曲的现象，预想可以使用更精细的打磨设备或者减少单次打磨时间，改为多次短时的方式更好。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 纪朝辉,王宏洋,孙凌丰,路鹏程,王志平.PPS/CF 复合材料电阻焊接工艺及性能评价[J].焊接学报,2020,41(03):80-85+101.
- [4] 谢鸣九,主编.复合材料连接技术[M].上海交通大学出版社,2016.
- [5] 施建伟. 基于 ABAQUS 复合材料层合板渐进损伤有限元分析[D].中北大学,2015.
- [6] 孙洋. 碳纤维复合材料连接结构的强度分析及其影响因素[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [7] 施建伟. 基于 ABAQUS 复合材料层合板渐进损伤有限元分析[D].中北大学,2015.
- [8] 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.
- [9] 钱和平.基于神经网络铝基复合材料焊接接头力学性能分析[J].电焊机,2014,44(11):103-105+115.
- [10] 陶永强,矫桂琼,王波,常岩军.搭接长度对 Z-pins 增强陶瓷基复合材料接头连接性能的影响[J].材料科学与工程学报,2008(04):593-598.
- [11] 搭接长度对缝合连接三维编织复合材料弯曲性能的影响[C]//第十五届全国复合材料学术会议论文集(上册).,2008:441-444.
- [12] David A Steenkamer,John L Sullivan. On the recyclability of a cyclic thermoplastic composite material[J]. Composites Part B,1998,29(6).
- [13] Jenny H. Helicopter industry designs for composites[J]. High Performance Composites May/June 2000.
- [14] Deo R B, Starnes J H, Holzwarth R C. Low-cost composite materials and structures for aircraft applications. Presented at the RTO AVT Specialists' Meeting on "Low Cost Composite Structures", Loen, Norway, 2001.
- [15] Favoloro M R. Thermoplastic composites for aerospace[J]. Plastics In Aerospace, 2010, 7(3-4): 18-20

致 谢

转眼大学的四年生活已经接近尾声，这四年以来，感谢各位老师对我的教导与帮助，使我能顺利的完成学业。父母和朋友们的支持与理解成为我生活中克服困难的重要支柱。四年的学习生活中，有很多人给予了我帮助，是他们的鼓励给了我力量，使我的人生变得更加丰富。

感谢我的论文指导老师，从论文的开题报告到完成论文的撰写，每一步老师都会细心解答我的疑问。是老师指导了我的方向，是老师以认真的态度鼓励着我，使我在生活和学习上勇敢前行使我终身受益。同时，感谢四年以来我接触到的所有老师对我的关怀与指导。感谢陪我度过大学生活的同学和室友，四年来我们一起玩耍、学习、上课、考试，四年的时光马上就要过去，我们即将各奔前程，在此分开，祝愿大家都能找到心仪的工作，完成自己的梦想。感谢我的父母，父母是我们最坚强的后盾，感谢父母无私的爱与关怀。他们总是默默的支持与关心，给予我在生活中的容忍及包容。

衷心的感谢各位专家、学者在百忙之中，抽出宝贵的时间对本文进行评阅和审议！