



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

本科生毕业设计

铝合金 T 型接头设计及疲劳分析

Design And Fatigue Analysis Of Aluminum Alloy T-Joint

姓 名 祁振国
学 院 航空航天学院
专 业 飞行器制造工程
指导教师 宋宗贤
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

铝合金 T 型接头设计及疲劳分析

Design And Fatigue Analysis Of Aluminum Alloy T-Joint

姓 名 祁振国
学 院 航空航天学院
专 业 飞行器制造工程
指导教师 宋宗贤
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	宋宗贤
专 业	飞行器制造工程		技术职务	中级
题目名称	铝合金 T 型接头设计及疲劳分析			
题目类型	自拟	题目来源	生产实际	
课题来源、背景及意义	<p>航空产业的发展对航空材料的性能要求不断提高。一方面，提高推重比和涡前温度、减少压气机和涡轮级数使得叶片承受的载荷不断提高、工况更加恶劣；另一方面，对飞机安全飞行时间提到前所未有的高度。不断提高的飞行寿命指标，致使大部分重要航空结构和关键部件的疲劳问题跨入一个崭新的领域，也就是所谓的超长寿命阶段。因此有必要对飞机结构中的铝合金 T 型连接工艺进行优化设计及疲劳分析。</p>			
任务及要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 制订研究方案。 2. 准备实验材料，对试验设备和试验方法进行学习和深入了解。 3. 进行试验，对实验所得数据进行详细记录。 4. 结合相关参考文献，分析实验数据及机理。 5. 撰写论文。 			
工作条件	焊接设备及高频疲劳试验机。			
知识与能力要求	掌握铝合金的基本知识，焊接工艺的基础知识，三维制图能力及有限元分析能力。			
系（教研室）审查意见：				
负责人(签名)： _____ 年 月 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：铝合金 T 型接头设计及疲劳分析

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：祁振国

学 号：18414020224

起止日期：2021 年 12 月 3 日~2022 年 6 月 3 日

指导教师：宋宗贤

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

铝合金厚板作为航天航空用材料具有很好的综合性能，是公认理想的材料。由于其无磁性，材料轻，耐低温的特点，铝合金 T 型接头得到了很大的应用。随着焊装机器人的推广，焊装工艺在机械领域得到了很大的发展。相比于整体壁板焊装壁板的特点体现在，材料可以得到最大程度的使用，节约了整体空间，使零件制造领域成本得到降低。正是由于焊装工艺的推广及其优点，在现代民用飞机得到了广泛的应用。

航空产业的发展对航空材料的性能要求不断提高。一方面，提高推重比和涡前温度、减少压气机和涡轮级数使得叶片承受的载荷不断提高、工况更加恶劣；另一方面，对飞机安全飞行时间提到前所未有的高度。不断提高的飞行寿命指标，致使大部分重要航空结构和关键部件的疲劳问题跨入一个崭新的领域，也就是所谓的超长寿命阶段。因此有必要对飞机结构中的铝合金对接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

(1) 制订研究方案。

在对铝合金 T 型接头设计了解的基础上，制定可行、科学的研究方案。

(2) 准备实验材料，对试验设备和试验方法进行学习和深入了解。

根据方案准备相应的实验材料，对实验设备进行初步的了解，然后在组内讨论进一步的试验方法并进行学习和深入了解。

(3) 进行试验，对实验所得数据进行详细记录。

利用高频疲劳试验机进行试验，在实验后对实验数据进行详细记录。

(4) 结合相关参考文献，分析实验数据及机理。

结合记录的实验数据及相关资料，绘制 S-N 曲线进一步了解实验机理。

(5) 撰写论文。

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):

毕业论文一套

4. 推荐参考资料:

- [1] 孙澜江, 张抒夏, 杨睿 & 辛勇.(2020).铝合金钻杆在国内外的研究及现场应用. 西部探矿工程(10), 49-52. 秦国锋, 那景新, 慕文龙, 谭伟, 刘浩垒.GFRP/铝合金和铝合金/铝合金粘接接头失效对比研究[J].汽车工程, 2019, 41(05):599-606.
- [2] 陈硕琛, 李光耀, 崔俊佳.表面处理对车身用 5182 铝合金接头胶粘性能的影响[J].汽车工程, 2018, 40(07):865-870.
- [3] 刘微.激光搭接焊不锈钢/铝合金接头组织与性能研究[D].吉林大学, 2014.
- [4] 黄湘龙.7A85 铝合金航空接头等温锻造组织演变模拟与实验研究[D].中南大学, 2013.
- [5] 徐晓波.激光—电弧复合焊接 7075-T6 铝合金接头的疲劳断裂特性[D].合肥工业大学, 2013.
- [6] 赵勇, 付娟, 张培磊, 严铿, 蒋成禹.焊接方法对 6061 铝合金接头性能影响的研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版), 2006(01):90-94.
- [7] 刘晓莉, 冯梓宁, 于华宽, 高飞.5083 铝合金 T 型接头焊接残余应力分布及超声冲击处理工艺研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(02):30-35.
- [8] 李文晓, 徐晓霞, 杨国舜, 吉华, 范美华, 胡霞.搅拌针直径对 5083-O/6082-T6 铝合金 FSW T 型接头组织及性能的影响[J].轻合金加工技术, 2020, 48(11):55-60.DOI:10.13979/j.1007-7235.2020.11.012.
- [9] 李志强.基于 Sysweld 的 6061 铝合金 T 型接头热力耦合模拟[J].金属世界, 2020(04):20-24.
- [10] L.M.Lobanov,M.O.Pashchyn,O.L.Mikhodui,P.V.Goncharov,M.Sydorenko,P.R.Ustymenko.Influence of the Accompanying Heating on the Efficiency of Electrodynamic Treatment of Al-Mg Alloy Welded Joints[J].Strength of Materials, 2021(prepublish):
- [11] Zhang Huijing Zhao Xiaohui Liu Yu.Effect of high frequency impacting and rolling on fatigue crack growth of 2A12 aluminum alloy welded joint[J].International Journal of Fatigue, 2021,147:
- [12] Abima C.S,Akinlabi S.A.Madushele N,Fatoba O.S,Akinlabi E.T.Mechanical and Microstructural Properties of MIG Welded Aluminium Alloy[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2021,1107(1):

所在专业审查意见：

负责人： _____

2021年12月16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：铝合金 T 型接头设计及疲劳分析

学 院：航空航天大学

专 业：飞行器制造工程

学生姓名：祁振国

学 号：18414020224

起止日期：2021 年 12 月 3 日~2022 年 6 月 3 日

指导教师：宋宗贤

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）

铝合金厚板作为航天航空用材料具有很好的综合性能，是公认的理想材料。由于其无磁性，材料轻，耐低温的特点，铝合金 T 型接头得到了很大的应用。随着焊装机器人的推广，焊装工艺在机械领域得到了很大的发展。相比于整体壁板焊装壁板的特点体现在，材料可以得到最大程度的使用，节约了整体空间，使零件制造领域成本得到降低。正是由于焊装工艺的推广及其优点，在现代民用飞机得到了广泛的应用。

航空产业的发展对航空材料的性能要求不断提高。一方面，提高推重比和涡前温度、减少压气机和涡轮级数使得叶片承受的载荷不断提高、工况更加恶劣；另一方面，对飞机安全飞行时间提到前所未有的高度。不断提高的飞行寿命指标，致使大部分重要航空结构和关键部件的疲劳问题跨入一个崭新的领域，也就是所谓的超长寿命阶段。因此有必要对飞机结构中的铝合金对接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。

二、 进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2022. 2. 5-2022. 2. 20	(1) 搜集资料，明确选题方向，并提交任务书	(1) 完成任务书的撰写
2022. 2. 21-2022. 3. 4	(2) 构思并撰写开题报告，并善后提交	(2) 提交开题报告
2022. 3. 5-2022. 3. 28	(3) 进行课题实验并记录实验数据	(3) 完成论文所需的实验及数据
2022. 3. 29-2022. 4. 3	(4) 整理实习日志，进行实习总结，撰写并提交实习报告	(4) 实习工作总结
2022. 4. 3-2022. 4. 9	(5) 完成开题答辩及毕业论文初稿	(5) 初步定稿
2022. 4. 10-2022. 4. 12	(6) 补充、修改并提交论文初稿	(6) 完善毕业论文
2022. 4. 13-2022. 4. 20	(7) 依据导师的指导，修改论文，完成并提交二稿	(7) 轻微改动毕业论文
2022. 4. 21-2022. 4. 30	(8) 完善论文并提交终稿	(8) 完成毕业论文终稿
2022. 5. 1-2022. 5. 10	(9) 准备毕业论文答辩材料，准备答辩	(9) 答辩准备充分，一次通过
完成课题的现有条件	(1) 高频试验机、ABB 焊接机器、高温合金试验模块、精密测量器、试验样品专用夹具人等相关仪器设备； (2) 国产镍基合金、焊接工艺金属、高低碳钢、铝合金等实验所需相关材料； (3) 掌握 CATIA、SolidWorks、AutoCAD 等工程制图软件；	

指导教师 意见	指导教师： _____ 年 ____ 月 ____ 日
开题答辩 小组意见	组 长： _____ 年 ____ 月 ____ 日

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：所提交的学位论文，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：祁振国

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。

学位论文指导教师签名：

年 月 日

摘 要

飞机工业的发展对飞机材料的性能要求日益提高。一方面,由于增加的推重比和涡前温度、并且降低压气机和涡轮引擎级数,导致叶片所承受的载荷进一步增加、工况也越来越糟糕;另一方面,对飞机安全航行时间也提出了前所未有的高度。不断提高的飞行寿命指标,致使大部分重要航空结构和关键部件的疲劳问题跨入一个崭新的领域,也就是所谓的超长寿命阶段。因此有必要对飞机结构中的铝合金对接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。

本文主要通过研究飞机铝合金 T 型接头,以及研究飞机铝合金连接构件,并利用 ABAQUS 软件,对系统进行结构建模与疲劳的研究。通过调整电流大小可发现焊缝后最大应力分布于焊缝趾部,从焊缝部位的拉应力双向逐渐转化为最大压应力。而随着焊接电压的增加后焊接部位的拉应力也逐步增加,焊接电流 100A 的拉应力最小,焊接电流 140A 的拉应力最大,并具有随着电流变化后大应力逐渐增加的趋势。选择电流时不易过大也不宜过小,电流太大会出现焊穿焊接板情况。焊缝速度为 15mm/s 的焊接处拉应力最大,焊缝速度为 10mm/s 时焊接拉应力最小,但随着焊缝速度的提高拉应力也增加。从三组应力云图看出焊接所受到拉应力,由焊缝中心向两边扩散,应力逐渐减少。焊缝处的负位移,以速度为 10mm/s 的焊缝位移最大,而速度为 15mm/s 的焊接位移最小。从焊缝双向分散,位移逐渐降低。通过应力变化和厚度方向位移变化的对比,焊缝速度 13mm/s,而焊缝电流为 120A 是较为理想的焊接参数。

关键词: T 型接头; ABAQUS; 建模; 受力分析

Abstract

With the development of aircraft industry, the requirement of aircraft material performance is increasing day by day. On the one hand, the increased thrust-to-weight ratio and prevortical temperature, as well as the decrease of compressor and turbine engine stages, lead to the further increase of blade load and worse working conditions, the SAFE flight time of the aircraft has also been raised to an unprecedented height. The increasing flight life index has led the fatigue problem of most important aviation structures and key components into a new field, the so-called super-long life stage. Therefore, it is necessary to optimize the process design and fatigue analysis of Aluminum Alloy Butt joint in aircraft structure.

In this paper, the aluminum alloy t-joint and the aluminum alloy joint of the aircraft are studied, and the software ABAQUS is used to study the structural modeling and fatigue of the system. By adjusting the current, it can be found that the maximum stress is distributed at the weld toe, and the tensile stress changes to the maximum compressive stress gradually. With the increase of welding voltage, the tensile stress of welding area increases gradually, the tensile stress of welding current 100A is the smallest, the tensile stress of welding current 140A is the largest, and the large stress increases gradually with the change of welding current. Select the current is not easy to too large should not be too small, too large current will occur through the welding plate. The tensile stress is the largest at the weld velocity of 15mm/s, and the smallest at the weld velocity of 10mm/s, but the tensile stress increases with the increase of the weld velocity. From the three groups of stress nephograms, it can be seen that the tensile stress is diffused from the center of the weld to the two sides, and the stress decreases gradually. The negative displacement of the weld is the largest at the velocity of 10mm/s, and the smallest at the velocity of 15mm/s. From the Weld bi-directional dispersion, the displacement gradually reduced. By comparing the change of stress and Thickness Direction Displacement, the weld velocity is 13mm/s, and the weld current is 120A, which is an ideal welding parameter.

Keywords: T-joint; ABAQUS; Modeling; Force analysis

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究现状及发展趋势	1
1.3 本文研究内容	2
第二章 材料与方法	3
2.1 材料简介	3
2.2 焊接技术	3
2.3 疲劳分析简介	5
第三章 焊接温度场模拟	6
3.1 ABAQUS 软件介绍	6
3.2 有限元模拟	6
3.3 不同焊接工艺参数对比	15
3.4 结论	18
第四章 静载与疲劳分析	20
4.1 静载荷分析	20
4.2 疲劳分析	22
4.2.1 材料定义	22
4.2.2 应力循环	23
4.2.3 求解	23
4.3 本章小结	24
第五章 结论	25
参考文献	26
附 录	27
致 谢	29

第一章 绪论

1.1 引言

铝合金厚板作为航天航空材料具有不错的综合性能，是公认的理想材料。由于其无磁性，材料轻，耐低温的特点，铝合金 T 型接头得到了很大的应用。随着焊装机器人的推广，焊装工艺在机械领域得到了很大的发展。相比于整体壁板焊装壁板的特点体现在，材料可以得到最大程度的使用，节约了整体空间，使零件制造领域成本得到降低。正是由于焊装工艺的推广及其优点，在现代民用飞机得到了广泛的应用。

飞机工业的发展对飞机材料的性能要求日益提高。一方面，由于增加的推重比和涡前温度、并且降低压气机和涡轮引擎级数，导致叶片所承受的载荷进一步增加、工况也越来越糟糕；另一方面，对飞机安全航行时间也提出了前所未有的高度。不断提高的飞行寿命指标，致使大部分重要航空结构和关键部件的疲劳问题跨入一个崭新的领域，也就是所谓的超长寿命阶段。因此有必要对飞机结构中的铝合金对接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。

1.2 研究现状及发展趋势

对于钢结构，T 接头的性能已经非常的成熟，有大量关于 T 行接头技术的实验数据，不少结果都已作为世界各国的技术标准。目前，国外对铝合金 T 行连接的研究主要聚焦在较复杂的方面，如疲劳特性等。由于铝合金的动力学特性一般与钢材不同，而 T 型接头的损伤方式则与连接的机械特性有关，因此铝合金 T 型接头的损伤方式也较为复杂。

国内对于铝合金研究起步晚，目前关于铝合金连接方式的研究进展缓慢。目前国内有比较少的关于铝合金 T 形连接的研究数据分析与实验资料整理，但因为实验结果太少，未能在可靠性方面给出适用国产铝合金框架的比较准确的设计方式。2006 年，张贵详、石永久等人利用有限元参数分析，研究了对铝合金 T 形连接撬力的影响因素。其研究所使用的有限元模型为文献三的一致模式，并由国外钢结构相关实验数据进行了证明^[1]。2007 年，李静斌、张其林等人利用对铝复合的双 T 形中心受拉螺钉群结点中的撬力问题做出了理论分析，并利用对 17 个 T 形螺钉群的联接实验完成单向拉伸测试，从而证明了铝复合双 T 形结点的强度设计能够采用欧洲钢结构标准的设计方法。

国内外对于铝合金 T 行接头的研究成果还主要限于数值分析上，而在将来国内外关于铝合金 T 型接头的研究成果还将更多的运用到航空，冶炼和建筑领域^[2]。目前航空领域对铝合金材料的需求主要集中在高强度的 2XXX 和 7XXX 系合金，以及密度较低的铝锂合金。中国铝业集团有限公司下属的铝加工企业、北京航空材料研究院、有研科技集团有限公司和中南大学等开发了超高强铝合金、高纯高损伤容限铝合金、铝锂合金和稀土铝合金等，并以此为基础开发了 2124-T351、2024-T851、2024HDT 板材，7050/2124 超宽超厚板，7B50-T7751 厚板，7A55-T7751 厚板，2A97 铝锂合金薄板及型材，2297 铝锂合金厚

板等产品，实现了多种产品的国产化^[3]。开发出高强高韧低淬火敏感性 7A85 锻件，实现批量应用，填补了国内空白。西南铝业（集团）有限责任公司研制出的 10m 整体环件，连续刷新了铝合金整体环件的世界记录。

结合我国实际情况与我国铝合金领域所遇瓶颈，提出以下中期发展目标：到 2030 年，高性能铝合金材料达到国际先进水平，部分达到国际领先水平，材料综合力学和工艺性能满足现代制造业指标要求，实现航空飞行器、新能源汽车、轨道交通和厢式货车等领域的大规模应用，第五代铝合金国产化率达到 80% 以上，航空用轻合金产量和应用达到 $2 \times 10^5 \text{t/a}$ ，汽车运输用轻合金产量达到 $3 \times 10^5 \text{t/a}$ ^[4]。长期发展目标：到 2035 年，铝合金材料达到国际领先水平，实现绝大部分铝合金材料的自给和输出，领导全球铝合金产业的发展。第五代铝合金全面国产化，研制成功第六代铝合金，空天轻合金产量和应用达到 $3 \times 10^5 \text{t/a}$ ，汽车运输用轻合金达到 $4 \times 10^6 \text{t/a}$ ^[5]。

1.3 本文研究内容

本文主要使用 Abaqus 软件对铝合金薄板的焊接过程进行模拟仿真，首先使用软件进行建模，创建材料属性分析布，外部载荷和划分网格，在作业中通过子程序完成对铝合金薄板的温度场模拟和焊接应力变化。最后通过子程序 Fe-safe 软件进行静载分析和疲劳分析。

- (1) 使用 Abaqus 对铝合金进行建模；
- (2) 进行温度场模拟和应力场模拟；
- (3) 使用 Abaqus 进行静应力分析；
- (4) 使用 Abaqus 子软件 Fe-safe 进行疲劳分析。

第二章 材料与方法

2.1 材料简介

以铝合金为基础加入大量的合金化成分的材料,属于轻金属的一种。铝合金材料除了具备铝合金的普通特点以外,随着所使用合金化元素的品种和量的不同,还具备很多合金的具体特点。铝合金材料的比密度范围为 $2.63\sim 2.85\text{g/cm}^3$, 具有很大的比硬度(σ_b 为 $110\sim 650\text{MPa}$), 比硬度超过高级合金钢, 比强度高于普通钢材, 具有优异的铸造能力和塑性加工能力, 优异的导电、导热性能, 优异的耐蚀性和可焊性, 可当作结构复合材料应用, 在交通、航天、建材、机械、工业轻化等领域都具有很大的应用性^[6]。

本课题实验所采用的材料为 2A12 铝合金。

(1) 2A12 铝板为 CU-Mg 系列的抗腐蚀铝板, 2A12 铝板具有腐蚀稳定性, 在退火和挤压状况下塑性尚好; 应用氩弧焊的焊缝气密性和点焊塑性尚可。2A12 铝板的力学性能: 条件下屈服抗拉强度为 $\sigma_{0.2}(\text{MPa})\geq 160$ 优异的抗腐蚀特性使 2A12 合金普遍地作为海事用途如造船, 包括车辆、航空焊接件、地铁轻轨运输系统, 还有要求严格防爆的压力容器、冷却设备、电视塔、钻井装置、交通设施、导弹零件、装甲等。

(2) 2A12 是铜镁合金, 其主要化学成分如表 2-1 所示。

表 2-1 2A12 铝合金化学成分

元素	Al	Si	Cu	Mg	Zn	Mn	Fe	Cr
含量	余量	$0<0.5$	$3.8\text{-}4.9$	$1.2\text{-}1.8$	<0.15	$0.3\text{-}0.9$	<0.5	<0.1

(3) 2A12 铜镁合金, 其主要力学性能如表 2-2 所示。

表 2-2 2A12 力学性能

密度	比热容	体膨胀系数	抗拉强度	延伸率	硬度
$\rho(\text{kg/m}^3)$	$C(\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{k}))$	$\beta(\text{m}^3/(\text{m}^3\cdot\text{K}))$	$\sigma_b(\text{MPa})$	$\sigma(\%)$	HV
270	850	66.0×10^{-6}	430	15	135

2.2 焊接技术

焊接是应用在很多领域的连接方式, 航空航天领域在很多的方面也应用了焊接技术。本文中则应用钨极氩弧焊法(TIG 焊)。通过这种焊接方式可以把各种材质、造型、构造与性能的零件连接成复杂的, 适应了整体生产的需要, 并能节约物料, 提升制造质量。在飞行器、发动机以及宇宙飞船的开发中, 焊接工艺已成为主要工艺方式之一。

图 2-1 是焊接技术的不同焊接技术体系:

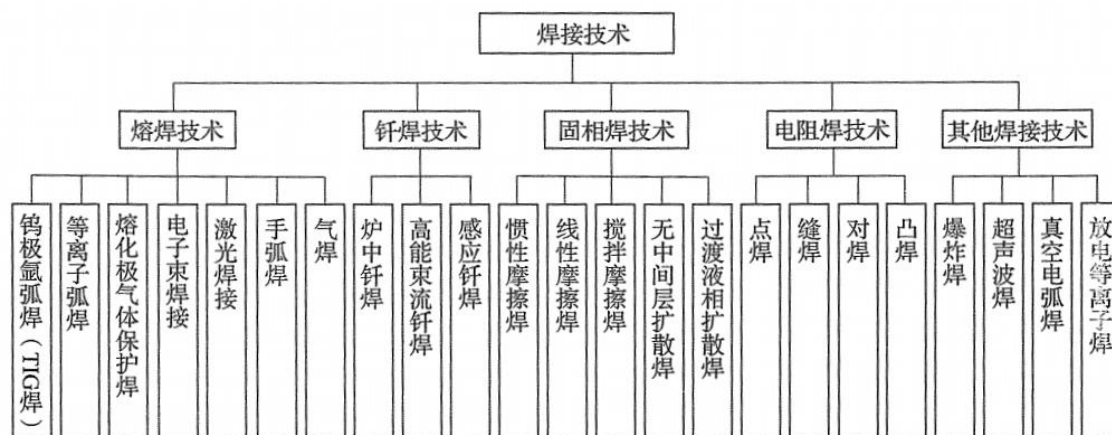


图 2-1 焊接技术体系图

对于每一种焊接方法，按其方法的实施全过程，又包含：焊接冶金和材料可焊性、焊接材料、焊接工艺和过程机理、焊接过程信号检测和分析、焊接过程自动化、焊接过程模拟和仿真、焊接应力和变形控制、焊接质量检测、焊接结构完整性评定、焊接装备等。

(1) 钨极氩弧焊

钨极氩弧焊法(TIG 焊)是一种广泛使用的利用对焊接电极加热的熔焊方式。该方式运用钨棒当作非熔化电极，采用外加气体作防护介质，其优势是对焊接电极与熔池之间的热可见性较好，而且动作简便，一般没有渣块或熔渣量很少，不需要在焊接后清渣，因此适合不同情况焊接。目前制造中，大多采用氩元素或氦元素的气体当作防护废气的主要成份。其中，以采用氩元素为主要防护废气成份的钨极氩弧焊术，在飞机制造领域中应用最普遍。

钨极氩弧焊是采用不熔融的高温钨合金棒为电极，在氩元素层流保存下，通过在钨棒和工具中间产生的电弧热能，来熔化母材和焊丝而构成焊缝接头的一类焊接方式。

- 1) 氩气使惰性气体有很强的稳定性，可以保证焊丝和焊接金属在焊接时的完整性；
- 2) 电弧燃烧时的稳定性，加热时热量非常集中，焊件变形不可视；
- 3) 焊丝的载流能力有限，一次性焊不透金属板。

(2) 接头形式

在钨极氩弧焊接中经常使用的接头方式有：T 字形、对接、搭接和平接。本文中使用的钨极氩弧焊的 T 形接头。影响焊接接头性能的因素分为两个方面：力学方面，接头形状没有规则；焊接有很多的缺陷；焊接完成后应为热胀冷缩导致材料变形。材料方面，加热会使材料变形；焊接过程中的会使材料性能产生变化；焊后热处理和纠正变形工序对接头性能影响^[7]。

(3) 焊缝特点

钨极氩弧焊接中焊缝金属通常是由焊缝材和部分母材进行熔融冷凝后产生的焊接组织，它从母材开始垂直于等温线方向逐渐结晶并长大的，其特性受焊缝方式，板厚，焊缝工艺参数的限制：①焊缝金属性能与焊接层数有关，其中单层焊缝中为常见柱状晶，但多层焊缝中前一层焊的柱子晶因后焊层中受热影响而转变为较小颗粒，故多层焊焊缝金属

动力学性能比单层焊缝好^[8]。②焊缝金属特性与焊接方式及参数关系有关，用较少的电流进行焊接后，随着冷却的增加则焊接金属硬化，温度增大，弹性变差；焊前由于预热温度过高或线能量过高，冷却缓慢，金属颗粒变粗，而硬度和弹性也会降低。

2.3 疲劳分析简介

(1) 疲劳的定义

在材料或构件遭受多次重复不同的压力影响后，内部应力变化虽然也不会高于材料的强度极限，甚至比强度极限还小的前提下也会引起损伤。这种在高交变载荷作用下对物质以及构件的损伤现象，被称为疲劳损伤。

(2) 疲劳破坏的特征

材料力学主要是通过静力特性测试，来判断建筑材料的基本机械(比如弹力限制、屈服限制、强度限制)的，因为这种力学性能反映不了金属材料在交变载荷的特点。所以，在交变载荷正常工作的飞机结构，如果不懂得根据实际来设计，那么现实中的结果也并不如意。

(3) 确定疲劳寿命的方法

应力寿命方法应用在应力水平方面。不适合用在塑性材料的部件上，这种疲劳的精确不好，但是这种方法最容易有丰富的数据库而且在疲劳周期大的实验中应用十分广泛；应变寿命可以对局部的塑性变形进行详细的介绍分析，适用在疲劳周期少的实验中，但是也存在结果不确定的缺陷；线性弹性破坏力学这种方法假定存在一条被检测的裂缝，增加应力大小推测到裂痕会变长，使用计算机检测，对于大型的结构很实用。^[9]

(4) 提高疲劳寿命的方法

延缓疲劳裂纹的产生时间，可以加强金属表面，提高金属材料的纯净度，减少夹杂物的含量提高零件的完整性设计水平，避免应力集中的现象，都可以起到延缓疲劳裂纹的产生时间；降低裂纹的扩展速度，在裂纹处应用局部增多有效截面或者增添金属条降低应力水平的方式来达到阻止裂纹的产生和扩展。^[10]

第三章 焊接温度场模拟

3.1 ABAQUS 软件介绍

ABAQUS 是一个功用巨大的工程建模问题的有限元软件系统，它能够处理的提问区域从相比于单纯的线形问题分析到一些更繁杂的非线性计算提问。ABAQUS 还包含了一个功能丰富的、能够构建自由几何形体的基本单元库。它具有各种各样的材料模型库，还能仿真典型建筑材料的特性，其中涉及金属材料、橡胶、高分子材料、复合材料、钢筋大直径混凝土、高压超弹性发泡材料以及土地与岩体结构等地质材料，而成为通用性的建模工具，ABAQUS 不仅仅具有处理大规模构件(应力/位移)提问，还具有仿真一些工程技术应用领域的众多实际问题。

3.2 有限元模拟

温度场计算结果利用了双椭球热源形状，并使用了 Fortran 语句进行子程序增加热源。图 3-1 中是双椭球热源模型。根据观测焊接过程中的电弧形态，在本文计算结果中假设双椭球的前半轴齿轮与后半轴套管相同，则为 $C_1=C_2$ 。式 3-1 即为计算结果中使用的双椭球热源热流密度分布。

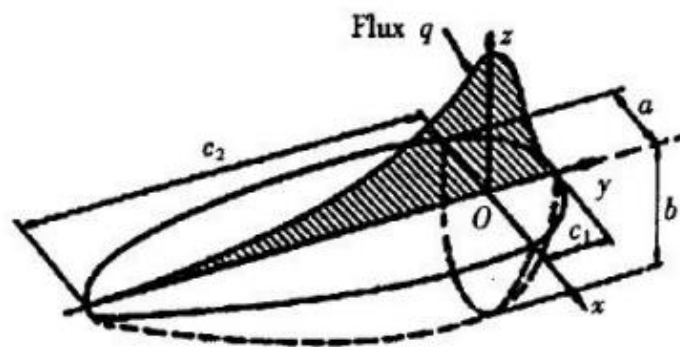


图 3-1 双椭球热源模型

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \times e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3(z-vt)^2/c^2} \quad (3-1)$$

其中 $Q=UI\eta$ ， U 是焊接电压， I 是焊接电流， η 是焊接效率， a ， b ， c 是热源形状参数， v 是焊接速度， t 是时间。本文计算中选定 $a=5\text{mm}$ ， $b=4\text{mm}$ ， $c=7\text{mm}$ ， $v=5.0\text{mm/s}$ 。热源效率为 0.8。热源施加通过在 Load 模块，在 step-1 中定义载荷，分布类型设置为 user-defined，然后在 Job 模块里设置编 General 选项，读入双椭球热源的 Fortran 子程序^[11]。

(1) 模型创建

在“部件”界面创建模型，焊接试件尺寸 200mmx100mmx2mm 和 120mmx100mmx2mm 两块平板组成^[12]。（如图 3-2 所示）

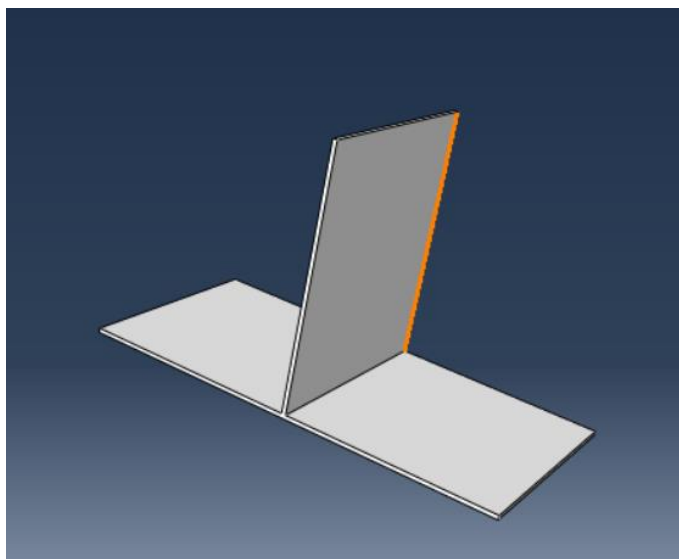


图 3-2 模型尺寸

1) 在属性板块管理器创建一个新的材料 2A12，找到相应的弹性模量、屈服强度、热膨胀系数、热导率、比热将 2A12 在“属性创建材料”中输入，弹性、比热、膨胀、塑性选择使用与温度相关的数据。（如图 3-3 所示）在左侧的树中选择部件右击，选择“编辑属性”输入绝对零度-273.15 和玻尔兹曼常数常数 5.67E-08。（如图 3-4 所示）

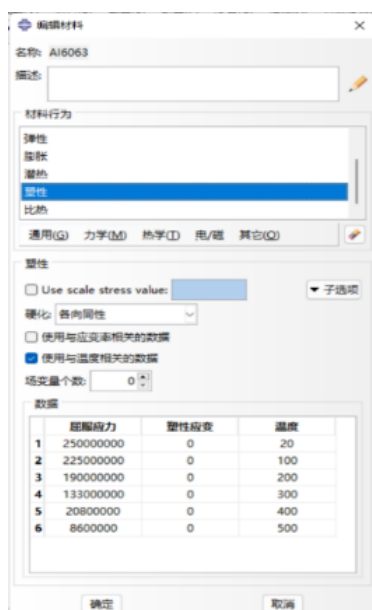


图 3-3 2A12 铝合金材料参数设置

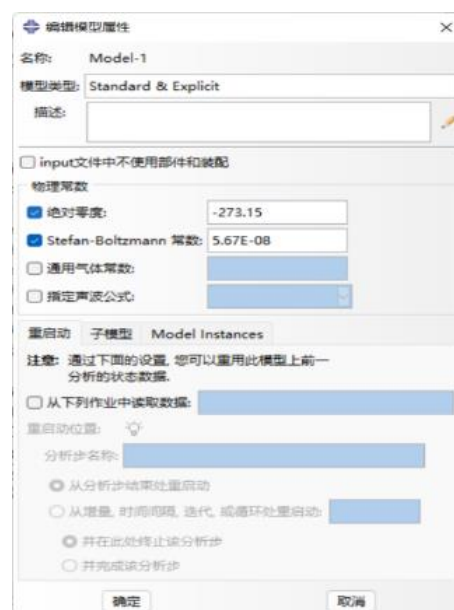


图 3-4 模型属性设置

2) 在创建界面创建一个界面，选择“实体”-“均质”再选择创建的 2A12 材料库，选择创建的模型则赋予 2A12 铝合金相应材料。

3) 在“装配”界面下，选择“部件”中的“Part-1”。并在“装配”界面下选择“平移实例”“旋

转实例”，调节 x 轴坐标为移动方向、y 轴垂直焊缝方向、z 轴厚度方向。（如图 3-5 所示）

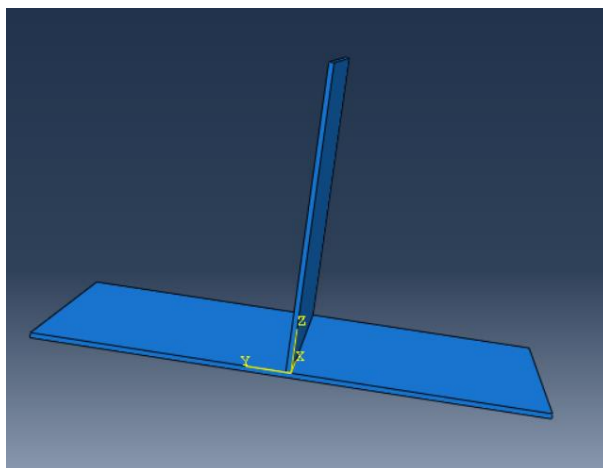


图 3-5 旋转后模型

4) 在“分析步”界面下，选择“创建分析步”选择创建“heat”类型选择“温度-位移耦合”瞬态时间长度为 20s，设置焊接速度为 5mm/s。（如图 3-6 所示）在创建“cool”程序瞬态时间长度为 600s。（如图 3-7 所示）

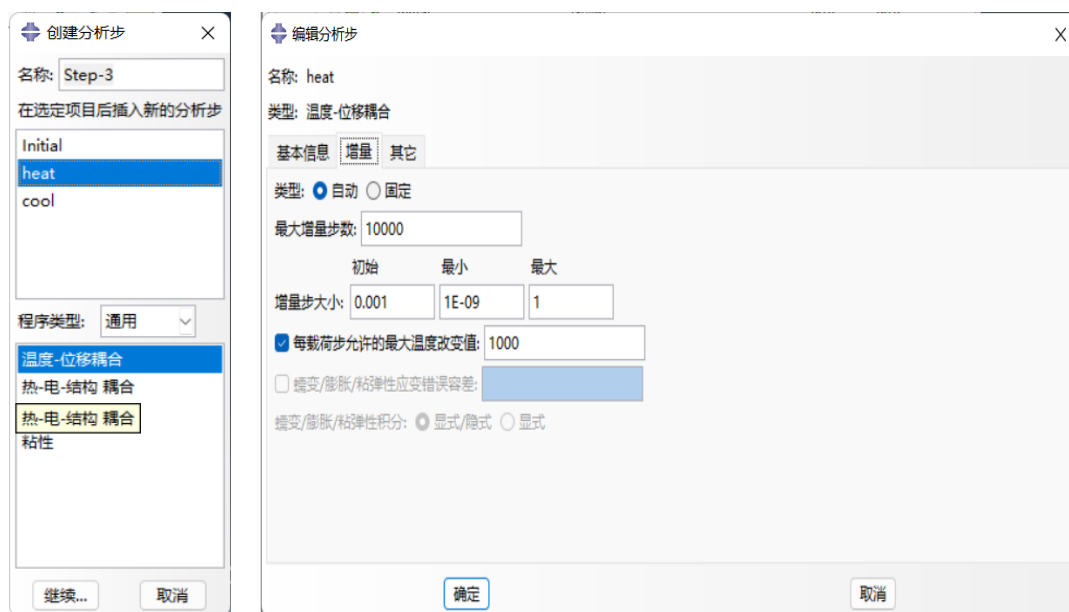


图 3-6 加热步

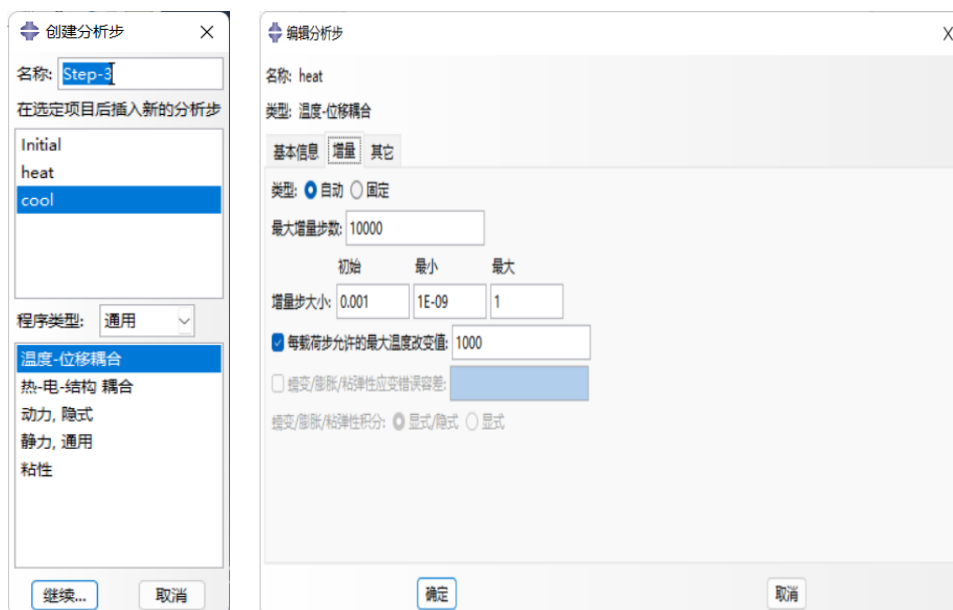


图 3-7 冷却步

5) 在相互作用模块创建辐射和对流。创建辐射“int-radiation”分析布为 heat，分析步类型选择“表面与表面接触 (Standrad)”，发射率为 0.85，环境温度为 20。(如图 3-8 所示) 创建对流“int-film”分析布为 heat，分析步类型选择“表面与表面接触 (Standrad)”，膜层散热系数为 20，环境温度为 20。(如图 3-9 所示)

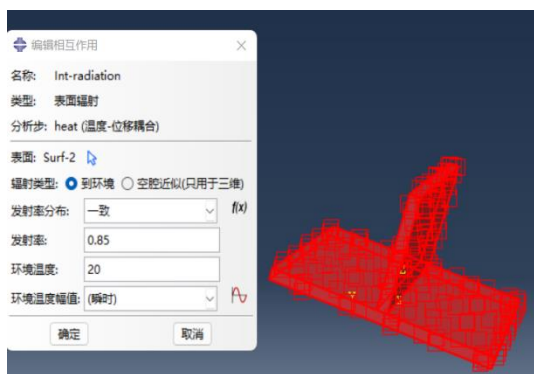


图 3-8 辐射图

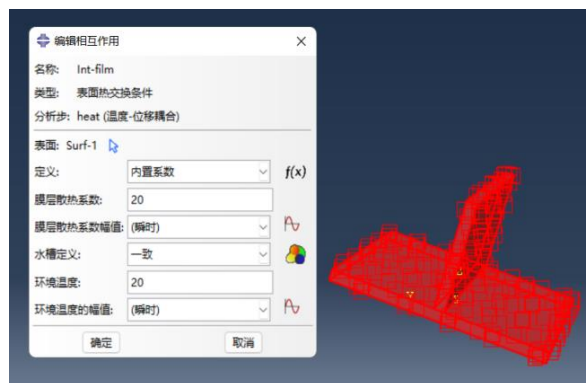


图 3-9 对流图

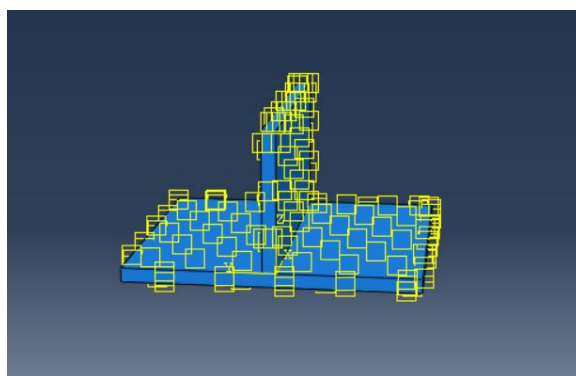


图 3-10 创建完成相互作用辐射与对流

6) 在载荷中创建载荷 Load-weld, 在分析布 Heat 中, 选择“热学”-“体热通量”。选择用户定义大小为 1。(如图 3-11 所示)

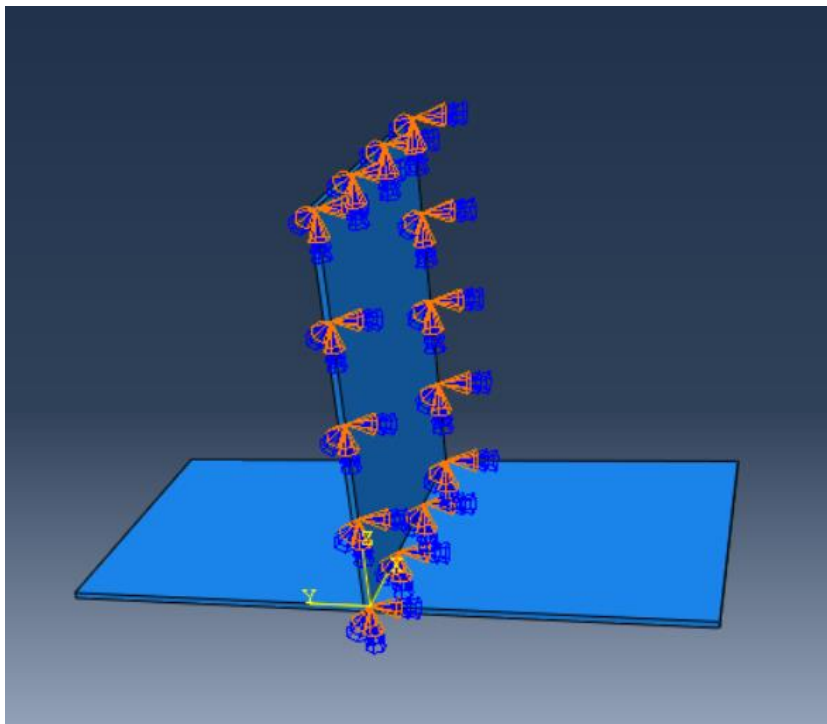


图 3-11 创建载荷

创建边界, 分析布为“Heat”类型为“力学”分析布的类型为“位移转角”, 选择合适的边为边界条件, 选择“U1\U2\U3”代表 x、y、z 三个方向位移固定。(如图 3-12 所示)

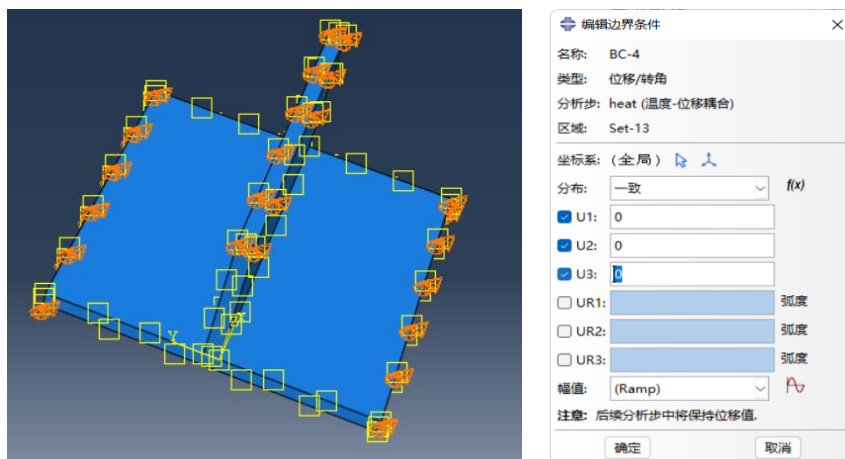


图 3-12 创立边界条件

创建定义温度场, 在预定义中创建一个预定义场从初始步 Initial, 选择“其他”“场”, 选中模型后设置初始温度 20°C。

7) 设置网格: 选择对象为“部件”, 选择树编辑全局种子, 设置全局尺寸为 0.001, (如图 3-13 所示), 如图 3-14 为划分网格。

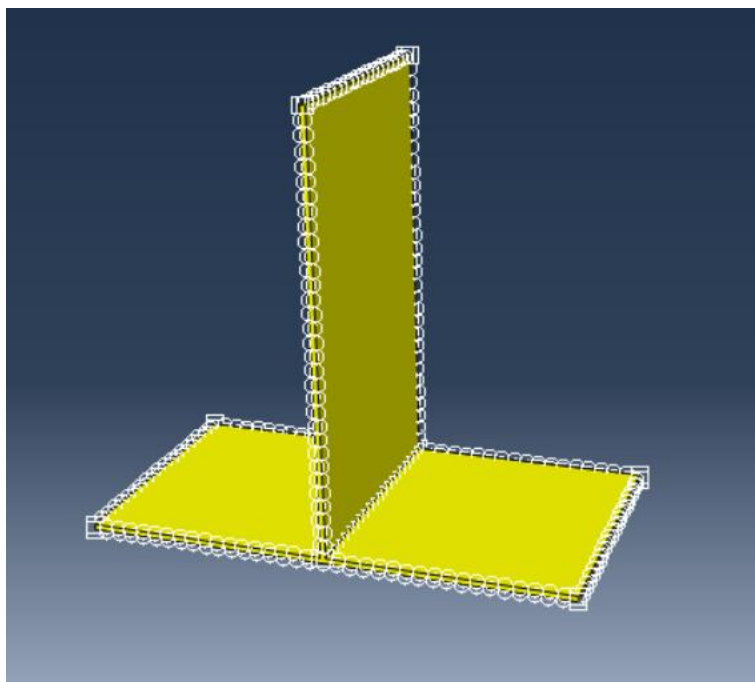


图 3-13 全局种子

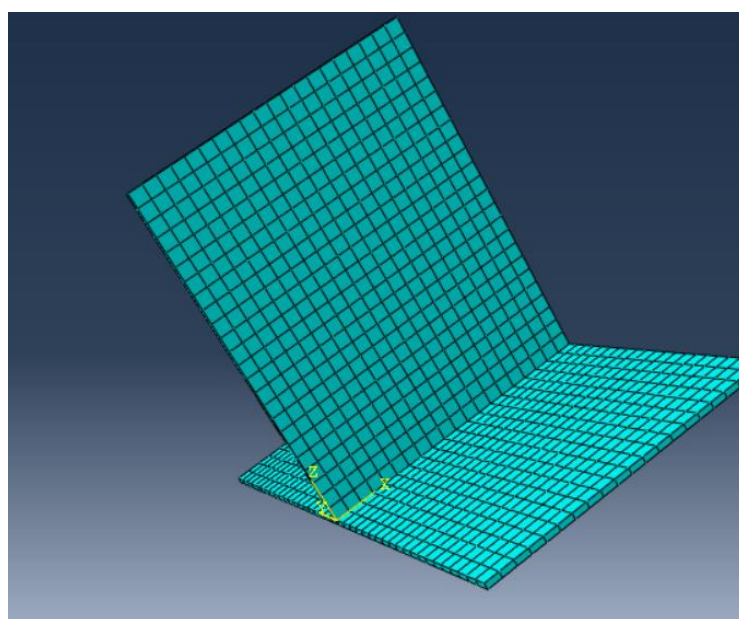


图 3-14 网格划分

在树中选择检查网格选择部件，选择对话框的高亮检查网格是否有问题。（如图 3-15 所示）

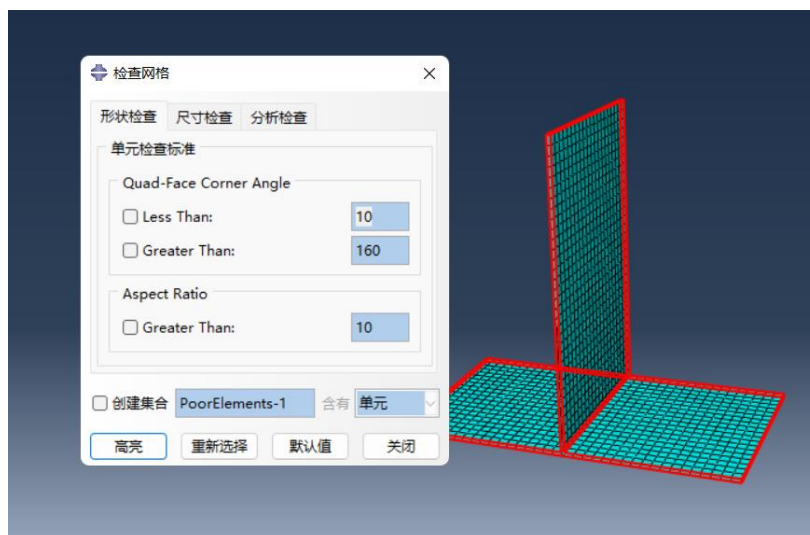


图 3-15 网格检查

点击指派单元类型，选择“温度-位移耦合”，几何层次为线性单元控制属性为“粘性”默认，“二阶精度”为否，“扭曲控制”为默认。

(2) 提交作业分析

在作业管理器下创建电流为组作业，选择子程序 Fortran 语言编辑的热源子程序并引用。作业创建后先点击“数据检查”检查设置的参数创建的分析布是否有错误导致程序无法识别，检查精确后开始计算分析，在监控窗口随时查看分析过程。

1) 温度场计算结果

计算完成后，打开可视化窗口在变形图上绘制云图选择“未变形图上绘制云图”，选择 NT11 观测焊接进行到 4.379s 和 10.43s 温度场分布与冷却到室温时的温度场分布。（图 3-16 所示，图 3-17，图 3-18 所示）

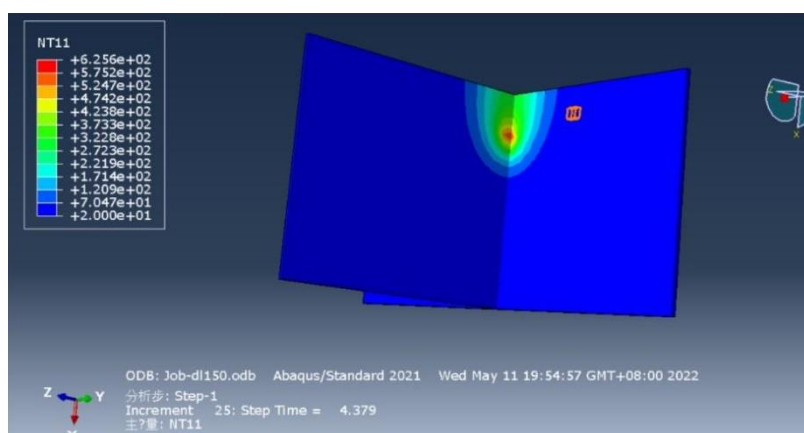


图 3-16 4.379s 温度场分布

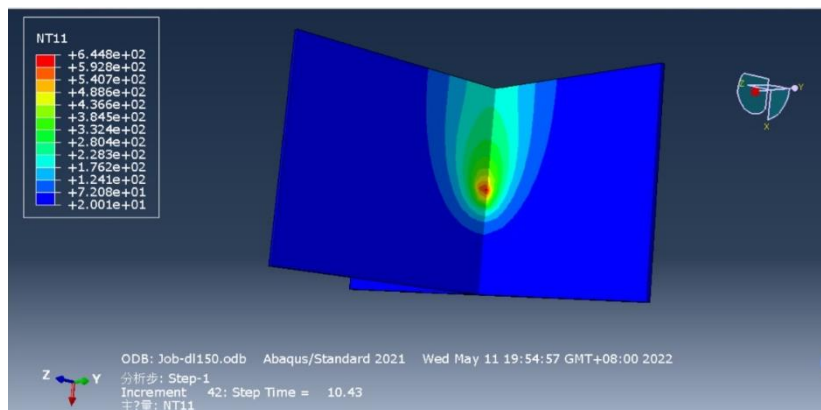


图 3-17 10.43s 温度场分布

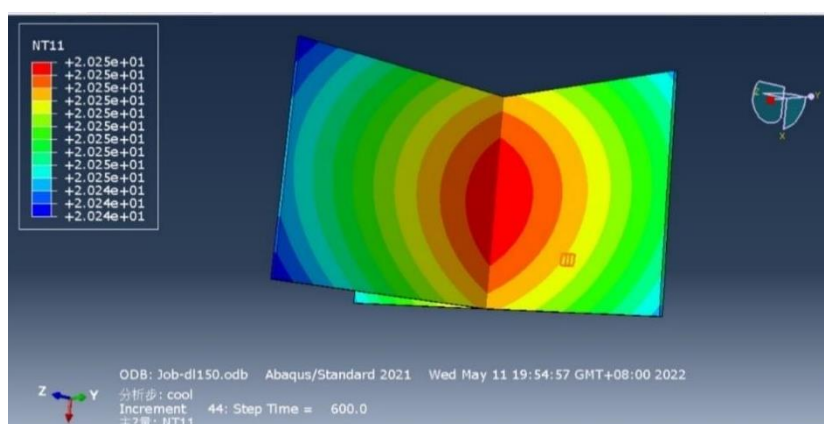


图 3-18 冷却到室温温度场分布

由图 3-16 和 3-17 可以看到，焊接源处温度为 625°C 此处温最大，焊接源周围温度逐渐变小，其他部位的温度为室温温度，随着焊接推进，温度场呈现稳定趋势，符合焊接温度场的分布规律。由图 3-18 可以看到，当冷却 600s 时，焊件温度为 20°C 整体趋近室温，与实际焊接后焊件逐渐冷却吻合。

2) 焊接应力计算结果

图 3-19 为与焊缝方向相同的应力分布图。

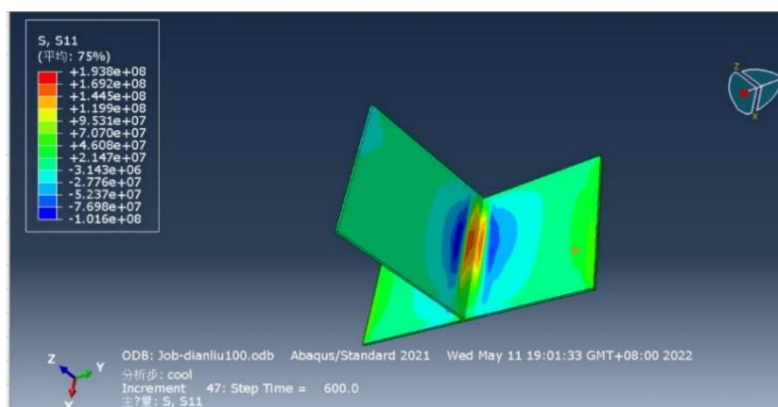


图 3-19 沿着焊缝方向应力分布

由图 3-19 可以看到，沿着焊缝的应力分布焊缝处的应力为正，在焊缝中心处的应力为 1.9×10^8 相比周围的温度最大。在图片可以看出随着焊缝扩散应力逐渐由应力由正变为负，而且应力逐渐变小。由上可以看出焊缝处受到了拉应力，焊缝边受到压应力。

在可视化找到“路径”，创建路径-“节点列表”。然后在沿着焊缝方向的一条直线路径上依次选择节点。图 3-20 是焊接电流为 120A，焊接速度为 5mm/s 的焊缝移动路径相同的应力分布图，图 3-21 是与焊缝路径上垂直方向的应力分布图。

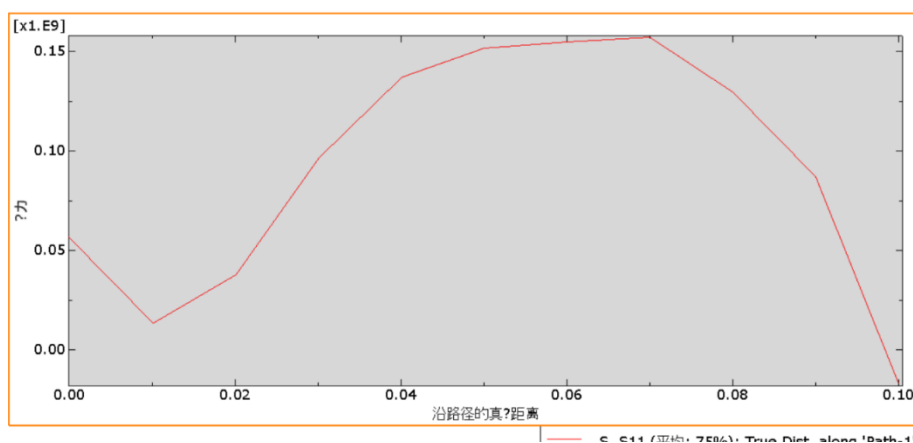


图 3-20 沿着焊缝方向应力分布

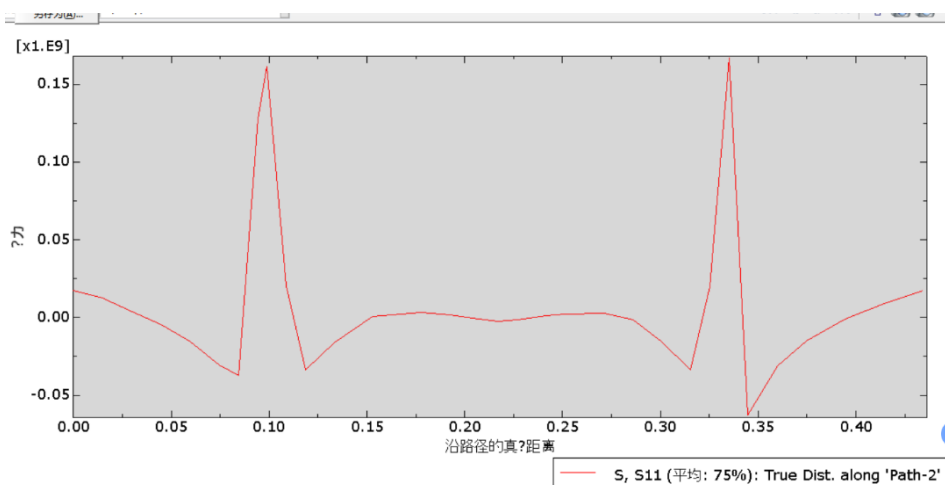


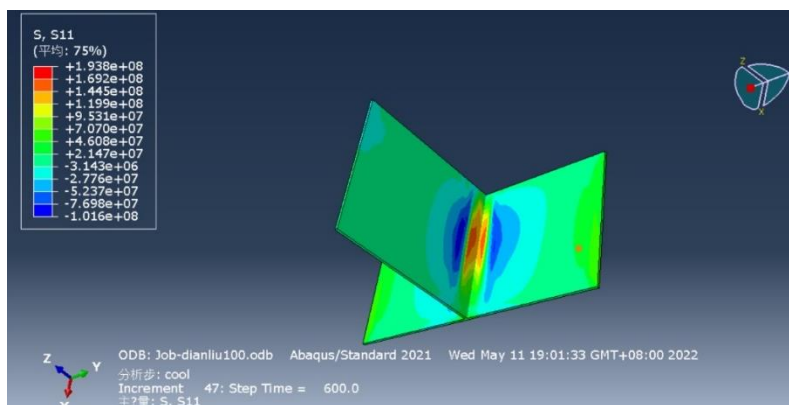
图 3-21 垂直焊缝方向应力分布

图 3-20 可看出，焊缝纵向应力一般在 150Mpa 左右。焊缝起始处产生 52Mpa 左右的拉应力，在焊接终止处产生一个大约为 25MPa 的压应力。由图 3-21 可以看到焊件左右双向所受到的应力分布基本相同，沿着焊缝的方向所引起的应力逐渐减小，10mm 到 32mm 处为焊件的 z 轴方向应力分布而且受到的应力趋近于 0。综上可知焊缝处受到的应力最大为拉应力，焊缝 z 轴受到的应力趋近于 0。

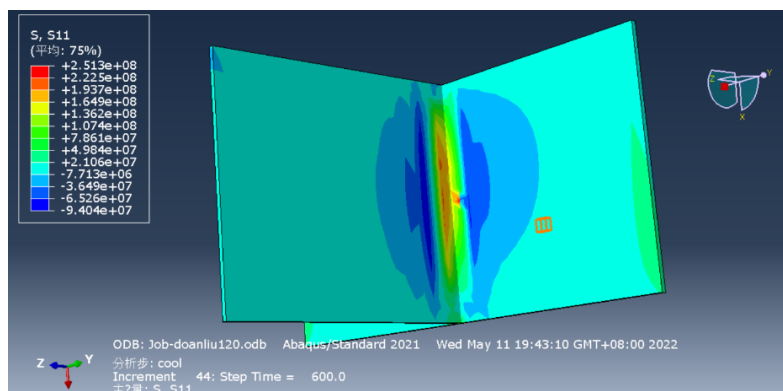
3.3 不同焊接工艺参数对比

(1) 焊接电流对比

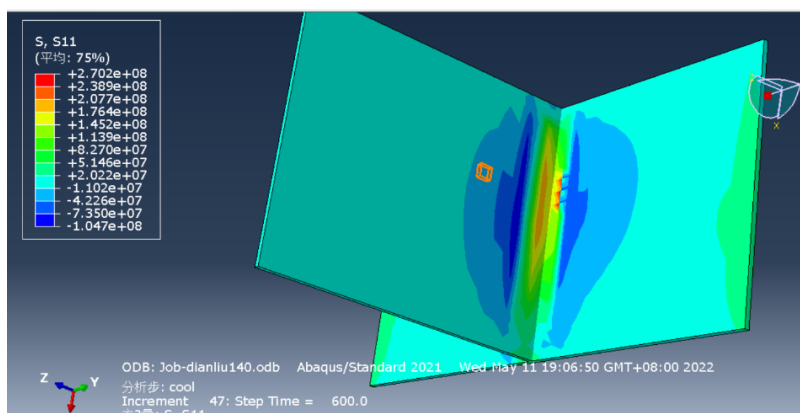
固定其它数值，改变焊接电流大小，分别设置 100A、120A、140A 得到图 3-22 的焊接应力分布图，设置 120A、130A、140A 得到图 3-23 的位移分布图。



(a) 100A 电流下的应力分布图



(b) 120A 电流下的应力分布图

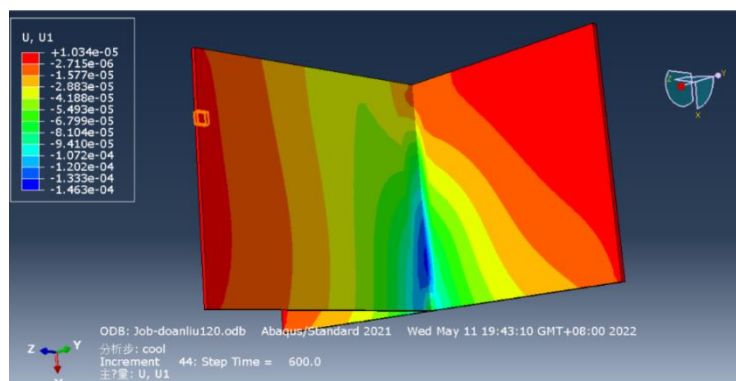


(c) 140A 电流下的应力分布图

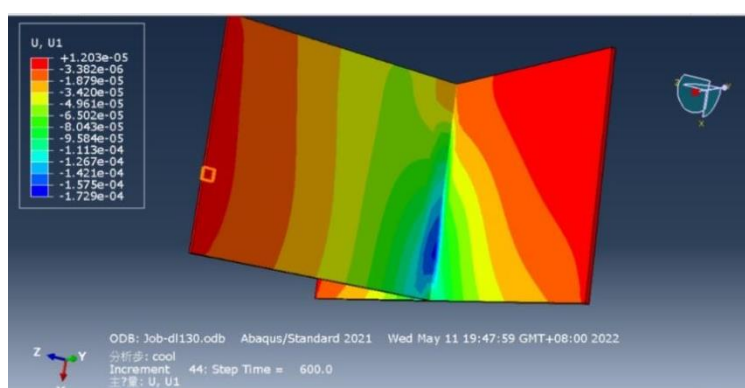
图 3-22 电流 100A、120A、140 的应力分布图

由图 3-22 即可得知焊缝的最大应力均匀分布于整个焊缝中，同时焊缝拉应力也由双

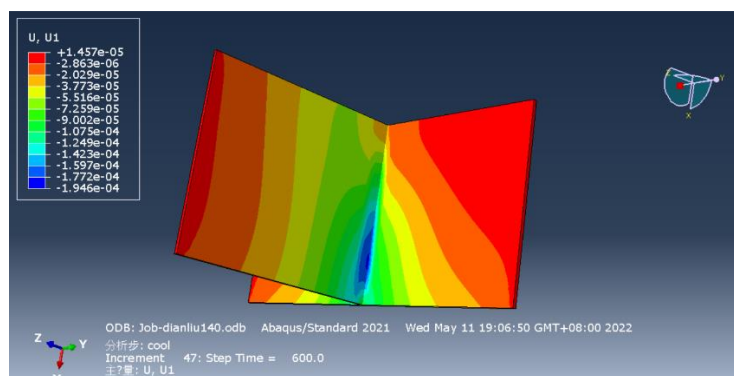
向扩展而逐渐转化为压应力。随着焊接电流的增大焊缝处的拉应力逐渐增加，焊接电流为 100A 的拉应力为 $1.9 \times 10^2 \text{MPa}$ ，而焊接电流为 140A 的拉应力则为 $2.7 \times 10^2 \text{MPa}$ 此处应力最大，吻合随电流变大应力变大的趋势。选择电流时不易过大也不宜过小，电流太大会出现焊穿焊接板情况。



(a) 电流 100A 的位移分布图



(b) 电流 130A 的位移分布图



(c) 电流 140A 的位移分布图

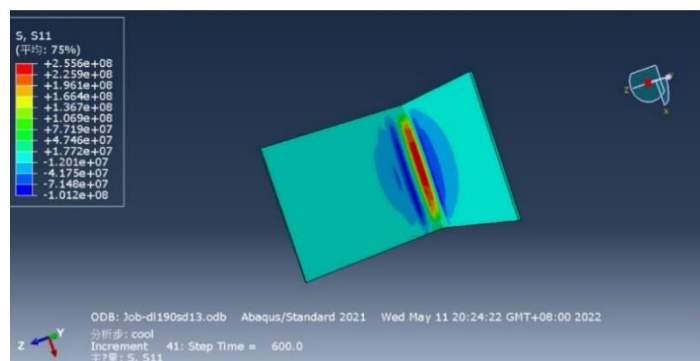
图 3-23 电流 100A、130A、140A 的位移分布图

由图 3-23 可以看出在焊接时板材经过焊接的高温融化再到室温温度，焊接路径上会受到挤压应力，从焊缝到双向位移变化逐渐由负变为正，此时外侧受拉应力。随着电流变

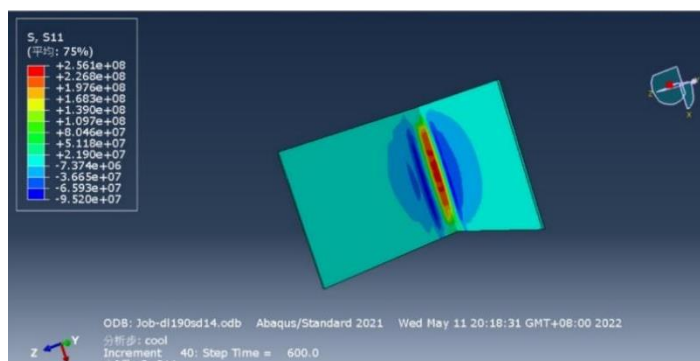
大，由图中的蓝色区域可以看到位移逐渐变大。

(2) 焊接速度对比

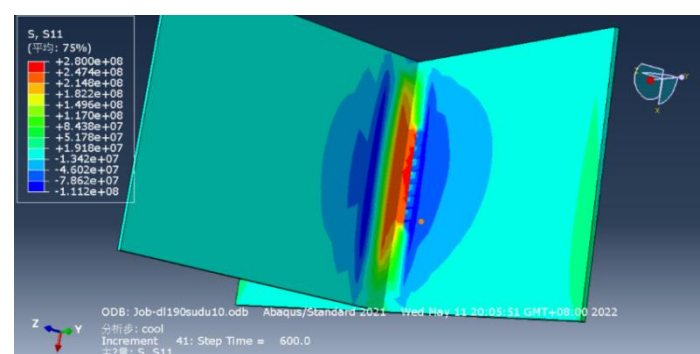
固定焊接电压、电流、效率系数设置数值，改变焊接速度大小，分别设置为 10mm/s、13mm/s、15mm/s，得到焊接应力分布图（图 3-24 所示）与位移分布图。（图 3-25 所示）。



(a) 焊接 10mm/s 应力分布图

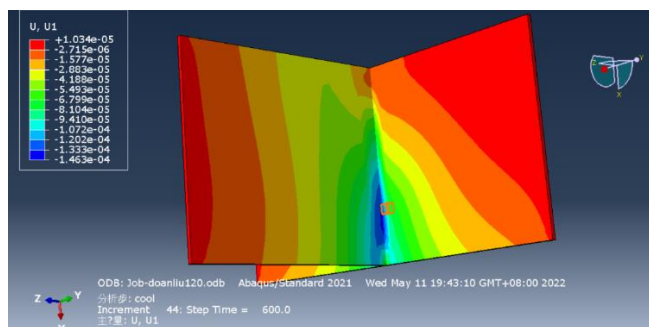


(b) 焊接 13mm/s 应力分布图

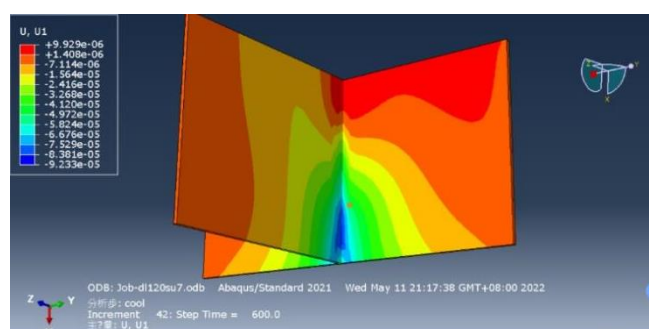


(c) 焊接 15mm/s 应力分布图

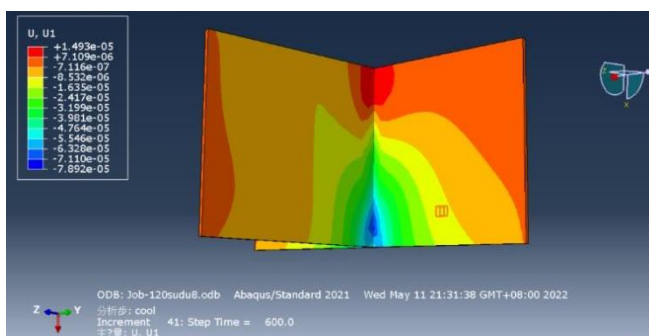
图 3-24 焊接速度 10mm/s、13mm/s、15mm/s 应力分布图



(a) 焊接 10mm/s 位移分布图



(b) 焊接 13mm/s 位移分布图



(c) 焊接 15mm/s 位移分布云图

图 3-25 焊接 10mm/s、13mm/s、15mm/s 位移分布图

由 3-24 即可得知, 通过改变焊接速度, 当焊接速度为 15mm/s 时焊接处拉应力为 $2.8 \times 10^2 \text{MPa}$, 焊接速度为 10mm/s 时焊缝拉应力为 $2.5 \times 10^2 \text{MPa}$, 同时由于焊缝速度的提高拉应力也提高。从上面三图看出焊缝所受到的拉应力, 沿着焊缝向四周分散, 应力逐渐减少。由图 3-25 中即可得到焊接处为负位移, 速度为 10mm/s 的焊接位移为 0.14mm, 速度 15mm/s 的焊接位移为 0.14mm, 随着速度的增大焊缝位移逐渐减小; 从焊缝向两边扩散, 位移逐渐降低。

3.4 结论

通过改变电流大小即可发现焊接后的最大应力分布于焊接处, 焊缝拉应力向二端延伸并逐渐转变为最大压应力。焊接源处温度为 625°C 处温最大, 焊接源周围温度逐渐变小,

其他部位的温度为室温温度，随着焊接进行，温度场呈现稳态分布，符合焊接温度场的分布规律。当冷却 600s 时，焊件温度为 20℃整体趋近室温，与实际焊接后焊件逐渐冷却吻合。焊缝拉应力向两边扩展逐渐转换为压应力。随着焊接电流的增加焊接时的拉应力也逐步增加，当焊接电流为 100A 的拉应力为 $1.9 \times 10^2 \text{MPa}$ ，当焊接电流为 140A 的拉应力为 $2.7 \times 10^2 \text{MPa}$ 此处应力逐渐增加，符合了随着电流变化大应力逐渐增加的结果。焊后板材通过焊缝的高温熔融再常温固化，焊缝方向上会引起挤压应力，由焊缝向二侧的变化逐渐由负转为正值，此时外侧受拉应力。通过改变焊接速度，焊接速度为 15mm/s 的焊缝处拉应力为 $2.8 \times 10^2 \text{MPa}$ ，焊缝速度为 10mm/s 时焊缝拉应力为 $2.5 \times 10^2 \text{MPa}$ ，随着焊缝长度的提高拉应力的增加。从三组应力云图看到焊接时的拉应力，并沿着焊缝线向二侧蔓延，应力逐渐减少。焊接处的负位移，速度为 10mm/s 的焊缝位移为 0.14mm，速度 15mm/s 的焊缝位移为 0.78mm，随着速度的提高焊缝位移逐渐降低；从焊缝向两边扩散，位移逐渐降低。

综上所述，通过应力变化和厚度方向位移变化的比较，焊接速度 13mm/s，焊接电流为 120A 是较为理想的焊接参数。

第四章 静载与疲劳分析

4.1 静载荷分析

进行完焊接温度场模拟后，应用 Abaqus 软件对试件进行静应力分析和疲劳试验。在文件中选择打开找到保存的模型文件。

(1) 建立分析步

在分析步模块中创建分析步。在最大增量步中设置为 10000、初始增量步设置为 0.01、最小增量步设置为 1E-05、最大设置为 1。（如图 4-1 所示）

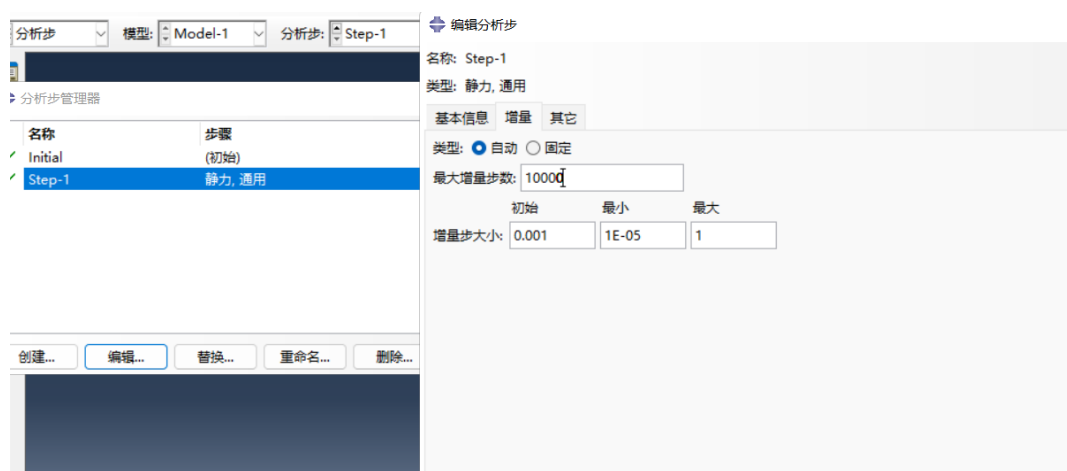


图 4-1 分析步建立

(2) 载荷创建

创建一个新的预定义场。（如图 4-2 所示）创建边界约束条件。为模型施加外力载荷，由焊缝向焊接板方向拉，力的大小设置为 20000N。创建载荷和边界条件。（如图 4-3 所示）

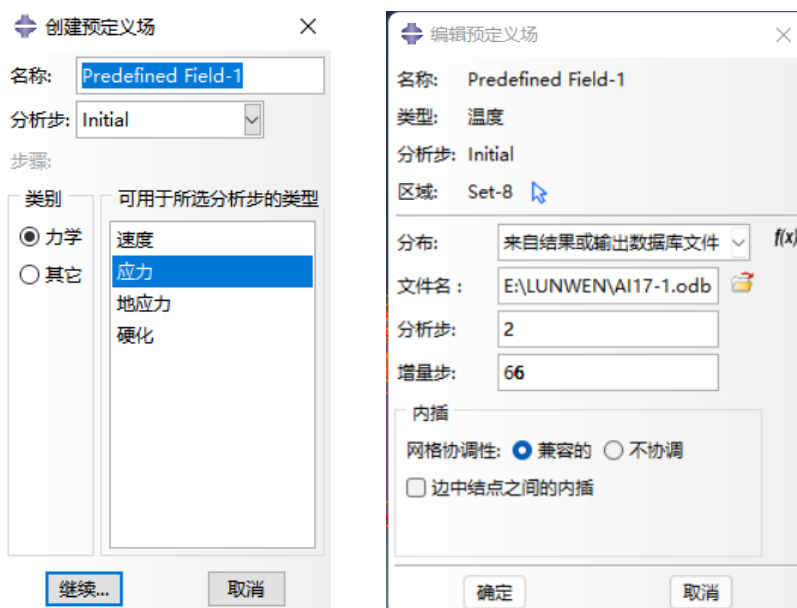


图 4-2 导入初始应力

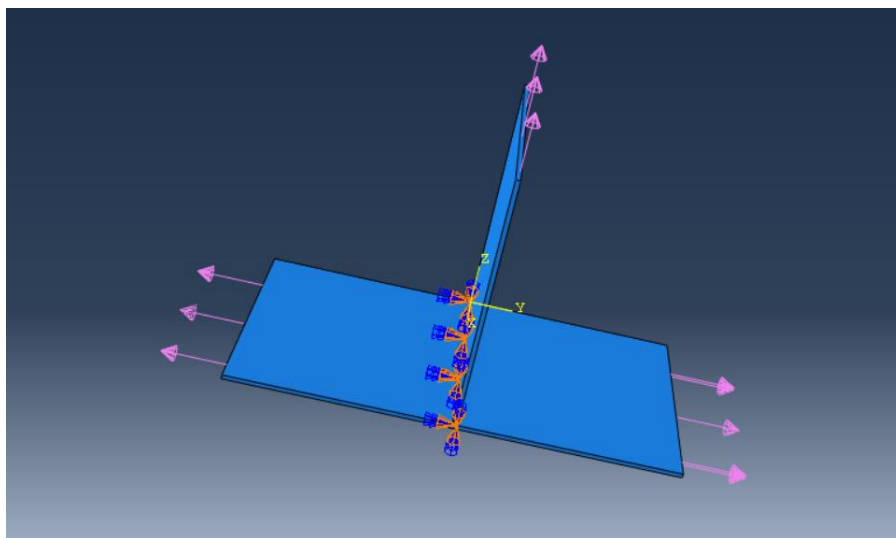


图 4-3 导入初始应力

(3) 网格划分并提交分析

选用单位布种，划分网格，单元类型设置为“三维应力”。网格划分，在任务管理器中建建作业，检查后进行分析。

(4) 分析结果

图 4-4 为施加外部载荷后的有限元分析应力图。

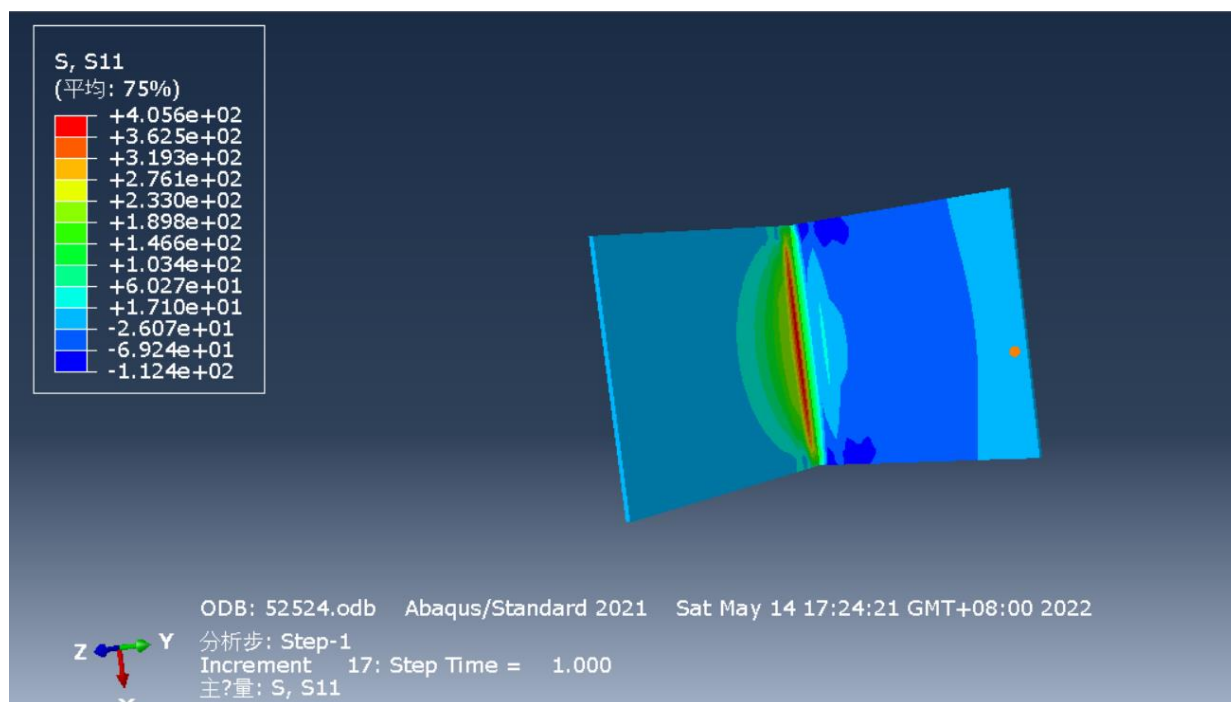


图 4-4 应力分布云图

图 4-4 的应力最大为 $4.056 \times 10^2 \text{MPa}$ ，此处为焊缝和底板交界处焊缝之间的波口形成的焊趾。在焊接引力场作为初始预定义的基础下进行静载荷分析，焊缝处完全固定，三个边加载拉力载荷，通过 4-3 可以看出模型在三个力的作用下焊缝的应力效果，从焊缝向周围的扩散应力逐渐减小。蓝色区域是给定板材施加的载荷为压应力，结果符合实际情况。

4.2 疲劳分析

4.2.1 材料定义

打开附属软件，在开始页面指定保存位置，打开一个新文档。找到分析完成后的文件，打开文件后勾选应力 stresses，再选择设置应力单位 Mpa。（如图 4-5 所示）在 Analysis Setting 中选择材料类型“Material”，在 Property 选择材料属性。（如图 4-6 所示）

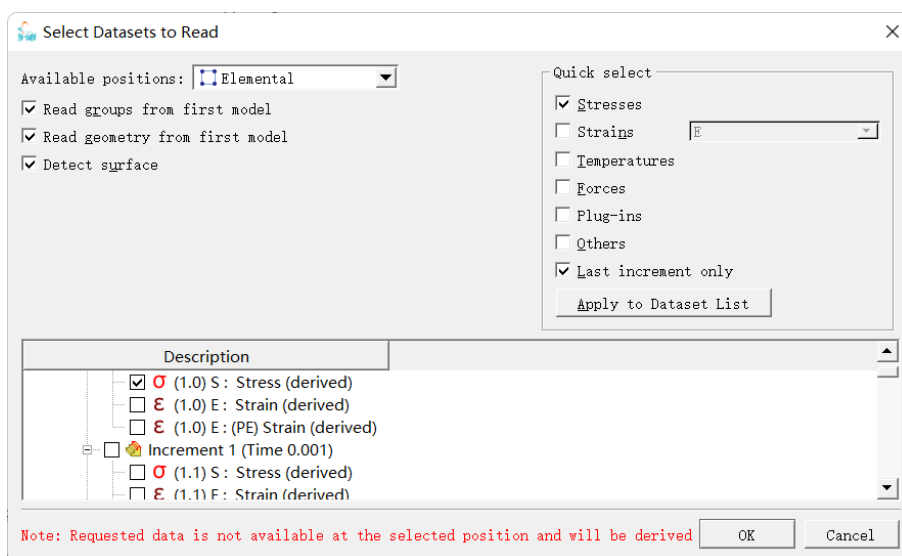


图 4-5 导入文件

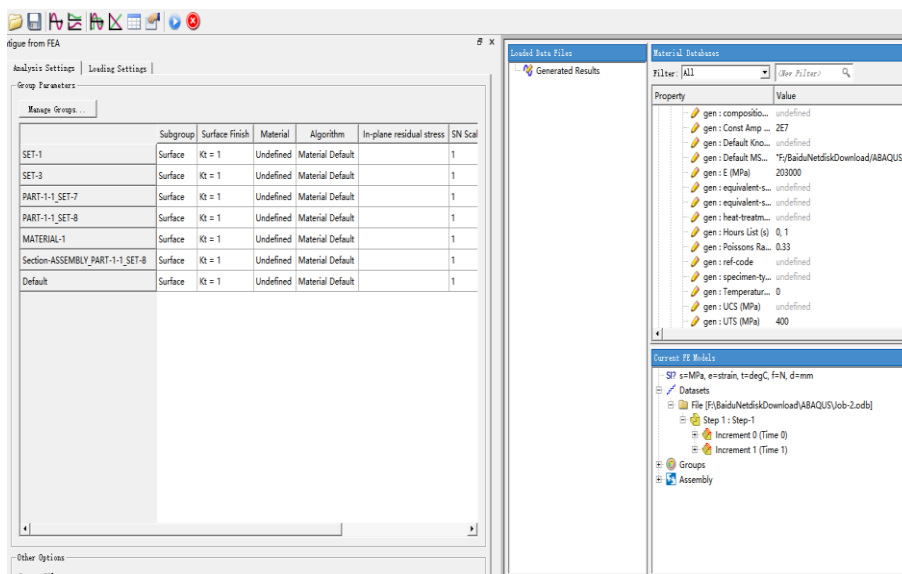


图 4-6 定义材料

4.2.2 应力循环

在 Load setting 模块中，在 frequency 设置频率，在 frequency 下方设置循环参数（如图 4-7 所示）。

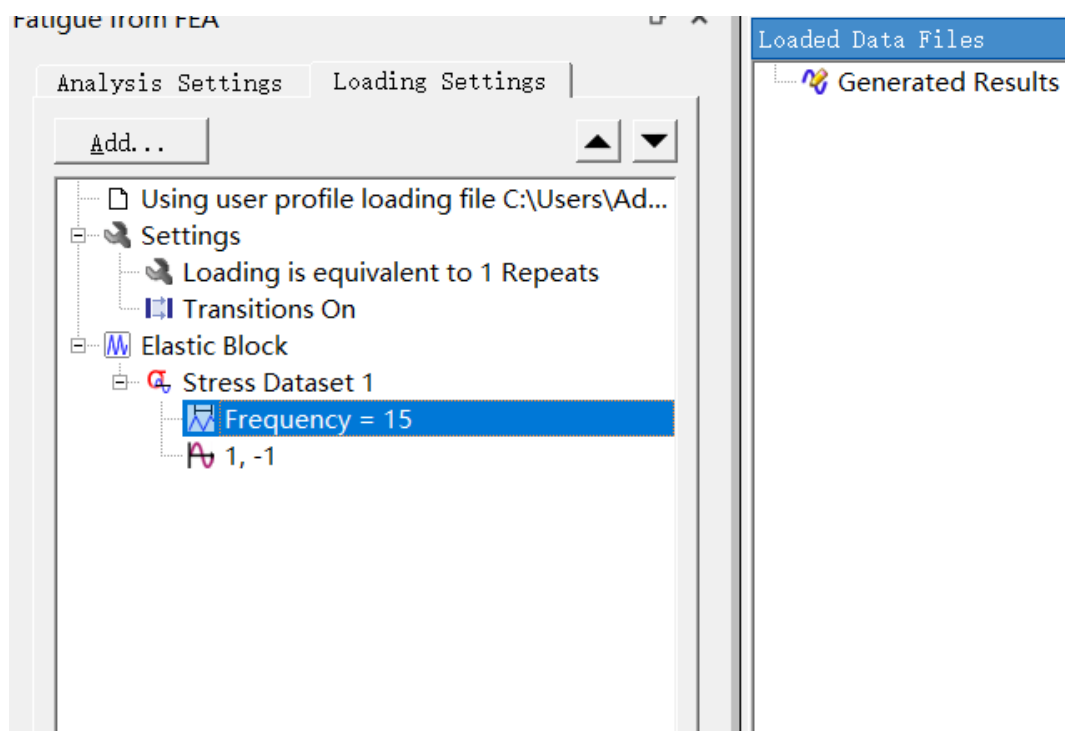


图 4-7 循环参数设置

4.2.3 求解

在 Other Option 模块中设置循环次数为 $1e7$ 。如图 4-8。最后选择 Analyse 完成疲劳计算。

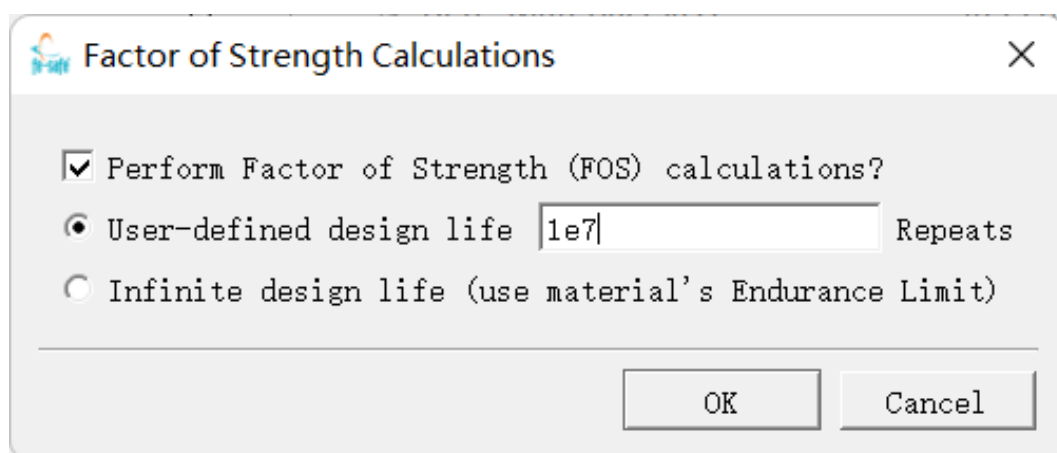


图 4-8 求解设置步

将静载荷分析结果在 Fe-safe 中打开在结束静载荷分析后，然后设置频率和材料。得到寿命分布云图如图 4-9 所示。如图 4-10 为交变载荷下最大应力分布图。

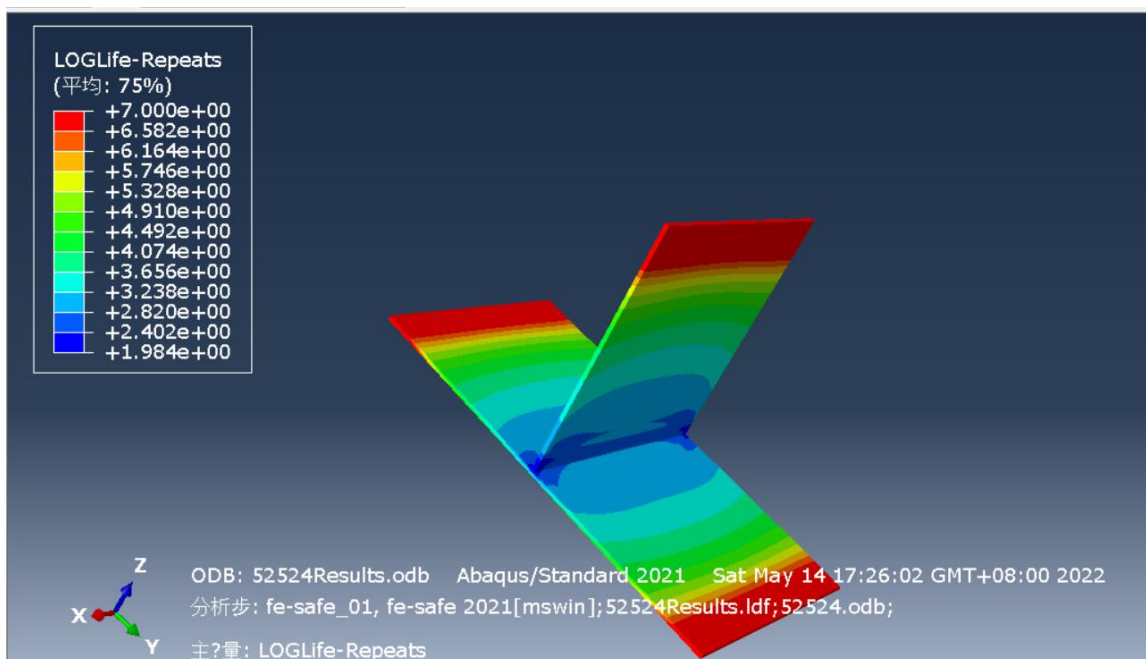


图 4-9 寿命分布云图

由图 4-9 可知，焊缝处的寿命是 1.98×10^7 此处的寿命是板材中寿命最小的部分，三个方向的力对板材进行拉伸试验，焊缝的寿命最短给定载荷的三个边寿命最长。沿着焊缝到母材两端寿命逐渐增大。

4.3 本章小结

通过对板材的载荷模拟得出，应力最大 $4.056 \times 10^2 \text{MPa}$ 是焊缝和底板交界处焊缝之间的波口形成的焊趾。在焊接引力场作为初始预定义的基础下进行静载荷分析，焊缝处完全固定，从焊缝向周围的扩散应力逐渐减小。

完成静载荷分析后，将静载荷分析结果在 Fe-safe 中打开，设置频率、材料后可以得出焊缝处的寿命是 1.98×10^7 此处的寿命是板材中寿命最小的部分，三个方向的力对板材进行拉伸试验，焊缝的寿命最短给定载荷的三个边寿命最长。通过本次的载荷以及疲劳分析模拟，在现实 T 型接头的应用中也应注意焊接处是整个板材中最脆弱的地方，对频繁需要 T 型接头的地方应注意板材焊接处的最大应力和极限寿命。

第五章 结论

①通过改变焊接速度参数,焊缝的最大应力均匀分布于整个焊缝中,同时焊缝拉应力也由双向扩展而逐渐转化为压应力。通过改变焊接速度,焊接速度为 15mm/s 的焊缝处拉应力为 2.8×10^2 MPa, 焊缝速度为 10mm/s 时焊缝拉应力为 2.5×10^2 MPa, 随着速度增大焊缝处的拉应力逐渐增加;通过改变焊接电流参数,焊接电流为 100A 的拉应力为 190MPa, 而焊接电流为 140A 的拉应力则为 270MPa, 此处应力最大, 吻合随电流变大应力变大的趋势。同时在选择电流时不易过大也不宜过小, 电流太大会出现焊穿焊接板情况。

②焊缝处的寿命是 1.98×10^7 此处的寿命是板材中寿命最小的部分,焊缝的寿命最短。焊缝处在交变载荷下最大应力处最大, 沿着焊缝到母材两端最大拉应力逐渐降低。

③焊后板材通过焊缝的高温熔融再常温固化,焊缝方向上会引起挤压应力,由焊缝向两侧的变化逐渐由负转为正值,此时外侧受拉应力。焊接处的负位移,速度为 10mm/s 的焊缝位移为 0.14mm, 速度 15mm/s 的焊缝位移为 0.78mm, 随着速度的提高焊缝位移逐渐降低; 从焊缝向两边扩散, 位移逐渐降低。

④通过应力变化和厚度方向位移变化的比较,焊接速度 13mm/s, 焊接电流为 120A 是较为理想的焊接参数。

⑤通过载荷以及疲劳分析模拟, 在现实 T 型接头的应用中也应注意焊接处是整个板材中最脆弱的地方, 对频繁需要 T 型接头的地方应注意板材焊接处的最大应力和极限寿命。

参考文献

- [1] 孙澜江, 张抒夏, 杨睿 & 辛勇.(2020).铝合金钻杆在国内外的研究及现场应用. 西部探矿工程 (10), 49-52. 秦国锋, 那景新, 慕文龙, 谭伟, 刘浩垒.GFRP/铝合金和铝合金/铝合金粘接接头失效对比研究[J].汽车工程, 2019, 41(05):599-606.
- [2] 陈硕琛, 李光耀, 崔俊佳.表面处理对车身用 5182 铝合金接头胶粘性能的影响[J].汽车工程, 2018, 40(07):865-870.
- [3] 刘微.激光搭接焊不锈钢/铝合金接头组织与性能研究[D].吉林大学, 2014.
- [4] 黄湘龙.7A85 铝合金航空接头等温锻造组织演变模拟与实验研究[D].中南大学, 2013.
- [5] 徐晓波.激光—电弧复合焊接 7075-T6 铝合金接头的疲劳断裂特性[D].合肥工业大学, 2013.
- [6] 赵勇, 付娟, 张培磊, 严铿, 蒋成禹.焊接方法对 6061 铝合金接头性能影响的研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版), 2006(01):90-94.
- [7] 刘晓莉, 冯梓宁, 于华宽, 高飞.5083 铝合金 T 型接头焊接残余应力分布及超声冲击处理工艺研究[J].江苏科技大学学报(自然科学版), 2021, 35(02):30-35.
- [8] 李文晓, 徐晓霞, 杨国舜, 吉华, 范美华, 胡霞.搅拌针直径对 5083-O/6082-T6 铝合金 FSW T 型接头组织及性能的影响[J].轻合金加工技术, 2020, 48(11):55-60.DOI:10.13979/j.1007-7235.2020.11.012.
- [9] 李志强.基于 Sysweld 的 6061 铝合金 T 型接头热力耦合模拟[J].金属世界, 2020(04):20-24.
- [10] L.M.Lobanov,M.O.Pashchyn,O.L.Mikhodui,P.V.Goncharov,M.Sydorenko,P.R.Ustyomenko.Influence of the Accompanying Heating on the Efficiency of Electrodynamical Treatment of AMg6 Aluminum Alloy Welded Joints[J].Strength of Materials, 2021(prepublish):
- [11] Zhang Huijing Zhao Xiaohui Liu Yu.Effect of high frequency impacting and rolling on fatigue crack growth of 2A12 aluminum alloy welded joint[J].International Journal of Fatigue,2021,147:
- [12] Abima C.S,Akinlabi S.A.Madushele N,Fatoba O.S,Akinlabi E.T.Mechanical and Microstructural Properties of MIG Welded Aluminium Alloy[J].IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2021,1107(1):

附 录

Abaqus 子程序

```
SUBROUTINE DFLUX(FLUX, SOL, JSTEP, JINC, TIME, NOEL, NPT, COORDS,
JLTYP, TEMP, PRESS, SNAME)
```

```
INCLUDE ABA_PARAM.INC
```

```
parameter(one=1.d0)
```

```
DIMENSION COORDS(3), FLUX(2), TIME(2)
```

```
CHARACTER*80 SNAME
```

```
wu=16
```

```
wi=80
```

```
effi=0.5
```

```
q=wu*wi*effi
```

```
v=0.005
```

```
d=v*TIME(2)
```

C 当前积分坐标

```
x=COORDS(1)
```

```
y=COORDS(2)
```

```
z=COORDS(3)
```

C 起始坐标

```
x0=0
```

```
y0=0
```

```
z0=0
```

C 双椭球形状参数

```
a=0.005
```

```
b=0.004
```

```
c=0.007
```

C f1, f2表示热量在坐标前后两部分间分配的比例, f1+f2=2

```
f1=1.0
```

```
PI=3.1415926
```

C 焊接方程

```
heat1=6*sqrt(3.0)*q/(a1*b*c*PI*sqrt(PI))*f1
```

```
heat2=6*sqrt(3.0)*q/(a2*b*c*PI*sqrt(PI))*(2.0-f1)
```

```
shape1=exp(-3*(x-x0-d)**2/(a1)**2-3*(y-y0)**2/b**2-3*(z-z0)**2/c**2)
```

```
shape2=exp(-3*(x-x0-d)**2/(a2)**2-3*(y-y0)**2/b**2-3*(z-z0)**2/c**2)
```

C JLTYP=1表示体热源

```
JLTYP=1
```

```
if(x.GE.(x0+d))then
```

```
FLUX(1)=heat1* shape1
```

```
else
```

```
FLUX(1)=heat2* shape2
```

```
endif  
return  
end
```

- (1) w_u 为焊接电压
- (2) w_i 为焊接电流
- (3) eff_i 为焊接效率系数
- (4) v 为速度
- (5) a 、 b 、 c 为双椭球的形状参数

致 谢

论文可以停留于此，但人生还要继续写。

行文至此，落笔为终。也意味着我的大学生涯到此结束。始于 2018 年金秋，终于 2022 年盛夏。逐梦中德，终要离别。目光所及，皆是回忆。纵有万般不舍，但仍心存感激。感谢母校的培育与关怀。

生逢盛世，与有荣焉。感谢党和国家给我提供了和平、舒适的学习环境和平等的接受教育的机会，让我可以安心完成学业，逐渐成长为一名有知识、有理想的中国共产党员。祝愿祖国繁荣昌盛，国泰民安。

桃李不言，下自成蹊。2018 年秋，初入中德，意气风华，满怀希冀。校园之行，幸遇良师。感谢老师对我的耐心指导和帮助。以及四年来各任课老师。传道授业解惑，虽风格各异，威有梅兰松柏之风也。

感谢父母在我求学路上的默默付出与鼎力相助，正是父母二十多年来给予的安全感，让我有机会在追梦路上肆意驰骋，你们是我坚强的后盾亦是坚硬的铠甲。愿我的父母福寿绵延，平安喜乐，我将继续前行，成为你们的骄傲。感谢我的家人们，支持我信任我，作为我人生道路上的领路人。

山水一程，三生有幸。感谢我的大学室友，谢谢你们一路陪伴，113 将永远是我们在中德的家。感谢与我认识数几载不在彼此身边却又彼此挂念的好朋友们，惟愿平安顺遂，日子有趣，不负热爱，前程似锦。以梦为马，不负韶华。漫漫人生路，悠悠岁月稠，感谢一直没有放弃的自己。来时笃定、勇敢，去时坚毅、刚强，我会保持心中那一份光亮，不断前行。

写尽千山，落笔是你。天津中德应用技术大学，后会有期!