



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

本科生毕业论文

铝合金搭接接头设计及疲劳分析

Aluminum Alloy Lap Joint Design And Fatigue Analysis

姓 名 罗林
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

本科生毕业论文

铝合金搭接接头设计及疲劳分析

Aluminum Alloy Lap Joint Design And Fatigue Analysis

姓 名 罗林
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	材料科学与工程		技术职务	正高	副高	中级 √
题目名称	铝合金搭接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搭接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。</p>					
任务及要求	<p>(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。</p>					
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： <div style="text-align: right; margin-top: 20px;"> 负责人(签名)： _____ 年 月 日 </div>						



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

毕业论文任务书

题 目： 铝合金搭接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： 罗林

学 号： 18414020311

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

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搭接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。

随着国内外航空航天工业的迅猛发展，对飞行器的质量和成本有了更高的要求，搭接连接不但能降低系统制造成本，而且提高了飞机制造效率，还能提供新的飞机结构设计可能性，完成飞机机身的纵向、环向连接，以往的飞机零部件装配连接使用了大量的铆接和螺栓连接结构，例如空客生产的 A340 飞机中的铆钉就超过了 100 万个，虽然方便拆卸和维修，但铆钉之间的缝隙是避免不了的，在长期的飞行中，积累的灰尘、杂质将会降低飞机的性能与安全性，并且提高了成本，加大了工作量。显然传统的铆接和螺栓连接已经不能够满足生产和制造的要求，因此各个国家对搭接技术进行了大量的研究与应用，充分证明了搭接技术在飞机制造中具有良好的优越性。在实际工程中，尤其是在航空航天等飞行器结构制造领域，搭接接头是关键连接形式之一，如传统的飞机机身蒙皮和加筋板、机翼框架及地面甲板等结构件。所以，针对搭接接头的研究无疑具有重要的学术价值和工程意义。

2. 毕业设计（论文）课题任务的内容和要求

- (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。

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) 毕业设计（论文）一套

4. 推荐参考资料：

- [1] 侯艳喜.7N01 铝合金板材对-搭接结构焊接技术研究[D].沈阳航空航天大学,2019.
- [2] 雷星海,王瑞杰,米鹏.2024-T351 铝合金搅拌摩擦搭接焊接头疲劳性能与寿命预测[J].宇航材料工艺,2019,49(05):79-84.
- [3] 徐晓磊.基于光谱分析的铝合金搭接接头熔深在线检测[D].上海交通大学,2019.
- [4] 冉继龙,高崇,刘贞山,黄瑞银,赵丕植.工艺参数对 5754 铝合金搅拌摩擦焊搭接接头剪切性能的影响[J].焊接技术,2018,47(08):20-23.
- [5] 邓威.镁合金/铝合金异种材料搅拌摩擦搭接焊接头组织与性能[D].湖北工业大学,2018.
- [6] 周振鲁.铝合金 FSW 的搭接接头性能及搅拌头优化[D].沈阳航空航天大学,2017.
- [7] 袁亮亮.2219 铝合金搅拌摩擦焊搭接工艺及接头性能研究[D].南京航空航天大学,2013.
- [8] 孟令伟.7B04 高强度铝合金搭接接头搅拌摩擦焊工艺研究[D].沈阳航空航天大学,2014.
- [9] Nick,Brown,Edinburgh,etal.AComparison of Techniques for Solving the Poisson Equation in CDF [J].2017,03(No.126):91-100.
- [10] Cederqvist L, Reynolds AP.Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints. Weld [U](Res Suppl)2001:281-7.

所在专业审查意见：

负责人：_____

年 月 日



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

本科生毕业论文开题报告

题 目： 铝合金搭接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： 罗林

学 号： 18414020311

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:2021年12月3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

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搭接连接工艺进行优化设计及疲劳分析。

随着国内外航空航天工业的迅猛发展，对飞行器的质量和成本有了更高的要求，搭接连接不但能降低系统制造成本，而且提高了飞机制造效率，还能提供新的飞机结构设计可能性，完成飞机机身的纵向、环向连接，以往的飞机零部件装配连接使用了大量的铆接和螺栓连接结构，例如空客生产的 A340 飞机中的铆钉就超过了 100 万个，虽然方便拆卸和维修，但铆钉之间的缝隙是避免不了的，在长期的飞行中，积累的灰尘、杂质将会降低飞机的性能与安全性，并且提高了成本，加大了工作量。显然传统的铆接和螺栓连接已经不能够满足生产和制造的要求，因此各个国家对搭接技术进行了大量的研究与应用，充分证明了搭接技术在飞机制造中具有良好的优越性。在实际工程中，尤其是在航空航天等飞行器结构制造领域，搭接接头是关键的连接形式之一，如传统的飞机机身蒙皮和加筋板、机翼框架及地面甲板等结构件。所以，针对搭接接头的研究无疑具有重要的学术价值和工程意义。

（二）有关的国内外研究（应用）情况及发展趋势

目前国内国内在搅拌摩擦焊方面的研究主要集中在对接接头方面，在搭接接头，点焊接头的研究上较少。而在实际生产中，特别是在航空航天结构连接技术中，常常都会涉及搭接接头的焊接，如传统的飞机蒙皮和肋条等。

有报道指出:FSW 搭接接头的有效厚度(EST)和界面形态是影响接头强度的两个重要因素，而界面尖角(应力集中)和界面缺陷又是导致接头失效的主要原因。而搭接工艺的关键又是解决塑性金属的流动和界面问题。北京航空制造工程研究所简波等人指出:高转速，低焊速和多道焊有利于提高 FSW 搭接接头性能，通过优化工艺参数，可以得到接头强度系数 0.9 以上的 FSW 搭接接头。

兰州理工大学王希靖,阿荣等人发现对 1.7mm 厚的 LF2 铝合金板进行 FSW 搭接焊时，转速在 1100rad/min,焊速在 80-255mm/min 范围内均可得到强度较高的搭接接头，且拉剪断口均出现在接头的热影响区内。其中焊速在 100mm/min 时，接头的剪切强度最高，可以达到母材剪切强度的 75%以上。

美国学者 L Cederqvist 指出:在搭接焊中，由于板与板之间存在界面，所以研究材料的迁移比微观组织更重要。如果材料垂直方向的迁移位于搅拌针的外表层，则未搭接的

界面材料也会垂直运动，影响搭接的强度。

D Fersini,A Pirondi 用有限元分析了缺口尖端疲劳裂纹扩展路径和应力强度因子 ΔK ，然后通过 AFgrow 软件估计出疲劳寿命。实验发现 FSW 搭接接头静载效率是母材的 70%，而疲劳效率只有静载强度的 15%，疲劳失效通常发生在前进侧。文中提到了搅拌摩擦焊搭接接头中常见的一种缺陷:钩状缺陷。

D M Rodrigues,A Loureiro, C leitao 等研究了 1mm 厚的 AA6016-T4 型铝合金的搅拌摩擦焊搭接接头，实验中，他们采用了两种不同的搅拌头，分析比较了两种搅拌头焊接后的接头的组织和机械性能。在每种搅拌头情况下，为了实现无缺陷的接头，焊接参数都得到了优化。假设焊接参数与焊缝上每单位长度上的热输入有一定的联系，他们把焊缝化分为两类:“热”焊缝和“冷”焊缝。结果指出热焊缝(包括最大的旋转速度和最小的焊接速度)相对于同样条件下的冷焊缝来说，机械性能得到了提高。这两种焊缝力学性能的不同能通过透射电镜下的微观组织分析得到了解释。

(三) 课题主要研究内容

1. 铝合金搭接焊接残余应力和变形;
2. 应力集中，焊接接头成分、组织和性能的不均匀性;
3. 焊接缺陷抗疲劳性能差等缺点的优化。

(四) 参考文献

- [1]栾国红,郭德伦,张田仓,等搅拌摩擦焊在飞机制造工业中的应用[J].新技术新工艺,2002.
- [2]孟令伟.7B04 高强度铝合金搭接接头搅拌摩擦焊工艺研究[D].沈阳航空航天大学,2014.
- [3]邢丽,柯黎明,刘鸽平.搅拌摩擦焊工艺及其应用[J].焊接技术.2000,29(2).
- [4]Miller DK.Designing welded lap joints.Welding Innovation [J] 2001;XVIII(3).
- [5]简波,孙成彬,栾国红.铝合金的搭接搅拌摩擦焊[M].航空航天焊接国际论坛,2004.
- [6]王希靖,阿荣,郭瑞杰.铝合金搭接接头搅拌摩擦焊工艺研究[J].兰州理工大学学报, 004(1):183-27.
- [7]Cederqvist L,Reynolds AP.Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints.Weld [J](Res Suppl)2001:281-7.
- [8]吴铁.铝合金搅拌摩擦焊搭接接头焊缝组织及性能研究[D].天津大学,2009.
- [9]D fersini,A Pirondi.Analysis and modeling of fatigue failure of friction stir welded aluminum alloy single-lap jonts [J].Engineering Fracture Mechanics 2008,75(1),790-830.
- [10]D M Rodrigues,A Loureiro,C leitao.Influence of friction stir welding parameters on the microstructural and mechanical properties of AA6016-T4 thin welds [J].Materials and Design.

二、进度及预期结果		
起止日期	主要内容	预期结果
2021.12.03-2022.12.10	制订研究方案。	方案科学、合理、完整、充分、实事求是。
2021.12.10-2022.01.01	查阅相关资料与文献,了解铝合金搭接接头相关知识、国内外研究现状,并撰写任务书。	查阅相关文献,撰写并完善任务书。
2022.01.01-2022.02.01	查阅相关资料与文献,学习与焊接有关的知识,构思并撰写开题报告,完善后提交。	了解相关知识,撰写并完善开题报告。
2022.02.01-2022.03.15	进行课题实验并记录实验数据。	完成课程实验,进行分析并得出结论。
2022.03.15-2022.06.03	根据课题实验得出的结论,撰写论文并完善。	总结实验分析结论,撰写并完善毕设论文
完成课题的 现有条件	1. 焊接设备及高频疲劳试验机; 2. 2212 铝合金及相关实验设备工具; 3. 掌握 ABAQUS 工程制图软件; 4. 保持实事求是,积极学习的态度。	
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	

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：罗林

年 月 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：

年 月 日

摘 要

搭接接头特征为应力分布不均匀,疲劳强度相对比较低,但是焊接前的准备工作和装配比较简单;焊后横向的收缩量小。搭接接头型式有开槽焊、塞焊、锯齿状搭接。本文针对铝合金薄板搭接接头设计并使用 ABAQUS 软件对铝合金薄板的焊接过程进行模拟仿真,模拟焊接温度场原理为双椭球热源模型函数,通过 Fortran 语言编写将其函数形式转化为语言程序加入 Abaqus 软件进行识别变为热源模型。最后再通过 Abaqus 附属软件 Fe-safe 对其进行疲劳、应力模拟分析。

模拟过程首先需查阅相关文献找到对应的材料热属性参数,在通过 ABAQUS 做温度场模拟的前期工作加入到材料属性中,在多次引用不同参数的热源子程序后发现当双椭球热源模型的形状参数 a 、 b 、 c 越大时,模拟的热源形状越大,则模拟效果越不切合实际,根据本文模拟模型的焊缝路径长度为 50mm,所以 a 、 b 取 5mm, c 取 10mm 时效果比较好。当 a 、 b 大小取到 5mm 以下时会加大模拟过程的计算时间。计算结果表明双椭球热源模型从设定坐标原点向着 x 轴方向缓缓移动,温度变化完全符合双椭球热源模型的变化规律。从应力分布可看出焊接后最大应力主要分布在焊缝处,焊缝拉应力向边缘扩散后逐渐转换为压应力,靠近边缘时应力接近与零,焊缝处只有较小的压应力;从位移分布可看出在焊缝处的位移变化为负位移,即在焊缝路径上受挤压作用。向远离焊缝方向逐渐扩散由受挤压力逐渐转变为受拉力的作用。

施加不同焊接电流 50A、80A、120A 后发现,焊接电流越大,焊缝处受挤压的位移越大,在焊接电流为 50A 时残余应力最小,所以选择焊接电流为 50A;当焊接电流为 50A,施加不同焊接速度 5mm/s、10mm/s、15mm/s 后发现焊接速度越大时,焊缝处残余应力最大,受挤压位移最小,所以选择焊接速度为 5mm/s。在焊接温度场模拟完成后,建立了新的算例,引入了原模型和焊接应力,建立新的分析步与载荷。最后,疲劳计算结果表明,在焊缝路径上的应力分布最大,焊缝上疲劳寿命 $10^{3.47}$ 次远小于远离焊缝的边缘处疲劳寿命 10^7 次,在焊缝与焊缝附近最容易断裂。

关键词: 搭接接头; ABAQUS; 疲劳分析; TIG 焊接; 双椭球热源模型;

ABSTRACT

The lap joint is characterized by uneven stress distribution and relatively low fatigue strength. However, the preparation and assembly before welding are relatively simple; The transverse shrinkage after welding is small. The types of lap joints include slotted welding, plug welding and serrated lap joint. In this paper, the aluminum alloy sheet lap joint is designed and the welding process of aluminum alloy sheet is simulated by Abaqus software. The principle of simulated welding temperature field is double ellipsoidal heat source model function, and its function form is converted into language program by Fortran language, which is added to ABAQUS software to identify and become heat source model. Finally, the fatigue and stress are simulated and analyzed by Abaqus software Fe-safe.

In the process of simulation, it is necessary to consult the relevant literature to find the corresponding thermal property parameters of materials. In the preliminary work of temperature field simulation by ABAQUS, it is added to the material properties. After many references to heat source subroutines with different parameters, it is found that when the shape parameters A, B and C of the double ellipsoidal heat source model are larger, the larger the simulated heat source shape is, the more unrealistic the simulation effect is. According to this paper, the weld path length of the simulation model is 50mm, so the effect is better when A, B are 5mm and C is 10mm. When the sizes of A and B are below 5mm, the calculation time of the simulation process will be increased. The calculation results show that the double ellipsoidal heat source model moves slowly from the set coordinate origin to the X axis direction, and the temperature change completely accords with the change law of the double ellipsoidal heat source model. From the stress distribution, it can be seen that the maximum stress after welding is mainly distributed at the weld seam, and the tensile stress of the weld seam is gradually converted into compressive stress after spreading to the edge, and there is almost no stress near the edge, but only a small compressive stress at the weld seam. It can be seen from the displacement distribution that the displacement change at the weld is negative displacement, that is, it is squeezed along the weld path. Gradually spread away from the weld, and gradually change from extrusion pressure to tension.

After applying different welding currents 50A, 80A and 120A, it is found that the larger the welding current is, the greater the extrusion displacement at the welding seam is, and the minimum residual stress is found when the welding current is 50A, so the welding current is selected as 50A. When the welding current is 50A and different welding speeds of 5mm/s, 10mm/s and 15mm/s are applied, it is found that the higher the welding speed is, the maximum residual stress at the weld is and the minimum displacement is caused by extrusion, so the welding speed of 5mm/s is selected. After the simulation of welding temperature field is completed, a new example is established, the original model and welding stress are introduced, and a new analysis step and load are established. Finally, the fatigue calculation results show that the stress distribution on the weld path is the largest, and the fatigue life of 103.47 times on the weld is much smaller than that of 107 times on the edge far away from the weld, and it is easy to break near the weld.

Keywords: Lap joint; ABAQUS; Fatigue analysis; TIG; Double ellipsoid heat source mode

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景及意义	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 试验材料与方法	3
2.1 材料简介	3
2.2 钨极氩弧焊原理	4
2.3 疲劳分析简介	4
第三章 焊接温度场模拟	6
3.1 Abaqus 软件简介	6
3.2 铝合金焊接过程有限元模拟	6
3.2.1 温度场、应力与变形模拟	6
3.2.2 温度场模拟结果	13
3.2.3 应力模拟结果	15
3.2.4 位移变形模拟结果	17
3.2.5 不同焊接电流模拟对比	17
3.2.6 不同焊接速度模拟对比	20
3.3 本章小结	23
第四章 静载与疲劳分析	24
4.1.前言	24
4.2 静载荷分析	24
4.3 疲劳分析	26
4.4 本章小结	29
第五章 结论	30
参考文献	31
致 谢	32

第一章 绪论

1.1 选题背景及意义

由于如今世界对节约、环境、安全的高要求，铝合金等轻质高强度建筑材料的使用得到普遍重视。铝材是一个可再生资源，而在地壳中镁物质的占比又是相当宝贵，经过多次利用的铝和铝材之间还可以回收并重熔，既具有资源节约的效益又可以降低环境污染。而且铝材就好像是一个“永不枯竭”的材料，因此它还能够供人们利用足够长的一段时间^[1]。同时铝及铝材也是一种节能和储能材料，对于在环保和安全状态下，铝的节能、储能功能远大于钢材和其它许多材料，所以铝材才能成为如今航空航天和现代交通运输轻量化、高速化的重要材料。轻量化可使得飞机和航天器飞得更高、更快、更远，可使导弹打得更快、更远、更准，可使电动汽车趋近于零污染高速行驶，可减少牵引力和节省大量资源，使运输工具既安全又准点^[2]。

随着目前国内外航空航天工业的发展迅速，针对飞行器的研究成本和质量有一个更高的要求，铝合金搭接连接不仅能减少产品制造成本，还大大提高了飞机的生产效率，对于飞机结构设计还能有一个新的可能性，例如飞机机身的纵向或者环向连接。以往的飞机结构连接较多是使用铆接和螺栓连接的方式，例如由空客制造生产的 A340 飞机中使用的铆钉和螺栓就超过了 100 万个^[3]，这两种连接方式虽然便于维修和拆卸，但是两连接件之间的缝隙是难以避免的，因此在长期循环飞行的工作中，会积累大量的灰尘与杂质从而使飞机的性能与安全性会降低。焊接相对于铆接与螺栓连接来说，将会降低成本，减少制造过程的工作量。所以很显然传统的铆接和螺栓连接已经不足以满足现如今生产和制造的要求，因此各个国家对搭接技术进行了大量的研究与应用，由此证明了搭接技术在飞机制造中具有一个很好的研究意义。并且实际的生产制造工程中，^[4]特别是像在航空航天、船舶等大工程结构制造领域，搭接接头是一很关键的连接形式之一，例如在飞机机身蒙皮和加筋板、机翼框架及地面甲板等结构件都有使用。所以，针对搭接接头的研究无疑具有重要的学术价值和工程意义。

1.2 研究现状及发展趋势

作为一门制造技术，焊接自 20 世纪初发展至今已经有近 100 年的历史了，焊接工艺上的应用以及在制造业上的重要性，是在 20 世纪 50 年代才慢慢的显现出来。现在工业国们纷纷将焊接作为一门独立的制造技术来作为一个至关重要的角色。在学术理论上的探索学习也达到了一定深度，并且，对于一些相关学术领域还起到了推动发展的作用。现在多种高科技技术都集聚焊接领域，焊接已成为一种不可替代的加工技术，而焊接的发展方向主要体现在：

(1) 焊接至今仍是制造业的重要加工技术，它将逐步集成到产品的全寿命过程中，从设计、开发、制造到维修、再循环的各个阶段。美国和德国等在其研究的工作报告中指出：“焊接(到 2020 年)仍将是制造业的重要加工技术。它是一种精确、可靠、低成本，并且是采用高科技连接材料的方法。目前还没有其它方法能够比焊接更为广泛地应用于金属的连接，并对所焊的产品增加更大的附加值。焊接技术在现在以及未来，都大概率是各种材料加工可投入市场产品的首选加工方法。焊接将被认为对改善产品全寿命的成本、质量和可靠性是至关重要的手段，而

且对提高产品的市场竞争力有重要贡献”。

(2) 焊接基本现象的模拟与仿真是 21 世纪焊接科学技术最重要的研究方向之一^[5]。1993 年, 美国能源部组织美国、加拿大、日本、瑞典、英国的 25 位著名专家对 21 世纪焊接科学技术的发展趋势做出预测, 其中焊接基本现象的模拟与仿真被列为最重要的研究方向之一。我国国家自然科学基金委员会制定的学科发展战略也将计算机模拟确定为机械热加工领域的发展方向之一。计算机模拟是使包括焊接在内的热加工工艺研究从“定性”走向“定量”、从“经验”走向“科学”的重要标志。^[6]采用科学的模拟技术和少量的试验验证, 以代替过去一切都要通过大量重复试验的方法, 不仅可以节省大量的人力和物力, 而且还可以通过数值模拟解决一些目前无法在实验室里进行直接研究的复杂问题。在制造业, 计算机模拟与仿真可以增加材料利用率 25%, 节约生产成本 30%, 产品设计至实际投产的时间缩短 40%^[7]。

(3) 以焊接技术为主导的集成制造技术是实现产品整体化^[8]、轻量化、高效率 and 低成本并保证产品满足性能要求的重要技术支撑航空产品结构的制造向着整体化、轻量化方向发展, 同时必须考虑产品结构的制造周期和成本, 比如高推重比的发动机的整体叶盘结构、飞机的整体壁板、框梁结构等, 而高性能的焊接技术是实现其目标的主要手段。

(4) 焊接结构全制造过程中的性能检测和寿命评定是保证焊接结构高可靠、长寿命的必要手段和方法。焊接结构在我国航空、航天、交通、能源、化工和建筑等领域得到了广泛的应用, 技术和装备发展非常迅速, 总体水平基本接近国际先进行列。随着新型航空武器装备的发展, 航空焊接技术取得了很大的进步, 部分技术能够基本满足航空武器装备的发展需求, 有力支撑了装备的发展。在航空武器装备制造工程中, 焊接技术的支撑作用可概括为焊接技术是先进航空结构设计方案得以实现的技术保证; 增加航空结构设计选材的灵活性, 提高材料利用率; 促进航空结构高精度组合连接工艺的发展; 扩大新型材料在飞行器结构上的应用; 促进航空特种结构设计的新构思。

1.3 本文研究内容

本文主要研究铝合金搭接设计与疲劳分析, 首先通过 Abaqus 软件建模, 建立分析步与外部载荷, 引用热源子程序模拟焊接温度场。然后在一个新 Part 中导入模拟温度场的模型、材料属性与焊接应力。在建立新的静载分析步与外部载荷, 最后再通过 Fe-safe 软件导入静载分析文件后做疲劳分析。

- (1) 查找 2A12 铝合金材料属性与介绍 TIG 焊接原理;
- (2) 基于 abaqus 软件, 构建模拟焊接模型;
- (3) 基于 abaqus 软件, 进行温度场模拟分析;
- (4) 基于 abaqus 软件, 进行静应力模拟分析;
- (5) 通过 origin 软件, 绘制应力分布折线图;
- (6) 基于 abaqus 附属软件 Fe-safe, 进行疲劳模拟分析。

第二章 试验材料与方法

2.1 材料简介

铝是一种很常见且密度较小金属材料，密度仅为 2.7g/cm^3 ，大约是钢密度的 $1/3$ 。所以铝被各行业广泛用于作为制造机械零件、部件的基本材料，将铝作为制造的材料可起到减轻重量的效果，还能达到轻量化和节能减排的作用^[9]。虽然铝合金的密度较小，但是其比强度和比刚度比常用的 45 钢与 ABS 塑料还要大很多，所以铝也可用于制作对刚性要求相对比较高的整体框架结构件。铝这种还具有很强的导电性、导热性以及较强的抗腐蚀能力，板材切削比较容易，还可以作为可回收利用多次性能源。

2A12 铝合金的另一个常用牌号为 2024，2A12 铝合金元素含量除了 Al 以外，最主要的成分即是 Cu、Mg 是，其中还有一些其他的微量元素如：Fe、Si、Mn、等。其化学成分如表 2-1 所示，机械性能如表 2-2 所示。

表 2-1 2A12 铝合金化学成分 (wt%)

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

2A12 铝合金经过高温固溶处理将会得到一种过饱和固溶体，当 2A12 铝合金在淬火后会有一定量的 Mg 和 Cu 将从基体中脱溶析出，并且以 $\text{Al}_2\text{Cu}(\theta)$ 相、 $\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{S})$ 相的一种形式存在于晶界的位置。然后这些析出相以沉淀强化的形式又会对材料进行强化。其中常见的析出相有 $\text{Al}_2\text{CuMg}(\text{S})$ 相、 $\text{Al}_2\text{Cu}(\theta)$ 相、 $\text{Mg}_2\text{Al}_3(\beta)$ 相、 $\text{Cu}_5\text{Mg}_6\text{Al}(\text{Q})$ 相、 $\text{Mg}_{23}(\text{Al-Cu})_{49}(\text{T})$ 相这些相都在不同程度上对材料起到强化作用。Mn、Si、Fe 等元素属于杂质元素并且在固溶体中扩散速率较慢因此其合成的析出相如： $\text{Al}_6(\text{MnFeSi})$ 、 FeAl_3 、 Al_2Fe ； $\text{Si}(\text{FeMn})\text{Al}_6$ 、 MnAl_6 等对于材料的性能会起到不好的影响，属于杂质相。

表 2-2 2A12 铝合金机械性能表

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	875	66.0×10^{-6}	430	15	135

2A12 铝合金在通过表面淬火+自然时效处理后将会拥有良好的抗腐蚀性能，这时 2A12 铝合金整体元素处于固溶状态，没有明显的第二相析出。材料在进过自然时效处理后使用过程中温度会明显升高或者在人工时效处理后，合金晶界处会析出 θ 相或者 S 相，导致晶界附近 Cu 元素含量将会快速下降，诱发晶间腐蚀。继而使材料的抗腐蚀性能远低于实际使用标准。

人工时效及变形处理可以改善 2A12 铝合金的力学性能。但是材料的抗蚀性能仍然需要进一步改善，工业上最常用的手段是在耐腐蚀性能较差的铝合金材料表面进行包铝处理，包铝层一般选用 1050 合金(纯铝含量大于 99.5wt%)，由于高纯铝自身具有优异的耐腐蚀性能并且在 2A12 铝合金表面起到阳极保护的作用，因此可以有效提升板材的抗腐蚀性能。

2.2 钨极氩弧焊原理

TIG 焊（Tungsten Inert Gas Welding），又称为非熔化极惰性气体保护电弧焊^[10]。无论是在人工焊接还是自动焊接 0.5~4.0mm 厚的不锈钢时，TIG 焊都是最常用到的焊接方式。用 TIG 焊加填丝的方式常用于压力容器的打底焊接，原因是 TIG 焊接的气密性较好能降低压力容器焊接时焊缝的气孔。TIG 焊的热源为直流电弧，工作电压为 10~95V，但电流可达 600A^[11]。焊机的正确连结方式是工件连结电源的正极，焊接中的钨极作为负极。惰性气体一般为氩气。TIG 焊原理是在惰性气体氩气的保护下，利用钨电极与焊接材料间接触产生的电弧热来熔化母材和填充焊丝的一种焊接方法。原理如图 2-1 所示。

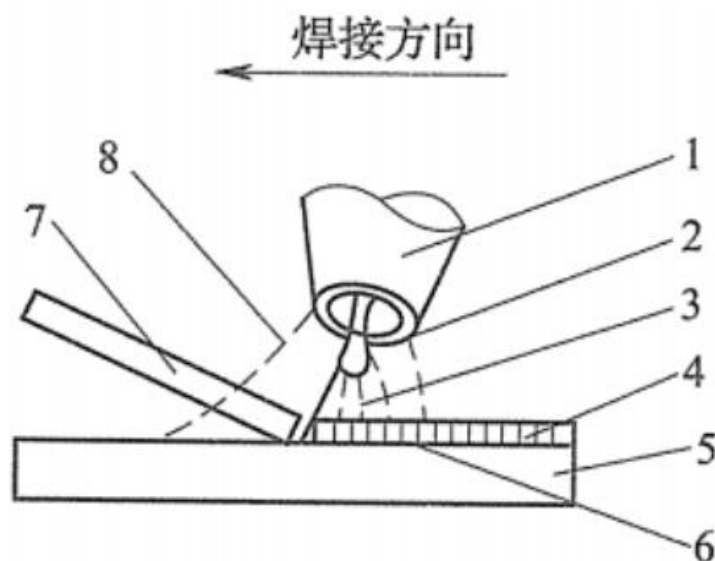


图 2-1 钨极氩弧焊原理示意图

1—喷嘴；2—钨极；3—电弧；4—焊缝；5—工件；6—熔池；7—填充焊丝；8—惰性气体

TIG 焊的特点通常为：氩气属于惰性气体之一，它不仅不溶于液态金属，也不与液态金属发生化学反应，可有效地保护熔化金属和钨极不被污染；电弧燃烧比较稳定，加热集中，热影响区小，焊件的变形量比较小；焊接表面成形良好，接头的力学性能高；明弧易于观察操作，并能进行各种位置的焊接；氩气的电离电势较高，必须采用高频或高压脉冲引弧；钨极的载流能力有限，一次焊透厚度受到限制，一般适用于薄板的焊接。

TIG 焊的优点有操作相当于其他焊接比较方便，操作灵活、容易控制、能很好的适用于各种工作情况的环境、经济成本较低；焊接热影响区域比较窄，在焊丝送丝紧凑的情况下焊接变形量相对较小，焊接后接头的各方面性能也比较高；焊接过程中的工艺性相对比较好、焊接比较稳定，焊接后形成的焊缝致密美观。缺点有熔深浅，熔敷速度小，生产率较低；钨极承载电流的能力较差，过大的电流会引起钨极熔化和蒸发，其微粒有可能进入熔池，渣成污染；惰性气体较贵，和其它电弧焊方法比较，生产成本较高。

2.3 疲劳分析简介

疲劳现象发现已经有很长的历史了，随着科学工作者及工程专家的不断研究和探讨，

已经形成了比较完善的疲劳分析理论，主要包括名义应力法、损伤容限法、局部应力应变法等疲劳分析方法。虽然疲劳分析理论比较成熟了，但是人们对于疲劳破坏的研究仍然在继续，所以疲劳在实际工程问题中的应用得到了更快的发展和变化。当某个结构的一个点或多个点在承受扰动应力并经过几十万或几百万次循环扰动后，材料出现了裂纹或者是直接断裂，发生局部、永久性的结构变化的过程称之为疲劳。

本文疲劳分析是通过 ABAQUS 中的附属软件 Fe-safe 软件最为模拟分析软件，研究模拟在外载荷的作用下模型的应力、位移的变化，首先需要把模拟焊接温度场的模型与焊后应力导入，然后在 ABAQUS 中做静载荷分析，最后把静载结果在 Fe-safe 中打开作为疲劳分析的基础。最后得到静载分析结果：应力分布云图、应变分布云图、位移分布云图与寿命分布云图。

第三章 焊接温度场模拟

3.1 Abaqus 软件简介

ABAQUS 是一个计算功能非常强大的工程类模拟的有限元分析软件，其所能模拟的范围从相对简单的线条分析到非常复杂的立体或曲面分析模拟。ABAQUS 拥有一个内容多种多样、可模拟任意几何图形的强大单元库。并且还拥有很多不同类型材料的材料模型库，所以能模拟常用工程材料的性能，例如常规金属材料、复合材料、高分子材料、钢筋混凝土材料、一些可以进行压缩的超弹性泡沫材料、甚至还能分析土壤和岩石等地质材料。相比于常规的模拟软件，ABAQUS 除了能模拟各种结构的应力、位移变形问题，还可以模拟热传导问题、温度-位移耦合问题、质量扩散、声学分析问题、地质材料力学分析、以及电解质分析等强大功能。

本文通过对 TIG 焊接模拟主要运用到 ABAQUS 中 With Standard/Explicit Model 模块，模拟焊接温度场的基础上再对焊接应力和变形进行分析。最后得到温度场焊接模拟动画、应力分布图、位移变形图等。

3.2 铝合金焊接过程有限元模拟

焊接过程的模拟采用温度-位移耦合，在计算焊接温度场的同时，将温度场作为载荷施加到试件上来计算焊接应力场。

3.2.1 温度场、应力与变形模拟

(1) 前言

模拟 TIG 焊接过程中的温度场计算采用的是双椭球热源形式^[12]，通过 Fortran 语言编写子程序（如图 3-3）在后期提交作业步时进行引用加载热源。图 3-1 为双椭球热源模型。根据以往类似的焊接模拟过程中电弧形态，本文编写的子程序中假设椭球前半轴和后半轴相等，即 $a_1=a_2$ 。算式 3-1 为计算中采用的双椭球热源热流的密度分布。

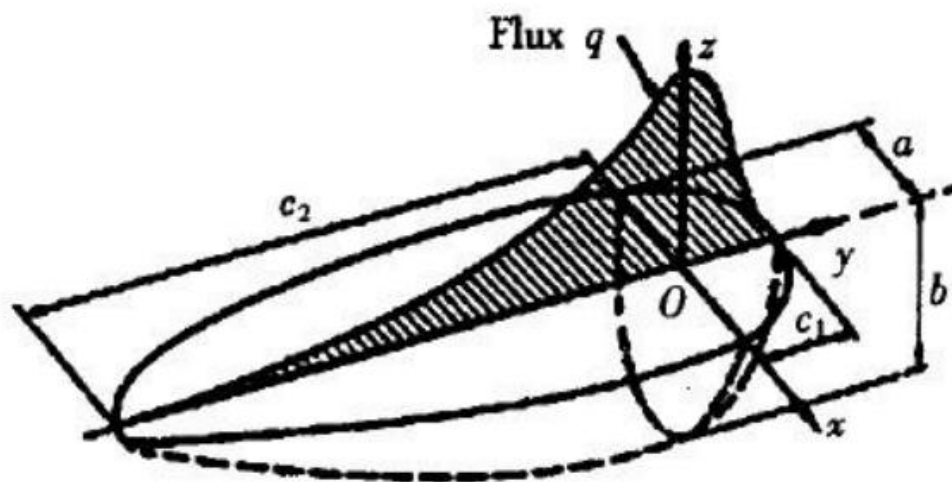


图 3-1 双椭球热源模型

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

其中 $Q=UI\eta$ ， U 为焊接电压， I 为焊接电流， η 为焊接效率， a 、 b 、 c 为热源形状参数， v 为焊接速度， t 为时间。本文模拟过程中 a 为 5mm， b 为 5mm， c 为 10mm， $v=5.0\text{mm/s}$ 。热源效率为 0.8。

(2) 几何模型的建立

通过 Part 模块进行绘制草图再拉伸，再通过草图分割与扫掠几何图形分割得到如图 3-2 的图形两块尺寸均为 100mmx50mmx2mm 模型。

(3) 给模型赋予材料

本文主要是对焊接温度场进行模拟，然后在焊接温度场模拟的基础再对应力变形和位移变形进行分析。所以要设置的必要参数有密度、弹性模量与泊松比随温度的变化、屈服强度随温度的变化、热膨胀系数随温度的变化、热导率随温度的变化、比热随温度的变化。

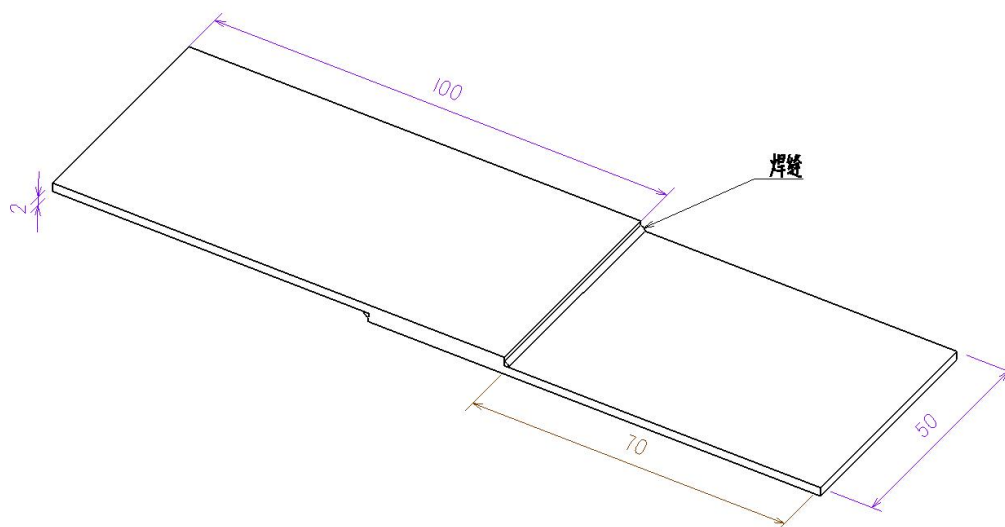


图 3-2 模型尺寸

```

SUBROUTINE DFLUX (FLUX, SOL, KSTEP, KINC, TIME, NOEL, NPT, COORDS, JLTY,
1              TEMP, PRESS, SNAME)
C
  INCLUDE 'ABA_PARAM. INC'
  DIMENSION COORDS (3), FLUX (2), TIME (2)
  CHARACTER*80 SNAME
  x=COORDS (1)
  y=COORDS (2)
  z=COORDS (3)
  wu=16.0
  wi=80.0
  effi=0.5
  v=0.005
  q=wu*wi*effi
  d=v*TIME (2)
  a=0.005
  b=0.005
  c=0.01
  aa=0.006
  f1=1.0
  PI=3.1415926
  x0=0
  y0=0
  z0=0
  heat1=6.0*sqrt (3.0)*q/(aa*b*c*PI*sqrt (PI))*f1
  heat2=6.0*sqrt (3.0)*q/(a*b*c*PI*sqrt (PI))*(2.0-f1)

  shape1=exp (-3.0*(x-x0-d)**2/aa**2-3.0*(y-y0)**2/b**2
$ -3.0*(z-z0)**2/c**2)
  shape2=exp (-3.0*(x-x0-d)**2/a**2-3.0*(y-y0)**2/b**2
$ -3.0*(z-z0)**2/c**2)

  JLTY=1
  IF (x .GE. (x0+d)) THEN
    FLUX (1)=heat1*shape1
  ELSE
    FLUX (1)=heat2*shape2
  ENDIF
  RETURN
  END
    
```

图 3-3 热源子程序图

1) 在属性板块中材料管理器中建立一个新的材料库命名为“A-2A12”，找到相应的密度、弹性模量、屈服强度、热膨胀系数、热导率、比热模块将依次将 2A12 铝合金材料参数输入，除了密度外需要加上“使用与温度相应的数据”才能输入与对应温度的变化。如图 3-4。完成新材料库建立后，在桌面左上方选择“模型”-“编辑属性”-“Model-1”后输入绝对零度-273.15 和玻尔兹曼常数（Stefan-Boltzmann）5.67E-08,如图 3-5。

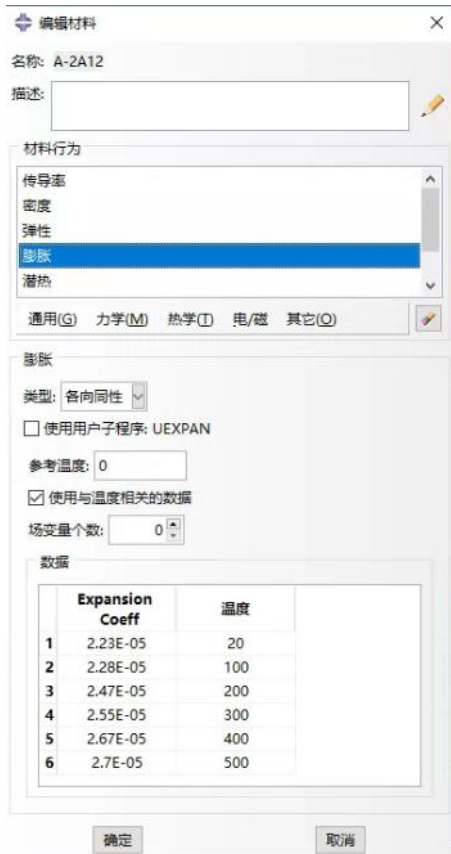


图 3-4 2A12 铝合金材料参数设置



图 3-5 参数设置

2) 创建一个截面，截面类型为“实体”、“均质”，再选中新建的 A-2A12 材料库。再“指派截面”里选中整体模型即成功将新建的模型库赋予到模型。

(4) 装配

在装配板块中，选择 **Create instance**，在部件下选中 **Part-1**，确定后即可。在“平移实例”中调节坐标位置，使得坐标原点与焊缝路径起点重合，接着在“旋转”模块中调节坐标方向，调节使得 x 轴方向为焊接移动的方向，z 轴方向为模型厚度方向，y 轴为垂直焊缝方向。

(5) 分析步

本次模拟需要建立加热步和冷却步两个分析步，在分析步模块中的“分析步管理器”中新建一个分析步命名 **Heating**，类型为“选择温度-位移耦合”，点继续后设置时间长度为 20s，表示焊接速度为 5mm/s。其他设置如图 3-6。再次在“分析步管理器”中创建一个分析步命名为 **Cooling**，点击 **Heating** 步表示在冷却步是在加热步后在进行的，分析步类型还是“温度-位移耦合”，点继续后在时间长度处输入 600 表示冷却时间为 600s，其他设置如图 3-7。

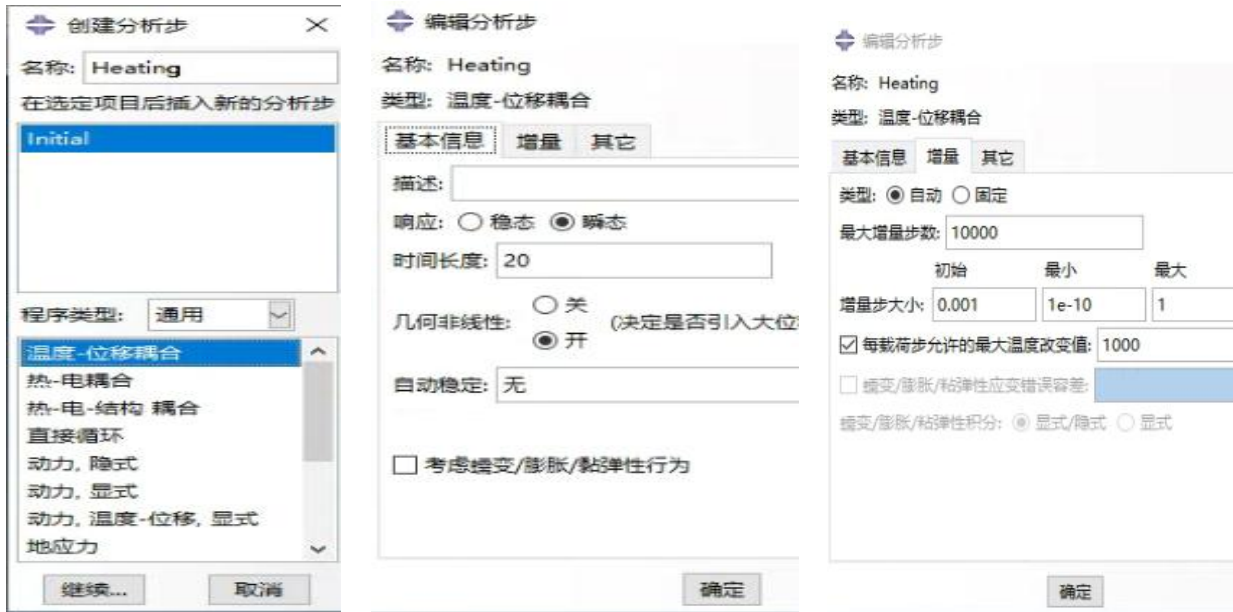


图 3-6 加热步创建



图 3-7 冷却步建立

(6) 相互作用

本模拟分析需要创建的相互作用主要是“辐射”和“对流”两种，如图 3-8 和图 3-9。首先是创建对流作用命名为 Int-film，点击 Heating 表示是在加热步起作用，作用类型选择“表面热交换条件”。点击继续再选中整体模型，将膜层散热系数设置为 20，环境温度设置为 20。接着创建辐射作用命名为 Int-radiation，还是选中 Heating 作用于加热步，作用类型选择“表面辐射”后也是选中整体模型，设置辐射换热系数为 0.85。环境温度为 20，如图 3-10。

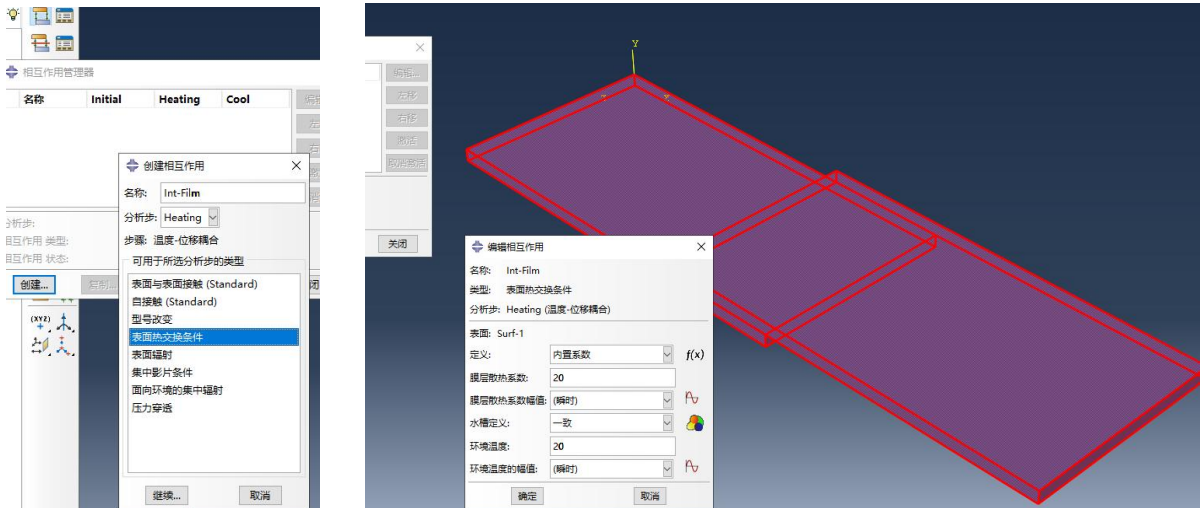


图 3-8 建立相互作用对流

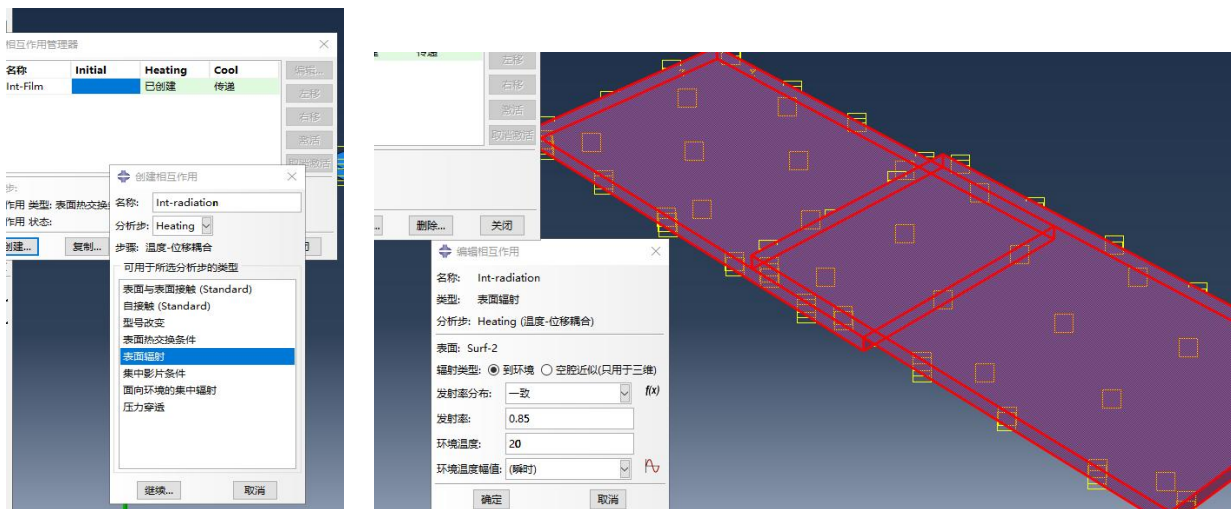


图 3-9 建立相互作用辐射

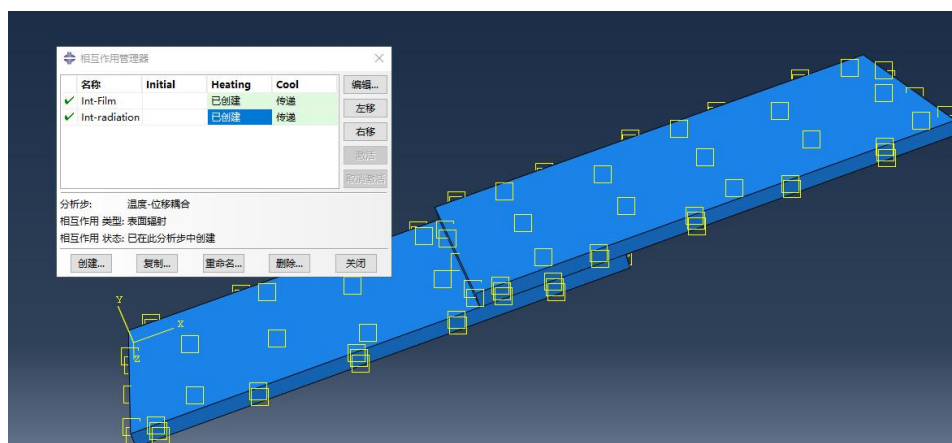


图 3-10 对流与辐射建立完成图

(7) 加载载荷

1) 在载荷管理器中创建一个新载荷 Load-weld, 在分析步 Heating 进行, 载荷类型选择“热学”与“体热通量”。接着分布方式选择“用户自定义”, 大小为 1, 1 对应热源子程序

中的是热源分配系数 $f1=1$ ，如图 3-11。

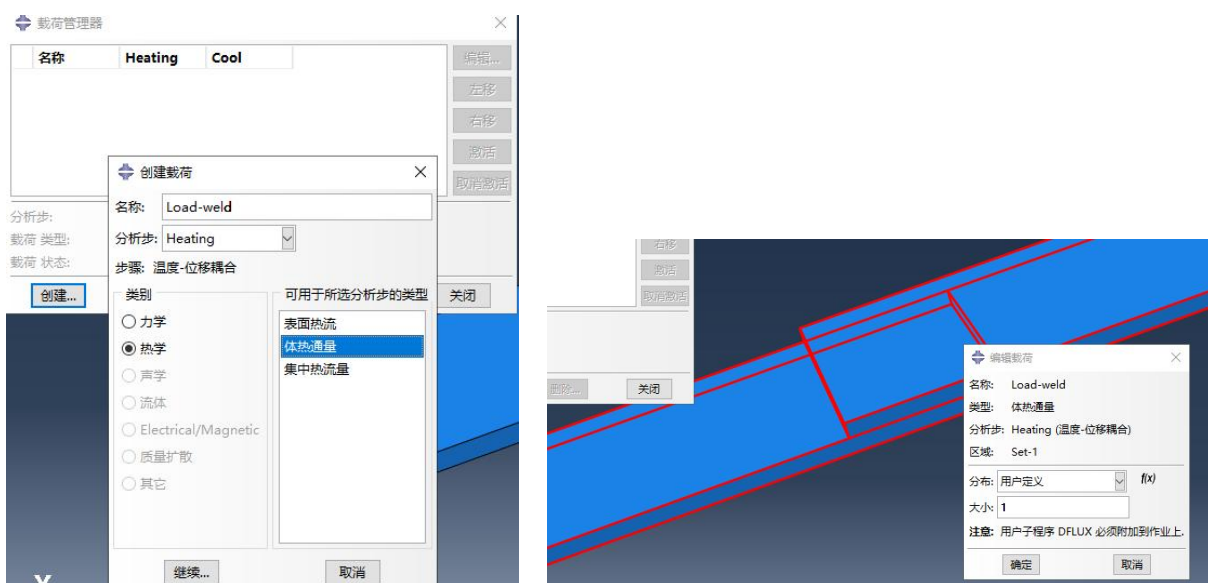


图 3-11 在焊缝处创建载荷

2) 创建边界条件，在“边界条件管理器”模块创建新的边界条件命名为 BC-weld，从初始步 Initial 步开始，类型选择“力学”与“位移/转角”再以模型六个角边线为边界条件，点继续后把 U1、U2、U3 勾上，代表将 x、y、z 三个方向位移固定，如图 3-12。

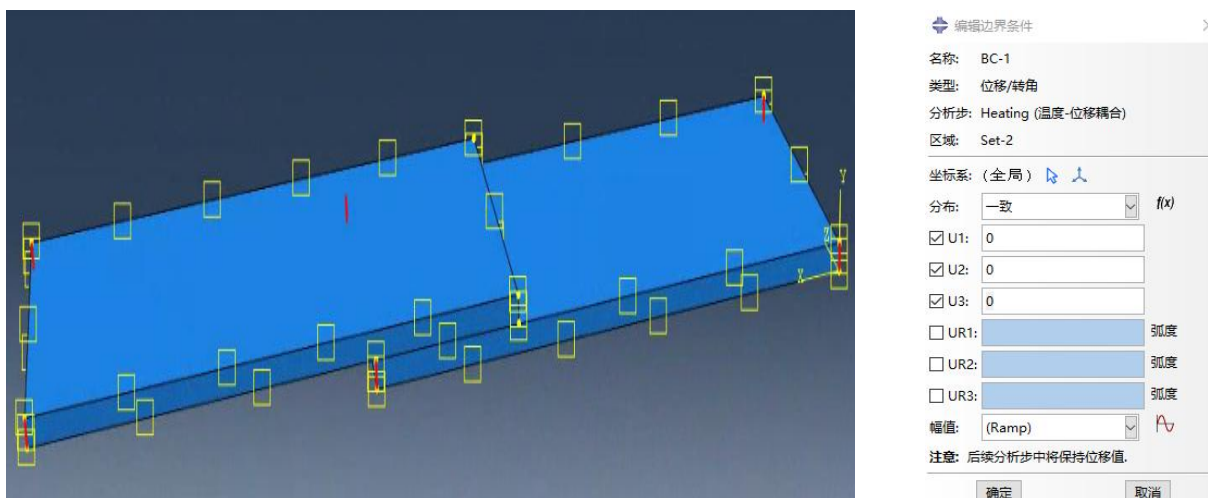


图 3-12 建立边界条件

3) 创建预定义场，在预定义管理器中创建一个新的预定义场默认命名 Predefined Field-1，从初始步 Initial 开始，类型选择“其他”、“场”，选中整体模型后在 Magnitude 处设置初始温度为 20°C 。

(8) 划分网格

1) 在部件的状态下进行网格划分，点击“种子部件”编辑全局种子，设置近似全局尺寸为 0.001，表示为以 1mm 为一个单位划分网格，如图 3-13。然后在“为部件划分网格”中进行网格划分，完成后网格数量为 30000 个，如图 3-14，检查后无报错接着下一步。

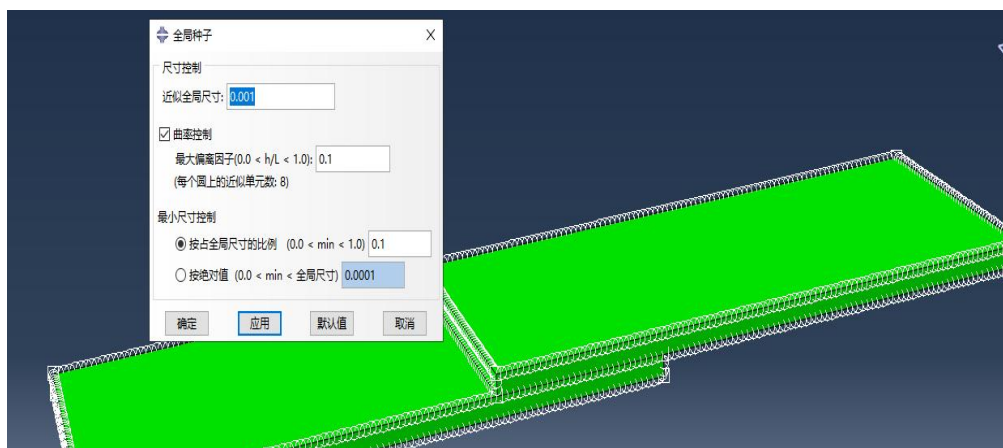


图 3-13 布置全局种子

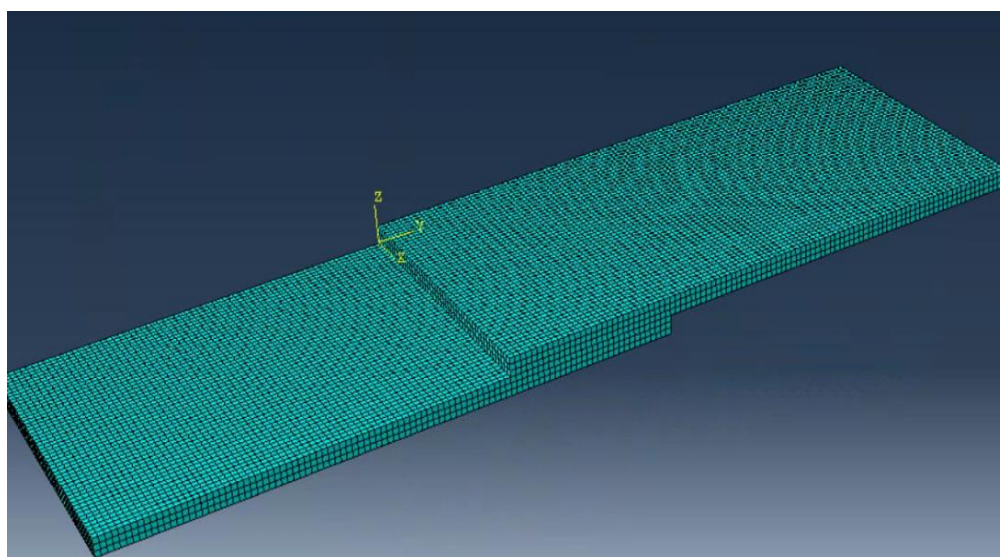


图 3-14 网格划分完成图

2) 网格划分完成后需要在“指派单元类型”中设置单元类型，本模拟分析单元类型选择“温度-位移耦合”与“减缩积分”，使得单元类型为 C3D8RT：八结点热耦合六面体单元，三向线性位移，三向线性温度，减缩积分，沙漏控制。

(9) 提交作业分析

在作业管理器中新建一个作业命名 Job-1，选中模型 Meder-1，然后在 User subroutine filer 处找到之前通过 Fortran 语言编写的热源子程序并引用。Job-1 建立成功后先点击 Date check 检查前面设置的参数或是建立的分析步是否有错误导致计算失败，若无报错出现出现点击 Submit 就开始计算分析了，分析过程中还可以打开 Monitor 监控窗口实时查看分析过程。

3.2.2 温度场模拟结果

计算完成后，打开可视化窗口，选择 NT11 即可查看温度场分布。图 3-15 到 3-17 分别为焊接过程进行到 1.609s、8.429s 时的温度场分布与冷却到室温时的温度场分布。

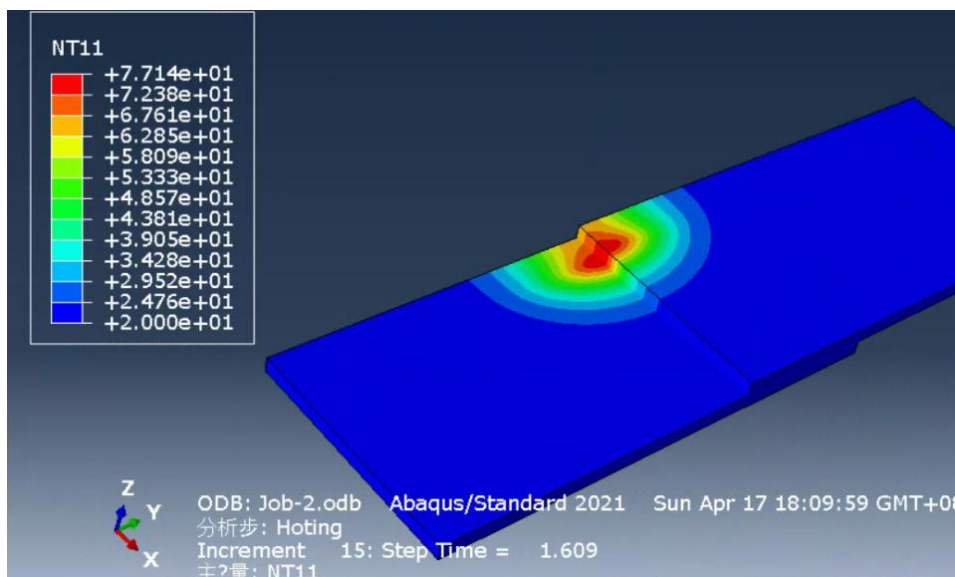


图 3-15 焊接进行到 1.609 时温度场分布

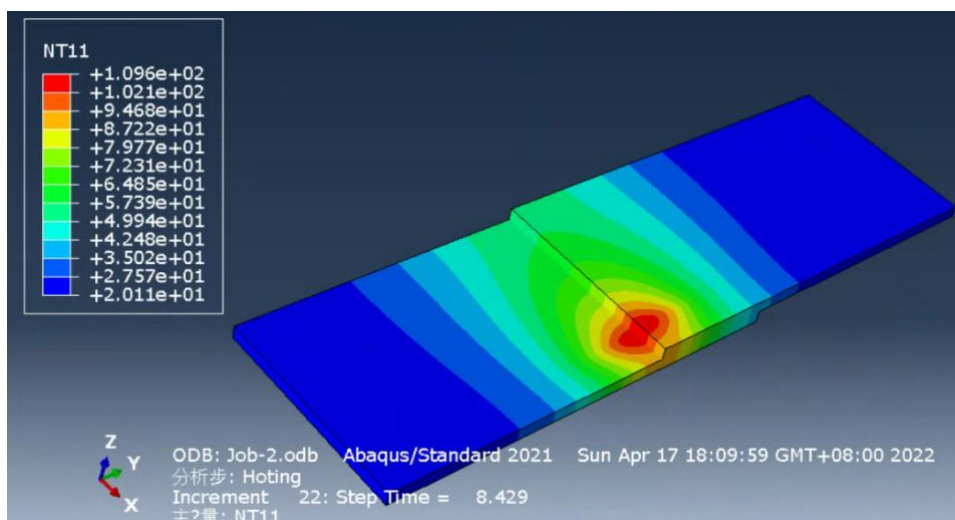


图 3-16 焊接进行到 8.429 时温度场分布

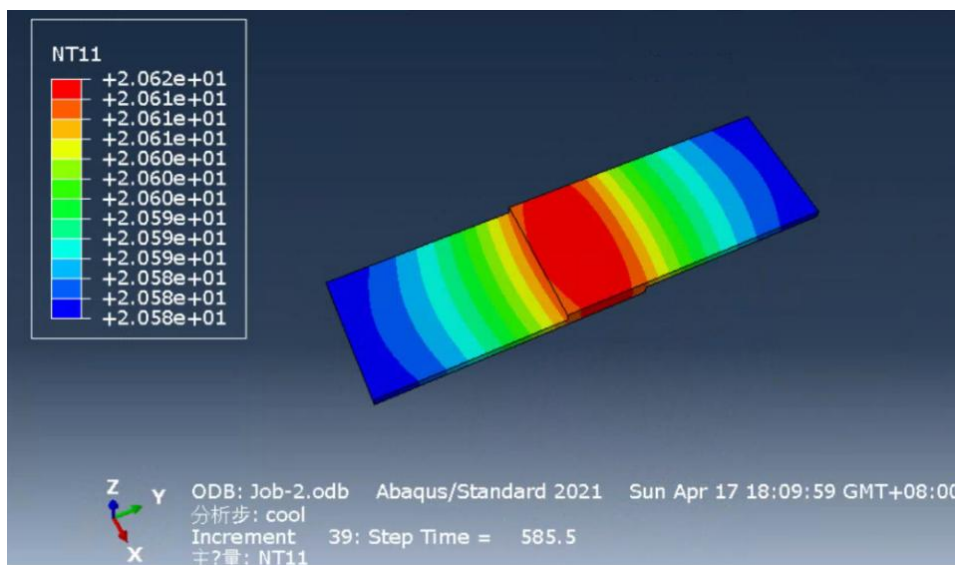


图 3-17 冷却到室温时温度场分布

由图 3-15 和 3-16 可以看到，温度场模拟结果表明热源区域符合双椭球热源模型形状且随时间向 x 方向缓缓移动，与在子程序设定的热源沿 x 轴方向移动吻合，展现结果十分稳定，完全符合上文所描述双椭球热源模型函数的分布规律。由图 3-17 可以看到，当分析步 cool 进行快到 600s 的时候，温度接近 20°C 室温，最大温度分布在焊缝处，与实际焊接过程冷却时间吻合。

3.2.3 应力模拟结果

图 3-18 为与焊缝方向垂直的应力分布图，图 3-19 为与焊缝方向一致的应力分布图。

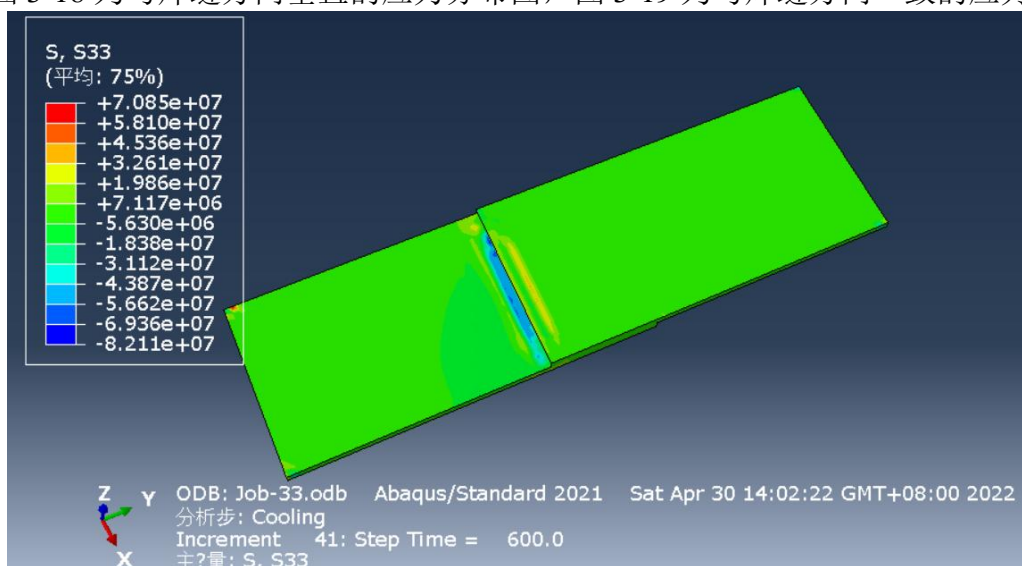


图 3-18 与焊缝方向垂直的应力分布

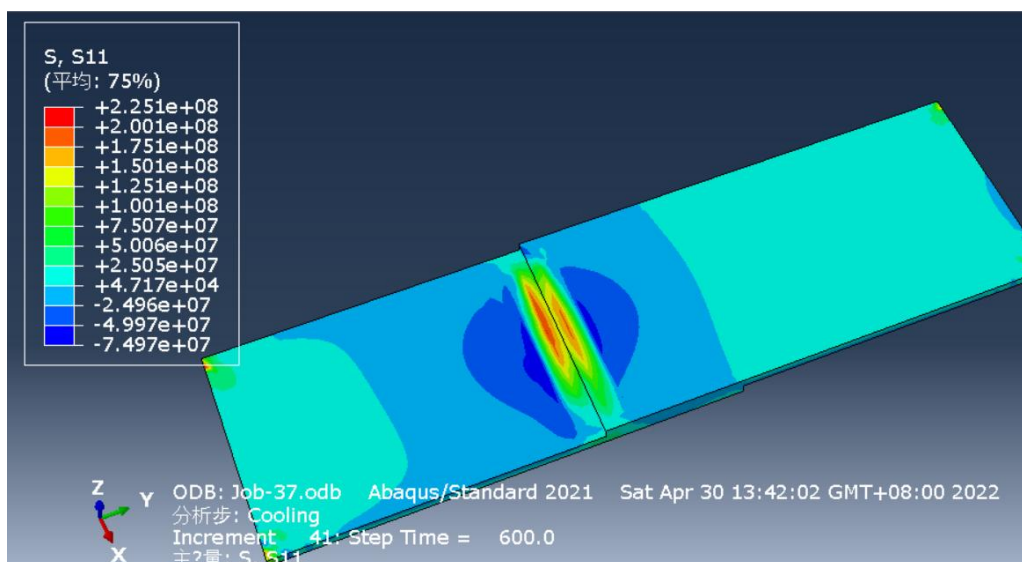


图 3-19 与焊缝方向平行的应力分布

比较图 3-18 与图 3-19，对于平行与焊缝路径的应力，在焊缝路径附近位置的应力分布主要为拉应力，并且焊缝区路径上拉应力最大，随着远离焊缝慢慢扩散拉应力逐渐变小

转换为压应力。对于与焊缝路径方向垂直的应力，整体应力分布主要为压应力，焊缝处压应力最大且只有较小的拉应力。

在可视化窗口找到“路径”，创建一个新的路径 path-1，类型为节点列表，在“在视口选择集”中选择“添加于前”。然后在沿着焊缝方向的一条直线路径上依次选择节点。接着找到“创建 X、Y 数据”，以路径方式创建，继续在“帧”处选择一个分析步时间点作为绘制 X、Y 数据的依据，再从场输出中选择“S”与“S33”（S33 为 z 轴方向），最后点击绘制即有如图 3-20 为与焊缝移动路径方向一致的应力分布图。再创建一个新的路径 Path-2，其它操作一样，除了选择节点为与焊缝移动方向垂直的一条直线路径，最后绘制如图 3-21 与焊缝移动方向垂直的应力分布。

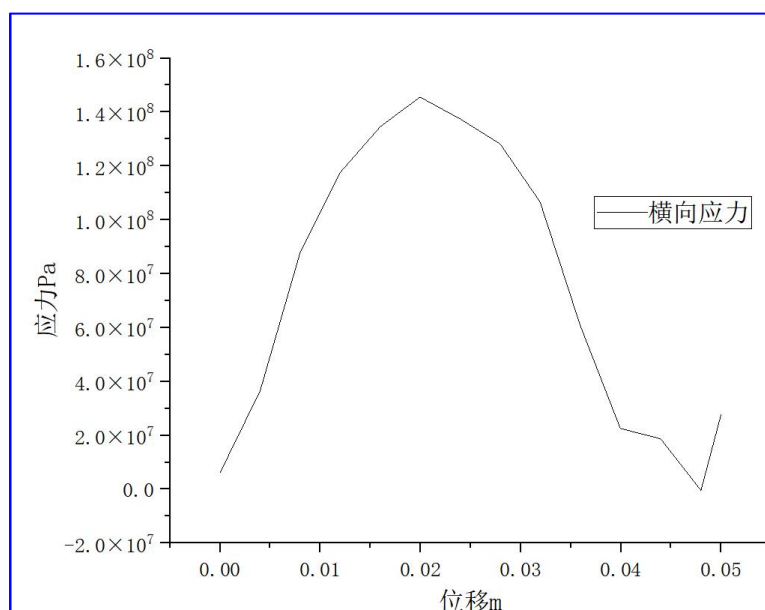


图 3-20 与焊缝路径移动方向一致的应力分布

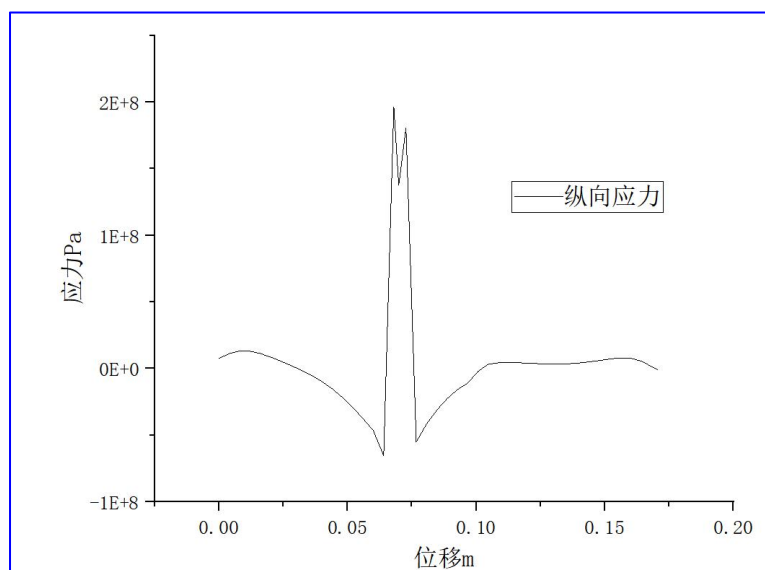


图 3-21 与焊缝移动路径上垂直的应力分布

由图 3-20 可以看出从焊接起点开始的拉应力 6MPa 逐渐增加,在距离焊接起点 19mm 处增加到最大 146MPa, 然后拉应力开始逐渐减小, 在距离焊接起点 45mm 时减小到 0, 最后在 0 附近波动, 只有较小的压应力。由图 3-21 可知在模型边缘应力几乎为零, 向着焊缝移动, 受压应力作用且压应力逐渐增加到-65MPa, 然后急剧减小到 0 后转变为拉应力急剧增加到 196MPa, 在焊缝中心处减小到了 137MPa, 过了焊缝有急剧增加到 181MPa, 此处两个最大值出现位置在焊趾处, 过了焊趾处拉应力急剧减小到 0 后转为压应力逐渐到 -55MPa, 最后逐渐减小到 0 附近波动。综上所述, 得出焊接在焊缝附近应力最大, 随着远离焊接路径, 拉应力逐渐变小变为压应力。

3.2.4 位移变形模拟结果

如图 3-22 是与焊缝平行方向的焊接位移变形分布云图。

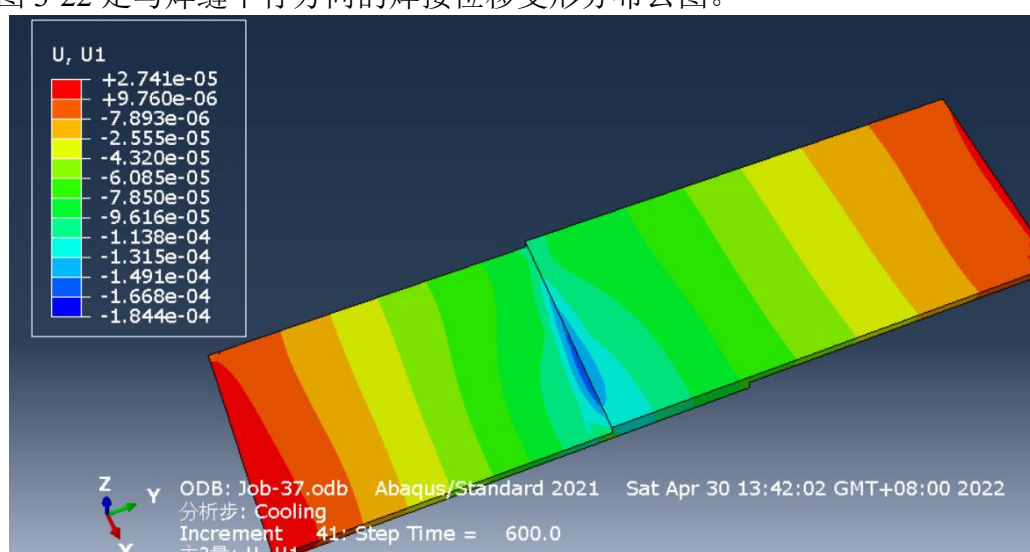
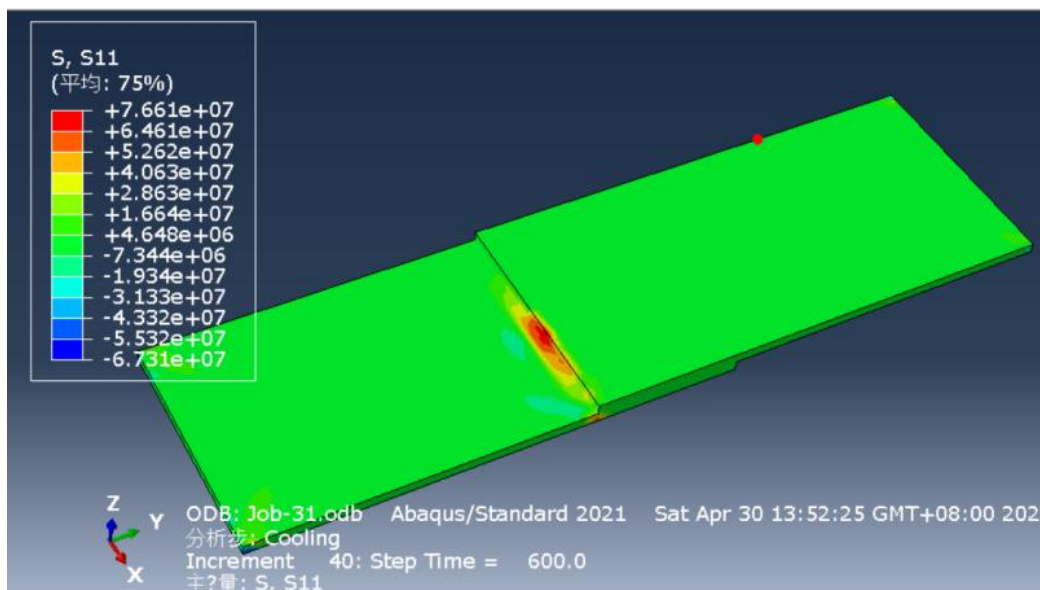


图 3-22 焊后位移分布图

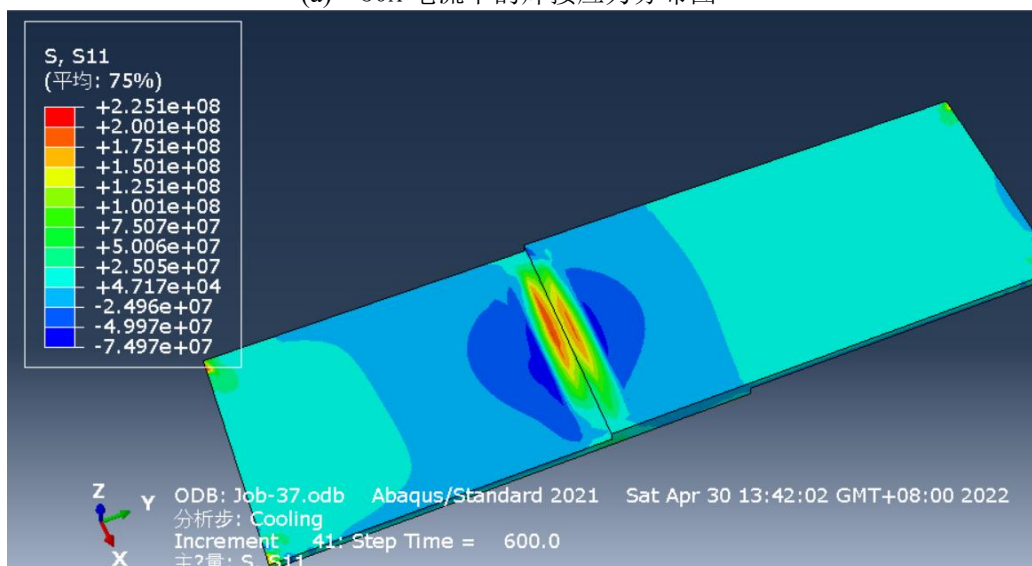
由图 3-22 可以看出, 在焊缝处由于焊接时熔池凝固后会产生收缩的压力, 所以位移变化为负位移, 即在焊缝路径处受挤压作用。向远离焊缝方向逐渐扩散由受挤压力逐渐转变为受拉力的作用。所以位移变化又从负位移变为正位移。

3.2.5 不同焊接电流模拟对比

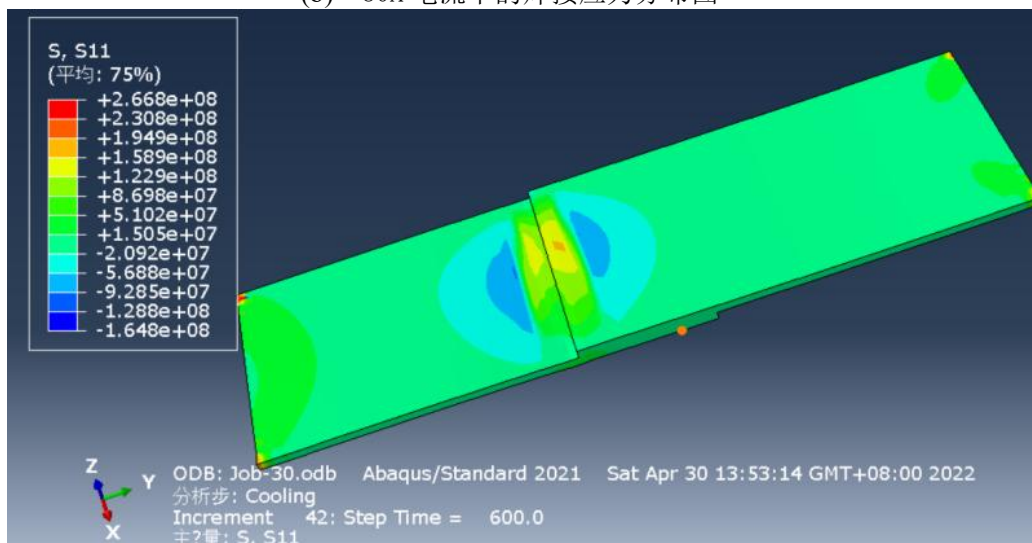
将焊接电压、焊接速度、焊接效率系数设置为固定值, 改变电流大小, 分别设置 50A、80A、120A 得到图 3-23 的焊接应力分布图, 图 3-24 的位移分布图。



(a) 50A 电流下的焊接应力分布图

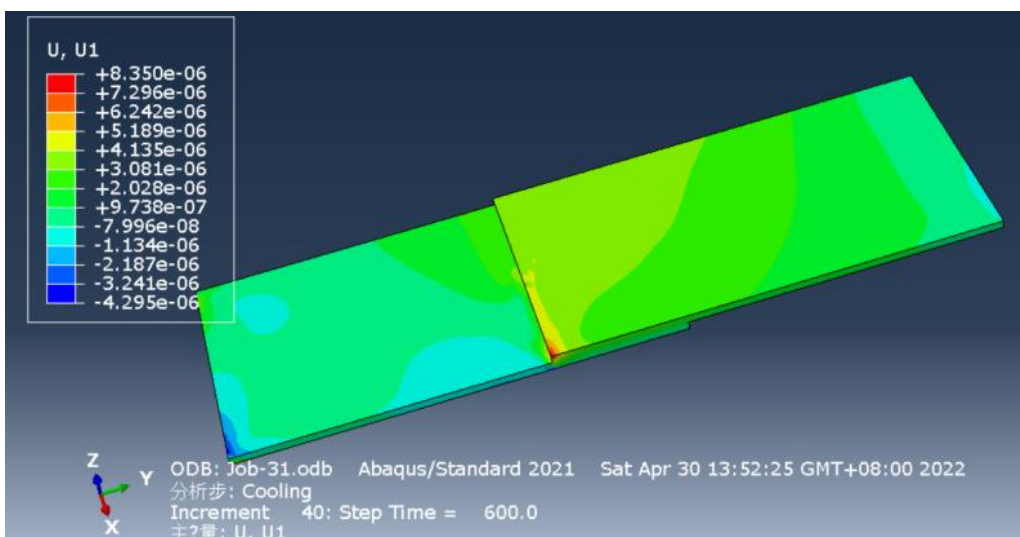


(b) 80A 电流下的焊接应力分布图

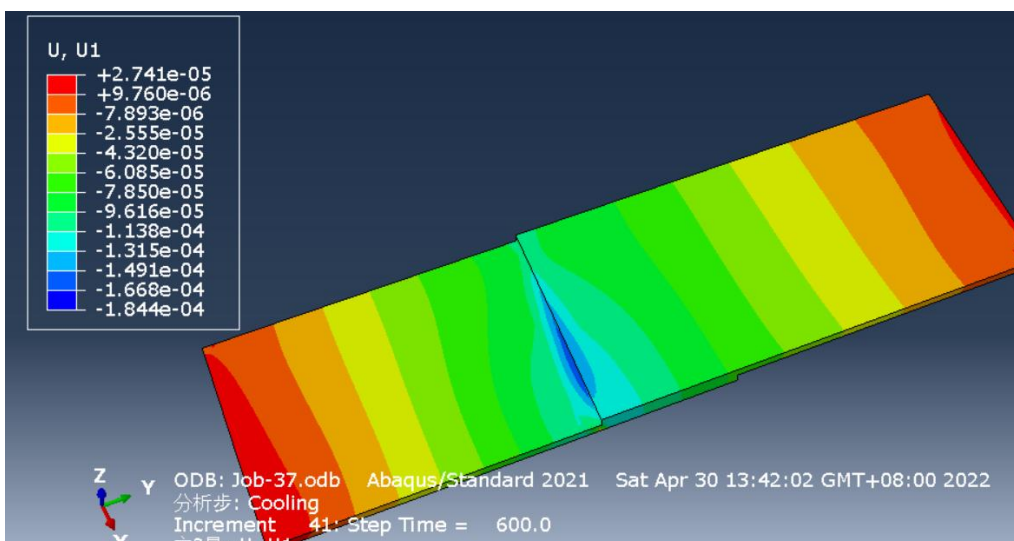


(c) 120A 电流下的焊接应力分布图

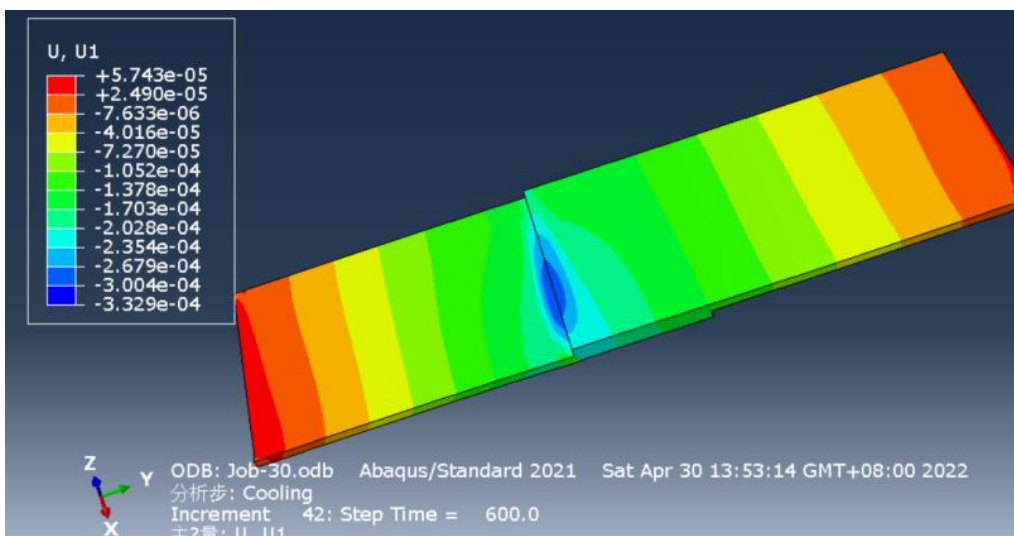
图 3-23 50A、80A、120A 三种电流下的焊接应力分布图



(a) 50A 电流下的位移分布图



(b) 80A 电流下的位移分布图



(c) 120A 电流下的位移分布图

图 3-24 50A、80A、120A 三种电流下的位移分布图

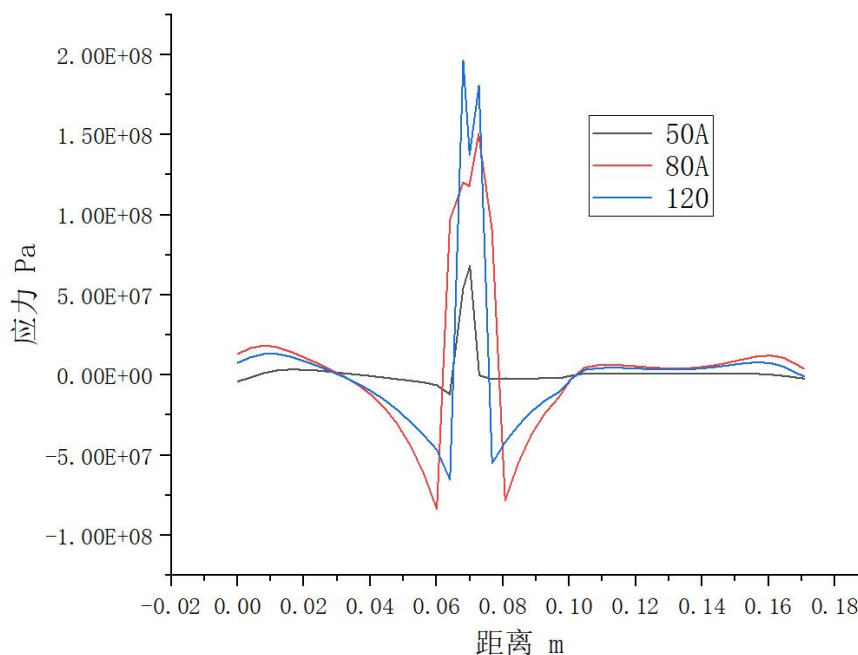
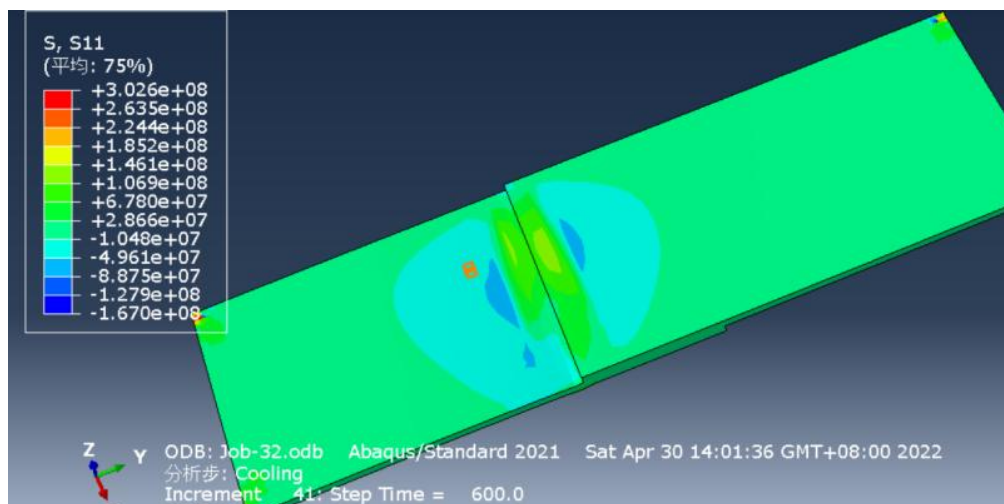


图 3-25 三种不同电流焊接的纵向应力分布图

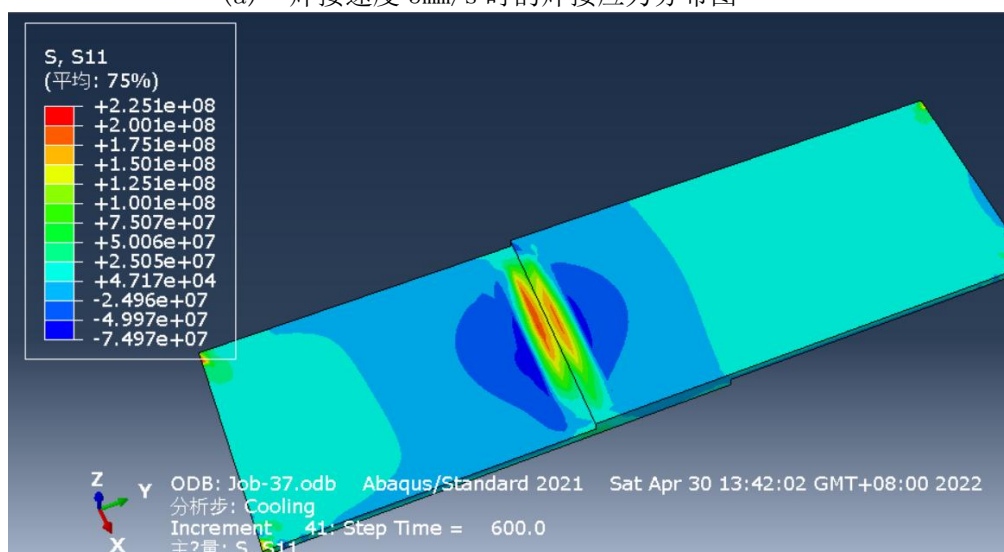
由图 3-23 可以看出焊接后最大应力分布在焊缝处，焊缝拉应力向两边扩展逐渐转换为压应力，再远点应力几乎没有，焊缝处只有较小的压应力。由图 3-24 可以看出焊缝处为都是负位移，因为在焊接时母材经过熔化再凝固后焊接路径上会受到挤压的作用力，由焊缝逐渐扩散到两边，位移变化大小逐渐由负变为正，及从中间的挤压转变为受拉的作用力。综合图 3-23、图 3-24、图 3-25，当焊接电流为 50A 时，焊缝处最大应力为 68MPa，焊缝受挤压位移为 $-4.295e-06m$ ，残余应力最小，但是应力分布并无规律可寻；当焊接电流为 80A 时，焊缝处最大应力为 150MPa，焊缝受挤压位移为 $-1.844e-04m$ ，虽然残余应力分布最大，但是焊后应力分布规律最清晰；当焊接电流为 120A 时，焊缝处最大应力为 180MPa，焊缝受挤压位移为 $-3.329e-04m$ 。综上，焊接电流越大，残余拉应力越大，焊缝处受挤压位移越大，所以选择焊接电流比较适中的 80A。

3.2.6 不同焊接速度模拟对比

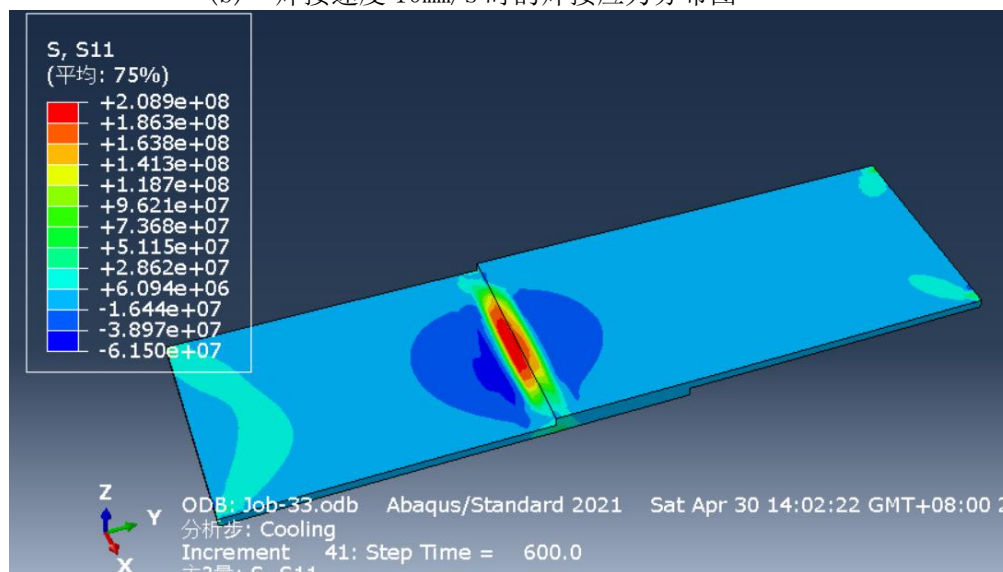
将焊接电压、焊接效率系数设置为同上数值，使用焊接电流为 50A，改变焊接速度大小，分别为 5mm/s、10mm/s、15mm/s，得到图 3-26 的焊接应力分布图与图 3-27 的位移分布图。



(a) 焊接速度 5mm/s 时的焊接应力分布图

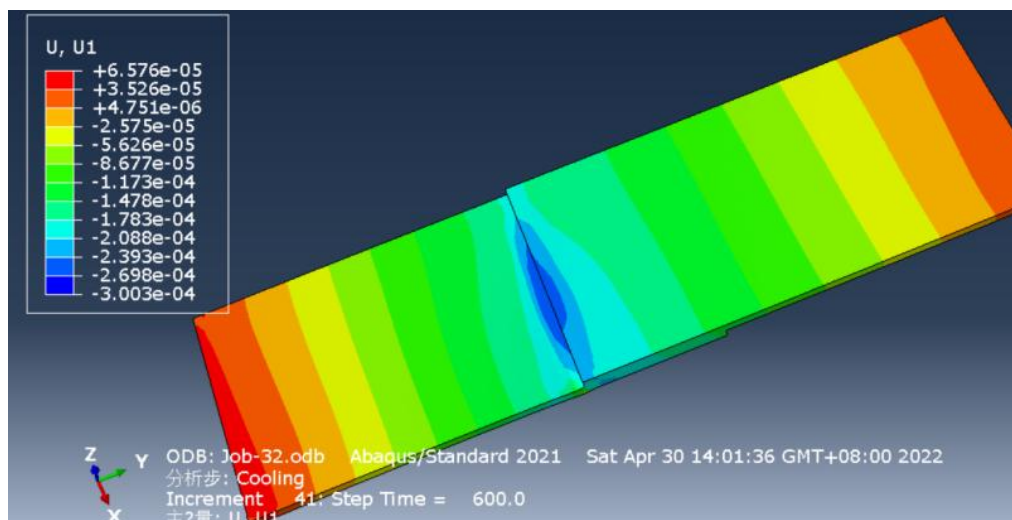


(b) 焊接速度 10mm/s 时的焊接应力分布图

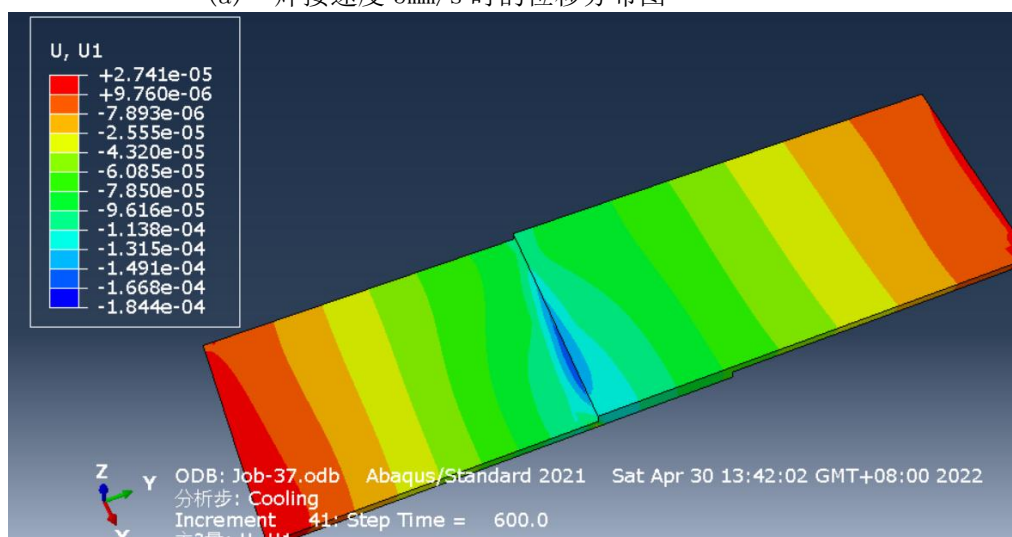


(c) 焊接速度 15mm/s 时的焊接应力分布图

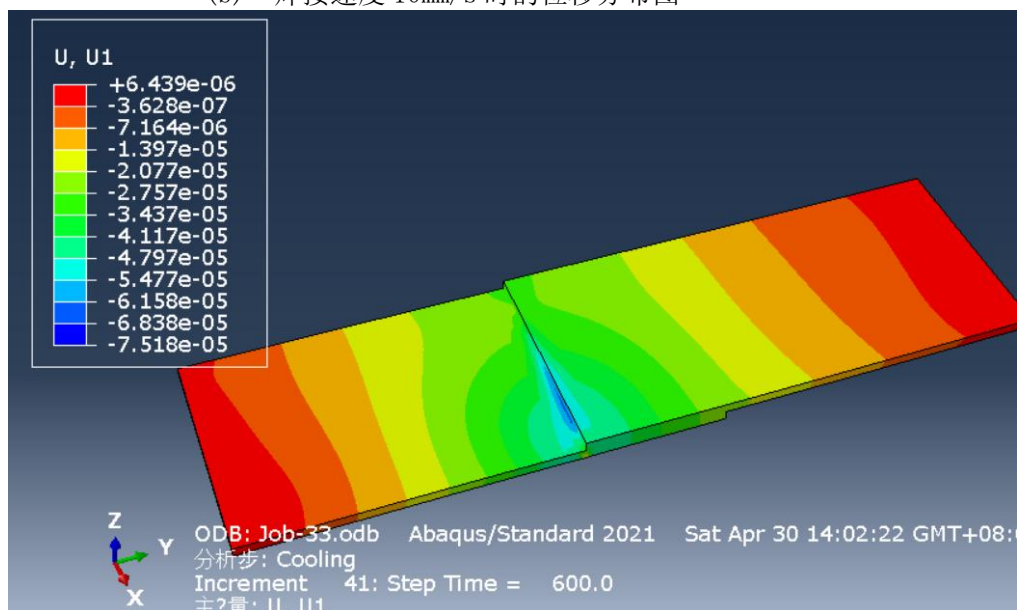
图 3-26 焊接速度为 5mm/s、10mm/s、15mm/s 时的应力分布图



(a) 焊接速度 5mm/s 时的位移分布图



(b) 焊接速度 10mm/s 时的位移分布图



(c) 焊接速度 15mm/s 时的位移分布云图

图 3-27 焊接速度为 5mm/s、10mm/s、15mm/s 时的位移分布图

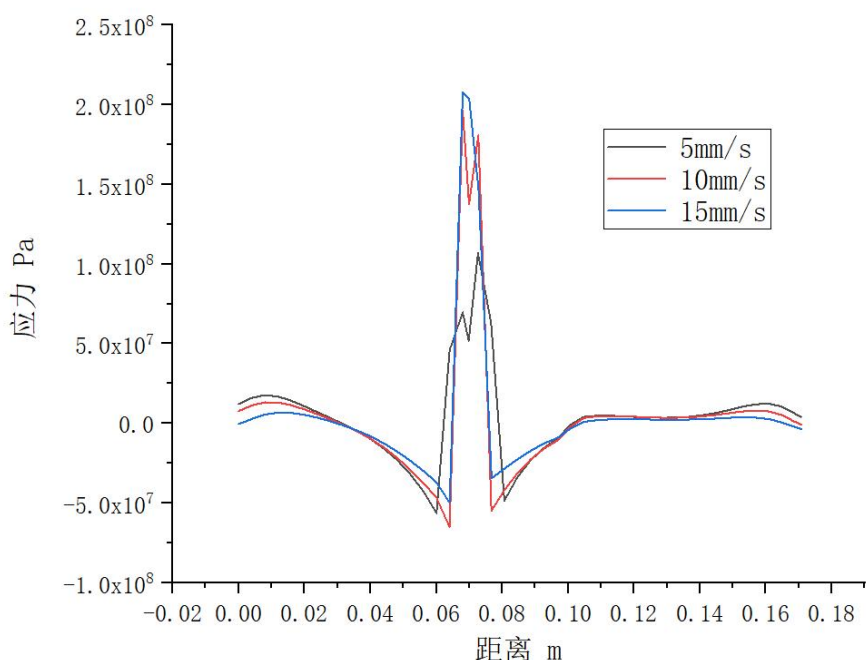


图 3-28 三种不同焊接速度的纵向应力分布图

由图 3-26 与图 3-27 可以看出，应力的分布都满足焊缝处收到拉应力最大，从焊缝向两边扩散，拉应力逐渐变为压应力，最后又慢慢接近于无应力分布；位移的分布均满足焊缝处受挤压，慢慢扩散远离焊缝后受挤压的力逐渐变为受拉的力，即从负位移逐渐变为正位移。由 3-28 可知，当焊接速度为 5mm/s 时，焊缝处最大应力为 106MPa，受挤压位移为 $-3.003\text{e-}04\text{m}$ ；当焊接速度为 10mm/s 时，焊缝处最大应力为 196MPa，受挤压位移为 $-1.844\text{e-}04\text{m}$ ；当焊接速度为 15mm/s 时，焊缝处最大应力为 207MPa，受挤压位移为 $-7.518\text{e-}05\text{m}$ ；所以焊接速度越大，最大残余应力最大，焊缝处受挤压位移越小，综上，焊接速度越大，焊缝处残余应力最大，受挤压位移最小，所以选择焊接速度为 5mm/s。

3.3 本章小结

在温度场模拟完成后，得出的温度场模拟结果表明热源区域符合双椭球热源模型形状且随时间向 x 方向缓缓移动，与在子程序中设定的热源沿 x 轴方向移动吻合；从应力分布云图可知，在焊缝处主要收拉力作用，远离焊缝逐渐扩散后拉应力慢慢变为压应力，接着又从压应力慢慢受力接近于零；从位移分布云图可知，焊接后在焊缝处主要受挤压力所以位移为负，远离焊缝后位移分布慢慢从负位移变为正位移。

第四章 静载与疲劳分析

4.1 前言

在焊接温度场模拟完成后,需要继续模拟对焊接完成后的试件的静应力分析与疲劳分析,操作过程如图 4-1。

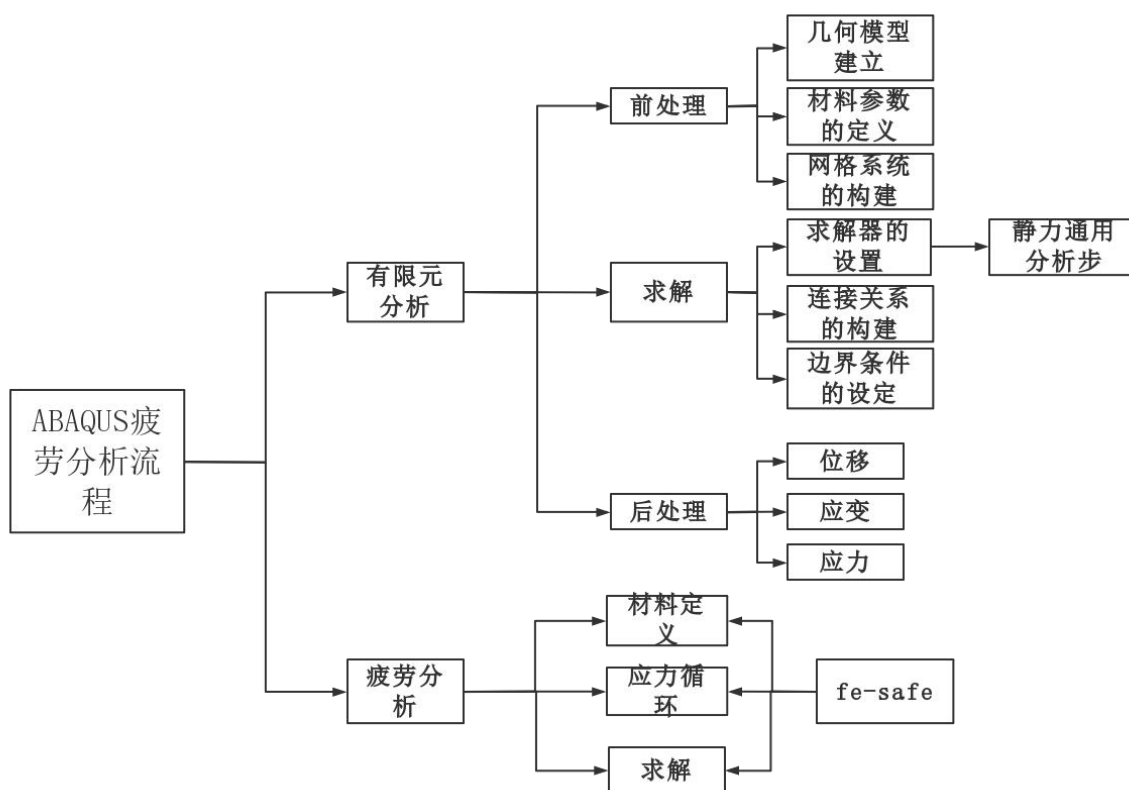


图 4-1 ABAQUS 疲劳分析流程图

4.2 静载荷分析

1.模型导入

为了更加接近实际疲劳分析,所以在做疲劳分析的时需要导入模拟焊接温度场所用的模型,打开模型后,清除温度场模拟所建立的分析步、相互作用、边界条件,只留下模型特征与模型材料。由于在模型两边加载荷拉伸时会产生翻转,所以还需要在模型两端各加一块尺寸为 50mmx20mmx2mm 薄板,使得模型在受力时力能作用在同一水平。

2.建立分析步

在分析不模块中建立一个新的分析不,类型选择“静力、通用”。基本信息可以默认,也可以将几何非线性打开,在增量中为了确保后续分析正常进行,需将最大增量步设置万步以上、初始增量步 0.01、最小增量步 1e-05、最大 1,如图 4-2。

3.载荷创建

创建一个预定义场,在 Initial 时加入应力,选中整体模型后“规范”选择“来自输出

数据库文件”，找到之前做好的温度场模拟结果文件加入进来，填写分析最后一步的分析步数与增量步数，如图 4-3。这样模型就拥有了焊接后的应力。接着创建一个边界条件将模型固定约束。最后创建载荷给模型施加外力，由焊缝向两边拉伸；力的大小为 30000N；约为材料抗拉强度的一半，力的类型选择表面载荷。

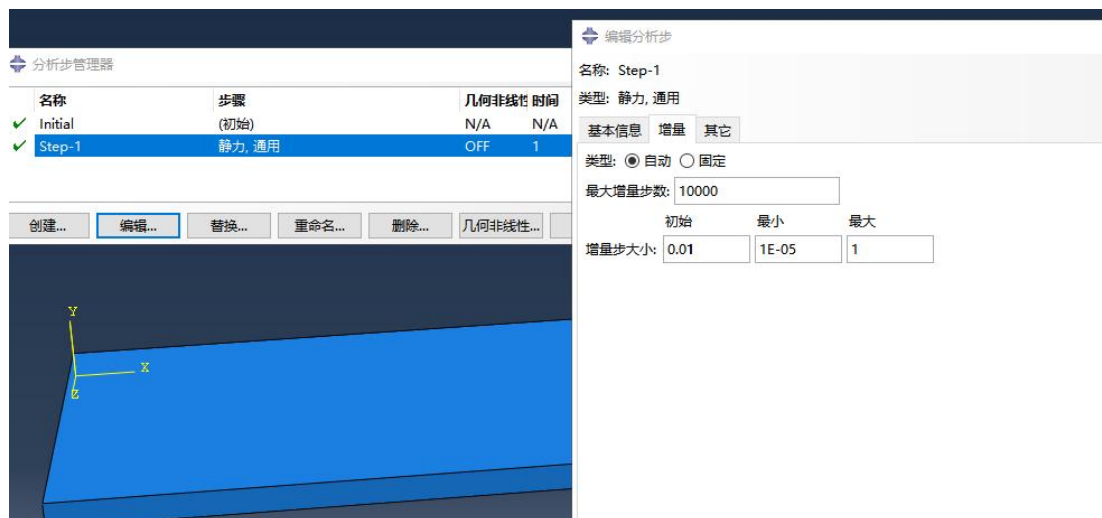


图 4-2 分析不建立过程

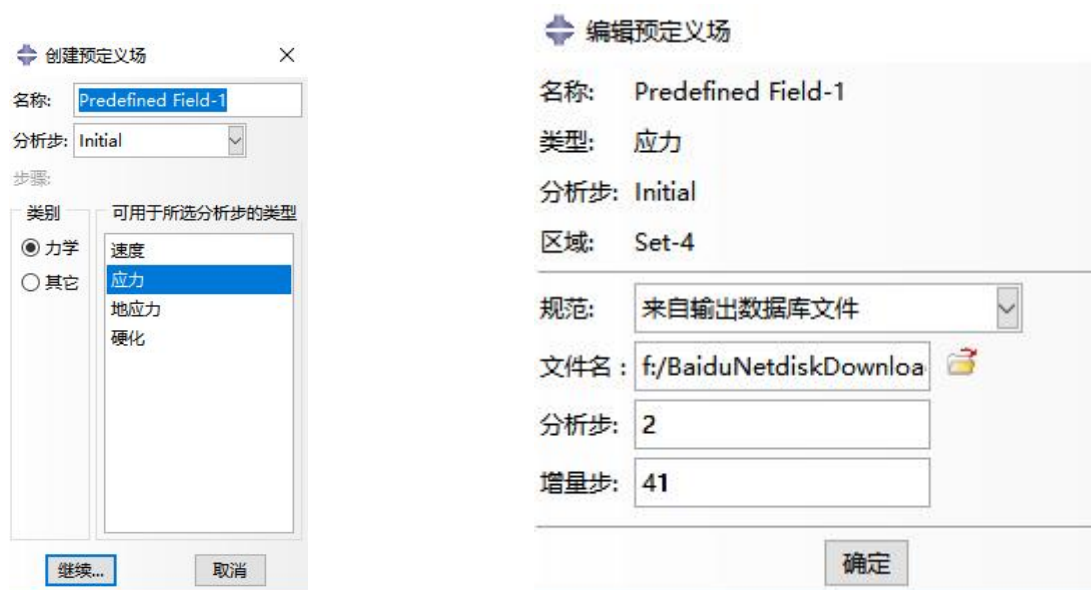


图 4-3 导入初始应力

4. 网格划分并提交分析

选用“种子部件”以 1mm 为一个单位布种，接着为部件划分网格，最后指派网格类型，单元类型为“三维应力”。网格划分完毕后，在任务管理器中建立一个新作业 Job，提交检查后无报错然后点提交就开始进行分析了。

5. 静载荷分析结果

图 4-4 与施加外部载荷后的有限元分析应力图，图 4-5 为位移分布云图。从图 4-4 可知，最大应力分布主要分布在焊缝处，随着远离焊缝扩散应力越来越小。

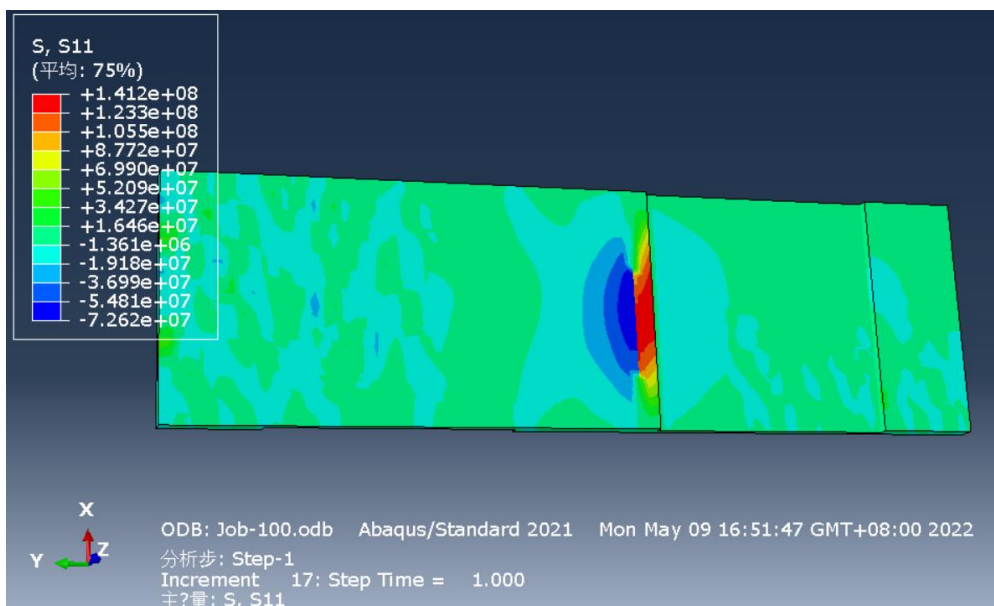


图 4-4 应力分布云图

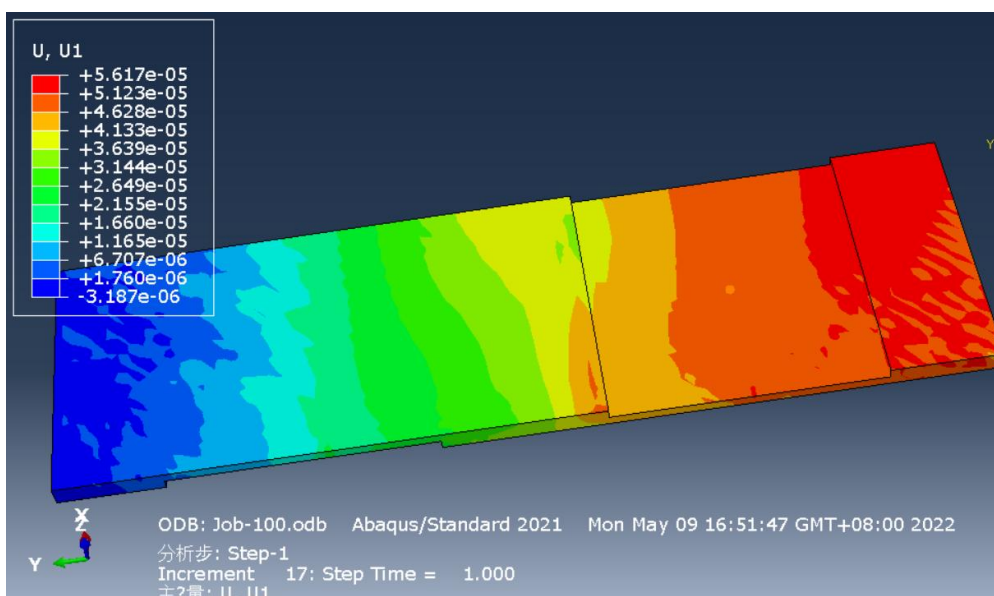


图 4-5 位移分布云图

在焊接引力场作为初始预定义的基础下进行静载荷分析,固定一端给另一端施加载荷进行拉伸,在相反力的作用下达达到两端拉伸的效果。由图 4-4 可得在焊缝上还是主要分布为拉应力,远离焊缝压应力转变为压应力。由图 4-5 可知最大位移为 $5.617e-05$ 最小位移为 $1.660e-05$ 。

4.3 疲劳分析

1.材料定义

有限元分析完成后,保存文档,打开 ABAQUS 附属软件 Fe-safe,在 Fe-safe 开始页面指定新的文件储存位置,然后 Create 一个新文档。进入后空白处鼠标右击“Open Finite Element Model...”找到分析完成后的有限元分析文件,打开文件后需要勾选应力 stresses,再设置应力单位为 Mpa,如图 4-6。在 Analysis seting 中找到材料类型“Material”,然后

在 Property 找到对应的材料属性(如图 4-7)，鼠标左键双击 Material 后即表示成功给材料完成定义。

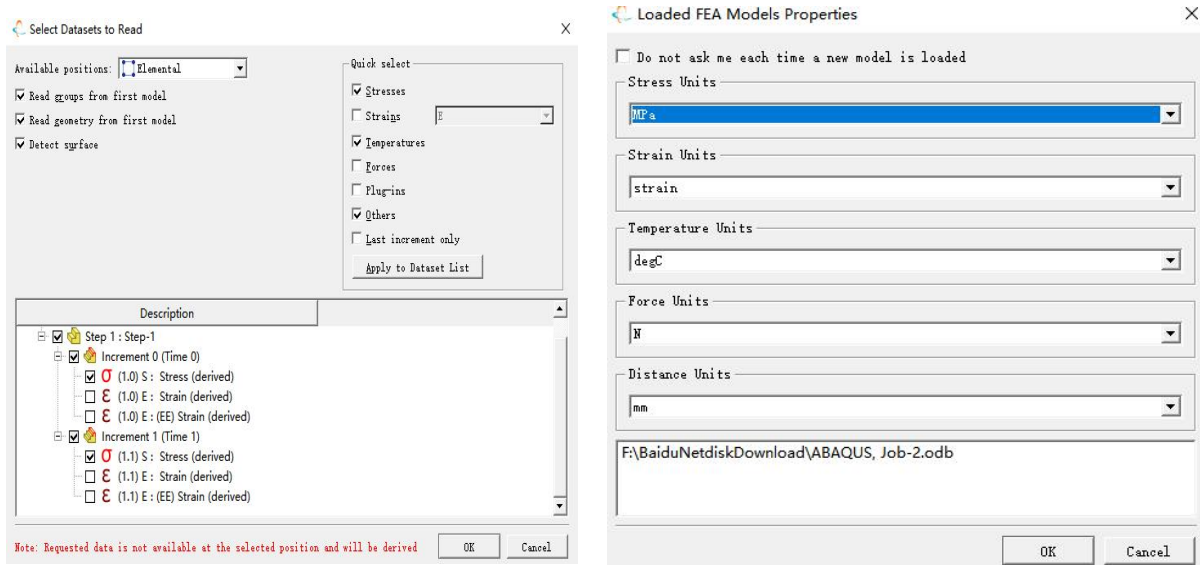


图 4-6 导入有限元分析应力

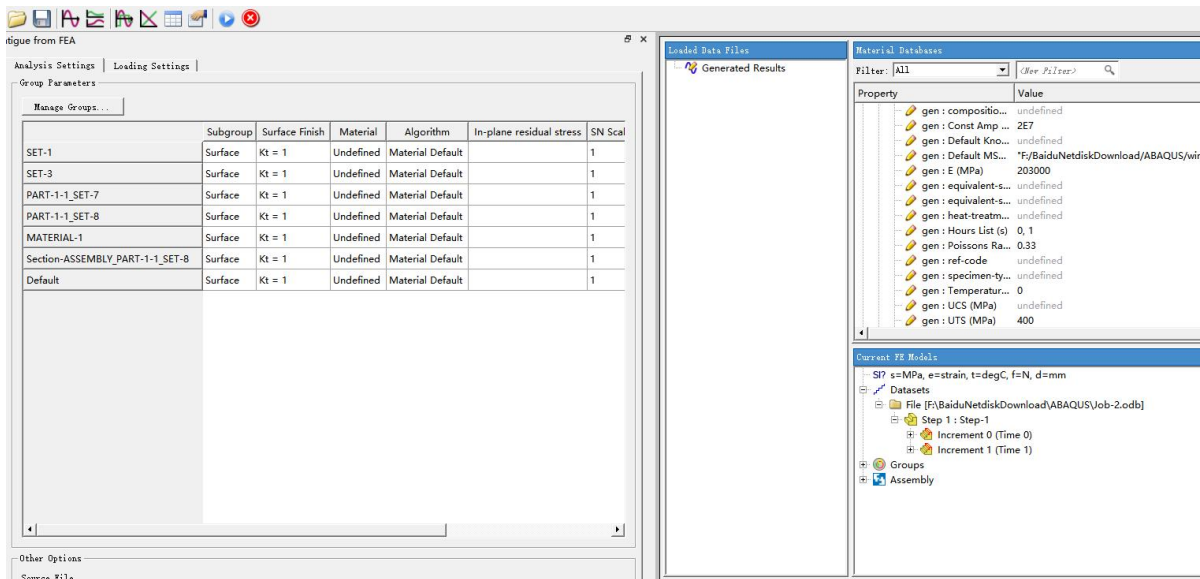


图 4-7 材料属性定义

2.应力循环

在 Lode seting 模块中，在 frequency 设置频率，在 frequency 下方设置循环参数（如图 4-8）。

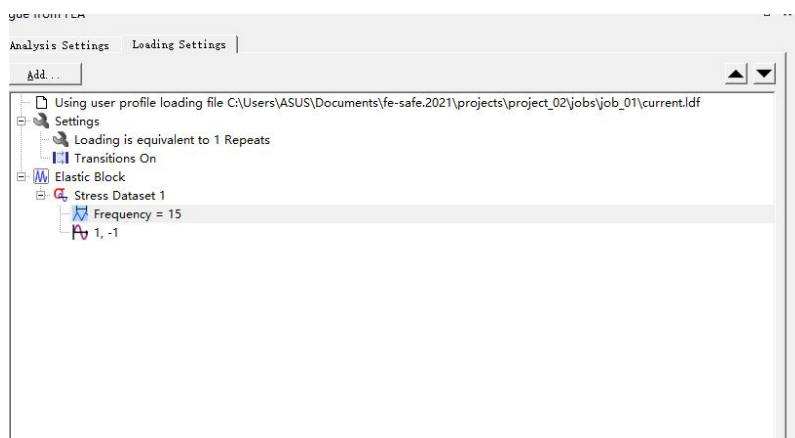


图 4-8 循环参数设置

3.求解

在 Other Option 模块中找到 Factor of strength 设置强度，设置循环次数为 $1e7$ 。在 Exports 输出窗口中设置输出变量，如应力与寿命，如图 4-9。最后点击 Analyse 即为疲劳计算中，计算完成后，回到 Abaqus 软件，在“可视化”窗口中点击“输出数据库”，找到刚计算好的疲劳分析文件即可观察计算结果。

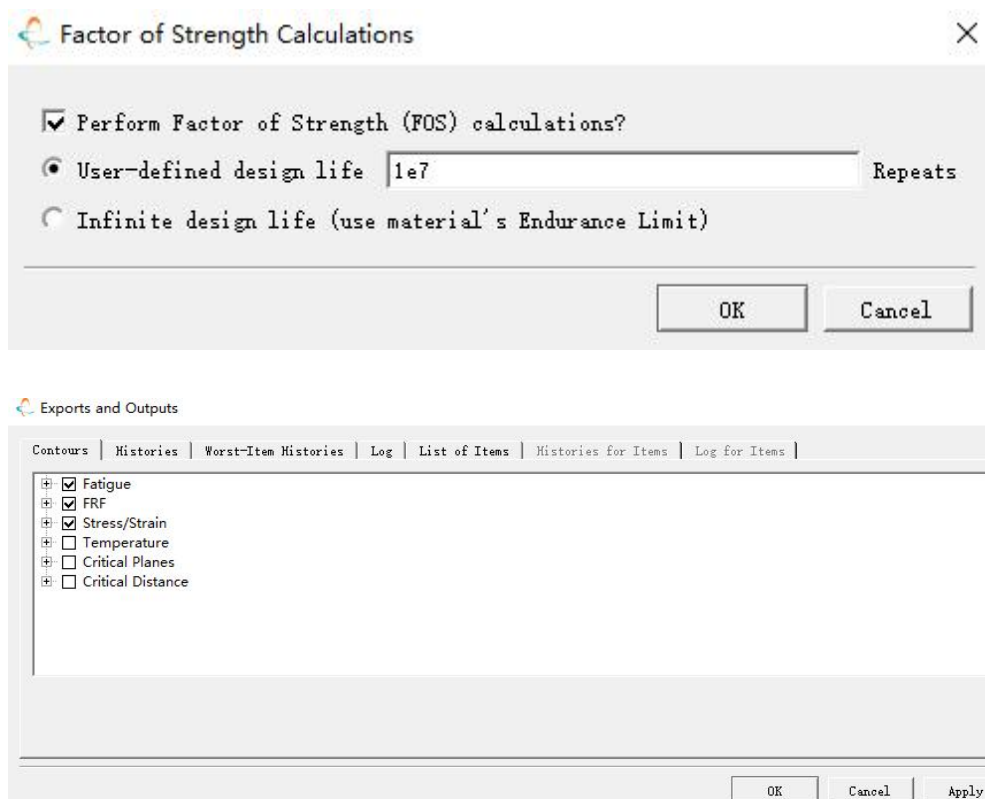


图 4-9 求解设置步

4.疲劳分析结果

在 ABAQUS 软件中做完静载荷分析后，将静载荷分析结果在 Fe-safe 中打开，设置频率、材料后分析处如图 4-10 的寿命分布云图。

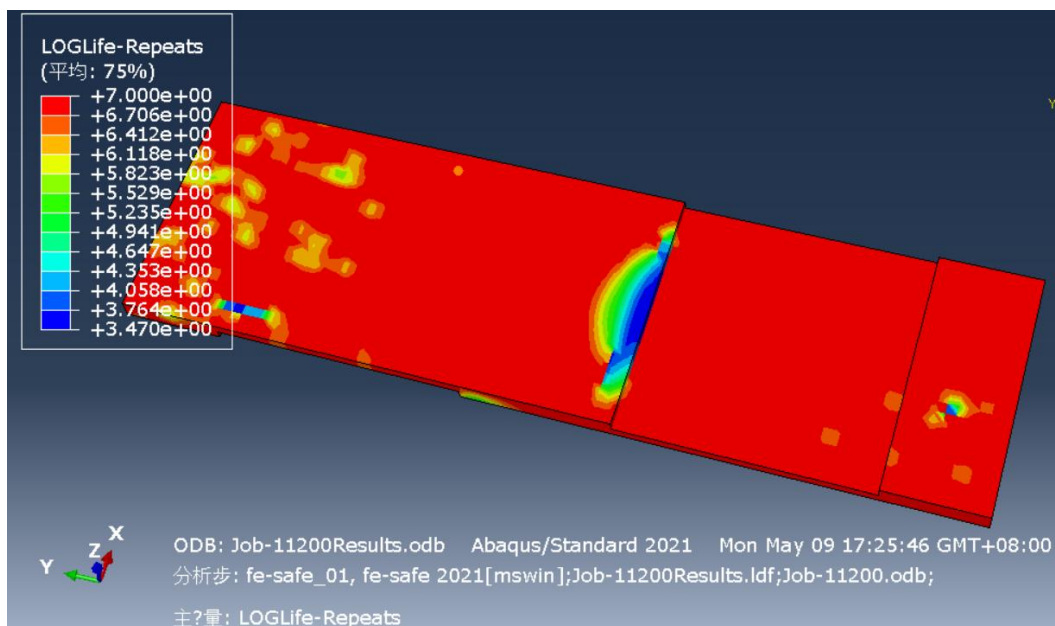


图 4-10 寿命分布云图

由图可知，在焊缝上颜色主要为蓝色，寿命最小为 $10^{3.47}$ 次，远离焊缝寿命逐渐增加最大为 10^7 次。综上所述，在焊缝处最容易发生断裂，随着远离焊缝处，疲劳寿命越来越长。

4.4 本章小结

把焊接应力场作为静载荷分析的初始预定义场，在一端施加固定载荷，另一端施加拉力后得到静载荷分析，再将静载荷分析结果在 Fe-safe 中打开作为疲劳分析的基础，设置频率、材料参数、输出场后得到寿命预测分布图。结果表明，在应力场的基础上进行静载荷分析的应力分布情况为在焊缝上的拉应力分布最大，远离焊缝拉应力逐渐转变为压应力；疲劳分析结果表明在焊缝处疲劳寿命预测最小，最容易发生断裂。

第五章 结论

(1) 本文主要使用 ABAQUS 软件对焊接温度场进行模拟，同时再对焊接应力场进行模拟，将焊接应力场作为静载荷分析的初始预定义场，最后在 Fe-safe 软件中将静载荷分析结果文件打开，作为疲劳分析的基础。

(2) 通过 ABAQUS 软件进行温度场模拟，得出的温度场模拟结果表明热源区域符合双椭球热源模型形状且随时间向 x 方向缓缓移动，与在子程序中设定的热源沿 x 轴方向移动吻合。

(3) 通过 ABAQUS 软件进行应力场模拟，结果表明在焊缝处主要收拉力作用，远离焊缝逐渐扩散后拉应力慢慢转变为压应力，接着又从压应力慢慢受力接近于零；当焊缝处母材在焊接时经过融化再凝固后会受挤压作用，远离焊缝后就会受拉作用，所以从位移分布云图有，焊接后在焊缝处位移为负，远离焊缝后位移分布慢慢从负位移变为正位移。

(4) 将焊接应力场作为静载荷分析的初始应力场经行载荷分析，结果表明应力分布还是焊缝处受拉应力作用，远离焊缝逐渐扩散后拉应力慢慢转变为压应力。

(5) 将静载荷分析结果再 Fe-safe 软件中打开，作为疲劳分析的基础。疲劳分析结果表明再焊缝处寿命最短，最小为 $10^{3.47}$ 次，最大 10^7 次，所以在焊缝处最容易发生疲劳断裂。

(6) 当在模拟温度场与应力场时，其他参数不变，施加不同电流 50A、80A、120A 当焊接电流为 50A 时，焊缝处最大应力为 68MPa，焊缝受挤压位移为 $-4.295e-06m$ ，残余应力最小，但是应力分布并无规律可寻；当焊接电流为 80A 时，焊缝处最大应力为 150MPa，焊缝受挤压位移为 $-1.844e-04m$ ，虽然残余应力分布最大，但是焊后应力分布规律最清晰；当焊接电流为 120A 时，焊缝处最大应力为 180MPa，焊缝受挤压位移为 $-3.329e-04m$ ，所以选择焊接电流选择 80A。

(7) 当在模拟温度场与应力场时，其他参数不变，施加不同焊接速度 5mm/s、10mm/s、15mm/s，当焊接速度为 5mm/s 时，焊缝处最大应力为 106MPa，受挤压位移为 $-3.003e-04m$ ；当焊接速度为 10mm/s 时，焊缝处最大应力为 196MPa，受挤压位移为 $-1.844e-04m$ ；当焊接速度为 15mm/s 时，焊缝处最大应力为 207MPa，受挤压位移为 $-7.518e-04m$ ；所以焊接速度越大，最大残余应力最大，焊缝处受挤压位移越小，综上，选择焊接速度为 5mm/s。

参考文献

- [1] 崔厚学,邹恒琪,刘昌雄.铝合金车身的焊接技术[J].电焊机,2013,43(02):34-37.
- [2] 朱海,孙朝伟,孙金睿,张剑,于明玉.2024 铝合金搅拌摩擦焊工艺参数对焊接质量的影响研究[J].热加工工艺,2019,48(23).
- [3] 吴铁.铝合金搅拌摩擦焊搭接接头焊缝组织及性能研究[D].天津大学, 2009.
- [4] 徐效东.铝合金搅拌摩擦焊搭接焊缝组织特征与疲劳断裂行为研究[D].天津大学,2012.
- [5] 彭佩基.基于 ANSYS 有限元模拟的铜/钢高频电磁感应焊温度场[D].南京理工大学,2018.
- [6] Real time-temperature models for Monte Carlo simulations of normal grain growth[J].Jinhua Gao, R.G.Thompson.Acta Materialia.1996(11)
- [7] 吴向阳,徐剑侠,高学松,武传松.激光-MIG 复合焊接热过程与熔池流场的数值分析[J].中国激光,2019,46(09):91-102.
- [8] 郭德伦.国外先进焊接技术在航空领域的应用进展[J].航空制造技术,2019,46(09):91-102
- [9] 王泽荫.铝合金焊接技术现状研究[J].世界有色金属,2021(10):4-5.
- [10] Long,Xue,Jinming,et al.Welding polarity effects on weld spatters and bead geometry of hyperbaric dry GMAW[J].Chinese Journal of Mechanical Engineering,2016,29(2):351-356.
- [11] Ye D,WuD, HuaX, et al.Using the multi-wire GMAW processes for controlling the formation of humping[J].Welding in the World,2017,61(4):649-658.[J].Welding in theWorld,2017,61(4):649-68.
- [12] 温忠亮.2219 铝合金 TIG 焊接头应力及变形的数值仿真研究[D]哈尔滨工业大学,2018.

致 谢

本文是在导师帮助下完成的，老师在我迷茫的时候给予了十分巨大的帮助，给我提供了很多参考资料并言传身教。及时监督我完成了此次的毕业设计。

在论文撰写的初级阶段，我始终处于一头雾水的状况。因为对焊接方面的知识了解不够充分，对做模拟疲劳分析的软件也不了解。但是在老师和同学的帮助下我查阅了很多关于焊接与疲劳模拟分析的资料与参考文献；初步学会使用 Abaqus 软件与 fe-safe 软件的操作后。心中有了大致的思路撰写思路。这对我对后期思路整体规划极其重要。

在论文的中后期，我在使用 ABAQUS 模拟焊接过程与使用 Fe-safe 模拟疲劳分析中出现了许多问题，是老师与同学和我一起研究、探讨出现错误的源头，分析发现是撰写热源子程序有错误的问题。最后的受力分析的过程中也请教了老师和同学，帮助我完成了最后的过程，得到了想要的模拟结果。

在此向我的导师宋宗贤和帮助我的同学致以诚挚的谢意！