



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

本科生毕业设计

铝合金对接接头设计及疲劳分析

Design And Fatigue Analysis Of Aluminum Alloy Butt Joint

姓 名 孙华峰

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造过程

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

铝合金对接接头设计及疲劳分析

Design And Fatigue Analysis Of Aluminum Alloy Butt Joint

姓 名 孙华峰

学 院 航空航天学院

专 业 飞行器制造过程

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	正高	副高	中级 √
题目名称	铝合金对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对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

毕业设计（论文）任务书

题 目：铝合金对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：孙华峰

学 号：18414020305

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

铝合金具有比强度高、抗疲劳性强、耐腐蚀性好等优点，被广泛应用于航天航空、船舶制造和轨道交通等领域，轻型铝合金材料的使用还能够提高飞机运行速度、提升飞机整体性能等。

大型客机的机身壁板均由成千上万个分离的部件组装而成，其工艺主要以飞机制造业中所普遍采用的传统铆接工艺为主。铆接技术作为一种机械连接方式，其工艺简单，强度稳定可靠，检查和排除故障容易，特别适用于对安全性能要求极高且需要重复使用的商用客机的制造，但铆接由于使用大量铆钉及密封材料导致了机身重量增加，不利于机身轻量化的发展方向。同时，铆接技术经过长期发展日趋完善，其发展潜力已经基本被充分挖掘，未来虽然还可以在质量上和技术上加以提升，但想要取得较程度的发展所面临的难度极高，德国空客公司联合欧洲多家激光焊接研究机构和激光焊接设备制造商率先开展了机身壁板双侧激光焊接技术的研究工作来代替传统的铆接技术，以通过制造工艺的改变来实现减轻机身重量的目的，可见焊接技术具有良好的灵活性与广阔的发展前景，应该得到广泛深入的推广与应用。

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。
- (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] 邹丽. 焊接接头疲劳寿命智能评价方法及其应用研究[D].大连交通大学,2017.
- [2] 刘向前. 铝合金型材高速搅拌摩擦焊接头结构与组织性能研究[D].哈尔滨工业大学,2016.
- [3] 马青娜,邵飞,高磊. 铝合金焊接接头疲劳研究进展综述[J]. 建筑结构,2018,48(S2):1022-1026.
- [4] 杜家政,赵振洋,黄诚,吴会强,张晓颖. 铝合金焊接接头力学性能实验研究[J]. 实验力学,2017,32(06):811-817.
- [5] 陈芙蓉,赵永胜,邱小明,解瑞军. 超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接接头表层组织及性能的影响[J]. 表面技术,2015,44(06):49-53.
- [6] 马建民,李敬勇. 焊接缺陷对铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. 材料开发与应用,2003(06):31-34.
- [7] 张俊苗,聂宏,薛彩军,吴会强,鄢东洋. 铝合金焊接接头预腐蚀强度特性及预测[J]. 航空学报,2013,34(09):2161-2168.
- [8] 米鹏. 含缺陷搅拌摩擦焊对接接头疲劳强度研究[D]. 昆明理工大学,2020.
- [9] 刘奋军. 铝合金薄板高速搅拌摩擦焊组织和性能研究[D]. 西北工业大学,2018.
- [10] 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:
- [11] Xu Boan,Jiang Ping,Geng Shaoning,Wang Yilin,Zhao Jintian,Mi Gaoyang. In-situ reactions and mechanical properties of 6061 aluminum alloy weld joint with SiCp by laser melting injection[J]. Materials & Design,2021,203:

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

本科生毕业设计（论文）开题报告

题 目：铝合金对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：孙华峰

学 号：18414020305

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）目的意义

航空航天工业是制造业的重要组成部分之一，综合国力的提高体现制造业的发展上，因此航空航天工业的发展是制造业的关键，而且质量要求把关和科技含量也是最高的，这就着重体现了国防科技工业水平和制造业的实力，因此对国防现代化和经济的发展有着积极的作用。

面对航空业的迅速发展，对飞机的性能要求也越来越高，从设计思路方面有着翻天覆地的变化，例如飞机整体结构件之间，部件与部件之间，零件与零件之间采用焊接的方法等等，焊接的这种连接方式将逐渐代替铆接和螺纹连接的方式。铝合金，钛合金，复合材料在航空航天的应用最为广泛，根据其经济性以及延展性，导电性和导热性的综合考虑，铝合金更有优势在飞机上大量应用，现如今的大型飞机铝合金占比百分之七十，而且铝的密度仅仅为钢的1/3，铝合金经热处理加工后，其拉伸强度与密度比和弹性模量与密度比堪与高强度钢，能够较好满足承载结构轻量化的要求；具备良好的低温性能和耐腐蚀性能，适用于低温和腐蚀环境；具备优良的工艺性，易于制造出形状复杂的型材，应用于制造复杂结构时优势显著。铝合金被广泛应用于航空航天、交通运输和化学工业等重要工业领域。

而焊接相比较铆接和螺栓连接具有很多的优势。（1）焊接使结构变得轻量化。一方面，焊接接头强度高，省去接头处补充强度带来的重量，在合理选择焊接材料和焊接工艺的前提下，焊接接头的强度可以接近甚至达到母材的强度，而铆接和螺栓联接由于需要在连接处钻孔，接头处的承载能力被削弱约20%；另一方面，相比铆接和螺栓联接，焊接为结构省去连接件的重量，对于大尺寸复杂结构而言，由此带来的减重效益相当显著。（2）焊接接头密封性好。尤其在高温环境中承受高压时，焊接接头在密封性上的优势相比其它连接方式尤为明显。（3）焊接连接灵活度高。焊接对被连接构件的形状和尺寸限制较小，因而通过焊接可以制造出传统制造和连接方式难以实现的复杂结构；焊接方式准备工作简单、便于现场制造且生产效率高，能够有效缩短制造大型或小批量产品结构的周期，降低成本。

但是也有焊接残余应力和变形。应力集中，焊接接头成分、组织和性能的不均匀性，焊接缺陷抗疲劳性能差等缺点。

(二)国外研究（应用）情况及发展趋势

- (1)静强度需求阶段（20 世纪初至 50 年代末）
- (2)综合性能需求阶段（60 年代末至 70 年代末）
- (3)抗腐蚀性能需求阶段（20 世纪 60 年代）
- (4)强烈的减重需求和高可靠性需求阶段(80 年代初至 90 年代初)。
- (5)降低制造成本的需求阶段(90 年代初至今)。

20世纪90年代以后，无论是民机还是军机，都有着降低成本的要求。而降低成本主要通过降低制造成本来实现的。科研工作者最初的目标是在不改变现有飞机结构设计的基础上，减少结构成本25%，为达到这个目标，西方国家进行了许多工作:以整体机加工件代替锻件或多零件装配而成的结构部件，开展机翼的高温时效成形和高强铝合金的快速超塑成形。开展可焊接铝合金和铝合金焊接技术的研究，用优质铸件制造复杂构件以减轻结构重量和降低制造成本，开展低成本高性能铝镁合金研究以及开展铝基复合材料的研究等。

(三)国内研究（应用）情况及发展趋势

- (1)高静强度需求时期(20 世纪 50 年代至 70 年代末)
- (2)高强耐蚀需求时期(20 世纪 70 年代末至 80 年代中期)
- (3)综合性能需求时期(20 世纪 80 年代末至 90 年代中期)
- (4)先进高性能铝合金的研制和发展阶段(20 世纪 90 年代中期至今)

材料和焊接的方式的选择是重要和关键，然后进行设计和延伸。新型高强韧可焊耐蚀 Al-Mg-Zn-Cu合金成分或者7075超硬铝合金焊接接头及搅拌摩擦焊接等等焊接工艺。

超声冲击（ultrasonic impact treatment,UIT）是一种高效的表面处理技术，超声冲击技术由于成本低、节能、执行机构轻巧、可控性好、使用灵活方便、噪声极小、效率高、应用时受限少、适用于各种接头，是一种有效改善焊接接头疲劳性能的措施。

搅拌摩擦焊搅拌摩擦焊是利用摩擦热作为热源的一种连续、纯机械化的固相焊接工艺。搅拌摩擦焊是一种机械化、连续的固相连接技术。由于该技术的自身特点，在焊接过程中存在诸多优势。首先，焊接过程中始终没有被焊接材料熔化的现象，不会出现烟尘和飞溅，可以在不需要保护气体下进行，并且能有效避免气孔缺陷和热裂纹现象。其次，由于在焊接过程中材料处于固相状态，使焊接件变形非常小且接头性能优异。最后，搅拌摩擦焊接过程中效率高、能耗小，且无紫外和电磁辐射，操作人员的工作环境较好。

(四)课题主要研究

- (1)通过焊接残余应力和变形。
- (2)应力集中,焊接接头设计、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分析与优化。
- (4)减轻重量的前提下使飞机性能提高。

(五)参考文献

- [1] 潘艳林. 新型高强韧可焊耐蚀 Al-Mg-Zn-Cu 合金成分设计及组织性能研究[D].北京科技大学,2021.
- [2] 刘敬萱. 6005A 铝合金搅拌摩擦焊接头组织、力学性能及耐蚀性能研究[D].北京有色金属研究总院,2020.
- [3] Najib Ahmad Muhammad. 超声振动辅助搅拌摩擦焊接铝合金/纯铜异质接头的组织与性能[D].山东大学,2020.
- [4] 张琨. 7075 超硬铝合金焊接接头组织性能预测与优化控制研究[D].沈阳工业大学,2019.
- [5] 马青娜,邵飞,高磊. 铝合金焊接接头疲劳研究进展综述 [J]. 建筑结构,2018,48(S2):1022-1026.
- [6] 杜家政,赵振洋,黄诚,吴会强,张晓颖. 铝合金焊接接头力学性能实验研究[J].实验力学,2017,32(06):811-817.
- [7] 刘亚良. 基于疲劳损伤熵的点焊接头累积损伤评估方法研究[D].大连交通大学,2018.
- [8] 邹丽. 焊接接头疲劳寿命智能评价方法及其应用研究[D].大连交通大学,2017.
- [9] 陈芙蓉,赵永胜,邱小明,解瑞军.超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接接头表层组织及性能的影响[J].表面技术,2015,44(06):49-53.
- [10]高会英. 复杂应力状态下焊接接头的疲劳寿命预测方法研究[D].电子科技大学,2016.
- [11]HeShi,Liu Liyuan,Zhao Yanqiu,Kang Yue,Wang Feifan,Zhan Xiaohong. Comparative investigation between fiber laser and disk laser: Microstructure feature of 2219 aluminum alloy welded joint using different laser power and welding speed[J]. Optics and Laser Technology,2021,141:
- [12]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:

[13]Xu Boan,Jiang Ping,Geng Shaoning,Wang Yilin,Zhao Jintian,Mi Gaoyang. In-situ reactions and mechanical properties of 6061 aluminum alloy weld joint with SiCp by laser melting injection[J]. Materials & Design,2021,203:

二、进度及预期结果

起止日期	主要内容	预期结果
2021. 12. 10- 2021. 12. 31	查阅文献，了解铝合金焊接的应用、国内外研究现状、以及飞机部件等相关知识，完成开题报告。	了解相关知识，撰写并完善开题报告。
2022. 1. 1- 2022. 1. 31	查找并详细分析资料和文献，学习铝合金焊接对接焊接方法以及在飞机上常见部件的应用。	掌握铝合金焊接对接的方法以及应用。
2022. 2. 1- 2022. 2. 28	利用有限元分析模拟铝合金对接接头部分的结构受力，拟定实施铝合金的材料选择和对接工艺和研究分析延长疲劳寿命的试验方案。	完成有限元分析，拟定实施铝合金的对接工艺和研究分析延长疲劳寿命的试验方案。
2022. 3. 1- 2022. 3. 31	实施铝合金的材料选择和对接工艺和研究分析延长疲劳寿命的试验方案，分析试验结果并得出结论。	完成试验方案，进行分析并得出结论。
2022. 4. 1- 2022. 4. 30	根据有限元分析结果和试验方案结论进行总结，撰写论文并完善。	总结试验分析结论，撰写并完善毕设论文。
完成课题的 现有条件	(1) 焊接设备以及疲劳试验机等相关仪器设备； (2) 2系2A12铝合金或7系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； (4) 实事求是，善于学习的能力。	
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）原创性声明的法律責任由本人承担。

毕业设计（论文）作者签名：孙华峰

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

对于国内外航空业的迅速发展,各个国家对飞机的性能要求也逐年提高,飞机整体结构件之间,部件与部件之间,零件与零件之间都可采用焊接的方法,焊接这种连接方式将逐渐代替铆接和螺纹连接的连接方式。我国的航空旅客运输量逐年增长,对飞机飞行的安全性与可靠性以及飞机部件零件的使用寿命提出了巨大的挑战,这与焊接的疲劳使用寿命息息相关。

本文在分析铝合金对接接头的基础上,分析飞机铝合金焊接结构,并选择结构进行建模和受力分析。首先运用 Abaqus 软件建立了零部件,模拟焊接过程中受到的热载荷和热变形情况,通过改变参数对焊接过程和结果进行优化,然后模拟施加外载荷,交变载荷以此来分析振动过程中因交变载荷造成的影响。最后通过 Abaqus 的软件的加载插件 Fe-safe 得到疲劳分析结果。根据应力分布,焊缝处受拉应力,母材两端受压应力。试件厚度位移方向分布焊缝处的厚度方向位移变化最大,并根据焊接模拟时改变电流或者焊接速度参数的应力分布图和厚度方向位移变化分布图的对比,焊接速度 5mm/s,焊接电流为 80A 较为理想。焊接完毕后,对模型施加外载荷,进行静应力分析,加入交变载荷用 Fe-safe 进行疲劳分析,通过静应力分析可知焊缝处应力集中受拉应力,母材两端受压应力,根据疲劳分析可知,焊缝处疲劳寿命最短,母材两端寿命最长。根据分析结果提出合理改进建议。通过 Abaqus 软件建立模型,结构可视化模型有利于载荷测验的分析,有助于结构的优化设计和制造,促进载荷分析进程,帮助减少载荷对飞机结构的损害。本文对飞机的结构的设计以及提高性能具有一定的参考价值。

关键词: 铝合金焊接; 疲劳寿命; 建模; 受力分析

ABSTRACT

For the rapid development of aviation industry at home and abroad, the performance requirements of aircraft in various countries are also increasing year by year. The welding method can be adopted between the overall structural parts, between parts and between parts and parts. The welding method will gradually replace the connection mode of riveting and thread connection. The volume of air passenger transport in China is increasing year by year, which poses great challenges to the safety and reliability of aircraft flight and the service life of aircraft parts, which is closely related to the fatigue service life of welding.

On the analysis of the aluminum alloy butt joint, aircraft aluminum alloy welding structure and selected for modeling and stress analysis. First, Abaqus software was used to establish the parts to simulate the thermal load and thermal deformation in the welding process, optimize the welding process and results by changing the parameters, and then simulate the external load and alternating load to analyze the impact of alternating load in the vibration process. Finally, the fatigue analysis results were obtained through the loading plugin Fe-safe of Abaqus's software. According to the stress distribution, the weld is under tensile stress, the base material at both ends of the compression stress. The thickness displacement at the weld changes the most, and according to the stress distribution map of changing the current or the welding speed parameters in the welding simulation, the welding speed is 5 mm/s and the welding current of 80A is relatively ideal. After welding, external load is applied to the model for static stress analysis, including Fe-safe. Through static stress analysis, the stress of the weld, the fatigue life and the fatigue life of the base material is the longest. Put forward reasonable improvement suggestions according to the analysis results. Model building through Abaqus software, the structure visualization model is conducive to the analysis of the load test, helps to the optimal design and manufacturing of the structure, promotes the load analysis process, and helps to reduce the damage of the load to the aircraft structure. This paper has certain reference value for the structure design and the improvement of aircraft performance.

Keywords: Aluminum alloy welding; Fatigue life; Modeling; Force analysis

目 录

第一章 绪论	1
1.1 选题背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	1
1.3 本文研究内容	2
第二章 焊接及疲劳概述	3
2.1 焊接概述	3
2.1.1 焊接材料简介	3
2.1.2 焊接及焊接方法概述	3
2.2 疲劳概述	5
2.2.1 疲劳分类	5
2.2.2 疲劳机制	5
2.2.3 疲劳性能改善措施	6
第三章 焊接温度场模拟	8
3.1 Abaqus 软件简介	8
3.2 铝合金焊接过程有限元模拟	8
3.2.1 焊接温度场模拟	8
3.2.2 焊接热应力与热变形模拟	11
3.3 本章小结	18
第四章 静应力与疲劳分析	19
4.1 静应力分析	19
4.2 疲劳分析	20
4.3 本章小结	22
参考文献	23
附 录	24
致 谢	25

第一章 绪论

1.1 选题背景和意义

铝合金在航空航天的应用最为广泛，根据其经济性以及延展性，导电性和导热性的综合考虑，铝合金更有优势在飞机上大量应用，现如今的大型飞机铝合金占比百分之七十，而且铝的密度仅仅为钢的 1/3，铝合金经热处理加工后，其拉伸强度与密度比和弹性模量与密度比堪比高强度钢，能够较好满足承载结构轻量化的要求；具有比较好的耐低温性能和抗腐蚀性能，适用于低温和腐蚀环境；具备优良的工艺性，易于制造出形状复杂的型材，应用于制造复杂结构时优势显著^[4]。因此在铝合金航空航天、交通运输领域广泛运用。

对于国内来说，飞机结构的合理性、安全性疲劳性一直吸引着社会广泛的目光，航空业承担了我国运输任务的重要部分，因此飞机的运行安全和对飞机的性能要求是我国民航部门必须充分保证的重点，在飞机的设计制造过程中安全法规的制定尤为重要。不论乘客还是机组人员，保证他们的生命安全应高于对舒适性和经济性的要求，安全性权重是所有设计任务中的首要标准，在保证安全的前提下提高飞机的疲劳使用寿命，提高飞机的整体质量。

随着当代飞机的飞行空地周期缩短，所以对焊接材料地选择以及工艺方法地选择对提高飞机疲劳寿命非常关键。

1.2 国内外研究现状

国外研究情况及发展趋势是在减轻重量前提下提高质量要求，提升安全可靠需求下还要着重降低制造成本和维护成本，20 世纪 90 年代以后，不管是军用还是民用飞机，对成本控制都有着严格的要求。而降低成本主要通过降低制造成本和维护成本或者提高使用寿命来实现的。现在的工作目标是在不改变飞机结构设计和固有的气动外形的前提下，从而降低对结构的加工成本，例如以整体焊接部件构件代替零件装配到一起，并且应用到机翼机身上或者整体飞机结构上。开展可焊接铝合金和铝合金焊接技术的研究，用焊接复杂结构的构件以达到减轻重量和降低和维护成本的目的，增加疲劳寿命。

德国冶金学家 A·维尔姆于 1906 年开发出一种高强度的新型 Al-Cu-Mg 变形铝合金，又称硬铝或杜拉铝，填补了航空领域缺少高强高韧材料的空白，为飞机工业带来革命性的变化，随着现代航空工业领域的高速发展^[3]。

国内研究情况及发展趋势分为四个阶段分别为高静强度需求时期；高强耐蚀需求时期；综合性能需求时期；先进高性能铝合金的研制和发展阶段。为满足铝合金材料的高性能需求，我国也很早开始对该系铝合金进行研制开发，并对其强化机理进行了更深层次的探究^[3]。通过微合金化、开发新的热处理工艺（如形变

热处理、深冷循环热处理等)、改善铸造加工工艺、提高合金的纯度和净度、添加变质剂等手段,来使合金获得高强度,同时尺寸稳定性、断裂韧性及耐蚀性良好的综合性能,而对合金组织强化的理论的深入研究也取得显著进展,逐渐拉近了与美、俄等一流水平的差距^[3]。材料和焊接的方式的选择是重要和关键,然后进行设计和延伸。如新型高强韧可焊耐蚀 Al-Mg-Zn-Cu 合金成分或者 7075 超硬铝合金焊接接头及搅拌摩擦焊接, TIG, MIG 焊等焊接工艺。我国的焊接工业蓬勃发展,且有许多产业需应用到焊接技术。目前焊接工业中普遍采用的焊接方法有电弧焊接 (SMAW)、气体保护熔化极电弧焊接 (GMAW)、保护钨极电弧焊接 (GTAW) 以及埋弧焊接 (SAW) 等四种。由于传统气焊运用于铝合金时,会造成严重的焊缝污染问题,所以如今几乎已完全被气体钨极电弧焊及气体金属电弧焊所取代,主要是因为其施焊时无焊渣及飞溅物的产生,因而广泛地应用于铝合金的焊接中^[1]。

1.3 本文研究内容

本文主要介绍的是焊接对接形式和在飞机上的应用,运用 Abaqus 软件进行模拟焊接后的受力情况和位移变化,对飞机焊接部分受到的外载荷和疲劳进行模拟分析,本文主要进行了以下的工作。

- (1) 运用 Abaqus 软件进行焊接热应力和焊接热变形的模拟分析。
- (2) 运用 Abaqus 软件对焊接部分应力集中的不均匀性进行模拟分析,通过改变电流焊接速度等参数对焊接性能进行优化。
- (3) 运用 Abaqus 对焊接后试件进行静应力模拟分析。
- (4) 运用 Abaqus 软件的 Fe-safe 插件进行疲劳模拟分析。

第二章 焊接及疲劳概述

2.1 焊接概述

焊接是制造业应用广泛的材料连接方法，是一种永久性的连接手段，是航空制造技术的制造方法之一。通过焊接可将不同种类的金属材料零部件焊接成一个整体的结构，整体的结构满足结构生产需求。现在也可以进行金属与金属基的复合材料进行焊接，焊接方法从手工焊到激光焊，焊接方式从手工操作焊枪到现在的输入编程程序自动焊接，焊接的工艺管理模式从编制工艺卡到电脑数据局统一管理。通过焊接可将不同材料、形状焊接到一起，现在的飞机大量采用焊接壁板结构。焊接件的数量在在飞机上的应用越来越高。

2.1.1 焊接材料简介

2A12 铝合金是 Al-Cu-Mg 合金，除上述三种合金元素外，还含有少量 Mn。目前，这种合金在飞机制造领域得到广泛应用。它可用于制造冲压零件、锻造工具和铆钉，参数如表 2-1，表 2-2 所示。

表 2-1 2A12 铝合金的化学成分(质量分数，%)

Fe	Si	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Ni	其他	Al
0.14	0.06	4.5	0.83	1.6	0.09	0.04	0.08	<0.05	余量

表 2-2 2A12 铝合金和合金钢的物性参数

材料	恒压比热容 J/(kg·K)	导热系数 W/(m·K)	热膨胀系数 1/K	密度 kg/m ³	杨氏模量 GPa	泊松比
2A12	900	143	23	2780	70	0.33
合金钢	500	42	0.1	7800	0.27	0.3

Al-Cu-Mg 系列合金中的 2A12 合金，是具有高强度，良好韧性的可热处理强化变形铝合金，作为飞机的主要结构材料一直被广泛应用，随着国产大飞机 C919 的研发与量产，该类材料的应用与可靠性要求也越来越高，改善合金的微观组织以提高合金综合力学性能的问题倍受关注^[3]。

2.1.2 焊接方法概述

(1) 焊接方法

钨极氩弧焊又称 TIG 焊是一种广泛应用的电弧加热熔焊方法。该方法采用钨棒作为不熔化电极，采用外部气体作为保护介质。其优点是电弧和熔炼池能够

清晰可见，操作很容易几乎没有炉渣，操作结束后无需清渣，适合不同位置和结构的焊接。目前氩或氦主要用作生产中的保护气体的主要成分。其中，以氩气为主要保护气体成分的钨极氩弧焊技术广泛应用于航天工业。

电极采用高熔点焊接钨合金棒。并在层合氩约束下，利用钨棒和工件之间产生的电弧热，将基础材料和焊接线熔化堆叠成焊接接头。其焊接过程示意图如图 2-1 所示，焊接方向从 O 点向 A 点进行焊接。

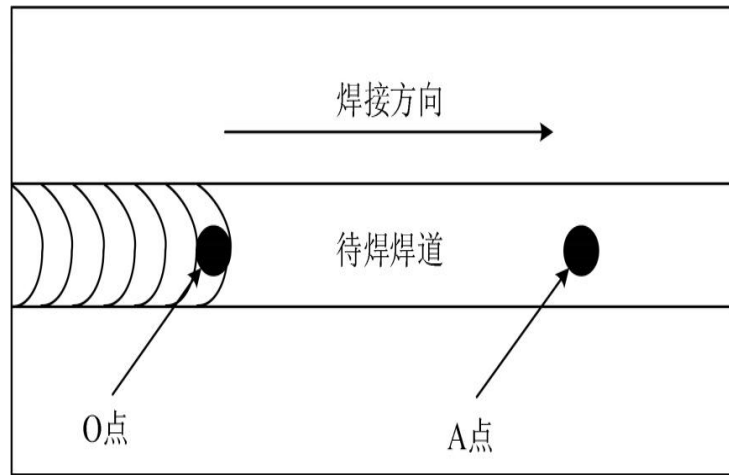


图2-1 钨极氩弧焊焊接过程示意图

钨极氩弧焊的焊接特点：钨极氩弧焊的焊接特点①氩是一种惰性气体非常稳定而且能够保护金属电极。②焊接时运行稳定，对母材影响小，焊缝变形小。③焊接表面无残渣，接头的受力较均匀。④焊弧能边观察边操作,对焊接的位置要求较低。⑤氩气难电离，必须采用大电压进行启动电弧。⑥钨极承载电流能力的有限，适用于薄板的焊接。

(2) TIG 焊工艺

钨极氩弧焊方法一般用于焊接厚度在 3mm 以下的薄壁构件，其典型工艺流程内容可概括为接头选择、焊材选择和焊接过程控制等。

1)钨极氩弧焊方法焊接中常采用的接头形式包括:对接、T 形接、搭接和平接等。如图 2-2 所示。

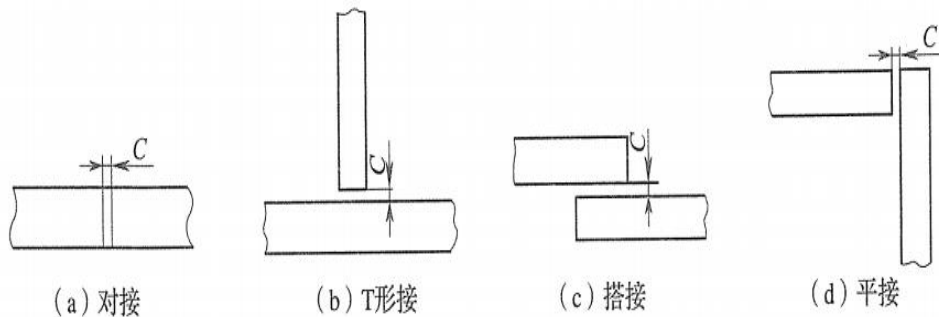


图 2-2 钨极氩弧焊常见接头形式

选择接头形式时应考虑如下因素。选择接头形式时应考虑如下因素。①根据受力要求选择接头形状。②组合起来的装配尺寸要求精确。③焊接的位置便于进行气体保护。④要求焊件受力和变形小，抗疲劳。

2) 焊材选择

钨极氩弧焊接一般采用工业纯氩，纯度为 99.99%。钨极氩弧焊接中常用的钨电极是纯钨、钨钨。一般而言，充填材料是由与母料相同或相似的材料组成的。

3) 钨极氩弧焊的方法

焊前的清理，焊件的母材和焊丝表面以及夹具需要进行仔细地清理，主要是焊接前去除锈和水等等影响实验结果的外在因素。有锈和水等杂质对焊接过程的稳定、焊缝的形状的形成产生影响甚至会产气孔缺陷等，清理后的零件应尽快进行焊接以防产生新的杂质来影响实验。焊前需要进行装配，零件的对齐和好的装配可以使焊接顺利进行，也保证焊接过程形成的电弧稳定，也同样获得良好的保护效果。焊接参数包括焊接电流、焊接速度等等，这对焊接质量有重要影响。

2.2 疲劳概述

当结构的受到空气动力的作用，经过不断的循环振动，循环一定的周期之后，材料出现了裂纹或者是断裂，发生局部、永久性的结构变化的过程称为疲劳。

2.2.1 疲劳分类

常规疲劳是在室温下，暴露在空气中。以室温为分界低于室温为低温疲劳，高于室温为高温疲劳。温度继续升高到一定的温度会发生蠕变，蠕变与疲劳会发生作用。

循环温度变化引起的热负荷疲劳称为热疲劳；循环温度变化和应变循环变化一起作用的疲劳称为热机械疲劳；腐蚀性与应力应变循环共同发生的疲劳称为腐蚀疲劳，为气相疲劳和水介质疲劳两类。在循环接触应力作用下，滚动接触零件导致零件内部的不可恢复的损伤^[2]；不断地经过循环后接触表面会发生变形称为接触疲劳；接触表面之间与静态部件产生相对振动引起的磨损的疲劳称为微动磨损疲劳；不断地反复冲击载荷引发的疲劳称为冲击疲劳^[2]。

2.2.2 疲劳机制

在循环的交变载荷作用下，材料的腐蚀结构会发生疲劳。材料的选择和结构的设计以及工艺的不同表面状态等都会影响结构的疲劳强度。疲劳过程是复杂的同时也是瞬时断裂的，但总的来说，疲劳断裂可分为三个阶段：裂纹萌生和裂纹扩散和不稳定断裂，如图 2-3 裂纹产生到开始裂纹扩展再到断裂。

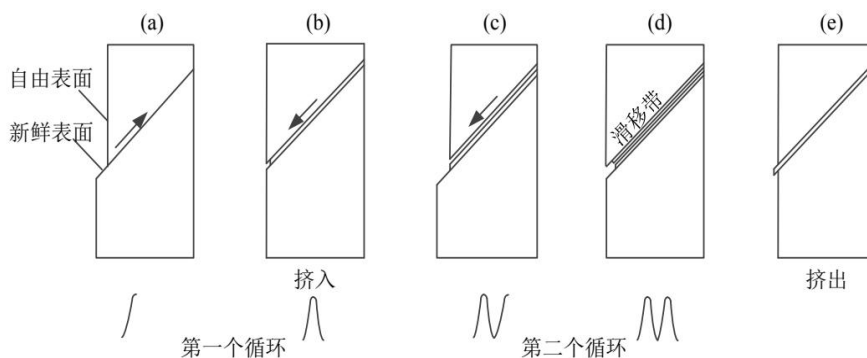


图 2-3 循环滑移导致裂纹形核示意图

结果表明，裂纹首先沿滑动面 45° 向外载荷方向扩展，然后当到达一定深度时，沿垂直于外载荷的方向逐渐扩展。不稳定性是通常在瞬间完成的疲劳失效的第三阶段，也是疲劳损伤持续积累的结果。或者材料结构的剩余面积随着裂纹扩展而逐渐减小。到达临界状态时，裂纹迅速失去稳定性，在循环疲劳载荷的进一步作用下扩散，导致断裂失效。

2.2.3 疲劳性能改善措施

(1) 影响接头疲劳因素

①应力集中影响：焊接结构的抗疲劳性能差绝大多数原因是应力集中造成的。造成应力集中的主要原因是设计的不合理，例如有棱角，有没有选择正确的焊接或者焊接自身产生的缺陷等等。

②焊缝附近金属特性变化的影响。焊缝区域附近金属特性的变化对焊缝焊接焊缝耐久性的影响也是人们关注的问题。但研究表明焊缝附近金属化学成分、金属形貌结构和力学性能的不一致对应力集中或无应力集中的永久强度影响不大。

③其他因素的影响。材料性质的影响；如果没有应力集中，材料的疲劳强度越大拉伸极限越大，因此低合金钢的疲劳极限高于低碳钢。但是高强钢对应力集中疲劳强度下降速度快于低碳钢。当应力集中系数非常大时候，高强低碳钢两种钢的疲劳极限几乎相同。结构尺寸的影响；当结构的尺寸增大时，抗疲劳性能下降，缺陷增大或由于焊接缺陷引起的小零件应力集中程度低于大型零件。

(2) 改善疲劳的措施

①打磨：假设没有明显的焊接误差，对接焊缝的余高可以进行处理，疲劳强度几乎可以被提高与母材金属相同。一般来说，转角连接只能使用研磨工具砂轮。通过局部加工提高焊接接头疲劳强度的机制是降低焊接尖端的应力集中，消除熔渣效应。

②TIG 熔修：TIG 重熔提高焊接接头疲劳强度的想法源于 TIG 焊接得到的焊缝外观良好，焊接单元上无残渣，疲劳强度高。TIG 焊沿焊趾重新熔化现有的焊接金属，从而消除残渣，改善焊趾的形状，在焊接和基本金属之间形成平稳过渡，

降低应力集中，从而改善焊接接头的疲劳行为。

③锤击与喷丸法：锤击是提高接头疲劳强度的冷工作方法，压应力是在接头焊接件表面引起的；降低焊趾区域中槽口的锐利度，降低应力集中度。当前，常用锤法广泛应用，操作方便，成本较低，效果较好。

④超声冲击方法：超声冲击利用大功率的能量推动冲击头冲击金属物体表面，产生有益的压应力；高温冷却，改变组织，达到强化，超声波冲击法由于执行机构简单、噪音低、效率高、成本低、节能等原因，已成为提高焊接后接头疲劳性能的理想措施。

第三章 焊接温度场模拟

3.1 Abaqus 软件简介

Abaqus 是仿真有限元分析软件，对于用线性分析可以求解非线性问题。本文的焊接过程的模拟分析利用 Abaqus/Standard 和 Abaqus/Explicit 模块，通过建模划分网格，并且输入材料属性和接触载荷等等，最后计算在焊接热应力变形和疲劳。Abaqus/CAE 是 Abaqus 与 Abaqus 合作的新开发的软件平台。求解器软件紧密集成。

本文提供了 python 语言编程的说明，该语言允许在没有接口操作的情况下执行计算过程。数字化和编程大大缩短了前置时间。

焊接过程有限元模拟 Abaqus 数值模拟分析为 2A12 合金焊接接头的显微组织。母材区、热影响区和焊缝区清晰可见。焊接过程仿真采用间接耦合。首先计算焊接温度场，然后应用温度场作为载荷，将其添加到试样中以计算焊接应力场。

3.2 铝合金焊接过程有限元模拟

3.2.1 焊接温度场模拟

(1) 建立几何模型

绘制草图，进行拉伸形成几何模型，然后进行模型分割形成焊缝，如图 3-1 的 2A12 硬质铝合金工件简化为 100mm×100mm×2mm 的长方体模型。

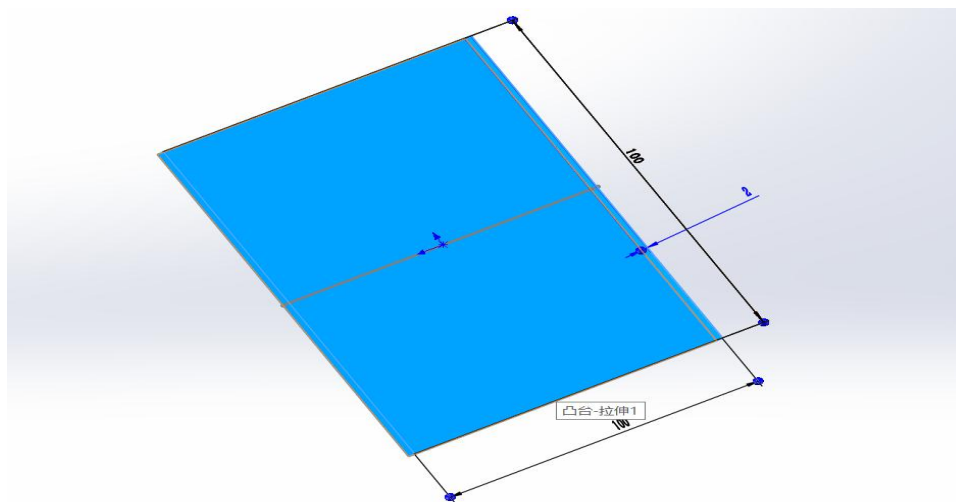


图 3-1 几何模型

(2) 建立材料库

当选择参数参考时，输入 2A12 铝合金的密度为 2780kg/m^3 和除密度以外的弹性模量、屈服强度等物理参数随温度变化的值，如表 3-3 所示，然后输入绝对零度为 -273.15 和玻尔兹曼常数。

表3-3 热物理性能参数

材料	恒压比热容 J/ (kg·K)	导热系数 W/ (m·K)	热膨胀系数 1/K	杨氏模 GPa	泊松 比	温度 °C
2A12 铝合 金	900	143	23	70	0.33	20
	910	148	26	72	0.33	100
	920	149	29	75	0.33	250
	925	155	33	80	0.33	500
	930	160	36	85	0.33	800
	950	170	40	90	0.33	1000
	960	188	45	95	0.33	2000

(3) 赋予模型材料并进行装配

创建截面类型为“实体”、“均质”然后将截面和建立的材料库应用到整个几何模型，进入装配，平移坐标系到焊缝起点位置，使 x 轴的方向为焊缝方向，z 为模型厚度方向，y 方向为垂直焊缝的方向。

(4) 分析步和载荷步设置

温度场计算中共设置三个分析步骤，初始步、加热步、冷却步，冷却步取消激活，step-1 设置加热分析步为焊缝焊接过程加上分析，类型为“温度-位移耦合”，时间值为 40s；焊接速度为 5mm/s，然后创建冷却步冷却到室温，类型还是“温度-位移耦合”设置冷却时间为 600s。step-2 设置边界条件，载荷设在长方体的四个边角位置，固定 U1、U2、U3 对应几何模型的 x、y、z 三个方向；step-3 预定义场管理器设置从初始步设置温度为 20°C 设置区域为全部。

(5) 热源模型

温度场采用双椭球热源形式计算，并用 Fortran 语言编写子程序加载热源。图 3-2 显示了双椭球面热源模型。根据焊接观察时的圆弧形状，本文假定为椭球体第一和第二半轴是相等的，即 $c_1=c_2$ 。等式 3-1 是计算中使用的双椭球热源的热流密度分布。

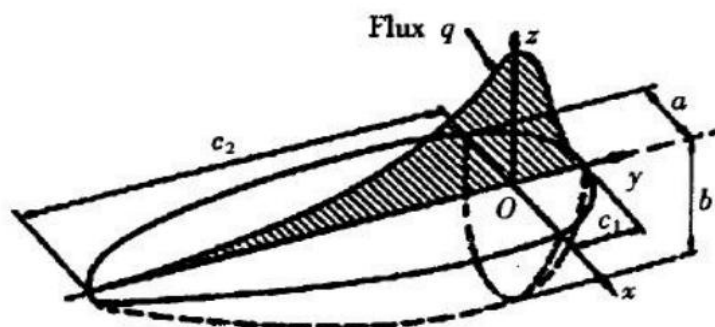


图 3-2 双椭球热源模型

$$Q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}Q_0}{abc\pi\sqrt{\pi}} \times e^{-3x/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3(z-vt)^2/c^2} \quad (3-1)$$

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。本文计算中选定 $a=5\text{mm}$ ， $b=5\text{mm}$ ， $c=10\text{mm}$ ， $v=5\text{mm/s}$ 。热源效率为 0.5。

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 模块里设置编辑 job 中 General 选项，引用热源 Fortran 子程序。

(6) 创建的相互作用

建立相互作用形式主要是“辐射”和“对流”两种，首先是创建对流作用，在 Heating 加热步起作用，作用类型选择“表面热交换条件”。整体模型将膜层散热系数设置为 20，环境温度设置为 20°C 。创建辐射作用，在 Heating 作用于加热步，作用类型选择“表面辐射”后选中整体模型，设置辐射换热系数为 0.85。环境温度为 20°C 。

(7) 网格划分

对于热分析单元 C3D8RT，它具有一个温度自由度和一个 8 节点的六边形单元。在模型的划分网格后共有 20000 个单元，30603 个节点。焊缝区和热影响区网格尺寸大小为 1mm，网格如图 3-3 所示。

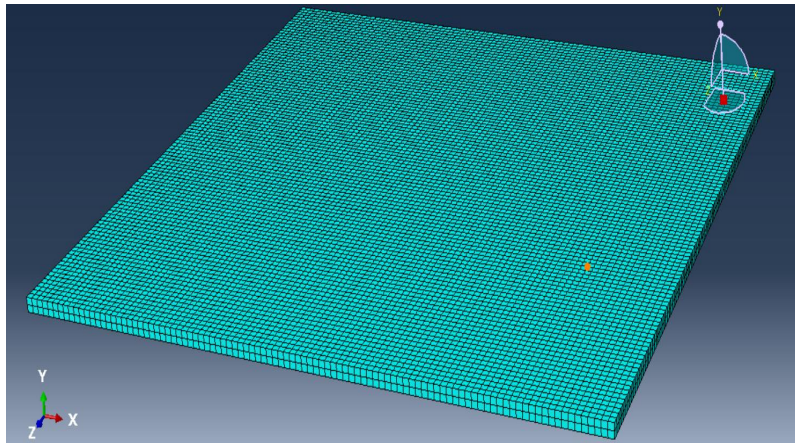


图3-3 有限元网格划分

(8) 提交作业分析

在作业管理器中新建一个作业 Job，选中模型用户自定义通过 Fortran 语言编写的热源子程序并引用。Job 建立成功后点击 Submit 就开始计算分析。

(9) 温度场计算结果

图 3-4，3-5，3-6 分别为焊接过程进行到 6.485s、15.55s 时和冷却到室温时的温度场分布。

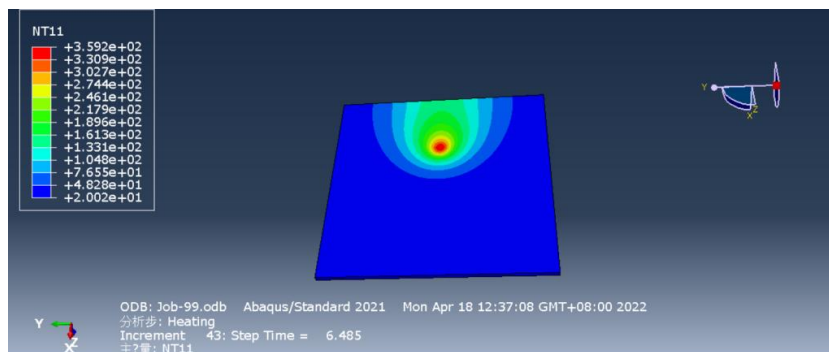


图 3-4 焊接进行到 6.485s 时温度场分布

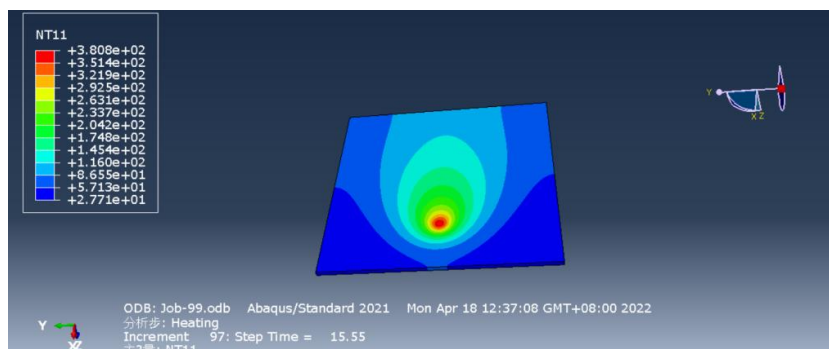


图 3-5 焊接进行到 15.55s 时温度场分布

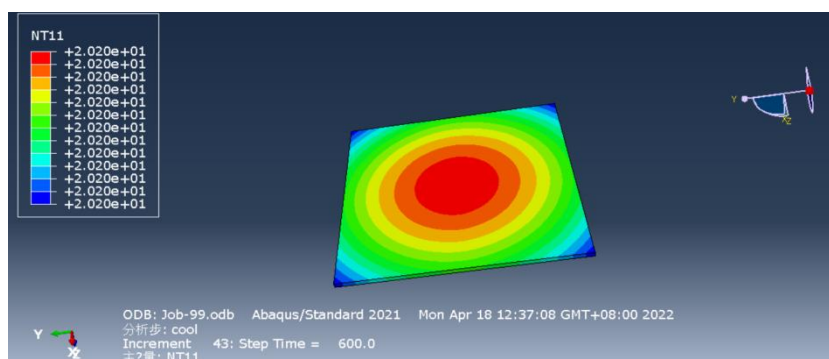


图 3-6 焊接冷却到室温的温度场分布

在温度场焊接模拟完成后，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 方向移动。

3.2.2 焊接热应力与热变形模拟

(1) 单元类型

应力场采用八节点六面体缩减积分单元 C3D8R。

(2) 力学性能参数

力学性能参数是 2A12 铝合金的性能。泊松比为 0.33，设置拉伸极限、弹性模量和线性范围。这些值随着温度梯度变化，如表 3-4 所示。根据软件进行模拟分析计算应力应变值。

表 3-4 2A12 铝合金力学性能参数

密度/(kg·m ⁻³)	杨氏模量/GPa	泊松比	温度/°C
2780	70	0.33	20
	72	0.33	100
	75	0.33	250
	80	0.33	500
	85	0.33	800
	90	0.33	1000
	95	0.33	2000

Abaqus 中 Mechanical-Plasticity-Plastic 中 Yield Stress, Plastic Strain, Temp 的值设置材料在达到屈服后强化的性质。

(3) 载荷

通过在 step-1 的步骤中对焊缝区域施加 Predefined Field, 选择温度场, 分布类型选为 From results or output database file, 写入温度场计算结果。

(4) 边界条件

焊接和冷却过程中, 长方体试件八个角受到固定夹具的约束, 直至冷却到室温, 设置见图 3-7。

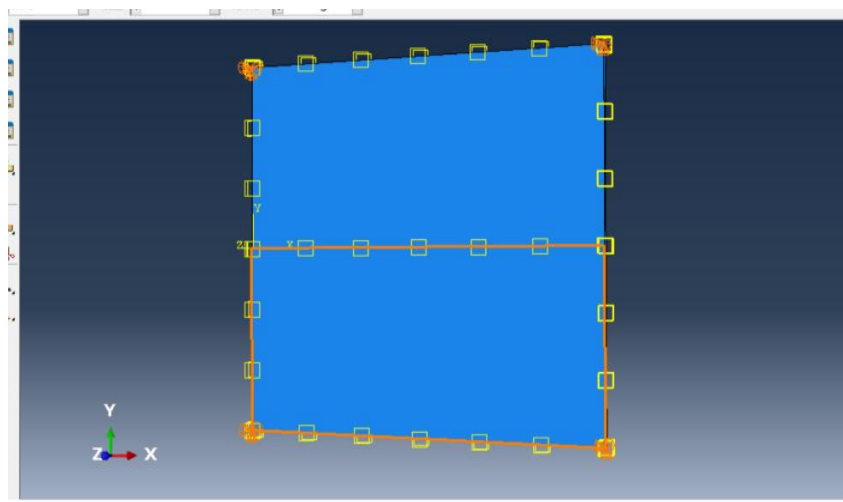


图 3-7 边界条件设置

(5) 焊接速度或者焊接电流外的其他参数保持不变, 编入子程序, 运行 Abaqus 得出应力和厚度方向位移的分布图, 进行对比分析得出结论。运用控制变量法控制焊接电流和电压等其他参数不变的情况下, 只改变焊接速度参数, 分别为 1mm/s、5mm/s、10mm/s 的焊接应力分布云图如图 3-8、3-9、3-10 所示。

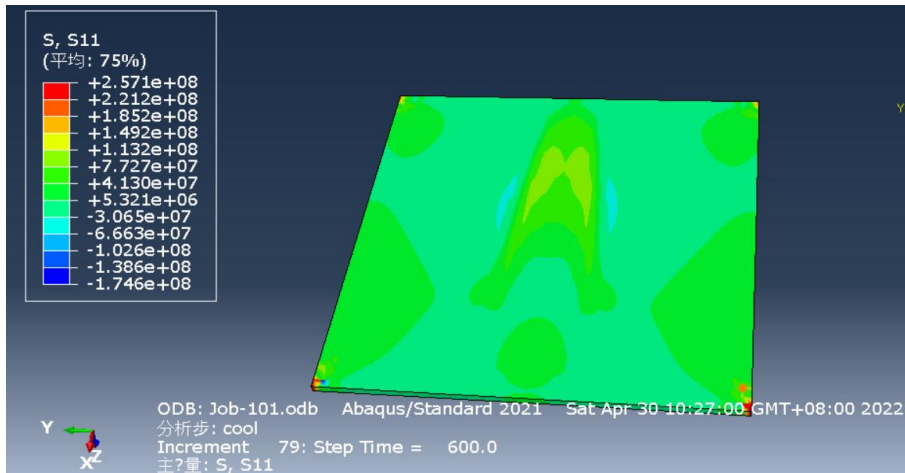


图 3-8 焊接速度为 1mm/s 的应力云图

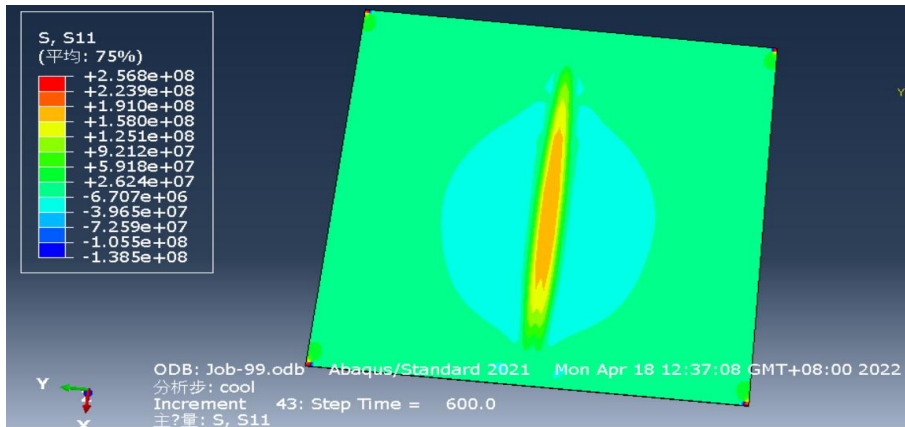


图 3-9 焊接速度为 5mm/s 的应力云图

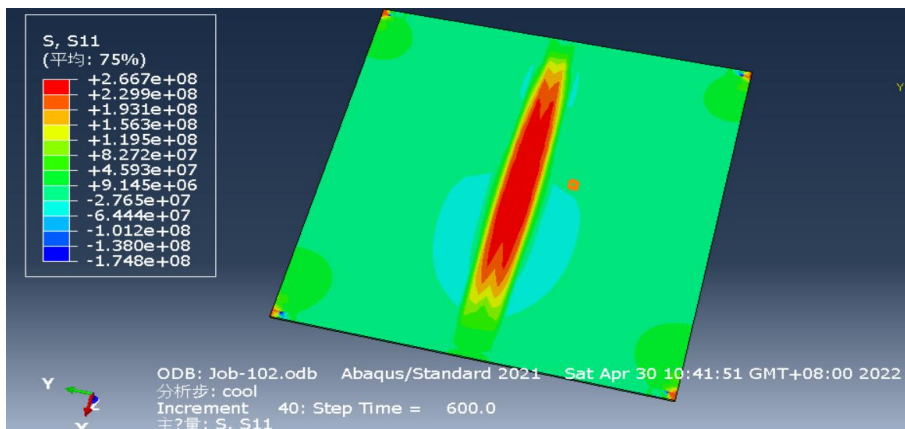


图 3-10 焊接速度为 10mm/s 的应力云图

通过只改变焊接速度的应力图可以看出，随着焊接速度的增大焊缝处的拉应力逐渐增大，焊接速度为 10mm/s 时的焊缝处拉应力最大，焊接速度为 1mm/s 时在焊缝处的拉应力最小，在一定范围内，焊接速度扩大 10 倍在焊缝处受到的最大拉应力也扩大约 10 倍，显而易见，在焊接速度为 5mm/s 时的焊缝受力情况

较好，三组应力云图焊缝处的拉应力最大，从焊缝到母材两侧边缘方向，应力逐渐降低。

运用控制变量法控制焊接速度还有其他焊接参数不变，只改变焊接电流，如图 3-11、3-12、3-13 所示为 35A、80A、110A 的焊接应力云图。

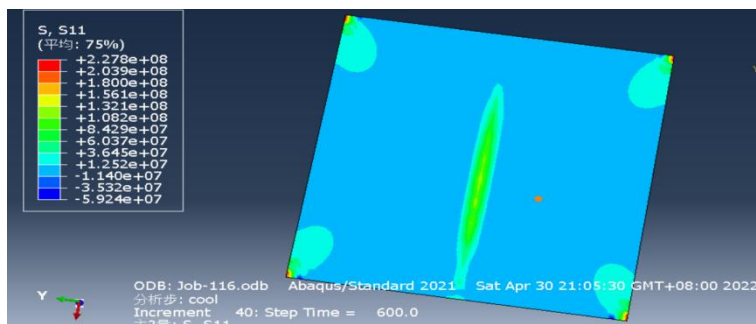


图 3-11 焊接电流为 35A 的应力云图

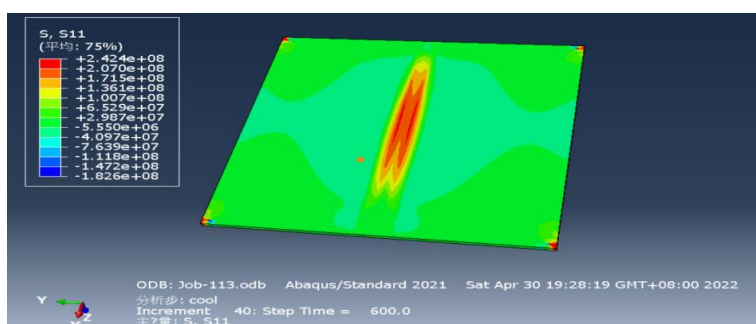


图 3-12 焊接电流为 80A 的应力云图

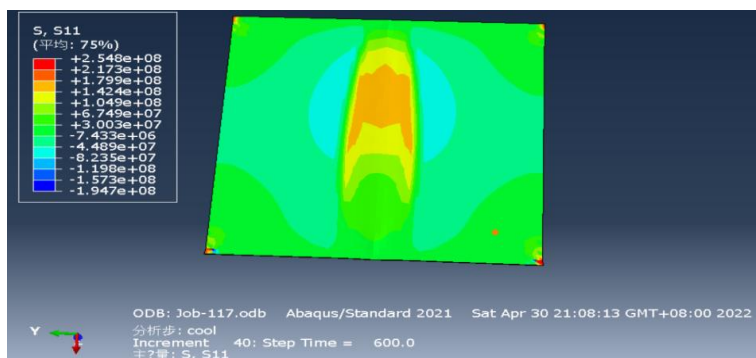


图 3-13 焊接电流为 110A 的应力云图

通过只改变焊接电流的的应力图可以看出，随着焊接电流的增大焊缝处的拉应力逐渐增大，焊接电流为 110A 时的焊缝处拉应力最大，焊接电流为 35A 时在焊缝处的拉应力最小，在一定范围内，焊接电流扩大 3 倍在焊缝处受到的最大拉应力也扩大约 3 倍，显而易见，在焊接电流为 80A 左右时的焊缝受力情况较好，三组应力云图焊缝处的拉应力最大，从焊缝到母材两侧边缘方向，应力逐渐降低。所以焊接时选择电流不宜过大或者过小，电流过小出现未焊透的情况，电流过大将会出现焊穿的情况，综上所述，根据应力变化图的显示结果，选择电流为 80A，焊接速度为 5mm/s 的受力情况较好。

图 3-14 所示为焊接电流为 80A，焊接速度为 5mm/s 的沿焊缝中心线路径上的应力分布，图 3-15 为垂直于焊缝路径上的应力分布。

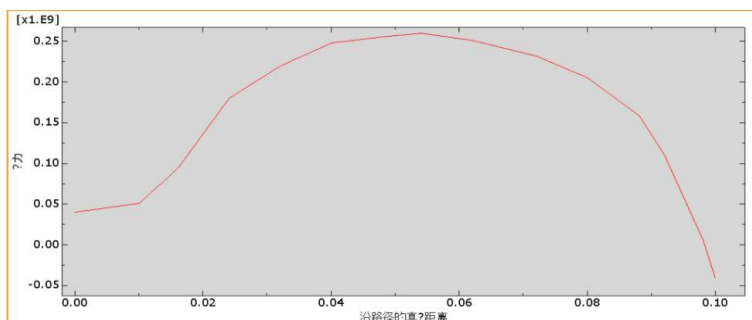


图 3-14 沿着焊缝中心线路径上的纵向应力分布

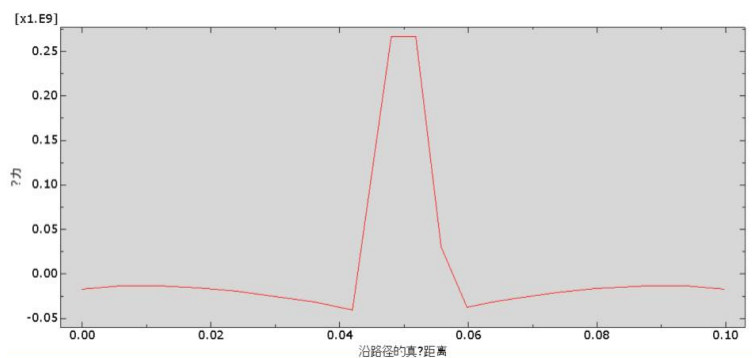


图 3-15 垂直焊缝路径上的横向应力分布

由图 3-14 可以看到焊缝中心线上应力最大约为 250Mpa，焊接开始时出现 50MPa 的拉应力，在焊接结束的位置出现了约为 50MPa 的压应力。由图 3-15 可以看到从焊缝中心线到母材，应力逐渐由 250Mpa 的拉应力减小，在约 45mm 还有 55mm 的位置处过渡为压应力，从中心到两边压应力值逐渐增大，在约 40mm 还有 60mm 的位置处压应力达到最大，压应力最大值为 50Mpa，从压应力最大处到母材两边缘的压应力逐渐降低趋向于 0。

运用控制变量法控制焊接电流和电压等其他参数不变的情况下，只改变焊接速度参数，图 3-16、3-17、3-18 分别为焊接电流不变，焊接速度为 1mm/s、5mm/s、10mm/s 不同的试件厚度方向位移变化分布。

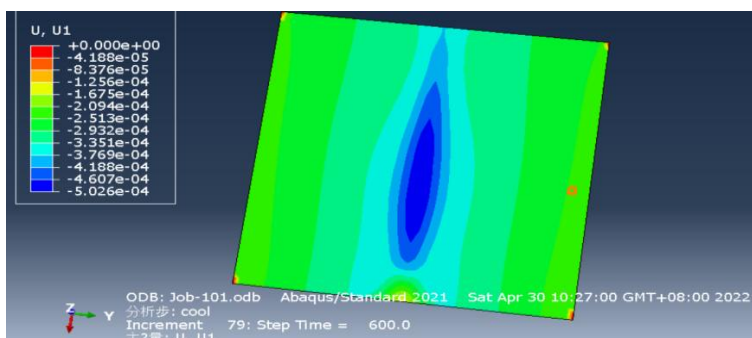


图 3-16 焊接速度为 1mm/s 的试件厚度方向位移分布

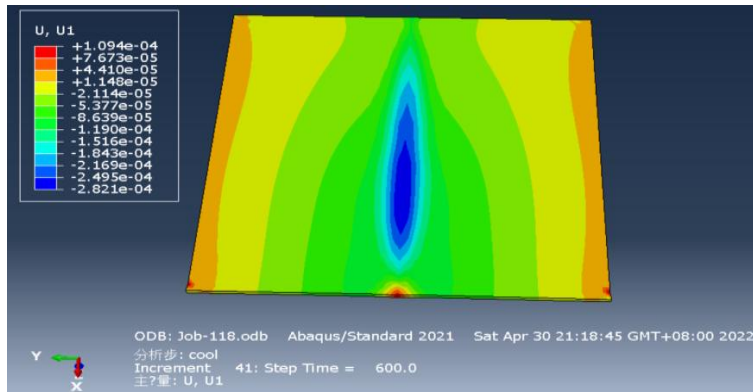


图 3-17 焊接速度为 5mm/s 的试件厚度方向位移分布

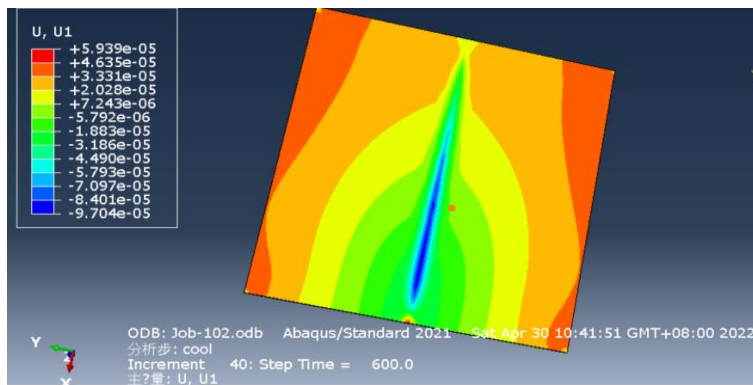


图 3-18 焊接速度为 10mm/s 的试件厚度方向位移分布

通过只改变焊接速度的厚度方向位移图可以看出，随着焊接速度的增大焊缝处的厚度方向位移逐渐减小，焊接速度为 10mm/s 时的焊缝处厚度方向位移最小，焊接速度为 1mm/s 时在焊缝处的厚度方向位移最大，在一定范围内，焊接速度扩大 10 倍在焊缝处厚度方向位移缩小约 1/2 倍，显而易见，在焊接速度为 5mm/s 时的焊缝处位移变化情况较好，三组应力云图焊缝处的厚度方向位移最大，从焊缝到母材两侧边缘方向，厚度方向位移逐渐减小，母材两侧边缘向上翘起。

运用控制变量法控制焊接速度为还有其他焊接参数不变，只改变焊接电流，如图 3-19、3-20、3-21 所示为 35A、80A、110A 的焊接试件厚度方向位移云图。

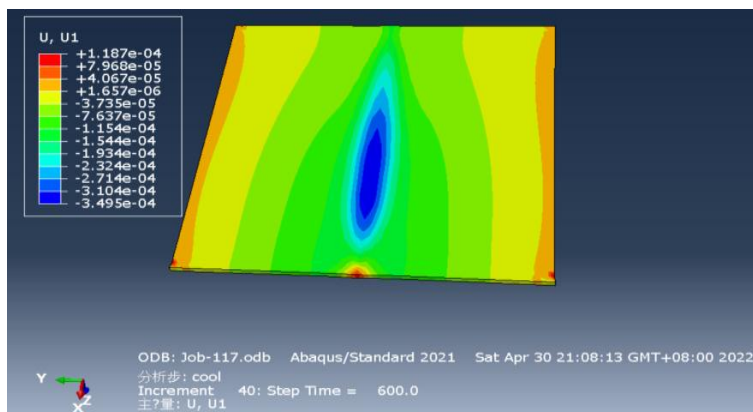


图 3-19 焊接电流为 35A 的试件厚度方向位移分布

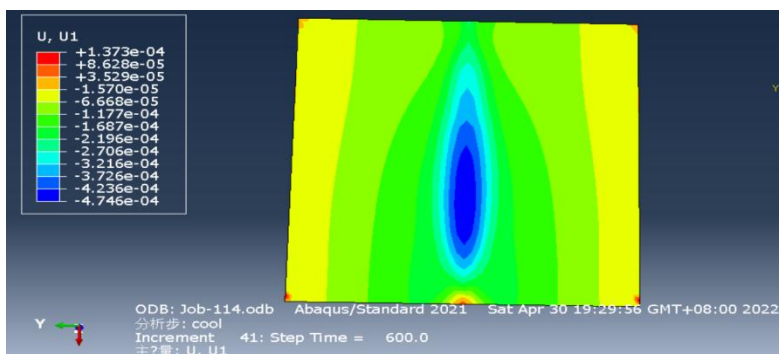


图 3-20 焊接电流为 80A 的试件厚度方向位移分布

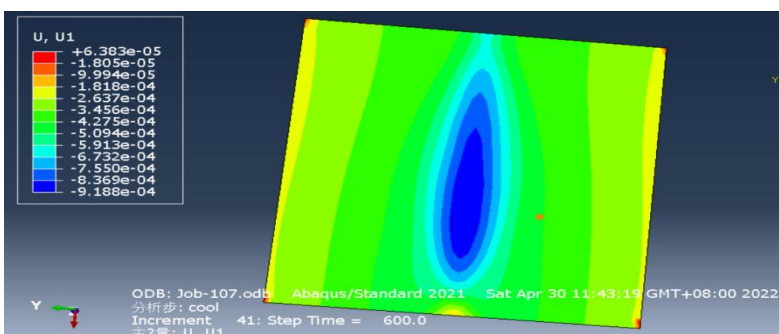


图 3-21 焊接电流为 110A 的试件厚度方向位移分布

通过只改变焊接电流的厚度方向位移图可以看出，随着焊接电流的增大焊缝处的厚度方向位移逐渐增大，焊接电流为 35A 时的焊缝处厚度方向位移最小，焊接电流为 110A 时在焊缝处的厚度方向位移最大，在一定范围内，焊接电流扩大 3 倍在焊缝处厚度方向位移也扩大约 3 倍，显而易见，在焊接电流为 80A 时的焊缝处位移变化情况较好，三组厚度方向位移分布图焊缝处的厚度方向位移最大，从焊缝到母材两侧边缘方向，厚度方向位移逐渐减小，母材两侧边缘向上翘起。所以根据厚度位移的变化来看，选择速度小，较小的电流的参数较为理想，即焊接速度 5mm/s，焊接电流为 80A 较为理想。

如图 3-22 所示为焊接电流为 80A，焊接速度为 5mm/s 试件沿着焊缝的厚度位移即挠度分布曲线。

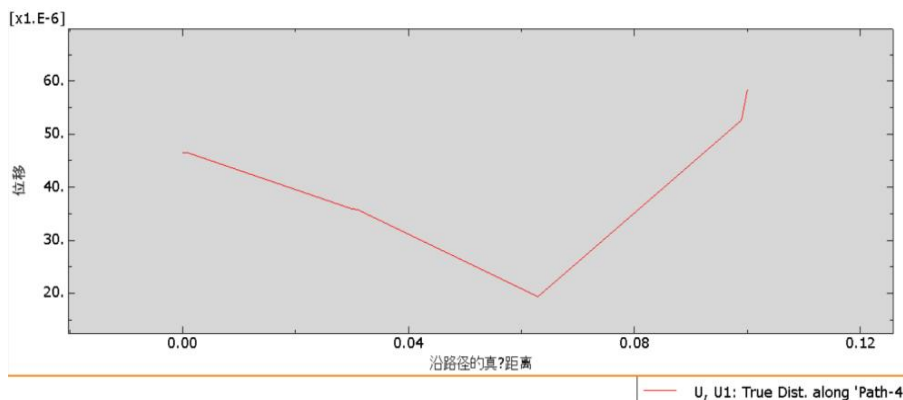


图3-22 试件厚度边缘厚度方向位移分布

由图 3-22 可以看到，在焊接开始端试件翘起一定高度，靠近中间位置最低，焊接结束端位置变高，呈现半个波浪变形的形态。最低点与最高点相差约为 25mm，即最大挠度为 25mm。

3.3 本章小结

在温度场焊接模拟完成后，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 方向移动。

通过只改变焊接速度的应力图可以看出，随着焊接速度的增大焊缝处的拉应力逐渐增大，焊接速度为 10mm/s 时的焊缝处拉应力最大，焊接速度为 1mm/s 时在焊缝处的拉应力最小，显而易见，在焊接速度为 5mm/s 时的焊缝受力情况较好，通过只改变焊接电流的应力图可以看出，随着焊接电流的增大焊缝处的拉应力逐渐增大，焊接电流为 110A 时的焊缝处拉应力最大，焊接电流为 35A 时在焊缝处的拉应力最小，显而易见，在焊接电流为 80A 左右时的焊缝受力情况较好，应力云图中焊缝处的拉应力最大，从焊缝到母材两侧边缘方向，应力逐渐降低。所以焊接时选择电流不宜过大或者过小，电流过小出现未焊透的情况，电流过大将会出现焊穿的情况，综上所述，根据应力变化图的显示结果，选择电流为 80A，焊接速度为 5mm/s 的受力情况较好。

通过只改变焊接速度的厚度方向位移图可以看出，随着焊接速度的增大焊缝处的厚度方向位移逐渐减小，焊接速度为 10mm/s 时的焊缝处厚度方向位移最小，焊接速度为 1mm/s 时在焊缝处的厚度方向位移最大，显而易见，在焊接速度为 5mm/s 时的焊缝处位移变化情况较好，通过只改变焊接电流的厚度方向位移图可以看出，随着焊接电流的增大焊缝处的厚度方向位移逐渐增大，焊接电流为 35A 时的焊缝处厚度方向位移最小，焊接电流为 110A 时在焊缝处的厚度方向位移最大，显而易见，在焊接电流为 80A 左右时的焊缝处位移变化情况较好，从厚度方向位移分布图可知焊缝处的厚度方向位移最大，从焊缝到母材两侧边缘方向，厚度方向位移逐渐减小，母材两侧边缘向上翘起。所以根据厚度位移的变化来看，焊接速度 5mm/s，焊接电流为 80A 较为理想。

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 5mm/s，焊接电流为 80A 是较为理想的焊接参数。

第四章 静应力与疲劳分析

4.1 静应力分析

焊接过后，需要对模型试件进行静应力和疲劳分析，导入模型为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 2\text{mm}$ ，建立分析步 step-1 类型为通用静应力，然后施加预定义焊接温度场如图 4-1 所示并且施加外载荷进行静应力和厚度方向位移变形分析。施加表面载荷模拟静拉力如图 4-2 所示，然后网格划分，求解结果。

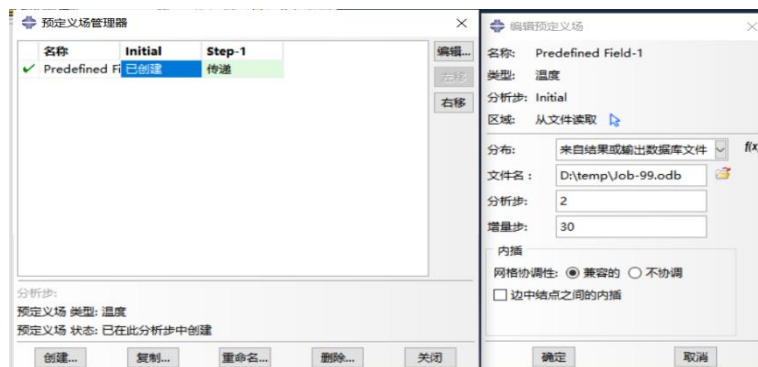


图 4-1 施加预定义焊接温度场

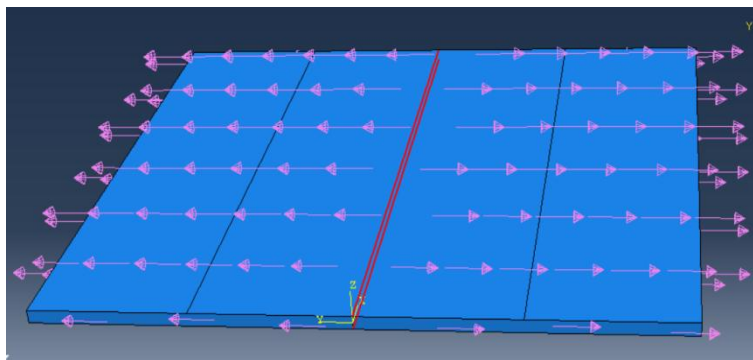


图 4-2 施加静应力场

图 4-3 为施加外部载荷后的有限元分析应力结果图，图 4-4 为施加载荷后的厚度方向位移分布云图。

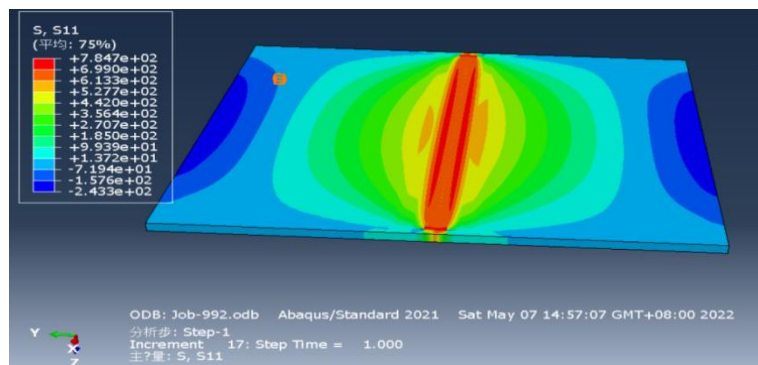


图 4-3 施加外部载荷应力图

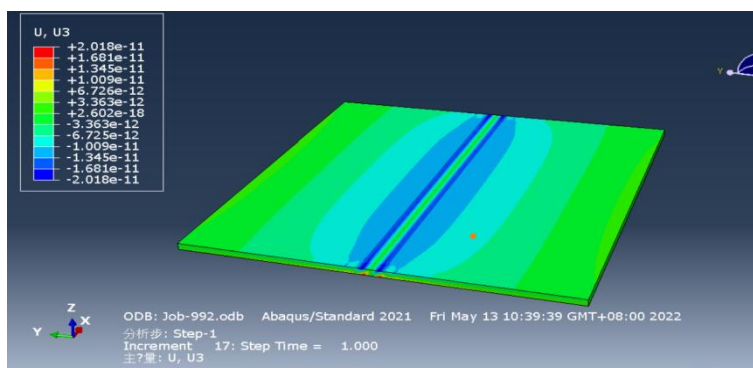


图 4-4 施加外部载荷后的位移分布云图

从图 4-3 可知，应力集中主要分布在焊缝处，从焊缝到母材两边边缘应力逐渐减小，然后逐渐过渡为压应力压应力逐渐增加母材两边边缘受到的压应力最大。图 4-4 可知焊缝处的厚度方向位移为负位移且变化最大，从焊缝到母材两边边缘厚度方向的位移逐渐减小，在两边边缘处达到最小值。

4.2 疲劳分析

静应力分析完成之后，运用 Fe-safe 软件进行疲劳分析，首先导入做好的静应力分析的 odb 文件，然后选择读入所有分析步增量步的应力，定义单位为 Mpa，对载荷参数，材料属性的设置如图 4-5，4-6 所示。

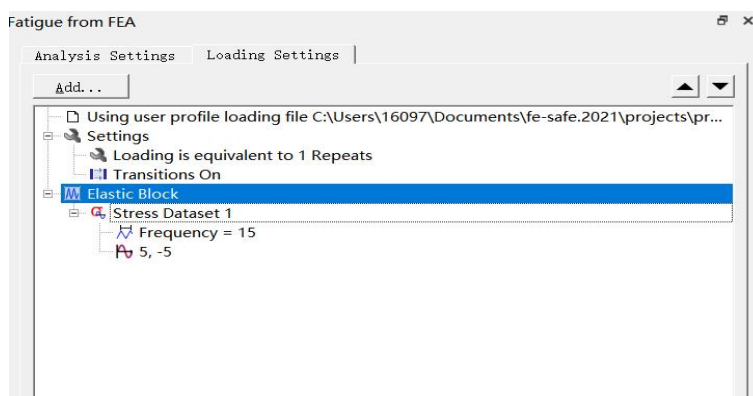


图 4-5 载荷参数设置

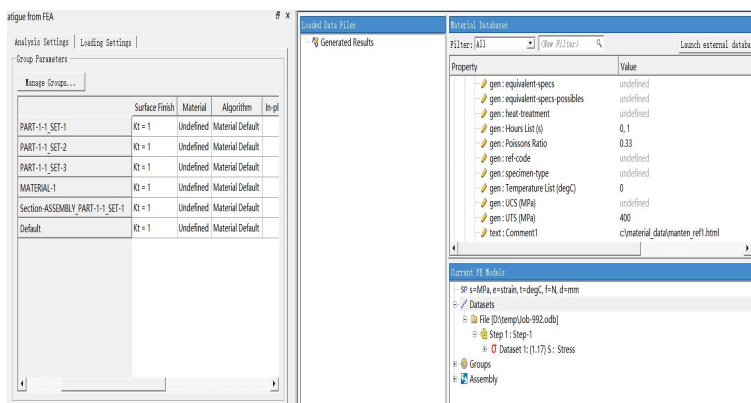


图 4-6 材料属性设置

在 Factor of Strength Calculations 中设置强度, 设置循环次数为设置循环次数 1×10^5 如图 4-7 所示。在 Exports 输出窗口中设置输出变量, 如应力或者疲劳寿命, 如图 4-8 所示。最后 Analyse 进行计算, 计算完成后, 在 Abaqus 软件, 找到“输出数据库”, 观察疲劳分析的计算结果。

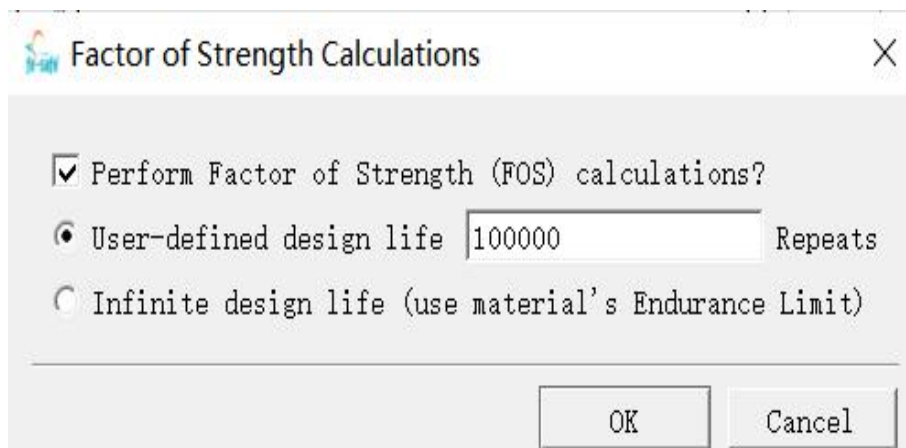


图 4-7 循环次数



图 4-8 输出参数

疲劳分析输出结果如图 4-9 所示为疲劳寿命分布云图, 如图 4-10 为交变载荷下最大应力分布图。

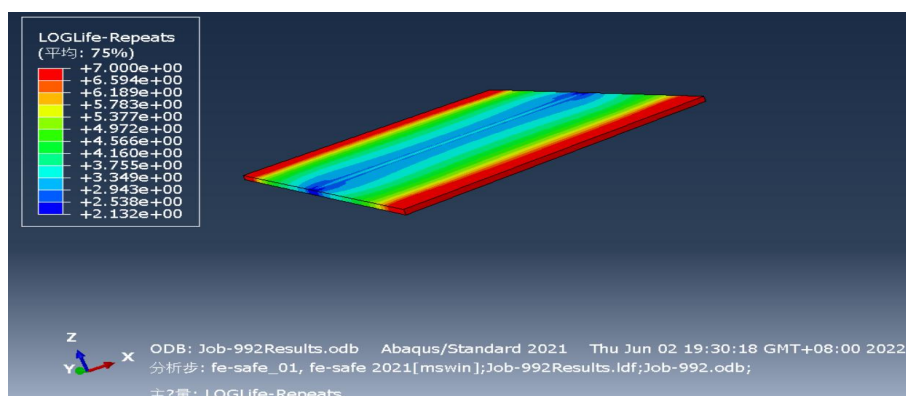


图 4-9 疲劳寿命分布云图

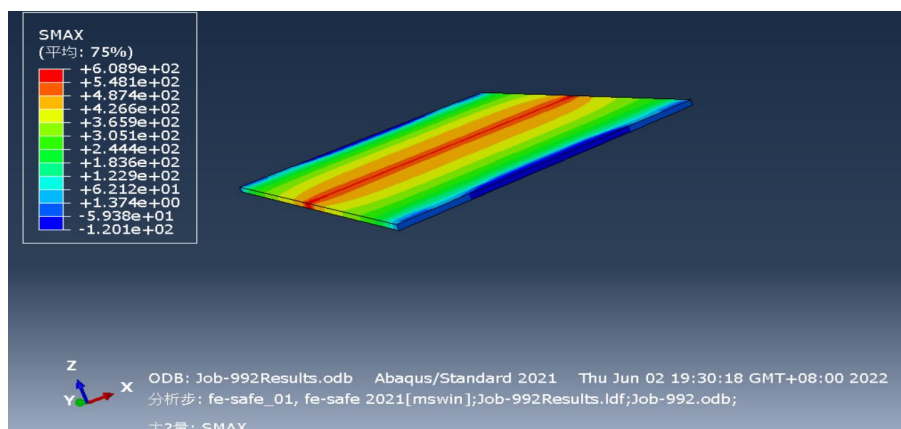


图 4-10 交变载荷下最大应力分布

图 4-9 可以看出从焊缝到母材两端焊接疲劳寿命逐渐增加，焊缝区域疲劳寿命最短极易发生断裂，母材两端疲劳寿命最高。图 4-10 施加交变载荷之后可见最大拉应力在焊缝区域，从焊缝到母材两端最大拉应力逐渐降低，逐渐过渡为最大压应力，然后压应力逐渐增加到母材边缘处压应力最高。

4.3 本章小结

根据静应力分析结果可知，应力集中主要分布在焊缝处，从焊缝到母材两边边缘应力逐渐减小，焊缝区域受拉应力，最大拉应力约 785MPa，然后拉应力逐渐过渡为压应力，压应力逐渐增加在母材两边边缘受到的压应力最大，最大压应力约 243MPa。焊缝处的厚度方向位移变化最大，从焊缝到母材两边边缘厚度方向的位移逐渐减小，在两边边缘处达到最小值。

从疲劳分析结果可以看出从焊缝到母材两端焊接疲劳寿命逐渐增加，焊缝区域疲劳寿命最短极易发生断裂，母材两端疲劳寿命最高，在焊缝处疲劳寿命约为 10^3 次，而在母材两端疲劳寿命约为 10^7 次。施加交变载荷之后可见最大拉应力在焊缝区域，最大拉应力约 600MPa，从焊缝到母材两端最大拉应力逐渐降低，逐渐过渡为最大压应力，然后压应力逐渐增加到母材边缘处压应力最高，最大压应力约 120MPa。

参考文献

- [1] 黄又青.2A12 铝合金 A-TIG 焊活性剂优化及其接头组织性能研究[D].广东工业大学,2020.
- [2] 赵步青,胡会峰,张丹宁.高速钢疲劳极限的研究[J].热处理,2018,33(05):31-36.
- [3] 吴私.杂质元素对 2A12 铝合金显微组织与力学性能的影响[D].辽宁石油化工大学,2014.
- [4] 张俊苗.航天器贮箱铝合金焊接接头强度特性研究[D].南京航空航天大学,2013.
- [5] 张海.超声喷丸矫正铝合金薄板焊接失稳变形[D].天津大学,2012.
- [6] 杜家政,赵振洋,黄诚,吴会强,张晓颖.铝合金焊接接头力学性能实验研究[J].实验力学,2017,32(06):811-817.
- [7] 刘亚良.基于疲劳损伤熵的点焊接头累积损伤评估方法研究[D].大连交通大学,2018.
- [8] 邹丽.焊接接头疲劳寿命智能评价方法及其应用研究[D].大连交通大学,2017.
- [9] 陈芙蓉,赵永胜,邱小明,解瑞军.超声冲击处理对 7A52 铝合金焊接接头表层组织及性能的影响[J].表面技术,2015,44(06):49-53.
- [10] HeShi,Liu Liyuan,Zhao Yanqiu,Kang Yue,Wang Feifan,Zhan Xiaohong.Comparative investigation between fiber laser and disk laser:Microstructure feature of 2219 aluminum alloy welded joint using different laser power and welding speed[J].Optics and Laser Technology,2021,141:
- [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] Xu Boan,Jiang Ping,Geng Shaoning,Wang Yilin,Zhao Jintian,Mi Gaoyang.In-situ reactions and mechanical properties of 6061 aluminum alloy weld joint with SiCp by laser melting injection[J].Materials & Design,2021,203:

附 录

```

SUBROUTINE DFLUX(FLUX,SOL,KSTEP,KINC,TIME,NOEL,NPT,COORDS, JLTP,
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=14
  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)

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

```

焊接热源子程序

温度场模拟计算采用的是双椭球热源形式，通过 Fortran 语言编写子程序，在子程序中 a、b、c 代表双椭球形状参数；wu 为焊接电压；wi 为焊接电流；effi 为焊接效率；f1 为热源分配系数；x0、y0、z0、为焊接起点坐标；heat、shape 为焊接热源方程，此子程序在后期提交作业步时进行引用加载热源。

致 谢

论文来到了致谢，也表示我的本科阶段即将结束，漫漫求学路，悠悠父母心。感谢父母二十三年的培养和教育，让我能够踏实的走自己人生的每一步。恩情无以言表，唯有努力，希望早日能够成为你们的依靠。感谢宋宗贤老师，从论文的选题，到完成整个论文，整个过程老师细心指导，培养了我严谨的态度，良师难得，将一生铭记。感谢求学期间所有老师的帮助与照顾，承蒙受教，心存感激。祝你们日后工作顺利，桃李满天下。

感谢我的大学舍友和同学们在四年相处过程中对我的包容与帮助，陪伴我度过四年的大学生活。感谢一起陪我成长的朋友，愿你我皆能前途似锦，愿你我皆能有所担当。

感谢成长路上所有关怀帮助我的人，祝愿爱我的和我爱的人工作顺利，身体健康。感谢平凡但坚毅的自己，未来的日子继续去经历，去成长，去沉淀。