

学校代码: 10289
分类号: TG453
密 级: 公开
学 号: 102060056



江苏科技大学 硕士学位论文

6082 铝合金双轴肩 FSW 工艺及温度场研究

6082 铝合金双轴肩 FSW 工艺及温度场研究

周小平

研究生姓名 周小平 导师姓名 李敬勇

申请学位类别 工学硕士 学位授予单位 江苏科技大学

学 科 专 业 材料加工工程 论文提交日期 2013 年 4 月 26 日

研 究 方 向 先进材料焊接及应用 论文答辩日期 2013 年 6 月 16 日

答辩委员会主席 吴铭方 评 阅 人 _____

江苏科技大学

2013 年 6 月 7 日

分类号: TG453

密 级: 公开

学 号: 102060056

工学硕士学位论文

6082 铝合金双轴肩 FSW 工艺及温度场研究

学生姓名 周小平

指导教师 李敬勇

江苏科技大学
二〇一三年六月

A Thesis Submitted in Fulfillment of the Requirments
for the Degree of Master of Engineering

Joint Properties and and Tempearture Field studies on
Bobbin tool Friction Stir welding of 6082 Aluminum alloy

Submitted by

Xiaopng Zhou

Supervised by

Professor Jingyong Li

Jiangsu University of Science and Technology

June, 2013

江苏科技大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立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，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

江苏科技大学学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权江苏科技大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于：

(1)保密□，在__年解密后适用本授权书。

(2)不保密□。

学位论文作者签名：

指导教师签名：

年 月 日

年 月 日

摘 要

双轴肩搅拌摩擦焊技术作为搅拌摩擦焊领域的拓展技术，是一种新型的搅拌摩擦焊技术，解决了常规搅拌摩擦焊存在的焊接载荷较大、背部需要刚性垫板、无法焊接形状复杂和特殊位置工件等问题。

本文进行了 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接工艺研究，获得 6mm 厚 6082 铝合金室温下最佳焊接参数范围，并从金相组织、拉伸性能、显微硬度、断口分析几个方面对接头力学性能及显微组织进行分析。双轴肩搅拌摩擦焊焊缝呈腰型；从显微组织角度看，接头的焊核区、热机影响区、热影响区等组织特征与常规搅拌摩擦焊相似；接头显微硬度分布呈“马鞍”形分布，但双轴肩搅拌摩擦焊接头不存在常规搅拌摩擦焊出现的各层异性；双轴肩搅拌摩擦焊接头抗拉强度达到了 225MPa，延伸率为 3%；接头断口形貌呈典型的韧性断裂。

搅拌摩擦焊温度场是进行接头流场、应力与变形分析的基础，是焊缝力学性能和微观结构的重要影响因素。本文通过实际测量与模拟计算两种方法研究了 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊的温度场。结果表明，双轴肩搅拌摩擦焊过程分为加速焊接阶段和稳定焊接阶段，处于不同阶段，焊接试板测温点的升温速度不同；相同焊接条件下，距离焊缝越近的位置温度上升和下降的越剧烈，峰值温度越高；靠近下轴肩试板的温度高于靠近上轴肩、后退侧的温度明显高于前进侧；焊接速度提高，各测温点的峰值温度依次降低，随着测温点远离焊缝中心，焊接速度对其温度分布的影响作用逐渐减弱。在试板厚度方向，试板温度最高的是下表面，其次是上表面，试板中心温度最低。

通过 ABAQUS 有限元软件建立双轴肩搅拌摩擦焊三维传热有限元模型，对 6mm 及 12mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接过程温度场进行了模拟分析计算。得到了双轴肩搅拌摩擦焊接过程中在不同时刻、不同位置的温度场，结合实验得到的数据进行分析对比，验证了所建立模型的正确性。

关键词：双轴肩搅拌摩擦焊；铝合金；组织性能；温度场检测；数值模拟

Abstract

Bobbin-tool friction stir welding technology as the expansion of the field of friction stir welding technology is a new type of friction stir welding. The development of the bobbin-tool technique was undertaken in order to overcome some limitations of conventional friction stir welding, such as: it need a force to react against the welding tool pressure load, it is necessary to have a device of high rigidity and steady back to achieve conventional FSW successfully, which restricts its application to complex shaped and special position and of the workpiece.

This paper studies on the welding parameter of Bobbin-tool friction stir welding of 6082 almuinum alloy plates 6mm in thickness. The result obtained the optimal welding parameter for Bobbin-tool friction stir welding of 6082 almuinum alloy. Microstruetures and properties of 6082 aluminum alloy weld joint are investigated by metallographic, microstructure hardness test, room-temperature tensile and fracture analysis. Typical macro sections of the joint were slightly waist shpaed. The microsImcture of the joint also consisted of nugget zone, thermal-mechanically affected zone, heat affected zone, and within each zone, the microstructure was the same as C-FSW joint. The BFSW joint and C-FSW joint had the similar hardness distdbution with the typical saddle type, but the former had no anisotropic. The mechanical property shown that the tensile strength of the joint can reach 225MPa, and the ductility can get to3%. The fracture mechanisium of the joint was ductile fracture.

The temperature field during the friction stir welding process is important factor on the mechanical properties and micro-structure in welded joint, and is principal for understanding seam metal flow, welding stress and deformation analysis. This paper studies the temperature field of 6082 aluminum alloys Bobbin-tool friction stir welding by numerical simulation and experimental measuring.It is shown that bobbin-tool friction stir welding process is divided into the acceleration stage and stable stage, at different stages of welding, the heating speed of welding samples are different. Under the same welding condition, the closer the position is to the weld center, the fiercer the temperature rising and falling, and the higher the peak temperature. The temperature near the lower shoulder is higher than that near the upper shoulder, and the temperature at retreating side is higher than that at advancing side. Increasing welding speed, the peak temperature of each measurement

point is lower and lower. With the temperature measuring point away from the weld center, the effect of welding speed on the temperature distributions is gradually weakened. in the thickness direction of the test workpiece, the temperature is highest on the bottom surface while the lowest in the test workpiece center.

With the ABAQUS finite element software, a three-dimensional heat transfer finite element model that analyzed the temperature distribution of 6mm and 12mm thick 6082 aluminum Bobbin-tool friction stir welding was presented in this paper. Compared with the measured temperature, the thermal model and the laws that were got by experimental measuring were tested. The model can obtained whole temperature field in different sections and different time.

Keywords: Bobbin-tool friction stir welding; aluminum alloys; Microstructures and properties; temperature measuring; numerical simulation

目 录

摘 要.....	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 前言	1
1.2 常规搅拌摩擦焊发展概述	2
1.2.1 常规搅拌摩擦焊原理.....	2
1.2.2 铝合金搅拌摩擦焊组织性能及温度场的研究现状.....	3
1.3 双轴肩搅拌摩擦焊发展概述	5
1.3.1 双轴肩搅拌摩擦焊原理.....	5
1.3.2 双轴肩搅拌摩擦焊研究现状.....	6
1.4 研究内容及意义	9
1.4.1 本课题的研究意义.....	9
1.4.2 本课题的研究内容.....	9
第 2 章 实验材料、设备及方案.....	11
2.1 实验材料选择	11
2.2 实验设备及方法	11
2.2.1 搅拌摩擦焊机及夹具	11
2.2.2 双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头.....	12
2.2.3 接头性能分析方法及仪器.....	13
2.2.4 测温方法及设备.....	14
2.3 实验方案	15
2.3.1 工艺研究实验方案.....	15
2.3.2 测温实验方案.....	16
本章小结	18
第 3 章 工艺实验结果与分析.....	19
3.1 焊接过程及接头组织分析	19
3.1.1 双轴肩搅拌摩擦焊过程特点.....	19
3.1.2 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊对接工艺试验结果.....	20
3.1.3 接头宏观形貌.....	21
3.1.4 母材的显微组织.....	22

3.1.5 焊核区的显微组织	23
3.1.6 热机械影响区的显微组织	24
3.1.7 热影响区的显微组织	26
3.2 双轴肩搅拌摩擦焊接头拉伸性能	27
3.3 双轴肩搅拌摩擦焊微观硬度分析	28
3.4 双轴肩搅拌摩擦焊试样接头断口微观分析	30
本章小结	23
第 4 章 试板温度场检测结果及分析	33
4.1 试板温度场测量结果	33
4.2 双轴肩搅拌摩擦焊试板温度曲线特征	33
4.3 变量对双轴肩搅拌摩擦焊试板焊接温度场的影响	34
4.3.1 距离焊缝中心不同距离的温度场分布规律	35
4.3.2 上轴肩与下轴肩、前进侧与后退侧温度分布规律	37
4.3.3 试板厚度方向的温度分布规律	38
4.3.4 不同焊接速度下温度场分布	39
4.4 试验存在问题分析	40
本章小结	41
第 5 章 试板温度场数值模拟	43
5.1 引言	43
5.2 ABAQUS 有限元软件	43
5.3 建模的基础理论	44
5.3.1 有限元基本理论	44
5.3.2 搅拌摩擦焊温度场基本理论	45
5.3.3 搅拌摩擦焊数值模拟过程	45
5.4 双轴肩搅拌摩擦焊的热输入模型	45
5.4.1 轴肩摩擦产热的计算	47
5.4.2 搅拌针产热计算	48
5.4.3 米塞斯屈服条件	48
5.4.4 材料的本构方程	49
5.4.5 传热模型	49
5.5 有限元模型的建立	50
5.5.1 建几何模型及模型网格划分	50
5.5.2 材料热物性参数	51
5.5.3 边界条件	51

5.6 双轴肩搅拌摩擦焊温度场模拟结果与分析	52
5.6.1 焊接初始阶段结果与分析	52
5.6.2 稳定阶段的温度场分布	53
5.6.3 各个特征点不同时刻的温度场分布	54
5.6.4 Y-Z 横截面上的温度场	55
5.6.5 距焊缝中心不同距离的温度分布	57
5.6.6 模拟值与实测值对比	59
本章小结	60
结 论	61
参考文献	63
攻读硕士学位期间所发表的学术论文	67
致 谢	68

CONTENTS

Abstract(Chinese).....	I
Abstract(English).....	II
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Friction Stir Welding Introduction	2
1.2.1 The principle of the friction stir welding.....	2
1.2.2 Research status of aluminum alloy by Friction Stir Welding	3
1.3 Bobbin-tool friction stir welding Introduction.....	5
1.3.1 The principle of the Bobbin-tool friction stir welding	5
1.3.2 The status of Bobbin-tool friction stir welding	6
1.4 Content and significance of this research	9
1.4.1 The purpose of this subject.....	9
1.4.2 The content of this subject.....	9
Chapter 2 Experimental equipment, processing of materials	11
2.1 Experimental material selection.....	11
2.2 Experimental equipment and the experimental plan.....	11
2.2.1 Friction stir welding machine and clamping tool	11
2.2.2 Bobbin-tool friction stir welding tool.....	12
2.2.3 Experimental equipment and the experimental plan of joint.....	13
2.2.4 Experimental equipment and the experimental plan of temperature measuring ...	14
2.3 Experimental plan	15
2.3.1 Experimental plan of processing	15
2.3.2 Experimental plan of temperature measuring.....	16
Summary	18
Chapter 3 Results and discussion of processing	19
3.1 Analysis of Welded Joints	19
3.1.1 Process characteristics of BFSW.....	19
3.1.2 Results of BFSW	20
3.1.3 Macro morphology of joints.....	21
3.1.4 Microstructure of base material.....	22

3.1.5 Microstructure of WNZ.....	23
3.1.6 Microstructure of TMAZ.....	24
3.1.7 Microstructure of HAZ.....	26
3.2 Tensile properties of bobbin-tool friction stir welding joints	27
3.3 Micro-hardness analysis of bobbin-tool friction stir welding joints.....	28
3.4 Fracture microscopic analysis of bobbin-tool friction stir welding joints.....	30
Summary.....	23
Chapter 4 Results and analysis of the test plates temperature field measurement.....	33
4.1 Results of the test plates temperature field measurement.....	33
4.2 Test plate temperature curve Overview of bobbin-tool friction stir welding.....	33
4.3 The influence of boundary conditions to temperature curves of test plates	34
4.3.1 Different distances from the center of the weld temperature distribution law.....	35
4.3.2 Temperature distribution	37
4.3.3 Test plate thickness direction temperature distribution.....	38
4.3.4 Temperature distribution in the different welding speed	39
4.4 Analysis of test problems.....	40
Summary.....	41
Chapter 4 Numerical Simulation of Temperature of test panels	43
5.1 Introduction.....	43
5.2 Introduction on Finite Element Software ABAQUS	43
5.3 Fundamental Tethory of Modeling	44
5.3.1 Basic theory of finite element	44
5.3.2 Basic Theory of Friction stir welding temperature field theory.....	45
5.3.3 Friction stir welding process of numerical simulation	45
5.4 The Bobbin-tool friction stir welding heat input model	45
5.4.1 Calculation of Shaft Shoulder Heat Production	47
5.4.2 Calculation of Mix Needle Heat Production	48
5.4.3 Mises Yield Condition.....	48
5.4.4 Material Constitutive Equation	49
5.4.5 Heat transfer model	49
5.5 The Establishment of finite element model	50
5.5.1 Build the geometric model and the model meshing.....	50
5.5.2 Material thermal parameters.....	51
5.5.3 Boundary conditions	51

5.6 Results of bobbin tool stir friction welding temperature field simulation	52
5.6.1 Results and analysis of the initial phase of the welding.....	52
5.6.2 The temperature distribution of the stabilization phase	53
5.6.3 Different time each feature point temperature distribution	54
5.6.4 The temperature field of Y-Z cross-section	55
5.6.5 Different distances from the center of the weld temperature distribution.....	57
5.6.6 Comparison of simulated and observed values	59
Summary	60
Conclusion.....	61
References	63
The published scientific papers during study for a master's degree.....	67
Acknowledgement.....	68

第 1 章 绪 论

1.1 前言

随着社会经济的发展，人们对节能、环保、安全提出了越来越高的要求，因此铝及铝合金等轻质高强材料获得越来越广泛的关注。铝及铝合金由于重量轻，具有高的比强度、断裂韧度，耐腐蚀、耐低温及成形性能好等特点正在逐渐取代钢结构材料成为大飞机制造的主要材料之一。例如铝合金是运载火箭及各种航天器的主要有色金属结构材料，同时铝合金也越来越广泛地应用于汽车车体材料^[1]。

焊接技术作为现代一种重要的金属成型方法，随着工业及现代制造业的快速发展，焊接效率的提高对工业乃至社会的发展进步起着不可估量的重要作用。同时，焊接技术发展的必然趋势是优质、高效、低耗，也是现代工业及制造业对焊接工艺及方法提出的迫切要求^[2]。新材料的出现对焊接技术得出了新的课题，成为焊接技术发展的重要推动力。

因此，铝及铝合金的焊接性及焊接接头性能的研究是十分必须的。由于铝及铝合金的化学活泼性很强，采用传统焊接方法进行焊接时，可能存在以下问题：（1）铝熔化时不发生颜色变化，很难控制；（2）焊缝中出现气孔；（3）焊接热裂纹；（4）接头的“等强性”；（5）变形（线胀系数大，导热性强）；（6）焊缝夹杂、焊缝未融合等^[3]。

搅拌摩擦焊（简称 FSW）是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种新型的塑化连接方法^[4]，是一个典型的固态焊接方法，并于 1992 年申请了发明专利，同时逐渐在世界范围内提出了专利保护申请，被称为继激光焊以来的一场焊接革命。随着研究的发展，目前为止可以用于同种及异种金属之间的焊接，包括：铝及铝合金、镁及镁合金、铜及铜合金等其他金属。与以前的熔化焊接方法相比较，焊缝处不会出现类似于熔焊的各种焊接缺陷；不需要进行复杂的焊前处理工作，焊接过程中不需要加保护气体、填充材料，并且所需要的能量仅为普通融化焊接方法的 20% 左右。噪音低，无烟尘、无弧光辐射和飞溅，易于实现机械化与自动化是搅拌摩擦焊焊接过程中的突出优点^[5]。搅拌摩擦焊被称为是一种低成本、高质量的“绿色焊接技术”。

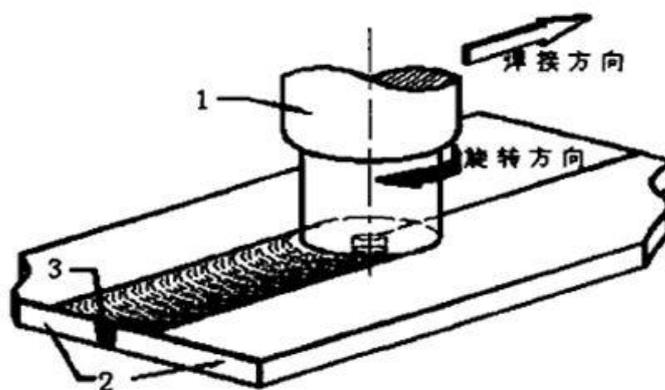
由于常规搅拌摩擦焊还存在不足，如焊接载荷较大，需要严格的装配精度和背部支持垫板，因而形状复杂和特殊位置的试板将可能无法焊接，此外常规搅拌摩擦焊焊接后还存在难于检测的根部缺陷。为此，英国焊接研究所（TWI）开发的双轴肩搅拌摩擦焊（SR-FSW 或 BFSW）成功的解决了常规搅拌摩擦焊存在的上述问题，并用于铝及铝合金、不锈钢等材料的焊接^[6-17]。考虑到国内对双轴肩搅拌摩擦焊的研究不多，还处在双轴肩搅拌摩擦焊基础研究及工程应用方面的起步阶段，本次实验用 6082 铝合

金为研究对象，进行了双轴肩搅拌摩擦焊工艺试验，对其焊缝成型、焊缝组织形态、力学性能、显微硬度及温度场测量及数值模拟进行了着重分析。

1.2 常规搅拌摩擦焊发展概述

1.2.1 常规搅拌摩擦焊原理

搅拌摩擦焊是将高速旋转的搅拌头扎入试板后沿焊接方向运动，在搅拌头与试板的接触部位产生摩擦热，使其周围金属形成塑性软化层，搅拌针后方所形成的空腔是通过搅拌头搅拌作用形成的软化层金属进行填充，并在搅拌头轴肩与搅拌针的搅拌及挤压作用下实现材料连接的固相焊接方法^[18]。图1.1所示为搅拌摩擦焊工作原理图。



1—搅拌头 2—试板 3—焊缝

图 1.1 搅拌摩擦焊示意图

Fig. 1.1 FSW schemes

在焊接过程中试板要固定在背部刚性垫板上，搅拌头一边高速旋转一边沿两块试板的接缝与试板相对运动。搅拌头的搅拌针伸进材料内部进行摩擦和搅拌，搅拌头的轴肩与试板表面摩擦生热，并用于防止塑性状态材料的溢出，同时可以起到清除表面氧化膜的作用。被焊金属材料刚刚达到塑性状态是通过搅拌摩擦焊接过程中轴肩、搅拌针与试板摩擦产生的热量，热量不足够使金属达到熔点，因此搅拌摩擦焊属于固相焊接方法。跟普通的熔化焊相比，搅拌摩擦焊的优势还体现在以下几个方面^[19-23]：

(1) 搅拌摩擦焊接头力学性能好。由于搅拌摩擦焊是一种固相焊接方法，在焊接铝合金时不熔化，处在塑性流动状态，焊缝金属受到搅拌头高速旋转破碎金属和强力的搅拌作用，焊缝区的晶粒组织比母材金属细小，为细小的等轴晶组织，接头力学性能良好；

(2) 试板焊后残余应力小、基本无变形。搅拌摩擦焊焊接的时候，合金材料没有熔化，只是产生可塑性状态，所以搅拌摩擦焊接时温度较低，试板受到的热量比较低，所以由于加热产生的变形量也小，同样残余应力也比较低。同时，搅拌摩擦焊接的热输入比较小，焊接热循环过程中峰值温度比较低，并且高温停留时间也比较短，所以

热影响区比较小，试板基本上无变形，焊后试板尺寸精度高，减少焊后矫形及修整工序^[24]。

(3) 焊接成本低。无需进行严格的焊前试板表面清洁准备，焊接表面的氧化膜可以通过焊接过程中的摩擦和搅拌去除；搅拌摩擦焊接时没有电弧、没有烟尘，工作环境好，对环境的污染小。

(4) 适用范围广。能实现同种及异种材料的焊接，能实现从仰焊到俯焊的各种位置的焊接，还可实现如对接、搭结、角接接头等多种接头形式的焊接，甚至厚度变化的多层材料和结构件的焊接。

(5) 耗材少。传统的焊丝、保护气体等在搅拌摩擦焊中是不需要添加的。焊接搅拌头是唯一易消耗的材料。

(6) 系统简单、易于操作。

虽然搅拌摩擦焊相对与传统的熔焊有很多优势，但是焊接技术的发展，和新材料的不断出现，搅拌摩擦焊的劣势也逐渐被人们提出来，主要体现在^[18,25-30]：

(1) 跟传统熔焊相比，传统熔化焊的焊接速度比搅拌摩擦高，（但是在厚板焊接上，搅拌摩擦焊可能比熔化焊快，因为搅拌摩擦焊可以实现一次焊接成型，而熔化焊需要多层多道焊）；

(2) 焊接试板必须刚性固定，反面应有垫板；对装配要求较高，尤其是对接面间隙，一般来说比填丝焊的精度要求还高；

(3) 焊接结束搅拌搅拌针提出试板时，焊缝端头形成一个匙孔，并且难以对焊缝进行修补；

(4) 受试板需要加紧和焊缝方向的限制，某些特殊情况下不适合采用搅拌摩擦焊。

(5) 目前主要适用于大型结构零件的焊接，无法实现小型精密零件复杂焊缝的焊接；

(6) 设备刚性和精度要求较高，设备一次性投资大。

1.2.2 铝合金搅拌摩擦焊组织性能及温度场的研究现状

目前应用搅拌摩擦焊成功焊接的材料有铝合金、镁合金、铅、锌、铜、不锈钢、低碳钢等同种或异种材料。Rommveux 等人进行了铝合金-银的焊接研究^[31]。

Adamowski 等人^[32]对 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊旋转速度与焊接速度对力学性能和微观组织的影响规律进行了研究，在对焊缝接头进行分析时发现，在接头表面出现了飞边及沟槽等缺陷。

Murr 等人^[33]研究了搅拌摩擦焊焊接 1100 铝合金的动态再结晶过程，表明铝合金搅拌摩擦焊的主要组织是柱状晶。

Scialpi 等人^[34]研究了在一定的搅拌头旋转速度和焊接速度下，各种轴肩尺寸和形

状对厚度为 1.5mm 的 6082 铝合薄板金搅拌摩擦焊接头机械性能和组织结构的影响。

Sajm 等人^[35]对搅拌摩擦焊接头的超塑性进行了研究, 研究的材料为 2095 铝合金薄板, 通过对焊接接头与母材的超塑性进行比较, 发现搅拌摩擦焊后金属母材的超塑性基本没有被破坏。

Cavaliere 等人^[36]研究了在固定搅拌速度下, 不同焊接速度对晶粒大小和分布的影响。研究表明当焊接速度较低时, 由于不同焊接速度下变形时, 温度及受到的真实应力大小不同, 晶粒度差别很大。当焊接速度增大到一定程度时, 再增加焊接速度, 对晶粒度变化不大。

Rajneesh KUMAR 等人对 AA5083 铝合金搅拌摩擦焊过程中焊接力和热输入进行了系统的实验, 对影响搅拌摩擦焊接的焊接力和热输入的影响因素做了全面的分析。研究发现搅拌头的旋转速度、焊接速度和搅拌头轴肩直径对轴向力和热输入的影响最为显著, 而焊接速度和搅拌头直径明显影响焊接时的纵向阻力。随着搅拌针直径和焊接速度的增加, 纵向力变大; 而搅拌头轴肩直径对纵向力的影响比较复杂: 当旋转速度较小时, 纵向力随着搅拌头轴肩直径增加而变大; 当旋转速度较大时, 纵向力随着搅拌头轴肩直径增加而减小。轴向力随着搅拌头轴肩直径或者焊接速度的增加而变大, 随着旋转速度的增加而减小。热输入随着搅拌头轴肩直径或者旋转速度的增大而增大, 随着焊接速度的增加而减小。

Mohamed Assidi 等人基于任意拉格朗日—欧拉方程建立数值模型, 并采用 Forge3[®] F.E. 软件进行模拟。模拟中分别采用牛顿摩擦模型和库仑摩擦模型来模拟搅拌头与试板间的接触状态。在牛顿摩擦模型中, 研究发现焊接力和搅拌头温度对摩擦系数非常敏感, 哪怕是微小的改变都可能会给焊接力的模拟带来很大的误差, 并且不能准确计算出搅拌头的温度分布。另一方面, 采用库仑摩擦模型能够得到较为真实的温度分布, 因而在不同的焊接速度下, 采用合适的摩擦系数都能得到与实验相符的模拟结果, 摩擦系数一般取 0.3 就能得到满意的结果了。

二十多年来, 各研究所、高校、企业公司单位等对搅拌摩擦焊进行了较为全面深入系统的研究, 研究领域包括焊接温度场^[37]、搅拌摩擦焊接工艺、焊接组织和性能^[38-39]、金属塑形流动规律、热力耦合、力、扭矩、热量^[40]等, 研究手段有实验测量和数值模拟^[41-44]两种。下面简要介绍一下国内搅拌摩擦焊的研究状况。

苏晓莉等^[37]等人对 5A02 铝合金试板搅拌摩擦焊的温度场进行了检测分析, 采用的测温方法是把热电偶埋入打在试板上小孔里, 热电偶头部与试板的接触点为测温特征点。结果表明在搅拌摩擦焊接过程中试板前进侧温度高于后退侧温度; 在试板厚度方向, 由试板上表面到试板下表面温度逐渐降低, 试板底部温度最低; 在焊接结束阶段焊试板的测温特征点温度有一点上扬的趋势。

汪建华^[44]等研究了搅拌摩擦焊的力学计算和传热模型, 提出了搅拌摩擦焊的力学

和传热计算模型，这个模型是基于三维热弹塑性有限元分析。搅拌摩擦焊接过程中的热循环和温度分布可以通过其建立的模型进行全面了解，焊后的残余应力和变形也可以通过这个模型进行预测。

王希靖等人^[45]对搅拌摩擦焊焊缝性能和焊接机理进行了系统研究，研究的材料为铝合金、铜合金等，同时用搅拌摩擦焊对异种金属之间的焊接进行了一些研究。

胡煌辉等人^[46]对焊接参数对 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头形貌以及力学性能的影响进行了研究。旋转速度与焊接速度具有合适的参数比的条件下能够获得优质搅拌摩擦焊接头。否则可能会在焊缝表面形成飞边，沟槽等缺陷。

杨新岐等人^[47]对厚度 10 mm 的 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊（FSW）和 MIG 焊接接头的疲劳强度进行了试验研究，并与 6082-T6 母材疲劳性能进行了对比分析。

李红克等人^[48]针对前人采用的温度场热源数值模型在准确表征焊接过程材料性能和产热机制与温度变化关系上存在困难，建立了一种自适应 FSW 热源模型，依据是材料屈服强度为产热计算参量，并通过温度场试验与模拟结果进行对比，结果表明，该模型具有较高的计算精度准确性。

1.3 双轴肩搅拌摩擦焊发展概述

随着研究的深入和发展，搅拌摩擦焊接的不足之处正在被逐渐改进。近年来，出现了一些新的搅拌摩擦焊方法。例如，搅拌摩擦点焊（FSSW）、摩擦塞焊（FPW）和双轴肩搅拌摩擦焊。英国焊接研究所（TWI）开发的双轴肩搅拌摩擦焊（Bobbin-tool Friction Stir Welding，简称 BFSW）解决了常规搅拌摩擦焊还存在的如焊接载荷较大、需要严格的夹持和背部垫板、无法焊接复杂形状和特殊位置的试板、难于检测的根部缺陷等一些不足。在传统搅拌摩擦焊技术中，只有一个轴肩。为了产生一种力来平衡搅拌头的负载，需要有一个高强度和高稳定的支撑设备来成功完善传统搅拌摩擦焊，这就限制了其薄金属板焊接和复杂曲线间隙的应用，如槽型环向焊接。

1.3.1 双轴肩搅拌摩擦焊原理

如图 1.2 所示，双轴肩搅拌摩擦焊采用两个轴肩，上轴肩（在试板上方）和下轴肩（在试板下方）通过与试板厚度相当的搅拌针连接，焊接过程中上、下轴肩与搅拌针共同旋转并与被焊材料表面相互作用实现焊接。

由于在搅拌头内部对上、下表面形成闭合的内力，从而大大降低了焊接过程中垂直方向的载荷，进而可以减小焊接结构对试板装夹的要求。两个轴肩都有为了防止塑性金属被挤出的作用，下轴肩还有代替常规搅拌摩擦焊背部垫板的作用，因此可以焊接复杂形状和特殊位置的试板。通过实时调整上、下轴肩的间隙，也可以焊接厚度带

有变化的试板。在同样的设备刚性条件下，可以提高可焊厚度。在焊接过程中搅拌针穿透试板，从而有效地消除根部缺陷。上、下轴肩同时作用于试板并产热，较大的热输入也为提高焊接速度带来了可能。

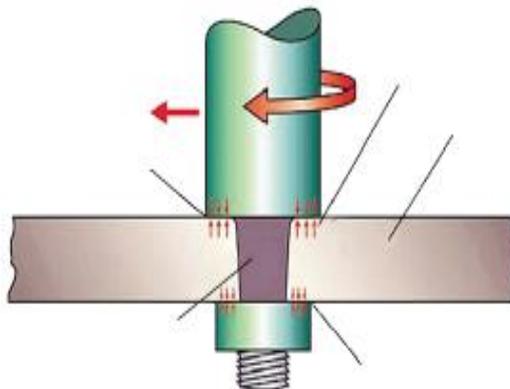


图 1.2 双轴肩搅拌摩擦焊示意图

Fig. 1.2 BFSW schemes

1.3.2 双轴肩搅拌摩擦焊研究现状

现阶段对双轴肩搅拌摩擦焊的研究大体分为四个方向：搅拌头的研究、接头宏观形貌与微观组织研究、接头力学性能的研究、焊接温度场的研究。

图 1.3(a)为 Thomas 等人^[11]采用的固定轴肩间隙式搅拌头示意图。传动杆底部和搅拌针底部两处设计成一定的斜度，这样在焊接过程中，在外在载荷的作用下借助摩擦力使上、下轴肩的连接在一起，并传递一定的扭矩。轴肩表面的光洁程度比较好，而且搅拌针材料在焊接过程中也要保持足够的强度。

Marie 等人^[12]研究一种可控制搅拌针长度的搅拌头并用于焊接试验。如图 1.3(b)所示，搅拌针与下轴肩连为一体，上轴肩为中空，搅拌针可在上轴肩内部滑动。但是这种搅拌头在焊接初始位置要预先设置先导槽，以便搅拌头能够进入到试板内部。

刘会杰等人^[49-50]为解决现有双轴肩搅拌摩擦焊方法中上、下两个轴肩为等直径，存在焊接热输入大及搅拌针承载大而影响接头性能、甚至造成搅拌针断裂的问题，发明了上、下轴肩直径不等的双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头，如图 1.3(c)所示。还研究出了一种上、下轴肩逆向旋转的双轴肩搅拌头，它解决上、下轴肩直径不相等、但同向等速旋转，焊接过程中，存在焊接热输入大、试板易变形，搅拌针存在断裂倾向，焊缝区温度场、接头组织和残余应力分布不对称，导致接头性能不对称，降低了焊接结构承载能力的问题，如图 1.3(d)所示。

Edwards 等人^[7]为解决传统的单轴肩搅拌摩擦焊存在的问题，自行研制了一种自适应式双轴肩搅拌头，并成功的焊接了铝合金薄板。试验结果表明，双轴肩自适应式搅拌头可以实现 1.8mm 甚至更薄铝合金试板的焊接，而且焊速可以超过常规搅拌摩擦焊，达到 1000mm/min 以上，接头的力学性能接近母材。

Marie F 等人^[15]对 4mm 厚的 2024-T3 和 6056-T4 铝合金常规搅拌摩擦焊和双轴肩搅拌摩擦焊过程中的温度场进行了对比研究，发现双轴肩搅拌摩擦焊的加热范围明显比常规搅拌摩擦焊宽，最高温度也偏高。与常规搅拌摩擦焊的稳定温度场不同的是，常规搅拌摩擦焊具有显著的热稳定性，而双轴肩搅拌摩擦焊则有着温度升高的趋向，这就可能在相同的焊接参数下出现较为严重的接头软化现象，对薄板铝合金而言会更加明显，可能需要一个冷却系统。

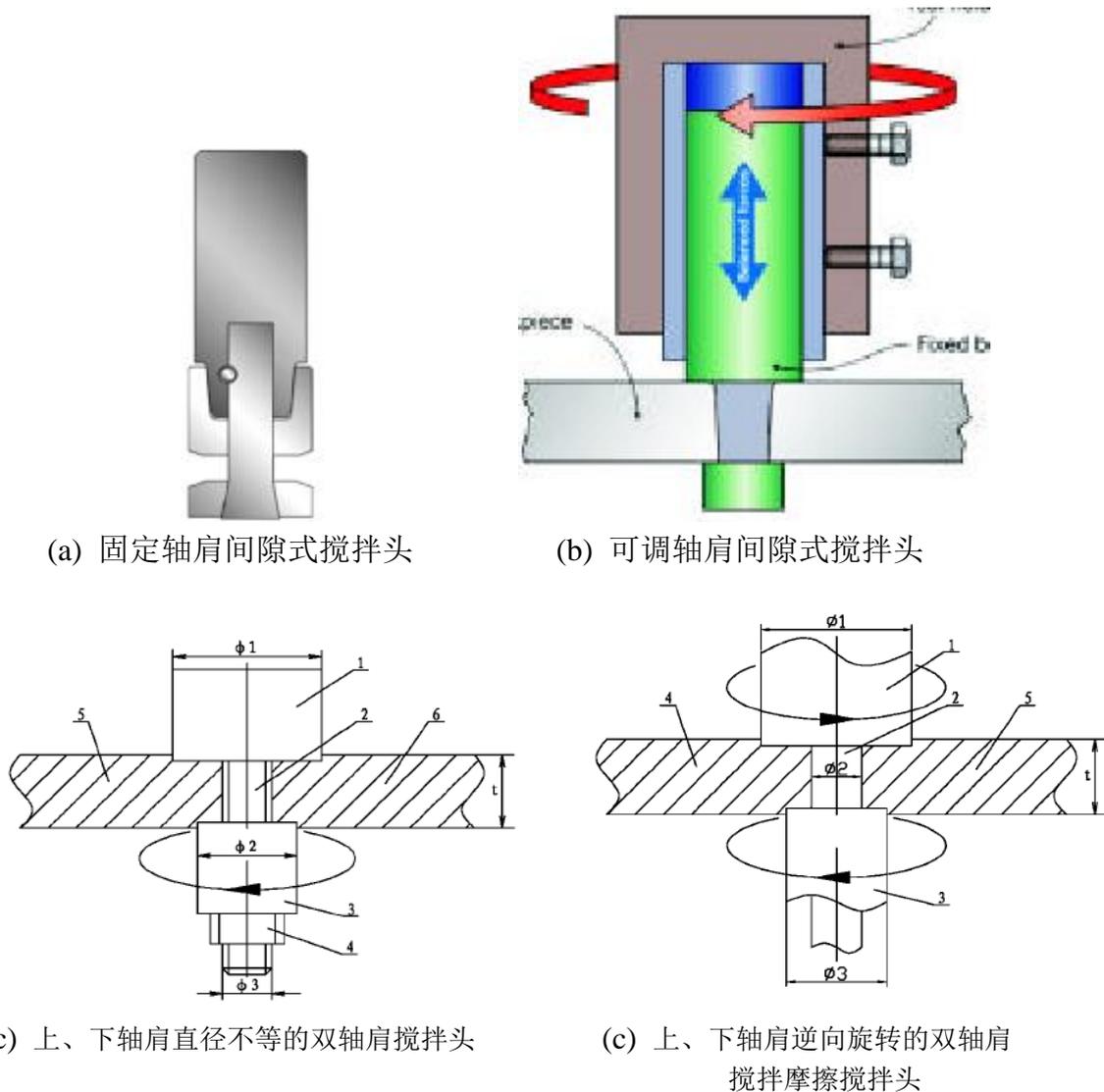


图 1.3 不同类型的双轴肩搅拌头

Fig. 1.3 Bobbin stir welding tools

目前，用于双轴肩搅拌摩擦焊的研究主要集中在 2XXX 系和 6XXX 系铝合金上，并且厚度在 1.8mm~30mm 之间，接头形式多为平板对接。双轴肩搅拌摩擦焊接头的抗拉强度均可达到母材强度的 70% 以上，但普遍略低于常规搅拌摩擦焊。

张健等人^[13]对常规搅拌摩擦焊和双轴肩搅拌摩擦焊技术进行了比较，试验材料为 6mm 厚 2219-T4 铝合金。对两种接头焊缝的力学性能、微观结构和显微硬度进行了测

试。结果表明：双轴肩搅拌摩擦焊接头的抗拉强度比常规搅拌摩擦焊接头强度低，大概是常规搅拌摩擦焊接头强度的 90%。而焊缝的宏观形貌与也常规搅拌摩擦焊焊缝不同，上、下宽，中间窄，呈哑铃型。且由于双轴肩搅拌摩擦焊焊接的热输入量比常规搅拌摩擦焊较高，导致其接头的显微硬度和力学性能普遍低于常规搅拌摩擦焊接头。

赵衍华等人^[51]对 2219 铝合金进行了双轴肩搅拌摩擦焊工艺试验，详细分析了焊缝成型、接头组织形态及力学性能。结果表明：2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊缝正反面成型美观，内部无缺陷，几乎无焊缝减薄；接头宏观形貌呈典型的“哑铃型”，焊缝上下表面宽，中间略窄；从显微组织角度看，接头的焊核区、热机影响区、热影响区等组织特征与常规搅拌摩擦焊相似；双轴肩搅拌摩擦焊接头显微硬度分布趋势与常规搅拌摩擦焊接头相似，均为典型的“w”型，但双轴肩搅拌摩擦焊接头不存在各层异性；接头力学性能试验表明：双轴肩搅拌摩擦焊接头抗拉强度达到了 318.3MPa，延伸率为 5.5%。接头断口形貌呈典型的韧性断裂。

董春林^[52]等人利用光学显微镜及动电位极化曲线技术，研究了 12mm 厚 6082-T6 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织形貌及其电化学性能。结果表明，当主轴转速为 600r/min，焊接速度为 300mm/min，搅拌头倾角为 0°的焊缝组织出现了明显的变化，焊合区组织发生了动态再结晶，形成细小的等轴晶结构；母材的腐蚀形貌比较粗糙，表面有较深的点蚀坑，而接头焊核区表面腐蚀形貌均一，点蚀现象较轻；动电位极化测试表明双轴肩搅拌摩擦焊接头焊核区的腐蚀电压比母材高，耐腐蚀性能比母材好。

Hilgert^[53]在 COMSOL 和 Matlab 中提出了三个针对双轴肩搅拌摩擦焊的 3D 热模型。该模型是利用热伪机械 (TPM) 热源，包括搅拌头旋转、剪切层分析模型和周围的散热片 (像设备与周围的空气)。实施一个新的瞬时移动几何方法。它包括搅拌头沿焊接线的完整运动，而其他两个模型则使用有移动热源的固定几何形状和没有移动热源的固定几何形状。对三种模型来说，计算的影响是很小的。在一个先进的工作站中，大约 5 分钟便可解决稳态模型问题。本实验已在 FlexiStir 实验焊接单位进行，并验证了模型的输出。所以模型的预测是在相互探讨和实验中进行。

山东大学刘雪梅等人^[54]建立了双轴肩搅拌摩擦焊的热-力数值模型，以该模型为基础，模拟了 6mm 厚 2014 铝合金板材双轴肩搅拌摩擦焊的温度场分布，模拟结果为该种新工艺的进一步研究提供了参考和依据。研究表明，横截面的温度场关于板厚中心呈基本对称分布，高温区域在靠近上下轴肩处半径最大，板厚中间处最小，呈腰型。返回侧最高温度比前进侧高出约 40℃。模拟中也出现了沟槽缺陷。

Sato 和 Suda 等人^[55]通过有限元数值模拟和焊接试验研究了焊接夹具对 6 系铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场的影响，主要考虑的焊接夹具材料、宽度和其之间距离对试板温度场的影响。

Threadgill 等人^[56]以 25 毫米厚的 AA6082-T6 锻铝为研究对象，对其进行实验，并

对其晶相显微组织进行详细的分析，并且验证了晶粒的尺寸、组织和力学性能。对不同的焊接工艺参数及不同形状的搅拌头进行实验，同时将实验得到的数据与用常规搅拌头焊接得到的数据进行了对比。

1.4 研究内容及意义

1.4.1 本课题的研究意义

目前，双轴肩搅拌摩擦焊的研究主要集中在 2XXX 系、6XXX 系铝合金材料（如 2219、6082 等）及少量的不锈钢材料上，还未见有学者及单位对钛合金、铜合金、镁合金及铝基复合材料上进行研究的报道。双轴肩搅拌摩擦焊的两轴肩同时产热，在相同焊接规范下，与常规搅拌摩擦焊相比产热较大，且热输入方式也有很大不同。温度场的分布不仅影响到摩擦搅拌焊缝区的材料流动，而且直接影响到焊缝各个区域微观组织结构，从而决定了焊接接头的性能。因此，深入了解双轴肩搅拌摩擦焊过程中温度场的变化规律，对工艺参数的制定、接头微观组织以及材料流动行为的研究极为重要。

6082 铝合金是能够热处理强化的 Al-Mg-Si 系铝合金，成形性及工艺性能好，具有中等强度和良好的焊接性及耐腐蚀性等优点。广泛应用于交通运输、航空航天、建筑等行业。

基于国内对双轴肩搅拌摩擦焊的研究开发还处于初始阶段，在许多问题上缺乏深入的了解，有关 Al-Mg-Si 系铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头微观组织和接头力学性能的研究尚需深入研究，而关于双轴肩搅拌摩擦焊温度场分布规律的研究几乎是空白，因此关于双轴肩搅拌摩擦焊接头微观组织、力学性能、温度场分布规律等问题，仍是双轴肩搅拌摩擦焊研究的重要基础方向。

1.4.2 本课题的研究内容

本论文拟通过双轴肩搅拌摩擦焊焊接 6082 铝合金，主要进行 6mm 的焊接，通过实验确定合适的焊接实验参数；选择合适的焊接参数测得 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场的分布规律；并通过 ABAQUS 软件进行模拟分析，并与实验测量进行对比分析。具体研究内容主要包括以下几部分：

(1) 使用双轴肩搅拌摩擦焊对 6mm 厚 6082 铝合金试板进行焊接。对满足使用要求的焊接试板制作金相试样，进行金相观察；制作拉伸试样，进行拉伸试验，对获得的拉伸数据进行分析，评价焊缝的各项拉伸力学性能并与母材进行比较；对获得的拉伸断口进行宏观、微观分析，研究试样的断裂机理；总结 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头力学性能和微观组织特点。

(2) 测量 6mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板的温度场。实验主要测定不同焊接工艺参数、不同焊接阶段（起始、稳定），距焊缝中心不同距离特征点、前进侧与后退侧、上轴肩与下轴肩、板厚方向的温度分布规律。

(3) 利用 ABAQUS 有限元分析软件对双轴肩搅拌摩擦焊的温度场进行了模拟计算。计算双轴肩搅拌摩擦焊焊接试板的温度场，获得焊接起始阶段的温度演化过程和焊接稳态过程的温度场，特征点热循环曲线的实验值与计算值变化趋势进行对比，从而为后续的双轴肩搅拌摩擦焊工艺及温度场研究奠定基础。

第 2 章 实验材料、设备及方案

2.1 实验材料选择

实验材料选用 6082 铝合金，6082 为 6xxx 系铝合金，主要的强化合金元素为 Mg、Si，为热处理可强化铝合金，强度中等，焊接性及耐腐蚀性良好，其-T6 状态具有较高的机械特性，广泛用于机械零部件、商务车辆、铁路结构件、造船等。T6 状态，代表固溶热处理后，进行人工时效的状态，适用于固溶热处理后，不再进行冷加工（可进行矫直、矫平，但不影响力学性能极限）的产品。产品具有的特点：

- (1) 良好的可成型性、可焊接性；
- (2) 强度高；
- (3) 可使用性好，接口特点优良；
- (4) 易于加工，容易涂层；
- (5) 抗腐蚀性、抗氧化性好。

其化学成分及力学性能如表 2.1、表 2.2，可以看出这种合金主要是以 Mg、Si 元素作为强化元素。

表 2.1 6082 铝合金的化学成分

Table 2.1 Chemical composition of 6082 aluminum alloy

成分 (%)	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
6082	0.7~1.3	0.50	0.10	0.4~1.0	0.6~1.2	0.25	0.20	0.10	余量

表 2.2 6082 铝合金的力学性能

Table 2.2 Mechanical properties of 6082 aluminum alloy

材料	屈服强度 (Mpa)	拉伸强度 (Mpa)	延伸率 (%)
6082	≥260	≥310	≥10

2.2 实验设备及方法

2.2.1 搅拌摩擦焊机及夹具

如图 2.1 (a) 所示为本实验所用的搅拌摩擦焊机，是由北京赛福斯特技术有限公司自主研发的一台大型二维搅拌摩擦焊专用设备 FSW-LM2-1020 型搅拌摩擦焊机，该设备主要用于铝合金、镁合金等材料的焊接，最大焊接厚度为 20mm。该搅拌摩擦焊接设备集成了恒压力控制装置，可以实现焊接过程自适应控制，保证焊接质量的均匀

性和一致性。主要技术参数分别为，控制系统：西门子 840D 数控系统、X 向行程：3000mm、Y 行程：2000mm、Z 行程 300mm、C 向行程： $n \times 360^\circ$ 、最大焊接厚度：20mm，闭环控制技术：恒扭矩控制。实验所用焊接工作台如图 2.1 (b) 所示，夹具利用可以调整的螺栓机构来对待焊试板进行加紧。



(a) 搅拌摩擦焊-LM2-1020 型搅拌摩擦焊机

(b) 搅拌摩擦焊焊接夹具

图 2.1 搅拌摩擦焊—LM2—1020 型搅拌摩擦焊机及夹具

Fig. 2.1 FSW-LM2-1020 friction stir welding machine and clamping tool

2.2.2 双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头

在搅拌摩擦焊接过程中，搅拌摩擦工具—搅拌头在搅拌摩擦焊过程中发挥着重要的作用，是搅拌摩擦焊的“心脏”，是完成搅拌摩擦焊过程必不可少的一个工具。焊接材料的连接是通过搅拌头的轴肩及搅拌针与被焊试板之间相互摩擦作用生成热量实现的。搅拌头主要有搅拌针、轴肩和夹持区等部分组成，如图 2.2 所示为焊接 6mm 试板的双轴肩搅拌头，搅拌针与上、下轴肩连为一体，而搅拌头被夹持部位为中空，上、下轴肩及搅拌针可在搅拌头被夹持部位内部滑动，这样就可以减少搅拌头在轴向的应力作用。同时这种搅拌头在焊接初始位置无需预先设置-先导槽，焊接时只需将搅拌针中心对准焊缝中心即可。双轴肩搅拌头主要尺寸为：轴肩直径 $\Phi 22.5\text{mm}$ ，搅拌针直径 $\Phi 12\text{mm}$ ，针长 5.95mm，无倾角。轴肩在焊接过程中一方面对塑性金属起着包拢作用，轴肩与试板之间产生的热量为搅拌摩擦焊焊接的主要热量来源，有研究认为占到总热输入量的 80% 左右；搅拌针的作用是通过旋转摩擦产生热量提供焊接所需的热量，并带动周围材料的流动以形成接头，搅拌针另一项重要功能是为焊缝区塑性材料提供机械搅拌力，使材料流动更为合理，以形成致密的焊缝组织。本次实验所采用的双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头轴肩结构为阿基米德螺旋线结构，搅拌针为双向反螺纹结构，搅拌头采用螺纹结构，能够保证轴肩端部下方的塑性金属受到向内方向的力的作用，使搅拌头搅拌更充分，摩擦产生充足的热量，从而有利于焊缝成型。同时可以产生向下的锻造力，也有利于减少焊接过程中搅拌针内部的应力集中，从而保护搅拌针。



图 2.2 双轴肩搅拌头

Fig. 2.2 Bobbin-tool stir welding tool

2.2.3 接头性能分析方法及仪器

2.2.3.1 金相组织观察

选择焊接参数合适，焊缝成形良好的试板进行切割，截取的试样位于焊接试板中心稳定焊接阶段并垂直于焊接方向，截取的试样尺寸为 $40\text{mm} \times 20\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。截取的试样要经过粗磨、细磨、抛光三个阶段，前两个阶段选用水砂纸进行，最后一个阶段采用呢子布进行，抛光液选用轻质 MgO 水溶液，抛光至无划痕，用 keller 试剂（ $1\text{mlHF}+1.5\text{mlHCL}+2.5\text{mlHNO}_3+95\text{mlH}_2\text{O}$ ）腐蚀 4-5 分钟，温水冲洗，吹干，并不要从表面上去除浸蚀产物，然后用 HAL1000 型光学显微镜对制备好的金相试样进行组织观察和分析。

2.2.3.2 拉伸性能测试

6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊对接接头用 CMT5205 电子万能试验机测试其室温拉伸性能。母材和焊接接头力学性能试验按照 GB16865-1997《变形铝、镁及其合金加工制品拉伸试验用试样》进行。

2.2.3.3 显微硬度测试

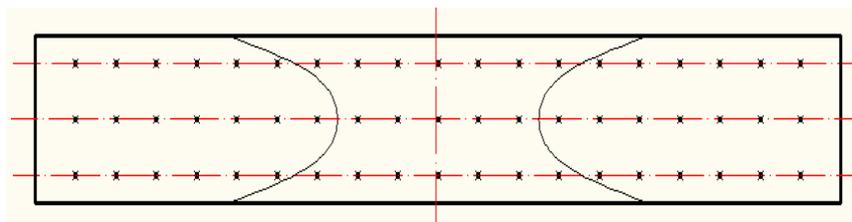


图 2.3 硬度测试分布示意图

Fig. 2.3 Schematic distribution of hardness test

选用上述金相观察后的试样在 MH-5 型显微硬度计上测试其焊接接头的显微硬

度, 试验载荷为 100g, 加载时间为 15s。如图 2.3 所示, 在距离焊缝上表面 1mm、3mm 及 5mm 位置处, 在横向上每隔 2mm 设置一个测试点。

2.2.3.4 SEM 断口形貌分析

使用 JSM-6480 扫描电子显微镜分析仪对拉伸断口进行了微观形貌的分析。断口分析利用了拉伸试验中拉断的双轴肩搅拌摩擦焊接头, 判断断口特征, 分析断裂机理。

2.2.4 测温方法及设备

2.2.4.1 测温方法简介

搅拌摩擦焊过程是一个集温度场、金属塑性流场、应力应变场和组织结构之间互相耦合的多因素复杂的变化过程。其中被焊材料的温度场对其他的影响起着决定性作用, 温度场的分布和变化对焊缝的组织性能都有直接影响, 温度的高低影响着搅拌头周围金属的塑形流动状态, 而温度则由其他因素共同作用的结果, 因此, 研究搅拌摩擦焊过程中工件的温度变化规律对研究搅拌摩擦机理具有重要的作用。搅拌摩擦焊技术一个重要的研究领域就是焊接过程的产热研究, 近年来, 随着搅拌摩擦焊技术的不断发展, 对搅拌摩擦焊热过程的研究不断增多, 同时也不断的对测温仪器及测温方法进行改良和优化, 从开始使用工控机处理温度数据到现在使用无纸测温仪, 摩擦焊过程中常用的测温方法主要包括热电偶测温、红外热成像仪测温两种方法。

(1) 热电偶测温

热电偶测温通常与无纸测温仪或者工控机配合测量固定端试样内部的温度, 通常采用从金属表面往金属内部打孔, 然后将热电偶埋入孔中, 压实使得热电偶与孔的顶端紧密接触且不松动, 这样即可精确的获得孔内的温度随时间变化的曲线否则在焊接过程中测量温度曲线时, 热电偶可能因为高速运动导致松动, 导致测温数据不正确。

(2) 红外热成像仪测温

红外热成像仪用于测量试样表面的温度值, 其测温精度高, 延时性小, 配合高速摄影可精确的描述惯性摩擦焊过程中飞边成型的过程。

2.2.4.2 测温设备选用

试板测温系统主要有 K 型铠装热电偶与无纸记录仪两部分构成。K 型热电偶是一种能测量较高温度的廉价热偶, 其用量为其他热电偶的总和, 热电偶丝直径一般为 1.2~4.0mm。这种热电偶可以用来直接测量生产中各种从 0℃至 1300℃范围内的液体、蒸汽和气体介质以及固体的表面温度。这种热电偶还具有较好的高温抗氧化性, 它不能直接用于还原性介质或者还原性、氧化性交替的气氛或真空中, 否则, 很快腐蚀。与 S 型热电偶相比, 有便宜、线性度好、稳定性和均匀性好等优点, 其热电动势也较

大，大约为 $0.041\text{mV}/\text{度}$ ，因次具有较高的灵敏度。是工业和科研中最常用的一种热电偶，在本实验中，同样选择这一款热电偶作为测温元件。

如图 2.4 所示，DX2008 无纸记录仪是一种应用广泛的数据实时记录设备。它能够同时进行 48 个通道输入批处理开始/停止记录，并生成数据文件使用 MW100 自动连接功能最多可扩展至 328 通道内存容量增加至 500MB 管理测量值的校正有效期，测量的数据可以曲线、表格、表格等形式显示。数据记录频率有 1、4、8 等多种选择。记录仪记录的数据要结合专业的数据处理软件 DAQ/Standard 软件进行数据转换，该软件能够将各个通道的记录的数据转换成 excel 形式的的数据，便于后续处理。



图 2.4 DX2008 彩色无纸记录仪
Fig. 2.4 DX2008 color cashless recorder

2.3 实验方案

2.3.1 工艺研究实验方案

实验所用铝板尺寸为：长×宽×高（ $400\times 60\times 6\text{mm}$ ）。此次双轴肩搅拌摩擦焊过程采用两试板对接。焊接前对试板进行简单处理，处理由于切割而沾染的大量油污等杂质，并采用专用夹具进行夹紧，保证焊接过程中不会出现移动。如表 2.3 所示为双轴

表 2.3 双轴肩搅拌摩擦焊接工艺参数
Table 2.3 The processing parameters of BFSW

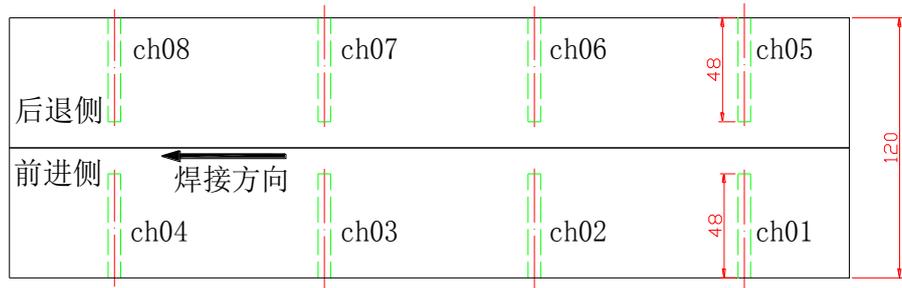
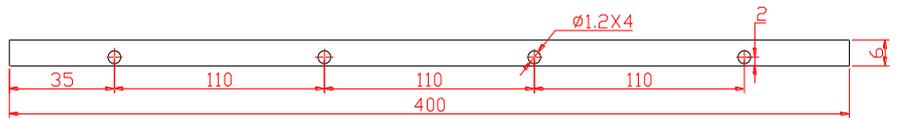
实验序号	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9
焊接速度 (mm/min)	300	400	500	300	400	500	300	400	500
主轴转速 (rev/min)	500	500	500	600	600	600	700	700	700

肩搅拌摩擦焊工艺参数。

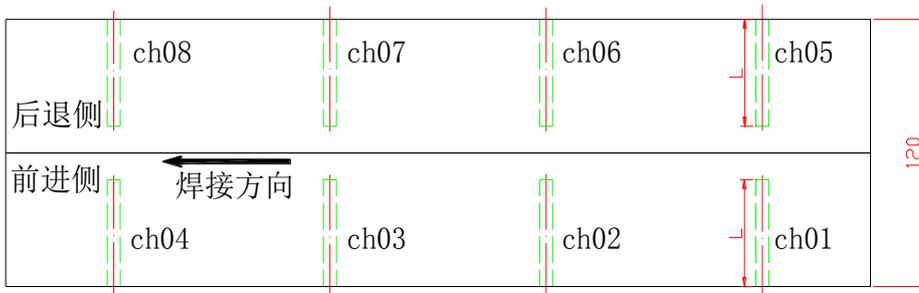
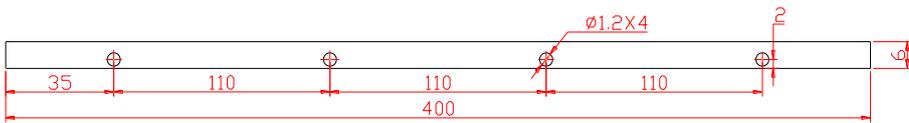
2.3.2 测温实验方案

实验主要测定不同工艺参数、不同焊接阶段，距焊缝中心不同距离的测温特征点和板厚方向的温度分布规律。实验所用试板的尺寸为： $400\text{mm} \times 60\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。分别在靠近试板上表面、下表面 2mm 以及试板中心设置测温特征点，采用合适的焊接工艺参数测定焊接过程中各测温点的温度变化规律。

本实验采用在试板侧面打孔后插入热电偶的方法来测量试板温度场，首先在所有被测铝板特征点处加工直径为中 1.2mm 的盲孔，孔底即为测温特征点，实验时铠装热电偶测量端头在孔底处与材料紧密接触，所测温度即为特征点温度（图中各虚线所示即为试板中直径为 1.2mm 盲孔）。实验主要分六组进行。



(a)



(b)

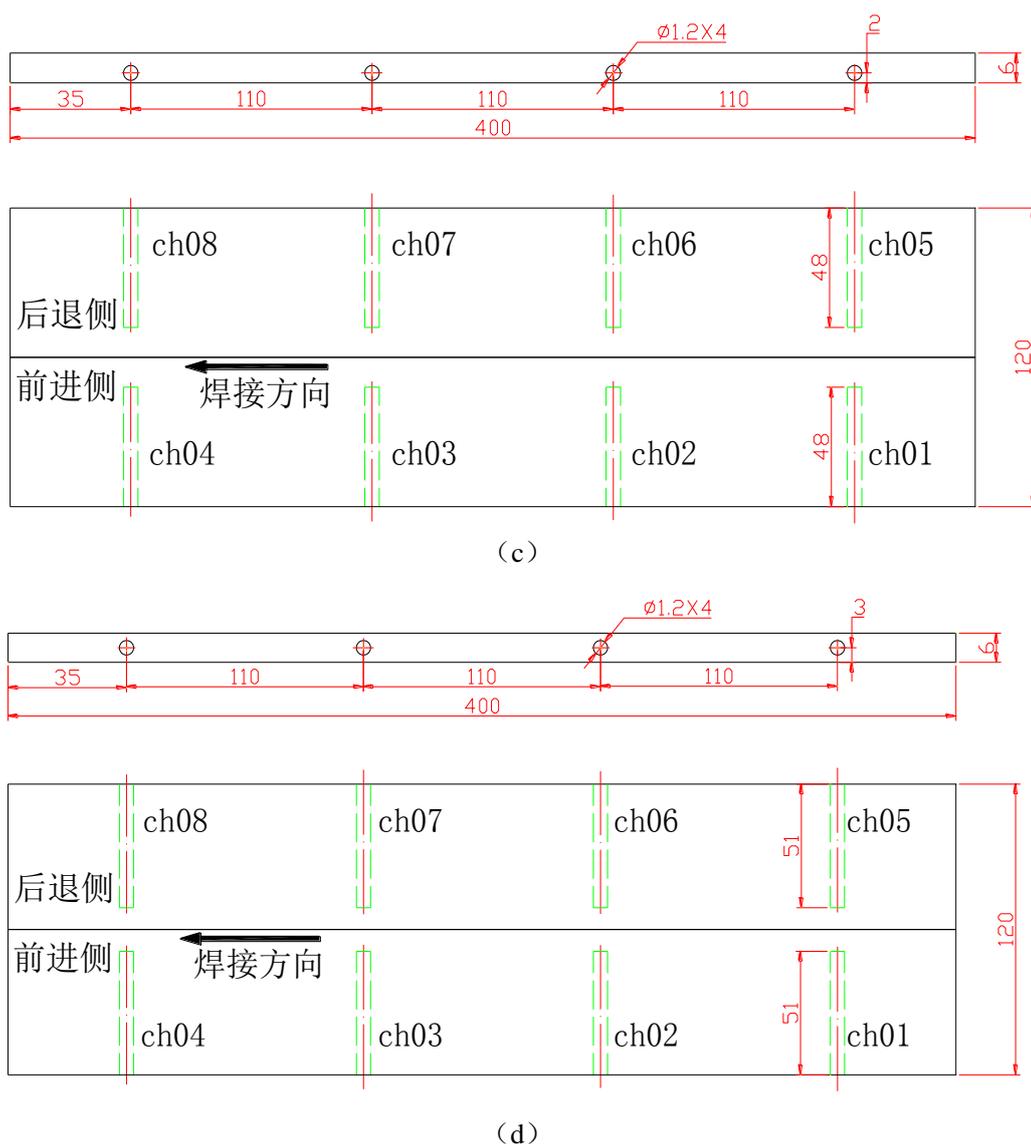


图 2.5 试板测温孔分布示意图

Fig. 2.5 Diagram of distributed feature points

第一组主要为试验焊接参数和调整实验测温设备稳定性而设，为保证后续试验调整作参考。同时在实验测量系统调整完善后与后几组实验测量不同焊接速度下的温度分布提供温度数据。选择的焊接参数为旋转速度：600r/min 焊接速度：300mm/min。测温孔的直径及位置分布如图 2.5 (a) 所示。

第二组实验主要是测量在同一焊接参数下距焊缝中心不同距离的温度分布规律，焊接参数为旋转速度：600r/min、焊接速度：400mm/min，测温特征点距离试板边缘的距离为 L ($L_1=48\text{mm}$, $L_2=42\text{mm}$, $L_3=36\text{mm}$)。图 2.5 (b) 为测温孔的直径及位置分布。

第三组实验主要是测量在同一焊接参数下试板前进侧与后退侧的温度分布规律。焊接参数为旋转速度：600r/min、焊接速度：400mm/min，测温特征点距离焊缝中心的距离为 12mm，测温孔的直径及位置分布如图 2.5 (c) 所示。

第四组实验主要是测量在同一焊接参数下上轴肩与下轴肩的温度分布规律。焊接参数为旋转速度：600r/min、焊接速度：400mm/min，测温特征点距离焊缝中心的距离为 12mm，测温孔的直径及位置分布如图 2.5 (c) 所示。

第五组实验主要是测量在不同焊接参数下靠近下轴肩的试板表面温度分布规律。焊接参数为旋转速度：600r/min、焊接速度：400mm/min，测温特征点距离焊缝中心的距离为 12mm，测温孔的直径及位置分布如图 2.5 (c) 所示。

第六组实验主要是测量在同一焊接参数下 6mm 厚试板在板厚方向 (Y-Z 方向) 的温度分布规律。焊接参数为旋转速度：600r/min、焊接速度：400mm/min，测温特征点距离焊缝中心的距离为 12mm，测温孔的直径及位置分布如图 2.5 (d) 所示。

本章小结

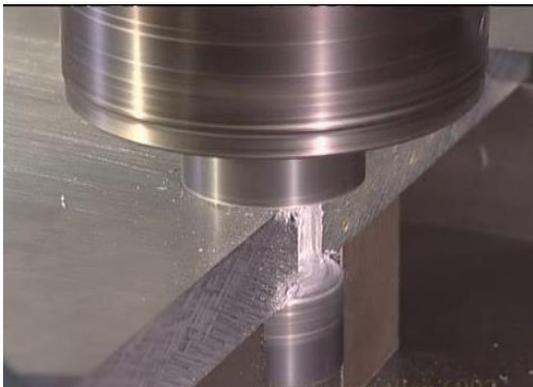
本章主要对于实验所需要的材料、设备及实验工艺参数做了简要介绍。考虑本文所需要进行实验内容主要是进行 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊工艺研究及试板温度场的检测分析，主要介绍了所用的材料、搅拌摩擦焊焊机、双轴肩搅拌头、测温设备及测温试板测温孔的设计及工艺参数。

第3章 焊接工艺实验结果与分析

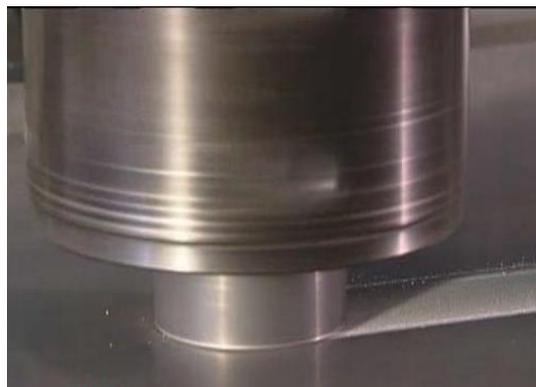
3.1 焊接过程及接头组织分析

3.1.1 双轴肩搅拌摩擦焊过程特点

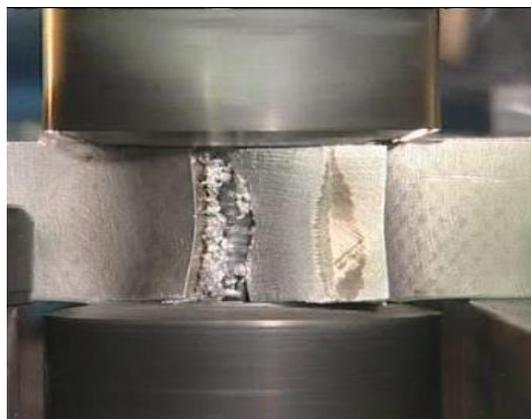
如图 3.1 所示为 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接过程，可以看出试板背部没有常规搅拌摩擦焊所需的刚性支撑垫板，双轴肩搅拌摩擦焊可以看成是一种近乎悬浮状态的搅拌摩擦焊接。焊接过程中依靠上、下轴肩、搅拌针和试板之间的相互摩擦生热完成焊接。双轴肩搅拌摩擦焊可以相当于两个常规单轴肩搅拌摩擦焊的合并，上轴肩与搅拌针上部分相当于一个独立的搅拌头，下轴肩与搅拌针下部分相当于另一个独立的搅拌头，二者之间以试板厚度中心镜像对称，同时双轴肩搅拌摩擦焊过程中二者的温度场、应力场、作用力等也基本上以试板厚度中心镜像对称。同时本次实验所用的双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头在轴向上可以上下浮动，因此焊接过程中搅拌头轴向方向上的力非常小。



(a) 旋转、起始焊接阶段



(b) 稳定焊接阶段



(c) 焊接结束阶段

图 3.1 试板双轴肩搅拌摩擦焊过程

Fig. 3.1 Process of BFSW for the plate

3.1.2 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊对接工艺试验结果

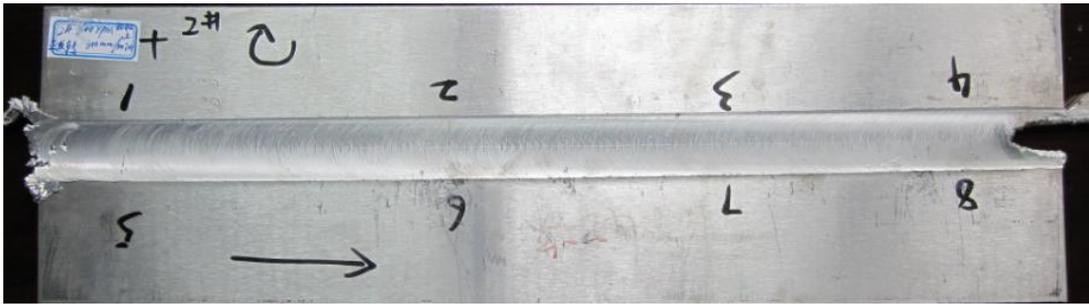
表 3.1 所示为焊接接头的表面成形情况，当尾孔出现沟槽、表面粗糙等缺陷，说明焊接所用的旋转速度与焊接速度不匹配，焊接速度过大，主轴转速过小，导致热输入严重不足，使塑性金属材料流动不充分而导致在接头内部形成材料未完全闭合的现象，在接头中产生沟槽等缺陷。当主轴转速过大，热输入较大，使金属材料表面发生氧化，导致接头表面粗糙。由表 3.1 得出，6082 铝合金搅拌摩擦焊对接工艺参数为旋转速度 600r/min、焊接速度 300~400mm/min 时接头表面成形良好。

表3.1 各焊接参数下试板双轴肩搅拌摩擦焊宏观形貌

Table 3.1 Macro-topography of BFSW joints under different welding parameters

实验序号	焊接速度 (mm/min)	主轴转速 (rev/min)	表面成形
1-1	300	500	出现沟槽
1-2	400	500	表面粗糙
1-3	500	500	表面粗糙
1-4	300	600	成型良好
1-5	400	600	成型良好
1-6	500	600	表面粗糙
1-7	300	700	出现粘针现象
1-8	400	700	表面粗糙
1-9	500	700	表面粗糙

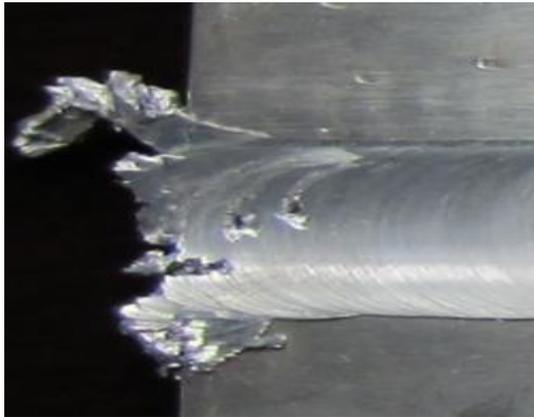
如图 3.2 观察表面成型良好的 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板，可以看出不管是在焊接起始阶段、稳定阶段还是焊接结束阶段试板上、下表面都为均匀细腻的鱼鳞状，焊缝变形很小，无非正常减薄，只有在试板下表面的后退侧出现少量的飞边。这是因为焊接参数合适的情况下，在焊接过程中材料处于超塑性状态，其流动性和成型性比较好，在平滑轴肩肩台的作用下形成比较美观的外形。主轴转速为 600r/min、焊接速度 300mm/min 时接头的表面成型见图 3.2 (a)、(b) 所示。但在焊接起始阶段因为轴肩未与试板完全接触，导致塑性金属溢出搅拌头轴肩，焊后残留在接头处或焊缝一侧两侧，形成的翻滚的金属如图 3.2 (c) 所示。而焊接结束阶段，由于搅拌针及轴肩逐渐远离试板母材，导致无足够塑性金属填充焊缝而出现的沟状缺陷，如图 3.2 (d) 所示。为防止这些缺陷的产生，可以在试板起始位置和结束位置采用引出板，将这些缺陷牵引到其他部位，然后通过机械方法将其切除。



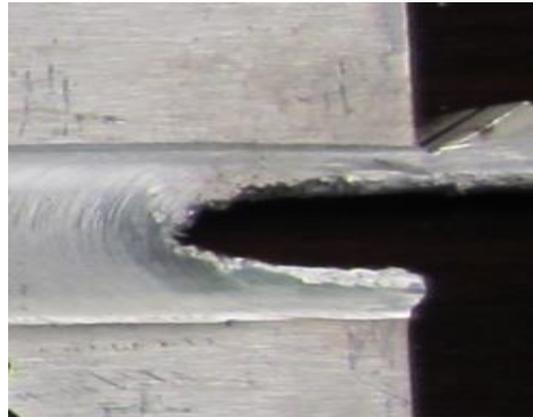
(a) 焊缝正面



(b) 焊缝反面



(c) 焊接起始位置



(d) 焊接结束位置

图 3.2 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头表面成型

Fig. 3.2 Appearances of 6082 BSW joints

3.1.3 接头宏观形貌

采用合适的焊接工艺参数，可以获得质量优良的双轴肩搅拌摩擦焊焊缝。如图 3.3 所示为 6mm 厚度的 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头的横截面宏观照片。

(1) 焊接后形成的焊接接头从组织上可以分为四个区域，即焊核区 (Weld Nugget Zone, 缩写 WNZ)、热机影响区 (Thermo-Mechanically Affected Zone, 缩写 TMAZ, 也有人称之为热力影响区)、热影响区 (Heat-Affected Zone, 缩写 HAZ) 和母材区 (Base Material, 缩写 BM)。同时，将焊核区和热机影响区统称为焊缝区 (WZ)。

(2) 双轴肩搅拌摩擦焊接头宏观形貌呈腰形，上、下表面宽，中间窄。这主要可

能是由于双轴肩搅拌摩擦焊的搅拌头独特的结构决定的。与常规搅拌摩擦焊不同，双轴肩搅拌摩擦焊搅拌头结构存在上、下两个轴肩，上、下轴肩通过与搅拌针连接起来。而搅拌摩擦焊的热输入来源主要是轴肩、搅拌针与试板的摩擦生热，这种热输入方式导致热量输入由试板的上、下表面向试板中心双向传递而形成与常规搅拌摩擦焊不同的宏观形貌。双轴肩搅拌摩擦焊这种独特的由试板表面向中心传递的热输入方式与常规的搅拌摩擦焊由上到下的单向热输入方式相比，热输入量更大且更加均匀，更有利于改善焊缝中塑性金属的流动与接头成行，接头性能也得到提高。同时，由于比常规搅拌摩擦焊多了一个下轴肩与试板的下表面接触并进行摩擦产热，代替了常规搅拌摩擦焊的背部刚性垫板，导致产热量增加，因此试板下表面弱连接或未焊透等传统搅拌摩擦焊时容易产生问题在双轴肩搅拌摩擦焊过程中得到消除。

(3) 在焊缝中心形成了许多文献称之为“洋葱环”的环状结构，与常规搅拌摩擦焊不同的是，双轴肩搅拌摩擦焊的焊核区明显分为上下两边，如图 3.3 (b) 中，WNZ1 和 WNZ2。同时观察到“洋葱环”结构在两个焊核区各有各的环向。这意味着双轴肩搅拌头周围流动金属的运动比单轴肩搅拌头中的运动更为复杂，但是还没有确定的证据证明这一点。



(a) 试样宏观形貌



(b) 焊核区试样宏观形貌

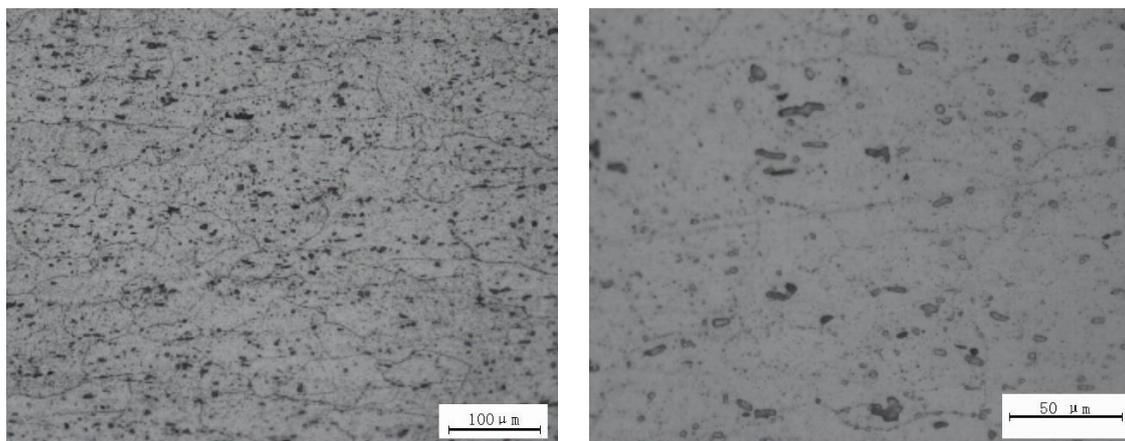
图 3.3 6082 铝合金 BFSW 接头的横截面宏观照片

Fig. 3.3 The cross section of 6082 aluminum alloy BFSW joints of macro photos

3.1.4 母材的显微组织

如图 3.4 所示为 6082 铝合金母材的显微组织，从图中可以看出，6082 铝合金的显微组织是典型的轧制组织，晶粒组织沿轧制方向延长呈纤维状，组织为具有方向性的变形板条状组织组成， α (Al) 固溶体基体上分布着大量的 Mg_2Si 强化相及少量的黑色

铸态 Mg_2Si 初晶。



(a) 母材显微组织

(b) 母材显微组织

图 3.4 母材显微组织

Fig. 3.4 Microstructure of base material

3.1.5 焊核区的显微组织

如图 3.5 所示为焊核区的显微组织，对应图 3.4 中母材组织，焊核区的微观组织与母材的原始组织相比有着很大的不同。焊核区位于搅拌头搅拌针的正下方，是轴肩和搅拌针直接接触摩擦搅拌的区域，原始组织发生了强烈的塑性变形，经历了较高温度的热循环。

在双轴肩搅拌摩擦焊接过程中，搅拌头上、下轴肩与被焊材料之间进行着剧烈的摩擦作用，使被焊材料在机械变形作用和摩擦热升温双重作用下加热到产生塑性变形或塑性流动的温度。双轴肩搅拌摩擦焊接过程中，搅拌针不仅旋转产热，使母材达到塑性状态，而且沿焊接方向有一个相对运动，使焊核区的温度超过母材中的强化相（如图 3.4 中所示：母材中 α (Al) 固溶体基体上分布的 Mg_2Si 强化相及少量的黑色铸态 Mg_2Si ）的溶解温度，但低于 6082 铝合金的熔点，从而实现了晶粒在双轴肩搅拌摩擦焊接过程中重结晶，最终由母材的带状轧制组织变成了细小的等轴晶粒结构。

在双轴肩搅拌摩擦焊过程中，搅拌针与试板及上、下轴肩与试板之间产生了大量的热量，使周围金属塑化，并充分流动，试板温度上升很快；同时在搅拌针的搅拌作用下试板内部的位错密度不断增加，当位错密度增加一定的时候，便发生动态再结晶过程，形成的晶粒来不及长大就会在搅拌针的作用下被打碎，形成等轴、细小的晶粒。由于焊核区受到搅拌针的搅拌作用最强烈，因此该区域的晶粒均非常细小，远远小于母材晶粒的尺寸。形成的这些细小晶粒对于提高焊接接头的强度有很大作用。而焊核区晶粒尺寸和数量取决于焊接接头的热量和搅拌力，即搅拌头的旋转速度和焊接速度。

观察图 3.5(b)、(c)、(d)中焊核区的上焊核、下焊核和两个焊核的分界线处 500 倍

图像。发现三者当中，两个焊核的分界线组织的晶粒尺寸最小。初步分析认为，在双轴肩搅拌摩擦焊过程中，上下两个轴肩产生的摩擦热由各自上、下表面向焊缝中心辐射状扩散，温度依次由上下表面向焊缝厚度中心处递减，因此在焊核区水平中心组织的再结晶等轴晶粒受到的热处理效果就小于上下两个焊核区的晶粒，所以在显微组织中就体现为 WNZ1、WNZ2 分界线处的晶粒尺寸小于 WNZ1、WNZ2 区域的晶粒尺寸。

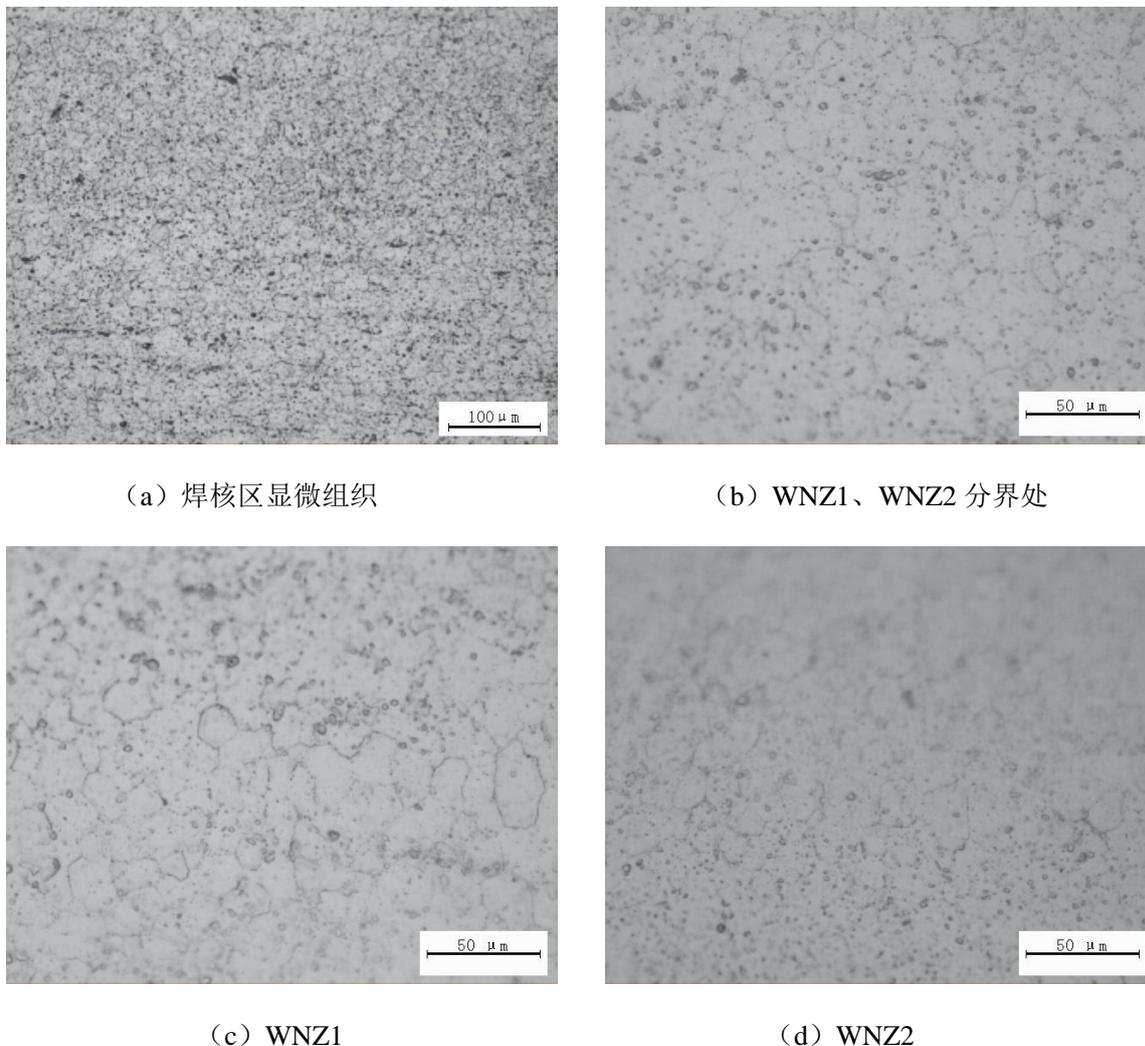


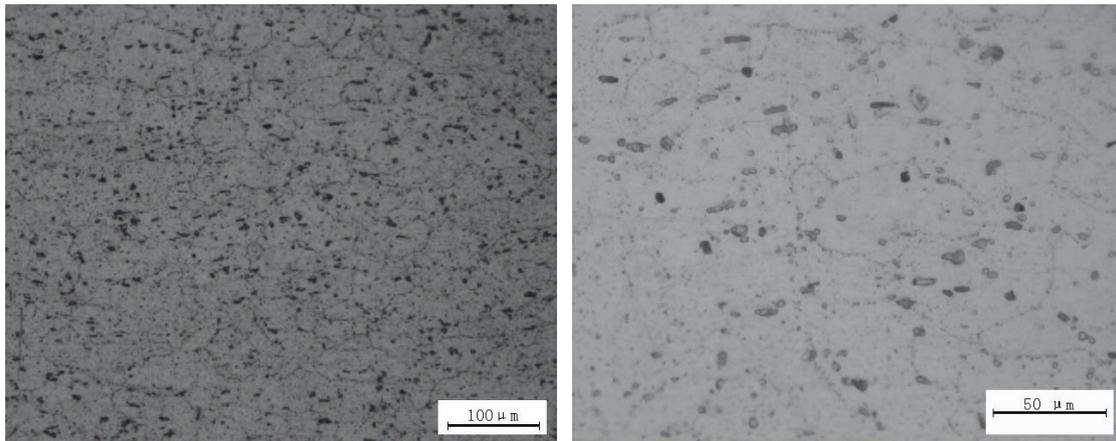
图 3.5 焊核区的显微组织

Fig. 3.5 Microstructure of WNZ

3.1.6 热机械影响区的显微组织

如图 3.6 所示为热机影响区的显微组织，热机械影响区可以认为是处于焊核区和热影响区的过渡区域，焊接热循环和搅拌针的机械搅拌作用同时作用在该区域的组织上，但是由于该区距离搅拌针有一定的距离，受到的机械搅拌作用远小于焊核区组织。由于该区域位于搅拌针的边缘外侧，没有受到搅拌针的直接搅拌作用，发生的塑性变形作用较小，因此，这部分材料发生了一定程度的弯曲变形，并且局部区域在热循环的作用下发生回复反应，在板条状组织内形成了回复晶粒组织，故热机影响区的晶粒

组织差异较大。

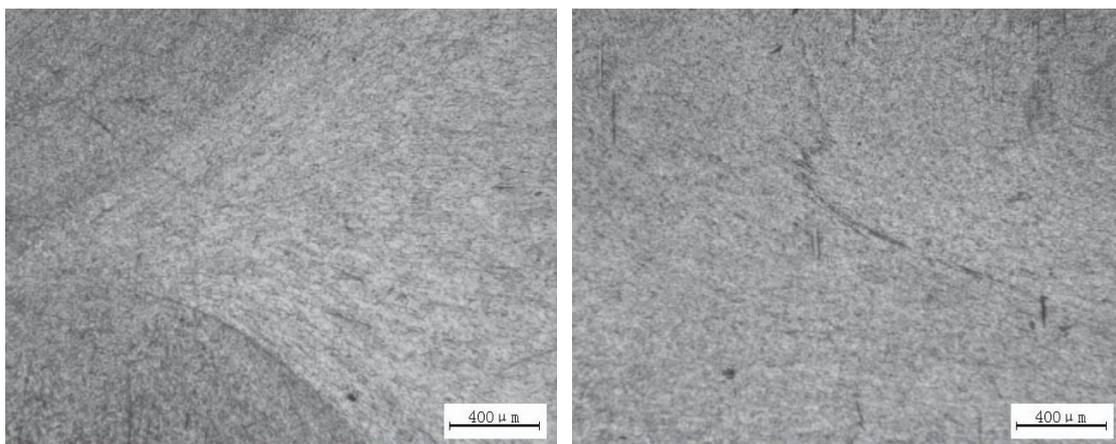


(a) TMAZ

(b) TMAZ

图 3.6 前进侧热机影响区的微观组织

Fig. 3.6 Microstructure of the advancing side of TMAZ



(a) 前进侧 WNZ 和 TMAZ 分界线

(b) 后退侧 WNZ 和 TMAZ 分界线

图 3.7 WNZ 和 TMAZ 分界处组织

Fig. 3.7 Microstructure between WNZ and TMAZ

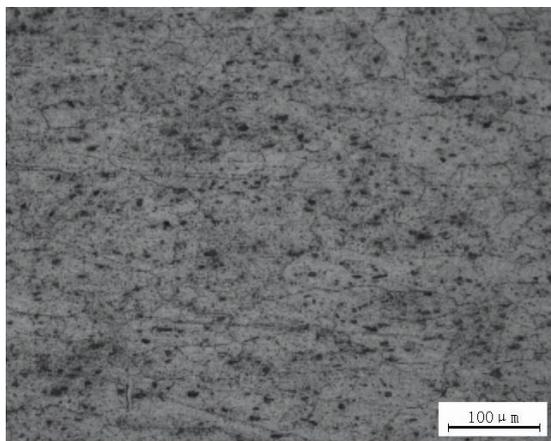
如图 3.7 所示为焊核区与热机械影响区分界区的显微组织。搅拌摩擦焊接接头的另外一个明显特征是前进侧组织和后退侧组织在金相显微镜下呈现不同的形貌。热影响区和焊缝区的分界线在前进侧和后退侧是不同的。从图 3.7 中可以看出，前进侧焊核区和热机影响区有着明显的分界过渡区域，并且前进侧热机影响区与焊核区的过渡界面比较急剧。前进侧分界明显，即热机影响区范围大；而后退侧的分界比较模糊。出现这种现象可能是焊接过程中两侧金属的塑性流动状态的差异有关。搅拌摩擦焊焊缝一个重要特征就是由于前进侧与后退侧上塑性体流动时相对速度不同，因此形成不同的组织形貌。在前进侧，塑性体之间的速度梯度比较大，在焊核区与热机影响区之间往往形成性能薄弱区域。焊接过程中，如果塑性金属的流动不够充分，加上速度梯

度大，焊核区的金属在搅拌头的作用下发生了强烈的塑性变形，晶粒发生回复和再结晶。而在搅拌头外围靠近搅拌头的塑性体，变形程度及流动性都远远小于焊核区塑性金属，由于两者之间的速度梯度大，造成他们之间形成明显的分界线，这个区域往往成为缺陷集中产生的区域。

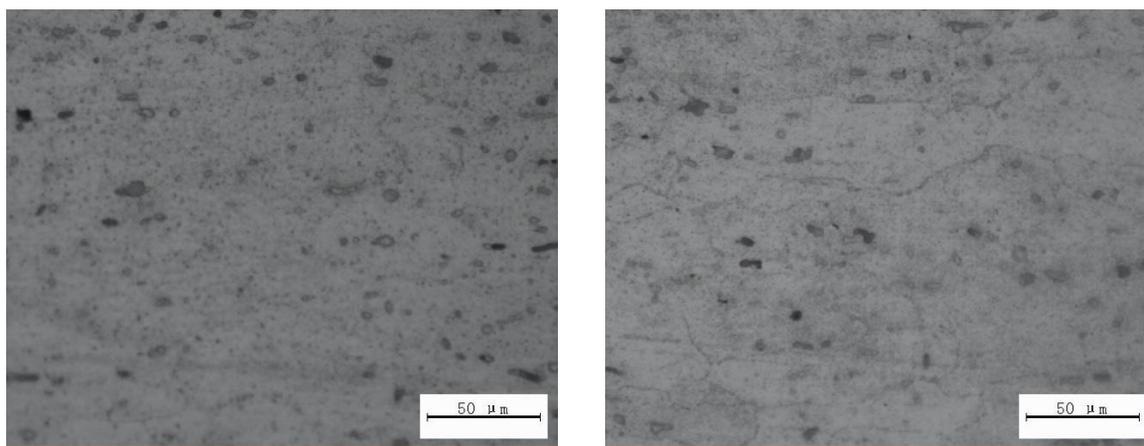
3.1.7 热影响区的显微组织

如图 3.8 所示为焊接热影响区的显微组织。焊接接头热影响区（HAZ）组织是没有受到机械搅拌挤压作用和塑性变形作用，仅受到焊接热循环作用的区域，不发生变形，经受的焊接热作用也比焊核区弱，仅仅发生回复反应，其范围较窄，相对于母材，该区组织稍微有粗化现象。此处主要是受热影响，受力很小或者完全不受力，所以畸变能很低。因此此处不会再发生动态再结晶，在焊缝缓慢冷却的过程中组织仍会沿变形方向长大，而其亚晶粒仍保持等轴状，形成大小不均匀的，甚至变形的组织。从图 3.8 所示的热影响区组织，发现晶粒出现了粗化现象，而且各个部分的晶粒粗化程度也不一样。分析认为该部分的材料所受到热循环的不同，微观组织结构和力学性能均发生了变化，但没有发生塑性变形。热影响区各部位所经历的焊接热循环，实际上是各自进行着一个特殊的热处理过程。这种焊接热循环造成的特殊热处理，造成焊缝中各部位发生不同程度的粗化、静态再结晶和回复，并因而造成接头软化，但仍保留了母材带状轧制组织的部分形貌。这种不均匀的组织变化，带给焊缝不良的影响，是双轴肩搅拌摩擦焊焊接头的薄弱区域，从后面的接头拉伸均在热影响区断裂可以看出来。

观察图 3.8(b)、(c)焊接接头前进侧 HAZ 和后退侧 HAZ 500 倍图像。发现后退侧的 HAZ 晶粒粗化比前进侧严重。初步分析认为，在搅拌头搅拌前进过程中，焊缝前进侧的部分热量借由塑性流动的材料带到了后退侧，造成了前进侧热影响区组织热循环温度低于后退侧热影响区的热循环温度，进而使得后退侧的热影响区晶粒粗化相比前进侧更为显著。



(a) 焊接接头前进侧 HAZ



(b) 焊接接头前进侧 HAZ

(c) 焊接接头后退侧 HAZ

图 3.8 热影响区的显微组织

Fig. 3.8 Microstructure of HAZ

3.2 双轴肩搅拌摩擦焊接头拉伸性能

表 3.2 所示为 6mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试样静载拉伸实验结果。由表 3.2 可知试样 6-1、6-2、6-3、6-4 的平均抗拉强度大约为 225MPa，平均屈服强度约为 164.8MPa，可见双轴肩搅拌摩擦的接头力学性能非常稳定。将 6mm 母材板进行拉伸试验，获得母材的抗拉强度为 314MPa、屈服强度 261MPa、延伸率 10%。6mm 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊缝抗拉强度约为母材的 71.66%，焊缝屈服强度约为母材的 63.14%，延伸率约为母材的 30%。如图 3.9 所示为 6mm 试样拉伸断裂试样图，发现试样都是在热影响区断裂，并且拉伸试样的断裂面和接头横截面呈 45°。

研究表明，焊态下，搅拌摩擦焊焊接接头焊核区组织的强度要高于热影响区组织的强度。对于退火状态的铝合金，拉伸试验的破坏通常发生在远离焊缝和热影响区的母材上；对于形变强化和热处理强化的铝合金，搅拌摩擦焊接后热影响区、热机影响区及焊核区交界区的组织的强度和硬度较低，可以通过控制焊接热循环，尤其是通过降低焊缝热机影响区的退火和过时效来改善焊缝的性能。为了获得最佳的性能，焊后热处理是提高热处理强化铝合金性能的最好选择。双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头能够保持较高的强度与塑性的原因在于搅拌头机械搅拌对接头强度产生了很大的影响，焊缝区域由于受到搅拌针的强烈搅拌作用，且经历热循环，组织发生了动态再结晶，形成了细小的再结晶组织。而在焊接过程中，由于热影响区只受到热循环的作用，相对于母材，该区组织晶粒粗化，使得热影响区的力学性能低于焊缝，因此试样拉伸时，断口都分布在热影响区。观察图 3.9 发现试样断裂位置都分布于焊缝的后退侧热影响区，这说明焊缝后退侧的热影响区的力学性能低于前进侧。初步分析认为，在搅拌头搅拌前进过程中，焊缝前进侧的部分热量借由塑性流动的材料带到了后退侧，造成了前进

侧热影响区组织热循环温度低于后退侧热影响区的热循环温度，进而使得后退侧的热影响区晶粒粗化相比前进侧更为显著。因此，在静载拉伸试验中，断裂位置出现在焊缝后退侧的热影响区。

同时常规的搅拌摩擦焊由于本身焊接过程的特点，焊缝上部主要受轴肩和搅拌针的双重作用，而焊缝下部主要受搅拌针的作用，于是整个焊缝在厚度方向上的组织结构和性能是不同的，表现为焊缝接头力学性能呈现各层异性。表现为接头上部抗拉强度最高，中部和下部抗拉强度要小于上部抗拉强度，中部抗拉强度最低。

双轴肩搅拌摩擦焊。而双轴肩搅拌摩擦焊由于有上、下两个轴肩，可以相当于两个常规单轴肩搅拌摩擦焊的合并，二者之间以搅拌针中心镜像对称，则接头各层异性表现的不明显。因为从本质上说，接头的各层异性是由于接头不同部位在焊接过程中经历了不同的热—机循环作用所致。

表 3.2 6mm 6082 铝合金 BFSW 试样拉伸实验结果
Table 3.2 Results of tensile tests for 6 mm 6082 aluminum alloy in BFSW joint

试件 编号	截面尺 寸(mm)	最大拉力 F_m (KN)	抗拉强度 R_m (MPa)	0.2%延伸 $R_{p0.2}$ (MPa)	断后伸长率 A%	断裂位置
6-1	6*20	26.54	224	164	2.9	热影响区
6-2	6*20	26.48	226	166	2.9	热影响区
6-3	6*20	26.59	226	165	3.1	热影响区
6-4	6*20	26.52	224	164	3.0	热影响区

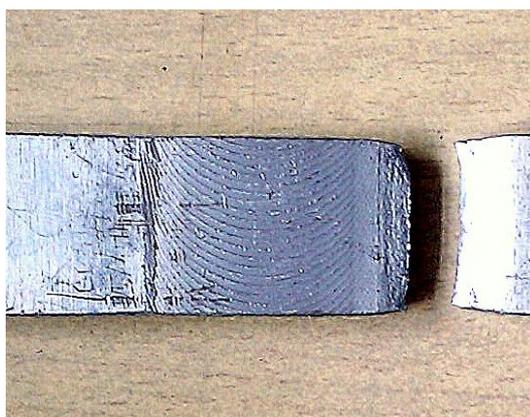


图 3.9 6mm 试样拉伸断裂位置
Fig. 3.9 Fracture position of 6mm BFSW joint

3.3 双轴肩搅拌摩擦焊微观硬度分析

图 3.10 为 6 mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊在旋转速度为 600 r/min、焊接

速度为 300 mm/min 焊接接头横截面的显微硬度分布曲线。图中分别列出了距离试样上表面 1mm、3mm、5mm 的显微硬度曲线。沿垂直焊接前进方向截面上接头显微硬度分布呈“马鞍”形分布，接头显微硬度并不完全一致，其数值有高低，但不离散。这主要是因为接头由不同的焊接区组织组成，不同的组织其晶粒大小和力学性能是不同的，各区域组织之间一般都能平滑过渡，因此接头显微硬度虽不完全一致，但并不离散。

焊接接头与母材相比强度有所不同是因为接头经历了热循环作用。接头抗拉强度很大程度上与接头微观硬度分布密切相关，而接头硬度又取决于接头焊接工艺参数的选取。从图 3.10 中可以看出，焊核区的硬度明显比热机械影响区和热影响区的硬度高，这是因为焊核区和热机械影响区虽然都经历了再结晶软化过程，但是焊核区的组织在搅拌针的搅拌及轴肩的挤压作用下，接头组织细化，组织更加细密，位错密度高，因此，焊核区的显微硬度要稍稍高于热机械影响区的显微硬度。但与母材相比，焊接后显微硬度都有一定程度的下降，这和焊接接头强度比母材低是一致的。接头显微硬度的最低值出现在热影响区，可见双轴肩搅拌摩擦焊过程中焊缝发生了较大程度的软化，这是由于双轴肩搅拌摩擦焊独特的热输入方法决定的，存在上、下两个轴肩，热输入量大，导致出现接头软化。

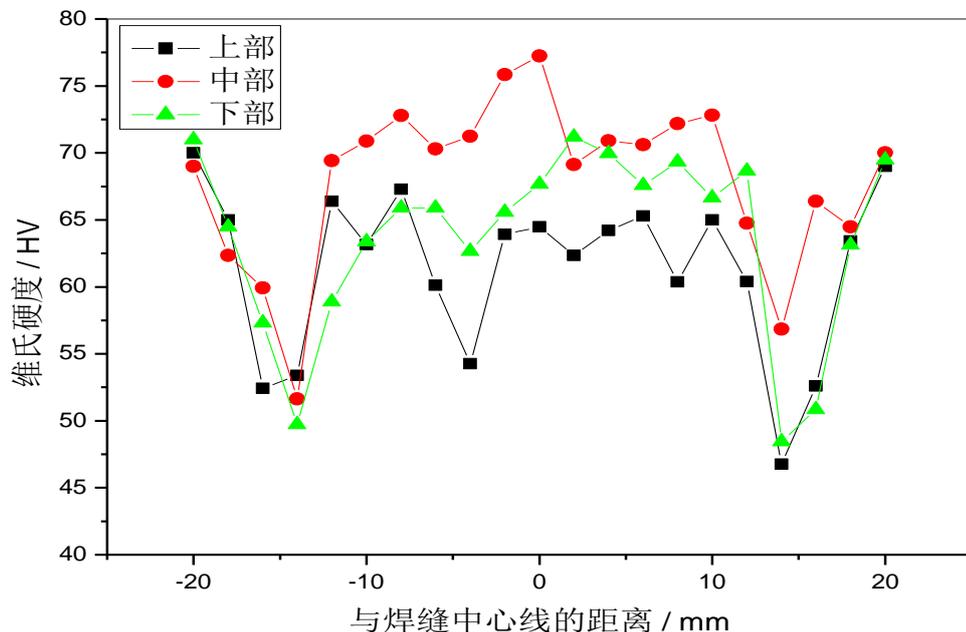


图 3.10 双轴肩搅拌摩擦焊接头横截面显微硬度分布

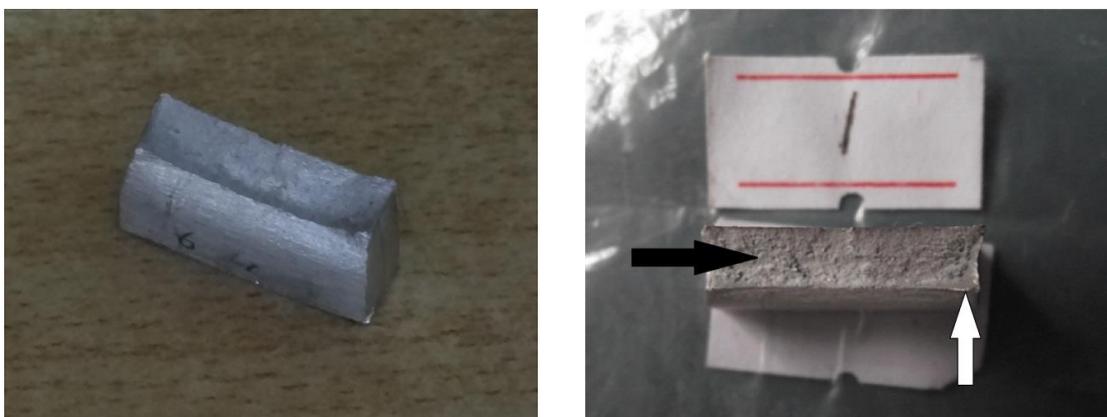
Fig. 3.10 Distribution of microhardness along transversal section of bobbin-tool FSW joint

图 3.10 还可以看出接头显微硬度值沿厚度方向上分为上、中、下三个部分。接头中部硬度平均值比上表面和下表面硬度平均值要高，这可能是经历了焊接热循环所致，上、下表面热输入量大，接头出现稍微的软化现象。接头在后退侧一侧有一个硬度最

低区域，所以试件拉伸时断裂都发生在后退侧，而不会发生在前进侧。

3.4 双轴肩搅拌摩擦焊试样接头断口微观分析

如图 3.11 所示为 6mm 试样的宏观断口。从图中可以看出整个断口平行于最大切应力，与拉伸应力呈 45° 角，断口边缘有明显的宏观塑性变形的痕迹，初步符合常见静拉伸载荷下的韧性断裂断口。进一步观察试样宏观断口，整个断口只有中间的纤维区和边缘的剪切唇区，没有看到放射区，这说明材料的塑性很好。一般来说，纤维区所占的面积比例越大、放射区所占的面积比例越小，纤维区颜色越暗说明材料的塑性越好。材料的塑性越好，在静拉伸时产生韧性断裂的可能性越大。



(a) 6mm 试样的宏观断口斜视图

(b) 6mm 试样的宏观断口平视图

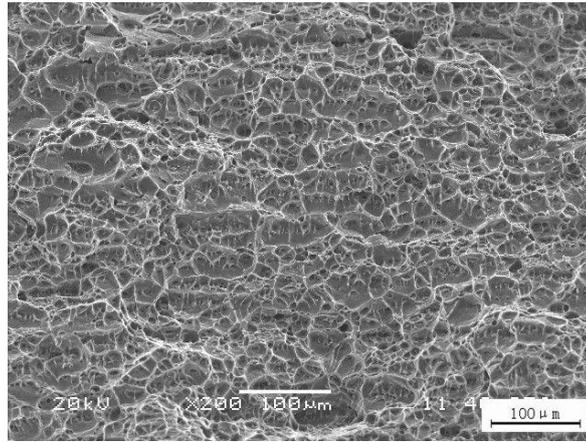
图 3.11 拉伸断口宏观形貌

Fig. 3.11 Tensile fracture surface Macro-morphology of BFSW joint

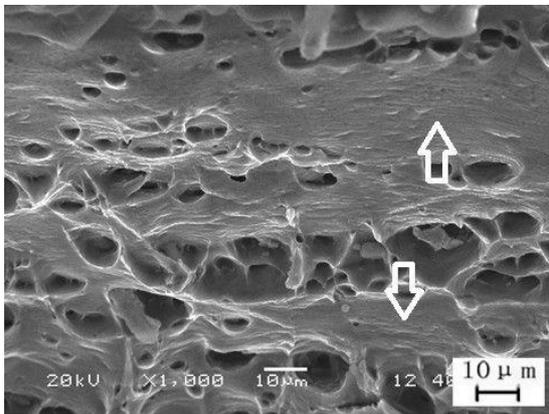
如图 3.12 所示为接头断口各区域的 SEM 图像。观察得知，整个断口中部纤维区的大量视野中分布大面积的韧窝，类似典型韧性断裂形貌。而观察试样边缘区域 SEM 微观图像发现蛇形滑移（图 3.12 (b) 中白色空心箭头所指），当韧窝表面与主应力方向垂直时，较大的应力会导致韧窝的自由表面产生新的滑移，初生的滑移痕迹很尖锐、继续滑移使之平滑发展为蛇形花样，进而成为涟波、无特征区。分析断口剪切唇部分区域，如图 3.12 (c)。观察到部分解理台阶花样、撕裂棱、同时有少量小型韧窝。此部分断口形貌呈现准解理断口形式。准解理断口是一种基本上属于脆性断裂范围的微观断口，是介于解理断裂和韧窝断裂之间的一种过渡断裂的形式。

分析试样断口中部纤维区韧窝形貌，发现部分韧窝的中心部位分布着第二相颗粒，如图 3.12 (d)、(e)。韧窝特征的形成是通过空洞核的形成长大和相互连接的过程进行，韧窝断裂是属于一种高能吸收过程的延性断裂。金属内部形成的大量显微空洞在外力的作用下不断长大，同时几个相邻显微空洞之间的基体横截面不断在缩小，直至彼此

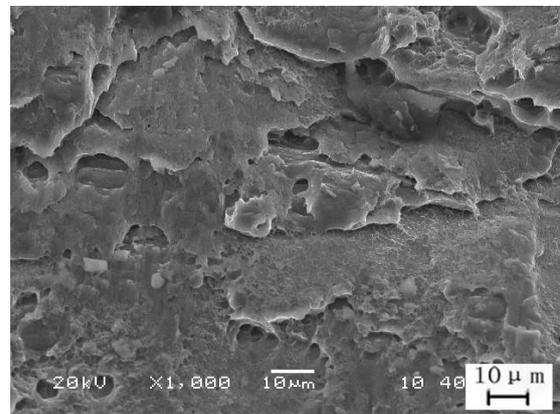
连接而导致断裂，形成韧窝断口形貌。



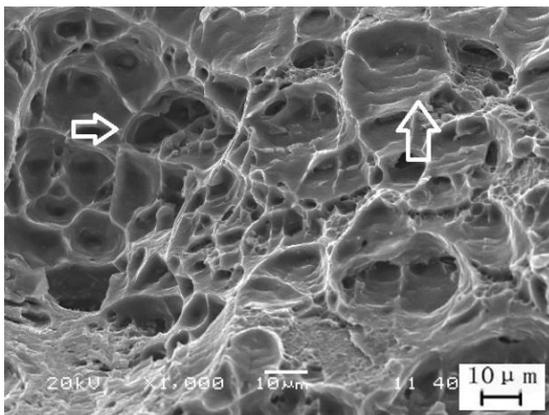
(a) 试样断口形貌 ×200



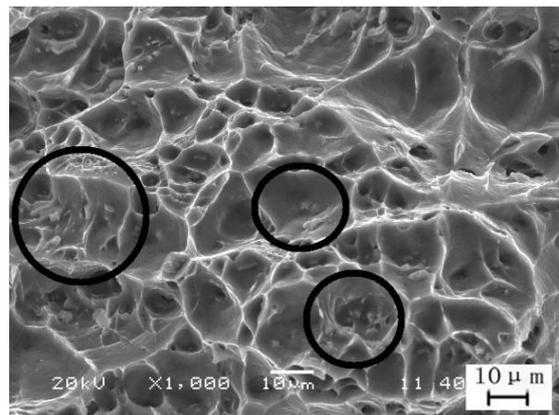
(b) 试样边缘区域断口形貌



(c) 试样边缘区域断口形貌



(d) 试样中心区域断口形貌



(e) 试样中心部分断口

图 3.12 接头断口形貌

Fig. 3.12 Fracture surface morphology of joint

本章小结

本章主要研究 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头的力学性能和微观组织,通过金相观察、拉伸试验和断口分析可以得出以下结论:

(1) 双轴肩搅拌摩擦焊接头在宏观上则呈腰型,上、下表面宽,中间窄;焊缝焊核区的晶粒在双轴肩搅拌摩擦焊接过程中重结晶,最终得到了细小的等轴晶粒结构;热影响区晶粒出现了粗化现象,其中后退侧热影响区晶粒粗化比前进侧严重,带给焊缝不良的影响,是双轴肩搅拌摩擦焊接头的薄弱区域;

(2) 沿垂直焊接前进方向截面上接头显微硬度分布呈“马鞍”形分布,接头显微硬度并不完全一致,其数值有高有低,但不离散。焊核区的硬度明显比热机械影响区和热影响区的硬度高,但稍低于母材的硬度;

(3) 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头的抗拉性能较好。6mm 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊缝抗拉强度约为母材的 71.66%,焊缝屈服强度约为母材的 63.14%,延伸率约为母材的 30%;

(4) 拉伸试样断裂位置都分布于焊缝的后退侧热影响区。焊缝后退侧的热影响区的力学性能低于前进侧;

(5) 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头的塑性较好。6mm6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试样断口整体呈韧性断口,边缘部分区域呈准解理断口。

第4章 试板温度场检测结果及分析

4.1 试板温度场检测结果

本试验主要考察双轴肩搅拌摩擦焊试板的温度分布规律，通过测量距离焊缝中心不同距离的各测温特征点的温度、距离试板表面不同距离测温特征点的温度以及不同的焊接工艺参数对温度分布规律的影响。试验方案及参数如表 4.1:

表 4.1 实验编号及结果
Table 4.1 Experimental program and results

试板编号	焊接参数		焊接位置	备注
1#	600r/min	300mm/min	孔深: 48mm 距离试板上表面 2mm	上轴肩
2#	600r/min	300mm/min	孔深: 48mm 距离试板下表面 2mm	下轴肩
3#	600r/min	400mm/min	孔深: 48mm 距离试板上表面 2mm	上轴肩
4#	600r/min	400mm/min	孔深: 42mm 距离试板上表面 2mm	上轴肩
5#	600r/min	400mm/min	孔深: 36mm 距离试板上表面 2mm	上轴肩
6#	600r/min	400mm/min	孔深: 45mm 距离试板上表面 3mm	试板中心
7#	600r/min	400mm/min	孔深: 48mm 距离试板下表面 2mm	下轴肩

4.2 双轴肩搅拌摩擦焊试板温度曲线特征

如图 4.1 所示为试板测温点顺序示意图。每组试板上共有四对测温孔，故在焊接试板温度曲线测量过程中，每组实验可以测得八条温度曲线。此八个测温孔分别标识为 CH01 至 CH08。

由于实验设计测量频率为每秒钟对于试板上的每个测温孔得到八个温度值，这样可以有效避免温度数据的测量频率低造成的偏差，但是由于焊接试板所用时间约为 200s，测温频率高使得每焊接一组试板都会得到大量的数据，而且在高速焊接过程中，由于搅拌摩擦焊接设备的震动也会造成测量值的上下抖动较为剧烈。故在实验后，将测得的数据利用 Origin 软件将数据导入处理，绘制成图像。其总体趋势如图 3.8 所示。

如图 4.2 所示为试板温度曲线示意图。双轴肩搅拌摩擦焊过程中，随着搅拌头的移动，各测温特征点所经历的温度上升与下降过程都比较相似，均为从室温迅速升高到峰值温度，然后缓降到室温。从图 3.8 中还可以看出，CH01、CH05 与其他六通道形成两个上升趋势，这主要是开始阶段，由于搅拌头是从 CH01 和 CH05 开始焊接，

并且是由初始的 25mm/min 逐渐加速到设定的焊接速度，故温度曲线是逐渐上升的，曲线上升比较平缓。而其他六通道是在设定的焊接速度下进行焊接，故温度上升比较迅猛。

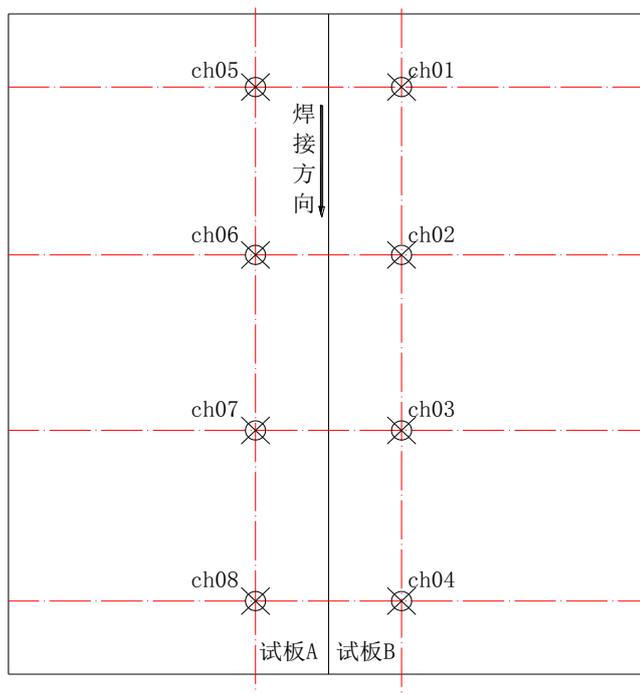


图4.1 试板测温点顺序示意图

Fig. 4.1 Orders of panel feature points diagram

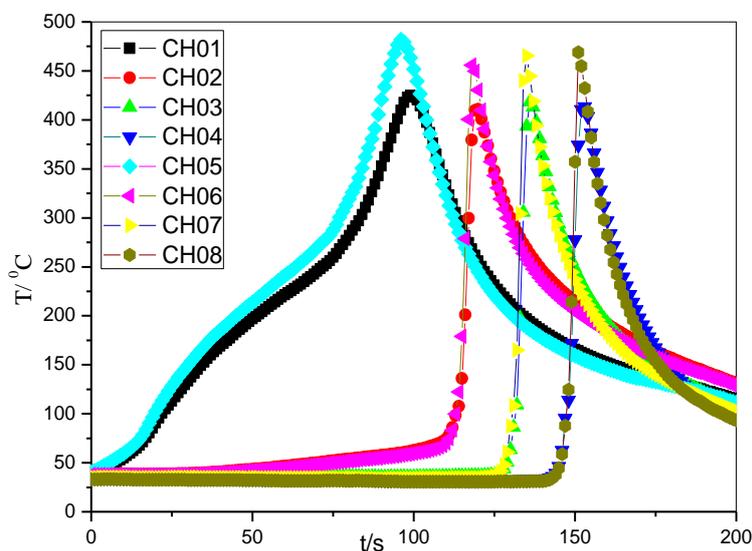


图4.2 试板温度曲线示意图

Fig. 4.2 Temperature-time curve of panel feature points

4.3 变量对双轴肩搅拌摩擦焊试板焊接温度场的影响

双轴肩搅拌摩擦焊同常规搅拌摩擦焊一样，集温度场、金属塑性流场、应力应变

场和组织结构之间互相耦合的多因素复杂的变化过程，材料本身的热物理性能、焊接工艺参数、热源形式以及周围环境等都会影响焊接过程的温度场。本试验主要研究了：

(1) 同一焊接参数下：

- ①距离焊缝中心不同距离的温度场分布规律；
- ②前进侧与后退侧的温度分布规律；
- ③上轴肩与下轴肩的温度场分布规律；
- ④试板厚度方向的温度分布规律。

(2) 不同焊接参数下温度场分布规律。

4.3.1 距离焊缝中心不同距离的温度场分布规律

由于焊接过程前进侧与后退侧、靠近上轴肩与下轴肩各测量点均沿焊缝对称分布，其沿试板宽度方向的温度变化趋势相似，因此，本节仅分析距上轴肩面 2mm，前进侧测温点的温度数据。

图 4.3 所示为在同一焊接参数（搅拌头转速：600r/min，焊速：400mm/min）下距焊缝中心不同距离的温度场分布规律。从图中可以看出 CH01 到 CH04 各测量特征点的温度是随着搅拌针与测量特征点之间的距离缩小而突然增大而后又迅速下降，这是由于搅拌针在经过焊缝中心测量特征点时达到了最高温度，经过后热输入量减少，温度下降。

在开始阶段存在一个焊接初始速度（25mm/min）逐渐增大到最终焊接速度（400mm/min）的过程，由于初始焊接速度较慢，搅拌头转速相同的条件下，搅拌头上、下轴肩与试板、搅拌针与试板之间的摩擦所产生的热量逐渐增加，靠近焊接起始端的测温点 CH01 和 CH05 的温度逐渐升高，在焊接速度接近稳定焊接速度，搅拌头行进至该两个测温点附近时，其温度达到最高值；单位时间的热输入量较大，存在热量累积过程，故试板温度呈现缓慢上升的状态，并在 100s 左右搅拌头行进到 CH01 通道附近，CH01 通道温度达到峰值；随后焊接速度变大导致单位时间内的热输入量降低，试板受加热时间变短，导致试板各通道整体温度都呈现有所下降的趋势。

由图 4.3 中的 (b)、(c)、(d) 可以看出，在同样的焊接参数条件下，在焊接温度阶段各特征点温度随着搅拌头的移动都从室温迅速升高到峰值温度，然后缓慢下降至室温附近；孔深 48mm 的特征点的峰值温度最高，孔深 42mm 的特征点峰值温度次之，孔深 36mm 的特征点峰值温度最低。由图 4.3 及表 4.2 可以发现，与单轴肩搅拌摩擦焊温度场分布规律一样，双轴肩摩擦焊试板宽度方向温度分布随着测温点远离焊缝中心，其峰值温度逐渐降低；长度方向，在焊接速度接近稳定焊速之前，焊接试板整体温度达到最高，随着搅拌头以稳定焊接速度的行进，焊接试板的温度基本保持稳定。焊接过程中摩擦产热量的叠加，使焊接试板温度的整体升高，随着搅拌头接近焊接试板的

末端，搅拌头前部试板的温度梯度越来越小，越来越不利于试板的传导散热，因此，试板 CH04 测温点的温度较稳定焊接阶段略有回升，这和实际情况也比较符合；图 4.3 各温度曲线还显示，距离焊缝中心越近的测温特征点温度变化范围比较大，温度梯度大，峰值温度越高；相反，温度上升下降的越平缓的位置距离焊缝中心比较远。在整个焊接过程中各特征点的焊接峰值温度都未达到 6082 铝合金的熔点。

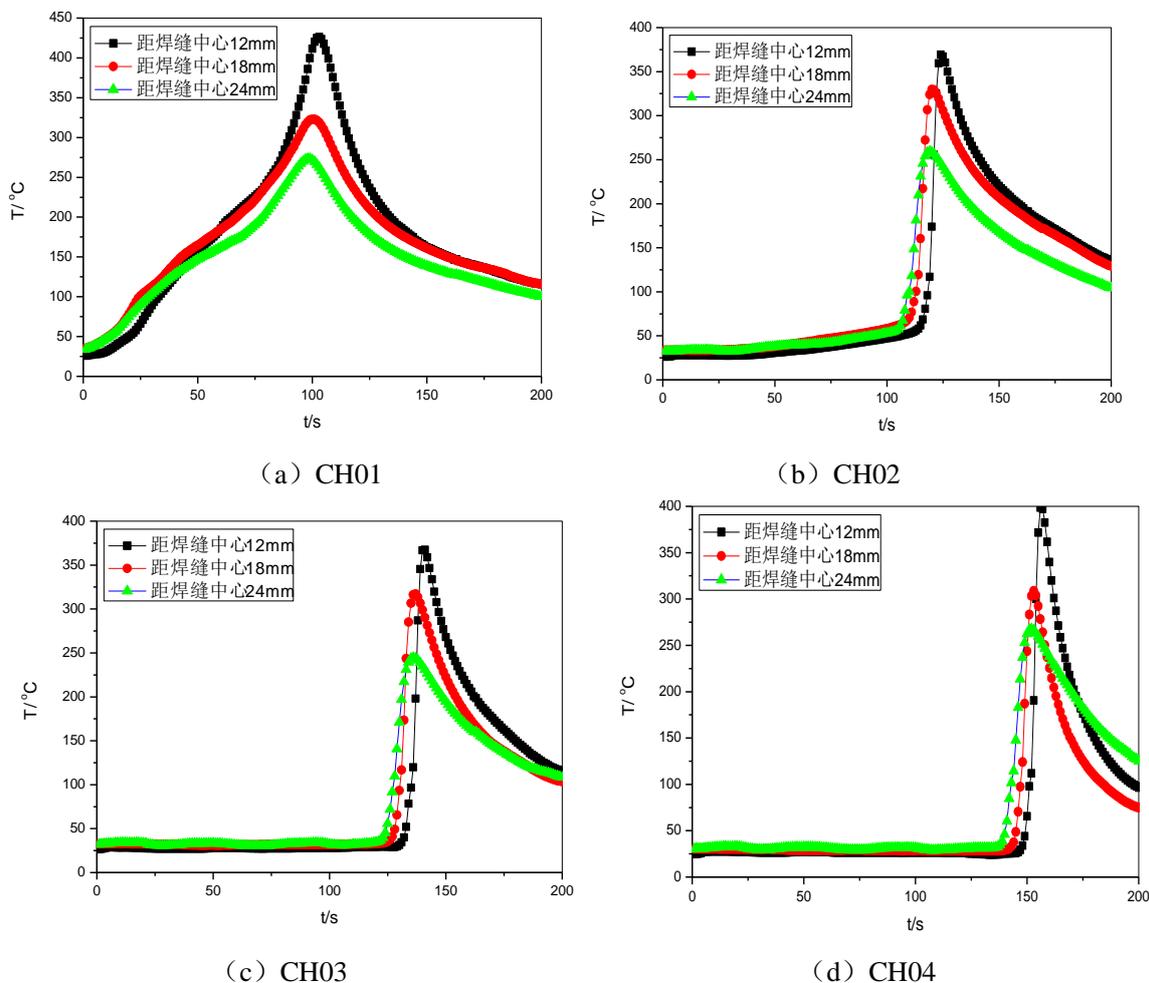


图 4.3 距离焊缝中心不同距离的温度分布曲线

Fig. 4.3 Temperature-time curve of different different distances from the center of the weld

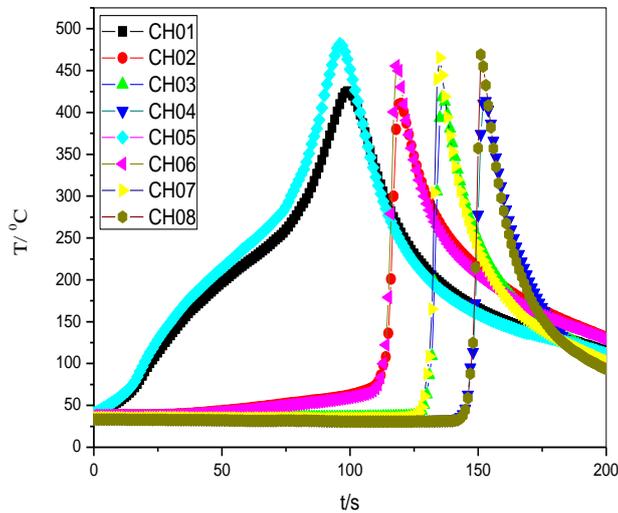
表 4.2 试板测温点峰值温度

Table 4.2 The peak temperature of panel feature points

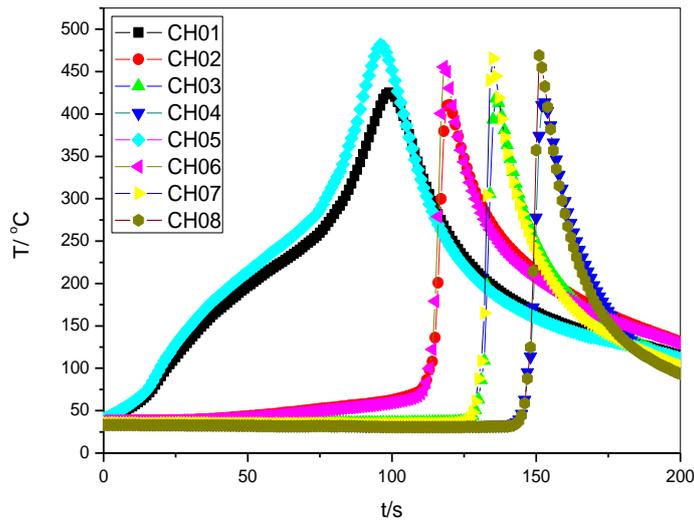
测温点序号	3# (孔深 48mm)	4# (孔深 42mm)	5# (孔深 36mm)
CH01	426	323	373
CH02	369	330	260
CH03	367	317	245
CH04	399	309	266

如表 4.2 所示为搅拌头行进过程中各特征点的峰值温度。从表 4.2 中可以发现在 4#和 5#试板试验中, CH01 通道的峰值温度出现波动, 距离焊缝位置较近的温度反而偏低, 有以下几种可能造成这种现象: (1) 飞边的产生可能造成测温点温度异常, 在焊接过程中由于各种因素可能产生飞边缺陷, 而飞边可以带走部分热量; (2) 在焊接过程中, 由于搅拌头与试板相互作用, 产生较大的阻力, 造成试板的震动, 导致热电偶松动, 导致测温不准确; (3) 由于试板材料本身的不均匀性, 测温孔中存在氧化物等都会影响测温的准确性。去除个别偶然因素影响, 我们从总体趋势可以看出, 距离焊缝中心越远, 峰值温度越低。

4.3.2 上轴肩与下轴肩、前进侧与后退侧温度分布规律



(a) 3#试板 (上轴肩)



(b) 7#试板 (下轴肩)

图 4.4 前进侧与后退侧温度分布

Fig. 4.4 Temperature-time curve of advancing side and retreating side

图 4.4 所示为在同一焊接参数（搅拌头转速：600r/min，焊速：400mm/min）距焊缝中心 12mm，距试板上表面 2mm（近上轴肩）与 4mm（近下轴肩）各测温点的温度分布曲线。由图中可以看出：不管是上轴肩还是下轴肩，焊接试板后退侧的温度都明显高于前进侧的温度。是因为，在后退侧搅拌头旋转方向与焊接方向相反，高温热塑性金属摩擦、挤压和塑性变形的产生的热量比前进侧明显多；同时，由于试板受到上、下轴肩及搅拌针的旋转、摩擦和搅拌作用，热塑性金属通过搅拌从前进侧越过搅拌针移动到后退侧时，同时一部分的热量也被从前进侧带到后退侧，所以造成一定程度上造成了焊缝左右两侧材料温度的差异。这是与传统的单轴肩搅拌摩擦焊的不同之处，传统的搅拌摩擦焊都是前进侧的温度高于后退侧的温度。

表 4.3 是 3#（近上轴肩）和 7#（近下轴肩）试板的峰值温度。由表 4.3 可以看出：近下轴肩试板表面的温度要高于近上轴肩试板表面、后退侧的温度明显高于前进侧，并且近下轴肩的试板表面后退侧温度也要高于近上轴肩试板表面的后退侧温度（部分温度异常已在上节予以说明）。原因可能是由于本次试验所用搅拌头为双轴肩螺纹型搅拌头，焊接过程中的塑性流动金属顺着螺纹螺旋方向挤向下轴肩，导致塑性金属与下轴肩的摩擦作用加剧，产热量增加，最终导致温度升高。

表 4.3 靠近上、下轴肩面试板的峰值温度

Table 4.3 The peak temperature of upper shoulder and lower shoulder

测量点	特征点温度（℃）			
	距上轴肩面 2mm		距下轴肩面 2mm	
	前进侧	后退侧	前进侧	后退侧
CH01	426		425	
CH05		485		482
CH02	369		411	
CH06		482		456
CH03	367		419	
CH07		408		466
CH04	399		413	
CH08		417		469

4.3.3 试板厚度方向的温度分布规律

图 4.5 所示为试板在不同焊接参数下在厚度方向上的温度分布曲线。由图可以看出：在某一截面的同一时刻，试板在厚度方向上温度最高的是下轴肩，其次是上轴肩，试板中心温度最低；而且随着焊接速度的提高，试板整体温度有所下降。有研究得到传统的单轴肩搅拌摩擦焊试板和轴肩通过摩擦产生的热量 Q_1 超过总热量的 80%，试板和搅拌针的摩擦热及塑性变形热 Q_2 则不足 20%。而双轴肩搅拌摩擦焊可以认为是在传统的单轴肩搅拌摩擦焊基础上增加一个轴肩的修正。所以在本次双轴肩搅拌摩擦焊中

实验中，试板与轴肩间的摩擦在焊接热输入过程中仍然起主导作用。由于不同的热输入，双轴肩搅拌摩擦焊的焊接特点不同于传统的搅拌摩擦焊。与传统的搅拌摩擦焊相比，双轴肩搅拌摩擦焊在厚度方向上的温度场是关于板厚中心呈基本对称分布，距离上、下表面越远，温度逐渐下降，试板中心温度最低。因为在焊接过程中，相比搅拌针与试板产生的热量，轴肩与试板通过摩擦产生的热量占绝大部分。在实验中，两个轴肩的直径虽然是相同的，但由于本次实验所用搅拌头为双轴肩螺纹型搅拌头，焊接过程中的塑性流动金属顺着螺纹螺旋方向挤向下轴肩，导致塑性金属与下轴肩的摩擦作用加剧，产热量增加，最终导致温度升高。

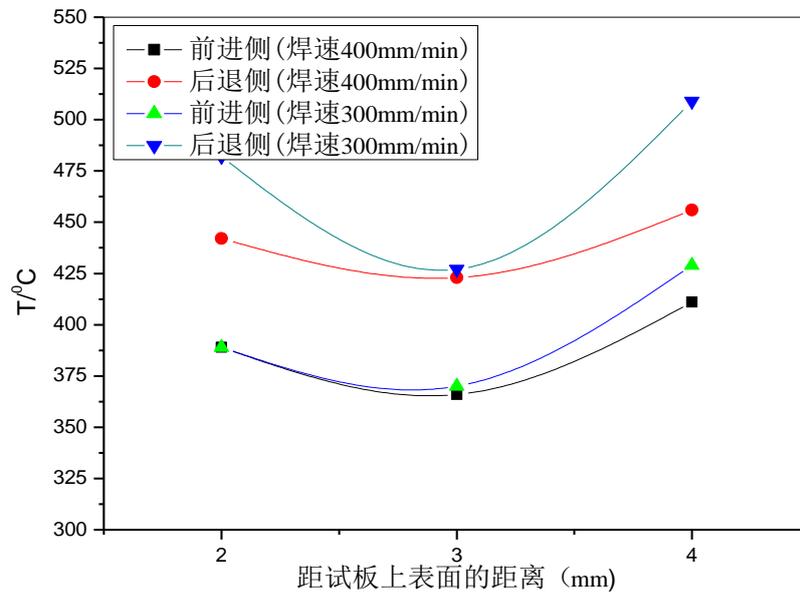


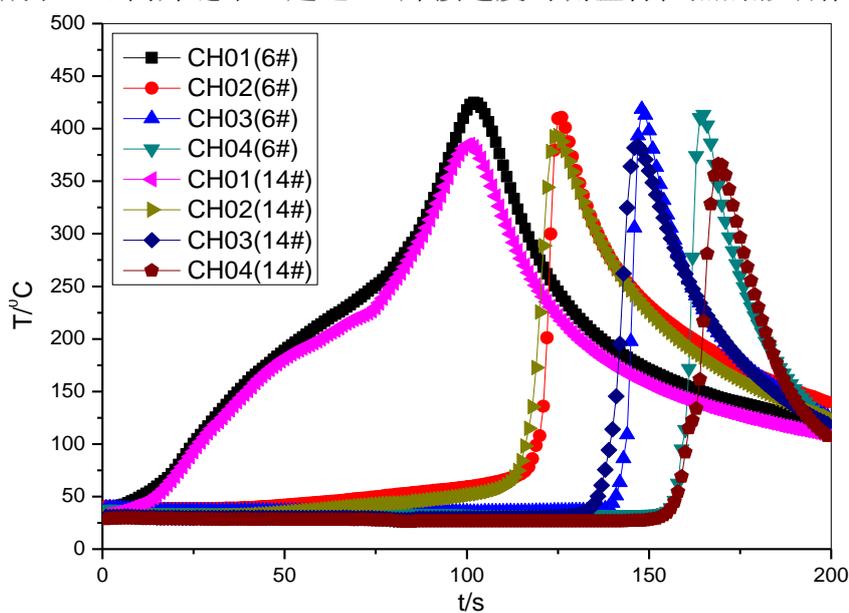
图 4.5 焊接稳定阶段试板厚度方向上温度分布

Fig. 4.5 Temperature distribution of the Stable welding stage at panel thickness direction

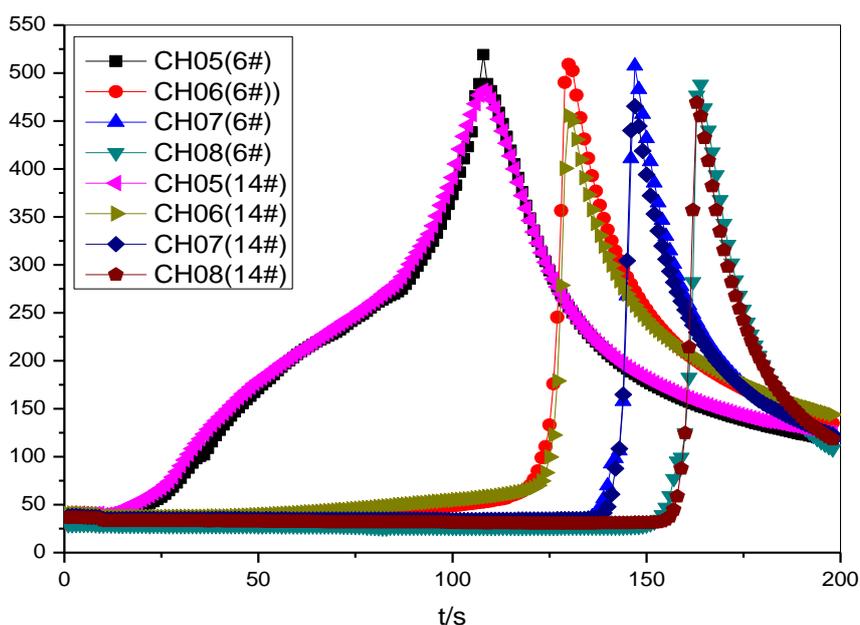
4.3.4 不同焊接速度下温度场分布

图 4.6 所示为在不同焊接参数下不同试板（2#、7#）靠近下轴肩表面温度分布规律。由图中可以看出：当固定搅拌头转速为 600r/min 时，焊接速度由 300mm/min 提高到 400mm/min 时，不管是在试板焊接的前进侧还是后退侧，试板测温特征点峰值温度都有所降低，降低幅度大概在 20°C~40°C 之间。在同一搅拌头旋转速度下，不管是前进侧还是后退侧，各测量特征点的峰值温度随着焊接速度的增加而逐渐降低。这是由于双轴肩搅拌摩擦焊的热输入来源主要来自搅拌头上、下轴肩与试板以及搅拌针与试板的摩擦生热，而在搅拌摩擦焊稳态焊接时，搅拌头转速是固定的，轴肩与搅拌针直径也是确定值，可见搅拌头旋转速度与焊接速度的比值直接表征了焊接热输入量的大小，可以称之为线能量密度，在转速不变的情况下，焊接速度的增加，导致线能量密度变小，进而导致单位时间的热输入量变小，导致各测温特征点峰值温度降低。而且

随着孔深的减小（距离焊缝中心越远），焊接速度对测温特征点的影响作用减弱。



(a) 前进侧



(b) 后退侧

图 4.6 不同焊接速度下温度场分布

Fig. 4.6 Temperature-time curve of different welding speed

4.4 试验存在问题分析

图 4.7 所示为第一组试验测试所用试板的温度分布曲线。由图中可以看出：前进侧的温度高于后退侧的温度，并且随着焊接的进行，各通道的温度波动比较大、前进侧与后退侧的温差越来越大，造成这种现象的原因可能有：

(1) 在焊接过程中由于试板材料并非完全均匀，试板装夹发生倾斜，随着焊接的进行焊缝中心逐渐偏向前进侧，导致前进侧的温度高于后退侧，前进侧与后退侧的温差越来越大，偏离常规；

(2) 由于在试验过程中由于搅拌头的旋转作用引起试板振动，热电偶发生松动，从而造成各通道温度波动；

(3) 由于试板打孔采用的是电火花打孔，小孔可能存在氧化物等因素影响温度采集的准确性。

由上述分析可以看出，本次温度场测量实验虽然进行了多方面的修正与改进，但在实际温差场测量实验中还存在一些不可避免的造成误差的影响因素，仍需继续改进。

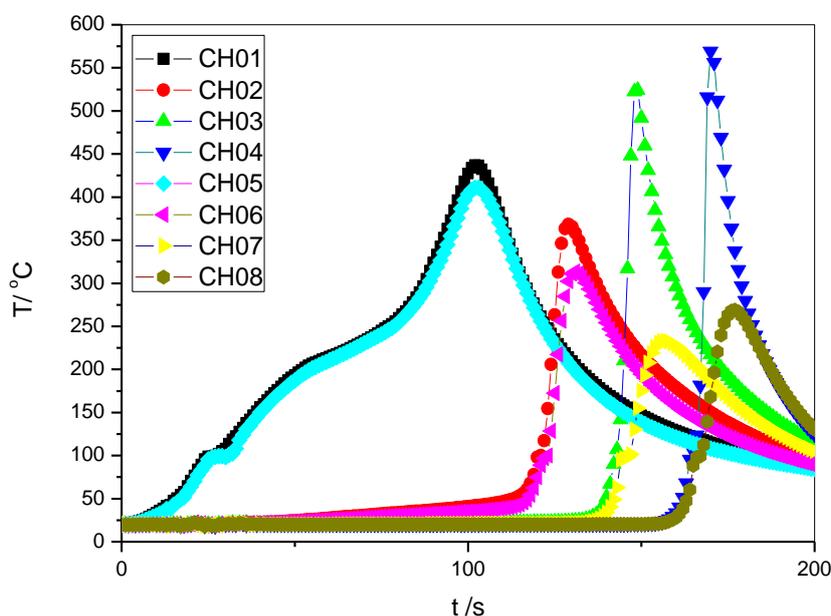


图 4.7 试验试板温度曲线

Fig. 4.7 Temperature-time curve of test

本章小结

(1) 试验成功的通过在试板中插入热电偶，使用测温系统实时检测了 6mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板特征点的温度；

(2) 试板测温点温度曲线分两个阶段：搅拌头的匀加速焊接阶段、准稳态焊接阶段。各测温特征点随着搅拌头的移动，所经历的温度上升与下降过程都比较相似，各测量点的温度是随着搅拌针与测量点间的距离缩小而突然增大而后又迅速下降，这是由于搅拌针在经过焊缝中心时达到了最高温度，经过后热量输入不够，温度下降。但在匀加速焊接阶段，由于焊接速度由初始的 25mm/min 逐渐加速到 300mm/min 或者 400mm/min，故温度曲线是逐渐上升的，且温度曲线上升比较平缓；

(3) 在同样的焊接参数条件下，距离焊缝中心越近的测温特征点温度变化范围比较大，温度梯度大，峰值温度越高；相反，温度上升下降的越平缓的位置距离焊缝中心比较远，峰值温度也越低，这和实际情况比较符合；在整个焊接过程中各点的焊接峰值温度都没有达到 6082 铝合金的的熔化温度；

(4) 下表面的温度要高于上表面、后退侧的温度明显高于前进侧，并且下表面的后退侧温度也要高于上表面的后退侧温度；

(5) 在同一搅拌头旋转速度下，不管是前进侧还是后退侧，随着焊接速度的增加各测量特征点的峰值温度逐渐降低。

(6) 在试板厚度方向，焊接稳定阶段试板温度最高的是下表面，其次是上表面，试板中心温度最低。

第5章 试板温度场数值模拟

5.1 引言

搅拌摩擦焊以其优良的焊接性能正获得越来越多的应用，但由于它是一个集温度场、金属塑性流场、应力应变场和组织结构之间互相耦合的多因素复杂的变化过程。温度场分析是进行金属状态及流动性能、焊接应力与变形分析的前提，同时温度本身也是其它因素共同作用的结果。而获得搅拌摩擦焊温度场分布情况的另一种方法就是建立焊接过程的数学模型进行数值模拟，通过有限元计算等手段，获得搅拌摩擦焊接温度场的分布云图。试验方法相对来说比较准确，但工作量大，要消耗大量的人力和物力。数值模拟方法相对来说比较简单，但准确度与所建立的数学模型密切相关。目前国内外许多学者利用数值模拟的方法来模拟常规焊接试板的温度场分布和变化规律，而对于双轴肩搅拌摩擦焊的温度场的数值模拟还很少有文献发表，因此该文针对6082铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板在不同时刻的温度分布进行了数值模拟研究，并与实验测量进行对比研究。

5.2 ABAQUS 有限元软件

ABAQUS是一款功能强大且应用非常广泛的有限元软件，它可以完成非常简单的有限元分析，也可以用来模拟非常庞大复杂的模型，解决工程实际中大型模型的高度非线性问题。受到了世界上很多国家的重视，用户涵盖机械、土木桥梁、材料、汽车、水利水电、机电、海洋工程等各个工程领域，特别是在尖端产品的研发过程中占据了很重要的地位。

其主要的优势还体现在强大的二次开发能力，ABAQUS提供了强大灵活的用户子程序接口，几十种不同的类型，按照fortran语言编写，定义初始条件、边界条件、材料属性、载荷条件、接触条件等。

ABAQUS包括三个主要的分析模块：ABAQUS/Standard、ABAQUS/Explicit和ABAQUS/CFD。另外，ABAQUS还提供了MOLDFLOW接口和ADAMS接口。ABAQUS/CAE的集成工作环境，包括了ABAQUS的模型建立、交互式提交作业、监控运算过程及结果评估能力，如图4.1所示。

本文应用 ABAQUS 6.10 有限元软件模拟双轴肩搅拌摩擦焊试板的温度场，研究不同焊接参数及其他条件下的温度场分布规律。

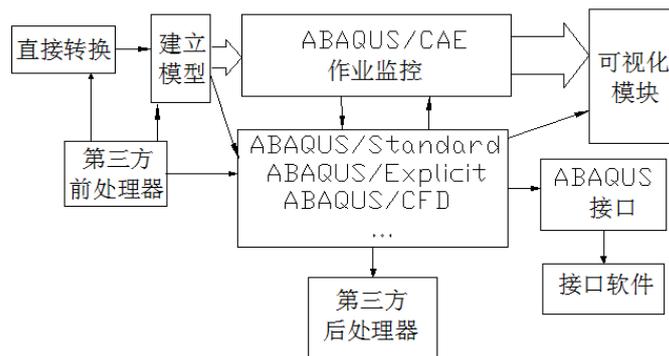


图 5.1 ABAQUS 产品

Fig. 5.1 ABAQUS products

5.3 建模的基础理论

5.3.1 有限元基本理论

有限元法（Finite Element Method）是把计算区域划分为一系列三角形或者四边形的单元体，在每个单元体上取数个节点作为节点，然后对控制方程积分获得离散方程。有限元法通过单元体节点上未知量来描述一个形状函数，在积分之前将这个形状函数带入到控制方程之中，并将控制方程乘上一个权函数，从而得到一组关于节点未知量的代数方程组。

如图 5.2 所示为有限元求解的一般步骤。有限元法的特点在于它的网格划分比较随意，对区域形状具有较大的适应性，而且它的离散形式很规范，可以编制通用的计算程序。有限元法由于这些特点以及其基础理论的普遍性，现在已经被广泛应用到传热、电磁场、流体力学等各个领域。但是由于有限元离散方程与原微分方程的相似性，它在计算流体流动和传热问题的时候，还是难免会产生一些误差。因此，有限元法通常用在固体力学的数值计算上，例如，在焊接热传导以及热塑性应力分析中，有限元法应用最广泛。

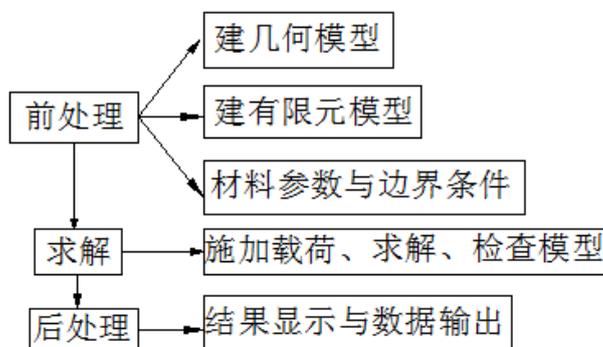


图 5.2 有限元分析流程图

Fig. 5.2 Flow chart of finite element

5.3.2 搅拌摩擦焊温度场基本理论

搅拌摩擦焊温度场传热是一个典型的三维非稳态的传热过程。非稳态传热过程微分方程可以根据能量守恒定律和傅立叶定律建立。在直角坐标系下，非线性瞬态热传导问题的微分方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - Q = 0 \quad (5-1)$$

式中 ρ —材料密度 (kg/m^3)；

c —材料比热容 (J/kg K)；

t —时间 (s)；

k_x 、 k_y 、 k_z 分别是材料沿X、Y、Z方向的热传导系数 ($\text{W/m}^2\text{K}$)；

$Q=Q(x, y, z, T)$ —物体内部的热源密度 (W/m^3)； ρ 、 c 、 k_x 、 k_y 、 k_z 都是温度的函数。

上述偏微分方程式是传热学理论中的基本公式，适合于包括铸造、焊接、热处理过程在内的所有热传导问题的数学描述，但在对具体热场进行求解时，除了上述偏微分方程外，还要根据具体问题给出导热体的初始条件与边界条件。初始条件：初始条件是指物体开始导热时（即 $t=0$ 时）的瞬时温度分布。边界条件：边界条件是指导热体表面与周围介质间的热交换情况。

5.3.3 搅拌摩擦焊数值模拟过程

如图 5.3 所示为一个完整的 ABAQUS 模拟过程。使用 ABAQUS 对搅拌摩擦焊温度场的模拟过程是一个完整分析过程，通常由三个明确的步骤组成：前处理、模拟计算和后处理。ABAQUS 模拟通常由若干不同的部件组成，它们共同描述了搅拌摩擦焊热过程和所得到的温度场分布结果。

本文是基于 ABAQUS 有限元软件对双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场热循环进行数值模拟，通过对双轴肩搅拌摩擦焊工艺全过程进行瞬态的三维温度场数值仿真数据探索出双轴肩搅拌摩擦焊主要工艺参数对温度场影响的基本规律。

5.4 双轴肩搅拌摩擦焊的热输入模型

图5.4所示为双轴肩搅拌摩擦焊接过程产热分析。双轴肩搅拌摩擦焊与常规搅拌摩擦焊接一样，其产热过程是一个三维立体过程，搅拌摩擦焊接的热源主要来自于搅拌头上下轴肩、搅拌针与试板的摩擦。另外，塑性变形产热也提供部分热量，但是由于没有准确的计算方法，同时所占比例较少，所以塑性变形产热在此不予考虑。焊接过程的散热主要是搅拌头、母材及夹具的热传导散热，试板端面及表面的散热主要是对

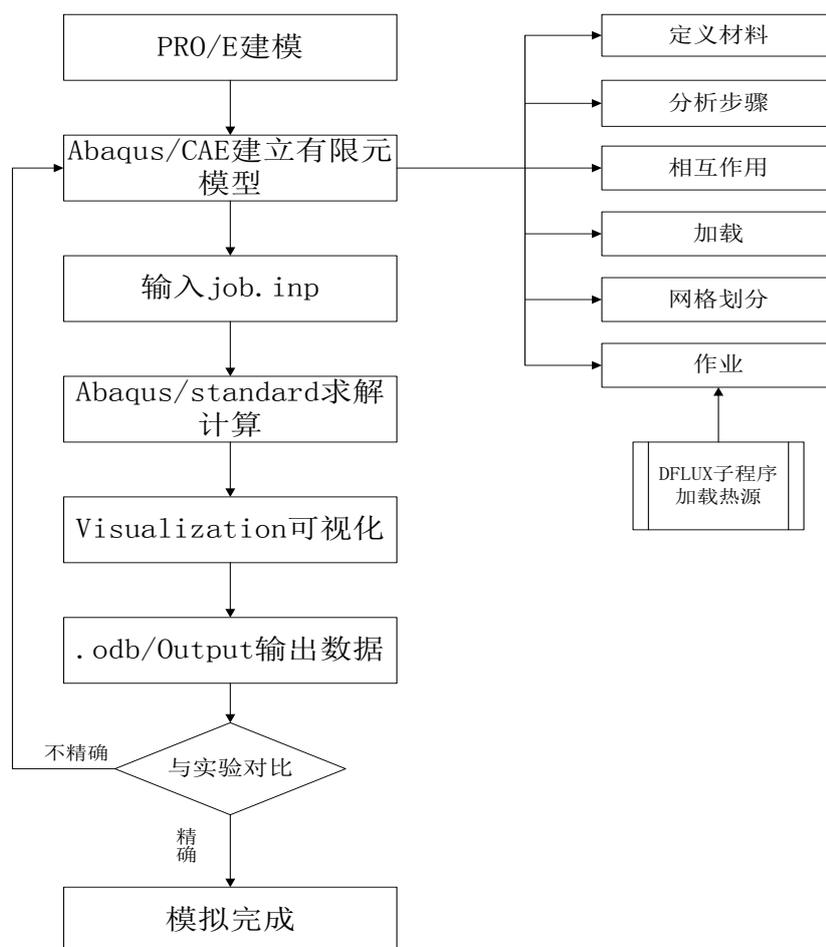


图 5.3 模拟流程图

Fig. 5.3 Simulation flow chart

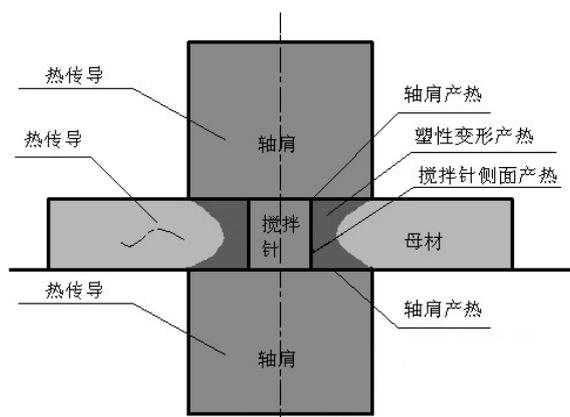


图 5.4 双轴肩搅拌摩擦焊接过程产热分析

Fig. 5.4 Schematic diagram of the heat source model

流、辐射散热，其产热与散热分析见图 5.4 所示。随后搅拌摩擦焊温度场的模拟计算逐渐被有限元方法所代替。温度场的热源模型主要分为以下三种：尝试-修正方法热输入；以机械功计算为基础的固定热输入；以轴肩压力乘以摩擦系数计算的热输入。但

搅拌摩擦焊为一瞬间过程，热量的产生主要与环境、材料性能有关，因而其物理本质很难用固定或尝试方法加以表征。在搅拌摩擦焊过程中要材料粘滞摩擦系数通常也是很难获得的，不同工艺条件下的系数更是难上加难。为此，本研究基于 ABAQUS 有限元软件，考虑轴肩和搅拌针产热，依据摩擦学理论，按照 Mises 屈服准则，以剪切力做功为基本参数建立热源模型，利用 J-C 材料本构方程实现自适应产热模型。

5.4.1 轴肩摩擦产热的计算

如图 5.5 所示为搅拌头各部分尺寸标注。轴肩产热实际有效区域为 R_1 与 R_2 之间的圆环，假设焊接压力均匀地施加于轴肩，轴肩圆环表面与试板上表面的接触应力可简化为：

$$P = F / A \quad (5-2)$$

式中： P 为应力， F 为轴肩圆环表面与试板的顶锻压力。

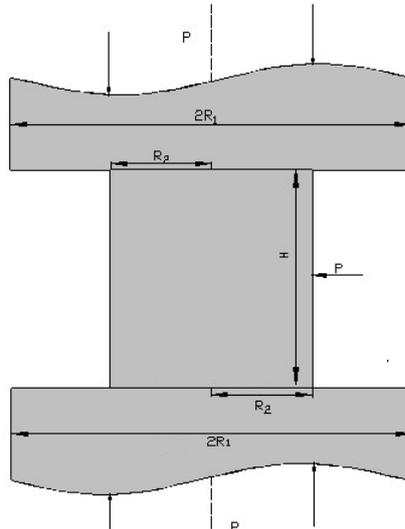


图 5.5 搅拌头各部分尺寸标记

Fig. 5.5 The dimensions mark of tool probe

图 5.6 所示为轴肩微单元模型。在图 5.6 中，半径为 r ，宽度为 dr 的微圆环上所受摩擦力为：

$$df = \mu F = \mu P ds = \mu P 2\pi r dr \quad (5-3)$$

式中 μ —摩擦系数，它在焊接过程中是一个变化的量，受摩擦力和温度变化的影响，但目前还不能定量的描述其变化规律，其值只能用经验来修正。

微圆环上轴肩旋转作用力矩为：

$$dM = r df = 2\pi P \mu r^2 dr \quad (5-4)$$

轴肩旋转扭矩为：

$$M_{\text{shoulder}} = \int_{R_2}^{R_1} dM = \int_{R_2}^{R_1} 2\pi P \mu r^2 dr = \frac{2\pi\mu P}{3} (R_1^3 - R_2^3) \quad (5-5)$$

轴肩产热功率为:

$$W_{\text{shoulder}} = 2\omega M_{\text{shoulder}} = \frac{4\pi\omega\mu P}{3}(R_1^3 - R_2^3) \quad (5-6)$$

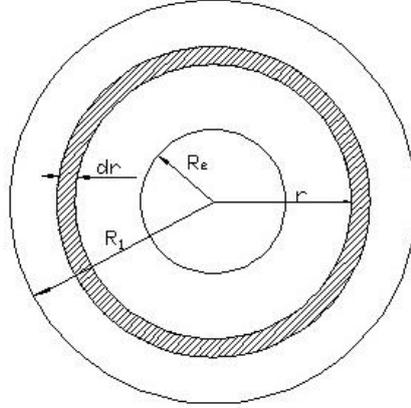


图 5.6 轴肩微单元模型

Fig. 5.6 Shoulder tiny unit model

5.4.2 搅拌针产热计算

对于搅拌头侧面的摩擦产热，根据搅拌摩擦机理，可简化的认为是由搅拌头前进时搅棒与试板材料承压接触面机械摩擦产热。搅拌头后方由于在进给过程中产生了动态的空腔，接触压力小可以忽略不计，所以搅拌头的整体侧面只与试板接触的面摩擦产热。因此搅拌头侧面的产热功率按下式计算：

在图 4.6 中，侧面微环受到的摩擦力为：

$$df = \mu P 2\pi r ds = \mu P 2\pi R_2 dh \quad (5-7)$$

则搅拌针在侧面微环旋转产生的扭矩为：

$$dM = r df = \mu P 2\pi R_2^2 R dh \quad (5-8)$$

侧面产热功率为：

$$W_{\text{surface}} = \eta \omega T_{\text{surface}} = 2\eta \omega \mu P R_2^2 H \quad (5-9)$$

5.4.3 米塞斯屈服条件

上述产热公式中， μ 为材料摩擦系数，摩擦系数与材料表面粗糙度、载荷、温度等很多因素有关。FSW 由于高温、塑性变形、粘着等问题的存在，对摩擦系数影响很大，所以关于摩擦系数的取值很难准确。而上述公式中扭矩 M 是关于摩擦系数与压力的乘积项，还可以从剪切力做功的角度分析扭矩、产热功率之间的关系。

$$\text{扭矩} \quad M = \tau \cdot R \quad (5-10)$$

$$\text{功率} \quad P = \omega \cdot M \quad (5-11)$$

式中 τ —剪切力； R —有效半径； ω —旋转速度。

大量实验证明,对绝大多数金属材料,米塞斯屈服准则更接近于实验数据,米塞斯屈服准则的数学表达式为:

$$\sigma_s = \sqrt{3}\tau \quad (5-12)$$

式中 σ_s —材料的屈服点。

5.4.4 材料的本构方程

材料的本构方程是描述材料成形过程的基本信息,表明了热加工过程中变形热力学参数之间的数量依赖关系,即流动应力与应变、应变速率($\dot{\epsilon}$)、温度(T)之间的依赖关系。Johnson-Cook(J-C)模型用来模拟高应变率下的金属材料。J-C强化模型表示为三项的乘积,分别反映了应变硬化,应变率硬化和温度软化。

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \left[1 + C \ln(1 + \dot{\epsilon}^*) \right] \left[1 - T^{*m} \right] \quad (5-13)$$

式中 σ —有效应力; ϵ —有效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ —无量纲应变率; $T^* = \frac{(T - 298)}{(T_m - 298)}$;

T_m —熔点温度。

如表5.1所示为J-C模型的参数。ABAQUS中自有的Johnson-Cook模型只能应用于显式ABAQUS/Explicit程序中,而我们希望能在隐式ABAQUS/Standard程序中更精确的实现本构积分,所以要应用Johnson-Cook模型的修正形式。这就需要通过ABAQUS/Standard的用户材料子程序UMAT编程实现。

表5.1 铝的J-C模型参数

Table 5.1 Aluminum J-C model parameters

性质	密度	杨氏模量	泊松比	Johnson-Cook模型参数				
	kg/m ³	MPa		A /MPa	B/MPa	n	C	M
数值	2712	68000	0.33	66.562	108.853	0.23	0.029	0.5

5.4.5 传热模型

搅拌摩擦焊是一个瞬态的过程,其温度场不是稳态的,因此,本文采用瞬态分析来研究焊接过程。瞬态传热过程是指整个热过程都是随时间不断变化的。在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理,瞬态热平衡可以表达为(以矩阵形式表示):

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \quad (5-14)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵,包含导热系数、对流系数及辐射率和形状系数;

$[C]$ 为比热矩阵,考虑系统内能的增加;

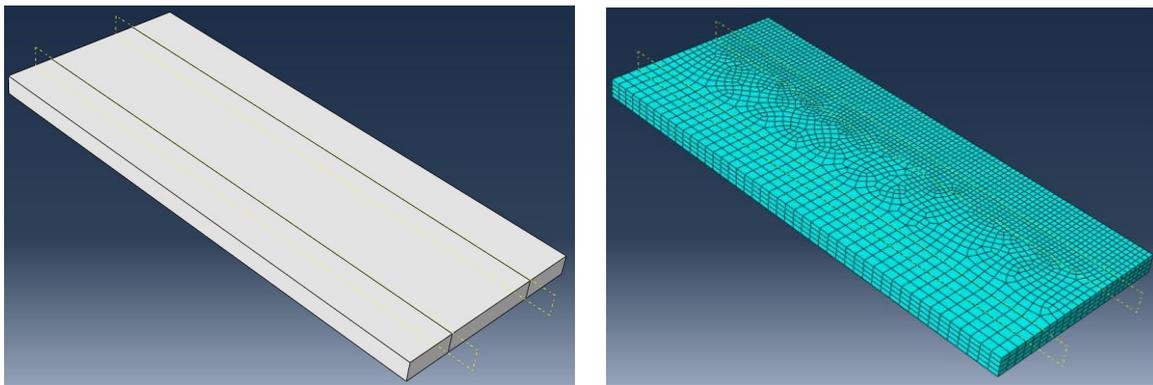
$\{T\}$ 为节点温度向量;

$\{T\}$ 为温度对时间的导数；
 $\{Q\}$ 为节点热流率向量，包含热生成。

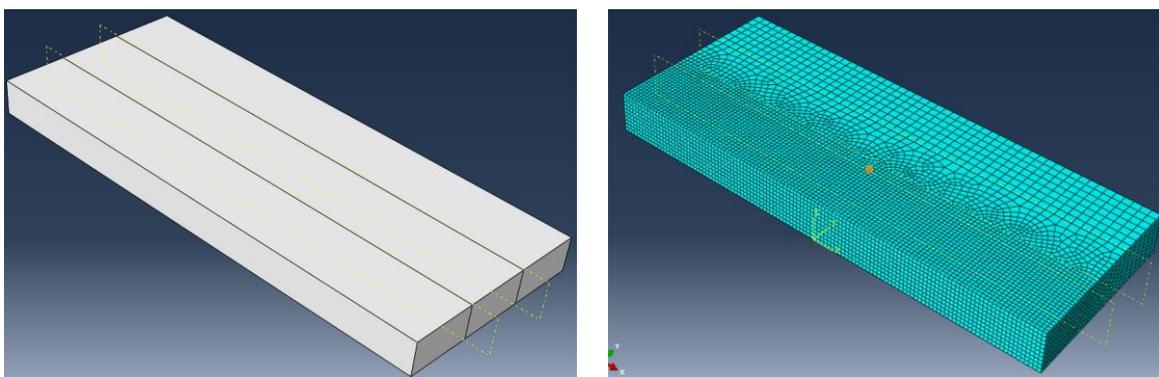
5.5 有限元模型的建立

5.5.1 建几何模型及模型网格划分

研究材料为 6082 铝合金，模拟所采用的焊接试板尺寸为：150mm×60mm×6mm、150mm×60mm×12mm，两块对接。搅拌头尺寸：模拟焊接 6mm 试板搅拌头轴肩半径 11.25mm，搅拌针半径 6.0mm，模拟焊接 12mm 试板搅拌头轴肩半径：15mm，搅拌针半径：8mm。焊接速度均为 300mm/min，搅拌头旋转速度均为 600r/min。双轴肩搅拌摩擦焊焊接开始阶段焊接速度由初始的 25mm/min 逐渐加速到最终的 300mm/min，使得开始阶段试板摩擦生热过程极其复杂。为简化计算过程，开始阶段的摩擦生热过程相应简化，不考虑焊接速度的渐变过程和材料变形引起的热量再分布。



(a) 6mm 试板



(b) 12mm 试板

图 5.7 几何模型及网格划分

Fig. 5.7 Geometry model and mesh on the model

如图 5.7 所示为划分网格后的模型。根据焊接和试板结构的特点，在划分模型网格前需要对模型进行分割操作，目的是在模型的不同部分有针对性的划分。即靠近焊

缝区部分采用结构化网格划分技术，同时网格设定的也较小。而远离焊缝区的部分采用的是进阶算法、扫掠网格划分技术，网格密度也较疏，该方法的优点是生成的网格与种子吻合得较好，产生较为均匀的网格，同时可以减小由于各区域内节点分布的不同而导致的边界网格的不规则。这样划分网格的好处是减小了计算量，也能得到满意的结果。网格划分所选择的单元类型在近缝区为 Hex 六面体单元，在远离焊缝区是 Hex-dominated 六面体占优单元，六面体单元可以用较小的计算得到较大的计算精度。

5.5.2 材料热物性参数

有限元模拟前处理过程中，需要创建材料和截面属性，根据模拟需要，设置相关的性能参数，本次模拟主要为了输出温度场，所以需要定义和温度有关的参数，由于搅拌摩擦焊温度场是一个瞬态的过程，因此必须考虑材料的热物理性值对热源温度场分布规律的影响。一般情况下，材料的热物性参数不是常数，而是随着材料的组织状态和温度变化而变化的。所以给出随温度变化的物性参数，假设密度、弹性模量、及泊松比不随温度变化，热导率、比热容是和温度呈函数关系的量。6082铝合金焊接是热导率 λ 和比热容 C 都是温度的函数，图5.8列出了不同温度下6082铝合金的热导率 λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 和比热容 C ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) 随温度的变化值。

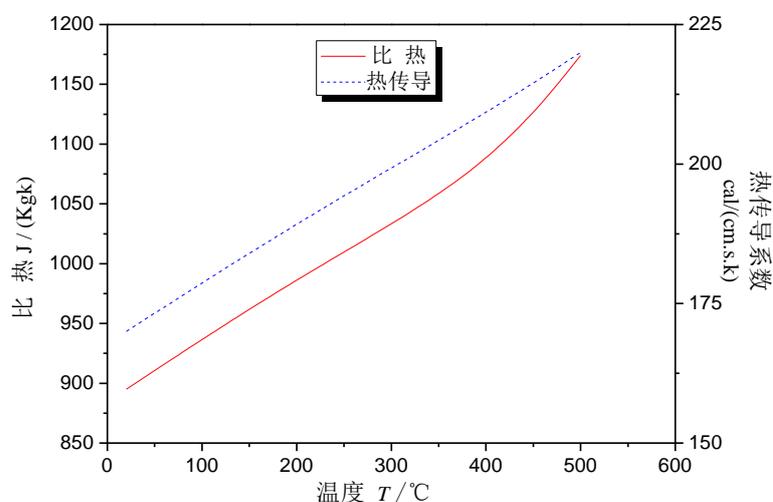


图 5.8 6082 铝合金热传导系数及比热与温度的关系

Fig. 5.8 The relationship between physical properties and temperature

5.5.3 边界条件

热传递的边界条件分为三类：

第一类边界条件，规定边界上的温度值。

$$\tau > 0 \text{ 时, } t_w = f_1(\tau) \quad (5-15)$$

第二类边界条件，规定了边界上的热流密度值，如上所述，在图中热流面加载热流。 $\tau > 0$ 时，

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = f_2(\tau) \quad (5-16)$$

第三类边界条件,规定了边界上物体与周围流体间的表面传热系数 h 及周围流体的温度 t_f 。

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_w = h(T_w - T_f) \quad (5-17)$$

焊接的初始条件主要是焊接之前的温度,在本文模拟的过程中,都假定试板以及周围环境的温度 $T_w=20^\circ\text{C}$,作为初始场加载到初始步骤中。这样在模拟过程中,试板与周围环境就有了温度差,从而使试板在焊接过程中有热传导。如图4.7为试板热分析的边界条件。

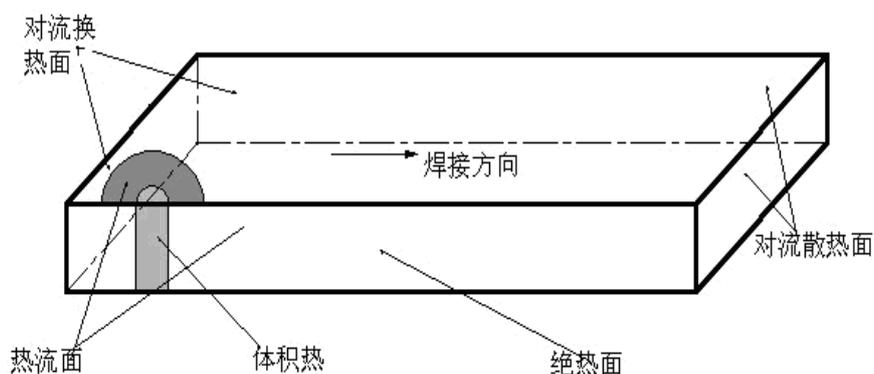


图 5.9 试板模型的边界条件

Fig. 5.9 The boundary conditions of the model

在如图4.7所示的面热流和体热流上通过子程序中的DFLUX加载热流密度,焊缝中心作为绝热面处理。暴露在空气中的面作为对流换热面来处理,铝合金在室温为 20°C 条件下,其自然对流系数为 $\gamma = 5 \sim 25 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,取为 $20 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。夹具与试板间为固-固接触传热,夹具材料为45#钢,他们的热传导系数比空气大的多,一般为 $\gamma = 100 \sim 125 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,那么取支撑板上的热传导系数为 $100 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

5.6 双轴肩搅拌摩擦焊温度场模拟结果与分析

5.6.1 焊接初始阶段结果与分析

图 5.10 所示为开始焊接阶段温度分布云图。双轴肩搅拌摩擦焊与常规搅拌摩擦焊不同,没有搅拌头插入阶段。双轴肩搅拌摩擦焊中,搅拌头高速旋转,上、下轴肩直接与试板接触、摩擦生热,而此时搅拌针还没有与试板接触,故只有试板上、下表面有热输入,高温区域集中在上、下轴肩与试板接触面,并从试板上、下表面向试板中

心传递，高温由轴肩处向四周扩散呈环形变化，由图 5.10 (b) ~ (e) 中的三维温度分布云图可以看出；而随着焊接的继续进行，搅拌针也与试板接触、摩擦生热，试板中心温度也迅速升高。由于试板的上、下表面都有轴肩摩擦生热，因此焊接处，试板温度升高很快，但此时试板升温区域较小，大部分面积还处在设置的初始温度 20℃。

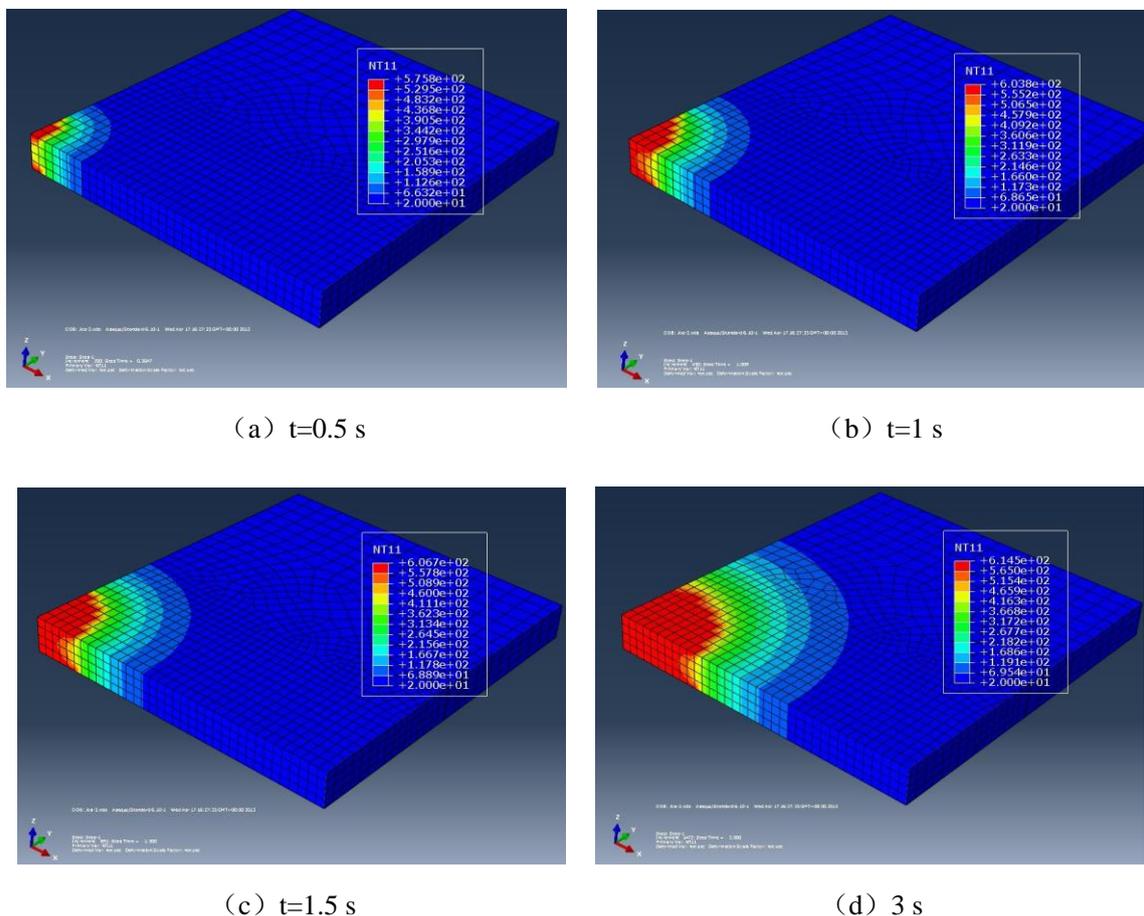


图 5.10 开始阶段温度分布云图

Fig. 5.10 The three-dimensional temperature contours of the beginning

5.6.2 稳定阶段的温度场分布

图 5.11 所示为焊接稳定阶段温度场分布云图。随着搅拌头沿着焊接方向前进，焊接区域高温区不断扩大。沿焊接方向，分布规律与单轴肩搅拌摩擦焊一致，随着焊接的进行，高温区域会变大，前方越靠近搅拌中心的温度变化越大（温度梯度大），而搅拌头后方的温度变化则比较平缓（温度梯度小），前方温度低于后方温度。研究认为这是由于随着搅拌头的前进，前方粘塑性变形区的高温金属通过搅拌针的搅拌作用通过后退侧带到搅拌头后方，对搅拌头后方金属有热量累积作用，而搅拌头前方区域的金属为未加热的金属且距离搅拌头较远，这部分金属的热量来源只能通过搅拌头热量的热传导实现，故高温区域较窄；在试板上表面和下表面搅拌头轴肩半径以外的区域内，高温区呈椭圆形分布，椭圆的长半轴与搅拌头前进方向一致；在搅拌头周围，温度梯

度较大，尤其是在搅拌头的前进方向上，而远离搅拌头的区域温度变化较平缓，温度梯度也较小。这是由于搅拌头剧烈的机械摩擦加热，使得搅拌头附近的金属温度陡升，而后侧的金属由于搅拌棒的离开而呈现逐步下降趋势，所以温度梯度平稳。

从模拟结果看来，5s 后峰值温度已基本不再发生变化，稳定在 618°C 左右，焊接过程进入稳定焊接阶段。从图 5.11 中可以看出，在稳定焊接阶段，温度场达到准稳态，但是焊接热源仍非常集中，试板上的峰值温度不再变化，高温区轮廓也保持相对稳定。

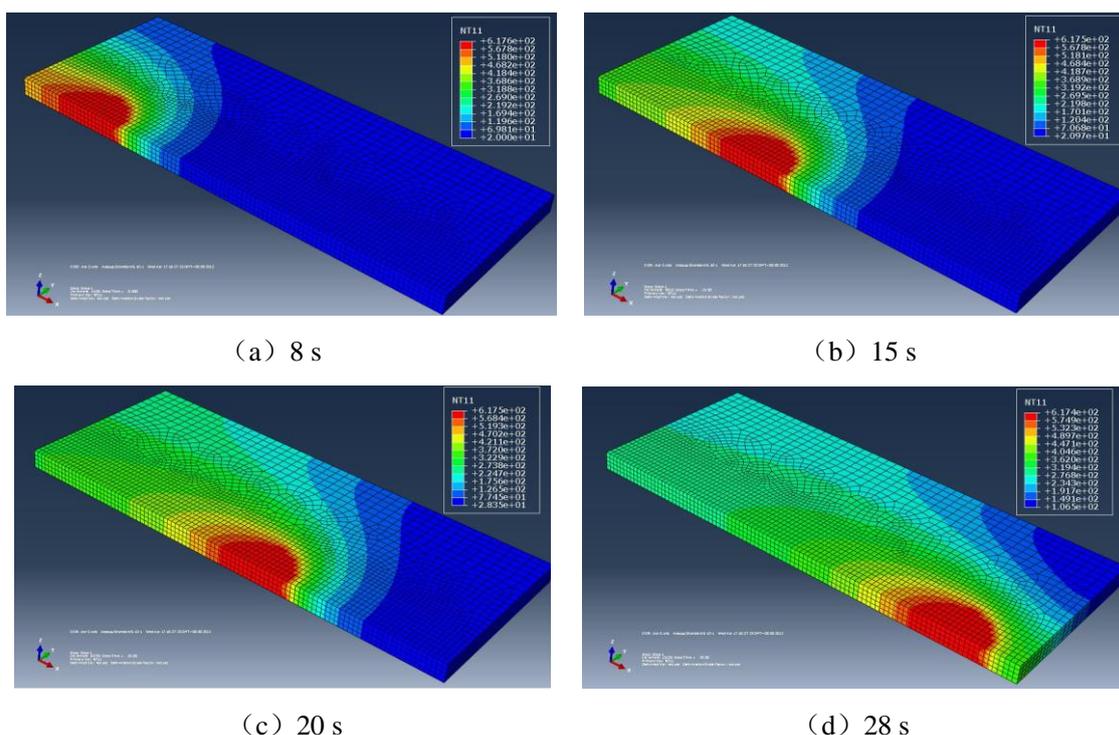


图 5.11 稳定焊接阶段温度场分布云图

Fig. 5.11 The temperature distribution of the welding stabilize stage

5.6.3 各个特征点不同时刻的温度场分布

图 5.12 所示为焊接不同时刻的温度场分布。为了解焊接过程中，从焊接开始阶段到准稳态时焊缝接头的温度变化情况，在试板板厚中心层上任取距离焊缝中心 6mm ，距离试板开始焊接边分别为 0mm 、 10mm 、 20mm 、 30mm 、 60mm 、 90mm 等六个点，显示其温度历程见图 5.12。从图中可以看出不同横截面的接头经历温度变化过程基本相同，当搅拌头到达所选择的特征点时温度都是从室温迅速上升到峰值温度，不随位置的变化而改变，准稳态时的温度值保持在 618°C 左右。仔细观察温度曲线还会发现，在焊接开始阶段温度上升的比较迅猛，温度曲线比较陡峭，而在焊接稳定阶段，温度曲线上升趋势稍微平缓一些。分析认为，焊接开始阶段试板温度设定在室温 20°C ，焊接开始时，搅拌头上、下轴肩与试板摩擦生热，温度迅速上升，温度梯度大，故温度曲线比较陡峭；而在焊接稳定阶段，由于有一段预热过程，相对焊接开始阶段，温度

梯度较小，温度曲线上升趋势稍微平缓一些。

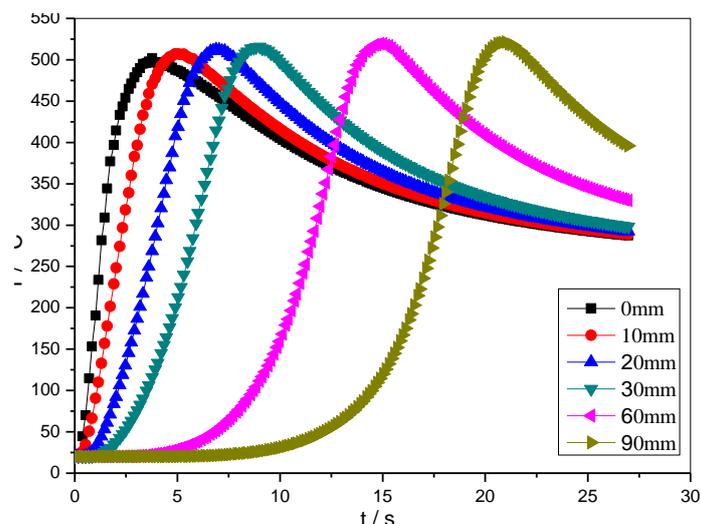
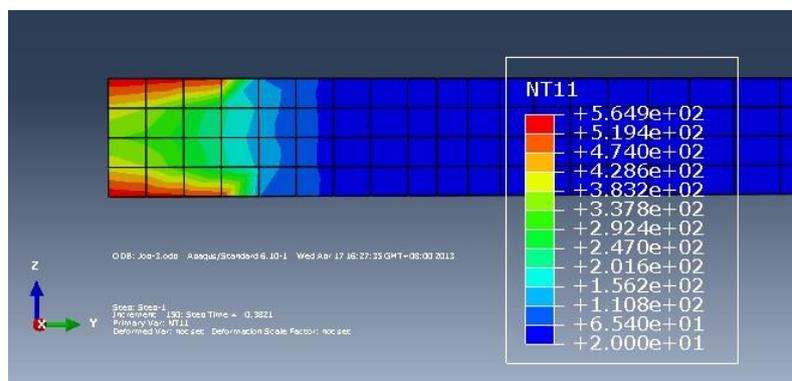


图 5.12 不同时刻的温度场分布

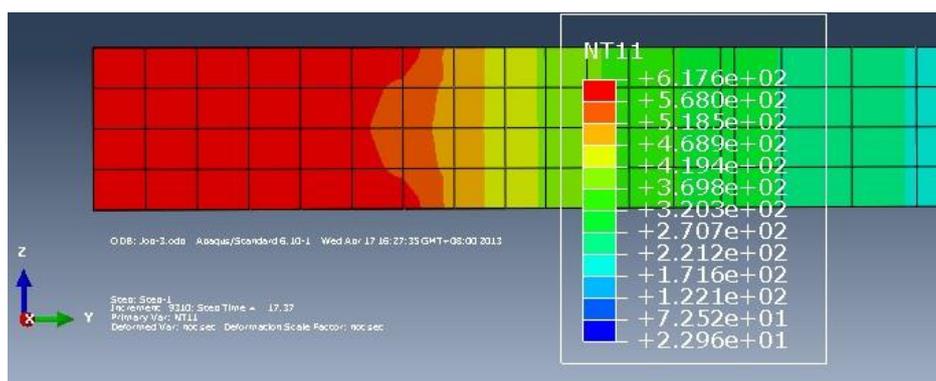
Fig. 5.12 The different moments of the temperature distribution

5.6.4 Y-Z 横截面上的温度场

图 5.13 所示为试板在稳定阶段时，试板上垂直于焊接方向截面上的温度分布。表明搅拌头靠近轴肩和搅拌针附近的温度较高，同时试板上、下表面上的高温区域比板厚中间处的宽，中层高温区域面积向内收缩。所以，高温区域在板厚中间处分布窄，在顶部和底部表面分布宽。不同于传统的搅拌摩擦焊，双轴肩搅拌摩擦焊在 Y-Z 方向上的温度场是关于板厚中心呈基本对称分布，呈腰型，这从图 5.14 中试板在板厚方向的温度分布曲线也可以看出。因为在焊接过程中，相比搅拌针与试板产生的热量，轴肩与试板通过摩擦产生的热量占绝大部分。在实验中上、下轴肩的直径是相等的，在相同的转速和同等的压力情况下，试板与各轴肩产生的热量也基本相等。



(a) 焊接开始阶段



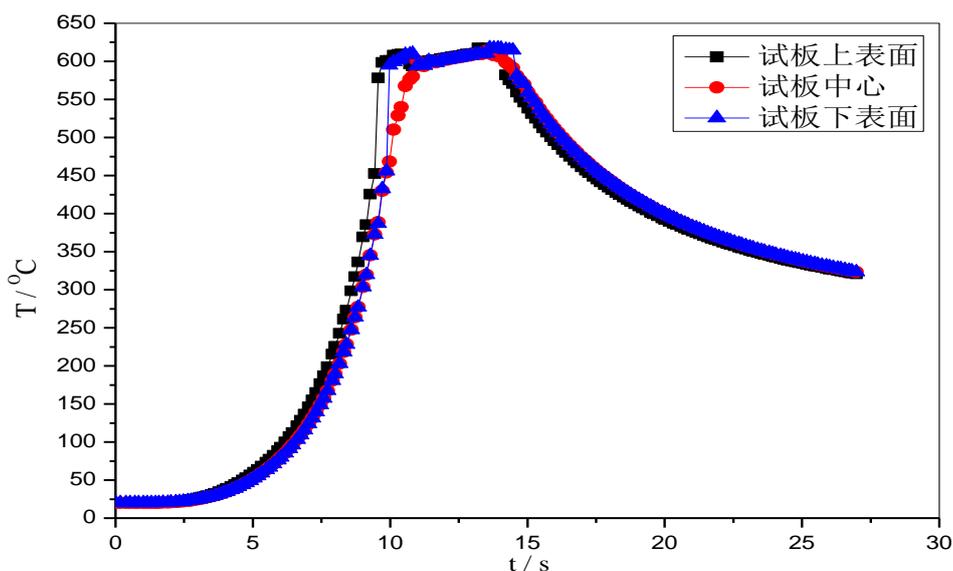
(b) 焊接稳定阶段

图 5.13 Y-Z 截面上的温度分布

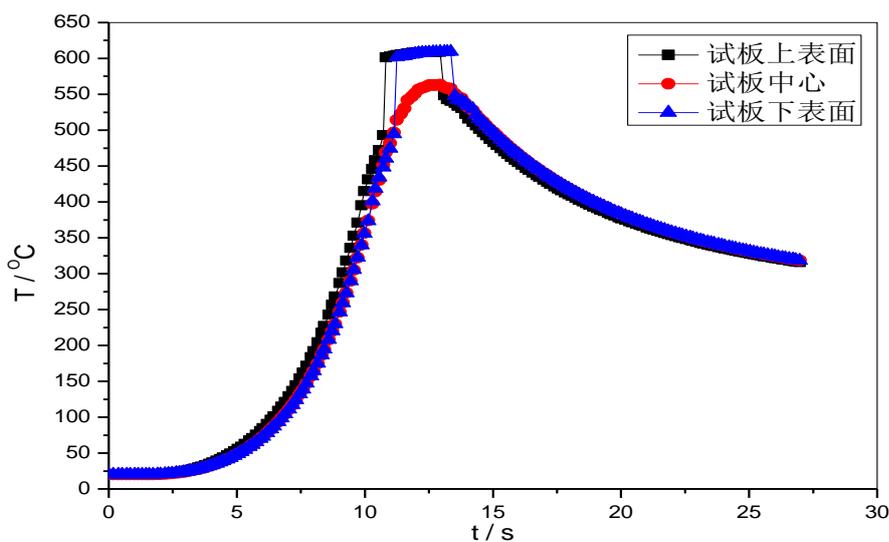
Fig. 5.13 The temperature distribution in the Y-Z cross section of the stabilization phase

这可以通过图 3.3 中经腐蚀以后焊缝试样截面 (Y-Z) 上的宏观照片来间接证明。其热机械区与焊核区的分界线类似于图 5.13 中的高温区域分布。由于产生热量、温度循环和应力作用的不同, 不同区域有着不同尺寸的晶粒以及其他一些属性。而对于那些进行类似温度循环和应力作用的区域, 经腐蚀后, 它们可能会有相似的微观组织和外观。双轴肩搅拌摩擦焊这种平衡的热输入与温度分布可以从根本上有效的避免缺陷。

但是对 6mm 厚的试板而言, 试板表面向中心的传热太快, 导致中心区的温度较高, 温度分布在厚度方向上的变化并不明显。为观察温度在厚度方向上的温度变化规律, 进一步验证试板模拟方法是否准确, 针对 12mm 厚的试板的焊接过程进行模拟。如图 4.13 所示, 12mm 试板在厚度方向上的分布则比 6mm 明显的多, 试板上、下表面上的高温区域比板厚中间处的宽, 中层高温区域面积向内收缩, 温度变化比较明显。



(a) 搅拌头轴心



(b) 距搅拌头轴心中心 10mm

图 5.14 焊接稳定阶段的温度分布

Fig. 5.14 Temperature distribution of the welding stabilization phase

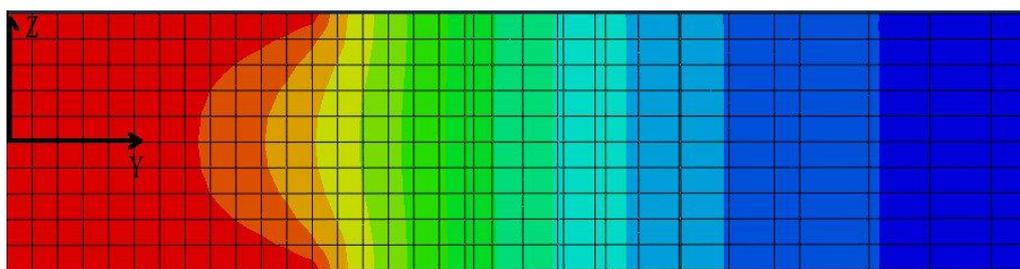


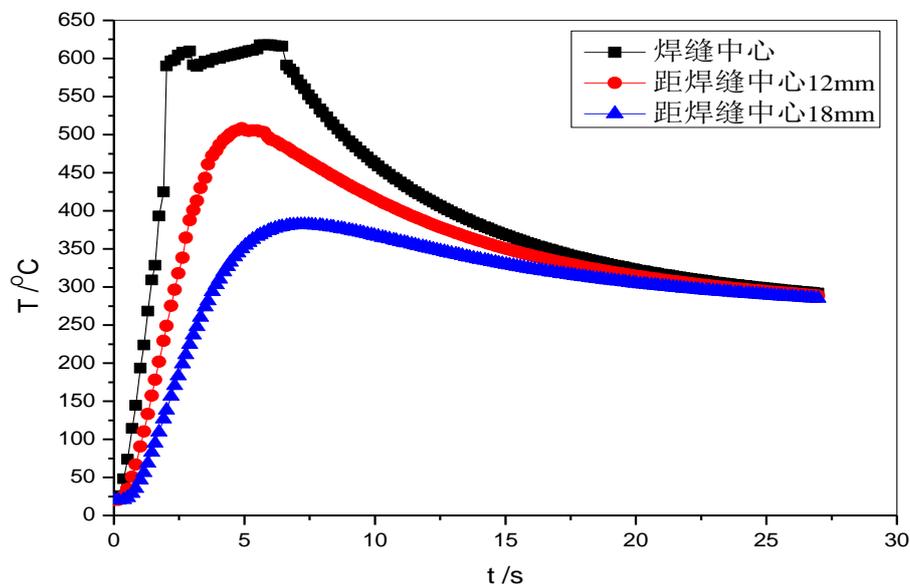
图 5.15 12mm 试板焊接稳定阶段 Y-Z 截面上的温度分布

Fig. 5.15 Temperature distribution on the YZ cross-sectional

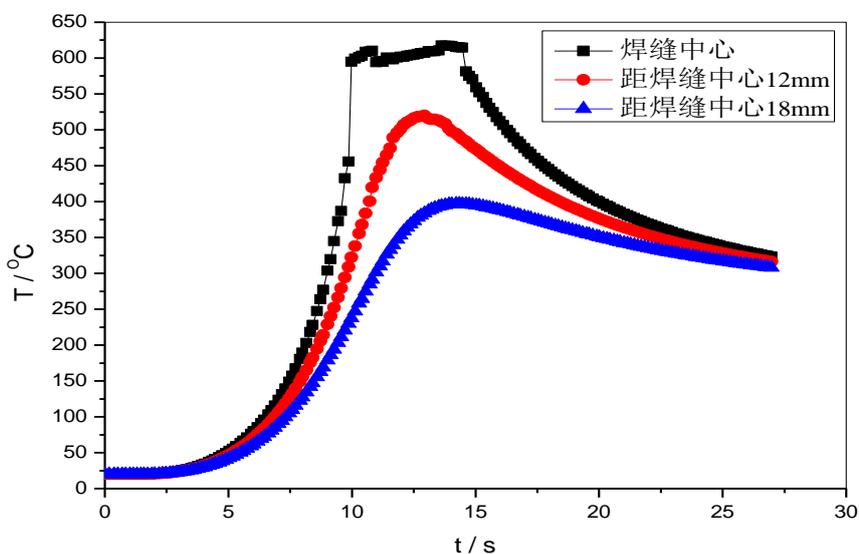
5.6.5 距焊缝中心不同距离的温度分布

如图 5.16 所示为距离焊缝中心不同距离的温度分布。选择距离焊件上表面 ($Z=6\text{mm}$) 且 Y 坐标为 10mm (焊接起始阶段) 及 100mm (焊接稳定阶段), 距焊缝中心为 0mm、12mm 及 18mm 三个点在不同时刻的温度变化曲线。由图可以看出: (a) 在搅拌头轴肩到达所选温度特征点时, 温度迅速升高, 但沿板宽方向不同点温度变化情况有所不同, 距离焊缝中心越远达到峰值温度的时间越靠后, 并且距离焊缝中心越远, 峰值温度越低, 说明热源的影响逐渐减弱; (b) 距焊缝中心越远温度变化越缓和, 这也与前面章节关于温度测量所得规律一致; (c) 在焊缝中心特征点温度曲线有一个平台, 并且温度出现小幅的波动, 平台现象的出现分析认为可能是: 从搅拌头轴肩经过该特征点区域, 热输入量持续保持稳定, 而当轴肩离开该特征点时, 热输入量减少, 温度逐渐降低; 随着温度升高, 材料本身的硬化系数有所改变, 即屈服应力会下降, 使得做功减少, 热输入减少, 温度又回有所下降, 如此反复使得高温区有上下细小波

动，此外散热系数随温度升高而加大对高温区也有影响。以上三点也可以间接说明，轴肩与试板的摩擦生热是搅拌摩擦焊的主要热输入。在峰值温度前温度上升较快，而在降温阶段则比较平缓，这是由于随着搅拌头的前进，前方粘塑性变形区的高温金属通过搅拌针的搅拌作用通过后退侧带到搅拌头后方，对搅拌头后方金属有热量累积作



(a) 起始阶段



(b) 稳定阶段

图 5.16 距离焊缝中心不同距离的温度分布

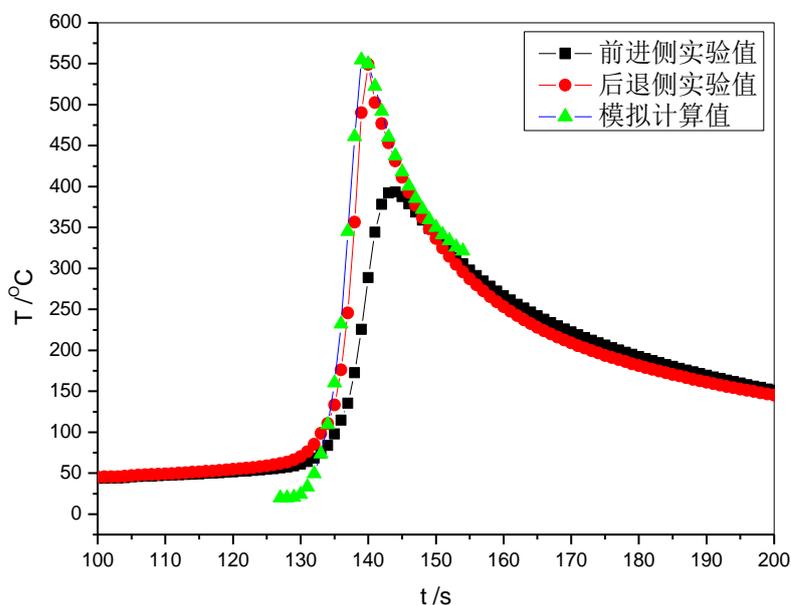
Fig. 5.16 Different distances from the center of the weld temperature distribution

用，温度梯度小，故温度曲线比较平缓；而搅拌头前方区域的金属由于距离搅拌头较远热量来源只能通过热传导实现，故高温区域较窄，温度梯度大，故温度曲线比较陡。

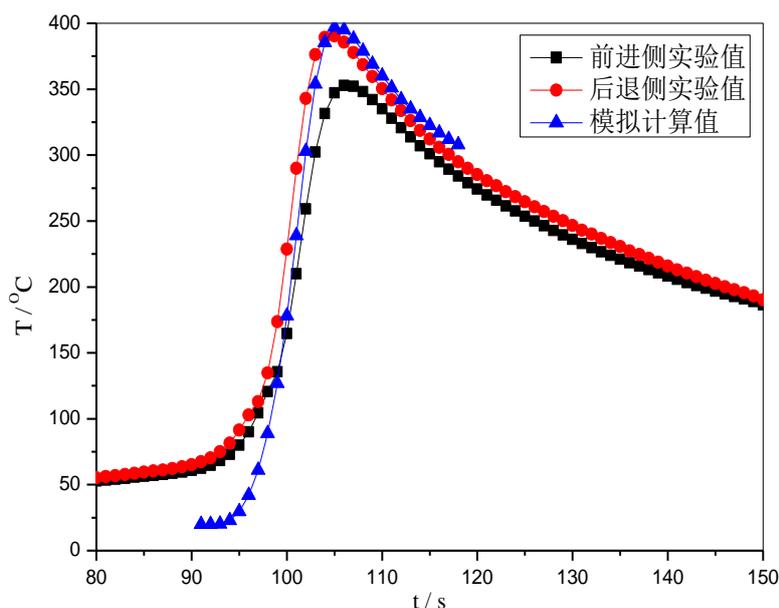
5.6.6 模拟值与实测值对比

图 5.17 所示距下轴肩 2mm 平面上特征点热循环曲线实验值与计算值的对比曲线。由于本研究没有考虑实际焊接过程中开始阶段的匀加速过程，实际焊接中开始阶段的成形和焊接速度的渐变过程对试板温度场影响较大，因此，在此对比中选择焊接稳定阶段的温度进行对比。故选择焊接测量实验中的 CH03 和 CH07 通道的实验结果与计算结果作对比，进行数值计算模型的验证。分别选取距离下轴肩 2mm 的表面上孔深 48mm、42mm 的特征点前进侧与后退侧的热循环曲线结果。计算结果与实验值的对比见图 5.17 所示。通过模拟结果与实测温度循环曲线的比较可知，选取的特征点的数值模拟结果与后退侧的实测曲线在升温趋势、降温趋势、跨度及最高温度均比较符合，与前进侧的实验结果有一些差别，这可能是实测曲线存在的误差造成的，但其温度变化趋势基本一致。因此，本研究所建立的双轴肩搅拌摩擦焊有限元模型能够较好地揭示双轴肩搅拌摩擦焊过程的温度演化规律。

进一步观察分析图 5.17 中 (a)、(b)，模拟计算的温度循环曲线在降温段温度值都较实验测量值高。模拟计算是在理想状态下进行的，对实际情况中存在的复杂环境因素进行了简化处理。在真实的搅拌摩擦焊焊接过程中，焊接夹具、搅拌头都会吸收大量的热量，而且周围环境温度也是不断变化的，与模拟室温存在着差别。以上因素导致模拟计算的试板温度循环曲线在降温段温度值都较实验测量值高



(a) 距焊缝中心 12mm 特征点热循环曲线对比



(b) 距焊缝中心 18mm 特征点热循环曲线对比

图 5.17 距下轴肩 2mm 平面上特征点热循环曲线实验值与计算值的对比

Fig. 5.17 Comparison of Calculated and Measured Temperature -curve

本章小结

本研究利用 ABAQUS 有限元分析软件对双轴肩搅拌摩擦焊的温度场进行了模拟计算，主要完成研究内容：

(1) 忽略塑性变形热，计算摩擦产热时转变为剪切力做功，利用米塞斯屈服准则及 J-C 材料本构方程建立起自适应的热源模型。

(2) 计算了双轴肩搅拌摩擦焊焊接试板的温度场，获得了焊接开始阶段的温度演化过程和焊接稳态过程的温度场，特征点热循环曲线的实验值与计算值变化趋势一致，后退侧的实验值与计算值吻合良好，说明所建立的计算模型正确，从而为后续的双轴肩搅拌摩擦焊温度场研究奠定了基础。

(3) 但本研究仍存在如下问题：简化的计算模型只选择了对称试板的一半，实际上后退侧温度高于前进侧温度，在模型中没有考虑；模型简化较多，对开始阶段的变形和焊接速度的渐变过程没有考虑。后续工作需要热源模型进行修正，考虑后退侧和前进侧的异同，同时对焊接速度的渐变过程进行考虑，以获得更为精确的计算结果。

结 论

本课题主要针对6082铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织性能及焊接过程试板温度场测定及模拟方面做了详细研究。主要得出了以下结论：

(1) 双轴肩搅拌摩擦焊焊缝呈腰型，上、下表面宽，中间窄。焊缝晶粒在搅拌摩擦焊接过程中重结晶，最终得到了细小的等轴晶粒结构。HAZ 晶粒出现了粗化现象，其中后退侧 HAZ 晶粒粗化比前进侧严重，带给焊缝不良的影响，是搅拌摩擦焊接头的薄弱区域；接头显微硬度分布呈“马鞍”形分布；6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头的抗拉性能较好，6mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头抗拉强度约为母材的 71.66%，焊缝屈服强度约为母材的 63.14%，延伸率约为母材的 30%；拉伸试样断裂位置都分布于焊缝的后退侧热影响区。焊缝后退侧的热影响区的力学性能低于前进侧；6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊焊接接头的塑性较好。6mm 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试样断口整体呈韧性断口，边缘部分区域呈准解理断口。

(2) 试验成功的通过在试板中插入热电偶，使用测温系统实时检测了 6mm 厚 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板特征点的温度；试板测温点温度曲线分两个阶段：搅拌头的匀加速焊接阶段、准稳态焊接阶段；各测温特征点随着搅拌头的移动，所经历的温度上升与下降过程都比较相似，各测量点的温度是随着搅拌针与测量点间的距离缩小而突然增大而后又迅速下降。但在匀加速焊接阶段，由于焊接速度由初始的 25mm/min 逐渐加速到 300mm/min 或者 400mm/min，故温度曲线是逐渐上升的，且上升曲线比较平缓。

(3) 在同样的焊接参数条件下，距离焊缝中心越近的测温特征点温度上升和下降的越剧烈，峰值温度越高；相反距离焊缝中心越远的位置，温度上升下降的越平缓，峰值温度越低，这和实际情况比较符合；在整个焊接过程中各点的焊接峰值温度都没有达到 6082 铝合金的的熔化温度；下轴肩的温度要高于上轴肩、后退侧的温度明显高于前进侧，并且下轴肩的后退侧温度也要高于上轴肩的后退侧温度；在固定搅拌头转速的情况下，不同焊接速度对温度场的影响整体趋势是：在一定的搅拌头转速下，随着焊接速度的提高各测量点的峰值温度逐渐降低。这是由于焊接速度的提高导致单位时间内的焊接热输入降低，试件受加热时间变短，导致整体温度都有所降低；在试板厚度方向的某一截面的同一时刻，试板温度最高的是下轴肩，其次是上轴肩，试板中心温度最低。

(4) 忽略塑性变形热，计算摩擦产热时转变为剪切力做功，利用米塞斯屈服准则及 J-C 材料本构方程建立起自适应的热源模型；计算了双轴肩搅拌摩擦焊焊接试板的

温度场，获得了起始阶段的温度演化过程和焊接稳态过程的温度场，特征点热循环曲线的实验值与计算值变化趋势一致，后退侧的实验值与计算值吻合良好，从而为后续的双轴肩搅拌摩擦焊温度场研究奠定了基础；

(5) 但本模拟研究仍存在如下问题：简化的计算模型只选择了对称试板的一半，实际上后退侧温度高于前进侧温度，在模型中没有考虑；模型简化较多，对开始阶段的变形和焊接速度的渐变过程没有考虑。后续工作需要热源模型进行修正，考虑后退侧和前进侧的异同，同时对焊接速度的渐变过程进行考虑，以获得更为精确的计算结果。

参考文献

- [1] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料的应用与技术开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] 关桥, 林尚扬. 熔焊新技术及应用研讨会论文集[C], 北京: 中国焊接协会, 2003: 11.
- [3] 周振丰, 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993: 125.
- [4] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templesmith, C.J. Dawes. Friction Stir Welding. International Patent Application No. PCT/GB92102203 and Great Britain Patent Application No. 9125978.8, 1991.
- [5] 关桥. 搅拌摩擦焊—未来的连接技术[C]. 工程前沿—香山会议文集. 第一卷, 未来的制造科学与技术, 柳百成主编. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [6] Neumann T, Zettler R, Vilaca P, et al. Analysis of self-reacting friction stir welds in a 2024-T351 alloy[C]. 4th Symposium on Friction Stir Welding and Processing. Orlando, FL, United State, 2007: 55-72.
- [7] Gil S. A feasibility study for self reacting pin tool welding of thin section aluminum[C]. 5th International Friction Stir Welding Symposium. Metz, France, 2004: S01-P1.
- [8] Deloison D, Marie F, Guerin B, et al. Multi-physics modeling of bobbin-tool friction stir welding-simulation and experiments[C]. 7th International Symposium on Friction Stir Welding. Awaji Island, Japan, 2008: S11B-P2.
- [9] Allehaux D, Marie F. Mechanical and corrosion behavior of the 2139 aluminum-copper alloy welded by the friction stir welding using the bobbin tool technique[J]. Materials Science Forum, 2006, 519-521: 1131-1138.
- [10] Marie F, Guerin F, Deloison D, et al. Investigation on bobbin tool friction stir welding of 2000 series aluminum thin sheets[C]. 7th International Symposium on Friction Stir Welding. Awaji Island, Japan, 2008: S8A-P3.
- [11] Thomas W M, Wiesner C S. Conventional and bobbin friction stir welding of 12% chromium alloy steel using composite refractory tool materials[J]. Science and Technology of Welding and Joining. 2009, 14(3): 247-253.
- [12] Skinner M, Edwards R L, Adams G, et al. Improvements to the FSW process using the self-reacting technology [C]. The 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, USA, 2003: S6B-P2.
- [13] 张健, 李光, 李从卿, 等. 2219-T4 铝合金双轴肩 FSW 与常规 FSW 接头性能对比研究[J]. 焊接, 2008, (11): 50-52.

- [14] Thomas W M, Wiensner C S. Recent developments of FSW technologies evaluation of root defects, composite refractory tools for steel join and one- pass welding of thick sections using self-reacting bobbin tools[C]. 8th International Conference on Trends in Welding Research. Pine Mountain, GA, United States, 2008: 25-34.
- [15] Marie F D, Allehaux D, Esmiller B, et al. Development of the bobbin tool technique on various aluminum alloys [C]. 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France, 2004: S01-P1.
- [16] Lafly A L, Allehaux D, Marine F, et al. Impact of friction stir welding techniques on microstructure changes and mechanical properties[J]. *Welding in the World*, 2005, (49): 444-457.
- [17] Edwards R, Sylva G. Recent advances in welding of aluminum alloys using a self reacting pin tool (SRPT) approach with application examples[C]. 7th International Conference on Trends in Welding Research. Pine Mountain, GA, United States, 2006: 191-199.
- [18] 王国庆, 赵衍华. 铝合金的搅拌摩擦焊接[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2010.
- [19] 栾国红, 郭德伦, 张田仓等. 革命性的宇航结构件焊接新技术—搅拌摩擦焊[J]. *航空制造技术*, 2002, (12): 31-32.
- [20] 栾国红, 郭德伦, 张田仓等. 铝合金的搅拌摩擦焊[J]. *焊接技术*, 2003, 32: 1-4.
- [21] Joelj D. The friction stir welding advantage[J]. *Welding Journal*, 2001, 80(5): 30-34.
- [22] Knipstrom KE. New welding method for aluminum. *Svetsaren* 1995, 3: 5-6.
- [23] 张田仓, 郭德伦, 栾国红等. 固相连接新技术-搅拌摩擦焊技术[J]. *新工艺·新技术·新设备*, 1999, (2): 35239.
- [24] 水野政夫等. 铝及其合金的焊接[M]. 冶金工业出版社. 1985: 38-50.
- [25] Kallee S W, Richardson D G, Henderson I. Friction Stir Welding of a High Speed Ocean Viewer Vessel[J]. *Welding and Cutting*. 1997, 49(12): 904-908.
- [26] Campbell G, Stotler T. Friction Stir Welding of Armor Grade Aluminum Plate [J]. *Welding Journal*, 1999, 78(12): 45-47.
- [27] Dawes CJ, Introduction to Friction stir welding and its development. *Welding and Metal Fabrication*, 1995, 63(1): 13-15.
- [28] Steward WM. Welding of air frames using friction stir. *Air&space furopf* 2001, 3(3/4): 64-66.
- [29] Li Y, Trillo E A, Mullr L E. Friction-stir welding of aluminum alloy 2024 to silver. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(12): 1047-1051.
- [30] Dawes CJ, Thomas W M. Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding Journal(Miami, Fla)*, 1996, 75(3): 41-45.
- [31] Rommevuax Jestin, Celine, Li ying. Friction stir welding of aluminum alloy 2024 to silver[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(12): 1047-1051.

- [32] Adamowski J, Szkodo M. Friction Stir Welds (FSW) of aluminum alloy 6082-T6. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, 5(120).
- [33] Murr L E, Liu G, McClure J C. Dynamic recrystallization in friction-stir Welding of aluminum alloy 1100[J]. *J Mater SciLett*, 1997, 16(22): 1801.
- [34] A. Scialpi, L. A. C. De Filippis, P. Cavaliere. Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminum alloy. *Materials and Design*, 2007(28): 112-1129.
- [35] Sajm Hanadi G, Reynolds Anthony P, et al. Microstructure and retention of super plasticity of friction stir welded super plastic 2095 sheet[J]. *Scripta Material*, 2002, 46(5): 337.
- [36] Cavaliere P, Squillace A, panella F. Effect of welding parameters on mechanical and micro-structural properties of AA6082 joints produced by friction stir welding. *Journal of materials Processing technology*, 2008(200): 364-372.
- [37] 苏晓莉, 王快社, 周俊杰. 铝合金搅拌摩擦焊温度场检测[J]. *焊接技术*, 2006, 35(1): 12-14.
- [38] 栾国红, 张田仓, 郭德伦等. 铝合金的搅拌摩擦焊[J]. *中国搅拌摩擦焊中心*, 2008.
- [39] 彭成章, 周鹏展, 黄明辉. 2024 铝合金的搅拌摩擦焊接工艺及显微组织[J]. *湘潭矿业学院学报*, 2002, 172(2): 37-39.
- [40] 李亭, 史清宇, 李红克等. 铝合金搅拌摩擦焊接头残余应力分布[J]. *焊接学报*, 2006, 27(11): 81-85.
- [41] 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊热输入数值模型[J]. *焊接学报*, 2005, 26(3): 25-28.
- [42] Zhang H W, Zhang Z, Chen J T. The finite element simulation of the friction stir welding process [J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, 403 (1-2): 340-348.
- [43] 王卫兵, 董春林, 李光. 铝合金搅拌摩擦焊接热力耦合数值模拟[J]. *航空制造技术*, 2009, (16): 66-69.
- [44] 汪建华, 姚舜, 魏良武等. 搅拌摩擦焊接的传热和力学计算模型[J]. *焊接学报*, 2000, (4): 61~64.
- [45] 王希靖. 铝合金搅拌摩擦焊接技术[J]. *有色金属学报*, 2003, (3): 78-81.
- [46] 胡煌辉, 栾国红, 柴鹏. 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头性能及组织分析. *机车车辆工艺*, 2006, 4: 4-6.
- [47] 杨新岐, 吴铁, 张家龙等. 厚板铝合金 FSW 和 MIG 焊接接头疲劳性能[J]. *焊接学报*. 2012, 33(5): 5-8.
- [48] 李红克, 史清宇, 赵海燕等. 热量自适应搅拌摩擦焊热源模型[J]. *焊接学报*, 2006, 27(11): 81-85.
- [49] 刘会杰, 赵运强, 侯军才等. 上、下轴肩直径不等的自持式搅拌摩擦焊方法及其搅拌头[P]. CN 101947691 A, 2011.01.19.

- [50] 刘会杰, 侯军才, 赵运强, 等. 上、下轴肩逆向旋转的自持式搅拌摩擦焊接方法[P]. CN 101979209 A, 2011.2.23.
- [51] 赵衍华, 李延民, 郝云飞, 等. 2219 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接头组织与性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2012(6): 70-75.
- [52] 董春林, 董继红, 赵华夏, 等. 6082 铝合金双轴肩 FSW 接头组织及腐蚀性能[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 5-9.
- [53] Hilgert J, Schmidt H. N. B. , Santos J. F, et al. Thermal Models for Bobbin Tool Friction Stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, (211): 197-204.
- [54] 刘雪梅, 姚君山, 蔡跃等. 双轴肩搅拌摩擦焊温度场数值模拟研究[OL]. 中国科技论文在线 <http://www.paper.edu.cn/index.php/default/releasepaper/content/201101-772>.
- [55] Sato T, Suda T. Finite element analysis of friction stir welding affected by heat conduction through welding jig[C]. 11th International aluminum conference-INALCO 2010 New Frontiers in light metals. IOS Press, 2010: 139-146.
- [56] Threadgill P L, Ahmed M M Z, Martin J P, et al. The use of bobbin tools for friction stir welding of aluminum alloys[J]. Materials Science Forum. 2010, (638-642) : 1179-1184.

攻读硕士学位期间发表的学术论文

李敬勇, 周小平, 等. 6082 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊试板温度场研究. 2013. (已录用)

致 谢

在这篇论文的写作过程中，我的导师李敬勇教授给予了我很大的帮助，本论文能够顺利完成，离不开导师的悉心指导和严格要求，导师渊博的学识，严谨的治学态度，诲人不倦的高尚师德，精益求精的工作作风，朴实无华的、平易近人的人格魅力，严于律己、宽于待人的崇高风尚对我影响深远，不进使我树立了自己的学术目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多为人处事和接人待物的道理。本论文从选题到完成，每一步都是在导师的指导下完成的，倾注了他很多的心血。在此，谨向导师表示崇高的敬意和衷心的感谢！撰写论文期间，老师还在生活和工作方面给予了我极大地关心和帮助，再次感谢老师！

与此同时本论文的顺利完成，与赵阳阳、李刚、邱硕、王顺尧、张亮、刘涛、陈晓松以及 309 实验室的其他成员的鼎力相助是分不开的，在此真诚地感谢他们给予的帮助。

并向研究生期间所有任课老师以及学院的各位领导和和其他老师、同学们给予过我关心和帮助，表示衷心的感谢！

最后对参加本文评审和答辩的各位老师表示衷心的感谢！由于本人知识水平和能力有限，在设计的过程中难免存在很多的纰漏和不足之处，恳请各位老师批评与指正！