# 基于 MORFEO 的对搅拌摩擦焊流动性及热 过程的研究

# Research on flowing patterns and thermal cycles of friction stir welding based on MORFEO

学科专业:材料加工工程 研究生:胥妍 指导教师:杨新岐教授

天津大学材料科学与工程学院

二零一三年十二月

# 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的 研究成果,除了文中特别加以标注和致谢之处外,论文中不包含其他人已经发表 或撰写过的研究成果,也不包含为获得 **天津大学**或其他教育机构的学位或证 书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中 作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名: 签字日期: 年 月 日

# 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 **天津大学** 有关保留、使用学位论文的规定。 特授权 **天津大学** 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检 索,并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校 向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

签字日期: 年 月 日

学位论文作者签名: 导师签名:

签字日期: 年 月 日

# 摘要

本文采用焊接有限元分析软件 MORFEO 对圆柱形和圆锥形两种搅拌针作用 时,4mm 厚 2024-T3 铝合金薄板对接接头搅拌摩擦焊的不同厚度水平面材料流 动和焊接热过程进行了数值分析,并对流动性模拟结果进行了铜箔标记试验验 证。为了研究搅拌摩擦焊接头界面的材料流动特点,同时设计了以 2024-T3 和 7075-T6 两种铝合金作为母材的 T 型接头和搭接接头形式的标记试验进行分析。 在对两种搅拌针进行不同厚度材料流动的模拟研究时,设计了焊接速度为 80 mm/min,旋转速度为 500 rpm,600 rpm,800 rpm 和 980 rpm 四组参数进行分析。 结果表明,当选用圆锥形搅拌针在转速为 600 rpm 时,工件各个厚度层面都体现 了良好的材料流动性。具体表现为,前进侧质点绕过搅拌针前端向后方运动,后 退侧质点被搅拌针甩至后方,但是不同层面上搅拌针后端两侧的质点分布都较均 匀。而在其他焊接条件下,只有靠近工件表面的质点可以均匀分布,越靠近搅拌 针底端的质点则几乎都沉积在后退侧,使搅拌针后方的前进侧留下了大量的空 洞。在使用铜箔作为标记材料的对接试验中,转速为 600 rpm 时采用圆锥形搅拌 针同样可以得到与模拟相类似的结果。并且发现铜箔发生变形处位于焊接的热力 影响区,此处的晶粒被明显拉长。

在采用 T 型接头的标记试验中,发现在壁板上的材料有类似于对接接头的横向流动特点,而壁板与筋板则体现出了一种相互交错的轴向流动特点。这种特点也使得实际 T 型接头的圆角区容易出现流动"死区",造成隧道或孔洞等缺陷。 搭接接头中的材料主要是轴向流动,并且在前进侧上下两板的材料都倾向于向焊 缝中心线上侧运动,而上板在后退侧的材料向中心线下侧流动,但其下板材料则 由于搅拌针和周围温度较低材料的挤压作用向上板流动。

焊接速度为80 mm/min,转速600 rpm时对4 mm厚2024-T3铝合金薄板对接 工件的热过程模拟,结果表明焊接开始前期搅拌头周围急剧产热,峰值温度较高, 而随着焊接进行逐渐步入稳定阶段,该峰值温度略有降低,升温过程也趋于平缓。 搅拌头周围工件上的温度分布呈现出一个前端较窄,后端较宽的卵形等温区,前 端温度区间比后端温区窄。通过使用MORFEO对搅拌摩擦焊流动性和热过程的 模拟分析,可以得到与实际焊接相符合的研究结果。而其模块化的参数设定以及 便于修改的材料文件,使得该模拟过程可以不依赖于试验测量进行,证明该软件 对于搅拌摩擦焊具有一定的指导意义。

关键词: 搅拌摩擦焊;有限元分析;流动性;铜箔标记试验; 热过程

# ABSTRACT

The finite element simulation codes MORFEO was used to analyze the effect of both the geometry of the pins and the rotation speed on the flowing patterns of 4mm thick 2024-T3 aluminum butt joint in friction stir welding (FSW), and the thermal cycles were also investigated. In the analysis of flowing patterns, the rotation speed was 500rpm, 600rpm, 800rpm and 980rpm with the welding speed of 80 mm/min, and the pins were cylindrical and conical. The simulation results shows that particles of different layers along the thickness of the workpiece are deposited on both sides behind the stir tool, when the conical pin and 600 rpm are utilized. Particles on the advancing side (AS) flows around the front of the pin to the back of the pin along with the particles on the retreating side (RS). However when other welding parameters are utilized, particles can only get to RS, leaving large vacant space on AS behind the pin. The marker experiment was conducted to verify the simulation results. The copper foils are bent and smashed which is similar to the simulation results. The microstructure adjacent to the bending foil is stretched, depicting it the characteristic texture in the thermomechanical affected zone (TMAZ).

2024-T3 and 7075-T6 aluminum were also used in the marker experiment of T-joint and overlap joint to observe the material flowing characteristics in FSW. In the experiment of T-joint, similar circumferential flowing as it in the butt joint was observed in the skin. The material of skin and stringer is blending through a complicated staggered way of axial flowing. Due to such axial flowing patterns, it tends to form a "dead zone" in the "fillet zones". Thus tunnel defects may appear because of the insufficient material flowing. Material in the overlap joint mainly flows axially. Material on AS tends to move to the upper centerline, whereas material of the upper and lower plates on RS moves in different direction. Material on the upper plate may move to the lower centerline. Material on the lower plate is forced to the upper plate due to the pin and adjacent colder material.

Thermal cycles of the 4 mm thick 2024-T3 aluminum butt joint were analyzed when the welding speed was 80 mm/min and the rotation speed was 600 rpm. It can be seen that at the beginning of the welding, the workpiece around the stir tool is heated rapidly and the peak temperature is 450  $^{\circ}$ C high. As the welding period

continues, the temperature rises more slowly and the peak temperature is a little lower. An elliptic isothermal region is also observed, with a wide temperature interval behind the stir tool and a narrow interval in front of the tool. By using the software MORFEO, verified simulation results of flowing and thermal cycles are obtained. The modular parameter setting and flexible material document makes the simulation procedure independent from experimental measurement, which brings guidelines to FSW process.

**KEY WORDS:** friction stir welding; finite element simulation; flowing patterns; marker experiment; thermal cycles

| _ |  |  |
|---|--|--|
| Ħ |  |  |
| н |  |  |

录

| 第一 | 章   | 绪    | 论              |       |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>1  |
|----|-----|------|----------------|-------|--------------------|---------------|-------|---|-------|-------|--------|
|    | 1.1 | 选题   | 背景             | 及研究意  | 义                  |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>1  |
|    | 1.2 | 搅拌   | 摩擦             | 焊原理   |                    |               |       |   |       |       | <br>2  |
|    | 1.3 | 搅拌   | 摩擦             | 焊的研究  | 现状                 |               |       |   |       |       | <br>3  |
|    |     | 1.3. | 1 搅打           | 半摩擦焊的 | 的热源研究              | रिं           |       |   |       |       | <br>3  |
|    |     | 1.3. | 2 搅排           | 半摩擦焊的 | 的流动性硕              | 开究            |       |   |       |       | <br>4  |
|    |     | 1.3. | 3 搅排           | 半摩擦焊的 | 的温度场码              | 开究            |       |   |       |       | <br>6  |
|    | 1.4 | 铝合   | 金数             | 值模拟分  | 析存在的               | 问题            |       |   |       |       | <br>7  |
|    | 1.5 | 本文   | 、研究            | 的主要内  | 容                  |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>7  |
| 第二 | 章   | 有限   | 元分             | 析软件 M | ORFEO 自            | <b>り理论基</b> 码 | 础及介绍. |   | ••••• | ••••• | <br>9  |
|    | 2.1 | MOF  | RFEO           | 软件界面  | 介绍                 |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>9  |
|    | 2.2 | 控制   | 方程             |       |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>11 |
|    | 2.3 | 搅拌   | 摩擦             | 焊热源   |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>11 |
|    | 2.4 | 材料   | 本构             | 方程    |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>13 |
|    |     | 2.4. | 1 局音           | 部分析本林 | 为方程                |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>13 |
|    |     | 2.4. | 2 总位           | 本分析本林 | 为方程                |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>14 |
|    | 2.5 | 边界   | 条件             |       |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>14 |
|    | 2.6 | 本章   | 小结             |       |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>16 |
| 第三 | 章   | 2024 | - <b>T</b> 3 钅 | 日合金搅拌 | ¥摩擦焊X              | 讨接接头洋         | 流动性分析 | F | ••••• | ••••• | <br>17 |
|    | 3.1 | 2024 | -T3 钅          | 日合金对持 | 医焊缝局音              | 『建模           |       |   | ••••• | ••••• | <br>17 |
|    |     | 3.1. | 1 试            | 验材料   |                    |               |       |   |       | ••••• | <br>17 |
|    |     | 3.1. | 2 搅            | 拌工具   |                    |               |       |   |       |       | <br>17 |
|    |     | 3.1. | 3 建            | 模过程   |                    |               |       |   |       | ••••• | <br>18 |
|    | 3.2 | 2024 | -T3 钅          | 日合金流动 | 的性数值分              | 分析结果          |       |   |       | ••••• | <br>20 |
|    |     | 3.2. | 1 搅            | 拌头周围  | 材料的温度              | 度和速度          | 场     |   |       |       | <br>20 |
|    |     | 3.2. | 2 水            | 平方向的  | 流线分布               |               |       |   |       | ••••• | <br>23 |
|    |     | 3.2. | 3 水            | 平方向前  | - 走側质点             | 周向速度          | ••••• |   | ••••• | ••••• | <br>26 |
|    |     | 3.2. | 4 竖            | 直方向材料 | 料质点的               | 流动特点          |       |   | ••••• | ••••• | <br>27 |
|    | 3.3 | 2024 | -T3 钅          | 日合金对持 | <del>侯</del> 焊缝标 ü | 己材料试验         | 脸     |   | ••••• | ••••• | <br>29 |
|    |     | 3.3. | 1 试            | 验材料   |                    |               |       |   | ••••• | ••••• | <br>29 |
|    |     |      |                |       |                    |               |       |   |       |       |        |

| 3.3.2 试验结果                        |    |
|-----------------------------------|----|
| 3.4 本章小结                          |    |
| 第四章 接头形式对搅拌摩擦焊材料流动性的影响            | 35 |
| 4.1 搅拌摩擦焊 T 型接头                   | 35 |
| 4.1.1 T 型接头制备                     | 35 |
| 4.1.2 焊接材料和焊接参数                   |    |
| 4.1.3 T 型接头焊缝形貌                   |    |
| 4.1.4 T 型接头铜箔流动                   |    |
| 4.2 搅拌摩擦焊搭接接头                     | 41 |
| 4.2.1 搭接接头制备和焊接参数                 | 41 |
| 4.2.2 搭接接头材料流动性                   |    |
| 4.3 搅拌摩擦焊搭接接头拉伸性能                 | 44 |
| 4.4 本章小结                          | 45 |
| 第五章 2024-T3 铝合金薄板基于 MORFEO 的热过程分析 | 46 |
| 5.1 2024-T3 铝合金薄板对接形式的温度场总体建模     | 47 |
| 5.2 铝合金对接薄板的温度场分布                 |    |
| 5.3 焊缝横截面上不同点的温度曲线                | 49 |
| 5.4 本章小结                          |    |
| 第六章 结 论                           | 53 |
| 参考文献                              |    |
| 发表论文和参加科研情况说明                     | 58 |
| 致 谢                               | 59 |

# 第一章 绪 论

#### 1.1 选题背景及研究意义

人类工业文明的发展伴随着材料的使用和变迁,随着大规模冶炼钢铁成为现 实,钢铁就逐渐成为一种不可替代的强度材料运用于生活的各个领域。而随着航 空航天工业,高速列车的飞速发展,这种不可替代性也必将发生转变。传统的碳 钢,合金钢和高强钢由于其易腐蚀,密度大,并且一般情况下塑性和强度无法同 时达到很高的标准这些局限性,已经无法满足高质量产品的服役环境要求。此时 迫切需要一种轻质,强度、塑性高的材料来代替传统的铁碳合金。经过人们研究, 铝合金以其密度小,强度高,塑性好的特点,作为一种新型材料已经开始运用于 新时代工业领域的众多角落,焊接技术也因此面临一个重要的转折点。传统的熔 焊方法,由于其加热温度高,加热面积大,在焊接铝合金这种熔点低,导热率大, 易氧化且线膨胀率大的有色金属时,极容易产生合金烧损,热输入高,气孔和夹 渣以及焊件变形大等缺点。更有甚者,如2xxx,6xxx系列铝合金会产生不可焊 的难题。

自从英国焊接研究所(TWI)于1991年发明了搅拌摩擦焊(FSW)技术<sup>[1]</sup> 以来,焊接铝合金所遇到的困难都基本得到了解决。搅拌摩擦焊属于一种固相连 接方法,即焊接温度低于材料熔点,可以保证焊缝加热面积小,焊件变形较小。 焊接过程不需要填充材料,因此不会造成飞溅、焊缝与母材成分过渡不均匀导致 的应力腐蚀等缺陷。由于工件表面被搅拌工具覆盖,焊缝不会直接与空气接触, 因此不需要添加保护气体,在节省焊材的同时也大大降低了气孔倾向。除此以外, 搅拌头对焊缝材料的机械搅动作用以及搅拌摩擦焊同传统熔焊机理的不同,使得 该项技术还有焊缝成形好、裂纹倾向小、焊前清理工作少、自动化程度高和焊接 效率高等优点。

然而,同传统熔焊相似,搅拌摩擦焊焊接接头性能好坏也是与焊接参数的选 取密切相关的。作为一种年轻的焊接方法,参数的选取基本依赖于施焊者的操作 经验,同时,仍然需要一系列的工艺研究来确定参数的选取范围,即参数优化。 目前常用的研究方法主要分为试验和数值模拟,前者包括焊缝接头组织微观形貌 观察,焊缝与母材的拉伸试验,硬度测试等;后者的研究内容则主要针对于焊缝 材料流动性,焊件温度场以及残余应力的分析。然而工艺试验必然会造成一定量 焊材的浪费,并且研究周期较长,研究结果的总体性和确定性无法得到保证。数 值模拟作为前期工艺参数测试方法,可以大大节省焊材和资源的消耗。并且数值 模拟考虑的是参数对于模型的总体效果,因此得到的结果并非只能代表局部区 域。但是数值模拟的计算模型建立是否合理,仍然需要一定量的焊接工艺试验加 以确定。

鉴于数值模拟分析在工程应用中的有益价值,越来越多的学者开始尝试建立 搅拌摩擦焊过程的热力学模型,希望计算结果能与实际焊接中相对应。然而大部 分的数值模拟分析都是以学术研究为目标的验证性分析,作为一项在轻质合金加 工领域内逐渐运用开来的焊接技术,搅拌摩擦焊急需要一种可以不依靠或者极少 量依靠试验验证和测量,以达到焊接参数优化和性能研究目的的数值分析技术。 鉴于此,本文选取搅拌摩擦焊接专业有限元分析软件 MORFEO 作为数值分析工 具,并结合少量流动性试验实现该软件对于焊接的指导作用。

#### 1.2 搅拌摩擦焊原理

搅拌摩擦焊过程如图 1-1 所示<sup>[2]</sup>,搅拌头在焊接中对工件产生力和热的共同 作用,它主要由两部分组成。一是与工件表面接触的搅拌轴肩,通过面与面之间 的摩擦产热,提供焊接过程所需的 80%左右的热量,同时它对焊缝部分材料有一 个向下的挤压作用,防止材料向上运动,控制焊缝成形。二是与轴肩相连深入到 工件内部的搅拌针,通过摩擦作用提供 20%左右的热量,并通过旋转带动下部材 料向上运动。焊接过程中搅拌头自身的旋转速度和相对于工件沿焊缝前进的焊接 速度是搅拌摩擦焊工艺的两个重要参数。焊缝上搅拌头旋转速度与焊接速度相同 的一侧称为前进侧,相反的一侧称为后退侧。



搅拌摩擦焊过程主要分为三个阶段,即插入阶段(plunge period),旋转阶段(dwelling period)和焊接阶段(welding period)<sup>[3]</sup>。在第一个阶段,搅拌针深入焊缝,使轴肩与工件表面接触。第二阶段搅拌头原地旋转,通过摩擦和挤压使材料变形生热。当材料达到塑性状态,搅拌头开始前进焊接,进入第三个稳定焊接阶段。随着搅拌头的前进,位于前方的材料在搅拌头的旋转带动下绕过搅拌针,填入搅拌针后方留下的轨迹中。以这样一种回填式的运动模式,完成对两块板材的连接。目前,搅拌摩擦焊已经可以运用于铝合金,镁合金,铜合金和钛合金的材料连接中,更有甚者,该项连接技术也可以运用与不锈钢的材料连接中。

#### 1.3 搅拌摩擦焊的研究现状

自从搅拌摩擦焊技术于 1991 年由英国焊接研究所申请专利以来,各国学者 和技术人员都致力于搅拌摩擦焊的研究当中,主要包括焊接工艺参数的优化、焊 接材料的创新以及接头形式的多样化,研究的手段主要分为试验和数值模拟技 术。由于搅拌摩擦焊具有自动化程度高的特点,因此其焊接参数一旦确定,焊缝 质量的稳定性可以得到保证。国内外学者通过大量的工艺试验,通过观察焊缝组 织,焊缝力学性能以及焊缝金属的流动性特点,可以确定合理的焊接参数范围, 以指导生产实践。而数值模拟技术则主要分为数值差分,微分的有限元方法,来 得到所需要的流动、力学、热循环等性质。由于其相对于试验方法大大节省了焊 接材料的使用,因此在对搅拌摩擦焊的研究分析中具有广阔的前景。

#### 1.3.1 搅拌摩擦焊的热源研究

绝大部分焊接方法都离不开热源,适当的热输入是焊接接头形成的第一要素。而在对搅拌摩擦焊做数值模拟分析的过程中,确定热源形式也是需要完成的第一步。Schmidt<sup>[4]</sup>基于库仑定律提出了一种热源模型,由三部分构成,分别是轴肩表面,搅拌针侧面和搅拌针端面,如图 1-2 所示。介于搅拌摩擦焊过程中复杂的接触形式,他利用搅拌头和工件之间的速度关系,提出了一个接触条件变量, 用以定义滑动、粘性接触以及两者结合的接触形式。通过对于焊接过程中压力和转矩的测量,可以推断是何种接触形式起到主要作用,他认为当焊接压力增大而转矩基本不变时,粘性接触起到主导作用。为了保证模拟温度场与实际焊接中的一致性,鄢东洋和史清字<sup>[5]</sup>提出了以温度为变量的计算方法以代替分段热源法。 具体做法是利用工件表面不同节点处的温度值以得到关于时间和空间的温度函数,将此温度函数添加到力学模型中,以得到焊接应力和变形。他们认为,由于该温度函数能反应不同时间的温度变化,因此可将焊接过程压缩,以提高计算效 率。为避免摩擦产热对于摩擦系数的估算,Khandkar<sup>[6]</sup>利用转矩定义了热源形式。 同样是分为轴肩,搅拌针侧面和搅拌针端面三个部分,热量分配率分别是这三个 部分所产生转矩占总转矩的百分比。每个表面所产生转矩由试验确定的一个固定 不变的剪切应力值计算获得,总热量则是对试验过程中的转矩进行连续测量与转 速相乘获得。在他的研究中假设引入垫板和未引入垫板两种情况,分别计算了散 热系数不同时工件上温度的分布。通过与试验对比分析,他认为在模拟中结合试 验获得的散热参数能有效的提高结果的准确性。上海交通大学的汪建华<sup>[7]</sup>,基于 与日本大阪大学共同开发的 WTEPP3D 程序,提出了一种热弹塑性有限元计算模 型,用以分析搅拌摩擦焊的热过程和残余应力分析。该热源模型是以传统的摩擦 定律为机理,假设热源全部由搅拌轴肩产生,并定义搅拌针直径为零。模拟结果 与试验测量基本一致,但是该模型并未考虑搅拌过程发生的塑性变形,热力耦合 计算并未引进。李红克<sup>[8]</sup>提出了一种热量自适应的搅拌摩擦焊热源模型,产热本 质同样是摩擦定律,只是将应力用与温度相关的材料屈服极限代替,比热和导热 率同样是与温度相关的函数。模拟温度曲线与试验在高温段形态有些区别,这可 能是因为高温段的材料参数是采用外推法得到的,与实际有出入。



图 1-2 搅拌摩擦焊热源的三部分<sup>[4]</sup>

#### 1.3.2 搅拌摩擦焊的流动性研究

前文提到搅拌摩擦焊的焊缝接头是由材料的交互运动所形成的,具体说来, 是原本固态下的金属在热与机械搅拌的共同作用下达到塑性流动状态,使原本分 离的两部分金属能沿搅拌针做周向和轴向运动而形成的。焊缝的形成机理决定了 对搅拌摩擦焊中材料流动研究的重要性,目前对这方面的研究主要有两种方法, 一是试验方法,二是数值模拟方法。

最早开始对搅拌摩擦焊过程材料的流动特征进行试验探索的是 Colligan<sup>[9]</sup>, 他采用急停技术以求得到搅拌头附近材料流动的快照。但是这只能反映搅拌头周 围材料的瞬时状态,却很难追踪到焊接过程中材料究竟运动至何处,因此 Colligan<sup>[10]</sup>提出将直径为0.38mm的钢球镶嵌在母材金属焊缝中心线的不同方位, 再通过 X 射线技术追踪钢球的运动。Reynolds<sup>[11]</sup>运用异种铝合金在金相腐蚀后表 现出的不同颜色特征,采用异种铝合金作为标记材料,但是这种方法只能用来观 察焊缝形成后的金属位置,而不能说明焊接过程中材料是如何流动的。Seidel<sup>[12]</sup> 在观察 AA2195 铝合金对接接头焊接时,将 AA5454-H32 作为标记材料镶嵌在焊 缝中心线两侧不同深度位置上。金相分析时发现标记材料在搅拌针的运动轨迹中 始终保持连续状态,并且关于焊缝中心线并非是对称分布的,并且大块的材料被 输送至其原始位置后方。国内的柯黎明<sup>[13]</sup>也利用这一特点,将LY12和LF6两种 铝合金交替层叠构成搭接,通过使用带螺纹和不带螺纹的两种搅拌针做对比,来 观测螺纹对于材料轴向运动的影响,并提出了抽吸-挤压理论来解释焊缝中"洋 葱环"的出现。London<sup>[14]</sup>焊接 6.3mm 厚 7075 铝合金板对接时,使用了 SiC 和 W 原子作为示踪原子,将其镶嵌在工件中心厚度的前进侧和焊缝中心线上。通过利 用 X 射线衍射仪发现,搅拌针前侧金属向上运动幅度较大,而焊缝中心线的上 升运动则较小。Guerra<sup>[15]</sup>将铜箔放置在焊缝中心线处,由于铝合金与铜不会发生 反应,且即使在金相腐蚀后铜箔也会表现出鲜明的颜色,这样便于观测焊接后材 料的流动特征。国内有王希靖<sup>[16]</sup>通过使用铁粉作为标记材料来研究 LF2 铝合金 搅拌摩擦焊的流动特点,具体做法是在铝板不同深度嵌入铁粉,焊后利用扫描电 镜能谱分析观测铁粉在焊缝平面的分布。结果显示,前进侧大部分材料向后运动, 而后退侧材料都向后运动,并有一部分可以达到前进侧。Liechty<sup>[17]</sup>则将铜箔换 成了不同颜色的塑泥来观察搅拌摩擦焊中的材料流动,但是由于焊接温度下塑泥 已经达到熔点并且其延展性也与金属有着显著差别,因此其在准确度上还有待商 榷。

由于数值模拟技术的发展,更多的学者也投身于用数值模拟方法探索搅拌摩 擦焊中的材料流动研究。Colegrove<sup>[18]</sup>利用计算流体力学(CFD)软件 FLUENT 对带有螺纹的搅拌工具进行建模,并分析其附近的材料流动。结果表明,在越接 近轴肩的的位置会有更多的材料扫过搅拌针,但是并没有分析在螺纹的影响下材 料沿搅拌针的轴向运动。Reynolds<sup>[19]</sup>提出了一个用搅拌头每旋转一周所行进的 距离来表示材料应变的公式,但是该公式只与低转速下的材料变形较符合。Xu 和 Deng<sup>[20]</sup>建立搅拌摩擦焊材料的二维模型,基于有限元分析软件 ABAQUS 来 分析材料的流动特征。但是为了保证计算收敛,设置搅拌针长大于工件厚度,这 显然与实际不符。Fratini<sup>[21]</sup>在研究 6082T6 铝合金薄板 T 型接头连接面的材料流

5

动特点时,使用 DEFORM-3D 建立了一个连续的三维模型,即使壁板和筋板作 为一个整体。同时,他设定了圆锥形和圆柱形两种搅拌针来分析对连接面材料流 动性的影响,并分别设计了黄铜作为标记材料的试验进行验证。焊缝横截面上观 察到壁板的材料由后退侧绕过搅拌针后方流向前进侧,锥形搅拌针对于材料的上 下流动促进作用更加有效,并且由于它的挤压力使得材料更容易流向连接面的圆 角处,获得更好的角焊缝成型。张昭<sup>[22]</sup>利用 ABAQUS,通过对不同形状的搅拌 头建模,分别研究了不同形状搅拌头对于材料变形的影响。哈尔滨工业大学的赵 衍华<sup>[23]</sup>等将 2014 铝合金搅拌摩擦焊过程模拟为一个二维层流的非牛顿流体,基 于 FLUENT 发现焊接过程中材料并非环绕搅拌针两侧运动,而是仅仅绕过后退 边。

#### 1.3.3 搅拌摩擦焊的温度场研究

Tang和Guo<sup>[24]</sup>经过试验探索不同搅拌摩擦焊接参数下沿6061-T6铝合金工件 厚度和垂直于焊接方向上的温度分布,结果发现焊缝中出现的最高温度也总是低 于材料熔点的80%,而通过提高下压力和搅拌头旋转速度也可以增大焊接过程的 峰值温度,他们认为轴肩在搅拌摩擦焊的产热上起到至关重要的作用。而在对焊 缝组织的观察中他们发现了焊缝中心线存在由于变形挤压和动态再结晶形成的 等轴细晶粒,证明焊接过程没有发生熔化。Khandkar<sup>[25]</sup>将试验与模拟结合起来研 究 6061-T651 铝合金对接过程的温度场,其热源由转矩和旋转角速度的乘积得 到,具体来说是由轴肩表面,搅拌针侧面和搅拌针端面三部分组成。为了与实际 相结合,他分别对于不带垫板和带垫板两种形式建立三维模型。不带垫板的工件 底面设立多种对流散热系数,以确定最佳散热系数。对带垫板的工件,还需要对 工件与垫板的接触间隙设定合适的传热系数。通过计算分析,结合试验测量的温 度场,得到两种情况下的最佳散热系数,工件中的温度场分布与试验基本一致。 Buffa<sup>[26]</sup>利用有限元分析软件DEFORM-3D对7075铝合金搅拌摩擦焊过程进行了 数值模拟,提出了一种连续有限元模型用以分析对接接头的温度场和应力场。其 连续性即在于将两块对接板材建立一个三维模型,不存在对接面,这样可以减少 由于模型间断而引起的计算不收敛。材料性质属于固体粘塑性,材料常数也是恒 定值。国内学者对于搅拌摩擦焊温度场的数值模拟工作主要集中在与试验的对比 验证上,兰州理工大学的郭瑞杰<sup>[27]</sup>利用 ANSYS 对硬铝 LY12 的对接接头进行了 模拟,热源利用摩擦生热,引进了一个分配系数以确定轴肩和搅拌针分别产热百 分比,并通过热电偶测温对此模拟结果进行了验证。南昌航空工业学院的柯黎明 <sup>[28]</sup>也是基于库伦摩擦定律,列出防锈铝 LF7 的屈服强度随温度变化方程,作为 搅拌摩擦焊热输入。通过模拟得到的温度场发现,焊缝中心处搅拌头前段高温区

6

比后端小,并将该温度场与材料流动结合分析,得到前进边与后退边材料分别从 搅拌针两边向后方流动,该结论与上文流动性模拟得到的结果不同。

# 1.4 铝合金数值模拟分析存在的问题

如前文所述,目前针对铝合金运用数值模拟分析方法研究的领域主要分为三 大块,即焊缝附近的材料流动性分析,整体工件内的温度分布和残余应力分布。

从源头上来说,这三方面的数值模拟分析都必须依赖于一个加载的热源。已 有的研究方法主要是基于经典的库伦摩擦定律或是采用转矩与转速的乘积,来定 义搅拌摩擦焊过程的热输入。这两种方法都有一个共同的特点,即是由机械作用 的外部产热形式,忽略了电动机的输出功率必然会大于实际用于焊接的能量。一 些学者采用添加有效系数来确定这部分实际用于材料连接的能量,但是都是基于 经验和假设。除此以外,无论是摩擦生热,还是电动机的输出功率,搅拌头对工 件施加的下压力和搅拌头收到的转矩都需要进行试验测量。这部分测量工作使模 拟分析工作变得更加繁复,而单纯运用数值模拟的便捷性和经济性就无法得到充 分的体现。

焊缝附近材料流动性的分析主要借助的是分析材料质点速度场,在经过一段 时间达到基本稳定的状态时(准稳态),通过观察不同质点的位置分布来预测实 际焊接中的材料流动性。目前这方面的研究主要是采用拉格朗日法和欧拉法,研 究对象主要是简单的对接接头,而对于较复杂的T型接头和搭接接头,主要运用 的还是标记材料法。在对接接头的流动性分析中,许多学者为了保证计算结果的 收敛,对参数设定做出了修改,这其中很多是与实际焊接情况不相符,并且有些 是与实际相悖的,这些修改是无法实现数值模拟对焊接工艺的指导作用的。因此, 总是需要大量的验证试验,以检测模拟结果是否正确。

# 1.5 本文研究的主要内容

基于以往对铝合金搅拌摩擦焊数值模拟分析存在的一些问题,本文选用了专 业的搅拌摩擦焊数值模拟分析软件 MORFEO 作为研究工具,对铝合金在焊接过 程中的材料流动和温度循环进行数值模拟。在流动研究部分,采用数值模拟与试 验分析相结合的方法,对搅拌摩擦焊过程对接接头,T型接头和搭接接头分别进 行研究,以得到材料流动与焊接接头缺陷及微观组织的联系。其中模拟部分的工 作是建立焊接过程局部三维有限元模型,包括搅拌头,局部工件和垫板,工件的 材料特性设定为粘塑性以分析质点速度得到准稳态的质点迹线图。试验部分主要 是采用标记试验法,通过观察 0.2mm 厚铜箔在焊缝中的变形和移动情况来推测 其附近铝合金的流动。对于温度循环的研究主要是针对于对接形式的工件整体进 行研究,材料特性设定为弹塑性的总体分析,热源是基于前期的局部分析得到的。 具体的内容包括:

(1) 借助 MORFEO 的局部分析模块,研究转速和搅拌针形状对于工件不同厚度层面的材料流动性的影响。

(2) 针对于数值模拟结果,设计铜箔标记试验以研究不同转速下材料的流动 情况与焊缝组织的联系。

(3) 将 2024-T3 和 7075-T6 两种铝合金运用在 T 型接头和搭接接头中,研究接头形式对于搅拌摩擦焊中材料流动性的影响。

(4) 借助 MORFEO 的总体分析模块,对 4mm 厚的 2024-T3 铝合金对接工件 建模,分析搅拌摩擦焊的热过程。

8

# 第二章 有限元分析软件 MORFEO 的理论基础及介绍

# 2.1 MORFEO 软件界面介绍

MORFEO 有限元仿真软件由比利时 CENAERO 公司所开发的针对于搅拌摩 擦焊接过程的分析软件,用以模拟焊接过程中的流场,温度场及残余应力场。该 软件涉及对搅拌摩擦焊过程的局部分析和总体分析,分别使用的是热流体模型以 分析搅拌头周围金属材料的流动性,固体力学模型以分析工件温度场以及工件残 余应力场。热流体模型中默认材料属性为粘塑性,这一默认属性是相对准确的, 一般搅拌摩擦焊中使用的铝合金一类轻金属材料在塑性状态下的雷诺系数较小, 因此可认为粘性力起到主导作用。而搅拌摩擦焊的热源也全部由粘塑性耗散提 供,局部分析模块使用欧拉法可以获得质点速度,局部工件温度分布和总体塑性 变形功。在总体分析中,将局部分析得到的塑性变形功导入,根据搅拌头形状以 及分配系数确定轴肩负责的面热源和搅拌针负责的体热源。这部分分析中使用的 是固体力学模型,材料属性为弹塑性,无论在热传导还是力学行为分析上都更具 有说服性。首先计算获得工件的温度分布,而材料的机械性能参数定义是与温度 相关的函数,因此便可以获得残余应力分布。除此以外,由于焊接过程的热输入 几乎全部由材料的粘塑性耗散所提供,因此对热源的定义可基本不依靠试验测 量,主要与搅拌头的形状尺寸以及具体材料参数有关。

模拟分析流程如图 2-1 所示,需要先进行局部分析再完成总体分析。其中局部分析的主要目的是需要计算出搅拌头附近材料所产生的塑性变形能,尺寸及网格定义如图 2-2 (a)所示,包括对搅拌头,工件和垫板纵截面各部分几何尺寸和需要细化网格的尺寸范围。材料加载主要分为工件、垫板和二者接触界面的材料 热物理性能文件的添加,如图 2-2 (b)。该部分输出的计算结果可以有塑性变形能、 温度和速度。总体分析模块则需要利用局部分析模块得到的塑性变形功计算工件 整体的温度、残余应力和应变场。首先需要将工件和垫板的三维网格文件导入, 其次也需要加载材料文件,而这部分材料文件主要涉及到被焊工件和垫板的热学 和力学性能参数,是与温度相关的函数。在焊接过程定义中,需要输入局部分析 得到的塑性变形能,并定义热源加载的平面单元和体单元,如图 2-2(c)。边界条 件定义包括散热平面和位移边界定义。



图 2-1 模拟分析流程

| Loc   | al FSW Tool Definition           |                  |                 |   |   |   |                               |
|---|----------------------------------|------------------|-----------------|---|---|---|-------------------------------|
| Geor  | netrical Definition of the tool  | 搅拌头              | 几何尺,            | <del>با</del>                                     |   |   | a                             |
| 0.0   | 13 tool_d                        | 0.012            | should_d        |   |   |   |                               |
| 0.0   | 0036 pro_in_top_d                | 0.0042           | pro_out_top_    | d 0.0036  | pro_in_bot_d                                  | 0.0042  | pro_out_bot_d                 |
| 0.0   | 0085 tool_L1                     | 0.004            | tool_L2         | 0.0035  | prob_L  | 0.0013  | sh_scr_dep                    |
| Geor  | netrical Definition of the Plate | s:垫板尺            | こす              |   |   |   |                               |
| 0.0   | 004 Wkp_th                       | 0.12             | Wkp_d           |   |   |   |                               |
| 0.0   | 0001 con_th                      |                  |                 |   |   |   |                               |
| 0.0   | 04 bckP_th                       |                  |                 |   |   |   |                               |
| Appli   | cation of the Mesh Refineme      | nts: 细化          | 网格尺寸            | ť   |   |   |                               |
| 0.0   | 0007 Lay1_th                     | 0.0001           | Lay2_th         | 0.00015   | Lay3_th                                       | 0.0003  | Lay4_th                       |
| 0.0   | 003 mesh_refin1                  | 0.006            | <br>mesh_refin2 | 0.002   | _ msh_rf_bckP1                                | 0.006   | msh_rf_bckP2                  |
|   |                                  |                  |                 |   |   |   |                               |
| _什 扼扞头 =<br>egion to which this material is<br>Select all<br>* Select from viewport<br>2000 | Physical groups                  | list [ld1; ld2;] |                 | Type 1<br>Fill-in to define the h<br>Measured Por | Heat source by<br>eat source:<br>wer 1500 [W] | pe —— 热源<br>Shoulder Ratio: [75<br>Probe Ratio: [25 | 和类<br>轴肩和搅拌针<br>热量分配比         |
| efine material from:  |                                  |                  |                 | Tool Dimensions :                                 | Shoulder Hab                                  | Power distribution                                  | Probe Ralio                   |
| 机械性   | ŧ                                |                  |                 | Radiu   | s O 0.01 [m]                                  | Radius P 0  | 0027 [m]                      |
| Norton-Hoff file  | ntact_thermo_norton_hoff.mat     | Browse           |                 | aar na  | ans process that                              | cetter los  | 0005 [m]                      |
| O Norton-Hoff Temp file   | 1_norton_hoff_temp_2024.mat      | Browse           |                 | Line<br>Fill-in to define the v                   | Trajectory type                               | 1   |                               |
|   |                                  |                  |                 | Initial tool axis position                        | on: 0 x0                                      | yo cos  | - <sub>z[m]</sub> 搅拌头初始位置<br> |
| 接触导   | 的热特性                             |                  |                 | Tool axis   | 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 1      |   | - z                           |
| Thermal properties file   | -T3-local/thermal_contact.mat    | Browse           |                 | 0 Star  | t time [ s ]<br>t advancing time [ s ]        |   |                               |
|   | fsw thermal contac  Therma       | law              |                 | 150 End   | tme[s] 热源加                                    | 载体单元  | 面单元                           |
| Solidus temperature   | Celsius                          |                  |                 | Volume Domain defi                                | export  | Surface D   | Iomain definition:            |
|   |                                  | Remove this n    | naterial        | < As analyticat                                   | region Édit                                   | AL AL   | anatyticar region Edit        |
|   | ·······                          |                  |                 |   |   |   | Remove this sta               |

图 2-2 软件界面

(a)局部尺寸定义界面(b)局部材料加载界面(c)总体焊接过程定义

#### 2.2 控制方程

有限元分析软件 MORFEO 选取欧拉法研究流体运动,该方法是对质点经过 固定空间位置时运动参数变化进行研究,因此流体运动特征量,如速度,加速度 及压强等都是时间和空间坐标的连续函数,与拉格朗日法比较更加简单。

根据流体力学基本知识,选取一个六面体单元研究,由质量守恒定律,牛顿 第二定律可分别写出其质量和动量守恒方程<sup>[29]</sup>,如公式(2-1)(2-2)所示。

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$\rho G - \nabla \sigma = \rho \frac{DV}{Dt}$$
(2-1)
(2-2)

其中

 $\rho$ 是流体密度

G 是体积力

t 是时间

 $\nabla_{: \text{哈密顿算子},} \nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$ 

ν: 材料质点运动速度分量

 $\sigma: 应力张量$ 

搅拌摩擦焊过程涉及到材料的大量塑性变形,绝大多数属于粘塑性变形,弹 性变形基本可以忽略,因此在热-流体模型的稳态计算中,可认为金属材料是不 可压缩的,即材料密度不随时间而变化。对热-流体模型的计算属于稳态计算, 因此可以忽略对速度时间导数的求解,此外,由于流体雷诺数远小于1,动量守 恒方程中的对流项也被忽略。<sup>[30]</sup>

因此得到简化的质量和动量守恒方程如公式(2-3)(2-4)所示。由此可知, 采用欧拉方程求解,对于理想不可压缩流体,已知材料密度,初始坐标,联合质 量、动量守恒方程可以求解质点速度及压力。

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \tag{2-3}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0 \tag{2-4}$$

# 2.3 搅拌摩擦焊热源

模型中考虑的唯一耦合项是作为热源的材料塑性变形功 Q,因此能量守恒方

程(2-5)是可单独求解的。热源的计算在第一部分流体动力学模型中,这就不 再需要试验测量来得到热源输入。本文将搅拌头与工件的接触面看做粘性接触, 因此热量产生主要由材料粘塑性耗散来提供<sup>[31]</sup>,如公式(2-6)所示。

$$\rho c_{p} v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q$$

$$Q = \beta \sigma : \dot{\varepsilon}^{vp}$$
(2-5)
(2-6)

其中

 $\rho$ : 材料密度

 $c_p$ : 比热容

T: 温度

k:粘性系数

β: 泰勒-昆尼系数, 定义有多少塑性变形能量转变为焊接所需要的热量, 一般取 0.9~1.0

*έ*<sup>ν</sup>: 塑性变形的应变速率

 $\sigma = s - pI, \sigma$  是应力张量, s 是偏应力张量, p 是压力, I 是二阶张量

: 是应力和应变速率张量之间的双缩写式

这部分是在局部计算中完成的,而搅拌摩擦焊中的热源形状是由搅拌头的几 何形状所决定的,将局部计算得到的总体热源数值代入总体分析中,MORFEO 将此热源划分为一个面热源和一个体热源,分别对应的是轴肩与工件的接触面和 搅拌针与工件接触的旋转体,两者的热通量密度公式分别如公式(2-7)(2-8) <sup>[31]</sup>。

$$q_{s}(r) = \frac{3}{2\pi} Q_{s} \frac{r}{R_{0}^{3} - R_{1}^{3}}$$
(2-7)

$$q_{p}(r) = \frac{Q_{p}}{\pi \left(R_{2}^{2} - R_{1}^{2}\right)t}$$
(2-8)

其中总热量 $Q = Q_s + Q_p$ , Q<sub>s</sub> 代表轴肩产生的热量,  $Q_p$  代表搅拌针产生的热量, 二者的分配比一般取 3:1,可由用户自定义。r 代表距离搅拌头轴线的距离,t 是搅拌针的长度,如图 2-3 所示, $R_1$ 代表搅拌针半径, $R_2$  代表搅拌针周围搅动区域的半径, $R_0$  代表轴肩半径。



图 2-3 热通量密度定义半径分布[31]

# 2.4 材料本构方程

# 2.4.1 局部分析本构方程

在局部分析热流体模型中所使用的材料本构方程是 Norton-Hoff 法则,这一 法则描述了粘塑性材料应力状态与应变速率之间的关系<sup>[32]</sup>,其中涉及到的两个重 要参数是材料粘度 K 和应变速率敏感系数 m,如公式(2-9)所示。不同温度和 应变速率下进行一系列热扭转试验,通过这些试验可以得到不同温度下的 K 值 和 m 值。

$$s = 2K(T)\left(\sqrt{3}\dot{\varepsilon}\right)^{m-1}\dot{\varepsilon}$$
(2-9)

其中:

s: 应力张量

*Ē*:有效应变

K 是粘度系数

m 是应变速率敏感系数,一般取 10

*Ė* 是应变速率

其中材料粘度 K 随温度变化而变化,在液化温度时的粘度  $K_l$ 比真值降低了 三个数量级,液相线和固相线间的粘度由公式(2-10),(2-11)计算获得, $f_l$ 表 示液相组分含量, $T_s$ 为固相线温度, $T_l$ 为液相线温度。

$$K(T) = K(1 - f_1) + K_1 f_1$$
(2-10)

13

$$f_l = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \cos \left[ \pi \left( \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \right)^{3.2} \right] \right\}$$

(2-11)

# 2.4.2 总体分析本构方程

前文提到在 MORFEO 中使用到两种材料模型,一是在局部分析中针对于流 场研究的热流体模型,而第二种就是在总体分析中针对于残余应力研究的固体力 学模型,这一部分所使用的计算模型是 Ludwik 模型。Ludwik 模型是选取取流动 应力曲线屈服极限以后的部分进行拟合后得到的塑性外推模型,其公式可以表示 为材料应力关于屈服极限和塑性应变的方程。当材料拥有恒定的各向同性热学性 能时,其弹性和 J2 型硬化定律由 Ludwik 模型来定义,得到的本构方程如公式 (2-12)所示。这样一来,切线算子的计算当中就可以考虑每一时间步下得到的 塑性应变增量,原本连续的切线算子被离散化,这种方法大大加快了有限元模型 的收敛速度。

$$\sigma = E : \left(\varepsilon - \varepsilon^{pl} - \varepsilon^{th}\right) \tag{2-12}$$

其中 E 是由杨氏模量和泊松比定义的胡克系数

 $\varepsilon, \varepsilon^{p^{l}}, \varepsilon^{t^{h}}$ 分别代表总应变,塑性应变和热应变 $\varepsilon^{t^{h}} = \alpha \Delta T$ 

α是材料的热膨胀系数

J2型屈服方程定义的是一个弹性区域和一个屈服表面,如公式(2-13)所示。

$$f(\sigma, p) = \sigma_{eq} - \sigma_Y - H_p^N$$
(2-13)

其中 $\sigma_{eq}$ 是 Von-Mises 等效屈服应力

 $\sigma_{\rm Y}$ 是初始屈服应力

H是硬化模量

P 是累计塑性应变

N 是硬化指数

#### 2.5 边界条件

在 MORFEO 中建立的几何模型主要包括搅拌头,被焊工件以及垫板三个部分,其中值得一提的是对搅拌头的模型建立准则。焊接过程中,搅拌针前方的材料向后流动主要依靠轴肩上沟槽的旋转来带动,而材料沿着搅拌针轴线上下的运动则主要依靠搅拌针上螺纹来实现。建模过程中,如果对这一部分进行细致的网

格划分,会带来庞大的计算量,因此 MORFEO 提供了一种简化的搅拌头建模准则,如图 2-4 所示,右图是简化后。对应于这种简化,软件也设置了对于轴肩和 搅拌针的速度边界条件的定义。轴肩的速度场包含两个分量,分别为旋转速度和 径向速度,两者的比值为沟槽间距的 10%<sup>[33]</sup>,后者是针对于带有沟槽的轴肩对 于材料流动的显著影响所设定。搅拌针周围的速度场也包含两个分量,分别是旋 转速度和轴向速度的叠加,后者同样也是针对搅拌针上螺纹对搅拌作用的影响所 设定。而两者附近的材料质点的周向速度与搅拌头的速度相同,因此而产生的周 围质点的速度梯度变大的问题,则需要通过细化该部分网格来解决。



图 2-4 搅拌头横截面的简化图形[33]

除此以外,被焊工件的速度边界条件也由两个分量组成,沿焊接方向施加一 个非零的速度,而垂直于焊接方向速度则为零。这一条件是针对于入口处而言, 对于出口处的速度分量,无论是工件还是垫板都是自由的。

温度边界条件也分为入口和出口的分别定义,当带有非零速度分量的质点进入温度计算区域,即开始了对于粘塑性状态下的材料热传导的分析,这一部分热量是由稳态分析中的塑性变形功得到的,属于非线性导热。出口的温度边界条件也是自由的,在模拟中为达到与实际符合的温度特性,需要读者添加一定的散热条件,这里主要考虑传导和对流两种方式。对流散热系数取 15<sup>W/m<sup>2</sup>•°C</sup>。

然而流体模型中不适合于计算接触应力,参照 Kandhar 和 Simar 的研究成果, 这里对接触导热系数的定义基于各部分压力和温度的不同进行了一定的简化,分 别是搅拌头和夹具部分为垫板热导率的 10%,搅拌头后部 5%,其他部分 1%。

固体力学模型中的热和机械模型是通过 SAMCEF 耦合的,热模型中的节点 温度场带入机械模型中,用以计算热应变和载荷引起的应力,然后压力又被带回 热模型中用以计算工件和垫板间的接触导热系数。材料属性为粘塑性,符合 Von Mises 屈服准则,杨氏模量和屈服应力都是与温度相关的,接触导热系数如式 (2-14) 所示,对流散热系数取  $15^{W/m^2 \cdot °C}$ 。

$$h = h_0 \left(\frac{p}{v}\right)^e$$
(2-14)  
其中<sup>*p*</sup> 是接触压力,由搅拌头对工件施加载荷决定

*v*是维氏硬度,取 932E+06MPa *h*<sub>0</sub> = 150*E* + 03*Watt* / *m*•*k* 

在 MORFEO 中,通过固定工件表面材料质点的位移来代替下压力。

# 2.6 本章小结

MORFEO 有限元仿真软件是一个搅拌摩擦焊专用模拟分析软件,主要运用 于流动性研究,热过程和残余应力分布的研究。它在局部分析中对于搅拌头局部 区域内的接触面和热交换面进行了大量的网格细分工作,能较大程度避免由于温 度梯度过大而产生的计算出错和扭曲问题。对搅拌工具,工件和垫板的分别建模 和单独的材料文件使得模拟过程更加贴近实际焊接过程。而模块化的参数设定工 作,极大的方便了对于实际焊接的指导作用,省去了大量的工艺试验,便于实现 搅拌摩擦焊前期参数优化工作。而在材料文件和模拟过程设定上,该软件都表现 了较大的灵活性。在总体的热过程分析中,可以直接在.dat 文件中对模拟过程 边界条件进行定义、添加和修改,使得工件与空气对流,与垫板传导散热都更贴 近实际。

然而,该软件主要用于常规形式搅拌头的搅拌摩擦焊过程模拟分析,对于具 有复杂截面形状和几何尺寸的搅拌头还有待开发。局部分析主要局限于对接接头 形式的计算,而搭接和T型接头形式中焊缝的流场研究则无法实现。

16

# 第三章 2024-T3 铝合金搅拌摩擦焊对接接头流动性分析

# 3.1 2024-T3 铝合金对接焊缝局部建模

#### 3.1.1 试验材料

流动性分析选取的焊接材料是 2024-T3 铝合金,属于 Al-Cu-Mg 系硬铝型合金,强度较高,其热处理状态为固溶+冷加工+自然时效<sup>[34]</sup>。化学成分及主要性能参数如表 3-1 和表 3-2 所示。

表 3-1 2024-T3 铝合金化学成分(%)

| Si       | Fe                 | Cu      | Mn            | Mg       | Ti    | Zn   | Al   |
|----------|--------------------|---------|---------------|----------|-------|------|------|
| 0.5      | 0.5                | 3.8~4.9 | 0.3~0.9       | 1.2~1.8  | 0.15  | 0.25 | 余量   |
|          |                    | 表 3-2   | 室温下(20        | ℃)2024-T | 3 铝合金 | 生能   |      |
| 密度       | 比热容                | 热导率     | × 热膨          | 胀系数      | 固相线   | 抗拉强度 | 屈服强度 |
| $kg/m^3$ | $J/(kg \bullet K)$ | W / (m• | $K$ ) $\mu m$ | (m•K)    | °C    | MPa  | MPa  |

铝合金板材的厚度为4mm,采用对接接头。由于 2024-T3 铝合金粘度适中, 传统的机械加工不会对切割表面造成较大的影响,因此在剪板机上将铝合金板材 加工为尺寸为 75 mm×200 mm×4 mm 的待焊板材,可以得到较为平整的对接面, 经过少量的打磨工作即可用于搅拌摩擦焊接。

23.2

502

390

245

#### 3.1.2 搅拌工具

2.77

875

120

搅拌摩擦焊中应用的搅拌工具主要包括三个部分,即夹持部分,与机器主轴 相连,带动搅拌头的旋转运动;搅拌轴肩,通过与工件表面摩擦产生焊接过程 80%左右的热量,并通过下压防止材料被挤出;搅拌针,一般为圆锥形或是圆柱 形,提供焊接热量并促使中厚度板厚处材料的周向和轴向运动。本文选取的搅拌 头材料为 H13 钢,是典型的模具用钢,在高温下仍然具有较高的强度和耐磨性, 其热导率较低,化学成分和特征参数如表 3-3 和 3-4 所示。

| С         | Si      | Mn      | Cr       | Мо       | V       | S             | Р             |
|-----------|---------|---------|----------|----------|---------|---------------|---------------|
| 0.32~0.45 | 0.8~1.2 | 0.2~0.5 | 4.75~5.5 | 1.1~1.75 | 0.8~1.2 | ≤ <u>0.03</u> | ≤ <u>0.03</u> |

表 3-3 搅拌头工具钢化学成分(%)

表 3-4 搅拌头工具钢主要性能参数

| 密度         | 比热容                | 热导率               | 线膨胀系数               | 弹性模量   |
|------------|--------------------|-------------------|---------------------|--------|
| $kg / m^3$ | $J/(kg \bullet K)$ | $W/(m \bullet K)$ | $^{\circ}C^{^{-1}}$ | MPa    |
| 7.69       | 459                | 26                | 10 <sup>-5</sup>    | 227000 |

搅拌头的轴肩表面有 5°的倾角,目的是优化焊缝表面成型,防止材料挤出。 搅拌针为两种形状,分别是圆柱形和圆锥形,分别记为 N1 和 N2,两者都带有 右旋的螺纹,具体尺寸图 3-1 所示。



图 3-1 搅拌头尺寸示意图 (a) N1 截面尺寸 (b) N2 截面尺寸

# 3.1.3 建模过程

此部分主要在 MORFEO 软件的局部分析模块进行,通过对上文所示两种搅拌针形状分别建模,来分析搅拌针形状对于铝合金板材不同厚度平面材料流动性的影响。建模对象选取的是搅拌头附近半径为 75 mm 的一个圆柱体,该圆柱体

沿轴向方向从上至下分别是工件和垫板。局部模型的形状已定,需要根据计算速 度和收敛度来确定需要细化网格的区域。由于工件表面中心处主要受到轴肩的摩 擦带动作用,这里产热量最大,因此确定一个半径为7mm的圆,即轴肩作用区 域。以此圆为中心,越向外扩展,单元越大。而在工件与垫板的接触面,由于涉 及到传热作用,因此网格单元也需要细分,但该传导层厚度极小,约为0.5mm。 根据搅拌头和工件尺寸,以及定义的细分区域尺寸可以生成一个二维的.geo文 件,该文件不仅包含以上信息,还涉及到每个区域内不同方向上单元的尺寸(在 Mesh Parameter 部分),以及计算过程所需要的坐标和迭代方程等重要信息。通 过修改 Mesh Parameter 中的数值,可以调整局部模型的单元数量,来控制计算速 度和收敛性。修改后得到的局部三维网格如图 3-2 所示,A 为搅拌头,B 是搅拌 头与工件接触区,C 是工件,D 是垫板,最小单元尺寸是 0.0001 mm,沿搅拌头 与工件的边界层厚度方向,最大单元尺寸是 0.2 mm,沿垫板厚度方向。通过 GMSH 对 .geo 二维文件的处理,生成计算需要的三维网格文件 .msh,即图中所 示,单元总数约为 17 万,节点数约 155000。



图 3-2 局部计算三维网格

搅拌摩擦焊接过程有三个重要参数,分别是下压力,焊接速度和旋转速度。 本文在计算时采用控制工件表面质点位移的方式,没有涉及到下压力,焊接速度 保持 80 mm/min,以研究旋转速度对于材料流动的影响。总共设定了4种旋转速 度,分别是 500 rpm,600 rpm,800 rpm 和 980 rpm。计算时假设搅拌头原地旋转, 材料质点具有一个前进速度,其数值等于实际焊接速度,方向与焊接方向相反。 计算在主频为 2.8 GHz,内存为 48 G 的台式工作站上进行,在达到合理的收敛度 的前提下,完成对 17 万个单元的计算约耗时 5 小时。

# 3.2 2024-T3 铝合金流动性数值分析结果

在局部分析中首先得到的是不同参数条件下的塑性变形功,这部分能量用于 提供焊接过程材料的塑化变形以及热量损失,如表 3-5 所示。通过计算发现,塑 性变形功随转速提高而发生变化。当搅拌头转速达到 800 rpm 时,塑性变形功也 达到峰值 1830 W,而当转速为 980 rpm 时,塑性变形功降低至 1770 W。由此可 见,塑性变形功并非随着转速提高而单调增加,但是当转速相同时,不同形状的 搅拌针所产生的变形功却基本相等。这一点也正是前文两种搅拌头尺寸选择的依 据,因为总体变形功相等,热传导参数一致,那么就很容易判断不同厚度处的能 量分布不同是由于搅拌针表面积不同所致。

表 3-5 不同转速下搅拌头产生的塑性变形能(W)

| 转速 | 500rpm | 600rpm | 800rpm | 980rpm |
|----|--------|--------|--------|--------|
| N1 | 1620   | 1760   | 1830   | 1770   |
| N2 | 1620   | 1750   | 1830   | 1780   |

在搅拌摩擦焊中,搅拌针的长度要小于工件厚度,以防止搅拌针碰到垫板被 打断。而产热量主要集中在轴肩处,因此焊缝表面靠近轴肩处往往能获得优良的 焊缝组织<sup>[34]</sup>。而在靠近搅拌针底端,由于产热量有限,加之针对于底端材料的搅 动作用减弱,使得焊缝组织沿搅拌针方向具有很大的差异,经常会出现根部缺陷。 本次研究选取距离工件表面不同厚度处的平面,对于质点流线图进行分析,以获 取材料流动沿工件厚度方向的分布特点。

### 3.2.1 搅拌头周围材料的温度和速度场

在局部分析中可以得到不同转速下圆柱形和圆锥形搅拌针周围工件的温度 分布,分别如图 3-3 和图 3-4 所示。其中图 a, b, c 和 d 分别对应的转速为 500 rpm, 600 rpm, 800 rpm 和 980 rpm。沿搅拌针轴向观察,可以发现越靠近轴肩的部分, 等温区间越宽。这一现象的原因主要是因为工件底端与垫板接触,因此热传导系 数大,热量较工件上端容易传递,因此温度变化比较迅速,这里也拥有更窄的等 温区间。当旋转速度由 500 rpm 增加至 980 rpm 时,圆柱形搅拌针周围工件的峰 值温度也从 577 ℃增加至 625 ℃。一般来说,搅拌摩擦焊中出现的峰值温度大 约为材料熔点的 80%,本文得到的局部峰值温度略高于该数值。而当旋转速度相 同时,不同的搅拌针并没有对峰值温度以及温度场分布形态造成明显的影响。由 于相同转速下不同搅拌针形状对于塑性变形功的影响很小,而温度的分布还与热 传导系数相关,搅拌针形状显然不会影响传导系数,因此两种搅拌针周围工件的 温度分布也相差不大。



图 3-3 不同转速下圆柱形搅拌针(N1)周围工件的温度分布 (a)转速 500 rpm (b)转速 600 rpm (c)转速 800 rpm (d)转速 980 rpm



图 3-4 不同转速下圆锥形搅拌针(N2)周围工件的温度分布 (a)转速 500 rpm (b)转速 600 rpm (c)转速 800 rpm (d)转速 980 rpm

对动量和质量方程的联合求解,可以得到搅拌头作用下的材料质点速度云 图,图 3-5 分别展示的是圆柱形和圆锥形搅拌针周围质点的速度云图。该速度云 图描绘的是搅拌头周围质点的宏观运动状态,主要体现的是质点绕搅拌头轴线的 周向运动。从图中可以看出,轴肩附近的质点不仅具有较高数值的周向速度,这 里的速度曲线也更加密集,说明这里有更多的质点参与到"搅动"运动中。而越 靠近搅拌针底端,质点速度曲线也越稀疏,甚至有的质点运动速度几乎接近于零, 说明搅拌针底端对于材料的搅动作用微乎其微,这也从宏观角度上解释了对接焊 缝容易出现根部缺陷的原因。



图 3-5 500rpm 时搅拌头周围质点速度云图 (a)N1 (b)N2

# 3.2.2 水平方向的流线分布

图 3-6, 3-7, 3-8 和 3-9 显示的是沿工件厚度方向不同水平面材料进入稳定塑性 流动状态的流线图,该图面积为 20 mm×20 mm,中心即搅拌头轴线。沿竖直方 向分布有相互平行的 101 条流线,每两条相邻流线间距离为 0.2 mm,焊接前进 方向与搅拌头旋转方向在图 3-6 (a)中标出。图中实心黑点表示材料进入准稳态流 动后质点所沉积的位置,这些质点的初始位置组成一条直线与左边界重合。发生 较大变形的流线主要集中在搅拌头附近。这些流线图是距离工件上表面不同距离 的水平面所得到的,分别是距离表面 1 mm, 2 mm 和 3.5 mm,代表搅拌针上中 下段。



图 3-6 500 rpm 时 N1 和 N2 不同水平面流线图



(a)z = -1 mm, N1 (b)z = -2 mm, N1 (c)z = -3.5 mm, N1 (d)z = -1 mm, N2 (e)z = -2 mm, N2 (f)z = -3.5 mm, N1 (d)z = -1 mm, N2 (e)z = -2 mm, N2 (f)z = -3.5 mm, N1 (d)z = -1 mm, N2 (e)z = -2 mm, N2 (f)z = -3.5 mm, N1 (d)z = -1 mm, N2 (e)z = -2 mm, N2 (f)z = -3.5 mm, N1 (d)z = -1 mm, N2 (e)z = -2 mm, N2 (f)z = -3.5 mm, N1 (d)z = -1 mm, N2 (e)z = -2 mm, N2 (f)z = -3.5 mm, N2

图 3-7 600 rpm 时 N1 和 N2 不同水平面流线图

(a)z= -1 mm,N1 (b)z= -2 mm,N1 (c)z= -3.5 mm,N1 (d)z= -1 mm,N2 (e)z= -2 mm,N2 (f)z= -3.5 mm,N2



图 3-8 800 rpm 时 N1 和 N2 不同水平面流线图

(a)z= -1 mm,N1 (b)z= -2 mm,N1 (c)z= -3.5 mm,N1 (d)z= -1 mm,N2 (e)z= -2 mm,N2 (f)z= -3.5 mm,N2

每个水平面上质点运动的趋势基本是一致的,前进侧质点在搅拌针的旋转带

动下,绕过其前方运动至搅拌针的后部,而具体位于焊缝哪一侧则根据搅拌头旋 转速度变化而不同。后退侧质点体现出的状态类似于是扫过搅拌针,最终也是沉 积在搅拌针的后部,但是该侧质点沿搅拌针周向旋转运动的轨迹一般要比前进侧 质点短。但随着水平面距离工件表面的距离不断加大,这种运动的趋势也表现出 不同。靠近轴肩处(z=-1 mm)的材料,由于受到轴肩表面的摩擦带动作用,运 动速度最大,塑性流动最好。Guerra<sup>[35]</sup>指出,工件上表面 1/3 处材料主要被轴肩 带动旋转,流动充分。而与工件底端越接近的水平面,靠近搅拌针底端,前进侧 质点沿周向的运动轨迹越短,经常只能移动至搅拌针后部的后退侧,使得前进侧 留下很大的空洞无法得到材料质点的充分填充。由于质点在沿工件厚度方向的旋 转运动不足,导致前进侧极易产生孔洞等缺陷<sup>[36]</sup>。在 z= -2 mm 水平面,即搅拌 针中段,由于受到搅拌针形状和塑性变形能分布的影响,在周向运动上有时甚至 要优于搅拌针上段,如图 3-7(e)所示使用圆锥形搅拌针,转速为 600 rpm 时。

随转速提高,搅拌针对于材料流动的影响发生了变化。500 rpm 时,N2 靠近 轴肩处对材料的带动作用明显高于 N1;但随水平深度的增加,二者对材料带动 作用都不佳。该转速下,两种形状搅拌针的塑性功都不高,故远离轴肩处材料的 塑化也越差。600 rpm 时,质点运动有很大差别,N2 在各个水平深度对质点的带 动作用都体现了较高的优势,质点在整个周向范围内都有沉积,分布均匀;N1 的质点依然主要沉积在后退侧。此时塑性功已经足以提供材料的流动,出现差异 的原因主要是因为 N2 的锥面对材料产生竖直方向挤压力,许多质点因而更容易 产生螺旋向上运动,最终沉积位置也较均匀。800 rpm 和 980 rpm 时,N1 在中间 深度流动性比 N2 好,但下部的质点最终位置都不如 600 rpm 均匀,同样这也是 塑性功和挤压力共同作用的结果。

从图中可以看出,旋转速度的提高对于促进质点的周向运动有一定的有益效 果,但这种效果主要集中在搅拌针的上段。为了使材料质点在工件厚度方向都能 体现出良好的流动性,除了需要适当的旋转速度以获得合适的塑性变形能,还需 要搅拌针形状的配合。图 3-7(d)(e)(f)为 600 rpm 时使用圆锥形搅拌针不同水平面 质点的流线图,可以看出该组条件下各个水平面上质点在搅拌针后部两侧分布都 比较均匀。而这一现象的产生不仅是塑性变性能在圆锥面上的分布,也有搅拌针 的斜面对于材料的挤压促进作用使然<sup>[37]</sup>。

25





# 3.2.3 水平方向前进侧质点周向速度

上文对于质点流线图的分析发现,600 rpm 时,N2 圆锥形搅拌针各个厚度层 面的质点在搅拌针后侧沉积位置较均匀,故选取 600 rpm 时对质点沿搅拌针周向 的旋转速度进行定量分析。选取单位时间长度为 0.1 s 研究质点旋转速度与其运 动轨迹的关系,鉴于前进侧质点较后退侧质点运动路线更长,故选前者研究。不 同厚度水平面上被研究的质点位于距离搅拌针外径 0.015 mm 处,即搅拌针边缘, 做出旋转速度曲线如图 3-10。质点的旋转速度都是先增大后减小,在 z= -1 mm 水平面处,N1 的半径较大,故其质点的速度峰值也比 N2 大。然而相对于 N1 较 高的速度峰值,N2 在各个水平面的质点都有较宽的速度增长区间。尤其在 z= -2 mm 水平面,N2 质点速度曲线无论是增长段还是下降段,变化速率都小于 N1。 这说明在很长一段时间内,N2 质点在搅拌针切向上的速度分量都足以支持其进 行周向运动。从这点可以看出,N2 对质点的带动力较强,因而有更多的质点可 以运动至前进侧,如图 3-7(e)(f)所示。而 N1 虽然有较高的峰值速度,但在很短 时间内就减少至 0,故周向运动路线较短。



图 3-10 600 rpm 时不同水平面质点旋转速度曲线

# 3.2.4 竖直方向材料质点的流动特点

竖直方向的流动主要是指质点的螺旋向上运动,其立体运动形态如图 3-11 所示。观察到的质点并非绝对的水平运动,而是有一个向上的分速度,并且后退 侧质点的螺旋向上运动更加充分。选取 600 rpm 时两种搅拌针形状下不同厚度水 平面进行研究,测量该平面质点向上运动所能达到的最大位移如图 3-12。在 z= -1 mm 和 z= -2 mm 水平面,N2 在竖直方向的运动位移远大于 N1。这说明锥形搅 拌针更能促进材料在竖直方向上的运动。Zhao 和 Lin<sup>[38]</sup>通过研究发现,产热量相 当的情况下,锥形搅拌针的斜面对材料产生轴向作用力,更能促进材料的轴向流 动,从而能得到比圆柱形搅拌针更均匀细小的晶粒和更高的沉积密度。而在 z= -3.5 mm 水平面上,由于圆锥形搅拌针底端面积小于圆柱形搅拌针,因此 N2 的 产热量不如 N1,斜面对于材料的挤压带动作用不能得到充分体现,质点的轴向 运动位移略小于圆柱形搅拌针。



图 3-11 质点螺旋运动示意图



图 3-12 600 rpm 时不同水平面质点轴向最大位移

选取 3.2.3 中相同质点研究轴向速度随时间的变化,转速 600 rpm 时各水平面 上质点的轴向速度曲线如图 3-13 所示。几乎每条曲线都穿过了 v=0 的水平线, 这说明质点沿轴向的运动方向并非是一成不变的,而是随着速度大小的变化有一 个往返波动的过程。靠近搅拌针底端的质点,这一波动趋势越小,速度基本为正 值,即一直朝上的运动。而接近轴肩的质点,虽然上下波动也较频繁,但是速度 的数值比较低。在搅拌针中部的质点则表现出强烈的上下波动状态,并且运动的 速度也较快。鉴于研究稳态时的轴向位移,应观察速度和时间的叠加结果,即速 度曲线与纵坐标为 0.0 的水平线围绕的封闭图形面积。从图中可以看出,截止至 所选取的时间点,距离工件表面 2 mm 处,N2 周围的质点速度仍然有一个增长 趋势,它所围绕的面积要远大于 N1。这一现象与图 3-12 中轴向位移柱状图是一 致的,该平面处的质点受到搅拌针的轴向带动作用最明显,搅动效果最强烈。而 锥形搅拌针相对于圆柱形搅拌针的轴向带动作用最明显,搅动效果最强烈。而

28



图 3-13 600 rpm 时不同水平面质点轴向速度

# 3.3 2024-T3 铝合金对接焊缝标记材料试验

# 3.3.1 试验材料

鉴于前文分析,在不同转速条件下,圆锥形搅拌针在不同厚度工件水平面上都表现出了明显的促进材料质点流动的优势,因此本组验证试验主要使用搅拌头N2,来分析不同转速下对工件厚度方向材料流动性的影响。搅拌头的尺寸和试验参数如3.1 中介绍,搅拌头的下压量为0.1 mm,旋转方向为逆时针。

采用 0.2 mm 厚的铜箔作为标记材料,利用线切割在对接铝板垂直于焊缝方向开槽,槽深度为 3.8 mm,如图 3-14 所示。将铜箔裁剪为尺寸为 75 mm×3.8 mm 的长方形,置于切好的沟槽当中,使得铜箔上端面与工件上表面平齐。由于铝合金极易变形,在搅拌针插入工件旋转过程中,这些沟槽就会发生变形,使得铜箔 镶嵌的更加紧密,不会被挤出工件表面。焊接完成后切取每道铜箔附近的试样,以焊缝中心线对称,试样尺寸为 20 mm×12 mm,焊缝表面朝下在镶样机上进行 镶样。对试样打磨掉 1 mm 厚度,再进行金相试样制取,观测此厚度处试样表面 的宏观形貌。随后再分别打磨 2 mm 和 3.5 mm 厚度,重复上述步骤制取相应厚度处的试样。金相腐蚀液使用科勒试剂(Kellers' Etch),成分比为水:硝酸:盐酸:氢氟酸=190:5:3:2。



图 3-14 铜箔在工件上的镶嵌位置

# 3.3.2 试验结果

以 600 rpm 时锥形搅拌针为例,图 3-15 所示分别为距离焊缝表面 1 mm, 2 mm 和 3.5 mm 水平面的宏观照片。图 3-15 (a)显示的照片中,后退侧铜箔发生明显的 弯曲,在向前进侧扩展的过程中铜箔被分离打断,呈块状分布在焊缝中心线两侧。 前进侧铜箔沿焊缝边界区域被切断,在视野范围内只要少量残余铜被带至原位置 前侧。图 3-15 (b)和(c)中铜箔形态与图(a)有较大的差异,铜箔在搅拌针的搅动作 用下被分解的较充分,后退侧铜箔依然运动至前进侧,并在焊缝大部分区域呈现 一种分层排布的状态。将图(b)中方框区域内放大得到图(d),对其中的分层铜箔 进行测量,发现相邻两层铜箔间的平均距离是0.12 mm。根据计算,该焊接参数 下,搅拌头每旋转一周所前进的距离是(80*mm*/min)÷(600rpm)=0.13mm/r。每 层铜箔间距与该数值接近,这也说明焊缝中材料正是以一种分层递进的方式过渡 所形成的,即搅拌头前方材料旋转一周过渡到搅拌头后方沉积,与"回填"的形 式类似。根据图 3-15(d)中铜箔流动分布情况可以判断出搅拌头后方的铜箔是源 于镶嵌于后退侧铝板中的铜箔,这部分基本是与数值模拟结果相类似的,即后退 侧材料是随着搅拌头旋转绕过搅拌头后方沉积的。而镶嵌于前进侧的铜箔在视野 中分布较少,分析原因是在绕过搅拌头前方时被搅拌头向前推进,因此取样范围 内几乎看不到前进侧铜箔。然而这三个平面所观测到的铜箔流动的确各不相同, 尤其是在距离工件表面 3.5 mm 处的平面,焊缝中的铜箔并非是源于该平面,而 是上部的一部分在搅拌针底端的挤压下达到的。这也说明越靠近下端,搅拌针的 搅动作用越薄弱。而在距离工件表面 2 mm 处,铜箔在焊缝中呈现明显的逐层分 布状态,也说明了材料流动性不仅与热量分布有关,搅拌针的直径也存在一个合 适尺寸。只有在该尺寸下,材料才能在热-力联合作用获得更好的运动状态。



图 3-15 600 rpm 时圆锥形搅拌针不同水平面铜箔流动情况 (a)z= -1 mm (b)z= -2 mm (c)z= -3.5 mm (d)z= -2 mm 铜箔变形处 50 倍金相照片

图 3-16 (a)所示为转速为 800 rpm 时距离焊缝表面 1 mm 处水平面铜箔流动的 宏观示意图,其中白色发亮区域是工件表面氧化膜被打碎带入焊缝区域后的形态。该转速下后退侧铜箔也在旋转弯曲过程中被打断,与 600 rpm 时相似,并有 一部分分离的铜箔 1 在搅拌头带动下移动至前进侧。将该区域放大 50 倍观测, 如图 3-16 (b)所示,由于铜箔体积与厚度仍然较大,呈块状,并未发生细化变形 使之便于流动,说明此处主要仍然是搅拌轴肩对工件的摩擦和轴向挤压作用主 导,而搅拌针直径较大,因此其搅拌作用较弱。前进侧铜箔同样发生了弯曲变化, 其部分分离的铜箔 2 被细化移动至铜箔前段靠近焊缝中心线位置。同样对此区域 放大 50 倍进行观察,如图 3-16 (c)发现这部分铜箔虽然未被细化至便于流动的尺 寸,但是仍然被打碎呈团状,弥散分布于靠近焊缝中心线位置。由于前进侧材料 移动速度略大于后退侧,因此这部分铜箔被轴肩撕扯,分布状态与后退侧显著不 同。



图 3-16 800 rpm 时圆锥形搅拌针 z= -1 mm 水平面铜箔流动 (a) z= -1 mm 水平面铜箔流动宏观照片 (b)后退侧流动情况(50×) (c)前进侧流动情况(50 ×)

为进一步分析流动性对于焊缝区域组织状态的影响,分别对于 500 rpm 时距 离工件表面 1 mm 和 600 rpm 时距离工件表面 3.5 mm 处的金相组织进行研究。

图 3-17 (d)所示区域为 500 rpm 时距离工件表面 1 mm 后退侧铜箔发生明显 弯曲的部分,金相照片放大倍数为 50 倍,通过比例计算可以推测出该处靠近搅 拌针边缘,即位于搅拌针挤压区。其中白色区域表示铜箔,1 侧为铜箔外侧靠近 母材区,3 侧为铜箔内侧靠近焊核 (NZ) 区。对图中标出的三个区域分别进行放 大处理,如图(a),(b),(c)所示。图(a)为1 区,这里靠近搅拌针边缘,在焊接过程 中受到搅拌针表面对它的强烈挤压和摩擦作用。该区域内晶粒沿铜箔弯曲方向被 明显拉长,属于搅拌摩擦焊接头组织中的热力影响区 (TMAZ)。图(b)显示的2 区具有显著的母材组织特征,轧制使得晶粒尺寸较均匀,几乎没有发生变形。图 (c)为3 区,位于铜箔内侧靠近焊缝的区域。该部分晶粒明显小于1 和2,500 倍 放大倍数下依然不能清晰分辨晶粒边界,该区域组织在热和搅拌针的旋转和不断 前进作用下发生了充分的再结晶变化。



图 3-17 500 rpm 时圆锥形搅拌针 z= -1 mm 水平面后退侧铜箔附近组织 (a)热力影响区 (b)母材区 (c)焊核区 (d)宏观图

下图 3-18 所示为 600 rpm 时距离工件表面 3.5 mm 处的前进侧焊缝组织显微 图,图(b)为靠近焊核边缘区域中方框的放大图,即图(a)黑色边框区域。同上文 不同的是,该区域内并没有发现具有明显变形现象的晶粒存在,即使是在焊核边 界区,晶粒形态仍然与母材接近。这说明在靠近搅拌针底端,不论是热还是机械 效应都较弱,对材料组织的影响远没有焊缝上端强烈。



图 3-18 600rpm 时圆锥形搅拌针 z=-3.5mm 水平面前进侧组织 (a)宏观图 (b)放大(100×)

#### 3.4 本章小结

本章基于 MORFEO 软件的局部分析模块,对圆柱形和圆锥形搅拌针在不同 旋转速度下工件不同厚度水平面上质点的速度曲线进行了模拟分析。搅拌针尺寸 的选择基于转速相同时,其产生的塑性变形能也相当这一原则,得到对应的质点 流线图,可以出以下结论。

(1) 随旋转速度从 500 rpm 增至 980 rpm,两种形状搅拌针周围的峰值温度 也随之升高,温度分布沿工件厚度截面分布呈上宽下窄,越靠近轴肩部位等温区 间越宽。

(2)材料质点的运动是可以分解为沿搅拌头周向和轴向两个分速度的螺旋向上运动。在周向运动中,前进侧质点绕过搅拌针前端向后端运动,后退侧质点则是环绕搅拌针后方移动至后端的前进侧。从质点轴向运动速度曲线可以发现,质点并非是单纯的上升运动,而是一个不断上升和下降的来回波动,其总体趋势是向上的。

(3) 越靠近轴肩的质点在周向运动中两侧的质点都可以行进较远的距离, 而接近搅拌针底端的前进侧质点则只能行进至搅拌针后端的后退侧。但是当旋转 速度为 600 rpm,搅拌针形状为圆锥形时,由于塑性变形能在工件厚度方向的适 当分配和搅拌针锥面对于材料的挤压作用,质点在各个厚度层面都体现出来良好 的流动性,最终在搅拌针后部两侧的沉积都较均匀。

(4)为验证模拟结果的准确性并进一步分析搅拌头对于材料组织形态的影响,以 0.2 mm 厚铜箔作为标记材料进行了工艺试验。在 600 rpm 时,距离工件 表面 1 mm, 2 mm 和 3.5 mm 的水平面上,都有较多数量的后退侧铜箔被弯曲打 碎绕搅拌针后方流动至前进侧,从而说明了模拟结果的可靠性。

(5) 在对不同层面的焊缝水平面进行金相分析,发现靠近工件表面的材料 主要受到轴肩摩擦作用,因此材料的运动主要依靠轴肩的摩擦带动完成。在工件 中间厚度水平面,铜箔体现出明显的分层流动状态,可以看出这些材料随搅拌针 旋转前进,并在搅拌头短暂停顿的过程中发生沉积。

34

# 第四章 接头形式对搅拌摩擦焊材料流动性的影响

前文介绍了利用数值模拟与试验的方法分析材料流动特点,主要是针对于工件前进侧与后退侧材料运动的研究。然而,焊接的本质是将原本分离的物件彼此间达到原子间结合,因此,除了搅拌摩擦焊过程所特有的将工件分为前进侧和后退侧两个部分,对工件连接界面的材料流动性分析,也显得异常重要。本章选取另外两种常见接头形式,T型接头和搭接接头对于焊接工件的连接面材料流动特点进行试验的探索和分析。试验方法仍然采取铜箔作为标记材料的方法。

# 4.1 搅拌摩擦焊 T 型接头

# 4.1.1 T 型接头制备

T型连接在固相焊接中一直是一个难题,常见的缺陷主要是角接处凹形圆角成型困难。在焊接该种接头时,不仅需要材料在水平方向流动,更重要的是需要材料在沿搅拌针轴向上具有充分的运动,才能使得筋板与壁板得以连接。除了对搅拌摩擦焊焊接参数的优化研究,许多学者也通过改变T型接头形式使焊缝成型更加良好。常用的T型接头如图4-1所示,主要分为壁板未穿透型,穿透型和半穿透型<sup>[39]</sup>。本文采用的T接形式主要是由图4-1(b)的筋板未穿透型的变形,为了方便放置标记材料,对于筋板安放做了稍微调整,如图4-2所示,仍然包括壁板间的对接和壁板与筋板的搭接。三块板尺寸都为5mm×75mm×200mm,具体的铜箔放置形图4-3中所示,虚线框出的区域为铜箔放置区。在沿焊缝方向上将工件分为两段,第一段在壁板对接面上放置一块0.2mm厚铜箔,铜箔面积为5mm×100mm;第二段在壁板与筋板搭接面上平放一块铜箔,关于焊缝中心线对称,面积为20mm×100mm。



图 4-1 几种主要的 T 型接头形式

(a) 筋板未穿透的两板搭接 (b) 筋板未穿透的三板对搭接 (c) 筋板穿透的三板搭接 (d) 筋板半穿透的三板对搭接



图 4-2 T 型接头的变形



# 4.1.2 焊接材料和焊接参数

这部分焊接材料除了前文所使用的 2024-T3 铝合金,还设计一组 7075-T6 铝 合金的搅拌摩擦焊。7075 属于 Al-Zn-Mg-Cu 系高强度超硬铝型合金,与 2024 铝 合金相比,具有更大的粘度,强度硬度也较高,疲劳性能与之相近。7075-T6 铝 合金化学成分和常用的机械性能参数如表 4-1 和表 4-2 所示<sup>[40]</sup>。材料组别如表 4-3 所示,其中详细列出了焊接过程所使用的焊接速度与旋转速度。

| Si  | Fe  | Cu      | Mn  | Mg      | Cr        | Zn      | Ti  | Al |
|-----|-----|---------|-----|---------|-----------|---------|-----|----|
| 0.4 | 0.5 | 1.2~2.0 | 0.3 | 2.1~2.9 | 0.18~0.28 | 5.1~6.1 | 0.2 | 余量 |

表 4-1 7075 铝合金化学成分(%)

| 屈服强度 M | IPa     | 抗拉强度 MPa   |      | 伸长率% |
|--------|---------|------------|------|------|
| 527    |         | 588        |      | 8    |
|        | 表 4-    | -3T接材料组别焊接 | 参数   |      |
| 组别     | 材料      | 焊接速度       | 旋转速度 | 压入量  |
|        |         | mm/min     | rpm  | mm   |
| T1     | 2024-T3 | 100        | 650  | 0.1  |
| T2     |         | 100        | 980  | 0.1  |
| T3     | 7075-T6 | 100        | 800  | 0.1  |
| Τ4     |         | 100        | 1000 | 0.1  |

表 4-2 7075-T6 铝合金机械性能参数



图 4-4 T 接和搭接所用搅拌头尺寸示意图

图 4-4 所示为本章使用的搅拌头截面示意图,其中轴肩直径为 15 mm,带有 5°的倾角;搅拌针长度为 6 mm,顶端直径 7 mm,底端直径 4 mm,为带有螺 纹的圆锥体。

## 4.1.3 T 型接头焊缝形貌

图 4-5 中所示为搅拌摩擦焊焊缝宏观示意图,其中在焊接 T4 组别后半段时, 搅拌针断在工件当中,这一段工件只有轴肩的摩擦作用而没有搅拌针搅动作用, 因此体现出不同的形貌。观察各组焊接参数下的焊缝表面,都可以观察到类似于 鱼鳞状的呈许多半圆形状纹路的排布,这也反应了搅拌摩擦焊接过程的特点。工 件的连接是通过塑化材料不断绕过搅拌针以填满其留下的轨迹,随搅拌头的前 进,这种"回填"过程也不断重复进行。然而搅拌头的旋转和前进并非是一个完 全连续不断的过程,搅拌头每旋转一周会做短时的停留,这样后方材料在搅拌针 的挤压下就会在原地形成一个环绕搅拌头半周的堆积[41]。这一点从图中圆环的朝 向就可以看出,圆环突出总是与搅拌头前进方向相反的,材料就像被搅拌头"甩" 至后方一样。而当没有搅拌针作用时,图 4-5(d)后段,焊缝表面这种半圆形的材 料堆积就消失了,也说明其形成是由于搅拌针的挤压作用。T3 和 T4 组别的焊缝 表面纹路较 T1 和 T2 更加细致,这与材料的种类有关。7075-T6 铝合金的粘度比 2024-T3 大,这使得在塑性温度下材料在搅拌头挤压作用下的可塑性更强,因此 焊缝表面更加光滑。而焊缝两端比焊缝中段的纹路更加清晰,焊缝中段较粗糙, 可能与轴肩表面粘连的材料较多有关。由于焊接过程中工件材料的体积不会发生 变化,搅拌轴肩的下压和搅拌针的深入使得一部分材料被挤出工件表面,形成了 焊缝两侧的飞边<sup>[42]</sup>。有些飞边较厚呈波浪状弯曲与轴肩下压量过大有关。由于搅 拌针抽出后没有后续材料的填充,因此在焊缝末端形成了匙孔。一般这部分予以 机加工切除处理,或者通过使用回填式搅拌摩擦焊设备也可以消除匙孔的形成。





图 4-5 T 型接头宏观形貌示意图 (a)T1 组 (b)T2 组 (c)T3 组 (d)T4 组

#### 4.1.4 T 型接头铜箔流动

图 4-6 所示为本章所用 T 型接头中铜箔流动情况的宏观照片,其中(a)(c)(e)(g) 是 T1, T2, T3, T4 组别的壁板对接面铜箔流动情况, (b)(d)(f)(h)则分别对应的 是筋板与壁板搭接面上铜箔的流动情况。首先观察壁板对接面的铜箔,图中所示 黑线表示焊缝横截面上原始铜箔所在位置。可以发现铜箔已经被完全打断发生弯 曲,有部分甚至被打碎,尺寸远远小于原始尺寸。虽然很难看出铜箔的原始形态, 但是所有可以观察到的铜箔碎屑都集中在壁板和筋板搭接面以上,很少有铜箔会 向下移动超过搭接面以下进入筋板内。这一现象说明有母材材料阻碍了铜箔的向 下运动。观察右侧一列图片,发现位于壁板与筋板搭接面上的铜箔在焊核区域内 被打断,这部分铜箔已经完全消失融入工件材料当中。而焊核两侧的铜箔变形则 体现两种不同的形式。其中位于前进侧的铜箔向壁板方向发生弯曲,而位于后退 侧的铜箔则向筋板方向发生弯曲。铜箔的两种镶嵌位置说明了在该种形式接头焊 接时,材料除了有水平方向类似于对接的沿搅拌头周向的运动<sup>[43]</sup>,还有筋板与壁 板之间的轴向运动。而这种轴向的运动并非是单向的,而是搅拌头两侧材料倾斜 的不对称运动。前进侧材料在搅拌针的旋转带动下向壁板方向运动,而后退侧材 料则随着搅拌针上螺纹的走向向下流动。两侧材料以一种递进层叠的方式使材料 相遇发生重叠。



![](_page_45_Picture_6.jpeg)

![](_page_46_Picture_1.jpeg)

图 4-6 T 型接头铜箔宏观照片

(a)T1 壁板对接 (b)T1 壁板-筋板搭接 (c) T2 壁板对接 (d) T2 壁板-筋板搭接 (e) T3 壁 板对接 (f) T3 壁板-筋板搭接 (g) T4 壁板对接 (h) T4 壁板-筋板搭接

Acerra<sup>[44]</sup>认为在铝合金搅拌摩擦焊的T型接头焊接中,由于焊接工艺参数选取的问题,极容易引起筋板和壁板连接圆角区内由于材料流动不充分而形成的隧道缺陷。除此以外,由于筋板和壁板间温度分布的不均匀,前进侧材料在由搅拌头前方向后方流动时受阻容易产生钩状缺陷<sup>[45]</sup>;搅拌针旋转运动无法充分将界面间的氧化层打碎,因此产生类似残余界面线的弱连接缺陷<sup>[46]</sup>。本章所使用的T型接头虽然没有涉及到夹具对圆角处的强制成型,但是在转速较大的980 rpm时,在T2 组接头横截面处依然出现了隧道型缺陷,也位于搅拌针边缘区,如图 4-6(d)中黑色方框区域。该缺陷产生于壁板前进侧下方,在T型接头中,在靠近筋板与

壁板连接面处的搅拌针边缘区域,由于材料的轴向运动受限,并且前进侧材料的 回填不足,极容易形成一个流动"死区",导致隧道型缺陷的产生。图(a)(c)中 可以看到弱连接缺陷,主要是轴向材料运动不足,筋板和壁板之间材料的交互运 动不充分。

#### 4.2 搅拌摩擦焊搭接接头

#### 4.2.1 搭接接头制备和焊接参数

该部分总共设计了三种搭接接头,分别是同种材料搭接为 2024-T3 铝合金和 7075-T6 铝合金,异种材料搭接为 2024-T3 在上 7075-T6 在下。搭接上下板尺寸 都为 200 mm×150 mm×5 mm,搭接宽度为 50 mm,焊缝长度为 180 mm,示意 图如图 4-7 所示。在同组材料的搭接面上放置 0.2 mm 厚的铜箔,铜箔长度与板 材同长,其面积为 50mm×200mm。异种材料的搭接面上未放置铜箔,主要是因 为异种铝合金腐蚀效果不同,可以通过这种金相腐蚀上的颜色深浅差异来观测搭 接面材料的流动情况<sup>[47]</sup>。各组别的焊接参数如表 4-4 所示。

![](_page_47_Figure_5.jpeg)

图 4-7 搭接接头铜箔布置

| 组别 | 材料         | 焊接速度   | 旋转速度 | 压入量 |
|----|------------|--------|------|-----|
|    |            | mm/min | rpm  | mm  |
| A1 | 2024-T3    | 120    | 1200 | 0.1 |
| A2 |            | 120    | 1400 | 0.1 |
| B1 | 7075-T6    | 100    | 800  | 0.1 |
| B2 |            | 100    | 1000 | 0.1 |
| C1 | 2024-T3(上) | 120    | 1200 | 0.1 |
| C2 | 7075-T6(下) | 200    | 1200 | 0.1 |

表 4-4 不同组别的搭接接头焊接参数

# 4.2.2 搭接接头材料流动性

为了进一步说明筋板与壁板搭接面之间材料流动的情况,专门设计了搭接接 头来观测上下板之间的材料运动状态。图 4-8 所示为同种铝合金以铜箔作为标记 材料的搭接接头横截面示意图,每一组别的铜箔都在焊核区域内被打断,而两侧 铜箔的端口则呈现不同的弯曲形式。图 4-8 (c)(d)可以清楚看出,搭接面上前 进侧铜箔向上弯曲,而后退侧则向下弯曲。焊接过程中铜箔与铝合金之间并未发 生相对移动,因此铜箔的变形必然是搅拌针的挤压和周围铝合金材料流动的综合 作用。后退侧铜箔向下弯曲,说明搭接上板后退侧材料是向焊缝中心线下端流动 的。这一弯曲角度非常尖锐,可以看出其实上下板材料在该位置的流动趋势是有 一定冲突性的,下板材料更像是被刚性搅拌针向上推挤才会形成这样的尖角的。 前进侧的铜箔弯曲角度比较平滑,可以推测上下板在前进侧的材料都倾向于向上 流动,并最终在轴肩的压力下向焊缝中心线转移,与后退侧材料相交汇。

![](_page_48_Picture_3.jpeg)

图 4-8 铜箔标记的搭接接头横截面 (a)A1 组 (b)A2 组 (c)B1 组 (d)B2 组

为了避免铜箔与工件之间产生额外的焊接连接面影响试验结果的准确度,采 用异种铝合金薄板之间的搭接接头来说明这一问题。图 4-9 所示为 C1, C2 组别 铝合金搭接接头横截面的宏观照片,本组试验采用 2024-T3 铝合金作为上板,

7075-T6 铝合金作为下板。由于两种铝合金被科勒试剂的腐蚀程度存在很大的区 别,因此可以清楚的观测到两者之间的交互运动。同上一节中T接接头筋板与壁 板之间的连接相类似, C1 和 C2 组搭接接头的连接面较原始界面上移。下板后退 侧金属向上弯曲,将上板部分材料卷入其中。而下板在前进侧受到上板金属材料 向下流动的挤压,呈现一种下沉的趋势。在焊核中心区,下方的7075铝合金由 前进侧向后退侧弯曲,如同一只横放的"勺子",将上方的2024铝合金包裹住。 在图 4-6 (f) (g)中靠近壁板下方,以及图 4-9 (a) 所示的 C1 组接头横截面上靠近 上板 2024 铝合金区域,都可以清晰观察到"洋葱环"的形貌。目前对于"洋葱 环"的形成尚未形成统一的理论。有些学者认为搅拌头附近区域的材料温度跨度 不同, 位于焊核中心区域材料温度相对较高, 因此其塑化程度也较高, 在搅拌针 旋转前进中当这部分材料碰到附近热影响区时,相当于被温度较低的边壁反弹形 成类似于层状排列的组织<sup>[47]</sup>。还有的学者认为洋葱环的形成是由于搅拌针螺纹走 向的影响,当材料沿着搅拌针螺纹轴向运动时,螺纹一端形成的瞬时空腔将吸引 周围的塑化金属,而另一端的金属便会改变流向对这部分金属产生一定的挤压效 果,在这种吸附和挤压作用的共同影响下,材料便会在工件厚度方向不断形成往 复环形运动,形成类似于洋葱环的形貌<sup>[13][48]</sup>。本文认为洋葱环的形成与不同部 位材料流动方向的不同有关,前进侧材料向上运动,在轴肩作用下偏向焊缝中心 线与此处材料交融,而搭接上板后退侧材料则倾向于向焊缝中心线下端流动。由 于这两部分材料并非同时到达目的地,因此在焊缝界面上会呈现出一种环状分层 的状态。

图 4-9 中可以看到明显的钩状缺陷和隧道缺陷,也是由于某些区域内材料流动的局限性所造成的。前文模拟结果认为,搅拌摩擦焊过程中大部分材料会堆积在后退侧。搭接下板由于靠近搅拌针底端,产热量有限,因此只能在靠近搅拌针表面区域材料能达到良好的塑性软化状态,而其外围材料由于没有充分塑化,因此粘性和塑性都较差,如同构成了一圈刚性的屏障。当流向后退侧的材料遇到这道阻碍时,就只能朝温度较高的上方流动。向上的这部分材料由于并没有与其他材料充分混合,好像突然挤进上板中,因此产生了钩状缺陷。而前进侧无法得到充足的材料填充,产生了连续的孔洞缺陷,即图中所示的隧道缺陷。

43

![](_page_50_Picture_1.jpeg)

图 4-9 C1 和 C2 组搭接接头横截面宏观照片 (a) C1 组 (b) C2 组

# 4.3 搅拌摩擦焊搭接接头拉伸性能

焊接完成后,对工件按照标准拉伸试样尺寸进行线切割,并对试样侧面进行 打磨光滑,以1.5 mm/min 的加载速度在牌号为 CSS-44100 的电子万能试验机上 对搭接接头进行拉伸试验,得到的试验数据如表 4-5 所示。

| 组别 | 最大载荷 (kN) | 名义抗拉强度<br>(MPa) | 名义剪切强度 | 断裂位置 |
|----|-----------|-----------------|--------|------|
|    |           | (IvII a)        | (MPa)  |      |
| A1 | 26.35     | 150.55          | 125.47 | 搭接面  |
| A2 | 22.28     | 127.25          | 106.1  | 搭接面  |
| B1 | 26.87     | 153.55          | 127.95 | 上板焊缝 |
| B2 | 20.92     | 119.55          | 99.62  | 上板焊缝 |
| C1 | 27.69     | 158.2           | 131.86 | 搭接面  |
| C2 | 24.92     | 142.4           | 118.67 | 搭接面  |

表 4-5 搭接接头拉伸试验数据

不同组别的焊接接头拉伸试样断裂位置也不同,B组7075-T6铝合金的搭接 接头断裂位置主要在搭接上板的焊缝区域靠近后退侧,破坏载荷是拉应力。而A 组和C组的接头断裂位置都在搭接面上,主要受到剪切力的破坏。A组两种焊 接参数下的接头在搭接面处都存在弱连接缺陷,大大降低了该处的连接强度。这 种弱连接主要是由于2024-T3铝合金表面的包铝层未被完全打碎融入焊核区域 内。A2组转速较大,但是包铝层几乎仍然是连续的,因此其剪切强度也明显低 于A1组。C组异种铝合金搭接接头的断裂位置也处于搭接面上,C2组焊接速度 提高,在旋转速度不变的前提下线能量就有所减少,使得材料不能充分流动填充 焊核区域,因此才会出现隧道缺陷。这也是其剪切强度低于 C1 组的原因。B2 组旋转速度较大,可能造成局部区域过热产生不均匀的焊接组织,导致其抗拉强度明显低于 B1 组。

#### 4.4 本章小结

(1) 在对 T 型接头焊缝横截面进行观察时发现,在壁板间存在类似于对接接头的横向流动,但在筋板与壁板间的材料则主要以一种分层递进的形式进行轴向的运动。这种运动很容易在实际 T 型接头圆角区位置产生"死区",因为材料流动不足而产生缺陷。

(2)对搭接接头焊缝横截面进行观察,发现前进侧材料都倾向于向焊缝中 心线上侧运动,而在后退侧上下板材料流动方向则稍有不同,上板向焊缝中心线 下侧流动,而下板该位置材料则被搅拌针向上挤压。两侧材料以这样一种方式交 汇形成焊缝。

(3) 搭接接头的弱连接缺陷决定了拉伸试样的断裂位置主要位于平行于弱 连接的搭接面上,对于没有包铝层留下弱连接的焊接接头,其拉伸试样则主要断 裂在上板的焊缝区域。材料流动性不足造成隧道缺陷,使得搭接接头的抗拉强度 大大降低。

# 第五章 2024-T3 铝合金薄板基于 MORFEO 的热过程分析

第二章已经介绍了 MORFEO 两部分计算体系的联系,这一章分析的工件温度场主要是在软件的总体分析中进行。在第三章局部分析中得到的工件搅拌头附近的塑性变形能量数值,总体分析中需要使用该值作为总体的热输入,再根据热流密度分布公式对轴肩和搅拌针区域分别分配相应的能量。总体分析中认为材料具有弹塑性,属于固体力学模型。通过设定不同温度下的热物性参数以及合理的边界散热系数,来获得符合实际的工件温度场分布。局部分析和总体分析之间的联系可以用图 5-1<sup>[49]</sup>来表示。

![](_page_52_Figure_3.jpeg)

图 5-1 MORFEO 计算模型之间联系<sup>[49]</sup>

### 5.1 2024-T3 铝合金薄板对接形式的温度场总体建模

为了获得搅拌摩擦焊过程中工件上的温度场变化,除了需要确定热源形式以 外,还需要设定热物理性能参数,如 2024-T3 铝合金的密度,热导率和定压比热 容。在第三章对流动性的分析中也应用到这些参数,但是只涉及到其常温状态下 的数值。而焊接过程中温度时刻发生剧烈变化,因此这些数值也会发生变化,从 而影响了热量的散失速率。为了获得一定温度范围内 2024 铝合金的相关参数, 进行了一系列的测量试验,获得数值如表 5-1 所示<sup>[50]</sup>。

| 比热容 $J/(kg \cdot K)$ |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| <br>。<br>》<br>日      |        |        |        |        |        |        | 0.0    |        |        |
| 温度で                  |        | 46     | 100    |        | 200    | ) 300  |        | 400    |        |
| 数值                   |        | 900    | 900    |        | 940    | 0 980  |        | 1100   |        |
|                      |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 温度                   | 55     | 102    | 152    | 202    | 252    | 302    | 353    | 403    | 453    |
| °C                   |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
| 数值                   | 125.97 | 129.02 | 139.15 | 153.43 | 169.52 | 177.91 | 177.25 | 186.67 | 193.94 |

表 5-1 不同温度下 2024-T3 铝合金的热物理性能参数

对对接工件建立三维网格模型如图 5-2 所示,单元形式为八节点六面体,在 轴肩直径范围内对网格进行细分,横截面上该部分单元尺寸为 0.5 mm,越靠近 边缘的网格尺寸则越大。几何模型的建立在 Visual Mesh 中完成,导出 .nas 格式 的文件后在 GMSH 中进行物理组的划分。MORFEO 总体计算中主要涉及到两种 物理组,分别是面形式和体形式,其中前者主要用于定义边界条件和搅拌轴肩产 生热量的施加区域,后者主要用于对工件赋予相应的材料属性,并定义搅拌针产 生热量的施加区域。从图中网格表面的不同颜色可以区分出不同的物理组。图 5-2 中上表面是轴肩热源施加表面,与其他五个面共同组成了对流散热界面。为 了模拟实际焊接中对流散热和工件与垫板间的传导散热的区别,对这些表面设定 不同的对流散热系数,划分为散热面 1 和散热面 2 两种散热边界条件。其中散热 面 1 代表工件上下表面,在实际焊接中主要与夹具和垫板接触,因此热量的散失 主要通过热传导实现,这一界面赋予的对流散热系数较大。实际搅拌摩擦焊接中 峰值温度始终低于固相线,在通过温度反推并参考文献资料<sup>[51]</sup>,最终确定了焊 接过程的对流散热系数。在温度从 0 ℃至 800 ℃时,散热系数从 2000W / (m<sup>2</sup>•K) 至 3000W / (m<sup>2</sup>•K) 呈线性变化。散热面 2 在实际搅拌摩擦焊过程中主要依靠与空 气的对流散热,因此其散热系数较小,设定为0 ℃到 600 ℃从 1000W/(m<sup>2</sup>•K)到 1200W/(m<sup>2</sup>•K)线性变化。

总体分析中对于边界条件的定义还涉及到位移的控制,对应于搅拌摩擦焊中 夹具和垫板对于工件的夹紧作用。本文中选取散热面1作为位移边界条件的施加 界面,控制其 x, y, z 向位移皆为零,约束条件在焊接完成后卸载。模拟过程可以 根据实际需要定义为焊接过程和冷却过程,由于铝合金在搅拌摩擦焊后冷却非常 迅速,因此本文中没有对冷却过程进行设置。

![](_page_54_Figure_3.jpeg)

图 5-2 对接工件三维网格

#### 5.2 铝合金对接薄板的温度场分布

根据多次计算分析,最终确定搅拌摩擦焊过程的热量使用效率为80%,其中 轴肩热量分配比率为75%。模拟中设定焊接开始时间为0s,焊接前进时间为1.5 s,即安排了1.5 s的预热期。图5-3 所示为4mm厚2024-T3 铝合金薄板在不同 时间段的温度云图,图a至图d分别显示的是搅拌摩擦焊初始1s,焊接过程中 24 s,54 s 和74 s 时的温度分布。焊缝中心温度也随之从低升高,最终稳定在一 个范围内,而这个范围始终低于铝合金固相线温度,即503℃。

![](_page_54_Figure_7.jpeg)

![](_page_55_Figure_1.jpeg)

图 5-3 不同时间的工件温度云图 (a)1 s 时 (b)24 s 时 (c)54 s 时 (d)74 s 时

图(a)所示是搅拌摩擦焊初始阶段,相当于 plunge 阶段。此时,整个铝合金板 都还处于室温状态下,需要依靠搅拌头的旋转产生足够的热量使其局部区域母材 可以达到塑性软化状态,因此1s时峰值温度还较低,并且200 ℃以上的高温区 还局限在一个很小的范围内。 随着搅拌头持续旋转,其周围的材料温度也逐渐升 高,母材达到软化流动状态,因此进入 welding 阶段。图(b)所示是搅拌头刚进行 前进焊接阶段,此时焊缝中心温度已经高达 490 ℃,并且 300 ℃以上的高温区 已经明显大于图(a)。此时板材上的传热效果还不是非常明显,在搅拌头前方100 ℃以上的区域较窄,主要是因为焊接时间过短,温度还来不及传到至搅拌头前方 较远距离。图(c)所示是焊接进行接近一半过程,焊缝区域内高温分布与 24s 时基 本没有差别,但是100 ℃以上的高温区域已经向搅拌头四周扩散开来。由于搅 拌头后方材料刚被摩擦加热过,其散热过程没有边缘板材进行得快,而搅拌头前 方大部分板材还未被加热,其温度上升主要依靠的是后方热量的传导,因此才会 形成搅拌头后方高温区比搅拌头前方高温区宽的现象。图(d)是焊接进行过半的 时刻,此时材料焊接已经完全进入了稳定阶段,并且其中心部位峰值温度达到 480 ℃以上,与之前两个阶段相比有所降低。总体来讲,当焊接开始进行后,搅 拌头周围区域内的材料温度场主要是一个由许多前部较宽,后部较窄的封闭卵形 等温线组成,前部等温线间距较小,而后部则较大。

# 5.3 焊缝横截面上不同点的温度曲线

为了了解进入准稳态焊接中铝合金工件上温度的变化过程,在工件前进侧选取不同的点来分析具体的温度随时间的分布状态。点1,2,3都位于距离焊接开

始边 50 mm 处的横截面上,焊缝中心线右侧 2 mm 处,距离工件表面距离分别为 1 mm, 2 mm 和 3 mm。点 4, 5, 6 与点 1 平齐,位于焊缝中心线右侧 3 mm, 4.4 mm 和 6 mm 处。点 7 和点 8 与点 4 组成的直线与焊缝中心线平行,距离焊缝开 始边的距离分别为 20 mm 和 70 mm。这些点在工件上的分布如图 5-4 所示。

![](_page_56_Figure_2.jpeg)

图 5-4 测温特征点分布

图 5-5 显示的是前进侧沿工件厚度方向分布的三个点随时间变化的温度分布 曲线图。由于分布在同一横截面上,这三个点几乎同时到达焊接峰值温度。由于 轴肩占据了搅拌摩擦焊过程产热的主要部分,因此距离工件表面最近的点1峰值 温度也是最高的,接近450 ℃。点2和点3的峰值温度较点1略低,但三者差 别并不大,几乎只有50 ℃的温度跨距。这一相似性主要是因为采用薄板焊接, 因此在工件厚度方向的各点散热几乎没有区别。

![](_page_56_Figure_5.jpeg)

图 5-5 不同厚度点温度分布

图 5-6 所示为该横截面上距离焊缝中心线不同距离的特征点的温度曲线图。 各点温度随时间的变化规律与图 5-5 非常相似,因为仍然位于同一横截面上,每 个点还是在同一时间到达各自的峰值温度。其中点 1 和点 4 都位于轴肩覆盖区域 内,点 4 位于轴肩半径边缘处。这两个点在峰值处的温度都接近于 450 ℃,而 点 5 和点 6 的最高温度则小于 400 ℃。前两个点的温度上升主要依靠轴肩产热, 因此温度升高的主动性较高。后两个点的温度上升则主要依靠附近焊缝区域内材 料的导热作用,属于被动的升温,这也是两者峰值温度差别较大的原因。同图 5-5 所不同的是,图 5-6 所示的四个特征点温度升高斜率稍微有些不同,点 6 温 度曲线的上升斜率较低。越靠近工件边缘的特征点,与外围材料之间的温度梯度 就越大,因此也越有利于它的热量散失,因此这四个特征点的升温斜率才会有所 区别。

![](_page_57_Figure_2.jpeg)

图 5-6 距离焊缝中心线不同距离点温度分布

图 5-7 所示的三个特征点位于距离焊接开始边不同距离的横截面上,但是距 离焊缝中心线的距离都为 3 mm,即位于轴肩边缘处。这三个点到达峰值温度的 时间各不相同,其间隔大约就是搅拌头中心到达各个横截面的时间差。虽然三个 特征点距离焊缝中心线的距离相同,但是峰值温度并非相等。点 7 所在的横截面 距离焊接开始边比较近,相当于仍然处于焊接预热阶段,产热量急剧增加,因此 峰值温度略高。而之后当搅拌头行进至的两个点所在横截面时,焊接基本已经稳 定阶段,无论是产热还是散热都达到平衡状态,因此峰值温度较低,约维持在 430 ℃上下。焊接开始阶段,整个工件都处于室温状态,因此随着搅拌头的旋转 其附近材料快速升温。随着焊接的进行,搅拌头向前行进,整个工件温度都会有 所上升。当搅拌头位于特征点所在横截面时,温度升高的速度就会有所下降,比 焊接开始阶段的温度曲线稍微平缓些。但是焊接仍然是一个温度剧烈变化的过程,因此这三条曲线之间的斜率差别并不是很大。

![](_page_58_Figure_2.jpeg)

图 5-7 距离焊缝开始边不同距离点温度分布

# 5.4 本章小结

本章基于 MORFEO 的总体分析模块,对 2024-T3 铝合金薄板对接工件热过 程进行了分析,得到以下结论。

(1)通过对不同时间点工件上温度云图进行提取发现,焊接最高温度位于 搅拌头中心区域,并且始终低于铝合金熔点。在焊接开始阶段,由于工件整体温 度较低,随搅拌头旋转产生大量热量,峰值温度较高。搅拌头附近工件呈现出一 个前端高温区较窄,后端高温区较宽的卵形等温线分布区域。

(2)在对工件同一横截面上的特征点进行分析发现,越靠近轴肩的特征点 其峰值温度也越高,但是在沿工件厚度方向上特征点的峰值温度差值并不大。而 在越远离焊缝中心线的特征点,其峰值温度不仅较低,升温曲线的斜率也较平缓。 在轴肩半径区域内的特征点其峰值温度明显高于外部的特征点。

(3)分析工件上不同横截面上的特征点发现,在焊接刚开始时,温度上升 较快,并且峰值温度也较高。这与观察工件上温度云图得到的结果是一致的,也 比较符合实际的焊接特点。

# 第六章 结 论

本文选用有限元分析软件 MORFEO,对铝合金薄板搅拌摩擦焊对接接头的 流场和温度场进行了模拟分析,并结合材料标记试验,通过研究对接、T 接和搭 接接头来分析搅拌摩擦焊连接面材料的流动特点。可以得到如下结论:

(1) MORFEO 将材料粘性耗散作为搅拌摩擦焊热源,模拟中通过改变被焊 工件热物理性能参数、搅拌头几何尺寸和焊接参数,就可以得到焊接所需要的热 输入。模块化的参数设定使得该软件在参数优化任务上更加方便可行,并且完全 不依靠于试验辅助测量,可以实现以模拟指导工艺。

(2)使用局部分析模块模拟 4 mm 厚 2024-T3 铝合金薄板对接时,设计了圆 柱形和圆锥形两种形状的搅拌针,当焊接速度为 80 mm/min,旋转速度为 500 rpm, 600 rpm, 800 rpm 和 980 rpm 时,研究旋转速度对于工件不同厚度水平面质点的 流线特征。模拟结果表明,前进侧质点绕过搅拌针前端向后退侧移动,而后退侧 的质点则顺着旋转方向运动至搅拌针后侧。随着工件厚度的增加,越靠近搅拌针 底端的质点运动路径也越短,质点基本只能运动至搅拌针后端的后退侧。但是当 旋转速度为 600 rpm 时,圆锥形搅拌针作用下,不同厚度处的质点都可以在搅拌 针后端两侧均匀分配。

(3)采用圆锥形搅拌针对不同旋转速度下 2024-T3 铝合金对接焊缝标记材料试验研究表明,后退侧铜箔向后弯曲,流入前进侧。铜箔发生明显弯曲的外侧材料晶粒产生明显拉长现象,属于热力影响区。600 rpm 时,工件各个厚度上的铜箔流动性与模拟结果相符,焊缝区域没有发现由于流动不足而产生的缺陷。

(4)为了研究搅拌摩擦焊过程的材料流动特点,本文也设计了T型接头和 搭接接头分别进行研究,材料主要有2024-T3和7075-T6。T型接头的壁板中存 在与对接接头类似的横向材料流动,而在轴向流动中,壁板和筋板间则以一种交 叉分层向下流动的方式相交汇,极容易在实际T型接头的圆角区位置产生流动 "死角"。在对搭接接头进行分析时发现,上下板在前进侧材料都向焊缝中心线 上侧运动,上板在后退侧向中心线下侧流动,而下板则被搅拌针挤压向上方运动。

(5)使用总体分析模块对 4 mm 厚的 2024-T3 铝合金薄板对接工件温度场分 布进行模拟,发现焊接高温区主要位于搅拌头中心附近区域,而前端的高温区间 比后端较窄,呈现一个卵形的温区分布。在焊接刚开始时,搅拌头附近工件温度 上升较快,峰值温度也比较高。当焊接逐渐进入稳定阶段,温度曲线上升较缓, 峰值温度也略有降低。

53

# 参考文献

[1]Thomas MW, Nicholas ED, Needham JC, et al. Friction stir welding, GB, Patent Application, 99125978, 1991-12-08

[2]Nandan R, Debroy T, Bhadeshia HKDH. Recent advances in friction stir welding process, weldment structure and properties [J]. Progress Material Science, 2008, 58(5): 980~1023

[3] Neto DM, Neto P. Numerical modeling of friction stir welding process: a literature review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012: 1~12

[4] Schmidt H, Hattel J, Wert J. An analytical model for the heat generation in friction stir welding [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2004, 12: 143~157

[5] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍,等.焊接数值模拟中以温度为控制变量的高效 算法 [J].焊接学报,2009,30(8):77~80

[6] Khandkar MZH, Khan JA, Reynolds AP. Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model[J]. Science and Technology of Welding and Joining. 2003, 8(3): 165~174

[7] 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,2000,21(4):61~64

[8] 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

[9] Colligan K. Dynamic material deformation during friction stir welding aluminium [C]. Proc. 1st Int. Symp. on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, USA 1999

[10] Colligan K. Material flow behaviour during friction stir welding of aluminum [J]. Welding Journal, 1999, 75 (7): 229~237

[11] Reynolds AP, Seidel TU, M Simonsen. Visualization of material flow in an autogenous Friciton Stir Weld [C]. Proc. 1<sup>st</sup> Int. Symp. on Friction Stir Welding, Thousand Oaks, USA 1999 [12] Seidel TU, Reynolds AP. Visualization of the material flow in AA2195 friction-stir welds using a marker insert technique [J]. Metallurgical and materials Transactions A, 2001, 32(11): 2879~2884

[13] 柯黎明,潘际銮,邢丽,等. 搅拌摩擦焊焊缝金属塑性流动的抽吸-挤压 理论 [J]. 机械工程学报,2009,45(4):89~94

[14]London B, Mahoney M, Bingel W, et al. Material flow in friction stir welding monitored with Al–SiC and Al–W composite markers [J]. Friction Stir Welding and Processing II. The Minerals, Metals and Materials Society (TMS), 2003: 3~12

[15]Russell MJ. Development and modeling of Friction Stir Welding. PhD Thesis, University of Cambridge, 2000

[16]王希靖,韩晓辉,李常锋,等.厚铝合金板搅拌摩擦焊塑性金属不同深度的水平流动状况 [J].中国有色金属学报,2005,15(2):198~203

[17]Liechty BC, Webb BW. The use of plasticine as an analog to explore material flow in friction stir welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 184: 240~250

[18]Colegrove PA, Shercliff HR. 3-Dimensional CFD modeling of flow round a threaded friction stir welding tool profile [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169: 320~327

[19]Reynolds AP, Flow visualization and simulation in FSW [J]. Scripta Material, 2008, 58: 338~342

[20]Xu S, Deng XM, Reynolds AP, et al. Finite element simulation of material flow in friction stir welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6:191~193

[21]Fratini L, Buffa G, Micari F, et al. On the material flow in FSW of T-joints: Influence of geometrical and technological parameters [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 44(5-6): 570~578

[22] 张昭, 刘会杰. 搅拌头形状对搅拌摩擦焊材料变形和温度场的影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32 (3): 5~8

[23]赵衍华,林三宝,贺紫秋,等.二维搅拌摩擦焊接过程的数值模拟 [J]. 中国有色金属学报,2005,15(6):865~869

[24] Tang W, Guo X, McClure JC, et al. Heat input and temperature distribution in friction stir welding [J]. Journal of Materials Processing& Manufacturing Science, 1998, 7(2): 163~172 [25] Khandkar MZH, Khan JA, Reynolds AP. Prediction of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2003, 8(3): 165~174

[26]Buffa G, Hua J, Shivpuri R, et al. A continuum based fem model for friction stir welding-model development [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 419: 389~396

[27]郭瑞杰,搅拌摩擦焊温度场数值模拟:[硕士学位论文],兰州;兰州理 工大学,2004

[28] 张彦富, 柯黎明, 孙德超, 等. 搅拌摩擦焊焊缝区温度分布及对材料流动的影响 [J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版), 2003, 17(3): 12~16

[29]徐文娟,韩建勇,工程流体力学,哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2002.10~59

[30]刘寒龙. 搅拌摩擦焊数值模拟技术研究及应用 [J]. 航空制造技术, 2011, 23

[31]De Vuyst T, D'Alvise L. Prediction of material flow, thermal cycles, post-weld metallurgy and residual stresses in Friction Stir Welded components. CENAERO Internal Report, 2004

[32] Temam R. A generalized Norton-Hoff model and the Prandtl-Reuss law of plasticity [J]. Archive for Rational Mechanics and Analysis, 1986, 95(2): 137~183

[33]De Vuyst T, Madhavan V, Ducoeur B, et al. Computing temperature cycles in FSW using a combined thermo-fluid and thermo-mechanical finite element model. CENAERO Internal Report, 2004

[34]乔文广,时效处理对 2024-T3 搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响:[硕士 学位论文],天津;天津大学,2008

[35]Zhang L, Ji S, Luan G, et al. Friction Stir Welding of Al Alloy Thin Plate by Rotational Tool without Pin [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2011, 27(7): 647~652

[36]Guerra M, Schmidt C, McClure JC, et al. Flow patterns during friction stir welding [J]. Materials characterization, 2002, 49(2): 95~101

[37]Leonard AJ, Lockyer SA. Flaws in friction stir welds [C], 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Park City, Utah, USA, 2003

[38]Zhao YH, Lin SB, Wu L, et al. The influence of pin geometry on bonding and mechanical properties in friction stir weld 2014 Al alloy [J]. Materials letters, 2005, 59(23): 2948~2952 [39] Tavares SMO, Castro RAS, Richter-Trummer V, et al. Friction stir welding of T-joints with dissimilar aluminium alloys: mechanical joint characterization [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2010, 15 (4): 312~318

[40]林钢,林慧国,赵玉涛,铝合金应用手册,北京:机械工业出版社,2006. 364~369

[41]Krishnan KN. On the formation of onion rings in friction stir welds. [J] Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2002, 327 (2): 246~251

[42] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2005, 50(1): 1~78

[43]Zhang H, Wu H, Huang J, et al. Effect of welding speed on the material flow patterns in friction stir welding of AZ31 magnesium alloy [J]. Rare Metals, 2007, 26(2): 158~162

[44] Acerra F, Buffa G, Fratini L, et al. On the FSW of AA2024-T4 and AA7075-T6 T-joints: an industrial case study [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(9-12): 1149~1157

[45]Donati L, Tomesani L, Morri A. Structural T-joint produced by means of friction stir welding (FSW) with filling material [J]. International Journal of Material Forming, 2009, 2(1): 295~298

[46]刘会杰,潘庆,孔庆伟,等.搅拌摩擦焊焊接缺陷的研究 [J].焊接学报, 2007,2:17~21

[47] Wang KS, Shen Y, Wang XH, et al. Study on flow visualization with friction stir welding of 1060 aluminum and 3003 aluminum [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(10): 1677~1680

[48]柯黎明,潘际銮,邢丽,等.焊缝金属厚度方向的流动与洋葱瓣花纹的形成 [J].焊接学报,2008,29(7):39~42

[49] De Vuyst T, Magotte O, Robineau A, et al. Material flow around a friction stir welding tool- experiment and validation. CENAERO Internal Report, 2004

[50]Carton M, Geelen S, Lecomte-Beckers J. Thermal characterization of the 2024-T3 aluminium alloy. CENAERO Internal Report, 2004

[51]Zhu XK, Chao YJ. Numerical simulation of transient temperature and residual stresses in friction stir welding of 304L stainless steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146(2): 263~272

# 发表论文和参加科研情况说明

# 发表的论文:

胥妍,杨新岐,刘寒龙.基于 MORFEO 的采用不同搅拌针形状时沿板厚方向流动性的数值分析[J].焊接学报,已录用

# 参与的科研项目:

本人参与了杨新岐教授的国家自然科学基金项目(50775159)的研究,并作 为第一发明人申请发明专利:

一种观察搅拌摩擦焊连接面材料流动的方法.(专利申请号:2013104661348)

# 致 谢

本论文是在我的导师杨新岐教授的悉心指导下完成的,两年半以来,杨老师 从选题、试验到写作阶段都给了我极大的关注和指导。在初学软件阶段,杨老师 更是以他扎实的有限元分析基础指引并鼓励着我。在论文写作阶段,杨老师更是 孜孜不倦的帮我修改,给我很多中肯的意见。在这几年里,我不仅完成了对本课 题的研究工作,更重要的是杨老师勤恳的治学态度,发散的创新性思维给了我极 大的影响,这使我今后的学习和工作都将受益匪浅。在这里,我向杨老师表达衷 心的谢意。

在论文的审阅阶段,李午申教授,韩国明教授和郑振太教授都提出了大量的 宝贵意见,我向三位老师表达诚挚的谢意。

北京创联智软科技有限公司的刘寒龙为本文的研究提供了软件支持,并在我 的数值分析工作中不厌其烦的做了大量指导工作,在此表示衷心感谢。

在试验阶段,崔雷、李冬晓师兄,宋友宝、侯晓鹏、殷亚运和何方舟等同学 都对我给予了帮助,在此也向他们表达我的谢意。

最后,我要感谢我的家人在我读研期间理解我支持我,让我能专心完成学业。

# 基于MORFEO的对搅拌摩擦焊流动性及热过程的研究

![](_page_66_Picture_1.jpeg)

 作者:
 胥妍

 学位授予单位:
 天津

天津大学

引用本文格式: 晋妍 基于MORFEO的对搅拌摩擦焊流动性及热过程的研究[学位论文]硕士 2013