

# 搅拌摩擦焊的 数值模拟

张 昭 张洪武 著



科学出版社

# 搅拌摩擦焊的数值模拟

张 昭 张洪武 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书从5个方面阐释搅拌摩擦焊的数值模拟方法和由数值模拟得出的物理规律,主要包括:搅拌摩擦焊的基本原理以及搅拌摩擦焊研究的主要进展;搅拌摩擦焊数值模拟所需的有限元技术基础理论和方法;搅拌摩擦焊的传质与传热;搅拌摩擦焊焊接构件残余应力和残余变形的数值模拟;搅拌摩擦焊焊接构件疲劳寿命的计算方法;搅拌头受力的计算方法以及疲劳寿命预测的解析计算方法和有限元计算模型;搅拌摩擦焊晶粒尺寸的计算方法和焊接微结构演化对力学性能影响的计算方法。

本书可供高等院校机械工程等专业师生和企业相关技术人员阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

搅拌摩擦焊的数值模拟/张昭,张洪武著. —北京:科学出版社,2016  
ISBN 978-7-03-048782-7

I. ①搅… II. ①张… ②张 III. ①摩擦焊-数值模拟 IV. ①TG453

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 131865 号

责任编辑:陈 婕 纪四稳 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2016年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2016年6月第一次印刷 印张:20

字数:400 000

定价:128.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

搅拌摩擦焊的数值模拟涉及热力耦合、大变形、显微结构演变等,是较为复杂的力学问题和材料学问题,隶属于力学与材料学的学科交叉领域,在数值模拟方面具有挑战性。同时,基于搅拌摩擦焊发展出的搅拌摩擦点焊、搅拌摩擦加工以及搅拌摩擦增材制造等技术均具有广阔的应用前景,针对搅拌摩擦焊的数值研究对上述技术机理的理解和质量控制具有理论意义和工业应用方面的推动作用。

本书共7章,从5个方面阐释搅拌摩擦焊的数值模拟方法和由数值模拟得出的物理规律,第1章主要介绍搅拌摩擦焊的基本原理以及搅拌摩擦焊研究的主要进展;第2章主要介绍完成搅拌摩擦焊数值模拟所需的有限元技术基础理论和方法,包括弹性力学、变分原理和有限单元法基础,本构方程及求解,搅拌摩擦焊主要数值模型及网格处理技术;第3章主要介绍搅拌摩擦焊的传质与传热,阐释搅拌摩擦焊中热生成机理和材料流动机理以及焊接缺陷产生机理;第4章主要介绍搅拌摩擦焊焊接构件残余应力和残余变形的数值模拟,并进一步讨论复杂形式焊接构件的残余应力以及热处理工艺对焊接构件残余应力的影响;第5章主要介绍搅拌摩擦焊焊接构件疲劳寿命的计算方法,并讨论残余应力分布对焊接构件疲劳寿命的影响以及叶轮结构的裂纹扩展和概率失效;第6章主要介绍搅拌头受力的计算方法以及疲劳寿命预测的解析计算方法和有限元计算模型;第7章主要介绍搅拌摩擦焊晶粒尺寸计算的方法,并简单讨论焊接微结构演化对力学性能影响的计算方法。

本书的完成得益于作者所在研究团队自2003年以来对搅拌摩擦焊数值模拟持续不断的工作。与本书内容相关的科研工作,得到了国家自然科学基金(10802017、11172057、11572074)的持续资助,以及教育部新世纪优秀人才支持计划、中央高校基本科研业务费专项资金、国家重点基础研究发展(973)计划(2011CB013401)的资助,对此深表感谢;同时,对工业装备结构分析国家重点实验室的资助和支持也表示感谢。此外,在撰写本书过程中,研究生吴奇、葛芑、别俊、田宇、赵磊、万震宇、刘慧杨以及青年教师刘亚丽均为本书的完成提供了不同程度的帮助,在此对他们表示诚挚的感谢。

限于作者的学识和经验,书中难免存有不足,敬请读者批评指正。

作者

2015年12月

于大连理工大学

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 搅拌摩擦焊研究进展	2
1.2 搅拌摩擦焊数值模拟研究进展	8
参考文献	12
第 2 章 有限元基础和数值模型	21
2.1 弹性力学基础	21
2.2 变分原理基础	25
2.3 有限元基础	28
2.3.1 三角形单元	28
2.3.2 矩形单元	41
2.3.3 四面体单元	43
2.3.4 六面体单元	44
2.3.5 数值积分	46
2.4 本构方程	47
2.4.1 非率相关本构模型	47
2.4.2 率相关本构模型	51
2.4.3 Perzyna 模型	52
2.4.4 Duvaut-Lion 模型	53
2.4.5 Cowper-Symonds 过应力模型	53
2.4.6 图形返回算法	54
2.5 数值模型	55
2.5.1 移动热源模型	55
2.5.2 顺序热力耦合模型	58
2.5.3 欧拉模型和任意拉格朗日-欧拉模型	62
2.5.4 自适应网格重剖分模型	67
2.5.5 光滑粒子法数值模型	68
2.5.6 流体力学模型	70
参考文献	72

<b>第 3 章 传质与传热</b> .....	76
3.1 热源分析 .....	76
3.1.1 摩擦生热 .....	76
3.1.2 热输入功率与搅拌头转速的关系 .....	79
3.1.3 能量转换及塑性生热的热贡献 .....	81
3.2 焊接参数对焊接温度的影响 .....	87
3.2.1 ALE 模型 .....	87
3.2.2 移动热源模型 .....	90
3.3 材料流动与塑性变形 .....	95
3.3.1 物质点运动规律 .....	95
3.3.2 焊接参数影响 .....	102
3.3.3 等效塑性应变分析 .....	116
3.3.4 焊接缺陷 .....	121
3.3.5 流线分析 .....	124
参考文献 .....	125
<b>第 4 章 残余状态及热处理</b> .....	127
4.1 残余应力 .....	128
4.1.1 基于温度场的热力耦合模型 .....	128
4.1.2 热力耦合模型 .....	130
4.1.3 顺序热力耦合模型 .....	135
4.1.4 焊接叶轮残余应力 .....	144
4.2 残余变形 .....	151
4.3 热处理影响 .....	160
4.3.1 焊接平板 .....	160
4.3.2 T 型板 .....	171
参考文献 .....	174
<b>第 5 章 焊接构件疲劳与寿命</b> .....	178
5.1 应力强度因子与裂纹扩展速率 .....	180
5.2 叶轮轮轴接触部位裂纹扩展 .....	189
5.3 叶轮叶片的概率失效 .....	200
5.4 搅拌摩擦焊平板寿命预测 .....	208
5.5 搅拌摩擦焊与 TIG 焊对比 .....	220
参考文献 .....	224

---

第 6 章 搅拌头的受力与疲劳	228
6.1 搅拌头受力计算	228
6.1.1 流体力学模型	228
6.1.2 网格重剖分模型	235
6.2 搅拌头疲劳应力计算	245
6.3 搅拌头疲劳寿命	254
参考文献	263
第 7 章 微观结构及力学性能	267
7.1 再结晶数值模拟	267
7.1.1 再结晶与材料流动	267
7.1.2 转速影响	274
7.1.3 搅拌针影响	282
7.1.4 轴肩影响	286
7.2 蒙特卡罗法	292
7.3 沉淀相及力学性能预测	302
7.3.1 形核率	303
7.3.2 生长率	303
7.3.3 粒子尺寸分布	304
7.3.4 离散方程	304
7.3.5 数值计算流程	305
7.3.6 强化模型	306
参考文献	309

# 第 1 章 绪 论

搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)技术是英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)于 1991 年发明的一种新型焊接工艺<sup>[1]</sup>,具有接头性能好、低缺陷、高强度以及环保等特点,可以对多种熔化焊接性能差的金属进行焊接,尤其适用于航空航天以及船舶制造等领域。搅拌摩擦焊最初的目的是用于连接低熔点合金板材,如铝合金、镁合金等。与传统的焊接方法相比,它具有优质、低耗、焊接变形小和无污染等特点<sup>[2-10]</sup>,具体表现为:①可焊接板材及多种接头形式(对接、角接、搭接和 T 形接头等),还可进行不同位置焊接;②可用于对使用熔焊连接有一定难度的材料,如铝合金、钛合金及铜铝等异种材料的连接;③焊缝质量高,接头中不发生热裂纹、气孔等缺陷,接头力学性能好;④焊接成本低,焊前设备要求低,允许接缝有薄氧化膜和附着杂质,不需要焊后处理,也不需要使用填充材料和保护气体等;⑤焊接过程安全性好,无熔化、无飞溅、无烟尘、低噪声,是一种环保型的绿色节能连接技术<sup>[11-18]</sup>。在搅拌摩擦焊过程中,一个带有肩台的柱形或锥形搅拌头不断旋转并插入焊接工件中,搅拌头和焊接工件之间的摩擦剪切阻力导致摩擦热的产生,并促使搅拌头临近区域的材料热塑化,当搅拌头进行移动时,搅拌头周围的热塑化材料由于搅拌头的作用而发生迁移,并在轴肩和工件之间产生的摩擦热以及锻压的共同作用下,形成致密的固相连接接头<sup>[19]</sup>,如图 1.1 所示。在搅拌摩擦焊过程中,搅拌头旋转时线速度与搅拌头运动方向相同的一侧称为前进侧(advancing side),搅拌头旋转时线速度与搅拌头运动方向相反的一侧称为后退侧或返回侧(retreating side)。搅拌摩擦焊构件前进侧和后退侧具有不同的材料流动行为<sup>[20]</sup>。

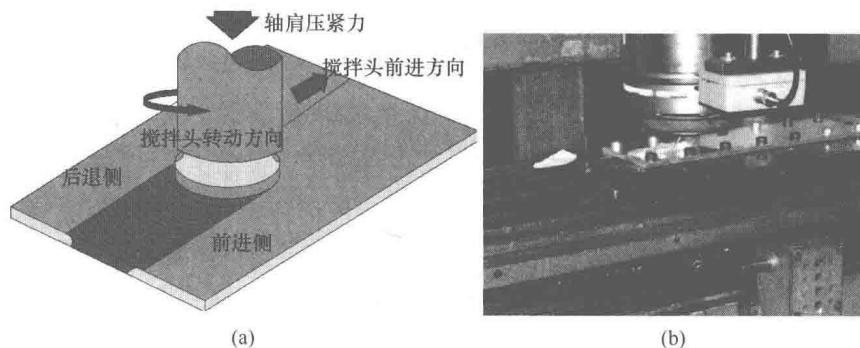


图 1.1 搅拌摩擦焊



通过搅拌摩擦焊,在焊接区域会形成几个较为明显的区域:搅拌区(stirring zone, SZ)、热力影响区(thermo-mechanically affected zone, TMAZ)、热影响区(heat affected zone, HAZ)和母材区(base metal zone, BZ),如图 1.2 所示,其中焊核区(nugget zone, NZ)在搅拌区内。在搅拌区会通过再结晶形成细小等轴晶粒,其具有良好的力学性能。

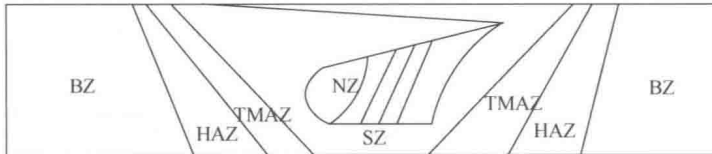


图 1.2 焊接区域示意图

搅拌摩擦焊工艺被认为是近二十几年来金属连接工艺中最重要的发明之一,由于其节能和环保的特点,被评定为一种绿色工艺<sup>[21]</sup>。同传统的焊接工艺相比,搅拌摩擦焊不需要使用保护气以及填充材料,而这些恰恰是熔化焊接中必须要考虑的问题。搅拌摩擦焊对材料的适应性也很强,几乎可以焊接所有类型的铝合金,另外,对于镁合金、锌合金、铜合金、铅合金、铝基复合材料、钛合金以及不锈钢等材料的板状构件对接也是优先选择的方法。同时,搅拌摩擦焊也可以实现异种材料之间的焊接<sup>[6,22-24]</sup>。当搅拌头偏离焊缝中心线一定距离时,也可以实现异种金属间的可靠连接<sup>[25]</sup>。异种金属间的连接会导致出现不规则的搅拌区形状<sup>[26]</sup>。

搅拌摩擦焊构件的焊接质量主要与搅拌摩擦焊的焊具及工艺参数有关,其中包括搅拌头的几何形状、旋转速度、焊接速度、焊具倾角、轴向压力等。搅拌头由轴肩和搅拌针构成,是搅拌摩擦焊的关键部件,其几何形状不仅直接影响搅拌焊接中的热输入方式,还会影响搅拌头附近的材料流动形式<sup>[4,27-29]</sup>,因此如何选择合适的搅拌头以获得高质量搅拌摩擦焊接头是搅拌摩擦焊研究的重要方面。

## 1.1 搅拌摩擦焊研究进展

搅拌头是搅拌摩擦焊技术的核心。在搅拌摩擦焊生产中,搅拌头起到提供焊接热能量及带动母材流动的作用<sup>[30]</sup>。伴随着搅拌头的高速旋转,搅拌头长期处于与母材材料的摩擦作用下,生产中需要经常更换搅拌头,以保证搅拌头表面的粗糙度,用以提供足够的摩擦热。因此,搅拌头表面常出现磨损严重的问题;除此之外,搅拌头也有可能出现断裂破坏的情况,这也同样与搅拌头的受力情况密切相关。因而在长期的摩擦力及压力作用下,搅拌头的疲劳性能是需要关注的。

在对搅拌头受力研究的过程中,研究者做了大量工作,他们认为搅拌头在焊接

过程中将同时承受剪切及弯曲的组合作用力,搅拌针断面上的受力可能出现如图 1.3所示三种形式。

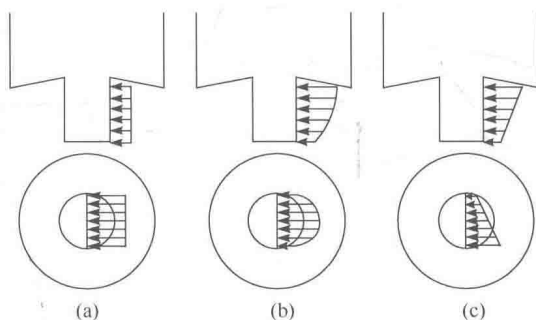


图 1.3 搅拌针的受力形式<sup>[31]</sup>

对搅拌头进行分析和设计,主要包括的设计参数和研究内容如图 1.4 所示。

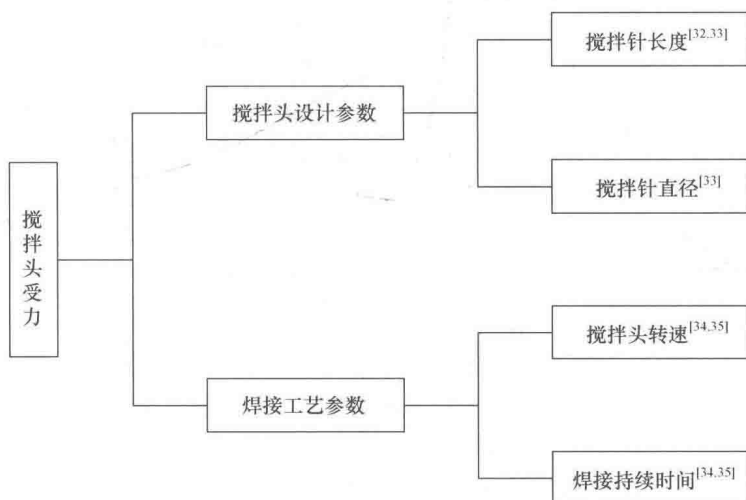


图 1.4 搅拌头设计参数与研究重点

Sorensen 等<sup>[31]</sup>认为,搅拌头的受力形式并不是如图 1.3 所展示的简单模型的分布函数,而是以上三种模型的组合形式,搅拌头所受纵向应力将沿着深度方向减小,但这种趋势存在临界值。若搅拌头长度小于这个临界值,搅拌针上的应力将呈现线性减小的趋势,若大于临界值,超过临界值的部分将保持临界值时的应力状态。Arora 等<sup>[36]</sup>采用黏塑性模型,对搅拌头受力进行分析,得到了搅拌头上剪切应力的变化规律,但并未发现存在临界值。Tozaki 等<sup>[32,33]</sup>在对搅拌摩擦点焊的研究中发现,搅拌针的长度对接头断裂模式和强度有明显影响,搅拌针长度是搅拌摩擦点焊的重要设计参数。

关于搅拌头的研究并不局限于搅拌头强度问题上,因为搅拌头在焊接过程中与母材材料发生剧烈摩擦而产生磨损现象,所以搅拌头在正常工作下的使用寿命也同样成为搅拌头研究的重点课题,具体如表 1.1 所示。

表 1.1 搅拌头磨损

搅拌头材料	搅拌头转速 $n/(r/min)$	搅拌头尺寸		焊速 $v/(mm/min)$	磨损率	参考文献
		搅拌针直径 $r_p/mm$	搅拌针长度 $h/mm$			
工具钢 H13/K390 (Cryo H13/K390)	1200	—	—	50/100	0.014%/0.005% (0.01%/0.005%)	[34]
油淬工具钢	1000	6.3	—	60/180/ 360/540	0.45%/0.31% /0.22%/0.19%	[35]
油淬工具钢	1000/750/500	6.3	3.6	360	24%/20.5%/6%	[37]
WC-Co 硬质合金	1500/2000	6	5	25/50/100/150	11%~27%	[38]
GH4169	600	4.5	4.7	65	4.2%	[39]

注:Cryo为Cryotreatment,即低温处理。

当所焊材料不同时,应选取合适的搅拌头材料,一是为了保证焊后接头的焊接质量,二是为了降低搅拌头的磨损,使之可以长期服役。研究表明,搅拌头在焊接初期会发生严重磨损,但磨损基本只发生在搅拌头的周向方向上,搅拌头长度、轴肩等部位磨损量极小<sup>[38]</sup>。这种磨损的原因基本可以归纳为以下几类:黏结磨损、氧化磨损、扩散磨损、磨料磨损。不同搅拌头材料及形状下,上述磨损量的贡献不尽相同<sup>[39]</sup>。随着焊接的进行,这种磨损将逐渐缓解,焊接距离达到某一个值时,搅拌头的磨损量趋近于零,此后的焊接过程中,搅拌头的工作状态将处于平稳,因此,在搅拌针形状设计上,应使得在旋转速度一定的情况下,在较短的时间内达到较高的焊接速度,尽量降低搅拌头的磨损<sup>[35,37]</sup>。为了进一步降低这种搅拌头的磨损量,研究者开始对各类焊接中的搅拌头材料进行研究。研究发现,如能对搅拌头进行焊前处理,磨损量也能出现相应程度的降低,如 Surekha 等<sup>[34]</sup>将 H13 工具钢进行焊前超低温冷处理,使得搅拌头材料发生相变,提高了搅拌头内的马氏体含量,从而提高了搅拌头的硬度,降低了搅拌头磨损量。

作为搅拌摩擦焊技术的核心,搅拌头的选材一直是研究人员关注的问题,在诸多研究中,人们发现对于不同的焊接材料,选择合适的搅拌头材料可以更好地保证焊接质量与焊接效率。在对以往研究成果及科研文献的回顾后,本章列举了部分搅拌头选材,如早期针对铝合金、镁合金<sup>[31,40,41]</sup>等轻质材料焊接,搅拌头多选择工具钢材料。工具钢材料易获取,切削加工性好,制作成本低,且在焊接中磨损程度

低,可以保证较长的工作时间<sup>[42]</sup>。应用于航空航天领域的钛合金材料在进行搅拌摩擦焊过程中,多采用钨系列的搅拌头<sup>[43,44]</sup>。钨系列的合金钢搅拌头可以很好地保证焊接质量,满足如火箭、高空飞行器等特殊领域的装备需要。在对钛合金材料的焊接中,钨系列合金钢的磨损情况较其他材料搅拌头好,可以更好地重复使用。在钢铁等黑色金属焊接中,则主要采用聚晶立方氮化硼作为搅拌头材料<sup>[45,46]</sup>。而在金属基复合材料的焊接中,则大多应用 AISI 标准的强化工具钢作为搅拌头材料<sup>[47,48]</sup>。

因搅拌头在焊接中高速旋转带动焊接材料流动的特性,搅拌头形状对焊接质量的影响也同样是巨大的,采用不同形状的搅拌头进行焊接,母材区的焊后纹理、微观晶粒尺寸及焊后焊材力学性能的变化是复杂的。因此,对搅拌头形状的研究以及合理设计,也是确保搅拌摩擦焊质量的重要课题。

邹青峰等<sup>[49]</sup>研究了搅拌头形状对搅拌摩擦焊接头的组织结构与拉伸性能的影响,通过对原始柱形圆头搅拌头的搅拌针实施切削以改变搅拌头尺寸,并定义切边深度,考虑不同切边深度对试验结果的影响,发现搅拌头形状的选取对搅拌摩擦焊效果影响较大,切边深度的增大使得母材区的材料流动效果更好、塑性变形产热量升高,从而使得焊接质量得到明显提高。Ramanjaneyulu 等<sup>[50]</sup>同样针对切边问题对搅拌头形状的影响进行了研究,通过改变切边形貌,建立了五种不同形状的搅拌针,对 AA2014 铝合金平板进行搅拌摩擦焊连接并进行相关讨论,通过对接触部位形貌观测及显微镜下的影像观测,对比了搅拌头形貌对搅拌摩擦焊的影响,采用 INSTRON 1185 通用试验机对焊后平板进行试验,分析了由不同形状搅拌头焊接后材料前进侧、返回侧的硬度变化。Boz 等<sup>[51]</sup>也对搅拌头形状对焊接质量的影响做了相关研究,其工作中由不同形状搅拌头焊接成型的构件,其接头部位性能变化较为明显,材料硬度、微观组织结构等力学性能均因搅拌头形状的改变产生了变化。柯黎明<sup>[52]</sup>等也研究了搅拌头形状对焊接质量的影响,其工作中对带有正、反螺纹的搅拌针焊接效果进行试验,表征了不同形状搅拌针作用下母材焊接区内的材料流动规律。其结果表明,不同方向的螺纹使得焊区内材料出现相反的流动形式,导致焊核中心位置出现变化,同时得出结论:若采用带有正螺纹的搅拌针进行搅拌摩擦焊,则焊后裂纹易出现在焊缝下部,若采用带有负螺纹的搅拌针进行搅拌摩擦焊,则焊后裂纹易出现在焊缝上部。谢腾飞等<sup>[53]</sup>采用四种不同形状搅拌针对搅拌摩擦焊过程进行试验,在试验中观察焊接截面内 S 曲线的变化规律。试验表明,搅拌针的形状对焊接质量的影响是不可忽视的,搅拌针的形状极易影响搅拌区内材料的流动特性和材料的微观特性,搅拌针是否光滑、是否带有螺纹、带有什么形式的螺纹,都将引起搅拌区内材料流动规律的明显变化,选择合适的搅拌针形状是保证焊接质量不可或缺的工艺指标。姬书得等<sup>[54]</sup>对静止轴肩搅拌摩擦焊进行了研究,以搅拌头旋转频率为研究变量,试验分析了经静止轴肩搅拌头焊后的

焊接接头的力学性能,发现静止轴肩搅拌摩擦焊接头的维氏硬度呈 W 形分布,最小值出现在前进侧的热影响区,接头的软化程度随搅拌头旋转频率的增大而增加,焊接接头的断裂位置位于热力影响区,断口呈韧性断裂。

焊接过程是一种高温过程,搅拌摩擦焊焊接温度虽较传统焊接方式的焊接温度低,但仍属于一种高温过程。因此,对搅拌摩擦焊温度场的研究是极为重要的。早在 1998 年, Tang<sup>[55]</sup> 等就开始了温度场的试验测量及规律研究,发现搅拌摩擦焊中,焊缝附近材料上任一点都将经历一个迅速升温、缓慢降温的温度时间历程,但与传统熔焊过程相比,最高焊接温度仅为材料熔点的 80%。当搅拌头转速处于较高水平时,搅拌头转速对焊接温度的增幅量明显降低,此时,再增大搅拌头转速并无太大意义。针对不同材料的搅拌摩擦焊温度场的几项工作如表 1.2 所示。

表 1.2 温度场

焊接材料	板厚 $t/\text{mm}$	搅拌头转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	搅拌头尺寸			焊速 $v/(\text{mm}/\text{min})$	焊接温度 $T/^\circ\text{C}$	参考 文献
			轴肩直径 $r_s/\text{mm}$	搅拌针直径 $r_p/\text{mm}$	搅拌针长度 $h/\text{mm}$			
6056 铝合金	3	1600~2000	13	5	2.6	700	299~531	[56]
AA2014-T6	5	1000	12	—	—	600	327~364	[50]
纯铝	4	1000	9/12/15	4	—	30	300~450	[57]
纯铜 C11000	3.1	400~1200	12	3	2.8	60	460~530	[58]

关于焊接构件的焊后残余应力场的研究,是搅拌摩擦焊研究的重点问题之一。针对不同材料的残余应力场研究的主要进展如表 1.3 所示。

表 1.3 残余应力

焊接材料	板厚 $t/\text{mm}$	搅拌头转速 $n/(\text{r}/\text{min})$	焊速 $v/(\text{mm}/\text{min})$	最大残余应力值 $\sigma/\text{MPa}$	参考文献
AA2024-T3	7	360	198	90	[59]
2024-T4	3	475	300	164.5	[60]
AA2024-T351	6.3	350	95	130	[61]
AA2050-T851	15	280	200	135	[62]
6056 铝合金板	4	—	—	220	[63]
5086 铝	8	400	12	50	[64]
AA5089-O 和 AA6061-T6	5	840/150	900/100	95	[65]
7050-T7451 和 2024-T351	25.4	—	50.8	18	[66]

人们在研究中发现,搅拌摩擦焊的焊后残余应力场基本与熔焊焊后残余应力场保持相似规律,即截面纵向残余应力相对横向残余应力较大<sup>[67]</sup>,在分布规律上,

截面纵横两向残余应力均基本呈 M 形分布,但分布规律较熔焊有所区别,在深度方向上,搅拌摩擦焊焊接构件残余应力并不呈线性变化,是较为复杂的<sup>[63]</sup>。搅拌摩擦焊中若所焊构件为单一材料,则残余应力场中前进侧残余应力值将略高于返回侧残余应力值<sup>[59,60,62,64]</sup>,若材料不同,则最大残余应力将产生在屈服强度或材料硬度较高的一侧<sup>[65,66]</sup>。而在关于残余应力场的研究中,研究人员发现若能在焊前对焊接构件进行拉伸处理,则焊后残余应力场将出现明显的变化,降低原本表现为拉应力的残余应力场<sup>[61]</sup>。

焊接材料硬度也是搅拌摩擦焊中值得关注的一个问题。搅拌摩擦焊构件横截面上焊核区材料较软,热影响区材料硬度逐渐增大,远离焊接位置的材料硬度与焊前相同<sup>[68,69]</sup>,这被认为是焊接过程中热过程对焊材微结构的影响产生的。焊接过程中,焊核区内将经历热高温过程,使得材料内析出相完全溶解,材料硬度降到最低,此区域被称为软化区。在焊核区与热影响区的交接处析出相并未完全溶解,出现棒状体。再向远离焊缝方向观察,则在显微照片上能清晰地看到棒状体与针状体混杂的区域,此区域称为低硬度区,此区域内随着针状体密度的增加,材料硬度增大,逐渐与材料原始硬度水平相当。最后,在远离焊接区,材料微结构与焊前相比,并未出现明显变化,因此,材料硬度基本与焊前相同<sup>[68-71]</sup>。当然,微结构的变化规律与具体焊材相关。

搅拌摩擦焊作为一种连接技术,必然存在着连接构件接头部位的疲劳问题,焊接过程将材料加热至高温状态,并将其混合连接,不可避免地将破坏材料本身的抗疲劳性能,研究者就此问题进行了探讨,在搅拌摩擦焊技术中,影响焊接接头疲劳强度的因素主要有焊接工艺参数<sup>[72]</sup>、焊后表面及内部缺陷<sup>[73-75]</sup>、循环载荷应力比<sup>[76,77]</sup>等。基于以上几个因素,研究人员做了大量试验及数值模拟,经过与熔化极惰性气体保护焊(metal inert-gas welding, MIG)和非熔化极惰性气体钨极保护焊(tungsten inert gas welding, TIG)的对比发现,相对其他焊接方式,在低焊速下,搅拌摩擦焊的静强度和动强度明显高于其他两种焊接形式<sup>[72]</sup>。在对焊接接头疲劳性能影响因素中最常见的应为表面及内部缺陷,疲劳问题的核心内容即结构在循环载荷下的破坏问题,断裂力学中的裂纹与缺陷则为这种破坏问题的主要因素,在焊接过程中,由于材料的高温加热及冷却过程,不可避免地将出现局部缺陷,这样的缺陷就成为结构疲劳破坏的主导因素。在搅拌摩擦焊中也同样存在着这样的缺陷及微裂纹,如张丹丹等<sup>[74]</sup>在对 Al-Li 合金的焊接接头做疲劳试验分析时,则发现了倒钩式的缺陷,并伴有局部的微裂纹产生,这样的缺陷及微裂纹将大大降低材料的屈服强度和延伸率,继而降低结构的抗疲劳性能。杨新岐等<sup>[73]</sup>在试验中也发现了“吻接”缺陷,并认为这样的缺陷是降低搅拌摩擦焊接头疲劳性能的主要因素。Lomolino 等<sup>[75]</sup>认为焊后对接头位置做回火处理是降低焊接缺陷、提高焊接接头抗疲劳性能的重要途径。焊接结构的全寿命周期预测是一项系统性的工

作,受多种因素影响,具有挑战性。

## 1.2 搅拌摩擦焊数值模拟研究进展

焊接过程中,热量的产生主要由搅拌头与焊接构件摩擦生热及材料塑性变形生热构成。其中,轴肩与构件接触摩擦力做功生热占绝大多数比例,是大多数模型中解析计算热输入的主要依据<sup>[78]</sup>。在搅拌头与焊接构件的接触定义上,通常采用如下几种接触类型:滑移接触、黏滞接触、滑移和黏滞混合接触,主要区别在于定义与搅拌头接触处的焊接构件材料运动速度与搅拌头速度的比值 $\delta$ ,若 $\delta$ 为0,则为滑移接触类型;若 $\delta$ 为1,则为黏滞接触类型;若 $\delta$ 介于0~1,则为混合接触类型。不同的 $\delta$ 值选取,将会影响最终热输入量的计算<sup>[79]</sup>。

总结几种针对搅拌摩擦焊温度场的数值模型,如表1.4所示。

表 1.4 几种温度场计算模型

时间	计算对象	计算模型和工具	文献
2003年	铝合金	三维固体有限元模型	[80]
2007年	不锈钢	三维流体模型	[81]
2005年	铝合金	三维流体模型/FLUENT	[82]
2004年	不锈钢	三维固体有限元模型/ WELDSIM	[83]
2006年	铝合金	三维固体有限元模型/ DEFORM	[84]
2003年	铝合金	三维固体有限元模型/ ABAQUS	[85]
2012年	铝合金	三维固体有限元模型/ COMSOL	[86]
2006年	铝合金	三维流体模型/半解析方法	[87]
2008年	铝合金	三维固体有限元模型	[88]

材料流动对焊后形成的焊缝质量有重要影响,然而在搅拌摩擦焊过程中,材料流动十分复杂,受焊接参数、材料属性、搅拌头尺寸等多种因素影响。数值模型可以方便地研究多种参数对材料流动的影响。Tutunchilar等<sup>[89]</sup>基于三维拉格朗日增量有限元模型,使用基于网格重剖分的商业软件 DEFORM-3D 模拟了搅拌摩擦加工(friction stir processing, FSP)过程,该数值模拟工作成功地预测了焊接缺陷种类形貌、温度场分布、等效应力应变和搅拌区的材料流动,中心区域、前进侧和后退侧的材料流动轨迹形貌可以依据跟踪材料物质点的方法得到。文中模拟结果显示,主要的材料流动过程发生在构件上表面前进侧;前进侧材料被拉伸旋转,造成了不对称的搅拌区域形貌。Zhang等<sup>[90-92]</sup>基于任意拉格朗日-欧拉耦合模型开展了一系列研究传质传热和材料流动的工作。模拟过程中,跟踪材料物质点的流动

轨迹,较为可靠地反映了焊接过程中材料的流动。结果显示,材料流动规律在前进侧与返回侧有显著区别。在搅拌头前方的材料,会在搅拌头拉伸旋转作用下做绕针运动。而搅拌头后方材料将向下运动并最终进入焊后焊缝部位。对多种焊接参数和搅拌头尺寸对材料流动的影响也进行了讨论,结果表明:较大的旋转速度将明显增大材料物质点的流动速度,较大的搅拌头轴肩也将起到相同的作用。流体力学模型对于材料的流动预测具有较大的优势。Colegrove 等<sup>[93,94]</sup>建立了搅拌摩擦焊的二维和三维计算流体力学模型,重点研究了复杂搅拌头周围的材料流动情况。相关研究结果为优化搅拌头设计、焊接参数选择提供了参考。

焊接参数是直接影响搅拌摩擦焊各项性质的直接因素,焊接参数一般包括搅拌头转速、搅拌头行走速度、下压力和轴肩倾斜角。在数值模型中,可以方便地计算上述焊接参数变化所带来的影响,而不必进行大量的试验研究。Michopoulos 等<sup>[95]</sup>建立了搅拌摩擦焊的弹塑性有限元模型,并建立了焊接参数对焊后残余应变的灵敏度分析。张昭等<sup>[96]</sup>基于三维有限元模型,讨论了搅拌头转速与焊接行走速度对焊接质量的影响。模拟结果表明,较大的搅拌头转速和较小的搅拌头行走速度有利于提高焊接质量;在焊接过程中,等效塑性应变随转速的增加而增加,随搅拌头行走速度的增加而降低。Zhao 等<sup>[97]</sup>建立了一个联系多种焊接参数(搅拌针插入深度、焊速和转速)和三方向可控制轴力的经验关系模型,该工作给出了焊接过程中上述重要物理量间的动态关系。研究表明,焊接参数与三向轴力间符合非线性的动态关系,该结果也被作者试验证实。Gok 等<sup>[98]</sup>基于三维网格重剖分 DEFORM 模型,研究了各种焊接参数对镁合金搅拌摩擦焊的影响。

搅拌摩擦焊的成败和焊后构件的焊接质量,与搅拌头息息相关。对于搅拌头的数值模拟研究工作,一直以来是搅拌摩擦焊研究中的重点内容之一。利用数值模拟技术,设计搅拌头的形貌和焊接参数,有利于提高焊接质量并延续搅拌头寿命。

Zhang 等<sup>[99,100]</sup>基于完全热力耦合的搅拌摩擦焊模型,研究了搅拌头形状对焊接温度场分布、材料塑性变形的影响,其结果表明搅拌区域随着搅拌头直径的增大而增大;在焊缝附近的搅拌区域,温度是控制晶粒长大的主要因素,但是在搅拌区外边缘,当等效应变和等效应变率值较低时,材料变形将比温度场分布更能影响材料的再结晶过程。Su 等<sup>[101]</sup>基于搅拌摩擦焊的流体力学模型,研究了两种搅拌针形貌(圆柱形、锥形)对焊后力学性能的影响,对总产热量、热流密度和温度场分布等进行了详细研究和讨论,其结果显示:锥形搅拌针与圆柱形搅拌针相比,具有更小的材料变形区域。Buffa 等<sup>[102]</sup>基于建立的三维搅拌摩擦焊有限元模型,研究了搅拌头几何形貌和焊接速度对焊后焊核区域晶粒尺寸和材料流动的影响,并进一步对搅拌头的形貌和焊速进行了优化设计。Aval 等<sup>[103,104]</sup>采用数值模拟和试验手段研究了 AA5086 铝合金的搅拌摩擦焊,分析了搅拌头形貌对构件力学性能的影响。



响,其研究发现:带有 $2^\circ$ 倾角的圆锥形搅拌头比圆柱形搅拌头产生的材料变形更显著,并且有利于提高焊后构件力学性能。Zhang等<sup>[105]</sup>基于铝合金的搅拌摩擦焊计算流体力学模型,研究了多种焊接参数下搅拌针的受力问题,其研究表明,较大的转速和较低的焊速有利于减小搅拌针上的应力,且搅拌针上应力值分布在根部达到最大值,根部是危险截面,疲劳应力的时间变化,随匀速旋转而呈正弦函数规律。Biswas等<sup>[106]</sup>采用有限元模拟研究了6mm厚AA1100铝合金板的搅拌摩擦焊,其研究表明:轴肩带有凹槽的锥形搅拌针更有利于该种材料的搅拌摩擦焊,并且搅拌针的直径应尽量小以避免焊接缺陷(wormhole defect)的产生。类似的研究搅拌头形貌对焊后构件力学性能影响的数值模拟工作,也被应用于AZ31镁合金的搅拌摩擦焊中<sup>[107,108]</sup>。

搅拌头的疲劳破坏、磨损变形等对搅拌头的寿命有重要影响。搅拌头的磨损变形改变了搅拌头的几何形状,将降低焊后构件接头质量。当使用搅拌摩擦焊焊接硬质材料,如不锈钢、钛合金时,上述问题愈加明显。对此,许多数值模拟工作把搅拌头的疲劳、磨损和寿命等问题作为主要研究对象。DebRoy等<sup>[109]</sup>建立了搅拌摩擦焊的三维传质传热模型,用于研究不锈钢材料搅拌摩擦焊过程中搅拌头的疲劳抵抗能力,使用累积损伤理论计算和分析搅拌头的破坏。他的研究表明了构件板厚、焊接速度、旋转速度、轴肩和搅拌针直径均会影响作用于搅拌头上的应力和温度历程;他基于建立的神经网络算法,计算了搅拌针上剪切应力与最大需用剪切应力的比值,并给出其与多种焊接参数的关系图。李秀娜等<sup>[110]</sup>应用数值模拟技术,基于改进的Archard理论建立搅拌头磨损模型,研究了搅拌摩擦焊过程中搅拌头的摩擦磨损规律及使用寿命。Arora等<sup>[36]</sup>基于三维流体力学模型,计算了搅拌头上的横向焊接力和扭矩,并考虑了构件材料的温度-等效应变率相关的流变应力本构关系建立了计算模型,预测了L80不锈钢和7075铝合金在搅拌摩擦焊过程中其搅拌头的受力变形及疲劳失效,同时很好地预测了针上最大应力与各种焊接参数、搅拌头形貌的关系。Scutelnicu等<sup>[111]</sup>开发了两种模型,模拟了传统搅拌摩擦焊和TIG辅助热源搅拌摩擦焊焊接金属铜的过程。当添加辅助热源后,研究发现了一系列优势,其中包括搅拌区域更快速和充分的塑性变形,降低了搅拌针的磨损和针上应力,提高了焊接速度,并增强了焊后接头质量等。Zhang和Wan<sup>[112]</sup>基于自适应网格重剖分技术,建立了AZ91镁合金搅拌摩擦焊模型,模拟了搅拌头的三维受力情况,其结果显示:搅拌头在焊接过程中三个方向的受力和温度场最大值均随焊接行走速度的增大而增大,随搅拌头转速的增大而减小;轴向压力是三个方向受力中最大的力,而由材料不均匀流动所产生的垂直于焊缝方向的力则是最小的。Ulysse等<sup>[113]</sup>建立了薄板搅拌摩擦焊的三维黏塑性模型,并基于该模型分析了搅拌头受力与焊接参数的变化关系。

相关研究人员也提出了一些特殊种类的搅拌头,Buffa等<sup>[114]</sup>利用试验和有限