



“十二五”国家重点图书出版规划项目  
21世纪先进制造技术丛书

# 大型航天搅拌摩擦焊机器人 动态仿真分析与优化设计

· 骆海涛 周维佳 刘玉旺 张 伟 著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
21世纪先进制造技术丛书

# 大型航天搅拌摩擦焊机器人 动态仿真分析与优化设计

骆海涛 周维佳 刘玉旺 张 伟 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了大型重载航天搅拌摩擦焊机器人研发设计的基础理论、基本方法和常用软件,面向我国在航空航天、国防和现代化工业等领域的迫切需求,以提高工件的焊接精度和焊缝质量为落脚点,针对新型的搅拌摩擦焊机器人开展了大量的理论分析、仿真优化和试验测试工作,获取了机器人在焊接过程中所关心的各项性能参数。研究机械结合部对整机静态性能的影响,建立了针对复杂大件结构动态优化设计的分析流程。最终的分析 and 测试结果表明了本书工作的必要性,提出大型重载航天搅拌摩擦焊机器人研发设计流程及仿真测试方法,确保搅拌摩擦焊机器人的焊接精度,有力地配合和指导了大型重载航天搅拌摩擦焊机器人研发设计工作。本书注重理论研究和实践相结合,旨在开拓读者的研究思路,提高读者的研究能力。

本书适合理工院校机械、材料、电子、航空航天、力学等相关专业的硕士研究生、博士研究生及教师使用,也适合从事相关领域科学技术研究的工程技术人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大型航天搅拌摩擦焊机器人动态仿真分析与优化设计/骆海涛等著.  
—北京:科学出版社,2018.11  
(“十二五”国家重点图书出版规划项目:21世纪先进制造技术丛书)  
ISBN 978-7-03-059593-5

I. ①大… II. ①骆… III. ①航空航天工业—摩擦焊—焊接机器人  
IV. ①TP242.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 262852 号

责任编辑:张海娜 赵晓廷/责任校对:何艳萍  
责任印制:张伟/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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷  
科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年11月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年11月第一次印刷 印张:14 3/4

字数:297 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编：熊有伦(华中科技大学)

编 委：(按姓氏笔画排序)

- |                      |                  |
|----------------------|------------------|
| 丁 汉(上海交通大学 / 华中科技大学) | 张宪民(华南理工大学)      |
| 王 煜(香港中文大学)          | 周仲荣(西南交通大学)      |
| 王田苗(北京航空航天大学)        | 赵淳生(南京航空航天大学)    |
| 王立鼎(大连理工大学)          | 查建中(北京交通大学)      |
| 王国彪(国家自然科学基金委员会)     | 柳百成(清华大学)        |
| 王越超(中国科学院理化技术研究所)    | 钟志华(同济大学)        |
| 冯 刚(香港城市大学)          | 顾佩华(汕头大学)        |
| 冯培恩(浙江大学)            | 徐滨士(陆军装甲兵学院)     |
| 任露泉(吉林大学)            | 黄 田(天津大学)        |
| 刘洪海(朴次茅斯大学)          | 黄 真(燕山大学)        |
| 江平宇(西安交通大学)          | 黄 强(北京理工大学)      |
| 孙立宁(哈尔滨工业大学)         | 管晓宏(西安交通大学)      |
| 李泽湘(香港科技大学)          | 雒建斌(清华大学)        |
| 李涤尘(西安交通大学)          | 谭 民(中国科学院自动化研究所) |
| 李涵雄(香港城市大学/中南大学)     | 谭建荣(浙江大学)        |
| 宋玉泉(吉林大学)            | 熊蔡华(华中科技大学)      |
| 张玉茹(北京航空航天大学)        | 翟婉明(西南交通大学)      |

## 《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪，先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点，同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展，为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术，出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合，产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战，要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展，激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升制造学科的学术水平。我们相信，有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委们的共同努力，本丛书将为发展制造科学，推广先进制造技术，增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物，在制造业中的应用范围很广，从喷漆、焊接到装配、抛光和修理，成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科，已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一，并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展，因此，本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后，我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对丛书的厚爱。

A handwritten signature in black ink, reading '熊有伦' (Xie Youjun).

华中科技大学

2008年4月

# 前 言

针对搅拌摩擦焊机器人在结构设计中可能存在的问题和难点,本书从理论分析和工程应用上对可能影响机器人焊接性能的因素开展了大量的分析和研究工作。由于搅拌摩擦焊机器人体积庞大、结构复杂,自身工况条件极其恶劣,传统的基于普通机床的结构设计思路和方法不再适合。本书通过分析搅拌摩擦焊机器人的机构构型和功能特点及其在实际应用中的焊接工况,建立了一套针对大型重载高精度设备的结构设计分析流程;对整机的运动学和动力学进行建模与仿真,获得了机器人在五种典型焊接工况下的运动性能和受载情况;建立了轴承、丝杠螺母和导轨滑块结合部的刚度模型,并将其结果数据用于整机的静动态特性建模和仿真中,最终得到了搅拌摩擦焊机器人在最恶劣工况下焊接的焊缝精度,有力地指导了整个机器人的结构设计工作。

本书的主要研究内容如下。

第1章 绪论。介绍了搅拌摩擦焊机器人研究的背景及意义,阐述了搅拌摩擦焊的原理及特点。综述了国内外搅拌摩擦焊设备的研究现状,并对现阶段搅拌摩擦焊设备的结构样式和功能特点做了归纳与总结。通过对大型重载设备的理论研究热点进行梳理,提出了搅拌摩擦焊机器人在结构设计过程中的理论研究问题和难点,最后给出了本书的主要研究内容。

第2章 搅拌摩擦焊机器人多体系统建模与仿真。首先,介绍了拟研究的搅拌摩擦焊机器人的结构样式、功能特点和五种典型工况;之后,分别建立了搅拌摩擦焊机器人的运动学和动力学模型,得到了各自的运动学和动力学方程。通过典型工况下的仿真分析,得到了机器人的各关节空间和搅拌头工具末端的各参数变量仿真曲线,为后续整机的静动态特性分析创造了条件。

第3章 搅拌摩擦焊机器人结合部建模和刚度分析。由于搅拌摩擦焊机器人的XYZ轴主要是轴承、丝杠螺母和直线导轨结合部,它们的共同特点是通过滚珠和滚道之间的接触来进行载荷传递,因此,本章首先建立了赫兹点接触的理论模型,并求解了接触区的弹性趋近量和接触应力。通过角接触球轴承的静刚度试验,验证了有限元分析方法的准确性。其中,角接触球轴承的动刚度分析又确保了另两种结合部在低速状态下可以近似等效成静刚度计算的可行性。所取得的分析数据和曲线可以使人们对搅拌摩擦焊机器人结合部的刚度性能做出定量评价,为整机

有限元模型的正确建立和计算奠定了基础。

第 4 章 搅拌摩擦焊机器人机械结构设计。本章以搅拌摩擦焊机器人的技术指标为目标,以高精度、高刚度、大负载、结构紧凑为设计约束,详细阐述了搅拌摩擦焊机器人的  $XYZ$  轴、 $AB$  轴和主轴系统的结构设计过程。

根据搅拌摩擦焊机器人的五种典型工况,给出了 8 自由度搅拌摩擦焊机器人机械系统的方案原理,根据方案原理给出了切实可行的系统组成结构,进而完成系统中各个子系统的原理设计、方案设计及详细设计。

第 5 章 搅拌摩擦焊机器人动态优化设计。以组成结构的外部框架和内部单元为出发点,分别对搅拌摩擦焊机器人  $XYZ$  轴组件的底座、立柱和滑枕大件结构进行了拓扑优化和尺寸优化,研究了它们的材料选用、几何外形与力学性能之间的关系。综合考虑结构的质量、位移和固有频率等约束条件,合理配置材料的分布、结构框架尺寸和基本单元样式以改善其静动态特性。最终通过仿真分析,从微观和宏观上验证了所设计出的产品具有较优的力学性能。

第 6 章 搅拌摩擦焊机器人静动态特性研究。建立了搅拌头的力学模型并进行了焊接过程的数值仿真,获得了作用于搅拌头上的各种机械载荷,比较了机器人在空载运行工况和五种典型工况下的静力分析结果,获得了整机的刚度和强度数据。通过模态试验手段,对整机以及各大件结构进行了模态测试,并与分析结果进行了对比。最后,将考虑了结合部刚度阻尼以及滑枕结构柔性的搅拌摩擦焊机器人的刚柔耦合系统进行了最恶劣工况下的焊接仿真,得到了各工况下的测量曲线。通过分析焊接曲线的误差得到了实际焊缝的焊接精度,最终证实了搅拌摩擦焊机器人总体设计的可行性。

本书以解决大型航天搅拌摩擦焊机器人动态仿真分析及优化设计问题为目标,研究大型重载航天搅拌摩擦焊机器人研发设计的基础理论、基本方法及常用软件,得到了国家自然科学基金青年基金项目“重载灵巧高刚度搅拌摩擦焊机器人动态特性分析及优化设计”(51505470)和中国科学院青年创新促进会项目的资助。在全书内容研究及编写过程中,特别感谢中国科学院沈阳自动化研究所空间自动化技术研究所的老师武加峰、宛敏红、田远征、杨广新与研究生王巍、武廷课的大力配合及辛勤工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者不吝指正。

作 者

2018 年 7 月



# 目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 搅拌摩擦焊的背景及意义	1
1.2 搅拌摩擦焊的原理及特点	4
1.3 搅拌摩擦焊设备现状介绍	5
1.3.1 国外搅拌摩擦焊设备	6
1.3.2 国内搅拌摩擦焊设备	9
1.3.3 国内外搅拌摩擦焊设备特点归纳	12
1.4 大型重载设备的相关理论研究现状	14
1.4.1 多体系统的运动学与动力学	14
1.4.2 机械结合部的等效建模方法	15
1.4.3 结构的静动态特性分析	18
1.4.4 参数化建模与结构优化	19
1.5 本章小结	20
第 2 章 搅拌摩擦焊机器人多体系统建模与仿真	21
2.1 引言	21
2.2 拟研究的搅拌摩擦焊机器人简介	21
2.2.1 机器人的系统构成	21
2.2.2 机器人的功能与指标	23
2.2.3 机器人的五种典型工况	24
2.3 搅拌摩擦焊机器人运动学研究	25
2.3.1 机器人的正向运动学	25
2.3.2 机器人的逆向运动学	27
2.3.3 雅可比矩阵及连杆速度和加速度	30
2.3.4 机器人典型工况下的运动学仿真	36
2.4 搅拌摩擦焊机器人动力学研究	39
2.4.1 机器人连杆的质心坐标和速度	39
2.4.2 机器人的拉格朗日函数	42
2.4.3 机器人的动力学方程	43

2.4.4	机器人典型工况下的动力学仿真	45
2.5	本章小结	50
<b>第 3 章</b>	<b>搅拌摩擦焊机器人结合部建模和刚度分析</b>	<b>52</b>
3.1	引言	52
3.2	滚珠-滚道的赫兹点接触理论	53
3.2.1	基本假设	53
3.2.2	滚珠-滚道的点接触理论模型	53
3.2.3	滚珠-滚道的点接触理论求解	56
3.3	角接触球轴承的刚度分析	58
3.3.1	角接触球轴承的几何参数	58
3.3.2	角接触球轴承的静刚度计算	61
3.3.3	角接触球轴承的静刚度有限元仿真	69
3.3.4	角接触球轴承的静刚度试验验证	72
3.3.5	角接触球轴承的动刚度计算	75
3.3.6	角接触球轴承的动刚度有限元仿真	82
3.4	滚珠丝杠副的刚度分析	89
3.4.1	滚珠丝杠副的几何参数	89
3.4.2	滚珠丝杠副的静刚度计算	92
3.4.3	滚珠丝杠副的静刚度有限元仿真	98
3.5	导轨滑块副的刚度分析	100
3.5.1	导轨滑块副的几何参数	101
3.5.2	导轨滑块副的静刚度计算	103
3.5.3	导轨滑块副的静刚度有限元仿真	110
3.6	本章小结	114
<b>第 4 章</b>	<b>搅拌摩擦焊机器人机械结构设计</b>	<b>115</b>
4.1	引言	115
4.2	XYZ 轴系统设计	115
4.2.1	功能要求与设计指标	115
4.2.2	总体结构方案	116
4.2.3	零部件结构设计	119
4.2.4	关键零部件的有限元分析	124
4.3	AB 轴系统设计	130
4.3.1	功能要求与设计指标	130
4.3.2	总体结构方案	131
4.3.3	零部件结构设计	132

4.3.4	AB 轴结构的有限元分析	135
4.4	搅拌头主轴设计	137
4.4.1	功能要求与设计指标	138
4.4.2	总体结构方案	139
4.4.3	零部件结构设计	141
4.4.4	搅拌头主轴有限元分析	143
4.5	本章小结	149
<b>第 5 章</b>	<b>搅拌摩擦焊机器人动态优化设计</b>	<b>150</b>
5.1	引言	150
5.2	基于结构分解的动态优化设计方法	151
5.2.1	结构框架和结构单元的基本概念	151
5.2.2	复杂大件结构的参数化设计流程	152
5.3	X 轴底座结构的动态优化设计	154
5.3.1	筋格出砂孔与筋格固有频率的关系	155
5.3.2	边长和壁厚与筋格固有频率的关系	158
5.3.3	筋格密度对底座固有频率的影响	159
5.3.4	X 轴底座结构的最优方案验证	160
5.4	Y 轴立柱结构的动态优化设计	163
5.4.1	拓扑优化的方法和流程	163
5.4.2	Y 轴立柱结构的载荷和边界条件	166
5.4.3	Y 轴立柱结构的拓扑优化分析	167
5.4.4	Y 轴立柱结构筋板的合理配置	170
5.5	Z 轴滑枕结构的动态优化设计	171
5.5.1	Z 轴滑枕结构的受力分析	171
5.5.2	Z 轴滑枕结构的拓扑优化分析	174
5.5.3	Z 轴滑枕结构的尺寸优化分析	176
5.6	本章小结	179
<b>第 6 章</b>	<b>搅拌摩擦焊机器人静动态特性研究</b>	<b>180</b>
6.1	引言	180
6.2	搅拌头焊接过程中的受力分析	180
6.2.1	搅拌头的受力模型	181
6.2.2	焊接过程的数值模拟	183
6.3	搅拌摩擦焊机器人静力分析	185
6.3.1	结合部等效刚度模型的建立	185
6.3.2	搅拌摩擦焊机器人的空载分析	187

---

6.3.3 搅拌摩擦焊机器人的工况模拟 .....	189
6.4 搅拌摩擦焊机器人动态特性分析 .....	192
6.4.1 模态分析 .....	192
6.4.2 模态试验 .....	199
6.4.3 频率响应分析 .....	205
6.5 搅拌摩擦焊机器人焊接精度分析 .....	206
6.5.1 柔性体计算模型的建立 .....	207
6.5.2 刚柔耦合动力学模型的建立 .....	209
6.5.3 瓜瓣焊工况下机器人的焊接精度分析 .....	210
6.6 本章小结 .....	212
参考文献 .....	214

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 搅拌摩擦焊的背景及意义

搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 技术最早是由英国焊接研究所 (The Welding Institute, TWI, Cambridge UK) 发明的一项革命性固相连接工艺, 它可以在未完全熔融状态下实现材料的固相连接<sup>[1,2]</sup>, 如图 1-1 所示。搅拌摩擦焊技术在其发明之后的 20 年里, 已经被应用到基础研究和工业制造的各个领域, 并受到来自各个国家科研机构和企业单位的广泛关注。在国外, 利用这项技术所生产的产品已经达到规模化和工业化的水平。

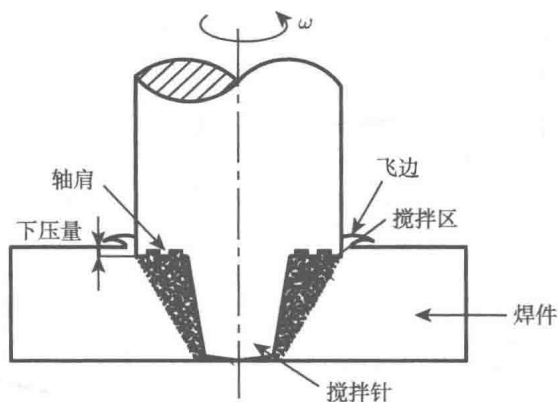


图 1-1 搅拌摩擦焊示意图

目前, 已经有多个国家如英国、美国、法国、德国、瑞典、日本和中国等把搅拌摩擦焊技术应用在各个制造领域<sup>[3-9]</sup>, 如图 1-2 所示。搅拌摩擦焊在世界工业领域的应用简述如下:

(1) 航天。运载火箭燃料贮箱、发动机承力框架、铝合金容器、航天飞机外贮箱、载人返回舱等。

(2) 航空。飞机蒙皮、加强件之间连接、框架连接、飞机门结构件、起落架舱盖、外挂燃料箱等。

(3) 船舶和海洋工业。快艇、甲板、侧板、防水隔板、船体外壳、船用冷冻器、帆船桅杆等。

(4) 车辆工业。高速列车、轨道货车、地铁车厢、轻轨电车。

(5) 汽车工业。发动机引擎、底盘支架、轮毂、车门、车体、升降平台、燃料箱、逃生工具等。

(6) 其他工业。发动机壳体、冰箱冷却板、电器分封装、天然气液化气贮箱、轻合金容器、家庭装饰、镁合金制品等。

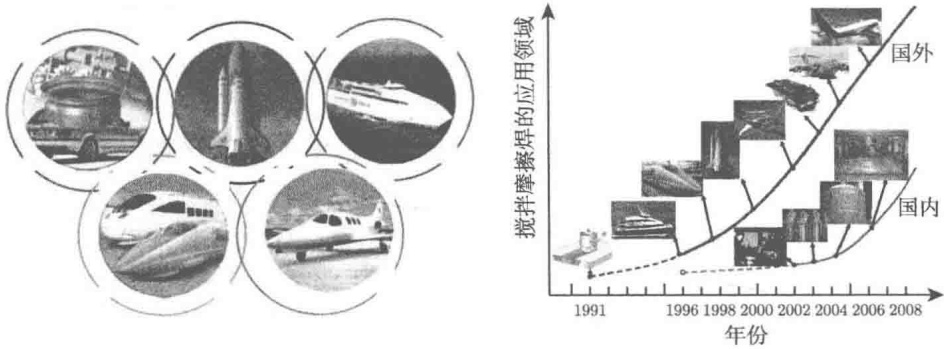


图 1-2 搅拌摩擦焊的应用领域

试验证实，利用搅拌摩擦焊技术所焊接的焊缝在机械特性上比用其他焊接工艺所焊接的焊缝甚至比它的母材性能都更加优良 [10,11]。在力学性能上，搅拌摩擦焊的焊接接头比传统焊接所采用的熔化极氩弧焊和钨极氩弧焊接头性能更加优良。数据显示，搅拌摩擦焊的接头强度最高可比氩弧焊接头强度高 20%，延伸率是氩弧焊的 2 倍，断裂韧度最高也比氩弧焊高 30% 以上。搅拌摩擦焊的接头内部组织是细小的锻造晶粒区，更加稳定。除此之外，与其他焊接工艺相比，搅拌摩擦焊焊后的工件变形小，残余应力低。图 1-3 显示了两种铝合金材料 T4 和 T6 在采用搅拌摩擦焊技术焊接以及焊接后经过时效处理后的焊缝接头力学性能与母材的强度数据。结果表明，采用搅拌摩擦焊的焊缝拉伸强度比较基本接近母材，而经过时效后更加接近或超过了母材的拉伸强度 [12]。

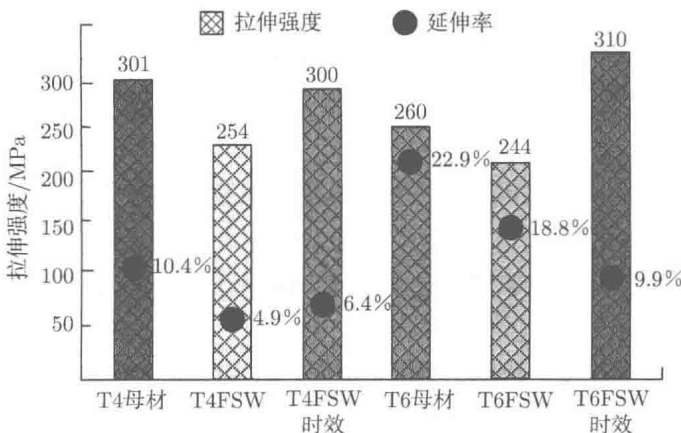


图 1-3 6082 铝合金拉伸强度和塑性力学性能

搅拌摩擦焊技术采用的是固态焊接工艺，因此在其焊接的过程中不会产生裂纹、气孔和夹渣等缺陷。与传统熔化焊接相比，它更加绿色环保，在焊接过程中不会产生烟雾、弧光和飞溅物。此外，该种焊接工艺经济方便，不需要焊丝和保护气的填充以及焊前开破口、去毛刺等特殊预处理。搅拌摩擦焊的具体优点<sup>[13,14]</sup>阐述如下：

- (1) 焊接质量均匀一致，焊接过程不需要特殊的专门培训，易于掌握；
- (2) 根据焊接本体的设计不同，单侧最大焊接厚度能达到 15mm；
- (3) 焊接开始前，焊口部位不需要开破口、去毛刺等特殊预处理，只需简单清洗和打磨；
- (4) 不需要焊丝和保护气的填充；
- (5) 焊接功率低，对于铝合金单侧焊接 12mm 厚度只需要 3W；
- (6) 焊缝残余应力低，无凸起、焊滴和局部变形的发生；
- (7) 绿色环保，有效保护使用者，无强光、电弧、烟雾和异味，与其他设备的使用不发生冲突；
- (8) 焊区的温度相比熔化焊要低，不会造成孔洞和烧伤现象的发生。

尽管搅拌摩擦焊具有上述众多优点，但是要想实现高质量的焊接，必须依赖一个性能优越的机械本体。焊接设备本体的动态特性对焊缝质量起着决定性的作用。在整个焊接过程中，搅拌头肩部和焊接表面要充分接触；搅拌头主轴要时刻垂直于待焊接工件的表面；搅拌区域温度或搅拌力及扭矩要合理控制<sup>[15]</sup>。所有这些要素都是在焊接本体良好的协调作用下完成的。目前，现有搅拌摩擦焊设备多是基于数控机床改造而成的，只能适用于规则焊件的连接，功能单一，缺少工艺柔性，难以实现复杂工件的焊接。而对于航空、航天领域需要焊接的大型薄壁曲面，焊缝多呈现为三维空间内的复杂曲线<sup>[16,17]</sup>。由于焊接设备自身机构的限制，其路径规划和程序编制相当烦琐，有的甚至无法执行，有的即使可以实现焊接，但与其相配套的搅拌摩擦焊工艺的开发也极其困难。面对上述应用的困难，一种新型的机器人化搅拌摩擦焊设备应运而生。

机器人是一种先进的机电一体化高度集成的产物，它可以通过程序的编制来进行重复性的工作，能够实现不同的作业任务。与传统机床样式的重载焊接设备相比，搅拌摩擦焊机器人自由度配置更加合理，运动操纵更加灵活，工艺柔性更好<sup>[18,19]</sup>。机床样式和机器人化的搅拌摩擦焊设备在焊缝形式、焊接功能、工艺柔性和工装卡具方面的优缺点比较，详见表 1-1。从表中可以看到，机器人化的搅拌摩擦焊设备工作空间大、焊缝适应性强，具有操作灵活和智能性强等众多优点。

本书针对搅拌摩擦焊机器人在总体设计过程中存在的问题，将多体系统运动学和动力学、弹性力学有限元、动态优化设计和刚柔耦合理论引入搅拌摩擦焊机器人本体的研发和设计过程中，其理论研究意义在于：

表 1-1 机床样式和机器人化的搅拌摩擦焊设备性能比较

项目	焊缝形式	焊接功能	工艺柔性	工装卡具
机床样式	规则	单一	差	复杂、昂贵
机器人化	复杂空间三维曲线	多样(点焊、塞焊)	好	易于制造

(1) 面向我国航空航天领域对先进焊接技术的迫切需求。这种需求主要体现在对高强轻质铝合金的焊接上, 由于受制于国产航空发动机推力的不足, 这就需要寻找一种轻质的材料来用于焊接航天飞机、宇宙飞船和火箭的蒙皮结构, 以扩充机身和箭身的体积。而搅拌摩擦焊技术是焊接铝合金材料的首选焊接工艺, 在保证焊接质量的同时又绿色环保。

(2) 焊缝接头的力学性能得到了显著提升。搅拌摩擦焊的接头强度高、抗冲击耐疲劳, 其各项性能指标都优于传统的熔化焊接。除此之外, 该种焊接工艺焊缝质量均匀一致性好, 工艺比较稳定。目前, 该种技术已经涵盖了国民经济的各个领域, 产生了巨大的学术价值和经济价值。

(3) 通过对其焊接机理的分析, 增强焊接设备本体的静动态特性。为了确保搅拌摩擦焊机器人工作时具有足够的强度和刚度, 通过机器人的总体构型设计、复杂结构件的最优材料分布和模态频率匹配等措施, 为不同材料的焊接作业设计切实可行的运行工况, 同时分析各部件的变形、应力和振动响应最小来保证搅拌摩擦焊机器人工作过程中的安全可靠。

(4) 探索大型复杂设备的动态设计与优化分析方法。机器人的焊接精度受制于焊接设备本体的动态特性, 因此针对复杂重载设备开展一系列的设计、分析和优化工作以增强焊接设备本体的静动态性能, 可大大缩短研发周期和减少研发成本。最重要的是寻找到一套适用于重载复杂结构件的综合动态优化设计流程, 用于指导整个机器人的研发设计, 减轻自重并提高焊缝的焊接精度。

总之, 本书所进行的理论推导、仿真分析和试验验证工作很好地解决了搅拌摩擦焊机器人在总体设计中存在的多体系统运动学和动力学、传动副结合部的刚度、基于多元约束的结构优化以及整机的静动态特性研究等问题, 全面提升了大型重载强扰动搅拌摩擦焊设备的设计理念, 这些工作对于机器人化搅拌摩擦焊设备的现代化设计和研发具有重要的理论与实际指导意义。同时, 项目的成功实施, 迎合了国家“十三五”期间的发展规划纲要, 极大地提升了我国高端装备制造业的水平和国际竞争力, 满足了东北老工业基地振兴对战略技术的需求, 有着显著的社会经济效益。

## 1.2 搅拌摩擦焊的原理及特点

搅拌摩擦焊是利用高速旋转的搅拌头, 将其插入被焊工件的接缝处, 使工件材



料与轴肩摩擦接触并软化，最终完成整条焊缝的固相连接，其焊接原理如图 1-4 所示 [20]。

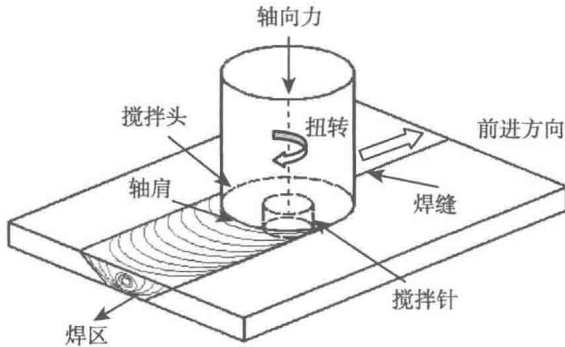


图 1-4 搅拌摩擦焊的焊接原理 [20]

搅拌摩擦焊接过程可大致分为以下四个阶段 [21]：首先，搅拌头在轴向力的作用下，将其机械式地插入被焊工件的接缝处；接着，在扭矩的作用下，搅拌头开始旋转并使其与被焊工件产生摩擦，从而使焊缝连接部位的材料温度升高并发生塑性化；然后，当焊头达到预定的深度之后停止插入，在进给力的作用下，开始沿工件的焊接线方向发生移动；最后，受搅拌工具旋转和移动的作用，高度塑性化的材料从工件的一端移动到另一端并不断地被搅拌，并在搅拌头轴肩锻造力的作用下在其运动方向的后方形成致密的焊缝。

与传统意义上的熔化焊接相比，搅拌摩擦焊有两大显著特点：超重载和强扰动。超重载是由搅拌摩擦焊的焊接机理决定的，它不同于普通切削和钻削机床是靠刀刃来去除材料的，因此切削阻力小、摩擦小。而搅拌摩擦焊是利用搅拌头机械式地插入被焊工件的接缝，并且焊接是发生在材料的塑性变形阶段，因此载荷条件极其恶劣。强扰动是由被焊工件的材质不均匀以及作用在搅拌头上的载荷周期性变化所致。正是如此，它需要焊接本体要有足够好的静动态特性，以确保焊后焊缝的精度和良好的力学性能 [22]。

### 1.3 搅拌摩擦焊设备现状介绍

搅拌摩擦焊的发展大致可归结为如下三个阶段，如表 1-2 所示。从表中可以发现，搅拌摩擦焊设备的研发还处于发展阶段，尽管现在已经出现了许多新型的搅拌摩擦焊设备，但离要求还有一定的差距。这主要体现在设备的工艺柔性、本体的动态特性、结构的尺寸参数以及焊接的工装工艺上。预计到 2020 年，搅拌摩擦焊的焊接工艺将会走向成熟阶段，这个阶段显著的标志就是焊接设备本体的动态性能已经得到了极大的改善，能够很好地保证搅拌头的焊接精度。除此之外，搅拌摩擦