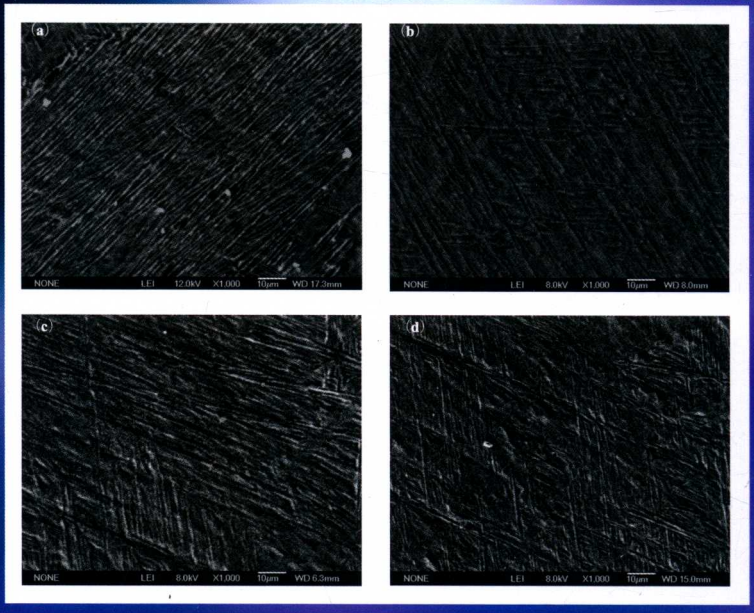
# 激光超声振动焊修技术

崔爱永　胡芳友　等著




化学工业出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 激光超声振动焊修技术

崔爱永　胡芳友　等著

其他著者：戴京涛　魏华凯　戚佳睿　赵培仲　刘浩东
易德先　卢长亮　胡　滨　付鹏飞

化学工业出版社

·北京·

**图书在版编目（CIP）数据**

激光超声振动焊修技术/崔爱永等著. —北京：化学工业出版社，2017.12

ISBN 978-7-122-30789-7

Ⅰ.①激… Ⅱ.①崔… Ⅲ.①激光焊②超声波振动-振动堆焊 Ⅳ.①TG44

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 253246 号

责任编辑：傅四周　　装帧设计：韩　飞

责任校对：王素芹

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号　邮政编码 100011）

印　　刷：三河市航远印刷有限公司

装　　订：三河市宇新装订厂

710mm×1000mm　1/16　印张 12½　字数 243 千字　2018 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686）　售后服务：010-64518899

网　　址：http://www.cip.com.cn

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

**定　　价：69.00 元**

**版权所有　违者必究**

# 前言

随着航空工业的发展，钛合金、复合材料等新材料在飞机上的应用比例越来越高。由于服役环境十分恶劣，飞机受机械振动、高低温交变载荷等因素影响，极易产生裂纹、微动磨损等损伤，给飞行安全造成极大的隐患。传统上常采取铆接和氩弧焊接来修复损伤。铆接修复时，由于钛合金材料对缺口敏感，止裂孔、铆钉孔易成为新的裂纹源，且钛合金铆钉塑性差，形成墩头困难，墩头易裂纹，需采取热铆的方式，操作起来较困难。钛合金材料可焊性好。焊接作为飞机制造过程的重要工艺，与机械连接和胶接共占整架飞机制造工时的20%左右，其中，焊接又以75%的份额居三大连接技术之首。但对无法拆卸的大尺寸损伤结构进行原位焊接修复后，将存在高值焊接残余应力，焊接质量难以控制，易在焊趾附近萌生新的裂纹，出现越修越严重的不良现象。与氩弧焊接相比，激光焊接具有热影响区小，质量稳定，焊接变形小，自动化程度高以及可焊接难焊材料等优点。但在激光焊接过程中，材料表面的局部高功率密度热输入将造成局部超高温度梯度，形成不均匀的热力学效应，并且熔池的分层快速凝固和冷却及基材的约束，将导致残余应力的产生。故损伤结构经激光焊接修复后，残余应力成为缩短修复结构服役时间的主要因素。

本书创新性地把原位激光技术与超声振动去应力技术结合，以整个团队长期的科研成果为基础，系统阐述了激光对材料微熔池温度场和应力场的影响规律，残余应力的产生机理，超声振动对激光焊接熔池应力场的动态响应规律，超声振动对焊接热过程的影响规律，超声振动对熔池凝固行为的影响规律，超声振动对焊缝力学行为的影响规律，为高频超声去应力激光焊修技术在航空乃至民用原位修理领域的应用做出理论和实践探索。

本书对于从事激光加工技术应用和研究、材料加工成形、工程维修等领域的工程技术人员及高等院校师生有较强的参考价值。

全书由崔爱永、胡芳友等著，刘浩东、戴京涛、戚佳睿、赵培仲、魏华凯、易德先、卢长亮、胡滨、付鹏飞等参与了本书有关的试验研究和编写工作。在本书编写过程中，书中所列的参考文献为编写工作提供了较大的帮助，在此对文献作者表达最诚挚的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

崔爱永　胡芳友

2017年12月于海军航空大学青岛校区

# 目 录


## 第1章 绪论 1

1.1 引言 …… 1
1.2 激光焊接技术 …… 2
1.2.1 激光焊接原理 …… 3
1.2.2 激光深熔焊小孔效应 …… 3
1.2.3 激光深熔焊能量吸收机制 …… 4
1.2.4 激光深熔焊光致等离子体现象 …… 4
1.2.5 钛合金激光焊接的常见缺陷 …… 5
1.3 焊接残余应力 …… 6
1.3.1 横向残余应力 $\sigma_Y$ …… 6
1.3.2 横向残余应力分布 …… 6
1.3.3 残余应力的不良影响 …… 7
1.4 焊后处理工艺 …… 8
1.4.1 焊前预处理 …… 8
1.4.2 随焊处理 …… 8
1.4.3 焊后处理 …… 9
1.5 超声振动随焊对熔凝行为的影响 …… 11
参考文献 …… 13

## 第2章 脉冲激光点热源作用下金属的温度场 15

2.1 引言 …… 15
2.2 温度场的计算模型 …… 15
2.2.1 激光加热金属板传热模型 …… 15
2.2.2 有限元解析方法 …… 17
2.3 脉冲点热源加热金属温度场模型的建立 …… 20
2.3.1 物理模型 …… 20
2.3.2 激光能量加载模型 …… 21


需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.3.3 材料参数 …… 25
2.3.4 初始条件及边界条件 …… 28
2.4 单脉冲作用下金属的热响应 …… 28
2.4.1 温度场的分布 …… 28
2.4.2 温度场的演变 …… 30
2.4.3 温度梯度场的分布 …… 31
2.5 多脉冲点热源作用下金属的热响应 …… 34
2.5.1 温度场的分布 …… 34
2.5.2 温度场的演变 …… 35
2.5.3 温度梯度场分布 …… 36
参考文献 …… 38

**第3章 脉冲点热源作用下金属的应力场 39**

3.1 引言 …… 39
3.2 弹塑性本构关系 …… 39
3.2.1 屈服准则 …… 40
3.2.2 强化法则 …… 41
3.2.3 增量本构关系 …… 43
3.2.4 弹塑性本构关系的矩阵形式 …… 43
3.2.5 热弹塑性本构关系 …… 45
3.2.6 有限元求解方法 …… 46
3.2.7 热应力场耦合求解 …… 47
3.3 有限元模型的建立 …… 48
3.3.1 材料参数 …… 48
3.3.2 初始条件 …… 48
3.3.3 边界条件 …… 49
3.4 单脉冲作用下金属的应力响应 …… 49
3.4.1 应力场分布特点 …… 49
3.4.2 应力场演变特点 …… 51
3.5 多脉冲点热源部分叠加加热金属板的应力响应 … 55
3.5.1 纵向应力 …… 55
3.5.2 横向应力 …… 58
3.5.3 残余应力 …… 60
3.5.4 残余应力与熔深的关系 …… 61

参考文献 …… 66

**第 4 章　激光振动焊修试验方法　67**

4.1　超声振动系统 …… 67
4.1.1　处理工艺 …… 67
4.1.2　试验系统及装置 …… 68
4.1.3　焊接工装设计及系统力学模型 …… 72
4.2　可视化验证试验 …… 74
4.2.1　试验方法 …… 76
4.2.2　不同液体的表现 …… 77
4.3　激光焊接工艺参数回归正交旋转组合设计 …… 78
4.3.1　二次回归正交旋转组合试验设计 …… 79
4.3.2　试验方案 …… 80
4.3.3　试验结果与分析 …… 81
4.3.4　优化焊接参数试验验证 …… 86
参考文献 …… 87

**第 5 章　超声振动对激光焊接热循环的影响　88**

5.1　激光焊接热循环试验系统 …… 88
5.1.1　测温方式和温度采集模块 …… 88
5.1.2　温度传感器计算 …… 89
5.1.3　热循环测试软件及模块集成 …… 90
5.2　激光焊接热循环的特征参数和数学表征分析 …… 92
5.2.1　特征温度点的分析及 TC4 相变点的测定 …… 92
5.2.2　焊接热循环历程的数学表征 …… 93
5.3　超声振动激光焊接热循环试验 …… 94
5.3.1　试验材料与方法 …… 94
5.3.2　试验结果 …… 95
5.3.3　超声对焊接过程的热影响分析 …… 98
5.3.4　试验结果分析 …… 100
5.4　不同超声功率下的焊接最高温度预测模型 …… 103
5.4.1　最高温度预测模型 …… 104
5.4.2　最高温度预测模型的验证 …… 106
参考文献 …… 107

第 6 章　超声振动对接头组织的影响　108
6.1　超声振动对焊接修复裂纹宏观形貌的影响 …… 108
6.2　超声振动对接头晶粒的影响 …… 111
6.2.1　试验方法 …… 111
6.2.2　试验结果与分析 …… 111
6.3　超声振动对马氏体相变的影响 …… 117
6.4　超声振动对焊接缺陷的影响 …… 119
6.4.1　试验设备与方法 …… 120
6.4.2　试验结果与分析 …… 120
6.5　超声振动对位错的影响 …… 124
参考文献 …… 127

第 7 章　超声振动对接头力学性能的影响　128
7.1　试验设备与方法 …… 128
7.1.1　再裂纹焊接修复试验方法 …… 128
7.1.2　拉伸性能测试方法 …… 128
7.1.3　冲击性能测试方法 …… 128
7.1.4　疲劳性能测试方法 …… 129
7.1.5　接头显微硬度测试方法 …… 130
7.2　超声振动对裂纹激光焊接修复接头力学性能的影响 …… 130
7.2.1　对接头拉伸性能的影响 …… 130
7.2.2　对接头冲击性能的影响 …… 133
7.2.3　对接头疲劳性能的影响 …… 137
7.2.4　对接头显微硬度的影响 …… 139
7.3　超声振动对接头断口形貌的影响 …… 142
7.3.1　对拉伸断口形貌的影响 …… 142
7.3.2　对冲击断口形貌的影响 …… 143
7.3.3　对疲劳断口形貌的影响 …… 145
参考文献 …… 149

第 8 章　超声振动对残余应力和变形的影响　151
8.1　焊接残余应力应变的相关测量方法 …… 151

8.1.1 焊接应力的分类 …… 151
8.1.2 焊接应力的测量方法 …… 152
8.2 残余应力的描述方法 …… 154
8.2.1 残余应力与残余变形的关系 …… 154
8.2.2 试验件的设计 …… 158
8.2.3 熔深与残余变形的关系 …… 159
8.3 焊接残余应力分布规律及超声振动下的衰减机理 …… 162
8.3.1 钛合金薄板焊接残余应力的分布规律 …… 162
8.3.2 焊接残余应力在超声振动下的衰减机理 …… 164
8.4 超声振动对一次裂纹修复残余应力的影响 …… 168
8.4.1 试验方法 …… 169
8.4.2 试验结果与分析 …… 172
8.5 超声振动对再裂纹修复残余应力的影响 …… 178
8.5.1 试验结果 …… 178
8.5.2 试验结果与分析 …… 179
8.6 超声振动控制裂纹修复残余应力的工艺稳定性分析 …… 182
8.7 超声振动对焊接残余变形的影响 …… 184
8.7.1 试验材料与方法 …… 184
8.7.2 试验结果与分析 …… 185
8.8 基于超声振动的焊接残余应力和残余变形的相关性分析 …… 189
参考文献 …… 192

# 第 1 章

# 绪　论

## 1.1　引言

随着航空工业的发展，钛合金、复合材料等新材料在战机上的应用比例越来越高。美军现役的 F-15、F-18、F-117 以及 B-1、B-2 等战机的钛合金使用比例均大于 20%，美军的四代战机 F-22 使用 TC4 钛合金的比例更是超过结构质量的 41%，使得钛合金等新材料一跃成为航空结构的主体材料之一，如图 1-1 所示。由于服役环境十分恶劣，飞机受机械振动、高低温交变载荷等因素影响，裂纹、微动磨损等损伤不可避免，给飞行安全造成极大的隐患，同时新材料的运用对传统的修理技术提出了新的要求。

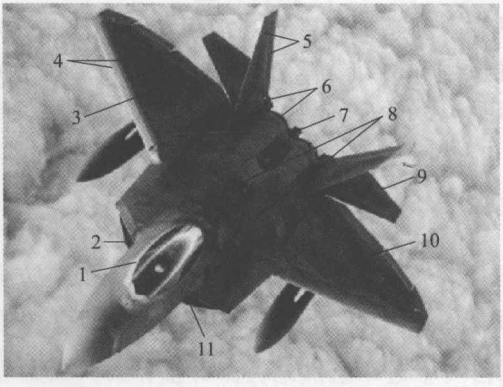



图 1-1　美军 F-22 战机的钛合金结构

1—座舱罩；2—斜隔框；3—主机翼部件；4—翼梁；5—尾翼梁及肋；6—方向舵部件；7—纵梁；8—机体及隔框；9—副翼部件；10—挡板铰链部件；11—辅助动力部件

目前航空上常采取铆接和氩弧焊接来修复裂纹损伤。由于钛合金材料对缺口敏感，铆接修理时的止裂孔、铆钉孔易成为新的裂纹源，而且钛合金铆钉塑性差，形成墩头困难，墩头易裂纹，需要采取热铆的方式，现场原位条件下操作困难。

钛合金材料可焊性好。焊接作为飞机制造过程的重要工艺，与机械连接和胶接共占整架飞机制造工时的20%左右，其中，焊接又以75%的份额居三大连接技术之首。但对无法拆卸的大尺寸损伤结构进行原位焊接修复后，由于无法进行后续处理，将存在高值焊接残余应力，成型表面质量不高，焊缝较宽，热影响区大，形变大，焊接质量难以控制，由于应力集中，易在焊趾附近，萌生新的裂纹，出现越修越严重的不良现象，如图1-2所示。

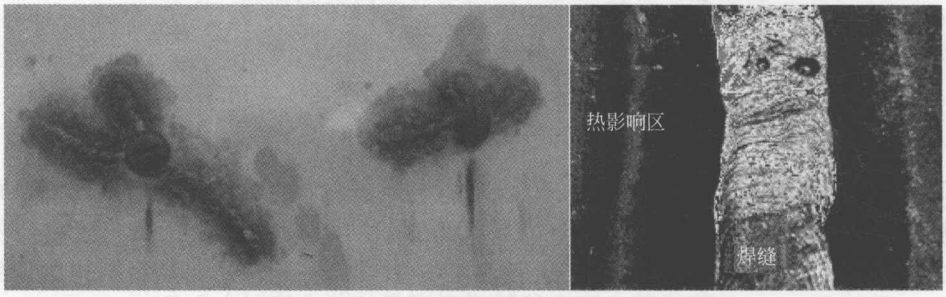



图1-2　氩弧焊接表面形貌

经过多年发展，激光焊接技术已经逐步成熟并广泛应用于飞机、汽车及船舶制造领域。与氩弧焊接相比，激光焊接具有热影响区小，质量稳定，焊接变形小，自动化程度高以及可焊接难焊材料等优点。但在激光焊接过程中，材料表面的局部高功率密度热输入将造成局部超高温度梯度，形成不均匀的热力学效应，并且熔池的分层快速凝固和冷却及基材的约束，将导致残余应力的产生。故损伤结构经激光焊接修复后，残余应力仍然是缩短修复结构服役时间的主要因素。

## 1.2　激光焊接技术

自20世纪60年代激光器发明以来，激光由于具有高方向性、高亮度、高单色性和高相干性等优点而被广泛应用于各领域，也由于这些特性使其成为理想的加工热源。高功率激光经聚焦后，聚焦处的功率密度可达$10^{14}\sim10^{15}\,W/cm^2$，金属材料在如此高功率密度的激光照射下会瞬间升温、熔化，甚至瞬间汽化。应用不同的激光功率密度和照射作用时间，就可对金属材料实现不同的加工方式[1]，如表面热处理、表面冲击强化、表面重熔、表面合金化、熔覆、焊接、切割、打孔等多种工艺。激光作为一种高能量密度、非接触、清洁的热源进入加工领域，解决了应用许多常规方法无法加工和很难加工的问题，极大地提高了生产效率和加工质量，也为损伤结构的修理提供了一种先进而有效的技术手段。

激光焊接具有能量集中、焊缝成形好、热影响区小、操作简单的优势，适合焊接各种厚度的材料，在飞机钛合金零部件的焊接中必将成为主导方向。



需要全本请访问 www.ertongbook.com

### 1.2.1 激光焊接原理

激光焊接是用高强度的激光照射金属焊接部分，通过金属材料吸收激光能量使金属熔化而形成焊接熔池，熔池表面极大的温度梯度使得焊接熔池迅速凝固，从而形成焊接[1]。激光焊接的机理有两种：①热传导焊接；②激光深熔焊。激光焊接时，激光照射到被焊接材料的表面，与其发生作用，一部分被反射，一部分被材料吸收使金属材料熔化、汽化，从而在汽化冲击压力作用下在焊接部位形成熔池，在熔池形成之前，激光的能量主要是通过热传导方式向金属材料内部传递，此过程属于热传导焊接。待形成稳定的熔池后，则主要通过小孔将激光折射传到材料内部，因此，整个焊接过程属于激光深熔焊。

### 1.2.2 激光深熔焊小孔效应

图 1-3 为激光深熔焊的原理图，激光深熔焊的典型特征是“小孔效应”。

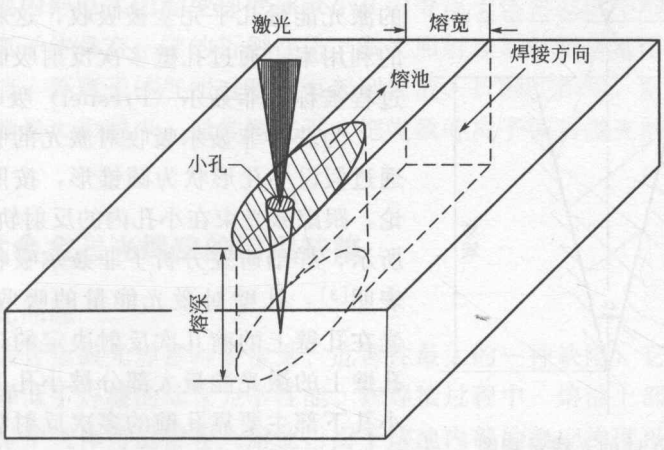



图 1-3 激光深熔焊原理图

钛合金的热导率较低，其对流和辐射散热速率较小，当高强度激光（功率密度 $10^6\,W/cm^2$）照射钛合金材料时，随着材料表面金属温度的不断升高，其金属熔化量不断增加。当材料受到较长时间高强度激光作用时，表面金属就会发生汽化蒸发，汽化蒸发的金属蒸气就会对熔池产生压力，此时熔池迅速下陷。当金属蒸气冲击压力增大到某一临界值时，熔池就会在金属蒸气冲击力的作用下生成小孔，当孔内金属蒸气压力与液态金属自身重力、表面张力达到动态平衡时，此时小孔处于稳定状态，激光通过孔壁的折射作用使能量传至小孔底部，此过程称为“小孔效应”。资料显示，在高强度激光作用下，金属蒸气会发生电离，电离的金属离子促进了小孔对激光能量的吸收[2]。

## 1.2.3 激光深熔焊能量吸收机制

在激光深熔焊过程中，就金属材料对激光的吸收而言，“小孔效应”起到了积极的促进作用，通过孔壁的多次反射形成了金属材料对激光能量的多次重复吸收，这就提高了金属材料对激光能量的吸收效率。通常情况下认为通过“小孔效应”吸收激光能量的机制包括逆韧致吸收和菲聂尔吸收。

逆韧致吸收是指光致等离子体对激光能量的吸收。在小孔形成过程中，伴随着金属蒸气的产生，小孔的深度迅速增加，金属蒸气充满整个小孔，此时大量金属蒸气被激光电离形成等离子体，这些等离子体促进了金属材料对激光能量的吸收。

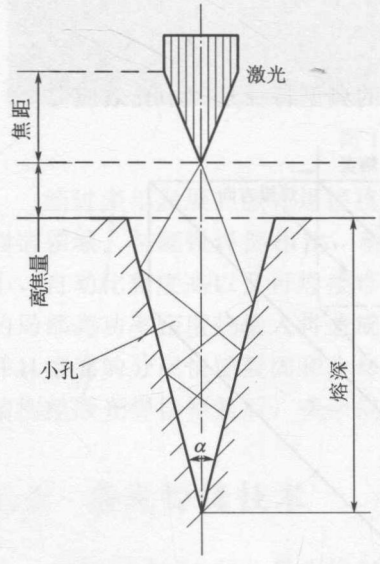



图 1-4　孔壁的光线示意图

激光焊接时，在小孔形成并稳定后，激光通过小孔孔壁发生多次反射，由于每次反射都有部分激光能量被孔壁吸收，随着反射次数的增加，激光束的能量不断衰减，直至小孔底部的激光能量几乎完全被吸收，这就提高了激光的利用率。通过孔壁多次反射吸收激光能量的过程被称为菲聂尔（Fresnel）吸收。

为获得菲聂尔吸收对激光的吸收率，有人通过假设小孔形状为圆锥形，按照几何光学理论，跟踪激光束在小孔内的反射轨迹，如图 1-4 所示，详细研究分析了菲聂尔吸收机理。结果表明[3]：孔壁对激光能量的吸收主要是由激光在孔壁上的前几次反射决定的，直射到小孔孔壁上的激光能量大部分被小孔上部吸收，而小孔下部主要靠孔壁的多次反射吸收能量。小孔孔壁上吸收的激光能量决定了小孔的形状和尺寸，小孔的形状、深度和大小与孔壁吸收的能量之间是一个动态平衡过程，孔壁的后几次反射获得的激光能量越大，小孔的直径和深度也就越大，而锥顶角越小。

## 1.2.4 激光深熔焊光致等离子体现象

在激光焊接过程中，高能量密度的激光束照射金属表面，使金属熔化后汽化蒸发，当小孔达到动态平衡后，金属蒸气充满整个小孔，随着激光强度的增加和作用时间的延长，金属蒸气被电离形成光致等离子体。光致等离子体是由电子、中性粒子、阳离子等组成的蒸气团。

研究表明[3]：低能量密度的激光照射时，由于自由电子吸收较低能量状态的光子后动能不足，致使金属蒸气原子电离较少，因此，金属离子蒸气是等离子体的主要组成部分。当高强度激光深熔焊时，自由电子吸收光子后动能增加，不断撞击金属蒸气原子，从而使电子密度急剧增大，最终形成光致等离子体。

光致等离子体产生后位于小孔上部和焊接熔池顶部，从而笼罩着整个焊接熔池。它对激光束的作用具体体现为吸收和折射。

（1）光致等离子体对激光能量的吸收

在小孔达到稳定状态后，大量光致等离子体笼罩在焊接熔池的正上方，一方面阻碍了金属材料对激光能量的吸收，另一方面增强了自身吸收激光束能量的能力，从而使自身温度升高，电子密度增大。其能量吸收机制分为两类：一类是高动能电子撞击金属蒸气离子，把通过光子获得的能量转移给金属蒸气离子，使其升温电离；另一类是把捕获的光子能量以波能量的形式转化为光致等离子体的内能，使其升温电离。

（2）光致等离子体对激光能量的折射

焊接熔池内部巨大的温度梯度导致小孔内等离子体密度的不均匀性。一般情况下认为等离子体具有一定的折射性质。激光照射金属材料时被熔池上部的光致等离子体遮挡，等离子体气团对激光束起到发散、折射的作用，从而使金属材料获得的激光能量大大减少。通常情况下，把光致等离子体对激光的折射作用称为负透镜效应。

### 1.2.5 钛合金激光焊接的常见缺陷

（1）气孔问题

气孔是钛合金激光焊接时最常见、危害性最大的一种缺陷，它容易引起应力集中，从而降低了焊缝的综合力学性能。在焊接过程中，熔池上部液体金属对流最为剧烈，保护气体可能被卷入熔池，由于熔池内部的温度梯度极大，焊接熔池快速凝固后，被卷入熔池的保护气体没有充足的时间逸出，从而在熔池底部形成气孔。此外，焊接熔池的快速凝固也可能使熔池中的光致等离子体没有充足的时间逸出熔池，其与熔池内液态金属同时凝固，最终在焊缝内部形成真空的气孔。

（2）焊接裂纹

钛合金激光焊接时极易吸收周围空气中的氮气、氧气、氢气，并与之发生反应形成间隙固溶体，这就阻碍了晶界间位错的移动，显著提高了焊缝的硬度，但其塑性会变差，导致整个焊接接头脆化。

氢气是引起焊缝及周围高温区域冷却后产生焊接裂纹的主要原因。氢气在钛合金中的作用是扩大β相相区，使β相的转变温度降低并强化β相。但氢气对焊缝综合力学性能的影响具体表现为热影响区产生延迟裂纹。研究发现，热影响区

的含氢量远高于熔合区，这可能是因为氢气随着熔池内熔融金属的对流运动而被带入激冷层附近，这样冷却后热影响区就会析出大量 $TiH_2$，导致热影响区的脆性增加。此外，钛合金气热导率较低，焊接熔池又不断地把热量以热传导的方式传给热影响区，使得热影响区始终保持较高温度，这样析出的氢化物体积迅速膨胀，从而引起较大的局部应力，当局部应力超过材料屈服极限时就会引起裂纹。

## 1.3 焊接残余应力

### 1.3.1 横向残余应力 $\sigma_Y$

当焊缝的横向收缩受阻时，就会产生横向残余应力。横向残余应力的产生由两部分构成，即纵向收缩引起的 $\sigma_{Y'}$ 和焊接时的不同时性引起的 $\sigma_{Y''}$。

两板对接焊接后，如果沿焊缝中心线切开，切开后焊缝就成了自由边界，应力要释放，而原来焊缝处承受的是纵向拉应力，焊缝处的纵向就会缩短，结果焊缝的纵向收缩就使得两块板条分别向外弯曲，发生挠曲变形。只有在板条两端加上压力，中部加上拉力，才会使它们恢复原位。这就说明，接头没有切开前，两个板条能连在一起形成一条平直的焊缝，两者是有横向应力作用的，也就是焊缝的纵向收缩不仅会造成纵向应力 $\sigma_X$，还会引起横向应力 $\sigma_{Y'}$，焊缝中部受拉应力而两端受压应力，如图 1-5 所示。压应力作用的区域很小，最大压应力要远大于最大拉应力，焊缝越长，焊缝中心部位的拉应力越小，逐渐趋近于零，如图 1-6 所示。

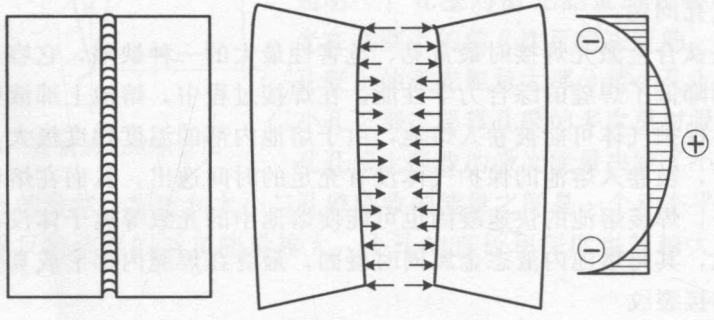



图 1-5 纵向应力引起的横向应力 $\sigma_{Y'}$

### 1.3.2 横向残余应力分布

焊缝横向残余应力（垂直于焊缝长度方向）$\sigma_Y$ 的分布情况为：在焊件纵截面上，焊缝中心区域为拉应力，接近端面的焊缝区域为压应力；在焊件横截面

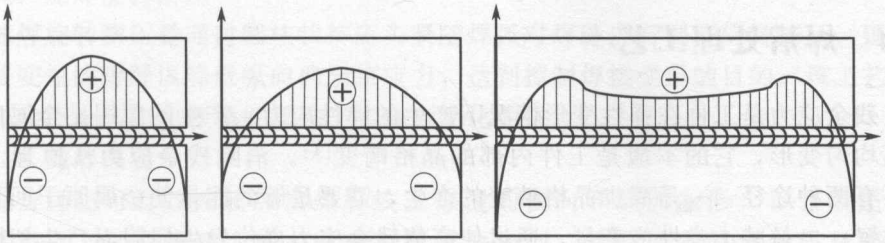


图 1-6 不同长度焊缝 $\sigma_{Y'}$ 的分布

上，随着截面远离焊缝，中心区域的拉应力峰值与接近端面区域的压应力峰值均逐渐减小，如图 1-7 所示。

## 1.3.3 残余应力的不良影响

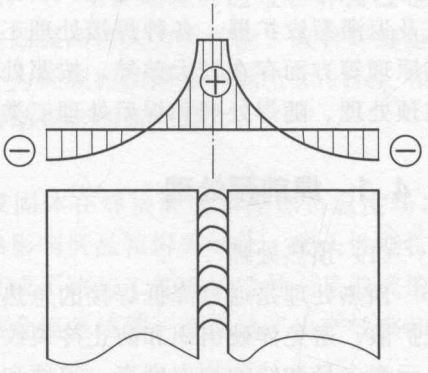


图 1-7 横向残余应力分布

残余应力作为一种内应力，不仅对修复件的静载强度、疲劳强度和抗应力腐蚀性能等有不利影响，而且也影响结构尺寸的稳定性和成形精度，严重时会直接引起裂纹，主要表现在以下几个方面。

（1）残余应力对结构尺寸的影响

残余应力使零件处于一种不稳定的应力状态，它的存在将影响零件的结构尺寸，原因是残余应力在外界因素作用或时效作用下会发生变化（松弛或衰减），其平衡状态遭到破坏，导致结构产生二次变形和残余应力的重新分布，降低工件的刚性和尺寸的稳定性。

（2）残余应力对使用性能的影响

残余应力的存在影响工件的使用寿命。这是由于工件在服役期间将承受残余应力和工作应力的共同作用，当两种应力方向相同产生叠加效应时，工件实际所受的工作载荷相当于增大了，势必会造成过载失稳而过早发生失效。另外，工件受服役过程中工作温度、工作介质和残余应力的共同作用易引起结构失效，比如在高温环境下由于热应力和残余应力的综合作用引起热裂；在腐蚀介质中，残余拉应力的存在会引起应力腐蚀开裂。

（3）残余应力对组织稳定性的影响

激光熔凝后材料一般为多相组织，在一定条件下残余应力会引起相转变，使材料微观组织发生变化，从而改变材料在某些特定条件下的使用要求。另外，残余应力在一定环境下也会影响激光加工后材料的电学、磁学等物理性能。

## 1.4 焊后处理工艺

残余应力是工件在弹性变形情况下产生的弹性应力，产生的原因是金属内部的不均匀变形，它的本质是工件内部的晶格畸变[4]。消除残余应力从原理上讲主要有两种途径：一是减少晶格畸变的产生，需要足够的能量使金属原子回到平衡位置；二是减小弹性应变量，通过使高值残余应力部位发生屈服而产生塑性变形。目前已有的残余应力的处理方法主要有：热处理法、机械拉伸法、爆炸法、振动时效法、超声波冲击法等。

焊接处理可以改善焊缝组织、释放残余应力、矫正焊接变形、提高力学性能以及迟滞裂纹扩展。各种焊接处理工艺在适用对象、施加方式、应用限制以及工艺原理等方面存在较大差异。按照处理时的焊接状态将不同焊接处理工艺分为焊前预处理、随焊处理和焊后处理三类。

### 1.4.1 焊前预处理

（1）预热处理

预热处理是通过降低焊接的急热幅度和冷却速度，达到减小焊接应力、加速氢扩散、避免淬硬组织和防止冷裂纹的目的。预热处理主要适用于焊接性差，合金元素含量和结构拘束度高，淬硬和开裂倾向大的材料。预热处理存在生产工艺复杂、生产成本高、生产效率低、工作环境恶化以及热影响区软化倾向增大等缺点，并且某些特殊结构较难实现甚至不允许采用预热处理[5]。

（2）预拉伸处理

预拉伸处理通过预加拉应力场与焊接应力场的叠加改变工件的应力场分布，达到控制焊接应力和变形的目的[6]。该工艺适用于因弹性模量小、线膨胀系数大以及高温塑性差引起残余应力和失稳变形的材料。

焊前预处理还包括预加载处理和预碾压处理，其操作和原理与预拉伸相似，故不赘述。

### 1.4.2 随焊处理

（1）随焊碾压

随焊碾压是通过前后碾压轮对焊后高温焊趾和焊缝进行冲击碾压，前轮为内凹周面，可迫使焊趾金属向焊缝中心流动以抵消拉伸应变，从而防止焊接热裂纹；后轮为外凸周面，可将焊缝的纵向和横向压缩应变以及前轮对焊缝的横向挤压应变碾开而使焊缝充分延展，从而消除焊接残余应力和变形[7]。该工艺的设备简单、成本低、效率高，且焊缝质量好，但仅适用于平面和小倾斜角度焊件。



需要全本请访问 www.ertongbook.com