

# 激光及其复合能场焊接 机理与工艺

邵新宇 蒋平 王春明 著



科学出版社

# 激光及其复合能场焊接 机理与工艺

邵新宇 蒋平 王春明 著

科学出版社

北京

版权所有，侵权必究

举报电话：010-64030229，010-64034315，13501151303

## 内 容 简 介

激光及其复合能场焊接技术具有焊接质量好、效率高等优势，在汽车、航空航天、轨道交通等领域得到了广泛应用。本书从能量作用机理、焊缝宏观形貌、接头服役性能等方面对激光及其复合能场焊接机理与工艺进行介绍，为激光及其复合能场焊接技术的实际应用提供理论指导和工艺基础。

本书可作为高等工科院校机械、材料类专业本科生、研究生教材或教学参考书，也可供有关专业的研究人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

激光及其复合能场焊接机理与工艺/邵新宇，蒋平，王春明著. —北京：科学出版社，2018.11

ISBN 978-7-03-058766-4

I. ①激… II. ①邵… ②蒋… ③王… III. ①激光焊-焊接工艺  
IV. ①TG456.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 205356 号

责任编辑：谭耀文 王 晶 / 责任校对：董艳辉

责任印制：彭 超 / 封面设计：苏 波

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>

武汉精一佳印刷有限公司印刷  
科学出版社发行 各地新华书店经销

2018年11月第一版 开本：787×1092 1/16  
2018年11月第一次印刷 印张：9 1/4  
字数：213 000

定价：98.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)



# 前 言

激光加工技术被誉为“21世纪制造系统共同的加工手段”，它具有效率高、质量优、适应性强、绿色环保等优势。激光焊接技术是激光加工技术的典型代表，与传统焊接技术相比，具有热输入小、焊缝深宽比大、效率高和柔性好等优势，在汽车、航空航天、轨道交通等领域得到了广泛应用。与此同时，由于激光复合焊接技术在提高能量利用效率、改善焊缝成形、调控微观组织等方面优势突出，受到了业界的广泛关注。

本书共分为6章，从能量作用机理、焊缝宏微观形貌、接头服役性能等方面介绍激光及其复合能场焊接机理与工艺。第1章对激光及其复合能场焊接技术、焊接变形与应力、焊接接头的腐蚀疲劳性能及厚板窄间隙叠层焊接等进行介绍。第2章介绍多能场复合焊接三维瞬态耦合多相流数值模型，分析焊接过程中的复合等离子体行为，研究能量耦合作用机理。第3章介绍考虑固态相变与析出强化的热-相变-弹塑性有限元模型，研究EH36高强钢激光焊接相变动力学机理，对焊后应力分布进行分析。第4章分析多能场复合焊接焊缝微观组织，研究熔池流动行为和焊缝微观组织形成机理。第5章分析多能场复合焊接焊缝腐蚀疲劳失效行为、微观组织与腐蚀疲劳性能的关联关系，研究焊缝腐蚀疲劳性能调控机制。第6章研究窄间隙多能场复合焊接电弧稳定性及熔滴过渡行为对焊缝成形的影响，优化焊接工艺，实现40mm厚板的多能场复合焊接。

本书由华中科技大学邵新宇教授团队完成。其中，邵新宇教授负责全书的统稿工作，并负责第1章、第6章的撰写；蒋平教授负责第4~5章的撰写；王春明教授负责第2~3章的撰写。本书的撰写还得到了华中科技大学黄禹教授、庞盛永副教授、米高阳博士、荣佑民博士及高忠梅、陈鑫、陈荣、张熊、耿韶宁、高嵩、王逸麟、赵津田等研究生的大力支持，在此表示感谢！

在本书的撰写过程中，上海交通大学、中国船舶重工集团公司四六一厂及中船重工第七〇二研究所、武汉华工激光工程有限责任公司等单位给予了大力的协助，为本书提供了许多宝贵的资料和图片，在此表示感谢！此外，对在本书成稿过程中给予帮助的专家学者致以诚挚的谢意。

由于作者的水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

作 者

2018年5月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 激光及其复合能场焊接技术	1
1.1.1 激光焊接技术简介	1
1.1.2 激光-电弧复合焊接技术简介	4
1.1.3 磁场辅助焊接技术简介	7
1.2 焊接变形与应力	12
1.2.1 变形与残余应力模拟方法	12
1.2.2 变形与残余应力测量方法	14
1.3 焊接接头的腐蚀疲劳性能	15
1.3.1 奥氏体不锈钢焊接接头的腐蚀疲劳裂纹萌生	15
1.3.2 奥氏体不锈钢焊接接头的腐蚀疲劳裂纹扩展	17
1.4 厚板窄间隙叠层焊接	18
1.4.1 厚板窄间隙叠层电弧焊接	18
1.4.2 厚板窄间隙叠层激光焊接	19
1.4.3 厚板窄间隙叠层激光-电弧复合焊接	20
参考文献	21
第 2 章 多能场复合焊接能量耦合协同作用机理	24
2.1 多能场复合焊接三维瞬态耦合数学模型	24
2.1.1 建模难点及解决方法	24
2.1.2 控制方程	26
2.1.3 边界条件	28
2.1.4 数值计算流程	31
2.2 电弧-磁场复合焊接复合等离子体行为及其机理	32
2.2.1 磁场对电弧桥接能力的调控作用	32
2.2.2 磁场对电弧焊接热效率的影响机理	33
2.2.3 磁场对斜电极电弧等离子体运动的作用机理	34
2.3 激光-电弧复合焊接复合等离子体行为及其机理	35
2.3.1 复合等离子体的瞬态性特征	35
2.3.2 激光冷却电弧等离子体效应	36
2.3.3 激光促进起弧和稳弧作用机理	38
2.4 激光-电弧-磁场多能场能量耦合作用机理	40

2.4.1	磁场对复合等离子体行为的影响	40
2.4.2	多能场复合焊接能量耦合作用机理	41
	参考文献	45
<b>第3章</b>	<b>激光焊接中的热-相变-弹塑性模型</b>	<b>47</b>
3.1	峰值指数递增-双锥体热源模型及相变过程分析	47
3.1.1	峰值指数递增-双锥体热源模型	47
3.1.2	PII-DC 热源模型参数的确定	49
3.1.3	考虑 PII-DC 热源的温度场有限元理论模型的构建	50
3.1.4	温度场有限元集成实现	52
3.1.5	激光焊接相变过程分析	54
3.2	考虑固态相变与析出强化的热-相变-弹塑性有限元模型	57
3.2.1	焊接热-弹塑性有限元理论模型	57
3.2.2	固态相变对应力场影响机理	61
3.2.3	析出强化对屈服强度影响机理	64
3.2.4	基于径向返回算法的应力快速更新方法	65
3.2.5	材料 Jacobian 矩阵	68
3.2.6	热-相变-弹塑性有限元模型的实现	69
3.3	热-相变-弹塑性有限元模型验证与分析	72
3.3.1	热源模型试验验证与分析	72
3.3.2	固态相变模型试验验证与分析	75
3.3.3	应力场试验验证与分析	79
3.3.4	固态相变及析出强化对残余应力的影响	82
	参考文献	85
<b>第4章</b>	<b>激光-电弧-磁场复合焊接组织形成机理</b>	<b>87</b>
4.1	激光-电弧-磁场复合焊接焊缝铁素体形成机理	87
4.1.1	多能场复合焊接焊缝中的铁素体调控	87
4.1.2	多能场复合焊接焊缝铁素体形成机理研究	89
4.2	激光-电弧-磁场复合焊接焊缝晶粒取向形成机理	94
4.2.1	多能场复合焊接焊缝晶粒取向调控	94
4.2.2	多能场复合焊接焊缝晶粒取向形成机理	98
	参考文献	101
<b>第5章</b>	<b>激光-电弧-磁场复合焊接接头腐蚀疲劳性能调控机制</b>	<b>103</b>
5.1	激光-电弧-磁场复合焊接焊缝腐蚀疲劳裂纹萌生行为及调控	103
5.1.1	腐蚀疲劳裂纹萌生寿命测试	103
5.1.2	腐蚀疲劳裂纹萌生行为	105
5.1.3	腐蚀疲劳裂纹萌生寿命调控机制	107
5.2	激光-电弧-磁场复合焊接焊缝腐蚀疲劳裂纹扩展行为及调控	113
5.2.1	腐蚀疲劳裂纹扩展速率测试	113

---

5.2.2	腐蚀疲劳裂纹扩展行为	113
5.2.3	腐蚀疲劳裂纹扩展速率调控机制	118
	参考文献	124
<b>第 6 章</b>	<b>厚板窄间隙多能场复合叠层焊接工艺</b>	<b>126</b>
6.1	窄间隙条件下电弧动态行为	126
6.1.1	焊接电流对电弧动态行为的影响	126
6.1.2	光丝间距对电弧动态行为的影响	127
6.2	窄间隙条件下熔滴过渡行为	127
6.2.1	焊接电流对熔滴过渡的影响	127
6.2.2	光丝间距对熔滴过渡的影响	129
6.3	40mm 厚板窄间隙多能场复合焊接	130
6.3.1	焊接工艺	130
6.3.2	微观组织	132
6.3.3	力学性能	134
	参考文献	137

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 激光及其复合能场焊接技术

### 1.1.1 激光焊接技术简介

激光焊接技术是将高能量密度的激光束作为热源的一种高效精密焊接技术。与传统焊接技术相比，激光焊接技术具有高精度、低变形和高效率等优势，被广泛应用于航空航天、轨道交通、汽车、能源等工业领域。

#### 1. 激光焊接原理

激光焊接主要有热导焊和深熔焊两种。激光热导焊采用的激光功率密度大约为  $10^5 \text{W/cm}^2$ ，它依靠激光辐射吸收与热传导的方式进行焊接，焊缝深度一般小于 2.5mm，焊缝的深宽比较小。激光深熔焊采用的激光功率密度一般在  $10^6 \text{W/cm}^2$  以上，焊缝熔深较大，深宽比最大可达 12 : 1。

##### 1) 激光热导焊

激光热导焊时，激光作用于材料表面，材料表面吸收激光辐射的能量并转化为热量。表面产生的热量通过热传导的方式向内部扩散，使材料熔化形成熔池。熔池随着激光束的移动向前移动，位于熔池后方的熔融金属随之凝固形成焊缝，如图 1.1 所示。激光能量只作用于材料表面，表面最高温度只能达到气化温度。激光热导焊一般只应用于薄板或者小零件的焊接加工。

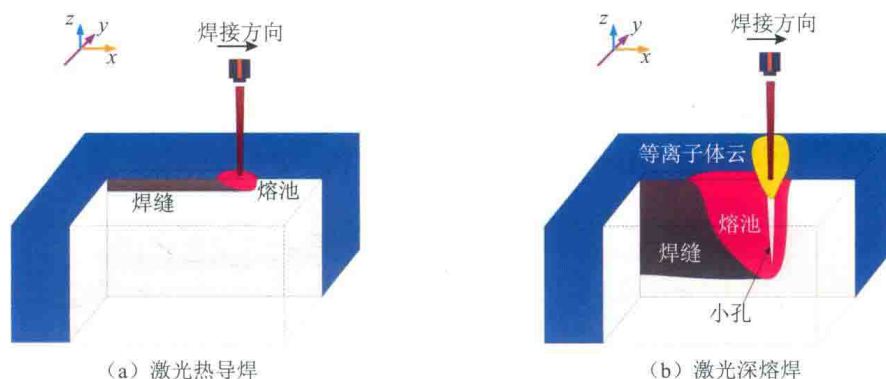


图 1.1 激光热导焊与激光深熔焊原理图

##### 2) 激光深熔焊

当激光功率密度达到  $10^6 \text{W/cm}^2$  左右时，激光输入的能量远大于热传导、热对流及



热辐射散失的热量，材料表面会发生熔化和气化而产生小孔，如图 1.1 (b) 所示。在小孔内金属蒸气产生的压力与四周熔池的静压力和表面张力形成动态平衡，激光可以通过小孔直接射到孔底，产生小孔效应。激光能量通过逆轆致辐射作用（主要发生在小孔内或小孔上方形成的等离子体云中）和菲涅耳吸收作用（小孔壁面上）被材料吸收。小孔的形状与大小在焊接过程中发生周期性变化，与传统焊接相比，熔池温度显著提高。由于焊接过程极快，热量传递到周围母材中形成狭窄的热影响区。

## 2. 激光焊接工艺

### 1) 激光自熔焊

激光自熔焊是常见的激光焊接方式。在激光自熔焊过程中，焊接工艺参数（激光功率、焊接速度、离焦量等）对焊接接头宏观形貌、微观组织、力学行为及焊接缺陷等有很大的影响。①激光功率：激光焊接过程中激光能量密度存在一个阈值，低于此值时，熔深很浅，达到或超过此值时，熔深会大幅度提高。②焊接速度：焊接速度对熔深影响较大，减小速度会使焊缝的熔深变大，但速度较低时会导致材料的过度熔化，出现焊缝下塌缺陷。焊接速度会影响焊缝金属的性能与微观组织，因此焊接速度较快时，熔池的冷却速度较快，对焊缝组织有显著的影响。③离焦量：激光束光斑的大小决定着激光功率密度。焦点与工件表面的相对位置影响着熔深与熔宽，采用正离焦和负离焦均会导致光束散焦，降低材料表面的能量密度。其中，负离焦由于焦平面位于工件以内，对于熔深的增加有一定帮助。

### 2) 激光填丝焊接

在激光焊接过程中，通过填加焊丝以改善焊缝成分和组织，抑制焊接缺陷和增加焊前装配间隙允差等的焊接方式称为激光填丝焊接。激光填丝焊接具有以下四方面优势：①可降低激光深熔焊对工件加工与装配精度的苛刻要求；②可方便地调整焊缝成分；③可实现异种材料及难熔材料的焊接；④可利用千瓦级功率的激光器来实现厚板、中厚板焊接。激光填丝焊接示意图如图 1.2 所示。

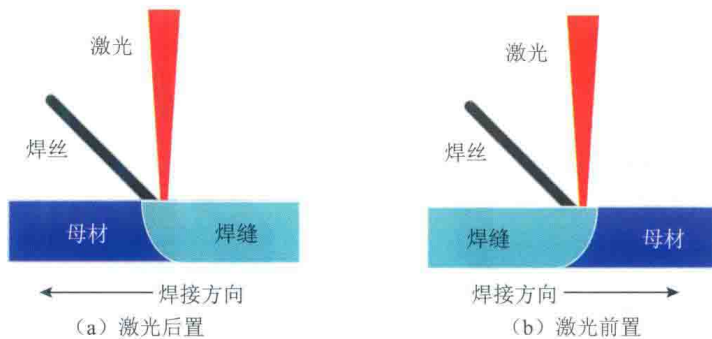


图 1.2 激光填丝焊接示意图

### 3) 双光束激光焊接

双光束激光焊接是通过两束光或者一束光进行分光形成两个光斑来对材料进行焊接的焊接方法。根据不同的分布方式，双光束激光焊接可以分为并行分布方式、成角度

分布方式和串行分布方式，当两激光束的连线与焊接方向垂直时，称为并行分布方式，当两激光束的连线与焊接方向成一定角度时，称为成角度分布方式，当两激光束的连线与焊接方向平行时，称为串行分布方式，具体分布方式如图 1.3 所示。

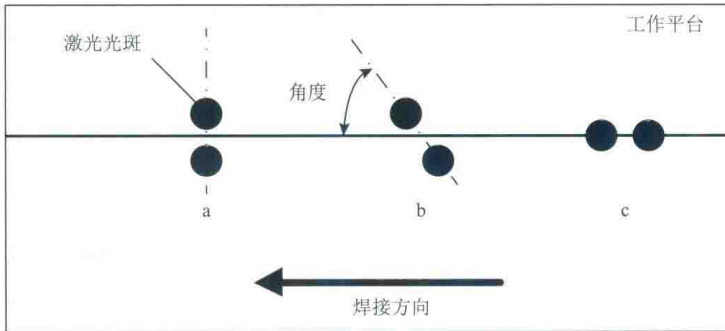


图 1.3 双光束激光焊接的分布方式

a 为并行分布方式；b 为成角度分布方式；c 为串行分布方式

根据光斑间距与能量分布的不同，双光束激光焊接有三种焊接模式，如图 1.4 所示。类型 1：在一定的光斑间距下，两光束小孔在同一熔池内形成一个共同的小孔。类型 2：在同一个熔池内增大光斑间距，两光束分开成为两个独立的小孔，熔池的流动模式被改变。类型 3：进一步增大光斑间距，改变两束光的能量比例，将双光束中的一束光作为热源对焊接过程进行焊前或焊后热处理，另一束光用于生成小孔。

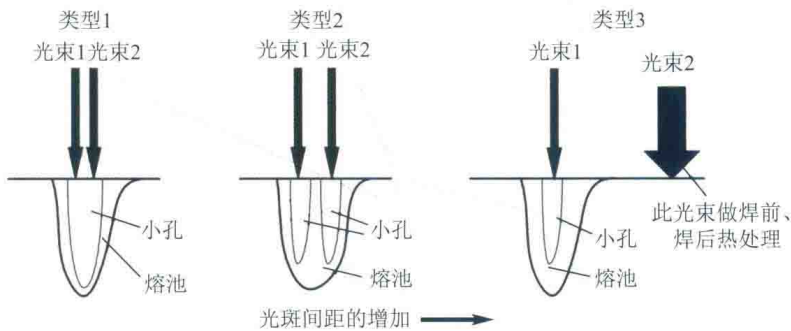


图 1.4 不同光斑间距及能量分布的焊接机理

类型 1 为一个焊接熔池，两光束产生一个小孔；类型 2 为一个焊接熔池，两个小孔；类型 3 为一个焊接熔池，一个小孔

对于类型 1，研究发现两个光束形成一个小孔，小孔不易塌陷，焊缝不容易产生气孔；类型 2 可以有效增加焊接熔深；对于类型 3，采用一束光产生小孔，另一束光进行焊接热处理，能有效改善高碳钢及合金钢的组织性能。

#### 4) 激光钎焊

激光钎焊是在电弧钎焊的基础上发展起来的一种新的局部硬钎焊技术。如图 1.5 所示，激光钎焊是将激光束作为热源，照射在填充的焊丝表面上，焊丝被光束能量加热，熔化形成高温液态金属，液态金属浸润到被焊零件连接处，在适当的外部条件下，生成均匀的固熔体及共晶组织，使之与工件间形成良好的冶金结合。激光钎焊过程中，母材本身不会被激光严重熔化，工件间的连接是通过钎焊层实现的。激光钎焊焊缝成形美观，质量稳定。

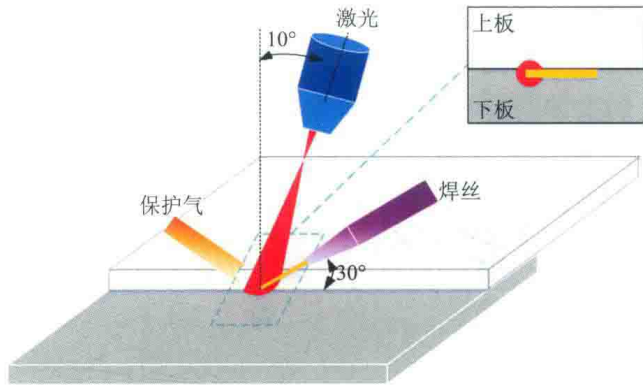


图 1.5 激光钎焊示意图

### 3. 激光焊接特点

激光焊接作为一种高效可靠的焊接方法已被广泛应用。随着工业激光器的出现与改进,在某些工业领域中,激光焊接已经代替了一些传统焊接方法。激光焊接有以下优点:①焊接速度快,功率密度大,焊接深宽比大,热影响区小,变形小;②表面质量好,强度高,某些情况下可以减少焊后二次加工;③可焊接难熔材料,并能对不同性质的材料进行焊接;④易于实现自动化焊接,可实现非接触远距离焊接,具有很大的灵活性。

与此同时,激光焊接也有一定的局限性:①高功率高质量激光器价格昂贵;②激光束直径小,对工件装配间隙要求严格,工艺参数调整复杂;③对高反射率、高导热系数材料焊接比较困难,易产生气孔、裂纹及偏析等焊接缺陷。

#### 1.1.2 激光-电弧复合焊接技术简介

激光-电弧复合焊接技术由英国学者 Steen 于 20 世纪 70 年代末 80 年代初首次提出<sup>[1-2]</sup>。该技术将不同形式的激光热源[CO<sub>2</sub> 激光、钕铝石榴石晶体(Nd:YAG)激光等]与不同类型的电弧热源[非熔化极惰性气体(tungsten insert gas, TIG)电弧、熔化极惰性气体(metal insert gas, MIG)电弧、熔化极活性气体(metal active gas, MAG)电弧和等离子体弧(plasma arc, PA)等]相结合,同时作用于工件以完成焊接过程,从而实现基于“复合热源”的焊接。激光-电弧复合焊接技术既充分发挥了两种不同热源各自的优势,又弥补了对方的不足。自激光-电弧复合焊接技术提出以来,它引起了国内外学者和工程技术人员的广泛关注。

##### 1. 激光-电弧复合焊接原理

激光-电弧复合焊接技术的主要思想是将激光和电弧这两种物理性质、能量传输机制截然不同的热源复合,相互作用、相互加强形成一种新型高效热源,达到“1+1>2”的协同效应,从而实现高质高效的焊接,其原理如图 1.6 所示。

激光-电弧复合焊接时,两者之间存在复杂的交互作用,目前存在以下观点:①激光作用产生的金属蒸气进入电弧区域,由于金属蒸气电离能较低,容易发生电离,可有效降低电弧导电通道的电阻,增加电弧电流密度,增强电弧稳定性,提高电弧的能量利

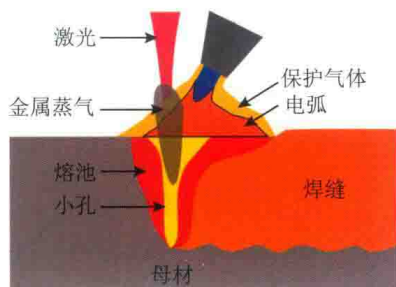


图 1.6 激光-电弧复合焊接原理示意图

用率；②激光作用形成的小孔处温度较高，热发射电子比较容易，可吸引、压缩电弧，提高复合热源的能量利用率，产生相互增强的协同效应；③电弧对金属表面进行加热，使母材温度升高，提高金属对激光的吸收率，进而提高激光的能量利用率；④激光产生的金属蒸气对入射激光的吸收和散射会降低激光能量利用率，外加电弧的低密度等离子体可有效稀释金属蒸气，提高激光能量的传输效率。

## 2. 激光-电弧复合焊接工艺

根据热源主导地位的不同，激光-电弧复合焊接可分为两类。一类为激光增强电弧复合焊接。在这种方式中，电弧能量较大，激光功率较低，电弧能量占据主导地位，激光起到辅助作用。该方式主要利用激光在金属表面形成的“热点”吸引电弧，减小电弧引燃的阻力以抑制电弧弧根的漂移，实现电弧的高速稳定焊接<sup>[3]</sup>。另一类为电弧辅助激光焊接。在这种方式中，激光功率较高，占据主导地位，电弧能量较低，起到辅助作用。该方式主要利用电弧对金属表面的预热及复合等离子体对桥接性的提高，改善焊接过程稳定性，提高焊接质量和效率<sup>[4]</sup>。

根据激光、电弧在焊接时所处的相对空间位置，可将激光-电弧复合焊接分为旁轴复合焊接和同轴复合焊接两大类，如图 1.7 所示。同轴复合焊接需要制作中空钨极[图 1.7 (b)]或者通过光学系统将激光分束[图 1.7 (c)]，使激光与电弧处于同一轴线。此方法虽然解决了旁轴复合焊接的方向性问题，可以在工件表面提供对称热源，适用于三维空间焊接，但是可调节范围较小，对设备集成要求较高。相比较而言，旁轴复合焊接[图 1.7 (a)]可操作性更强，应用范围更为广泛。

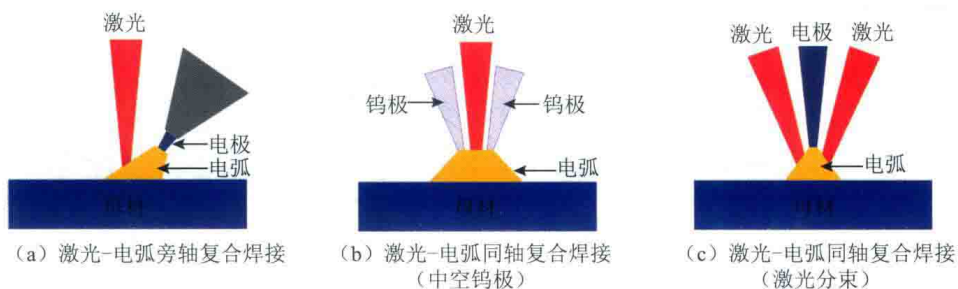


图 1.7 激光与电弧的复合形式

根据电弧种类的不同,可将激光-电弧复合焊接分为激光-TIG 电弧复合焊接、激光-MIG/MAG 电弧复合焊接、激光-双电弧(double arc, DA)复合焊接、激光-PA 复合焊接等。

#### 1) 激光-TIG 电弧复合焊接

激光-TIG 电弧复合焊接主要用于薄板金属的焊接,适合焊接热传导率高的金属。与单一 TIG 电弧焊接相比,可以明显提高焊接速度,改善 TIG 电弧焊接效率低的情况。20 世纪 90 年代出现了激光与 TIG 电弧同轴焊接的方法,这种焊接方法无方向性,焊接过程比较稳定,焊接速度也较高。在焊接过程中,小孔直径可以达到单一 YAG 激光焊接时的 1.5 倍,非常有利于气体的逸出,可以有效减少焊缝中的气孔。

#### 2) 激光-MIG/MAG 电弧复合焊接

激光-MIG/MAG 电弧复合焊接应用较为广泛,在中厚板焊接中具有较为明显的优势。与激光-TIG 电弧复合焊接相比,该方法焊接板厚更大,焊接适应性更高。由于需要送丝,激光-MIG/MAG 电弧复合焊接大多采用旁轴复合,通过调节电弧与激光的相对位置,可有效增加焊接熔深,改善焊接适应性,降低对间隙、错边、对中偏离的敏感性。与单 MIG/MAG 电弧焊接相比,该方法热输入较小,焊后变形和焊接残余应力较小。同时研究表明,激光作用于电弧,不仅可以改变电弧形态,而且可以改变熔滴的过渡方式,减少飞溅量。另外,该方法能够稳定地填丝,从而改善焊缝冶金性能和微观组织。

#### 3) 激光-DA 复合焊接

由德国亚琛工业大学焊接研究所的研究人员开发的激光-双 MIG 电弧复合焊,适合于中厚板及铝合金、镁合金、双相钢等难焊金属的焊接。试验结果表明,在无间隙接头焊接时,激光-DA 复合热源的焊接速度比激光-MIG 电弧复合热源提高 33%,单位长度的能量输入减少 25%,间隙允差可达 2mm,且焊接过程非常稳定,远远超过激光-MIG 电弧复合热源的焊接能力。

#### 4) 激光-PA 复合焊接

激光-PA 复合焊接具有刚性好、温度高、方向性强、电弧引燃性好及加热区窄等优点,适用于薄板对接、镀锌板搭接、钛合金及铝合金等高反射率和高热传导率材料的焊接。

### 3. 激光-电弧复合焊接优势

与单激光焊接和单电弧焊接相比,激光-电弧复合焊接有如下优势:

(1) 增加焊接熔深。与同功率下的单激光焊接相比,复合热源的焊接熔深增大。

(2) 增强焊接稳定性。传统电弧焊接容易受到各种环境因素的影响而导致焊接过程不稳定,尤其是高速焊或者厚板坡口内焊接,电弧弧根阳极或阴极斑点的剧烈跳跃会造成焊接工艺极不稳定。激光的加入能够为电弧提供稳定的斑点,从而抑制电弧弧根跳跃。同时激光等离子体能够通过激光、电弧的相互作用提高电弧的电离程度,稳定和压缩电弧。

(3) 提高焊接适应性。相对于单激光焊接,电弧的引入使工件表面的熔合宽度增大,提高了桥接能力,降低了热源对间隙、错边和对中偏离的敏感性。

(4) 减少焊接缺陷,改善焊缝成形。与单激光焊接相比,复合热源能够增加熔池金

属的凝固时间,有利于气体逸出从而减少气孔,减少裂纹、咬边等缺陷。另外,母材的熔化量增加,可以改善焊缝金属与母材的润湿性,减少咬边现象。

(5) 调整焊缝成分和组织,提高接头性能。电弧的加入有利于焊丝的熔入,从而调整焊缝的合金成分,改善焊缝组织和提高性能。

(6) 减小焊接变形。激光-电弧复合焊适用于高速焊,热输入小,从而减小焊接残余应力和残余变形。

### 1.1.3 磁场辅助焊接技术简介

#### 1. 磁场辅助电弧焊接技术

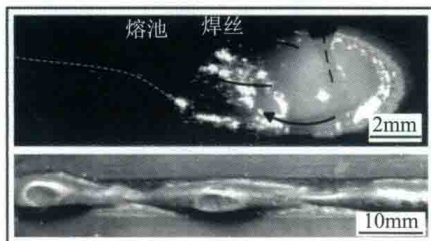
磁场辅助电弧焊接可以在一定程度上提高焊接速度,改善焊接接头性能。磁场具有能量输入响应快、施加形式多样化、设备简单便利及无污染的优势,因此,将磁场引入电弧焊接中能够获得低成本、更效率的焊接工艺。首先,电弧焊接过程产生的等离子体具有良好的导电性,能够与外加磁场交互作用,从而改变电弧的形状、位置和运动状态,实现焊接稳定性的控制;其次,磁场与熔池内的电弧电流交互产生电磁搅拌作用,影响熔池液态金属传热传质过程,改变枝晶的生长方向,促进柱状晶向等轴晶转变,细化晶粒,提高接头力学性能。近年来,磁场辅助电弧焊接的研究主要关注以下三个方面。

##### 1) 调控电弧形状及能量分布

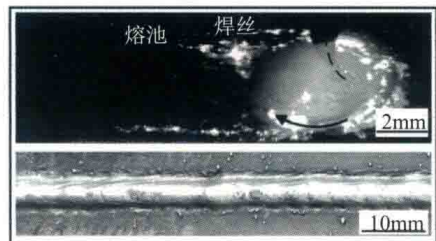
根据前期研究工作,国内外学者广泛认为<sup>[5-6]</sup>,外加磁场辅助焊接促进电弧从初始的圆锥形转变为钟罩形。主要原因是外加纵向磁场可以使纵向运动的带电粒子受到洛伦兹力,驱使带电粒子旋转,使电弧旋转并在外形上表现出上部收缩、下部扩张。因为焊接电弧的能量分布特性随着电弧形态的变化而变化,所以大量研究者以电弧形态变化的研究为基础,开展了一系列应用方面的研究。

##### 2) 抑制焊缝成形缺陷

如图 1.8 所示, Wu 等<sup>[7]</sup>发现外加磁场可以抑制高速气体保护焊过程中的驼峰缺陷。产生该现象的原因为外加磁场减小高速焊接过程中反向流动的液态金属的动量,从而减少焊接过程中的驼峰、咬边等缺陷。如图 1.9 所示, Shoichi 等<sup>[8]</sup>为了解决平焊过程中由于重力作用产生的下塌现象,提出利用向上的电磁力来控制熔化金属的流动,并且通过试验证明通过调整电磁发生装置来利用不同方向的电磁力,不仅能够减少平焊过程中由于过热而产生的下塌现象,而且可以减少仰焊过程中底部的咬边现象,实现较好的成形。



(a) 磁场强度 $B=0\text{mT}$



(b) 磁场强度 $B=40\text{mT}$

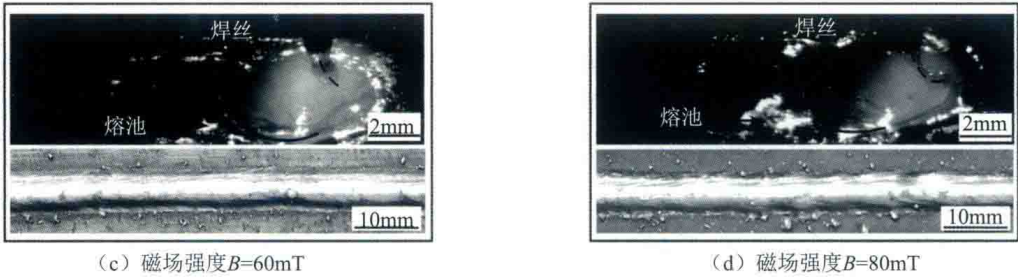
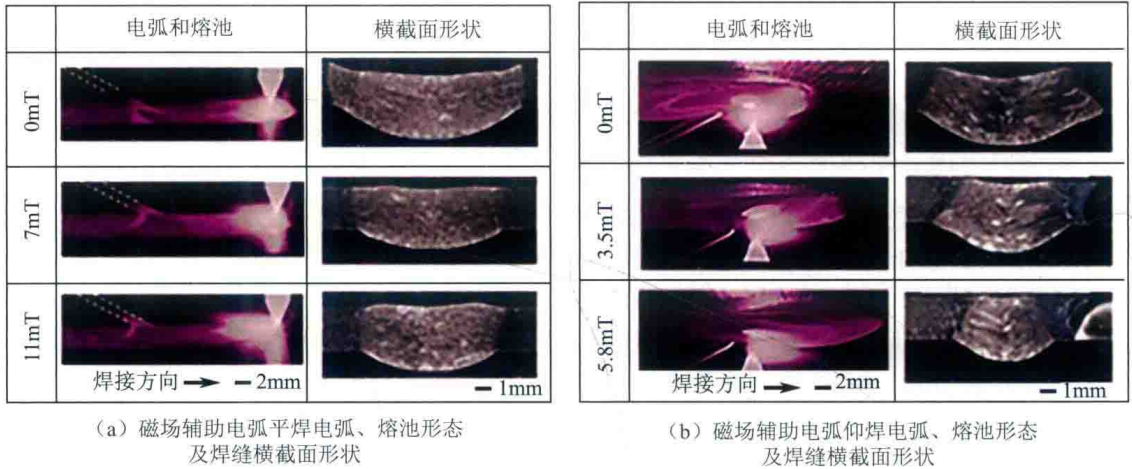


图 1.8 不同强度磁场辅助电弧焊接的熔池形态及对应的焊缝形貌<sup>[7]</sup>



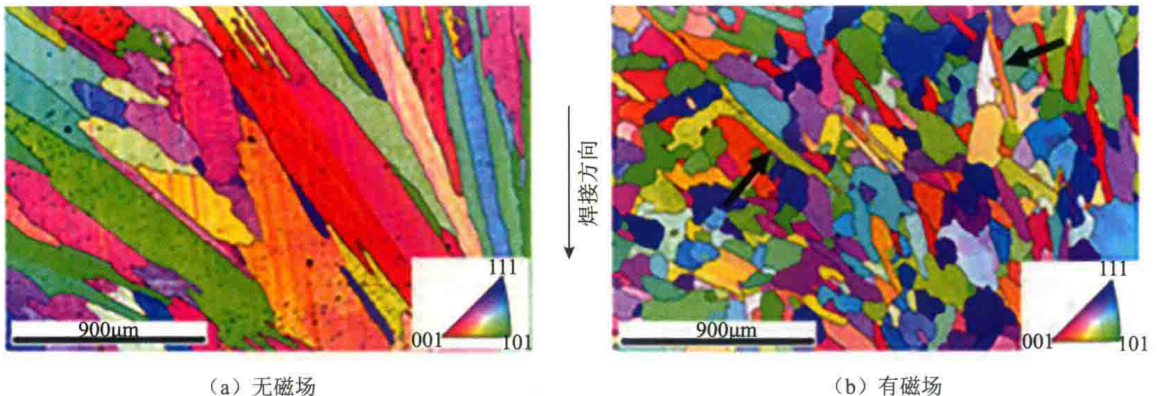
(a) 磁场辅助电弧平焊电弧、熔池形态及焊缝横截面形状

(b) 磁场辅助电弧仰焊电弧、熔池形态及焊缝横截面形状

图 1.9 不同位置的磁场辅助电弧焊接示意<sup>[8]</sup>

### 3) 调控焊缝微观组织及性能

如图 1.10 所示, Mousavi 等<sup>[9]</sup>利用交变磁场辅助电弧焊接对镍基合金、铝合金及不锈钢焊缝的微观组织进行调控。交变磁场会在熔池内部产生搅拌作用, 促进晶粒与母相分离, 提高焊缝内部异质形核率, 细化晶粒, 从而大大提升焊接接头拉伸强度。如图 1.11 所示, García-Rentería 等<sup>[10]</sup>在熔化极气体保护焊焊接 2205 双相不锈钢时外加 0~15mT 纵向磁场, 发现熔池内部的搅拌作用会减小晶粒尺寸, 减少热影响区宽度, 促进两相平衡, 减少焊缝内部碳化物析出。在磁场强度为 3mT 时, 抑制热影响区内  $\sigma$  相及  $Cr_7C_3$  的析出, 焊缝内部铁素体相与奥氏体相达到平衡 (50/50), 改善钝化膜组成, 提高抗局部腐蚀能力。



(a) 无磁场

(b) 有磁场

图 1.10 交变磁场辅助电弧焊接细化晶粒<sup>[9]</sup>

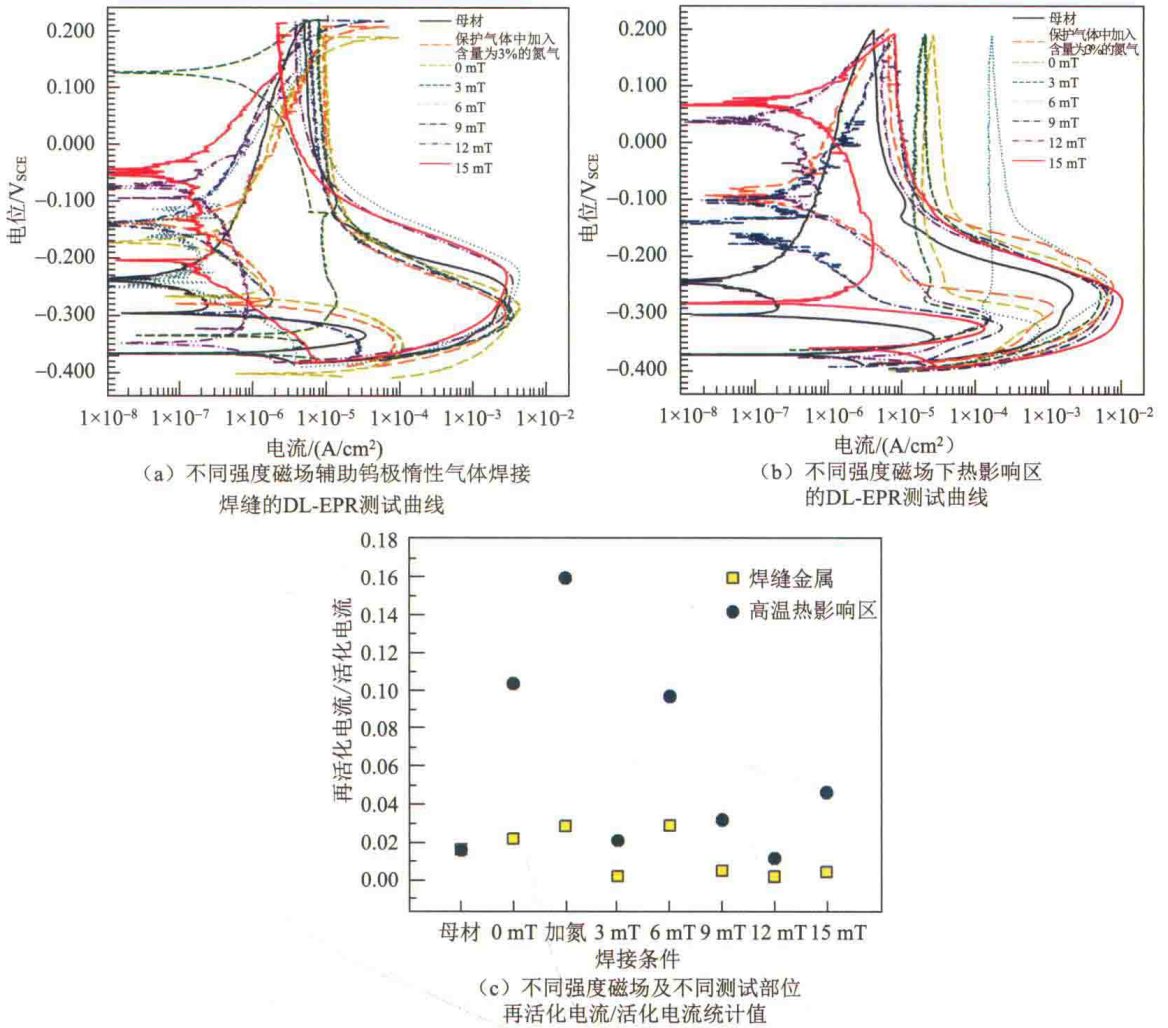


图 1.11 磁场强度对钨极氩弧焊缝腐蚀性能的影响<sup>[10]</sup>

## 2. 磁场辅助激光焊接技术

近年来，研究人员提出利用外加磁场辅助激光焊接的新思路。首先，外加磁场能够控制 CO<sub>2</sub> 激光焊接过程的等离子体，提高能量利用率；其次，通过外加磁场与熔池内感生电流的交互作用对熔池流动状态进行调控，影响熔池内传热传质过程，改善焊缝成形，提高接头质量。

### 1) 抑制焊缝成形缺陷

与磁场对电弧焊接的影响相比，学者关于磁场对激光焊接熔池影响的研究开展较晚。如图 1.12 所示，Gatzen 等<sup>[11]</sup>利用 X 射线对磁场辅助激光焊接熔池内部金属流动状态进行观察，发现垂直于磁场方向的液态金属的流动状态发生了改变。纵向磁场与感应电流作用产生的洛伦兹力可以降低液态金属水平方向的流速，并使液态金属向磁感线的方向发生偏转。增加磁场频率，熔池内部液态金属的平均流速和最大流速增加；当频率增加到 50Hz 时，熔池内部液态金属的平均流速和最大流速减小。如图 1.13 所



示, 2016 年 Avilov 等<sup>[12]</sup>对 15mm 厚 2205 双相不锈钢磁控激光穿透焊接进行了深入研究。为抑制重力导致的熔池下塌现象, 引入了一种非接触式感应电磁熔池支撑系统。

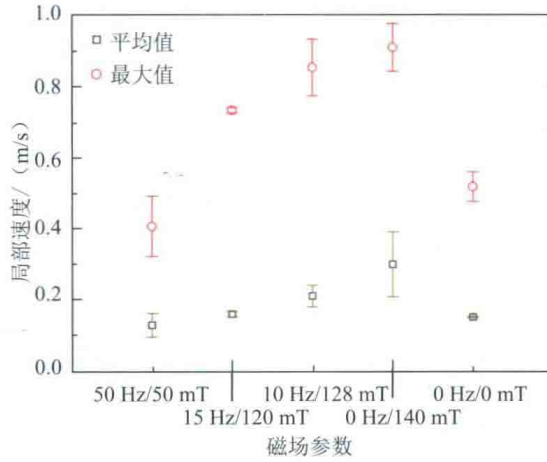


图 1.12 熔池内局部流速与焊接参数关系 (激光功率 7kW, 焊接速度 4m/min) <sup>[11]</sup>

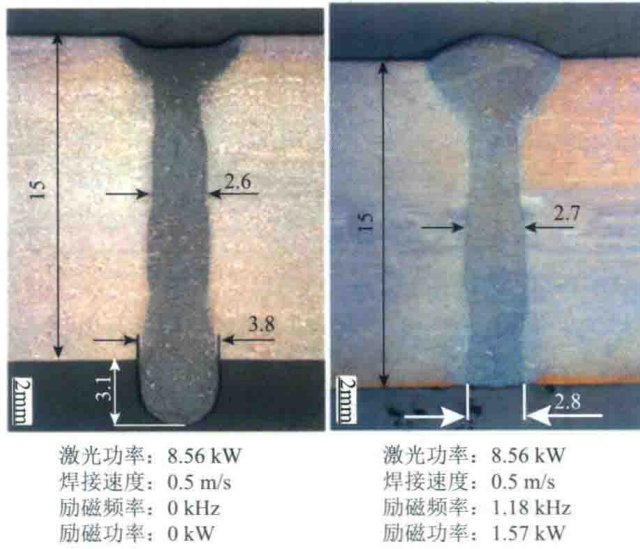


图 1.13 15mm 厚 2205 双相不锈钢焊缝截面形貌<sup>[12]</sup>

### 2) 调控焊缝微观组织及性能

Gatzen 等<sup>[13]</sup>研究了交变磁场对激光焊接焊缝内部元素分布的影响, 发现频率  $f=12\text{Hz}$ 、磁场强度  $B=60\text{mT}$  时, 交变磁场会促进熔池内金属合金元素的均匀分布。进一步跟踪填充金属的特征元素 Si, 发现低频磁场 (大于  $200\text{mT}$ ) 可以促进填充金属向熔池内的扩散及溶解, 并且通过对频率和磁场强度两个特征量的控制, 如图 1.14 所示, 发现频率  $f=25\text{Hz}$ 、磁场强度  $B=250\text{mT}$  的磁场辅助激光焊接可以较好地促进元素的扩散<sup>[14]</sup>。