

# 华中科技大学

## 大学生创新训练项目结题报告

项目名称:	面向汽车轻量化的超高强钢与热塑性复合材料激光焊接工艺分析
所属一级学科:	机械工程
项目成员:	罗敏欣; 王心妍
申请资助经费:	5000 元
指导老师:	荣佑民
导师所在单位:	机械科学与工程学院
实施起止时间:	2023/02-2024/04
填表时间:	2024/04

## 目 录

1 项目概述 .....	3
1.1 项目研究目的 .....	3
1.2 项目研究内容 .....	4
1.3 项目的研究技术方案 .....	4
2 项目完成情况 .....	5
2.1 项目总体要求完成情况 .....	5
2.2 设计开展激光焊接实验 .....	5
2.3 实验结论 .....	15
3 项目成果情况 .....	17

# 1 项目概述

## 1.1 项目研究目的

党的二十大报告提出，“积极稳妥推进碳达峰碳中和。”面向碳减排和节能需求，轻量化已成为汽车制造业高质量发展的主攻方向之一。

超高强钢以其高吸能性的优势，在实现汽车轻量化和提高车身安全性能方面起着非常重要的作用，为汽车行业成为“碳达峰、碳中和”典范提供了有效的解决办法。由于其优异的性能和具有竞争力的成本，目前超高强钢已被广泛应用于保险杠、汽车底架和新能源汽车电池保护外壳等关键结构件。

热塑性复合材料是目前众多汽车轻量化解决方案中最前沿、最具潜力的材料。因其具有高强度、高模量、轻质、耐腐蚀、综合性能优异等诸多优点，近年来得到越来越广泛的认可和应用。已经成为汽车轻量化进程中不可或缺的重要材料。

为实现低成本和轻量化制造，在现代装备中越来越多地采用超高强钢与热塑性复合材料的复合结构，这就不可避免地涉及异质材料连接问题。

两者之间传统的连接技术主要包括机械紧固和胶粘剂粘接。机械连接主要依靠铆接，但铆接在静载荷作用下容易产生应力集中和应力腐蚀，在动载荷作用下容易发生破坏；且铆钉增加了原有结构的重量，不符合车身轻量化发展理念。而胶接主要使用环氧胶等工业粘合剂将 2 种材料连接以达到牢固的连接接头，接头强度较高不易发生断裂，但是胶接固化时间较长导致制造周期增加，同时接头在复杂恶劣的条件下容易出现老化导致开裂。

激光焊接技术以其能量可控、可达性好、效率高等优势，成为超高强钢与热塑性复合材料异质构件高品质、高效率、高柔性连接制造的重要手段。连接原理如图 1-1 所示，激光通过加热金属，传导热量至连接界面，使复合材料中的树脂基体熔化，并在夹具压力的作用下与金属界面充分接触，冷却后形成连接接头。

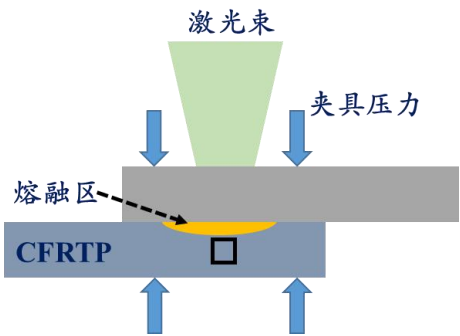


图 1-1 超高强钢与热塑性复合材料异质构件激光连接原理

为此，本项目拟开展面向汽车轻量化的超高强钢与热塑性复合材料激光焊接工艺研究，设计高速摄像和石英玻璃复合的激光连接过程在线检测试验，开展超高强钢与热塑性复合材料激光焊接工艺试验与接头性能测试表征，分析夹紧力对连接接头宏观形貌、力学性能和断裂形貌的影响规律，并讨论与外部压力相关的断裂机制的转变。从而，获得抗剪切性能较优的工艺窗口，实现超高强钢与热塑性复合材料高质高效焊接，满足工程应用需求。

### 1.2 项目研究内容

- (1) 设计制作可改变夹紧力的超高强钢与热塑性复合材料激光焊接专用夹具；
- (2) 设计与实施超高强钢与热塑性复合材料激光焊接工艺试验；
- (3) 分析夹紧力对连接接头宏观形貌、力学性能和断裂形貌的影响规律，并讨论与外部压力相关的断裂机制的转变。

### 1.3 项目的研究技术方案

围绕上述研究内容，本项目综合利用激光焊接、连续力学、断裂力学等方面的先进理论与技术成果，充分发挥先进激光焊接实验平台、高端测试分析设备等平台优势，制定了整体技术路线，如图 1-2 所示。

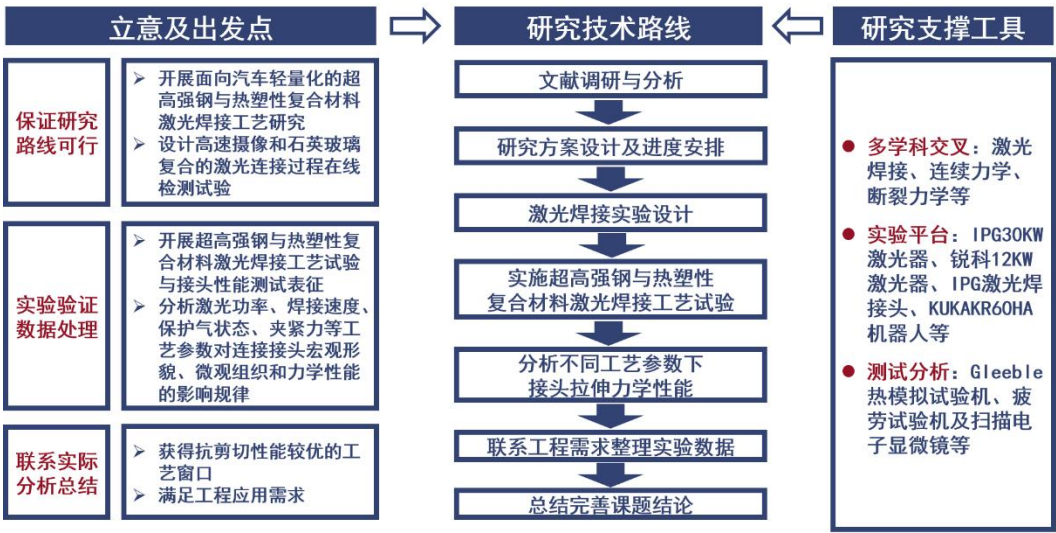


图 1-2 项目整体技术方案

## 2 项目完成情况

### 2.1 项目总体要求完成情况

本项目按照研究技术方案要求实施，完成了以下研究内容：（1）分析研究相关文献（详见 2.2.1）；（2）设计制作可改变夹紧力的超高强钢与热塑性复合材料激光焊接专用夹具（详见 2.2.2）；（3）设计与实施不同夹紧力下超高强钢与热塑性复合材料激光焊接工艺试验（详见 2.2.3）；（4）分析处理实验结果（详见 2.2.4、2.2.5）；（5）总结实验规律并推广应用（详见 2.3）。

项目研究过程中申请发明专利一项，实用新型专利一项。

### 2.2 设计开展激光焊接实验

#### 2.2.1 文献调研与分析

在连接金属和复合材料时，激光连接方式具有能量密度高、热量输入准确、生产效率高、工艺适应性灵活、连接质量可靠等几个优点。通过文献调研与分析，本项目发现国内外很多学者对这种技术特别关注，并进行了一些研究。

国外主要研究进展：Katayama<sup>[1]</sup>开发了一种创新的快速激光直接连接金属和塑料搭接板的工艺，无需粘合剂或胶水。Arkhurst<sup>[2]</sup>研究了 Mg 合金片的热氧化对使用激光辅助金属和塑料连接技术制备的 Mg-CFRP（碳纤维增强塑料）搭接接头的强度的影响。Bergmann 等人<sup>[3]</sup>分析了激光功率和辐照顺序对玻璃纤维增强热塑性复合材料和冷轧钢板激光焊接接头的机械强度的影响。

国内主要研究进展：国内目前的研究重点是工艺参数，包括激光功率、扫描速度、散焦距离对热输入和相关连接性能的影响。Jiao 等人<sup>[4]</sup>实现了由 CFRTP 和不锈钢组成的异种材料结构的连接，然后指出，粘合强度是连接过程中热输入的函数。适当的热输入有利于熔化的树脂和金属在连接界面上的结合，而过高的温度会诱发 CFRTP 内部产生气泡，减少有效的界面结合区域和连接强度。Zhang 等人<sup>[5]</sup>在激光连接过程前，对铝合金基体表面进行激光纹理处理，使铝合金和 CFRTP 之间产生微机械互锁，结果表明，通过表面改性，连接强度得到提高。Wang<sup>[6]</sup>等人在不同的夹持压力下进行 CFRTP 与 Ti 合金的激光连接，研究夹持压力对具有盲孔表面微观纹理的接合点的界面熔合形态、力学性能和断裂机制的影响。

综上，以前的研究大多集中在激光焊接工艺参数的优化上，其目的是调整热输入以影响接头的微观结构。然而，分析不同工艺参数下接头拉伸力学性能的研

究还比较少，特别是分析夹紧力对焊接性能的影响较少。因此，本项目主要致力于分析夹紧力对连接接头宏观形貌、力学性能和断裂形貌的影响规律，并讨论与外部压力相关的断裂机制的转变。

[1] Katayama S, Kawahito Y. Laser direct joining of metal and plastic[J]. Scripta Materialia, 2008, 59(12):1247-1250.

[2] Arkhurst B, Seol J. Interfacial structure and bonding mechanism of AZ31/carbon-fiber-reinforced plastic composites fabricated by thermal laser joining, Compos. B Eng. 167 (2019) 71–82.

[3] Bergmann J P, Stambke M. Potential of Laser-manufactured Polymer-metal hybrid Joints[J]. Physics Procedia, 2012, 39(9):84-91.

[4] Jiao J, Xu Z, Wang Q, et al. CFRTP and stainless steel laser joining: Thermal defects analysis and joining parameters optimization[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 103:170-176.

[5] Zhang Z, Shan J, Tan X, et al. Improvement of the laser joining of CFRP and aluminum via laser pre-treatment[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016.

[6] Wang F, Zhang P, Bu H, et al. Effect of clamping pressure on interfacial fusion morphology and fracture mechanism of CFRTP/Ti6Al4V laser bonding joint featuring blind hole surface microtextures[J]. Optics & Laser Technology, 2022:153.

## 2.2.2 设计制作夹紧力可变的专用夹具

针对夹紧力对超高强钢和热塑性复合材料的激光焊接工艺缺乏研究、国内相关装夹装置不具备测定压力的装置的问题，在项目实施过程中设计了一种能够夹紧力可调的、测定精度高、焊接效率高、焊接质量好的金属和复合材料激光连接装夹装置（详见图 2-1），实现焊接过程中夹紧力的调节，用于后续研究夹紧力对激光焊接过程的影响。

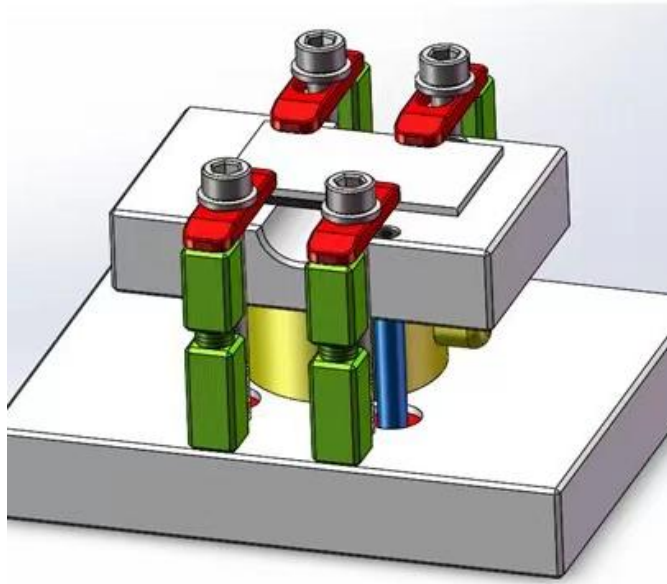


图 2-1 夹紧力可调专用夹具图示

设计发明的装置包括固定模块、夹紧模块、材料放置平台和压力传输模块。固定模块是整个装置的基础部分，用于固定装置的空间位置。固定装置为一零件整体固定平台，包括底座和四个凸缘，所述凸缘凸起部分加工有螺纹孔，并通过螺钉与底座相连。装置内其他各模块平台之间均直接或间接的与该模块相固定。通过装夹对底座的运动限制，能实现整体装置在空间位置上的固定。

夹紧模块用于保证被焊接材料在焊接过程中的位置固定，并通过调节夹紧力来实现不同夹紧力下的焊接实验。夹紧模块由夹紧板、垫圈、长螺钉组成。所述夹紧板数量为两块，通过表面两直槽口套在长螺钉中，夹紧板的上表面与长螺钉下方的垫圈接触，可做竖直运动。在焊接时，夹紧板的下方紧贴金属材料的上表面，从而实现夹紧功能。所述长螺钉数量为四个，每两个长螺钉控制一块夹紧板，且均通过垫圈。通过控制螺纹进给的长度可以控制螺钉向下进给的距离，带动夹紧板在竖直方向上的移动，从而在焊接时限制材料竖直方向的自由度。当夹紧板贴合在金属表面时，继续旋进长螺钉可增大夹紧力，反之则减小夹紧力。

材料放置平台用于摆放被焊接材料，并具有适应不同材料尺寸的设计。下半槽用来放置复合材料，上半槽用来放置金属材料，两阶梯用来限制复合材料长度方向上的运动。

压力传输模块通过压力传感器和外接压力显示器，实时测量并显示施加在材料上的夹紧力大小。其通过测定竖直方向的微小位移来计算夹紧力，其顶部与材料台相接触，底部与底座配合固定。

该装置的优点在于结构简单合理、操作方便，能够搭载在任意焊接平台上进

行实验研究。其中夹紧模块和压力传输模块为该装置的核心内容，通过控制长螺钉的旋进长度来控制夹紧力大小，通过压力传感器和显示器给出的读数可以了解某时刻夹紧力的具体数值。通过调节夹紧模块的夹紧力，研究人员可以探究不同夹紧力对激光焊接过程和焊接质量的影响，为超高强钢和热塑性复合材料的激光焊接工艺提供有力支持。

2.2.3 开展不同夹紧力下激光焊接工艺试验

2.2.3.1 试验材料

本研究使用尺寸为 50 mm×30 mm×2 mm 的 1700 MPa 级的冷轧马氏体钢 1700MS，是瑞典 SSAB 钢铁公司强度最高的马氏体钢，该材料在汽车车身加强件上具有很好的应用前景，比如保险杠、汽车底架和新能源汽车电池保护外壳等。1700MS 力学性能如表 2-1 所示，材料化学成分如表 2-2 所示。在焊接之前，钢表面用丙酮清洗，以避免灰尘和油污的负面影响。CFRTP 的尺寸也为 50 mm×25 mm×2 mm。CFRTP 的基体是聚苯硫醚（PPS）树脂，增强相是 T700 连续纤维，树脂含量约为 43.87%，由苏州诺恩复合材料有限公司提供。PPS 的热物理性质和化学式如表 2-3 所示。

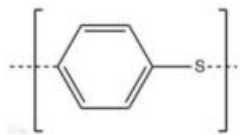
表 2-1 马氏体钢 1700MS 力学性能

屈服强度 $R_{p0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $R_m$ (MPa)	伸长率 $A_{80}$ (min%)
1350-1700	1700-2000	3

表 2-2 马氏体钢 1700MS 化学成分 (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Ti	Cu	Al	Fe
0.296	0.20	0.41	0.009	0.003	0.02	0.04	0.01	0.03	0.16	0.044	Bal.

表 2-3 PPS 的热物理性质和化学式

化学式	玻璃化温度 (°C)	晶体融化温度 (°C)	分解温度 (°C)
	85-106	280-320	542-586

2.2.3.2 激光焊接装置

本实验采用安装在六轴 ABB 工业机器人上的 nLIGHT CFL-5000 光纤激光器



进行连接实验。激光的波长为 1064 nm，最大功率为 5 kW，光斑直径为 100  $\mu\text{m}$ 。激光束通过振镜扫描器进行振荡，并沿连接方向线性移动，图 2-2 展示了 CF RTP 和马氏体钢之间的激光焊接过程的示意图。接头采用马氏体钢在上层，CF RTP 在下层，重叠部分长度为 30 mm。当激光束照射到马氏体钢的上表面时，马氏体钢的上表面吸收能量形成金属熔池，然后热量通过热传导作用传递到下表面和 CF RTP 的界面。随着温度的升高，CF RTP 顶部表面的树脂熔化并在外部压力的作用下熔化，然后在冷却过程中固化，最终产生 CF RTP 和马氏体钢的混合焊接接头。激光束沿着半径为 0.4 mm 的圆弧摆动路径扫描钢表面，以获得更大的粘接面积和均匀分布的输入热量。激光束的复杂运动由 ABB 机器人和带有扫描镜的激光头协同完成。实验过程采用纯度为 99.99% 的氩气作为保护气体，以 30 L/min 的气体流量在激光连接过程中不断吹向连接区域，以防止马氏体钢氧化并获得更好的冷却条件。

外部压力是影响 CF RTP 和马氏体钢激光连接接头熔合质量的最重要参数之一，不同夹持压力下接触界面形貌、接头缺陷分布、粘结力和力学性能呈现明显差异。在本研究中，我们通过调整夹紧装置（详见 2.2.1）来进行不同夹持压力条件下的激光连接实验。

实验中使用的激光连接参数如表 2-4 所示。为了研究夹持压力对激光连接接头的微观结构和力学性能的影响，我们采用了变量控制的方法设计实验参数，即除了夹持压力外，保持激光连接参数保持一致，以避免其他因素的影响。

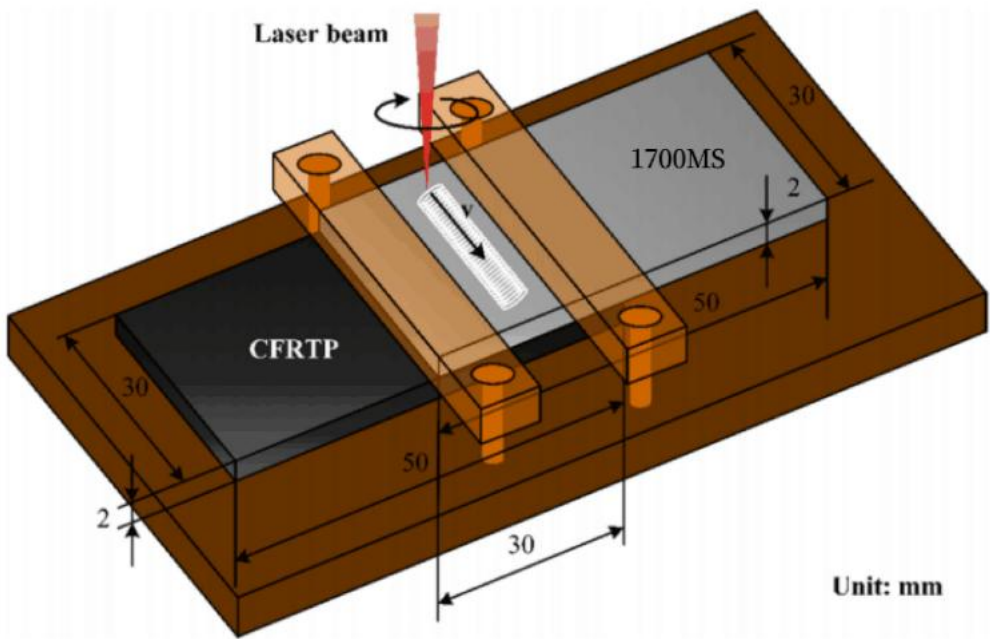


图 2-2 激光焊接过程示意图

表 2-4 激光连接参数

激光功率	行进速度	振动频率	振动半径
500 W	10 mm/s	200 Hz	0.4 mm

### 2.2.3.3 拉伸剪切性能测试

在连接完成后，使用 AG-IC 100 kN 高温性能测试机对接头的机械性能进行测量，以获取 CFRTP/马氏体钢焊接接头的拉伸剪切力，交叉头速度为 2 mm/min。拉伸剪切试验的示意图如图 2-3 所示。为了减少弯矩对拉伸试验的不利影响，在夹持位置添加了调整垫片。

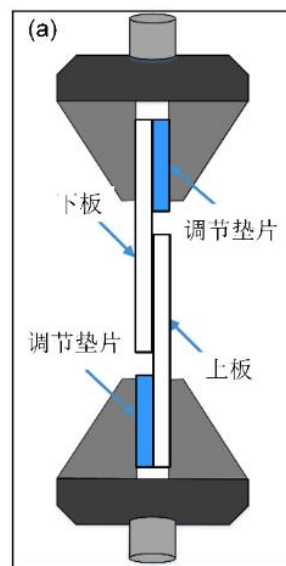


图 2-3 接头拉伸剪切性能测试图示






## 2.2.4 试验结果及讨论

### 2.2.4.1 CFRTP/马氏体钢激光焊接接头的宏观形貌

分别采用 5 种夹紧力（0.30、0.60、0.90、1.20、1.50 MPa）进行焊接，每种夹紧力进行 3 次重复实验。不同夹紧力情况下，具有相同激光连接参数 CFRTP/马氏体钢焊接接头的宏观形貌如表 2-5 所示（每种夹紧力选取一张图片）。

激光连接接头形状良好，焊缝表面几乎没有明显的宏观缺陷。在 CFRTP 的连接区域，即重叠区域的表面上，可以找到一个与焊接方向平行的焊缝。不同夹紧力下的每个焊缝的长度和宽度几乎相同，这表明在本次试验中，当其他连接过程参数保持恒定时，夹紧力对焊缝的尺寸和 CFRTP/马氏体钢焊接接头的宏观形貌几乎没有影响。这也间接说明在本次试验中夹持压力对激光连接过程中的热输入和传导没有显著影响。

表 2-5 不同压强下接头焊接的焊接参数及焊缝宏观形貌

编号	压强（MPa）	焊缝宏观形貌
1	0.30	
2	0.60	
3	0.90	
4	1.20	
5	1.50	

2. 2. 4. 2 CF RTP/马氏体钢激光焊接接头的拉伸性能分析

表 2-6 和图 2-4 显示了不同夹紧力下 CF RTP/马氏体钢接头的拉伸剪切试验结果，其中标记了激光焊接接头的断裂载荷（最大拉伸剪切力）。随着夹紧力的增加，断裂载荷总体来说先增加然后减小。具体而言，随着夹紧力从 0.3 MPa 增加到 1.5 MPa，断裂载荷从在 0.3 Mpa 的夹紧力下的 2.55 kN 逐渐增加，并在 0.6 MPa 的夹紧力下达到最大值 3.44 kN。随着夹紧力的进一步增加，断裂载荷降至 1.5 MPa 夹紧力时的 2.39 kN。

CF RTP 和马氏体钢的焊接性能存在不稳定的特点，这导致了试验结果的较大误差。此外，当夹紧力在 0.9 MPa 和 1.2 MPa 附近时，焊接接头的最大拉伸载荷差距较小。这两个因素共同作用，导致了在夹紧力从 0.6 MPa 增加到 1.2 MPa 的过程中，CF RTP/马氏体钢接头的平均断裂载荷变化规律与总体规律不一致，呈现出先减小后上升的趋势。

表 2-6 不同夹紧压力下的平均断裂载荷

夹紧力(MPa)	断裂载荷(kN)			平均断裂载荷(kN)
	1	2	3	
0.30	2.83	2.59	2.24	2.55
0.60	3.48	3.44	3.40	3.44
0.90	2.73	2.18	2.16	2.36
1.20	2.57	2.35	2.33	2.42
1.50	2.63	2.57	1.98	2.39

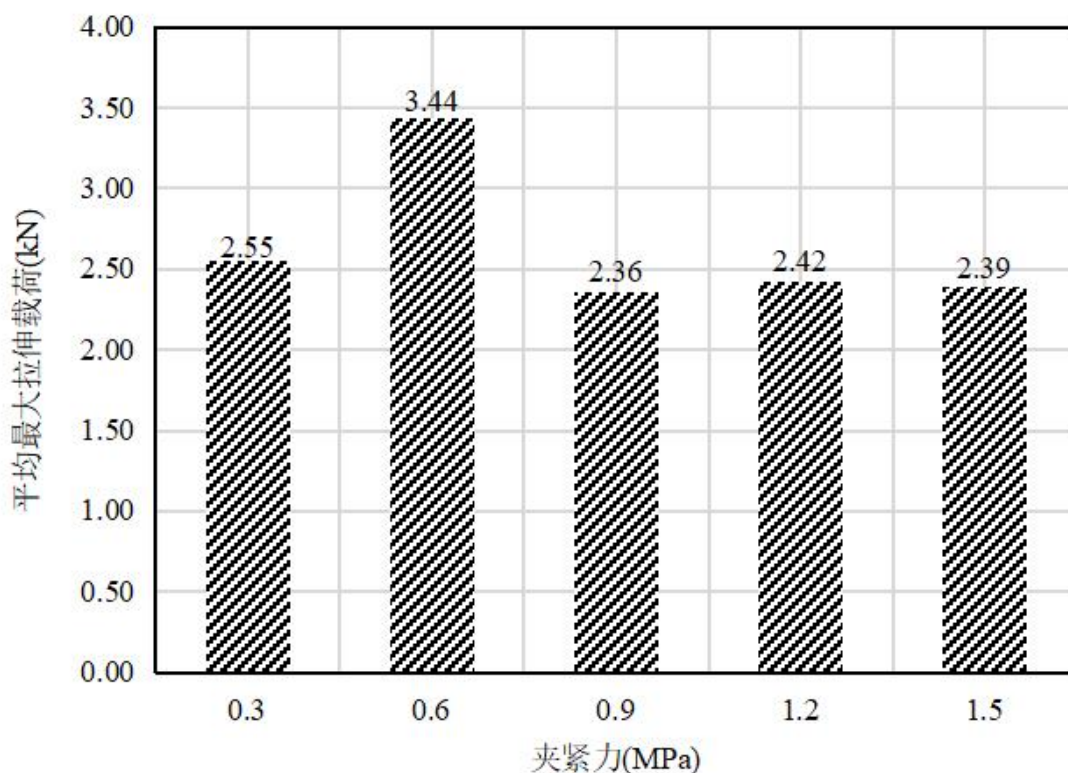


图 2-4 不同夹紧压力下的平均断裂载荷

在不同夹持压力条件下，对 CFRTP 和马氏体钢接头的断裂表面进行观察分析。当夹紧力为 0.3 MPa 时，拉伸剪切破坏后断裂表面 SEM 形貌如图 2-5(a-c) 所示，可以观察到大量没有嵌入熔化树脂的微纹理。同时在相对平坦的 CFRTP 断裂表面上分布着与马氏体钢微观结构相对应的突出的山丘状树脂表面。造成 CFRTP 一侧出现这种断裂形貌的主要原因是较低的夹紧力下，熔化树脂的流动不足，导致只有极少量的树脂填充到微结构中，与此同时，CFRTP 和马氏体钢之间的结合力较弱。当接头受到拉伸剪切载荷时，熔化树脂部分填充到微纹理



中的表面就容易从马氏体钢整体上被拉出来，因此 CF RTP 一侧的山丘状树脂表面是光滑的，几乎没有明显的变形。此外，CF RTP 表面树脂存在一些孔隙缺陷，这些缺陷往往成为失效源，并在一定程度上降低了接头的强度。

当夹紧力为 0.6 MPa 时，随着夹紧力的增加，熔化树脂逐渐具有更大的外部驱动力来流动和填充到微纹理中，形成异质材料之间的有效机械锚固结合。拉伸剪切破坏后断裂表面 SEM 形貌如图 2-5(d-f)所示。与 0.3 MPa 的夹紧力条件相比，填充树脂很难完全从微纹理中被拉出来。因此，在拉伸过程中，微纹理中的树脂发生内聚破坏，呈现撕裂形貌（变形树脂），而不是界面破坏，呈现光滑的山状形貌（山丘状树脂）。这种压力水平下，微纹理部分被熔化树脂填充。因此，CF RTP 一侧的断裂表面呈现出山丘状树脂和变形树脂混合分布的特征。此外，增加的外部压力促进了材料和元素的扩散，并增强了熔化树脂与马氏体钢之间的结合力。

当夹持压力达到 1.5 MPa 时，连接界面上存在各种不同的断裂形貌。拉伸剪切破坏后断裂表面 SEM 形貌如图 2-5(g-i)所示。马氏体钢表面的部分微纹理已被残留树脂覆盖，呈现出均匀且光滑的外观。同时，在微纹理内部存在相当多的残留树脂。此外，在 CF RTP 一侧断裂表面上主要为山丘状树脂和变形树脂。明显的断裂形貌表明，在高夹紧力条件下，接头的失效机制与较低夹紧力下的不同。

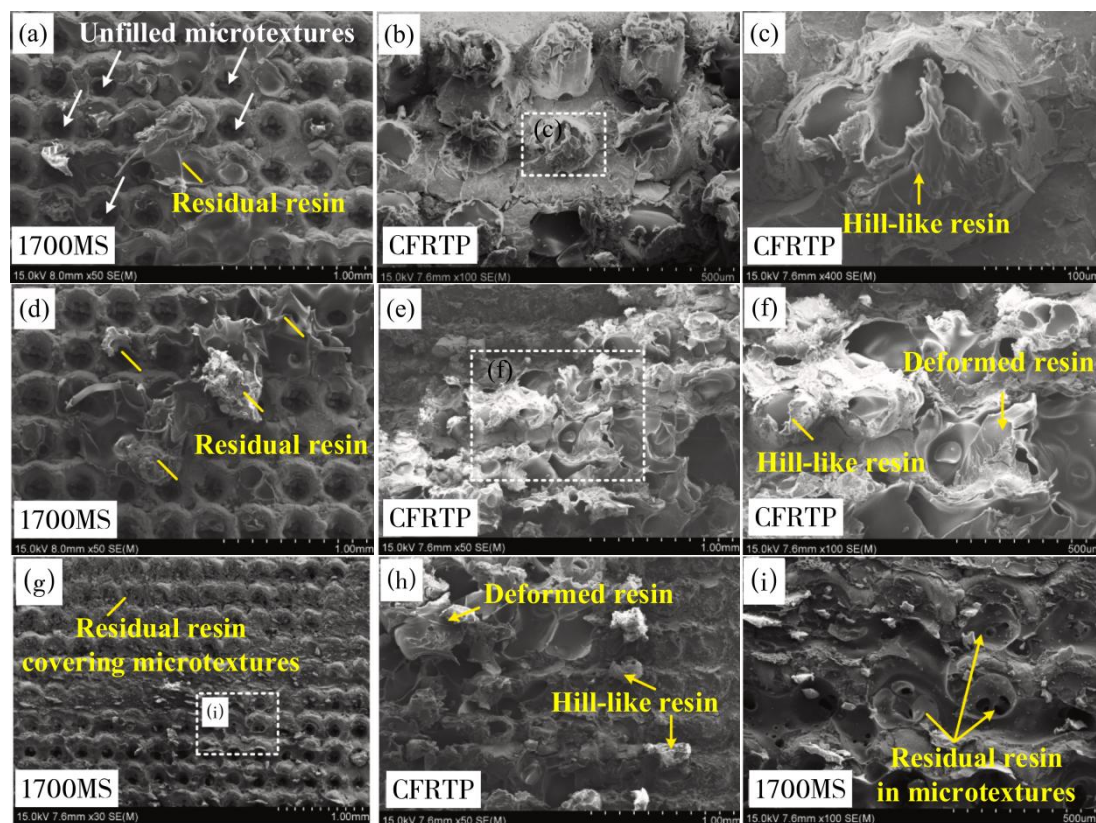


图 2-5 CF RTP/马氏体钢接头在不同夹紧力下的断裂表面形貌

#### 2.2.4.3 不同夹紧力下接合机制和断裂机制分析

为了更加明晰地分析夹紧力引起的接头强度差异的原因,基于实验所得到的断裂形貌和拉伸性能测试结果,在此进一步讨论接合机制和断裂机制。在 CF RTP 和马氏体钢的激光焊接过程中,由激光能量加热的界面熔化树脂在外部压力的作用下填充到马氏体钢表面的微纹理中,实现了机械锁定以固定两个接合部件。

图 2-6 说明了不同外部压力条件下接头的三种主要断裂机制。当夹紧力较低(0.3 MPa)时,只有少量的熔化树脂填充到微纹理中,因此树脂很容易从马氏体钢上分离出来,同时在 CF RTP 表面留下山丘状树脂,导致接头只能承受较低的拉伸剪切载荷。这是夹紧力较低时焊接接头的主要断裂机制——界面破坏。

随着夹紧力的增加,熔化树脂逐渐有效填充微纹理,进一步增加了有效结合面积并增强了机械锚固效应。因此,接头的断裂载荷随着夹紧力和树脂填充量的增加而增加,这与图 2-4 中的拉伸剪切试验结果一致。微纹理内部的填充树脂在拉伸剪切载荷下发生塑性变形,最终在断裂表面上留下撕裂形貌特征,这是内聚破坏 I 的典型特征。因此,可以发现,随着压力的增加,断裂机制从界面破坏逐渐转变为内聚破坏 I。当外部压力不足以形成完整的熔合界面时,即微纹理被部分填充的情况下,两种不同的断裂机制可能同时作用于结合区域,产生混合断裂形貌。

然而,当夹持压力过大时,由于填充到微结构内的树脂根部存在应力集中,因此在进行拉伸试验时,除了平行于 CF RTP 表面的拉伸剪切力外,填充树脂的根部还会承受由树脂突起表面上分布的力引起的弯矩,进一步增强了该位置的应力集中,并导致更多的裂纹萌生。同时,随着夹紧力的增加,在树脂填充微结构时会出现孔缺陷,这也引起了应力集中和树脂填充区域的减少。具体体现为在 CF RTP 的断裂表面形貌中出现大量的孔隙和裂纹结构。图 2-7 是夹紧力为 1.5 MPa 时 CF RTP 的断裂表面形貌,其中存在大量的孔隙和裂纹缺陷。其中,许多裂纹以孔隙为中心径向分布,这表明这些孔隙是裂纹生成的重要源头。孔隙和裂纹的存在使得接合界面周围形成了弱区域,在拉伸剪切试验中首先发生断裂,从而降低了接头的断裂载荷。这些接头通过裂纹的扩展而失效,CF RTP 层的顶部树脂被整体剥离,导致马氏体钢表面的大面积微纹理被残留树脂覆盖。这是对应极高外部压力的第三种断裂机制:内聚破坏 II。

通常,由于施加在接合区域的夹紧压力和热输入的不均匀性,激光接合中的各种断裂机制共存,而不仅仅是单一的。

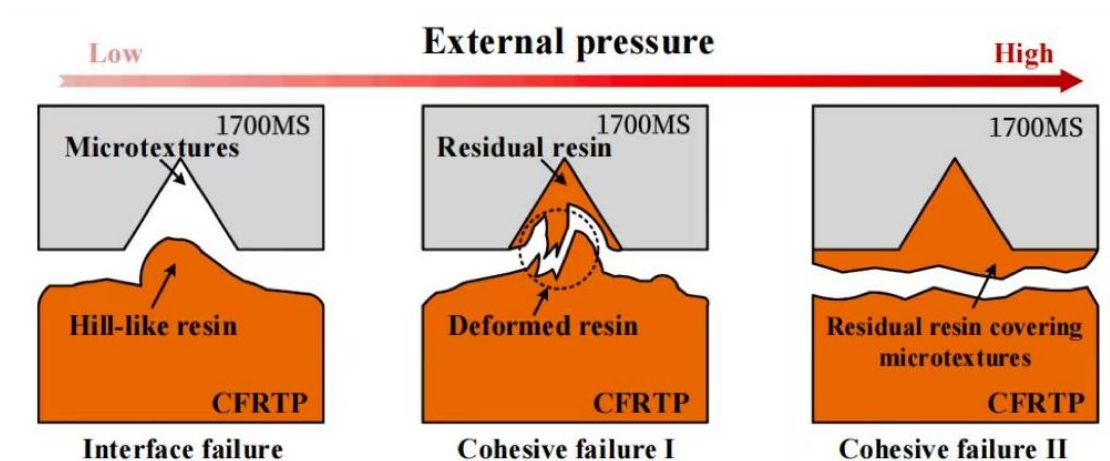


图 2-6 不同外部压力条件下的三种主要断裂机制

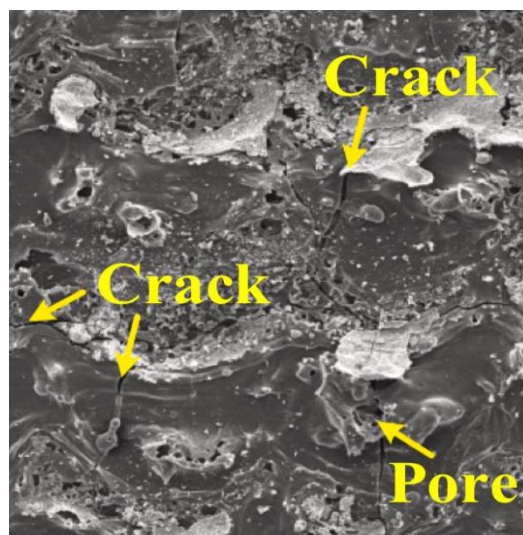


图 2-7 夹紧力为 1.5 MPa 时 CF RTP 的断裂表面形貌

## 2.3 实验结论

本项目通过使用不同夹紧力进行 CF RTP 和马氏体钢的激光焊接，研究了夹紧力对焊接接头界面宏观形貌、力学性能和断裂形貌的影响，并讨论了与外部压力相关的断裂机制的转变，得出以下结论：

(1) 夹紧力对接头的宏观成形和激光加热传导影响较小，但是夹紧力对熔化树脂与马氏体钢之间的界面熔合效果有显著影响。足够的外部压力会促使熔化树脂更好地流动和填充马氏体钢表面的微纹理，从而促进界面熔合。然而，太高的外部压力可能导致应力集中和接合缺陷，从而恶化结合效果。根据实验结果，最佳夹紧力为 0.6 MPa。

(2) 随着夹紧力的增加，拉伸断裂载荷逐渐增加，并在压力为 0.6 MPa 时达

到 3.44 kN 的峰值，然后随着压力的进一步增加而降低。接头的最佳力学性能对应于最佳的界面熔合形貌。当夹紧力为 0.3 MPa 时，熔化树脂与马氏体钢之间的结合力较小，因此填充树脂容易从微纹理中被拉出，形成断裂表面上的山丘状形貌。随着夹持压力的逐渐增加，熔化树脂更完全地填充微纹理，建立了有效的机械锚固效应，断裂表面上的树脂形貌从山丘状形状变为撕裂变形形状。

(3) 激光焊接接头存在三种主要的断裂机制。界面破坏是指填充树脂与马氏体钢表面微纹理在接合界面上的分离，其主要特征是山丘状树脂形貌，结合力在三种机制中最小。内聚破坏 I 是指填充树脂本身的内部撕裂，其典型特征是断裂表面上的变形树脂。当外部压力极高时，内聚破坏 II 是由于界面周围的缺陷引起的树脂的内部破裂。随着夹持压力从低到高的变化，主要的断裂机制从界面破坏机制转变为内聚破坏机制 I，最后转变为内聚破坏机制 II。但在实际实践过程中，由于施加在接合区域的夹紧压力和热输入的不均匀性，激光接合中的各种断裂机制共存，而不仅仅是单一的。



### 3 项目成果情况

本项目主要研究成果清单如下：

- (1) 分析研究了夹紧力对焊接接头界面宏观表面成形状态、力学性能和断裂形貌的影响，并讨论了与外部压力相关的断裂机制的转变。
- (2) 申请实用新型专利一项；
- (3) 申请发明专利一项；
- (4) 形成项目结题报告一份。