

# 双束激光焊接的研究现状

李明川, 张培磊, 顾思远, 于治水, 叶欣  
(材料工程学院, 上海工程技术大学, 上海 201620)

**摘要:** 首先根据单束激光焊接的缺点, 提出了采用双束激光焊接来改进, 并对其机理进行了概括分析; 再介绍了多种同种/异种材料连接的双束激光焊接的研究现状, 最后对焊接过程中的数值模拟进行了阐述。

**关键词:** 双束激光焊接; 布置方式; 同种/异种材料; 数值模拟

## 0 前言

激光焊接工艺是一种能够向工件传输高能量密度的焊接方法, 具有热影响区窄、焊接变形小、功率密度高、热输入量小等优点。但在单束激光焊接过程中, 等离子体尺寸较大, 且稳定性较差<sup>[1]</sup>; 在冷却过程中, 由于冷却速度过快, 使得氢气等气体在熔池内的溶解度急剧降低且来不及逸出, 导致气孔生成。而双束激光焊接不仅能用来解决单束激光焊接工艺对于工件装配要求精度过高的问题, 还能形成稳定的激光匙孔, 改善焊缝成形, 减少气孔、飞溅、咬边等缺陷<sup>[2]</sup>。本文重点介绍了国内外双束激光焊接工艺的研究现状。

## 1 双束激光焊接机理

双束激光焊接的实现形式主要有两种: 通过夹具将两个单独的激光头 (如Nd:YAG或CO<sub>2</sub>激光束) 联合在一起或用分光装置把一束激光分成两束来实现。如图1所示, 通过调节准直镜、棱镜和聚焦镜的位置和方向调节两焦点的距离和光强比。在双束激光焊接工艺中, 双束激光既可以串联布置, 也可以并联布置<sup>[3]</sup>, 如图2所示。两焦点的连线平行于焊接方向时, 称两焦点为串联布置方式; 当两焦点连线与焊接方向成一定角度时, 称两焦点为并联布置方式。根据束间距的不同, 串联和并联布置方式的焊接机理并不相同。在串联方式下的双束激光焊接中, 随着束间距的逐渐增大, 两个激光束由在同一个匙孔内与材料相互反应变为在同一焊缝熔池内生成两个匙孔。当束间距增大到一定程度后, 双束激光中的一束作为主要输出, 生成匙孔; 另一束则作为辅助, 对工件进行预热或者焊后热处理。在并联方式下的双束激光焊接中, 双束所产生的匙孔被放大; 因此, 匙孔也有可能不轻易崩溃。所以并联方式下的双束 (合理的束间距) 能增强匙孔的稳定性, 并且改善焊接质量<sup>[4,5]</sup>。

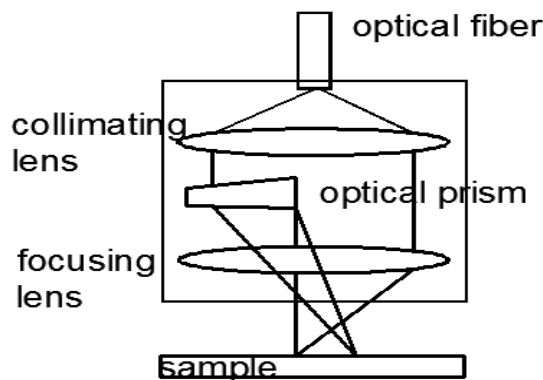


图1 双束激光焊接装置的示意图

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51375294, 51605276, 51405288)。

**作者简介:** 李明川 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光表面改性方面研究。E-mail: 15317538065@163.com

**导师简介:** 张培磊 (1981—), 男, 副教授, 博士, 主要从事高能束表面改性方面研究。E-mail: [peilei@sues.edu.cn](mailto:peilei@sues.edu.cn)

**\*通信联系人.** E-mail: [peilei@sues.edu.cn](mailto:peilei@sues.edu.cn)

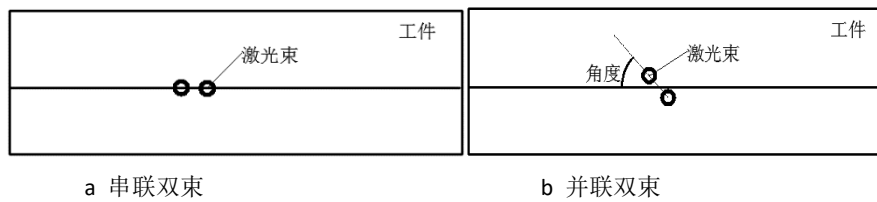


图2 双束激光布置

## 2 同种材料的双束激光焊接

### 2.1 铝合金

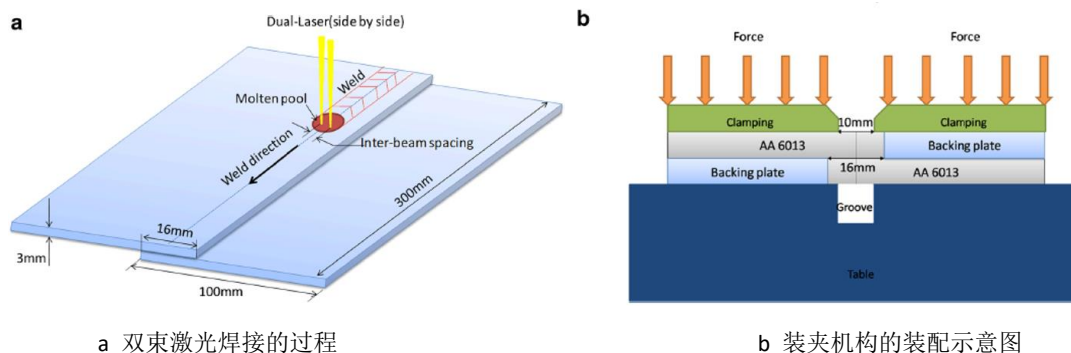
铝合金因其密度低，具有较高的抗疲劳性能、比强度、较好的耐蚀性等特点，而广泛用于钣金、车辆、飞机等制造行业。但在激光焊接铝合金时有三个难点：1、铝合金线膨胀系数大，易产生焊接变形；2、铝合金反射率高，吸收的能量减少；3、在焊接过程中容易将 Mg、Zn 等合金元素蒸发，使得沉淀相强化效果降低。通过合理地排布双束激光的位置、分配能量比，能一定程度上改善铝合金的激光焊接工艺性。

#### 2.1.1 5052铝合金

Weichiat Chen & Pal Molian<sup>[6]</sup>论证了运用脉冲Nd:YAG 激光器（1.1-3.6W）和连续波半导体激光器（3W）的串联方式（焦斑距0.8mm）对超薄铝合金5052进行双束焊接，能够比单独用脉冲Nd:YAG 激光器焊接得到更好的焊接质量。随着焊接速度的增加，连续波半导体激光器的预热作用会减小，使得铝合金对Nd:YAG 激光器的能量吸收减小，进而导致熔深减小。试验证明，双束激光焊接能通过稳定焊接过程来提高焊缝成形，并减少合金元素的蒸发以及较大的热梯度（热梯度过大会产生气孔和热裂纹）。在双束激光焊下得到的焊接接头强度高于传统的激光焊的强度，对此文章给出了解释为：前置的辅助二极管激光光源在没有保护气体的情况下对母材进行预热，使得母材发生氧化形成氧化物，因此在熔池中形成Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的复合强化相，提高了硬度。

#### 2.1.2 6022-T4铝合金

Xiaojie Wang & Hui-Ping Wang<sup>[7]</sup>等人通过试验和热模拟，研究了束间距、激光功率、焊接速度等工艺参数在双束激光焊接下对6022-T4铝合金搭接接头的焊缝中心的裂纹敏感度的影响。图3展示了双束激光焊接的过程以及装夹机构的布置。试验中，用楔形镜将激光束分成两束并排的激光束，且激光束与垂直方向呈7.5°。试验结果显示，随着束间距的增加（0mm, 0.15mm, 0.3mm, 0.6mm），焊缝中心裂纹的生长会逐渐增加。当束间距超过0.6mm时，焊缝深度太浅而难以形成良好的搭接接头。另一方面，增加激光功率或者减小焊接速度也都会增加裂纹敏感度。



a 双束激光焊接的过程

b 装夹机构的装配示意图

图3 双束激光焊接铝板的试验装置

### 2.1.3 1420铝锂合金

锂是世界上最轻的金属元素。把锂作为合金元素加到金属铝中，就形成了铝锂合金。其密度小，比强度高，具有良好的高温机械性能，在航空航天材料领域备受关注。杨瑾等人<sup>[8]</sup>对比分析了1420铝锂合金在单/双束激光焊接工艺下焊接参数和接头成形的特点。试验表明，实现全熔透焊的双束激光焊接参数阈值较单束窄；双束光点在0.37mm~0.72mm之间时，咬边、飞溅等缺陷明显减少，焊缝成形良好；并排双束的焊缝宽度明显宽于串联双束。黄瑞<sup>[9]</sup>对如何降低1420铝锂合金接头中的气孔率进行了实验研究。实验表明在双束激光功率均为1800W，焦斑间距为0.4mm时得到的焊缝成型较好，气孔率低。在焊接过程中，覆盖在合金表面的氧化膜分解出的大量气体，是导致焊缝中气孔的根源。双束激光焊接中前束光的照射可使板材表面层重熔，使表面氧化物气化和蒸发，减少焊缝中氢气孔的来源，可以达到去除氧化膜的目的。后一束光聚焦在板材表面上达到深熔焊的目的。且前一束光的预热可以提高工件对后一束激光的吸收率。这种焊接工艺省去了焊前去除氧化膜的步骤，节省时间，提高了效率。

### 2.2 镁合金

镁合金作为一种活泼金属，容易在表面生成氧化镁、氢氧化镁等氧化层，进而产生气孔等缺陷，影响焊缝质量。Masoud Harooni 等人<sup>[10]</sup>对比了单束激光和双束激光（串联式）的焊接工艺，研究了如何减少AZ31B-H24镁合金搭接接头的气孔问题。在优化的双束激光焊的光强比下，因第一道激光的预热过程，以及稳定激光小孔的生成，使得双束激光的焊缝表面较单束的更为光滑平整。在对熔池和等离子体羽的在线监测中，发现在单束激光中没有形成稳定的激光小孔，且等离子体羽由于水蒸气的影响以及不稳定的激光小孔而产生波动甚至熄灭。此外，在对单束/双束激光条件下的试样进行机械性能的测试后，发现双束激光焊的试样因气孔等缺陷较少，其剪切强度比单束激光焊接强。

## 3 异种材料的双束激光焊接

### 3.1 铝钢连接

H. Laukant等人<sup>[11]</sup>通过激光熔钎焊技术，对镀锌钢板和铝板的搭接进行了研究。实验表明，串联式布置的双束激光焊接相比单束激光能更有效率地控制熔池流动，且第二束激光对钢板的预热作用能增加钎料的润湿性，从而提高接头的拉伸性能。此外，双束激光之间合理的光强比使得硬脆的Fe-Al金属间化合物的厚度保持在10 μm以下，增加了铝钢界面处的结合强度。

Shi Yan 等人<sup>[12]</sup>利用连续波（360W）和脉冲波（峰值功率为2.61Kw，脉冲频率为5Hz，脉冲宽度为2ms）的双束YAG激光（并联双束）对JSC270CC低碳钢和A6111-T4铝合金进行搭接焊。在焊接过程中，双束激光焊中的连续波激光会加热材料并形成熔池；同时，脉冲波对熔池进行搅拌，使得在熔池中产生的气孔上浮，并能在铝合金基体中生成像树根一样形状的结构，增加低碳钢和铝合金之间的结合强度。实验中测量得到的单束/双束激光焊的焊缝界面的金属间化合物的厚度分别为94 μm和10 μm，这也导致了单束激光焊接所得到的搭接接头的剪切强度比双束小。

Shuhai Chen等人<sup>[13]</sup>在搭接Q235低碳钢和5052铝合金时，在两板之间添加了一层铜箔，进而利用单束/双束激光（并联式）进行焊接，并对搭接接头进行了研究。试验证明，在一定焊接速度范围内，与单束激光焊接相比，双束激光的焊接过程更稳定，减少了飞溅、气孔等缺陷，使得焊缝成型更平滑，如图4所示；双束激光焊的有效接头宽度也更大，使得拉伸性能得到提高。同时，能得到良好焊缝的双束激光焊接的焊速范围比单束激光焊接宽，适应性好。从渗透铝合金区的显微硬度的分布来看，双束激光焊接由于存在束间距（0.8mm），且能产生更多金属间化合物，所以其硬化区不仅比单束激光焊接宽，最大硬度也较大。

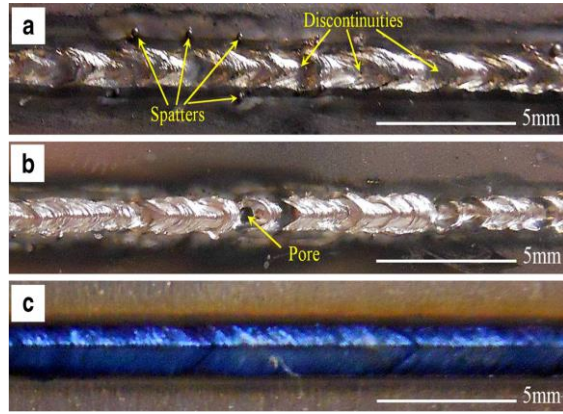


图4 Q235低碳钢/5052铝合金的搭接接头形貌: a, b 不同工艺参数下单束激光焊接所获得的焊缝; c 双束激光焊接所获得的焊缝

### 3.2 铝镁连接

Rattana Borrisutthekul等人<sup>[14]</sup>对AZ31B镁合金和A5052-0铝合金进行了双束激光并联的搭接焊。通过改变棱镜的楔形角度，可以得到不同的束间距。试验所使用的两个角度为 $2^\circ$ 和 $4^\circ$ ，对应的束间距分别为0.87mm和1.6mm。如图5, 6所示，单束激光和束间距为0.87mm下所得到的焊缝随着焊接速度降低，焊缝深度增大。这有可能会产生较厚的金属间化合物生成，影响交界处的结合强度。在束间距为1.6mm下所得到的焊缝宽度提升明显，而熔深则变化不大。同时，从图中可以发现，束间距为1.6mm时，所得到的失效载荷的承载能力较大。这说明，在合理的束间距下，双束激光焊接对提高异种合金搭接接头的失效载荷承载能力起到有效作用。

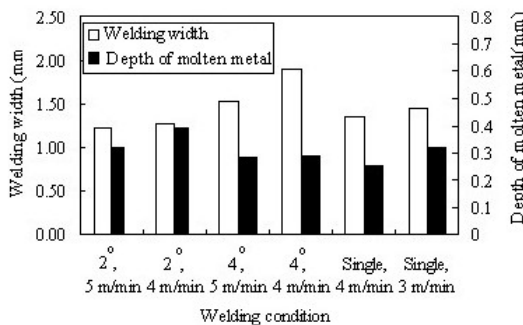


图5 双束激光焊接对熔池焊接宽度和深度的影响

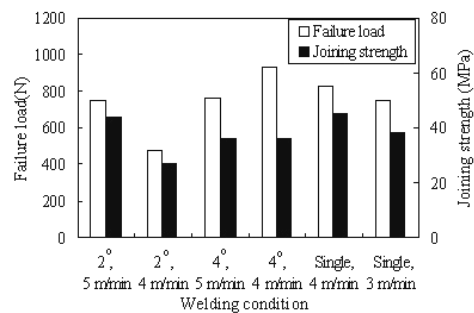


图6 双束激光焊接对失效载荷和接头强度的影响

## 4 双束激光焊接的数值模拟研究

在激光焊接过程中，激光与被焊材料之间进行着复杂的相互作用。通过数值分析，可以模拟出工件在焊接过程中的温度场、应力场及变形，并与试验结果相结合，有效地在实际应用中进行预测和调整。郑文健<sup>[15]</sup>在双束激光焊接铝合金6156蒙皮与铝合金6056桁条组成的T型接头的数值模拟研究中，调整了以往热源模型的热流分布，利用高斯状分布的面热源下面复合高斯旋转体热源，得到了与实际熔池形貌相似度较高的热源模型。通过在不同激光功率、焊接速度和入射角度的条件下，对熔池的熔深和熔宽进行了模拟，并对照试验结果，确定出最佳焊接工艺参数。结合单桁条基本件的温度场和应力场，对其变形结果进行了仿真模拟。如图7, 8所示，工件的挠曲变形与实验结果变化趋势相同，而角变形的模拟则存在一定偏差。

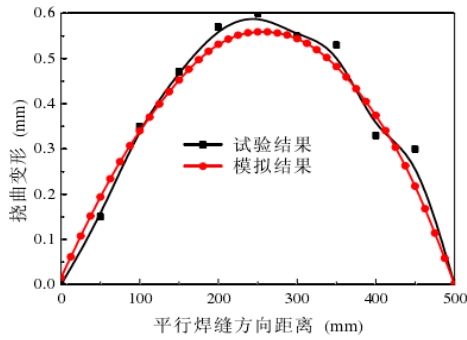


图7 挠曲变形模拟与试验结果对比

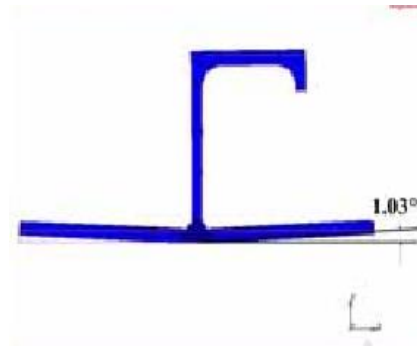


图8 T型接头角变形模拟结果

欧阳自鹏<sup>[16]</sup>也以新型铝合金T型结构双激光束双侧同步焊接工艺作为研究对象，首先针对焊接过程中形成的特殊匙孔进行了受力分析，建立了匙孔壁不同部位的力学模型，并发现**双束光**匙孔倾斜使得匙孔上下壁受力不均匀，进而影响匙孔上下壁熔融金属的流动速度，最后导致匙孔不稳定塌陷；其次，应用流体动力学方程和多孔介质流方程，建立了移动热源作用下熔化和凝固过程的三维热过程数学模型，模拟了双激光束双侧同步焊接过程中的温度场、流场以及焊接熔池形状，为进一步研究焊接过程中气孔和其它缺陷的形成打下理论基础。

YINGTAO TIAN等人<sup>[17]</sup>通过整合ABAQUS和FEAT-WMT（有限元分析中焊缝模块工具箱）的优点，在不同参数下对双束激光焊接过程中的热力学、熔合区轮廓作出了模拟，如图9所示。试验结果证明了建立的模型有较高的精确度。对热裂纹敏感性的分析则是通过两个不同基准的RDG模型（由Rappaz, Drezet, and Gremaud发明）完成。在第一基准下的RDG模型中，其预测分析只依赖于熔池的组成。而第二基准下的RDG模型不仅包括了对焊接过程的考虑，还加入了对局部热输入、吸附速度等因素的影响，所以能更好地评估热裂纹敏感性与激光功率之间的关系：随着激光功率的增加（1400w~2000w），在熔合区的热梯度增加，二次枝晶臂长度减小，熔合区只能维持一个较小的应变速率，因此很容易产生热裂纹。

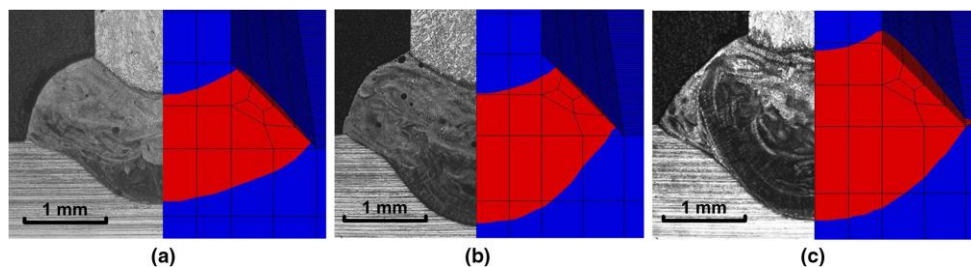


图9 不同激光功率下熔合区边界的对比：(a)1400w；(b)1700w；(c)2000w

#### 4 总结

目前，双束激光焊接在同种/异种材料连接中的应用在国外已深受重视，有不少文献对其进行了报道。其中，以铝合金的双束激光焊接为主。在运输制造业中，采用双束激光焊接技术对轻金属进行焊接已成为了一种趋势。双束激光焊接不仅改善了单束激光焊接存在的问题，在不同连接方式下也都能获得较好的焊接接头性能。在未来，双束激光焊接要更好地与数值模拟方法进行配合，从而缩短研发周期，降低研发成本，促进该工艺在汽车、航空航天等制造业中更好地发展。

#### 参考文献

- [1] 李俐群, 陈彦宾, 陶汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, 35(11):1783-1788.

- [2] 尹杰. 高强钢双光束热丝多层焊工艺及接头组织性能研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2009.
- [3] J. Xie, 帅平. 双束激光焊[J]. 国外机车车辆工艺, 2004(4):5-14.
- [4] Huegel H, Beck M, Rapp J, et al. Laser welding of aluminium[C]// XI International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers and High Power Laser Conference. International Society for Optics and Photonics, 1997.
- [5] Dausinger F, Rapp J, Beck M, et al. Welding of aluminum: A challenging opportunity for laser technology[J]. Journal of Laser Applications, 1996, 8(8):285-290.
- [6] Chen W, Molian P. Dual-beam laser welding of ultra-thin AA 5052-H19 aluminum[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(9):889-897.
- [7] Wang X, Wang H P, Lu F, et al. Analysis of solidification cracking susceptibility in side-by-side dual-beam laser welding of aluminum alloys[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(1):73-85.
- [8] 杨璟, 李晓廷, 陈俐, 等. 1420铝锂合金双光点激光焊接头成形[J]. 焊接学报, 2010, 31(12):29-32.
- [9] 黄瑞. 1420铝锂合金的双光束激光焊接[D]. 北京工业大学, 2007.
- [10] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. Dual-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 56(5):247-255.
- [11] Laukant H, Wallmann C, Korte M, et al. Flux-Less Joining Technique of Aluminium with Zinc-Coated Steel Sheets by a Dual-Spot-Laser Beam[J]. Advanced Materials Research, 2005, 6-8:163-170.
- [12] Yan S, Hong Z, Watanabe T, et al. CW/PW Dual-Beam YAG Laser Welding of Steel/Aluminum Alloy Sheets[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 48(7):732-736.
- [13] Chen S, Zhai Z, Huang J, et al. Interface microstructure and fracture behavior of single/dual-beam laser welded steel-Al dissimilar joint produced with copper interlayer[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 82(1):631-643.
- [14] Borrisutthekul R, Mogi M, Miyashita Y, et al. 338 Twin beam laser welding of AZ31/A5052 dissimilar metals[C]// Pre-Prints of the National Meeting of JWS. Japan Welding Society, 2005:272-273.
- [15] 郑文健. 铝合金T型接头双束激光双侧同步焊接的数值模拟研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2011.
- [16] 欧阳自鹏. 铝合金T型接头双激光束双侧同步焊接稳定性研究[D]. 南京航空航天大学, 2012.
- [17] Tian Y, Robson J D, Riekehr S, et al. Process Optimization of Dual-Laser Beam Welding of Advanced Al-Li Alloys Through Hot Cracking Susceptibility Modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2016, 47(7):3533-3544.

文章介绍了双光束激光在铝合金或异种金属连接方面的应用情况。