

文章编号:1002-025X(2007)02-0032-03

# 数控激光焊接汽车用高强钢

申晓龙<sup>1</sup>, 张来希<sup>1</sup>, 陈根余<sup>2</sup>

(1.湖南工业职业技术学院, 湖南长沙 410208; 2.湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:**在数控激光焊接加工中,影响高强钢板焊接质量的因素很多,根据试验加工对相应因素进行了分析,并给出了1套可以有效控制高强钢加工质量的工艺参数。

**关键词:**激光焊接; 高强钢; 焊接质量; 工艺参数

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** B

数控激光焊接是一种先进的焊接技术,它是以高强度的激光束辐射至金属表面,通过激光与金属的相互作用,金属吸收热能熔化后冷却结晶形成焊缝的方法<sup>[1]</sup>。因为激光能量高度集中,加热、冷却过程极其迅速,加之高精度、高生产率和高适应性的特点,在钣金加工行业已经起到了越来越重要的作用。激光焊接工艺具有其它许多焊接方法所无法比拟的优越性,如光束易于控制、焊接接头成形好、焊缝深宽比大、热影响区狭窄、可在大气压下焊接、无需填充材料、焊接过程的自动化程度和可靠性高等,具有优良的性价比,在汽车工业中,无论是车身组装,还是汽车零部件的生产,特别是在汽车零部件的连续生产线中,均获得广泛的应用<sup>[2]</sup>。

在实际加工中,由于各方面的因素和工艺参数的匹配不当,造成工件表面变形和焊缝质量、精度受到很大的影响,无法满足实际的加工要求<sup>[3]</sup>。本文采用PHC-1500折叠式准封离型连续CO<sub>2</sub>激光器对1.5 mm厚高强钢板进行了深熔焊工艺试验,焊接效果较好,并对焊接接头性能评价等方面做了一定的研究,给出了1套可有效控制焊接板材加工质量的工艺参数。

## 1 数控激光焊接工作原理

### 1.1 激光焊接热循环

激光焊接分为传热焊和深熔焊2种。功率密度小于 $10^4 \sim 10^5$  W/cm<sup>2</sup>为传热焊,熔深浅,焊接速度慢;当功率密度 $>10^5 \sim 10^7$  W/cm<sup>2</sup>时,金属表面受热作用下凹成“孔穴”,形成深熔焊,焊接速度快,深宽比大<sup>[4]</sup>。本试验高强钢激光焊主要采用这种工艺。深熔焊的焊接热循环与传统焊接方法有所不同,HAZ的温度梯度大,高温停留时间短,HAZ的峰值温度可达2 000 ℃。细晶钢CO<sub>2</sub>激光焊距焊缝中心0.7 mm处的峰值温度为968 ℃,最大

加热速度为 $9 \times 10^4$  ℃/s,峰值温度为500 ℃的平均冷却速度为2 035 ℃/s<sup>[5]</sup>。

### 1.2 数控激光焊接机的工作原理

数控激光焊接机利用单色相干的激光,调节激光光束,使激光器为连续输出模式TEM<sub>01</sub>。波长为10.6 μm,焦深 $z=3$  mm,聚焦元件为焦距 $f=127$  mm的硒化锌透镜,在细聚焦的高能激光束辐射条件下,激光束聚焦在一个很小的面积上,如图1所示。

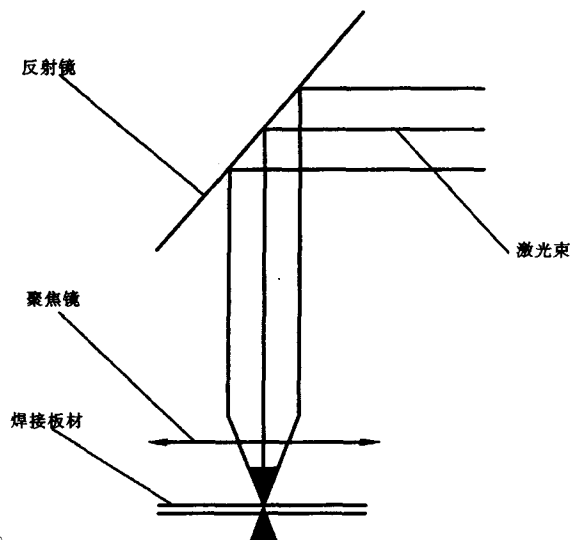


图1 数控焊接机原理图

激光深熔焊的本质特征就是存在着小孔(Key-hole)效应<sup>[6]</sup>。根据试验用激光器的光束发散角(半角) $\alpha$ 及聚焦元件的焦距 $f$ ,由 $d=2f\alpha$ 可以估算激光的焦斑直径,试验时实测焦斑直径约为0.42 mm,在焦点处获得极高的功率密度。CO<sub>2</sub>激光器焊接板材时,当激光功率 $>1.2$  kW时,焦斑功率密度可达到 $8.7 \times 10^5$  W/cm<sup>2</sup>以上,可以实现有小孔效应的深熔焊。激光器发射出的激光聚焦在被加工零件板材表面,焦点温度迅速升高,在足够高功率密度光束的照射下,材料蒸发产生小孔,这个充满蒸汽的小孔犹如一个黑体,几乎全部吸收入射光束能量,孔隙

内平衡温度达到25 000 ℃左右, 热量从这个高温孔腔外壁传递出来, 使包围着孔腔四周的金属熔化<sup>[7]</sup>。小孔和围着孔壁的熔融金属随着前导光束前进速度向前移动, 熔融金属填充着掀开、移开后留下的空隙并随之冷凝, 于是形成焊缝, 如图2所示。这时只要使被加工板材和激光束按一定的规律相对运动, 即可焊接出所需的工件。激光焊接时, 为获得好的焊接质量, 通常需优化工艺参数(光束质量、激光功率、焊接速度、焦点位置、保护气体流量及等离子体的控制)。

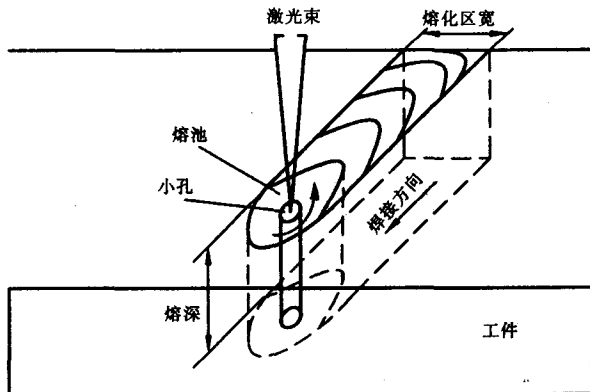


图2 具有小孔效应的激光深熔焊

## 2 影响激光焊接的几个关键因素

### 2.1 激光功率

焊接功率是影响光束功率密度的主要因素。激光深熔焊的前提是聚焦激光焦点有足够高的功率密度, 激光深熔焊时, 熔深直接与光束功率密度有关, 而且是入射光束功率和光束直径的函数。当光斑直径一定时, 功率越高, 熔深越大, 焊接速度也越快。试验发现: 气孔数与激光功率也密切相关, 随着激光功率减小, 气孔数减少。这是因为减小激光功率可减少金属蒸汽的形成, 从而抑制气孔的形成。采用激光功率在1 300 W为宜, 可见激光功率密度对焊缝成形有决定性的影响。

### 2.2 焦点位置

激光束斑点大小是激光焊的最重要变量之一, 它决定功率密度, 但对高功率激光束来说, 它的测量又是一个难题。光束焦点衍射极限光斑尺寸可以根据光衍射理论计算, 但由于聚焦透镜像差的存在, 实际光斑尺寸要比计算值大, 所以在实用中以实测光斑尺寸为主要依据。

焊接时, 为了保持足够的功率密度, 焦点位置至关重要。焦点位置的高低直接决定焊缝处的焦点面积, 在相同的功率条件下, 面积越大, 单位面积上光束功率密度就越小, 无法熔化板材, 造成未焊透。此外, 如果焦点的对中度不好, 容易形成单边焊不透的现象。如果是不同材料焊接时, 激光束位置还控制着焊缝成分, 对接接头比搭接接头对此更为敏感。焦点与工件表面相对位置的变化直接影响焊缝宽度与深度, 当焦点位于工件表面时, 熔深较浅, 不宜进行深熔焊; 当焦点位于工件表

面以下时, 工件内部功率密度比表面的大, 宜形成较大熔深。所以, 在实际生产中, 当要求较大的熔深时, 采用负离焦。对大多数激光焊接应用场合, 通常将焦点位置设置在工件表面下大约所需熔深的1/4处。本试验取焦点位于工件表面以下0.4 mm附近时, 焊缝成形好, 得到了满意的焊缝熔深效果。

### 2.3 焊接速度

焊接速度主要影响焊缝熔深和熔宽, 深熔焊时, 熔深几乎与焊速成反比。在一定的激光功率下, 提高焊速, 热输入减小, 熔深减小。因而适当降低焊速可加大熔深; 提高焊速会使焊接熔深变浅, 甚至工件未被完全焊透; 但速度过低又会导致材料过度熔化、使焊缝加宽, 表面凹陷, 严重时使工件焊穿。所以, 对一定激光功率和一定厚度的某特定材料都有一个合适的焊接速度范围, 并取其中相应速度值时可获得最大熔深。同时, 与机械加工一样, 焊接速度越快, 焊缝表面就越光滑, 粗糙度就越低。但是, 焊接速度过快, 焊缝处的金属还来不及完全熔化就已经冷却, 形成未焊透和挂渣; 焊接速度过慢则熔池扩大, 焊接表面粗糙度变大。大量的焊接试验结果表明: 焊接速度在0.8~1.0 m/min之间, 均能获得满意的焊接质量。

### 2.4 保护气体成分和流量

保护气体的作用包括: ①保护工件的待焊表面在焊接过程中免受氧化; ②保护聚焦透镜免受金属蒸汽污染和液体熔滴的溅射; ③除去高功率焊接中产生的对激光束有吸收和散射作用的等离子体云。

激光焊接过程使用惰性气体来保护熔池, 大多数应用场合则常采用氩、氦、氮等气体。如等离子体存在过多, 熔深变浅, 焊接熔池表面变宽。激光束在某种程度上被等离子体消耗削弱, 等离子体作为第2种能量存在于工件表面。等离子体云尺寸随采用的保护气体不同而变化, 氦气最小, 氮气次之, 使用氩气时最大, 即:  $\text{Ar} \rightarrow \text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 \rightarrow \text{He}$ 。氮气作为保护气体最经济, 也最常用, 本试验采用氮气作为保护气体。在气体流量方面, 若气体流量过小, 不能驱离等离子体, 对焊缝及镜片的保护效果也不好; 气体流量过大, 带走大量热能, 而且会加大紊流度, 对熔池搅拌作用加剧, 易造成焊缝气孔等缺陷, 如图3所示。经过多次试验, 最后确定同轴气流量为3.0 m<sup>3</sup>/h。

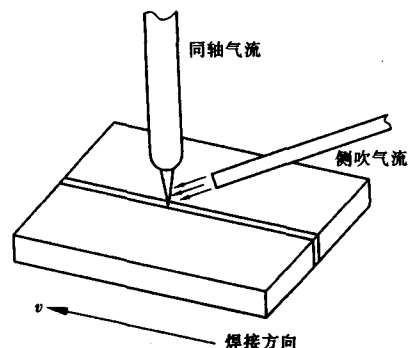


图3 同轴和侧吹气流相结合情况下的激光焊接

## 2.5 侧吹保护气体角度和流量

侧吹的保护气体可驱使金属蒸汽从光束聚焦区强制移开, 不管使用什么类型的保护气体, 都可增加熔深。等离子体云对熔深的影响在低焊接速度区最为明显, 当焊接速度提高时, 它的影响就会减弱。在CO<sub>2</sub>激光焊接过程中, 通过从光束轴向和侧向吹辅助气体, 能够增强等离子体附近区域的对流和冷却作用, 从而削弱等离子体, 有效抑制等离子体对入射激光束的吸收, 改善激光能量的耦合和传输过程。激光能量耦合作用的变化可以由等离子体的行为得到解释。

侧吹辅助保护气为氮气, 采用前保护方式; 试验辅助气体顶吹喷嘴内径为5 mm, 侧吹喷嘴内径6 mm。用喷管将氮气以一定角度直接射入深熔焊的小孔, 气流方向与焊接速度方向相反。保护气体不仅抑制了工件表面的等离子体云, 而且对孔内的等离子体及小孔的形成施加影响, 可以进一步增大熔深。但这种吹气方法的气体流量要小, 以免破坏熔池, 对气流的调整精度和稳定性要求较高, 焊接效果难以稳定; 当流速为2.3 m<sup>3</sup>/h时, 由于侧吹流速较大, 焊缝表面的成形变差。试验研究了侧吹角度、侧吹流速对熔深的影响, 结果表明侧吹气流与水平方向呈40°夹角, 侧吹气流量为2.1 m<sup>3</sup>/h时对焊缝增深和焊缝成形最好。

## 3. 工艺参数的确定

试验采用的同轴气体流量为3.0 m<sup>3</sup>/h, 其余激光功率、焦点位置、焊接速度、保护气体流量及等离子体的控制根据CO<sub>2</sub>激光器对1.5 mm厚高强度钢板焊接试验情况实际选取。通过正交试验, 得到1组优化后的工艺参数, 见表1。

表1 正交试验优化后的工艺参数表

因素 试验编号	焊接速度 (m·min <sup>-1</sup> )	气体流量 (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	侧吹角度 (°)	离焦量 /mm	功率 /W
1	0.4	1.2	10	0.2	1 000
2	0.4	1.5	20	0.0	1 100
3	0.4	1.8	30	-0.4	1 200
4	0.4	2.1	40	-0.6	1 300
5	0.4	2.3	50	-0.8	1 400
6	0.6	1.2	20	-0.4	1 300
7	0.6	1.5	30	-0.6	1 400
8	0.6	1.8	40	-0.8	1 000
9	0.6	2.1	50	0.2	1 100
10	0.6	2.3	10	0.0	1 200
11	0.8	1.2	30	-0.8	1 100
12	0.8	1.5	40	0.2	1 200
13	0.8	1.8	50	0.0	1 300
14	0.8	2.1	10	-0.4	1 400
15	0.8	2.3	20	-0.6	1 000
16	1.0	1.2	40	0.0	1 400
17	1.0	1.5	50	-0.4	1 000
18	1.0	1.8	10	-0.6	1 100
19	1.0	2.1	20	-0.8	1 200
20	1.0	2.3	30	0.2	1 300
21	1.2	1.2	50	-0.6	1 200
22	1.2	1.5	10	-0.8	1 300
23	1.2	1.8	20	0.2	1 400
24	1.2	2.1	30	0.0	1 000
25	1.2	2.3	40	-0.4	1 100

在数控激光焊接高强度钢板时, 采用表1中的工艺参数, 通过在实际加工中的工艺总结, 对高强度钢焊接焊缝进行金相组织、抗拉强度、显微硬度、成分偏析及焊缝腐蚀试验, 研究结果表明, 激光焊接1.5 mm厚高强度钢板时, 保证焊缝成形、强度和质量的优化工艺参数是: 以氮气作为保护气体, 同轴气体流量为3.0 m<sup>3</sup>/h, 激光功率为1 300 W, 离焦量为-0.4 mm, 焊接速度为0.90 m/min, 侧吹气流方向与水平方向呈40°夹角, 侧吹气体流量为2.1 m<sup>3</sup>/h。采用优化后的工艺参数焊接的焊缝放大图如图4所示。



图4 采用优化工艺参数焊接的焊缝放大图

## 4 结论

在实际的数控激光焊接高强度钢板加工过程中, 了解并控制好影响焊接质量的几个主要因素, 遵循“薄板低激光功率密度、高焊接速度或正离焦量; 厚板高激光功率密度、低焊接速度或负离焦量; 采取同轴和侧吹保护气体及等离子体云控制”等原则。有效地匹配工艺参数, 适时修正, 就能加工出质量好、精度高、焊接接头成形好且抗拉强度高的零件, 从而充分发挥数控激光焊接高效、高生产率和高适应性的优势。

## 参考文献:

- [1] 李力钧. 现代激光加工及其装备[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [2] 马鸣图, M F Shi. 先进的高强度钢及其在汽车工业中的应用[J]. 钢铁, 2004, 51(7): 68-72.
- [3] 关振中. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998.
- [4] 陈 俐, 胡席远. 高强度钢的激光焊接性研究[J]. 新技术新工艺, 2002, 24(11): 26-28.
- [5] Ulrich Draugelates, Belkacem Bouaifi, Stefan Daniel, et al. Effect of the post-weld treatment on the weld properties of mash-seam-welded and laser-beam-welded sheets[J]. Schweissen & Schneiden. (Welding and Cutting), 2000, 52 (1): E27-E31.
- [6] 左铁钊. 高强度铝合金的激光加工[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [7] 陈家璧. 激光原理及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

作者简介: 申晓龙 (1964—), 男, 湖南隆回人, 工学硕士, 副教授, 研究方向为机械制造及自动化。