

文章编号: 0258-7025(2003)02-0179-06

HE130 合金激光焊接线能量与焦点位置研究

王家淳, 王希哲, 惠松晓

(北京有色金属研究总院有研亿金新材料股份有限公司, 北京 100088)

摘要 实验研究了连续波 Nd:YAG 激光焊接线能量和激光焦点位置对 HE130 合金焊缝成形质量的影响。通过试验确定了不同板厚 HE130 合金激光焊接时的有效线能量,并量化了有效线能量与熔深及深宽比的关系,得到了 HE130 合金激光焊接的有效线能量曲线和激光功率与焊接速度在不同板厚范围内的匹配曲线。为获得最佳的焊缝成形(焊缝深宽比及焊缝背面成形),通过试验确定了不同板厚 HE130 合金激光焊接时的最佳激光焦点位置,并量化了它与板厚的关系,即最佳激光焦点位置曲线。

关键词 激光技术;激光焊接;焊接线能量;激光焦点位置;焊缝成形;HE130 合金

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

Research of Linear Heat Input and Laser Focus Position for Laser Welding HE130 Titanium Alloy

WANG Jia-chun, WANG Xi-zhe, HUI Song-xiao

(GRKIN Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract The effects of linear heat input and focus position on the HE130 alloy laser weld shaping quality using solid Nd:YAG laser welding process with continuous wave were experimentally researched. The efficient laser welding linear heat input of HE130 alloy plates with various thickness were established through experiments and the relationship of the efficient linear heat input with the weld penetration and weld penetration/width ratio was quantified. The laser welding efficient linear heat input curve of HE130 alloy and the matching curve of laser power and welding speed in the range of different plate thickness were successfully made. The optimal focus positions while laser welding HE130 alloys with various thickness were experimentally acquired to get the optimal weld shaping including the larger penetration/width ratio and good rear shaping of the weld. The relationship between the plate thickness and the optimal laser focus position was then quantified and the optimal focus position curve was given.

Key words laser technique; laser welding; welding linear heat input; laser focus position; weld shaping; HE130 alloy

1 引言

HE130 合金是一种具有高弹性模量和高强度的新型钛合金,主要用于航空结构材料,亦可推广于对构件弹性及强度要求较高的其他军工和民用领域。为扩大该合金板材的幅宽,需进行焊接,实践中采取了连续波形 Nd:YAG 激光焊接工艺,并获得了成形优异的激光焊缝。

影响 HE130 合金激光焊接质量的主要工艺因素包括激光功率、焊接速度和激光焦点位置,而激光

功率和焊接速度的影响又可归结为焊接线能量的影响。仔细研究了激光焊接线能量和激光焦点位置对 HE130 合金激光焊缝成形的影响,并量化了它们之间的关系,为该合金激光焊接工艺的全面优化奠定基础。

2 HE130 合金激光焊接线能量的研究及其对焊接质量的影响

当综合考虑激光功率 P 和焊接速度 v 对

收稿日期:2001-11-09;收到修改稿日期:2002-03-14

作者简介:王家淳(1972—),男,有研亿金新材料股份有限公司,博士,工程师,主要从事钛合金及其加工方面的工作。E-mail:wjc963@163.com

HE130 合金激光焊接质量的影响时,有必要提出焊接线能量的概念。线能量是熔化焊中的一个重要参数,其定义为:单位时间内焊缝单位长度上激光对工件所施加的能量。在激光焊接过程中,焊接线能量 J 可表示为^[1]

$$J = P/v \quad (1)$$

实验研究了激光焊接线能量 J 对 HE130 合金

焊缝熔深 h_p 和深宽比 ν 的影响,激光功率 P 和焊接速度 v 的取值范围分别为 200~2000 W 和 0.6~2.0 m/min,其他焊接工艺参数见表 1。

试验设备主要包括 HL2006D 型 Nd:YAG 激光器和 MOTORMAN 六轴联动工业机器人。该激光器的额定输出功率为 2 kW,输出光斑直径为 20 mm,焦斑直径在 0.2~0.6 mm 之间。

表 1 激光焊接工艺参数

Table 1 Laser welding process parameters

Process parameters	Focus position Δf /mm	Flow of argon L /l · min ⁻¹	Lens focus F /mm	Distance from nozzle to surface of workpiece H_n /mm
Selected value	0.3	25	100	5.0

图 1 所示为 HE130 合金激光焊缝熔深 h_p 和深宽比 ν 与激光焊接线能量 J 的关系。通过分析图 1 中试验数据及其拟合曲线的变化趋势可见,随着 J 的增加,焊缝熔深和深宽比均呈现增大的趋势,且深宽比 ν 的增大幅度略大于熔深。焊接线能量的增加使单位时间内被焊材料单位长度上吸收的激光能量增加,这势必会导致焊缝熔深的增大,而且增加的激光能量主要通过小孔效应来加大熔深,而以热传导作用增大熔宽的激光能量则相对较少^[2]。因此,随激光焊接线能量的增加,熔深增大,而熔宽的变化较小,从而提高了焊缝深宽比。

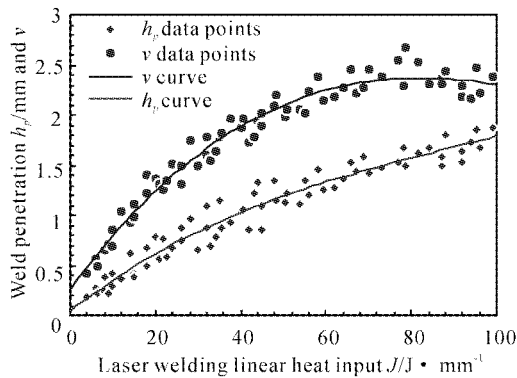


图 1 激光焊接线能量 J 对 HE130 合金激光焊缝熔深 h_p 和深宽比 ν 的影响

Fig. 1 Effects of laser welding linear heat input on the weld penetration and the penetration/width ratio of HE130

从图 1 还可看出,当 J 增加至约 $80 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 左右时,深宽比 ν 达到了最大值(约为 2.4),而后再增加线能量,深宽比将不再增大,反而倒有所减小。产生这种现象的原因是:当线能量在小于 $80 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$

的范围内增加时,小孔内尚未达到能量平衡,即通过小孔效应继续穿透被焊材料的激光能量不断增加,而通过传导、对流及辐射散失的能量和光致等离子体所吸收的激光能量相对较少,从而使焊缝的熔深和深宽比不断增大,而熔宽的增加则不明显;当线能量达到或超过 $80 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 后,小孔内部形成了能量的动态平衡,用来穿透被焊材料的激光能量将不再增加,小孔效应达到饱和状态,同时,随着入射激光能量的增加,光致等离子体的粒子密度不断升高,对激光能量的吸收率也不断提高,从而使焊缝熔深的增加幅度逐渐减小,而小孔内部和工件表面的等离子体密度及其对激光能量吸收率的提高,将使热传导作用加强,促使焊缝熔宽进一步增大。综合上述因素可知,对于 HE130 合金的 Nd:YAG 连续激光焊接来说,最大焊缝深宽比 ($\nu \approx 2.4$) 对应着 $80 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的激光焊接线能量,线能量高于或低于 $80 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 时,深宽比都将减小。此处将 $J = 80 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$ 的线能量称为 HE130 合金的最有效激光焊接线能量 J_{ME} 。不同材料的 J_{ME} 有所不同,主要与材料的基本物理特性、板厚、激光器的种类以及光致等离子体对激光能量的吸收率等因素有关,表 2 列出了几种材料的 J_{ME} 值。

进行激光焊接时,总是希望采用最小的能量输入获得最大的熔深,也希望采用能使焊件全熔透的最小线能量,以达到最高的焊接效率^[3,4]。上面提到的最有效激光焊接线能量 J_{ME} 是指焊缝深宽比达到最大值时所需的焊接线能量,而对于一定厚度的被焊试件来说,达到熔透所需的线能量通常处于某个范围之内^[8],在该范围内,使焊缝深宽比最大的最小线能量称为有效线能量 J_E 。当激光焊接线能量 J

低于有效线能量 J_E 时,将难以获得完全熔透的焊缝;而当 J 远高于 J_E 时,焊缝变宽,熔透加大,甚至产生焊缝塌陷或焊穿现象。针对特定板厚的被焊试

件,通过试验,并测定其焊缝横断面的熔深和熔宽,可以确定有效线能量 J_E ,表 3 所示为 TC4, Ti-55 及 HE130 合金不同板厚的有效线能量。

表 2 几种钛合金材料的 J_{ME} 值
Table 2 J_{ME} of several titanium alloys

Materials	Lasers	$J_{ME} / J \cdot \text{mm}^{-1}$
TC4	HAAS-HL2006D Nd: YAG CW	88.5
Ti-55	HAAS-HL2006D Nd: YAG CW	104.8
HE130	HAAS-HL2006D Nd: YAG CW	80.6

表 3 不同板厚钛合金的激光焊接有效线能量

Table 3 Efficient linear heat input of laser welding for Ti-alloys with different thickness

Materials	HE130	HE130	HE130	Ti-55	TC4
Sheet thickness /mm	0.25	0.35	0.80	2.0	2.5
$J_E / J \cdot \text{mm}^{-1}$	7.2	11.4	29.5	125.8	149.6

通过对钛合金激光焊接有效线能量 J_E 的研究,可以进一步量化 HE130 合金激光焊缝熔深和深宽比与有效线能量的关系。对图 1 中的试验数据点进行立方拟合,得到了熔深 h_p 及深宽比 ν 与有效线能量 J_E 的函数关系式

$$\begin{cases} h_p = 1 \times 10^{-6} J_E^3 - 3 \times 10^{-4} J_E^2 + \\ \quad 3.3 \times 10^{-2} J_E + 4 \times 10^{-2} \\ \nu = 1 \times 10^{-6} J_E^3 - 5 \times 10^{-4} J_E^2 + \\ \quad 5.9 \times 10^{-2} J_E + 0.25 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式具有较高的实用价值,将焊件的厚度作为熔深 h_p 代入上式,即可得到全熔透激光焊接的有效线能量 J_E 以及此时的深宽比系数 ν ,进而确定激光功率 P 和焊接速度 v 的匹配。利用(2)式绘出的 h_p - J_E 和 ν - J_E 曲线(图 1 中的拟合曲线)称为 HE130 合金激光焊接的有效线能量曲线(也称为最小线能量曲线或最大熔深曲线),其物理含义为使某厚度试件实现全熔透激光焊接所需的最小线能量(有效线能量)或采用某焊接线能量所能达到的最大熔深。

图 2 所示为 HE130 合金激光焊接时激光功率 P 与焊接速度 v 的匹配曲线。由图 2 可以获得为达到不同焊缝熔深所需的激光功率与焊接速度组合。

通过上述分析可知,激光焊接线能量是激光能量有效利用率的一种标志^[4,9]。激光焊接线能量与焊缝熔深的关系比较复杂^[3,6,7],同时,激光焦点位置 Δf 对焊缝熔深的影响也很大,而在焊接线能量的定义中并不包含焦点位置的作用。事实上,在相同的焊接线能量下,随激光功率和焦点位置的不同,

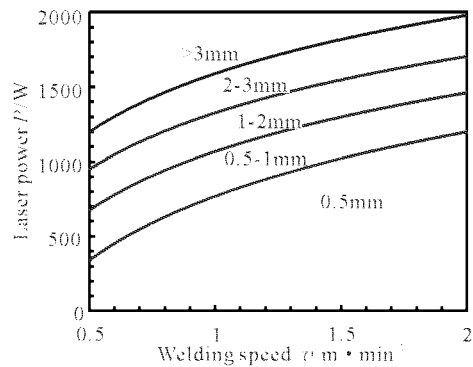


图 2 激光功率与焊接速度的匹配曲线

Fig. 2 Matching curve of laser power and welding speed

焊缝熔深变化很大。当激光功率很小或焦点位置选择不当时,即使通过降低焊接速度可以获得较大的线能量,但由于此时的激光功率密度较小,而很难达到理想的熔深。因此,在激光焊接时,对焊缝熔深起决定性作用的因素除焊接线能量外,还有激光功率密度,即除了要考虑激光功率和焊接速度对焊缝熔深的影响外,还必须考虑焦点位置对熔深的影响。

文献[8]指出,在相同线能量输入的条件下,焊缝熔深随激光功率的提高而增大,而熔宽的变化很小。因此,提高激光功率的方法对增加焊缝熔深的作用比降低焊接速度的效果好。对激光焊接来说,高功率快速焊的焊接规范可以大幅度提高激光能量的有效利用率,并削弱光致等离子体的不利影响;而且,从提高激光焊接过程稳定性的角度考虑,采用较

高的激光功率能够获得稳定焊接工艺区间中更大的焦点位置范围。但是,激光功率的提高并非没有限度,一方面,激光器的输出功率受到激光加工设备整体性能和制造因素的影响,不可能无限制地提高;另一方面,过高的激光功率会使光致等离子体对激光能量的吸收增强,反而会降低焊缝熔深。

3 激光焦点位置

在激光功率、焊接速度和焦点尺寸一定的情况下,为了获得激光焊接所需的功率密度,必须保证激光焦点处于合理的位置。通常使激光焦点位于被焊工件的表面或表面以下,将焦点移出工件表面是不明智的,因为这样会大大降低工件表面和工件内部的激光功率密度,削弱激光的穿透能力,减小焊缝熔深和深宽比,恶化焊缝成形。此外,激光焦点位置的波动也会引起功率密度的改变,从而影响焊接质量,因此应采取措施,避免焦点位置在焊接过程中的波动。

激光焦点位置是指激光焦点相对于被焊工件表面的位置,也称为离焦量。定义焦点在工件表面以下时为正,在工件表面上时为零,在工件表面以上时为负。按照几何光学理论,当正、负离焦量相等时,工件表面的激光功率密度相等,但获得的熔池形状不同,在正离焦(入焦)的情况下可获得更大的熔深,这主要与激光焊接熔池的形成过程有关。实践表明,大多数材料在激光加热后 50~200 μs 时开始熔

化,并出现部分气化,产生高压蒸气,并以极高的速度喷射出来;之后,高浓度气体(金属蒸气和辅助气体)使液相金属运动至熔池边缘,并在熔池中心形成小孔。当焦点位置为正时,材料内部的激光功率密度比工件表面还要高,因此能够形成更强的熔化和气化,并使激光能量向材料的更深处传递。所以在实际应用中,当被焊材料较厚、要求熔深较大时,应采用一定的正离焦量;而当被焊试件为薄壁材料时,宜采用负离焦方式。

激光焦点位置是一个对焊缝成形十分敏感的参数,很小的出入就会造成焊缝熔深和熔宽的较大差异,这同时也说明了焦点位置对激光能量的传输效率具有很大的影响。对不同板厚钛合金的激光焦点位置与焊缝成形的关系进行了系统的试验研究,并量化了最佳焦点位置 Δf_m 与钛合金板厚 δ 的关系。

在考察钛合金的最佳激光焦点位置时,首先选定激光功率 P 和焊接速度 v ,然后使焦点位置从负到正变化。采用平板单面熔焊方式,对每条焊缝沿焊缝方向的 5 个不同位置横向剖开,测定其熔深 h_p 和熔宽 h_w ,并取平均值,计算出焊缝的深宽比 ν 。不同板厚钛合金激光焊接时固定的焊接工艺参数如表 4 所示。

不同板厚的各种钛合金(HE130, Ti-55 和 TC4)激光焊缝成形(熔深 h_p , 熔宽 h_w 和深宽比 ν)与焦点位置关系的试验结果见表 5~9。

表 4 钛合金激光焊接工艺参数

Table 4 Laser welding process parameters for titanium alloys

Titanium alloys	δ/mm	P/W	$v/\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	F/mm	H_n/mm
HE130	0.25	200	1.2	150	5
HE130	0.35	330	1.2	150	5
HE130	0.80	850	1.2	150	5
Ti-55	2.0	1400	1.2	150	5
TC4	2.5	1900	1.2	150	5

表 5 0.25 mm 厚 HE130 合金激光焊接时焊缝成形与激光焦点位置的关系

Table 5 Relationship between weld shaping and laser focus position in laser welding HE130 alloy with the thickness of 0.25 millimeters

$\Delta f/\text{mm}$	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
h_p/mm	0.16	0.19	0.20	0.23	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.22	0.18
h_w/mm	0.60	0.52	0.45	0.43	0.39	0.36	0.40	0.45	0.48	0.56	0.62
ν	0.267	0.365	0.445	0.535	0.641	0.695	0.625	0.556	0.521	0.393	0.290

由表 5~9 可以看出,对于不同板厚的钛合金来说,使其熔透的激光焦点位置在一定的范围内,在此

范围内,虽然焊缝熔深 h_p 相同,但焊缝熔宽 h_w 随焦点位置的变化而有所不同,从而使焊缝的深宽比 ν

产生差异。当确定各种板厚钛合金激光焊接的最佳焦点位置 Δf_m 时,首先要考虑在试板全熔透的基础上,使焊缝的深宽比 ν 尽可能大;其次,为了保证焊缝的综合性能,还应使焊缝的背面成形达到一定要求,使焊缝背面宽度 h_b 与正面宽度 h_w 的比例系数 r_b 达到一定值,即

$$r_b = h_b/h_w \approx 0.8 \quad (3)$$

此外,在焊缝的表面不允许出现气孔、夹杂、塌陷或咬边等焊接缺陷。

在全面考虑了上述各种因素的影响后,确定了各种不同板厚钛合金的最佳激光焦点位置 Δf_m , 如表 10 所示。

表 6 0.35 mm 厚 HE130 合金激光焊接时焊缝成形与激光焦点位置的关系

Table 6 Relationship between weld shaping and laser focus position in laser welding HE130 alloy with the thickness of 0.35 millimeters

Δf /mm	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8
h_p /mm	0.19	0.24	0.31	0.35	0.35	0.35	0.35	0.32	0.28	0.25	0.22
h_w /mm	0.69	0.63	0.52	0.40	0.42	0.43	0.43	0.55	0.62	0.68	0.75
ν	0.275	0.381	0.596	0.875	0.834	0.814	0.814	0.582	0.452	0.368	0.293

表 7 0.80 mm 厚 HE130 合金激光焊接时焊缝成形与激光焦点位置的关系

Table 7 Relationship between weld shaping and laser focus position in laser welding HE130 alloy with the thickness of 0.80 millimeters

Δf /mm	-1.0	-0.6	-0.2	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	1.2
h_p /mm	0.46	0.54	0.65	0.72	0.75	0.80	0.80	0.80	0.78	0.75	0.70
h_w /mm	0.84	0.79	0.63	0.53	0.52	0.54	0.52	0.53	0.69	0.74	0.86
ν	0.548	0.684	1.032	1.359	1.442	1.482	1.538	1.509	1.131	1.014	0.814

表 8 2.0 mm 厚 Ti-55 合金激光焊接时焊缝成形与激光焦点位置的关系

Table 8 Relationship between weld shaping and laser focus position in laser welding Ti-55 alloy with the thickness of 2.0 millimeters

Δf /mm	-2.0	-1.0	-0.5	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5
h_p /mm	1.36	1.54	1.62	1.75	1.80	1.98	2.0	2.0	2.0	1.89	1.76
h_w /mm	1.16	0.98	0.78	0.65	0.66	0.68	0.68	0.70	0.73	0.80	0.96
ν	1.173	1.572	2.077	2.692	2.727	2.912	2.941	2.857	2.740	2.363	1.833

表 9 2.5 mm 厚 TC4 合金激光焊接时焊缝成形与激光焦点位置的关系

Table 9 Relationship between weld shaping and laser focus position in laser welding TC4 alloy with the thickness of 2.5 millimeters

Δf /mm	-3.0	-2.0	-1.0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.5
h_p /mm	1.73	1.92	2.10	2.25	2.38	2.46	2.5	2.5	2.5	2.5	2.45
h_w /mm	1.30	1.18	0.87	0.78	0.76	0.79	0.80	0.79	0.86	0.94	1.10
ν	1.331	1.627	2.414	2.885	3.132	3.114	3.125	3.165	2.907	2.660	2.227

表 10 不同板厚钛合金激光焊接的最佳焦点位置

Table 10 Optimal laser focus position of titanium alloys with different thickness

Titanium alloys	HE130	HE130	HE130	Ti-55	TC4
Thickness $\delta(h_p)$ /mm	0.25	0.35	0.80	2.0	2.5
Δf_m /mm	0.06	0.14	0.29	0.65	0.90
h_w /mm	0.38	0.42	0.52	0.68	0.82
h_b /mm	0.30	0.34	0.42	0.54	0.66
r_b	0.79	0.81	0.81	0.80	0.81
ν	0.658	0.834	1.538	2.941	3.049

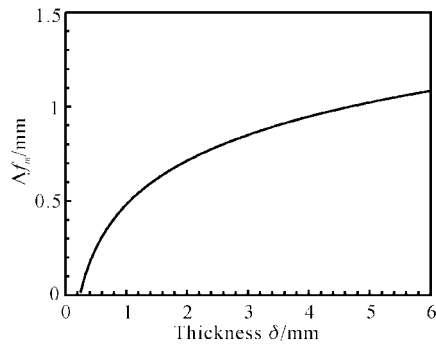


图3 最佳激光焦点位置与钛合金板厚的关系

Fig. 3 Relationship between the optimal focus position and thickness of titanium alloys

图3为钛合金最佳激光焦点位置 Δf_m 与板厚 δ 关系的对数线性拟合曲线,拟合公式如下

$$\Delta f_m = 0.3375 \ln \delta + 0.4789 \quad (4)$$

对于给定的钛合金试件,利用(4)式,并根据试板厚度 δ 就可以确定其激光焊接时的最佳焦点位置 Δf_m 。对板厚小于0.2 mm的钛合金试板,选择 $\Delta f = 0$ 作为最佳激光焦点位置。

通过对钛合金激光焊接焦点位置的研究可以发现,在最佳激光焦点位置处,焊缝具有较大的熔深、深宽比和较小的熔宽;当激光焦点偏离最佳位置时,焊缝熔深和深宽比均减小,而熔宽变化不大。

4 结 论

焊接线能量是激光功率和焊接速度的综合表达,对焊接质量影响较大。结合试验研究了线能量

对 HE130 合金激光焊缝成形的影响,量化了二者的关系,获得了 HE130 合金激光焊接的有效线能量曲线。

评价了激光焦点位置对焊缝成形的影响,并量化了试板厚度与最佳激光焦点位置的关系,获取了 HE130 合金的最佳激光焦点位置曲线。

参 考 文 献

- 1 R. V. Duhamel, C. M. Banas. Laser in materials processing: Laser welding of steels and nickel alloys [C]. American Society of Metals, 1983
- 2 Y. Arata, T. Oku. Development of light beam welding process [C]. IIW Document, IIW-IV-150-74, 1974
- 3 V. M. Weerasinghe, A. Drenker, B. Seidel *et al.*. In-process monitoring of laser processes [C]. ICALEO'95, 1995. 107~112
- 4 W. Lucas, M. H. Rodwell. Process techniques to improve control of penetration in TIG welding [J]. *Welding Review*, 1987, **8**(3):185~196
- 5 G. Herziger. Basic elements of laser materials processing [C]. *SPIE*, 1983, **455**:66~74
- 6 V. Semak, J. A. Hopkins. Dynamics of penetration depth during laser welding [C]. ICALEO'94, 1994. 830~837
- 7 C. Tix, G. Simon. Model of a laser heated plasma interaction with walls arising in laser keyhole welding [J]. *Phys. Rev.*, 1994, **50**: 453~462
- 8 J. Dowden, P. Kapadia. A mathematical investigation of the penetration depth in keyhole welding with continuous CO₂ lasers [J]. *J. Physics D: Appl. Phys.*, 1995, **28** (11):2252~2261
- 9 E. Dumord, J.-M. Jouvard, D. Grevey. Modelling of high power CW Nd:YAG laser welding [C]. *SPIE*, 1996, **2889**:26~33