

文章编号: 0258-7025(2006)08-1133-06

高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接

伍强^{1,2}, 陈根余^{1,2}, 王贵^{1,2}, 李力钧², 龚金科¹

(湖南大学¹ 现代车身技术教育部重点实验室, ² 激光研究所, 湖南长沙 410082)

摘要 利用 CO₂ 激光对汽车车身用 1.5 mm 厚高强度双面镀锌钢进行了大量的焊接实验,对焊缝组织进行了显微组织分析和相关的机械性能实验。从理论上推导了在一定焊接工艺条件下,稳定深熔焊接的下临界功率与焊接速度及焦点位置的关系。在同轴和侧吹保护气体的条件下,通过工艺参数优化,激光深熔焊接可以有效地避免高强度镀锌钢热影响区(HAZ)的软化现象以及焊缝气孔的有效控制。锌不稳定的急剧气化,使热影响区扩大和焊接稳定性降低,聚焦镜的保护难度加大,采取了有效措施加以控制。实验结果表明,用氮气作为保护气体,在激光功率 1300 W,焊接速度 0.8~1.1 m/min,焦点位置在工件表面下 0.4 mm 处时,得到了满意的焊接质量。焊缝的硬度接近母材硬度的 2 倍。

关键词 激光技术;激光深熔焊接;高强度镀锌钢;锌行为;热影响区软化

中图分类号 TG 456.7 **文献标识码** A

CO₂ Laser Welding of Zinc Coated High Strength Steel

WU Qiang^{1,2}, CHEN Gen-yu^{1,2}, WANG Gui^{1,2}, LI Li-jun², GONG Jin-ke¹

(¹Key Laboratory of Advanced Technology for Vehicle Body Design & Manufacture, Ministry of Education,)
²Laser Research Institute, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Based on many experiments of CO₂ laser welding of 1.5 mm zinc coated high strength steel to vehicle body, joint microstructure and stress-strain curve of specimen are acquired. Given special welding technology, theoretical P_c-v curve and $P_c-\Delta f$ curve of stable deep penetration laser welding are deduced. The unstable sharply gasification of zinc enlarges heat-affected zone (HAZ), debases welding stability and increases the difficulty of protecting condenser. Through optimizing technology parameter, adopting coaxial and side blown protective gas, deep penetration laser welding can effectively avoid softening HAZ of welding of zinc coated high strength steel and can control the gas hole. The experimental result indicates that the content welding quality can be gained on the condition of using N₂ as protective gas, the laser power at 1300 W, the welding speed at 0.8~1.1 m/min and defocusing amount at $\Delta f = -0.4$ mm, the hardness of welding seam is twice as that of base material.

Key words laser technique; deep penetration laser welding; zinc coated high strength steel; effects of zinc vaporization; softening of heat-affected zone

1 引言

近年来,汽车“车身轻量化”和“安全性”作为汽车产业的重要问题越来越受到重视。作为车身“安全件”用钢板的质量要求也日益提高。结构钢中通过添加合金,成分优化和特殊的冶炼加工,可获得高强度,并且具有良好的塑韧性、耐低温、耐高温、耐腐

蚀和耐磨损等性能。同时,通过镀锌可使金属薄板的上下表面各获得一层保护层,从腐蚀电化学原理上来看,由于镀锌钢板作为大范围的锌阳极,腐蚀一般不会发生在狭窄的激光焊缝上,能较好地满足车身的抗腐蚀性能。高强度镀锌钢则成为汽车车身的首选用材。

一般常用的焊接工艺难以满足车身“安全件”的

收稿日期:2005-11-11;收到修改稿日期:2006-02-23

基金项目:国家自然科学基金(50575070)和“985”二期工程湖南大学汽车先进设计制造技术科技创新平台资助项目。

作者简介:伍强(1967—),男,湖北省荆州市人,湖南大学机械与汽车工程学院博士研究生,主要从事激光加工方面的研究。E-mail:410082wuqiang@sina.com

导师简介:陈根余(1965—),男,湖南省长沙市人,教授,主要研究方向为激光加工新技术。E-mail:hdgychen@163.com

制造对接头质量的要求,激光焊接工艺成为许多著名汽车制造厂商竞相采用的新技术。目前,大功率 CO₂ 激光已广泛应用于工业、军事和度量衡中^[1~3]。本文采用自制的1500 W连续 CO₂ 激光器对1.5 mm厚高强度镀锌钢板进行了深熔焊接工艺实验,获得了较好的焊接效果。

2 实验条件及方法

实验所用的激光器为自制的具有自主知识产权的 PHC-1500 折叠式准封离型 CO₂ 激光器,输出激光模式为连续输出 TEM₀₁,波长为10.6 μm,其光束发散角(半角) α 为1 mrad,焦深 z 为3 mm,聚焦元件的焦距 f 为127 mm的硒化锌透镜,聚焦前的光束直径 φ28 mm,焦斑直径约为0.42 mm。焊接材料是

瑞典生产的高强度镀锌钢(DOGAL 800DP),实验用工件尺寸为100 mm×30 mm×1.5 mm,焊接接头采用对接方式。材料参数见表1。要求工件完全焊透,焊接质量高。

为减少焊接缺陷,焊前用丙酮清洗焊接部位。采用自制的焊接夹具固定工件,保证工件的焊缝均匀平整,对接焊缝焊前间隙被控制在板厚的1/10以内。采用 N₂ 作为保护气和等离子体控制气。焦点设置在试样的上表面接缝处。激光光束相对试样表面的法线向薄板一侧倾斜 5°以保护镜片,试件随工作台移动。焊后沿垂直于焊缝方向切割焊接工件,抛光后经酸腐蚀,用金相显微镜观察焊缝及焊接质量,对焊缝及热影响区(HAZ)作了硬度实验,并对焊接试件作了机械性能分析。

表1 实验材料的力学性能和化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of tested materials (w)

σ _b /MPa	σ _s /MPa	Elongation δ /%	C	Si	Mn	P	S	Others
800~950	≥500	≥10	≤0.18	≤0.5	≤2.0	≤0.025	≤0.015	≥0.015

3 分析与讨论

3.1 焊接工艺

激光深熔焊接的能量转换是通过“小孔”效应机制来完成的。在已知被焊材料及其厚度、接头方式、聚焦光斑直径的条件下,影响焊接质量的主要参数是激光功率 P,焦点位置,保护气体及焊接速度 v。小孔开始形成的临界条件是工件吸收的激光能量使热穿透范围内的金属材料刚好气化,即材料气化并开始形成小孔所需的最低激光功率密度 I_c 满足条件为^[4]

$$I_c = \frac{L_M + L_V + L_P + \int_{T_0}^{T_V} C_{pm} dT}{At} \cdot \rho \cdot d, \quad (1)$$

式中 L_M 为材料的熔化潜热; L_V 为材料的气化潜热; L_P 为材料的相变潜热; T₀ 为工件初始温度; T_V 为材料气化的终止温度; C_{pm} 为材料的比热容; A 为材料对激光的吸收率; t 为时间; ρ 为材料密度; d 为激光在材料内的热穿透深度, d = 2√at, a 为材料的扩散系数, a = K/(ρC_{pm}), K 为材料的热传导率; T 为温度。在移动连续激光作用下,光斑范围内激光对工件的作用时间为

$$t = 2r/v, \quad (2)$$

式中 r 为光斑半径。下临界激光功率 P_c 与 I_c 的关系

为

$$P_c = \pi r^2 I_c, \quad (3)$$

将(2),(3)式代入(1)式得

$$P_c = \pi \sqrt{2avr^3} \frac{L_M + L_P + \int_{T_0}^{T_V} C_{pm} dT}{A} \cdot \rho. \quad (4)$$

采用焦点位置作为焊接工艺参数时,将(4)式的 r 换算成离焦量 Δf,则当 -z < Δf < z 时

$$r = \frac{d_{min}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{4\lambda\Delta f}{\pi d_{min}^2}\right)^2}, \quad (5)$$

式中 d_{min} 为聚焦光斑最小直径, λ 为激光波长。

稳定深熔焊接的下临界条件是激光穿过等离子体到达下孔内部的功率能够达到(4)式所确定的准临界功率 P_{c0},则稳定深熔焊接的下临界功率 P_c 为

$$P_c = \frac{P_{c0}}{1 - A_0}, \quad (6)$$

由(4)~(6)式得到采用焦点位置作为焊接工艺参数,当 |Δf| < z 时,设 A₀ 为工件表面等离子体对激光的吸收率,稳定深熔焊接的下临界功率与焊接速度及焦点位置的关系为

$$P_c = \frac{\pi}{2} \sqrt{avd}^{3/2} \frac{L_M + L_V + L_P + \int_{T_0}^{T_V} C_{pm} dT}{A(1 - A_0)} \times \rho \cdot \left[1 + \left(\frac{4\lambda\Delta f}{\pi d_{min}^2}\right)^2\right]^{3/4}, \quad (7)$$

根据(7)式,将高强度镀锌钢和激光的各个参数代入后可以得到一定焊接工艺条件下,稳定深熔焊的下临界功率与焊接速度及焦点位置的关系,如图 1,图 2 所示。当离焦量在 $-1\text{ mm}\sim 1\text{ mm}$ 时,稳定深熔焊接的下临界功率 P_c 在 1200 W 左右。

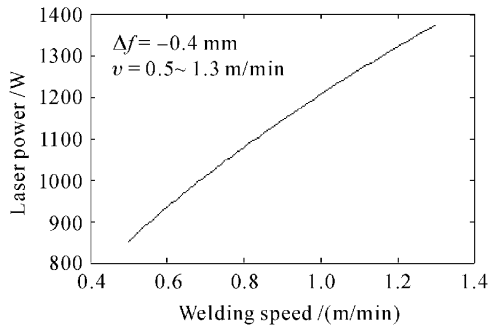


图 1 下临界功率与焊接速度的关系曲线

Fig. 1 P_c - v curve

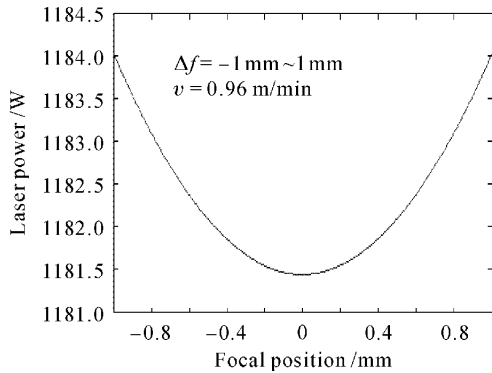


图 2 下临界功率与离焦量的关系曲线

Fig. 2 P_c - Δf curve

3.1.1 激光功率

激光深熔焊接的本质特征就是存在着小孔效应^[5]。根据实验用激光器的光束发散角(半角) α 及聚焦元件的焦距 f ,由 $d = 2f\alpha$ 可以估算激光的焦斑直径,实验时实测焦斑直径约为 0.42 mm 。结合图 1 及图 2,当激光功率大于 1.2 kW 时,焦斑功率密度可达到 $8.7 \times 10^5\text{ W/cm}^2$ 以上,可以实现有小孔效应的深熔焊接。激光深熔焊接时,熔深与光束功率密度相关。当光斑直径一定时,功率越高,熔深越大,焊接速度也越快。实验发现:气孔数与激光功率也密切相关,随着激光功率降低,气孔数减少。这是因为降低激光功率可以减少金属蒸气的形成,从而抑制气孔的形成^[6]。采用的激光功率在 1300 W 为宜。

3.1.2 焦点位置

激光焊接时,为了保证工件表面有足够的功率密度,聚焦光斑的焦点位置至关重要。当焦点位于

工件表面时,熔深较浅,不宜作深熔焊接。当焦点位于工件表面以下时,工件内部功率密度比表面高,易形成较大熔深。

图 3 为焦点在工件表面下的位置与焊接熔深的关系曲线。可以看出,随着焦点从工件表面下移,焊接熔深逐渐增加。当焦点位于工件表面以下 0.4 mm 附近时,熔深最大;焦点继续下移,熔深则迅速变浅。同时,焊缝金相表明,焦点位置过低时,焊接工件接头部分材料不能充分熔化,影响焊缝成形。因此,焊接时,焦点应位于工件表面以下 0.4 mm 附近。

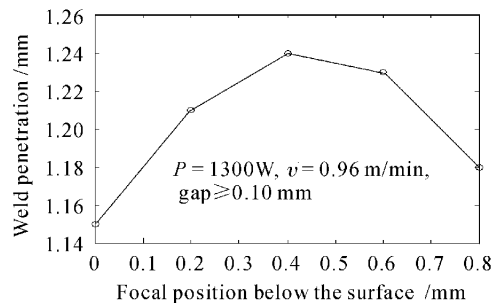


图 3 焦点在工件表面下的位置对焊接熔深的影响

Fig. 3 Effect of focal position on weld penetration for zinc coated high strength

3.1.3 焊接保护气体

焊接保护气体主要作用是防止焊接过程中工件表面氧化,去除高功率深熔焊接过程中产生的对激光能量有吸收和散射作用的等离子体云。但是,小孔内部存在一定量的等离子体有助于小孔的稳定,从而增加熔深。为此,实验中采用侧吹与同轴保护气体的方法。使用 N_2 作为辅助气体,气体通过一个内径为 $\phi 6\text{ mm}$,与焊接平面的夹角 α 在 30° 左右布置的圆管供应,气流方向与焊接速度 v 方向相反。与光轴同轴的保护气体主要是保护聚焦透镜免受焊接时产生的烟尘、飞溅物等的污染,并对其起一定的散热作用,同时保护熔池不受空气污染等作用。此外,同轴保护气体对等离子体云也有一定的抑制作用。在气流量方面,若气流量过小,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。经过实验,确定同轴气量为 $2.5\text{ m}^3/\text{h}$,侧吹气量为 $1.8\text{ m}^3/\text{h}$ 。实验装置原理如图 4 所示。

3.1.4 焊接速度

实验表明,工件的被焊表面之间的间隙和高度

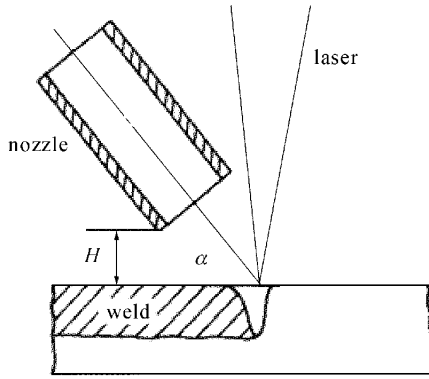


图 4 实验装置

Fig. 4 Experimental setup

差均小于0.1 mm时,在激光功率为1300 W,焦点位于工件表面下0.4 mm处的条件下,当焊接速度高于1.1 m/min时,焊接熔深较浅,工件未被完全焊透,如图5所示;速度过低又会导致材料过度熔化,使焊缝加宽,表面凹陷,如图6所示。结合图1,选取的焊接速度在0.8~1.1 m/min进行实验,获得了满意的焊接质量。

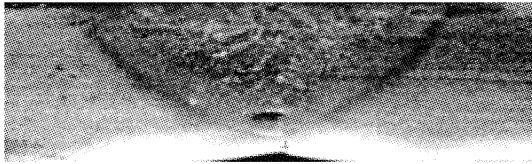


图 5 焊接速度为 1.2 m/min 时的接头微观组织

Fig. 5 Joint microstructure when $v = 1.2$ m/min
($P = 1300$ W, defocus = -0.4 mm, gap ≤ 0.15 mm, $\alpha = 30^\circ$, N_2)

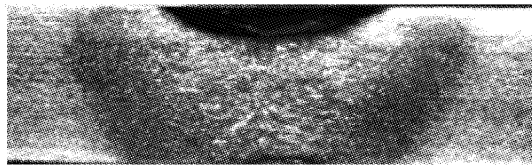


图 6 焊接速度为 0.7 m/min 时的接头微观组织

Fig. 6 Joint microstructure when $v = 0.7$ m/min
($P = 1300$ W, defocus = -0.4 mm, gap ≤ 0.15 mm, $\alpha = 30^\circ$, N_2)

3.2 锌对激光焊接的影响

锌的气化将导致焊缝及热影响区镀锌层的破坏或含锌量的减少,导致汽车用高强度镀锌钢保护层的破坏。实验发现,实验样品的镀锌层的烧蚀范围一般不会超过0.5 mm,焊缝附近的镀锌层的烧蚀区宽度与焊接热影响区的宽度基本相同,这是因为锌的蒸发温度与钢的奥氏体-铁素体相变点基本相同。

但是,锌不稳定的急剧气化增加了蒸气的压力和紊流度,对熔池有强烈的搅拌作用,使扩展到金属表面上方的等离子体云的波动加剧,导致激光焊接高强度镀锌钢时飞溅火花和多孔性的倾向加大,扩大热作用区和焊接稳定性降低,出现内应力、裂纹和气孔等缺陷,从而影响激光焊接高强度镀锌钢的焊缝质量,而且加大了聚焦镜的保护难度,应采取有效措施加以控制。

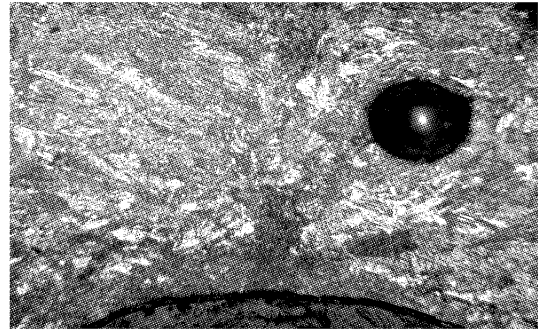


图 7 接头微观组织(100×)

Fig. 7 Joint microstructure (100×)

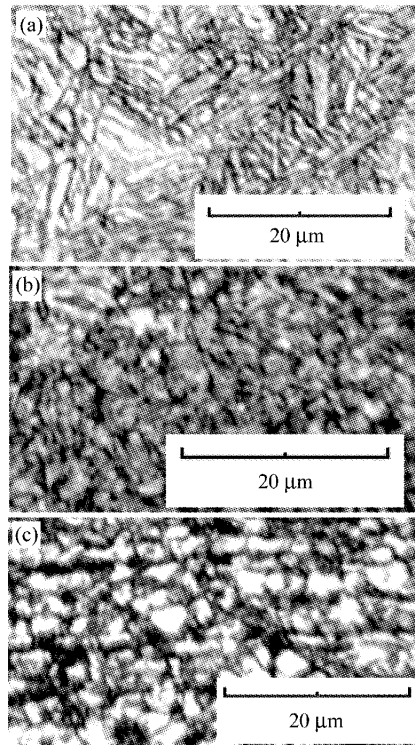


图 8 接头微观组织(500×)

(a) 熔池区; (b) 热影响区; (c) 母材区
Fig. 8 Joint microstructure (500×)

(a) fused bath zone; (b) heat-affected zone; (c) based metal zone

($P = 1300$ W, $v = 0.96$ m/min, defocus = -0.4 mm, gap ≤ 0.15 mm, $\alpha = 30^\circ$, N_2)

激光焊接速度快,熔池固化速度快,焊缝断面深宽比大,气体不易释出,镀锌钢板在焊接过程中因锌的挥发而易于产生气孔^[7]。同时,附着在焊件表面及大气中的水分,一经高温加热即分解,产生氢,这也可能导致焊缝中出现气孔,如图7所示。实验时,在保持环境空气干燥,去除工件表面水分的同时,在夹具中设置了排气通道,以减少因锌的急剧气化而产生的蒸气压力,从而抑制焊接气孔的生成。图8是在MM-6卧式金相显微镜下放大500倍时,焊接接头的微观组织。可以看出,气孔得到了明显的控制。

3.3 焊缝组织的机械性能实验

激光深熔焊的焊接热循环与传统焊接方法不同,热影响区的温度梯度大,高温停留时间短,平均加热冷却速度大,使碳当量较高的高强度镀锌钢接头易出现裂纹缺陷,尤其是焊接速度高的条件下更加明显。焊接速度超过一定值时,接头裂纹敏感增大,这一焊接极限值与激光功率、板厚等因素有关。因此,在激光焊接高强度镀锌钢时必须合理匹配激光功率和焊接速度。

图9是在WDW-100微机控制电子万能实验机上,对母材及焊接件所作的应力-应变曲线图。从

曲线图中可以看出,焊件的屈服强度 σ_s 为780 MPa,抗拉强度 σ_b 为1280 MPa;母材的屈服强度 σ_s 为590 MPa,抗拉强度 σ_b 为1260 MPa。试件热影响区的屈服强度 σ_s 和抗拉强度 σ_b 均比母材高。图10是利用MM-6卧式金相显微镜对试件进行显微硬度实验的测试位置图。图中的标记点分别代表了母材区、热影响区、熔池区的硬度测试位置。在负载400 g,保持载荷时间5 s的条件下,三个区域的显微硬度如下:母材区为271HV,热影响区为441HV,熔池区为438HV。从图中可以看出,母材区的金相组织是铁素体+珠光体;热影响区的金相组织是上贝氏体+低碳马氏体+铁素体;熔池区的金相组织是上贝氏体+低碳马氏体。由于冷却条件不同,热影响区的晶粒明显比熔池区的晶粒细小,所以硬度值较高,应力较大,拉伸试件的断裂裂纹出现在热影响区附近,并向母材区扩展。

综上所述,激光深熔焊可以有效地避免高强度镀锌钢热影响区的软化。这是因为激光焊接时加热冷却速度非常快,热影响区不完全重结晶区非常窄,而且生成了一定量的淬硬组织,组织强化使该区域硬度与强度高于母材。

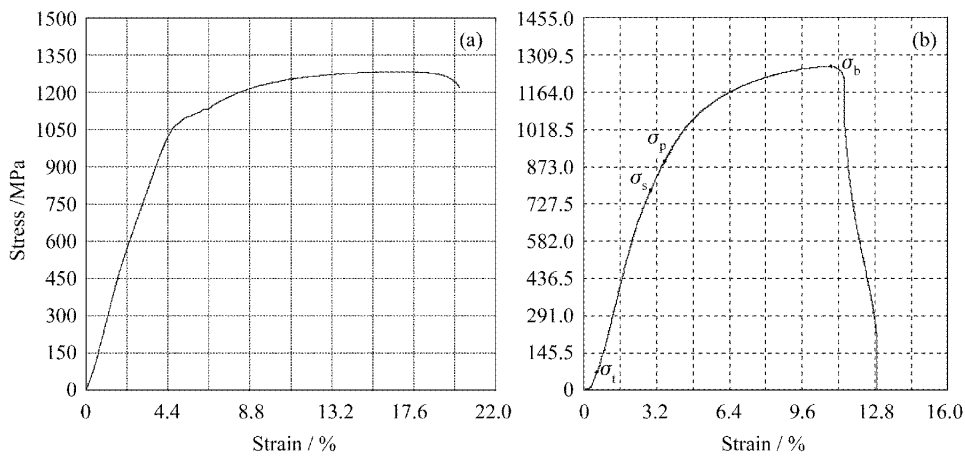


图9 焊件力学实验的应力-应变图

(a) 母材;(b) 焊缝

Fig.9 Stress-strain curve of specimen

(a) based metal; (b) welded seam

($P=1300\text{ W}$, $v=0.96\text{ m/min}$, defocus $=-0.4\text{ mm}$, gap $\leq 0.15\text{ mm}$, $\alpha=30^\circ$, N_2)

4 结论

实验表明:1) 用 N_2 作为保护气体,在激光功率1300 W,焊接速度0.96 m/min,与焊接平面的夹角 α 在 30° 左右,气流方向与焊接速度方向相反侧吹保

护气体,焦点在工件表面下0.4 mm附近的条件下,用 CO_2 连续激光深熔焊接高强度镀锌钢可以有效地避免其热影响区的软化,获得了较好的焊接效果。所焊试件在上海大众POLO车车门安全件上得到了成功的应用。2) 锌的蒸发及环境中的水分等,在

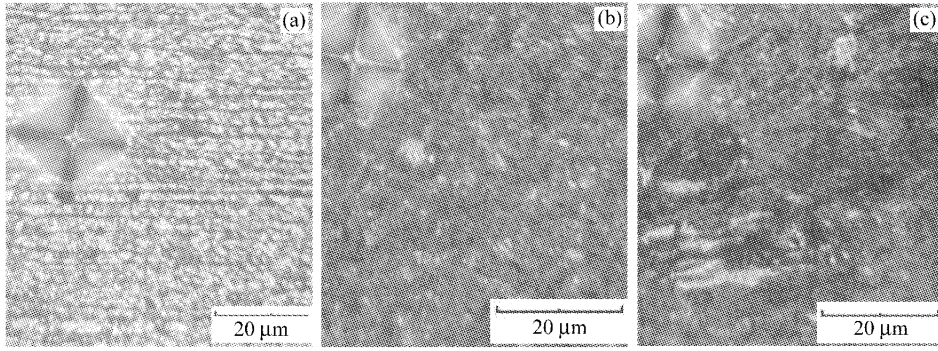


图 10 显微硬度点的测试位置图

(a) 母材区; (b) 热影响区; (c) 熔池区

Fig. 10 Position of rigidity point

(a) based metal zone; (b) heat-affected zone; (c) fused bath zone

($P = 1300 \text{ W}$, $v = 0.96 \text{ m/min}$, defocus = -0.4 mm , gap $\leq 0.15 \text{ mm}$, $\alpha = 30^\circ$, N_2)

激光焊接时容易形成气孔。在优化的工艺条件下，可以有效地控制焊接件焊缝气孔的生成。3) 在激光功率及焊接速度一定时，焦点位于工件表面下 0.4 mm 处时可获得最大熔深。

参 考 文 献

- Xiong Jiangang, Hu Lunji, Liu Jianhua *et al.*. Study on laser welding of zinc coated steel and the effects of zinc vaporization [J]. *Laser Technology*, 1998, **22**(1):26~28
熊建钢, 胡伦骥, 刘建华 等. 镀锌板激光焊接工艺及锌行为研究 [J]. *激光技术*, 1998, **22**(1):26~28
- Xu Rongqing, Chen Xiao, Chen Jianping *et al.*. Shock wave and cavitation effects by laser ablation of metal in water [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12):1643~1648
徐荣青, 陈 笑, 陈建平 等. 激光烧蚀水下金属产生冲击波和空泡效应的研究 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(12):1643~1648
- Hussein Badran, Zhaoshuo Tian, Qi Wang. Compact waveguide CO_2 laser excited by a RF power supply [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(10):597~599
- Hong Lei. The study of stability model of laser welding aluminium alloys and the influence of heat input parameters to the stability [D]. Beijing: Post Ph. D Dissertation, Tsinghua University, 2003. 14~19
洪 蕾. 激光焊接铝合金稳定性计算模型和热输入工艺因素影响的研究 [D]. 北京: 清华大学博士后论文, 2003. 14~19
- Zhang Yi, Li Lijun, Jin Xiangzhong *et al.*. Diathermancy study on keyhole effects in laser deep penetration welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1538~1542
张 屹, 李力钧, 金湘中 等. 激光深熔焊接小孔效应的传热性研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1538~1542
- Tang Xiahui. Laser Welding of Diamond Tools [M]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2004. 125~126
唐霞辉. 激光焊接金刚石工具 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004. 125~126
- Li Lijun. Modern Laser Material Processing and Equipment [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1993. 213~214
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. 213~214