

镀锌钢板激光焊接关键技术研究

张屹 李时春 金湘中 陈根余 梅丽芳

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南长沙 410082)

摘要 镀锌钢因其良好的抗腐蚀性能而广泛应用于各个领域,而镀锌层的存在使得镀锌钢的焊接过程和焊接质量受到不利影响。激光焊接是实现镀锌钢焊接的一种新方法。激光深熔焊接镀锌钢的过程中存在着锌蒸气和锌等离子体两种特有焊接特征。镀锌钢激光焊接的根本问题是锌蒸气对焊接过程的影响,减少镀层锌的蒸发和顺利排出锌蒸气是降低锌蒸气影响的根本途径。围绕镀锌钢激光焊接的关键技术,讨论了提高激光焊接镀锌钢焊接质量的多种工艺和方法,包括寻求特定的工艺措施、工艺参数优化和焊接过程的仿真优化以及在线检测控制。

关键词 激光焊接; 镀锌钢板; 锌蒸气; 工艺措施

中图分类号 TG456.7

OCIS 140.3390 140.3380

文献标识码 A

Key Technology of Laser Welding of Galvanized Steel

Zhang Yi Li Shichun Jin Xiangzhong Chen Genyu Mei Lifang

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Galvanized steel is widely used in industry due to its excellent corrosion resistance. However, the zinc coating greatly reduces the welding process property of galvanized steel. As a new technique, laser welding is implemented to realize the joint of galvanized steel. There are two unique characteristics, zinc vaporization and zinc plasma, existing in deep penetration laser welding of galvanized steel. The key issue of laser welding of galvanized steel is the influence of the zinc vapor during the welding process. The reduction and elimination of the zinc coating evaporation are the fundamental methods to avoid the influence of the zinc vapor. Based on the key technology of laser welding of galvanized steel, varied welding processes and solutions are discussed to improve the quality of the laser welding, including specific processes, process parameters and simulation optimization, as well as the online monitoring and controlling during the welding process.

Key words laser welding; galvanized steel sheets; zinc vapor; process measures

1 引言

镀锌钢的镀锌层不但具有物理屏蔽作用,而且对钢基体还起到了电化学保护作用^[1,2],其良好的抗腐蚀性能使得镀锌钢在许多领域得到广泛的应用,包括电力、交通、建筑、化工、通风供热设施以及家具制造等行业。尤其在汽车制造中,各种普通镀锌钢、高强度镀锌钢、超高强度镀锌钢的应用大幅提高了车身等部件的抗腐蚀性能和汽车的使用寿命。

然而,镀锌钢中镀锌层的存在,使得镀锌钢的焊接过程和焊接质量受到不利影响。原因是在镀锌钢的焊接过程中,镀层锌和基体钢物理特性的极大差异(镀层锌的熔点是 $420\text{ }^{\circ}\text{C}$,沸点是 $908\text{ }^{\circ}\text{C}$,基体钢的熔点是 $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$,沸点是 $2861\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[3]),镀层锌的气化先于基体钢的熔化,这一现象对镀锌钢的焊接过程和质量都有很大影响。目前,镀锌钢的主要焊接工艺有电阻点焊、电弧焊和激光焊接3种。对电阻点焊而言,由于镀锌层的存在,焊接时电极易与锌层合金化,降低了电极的寿命^[4,5]。而采用电弧焊焊接镀锌钢时,由于锌的低沸点,在电弧刚接触到镀锌层时,锌迅速气化,产生的锌蒸气向外喷射,很容易使焊接产生熔渣粒子、气孔、飞

收稿日期: 2009-08-17; **收到修改稿日期**: 2009-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(50805045)和高等学校博士学科点专项科研基金(20070532003)资助课题。

作者简介: 张屹(1976—),男,博士,副教授,主要从事激光焊接、切割等方面的科研和教学工作。

E-mail: zy2100_hn@yahoo.com.cn

溅、未熔合及裂纹等焊接缺陷,电弧的稳定性也因此受到影响,焊接质量下降,同时焊接过程中还会产生大量烟尘^[3,4]。另外,由于电弧焊的焊缝宽度较大,且热输入量大,镀层锌的大量气化降低了镀锌钢焊缝处的抗腐蚀性能。

镀锌钢采用激光焊接时,同样存在镀锌层的气化以及焊接气孔、飞溅、未熔合等缺陷。但激光焊接与电阻点焊和电弧焊相比,激光焊接单位热输入量少、热变形小、焊缝深宽比大、焊接速度快、焊缝强度普遍高于母材、镀层锌的损耗低,且激光焊接是单边加工、复杂结构适应性好、易于实现远程焊接和自动化^[4,5]。例如,德国奥迪、奔驰、大众,瑞典的沃尔沃,美国通用、福特,意大利菲亚特,日本的日产、本田和丰田等汽车公司,都采用了激光焊接技术,建立了激光焊接生产线,在有的汽车生产中激光搭接焊缝已达到 100 m 长^[6]。在国内汽车厂家,只有少数几家企业(如:上海通用、一汽奥迪、大众等)引进国外的设备和技术,建立了激光焊接生产线。

本文以镀锌钢板为例,在分析镀锌钢板激光焊接特性的基础上,综述了提高镀锌钢板焊接质量的工艺措施,焊接过程的优化仿真及焊接质量的在线检测与控制的方法。

2 镀锌钢板激光焊接特性

激光焊接过程,根据焊接机理的不同可以分为热传导焊与深熔焊^[7]两类。两者之间的根本区别为是否存在焊接小孔。激光焊接镀锌钢板时,一般采用深熔焊接。但由于镀锌钢板中镀层锌的存在,激光深熔焊接镀锌钢板的过程存在锌蒸气和锌等离子体两种特有的焊接特征。

2.1 锌蒸气

当高能量密度的激光束照射到工件表面时,工件吸收激光能量,温度迅速升高,由于锌的低沸点,镀锌钢板的镀层锌极易气化而形成锌蒸气。当锌蒸气被压入焊接熔池时,对熔池产生扰动,熔池中的气泡不易排出,对焊接过程的影响最大。因为激光焊接熔池的冷却速度很快,熔池凝固时间很短,熔池中的气泡极易使焊缝产生焊接缺陷,如飞溅、熔渣、气孔、未熔合,影响焊缝成形,降低焊缝质量。同时,锌的蒸发使镀锌层的含锌量减少,对镀锌层的防腐性也有一定的影响^[8,9];还有文献^[10]中提到锌层的蒸气对人体有害,影响工作环境。因此解决锌蒸气问题成为镀锌钢板激光焊接的根本问题。

镀锌钢板的激光焊接过程中,锌蒸气的产生可以分为两类:1)上层锌和下层锌的气化;2)叠层搭接焊时中间层锌的气化,如图 1 所示。上下表层锌蒸发而产生的锌蒸气膨胀并向空中自由扩散,对焊接质量无直接影响。镀锌钢板叠层搭接焊中,中间镀锌层气化产生的锌蒸气的膨胀扩散途径有 3 种:1)经由板间间隙膨胀扩散至空气中;2)经由焊接小孔膨胀扩散至空气中;3)锌蒸气被压入焊接熔池。对于镀锌钢板叠层搭接焊锌蒸气经由板间间隙扩散排出的方式,合适的板间间隙值是控制锌蒸气排出的关键因素。锌蒸气经由焊接小孔排出是另一种有效的途径。但是,焊接小孔是细长小孔且焊接速度较快,有时锌蒸气无法通过板间间隙和焊接小孔完全排出而被强大的蒸气压力压入焊接熔池,形成熔池中的气泡。当熔池凝固时间足够长,气泡会随熔池的搅拌从内部熔池向熔池表面移动并最终排到空气中;但如果熔池凝固时间短,熔池中锌蒸气的气泡在向熔池外移动和挤压过程中容易形成飞溅和熔渣,或者留在熔池内形成焊缝中的气孔,严重时会在板间形成大气泡,阻碍板间的熔合。实际镀锌钢板的激光焊接过程中,锌蒸气的迅速产生且蒸气压力大,锌蒸气同时经由上述 3 种扩散途径排出。

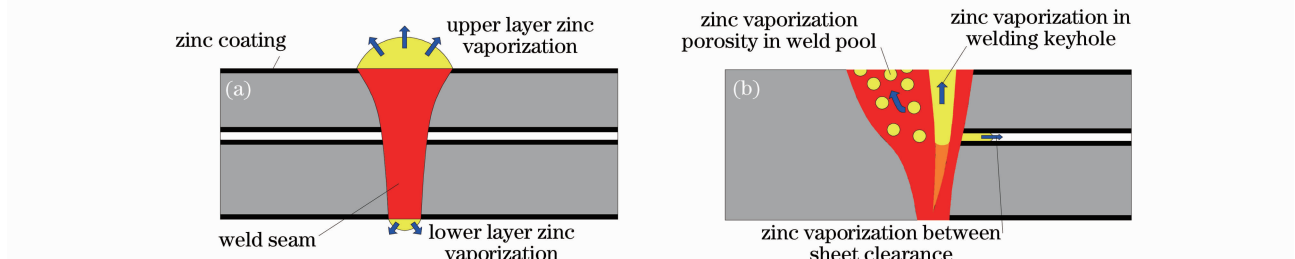


图 1 锌蒸气的扩散。(a)上下表层锌蒸气扩散,(b)中间层锌蒸气扩散

Fig. 1 Diffusion of zinc vapor. (a) on top and bottom surface, (b) in middle layer

2.2 锌等离子体

光致等离子体是激光深熔焊接的重要特征。当激光束照射到镀锌钢板上,表层锌和基体钢吸收激光并迅速气化,形成锌和铁的混合金属蒸气。金属蒸气在激光的辐照作用下电离并形成等离子体。由于锌的气化温度低于铁的气化温度,锌蒸气比铁蒸气更容易产生,锌蒸气气压比铁蒸气气压高 8 个数量级^[11];同时当等离子体温度在 10^4 K 时,锌等离子体的电子密度比铁等离子体的电子密度大 2 个数量级(Zn: $2.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, Fe: $4.1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)^[11]。因此 Weichait Chen 等^[11]认为,锌的蒸气将加剧等离子体的产生,是镀锌钢板激光焊接时大量等离子体存在的主要原因。然而,熊建钢等^[12]从理论计算探讨锌蒸气问题时发现:在相同的条件下,锌比铁的蒸气密度约小 25%,而锌的电离能(9.36 eV)比铁(7.83 eV)大,所以在被激光辐照气化的金属蒸气中,锌并不比铁优先电离,也就是说锌蒸气并不加速等离子体的形成。正是因为锌蒸气不易电离,使得在焊接过程中可观察到大量锌蒸气的存在。

无论锌是否加剧了等离子体的产生,在镀锌钢板激光焊接过程中仍然有大量的光致等离子体存在。等离子体对激光束有严重的阻隔作用,它不但对激光束有散射作用,而且会吸收激光能量,使得照射到工件上的能量减少,影响焊接小孔稳定形成,从而降低了焊接过程的稳定性。有关镀锌钢激光焊接的锌行为研究,特别是锌等离子体和小孔效应的实验研究目前比较缺乏。Yi Z. 等^[13]分别对焊接小孔内和小孔外的等离子体做了研究,得出一定浓度的小孔孔内等离子体对激光能量的吸收是有利的,而孔外的等离子体云对焊接过程中激光能量的吸收有屏蔽作用。

3 镀锌钢板激光焊接质量的提高方法

3.1 寻求特定的工艺措施

镀锌钢板激光焊接过程中锌蒸气对焊接质量的影响最大,因此采取相应措施减少锌蒸气的影响是提高镀锌钢激光焊接质量的首要任务。一般而言,镀锌钢板激光焊接接头的形式有搭接、对接、角接、卷边接头等。而实际生产中,叠层搭接接头形式应用最多,且锌蒸气对该种接头形式的焊接质量影响最为严重。已报道的解决镀锌钢激光焊接时锌蒸气问题的各种特定工艺措施,其根本途径有两类:1)使激光焊接过程中不产生锌蒸气或产生极少量的锌蒸气;2)使产生的锌蒸气尽可能地顺利地排到空气中。锌蒸气的排出途径又主要有经由板间间隙、焊接小孔、熔池冒泡排出 3 种。同时,也有文献研究了锌蒸气排出的其他方式,如预先开排气孔^[11]、预先切割出排气缝^[14]。此外,减少等离子体对焊接过程的影响是提高镀锌钢板激光焊接中的另一个重要任务。

3.1.1 激光填丝钎焊

激光钎焊技术在汽车制造中已得到很好的应用,如车顶与侧围的连接,车厢后盖的激光钎焊^[15]。激光填丝钎焊是激光焊接与钎焊技术的组合,具有钎焊的特性,即焊接过程中钎料吸收大部分热量而熔化,母材吸收少部分热量基本不熔化。采用激光填丝钎焊焊接镀锌钢板最大的优势是母材吸收热量少,大大减少了镀锌层的气化,减少了锌蒸气的影响,提高了焊接质量。在激光钎焊焊接过程中关键技术是激光能量在钎料与母材上的分配,要得到好的焊接效果,激光功率、焊接速度、焦点位置、光斑直径、填充材料、送丝速度、送丝方向都要很好的控制匹配^[5,15~18]。一般而言,激光钎焊过程中减小焊丝与母材的距离与夹角,保证钎料熔化后与母材直接接触可获得较好的焊缝成形^[5],并且采用前方送丝较后方送丝的焊接效果好^[16]。其原因是后方送丝时,少量光照在镀锌层上产生锌蒸气出现喷射气孔;前方送丝时,少量光照在熔池中使熔池温度升高无不良影响。在相同的离焦量下,将激光束沿焊接方向倾斜一定角度入射,激光由圆形光斑变成椭圆光斑,激光照射面积增加,有利于钎料铺张,此时焊缝的外观成形优于激光束垂直入射^[18]。此外,焊接汽车车顶时,采用带角度的上下板搭接激光填丝钎焊,一定的搭接角度有利于产生的锌蒸气逃逸,提高焊接质量^[15]。如要提高激光钎焊的速度,可以对焊丝先行预热(热丝激光钎焊),增加钎焊的填充量,加快焊丝铺展,提高焊速。激光钎焊采用的填充钎料一般为铜基合金,如 CuSi_3 (熔点 $950 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1050 \text{ }^\circ\text{C}$), CuAl_8 , CuSn 等,其中 CuSi_3 用的最多,因为这种材料有好的流动性^[5]和挺直性^[16]。

3.1.2 板间间隙法

镀锌钢板的叠层搭接激光焊,常在搭接的两层或多层板间留出一定间隙,以便中间镀层锌产生的锌蒸气

顺利从间隙中排出。板间间隙法可以通过控制搭接板间的夹紧力控制板间间隙,在板间预夹薄层垫片保证夹紧后板间间隙值^[19],或采用特殊的结构保证合适的间隙值,如图 2 所示^[20]。

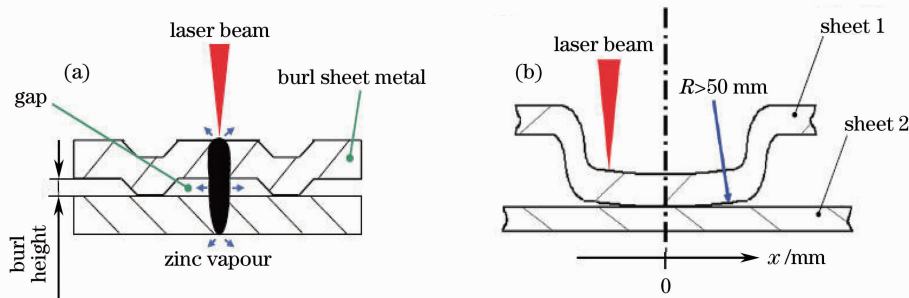


图 2 (a)节薄板间隙焊,(b)带圆弧结构间隙焊

Fig. 2 (a) Gap welding of burl sheet metal, (b) gap welding of the radius configuration

在板间夹层粉末状材料^[11],完全夹紧时锌蒸气能够从粉末间的间隙排出。采用间隙法焊接时,关键就是板间间隙的控制。间隙过小,锌蒸气不能完全经由间隙排出,焊接过程容易产生焊接气孔、飞溅等缺陷,焊缝强度下降。间隙过大,锌蒸气可能会阻隔焊缝熔合而产生假焊;或由于间隙太大,熔池金属材料因填充间隙而使焊缝上表面凹陷,焊缝质量下降^[9,19,21]。对搭接焊间隙的研究,板间间隙常在 0.1~0.2 mm^[9,19],但也视实际情况不同而定,如:镀层种类及厚度、母材厚度、激光束参数、焊接速度等。Jae-Do Kim 等^[4]对镀锌钢激光搭接焊板间间隙进行了理论研究,并建立了数学模型

$$g = AVt_{Zn}t_p^{1/2}, \quad (1)$$

式中 g 为间隙值, A 为材料系数(镀锌钢板 $A = 16.1 \text{ sm}^{-1/2}$), V 为焊接速度, t_{Zn} 为镀锌层的厚度, t_p 为焊接母材的厚度。虽然这种预留间隙的焊接方法在镀锌钢激光焊接时可以很好地排出锌蒸气,减少焊接气孔,能得到较好焊接质量,但此方法对预留间隙值的精度要求较高。对于曲面型镀锌钢板焊接,其间隙值更难以达到理论要求^[6,11,16,22]。

3.1.3 吹送保护气体

吹送保护气体是激光焊接中最常用的工艺措施,其方式有同轴吹气和侧吹气两种,其控制参数有保护气体种类^[23,24]、气体流速^[12]、侧吹方向^[25]、侧吹角度^[12]、喷嘴尺寸^[23,26]。保护气体在激光焊接中起到的作用主要有 3 个方面:1)对焊缝进行保护,防止焊缝氧化并加快焊缝冷却;2)在一定程度上抑制等离子体对焊接过程的影响;3)防止溅射物和金属蒸气对聚焦镜片的污染。同轴吹气保护,气流与焊接时产生的金属蒸气和等离子体形成对流,降低蒸气和等离子体的温度,同时增加小孔内的气压,抑制孔内的金属蒸气和等离子体向孔外喷射,有利于焊接小孔的稳定和降低孔外等离子体的屏蔽作用。而侧吹气体保护,能够吹散熔池表面的等离子体和飞溅,减少焊缝表面缺陷。研究表明,镀锌钢板激光焊接时,合适的吹气方式和吹送气体参数有利于增加熔深,减少焊缝气孔,抑制等离子体的不利影响,得到好的焊缝成形和表面质量^[12,24,25,27~29]。

3.1.4 添加元素法

在镀锌钢板激光焊接中添加与锌发生化学反应的异种元素是抑制锌蒸气产生的另一种有效途径^[5,11,30]。在保护气体 Ar 中混合加入少量 O_2 (2%~5%),利用氧气与锌反应而减少锌蒸气对焊接过程的影响^[11],这种方法不足是增加了焊缝的氧化。采用三明治形式的搭接焊^[5],预置铜粉在两层板间,利用铜与锌的冶金反应降低锌蒸气对焊接过程的影响。采用添加铜焊接镀锌钢板,通过焊接过程中的光谱分析表明,锌蒸气的产生明显减少,且焊缝抗腐蚀性和焊缝机械性能没有因铜的加入而降低。铜的添加显著增加了焊接过程的稳定性;添加铜粉的前后,焊缝中的气孔数量由 10%降低至 1%。

3.1.5 开排气孔的方法

开排气孔的方法是预先在需要焊接的母材上加工出排气小孔,从而使激光焊接镀锌钢板的过程中产生的锌蒸气能够从排气小孔中排出。Weichiat Chen 等^[11]采用脉冲 YAG 激光预先在搭接板的下层板上打出合适的排气小孔,再用 1500 W 连续 CO_2 激光焊接双层搭接镀锌钢板。排气小孔与实际焊缝的位置及排气小孔尺寸是获得良好焊接质量的关键。通过有限元优化分析和焊接实验发现,焊接速度为 9 m/min,连续 CO_2

激光焦点直径 0.2 mm, 预先在下层镀锌钢板上焊缝方向离焊缝中心 0.14 mm 处打出直径为 0.07 mm 的排气小孔, 焊接时能得到好的焊接质量。激光焊接镀锌钢板采用开排气孔的方法焊接, 能减少锌蒸气的影响, 减少焊接气孔, 得到的焊缝因熔融金属填满了所开的排气小孔形成类似于铆接的结构而增强了抗拉强度; 而当焊接速度过高时, 因排气小孔无法被熔融金属填满得到的焊缝抗拉强度反而下降。开排气孔的方法与预留间隙法相比, 预留间隙法不适于实际生产, 其间隙值大小难以保证; 开排气孔方法能够解决锌蒸气问题, 且焊缝强度更高、可实践性更好, 不足的是需要额外开排气孔, 增加了工序^[11]。

3.1.6 双光束激光焊接

双光束激光焊接方法是近几年出现的一种新方法^[14,22,31~35]。双光束焊接根据所采用的光源分为两种: 同一激光源分出的两束激光^[17,22,34]和两个激光源发出的两束不同激光束(如 CO₂ + 高功率激光二极管及 YAG + 高功率激光二极管^[31,32,35,36])。焊接过程中一束光作为辅助加工, 另一束光实现焊接功能。采用双光束激光焊接方法焊接镀锌钢板, 根据辅助光束的作用机理分为四类: 1) 延迟焊接小孔闭合; 2) 延迟熔池凝固; 3) 预先切割出细缝^[14]; 4) 预先气化锌层^[11,22,36]。先采用 YAG 激光在搭接镀锌钢板上切割出一条细缝, 再用 CO₂ 激光实现焊接^[14]。细缝的作用: 一是预先去除部分锌层; 二是便于焊接过程中锌蒸气从细缝中排出。切割细缝与焊接过程同时进行有利于保证焊接光束与切缝的位置关系。若采用的双光束是同一光源分出的两束光, 前一光束可气化镀锌层(预先气化宽度为焊接熔池的宽度, 如 2 mm^[22]), 后一束光实现焊接作用。采用双光束激光焊接镀锌钢板, 关键是前后光束的相互位置与功率匹配, 在合适的参数匹配下双光束焊接能解决锌蒸气问题, 得到较好的焊缝质量。然而, 要得到两束激光必须增加焊接装备, 也增加了加工成本。

3.1.7 脉冲激光焊接

脉冲激光与连续激光焊接的区别是焊接小孔的间断出现, 焊缝熔池也随着焊接小孔的波动而波动, 且相邻两个焊接小孔与熔池之间存在一定的重叠区, 如图 3 所示^[37]。研究结果表明^[10,37~42], 脉冲激光焊接镀锌钢板的关键和难点是控制脉冲激光束参数(脉冲波形、脉冲能量、脉冲宽度、脉冲重复频率、脉冲占空比、平均功率密度峰值、平均功率)和焊接速度的良好匹配, 得到合适的重叠率, 以便将焊接过程中产生的锌蒸气经由焊接小孔和熔池排出, 得到好的熔池一致性和焊接质量^[10,37,40]。采用 CO₂ 脉冲激光难于 YAG 脉冲激光实现无孔焊缝, 其原因是 YAG 激光的脉冲峰值功率密度相比 CO₂ 激光更高^[35]。

上述各种工艺措施均能不同程度地提高镀锌钢板的激光焊接质量, 同时存在一定的局限性和不足, 如增加额外装置和工序、设备复杂、成本增加、不易在生产中实践等。在实际生产中应用最为广泛的是激光填丝钎焊和预留间隙焊接。尤其是在汽车制造的镀锌板焊接中, 激光填丝钎焊具有焊缝成形和抗腐蚀性能良好的特点, 预留间隙焊由于无需增加额外设备与工序, 操作简单而得到应用。侧吹保护气体则是激光焊接中用以抑制等离子体提高焊接质量的最常用工艺。其他焊接方法则仍处于实验研究阶段, 广泛应用于生产中还需要进一步深入探讨。

此外, 激光焊接镀锌钢板时诸如采用立焊、激光束的来回摆动焊接(与双焦点焊效果相似)以及焊前预先去除焊缝处的锌层等^[9,11,21,42~44]也是通过解决锌蒸气问题以提高焊接质量的重要方法。采用立焊焊接镀锌钢板的过程中, 金属溶液所受重力与焊接小孔深度方向垂直有利于保持小孔打开和锌蒸气顺利排出, 且立焊方式不会使熔池焊缝产生表面下凹现象^[9,21]。立焊方式焊接镀锌钢板与平焊方式相比, 焊接过程更稳定, 焊缝成形良好, 减少了锌蒸气产生的气孔和飞溅。然而, 由于实际生产中受到实际焊接条件的限制, 立焊方式应用的灵活性受到限制。

3.2 工艺参数优化与仿真优化

对焊接过程的优化是提高焊接质量的重要方法。其中包括: 焊接接头形式的优化、焊接参数的优化、焊接过程的机理分析以及焊接过程的数学建模与仿真分析等。

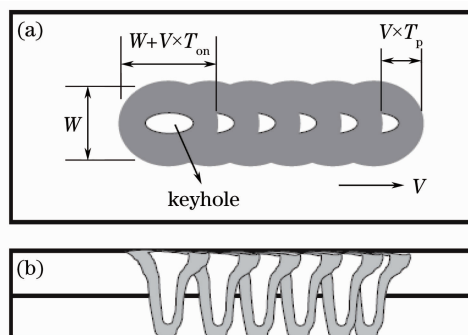


图 3 由焊接小孔形成的一系列焊缝重叠区。

(a) 平面视图, (b) 侧面视图

Fig. 3 A series of partially overlapping spot welds made with a keyhole mode. (a) plan view, (b) side view

工艺参数优化中常用的有正交实验方法、均匀实验法和单个参数的对比实验法,以此比较各参数的变化对焊接质量的影响程度。激光焊接镀锌钢板实验中,常用来比较优选的工艺参数有:激光功率、脉冲激光参数、焊接速度、焦点位置,吹气参数等。激光焊接 0.7 mm 电镀镀锌钢板搭接,Y. F. Tzeng 等^[10,37,39,41]采用脉冲激光焊接,比较分析了脉冲激光束参数对焊缝表面质量和焊缝机械性能的影响。在采用 Nd:YAG 脉冲激光焊接时,光斑直径为 0.8 mm,聚焦在材料表面,45°侧吹 Ar 气 20 L/min,平均功率小于 400 W,平均峰值功率密度在 $(3.73\sim 5.47)\times 10^9$ W/m² 范围内,焊接速度在 0.8~3 mm/s 范围内,能够得到可接受的焊接结果。采用高功率 CO₂ 脉冲激光焊接时,光斑直径为 0.75 mm,聚焦在材料表面,45°侧吹 Ar 气 30 L/min,平均峰值功率在 1400~1800 W 范围内,速度为 6~21 mm/s,占空比为 0.7~0.9,频率为 300~500 Hz,能够得到表明外观较好的焊缝。李明星等^[24]研究了保护气体种类对镀锌板激光焊接质量的影响,对比了保护气体 He, Ar, N₂ 及 Ar+N₂ 混合气体对镀锌板对接焊焊缝形貌、强度和成形性的影响,得出保护效果而言 He 最好,考虑经济性而言 N₂ 最好。

通过镀锌钢板激光焊接的机理研究,建模和仿真优化工艺参数则是分析和认识焊接机理和降低实验费用的重要途径。建模仿真时,激光束加热过程可以被简化为移动点热源和线热源^[45],或者直接由实验拍摄得到实际的小孔热源^[46];所建模型可以是一维、二维或三维^[30]。常用的建模与求解方法为有限差分法^[47]、有限单元法^[22,48]与人工神经网络方法^[47]。A. K. Dasgupta 等^[30]对 CO₂ 激光焊接镀锌钢板搭接焊进行了固、液、气、等离子体四态三维建模仿真并分析,固液相交界采用混合态理论、液气相仿真采用水平集方法;考虑了焊接小孔内部锌和铁蒸气的比重与压力、熔池液体流速与液体张力、等离子体对激光能量的吸收系数,选用合适的网格划分精度建模仿真。仿真结果表明,锌蒸气的存在使得焊缝熔池的尺寸波动增大,强大的锌蒸气压力增加了熔池液体流速和小孔内气体流速使得焊接小孔容易崩塌,熔池和焊接小孔波动增加,温度分布不均,焊接易出现焊接缺陷,等离子体吸收激光能量使得等离子体峰值强度波动增加到 20%。通过建模仿真与实际镀锌钢板激光焊接实验对比,证实所建模型与实际焊接过程很接近,利用该模型设置相应的参数可模拟焊接过程分析温度、强度、压力和速度变化。

3.3 镀锌钢板焊接过程的在线监控

对加工过程实现在线监控是现代制造过程中保障加工质量和降低成本的重要手段。激光焊接过程的在线检测与控制则是提高焊接质量和实现自动化的关键技术,也是焊接技术发展的必然趋势。焊接过程的在线监测技术可以分为相对光束的焊前监测、焊中监测和焊后检测,其中焊前监测和焊中监测是提高焊接质量的重要途径。

焊缝跟踪作为一种重要的焊前监测技术,主要用于对接焊和其他对焊接轨迹有严格要求的焊接过程。镀锌钢板的激光对接焊时,要求板间的对接缝宽非常小(一般在 0.1~0.5 mm 之间^[8]),且不能大于焦点光斑直径(聚焦光斑直径常小于 0.5 mm^[8])。对于实际生产中的曲线轨迹焊接,由于装夹误差和焊接设备的移动轨迹误差的叠加,理论移动轨迹与实际移动轨迹会产生偏移,焊接时会出现多种焊接缺陷。此时,采用焊缝跟踪技术可提高焊接质量,并有利于实现自动化无人加工。焊缝跟踪技术的研究包括焊缝偏差信号获取、焊缝跟踪传感器研究、控制系统和控制方法的研究以及焊缝偏差补偿方法等^[49~52]。

焊接过程中的信号,如声音、光、电、图像、热等信号^[6,53,54]常用于焊中监测。光电二极管和高速摄像机是最常用于在线信号采集的一维和二维传感器,光谱检测也是常用的信号检测方法。在线检测控制可以分为 3 步^[6,53,54]:对反应焊接缺陷、焊缝成形质量和焊接过程稳定性等信号的采集;通过傅里叶变换、小波分析等方法做数据提取、处理和分析;基于人工神经网络、智能控制、模糊控制、专家系统等控制系统的实时控制。镀锌钢板激光焊接过程中,锌蒸气的作用使焊接过程更加复杂,采集信号和控制焊接过程的难度大为增加^[6]。在镀锌钢板搭接焊过程中采集焊缝熔池和焊接小孔波动的信号,分析该信号的频率和振幅的波动信息以控制激光输出功率,实现对焊接过程的监控^[6]。一般而言,在零间隙搭接焊时,由于锌蒸气影响较大,仅监测小孔和熔池的波动信号以控制激光输出功率而不辅以在 3.1 节中提到的工艺方法是很难实现无缺陷焊接的。

在镀锌钢激光焊接中锌等离子体信号的采集可以获得锌等离子体的温度和电子密度信号,通过间接监测锌等离子体温度和电子密度的变化则是实现焊接过程在线监测控制的一种新方法。

4 结 论

锌蒸气和锌等离子体是激光深熔焊接镀锌钢板的过程存在的两种特有焊接特征。镀锌钢板激光焊接的根本问题是锌蒸气对焊接过程的影响,锌蒸气的产生包括上表层锌和下表层锌的气化以及叠层搭接焊中中间层锌的气化。在镀锌钢板的叠层搭接焊中,中间镀锌层气化产生的锌蒸气的膨胀扩散途径有三种:1)经由板间间隙膨胀扩散至空气中;2)经由焊接小孔膨胀扩散至空气中;3)锌蒸气被压入焊接熔池。减少镀层锌的蒸发和顺利排出锌蒸气是提高镀锌钢激光焊接质量的根本途径,其实现工艺措施包括了吹送保护气体、板间间隙法、添加元素法、开排气孔法、双光束激光焊接、脉冲激光焊接、激光填丝钎焊、立焊、激光束的来回摆动焊接以及焊前预先去除焊缝处的锌层等方法。工艺参数的正交实验优化、焊接过程的建模与仿真优化以及在线监测与控制技术则是提高镀锌钢激光焊接质量的重要方法。

目前,镀锌钢激光焊接的锌行为研究,特别是锌等离子体和小孔效应的实验研究比较缺乏,锌行为在焊接过程中的数值模拟仿真仍存在困难。此外,镀锌钢脉冲激光焊接机理、采用不同激光器(如光纤激光器、短脉冲激光器等)实现镀锌钢的激光焊接工艺以及镀锌钢与其他材料的焊接机制、镀锌钢板激光焊接过程的实时监控技术,还有待更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Tan Juan, Wang Jun, Gao Haiyan *et al.*. Recent advances in high strength galvanized sheet steels[J]. *Materials Review*, 2008, **22**(2): 64~67
谭娟,王俊,高海燕等. 高强钢合金化热镀锌研究进展[J]. 材料导报, 2008, **22**(2): 64~67
- 2 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
伍强,陈根余,王贵等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 3 Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Li Liqun *et al.*. Laser brazing with wire feed of galvanized thin sheets[J]. *Applied Laser*, 2004, **24**(6): 357~360
封小松,陈彦宾,李俐群等. 镀锌板激光填丝钎焊[J]. 应用激光, 2004, **24**(6): 357~360
- 4 Jae-Do Kim, I. Na, Chan-Cheol Park. CO₂ laser welding of zinc-coated steel sheets[J]. *KSME Inter. J.*, 1998, **12**(4): 606~614
- 5 A. K. Dasgupta, J. Mazumder. Laser welding of zinc coated steel: an alternative to resistance spot welding[J]. *Sci. Technol. Weld. Joining*, 2008, **13**(3): 289~293
- 6 M. Schmidt, A. Otto, C. Kägeler. Analysis of YAG laser lap-welding of zinc coated steel sheets[J]. *CIRP Annals-Manuf. Technol.*, 2008, **57**(1): 213~216
- 7 Chen Yanbing. *Modern Laser Welding Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2005. 64~65
陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 64~65
- 8 Huang Zhijun, Hu Lunji, Liu Jianhua *et al.*. Research on zinc distribution and corrosion resistance of laser welding joint of galvanized steel[J]. *Welding and Joining*, 2004, (5): 17~20
黄治军,胡伦骥,刘建华等. 镀锌板激光焊接接头锌的分布及耐腐蚀性实验[J]. 焊接, 2004, (5): 17~20
- 9 Xi Shengyin. Robust analysis and experiment of laser welding process parameters on overlap joint[J]. *Applied Laser*, 2008, **28**(4): 227~230
席升印. 搭接接头激光焊接工艺参数实验及其稳健性分析[J]. 应用激光, 2008, **28**(4): 227~230
- 10 Y. F. Tzeng, F. C. Chen. Effects of operating parameters on the static properties of pulsed laser welded zinc-coated steel[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2001, **18**(9): 641~647
- 11 Weichiat Chen, Paul Ackerson, Pal Molian. CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes[J]. *Mater. Design*, 2009, **30**(2): 245~251
- 12 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): 26~29
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): 26~29
- 13 Yi Z, Lijun L, Gang Z. Spectroscopic measurements of plasma inside the keyhole in deep penetration laser welding[J]. *J. Phys. D*, 2005, **38**(5): 703~710
- 14 S. Iqbal, M. M. S. Gualini, F. Grassi. Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: Analysis and comparison[J]. *J. Mater. Proc. Technol.*, 2007, **184**(1-3): 12~18
- 15 Zhang Hailiang. Study on laser welding process in passat linyu[J]. *Applied Laser*, 2006, **26**(1): 90~92

- 张海亮. 帕萨特领驭车身激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2006, **26**(1): 90~92
- 16 Fenggui Lu, Bin Feng Lu, Xinhua Tang *et al.*. Study of influencing factors and joint performance of laser brazing on zinc-coated steel plate[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2008, **37**(9-10): 961~965
- 17 Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Ni Jiaming *et al.*. Dual laser beam brazing process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(9): 17~20
- 封小松, 陈彦宾, 倪加明 等. 双光束激光钎焊工艺[J]. 焊接学报, 2006, **27**(9): 17~20
- 18 Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Li Liqun. Study of seam appearance and joint quality in laser brazing for galvanized steel sheets [J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(1): 23~26
- 封小松, 陈彦宾, 李俐群. 镀锌板激光钎焊钎缝成形和接头质量研究[J]. 应用激光, 2005, **25**(1): 23~26
- 19 Huang Haijun, Xi Shengyin, Ding Jianjun. The research on laser welding processes of zinc-coated steel of car body for improving the influence of zinking layer[J]. *Applied Laser*, 2005, **25**(5): 306~308, 354
- 黄海军, 席升印, 丁健君. 降低镀锌层影响的汽车用镀锌钢板激光焊接工艺研究[J]. 应用激光, 2005, **25**(5): 306~308, 354
- 20 H. Bley, L. Weyand, A. Luft. An alternative approach for the cost-efficient laser welding of zinc-coated sheet metal[J]. *Annals of the CIRP*, 2007, **56**(1): 17~20
- 21 Gao Shaofeng, Tang Xinhua, Xi Shengyin. The laser welding technology of three-layer zinc coated sheet[J]. *Welding & Joining*, 2006, (1): 52~55
- 杲绍风, 唐新华, 席升印. 三层镀锌钢板激光焊接工艺[J]. 焊接, 2006, (1): 52~55
- 22 A. Loreda, B. Martin, H. Andrzejewski *et al.*. Numerical support for laser welding of zinc-coated sheets process development[J]. *Applied Surface Science*, 2002, **195**(1-4): 297~303
- 23 Dominique Grevey, Pierre Sallamand, Eugen Cicala *et al.*. Gas protection optimization during Nd:YAG laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2005, **37**(8): 647~651
- 24 Li Mingxing, Hu Zhihua, Chen Kai. The effect of shielding gas type on laser weldability of galvanized steel[J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(6): 72~73
- 李明星, 胡治华, 陈 铠. 保护气体种类对镀锌板激光焊接性的影响[J]. 激光杂志, 2006, **27**(6): 72~73
- 25 Li Guohua, Jia Shijun, Douglas Steyer *et al.*. Effect of side assist gas orientation on high-power CO₂ laser welding formation [J]. *Hot Working Technology*, 2007, **36**(19): 23~25
- 李国华, 贾时君, Douglas Steyer 等. 侧吹气流方向对大功率 CO₂ 激光焊缝成形的影响[J]. 热加工工艺, 2007, **36**(19): 23~25
- 26 Zhang Linjie, Zhang Jianxun, Duan Aiqin. Effect of side gas on laser induced plasma during laser deep penetration welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, **27**(10): 37~41
- 张林杰, 张建勋, 段爱琴. 侧吹辅助气流对激光深熔焊接光致等离子体的影响[J]. 焊接学报, 2006, **27**(10): 37~41
- 27 Qiang Wu, Jinke Gong, Genyu Chen *et al.*. Research on laser welding of vehicle body[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(2): 420~426
- 28 Wu Qiang, Xu Lanying, Chen Genyu *et al.*. Experimental study about CO₂ laser welding of galvanized sheet[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(6): 571~574
- 伍 强, 徐兰英, 陈根余 等. CO₂ 激光焊接高强度镀锌板的实验研究[J]. 激光技术, 2007, **31**(6): 571~574
- 29 Wu Qiang, Chen Genyu, Xu Lanying *et al.*. CO₂ laser welding of vehicle body[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1726~1731
- 伍 强, 陈根余, 徐兰英 等. CO₂ 激光焊接车身拼焊板[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1726~1731
- 30 A. K. Dasgupta, J. Mazumder, P. Li. Physics of zinc vaporization and plasma absorption during CO₂ laser welding[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(5): 053108
- 31 Xie J. Dual beam laser welding[J]. *Welding J.*, 2002, **81**(10): 223~230
- 32 Roland-Lee F. Laser welding with dual wavelength technology[OB]. Newsletter of Fraunhofer USA, Spring, 2001
- 33 Xie J, Denny P. Galvanized steel joined with lasers[J]. *Welding J.*, 2001, **80**(6): 59~61
- 34 Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **36**(11): 1783~1788
- 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, **36**(11): 1783~1788
- 35 Bi Jijun. Mixing two laser welding technology can improve the welding quality[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(3): 49~51
- 毕纪军. 二种激光焊接技术混合可提高焊接质量[J]. 激光与光电子学进展, 2002, **39**(3): 49~51
- 36 Joachim Milberg, Andreas Trautmann. Defect-free joining of zinc-coated steels by bifocal hybrid laser welding[J]. *Prod. Eng. Res. Devel.*, 2009, **3**(1): 9~15
- 37 Tzeng Yihfong. Gap-free lap welding of zinc-coated steel using pulsed CO₂ laser[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2006, **29**(3-4): 287~295

- 38 Y. F. Tzeng. Process characterization of pulsed Nd:YAG laser seam welding[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2000, **16**(1): 10~18
- 39 Y. F. Tzeng. Pulsed Nd:YAG laser seam welding of zinc-coated steel[J]. *Welding J.*, 1999, **78**(7): 238~244
- 40 Yih-Fong Tzeng. Parametric analysis of the pulsed Nd:YAG laser seam-welding process[J]. *J. Mater. Proc. Technol.*, 2000, **102**(1-3): 40~47
- 41 Y. F. Tzeng. Effects of operating parameters on surface quality for the pulsed laser welding of zinc-coated steel[J]. *J. Mater. Proc. Technol.*, 2000, **100**(1-3): 163~170
- 42 Bilge U, Jurczyszyn C E, Jenuwine W C. Laser Welding Method[P]. U.S. Patent 5183992, 1993-02-02
- 43 Banas C M, Doyle B M. Twin Spot Laser Welding[P]. U.S. Patent 4691093, 1987-09-01
- 44 Stol I, Martukanitz R P. Laser Welding with Beam Oscillation[P]. U.S. Patent 6740845, 2004-05-25
- 45 A. Kaplan. A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile[J]. *J. Phys. D*, 1994, **27**(9): 1805~1814
- 46 Yi Zhang, Genyu Chen, Haiying Wei *et al.*. A novel "sandwich" method for observation of the keyhole in deep penetration laser welding[J]. *Opt. & Laser Eng.*, 2008, **46**(2): 133~139
- 47 Zhang Wei, Xiong Jianguang, Li Zhiyuan. Research progress of modeling deep penetration laser welding[J]. *Applied Laser*, 2000, **20**(5): 205~208
张伟,熊建钢,李志远. 深熔激光焊建模方法的研究进展[J]. *应用激光*, 2000, **20**(5): 205~208
- 48 Feng Xiaosong, Chen Yanbin, Li Liqun. Temperature filed simulation of laser brazing for galvanized steel sheets[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, **42**(8): 882~886
封小松,陈彦宾,李俐群. 镀锌板激光钎焊温度场的数值模拟[J]. *金属学报*, 2006, **42**(8): 882~886
- 49 Lü Xueqin, Zhang Ke, Wu Yixiong. Condition and expectation of automatic weld seam tracking system[J]. *Chinese J. Mechanical Engineering*, 2003, **39**(12): 80~85
吕学勤,张柯,吴毅雄. 焊缝自动跟踪的发展现状与展望[J]. *机械工程学报*, 2003, **39**(12): 80~85
- 50 Ye Jianxiong, Zhang Hua, Yang Wuqiang. Adaptive fuzzy controller based on variable universe for seam tracking[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, **26**(12): 32~34
叶建雄,张华,杨武强. 焊缝跟踪的变论域自适应模糊控制[J]. *焊接学报*, 2005, **26**(12): 32~34
- 51 Xi Feng, Song Yonglun. Study of weld tracking control system based on visual sensor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2006, (5): 30~31, 34
席峰,宋永伦. 基于视觉传感的焊缝跟踪控制系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2006, (5): 30~31, 34
- 52 Du Dong, Wang Shenghua, Wang Li *et al.*. Study of vision sensing technology in seam recognition based on analyzing target feature[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(10): 108~112
都东,王胜华,王力等. 基于对象特征分析的焊缝识别视觉传感技术[J]. *焊接学报*, 2008, **29**(10): 108~112
- 53 Qin Guoliang, Lin Shangyang, Qi Xiubin *et al.*. Study status and development of real-time process monitoring for laser welding[J]. *Welding & Joining*, 2002, (10): 5~8, 40
秦国梁,林尚扬,齐秀滨等. 激光焊接过程实时监测技术的研究现状及其发展[J]. *焊接*, 2002, (10): 5~8, 40
- 54 Zeng Hao, Zhou Zude, Chen Youping *et al.*. The progress of in-process monitoring and quality control of laser welding[J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(1): 2~5
曾浩,周祖德,陈幼平等. 激光焊接质量实时检测和控制的进展[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(1): 2~5