

平吹气流下镀锌钢板的零间隙激光搭接焊研究

雷 斌, 米高阳, 胡席远, 王春明

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074

摘要 为了解决镀锌钢板在激光焊接过程中由锌蒸气引发的焊接缺陷问题, 在小孔上方施加平吹辅助气流, 以维持小孔持续稳定张开并形成稳定的锌蒸气逸出通道; 研究了平吹气流量对镀锌钢板零间隙激光搭接焊缝成形质量及力学性能的影响, 通过焊接过程的实时监测和数值模拟分析了平吹气流对锌蒸气有效逸出的作用机理。结果表明, 对厚度为 1 mm 的 DP590 镀锌钢板进行零间隙激光搭接焊时, 平吹辅助气流能有效促进锌蒸气的逸出, 从而获得表面质量和力学性能较好的搭接接头。

关键词 激光技术; 激光搭接焊; 平吹气流; 镀锌钢板; 零间隙

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1102009

Gap-Free Laser Lap Welding for Galvanized Steel Sheets with Laminar Flow

Lei Bin, Mi Gaoyang, Hu Xiyuan, Wang Chunming

State Key Laboratory of Material Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract To solve the problem of weld defects caused by zinc vapor in the process of laser welding of galvanized steel sheets, we adopt the laminar flow above a keyhole to keep the keyhole open continuously and form a stable zinc vapor venting channel. The effects of the laminar gas flow on weld forming quality and mechanical properties of gap-free laser lap welded joint of galvanized steel sheet are studied. The influencing mechanism of the laminar flow on the effective escape of zinc vapor is analyzed with the utilization of real-time monitoring and numerical simulation of the welding process. The results show that for gap-free laser lap welding of DP590 galvanized steel sheet with thickness of 1 mm, the laminar flow can effectively promote the escape of the zinc vapor, and thus a lap joint with excellent surface quality and mechanical properties is obtained.

Key words laser technique; laser lap welding; laminar flow; galvanized steel sheet; gap-free

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引 言

镀锌层对钢板基体具有物理屏蔽和电化学阴极保护作用^[1], 因此抗腐蚀能力良好的镀锌钢板在家用电器、家具、建筑、运输、电力、交通等诸多行业中广泛应用。特别是在汽车制造领域, 各类镀锌钢板在车身制造中的应用已成主流^[2-3]。激光焊接具有生产效率高、焊接强度高、热变形小等优势, 因此在车身焊接中逐步取代了传统的电阻点焊^[4]。但镀锌层和钢板的热物性存在明显差异, 如锌的熔点为 420 °C, 沸点为 906 °C, 而钢的熔点为 1530 °C, 焊接时镀锌层在母材熔化前就已气化, 产生的高温、高压锌蒸气冲击小孔熔池, 造成焊接失稳, 产生飞溅、气孔、孔洞等缺陷。这些焊接缺陷会使焊缝成形恶化, 严重劣化接头的力学性能^[5-8]。

针对锌蒸气引发的质量问题, 国内外学者进行了大量研究, 并提出多种解决方法。Iqbal 等^[9-10]采用双光束激光焊接时预先在钢板上切出细槽, Chen 等^[11]利用 Nd:YAG 激光在试板底部制造通气孔, Gu 等^[12]利

收稿日期: 2017-07-10; **收到修改稿日期:** 2017-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(51375191)

作者简介: 雷 斌(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事镀锌钢激光焊接方面的研究。E-mail: leibin_hust@qq.com

导师简介: 王春明(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事激光焊接方面的研究。

E-mail: cmwang@mail.hust.edu.cn(通信联系人)

用激光预先在试板结合面上形成小驼峰,Gu^[13]利用激光造窝技术在钢板间形成一定间隙,Mei等^[14]通过在2个试板间设置中间板来形成间隙,张帆等^[15]研究了不同间隙对焊缝成形的影响。这些方法通过人为形成锌蒸气逸出通道保证了锌蒸气的逸出,但需要增加额外工序,无法保证试板尺寸的精度,且间隙处易成为腐蚀源。Dasgupta等^[16]采用在两板间预置铜粉的方式来抑制锌蒸气的产生,Zhou等^[17]在试板间加一层铝箔使其与锌反应形成高沸点合金来抑制锌蒸气的产生,但这些方法会引入新的元素,并导致相应的质量问题。Ma等^[18]利用双光束的前束激光使镀锌层蒸发,利用后束激光施焊。徐国建等^[19]采用光纤耦合半导体激光进行焊接,但这两种焊接工艺复杂,焊接成本激增。Chen等^[20]通过侧吸气嘴产生负压吸力促使锌蒸气逸出,但焊速慢,工艺窗口小,难以满足实际生产的要求。李涛等^[21]采用拼接焊替代搭接焊,避免了锌蒸气的影响,但拼接焊的间隙难以控制,接头强度降低。

为了确定一种工艺简单、质量稳定且不增加成本的镀锌钢板激光搭接焊工艺方法,本课题组在小孔上方施加平吹辅助气流,研究了平吹气流对小孔稳定性和锌蒸气逸出规律的影响,对比了不同气流量时焊缝的成形质量及力学性能,并获得了最优参数;利用电荷耦合器件(CCD)高速相机记录焊接过程中等离子体的动态行为,并借助计算机数值模拟分析了平吹气流对锌蒸气逸出通道迁移的影响。

2 实 验

2.1 材料与设备

实验材料为DP590双面热镀锌钢板,镀层的面密度为 $60\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,热镀锌钢板的尺寸为 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 1\text{ mm}$,化学成分如表1所示。

表1 DP590热镀锌钢板的化学成分(质量分数)
Table 1 Chemical composition of DP590 galvanized steel sheet (mass fraction) %

C	Si	Mn	P	S	Al	B	Cr	Mo	Nb	Ti	Ni	Fe
0.0510	0.0150	1.5100	0.0120	0.0050	0.0330	0.0005	0.0310	0.2500	0.0110	0.0008	0.0200	98.0607

焊接实验设备如图1所示。实验使用的激光器为YLR-4000型光纤激光器,额定功率为4 kW,光斑直径为 0.5 mm ,波长为 $1.07\text{ }\mu\text{m}$ 。平吹辅助气流的气嘴为特制气嘴,气嘴出口直径为 0.27 mm ,平吹气体为氩气。

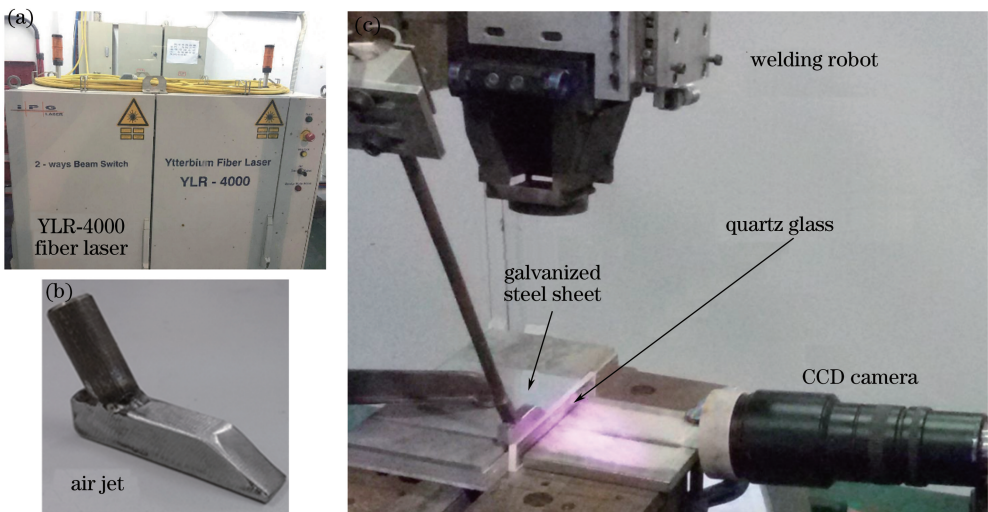


图1 镀锌钢板焊接实验设备

Fig. 1 Experimental setup for welding galvanized steel sheet

2.2 实验方法

实验采用搭接焊的方式进行焊接,当试板间隙小于 0.04 mm 时视为零间隙,工艺参数如表2所示。在给定的功率和焊接速度下进行焊接,然后对比平吹气流量对焊缝成形质量的影响,在相同气流量下探究工艺对焊接速度的适应性。

表 2 激光焊接工艺参数
Table 2 Parameters of laser welding

Laser power /kW	Welding velocity /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	Gas flow /($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	Defocusing /mm	Jet height /mm
4.0	3.0, 4.2, 5.4	0, 0.5, 1.0, 1.5	0	2.0

采用 CCD 高速相机记录激光功率为 4 kW、焊接速度为 $4.2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时等离子体随气流量的变化过程。根据国家标准 GB/T 228.1—2010 加工标准剪切拉伸试样,如图 2 所示。

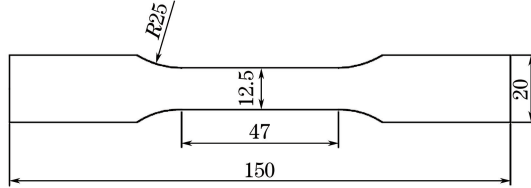


图 2 剪切拉伸试样的尺寸

Fig. 2 Dimension of shear tensile specimen

3 数学模型

建立三维有限体积模型,并使用 Fluent 流体计算软件计算焊接过程中小孔熔池的动态行为和流动相变过程。焊接过程的能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p \mathbf{v}T) + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{v}T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q, \quad (1)$$

式中 t 为物理变化过程的时间, ρ 为密度, c_p 为质量定压热容, \mathbf{v} 为速度矢量, T 为温度, λ 为热导率, Q 为热量, ∇ 为矢量微分算子。

焊接过程的质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0. \quad (2)$$

采用双椭球-柱状复合热源作为焊接热源。复合热源上部为双椭球热源,下部为柱状热源。双椭球热源的能量密度公式^[22]为

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q_1}{a_f b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_f^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad (3)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q_1}{a_r b c \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_r^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), \quad (4)$$

式中 x, y, z 为笛卡尔坐标;下标 f 和 r 分别表示双椭球的前半椭球和后半椭球; q 为热流密度; Q_1 为双椭球热源分配的热量; a, b, c 分别为双椭球在 x, y, z 方向半轴的长度; f 为 2 个半椭球的能量分配,且 $f_f + f_r = 1$ 。

柱状热源部分的热流密度公式^[23]为

$$q(r) = Q_2 \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right), \quad (5)$$

式中 Q_2 为柱状热源分配的热量, r_0 为圆柱半径, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。

采用熔化凝固模型和蒸发冷凝模型计算焊接过程中发生的相变及能量变化,利用耦合反冲压力和表面张力建立小孔壁面的受力情况,通过流体体积(VOF)方法来追踪界面。

4 结果与讨论

4.1 焊缝表面与横截面形貌

在激光功率为 4 kW、焊接速度为 $4.2 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 的条件下,不同气流量时的焊缝表面和横截面形貌如图 3 所示。由图 3 可知:不施加平吹辅助气流时,焊缝表面存在大量飞溅、凹坑,甚至产生穿孔缺陷;当平吹辅助

气流的气流量为 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,焊缝的成形质量有所改善,但仍存在凹坑和孔洞等缺陷;当平吹辅助气流的气流量大于或等于 $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,焊缝成形良好,表面没有飞溅、凹坑、孔洞等缺陷。

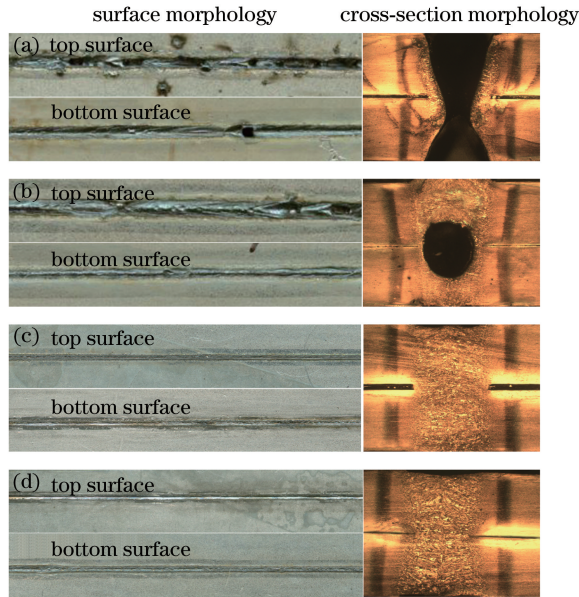


图 3 不同平吹气流量时焊缝的表面形貌与横截面形貌。(a) $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (b) $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (c) $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (d) $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 3 Surface and cross-section morphology of weld obtained at different gas flows. (a) $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (b) $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (c) $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (d) $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

在激光功率为 4 kW 、平吹辅助气流的气流量为 $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下,不同焊接速度时的焊缝表面形貌如图 4 所示。由图 4 可知,当焊接速度从 $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 $5.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,焊缝表面成形良好,无焊接缺陷,说明平吹辅助气流工艺方法具有较大的工艺窗口,在焊接速度为 $5.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时仍能获得良好的焊缝。

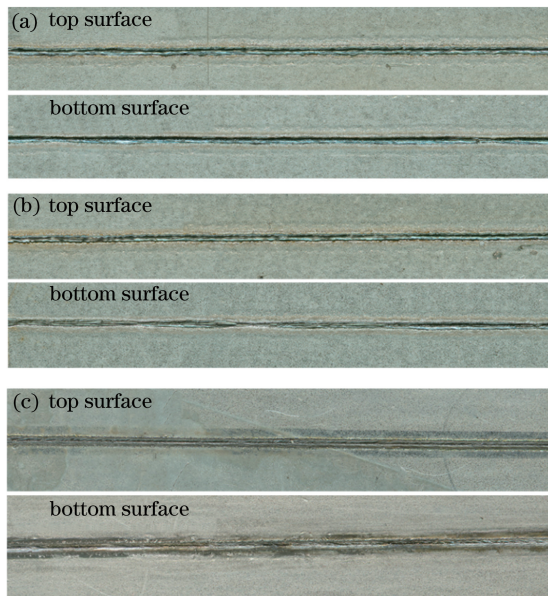


图 4 不同焊接速度时的焊缝表面形貌。(a) $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (b) $4.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (c) $5.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Fig. 4 Surface morphology of weld obtained at different welding velocities. (a) $3.0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (b) $4.2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$; (c) $5.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

以上焊缝的宏观形貌说明,平吹辅助气流能有效改善镀锌钢板零间隙激光搭接焊缝的成形质量,能得到较高质量的焊缝,在额定功率为 4 kW 的条件下,焊接速度能达到 $5.4 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

4.2 平吹气流对锌蒸气逸出的作用规律

在镀锌钢板的零间隙激光搭接焊过程中,锌蒸气的主要受力分析如图 5 所示。高压锌蒸气以水平初速度 v_0 突破小孔前壁液膜进入到小孔中,受到底部金属蒸气反冲压力形成的向上推力和小孔内外环境压力差形成的向下环境压力的共同作用。因金属蒸气的反冲压力相对较大,锌蒸气所受合力向上,故而实际速度 v 的方向由水平方向转向竖直方向。激光焊接小孔周期性振荡,小孔闭合时锌蒸气失去逸出的通道而无法逸出,被迫进入熔池中;当小孔张开时,因向上的合力过小而难以在锌蒸气冲击小孔后壁前推动锌蒸气离开小孔,故而导致锌蒸气冲击小孔后壁,破坏了焊接过程的稳定性,从而产生焊接缺陷。

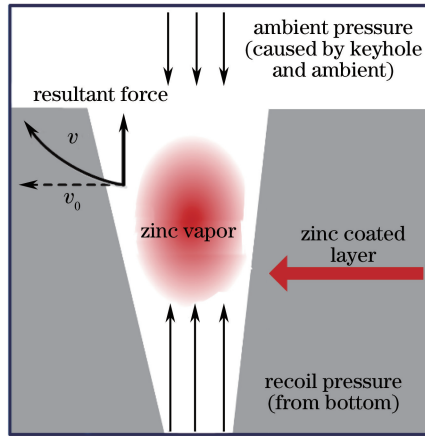


图 5 锌蒸气受力分析

Fig. 5 Force analysis of zinc vapor

施加平吹辅助气流改变了激光焊接小孔的动态行为。小孔持续稳定张开是锌蒸气从小孔中顺畅逸出的前提。平吹气流能驱散小孔上方的金属蒸气等离子体,使工件稳定地吸收激光能量,小孔由周期性振荡转为持续稳定的张开,且开口直径变大,这确保了小孔作为锌蒸气逸出通道的可行性。

根据伯努利流体基本方程,保持其他条件不变,增大小孔上方气流的流速,会使小孔上方的空气压力减小,形成局部负压环境,导致锌蒸气的逸出通道出现迁移效应。不同气流量时小孔的动态行为(母材气相组分云图)如图 6 所示。由图 6 可知:在激光的作用下,试板气化产生的金属蒸气与冲击进入小孔的锌蒸气共同组成了母材金属蒸气的气相云图,蓝色部分为空气和试板;在锌蒸气聚集区域,母材金属蒸气的含量小,呈绿色;锌蒸气扩散逸出后,母材金属蒸气的含量增大,该区域由绿色向红色转变。不施加平吹气流时,锌蒸气从小孔前壁 A 处突破进入小孔,由于下方金属蒸气的反冲压力不足,且小孔太小,因此锌蒸气在小孔后壁上边缘 B 处下方冲击小孔后壁进入熔池,使焊接失稳,产生缺陷。当平吹气流量为 $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,锌蒸气逸出

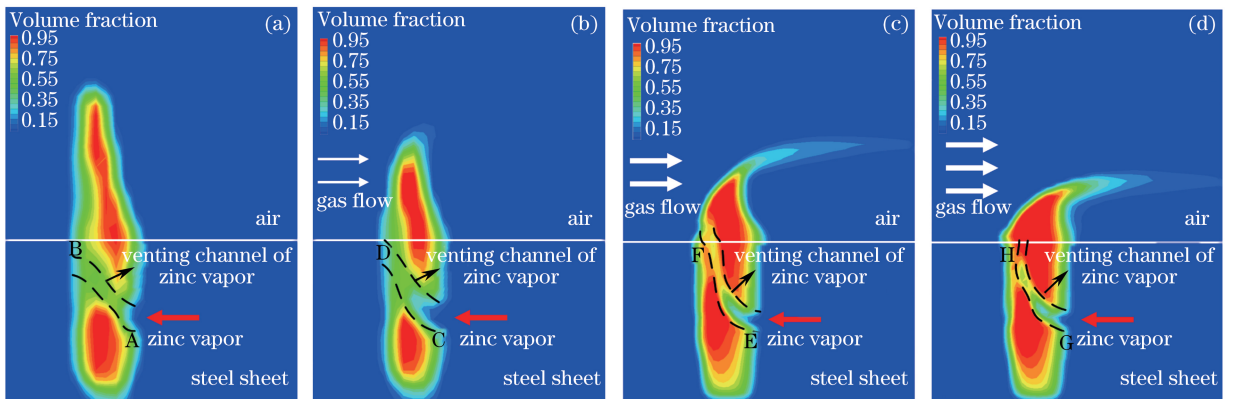


图 6 不同平吹气流量时小孔的动态行为。(a) $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (b) $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (c) $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (d) $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

Fig. 6 Dynamic behavior of keyhole at different gas flows. (a) $0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (b) $0.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$;

(c) $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; (d) $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

通道后向上迁移,恰好避开小孔后壁而顺畅逸出,或冲击小孔后壁上边缘D处,产生少量缺陷。当平吹气流量为 $1.0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,锌蒸气逸出通道向上迁移,完全避开了小孔后壁,在到达后壁上边缘F之前逸出小孔,避免了对小孔后壁和熔池的冲击。当平吹气流量增至 $1.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时,由于锌蒸气逸出通道已完全避开小孔后壁,因此气流量对焊接的稳定性无影响,焊缝成形质量无明显变化。

平吹气流形成局部负压环境,导致锌蒸气的逸出通道出现迁移效应,保证锌蒸气不会冲击小孔后壁并顺畅逸出,主要原因如下:

1) 局部负压使阻碍锌蒸气逸出的环境压力减小,锌蒸气所受向上合力增大,锌蒸气逸出通道更快地向上迁移,使锌蒸气能顺畅地逸出小孔。同时,负压吸力使离开小孔的金属蒸气和锌蒸气加速扩散,防止其聚集在小孔上方而阻碍后续金属蒸气及锌蒸气的逸出。

2) Clausius-Clapeyron 材料两相平衡方程^[24]为

$$\frac{d \ln p}{dT_p} = \frac{\Delta H_m}{RT_p^2}, \quad (6)$$

式中 p 为环境压力, T_p 为相变温度, ΔH_m 为相变焓, R 为理想气体常数。

对(6)式变形可得:

$$\ln p = -\frac{\Delta H_m}{RT} + C. \quad (7)$$

式中 C 为常数。(7)式说明当两相平衡时,相变温度 T 与环境压力 p 呈指数关系。根据该式可计算得到铁、锌沸点与环境压力之间的关系,结果如图7所示。由图7可知,随着环境压力减小,铁和锌的沸点均下降,且铁的沸点下降得更快。

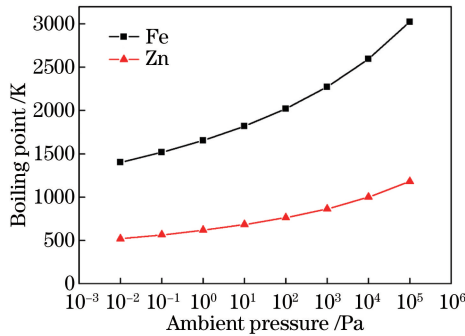


图7 铁和锌沸点随环境压力的变化

Fig. 7 Boiling points of Fe and Zn varying with ambient pressure

金属的沸点与激光焊接过程中金属蒸气的反冲压力紧密相关。Pang等^[25]提出了反冲压力修正模型:

$$p_r = \begin{cases} p_{\text{atm}}, & (0 \leq T_s \leq T_1) \\ \frac{1 + \beta_R}{2} p_0 \exp \left[\frac{\Delta H_v}{k_B T_v} \left(1 - \frac{T_v}{T_s} \right) \right], & (T_r \leq T_s \leq +\infty), \\ p_c(T), & (T_1 \leq T_s < T_r) \end{cases}, \quad (8)$$

式中 p_r 为反冲压力, p_{atm} 为标准大气压力, β_R 为蒸发再凝结分数, k_B 为玻尔兹曼常数, ΔH_v 为蒸发焓, T_v 为金属在当前环境压力下的沸点, T_s 为金属蒸气温度, $p_c(T)$ 为前2个分式之间的三次过渡曲线, T_1 和 T_r 分别为 $p_c(T)$ 与直线和曲线相切时的切点温度, p_0 为与 T_v 对应的大气压力。

根据反冲压力修正模型可知,平吹气流形成的局部负压环境使金属沸点 T_v 下降,反冲压力 p_r 因指数的变化而大幅增大;等离子体高度减小,试板获得了更多的激光能量使反冲压力增大,从而使得锌蒸气所受的向上合力增大,锌蒸气逸出通道时的迁移速度更快,更容易逸出小孔。反冲压力是维持小孔持续张开的动力,反冲压力越大,小孔更容易维持稳定的张开状态,且开口直径变大,从而为锌蒸气逸出小孔提供了更大的缓冲空间。

综上所述,平吹气流促使锌蒸气逸出通道后向上迁移,可避免锌蒸气冲击小孔后壁导致焊接失稳而产生的缺陷。

4.3 焊接过程的高速摄像

在激光功率为 4 kW、焊接速度为 4.2 m·min⁻¹ 的条件下,用 CCD 高速相机记录了不同气流量时焊接过程中的金属蒸气等离子体,如图 8 所示。由图 8 可知:不施加平吹气流时,等离子体由低到高呈周期性变化,小孔周期性振荡,难以维持张开状态供锌蒸气逸出,最终锌蒸气冲击熔池,产生飞溅等缺陷;当平吹气流量为 0.5 m³·h⁻¹ 时,等离子体高度减小并向前倾。由于平吹气流量较小,因此等离子体仍呈现由低到高的变化,并伴有飞溅;从平吹气流量为 1.0 m³·h⁻¹ 开始,等离子体变成类三角形形状,且高度基本稳定。等离子体的稳定使得工件能稳定地吸收激光能量,小孔持续张开,锌蒸气在逸出通道的迁移效应下顺畅地逸出小孔。

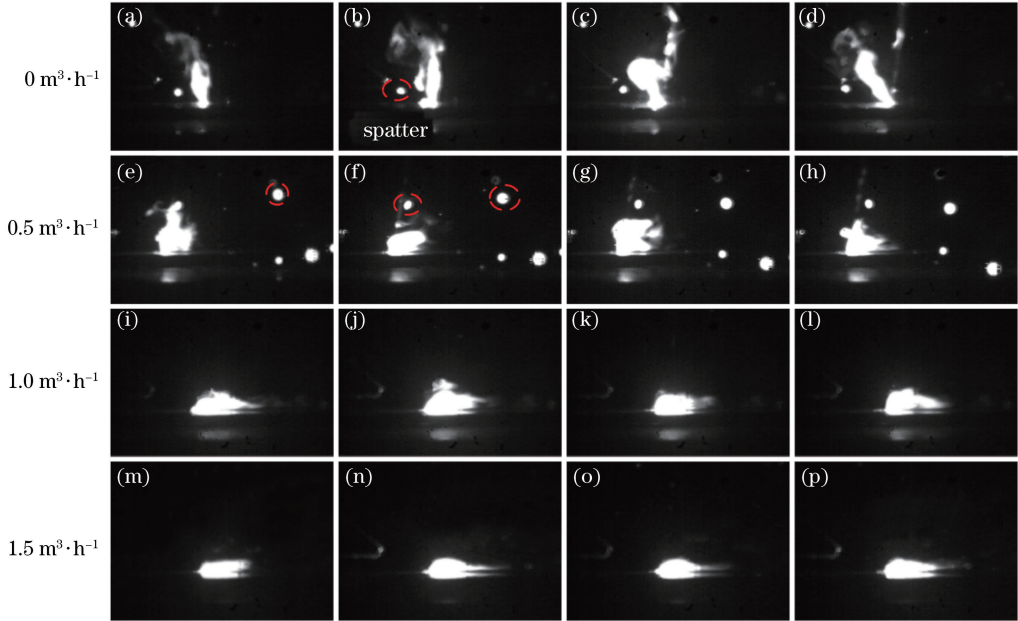


图 8 不同气流量时等离子体的影像

Fig. 8 Images of plasmas at different gas flows

4.4 焊缝的力学性能

对激光功率为 4 kW、焊接速度为 4.2 m·min⁻¹、不同气流量条件下所得焊缝进行剪切拉伸试验,剪切力随位移的变化如图 9 所示,试样的断裂位置如图 10 所示。不施加平吹气流时,焊缝中存在大量的孔洞及凹坑,剪切受力面积减小,接头的剪切力很小,约为 4.2 kN;当平吹气流量为 0.5 m³·h⁻¹ 时,焊缝的成形质量得到改善,孔洞和凹坑等缺陷减少,接头的剪切力增大至 7.5 kN;当平吹气流量为 1.0 m³·h⁻¹ 时,焊缝完好无缺陷,接头的剪切力增大至 8.7 kN;继续增大平吹气流量至 1.5 m³·h⁻¹ 时,接头的剪切力为 8.8 kN,基本无变化。实验结果表明:施加平吹辅助气流可有效改善焊缝的力学性能,得到良好的焊缝后继续增大气流量对力学性能基本无影响。

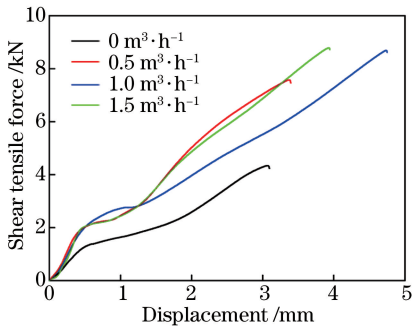


图 9 不同气流量下所得焊接接头的剪切力随位移的变化

Fig. 9 Shear tensile force vs. displacement for welded joint obtained at different gas flows

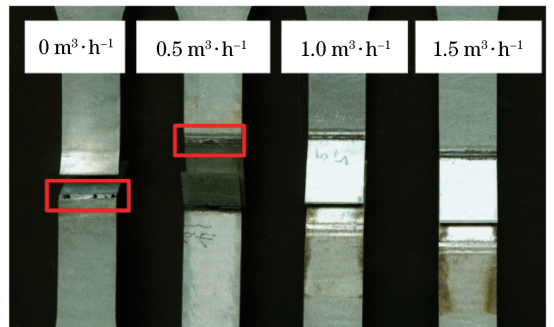


图 10 不同气流量下焊接试样的断裂位置

Fig. 10 Fracture positions of samples welded at different gas flows

5 结 论

采用平吹辅助气流的新工艺,通过改变平吹气流量和焊接速度对 DP590 热镀锌钢板进行了零间隙激光搭接焊,分析了平吹气流量对钢板焊缝成形质量和焊接试样力学性能的影响;利用数值模拟和高速摄像技术研究了平吹气流对锌蒸气逸出的作用机理。结果表明:平吹气流可形成局部负压环境,使锌蒸气所受的向上合力增大,逸出通道向上迁移,从而避免了锌蒸气冲击小孔后壁而导致的焊接失稳;平吹气流的工艺适应性好,在激光功率为 4 kW 的条件下,当焊接速度为 $3.0\sim 5.4\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时均能得到成形良好的焊缝,符合实际生产的要求;平吹气流能维持等离子体高度的稳定,使小孔持续稳定张开,从而保持了锌蒸气逸出通道的畅通。

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. 高强度合金化热镀锌研究进展[J]. *材料导报*, 2008, 22(2): 64-67.
- [2] Liu Guocheng, Tian Jieping, Shi Yusheng, *et al.* Review of welding technologies for automotive steel sheets[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 010004.
刘国承, 田杰平, 史玉升, 等. 汽车用钢焊接技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 010004.
- [3] 魏元生. 镀锌板种类及其在车身上的应用[J]. *汽车工艺与材料*, 2011(9): 51-56, 62.
- [4] 陈义红. 激光焊接在汽车行业中的应用[J]. *汽车零部件*, 2012(7): 30.
- [5] Chen G Y, Mei L F, Zhang M J, *et al.* Research on key influence factors of laser overlap welding of automobile body galvanized steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 726-733.
- [6] Pan Y, Richardson I M. Keyhole behaviour during laser welding of zinc-coated steel[J]. *Journal of Physics D*, 2011, 44(4): 045502.
- [7] Bley H, Weyand L, Luft A. An alternative approach for the cost-efficient laser welding of zinc-coated sheet metal[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 17-20.
- [8] Ribolla A, Damoulis G L, Batalha G F. The use of Nd:YAG laser weld for large scale volume assembly of automotive body in white[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 164/165: 1120-1127.
- [9] Iqbal S, Gualini M M S, Grassi F. Laser welding of zinc-coated steel with tandem beams: analysis and comparison[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184: 12-18.
- [10] Iqbal S, Gualini M M S, ur Rehman A. Dual beam method for laser welding of galvanized steel: experimentation and prospects[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42: 93-98.
- [11] Chen W, Ackerson P, Molian P. CO₂ laser welding of galvanized steel sheets using vent holes[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(2): 245-251.
- [12] Gu H P, Shulkin B. A practical use of humping effect in laser beam welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2011, 23(1): 012001.
- [13] Gu H P. Laser lap welding of zinc coated steel sheet with laser-dimple technology[J]. *Journal of Laser Applications*, 2010, 22(3): 87-91.
- [14] Mei L F, Chen G Y, Yan D B, *et al.* Impact of inter-sheet gaps on laser overlap welding performance for galvanized steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 226: 157-168.
- [15] Zhang Fan, Li Fang, Wang Shien, *et al.* Research of lap gap in fiber laser lap welding of galvanized steel[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(10): 1003011
张帆, 李芳, 王诗恩, 等. 镀锌钢板搭接光纤激光焊接中搭接间隙的研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(10): 1003011
- [16] Dasgupta A K, Mazumder J. Laser welding of zinc coated steel: an alternative to resistance spot welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(3): 289-293.
- [17] Zhou S Q, Peng Z G. Mechanism of Zn vapour suppressed by Al in laser lap welding of high strength zinc coated sheet steel[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 37/38: 634-642.
- [18] Ma J, Kong F, Carlson B, *et al.* Two-pass laser welding of galvanized high-strength dual-phase steel for a zero-gap lap joint configuration[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 495-507.
- [19] Xu Guojian, Zhong Liming, Hang Zhengxiang, *et al.* Welding performances of galvanized sheet using the fiber coupled diode laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 071402.
徐国建, 钟立明, 杭正翔, 等. 镀锌钢板的光纤耦合半导体激光焊接性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7):

071402.

- [20] Chen Z C, Yang S L, Wang C M, *et al.* A study of fiber laser welding of galvanized steel using a suction method[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214: 1456-1465.
- [21] Li Tao, Li Fang, Wang Shien, *et al.* Research on car galvanized tailor-welded blanks of fiber laser welding[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(1): 011406.
李涛, 李芳, 王诗恩, 等. 车用镀锌钢板光纤激光拼焊工艺研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(1): 011406.
- [22] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1984, 15(2): 299-305.
- [23] Chukkan J R, Vasudevan M, Muthukumaran S, *et al.* Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 219: 48-59.
- [24] 郝士明. 材料热力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 22-25.
- [25] Pang S Y, Chen X, Zhou J X, *et al.* 3D transient multiphase model for keyhole, vapor plume, and weld pool dynamics in laser welding including the ambient pressure effect[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 74: 47-58.