

激光深熔焊接的熔池行为与焊接缺陷的研究*

郑启光 辜建辉 王 涛 王忠柯 陶星之

(华中理工大学激光技术国家重点实验室,武汉,430074)

段爱琴

(高能束流动加工技术国防科技重点实验室)

摘要: 分析了激光深熔焊接的小孔机制的数学模型。研究了焊接熔池的稳定性与金属蒸气压的关系及金属蒸气压与等离子体的关系。着重研究了激光焊接工艺参数(包括激光模式、功率、聚焦条件、焊接速度和辅助吹气)对焊接熔池行为的影响,最后,还研究了熔池行为与焊缝组织结构和缺陷(如气孔、裂纹等)的关系。

关键词: 激光深熔焊接 熔池稳定性 金属蒸气反冲压 气孔

Investigation on melting pool behavior and defects of laser welding

Zheng Qiguang, Gu Jianhui, Wang Tao, Wang Zhongke, Tao Xingzhi

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Duan Aiqin

(High Energy Beam Processing Laboratory of National Defense)

Abstract: In this paper, a mathematical model of keyhole mechanism of laser deep welding has been analyzed. We studied the relationship of the stability of weld pool with metallic vapor pressure and the relationship of metallic vapor with plasma. The effect of laser weld parameters (including laser mode, laser power, focusing condition, welding speed and assistant gas etc.) on weld pool behavior have been investigated in detail. Finally, we also have analyzed the weld pool behavior related weld structure and defects (such as crack and porosity etc.).

Key words: laser deep penetration weld stability of melt pool metal vapor recoil pressure porosity

引 言

激光深熔焊接的本质特征为小孔效应。当高功率密度激光束入射到金属表面时,材料被迅速加热,由于热传导作用,材料将产生熔化、蒸发。如果材料蒸发速度足够高,激光束将在金属中打出一个孔,在小孔内,金属蒸气反冲压力与液态静压力、表面张力之间的作用的动态平衡将维持小孔的存在^[1]。小孔内的蒸气压力分布和有关的气体动力学及离化作用将影响到小孔的形状。在激光深熔焊接中,由于存在小孔,激光束能深入到材料内部,被熔化的液态金属环绕在小孔的周围,激光对材料的热输入主要是在小孔壁上的液化界面上,随着激光束的移动,小孔前沿的金属被熔化、汽化,而在小孔后部,液态金属重新凝固,而形成焊缝。由于小孔附近的很大温度梯度,使小孔周围的金属熔体产生很大的表面张力梯度,其相应的金属蒸气反冲压力使小孔前沿产生强烈的环流。图 1 示出激光深熔焊接熔池的流动情况,熔池内的热

* 高能束流动加工技术国防科技重点实验室基金资助。

传输和液体流动可以显著地影响熔池的几何形状、温度梯度、局部区域的冷却速率和凝固结构,并可导致熔深的波动、气孔、熔池不足等缺陷。采用实验方法很难确定焊接过程中的温度分布、冷却速度和熔池流动的形态。因此,采用数学方法定量分析激光深熔焊接过程中的具体温度分布和流动状态引起了人们的广泛注意。

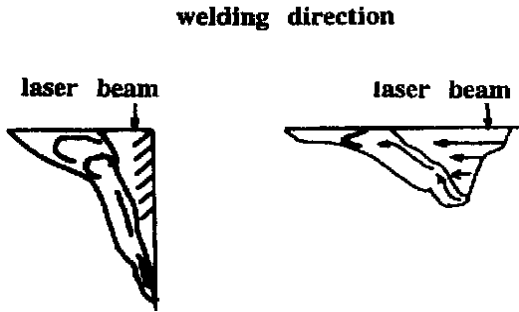


Fig. 1 The pool flow of laser deep penetration welding

Mazumder 等人采用有限差分法发展了一个三维稳态激光深熔焊接的数值模型,根据传热理论可得到小孔的形成过程^[5]。Sonti 等人采用二维有限元非线性模型进行了铝合金激光深熔焊接传输过程的三维计算,得到了激光焊接的三维温度场^[6]。Klemens 是第一个从小孔压力平衡角度研究了稳态下的小孔的形态,由于压力是小孔深度的函数,小孔半径将随深度而变化^[7]。Andrens 等人更加具体地分析了小孔形状与小孔内压力之间的关系^[8]。Dowden 等系统地分析了深而窄的小孔内的能量和压力平衡,建立了一个小孔内液体和蒸气流动的通用模型,并认为小孔内的压力主要是由表面张力决定的,小孔的形状和半径主要是由固相和汽相的能量平衡决定的^[9]。

本文中主要是研究激光深熔焊接中的熔池行为,并着重研究激光工艺参数(包括激光功率、聚焦条件、模式及辅助吹气)对焊接熔池行为的影响,尤其是研究熔池行为与焊接缺陷(如气孔)的关系。

1 激光深熔焊接中的熔池行为

1.1 熔池稳定性与金属蒸气压及等离子体的关系

大量研究人员讨论分析了激光表面重熔或热传导激光焊接现象,依据基本的控制方程,即连续方程、动量方程和能量方程,采用数值方法计算得到了熔池内液态金属的流动形态和温度分布^[10~12]。

对激光深熔焊接与激光重熔和热传导焊接不同的是,高功率密度作用下的材料蒸发过程将在熔化金属表面产生反冲压力。由于激光束具有高斯型的功率密度分布,金属液面上的反冲压力将具有中心大边缘小的压力分布。如图 2 所示,由于反冲压力沿光斑中心往边缘区域逐渐降低,压力差将驱使熔化金属由光束中心区域

许多学者根据激光深熔焊中的小孔机制,对激光焊接的温度场、液体流动及小孔形状和尺寸进行了计算。例如 Swift-Hook 和 Peretj 等人采用均匀介质中的线源模型来模拟小孔内的热输入,求解热传导方程而计算出了激光焊接中的温度场^[2,3]。Dowden 等人提出了入射激光的逆韧致吸收模型,假定能量通过传导机制传递给小孔壁,通过解热传导方程,得到一个最大的理论熔深^[4]。

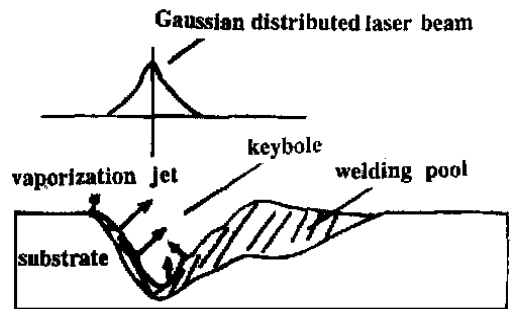


Fig. 2 The metal evaporation recoil pressure on keyhole wall

域向小孔前沿两侧和小孔后部流动,从而造成小孔前沿液面向焊接方向移动。

实验中观察到,尽管入射激光功率不变,激光焊接所产生的等离子体强度和扩展角发生改变,并驱使焊接熔池出现不稳定现象,即小孔尺寸及形状随着金属蒸气压的改变而变化。

当金属蒸气压驱动金属溶液沿小孔后壁方向流动,这时熔池小孔变宽,而从小孔后壁反射的激光束则使小孔变窄。

在激光深熔焊接中产生两种类型等离子体,一类是屏蔽气体离子化产生的等离子体,它是与入射激光束方向平行。另一类是激光作用金属所产生的金属蒸气等离子体,它与入射激光束方向垂直,并且随熔池小孔运动而改变它的扩展角。当等离子体沿直线向上时,使小孔变宽,而当等离子体向孔壁后方倾斜时,则小孔尺寸变大。

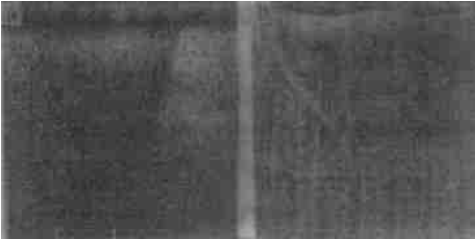


Fig. 3 The effect of laser mode on weld pool shape
a—low order mode b—multi-mode

1.2 激光焊接工艺参数对熔池行为的影响

激光焊接工艺参数(包括模式、激光功率、焊接速度及辅助吹气等)对焊接熔池行为有较大的影响。图3示出了不同模式对熔池形状的影响的焊缝熔区形貌。从图中可看到,当采用低阶模进行焊接时,焊缝区深而窄,而当用多模激光焊接时,焊缝宽而浅。激光功率对焊接熔池有影响,当激光功率密度低时,不足以产生气体离子化,故不形成等离子体。

只有在激光功率密度高时对焊接熔池产生影响。且激光功率越大,焊接熔池越深,最大熔池近似与激光功率的0.7次方成正比^[1]。激光功率不稳定,会引起等离子体的不稳定,继而引起熔池不稳定。

激光等离子体是激光深熔焊接中在高能量密度作用下伴随小孔同时存在的。等离子体的状态和行为对激光焊接熔池行为有重要的影响,如果等离子体控制得不好,可能造成激光焊接过程的中断。等离子体主要通过以下两种机制对激光深熔焊接过程产生影响,一是等离子体吸收激光能量;二是等离子体会改变激光束聚焦光斑的空间形态。

研究证明^[10,11],等离子体是一个光疏介质,当入射激光束穿过等离子体将导致激光束传播方向的改变;其偏转角是不同的,并与等离子体的电子密度梯度和等离子体长度等有关,几十瓦至几千瓦的CO₂激光诱导的等离子体对激光束的偏转角达10⁻²mrad。

Rockstroh^[12,13]研究证明,在Ar气氛下,CO₂激光辐射铝靶,当激光功率密度为6×10⁵W/cm²时,激光束穿过等离子体,由于等离子体对激光束的折射,激光光斑面积增大了8%。当激光功率为1×10⁶W/cm²时,光斑面积扩大了23%。很显然,激光束穿过等离子体时光斑面积扩大,且焦点位置发生改变。我们的实验也证明了这一点。

激光等离子体对焊接熔池会造成较大影响。等离子体浓度越高,对激光束的吸收和聚焦光束的折射的影响越大。将使焊接熔池深度减少,并使焊缝的深宽比减少。由于等离子体对焊接熔池影响较大,故需采取措施消除和抑制等离子体。通常采用沿焊接方向吹辅助气体。辅助气体种类也影响等离子体的形态。几种辅助气体的效果排列顺序为He,CO₂,N₂,Ar。He抑制等离子体效果最好,熔池深度最深。这是因为He不仅有较大的电离电流,而且He的导热性好,也使得产生的等离子体不易扩展。而Ar电离能较低,尤其是Ar的导热性差而易造成等离子体扩展。

此外,激光焊接速度也对等离子体形态产生影响。实验证明,在入射激光功率密度大于6×10⁶W/cm²时,如果激光焊接速度大于60mm/s,则产生的等离子体密度较低,此时对激光焊接

熔池影响较小。如果焊接速度低于 40mm/s 时,等离子体密度迅速增加,等离子体对激光的聚焦特性影响增大。因此,焊接速度越小,焊接熔池深度差别越大。

2 熔池行为与焊接缺陷

上面已经提到,在激光深熔焊接中,熔池小孔的深度和形状与等离子体状态密切相关。如果对等离子体控制得不好,等离子体状态(包括电子密度与等离子体的长度和扩散角)的起伏将导致熔池小孔深度和形状的起伏。由于小孔深度和形状的起伏(即孔形扩大或缩小),屏蔽气体和金属蒸气将会在小孔底部形成气泡,继而气泡向上漂浮,随着熔池的迅速凝固,则以气孔形式滞留在焊接熔池底部(第一类型气孔)。图 4 给出了高功率 CO₂ 激光深熔焊接焊缝形成气孔的示意图。从图中可清楚地看到气孔的形成过程。

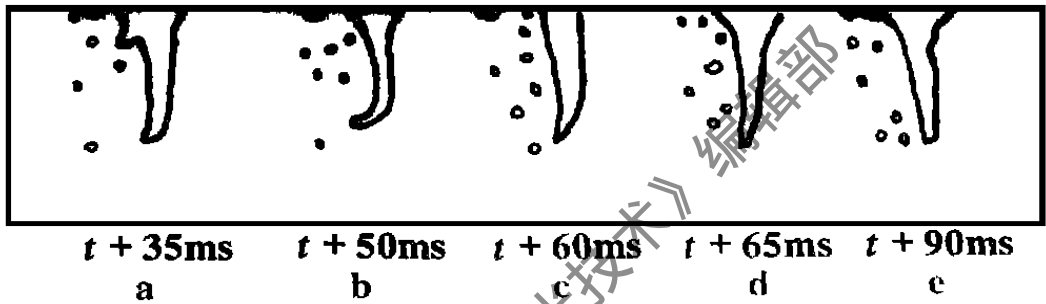


Fig. 4 Schematic of keyhole motion and porosity formation process observed in CO₂ laser welding of low carbon steel

在激光深熔焊接中,随着激光功率密度的增加,熔池锁孔会变得不稳定,因而焊缝内气孔率会急剧增加。焊接熔池不稳定是形成气孔的主要原因。通过对焊缝内气孔内的成分分析,在气孔内检测到含有 He, Ar, N₂ 和 H₂ 等。而氢气孔认为是在激光作



Fig. 5 The porosity distribution of laser welding of 18CrMnTi
a—porosity distribution b—the weld pool porosity

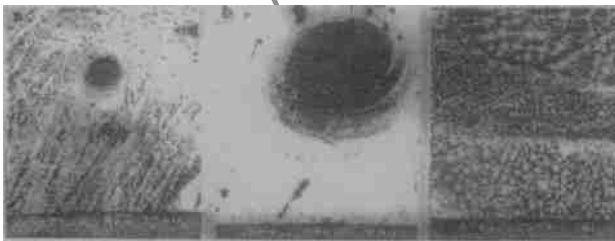


Fig. 6 The morphology of the gas porosity
a—porosity morphology b—magnification of porosity c—interior wall of porosity

用后焊接熔池内金属熔体凝固期间,由于保护不好,氢气扩散进入熔池内来不及逸出而残留在熔池内所形成的气孔(第二类型气孔)。图 5 示出激光焊接 18CrMnTi 时的气孔情况,此时是采用 N₂ 保护焊缝,Ar 作为辅助吹气气体。

图 6 示出气孔形貌。通过对图 6 中气孔的成分分析,检测出是 N₂ 孔,

即属于保护气体进入熔池内的第一类型气孔。气孔可以通过以下方法加以消除或减小:(1)在激光焊接中,认真清洗焊件表面;(2)在焊接前预先采用 Ar 或 N₂ 保护焊缝;(3)采用最佳的离焦量;(4)选择最佳的辅助气体流速和合适的辅助吹气入射角,并调整好吹气喷嘴与焊件的合适距离。上述第 4 种是抑制第一类型气孔的重要措施。即在激光深熔焊接中抑制好等离子体

是最重要的。在焊接 18CrMnTi 时,采用 140mm 透镜焦距。负离焦量 1mm,采用 Ar 作为辅助吹气,气体流速为 10L/min,吹气与水平方向成 10° 夹角,这时可得到 5mm 焊接深度,且无气孔的焊缝(见图 7)。当采用 7kW CO₂ 激光(低阶模)焊接低碳钢板,板厚 6mm,负离焦 1.25mm,焊速为 2.2mm/min。此时,最佳辅助吹气流速度 15L/min,



Fig. 7 Weld seam without porosity
吹气夹角为 33°。

氧、硫元素对焊缝气孔也有影响。通常是随着氧、硫含量的增加,焊缝气孔率相应增加。

图 8 示出激光焊接 18CrMnTi 的激光熔区的组织结构。由于激光焊接速度快,熔池迅速冷却,故与常规焊接相比,激光焊接具有:(1)焊接熔池的液-固界面存在很大的温度梯度;(2)焊接熔池是在快速凝固下结晶的,且结晶方向与焊接熔池流动方向密切相关;(3)焊接区热影响区小。



Fig. 8 The microstructure of laser welding
a—structure of laser weld seam b—structure of heat-effect zone of laser weld

图 9 示出焊缝区的裂纹特性。在激光焊缝区通常有根部裂纹、纵向裂纹和显微裂纹。根部裂纹通常与焊接熔池的塑性、氢及拘束力有关。此外,在焊接大结构件或封闭零件时,容易产生纵向裂纹。预热和后热可消除裂纹。例如在激光焊接 18CrMnTi 时,采用 200 °C 预热和 300 °C 后热可有效地防止裂纹的产生。



Fig. 9 Crack of laser welding
a—bottom crack b—longitude crack c—micro-crack

参 考 文 献

- 1 Banas C M. Opt Engineer, 1978; 17(3): 210
- 2 Swift-Hook D T, Gick A E F. J Welding, 1973; 52(11): 4925
- 3 Peretz R. Opt & Laser in Engineering, 1986/1987; 7: 69~81
- 4 Dowden J M, Kapadia P, Postacioglu N. J Phys D, 1989; 22: 741~749
- 5 Mazumber J, Steen W M. J A P, 1980; 51(2): 941~947
- 6 Sonti N, Amateau M F. Numerical Heat Transfer, Part A, 1989; 16(3): 351~370
- 7 Klemens P G. J A P 1976; 47: 2165~2174
- 8 Andrews J G, Anthey D R. J Phys D, 1976; 9: 2181~2194
- 9 Dowden J, David A B. J Phys D, 1987; 21(1): 36~44
- 10 Anthony J R, David A B. ICAL EO '84, 1984; 44: 8~16
- 11 Yang X, Yan Y, Peng S. ICAL EO '90, 1990: 480~490
- 12 Chan C, Mazumber J, Chen M M. Trans A, 1984; 15A(2): 2175~2184
- 13 Rockstron T J, Mazumber J. SPIE, 1986; 668: 145~149

激光焊接专用气动喷嘴的研究

唐霞辉 朱海红 朱国富 李适民 李再光

(华中理工大学激光加工国家工程研究中心,武汉,430074)

摘要: 针对高功率 CO₂ 激光焊接,作者试验研究出一种气动喷嘴,用以保护导光聚焦系统,防止焊接过程中金属飞溅造成的镜片污染,通过对飞溅粒子运动轨迹的理论分析,设计出合理的喷嘴结构。采用气动喷嘴和普通同轴喷嘴,比较试验出高功率激光焊接过程中导光系统污染对激光功率的衰减、焊缝气孔率及有效熔深等的影响以及聚焦镜片上飞溅粒子的分布。结果表明:气动喷嘴从本质上减少了聚焦镜上飞溅粒子的数量,使激光功率损失减少,有效焊接长度增加,并且横向气流没有对焊缝造成任何不利影响。

关键词: 激光焊接 飞溅污染 气动喷嘴 镜片保护

Study on aerodynamic nozzle specialized for laser welding

Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu, Li Shiming, Li Zaiguang

(National Engineering Research Center for Laser Processing, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: In this paper, an aerodynamic nozzle was investigated for protecting the beam delivery system and preventing optics pollution from ejected particle vaporized on metallic surface during high power CO₂ laser welding. The suitable nozzle structure was designed on the basis of theoretical analysis on moving trajectory of the ejected particle. The comparing experiments between aerodynamic nozzle and ordinary nozzle were performed to examine the influence of optics pollution on loss of laser power, porosity percentage of weld section, and efficient penetration depth, and also to inspect the distribution of ejected particle on optics during laser welding. The studied results show that the aerodynamic nozzle substantially reduced the particle amount on the optics, so the loss of the laser power delivered to the workpiece was reduced, the effective weld length was increased. The examination of the weld structure ensured that there was no interference with the quality of the weld due to the cross-flow.

Key words: laser welding ejecta pollution aerodynamic nozzle optics protection

引 言

就几类典型的激光加工而言,激光熔覆和热处理焦距长、飞溅小、镜片污染少;激光切割喷嘴出气口小,气压大,能有效防止飞溅;而激光焊接焦距较短,熔池反应剧烈,飞溅大,但保护气流量有限,故极易造成镜片污染,成为激光焊接产业化中一个非常棘手的问题。镜片污染导致激光束产生散射,聚焦不良,长时间工作会出现焦点漂移,传输到工件的激光功率受到损失,使激光焊接性能变差。镜片的频繁清洗和更换严重影响工作效率,大量的飞溅使晶体镜片因热

*

*

*

作者简介:郑启光,男,1944年12月出生。教授,博士生导师。现从事激光与物质相互作用及大功率 CO₂ 激光导光、传输理论的研究。