

匙孔内光纤激光致喷发蒸汽对焊接过程的影响

孔华, 赵振家, 邹江林, 王紫, 黄泽泓

(北京工业大学, 高功率及超快激光先进制造实验室, 北京, 100124)

摘要: 光纤激光深熔焊接羽辉由匙孔内激光致蒸汽喷发所致, 对焊接过程存在严重的负面影响. 文中通过改变匙孔内激光致蒸汽的喷发特征, 研究羽辉对光纤激光深熔焊接过程的影响规律. 结果表明, 随着焊接速度的提高, 沿焊接方向的匙孔口长度逐渐增大, 匙孔前壁的倾斜角则逐渐减小. 该现象导致孔内激光致喷发蒸汽的特征发生变化: 底部摆动羽辉的喷发方向逐渐沿焊接反方向偏离激光束, 狭长形羽辉的高度则逐渐降低直至消失; 羽辉对焊接熔深的负面影响也逐渐减小直至消失, 但飞溅数量逐渐增多, 焊缝表面成形则逐渐恶化. 进一步分析表明, 匙孔前壁激光致蒸汽的喷发方向变化是底部摆动羽辉的喷发方向和狭长形羽辉高度均发生改变的主要原因; 提高焊接速度可降低羽辉对焊接过程的负面影响, 但匙孔前壁激光致蒸汽对匙孔后壁的冲击作用将导致孔口沿焊接方向的长度变大、飞溅增多、焊缝表面成形质量变差.

创新点: (1) 原位观测了不同焊接速度下羽辉和匙孔的形态, 获得了底部摆动羽辉、狭长形羽辉随焊接速度的变化规律及其影响焊接过程的规律.

(2) 基于匙孔内激光致蒸汽喷发方向和匙孔前壁倾斜角度的变化, 揭示了底部摆动羽辉和狭长形羽辉形态发生变化的原因.

(3) 分别揭示了底部摆动羽辉和狭长形羽辉对焊接过程的影响, 为光纤激光焊接羽辉的控制及光纤激光焊接技术的优化奠定了基础.

关键词: 光纤激光; 焊接速度; 羽辉; 蒸发蒸气; 熔深

中图分类号: TG 456.7

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20220530001

0 序言

高功率光纤激光器自 21 世纪初诞生以来, 获得了飞速发展^[1-3]. 相比于制造行业内传统的高功率激光器 (CO₂ 激光器、Nd:YAG 激光器和碟片激光器), 高功率光纤激光器具有电光转换率高、加工柔性高、运行成本低等综合优势^[4-6], 受到了焊接领域内的广泛关注. 羽辉是光纤激光深熔焊接中一种固有的物理现象, 对焊接过程存在严重的负面影响^[7-10]. 羽辉的形成与匙孔内激光致蒸汽的喷发有关. 因此, 研究匙孔内光纤激光致蒸汽的喷发特征及影响规律, 对理解羽辉的形成及优化光纤激光焊接工艺具有重要意义.

羽辉的研究大致始于 2008 年, Kawahito 等

人^[11]发现高功率光纤激光深熔焊接羽辉的电离度较低, 对入射激光的逆韧致吸收效应可忽略不计. 根据羽辉的形态, 可将羽辉分为底部周期性摆动羽辉和类似于激光束聚焦形态的狭长形羽辉^[12]. 韩雪等人^[13]指出高功率光纤激光深熔焊接中, 底部周期性摆动羽辉的形成与匙孔内激光致蒸汽的喷发有关. Chen 等人^[14]指出摆动羽辉是由匙孔内金属蒸汽在压力差下向外剧烈喷发所致, 并且喷发中呈现出不稳定状态. 匙孔内激光致金属蒸汽向外喷发时, 将对熔池产生推动效应, 这种不稳定的推动效应将会对熔池的稳定性和焊缝成形产生影响^[15-16], 形成飞溅效应^[17]或焊接气孔等缺陷^[9,13].

狭长形羽辉的形成与底部周期性摆动羽辉沿激光束方向喷发时, 其携带的微粒进入激光束内、被激光束加热发光有关^[18-20]. Li 等人^[21]指出低电离状态的羽辉 (金属蒸汽) 中微粒的密度非常高, 对光纤激光光束的传输存在明显的吸收、散射作用. 可见, 羽辉影响光纤激光焊接过程的根本原因是光

纤激光束中的微粒(即狭长形羽辉)对光纤激光能量的传输产生影响,焊接熔深变浅、熔宽变宽,并且微粒数量或尺寸的波动诱发熔深波动、焊缝表面成形差等缺陷^[20,22]。综上所述,焊接缺陷的形成与底部摆动羽辉和狭长形羽辉均有关,而底部摆动羽辉和狭长形羽辉的形成均与匙孔内激光致蒸汽的喷发有关^[11]。然而,目前直接聚焦匙孔内激光致蒸汽(羽辉)喷发特征及其对焊接过程影响的研究尚未见报道。

文中采用高功率光纤激光扫描焊接低碳钢进行焊接试验,通过改变焊接速度的方式来改变深熔焊接匙孔内激光致羽辉的喷发特征,探究匙孔内金属蒸汽的喷发行为与羽辉形态之间的关系及其对焊接过程的影响规律。使用高速摄像系统实时观测羽辉、熔池和匙孔,焊后使用光学显微镜测量焊缝熔深、熔宽,并计算匙孔前壁的倾斜角。最后综合试验结果,得出匙孔内光致蒸发蒸汽的喷发行为对羽辉形态的影响规律及羽辉形态对焊接过程的影响。

1 试验方法

试验中所使用的激光器是 IPG YLS-6000 光纤激光器,激光波长为 $1.07\ \mu\text{m}$,激光束通过芯径为 $200\ \mu\text{m}$ 的光纤进行传输,经焦距为 $300\ \text{mm}$ 的聚焦镜聚焦,得到的激光腰斑半径约为 $0.3\ \text{mm}$ 。试验时激光功率设定为 $6\ \text{kW}$,离焦量为 $0\ \text{mm}$,激光器的光纤头安装于 KUKA 机械臂上。采用 DMC-B140-M 控制系统控制的移动平台对焊接轨迹和焊接速度进行控制。在进行横向气帘吹除羽辉的试验中,将横向气帘固定在距板材表面 $2\ \text{mm}$ 高度处,并平行于焊接材料表面吹除羽辉,经横向气帘的气体流速可达 $400\ \text{m/min}$ 。试验布置方式如图 1 所示。

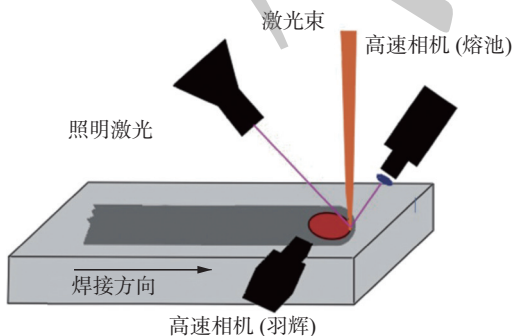


图 1 羽辉及匙孔观测实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plume and keyhole observation experiment

采用 FASTCAM Mini UX100 高速摄像机搭配波长为 $808\ \text{nm}$ 、最大功率为 $50\ \text{W}$ 的半导体激光对熔池和匙孔进行拍摄,配备 Nikon AF 镜头和透光率 25% 的白光滤波片,实时记录熔池、匙孔的特性行为。拍摄羽辉形态时,高速摄像机距离激光材料作用区 $50\ \text{cm}$ 处并垂直于焊接激光束与焊接方向组成的平面,拍摄速度设置为 $5\ 000\ \text{帧/s}$ 。拍摄熔池和匙孔形貌时,调节照明激光使其反射光恰好进入高速摄像机镜头内,拍摄速度设置为 $10\ 000\ \text{帧/s}$ 。扫描速度从 $1\ \text{m/min}$ 递增至 $12\ \text{m/min}$ 。飞溅数量的统计为连续 10 帧照片中的亮点数量。

试验材料选用尺寸为 $100\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ 经磨削处理的低碳钢,各元素的质量分数分别为 $\omega(\text{Fe}) = 99.5\%$, $\omega(\text{C}) = 0.12\%$, $\omega(\text{其他}) = 0.38\%$ 。焊接试验前用丙酮擦拭样品以去除表面油污及其它杂质。焊后对焊缝进行横向切割,对焊缝横截面进行研磨、抛光、化学腐蚀等处理后,采用 Keyence VHX950 光学显微镜测量焊缝截面的熔深和熔宽。采用 ImageJ 软件对高速摄像机所获得的照片进行处理,以精确计算羽辉高度和飞溅颗粒的数量。

2 试验结果

2.1 焊接速度对羽辉形态和飞溅的影响

不同焊接速度时的典型羽辉形态如图 2 所示。可发现随着焊接速度的提高,羽辉形态出现了明显的变化:焊接速度较低时,羽辉形态可以分为底部摆动部分和类似于激光束聚焦形态的狭长形部分;随着焊接速度的提高,狭长形羽辉的高度逐渐降低

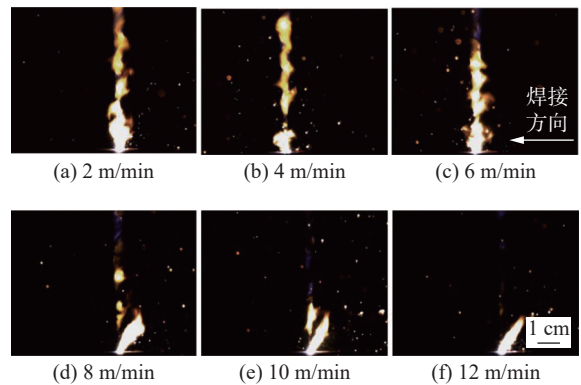


图 2 不同焊接速度时羽辉的形貌

Fig. 2 The shape of the plume at the different welding speeds. (a) $2\ \text{m/min}$; (b) $4\ \text{m/min}$; (c) $6\ \text{m/min}$; (d) $8\ \text{m/min}$; (e) $10\ \text{m/min}$; (f) $12\ \text{m/min}$

直至消失;底部摆动羽辉的喷发方向偏离激光束,朝向逆焊接方向进行喷发,但是其摆动的幅度降低,即羽辉形态较为稳定.底部摆动羽辉呈亮白色形态,狭长形羽辉为暗黄色.此外,随着焊接速度的提高,飞溅数量也逐渐变多,喷发方向由随机喷发逐渐转变为主要沿焊接反方向喷发.

统计图 2 照片中的信息,获得羽辉高度、飞溅数量随焊接速度的变化规律,结果如图 3 所示.在低焊速时,狭长形羽辉的高度可超过 75 mm,底部摆动羽辉的高度为 10~15 mm;羽辉的高度随焊接速度的提高逐渐降低;当焊接速度达到 12 m/min 时,狭长形羽辉部分几乎消失,只存在底部摆动羽辉,其高度为 20 mm 左右.低速时,喷发的飞溅颗粒相对较少.随着焊接速度提高,飞溅颗粒数量从 1 m/min 时的约 20 颗逐渐增加至 12 m/min 的 85 颗左右.

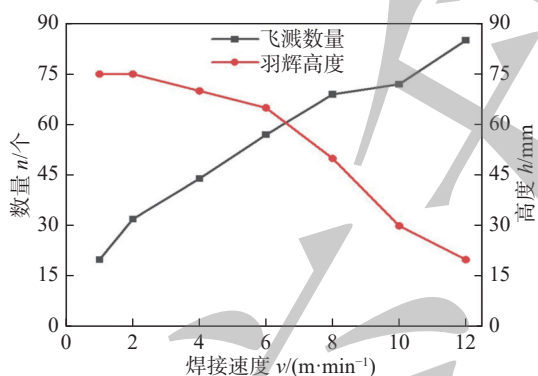


图 3 不同焊接速度下的羽辉的高度及飞溅数量

Fig. 3 Plume height and spatters number at different welding speeds

2.2 焊接速度对熔池和匙孔特性行为影响

图 4 所示为不同焊接速度时典型的熔池和匙孔形态.可发现随着焊接速度的提高,匙孔宽度有变窄的趋势,而匙孔沿焊接方向上的长度则逐渐变长.匙孔口形状从近似圆形变为近似椭圆形,且扁平程度逐渐变大,即椭圆离心率逐渐变大.在 2 m/min 的扫描速度下,在匙孔前方位置,有较厚的熔融金属层.当扫描速度在 6 m/min 以上时,匙孔位于熔池前端边缘,此时匙孔前方位置几乎不存在熔融金属层.随着焊接速度的提高,熔池的宽度也逐渐变窄,长度则逐渐变短.根据熔池图像表面不同位置的亮暗程度(反射光强度)不同,这是由于焊接过程中熔池表面的流动造成的,这也使得焊缝表面成形不光滑.

将匙孔形态近似为椭圆形态处理,使用图像处

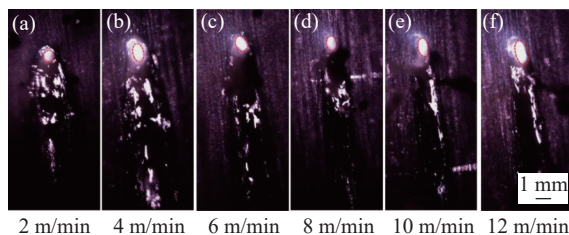


图 4 不同焊接速度时典型的熔池和匙孔口形态

Fig. 4 Morphology of molten pool and keyhole under the action of illuminated laser. (a) 2 m/min; (b) 4 m/min; (c) 6 m/min; (d) 8 m/min; (e) 10 m/min; (f) 12 m/min

理软件分别对匙孔的长度(椭圆长轴)、宽度(椭圆短轴)和熔池宽度进行测量.对匙孔的尺寸进行了测量,结果如图 5 所示.结果表明,熔池宽度与匙孔口的宽度随焊接速度的增大而减小;匙孔口的长度则随焊接速度的增加而增加.在低速时,匙孔口的尺寸相对较大,熔池宽度相对较大.焊接速度较大时,匙孔宽度与熔池宽度的比值要大于焊接速度较小时匙孔宽度与熔池宽度的比值,即高速焊接与低速焊接相比,匙孔宽度与熔池宽度更接近.

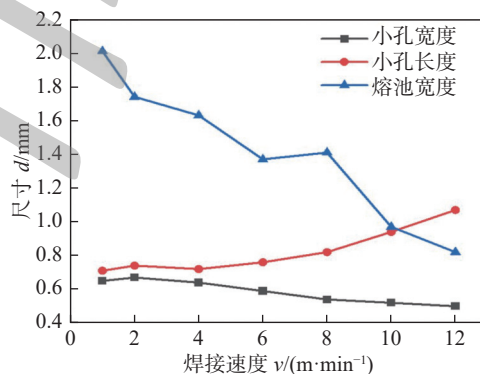


图 5 匙孔形貌及熔池宽度随焊接速度的变化

Fig. 5 Variation of keyhole morphology and molten pool width with welding speed

焊后观察焊缝表面形貌,获得不同焊接速度时典型的焊缝表面形貌如图 6 所示.低焊接速度时,

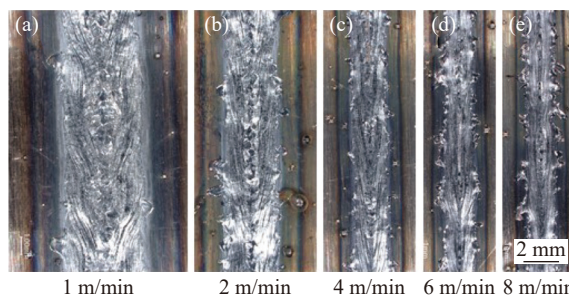


图 6 不同扫描速度下的焊缝表面形貌

Fig. 6 Surface morphology of welds at different welding speeds. (a) 1 m/min; (b) 2 m/min; (c) 4 m/min; (d) 6 m/min; (e) 8 m/min

焊缝宽度较宽,表面较为光滑,成形质量相对较好.随着焊接速度的提高,焊缝宽度逐渐变窄,表面出现驼峰、凹坑等特征,焊缝两侧的飞溅数量也增多.这也表明,随着焊接速度的增加,焊缝宽度变窄(图6)与匙孔口宽度或熔池宽度变化密切相关^[23].另外,匙孔长度逐渐变长是焊接速度提高,匙孔内激光致蒸汽喷发所致,这也使得焊接过程变得逐渐不稳定、焊缝表面成形差等焊接缺陷^[24].

2.3 焊接速度对焊缝熔深及小孔前壁的影响

探究了超音速横向气帘贴板材表面吹除羽辉之后对焊缝熔深熔宽的影响,获得的熔深和熔宽随焊接速度的变化规律如图7所示.可以看出横向气帘吹除羽辉与羽辉未被吹除之后焊缝的熔深、熔宽随焊接速度具有相同的变化趋势,均呈现为随着焊接速度的提升而逐渐降低.同时发现相较未添加横向气帘时,使用横向气帘吹除羽辉之后的熔深更深,熔宽更窄。

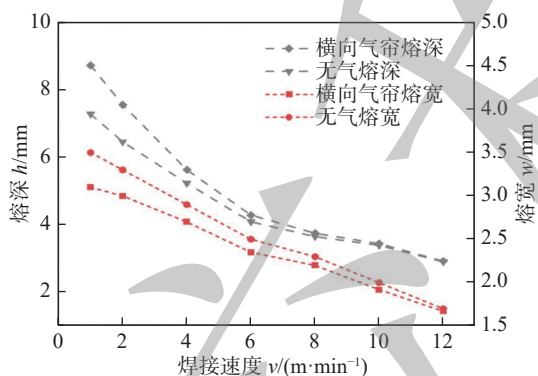


图7 横向气帘对焊缝熔深熔宽的影响规律

Fig. 7 The influence of transverse air curtain on the penetration and width of the weld

根据图7可知,焊接速度相同时,加横向气帘与未加横向气帘对焊缝熔深熔宽的影响程度明显不同.当扫描速度为1 m/min时,吹除羽辉后所得焊缝熔深相比未吹除羽辉所得焊缝熔深提高约28%,而当焊接速度达到12 m/min时,吹除羽辉后所得焊缝熔深几乎没有变化.对熔宽的影响也具有相似的规律,当扫描速度为1 m/min时,吹除羽辉后熔宽相对未吹除羽辉所得焊缝熔宽减少13%左右;而当扫描速度达到12 m/min时,吹除羽辉后所得焊缝熔深与未吹除羽辉所得焊缝熔宽相比几乎没有变化。

根据前期研究^[25],焊缝熔深与匙孔口半长轴长之比(将小孔口看作椭圆处理)可近似为匙孔前壁倾斜角的正切值.再利用反三角函数的计算方法,

可将倾匙孔前壁的倾斜角度计算出来.利用图7中未加横向气帘吹除羽辉所得焊缝熔深和图4所示匙孔沿焊接方向上的长度,求得深熔焊接过程中匙孔前壁倾斜角随焊接速度变化规律,结果如图8所示.当焊接速度为1 m/min时,小孔前壁的倾斜角度约为82°.随着焊接速度的提高,小孔前壁倾斜角逐渐变小.当焊接速度达到12 m/min时,小孔前壁的倾斜角减小至约50°.即随着焊接速度的增加,匙孔前壁的倾斜角逐渐减小。

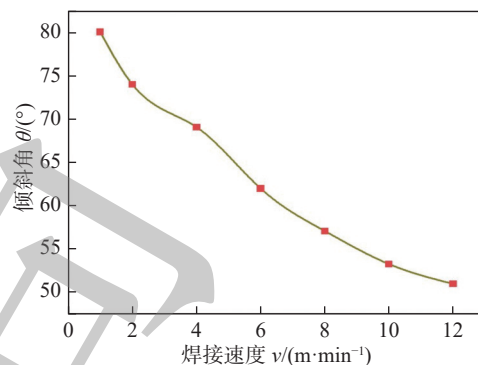


图8 小孔前壁倾斜角随焊接速度的变化规律

Fig. 8 Variation of the tilt angle of the front keyhole wall with the welding speed

3 分析与讨论

光纤激光深熔焊接中,激光束直接辐照于匙孔前壁表面,匙孔前壁表面激光光斑中心致亮斑呈现出周期性向下的运动特征^[26-29].该亮斑实为该位置处的激光致强蒸发蒸汽,其喷发方向沿前壁表面的法线方向^[30].随着焊接速度的增大,匙孔前壁的倾斜角从焊接速度1 m/min的约82°逐渐减小至12 m/min的约50°,如图8所示.因此,光纤激光深熔焊接匙孔前壁倾斜角的变化,将影响前壁表面激光致蒸发蒸汽的喷发方向,如图9所示。

羽辉是光纤激光深熔焊接过程中固有的物理现象,其形态可分为底部摆动羽辉和类似于激光束聚焦形态的狭长形羽辉:狭长形羽辉的高度可超过75 mm,具有逆光束向上的运动特征;底部摆动羽辉呈现出周期性摆动的特征,如图2所示.匙孔前壁表面激光致蒸汽的喷发是形成孔外羽辉的主要原因.焊接速度较低时,匙孔的深度相对较大.前壁表面激光致蒸汽喷发后经匙孔壁的约束,最终喷出匙孔口便形成了底部周期性摆动羽辉^[31].底部摆动羽辉的喷发过程中会携带大量微粒.当底部摆动

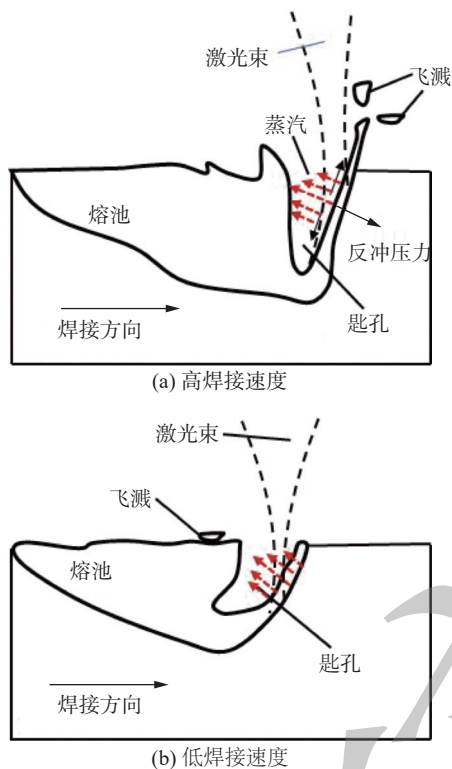


图 9 不同焊接速度下羽辉产生机理

Fig. 9 The generation mechanism of plume at different welding speeds. (a) High welding speed; (b) Low welding speed

羽辉沿光束方向喷发时,这些微粒进入激光束内并在激光束的照射下发光,便形成了类似于激光束聚焦形态的狭长形羽辉^[32-34]。

随着焊接速度的提高,匙孔变浅且匙孔前壁的倾斜角逐渐减小。由于匙孔前壁倾斜角的变小,沿匙孔前壁表面法线方向喷发的激光致蒸汽将对匙孔后壁产生更明显的冲击效应,即更易于掀开匙孔后壁孔口的熔液,如图 9b 所示。这是形成飞溅、驼峰效应、气孔、焊缝成形差等焊接缺陷的原因^[35-38]。该过程将导致匙孔口沿焊接方向的长度变长,飞溅颗粒增多,如图 2 所示。由于匙孔口沿焊接方向的长度变长,更利于匙孔前壁激光致蒸汽的喷出(减少了匙孔壁的束缚作用),故而底部摆动羽辉的喷发方向(摆动中心位置)随着焊接速度的提高逐渐偏离光束方向沿焊接反方向,如图 2 所示。随着底部摆动羽辉喷发方向的变化,其所携带的微粒则难以进入光束之中,故而狭长形羽辉的高度逐渐减小直至消失,如图 2 所示。

采用超音速横向气帘在不同高度处吹除狭长形羽辉,焊接熔深均可获得提高^[27]。焊接速度较低时,使用横向气帘贴板材表面对狭长形羽辉进行彻

底清除,发现吹除之后与吹除之前的焊缝熔深差别明显,而此时也只能是吹除狭长形羽辉,对底部摆动羽辉的调控效果有限,这是由于底部摆动羽辉速度极高,即使横向气帘也难以控制。随着速度的提升,同样的横向气帘作用方式,表明狭长形羽辉同样的去除程度,发现狭长形羽辉对焊缝熔深熔宽的影响逐渐降低。这就表明,狭长形羽辉随着焊接速度的提高对焊接过程的影响越来越小。焊接过程中采用超音速横向气帘贴近板材表面吹除狭长形羽辉,本质上是吹除光纤激光束中的微粒。该现象表明狭长形羽辉是影响光纤激光焊接熔深/熔宽的主要原因,提高焊接速度可抑制羽辉对焊接熔深/熔宽的负面影响。

光纤激光深熔焊接中,焊接速度的变化导致匙孔前壁倾斜角的变化。而匙孔前壁倾斜角的变化改变了匙孔前壁激光致蒸汽的喷发状态,进而对匙孔外羽辉的特性行为及羽辉对焊接过程的负面效应带来明显的影响。低焊接速度时,羽辉分为狭长形羽辉和底部摆动羽辉,狭长形羽辉对焊接过程具有重要的负面影响。焊接速度较高时,底部羽辉的喷发方向偏离激光束沿焊接反方向。此时,底部摆动羽辉所携带的微粒则难以进入光纤光束之中,狭长形羽辉及其对焊接熔深/熔宽的负面影响均消失。但沿匙孔前壁表面法线方向喷发的激光致蒸汽(底部摆动羽辉)对匙孔后壁的冲击,致使飞溅数量变多,焊缝成形质量变差,如图 3 和图 6 所示。

4 结论

(1) 随着焊接速度的提高,匙孔口沿焊接方向上的长度逐渐增大,匙孔前壁的倾斜角则逐渐减小;底部摆动羽辉的喷发方向沿焊接反方向逐渐偏离激光束,狭长形羽辉逐渐消失。

(2) 随着匙孔前壁倾斜角的减小,羽辉对焊接熔深/熔宽的负面影响逐渐减弱直至可忽略不计,飞溅的数量则逐渐变多,焊缝表面成形质量则逐渐恶化。但匙孔前壁激光致蒸汽对匙孔后壁的冲击将导致孔口沿焊接方向的直径变大、飞溅增多、焊缝表面成形质量变差。

(3) 匙孔前壁激光致蒸汽的喷发方向随焊接速度的变化是底部摆动羽辉的喷发方向和狭长形羽辉高度均发生改变的主要原因。

参考文献

- [1] Yu H, Tan S, Pan H, *et al.* High efficiency 600 W, 100 μm wavelength stabilized fiber coupled laser diode module for fiber laser pumping[C]//High-Power Diode Laser Technology XIX. 2021.
- [2] Saha P, Datta S, Raza M S, *et al.* Effects of heat input on weld-bead geometry, surface chemical composition, corrosion behavior and thermal properties of fiber laser-welded nitinol shape memory alloy[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(5): 2754 – 2763.
- [3] Sharma L, Chhibber R. Study of weld bead chemical, microhardness & microstructural analysis using submerged arc welding fluxes for linepipe steel applications[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(15): 25677.
- [4] Hao K, Wang H, Gao M, *et al.* Laser welding of AZ31B magnesium alloy with beam oscillation[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2019, 8(3): 3044 – 3053.
- [5] 赵乐, 曹政, 邹江林, 等. 高功率光纤激光深熔焊接匙孔的形貌特征[J]. *中国激光*, 2020, 47(11): 1102005.
- Zhao Le, Cao Zheng, Zou Jianglin, *et al.* Keyhole morphological characteristics in high-power deep penetration fiber laser welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(11): 1102005.
- [6] Quintino L, Costa A, Miranda R, *et al.* Welding with high power fiber lasers a preliminary study[J]. *Materials and Design*, 2007, 28(4): 1231 – 1237.
- [7] 徐国建, 李响, 杭争翔, 等. 光纤激光及 CO_2 激光焊接高强钢[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 031403.
- Xu Guojian, Li Xiang, Hang Zhengxiang, *et al.* Fiber laser and CO_2 laser welding of high-strength steel[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 031403.
- [8] Li R, Wang T, Wang C, *et al.* A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 64: 172 – 183.
- [9] Zhang B, Dong Y, Du Y, *et al.* Microstructure and formability performance of fiber laser welded 1.2 GPa grade hot-rolled TRIP steel joints[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143(34): 107 – 341.
- [10] Shcheglov P Y, Gumenyuk A V, Gornushkin I B, *et al.* Vapor-plasma plume investigation during high-power fiber laser welding[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(1): 016001.
- [11] Kawahito Y, Kinoshita K, Matsumoto N, *et al.* Effect of weakly ionised plasma on penetration of stainless steel weld produced with ultra high power density fibre laser[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2013, 13(8): 749 – 753.
- [12] Li S C, Chen G, Zhang M J, *et al.* Dynamic keyhole profile during high-power deep-penetration laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 565 – 570.
- [13] 韩雪, 赵宇, 邹江林, 等. 基于可视化观察的光纤激光深熔焊接羽辉形成原因分析[J]. *中国激光*, 2020, 47(6): 0602004.
- Han Xue, Zhao Yu, Zou Jianglin, *et al.* Analysis of plume formation in fiber laser deep penetration welding based on visual observation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(6): 0602004.
- [14] Chen G, Zhang M, Zhao Z, *et al.* Measurements of laser-induced plasma temperature field in deep penetration laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 551 – 557.
- [15] Cai Y, Heng H, Li F, *et al.* The influences of welding parameters on the metal vapor plume in fiber laser welding based on 3D reconstruction[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 1 – 7.
- [16] Li M, Xiao R S, Zhou J L *et al.* A multiple synchronous imaging method for strong illuminants induced during a hot working process[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(6): 66003 – 66003.
- [17] Zhang M, Zhang Z, Tang K, *et al.* Analysis of mechanisms of underfill in full penetration laser welding of thick stainless steel with a 10 kW fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 98: 97 – 105.
- [18] 邹江林, 吴世凯, 肖荣诗, 等. 高功率光纤激光和 CO_2 激光焊接熔化效率对比[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0803002.
- Zou Jianglin, Wu Shikai, Xiao Rongshi, *et al.* Comparison of melting efficiency in high power fiber laser and CO_2 laser welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0803002.
- [19] 张明军. 万瓦级光纤激光深熔焊接厚板金属蒸气行为与缺陷控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- Zhang Mingjun. Study on the behavior of metallic vapor plume and defects control during deep penetration laser welding of thick plate using 10-kW level high power fiber laser [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [20] Zou J L, Yang W X, Wu S K, *et al.* Effect of plume on weld penetration during high-power fiber laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(2): 022033.
- [21] Li S, Chen G, Zhang Y, *et al.* Investigation of keyhole plasma during 10 kW high power fiber laser welding[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(10): 106003.
- [22] Zhao L, Tsukamoto S, Arakane G, *et al.* Prevention of porosity by oxygen addition in fiber laser and fiber laser-GMA hybrid welding[J]. *Science & Technology of Welding & Joining*, 2014, 19(2): 91 – 97.
- [23] Schmidt L, Schricker K, Bergmann J P, *et al.* Effect of local gas flow in full penetration laser beam welding with high welding speeds[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(5): 1 – 19.
- [24] Bao H T, Liu J H, Liu k, *et al.* Effect of vacuum laser welding process parameters on penetration depth of AZ31 magnesium alloy and defect analysis[J]. *Applied laser*, 2008, 28(5): 570 – 577.
- [25] 张高磊, 孔华, 邹江林, 等. 高功率光纤激光深熔焊接飞溅特性以及离焦量对飞溅的影响[J]. *中国激光*, 2021, 48(22): 79 – 86.
- Zhang Gaolei, Kong Hua, Zou Jianglin, *et al.* Spatter characteristics

- ics of high-power fiber laser deep penetration welding and effect of defocusing amount[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(22): 79 – 86.
- [26] Zou J L, Han X, Zhao Y, *et al.* Investigation on plume formation during fiber laser keyhole welding based on in-situ measurement of particles in plume[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 65(15): 153 – 160.
- [27] Cui Bing, Song Longyu, Liu Zhangwei, *et al.* Study of the morphology and properties of diamond joints brazed with carbide-reinforced Cu-Sn-Ti filler metal[J]. China Welding, 2022, 31(3): 53 – 60.
- [28] Zou J L, Ha N, Xiao R S, *et al.* Interaction between the laser beam and keyhole wall during high power fiber laser keyhole welding[J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17650 – 17656.
- [29] 赵乐, 韩雪, 邹江林, 等. 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 227 – 233.
- Zhao Le, Han Xue, Zou Jianglin, *et al.* Research on formation process of keyhole during fiber laser deep penetration welding[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 227 – 233.
- [30] Zhang G L, Zhu B Q, Zou J L, *et al.* Correlation between the spatters and evaporation vapor on the front keyhole wall during fiber laser keyhole welding[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6): 15143 – 15152.
- [31] Greses J, Hilton P A, Barlow C Y, *et al.* Plume attenuation under high power Nd: yttrium aluminum garnet laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2004, 16(1): 9 – 15.
- [32] Abe Y, Mizutani M, Kawahito Y, *et al.* Deep penetration welding with high-power laser under vacuum[J]. Trans Joining Weld Res Inst, 2010, 40(1): 9 – 15.
- [33] Zou J L, Wu S K, Yang W X, *et al.* A novel method for observing the micro-morphology of keyhole wall during high-power fiber laser welding[J]. Materials & Design, 2016, 89(6.): 785 – 790.
- [34] Fabbro R, Slimani S, Coste F, *et al.* Study of keyhole behaviour for full penetration Nd-Yag CW laser welding[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2005, 38(12): 1881.
- [35] Oiwa S, Kawahito Y, Mizutani M, *et al.* Effect of atmosphere above specimen on welding results during remote welding[J]. Journal of Laser Applications., 2011, 23(2): 022007.
- [36] Lescoute E, Hallo L, Hébert D, *et al.* Experimental observations and modeling of nanoparticle formation in laser-produced expanding plasma[J]. Physics of Plasmas, 2008, 15(6): 63507.
- [37] Shcheglov P Y, Uspenskiy S A, Gumenyuk A V, *et al.* Plume attenuation of laser radiation during high power fiber laser welding[J]. Laser Physics Letters, 2011, 8(6): 475 – 480.
- [38] 牛小男, 崔丽, 王鹏, 等. 镍铝青铜过渡层对钛合金/不锈钢异种材料激光焊接头组织与力学性能的影响 [J]. 焊接学报, 2022, 43(1): 42 – 47.
- Wang Xiaonan, Cui Li, Wang Peng, *et al.* Effect of nickel-aluminum bronze transition layer on microstructure and mechanical properties of laser welding head of titanium alloy/stainless steel dissimilar material[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(1): 42 – 47.
-
- 第一作者: 孔华, 硕士; 主要研究方向为激光先进制造;
Email: kongh@emails.bjut.edu.cn.
- 通信作者: 邹江林, 博士, 副研究员, 博士研究生导师;
Email: zoujianglin@bjut.edu.cn.

(编辑: 王娇)