

Ti6Al4V 合金低真空激光焊接头形貌特征分析

黄瑞生, 李想, 邹吉鹏, 武鹏博, 滕彬, 苏金花, 孙元奇
(中国机械总院集团哈尔滨焊接研究有限公司, 哈尔滨, 150028)

摘要: 为了探究 Ti6Al4V 合金在低真空环境不同焊接参数下激光焊接头的形貌特征, 在 5 Pa 环境压力下对其进行非熔透焊接, 分析了激光功率及离焦量对焊接接头形貌的影响规律, 并对典型接头形貌的稳定性及形成区间进行分析。结果表明, 低真空环境下激光焊工艺参数的宽范围改变均可以得到较为理想的焊接质量, 焊缝熔深随输出功率的增加而近似线性增加, 未发生常压气氛下万瓦级激光焊存在的若干缺陷问题。焊接接头的几何形貌特征可分为 2 种, 线能量利用系数小于 0.13 或大于 0.14 时形成的 U 形形貌, 以及线能量利用系数在 0.13 与 0.14 之间时形成的 V 形形貌。V 形形貌匙孔维持稳定所需要的蒸气压力远大于 U 形, 因此 V 形形貌匙孔较难维持准稳态, 焊缝熔深波动较大, 易在焊缝底部形成缺陷。

创新点: 分析了 Ti6Al4V 合金低真空激光焊接头形貌特征, 对典型几何形貌的匙孔稳定性进行了相关计算, 并将形貌特征与线能量利用系数相关联, 提出优化的工艺窗口。

关键词: 低真空激光焊接; 钛合金; 焊接接头形貌

中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20221130001

0 序言

近些年, 随着国内工业产品的快速迭代发展, 具备低密度、高比强度和耐腐蚀性等优异综合性能的钛合金系列材料开始被深入研究, 钛合金也成为了航空航天、海洋工程和生物科学等诸多领域广泛使用的首选材料之一^[1]。由于钛合金诸多特殊的物化性能, 对其制备工艺尤其是焊接工艺特征的分析十分重要^[2]。钛合金的化学性质活泼, 在 350 °C 以上温度, 钛很容易与大多数气体发生冶金反应^[3], 若焊接保护措施不当, 接头易产生气孔、裂纹、焊缝氧化、接头脆化等问题^[4], 因此在真空环境下进行焊接被认为是连接钛合金最合适的方式^[5]。

目前相对成熟的真空环境焊接方式为电子束焊与高功率激光焊, 其中, 真空电子束焊应用最为广泛, 国内外学者已经对钛合金电子束焊的工艺特

性、微观结构和力学性能等进行了大量研究^[6-8]。相比之下, 自 1985 年日本大阪大学^[9-10]首次提出真空激光焊方法后, 只在近十几年时间国内外对该技术的研究开始增多^[11-14], 这跟近些年工业激光器的飞速发展息息相关。

Youhei 等人^[15]、Reisgen 等人^[16]试验证明, 真空激光焊所需的“真空环境压力”更加宽泛, 焊接缺陷率大幅降低, 焊缝几何形状及其轮廓可以得到极大的改善; Jiang 等人^[17]发现这种亚气氛很容易获得良好的激光焊接质量, 并且其加工窗口比在常压下要大得多。目前, 国内外关于环境压力对激光焊熔深和焊缝质量的影响研究报道较多, 对真空激光焊接头形貌特征研究相对较少。因此, 文中将以 Ti6Al4V 合金为研究材料, 分析低真空环境 (5 Pa) 下激光功率及离焦量对焊缝形貌的影响规律, 对典型接头形貌的稳定性及形成区间进行分析, 获得优化的焊接工艺窗口, 为真空激光焊技术在钛合金厚板焊接领域的实际应用提供技术参考。

1 试验方法

收稿日期: 2022-11-30

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFB3401100); 黑龙江省头雁行动计划-能源装备先进焊接技术创新团队资助项目 (201910312)。

试验材料为退火态的 Ti6Al4V 合金, 化学成分

见表1, 将尺寸为 $300\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 80\text{ mm}$ 的钛合金待焊试板采用酸洗方法 (酸洗液 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:3:6$ 浸泡 5 min, 然后用 NaOH 溶液进行碱

中和) 去除焊接面氧化层后清水冲洗并烘干, 以确保试件表面清洁, 处理好的试板放置在真空舱内并加持固定。

表 1 试验材料化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of the base metal Ti6Al4V

| Al | V | Fe | C | N | H | O | Ti |
|------|------|-------|-------|--------|--------|------|----|
| 6.30 | 4.11 | 0.018 | 0.024 | 0.0044 | 0.0014 | 0.17 | 余量 |

低真空激光焊示意图如图1所示, 使用的激光设备是 IPG YLS-30000, 最大持续输出功率为 30 kW, 激光束通过光纤传输到激光枪头, 激光枪头位于真空舱室内部并通过运动系统进行枪头运动控制。在实际焊接过程中, 为保证激光枪头不受反射光的损伤, 激光头沿着焊接方向倾斜 10°, 激光束以 10°入射角作用于焊接位置, 焊接方向沿着试板轧制方向。玻璃真空箱采用一组旋片式机械泵进行抽气, 可以提供最低 5 Pa 的工作环境压力, 为了讨论低真空环境下焊接参数对焊缝形貌的影响规律, 试验采用的工艺参数如下: 环境压力为 5 Pa, 焊接速度为 0.8 m/min, 激光输出功率为 5~30 kW, 离焦量为 $-50\sim 0\text{ mm}$, 试验均为未熔透平板焊接。

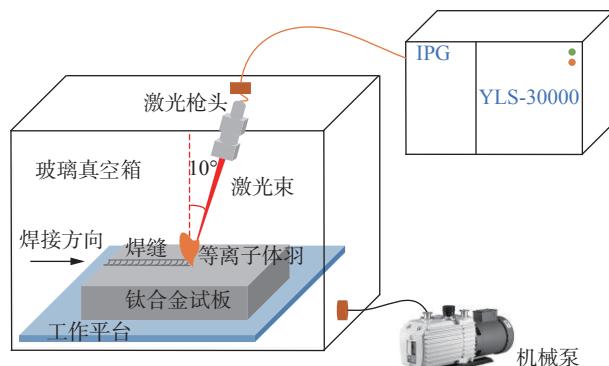


图 1 低真空激光焊接布置示意图
Fig. 1 Layout of low vacuum laser welding

将焊接完成后的样件使用电火花数控线切割机床进行金相试样取样, 并按照标准程序制备金相试样。在研磨、粗抛、精抛后用酒精洗净后进行浸蚀, 浸蚀液配比为 $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:4:45$, 时间控制在 20 s 左右, 最后将残酸用酒精冲洗掉, 并用吹风机吹干, 采用 OLYMPUS GX71 光学显微镜对焊接接头进行观察。

2 试验结果与分析

2.1 低真空激光焊接头形貌

在低真空激光焊中, 激光功率与离焦量对焊缝

形貌有十分显著的影响, 因此, 为了分析工艺参数对钛合金低真空激光焊特性的影响, 开展了系列试验。为保证数据准确性, 每个参数下截取同一焊缝的多处横截面进行焊接接头形貌分析, 截取同一焊缝纵截面进行焊接接头熔深波动分析。不同激光功率和离焦量下, 焊缝的表面和横截面典型形貌特征如图2和图3所示。不同激光功率和离焦量下对应焊缝的熔深、熔宽、熔深波动数值, 如图4和图5所示。

如图2所示, 激光功率为 15 kW 时焊缝表面开始出现小颗粒飞溅, 此后随着激光功率的增加, 飞溅尺寸增大、数量增多。焊缝表面颜色由金属本色逐渐变为金黄色, 部分后凝固区域由于热积累效应表面呈现出了蓝色。文中在激光输出功率为 5~30 kW 宽范围内均得到了比较光滑的焊缝表面成形, 是可以接受的焊接质量, 未发生在常压气氛下万瓦级激光焊出现的大量飞溅和表面塌陷等焊缝难以成形的问题^[18]。由于低真空条件下, 焊缝表面成形对激光功率的变化与常压万瓦级激光焊接相比并不十分敏感, 因此其工艺适应性较为良好, 这是低真空激光焊技术的优势之一。低真空激光焊焊缝熔深随输出功率的增加而近似线性增加, 在激光功率为 30 kW 时获得最大焊接熔深可达 67.6 mm, 如图2所示, 未发生在常压气氛下由于等离子体蒸气羽辉对入射激光强烈的损耗效应而导致的焊接熔深难以随功率增加而持续增长的问题^[19]。

如图3所示, 低真空焊接条件下离焦量在 $-50\sim 0\text{ mm}$ 宽范围变化时, 同样得到了光滑均匀的焊缝表面成形。随着离焦量的增加, 焊缝熔宽略有增加, 焊缝熔深呈现先增大后减小的趋势, 在离焦量为 -20 mm 时焊接熔深达到最大值 27.9 mm。

通过统计大量不同焊接参数得到的焊缝横截面形貌发现, 接头几何形状特征可分为 2 种: 一种为底部形貌光滑过渡的 U 形, 另一种为底部形貌尖锐过渡的 V 形。

试验结果发现, 这种 V 形焊缝底部形貌极易导

致焊缝出现“钉尖缺陷”，对于未熔透焊接来说，“钉尖缺陷”会成为裂纹的萌生和扩展源，在焊缝根部造成应力集中，降低接头的疲劳性能。高福洋等人^[20]认为，焊缝根部匙孔内壁无法维持稳定，液态金属凸出向匙孔坍塌，金属蒸气不能完全逸出，在快速冷却条件下，液态金属凝固后形成钉尖缺陷。此外，通过测量焊缝纵截面熔深连续变化，发现 V 形形貌

熔深波动值远大于 U 形焊缝。在图 4 中，V 形形貌焊缝熔深波动值在 ± 2.6 mm 之间，U 形形貌焊缝熔深波动值在 ± 0.8 mm 之间。在图 5 中，V 形形貌焊缝熔深波动值在 ± 1.8 mm 之间，U 形形貌焊缝熔深波动值在 ± 0.41 mm 之间。“钉尖缺陷”的形成以及熔深数值的较大波动说明此种工艺条件焊接过程中匙孔的波动较为剧烈，处于非稳定状态。

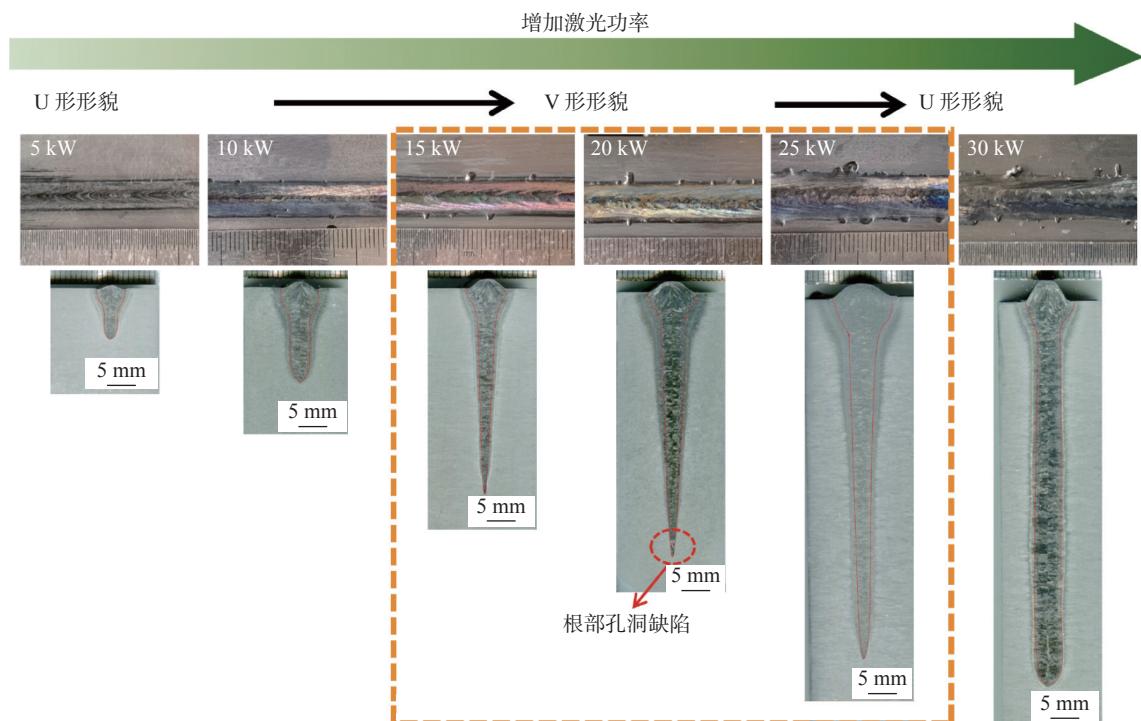


图 2 离焦量-50 mm 条件下，不同激光输出功率的焊缝表面和截面形貌

Fig. 2 Weld surface appearances and cross sections with different laser power at -50 mm defocus distance

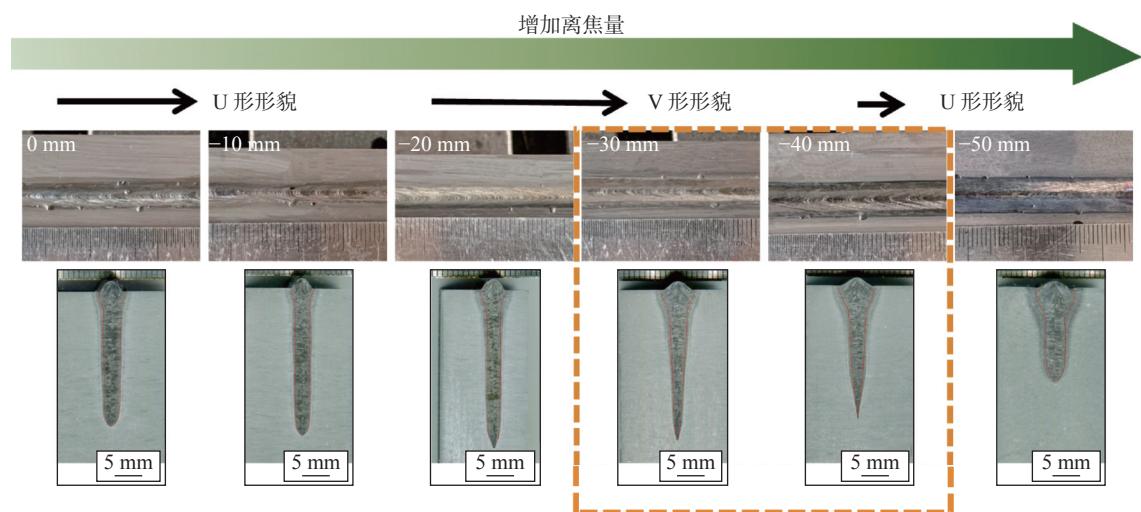


图 3 环境压力 5 Pa，焊接速度 0.8 m/min，激光输出功率 10 kW 条件下不同离焦量的焊缝表面和截面形貌

Fig. 3 Weld surface appearances and cross sections with different defocus distance at laser power 10 kW

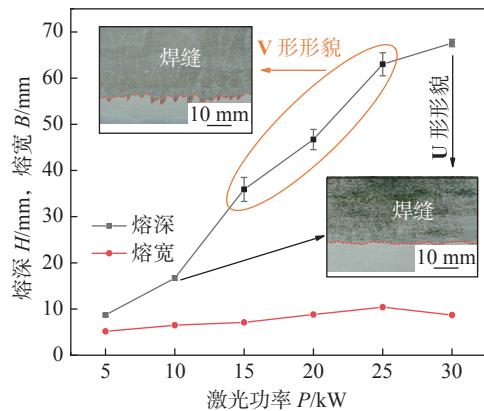


图 4 熔深和熔宽随激光功率的变化

Fig. 4 Variation of melting depth and width with power

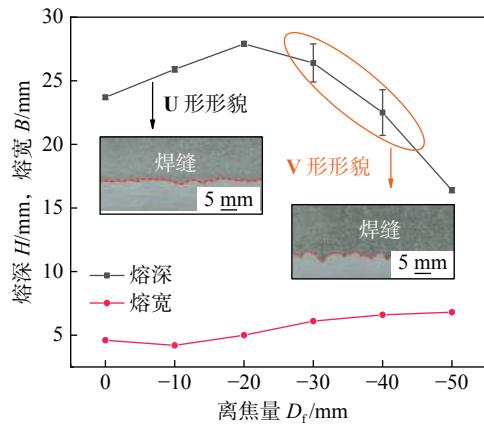


图 5 熔深和熔宽随离焦量的变化

Fig. 5 Variation of melting depth and width with defocus distance

2.2 接头形貌特征稳定性分析

2.1 节中发现的 2 种接头几何形状的形成与匙孔状态直接相关。低真空激光焊过程中, 在高能量密度激光束作用下, 材料表面受热迅速熔化、蒸发气化。强烈的金属蒸气压力作用于焊接熔池并形成匙孔, 饵孔的形成及维持准稳态是金属蒸气压力、环境压力、表面张力和流体静压力共同作用的结果^[21]。匙孔的张开及维持主要是靠激光能量的不断输入产生的材料蒸发气化反冲压力 P_v 来实现, 饵孔内壁及熔融金属的表面张力引起的压力 P_σ , 由于重力引起的流体静压力 P_h , 以及环境压力 P_0 (本试验为 5 Pa), 都试图关闭匙孔, 是匙孔存在并维持稳定的主要阻力。

为了深入探讨在低真空激光焊条件下 2 种接头几何形态下的匙孔稳定性, 分析了理想条件下 U 形和 V 形 2 种情况的匙孔内部压力平衡关系。在理想平衡状态, 饵孔底部压力平衡如图 6 所示, 平衡方程为

$$P_v = P_0 + P_\sigma + P_h \quad (1)$$

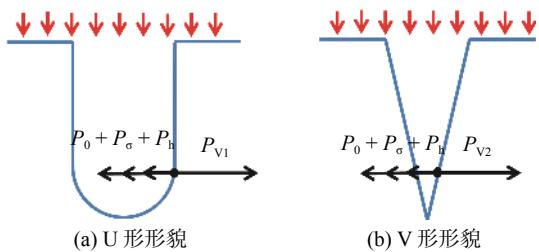


图 6 理想状态匙孔底部压力平衡

Fig. 6 Schematic of the keyhole state in ideal state of equilibrium. (a) type U shape; (b) type V shape

文中对 2 种几何形貌的平衡方程分别进行独立计算, 对于 U 形形貌: 环境压力 P_0 为 5 Pa, 表面张力引起的压力 $P_\sigma = \sigma/r$ 为匙孔壁面处的表面张力与匙孔平均半径之比, 当锁孔壁表面张力为 2 N/m^[22], 孔壁底部平均半径根据实际焊接结果取 2 mm 时, P_σ 约为 1 kPa; 当钛合金熔池密度 ρ 为 4.5×10^3 kg/m³, 重力加速度 g 为 9.8 m/s², 饵孔深度 h 根据实际焊接结果取 30 mm 时, 流体静压 $P_h = \rho gh \approx 1.3$ kPa. 基于式 (1), P_{v1} 约为 2.3 kPa.

对于 V 形形貌: 环境压力 P_0 为 5 Pa, 当锁孔壁表面张力 σ 为 2 N/m, 根据实际焊接结果孔壁底部平均半径 r 为 0.2 mm 时, $P_\sigma = \sigma/r$ 约为 10 kPa, 由于匙孔平均半径的降低造成此项数值可以达到 U 形形貌时数值的 10 倍以上; 当钛合金熔池密度 ρ 为 4.5×10^3 kg/m³, 重力加速度 g 为 9.8 m/s², 饵孔深度 h 取 30 mm 时, 流体静压 P_h 约为 1.3 kPa. 基于式 (1), P_{v2} 约为 11.3 kPa.

综上可知, 由于匙孔形态的不同, U 形形貌维持稳定所需要的蒸气压力 P_{v1} 远小于 V 形形貌所需要的蒸气压力 P_{v2} , 也就是说 V 形形貌匙孔较难维持准稳态, 更易产生闭合. 这也是为什么当焊缝截面几何形貌为 V 形时, 极易导致焊缝底部出现“钉尖缺陷”, 甚至会在底部出现尺寸较大气孔, 以及熔深波动较大的原因, 因此, 对于非熔透焊接, 应当予以避免 V 形焊缝形貌的形成. 虽然上述计算没有考虑到环境压力的改变对材料物理性质的改变以及忽略了匙孔壁振荡和塌陷等动态变化过程, 但它可以反映 2 种接头几何形状稳定性的物理机制.

2.3 V 形焊缝形貌形成区间

以上对 2 种焊缝截面形貌的匙孔稳定性进行了对比计算分析, 得出 V 形几何形貌更难以维持稳

定, 是一种非稳态焊缝形貌特征的结论。文中将继续探究易形成 V 形焊缝形貌的焊接工艺区间, 为 Ti6Al4V 合金低真空激光非熔透焊提供工艺指导。

为了将工艺区间与形成焊缝的有效激光能量传输相关联, 这里讨论线能量对激光作用结果的影响程度。线能量 (LE) 与激光输出功率 (P) 和焊接速度 (v) 相关

$$LE = P/v \quad (2)$$

进一步地, 将焊缝熔凝区面积 (FZ) 与线能量 (LE) 进行关联, 引入一个新的参数, 称为线能量利用系数 (LEUF, 单位为 mm^3/J), 物理意义为单位激光能量形成的有效熔凝区体积。

$$\text{LEUF} = FZ/LE \quad (3)$$

试验激光功率为 5~30 kW、离焦量为 -50~0 mm 条件下的焊接结果进行 LEUF 计算, 结果如图 7 所示。图中 B 区域为 V 形几何形貌形成区, A 区和 C 区为 U 形几何形貌形成区。

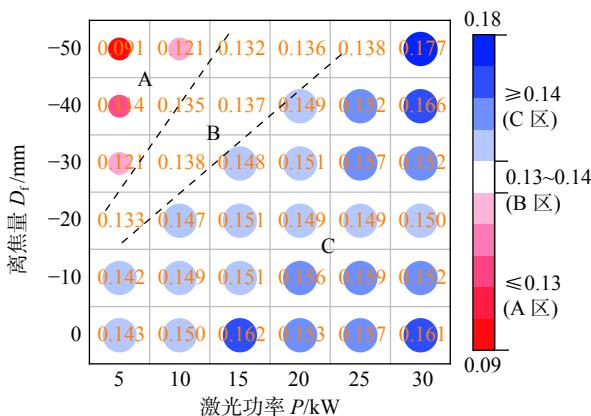


图 7 线能量利用系数 (LEUF) 计算结果
Fig. 7 Results of line energy utilization factor

由 LEUF 计算结果可以看到, 当 LEUF 小于 0.13, 即单位激光能量形成的有效熔凝区体积处在较低水平时, 如图 7 中 A 区域所示, 焊缝易为熔深较浅的 U 形形貌。这可能是因为此时光束离焦距离普遍偏大, 而激光输出功率偏小, 这就造成了激光能量被材料表面过度分散使得材料对激光能量的吸收率大幅降低, 难以形成较深的匙孔; 当 LEUF 大于 0.14, 即单位激光能量形成的有效熔凝区体积处在较高水平时, 如图 7 C 区域所示, 焊缝易为熔深较深的 U 形形貌。这可能是因为此时能量密度集中, 深熔匙孔对激光能量的菲涅尔吸收强度较高, 饵孔更易维持准稳态; 但当 LEUF 处于 0.13~0.14 之间时, 如图 7 中 B 区域所示, 饵孔易

为 V 形形貌。这可能是因为此时虽然会形成深熔匙孔, 但维持匙孔张开的材料蒸发气化压力不足以使匙孔底部维持准稳态, 容易发生塌陷闭合, 造成了熔深的不稳定波动, 甚至形成焊接缺陷。

通过以上分析, Ti6Al4V 合金低真空环境非熔透激光焊时, 焊接工艺的选择应规避图 7 中的 B 区域范围参数。受目前结果的启发, 接下来的工作将引入焊接速度的变化及全熔透焊接情况来分析 Ti6Al4V 合金低真空激光焊接头形貌特征。

3 结论

(1) 低真空环境激光焊焊缝表面成形良好, 焊缝熔深可以随输出功率的增加而近似线性增加, 文中最大焊接熔深可达 67.6 mm, 焊缝截面存在 U 形和 V 形 2 种不同的几何形貌, 其中 V 形形貌易在焊缝底部形成缺陷, 熔深波动值大于 U 形焊缝。

(2) U 形形貌维持稳定所需要的蒸气压力远小于 V 形形貌所需要的蒸气压力, V 形形貌匙孔较难维持准稳态, 更易产生闭合, 这是 V 形形貌底部易形成缺陷、熔深波动较大的原因。

(3) 当焊接工艺区间的线能量利用系数 (LEUF) 小于 0.13 或大于 0.14 时易形成 U 形焊缝形貌, 当 LEUF 处于 0.13~0.14 之间时焊缝易为 V 形貌。

参考文献

- [1] Gao F Y, Mu Z Z, Ma Z W, et al. Fine microstructure characterization of titanium alloy laser narrow gap welded joint[J]. China Welding, 2021, 30(3): 31~38.
- [2] 方乃文, 郭二军, 徐锴, 等. 钛合金激光填丝焊缝晶粒生长及相变原位观察 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1665~1672.
Fang Naiwen, Guo Erjun, Xu Kai, et al. In-situ observation of grain growth and phase transformation in laser welding of titanium alloy with filler wire[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6): 1665~1672.
- [3] Qin Y Q, Zhang D F, Jiang W X, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of titanium alloy Ti60 after laser welding and subsequent heat treatment[J]. Metal Science and Heat Treatment, 2021, 62(11-12): 689~695.
- [4] Zhang L J, Pei J Y, Jian L, et al. Effects of laser welding and post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of aged Ti55531 alloy[J]. Materials, 2018, 11(10): 1907.
- [5] Zeng C Y, Zhang Y P, Hu J L, et al. The role of microstructure on corrosion fatigue behavior of thick-plate Ti6Al4V joint via vacu-

- um electron beam welding[J]. Vacuum, 2020, 182: 109714.
- [6] Lu Y, Turner R, Brooks J, *et al*. A study of process-induced grain structures during steady state and non-steady state electron-beam welding of a titanium alloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 11(18): 117 – 127.
- [7] Hu M J, Liu J H. Effects of zonal heat treatment on residual stresses and mechanical properties of electron beam welded TC4 alloy plates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(2): 324 – 329.
- [8] Cheng M, Yu B, Guo R, *et al*. Electron beam welding of a novel near α high temperature titanium alloy powder compact: effect of post-welding heat treatment on tensile properties[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 10(5): 153 – 163.
- [9] Yoshiaki A, Nobuyuki A, Tatsuharu O. Fundamental phenomena in high power CO₂ laser (report II): vacuum laser welding (welding physics, process & instrument)[J]. Transactions of JWRI, 1985, 14(2): 217 – 222.
- [10] Katayama S, Kobayashi Y, Mizutani M, *et al*. Effect of vacuum on penetration and defects in laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2001, 13(5): 187 – 192.
- [11] 孟圣昊, 司昌健, 任逸群, 等. 中厚板 TC4 钛合金真空环境激光焊接特性 [J]. 焊接学报, 2021, 42(8): 40 – 47.
Meng Shenghao, Si Changjian, Ren Yiqun, *et al*. Laser welding characteristics of TC4 titanium alloy in vacuum environment[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(8): 40 – 47.
- [12] 姜梦. 低真空激光焊接特性及热物理过程的试验研究与数值模拟 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Jiang Meng. Experimental study and numerical modeling of thermophysical process in laser welding under low vacuum and its welding characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [13] Reisgen U, Olschok S, Jakobs S, *et al*. Welding with the laser beam in vacuum[J]. Laser Technik Journal, 2015, 12(2): 42 – 46.
- [14] Francis J A, Holtum N, Olschok S, *et al*. Vacuum laser welding of SA508 steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 274: 116269.
- [15] Youhei A, Yousuke K, Hiroshi N, *et al*. Effect of reduced pressure atmosphere on weld geometry in partial penetration laser welding of stainless steel and aluminium alloy with high power and high brightness laser[J]. Science & Technology of Welding & Joining, 2014, 19(4): 324 – 332.
- [16] Reisgen U, Olschok S, Turner C. Welding of thick plate copper with laser beam welding under vacuum[J]. Journal of Laser Applications, 2017, 29(2): 022402.
- [17] Jiang M, Tao W, Chen Y B, *et al*. Comparison of processing window in full penetration laser welding of thick high-strength steel under atmosphere and sub-atmosphere[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 109: 449 – 455.
- [18] 张明军. 万瓦级光纤激光深熔焊接厚板金属蒸汽行为与缺陷控制 [D]. 湖南: 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]. Hunan: Hunan University, 2013.
- [19] Luo Y. Bubble flow and the formation of cavity defect in weld pool of vacuum electron beam welding[J]. Vacuum, 2011, 86(1): 11 – 17.
- [20] 高福洋, 高奇, 蒋鹏, 等. 钛合金电子束深熔焊根部缺陷机理分析 [J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 30 – 34.
Gao Fuyang, Gao Qi, Jiang Peng, *et al*. Analysis on mechanism of root defect in titanium alloy electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 30 – 34.
- [21] Zhao H, Niu W, Zhang B, *et al*. Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(48): 485302.
- [22] Pang S Y, Chen X, Shao X Y, *et al*. Dynamics of vapor plume in transient keyhole during laser welding of stainless steel: local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 82: 28 – 40.

第一作者: 黄瑞生, 博士, 正高级工程师; 主要从事激光焊接技术与装备的科研工作; Email: huangrs8@163.com.

(编辑: 高忠梅)