钒作中间层的 TC4 钛合金与 316L 不锈钢双道激光焊接

余腾义[1], 陈树海[2], 刘　珂[1], 贾　旭[2], 陈　容[1]

（1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀钢集团研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000; 2. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083）

摘　要: 采用 TC4 钛合金和 316L 不锈钢作为母材, 纯钒作为中间层材料, 进行了双道激光焊接试验。研究了焊接速度、光束偏移量对焊缝成形、显微组织、力学性能的影响, 并进行了分析测试。结果表明: 在钛合金一侧的钒中间层可发生一定程度的熔化, 但界面近域均为固溶体, 对接头的力学性能影响较小。在钒与不锈钢一侧, 钒中间层与不锈钢呈钎焊界面, 钒发生一定程度的溶解与扩散, 形成扩散层。随着钢侧光束偏移量的增加, V/Fe 界面扩散层的厚度减小, 偏移量为 0.3 mm 时, 界面扩散层厚度达到 35.8 μm, 此时抗拉强度最高达到 406.9 MPa, 断裂位置为钒/不锈钢界面处, 断口呈韧性断裂特征。

关键词: 钛合金; 不锈钢; 双道激光焊接; 钒中间层; 焊接速度; 光束偏移量

中图分类号: TF823,TG456.7　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2023)02−0092−06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.02.013　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 聊科研 与作者互动

Two pass laser welding of TC4 titanium alloy and 316L stainless steel with vanadium interlayer

Yu Tengyi[1], Chen Shuhai[2], Liu Ke[1], Jia Xu[2], Chen Rong[1]

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co.,Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. School of Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A two-pass laser welding test was carried out using TC4 titanium alloy and 316L stainless steel as the base material and pure vanadium as the interlayer material. The influence of welding speed and beam offset on weld formation, microstructure, and mechanical properties were studied and analyzed. The results show that the vanadium interlayer on the side of titanium alloy can be melted to a certain extent. Still, all near the interface are the solid solution, and the mechanical properties of the joint are less affected. On the side of stainless steel, the vanadium interlayer is brazed with the stainless steel. Vanadium dissolves and diffuses to some extent, forming a diffusion layer. With the increase of beam offset on the steel side, the thickness of the V/Fe interface diffusion layer decreases. At an offset of 0.3 mm, the thickness of the interfacial diffusion layer reaches 35.8 μm, and the maximum tensile strength reaches 406.9 MPa at this time. The fracture location is at the vanadium/stainless steel interface, and the fracture is characterized by ductile fracture.

Key words: titanium alloy, 316L stainless steel, two pass laser welding, vanadium interlayer, welding speed, beam deflection

收稿日期: 2022−07−25

0　引言

钛/钢异种金属复合结构能够兼具钛合金高比强度、轻量化、高耐蚀性与钢的低成本、高耐磨性和高温强度等多重优势, 在船舶、石化和电力等行业中具有广泛的应用[1−3]。因此, 开发可靠的焊接技术, 实现钛合金与不锈钢的可靠连接, 对于制造钛/钢异种金属复合结构具有重要意义。

钛合金和钢的物理与化学性能有巨大差异, Ti 和 Fe 的溶解度非常低, 二者熔化焊接头中由于应力集中以及界面会生成脆性极大的 Ti-Fe、Ti-Cr 金属间化合物[4], 导致无法实现连接。目前钛/钢焊接采用的扩散焊[5], 爆炸焊[6] 和摩擦焊[7] 等压力焊接方法存在焊接效率低、接头形式受限等缺点, 难以实现批量生产和复杂构件的焊接。

通过添加中间材料, 可以对元素的扩散进行抑制, 消除金属间化合物, 从而改善接头的性能。中间材料的选择取决于其与钛和铁的冶金相容性和性能, 中间层材料应避免形成金属间化合物相。钛和钢的连接采用了各种中间层, 最常用的中间层材料包括 Cu[8]、Ni[9] 及其合金。现有研究表明[8−10]Cu、Ni 及其合金作中间层焊接钛/钢依然不足以抑制脆性金属间化合物的形成。

钒基合金是先进熔合系统中结构材料的潜在候选材料, 因为钒与钛形成连续固溶体。然而, 铁与钒在一定成分下可以形成金属间化合物 σ 相, 会导致接头性能下降, 因此最好的选择是将钢/钒熔化区中的 V 含量降低到 σ 相形成极限以下。有相关研究发现[11], 由于高冷却速率, 在激光焊接过程中不会在 Fe 和 V 之间形成 σ 相。目前, 钛合金不锈钢接头以纯钒为中间层已实现双道激光焊接[12], 但是这些研究均针对焊接工艺参数, 对接头微观组织与力学性能的研究不够充分。

基于上述问题, 笔者选用纯钒作中间层, 采用双道激光焊接的方法, 即将激光首先聚焦在钛合金/钒界面形成焊缝, 再将激光聚焦于钒/不锈钢界面附近不锈钢一侧, 研究和探讨双道激光焊接过程工艺参数对焊接接头的影响规律, 最终实现钛/钢异种金属的高质量焊接。

1　试验

1.1　试验材料

试验母材为 TC4 钛合金和 316L 不锈钢, 其主要成分见表 1, 母材规格均为 100 mm×60 mm×3 mm, 中间层材料纯钒规格为 100 mm×3 mm×2 mm。因试验焊接的板材均为 3 mm 厚的薄板, 所以焊前不需要开坡口, 焊前被焊材料及中间层都用砂纸将待焊面打磨干净, 去除表面氧化皮, 然后用丙酮清洗以去除表面的油污及杂质。

表 1　试验材料化学成分

Table 1　Chemical compositions of TC4 and 316L　　%

材料	Fe	C	Si	Ni	Cr	Mn	Mo	Al	V	Ti
TC4	0.3	0.1	0.15			0.015		5.5	4.5	余量
316L	余量	≤0.03	≤1.0	10.0~14.0	16.0~18.0	≤2.0	2.0~3.0			

1.2　试验方法

试验所选的焊接设备为数控激光焊接与加工系统的轴流式二氧化碳激光器, 型号为 SLCF-X1225, 最大功率为 4 000 W, 波长为 10.6 μm。焊接过程中严格装配, 保证钒层和钛合金及不锈钢间无间隙。采用氩气作为保护气体, 正反面双面保护, 焊接形式为对接。

按照图 1 设计试验, 第一道激光焊接 TC4 钛合金板和纯钒, 第二道激光焊接钒/不锈钢。通过调节激光焊距进行焊前试验, 调试成功后, 调整激光作用在钛合金侧、不锈钢侧的位置(光束偏移量)和激光束在工件表面的移动速度(即焊接速度)等设计单因素试验。先期探索得到激光功率 3 500 W, 焊接速度 1.0 ~ 1.5 m/min, 激光束偏移量 0.1 ~ 0.5 mm, 离焦量为 0, 即聚焦焊接。

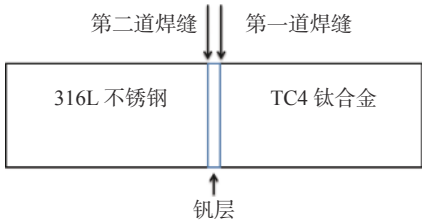


图 1　不锈钢/钒/钛合金焊接示意

Fig. 1　Welding schematic of stainless steel, vanadium and titanium alloy

将激光焊接的试样沿垂直焊缝的方向切割, 制成 10 mm×5 mm 的小试样。采用标准的金相试样制备方法进行打磨抛光, 满足要求后对金相试样中

钛合金与不锈钢分别采用 HF：HCl：HNO_3：H_2O=1：2：4：50 配制而成的溶液和 $FeCl_3$ 溶液进行腐蚀，金相试样腐蚀完成后，用水和酒精清洗试样表面，以除去残留的腐蚀液，然后用吹风机吹干，再在金相显微镜下观察焊缝金相组织并拍照。

利用扫描电子显微镜（FEIQuanta 250）和能谱分析仪（EDS）对激光焊接接头显微组织进行形貌观察和元素分析。焊接得到的试样进行切割，加工成 122 mm×15 mm×3 mm 的拉伸试样，利用 MTS810 型万能材料拉伸试验机测试接头抗拉强度，焊缝位于拉伸试样中部，每组试件线切割 3 个拉伸试样，速率选用 1.5 mm/min，试样被拉断时记录其峰值，再根据断裂处的承载截面积计算出抗拉强度，取拉伸试样的平均值作为试件的抗拉强度。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对焊缝成形的影响

为了研究第一道激光焊接工艺参数在 TC4 钛合金/钒焊缝界面成形的影响，按照设计试验，激光功率恒定为 3 500 W，离焦量为 0，改变中间层钒和钛合金焊接时的激光焊接速度，激光光束对准 V/Ti 焊缝中央，分别选取激光焊接速度为 1.5、1.2 m/min 和 1.0 m/min 进行试验。

不同焊接速度下钛合金/钒焊缝界面成形如图 2 所示，当焊接速度为 1.5 m/min 和 1.2 m/min 时，焊接速度较高，热输入较低，焊缝底部出现未焊透缺陷，随着焊接速度的降低，未焊透缺陷得到进一步改善。当焊接速度降低至 1.0 m/min 时，焊缝完全焊透，接头呈现典型的 T 字型焊接接头，成形良好。

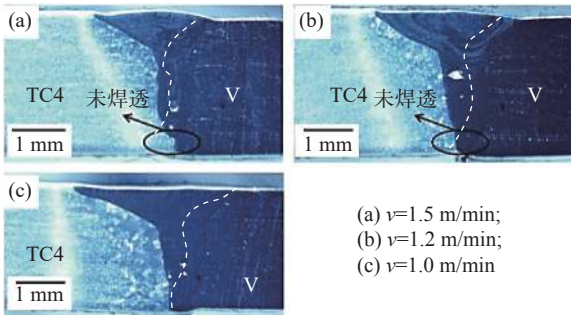


图 2 不同焊接速度下钛合金/钒焊缝界面成形

Fig. 2 Weld interface forming of titanium alloy and vanadium at different welding speeds

为了研究钛合金/钒激光焊接中钛合金侧光束偏移量对接头焊缝成形的影响，在激光功率恒定为 3 500 W，焊接速度恒定为 1.0 m/min 时，改变钒和钛合金焊接时的激光偏移量，分别向钛合金侧偏移 0.1、0.2、0.3、0.4 mm 和 0.5 mm。

不同偏移量下钛/钒激光焊接界面微观组织如图 3 所示。在不同的偏移量下，焊接接头成形良好，呈现典型的 T 字型，接头处钛和钒都发生了熔化，从图 3(a)中可以看出，当偏移量较小为 0.1 mm 时，接头焊缝正面铺展面积较大，同时焊缝背面液态金属流出；当偏移量继续增大，在 0.2 ~ 0.4 mm 变化过程中，焊缝组织基本相同，焊缝美观，背部焊透，为典型的熔焊接头界面。从宏观形貌来看，当偏移量达到 0.2 mm 时，钒层熔化量相同，背面尺寸趋于稳定，因此确定激光束在钛侧的最佳偏移量为 0.2 mm。焊接功率 3 500 W，焊接速度 1.0 m/min，偏移量为 0.2 mm 时，焊缝金相组织如图 3(b)所示，钒与钛熔合得很好，焊接接头美观，呈现出激光焊接典型的 T 字型接头，焊缝背部完全焊透，钛侧呈现银白色光泽，且无裂纹、气孔、未焊透等缺陷，熔合线两侧界线很明显，实现了很好的冶金结合。

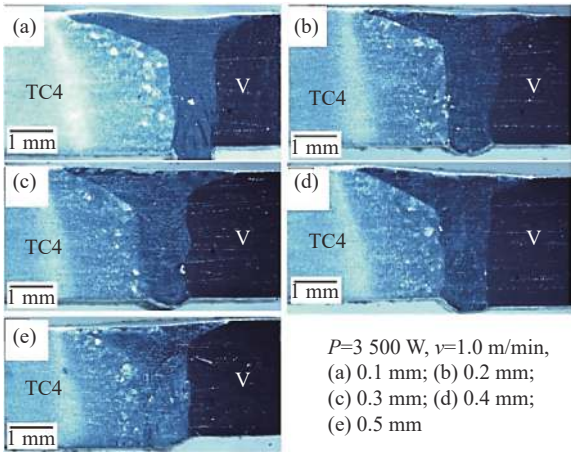


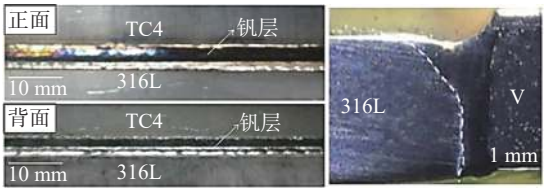
图 3 不同偏移量下钛/钒激光焊接接头组织形貌

Fig. 3 Microstructure morphology of titanium/vanadium laser welded joint with different offsets

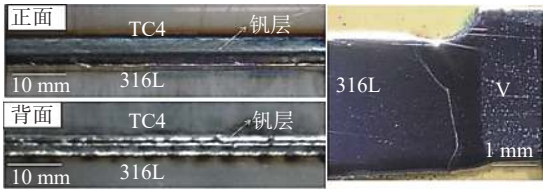
实现了钛合金和钒的稳定焊接后，开始第二道激光焊接钒和不锈钢，由于光束偏移量是影响焊缝性能的主要参数，因此作为主要探究的变量，研究不同偏移量对焊缝的影响，光束向钢侧分别偏移 0.1、0.2、0.3 mm 和 0.4 mm。

图 4 为在钒/钛偏移量为 0.2 mm 的条件下偏移量对钒/钢焊缝成形的影响。当钢侧偏移量为 0.1、0.2、0.3 mm 时，如图 4(a)~(c)所示。试样均完全焊透，正面及背面成形都很光滑，焊缝正面颜色略发蓝，说明焊缝表面保护得不是太好，发生了一定的氧化，但不会影响力学性能，焊缝背面呈现出金属光泽银白色，说明背面氩气氛围保护良好，成形美观，未发

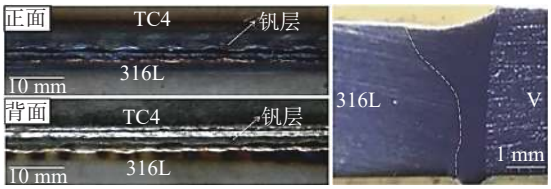
现有裂纹。对照横截面金相组织可以看出, 钒层很好地充当了中间层的作用, 焊缝成形美观, 光滑, 且无裂纹、气孔、未焊透等缺陷, 熔合线两侧界线很明显, 实现了很好的冶金结合, 因此 Ti/V 界面和 Fe/V 界面均呈现熔焊接头。当钢侧偏移量增加到 0.4 mm 时, 如图 4(d), 据焊缝截面形貌图可知, 由于偏移量较大, 此时钒/不锈钢界面焊缝正面钒熔化量很小, 原因可能为激光束远离焊缝中央, 热输入较小, 导致没有形成良好的冶金结合, 焊缝背面也未焊透, 直接影响力学性能。



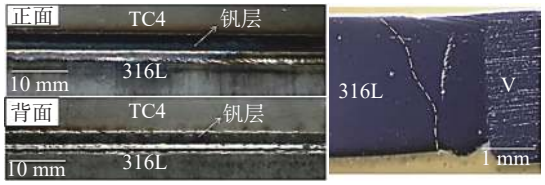
(a) 钢侧偏移量 0.1 mm



(b) 钢侧偏移量 0.2 mm



(c) 钢侧偏移量 0.3 mm



(d) 钢侧偏移量 0.4 mm

图 4　偏移量对钢/钒焊接接头的影响(P=3 500 W, v=1.0 m/min)

Fig. 4　Effect of offsets on steel/vanadium welded joints

2.2　工艺参数对焊缝力学性能的影响

钛合金/钒/不锈钢双道激光焊接接头抗拉强度测试中, 发现拉伸试样的断裂位置由钒变为钒/钢界面, 钛/钒界面力学性能较好, 不发生断裂。在钒/钛侧偏移量为 0.2 mm 时, 钒/钢侧激光焊接不同光束偏移量下试样力学性能的变化如图 5 所示。由图 5 可知, 随着偏移量的增加, 接头的力学性能呈现先增加后减小的趋势, 试样的接头断裂位置当偏移量为 0.1、0.2、0.3 mm 时, 断裂位置均处于钒层, 且随着偏移量的增大, 试样的抗拉强度呈现增大的趋势, 这与激光热输入对钒层的热影响有关, 当光束偏移量较小时, 钒层受激光热输入的影响, 组织状态发生改变, 从而成为接头中的薄弱地带, 因此断裂位置位于钒层。当偏移量为 0.4 mm 时, 相比于断裂位置在钒的试样, 试样的抗拉强度明显降低, 断裂位置位于钒/不锈钢, 断裂形式为脆性断裂, 说明偏移量太大时, 热源距离界面太远, 界面处的温度进一步降低, 导致界面反应不充分, 无法形成有效的冶金结合, 甚至出现焊缝根部未熔合等缺陷, 导致接头强度有所降低, 钒/不锈钢界面处没有形成稳定的焊接接头。

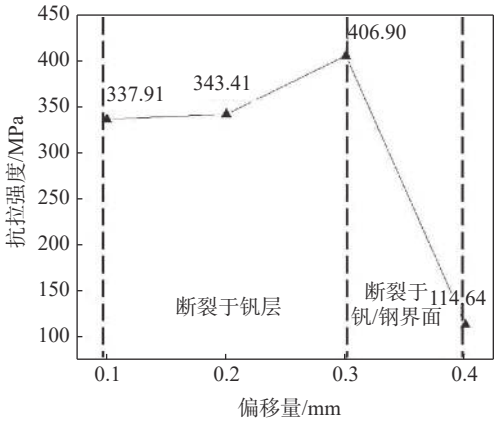


图 5　钢侧不同偏移量下的焊缝抗拉强度

Fig. 5　Tensile strength of weld at different offsets of steel side

综上可以得知, 为了保证中间层钒受到激光热输入的影响最小, 同时又要有足够的热输入使得界面形成良好的冶金结合, 偏移量是影响力学性能最主要的工艺参数, 偏移量为 0.3 mm 时, 抗拉强度达到最大。通过对焊缝成形及拉伸强度的分析, 将钒作为中间层, 采用双道激光焊接 TC4 钛合金和 316L 不锈钢异种金属时, 获得了最佳的工艺参数: 双道激光焊接功率 3 500 W、焊接速度 1.0 m/min, 第一道激光(钛合金/钒)偏向钛合金侧 0.2 mm, 第二道激光(钒/不锈钢)偏向不锈钢侧 0.3 mm, 焊件的抗拉强度达到了 406.9 MPa。试样断裂的宏观形貌图如图 6 所示, 由断口的放大图可以看出, 断裂位置从钒中间处发生, 说明界面的连接强度大于中间层的强度, 证明该方法可以获得良好的界面强度, 并且断裂过程中发生明显的缩颈, 属于韧性断裂。

2.3　焊缝显微组织分析

不锈钢/钒/钛合金双道激光焊接接头组织形貌如图 7(a)所示, 焊接过程中, 激光聚焦分别聚焦在不锈钢和钛合金一侧, 钒中间未完全熔化, 焊缝熔合

区很窄，不明显，因此将接头分为 5 个区域，包括 316L 不锈钢—不锈钢与钒的焊缝区—未熔的钒层—钒与钛合金的焊缝区—TC4 钛合金。

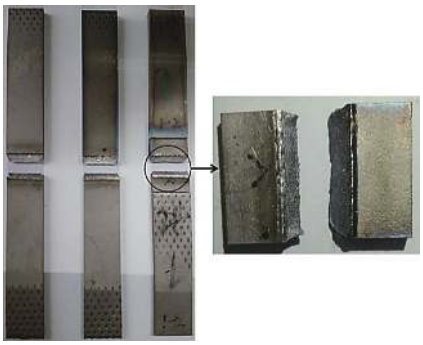
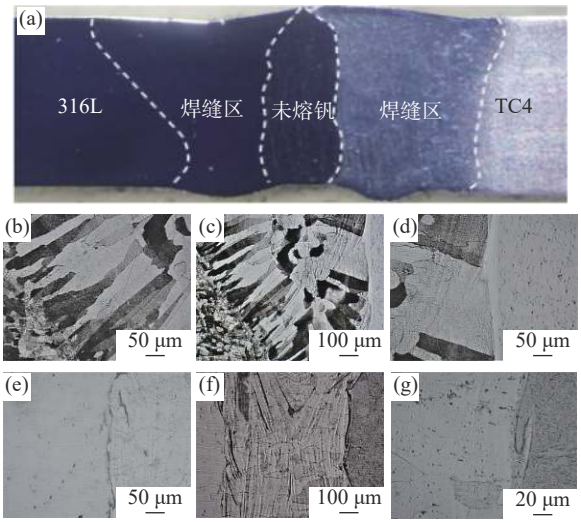


图 6　最佳工艺参数下的试样断口形貌

Fig. 6　Fracture profile of the specimen with optimal process parameters

由图 7 可看出，316L 不锈钢母材为单一奥氏体组织，不锈钢/钒焊接接头产生了焊缝、热影响区和母材三个组织特征明显不同的区域。焊接热影响区组织与母材组织有显著差异，该区域内的奥氏体有显著长大。焊缝中存在细小的等轴晶粒区，而两侧晶粒向焊缝中心方向生长，中心两侧晶粒夹杂不同形态的柱状晶和等轴晶。TC4 钛合金其微观组织为 α+β 双相组织，在焊缝区，主要以粗大 β 柱状晶为主，这是由于钛合金导热性较差、β 相极易过热且快速长大，在熔合线附近母材通过联生结晶、外延生长形成。β 晶粒内部分布着大量针状 α'马氏体，这种组织的形成是由于钛合金焊接过程中在较高温度的 β 区停留时间不足、冷却速度过快所致。

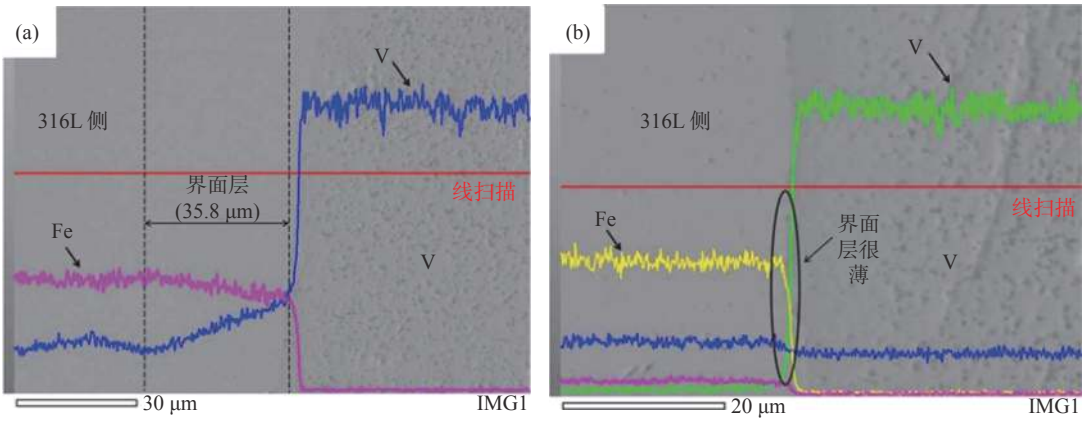
图 8 为钢侧不同激光光束偏移量下 V/Fe 焊缝界面的显微组织照片，经过成分线扫可知不同偏移量下界面层的厚度不同，钢侧偏移量为 0.3 mm 时，界面层厚度为 35.8 μm，当偏移量为 0.4 mm 时，界面层非常薄，原因为偏移量太大，界面处热输入不够高，而 V 的熔点较高，导致熔化量较小，未能形成良好的焊接接头。



(a) 接头宏观形貌；(b) ~ (d) 不锈钢/钒接头微观组织；(e) ~ (g) 钒/钛合金接头微观组织

图 7　不锈钢/钒/钛合金焊接试样的接头组织形貌

Fig. 7　Joint morphology of stainless steel/vanadium/titanium alloy welding sample



(a) 偏移量为 0.3 mm　　(b) 偏移量为 0.4 mm

图 8　钢侧不同激光光束偏移量下 V/Fe 焊缝界面的显微组织照片

Fig. 8　Microstructure of V/Fe weld interface at different laser beam offsets on steel side

图 9 为钒/钢界面处的扫描电子显微镜照片，对 A、B 两点进行 EDS 能谱分析，各个元素的原子分数见表 2。由表 2 可以发现，靠近不锈钢与钒的界面处，钒的摩尔分数为 35.55%，远离焊缝界面处钒的摩尔分数降至 19.59%。根据 Fe-V 二元相图推断，虽然有形成 σ 相的可能，但由于激光焊本身快速冷却的特点，不发生固相反应，界面层的成分为铁基固溶体，同时根据力学性能的分析，也证明了界面处不存在脆性相。

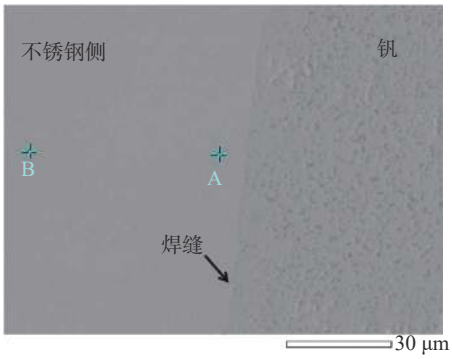


图 9　钒/钢焊缝界面 EDS 成分分析

Fig. 9　EDS component analysis of vanadium/steel weld interface

表 2　不锈钢/钒焊接界面的元素含量

Table 2　Element content of stainless steel/vanadium welding interface　%

位置	Ti	V	Cr	Fe	Ni
A	0.06	28.47	11.98	51.61	7.88
B	0.07	14.80	16.54	60.74	7.85

3　结论

1)纯钒作为中间层材料能实现钛合金和不锈钢的高强度焊接, 钒层阻止了钛-铁的直接接触, 从而避免了脆性金属间化合物的生成, 同时, 钒/铁界面不形成 σ 相。

2)激光光束偏移量对焊件的抗拉强度有很大的影响, 通过调整焊接工艺, 最佳焊接工艺下焊件的最大抗拉强度达到了 406.9 MPa, 断裂位置在钒/钢界面, 属于韧性断裂。

3)最佳的焊接工艺为: 第一道激光首先焊接钛合金和钒, 激光功率为 3 500 W, 焊接速度为 1.0 m/min, 激光光束偏向钛合金侧 0.2 mm; 第二道激光焊接钒和不锈钢, 激光功率为 3 500 W, 焊接速度为 1.0 m/min, 激光光束偏向不锈钢侧 0.3 mm。

参考文献

[1] Wang Zhe, Xiao Mingying, Gao Huabing, *et al*. Research progress on microstructure and properties of titanium alloy/steel dissimilar joints[J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(5): 1-9.
(王喆, 肖明颖, 高华兵, 等. 钛合金/钢异种连接接头组织与性能研究进展[J]. 材料工程, 2022, 50(5): 1-9.)

[2] Liu Fu, Li Shikai, Jiang Peng, *et al*. Research progress of titanium/steel dissimilar metal welding technology[J]. Journal of Materials Development and Application, 2020, 35(2): 67−74.
(刘夫, 李士凯, 蒋鹏, 等. 钛/钢异种金属焊接技术的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(2): 67−74.)

[3] Song Tingfeng, Jiang Xiaosong, Mo Defeng, *et al*. Progress in welding of stainless steel and titanium alloy dissimilar metals[J]. Materials Review, 2015, 29(11): 81−87.
(宋庭丰, 蒋小松, 莫德锋, 等. 不锈钢和钛合金异种金属焊接研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(11): 81−87.)

[4] Zhang Y, Zhou J P, Sun D Q, *et al*. Nd: YAG laser welding of dissimilar metals of titanium alloy to stainless steel without filler metal based on a hybrid connection mechanism[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1662−1672.

[5] Ananthakumar K, Kumaran S. Plasma assisted diffusion joining of CP-titanium-304L stainless steel: Attributes of temperature and time[J]. Materials Today:Proceedings, 2020, 33: 3174−3176.

[6] Chu Q, Tong X, Xu S, *et al*. Interfacial investigation of explosion-welded titanium/steel bimetallic plates[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 78−86.

[7] Li S, Chen Y, Zhou X, *et al*. High-strength titanium alloy/steel butt joint produced via friction stir welding[J]. Materials Letters, 2019, 234: 155−158.

[8] Tomashchuk I, Sallamand P, Belyavina N, *et al*. Evolution of microstructures and mechanical properties during dissimilar electron beam welding of titanium alloy to stainless steel via copper interlayer[J]. Materials Science and Engineering:A, 2013, 585: 114−122.

[9] Zhang Yifu, Zhang Hua, Su Zhanzhan. Effect of Zr-Ni interlayer on microstructure and properties of laser welded TC4 titanium alloy /304SS stainless steel[J]. Rare Metals, 2020, 44(11): 1137−1145.
(张义福, 张华, 苏展展. Zr-Ni中间层对TC4钛合金/304SS不锈钢激光焊接头组织性能的影响[J]. 稀有金属, 2020, 44(11): 1137−1145.)

[10] Yu J, Zhang H, Wang B, *et al*. Dissimilar metal joining of Q235 mild steel to Ti6Al4V via resistance spot welding with Ni–Cu interlayer[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4086−4101.

[11] Tomashchuk I, Grevey D, Sallamand P. Dissimilar laser welding of AISI 316L stainless steel to Ti6–Al4–6V alloy via pure vanadium interlayer[J]. Materials Science and Engineering:A, 2015, 622: 37−45.

[12] Zhang Y, Zhou J, Sun D Q, *et al*. Two pass laser welding of TC4 titanium alloy to 301L stainless steel via pure V interlayer[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1400−1404.

编辑　邓淑惠