

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

牛小男¹, 崔丽¹, 王鹏¹, 贺定勇¹, 曹庆²

(1. 北京工业大学, 北京, 100124; 2. 江苏斯普瑞科技有限公司, 宜兴, 214200)

摘要: 对 3 mm 厚 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢异种材料进行了添加镍铝青铜 (nickel aluminum bronze, NAB) 过渡层的激光填充材料焊接, 研究了 NAB 过渡层对接头成形、微观组织与力学性能的影响。结果表明, 添加 NAB 过渡层的 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢异种材料激光焊接获得了良好成形的全熔透接头, 接头抗拉强度达 290 MPa, 接头钛合金侧界面层硬度为 547.8 HV。接头钛合金侧界面由 3 种不同形态的金属间化合物层组成, 其中脆性较小的 Cu-Ti, Ni-Ti 相的数量显著增多, 而脆性高的 Ti-Fe 相数量明显减少, 表明添加 NAB 过渡层抑制了接头钛合金侧界面脆性高的 Ti-Fe 相的形成。

创新点: (1) 添加 NAB 过渡层的钛合金/不锈钢激光焊获得了良好成形的全熔透接头。

(2) 添加 NAB 过渡层抑制了接头钛合金侧界面脆性高的 Ti-Fe 相的形成。

关键词: 激光焊; 钛合金; 不锈钢; 力学性能

中图分类号: TG 456.7

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210722002

0 序言

钛合金具有优良的耐蚀性、较小的密度、较高的比强度及较好的韧性和焊接性^[1-2], 不锈钢具有良好的耐蚀性和较高的塑韧性^[3-4], 而钛合金/不锈钢复合结构由于同时具备两种合金的优点, 在航空航天、化工、国防军事装备等领域得到了广泛的应用^[5-6]。然而, 由于两种材料在晶格类型、原子半径、电负性等化学性能以及冶金兼容性方面的显著差异, 钛合金/不锈钢异种材料焊接存在诸多挑战, 其中最主要的难题是接头易生成脆性极高的 Ti-Fe 金属间化合物 (intermetallic compound, IMC)^[7-8], 导致接头力学性能显著降低^[9]。因此, 钛合金/不锈钢异种材料的优质、高效焊接问题受到研究人员的广泛关注, 而过渡层金属的优化是改善焊接接头性能的有效途径之一^[10-12]。

目前国内外对于钛合金/不锈钢异种材料焊接用的过渡层金属方面进行了大量的研究。研究表

明, 以纯 Ag 作为过渡层, 虽然接头界面会有 AgTi 化合物相生成, 但可获得力学性能较好的接头^[13-14]。然而, 由于 Ag 成本的限制, Ag 过渡层难以在实际工程中应用, 目前主要集中在 Cu, Ni 等过渡层金属的研究, 这是由于接头界面处形成的 Cu-Ti 相比 Ti-Fe 相具有更好的塑韧性。Zhang 等人^[15-16]研究了 0.2 和 0.4 mm 厚 Cu 箔对钛合金/不锈钢激光焊接头的影响, 结果表明, 添加两种厚度的 Cu 箔可获得抗拉强度分别为 210 和 320 MPa 的钛合金/不锈钢激光焊接头。Li 等人^[17]研究了添加纯 Cu 和 Cu-Nb 过渡层进行 TC4 钛合金/316L 不锈钢激光焊接, 结果表明, 添加 Cu-Nb 过渡层接头的最高抗拉强度达到 215 MPa。Wang 等人^[18]研究了添加 0.5 mm 铜片进行 TA15 钛合金/304 不锈钢电子束焊接, 获得了抗拉强度约为 234 MPa 的接头。由此可见, 虽然目前已有的添加 Cu 过渡层金属可提高钛合金/不锈钢焊接接头强度, 但接头强度仍然较低, 难以满足实际应用的更高强度要求。

激光焊具有能量密度高、焊接热输入低、焊接速度快、接头热影响区小、焊接应力和变形小以及光束能量及作用位置精确可控等优势^[19], 且不需要真空, 生产中柔性高, 极易实现自动化生产。同时,

激光焊接低的热输入有利于抑制接头界面 IMC 的形成, 减小 IMC 层厚度, 从而提高接头的力学性能^[20]. 为此, 采用力学性能优异的 NAB 取代纯 Cu 作为过渡层金属进行 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢对接接头的激光焊接工艺探索, 分析添加 NAB 过渡层对 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢焊接接头微观组织和力学性能的影响, 为钛/钢异种材料焊接接头力学性能的提升提供理论基础和新的研究

思路.

1 试验方法

选用的母材分别为 3 mm 厚的 TC4 钛合金板与 3 mm 厚的 15-5PH 不锈钢板, 过渡层金属为 NAB 块体材料, 厚度为 2 mm. 采用 X 射线荧光光谱法测得 3 种材料的化学成分如表 1 所示.

表 1 材料的化学成分 (质量分数, %)
Table 1 Chemical compositions of materials

材料	Mn	Ni	Al	V	Cr	Cu	Fe	Ti
TC4钛合金	—	—	5.5~6.8	3.5~4.5	—	—	≤0.30	88.4~90.7
NAB青铜	0.5~4.0	3.0~6.0	7.0~11.0	—	—	77.5~82.0	2.0~6.0	—
15-5PH不锈钢	≤1.0	4.7~5.7	—	—	14~15	1.7~2.5	75.5~78.5	0.15~0.30

采用 IPG 公司生产的 YLS-6000 系光纤激光器进行双道激光焊接, 焊接过程示意图如图 1 所示, 第 1 道对 TC4/NAB 进行激光焊接, 再以相同工艺参数立即对第 2 道 NAB/15-5PH 进行激光焊接, 光斑均向 NAB 侧偏移. 为获得全熔透焊缝, 优化的激光焊接工艺参数如表 2 所示.

观察接头界面 IMC 组织形貌及分布; 采用能谱仪 (energy dispersive spectrometer, EDS) 进行 IMC 成分分析; 采用 HVS-1000 型显微硬度仪测试钛/钢接头显微硬度; 采用液压万能材料试验机进行接头拉伸试验, 试样依据 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》标准制样, 拉伸性能结果取 3 个试样测试的平均值.

2 试验结果与分析

2.1 钛合金/不锈钢异种材料接头的焊缝成形

添加 NAB 过渡层的 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢异种材料激光焊接获得了良好冶金结合的全熔透接头, 其横截面形貌如图 2 所示. 接头由钛合金侧热影响区 (heat affected zone, HAZ)、钛侧界面及近钛合金侧过渡层区 A、未熔化过渡层区 B、近钢

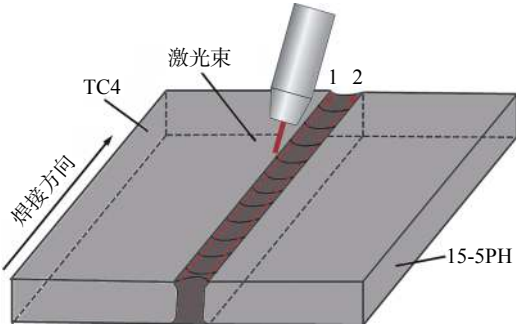


图 1 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接示意图
Fig. 1 Schematic diagram of laser welded TC4/NAB/15-5PH

表 2 优化的激光焊接工艺参数
Table 2 Optimized laser welding process parameters

激光功率 P/W	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	离焦量 $\Delta f/mm$	偏移量 $d(mm)$	氩气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$
3 500	2 500	3	0.4	20

焊接完成后, 采用线切割对接头进行切割取样, 镶样经过研磨、抛光和腐蚀后制备金相试样. 钛合金和不锈钢采用的腐蚀剂分别为 Keller 试剂和王水. 采用 LEXT OLS4100 型激光共聚焦显微镜和扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM)

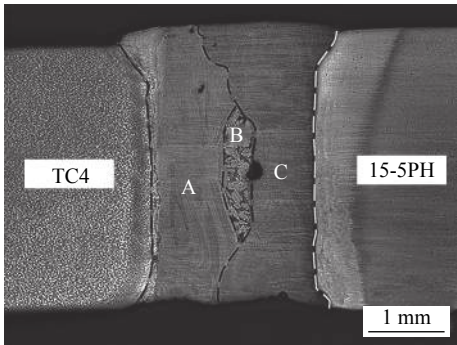


图 2 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头横截面形貌
Fig. 2 Cross section of TC4/NAB/15-5PH laser welded joint

侧过渡层区 C、钢侧界面及钢侧 HAZ 组成. 钛合金侧和不锈钢侧 HAZ 的宽度分别为 0.21 mm 和 0.54 mm, 钛合金侧 HAZ 宽度小于不锈钢侧. 过渡层焊缝中部产生一个尺寸较大的气孔, 直径约为 185.3 μm , 未见裂纹等其它焊接缺陷.

2.2 钛合金/不锈钢接头力学性能

2.2.1 接头的硬度分布

图 3 为 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢异种材料激光焊接头显微硬度分布曲线. 母材 TC4 钛合金和 15-5PH 不锈钢的平均硬度分别为 347.6 和 405.7 HV. TC4 钛合金及 15-5PH 不锈钢侧 HAZ 的硬度分别为 390.5 和 366.3 HV, 中间过渡层焊缝铜合金区域硬度最低为 211.9 HV. 由图 3 可见, 接头 TC4 钛合金侧界面硬度最高, 这是由于钛合金侧界面生成了脆硬的 IMC. 然而, 相对于 TiFe_2 相的高硬度大于 (1 000 HV), 添加 NAB 过渡层钛合金

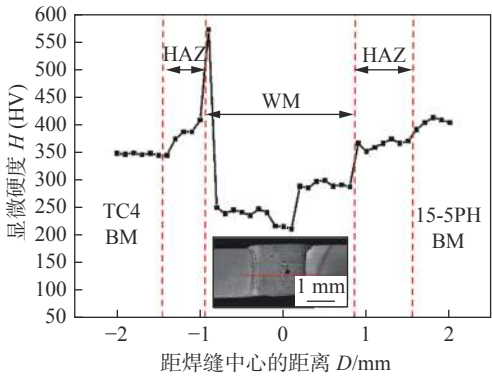


图 3 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头显微硬度分布

Fig. 3 Microhardness profile of TC4/NAB/15-5PH laser welded joint

侧界面 IMC 层硬度降低了约 400 HV. 因此, 添加 NAB 过渡层金属降低了钛合金侧界面区域的硬度, 改善了钛合金侧界面 IMC 层的塑性.

2.2.2 接头的拉伸性能

TC4 钛合金、15-5PH 不锈钢、NAB 过渡层及 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢接头的拉伸测试结果如表 3 所示. TC4 钛合金、15-5PH 不锈钢、NAB 过渡层金属的抗拉强度分别为 1 012, 980, 638 MPa, 而添加 NAB 过渡层的钛合金/不锈钢激光焊接头的抗拉强度为 290 MPa. 与已有的添加 Cu 过渡层钛合金/不锈钢焊接研究结果相比^[15-18], 添加 NAB 过渡层激光焊接头获得了较高的抗拉强度. 图 4 为 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头拉伸断口形貌. 接头拉伸试样均断裂在钛合金侧界面的 IMC 层, 断裂位置如图 4a 所示. 由图 4b 可见, 钛合金侧拉伸断口的表面光滑平坦, 塑性变形很小. 图 4c 为高倍 SEM 断口形貌, 呈现河流花纹图样, 为典型的脆性解理断裂, 而这种脆性断裂与钛合金侧界面处形成的 IMC 层组织的形貌及物相组成密切相关.

表 3 激光焊接接头的拉伸性能
Table 3 Tensile properties of laser welded joints

材料	屈服强度 R_{eL}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
TC4钛合金	865	1 012	≥ 10.0
15-5PH不锈钢	785	980	≥ 8.0
NAB青铜	268	638	15.0
TC4/15-5PH接头试样	—	290	2.0

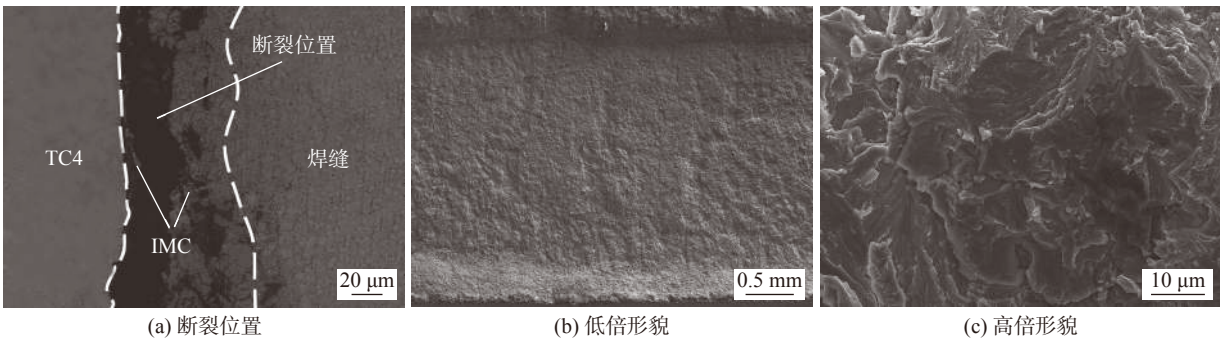


图 4 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头拉伸断口形貌

Fig. 4 Fracture surface morphology of TC4/NAB/15-5PH laser welded joint. (a) fracture location; (b) low magnification micrograph; (c) high magnification micrograph

2.3 钛合金/不锈钢接头不同区域的微观组织

图 5 为 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢接头焊缝组织形貌. 靠近钛合金侧界面的 NAB 过渡层熔化结晶形成的焊缝 (图 5a) 呈现了细小的等轴晶,

弥散分布着球形的 IMC 颗粒, 对该 IMC 颗粒进行点扫描分析, 该 IMC 颗粒原子组成为 27.52%Ti, 26.50%Fe, 22.06%Ni, 23.92%Cu, 因此, 推测此球形颗粒可能为 NiTi 或 TiFe 相. 过渡层中部区域组

织(图 5b)有粗大的等轴晶组成, 晶界上分布着细小的 IMC 颗粒, 证实过渡层 NAB 金属存在未熔的区域, 未熔区域的存在对钛合金与不锈钢母材可以起到屏障作用, 有利于抑制 Fe, Ti 在接头界面中的

相互扩散^[21], 从而抑制 Fe-Ti IMC 的生成. 图 5c 为靠近不锈钢侧过渡层 NAB 金属熔化凝固形成的焊缝区, 显示了网状分布的等轴树枝晶组织, 与钛合金侧焊缝组织明显不同.

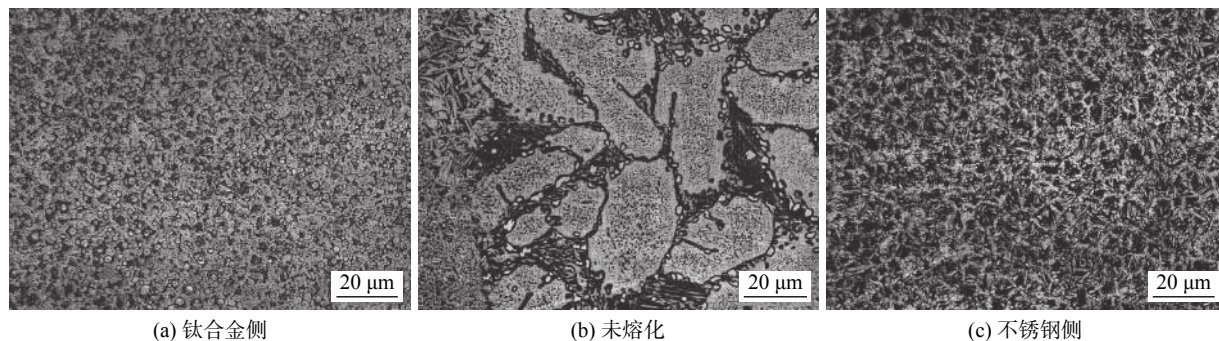


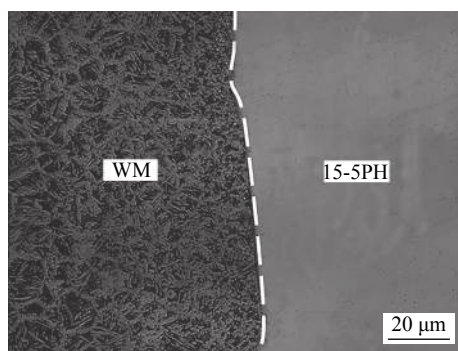
图 5 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头不同位置处的过渡层区

Fig. 5 Transition layers at different positions of TC4/NAB/15-5PH laser welded joints. (a) titanium alloy side; (b) unmelted; (c) stainless steel side

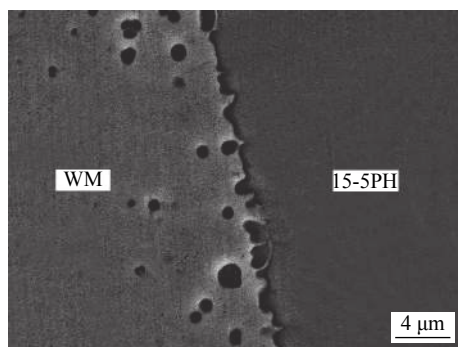
图 6 为 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢异种接头不锈钢侧界面的组织形貌. 从图 6 可见, 在不锈钢侧界面处无明显 IMC 生成, 这是因为 Cu 和 Fe 能够相互溶解形成连续的固溶体界面. 在界面附近 NAB 过渡层金属中形成了较多的直径为 0.5~1.0 μm 的球形气孔, 这些微气孔的存在可能会对接头拉伸

断裂行为有一定的影响.

图 7 和图 8 为激光焊接 TC4 钛合金/15-5PH 不锈钢异种材料钛合金侧界面的组织形貌. 由图 7 可见, TC4 钛合金侧界面处形成了复杂的 IMC 层, 依据 IMC 组织的晶粒形态分为 I, II, III 3 个区域, 其相应的高倍 SEM 形貌如图 8 所示.



(a) 低倍形貌



(b) 高倍形貌

图 6 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头钢侧界面

Fig. 6 Interface on steel side of TC4/NAB/15-5PH laser welded joint. (a) low magnification micrograph; (b) high magnification micrograph

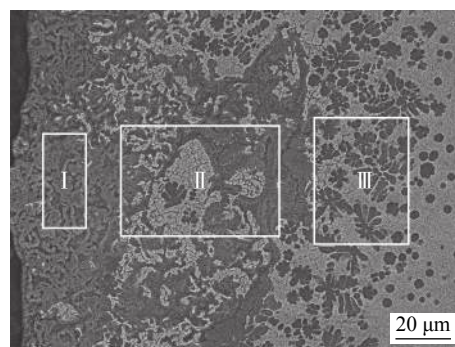


图 7 TC4/NAB/15-5PH 激光焊接头钛侧界面组织

Fig. 7 Interface on Ti side of TC4/NAB/15-5PH laser welded joint

采用 EDS 能谱对 IMC 进行了点扫描分析, 测得各合金元素的含量如表 4 所示. 图 8 显示的 IMC 组织厚度约为 67.50 μm, 靠近 TC4 钛合金侧的 I 区 IMC 组织密集分布, 其中标记为 1~3 相富集 Cu, Ti 元素, 由原子含量计算推测形成的 IMC 为 CuTi_2 和 CuTi 相. 临近 I 区的 II 区 IMC 组织中黑色相 4 和灰色相 5, 6 的晶粒明显粗大, 富集 Ni, Ti 元素, 根据原子含量计算 4 相可能为 CuTi , NiTi_2 , 经 Gibbs free energy 公式计算^[22], $G(\text{NiTi}_2) = -49\,120 + 17.21T$, $G(\text{CuTi}) = -17\,534 + 3.37T$; $T = 1\,023\text{ K}$ 时,

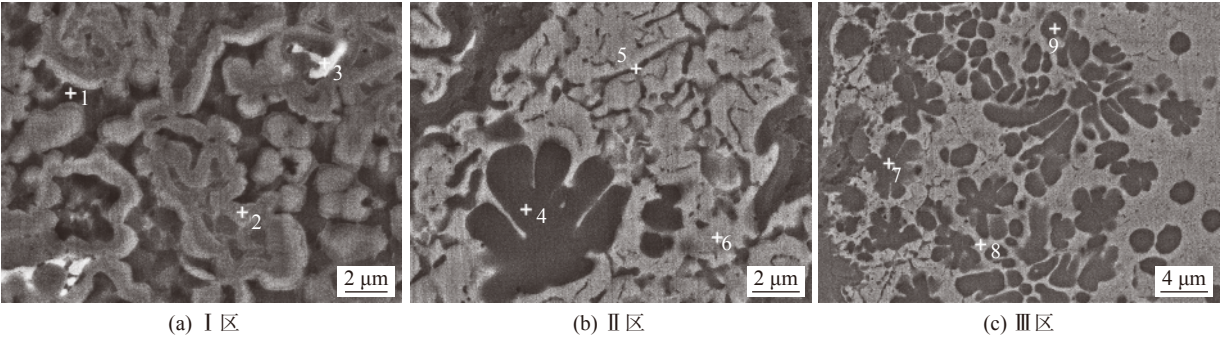


图 8 I, II, III 区高倍 SEM 形貌
Fig. 8 High magnification SEM morphology of I, II and III zones. (a) I area; (b) II area; (c) III area

表 4 TC4 侧界面 IMC 组织的 EDS 分析 (原子分数, %)
Table 4 EDS analysis of IMC structure of TC4 side interface

区域	Ti	V	Cr	Fe	Ni	Cu	可能的物相
1	57.47	1.29	1.01	1.19	1.55	37.50	CuTi ₂
2	40.71	1.07	0.17	2.47	3.48	52.10	CuTi
3	25.18	0.98	0.06	1.63	1.69	70.45	CuTi
4	34.15	0	0.12	12.26	14.54	38.93	CuTi, NiTi ₂
5	16.30	0.11	0.10	3.63	12.56	67.30	NiTi
6	4.32	0	0	2.34	2.32	91.02	FeTi ₂ , NiTi ₂
7	33.69	0.25	0.24	20.56	20.50	24.76	NiTi ₂ , FeTi ₂
8	6.10	0.06	0.05	3.47	3.66	86.65	Cu 基固溶体
9	33.01	0	0.14	16.35	15.68	34.83	NiTi ₂ , FeTi ₂

$G(\text{NiTi}_2)(-31.5 \text{ J/mol}) < G(\text{CuTi})(-14.1 \text{ J/mol})$, 因此 4 相为 NiTi_2 ; 5 相为 NiTi 相; 6 相可能为 FeTi_2 和 NiTi_2 , 经计算 $G(\text{FeTi}_2) = -15\,219 - 2.29T$, $T = 1\,023 \text{ K}$ 时, $G(\text{FeTi}_2)(-17.6 \text{ J/mol}) > G(\text{NiTi}_2)$, 因此 6 相为 NiTi_2 . 由此可知, II 区 IMC 组织为 NiTi 和 NiTi_2 相. 靠近不锈钢侧 III 区 IMC 中黑色相 7 的晶粒尺寸显著细化, 由原子含量计算 7 和 9 相可能为 NiTi_2 , FeTi_2 相, $G(\text{FeTi}_2) > G(\text{NiTi}_2)$, 因此 7 和 9 相主要为 NiTi_2 相, 8 相为 Cu 基固溶体, 因此该层主要为少量的 NiTi_2 相弥散在铜基体中形成. 因此, III 区 IMC 组织主要由 CuTi_2 , CuTi , NiTi 和 NiTi_2 组成. 可见, 添加 NAB 中间层接头钛合金侧界面形成了大量脆性相对较低的 Cu-Ti, Ni-Ti 相, Ti-Fe 相数量减少. 因此, 添加 NAB 中间层有效地抑制了 Fe 和 Ti 在钛合金侧界面的相互扩散, 界面处形成了大量塑性相对较好的 Cu-Ti, Ni-Ti 相, 有利于改善接头的抗拉强度.

3 结论

(1) 添加 NAB 过渡层钛合金/不锈钢异种材料

激光焊接可获得成形优良的全熔透钛/钢异种接头. 接头拉伸断裂于钛合金侧界面 IMC 层, 接头的抗拉强度可达 290 MPa, 断后伸长率为 2.0%.

(2) 接头钛合金侧界面 IMC 层硬度最高为 547.8 HV, 相对脆性高 Ti-Fe 相的硬度降低了 400 HV 以上.

(3) 接头钛合金侧界面形成的 IMC 层的宽度约为 67.5 μm, 主要由 CuTi_2 , CuTi , NiTi , NiTi_2 相及少量的 FeTi_2 相组成, 脆性相对较低的 Cu-Ti, Ni-Ti 相数量增加, 接头不锈钢侧界面未形成 IMC.

参考文献

[1] Chen H, Bi G, Lee B Y, *et al.* Laser welding of CP Ti to stainless steel with different temporal pulse shapes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 58 – 65.
[2] 王廷, 张秉刚, 张艳桥, 等. 采用不同结构 Cu/V 填充层的钛合金/不锈钢电子束焊接试验 [J]. 焊接学报, 2014, 35(8): 71 – 74. Wang Ting, Zhang Binggang, Zhang Yanqiao, *et al.* Experimental research on electron beam welding of titanium alloy to stainless steel based on Cu/V filler metals with different shapes[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014,

- 35(8): 71 – 74.
- [3] Vannod J, Bornert M, Bidaux J E, *et al.* Mechanical and micro-structural integrity of nickeltitanium and stainless steel laser joined wires[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(17): 6538 – 6546.
- [4] Shanmugarajan B, Padmanabham G. Fusion welding studies using laser on Ti-SS dissimilar combination[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, 50(11): 1621 – 1627.
- [5] Dey H C, Ashfaq M, Bhaduri A K, *et al.* Joining of titanium to 304L stainless steel by friction welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(18-19): 5862 – 5870.
- [6] Bodunrin M O, Chown L H, Omotoyinbo J A. Development of low-cost titanium alloys: A chronicle of challenges and opportunities[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 38: 564 – 569.
- [7] Mannucci A, Tomashchuk I, Mathieu A, *et al.* Direct laser welding of pure titanium to austenitic stainless steel[J]. *Procedia CIRP*, 2018, 74: 485 – 490.
- [8] Gnyusov S F, Klimenov V A, Alkhimov Y V, *et al.* Formation of the structure of titanium and stainless steel in laser welding[J]. *Welding International*, 2013, 27(4): 295 – 299.
- [9] Lee M K, Lee J G, Choi Y H, *et al.* Interlayer engineering for dissimilar bonding of titanium to stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2010, 64: 1105 – 1108.
- [10] 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.
- [11] Tomashchuk I, Sallamand P, Andrzejewski H, *et al.* The formation of intermetallics indissimilar Ti6Al4V/copper/AISI 316L electron beam and Nd: YAG laser joints[J]. *Intermetallics*, 2011, 19(10): 1466 – 1473.
- [12] Elrefaey A, Tillmann W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(5): 2746 – 2752.
- [13] Atasoy E, Kahraman N. Diffusion bonding of commercially pure titanium to low carbon steel using a silver interlayer[J]. *Materials Characterization*, 2008, 59(10): 1481 – 1490.
- [14] Lee M K, Lee J G, Lee J K, *et al.* Strong bonding of titanium to copper through the elimination of the brittle interfacial intermetallics[J]. *Journal of Materials Research*, 2008, 23(8): 2254 – 2263.
- [15] Zhang Y, Sun D, Gu X, *et al.* Characterization of laser-welded Ti alloy and stainless steel joint using Cu interlayer[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(10): 6092 – 6101.
- [16] Zhang Y, Chen Y, Zhou J, *et al.* Experimental and numerical study on microstructure and mechanical properties for laser welding-brazing of TC4 Titanium alloy and 304 stainless steel with Cu-base filler metal[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(1): 465 – 477.
- [17] Li J, Liu Y, Gao Y, *et al.* Benefits of interfacial regulation with interlayers in laser welding Ti6Al4V/316L steel[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 125: 1 – 10.
- [18] Wang T, Zhang B, Feng J. Influences of different filler metals on electron beam welding of titanium alloy to stainless steel[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24(1): 108 – 114.
- [19] 范朝, 程东海, 陈益平, 等. 置氢对钛合金激光焊接接头超塑变形均匀性的影响 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(4): 57 – 60.
Fan Zhao, Cheng Donghai, Chen Yiping, *et al.* Effect of hydrogenation on uniformity of superplastic deformation of titanium alloy laser weld[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(4): 57 – 60.
- [20] Turner M W, Crouse P L, Li L. Comparison of mechanisms and effects of Nd: YAG and CO₂ laser cleaning of titanium alloys[J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(13): 4792 – 4797.
- [21] Zhang Y, Zhou J, Sun D, *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.
- [22] 何鹏, 冯吉才, 钱乙余, 等. 扩散连接接头金属间化合物新相的形成机理 [J]. *焊接学报*, 2001, 22(1): 53 – 55.
He Peng, Feng Jicai, Qian Yiyu, *et al.* Forming mechanism of interface intermetallic compounds for diffusion bonding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2001, 22(1): 53 – 55.

第一作者: 牛小男, 硕士; 主要从事激光焊接方面研究;
Email: niuxiaonan@emails.bjut.edu.cn.

通信作者: 崔丽, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email:
cuili@bjut.edu.cn.

(编辑: 张芷晴)