

钛合金/不锈钢冷金属过渡焊接头组织及性能

常敬欢^{1,2}, 曹睿^{1,2}, 闫英杰^{1,2}

(1. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050; 2. 兰州理工大学, 兰州, 730050)

摘要: 采用铜基填充金属对 TC4 钛合金、304 不锈钢进行冷金属过渡焊接, 分析了钛合金/不锈钢接头的界面组织、力学性能及腐蚀性能。结果表明, 采用冷金属过渡连接方法实现了 TC4 钛合金和 304 不锈钢的焊接。钛合金/不锈钢接头主要由焊缝金属、不锈钢-铜焊缝界面和钛合金-铜焊缝界面组成。钛合金/不锈钢接头的拉剪强度为 306 MPa。由于钛合金-铜焊缝界面中 Ti-Cu、Ti-Fe 金属间化合物的生成, 接头沿钛合金-铜焊缝界面反应层发生脆性断裂。钛合金/不锈钢接头在人工海水溶液中发生了电偶腐蚀, 其腐蚀机理为阴极区发生氧的还原反应和析氢反应, 阳极发生焊缝金属的氧化, 钛合金母材表面 TiO₂ 氧化膜的形成, 不锈钢母材发生点蚀。

创新点: (1) 揭示了钛合金/不锈钢接头的连接机理。

(2) 明确了钛合金/不锈钢接头中最薄弱的位置。

(3) 揭示了钛合金/不锈钢接头在人工海水溶液中的腐蚀机理。

关键词: 异种钛合金/不锈钢接头; 微观组织; 力学性能; 腐蚀机理

中图分类号: TG 401 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20210114001

0 序言

异种金属钛/钢焊接结构兼具了两者的强度高、低质量、优异的耐腐蚀性和满意的经济性等优点, 被广泛应用于海水冷热换热器、涡轮喷气发动机压气机和燃烧室之间的连接等^[1-3]。但是由于钛和铁之间的物理性能存在较大的差异, 如热导率、线膨胀系数等, 在焊后冷却过程中收缩不均匀, 导致接头中存在较大的焊接应力^[4]。另一方面, 当钛/钢直接熔化焊时, 焊缝中含 Fe 量大大超过在 Ti 中的溶解度范围^[5], 焊后接头中存在大量硬脆的 Ti-Fe 金属间化合物 (600 ~ 1050 HV)^[6]。因此钛/钢异种金属直接焊接后, 接头的力学性能很差。关于改善钛/钢异种金属焊接接头力学性能方面的研究有很多, 主要通过合适的焊接方法^[7-8]和添加中间填充金属^[9-15]来抑制硬脆的 Ti-Fe 金属间化合物的生成, 进一步改善接头的力学性能。很多学者主要研究钛/钢异种金属焊接接头的力学性能。对钛/钢接

头的耐腐蚀性能的研究相对较少。因此研究异种金属接头的耐腐蚀性很有必要。目前主要研究铝/钢^[16-17]、铝/铜^[18-19]、铝/钛^[20-21]、镁/铝^[22-23]、镁/钢^[24-25]以及钛/钢^[26-27]等异种金属接头的耐腐蚀性。结果表明, 异种金属接头在特定的溶液中腐蚀后发生了电偶腐蚀。

关于钛/钢异种金属接头的耐腐蚀性研究相对较少。文中采用铜基填充金属对 Ti6Al4V 钛合金/304 不锈钢进行冷金属过渡 (CMT) 搭接焊接。一方面是 Ti 与 Cu 发生反应, 生成硬度相对较低的 Ti-Cu 金属间化合物 (500 ~ 600 HV), 此外铜具备良好的塑性和延展性, 可以缓解接头中的焊接应力^[28]。另一方面是选用热输入较低的冷金属过渡技术进行钛合金、不锈钢焊接, 以减少金属间化合物的生成^[29]。焊后分析了接头的显微组织及形成过程, 评定了接头的力学性能, 研究了接头的腐蚀性能。研究内容有望为钛/钢异种金属焊接接头的性能改善提供理论基础。

1 试验方法

试验采用直径为 1.2 mm 的 ER CuNiAl 铜合金

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51761027, 51675255); 甘肃省高校协同创新团队资助项目 (2017C-07); 兰州市科技兴项目 (2019-49); 甘肃省教育厅创新基金项目 (2021B-308)。

焊丝对 TC4 钛合金 (TC4) 和 304 不锈钢 (304 SS) 板的尺寸均为 100 mm × 50 mm × 1 mm. 其化学成分如表 1 所示.

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

材料	Cr	Ni	Si	Mn	C	Fe	Al	V	N	H	O	Ti	Pb	Zn	Cu
304 SS	18.0 ~ 20.0	8.0 ~ 12.0	1.0	2.0	≤ 0.03	余量									
TC4					0.1	0.3	5.5 ~ 6.8	3.5 ~ 4.5	0.05	0.01	0.2	余量			
ERCuNiAl		6.0		1.0			8.0						0.038	0.003	余量

试验采用冷金属过渡一元程序 (CMT 3200, 福尼斯, 奥地利) 进行搭接焊. 焊接前, 先用丙酮对 TC4 钛合金板待焊面进行清洗, 再用钢丝刷打磨, 然后分别用 5% ~ 10% 氢氧化钠溶液和 30% 硝酸溶液清洗 5 min, 再用自来水冲洗, 最后用酒精冲洗, 吹干待用. 采用钢丝刷打磨 304 不锈钢板待焊表面, 将处理好的不锈钢板放入酒精中超声清洗, 最后吹干待用. 焊接时, 采用不锈钢板放置在上面, 钛合金板放置在下面的搭接方式, 搭接量为 10 mm, 如图 1 所示. 焊接速度为 8.53 mm/s, 送丝速度为 5.5 m/min (电流 $I=171$ A, 电压 $U=15.0$ V). 过程中采用气流量为 15 L/min 的高纯氩气.

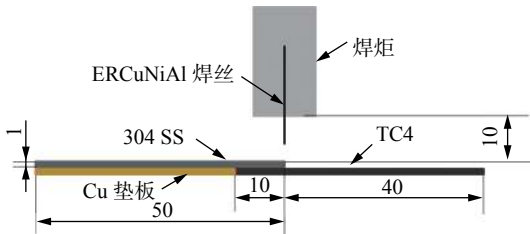


图 1 CMT 焊接 TC4/304 SS 示意图 (mm)
Fig. 1 Schematic diagrams of CMT welding TC4/304 SS

焊接后, 采用配备能谱仪 (EDS) 的扫描电子显微镜 (SEM, FEG 450) 对横截面接头的显微组织进行分析; 在室温下采用拉伸机 (AGS-X 300KN) 测试接头的拉伸性能, 拉伸速度为 0.5 mm/min; 采用维氏硬度计 (HVT-1000A) 测试接头的显微硬度, 测试载荷为 0.98 N, 保载时间 10 s; 采用 X 射线衍射仪 (XRD, D8Discover25) 对断口物相组成进行分析; 采用光镜 (OM) 对断口侧面进行分析.

对抛光后的试样进行浸泡腐蚀试验. 首先在腐蚀溶液中浸泡 30 天, 然后采用 SEM 对腐蚀后接头的显微组织进行分析. 腐蚀溶液为人工海水, 其配比为 0.23 g $MgCl_2$, 0.33 g Mg_2SO_4 , 2.67 g NaCl 和 100 mL H_2O .

2 试验结果与分析

2.1 焊缝形貌

图 2 为 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头的宏观形貌. 从图中可以看出, 使用铜基填充金属对钛合金、不锈钢 CMT 焊接后, 焊缝成形良好, 表面无焊接缺陷, 焊缝背面无明显的烧损.

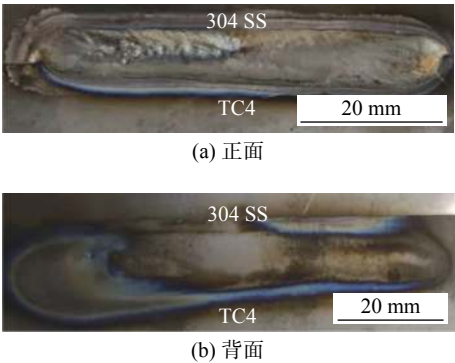


图 2 TC4/304 SS 搭接焊接头的焊缝形貌
Fig. 2 Weld appearance of TC4/304 SS lapped welding joint. (a) front surface; (b) back surface

2.2 显微组织

TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头主要由焊缝金属、304 SS-铜焊缝界面 (界面 I) 和 TC4-铜焊缝界面 (界面 II) 组成, 如图 3 所示.

图 4 为焊缝金属、界面 I 和界面 II 的微观组织. 图中各个区域的 EDS 分析如表 2 所示. 图 4a 为焊缝金属的 SEM 图, 主要由铜固溶体和 α_2 相、Fe-Cr-Al-Cu-Ti-Ni 化合物组成^[5]. 图 4b 为靠近界面 I 处焊缝金属的 SEM 图, 主要由铜固溶体和 α_2 相、Fe-Cr-Al-Cu-Ni 化合物组成^[5]. 图 4c 为界面 II 的 SEM 图, 从图中可以看出, TC4-Cu 焊缝界面形成明显的界面反应层. 进一步对图 4c 界面反应层中的 A, B 和 C 区域放大分别如图 4d, 4e 和



图 3 TC4/304 SS 搭接焊接头的横截面形貌示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of the cross-section of TC4/304 SS lapped welding joint

4f 所示. 结合 EDS 分析, 界面反应层中的 A 区域主要由 Ti-Cu-Fe 化合物和 Ti-Cu-Al 化合物组成.

界面反应层中的 B 区域主要由 Cu-Ti-Al-Fe 化合物、Ti-Cu 金属间化合物组成. 界面反应层中的 C 区域主要由 Ti-Cu-Al-Ni-Fe 化合物、Ti-Cu-Al 化合物、Ti-Fe-Cr 化合物组成, 基体相由铜固溶体和 α_2 相组成^[5].

图 5 为 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头的形成过程, 过程中的反应式如表 3 所示. 当 CMT 电弧的作用于铜基填充金属时, 铜基填充

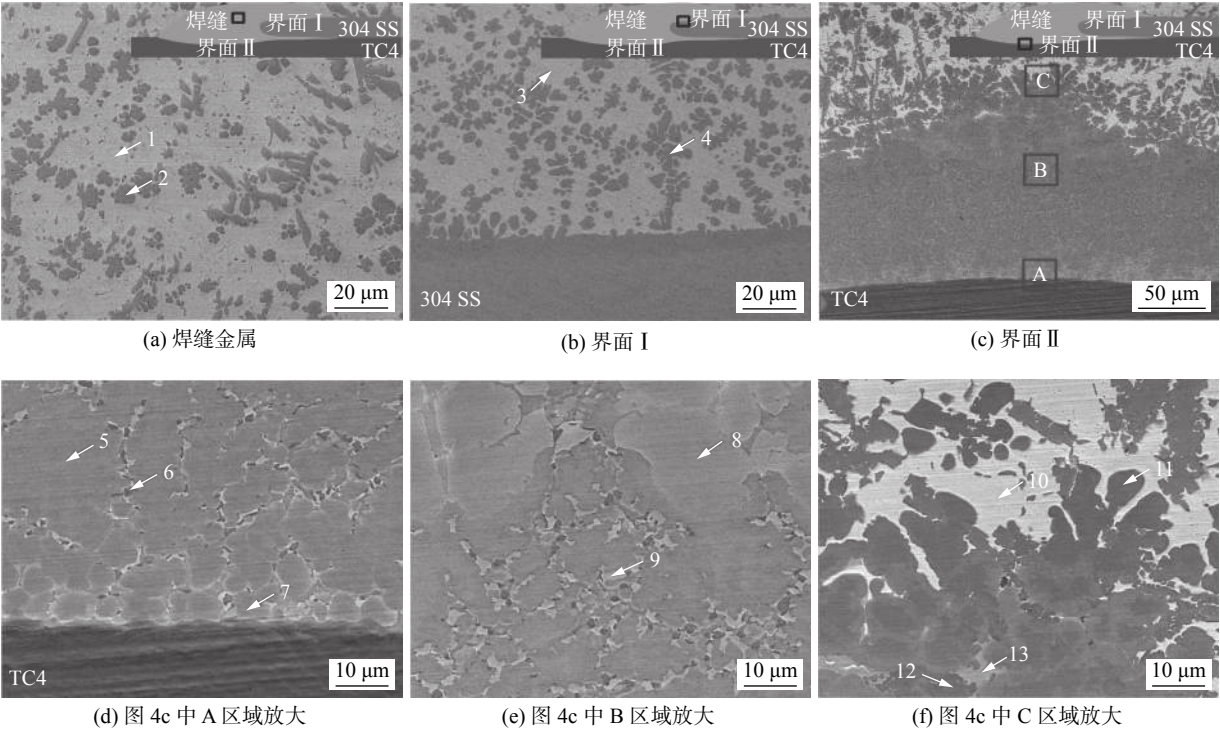


图 4 TC4/304 SS 搭接焊接头的显微组织

Fig. 4 Microstructure of TC4/304 SS lapped welding joint. (a) weld metal; (b) interface I; (c) interface II; (d) magnified zone A in Fig. 4c; (e) magnified zone B in Fig. 4c; (f) magnified zone C in Fig. 4c

表 2 图 4 中各个区域的 EDS 元素组成 (原子分数, %)

Table 2 EDS elemental compositions of various locations in Fig. 4

区域	Cu	Al	Ni	Fe	Cr	Ti
1	77.4	14.6	3.3	3.0	0.8	0.6
2	7.0	9.9	4.5	54.8	16.2	6.5
3	76.0	13.8	4.5	4.3	0.7	0.5
4	7.6	9.0	5.0	60.5	15.5	1.1
5	22.4	8.8	2.9	13.1	2.6	49.6
6	22.5	12.3	2.1	2.0	1.0	59.9
7	17.3	11.1	2.2	7.9	2.9	57.9
8	32.6	16.2	5.0	12.6	1.5	31.7
9	27.3	9.7	2.5	6.8	1.7	51.8
10	81.9	12.7	1.0	1.6	0.6	1.4
11	19.0	20.9	18.5	15.4	1.0	24.9
12	8.1	5.5	2.0	27.3	14.4	39.0
13	49.6	14.3	3.1	3.4	0.9	28.4

金属完全熔化, 304 不锈钢母材部分熔化, TC4 钛合金母材部分熔化, 如图 5a 所示, 液态熔池主要由 Cu, Al, Ti, Fe, Cr 和 Ni 元素组成, 如表 3 中式 (1) 所示. 随着熔池温度的降低, 焊缝金属、靠近界面 I 和界面 II 均发生反应, 如图 5b 所示. 首先发生液相的分离, 形成 $L_{Cu,Al}$, $L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ti,Ni}$, $L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ni}$, $L_{Cu,Ti,Al,Fe}$, $L_{Ti,Cu,Al,Ni,Fe}$, $L_{Ti,Fe,Cr}$, $L_{Ti,Cu,Fe}$, $L_{Ti,Cu,Al}$ 和 $L_{Ti,Cu}$ 相, 如表 3 中式 (2) 所示. 由于电弧的搅拌作用, 焊缝金属中的 Fe, Cr, Al, Cu, Ti, Ni 发生反应, 如表 3 中式 (3) 所示, 生成 Fe-Cr-Al-Cu-Ti-Ni 化合物. 靠近界面 I 处的焊缝金属中的 Fe, Cr, Al, Cu, Ni 发生反应, 如表 3 中式 (4) 所示, 生成 Fe-Cr-Al-Cu-Ni 化合物. 当温度降至 1005 °C 时, $L_{Cu,Al}$ 发生反应, 如表 3 中式 (5) 所示, 生成铜固溶体和 α_2 相^[5]. 界面 II 处的反应层发生一系列反应, 如表 3 中式 (6)~式 (12) 所示, 生成各种金属间化合物. 最后液态金属凝固形成焊接接头, 如图 5c 所示.

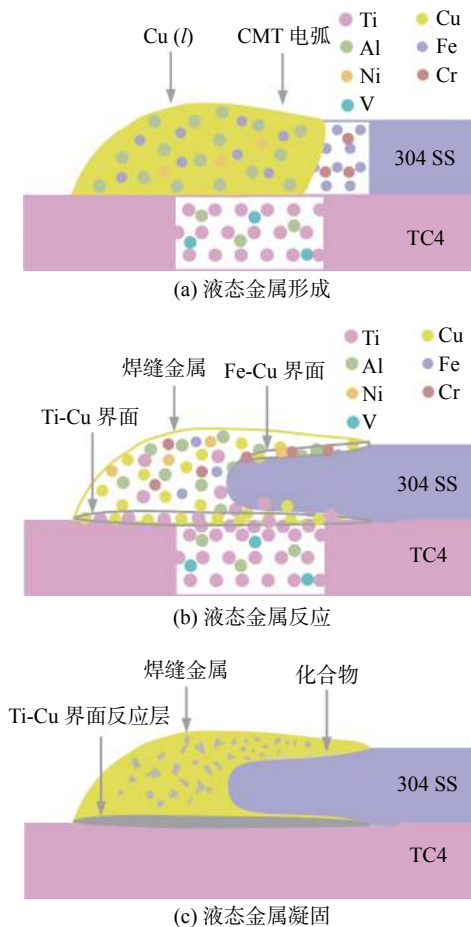


图 5 TC4/304 SS 搭接焊接头的形成过程

Fig. 5 Formation process of TC4/304 SS lapped welding joint. (a) the formation of liquid metal; (b) the reaction of liquid metal; (c) the solidification of liquid metal

表 3 TC4/304 SS 搭接焊接头形成过程中的反应式

Table 3 Reaction formula during the formation process of TC4/304 SS lapped welding joint

序号	反应式
1	$Cu+Al+Ti+Fe+Cr+Ni \rightarrow L_{Cu,Al,Ti,Fe,Cr,Ni}$
2	$L_{Cu,Al,Ti,Fe,Cr,Ni} \rightarrow L_{Cu,Al} + L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ti,Ni} + L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ni} + L_{Cu,Ti,Al,Fe} + L_{Ti,Cu,Al,Ni,Fe} + L_{Ti,Fe,Cr} + L_{Ti,Cu,Fe} + L_{Ti,Cu,Al} + L_{Ti,Cu}$
3	$L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ti,Ni} \rightarrow Fe-Cr-Al-Cu-Ti-Ni \text{ 化合物}$
4	$L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ni} \rightarrow Fe-Cr-Al-Cu-Ni \text{ 化合物}$
5	$L_{Cu,Al} \rightarrow \beta + Cu, \beta \rightarrow \gamma_1 + Cu \text{ 和 } Cu + \gamma_1 \rightarrow \alpha_2$
6	$L_{Fe,Cr,Al,Cu,Ti,Ni} \rightarrow Fe-Cr-Al-Cu-Ti-Ni \text{ 化合物}$
7	$L_{Cu,Ti,Al,Fe} \rightarrow Cu-Ti-Al-Fe \text{ 化合物}$
8	$L_{Ti,Cu,Al,Ni,Fe} \rightarrow Ti-Cu-Al-Fe-Ni \text{ 化合物}$
9	$L_{Ti,Fe,Cr} \rightarrow Ti-Fe-Cr \text{ 化合物}$
10	$L_{Ti,Cu,Fe} \rightarrow Ti-Cu-Fe \text{ 化合物}$
11	$L_{Ti,Cu,Al} \rightarrow Ti-Cu-Al \text{ 化合物}$
12	$L_{Ti,Cu} \rightarrow \beta Ti + Ti_2Cu, \beta Ti \rightarrow \alpha Ti + Ti_2Cu$

2.3 力学性能

图 6 为 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头与纯钛/镀锌钢、纯钛/铜、钛合金/铜接头拉剪强度的对比图^[30-32], 从图中可以看出, 纯钛/镀锌钢接头的强度最高, 可达 325 MPa, 而钛合金/不锈钢接头的拉剪强度次之, 为 306 MPa. 纯钛/镀锌钢和钛合金/不锈钢接头的强度约为纯钛/铜、钛合金/铝接头强度的 2 倍.

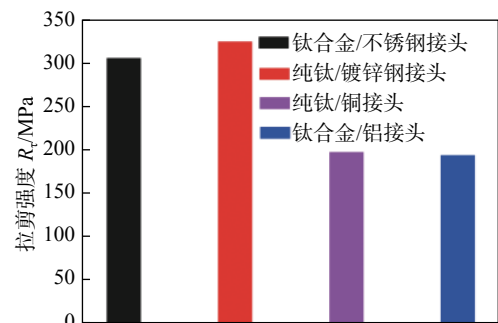


图 6 不同接头拉剪强度的对比图

Fig. 6 Comparison of the tensile strength for TC4/304 SS lapped welding joint and other related joints

图 7 为 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头中沿界面 I 和界面 II 的显微硬度变化. 从图中可以看出, 界面 I 的显微硬度变化不大, 主要是因为无明显反应层生成. 焊缝金属的显微硬度平均值为 244 HV, 显微硬度的变化主要是 Fe-Cr-Al-Cu-Ti-Ni 化合物的生成. 对界面 II 而言, 界面反应层的

显微硬度明显的高于焊缝金属和 TC4 钛合金母材的显微硬度,其最大值为 600 HV. 主要是生成大量的 Ti-Cu 金属间化合物。

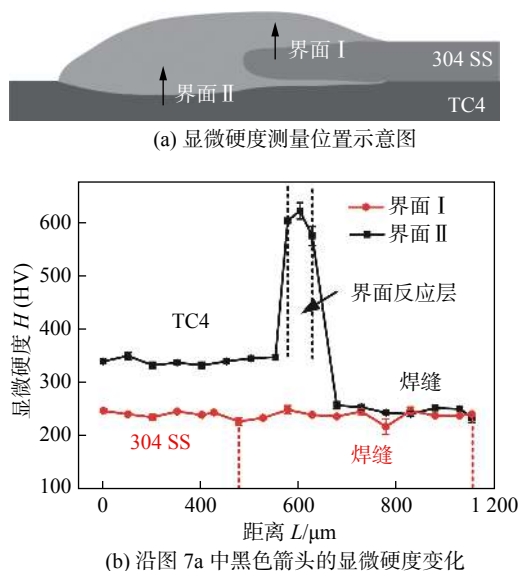


图 7 TC4/304 SS 搭接焊接头的显微硬度变化

Fig. 7 Microhardness variation of TC4/304 SS lapped welding joint. (a) schematic diagram of microhardness measurement position; (b) microhardness variation along the black arrow in Fig. 7a

图 8 为 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头的断裂方式和断口侧面 OM 图。从图 8a 可以看出,接头沿界面 II 断裂。根据图 8b 断口侧面图也可以看出,接头断裂在 Ti-Cu 界面反应层。图 9 为 TC4 钛合金和 304 不锈钢搭接焊接接头断口 XRD 图谱。从图中可以看出,断口主要由 Ti-Cu 金属间化

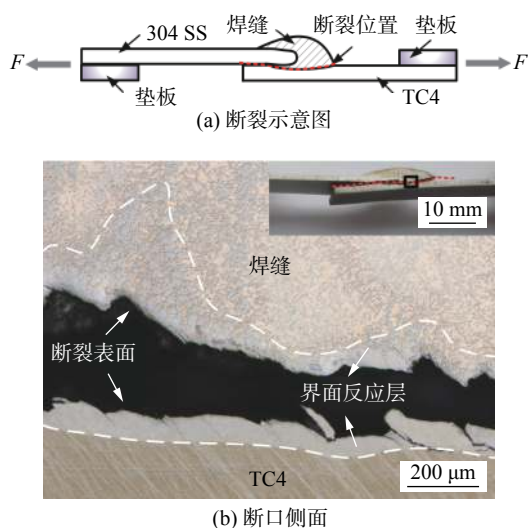


图 8 TC4/304 SS 搭接焊接头的

Fig. 8 TC4/304 SS lapped welding joint. (a) the fracture mode of the joint; (b) the fracture side of the joint

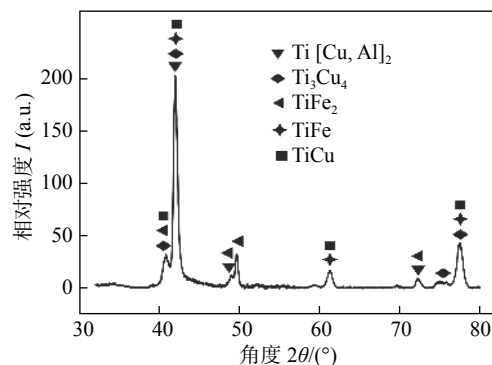


图 9 TC4/304 SS 搭接焊接头的断口 XRD 图谱

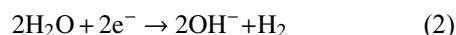
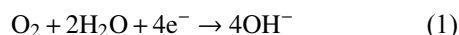
Fig. 9 XRD spectra of fracture TC4/304 SS lapped welding joint

合物、Ti-Cu-Al 化合物和 Ti-Fe 金属间化合物组成。根据图 4c 和图 7 可以看出,该区域生成 Ti-Cu 金属间化合物和硬度较高的 Ti-Fe 金属间化合物,因此在受到力的作用下成为整个接头中最薄弱的位置。

2.4 腐蚀性能

图 10 为 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头中焊缝金属、界面 I 和界面 II 在人工海水溶液浸泡 30 天后的微观组织。图中各个区域的 EDS 分析如表 4 所示。图 10a 为焊缝金属浸泡腐蚀后的 SEM 图,主要由 Fe-Cr-Cu-Al-Ti-Ni-O 氧化物、CuO 和 Al₂O₃ 双相氧化物、CuO 腐蚀产物组成。图 10b 为界面 I 浸泡腐蚀后的 SEM 图,从图中可以看出界面 I 和靠近界面 I 处的焊缝金属发生明显的腐蚀。304 不锈钢母材发生点蚀。进一步对界面 I (图 10b 中 D 区) 和靠近界面 I 处的焊缝金属 (图 10b 中 E 区) 放大,分别如图 10d, 10e 所示。结合 EDS 分析,浸泡腐蚀后的界面 I 主要由 Fe-Cr-Al-Cu-Ni-O 氧化物和 CuO 氧化产物组成。浸泡腐蚀后靠近界面 I 处的焊缝金属主要由 Al₂O₃ 氧化物和 Fe-Cr-Al-Cu-Ni-O 氧化物组成。图 10c 为界面 II 浸泡腐蚀后的 SEM 图,从图中可以看出,靠近母材处的反应层发生明显的腐蚀。进一步对图 10c 中的 F 区域放大如图 10f 所示。结合 EDS 分析,浸泡腐蚀后的界面 II 主要由 Ti-Cu-O 氧化物组成。

当 TC4 钛合金/304 不锈钢搭接焊接接头浸泡在人工海水溶液中时,接头发生电偶腐蚀,腐蚀过程中阴极发生氧的还原反应和析氢反应^[23],分别如式 (1) 和式 (2) 所示,即



阳极发生焊缝金属氧化,如式 (3) 所示,即

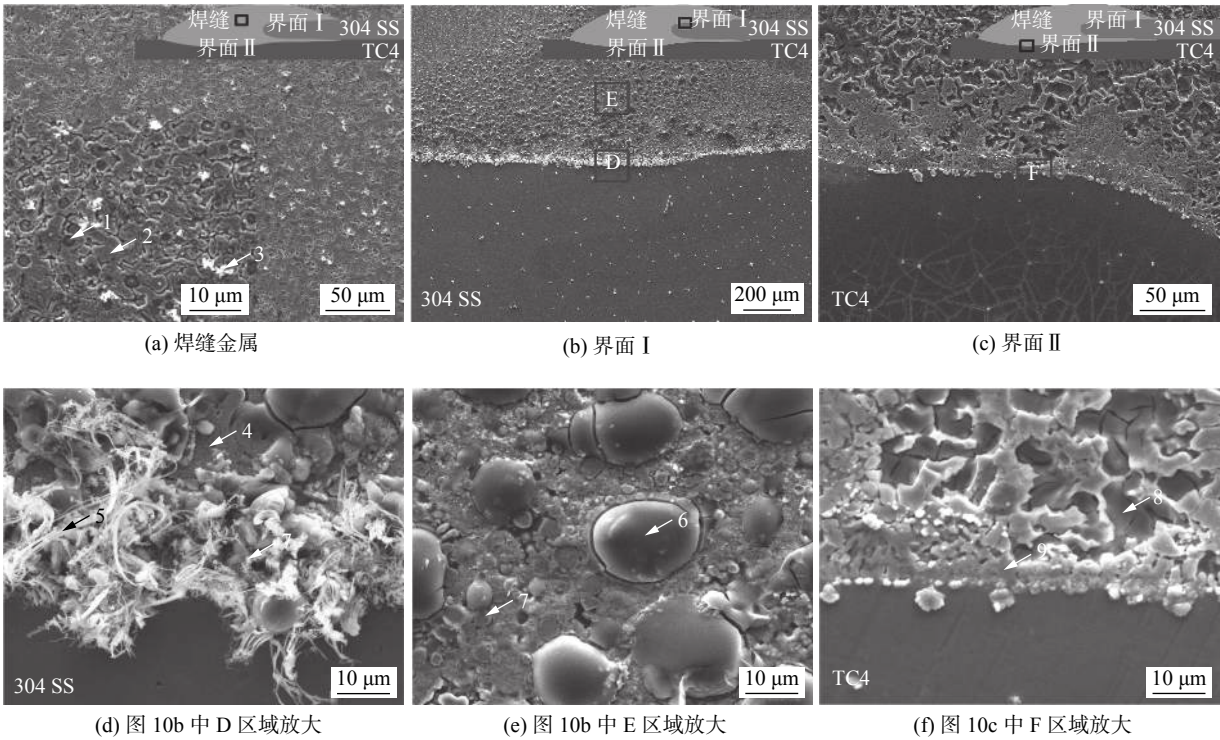


图 10 人工海水溶液浸泡 30 天后 TC4/304 SS 搭接焊接头的显微组织

Fig. 10 Microstructure of TC4/304 SS lapped welding joint after artificial seawater solution immersion test for 30 days. (a) weld metal; (b) interface I; (c) interface II; (d) magnified zone D in Fig. 10b; (e) magnified zone E in Fig. 10b; (f) magnified zone F in Fig. 10c

表 4 图 10 中各个区域的 EDS 元素组成 (原子分数, %)

Table 4 EDS elemental compositions of various locations in Fig. 10

区域	Cu	Al	Ni	Fe	Cr	Ti	O
1	7.9	10.5	3.3	33.3	8.0	4.1	31.4
2	61.4	16.2	3.7	3.6	0.4	0.8	12.3
3	54.9	7.7	1.5	5.5	1.5	1.2	26.4
4	5.1	7.2	3.7	55.2	15.3	0.3	10.8
5	31.3	4.8	1.6	10.0	3.0	0.1	48.2
6	9.4	18.9	4.4	1.8	0.2	-	63.0
7	7.2	10.5	3.9	52.3	11.9	0.6	10.0
8	24.8	4.9	1.3	2.1	0.2	7.8	58.9
9	19.9	4.7	1.1	0.9	0.2	32.5	40.4



此外, TC4 母材发生氧化, 生成 TiO_2 氧化膜, 如式 (4) 所示, 即



3 结论

(1) 采用铜基填充金属通过冷金属过渡技术成功实现了 TC4 钛合金与 304 不锈钢之间的焊接, 获

得成形良好的焊缝。

(2) 接头的拉剪强度为 306 MPa。TC4 钛合金母材-铜焊缝金属的界面形成大量的 Ti-Cu 金属间化合物和 Ti-Fe 金属间化合物, 使得界面反应层的硬度明显高于和焊缝金属和母材的硬度, 导致接头沿钛合金-铜焊缝金属界面发生脆性断裂。

(3) 接头在人工海水溶液中发生电偶腐蚀。钛合金母材表面形成氧化膜, 不锈钢母材发生点蚀。304 SS-铜焊缝界面发生明显的腐蚀, 主要由 Fe-Cr-

Al-Cu-Ni-O 氧化物和 CuO 氧化产物组成。Ti-Cu 金属间化合物发生明显的腐蚀, 形成 Ti-Cu-O 氧化物。

(4) 焊缝金属主要由 Fe-Cr-Cu-Al-Ti-Ni 化合物、Cu 固溶体和 α_2 相组成。腐蚀后的焊缝金属主要由 Fe-Cr-Cu-Al-Ti-Ni-O 氧化物、CuO 和 Al_2O_3 双相氧化物、CuO 腐蚀产物组成。

参考文献

- [1] 张岩. 钛合金/不锈钢异种材料激光焊接头微观组织及力学性能的研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Zhang Yan. Study on microstructures and properties of laser welded joints of Titanium alloy/stainless steel dissimilar materials [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [2] 孙倩, 张霞, 张罡, 等. TA2, Q345 及其爆炸复合板高周疲劳性能研究 [J]. 压力容器, 2019, 36(7): 9 – 17.
Sun Qian, Zhang Xia, Zhang Gang, *et al.* Researches on high cycle fatigue properties of TA2, Q345 and their explosively bonded plates [J]. Pressure Vessel Technology, 2019, 36(7): 9 – 17.
- [3] Mou G, Hua X, Wu D, *et al.* Microstructure and mechanical properties of cold metal transfer welding-brazing of titanium alloy (TC4) to stainless steel (304L) using V-shaped groove joints [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 266: 696 – 706.
- [4] 温秉权. 金属材料手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
Wen Bingquan. Handbook of metal materials [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.
- [5] Massalski T B. Binary alloy phase diagrams; Materials Park [M]. ASM International: Novelt, OH, USA, 1990.
- [6] 李标峰. 钛与钢及钛复合钢板的焊接性研究 (II) [J]. 材料开发与应用, 2004, 19(2): 45 – 46.
Li Biaofeng. Study on the weldability of titanium and steel and titanium clad steel plate (II) [J]. Development and Application of Materials, 2004, 19(2): 45 – 46.
- [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] Shi C G, Sun Z R, Fang Z H, *et al.* Design and test of a protective structure for the double vertical explosive welding of large titanium/steel plate [J]. China Welding, 2019, 28(3): 7 – 14.
- [9] Cheng Z, Ye Z, Huang J H, *et al.* Influence of heat input on the intermetallic compound characteristics and fracture mechanisms of titanium-stainless steel MIG-TIG double-sided arc welding joints [J]. Intermetallics, 2020, 127: 106973.
- [10] Wang T, Zhang B G, Wang H Q, *et al.* Microstructures and mechanical properties of electron beam-welded titanium-steel joints with vanadium, nickel, copper and silver filler metals [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(4): 1498 – 1504.
- [11] Hao X H, Dong H G, Xia Y Q, *et al.* Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 titanium alloy/304 stainless steel joint with (CoCrFeNi)_{100-x}Cu_x high-entropy alloy interlayer [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 803: 649 – 657.
- [12] Zhang Y, Sun D Q, Gu X Y, *et al.* Nd: YAG pulsed laser welding of TC4 Ti alloy to 301L stainless steel using Ta/V/Fe composite interlayer [J]. Materials Letters, 2018, 212: 54 – 57.
- [13] 褚巧玲. TA1/Q345 层状复合板焊接机理及其组织演变行为研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
Chu Qiaoling. Fusion welding on TA1/Q345 lamellar structure and joint microstructure evolution [D]. Xian: Xian University of Technology, 2017.
- [14] Song T F, Jiang X S, Shao Z Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between Ti-6Al-4V titanium alloy and AISI316L stainless steel using Cu/Nb multi-interlayer [J]. Vacuum, 2017, 145: 68 – 76.
- [15] Yue X, He P, Feng J C, *et al.* Microstructure and interfacial reactions of vacuum brazing titanium alloy to stainless steel using an AgCuTi filler metal [J]. Materials Characterization, 2008, 59(12): 1721 – 1727.
- [16] Sravanthi S S, Acharyya S G, Phani Prabhakar, *et al.* Effect of welding parameters on the corrosion behavior of dissimilar alloy welds of T6 AA6061 Al-Galvanized mild steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27: 5518 – 5531.
- [17] Shi Y, Li J, Zhang G, *et al.* Corrosion behavior of aluminum-steel weld-brazing joint [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(5): 1916 – 1923.
- [18] Vergara-Juarez F, Rosales-Cadena I, Salinas-Bravo V M, *et al.* Effect of methanol on the corrosion behaviour of Al-Cu Alloys in sulphuric acid [J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2017, 52(6): 476 – 483.
- [19] Sarvghad-Moghaddam M, Parvizi R, Davoodi A, *et al.* Establishing a correlation between interfacial microstructures and corrosion initiation sites in Al/Cu joints by SEM-EDS and AFM-SKP-FM [J]. Corrosion Science, 2014, 79: 148 – 158.
- [20] Behúlová M, Babalová E, Nagy M. Simulation model of Al-Ti dissimilar laser welding-brazing and its experimental verification [J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 179: 012007.
- [21] Vacchi G S, Plaine A H, Silva R, *et al.* Effect of friction spot welding (FSpW) on the surface corrosion behavior of overlapping AA6181-T4/Ti-6Al-4V joints [J]. Materials & Design, 2017, 131: 127 – 134.
- [22] Madhavan S, Kamaraj M, Vijayaraghavan L, *et al.* Cold metal transfer welding of dissimilar A6061 aluminum alloy-az31b magnesium alloy: effect of heat input on microstructure, residual stress and corrosion behavior [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 70(4): 1047 – 1054.

- [23] Li S X, Khan H, Hihara L H, *et al.* Marine atmospheric corrosion of Al-Mg joints by friction stir blind riveting[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 793 – 801.
- [24] Adlakha I, Bazehhour B G, Muthegowda N C, *et al.* Effect of mechanical loading on the galvanic corrosion behavior of a magnesium-steel structural joint[J]. Corrosion Science, 2018, 133: 300 – 309.
- [25] Liu L M, Xu R Z, Investigation of corrosion behavior of Mg-steel laser-TIG hybrid lap joints[J]. Corrosion Science, 2012, 54: 212–218.
- [26] Ravi Shankar A, Sole R, Thyagarajan K, *et al.* Failure analysis of titanium heater tubes and stainless steel heat ex-changer weld joints in nitric acid loop[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 99: 248 – 262.
- [27] 韩小敏. 钛-钢复合板爆炸焊接工艺及组织与性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
Han Xiaomin. Investigation on the explosive welding technology and its microstructure and property of titanium-steel compo-site plate[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [28] Zhang B G, Wang T, Chen G Q, *et al.* Contact reactive joining of TA15 and 304 stainless steel Via a copper interlayer heated by electron beam with a beam deflection[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21(10): 2067 – 2073.
- [29] 吕小青, 鲁硕, 徐连勇, 等. 7075/TC4 异种金属 CMT Advanced+P 熔钎焊特性分析 [J]. 焊接学报, 2021, 42(2): 1 – 7.
Lü Xiaoqing, Lu Su, Xu Lianyong, *et al.* Analysis of CMT advanced+P welding-brazing characteristics of 7075/TC4 dissimilar metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(2): 1 – 7.
- [30] Chang J H, Cao R, Yan Y J. The joining behavior of titanium and Q235 steel joined by cold metal transfer joining technology[J]. Materials, 2019, 12(15): 2413.
- [31] Cao R, Feng Z, Lin Q L. Study on cold metal transfer welding –brazing of titanium to copper[J]. Materials & Design, 2014, 56: 165 – 173.
- [32] Cao R, Sun J H, Chen J H. Mechanisms of joining aluminum A6061-T6 and titanium Ti–6Al–4V alloys by cold metal transfer technology[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2013, 18(5): 425 – 433.
-
- 第一作者:**常敬欢, 博士; 主要研究方向为异种金属焊接; Email: 1716295050@qq.com.
通信作者:曹睿, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: caorui@lut.edu.cn.

(编辑: 胡广旭)