

表面处理方式对钛/钢复合板界面结合性能的影响

杨德翰, 骆宗安, 谢广明, 余 煊
(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 采用真空制坯轧制复合法, 在相同的加热温度、轧制道次和压下量等工艺条件下, 分别对钢丝刷打磨、酸洗和带水砂带机打磨的表面处理方式, 研究了3组钛/钢复合板的界面组织和力学性能. 分析了表面处理方式对界面结合性能的影响. 结果表明: 带水砂带机表面处理方式下的钛/钢复合界面生成连续均匀的TiC层, 剪切断口呈韧窝状, 界面剪切强度稳定, 平均强度达到242.6 MPa. 其他两种表面处理方式下的钛/钢复合板界面生成断续的TiC层, 其剪切强度均未满足国家标准.

关 键 词: 真空制坯轧制复合; 表面处理; 电子束焊接; 组织分析; 界面结合性能

中图分类号: TG 335.59 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)10-1396-07

Influence of Surface Treatment on Interface Bonding Properties of Titanium/Steel Composite Plate

YANG De-han, LUO Zong-an, XIE Guang-ming, YU Huan
(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: LUO Zong-an, Email: luoza@ral.neu.edu.cn)

Abstract: Under the same heating temperature, rolling pass and pressure reduction by using vacuum roll cladding (VRC), the interfacial microstructure and mechanical properties of three groups titanium/steel composite plates were studied after one of three different surface treatment methods which were wire brush grinding, pickling and polishing machine with water. The influence of surface treatment on the interfacial bonding properties was analyzed. The results showed that a uniform and continuous TiC layer is formed at the bonded interface when the surface treatment of the polishing machine with water is carried out. The fracture surfaces are full of dimples, the interfacial shear strength is stable with the average shear strength of 242.6 MPa. However, the discontinuous TiC layers are formed in the interfaces of the titanium/steel plates subjected to the other two surface treatments and the shear strength of these two plates cannot meet the national standard.

Key words: vacuum rolling cladding (VRC); surface treatment; electron-beam welding; analysis of microstructure; interface bonding performance

钛及钛合金材料的成本较高, 钛/钢复合板兼具钛的耐蚀性及普通钢板的强度和塑性, 成本远低于钛合金, 因此钛/钢复合板在不同领域都有应用^[1-6]. 钛/钢复合板主要的生产方法有爆炸复合法^[7-8]、扩散焊接复合法、真空制坯轧制复合法^[9]. 爆炸复合法生产钛/钢复合板的工艺流程相对简单, 却存在生产效率低、复合板界面结合强度不高、结合强度不均匀等问题. 扩散焊接复合法生产的钛/钢复合板性能优于爆炸复合法, 但此方法生产的钛/钢复合板尺寸受到很大限制, 很难生产大型钛/钢复合板. 为了提高钛/钢复合板界面性能并扩大尺寸, 真空制坯轧制复合法被应用得越来越多. 真空制坯轧制复合法是将钛、钢板进行真空组坯焊接后直接进行加热轧制, 从而获得大

宽幅钛/钢复合板.

真空制坯轧制复合法工艺简单,界面结合强度高,产品尺寸范围广,是未来复合板生产的发展方向.2004 年,日本 JFE 公司利用真空制坯轧制复合法生产了高性能的钛/钢复合板,该方法首先将两块金属板进行表面处理后贴合在一起,置于真空电子束焊机(EBW)中进行四周焊接密封,使坯料贴合面处于高真空状态,最后进行加热和低速大压下轧制,使复合界面产生良好的冶金结合,从而获得高质量的钛/钢复合板.就真空制坯轧制复合法而言,金属表面的处理方式关系到界面生

成物的含量,这些因素将直接影响复合板的界面结合程度.因此,研究不同的表面处理方式对钛/钢复合板性能的影响具有重要的指导意义,本文在实验的基础上,研究了不同表面处理方式对真空制坯轧制钛/钢复合板的组织和性能的影响.

1 实验材料及方法

真空制坯轧制复合法制备钛/钢复合板所用材料为 TA2 工业纯钛板材和 Q345R 钢板材,其成分如表 1 所示.

表 1 实验材料的化学成分(质量分数)												
Table 1 Chemical components of raw materials(mass fraction)												
材料	Ti	C	N	H	O	Fe	Mn	P	S	Si	Al	V
TA2	其余	0.01	0.02	0.002	0.14	0.07	—	—	—	—	—	—
Q345R	—	0.2	—	—	—	其余	1.2	0.025	0.015	0.55	0.02	0.05

真空制坯轧制复合法的主要实验流程包括表面清理、组坯、真空电子束焊接、加热轧制等步骤.结合表面采用钢丝刷打磨、酸洗和砂带机打磨.由于钛和钢直接焊接时会产生脆性化合物,易生成裂纹,所以采用钢/钛/钛/钢的组坯方式,如图 1 所示.内侧钛板涂抹隔离剂,保证轧制后切分为两块对称钛/钢复合板.将组坯后的复合板表面贴合

对齐并夹紧,置于 THDW - 15 型真空电子束焊机真空室中,抽真空至 0.01 Pa 后进行焊接密封,以保证贴合面处于高真空状态.将组坯完成的真空复合坯置于 850 ℃的加热炉中进行加热,保温 2 h 后进行轧制,总压下率为 85%,轧制结束后空冷至室温.

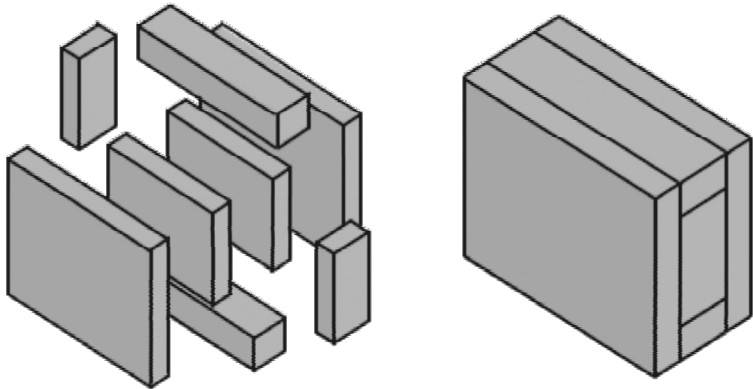


图 1 真空制坯轧制复合 4 层钛/钢复合板的组坯方式示意图

Fig. 1 Schematic diagram of assembly mode for four-layer titanium/steel plate by vacuum rolling cladding

轧制完成后,分别从 3 种不同表面处理方式的复合板选取金相试样并进行抛光,用 4% 的硝酸酒精进行金相侵蚀,利用 JXA - 8530F, JEOL 型电子探针显微分析仪观察界面处的组织和剪切断口形貌及元素分布,并从复合板轧制方向取样,利用长春试验机厂生产的 WDW - 300 型万能试验机进行剪切性能测试.

2 实验结果与分析

2.1 材料表面微观组织分析

3 种不同表面处理方式下钢板的微观形貌如图 2 所示.利用电子探针能谱分析检测不同表面处理方式中不同区域的元素成分,结果如表 2 所示.

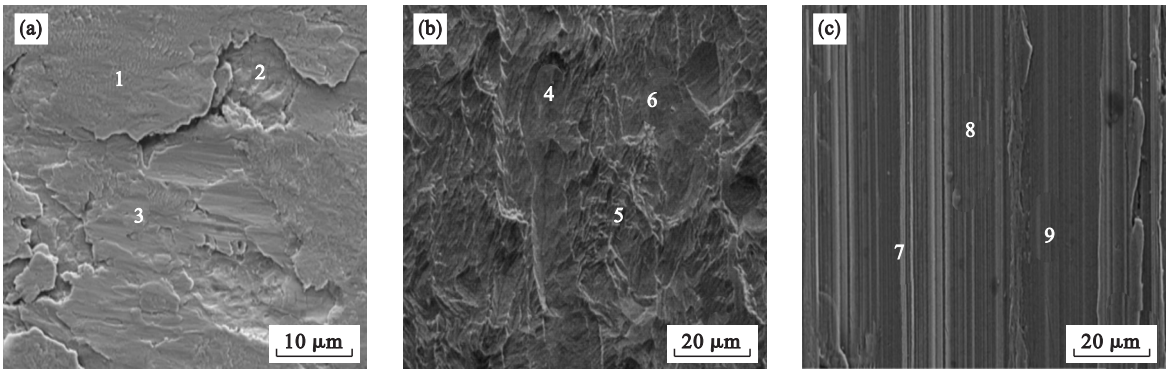


图 2 不同表面处理方式下的微观形貌
Fig. 2 Surface morphology of samples under different surface treatment methods
(a)—钢刷打磨; (b)—酸洗; (c)—带水砂带机打磨.

表 2 图 2 中各点成分
Table 2 Composition at each point in Fig.2

原子分数/%	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x_{O}	1.23	1.67	1.54	2.08	1.47	1.36	0.86	0.72	0.68
x_{C}	6.80	3.57	7.40	4.69	5.41	5.53	5.01	4.03	4.56
x_{Si}	0.47	0.62	0.53	0.46	0.43	0.67	0.72	0.65	0.79
x_{Mn}	1.20	1.59	1.37	1.43	1.15	1.35	1.23	1.68	1.21
x_{Fe}	89.07	92.55	89.16	91.34	91.54	91.09	92.18	92.92	92.76

由表 2 可知,经 3 种表面处理后,钢板表面的氧化物基本清除。针照片如图 3 所示.

2.2 结合界面分析

3 种不同表面处理方式下结合界面的电子探

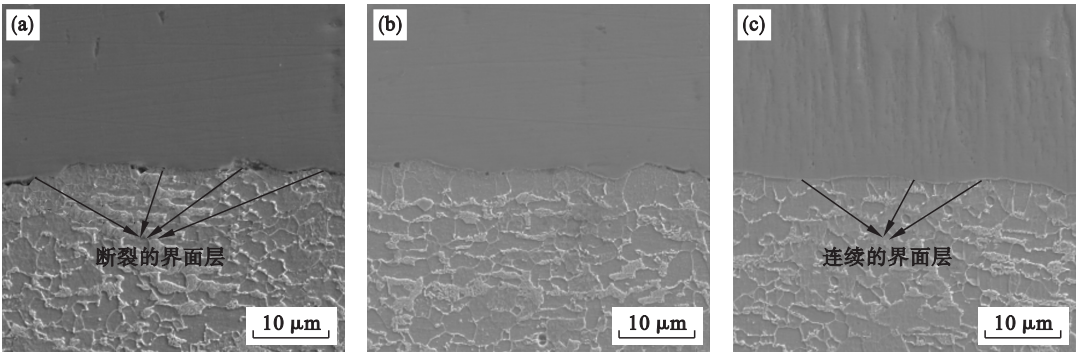


图 3 3 种不同表面处理方式下结合界面的电子探针图片
Fig. 3 Electron microprobe images of titanium/steel interfaces under three different surface treatments
(a)—钢刷打磨; (b)—酸洗; (c)—带水砂带机打磨.

在图 3a 中界面形成了大量的夹杂物,这些夹杂物的形成主要是由于钢丝刷打磨后的金属表面在互相接触时形成封闭区间,在加热、轧制和后续的冷却过程中,极易发生元素的聚集,并形成大量的夹杂物,通过 WDS 分析可得,夹杂物的元素为 Ti(50.12% ~ 52.3%) 和 C(46.12% ~ 47.7%),可知界面处的夹杂物极有可能为 TiC. 在图 3b 中,界面夹杂物含量明显降低,说明经酸洗处理的

金属表面,粗糙度明显降低,在加热轧制和轧后冷却过程中,形成的封闭区间较小,并没有发生明显的元素偏聚现象. 在图 3c 中,界面的化合物层连续,没有发现明显夹杂物.

图 4 为带水砂带机打磨的表面处理方式下界面元素分布情况. 由图 4a 和图 4b 知,界面形成明亮连续的 TiC 层. 在图 4b 的 II 区,Fe 元素的扩散区域为 1 μm,经 WDS 检测发现此区域主要含有

Fe(17.3% ~ 19.8%) ,Ti(79.5% ~ 81.6%) 和其他杂质元素. 研究表明,Fe 是 β -Ti 的稳定元素, Fe 在 β -Ti 中的固溶度为 20%. 对于 TA2 工业纯钛,其相变温度为 882 $^{\circ}\text{C}$,尽管轧制温度低于其相变温度,但大量的 Fe 元素扩散至 Ti 侧,导致 α -Ti 转变为 β -Ti. Ghosh 等^[10] 认为, II 区是由针状 α -Ti 和 β -Ti 组成的魏氏体组织. 由图 4a 的 I 区可知,界面处 Ti 元素在钢侧的扩散距离约为 3 μm ,由于金属 Ti 侧含有的 Fe 元素明显高于钢侧含有的 Ti 元素,菲克第一定律认为,当固体

中的元素存在浓度差异时,原子将会发生扩散行为,由于 TA2 纯钛与 Q345R 中碳钢的化学成分相差比较大,因此在加热、轧制过程中,复合界面处会形成合金元素浓度分布梯度曲线,导致原子发生扩散或者聚集,这种原子扩散或者聚集可能会有利于复合板界面结合强度的提高,但从另外一方面考虑,元素发生聚集,如果产生了新的脆性相等,又将对结合性能造成不利影响^[11-12]. 图 4 显示连续的 TiC 层有利于 Ti 和 Fe 元素的均匀扩散.

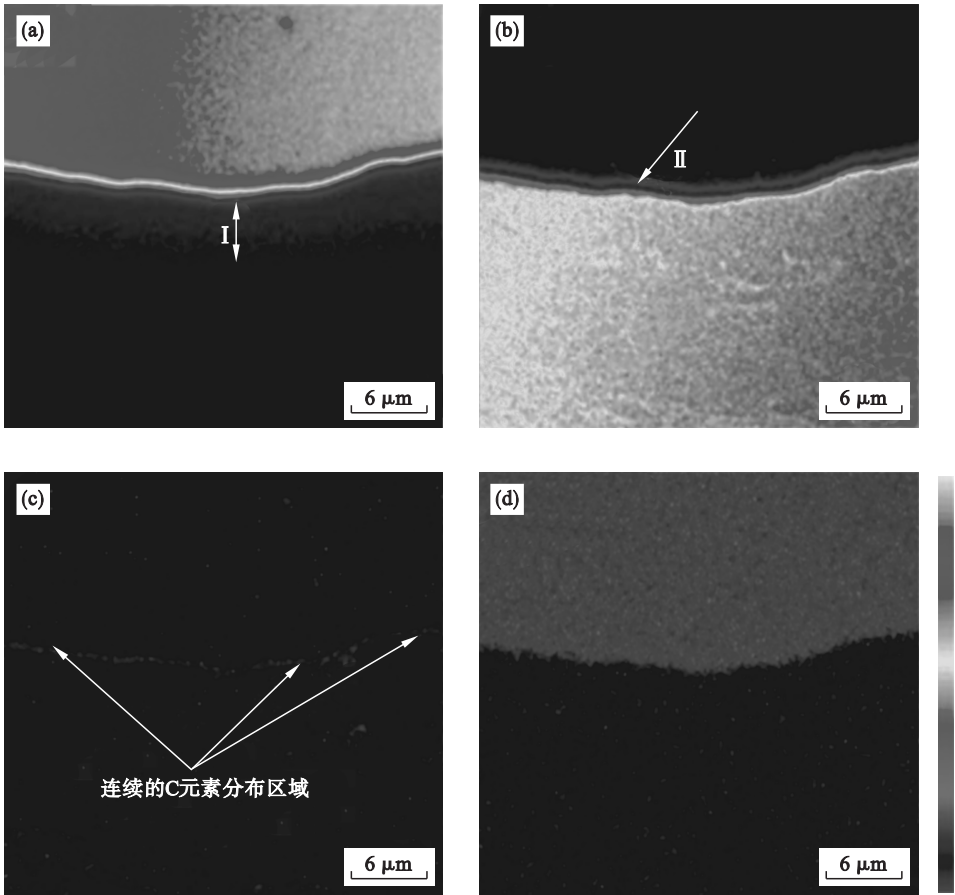


图 4 带水砂带机打磨的表面处理方式下界面元素分布
Fig. 4 Element distribution in the titanium/steel interface under surface treatment using water belt grinding machine
(a)—Fe; (b)—Ti; (c)—C; (d)—O.

图 5 为钢丝刷打磨的表面处理方式下界面元素分布情况,明显看出界面呈锯齿状,这是由于钢丝刷打磨条件下的金属表面粗糙度较高. 从图 5b,5c 可以看出 C 元素在界面处有明显的聚集区域并成断续分布,TiC 层厚度极不均匀. 这是由于在加热、轧制及后续的冷却过程中,钢丝刷打磨的金属表面凹凸不平,两种金属在互相接触时产生的封闭区间极易发生 C 元素偏聚,并与 Ti 元素结合生成 TiC. 金属板表面不同的粗糙度是导致 TiC 层厚度不均匀的主要原因,与厚度均匀的 TiC 层

形成鲜明对比.

2.3 拉剪断口分析

图 6 为不同表面处理条件下断口 Ti 侧的微观形貌,从图 6a 可以看出,带水砂带机打磨的表面处理方式下,拉剪断口有大量的韧窝生成,没有发现脆性化合物,这是典型的韧性断裂痕迹,说明砂带机打磨的金属板表面,在加热轧制和后续冷却过程中,结合效果更好. 图 6b 为钢丝刷打磨条件下断口形貌,可以看出断口呈现明显的解离状,并有大量块状化合物生成,这是典型的脆性断裂

痕迹. 经 WDS 分析发现, 这些块状化合物主要含有 Ti (61. 12% ~ 62. 7%) 和 C (35. 11% ~ 36. 36%), 以及少量其他元素, 说明断口生成的

块状化合物极有可能为 TiC. TiC 为脆性化合物, 界面处大量生成的 TiC 会破坏复合板的结合性能.

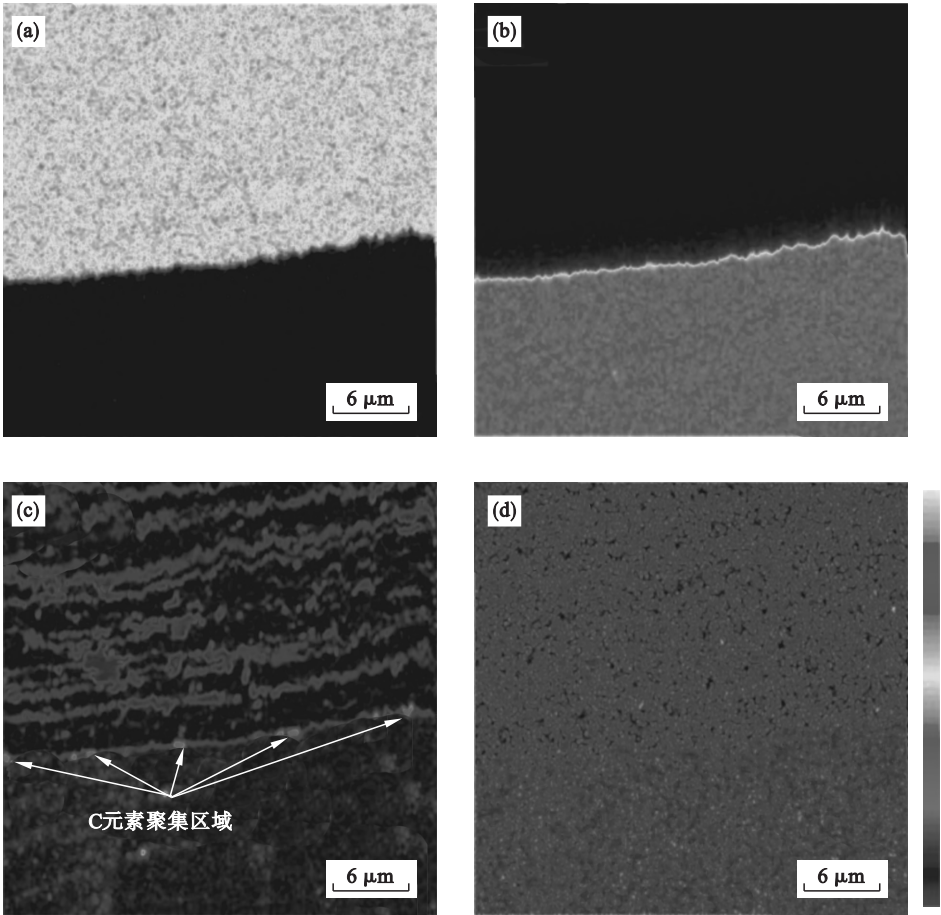


图 5 钢丝刷打磨表面处理方式下界面元素分布
Fig. 5 Element distribution in titanium/steel interface under surface treatment using steel wire brush
(a)—Fe; (b)—Ti; (c)—C; (d)—O.

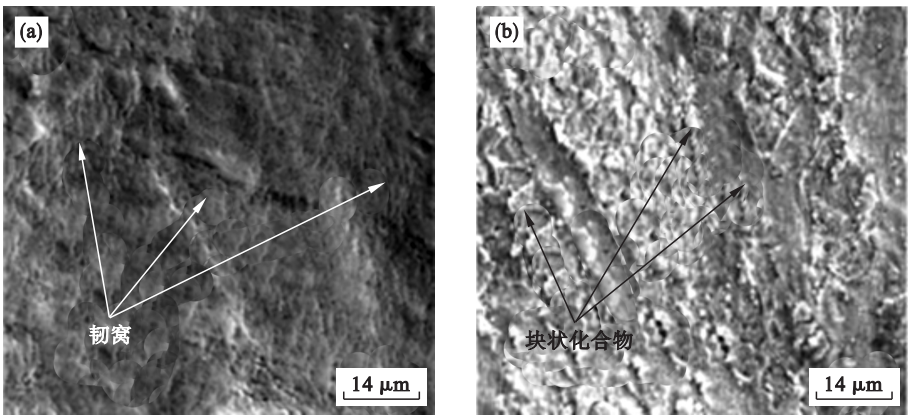


图 6 不同表面处理方式下拉剪断口形貌
Fig. 6 Shearing fracture morphologies of samples under different surface treatments
(a)—带水砂带机打磨(Ti 侧); (b)—钢丝刷打磨(Ti 侧).

图 7 为不同表面处理方式下断口 XRD 分析结果,从图中可以看出,两种表面处理方式下断口均含有 TiC. 其中,图 7b 钢丝刷打磨条件下的拉剪断口中 TiC 对应的 XRD 衍射峰较多且面积较

大,并且图 7b 的检测结果仅有 Ti 和 TiC,说明此种表面处理条件下,复合界面断裂位置在 TiC 层与 Ti 侧之间. 而图 7a 检测结果显示,拉剪断口含有 Ti, Fe 和 TiC,说明其复合界面具有混合型断

裂特征. 以上结果说明, 钢丝刷打磨的表面处理方式, 界面形成 TiC 聚集区, TiC 层较厚, TiC 断裂处无法将钢撕扯至 Ti 侧, 结合性能较差, 而砂带机打磨的表面处理方式, 界面形成的 TiC 层薄且均匀, 将钢撕扯至 Ti 侧.

表 3 为 3 种表面处理条件下复合板剪切强度检测结果, 分析发现, 砂带机打磨表面处理方式下

剪切强度最高, 而钢丝刷打磨条件下的剪切强度最低, 平均强度仅为 178.4 MPa, 根据国家标准 GB/T8547 中 0 类复合板规定, 钛/钢复合板的剪切强度应大于 196 MPa. 钢丝刷打磨和酸洗条件下的复合板均未满足标准, 选择带水砂带机的表面处理方式剪切强度最高且稳定, 平均剪切强度达到了 242.6 MPa.

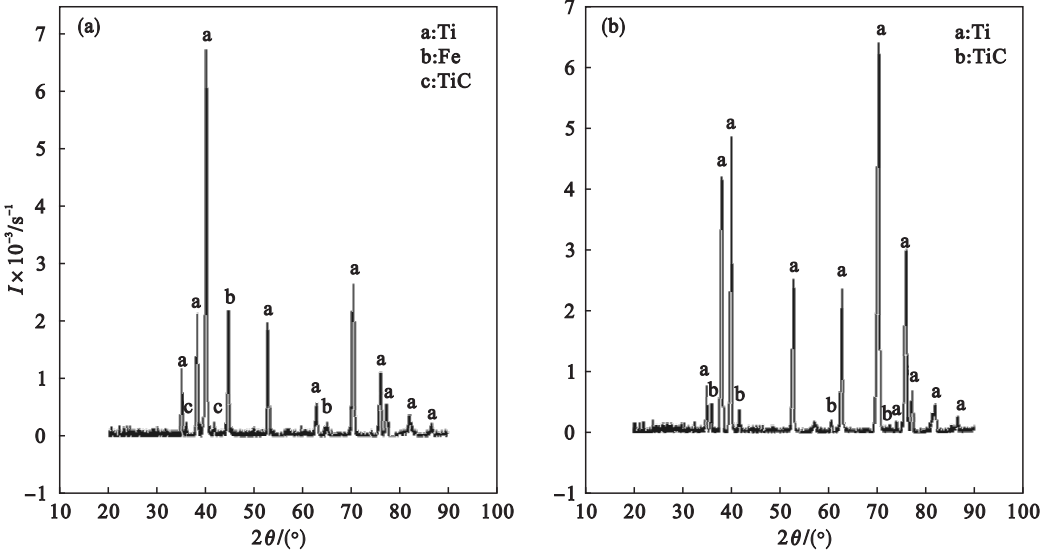


图 7 不同表面处理方式下拉剪断面 XRD 分析结果
Fig. 7 XRD analysis of shearing fracture surface of samples under different surface treatments
(a)—带水砂带机打磨(Ti 侧); (b)—钢丝刷打磨(Ti 侧).

表 3 不同表面处理条件下的剪切强度
Table 3 Shearing strength of samples under different surface treatments MPa

处理方式	边部			中部			平均
	1	2	3	1	2	3	
钢刷打磨	162.6	158.5	183.3	181.2	189.3	195.5	178.4
酸洗	187.5	195.4	175.3	189.1	199.3	202.4	191.5
砂带机打磨	237.3	240.5	230.7	236.4	253.6	257.3	242.6

3 结 论

- 1) 利用真空制坯轧制复合法生产的钛/钢复合板, 界面处于高真空状态, 3 种表面处理方式下, 金属表面氧化物基本去除.
- 2) 带水砂带机打磨条件下的金属板表面光亮平整, 复合板界面 TiC 层连续厚度均匀, Ti 和 Fe 元素扩散充分.
- 3) 钢丝刷打磨条件下的金属板表面凹凸不平, 复合界面 TiC 聚集且厚度不均匀, 影响了界面结合性能.
- 4) TiC 虽为脆性化合物, 但界面处较薄且均匀的 TiC 层有利于 Ti 和 Fe 元素的均匀扩散, 提高界面结合强度; 而界面处厚度不均匀且含量较

多的 TiC 区域易发生脆断, 影响复合板的结合性能.

参考文献:

[1] Ha J S, Sun I H. Design of high strength Cu alloy interlayer for mechanical bonding Ti to steel and characterization of their tri-layered clad[J]. *Materials & Design*, 2013, 51(10): 293–299.

[2] Kumar S M, Sethumadhava J R, Kumar V A, et al. Effects of conventional welding and laser welding on the tensile strength, ultimate tensile strength and surface characteristics of two cobalt-chromium alloys; a comparative study[J]. *Journal of Indian Prosthodontic Society*, 2012, 12(2): 87–93.

[3] Jin J Y, Hong S I. Effect of heat treatment on tensile deformation characteristics and properties of Al3003/STS439 clad composite[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2014, 596(3): 1–8.

(下转第 1407 页)