

# 钛-钢爆炸复合板熔焊对接过渡层 焊接材料

Transition Layer Welding Materials of Fusion Welding  
Joint for Titanium-steel Explosive Composite Plate

史倩茹<sup>1</sup>, 张 敏<sup>2</sup>, 吴伟刚<sup>1</sup>

(1 西安航空学院 材料工程学院, 西安 710077;

2 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048)

SHI Qian-ru<sup>1</sup>, ZHANG Min<sup>2</sup>, WU Wei-gang<sup>1</sup>

(1 School of Materials Engineering, Xi'an Aeronautical University,

Xi'an 710077, China; 2 School of Materials Science and Engineering,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**摘要:** 通过设计 TA1-X80 爆炸复合板熔焊连接过渡层焊接材料及焊接工艺, 结合复合板对接实验及接头组织、成分及性能测试实验, 研究钛-钢复合板熔焊对接的过渡层焊接材料及工艺。结果表明: 开 Y 型坡口并采用近钛层+近钢层双层过渡, 且近钛层采用 Ti-Ni-Al 合金系、近钢层采用 Ni-Cr-Fe 合金系, 可实现钛-钢复合板的冶金对接。焊缝组织由钛层粗大等轴晶逐渐转变为过渡层细小等轴晶或树枝晶, 并与钢层组织相互交织连接; 所得接头抗拉强度及屈服强度分别为 501.1、373.0 MPa, 均达到了复合板接头等强匹配效果, 塑/韧性稍有不足, 需通过减小过渡层厚度、调整焊材中细化晶粒元素等改善焊缝塑/韧性。

**关键词:** 熔焊对接; 过渡层; 焊接材料; 微观组织; 力学性能

**doi:** 10.11868/j.issn.1001-4381.2014.000554

**中图分类号:** TG422.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2018)09-0138-06

**Abstract:** The welding materials and processes of fusion welding joint for TA1-X80 explosive composite plate were designed by corresponding welding experiment. Based on the microstructure, composition and properties of the welded joints, a good welding material and process as transition layer for welding titanium-steel composite plate was obtained. The results show that Y-type groove and double-layer transition for metallurgical connection of titanium-steel composite plate are effective. The double-layer consists of nearly titanium layer of Ti-Ni-Al alloy and nearly steel layer of Ni-Cr-Fe alloy. The weld microstructure is changed from coarse equiaxed grain in the titanium layer to fine equiaxed grain or dendrite in the transition layer, and finally is interlaced with the structure of steel. The tensile and yield strength of the welded joint are 501.1 MPa and 373.0 MPa respectively, which reach the equal match. But the plasticity and toughness are slightly insufficient, which can be improved subsequently by reducing the thickness of the transition layer and adjusting the elements for refining grain size.

**Key words:** welding butt joint; transition layer; welding material; microstructure; mechanical property

随着石油天然气使用量的不断增长, 油气的长距离运输需求使得油气管道向高强韧、大口径不断发展。然而, 近年来油气泄漏、管道腐蚀开裂事故频发, 传统的管线钢已不能满足新形势下油气运输管道的强韧、耐腐蚀要求<sup>[1-3]</sup>。纯不锈钢或钛合金管道成本过高, 钛-钢复合板集钛的高耐腐蚀性、管线钢的高强度于一体, 保证了设备强度, 提高了管道耐腐蚀性, 在石油管道、海洋工程、航空、航天等领域有着很大的应用潜

能<sup>[4-5]</sup>。目前, 国内外钛-钢复合板多采用钛与钢互不相溶的搭接方式焊接, 但该方法难以在复合管焊接中应用<sup>[6-8]</sup>。这是由于钛、钢热物理性差异较大, 相溶性极小, 且极易形成低熔点共晶体和 Ti, Fe 金属间脆性化合物, 直接影响接头性能<sup>[9-12]</sup>。解决钛-钢复合板熔焊对接过渡连接问题是推进其工程化应用的关键<sup>[13-16]</sup>。本工作通过研究复合板特殊的结构特性, 分析钛-钢冶金结合困难、复合板界面适配及钛侧焊缝氧

化等问题,设计了复合板熔焊对接特殊坡口形貌、焊缝过渡方式、焊接材料及匹配焊接工艺,通过焊接实验及接头组织、性能分析,得到了可实现钛-钢复合板熔焊对接的过渡层(近钛层、近钢层)焊接材料及匹配工艺,为钛-钢复合板在油气管道的应用提供了理论参考。

1 实验材料与方法

实验选用 2 块尺寸为 160mm×180mm×16mm 的 TA1-X80 双金属复合板作为母材,编号分别为 A(近钛层采用 Ti-Al-Mo 焊接),B(近钛层采用 Ti-Ni-Al 焊接),其中,TA1 厚度为 2mm,X80 厚度为 14mm。对接实验用 Y 型坡口示意图如图 1 所示。

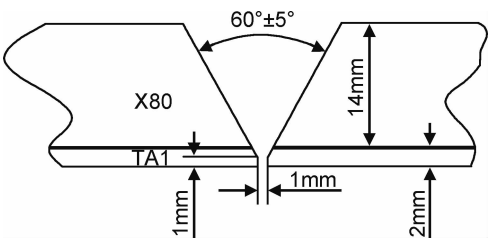


图 1 复合板对接实验坡口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of composite plate docking test

根据钛及钛合金物理、化学性能分析,结合 TA1 常温下的晶粒组织特点<sup>[17]</sup>,选择 TC4 钛合金焊丝作为钛层焊接材料;根据 TA1 及 X80 母材组织特点<sup>[18-20]</sup>,设计近钛层+近钢层双层过渡方式。根据过渡层在焊缝中所处位置及组织上的逐层过渡要求,结合合金元素对焊缝组织相组成的影响规律,选择 Ti-

Al-Mo,Ti-Ni-Al 两种合金系(合金粉)作为近钛层焊材合金系<sup>[21-24]</sup>,编号为近钛 1<sup>#</sup>、近钛 2<sup>#</sup>,A 试板近钛层采用近钛 1<sup>#</sup>,B 试板近钛层采用近钛 2<sup>#</sup>;近钢层均选用  $\phi$ 1.2mm 的 Ni-Cr-Fe 焊丝;钢层均选用  $\phi$ 1.2mm 的 YC-GX80 管线钢专用焊丝。钛层,近钛层,近钢层,钢层焊接方法分别为 TIG 焊,等离子喷焊,TIG 焊,MIG 焊,焊接电流分别为 90~95,110~115,120~125,160~180A。

金相测试和扫描测试均在焊板端部距离焊缝边缘 2cm 处取一个包括热影响区的试样。两个实验分别在 GX71 倒置金相显微镜和 JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜上进行。拉伸实验使用板状比例试样,取样部位垂直于焊缝横截面正中心,冲击实验为 V 形缺口标准试样,缺口开在焊缝中心,拉伸与冲击试样钛层与钢层厚度比均为 1:7。拉伸实验和冲击实验分别在 HT-2402 电脑控制万能试验机和 JB-300B 冲击试验机上进行。在 WE-10 型液压万能材料试验机、TUKON2100 显微硬度机上进行弯曲实验和硬度实验。

2 结果与讨论

2.1 接头微观组织特征

2 块试板各层的焊接方法相同,钛层均选用 TC4 钛合金焊丝,钢层均采用 YC-GX80 管线钢专用焊丝,故 A 板与 B 板 TC4 焊缝与钛侧母材 TA1 的结合效果及 YC-GX80 焊缝与钢侧母材 X80 的结合效果相同。图 2 为 A 试板 TC4 钛焊缝/母材 TA1 及 YC-GX80 钢焊缝/母材 X80 的结合金相图。

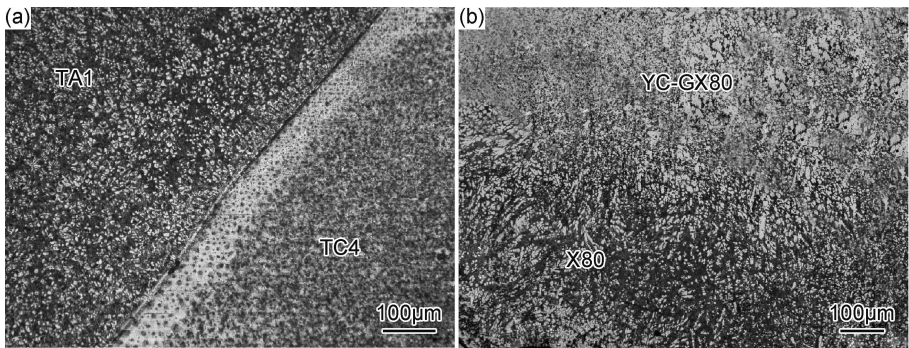


图 2 A 试板 TC4/TA1(a)及 YC-GX80/X80(b)结合 OM 像

Fig. 2 OM images of TC4/TA1(a) and YC-GX80/X80(b) of test plate A

由图 2(a)可知,TC4 焊缝与母材钛熔合较好,在钛表面形成了约 50 $\mu$ m 的熔合区,其上密布着黑色颗粒状质点。母材一侧组织变化不大,均为细小的颗粒状  $\alpha$  等轴晶,TC4 焊缝主要为颗粒状组织,组织较为

细小。有部分母材钛溶入到 TC4 焊缝中,与 TC4 焊缝形成交错组织。在靠近熔合线附近 TC4 焊缝组织比较细小,多为条状或小块状形貌,这是由于在该处温度降低过快,晶粒来不及长大,且母材中部分元素扩散

到了 TC4 焊缝中,增加了焊缝形核质点,细化了晶粒。在远离熔合线一侧的 TC4 焊缝组织逐渐变大,呈长条状。由图 2(b)可知,YC-GX80 焊缝与母材 X80 无过渡区,即焊缝与母材组织基本相同,均为铁素体和珠光体组织。

图 3 为 A 试板 TC4/近钛层 1<sup>#</sup>、近钛层 1<sup>#</sup>/近钢层、近钢层/钢层焊缝结合效果。由图 3(a)可知,TC4 焊缝层与近钛 1<sup>#</sup> 焊缝层结合良好,但其结合面无相互延伸和扩展。TC4 侧焊缝组织为不规则的块状或条状等轴晶组成,近钛 1<sup>#</sup> 侧组织为细小的块状或点状

物,在靠近界面线附近块状组织晶粒变小,且形成了一层细晶过渡区,该细晶区呈带状分布,带宽约 100 $\mu\text{m}$ 。

由图 3(b)可知,近钛 1<sup>#</sup> 合金层组织由靠近 TC4 层的块状或点状变成了靠近近钢层的具有一定尺度的类轧制状组织,之前的白色固溶体变成了层状板块物,板块厚约 10 $\mu\text{m}$ ,长约 50~100 $\mu\text{m}$ 。近钢层奥氏体晶界明显,奥氏体晶粒内部分布有大量的黑色点状物。由图 3(c)可知,近钢层与钢焊缝实现了较好的互溶,焊缝组织均由不规则的多边形小块状铁素体与珠光体组成,在铁素体与珠光体界面上密布着黑色质点。

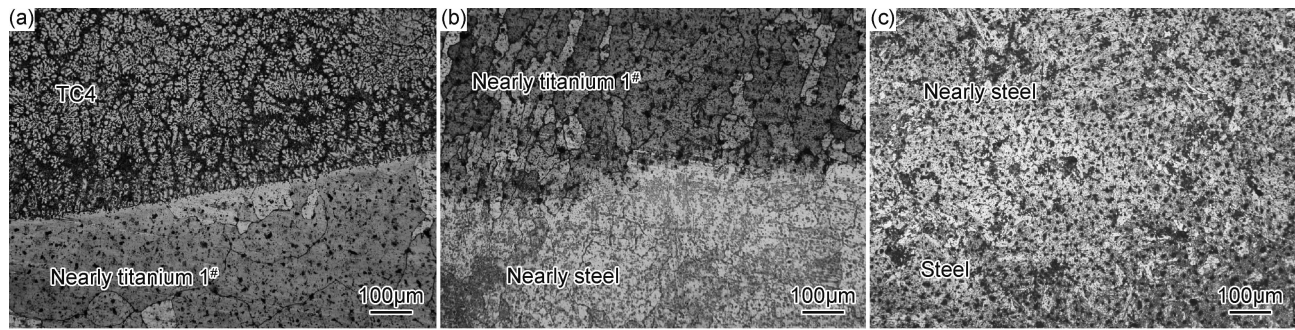


图 3 A 试板各层焊缝结合 OM 像 (a)TC4/近钛层 1<sup>#</sup>;(b)近钛层 1<sup>#</sup>/近钢层;  
(c)近钢层/钢层

Fig. 3 OM images of each weld joints of test plate A (a)TC4/nearly titanium layer 1<sup>#</sup>;(b)nearly titanium layer 1<sup>#</sup>/nearly steel layer;  
(c)nearly steel layer/steel layer

图 4 为 B 试板 TC4/近钛层 2<sup>#</sup>、近钛层 2<sup>#</sup>/近钢层、近钢层/钢层焊缝结合效果。

由图 4(a)可知,TC4 层与近钛 2<sup>#</sup> 界面结合较好,2 层组织均为不规则的等轴晶,这是由于 2 层的热过程相同、成分近似所致。由 TC4 层组织可看出,较靠近母材区的组织变小,其原因是重熔过程使得已凝固的 TC4 粗大等轴组织重新熔化结晶,且在结晶过程中近钛 2<sup>#</sup> 合金层与 TC4 层发生了相互扩散,增加了

TC4 层的形核质点,多质点形核使得其组织变小。

由图 4(b)可知,B 试板近钛 2<sup>#</sup> 与近钢层组织较为相似,近钛层 Ti-Ni-Al 与近钢层 Ni-Cr-Fe 结晶后组织错综交织,且可明显看出近钛 2<sup>#</sup> 组织已由靠近 TC4 层的等轴组织变为细条状的树枝晶,枝晶周围分布着长短、宽窄不一的树枝状晶粒,且晶粒较深入地延伸到了近钢层镍基合金中,并与镍基合金层形成了一个较宽的过渡带。由图 4(c)可知,近钢层镍基合金组织在

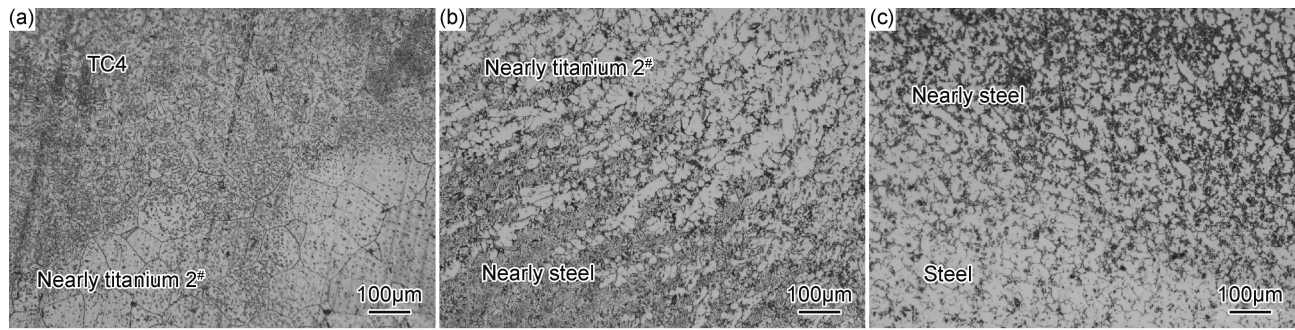


图 4 B 试板各层焊缝结合 OM 像 (a)TC4/近钛层 2<sup>#</sup>;(b)近钛层 2<sup>#</sup>/近钢层;  
(c)近钢层/钢层

Fig. 4 OM images of each weld joints of test plate B (a)TC4/nearly titanium layer 2<sup>#</sup>;(b)nearly titanium layer 2<sup>#</sup>/nearly steel layer;  
(c)nearly steel layer/steel layer

靠近钢层附近变成了明显的粒状铁素体和珠光体组织,并与钢层细小的铁素体和珠光体组织相互渗透交错,冶金结合较好。

由图 3 与图 4 可见,B 试板各层焊缝组织较 A 试板更为细小,其各层间过渡的结合效果也更优。

2.2 接头成分变化分析

由于 B 试板各层焊缝间结合效果优于 A 试板,由

此可知,B 试板各层所用焊接材料组合比 A 试板所用焊材组合更为适合钛-钢复合板的熔焊对接。因此对 B 试板焊缝界面进行了能谱测试分析,图 5 所示为 B 试板对接接头钛层-近钛层-近钢层各个结合面的能谱实验结果。

由图 5(a)可知,TC4 与近钛 2<sup>#</sup> Ti-Ni-Al 焊缝界面成分主要为 Ti, Ni 及 Cr。在靠近 TC4 焊缝层一

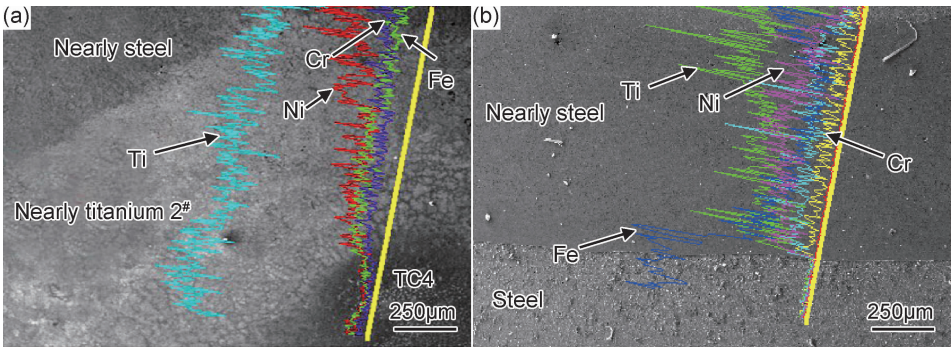


图 5 B 试板对接接头各个结合面 EDS 结果 (a)TC4/近钛层 2<sup>#</sup>/近钢层;(b)近钢层/钢层  
Fig. 5 EDS results of butt joint surface of test plate B (a)TC4/nearly titanium layer 2<sup>#</sup>/nearly steel layer;  
(b)nearly steel layer/steel layer

侧,焊缝主要成分为 Ti,TC4 中的 Al 及 V 等微量合金元素在近钛层焊接过程中被极大稀释,所以在能谱测试中未能测出。近钛层 Ti-Ni-Al 焊缝的主要成分为 Ti 和 Ni,从靠近 TC4 一侧到靠近近钢层一侧 Ti 含量逐渐降低,Ni 含量逐渐升高,且由测试结果还可看出 Fe 贯穿于整个界面,但在靠近钛一侧含量较少。由图 5(b)可知,在靠近近钛层处的近钢层焊缝的主要成分依然为 Ti 和 Ni,随着向钢层的靠近,Ti 含量逐渐降低,Ni 含量逐渐升高,Cr 含量在整个近钢层基本保持稳定。在近钢层与钢层界面处,焊缝成分发生了突变,Ti, Ni 和 Cr 含量急剧降低,Fe 含量明显升高。

综上分析可知,TC4 焊缝层与钢焊缝层化学成分均比较单一,过渡层(近钛层、近钢层)化学成分较为复

杂,这说明在过渡层焊接过程中焊缝合金元素发生了较大的扩散。

2.3 接头力学性能分析

表 1 为 A, B 试板对接接头的力学性能。由表 1 可知,A 试板对接接头抗拉强度与屈服强度较低,拉伸宏观断口出现较多的夹杂与孔洞。结合 A 试板金相实验结果可知,A 试板 TC4 焊缝-近钛层焊缝-近钢层焊缝界面线较为明显,各层焊缝相互熔合渗透较少,且焊缝主要以粗大等轴晶为主,这是导致 A 试板接头强度较低的主要原因。由 B 试板拉伸实验结果可看出,其接头强度及塑性远高于 A 试板,且其冲击韧性及抗弯性也较好,这与 B 试板较为细小且相互渗透交织的组织密切相关,由此也说明 B 试板所用焊接材料组合较为优异。

表 1 两种试板对接接头的力学性能  
Table 1 Mechanical properties of two test plates butt joint

Plate	Tensile strength/MPa	Yield strength/MPa	Elongation/%	Section shrinkage/%	Impact energy(25℃)/J	Bending strength/MPa
A	210.5	126.8	4.3	12	18	950
B	501.1	373.0	9.5	32	34	1200

对 B 试板接头冲击断口进行扫描测试,如图 6 所示。由图 6(a)可知,钛侧断口在靠近钢一侧处主要表现为细条状的裂纹,裂纹由起裂源向 4 周扩散,形成了密集的条状撕裂形貌。在远离钢一侧界面处撕裂的片

状尺寸逐渐变小,甚至出现了冰晶块状物。由此可见,钛侧断裂机制为沿晶断裂和穿晶断裂相结合的复合型断裂机制。由图 6(b)钢侧形貌图可看出,钢侧断面主要由韧窝和滑移构成,由此可推断,钢侧断裂机制主要

为韧窝断裂和滑移断裂相结合的复合型断裂机制。

复合板对接接头焊缝由钛焊缝-近钛焊缝-近钢焊缝-钢焊缝 4 层组成,但由于各层厚度均在微米级别,无法宏观测出层与层之间的结合强度或宏观硬度,故本研究对复合板接头进行了显微硬度测试,实验打点位置为焊缝正中心,且由钢层到钛层依次打点,测试结果

果如图 7 所示。

由图 7 可知,A,B 试板焊缝硬度变化趋势基本相同。A 试板过渡区焊缝硬度与两侧的钢焊缝及钛焊缝硬度无明显变化趋势,仅可看出钢侧焊缝硬度高于钛侧。B 试板接头过渡区焊缝硬度最低,从过渡区向两侧硬度均有所升高,但在短暂升高后趋于平缓。

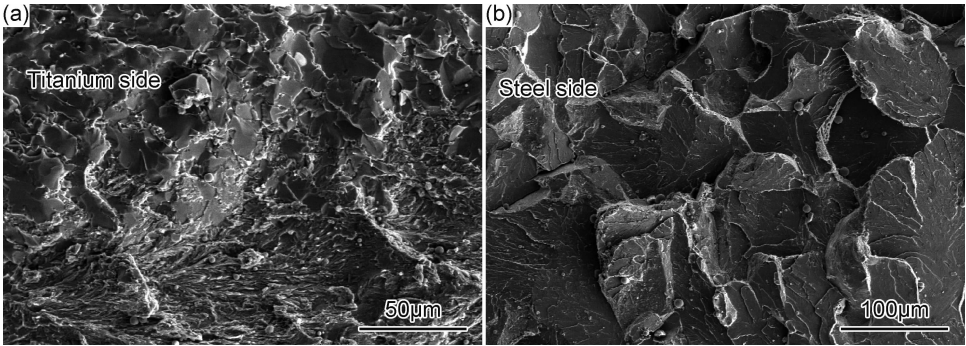


图 6 B 试板对接接头冲击断口形貌 (a)钛侧;(b)钢侧  
Fig. 6 Impact fracture morphologies of test plate B butt joints (a)titanium side;(b)steel side

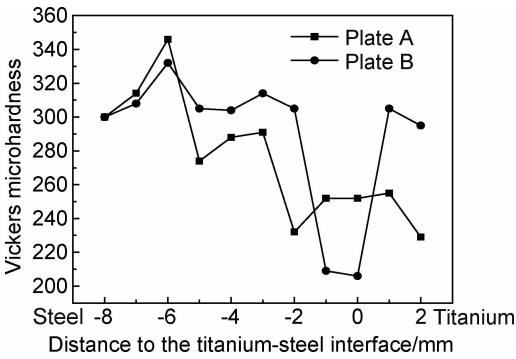


图 7 维氏显微硬度实验结果  
Fig. 7 Results of Vickers microhardness test

3 结论

- (1)复合板开 Y 型坡口,并采用近钛层+近钢层双层过渡的方法可以实现钛-钢爆炸复合板的熔焊对接。
- (2)近钛层采用 Ti-Ni-Al 合金系焊材,近钢层采用 Ni-Cr-Fe 合金系焊材,可以实现钛焊缝与钢焊缝的冶金结合。焊缝组织由钛层粗大的等轴晶逐渐转变为过渡层细小的等轴晶或树枝晶,并与钢层的铁素体和珠光体组织相互交织连接。
- (3)所得焊接接头的抗拉强度及屈服强度分别为 501.1,373.0MPa,达到了复合板接头等强匹配效果,塑性稍有不足,还需通过减小过渡层厚度、调整焊材中细化晶粒元素等改善焊缝塑/韧性。

参考文献

[1] 张斌,钱成文,王玉梅,等. 国内外高钢级管线钢的发展及应用[J]. 石油工程建设,2012,38(1):1-4.  
ZHANG B,QIAN C W,WANG Y M,et al. Development and application of high-grade pipeline steel at home and abroad[J]. Petroleum Engineering Construction,2012,38(1):1-4.

[2] 余伟,王班,贺婕,等. 多层金属复合板的热轧制备方法[J]. 材料工程,2017,45(2):32-38.  
YU W,WANG B,HE J,et al. Hot-rolled process of multilayered composite metal plate[J]. Journal of Materials Engineering, 2017,45(2):32-38.

[3] 柯伟. 中国工业与自然环境腐蚀调查的进展[J]. 腐蚀与防护, 2004,25(1):2-7.  
KE W. Progress in public inquiry concerning corrosion in Chinese industrial and natural environments[J]. Corrosion & Protection, 2004,25(1):2-7.

[4] 宋爱平. 钛钢复合板焊接技术[J]. 钢结构,2012,27(7):55-56.  
SONG A P. Welding technology of titanium steel composite plate [J]. Steel Construction,2012,27(7):55-56.

[5] MANIKANDAN P,HOKAMOTO K,RAGHUKANDAN K, et al. Explosive welding of titanium/stainless steel by controlling energetic condition[J]. Materials Transaction,2006,47(8):2049-2055.

[6] 陈满乾,刘亚芬. TA2/Q235B 钛钢复合板的焊接[J]. 焊接,2007 (8):53-54.  
CHEN M Q,LIU Y F. Welding of TA2/Q235B titanium/steel composite plate[J]. Welding & Joining,2007(8):53-54.

[7] 刘凤尧,林三宝,杨春丽,等. TIG 焊活性剂对焊缝成形的影响 [J]. 焊接学报,2002,23(1):3-5.



- LIU F Y, LIN S B, YANG C L, et al. Effect of activating fluxes on weld form in TIG welding of stainless steel and titanium alloy[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2002, 23(1): 3-5.
- [8] 毕宗岳, 丁宝峰, 张峰, 等. 2205/Q235 大面积双相不锈钢复合板性能分析[J]. 焊管, 2010, 33(3): 25-28.
- BI Z Y, DING B F, ZHANG F, et al. Performance analysis of large area 2205/Q235 duplex stainless steel composition plate[J]. Weld Pipe, 2010, 33(3): 25-28.
- [9] 孙荣禄, 张九海. 钛及钛合金与钢焊接的问题及研究现状[J]. 宇航材料工艺, 1997(2): 7-11.
- SUN R L, ZHANG J H. Welding problems and present situation of titanium or titanium alloy and steel[J]. Aerospace Materials & Technology, 1997(2): 7-11.
- [10] 袁江, 周恺武, 陈胜迁, 等. 钢/铝添加粉末激光焊接头界面组织与性能[J]. 材料工程, 2017, 45(9): 123-128.
- YUAN J, ZHOU D W, CHEN S Q, et al. Interfacial microstructure and properties of steel/aluminum powder additive[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(9): 123-128.
- [11] 汪汀. 钛/钢复合板反应釜筒体的焊接工艺[J]. 材料开发与应用, 2003, 18(2): 15-18.
- WANG D. Weldability and welding procedure of titanium clad steel plate for the manufacture of a reaction vessel[J]. Development and Application of Materials, 2003, 18(2): 15-18.
- [12] ASKARI A, DAS S. Practical numerical analysis of a crack near a weld subjected to primary loading and hydrogen embrittlement[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 173(1): 1-13.
- [13] 杜泽裕. X80 管线钢焊接性分析[J]. 电焊机, 2009, 5(2): 47-51.
- DU Z Y. Weldability of X80 alloy steel pipeline[J]. Electric Welding Machine, 2009, 5(2): 47-51.
- [14] 梁小林, 许希武, 林智育. 复合材料层板低速冲击后疲劳性能实验研究[J]. 材料工程, 2016, 44(12): 100-106.
- LIANG X L, XU X W, LIN Z Y. Fatigue performance of composite laminates after low-velocity impact[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(12): 100-106.
- [15] 于九明, 孝云祯, 王群骄. 金属层状复合技术及其新进展[J]. 材料研究学报, 2000, 14(1): 12-16.
- YU J M, XIAO Y Z, WANG Q J. New development of technology of clad metal[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(1): 12-16.
- [16] 周国顺. 钛管和钛钢复合管板的制造技术浅析[J]. 中国化工装备, 2008, 10(4): 22-23.
- ZHOU G S. The analysis for the manufacturing techniques of titanium tube and titanium clad tube sheet[J]. China Chemical Industry Equipment, 2008, 10(4): 22-23.
- [17] 缪林久. 钛及其合金焊接缺陷的产生及防止[J]. 大众科技, 2006(3): 58-59.
- MIAO L J. The produce and prevent of weld defects of titanium and its alloys[J]. Popular Science & Technology, 2006(3): 58-59.
- [18] SANG Y S, BYOUNGCHUL H, SUNGHAK L, et al. Correlation of microstructure and Charpy impact properties in API X70 and X80 line-pipe steels[J]. Mater Sci Eng, 2007, 458(15): 281-289.
- [19] GHOST M, CHATTERJEE S. Characterization of transition joint of commercially pure titanium to 304 stainless steels[J]. Materials Characterization, 2002, 48(2): 393-399.
- [20] 孔令然. X80 管线钢的研究与应用[J]. 科技情报开发与经济, 2011, 21(1): 120-135.
- KONG L R. The research and application of X80 pipeline steel[J]. Sci-Tech Information Development & Economy, 2011, 21(1): 120-135.
- [21] 礼宾, 王核源, 张舒庆, 等. Ti、B 微量元素对焊缝金属韧性的影响[J]. 机械工程材料, 2003, 27(1): 32-34.
- LI B, WANG H Y, ZHANG S Q, et al. Effect of trace elements Ti, B on toughness of welded metal[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2003, 27(1): 32-34.
- [22] 杜则裕, 张德勤, 田志凌. 低碳低合金钢焊缝金属的显微组织及其影响因素[J]. 钢铁, 1999, 34(5): 67-71.
- DU Z Y, ZHANG D Q, TIAN Z L. Microstructure of weld metal of low-carbon and low-alloy steels and influencing factors[J]. Iron and Steel, 1999, 34(5): 67-71.
- [23] EVANS G M. The effect of carbon on the microstructure and properties of C-Mn all-weld metal deposits[J]. Welding Journal, 1983, 62(11): 313-334.
- [24] JORGE J, SOUZA L, REBELLO J. The effect of chromium on the microstructure toughness relationship of C-Mn weld metal deposits[J]. Materials Characterization, 2001, 47(5): 195-202.
- 基金项目:** 国家高新技术研究发展计划项目(2013AA031303); 西安航空学院校级科研基金项目(2017KY1114)
- 收稿日期:** 2017-05-14; **修订日期:** 2018-05-05
- 通讯作者:** 史倩茹(1989—), 女, 硕士, 主要从事新型焊接材料、新材料焊接工艺、焊接应力应变计算方面研究工作, 联系地址: 陕西省西安市西二环 259 号西安航空学院材料工程学院(710077), E-mail: 331877532@qq.com

(本文责编:王 晶)