研究与开发

轧制压缩比对钛-钢复合板界面组织与性能的影响

柴希阳[1]，严文兵[1,3]，杨洋[2]，常平安[1]，王一飞[1,3]，余航[1]，罗小兵[1]
（1. 钢铁研究总院有限公司工程用钢研究院，北京 100081；2. 鞍钢集团钢铁研究院，
辽宁 鞍山 114009；3. 武汉科技大学材料科学与工程学院，湖北 武汉 430081）

摘要：采用钢/钛/钛/钢对称组坯及真空热轧复合工艺，研究了轧制压缩比对TA1工业纯钛-EH40钢复合板界面组织与性能的影响。通过金相显微镜、场发射扫描电子显微镜及透射电子显微镜等手段，表征了钛-钢界面微观形貌、元素扩散行为，并分析讨论了不同压缩比条件下界面组织对力学性能的影响。结果表明，随着压缩比增加，界面结合强度呈现明显增加趋势。轧制压缩比由3增加到6，界面剪切强度和黏结强度分别提高了84 MPa和67 MPa。在不同压缩比条件下，界面反应层均由β-Ti、TiC和FeTi反应相组成。随着压缩比增加，界面结合程度增加，界面反应层总厚度和脆性层厚度呈现降低趋势。界面缺陷减少及反应层厚度减薄是界面结合性能增加的微观组织因素。

关键词：钛-钢复合板；轧制压缩比；界面孔洞；金属间化合物
中图分类号：TG335 **文献标志码：**A **文章编号：**1006-4613(2026)04-0030-08
DOI：10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 04. 004

Effect of Rolling Reduction Ratio on the Interfacial Microstructure and Properties of Titanium-steel Composite Plates

CHAI Xiyang[1], YAN Wenbing[1,3], YANG Yang[2], CHANG Ping'an[1],
WANG Yifei[2], YU Hang[1], LUO Xiaobing[1]
(1. Research Institute of Structural Steels, Central Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: The symmetrical steel/titanium/titanium/steel billet assembly and vacuum hot rolling bonding process were adopted to investigate the effect of rolling reduction ratio on the interfacial microstructure and properties of TA1 commercially pure titanium-EH40 steel composite plates. The micromorphology and element diffusion behavior at the titanium-steel interface were characterized by means of optical microscopy (OM), field emission scanning electron microscopy (FESEM) and transmission electron microscopy (TEM). Meanwhile, the effect of interfacial microstructure on mechanical properties under different reduction ratios was analyzed. The results showed that the interfacial bonding strength increased significantly with the rise of reduction ratio. When the rolling reduction ratio increased from 3 to 6, the interfacial shear strength and bonding strength increased by 84 MPa and 67 MPa, respectively. The interfacial reaction layers were composed of β-Ti, TiC and

基金项目：企业横向合作项目(HT-GYZY-202511-006513)

柴希阳，博士，高级工程师，2018年毕业于清华大学材料科学与工程专业。E-mail：chaixiyang0728@163.com

FeTi phases under all reduction ratio conditions. With the increase of reduction ratio, the interfacial bonding quality was improved, while the total thickness of the interfacial reaction layer and the thickness of the brittle layer showed a decreasing trend. The reduction of interfacial defects and the thinning of the reaction layer were the microstructural factors responsible for the improvement of interfacial bonding properties.

Key words: titanium-steel composite plate; rolling reduction ratio; interfacial void; intermetallic compound

钛-钢复合板因能充分结合钛优异的耐腐蚀性能与钢良好的力学性能以及其较低的成本优势，广泛应用于石油化工、火电生产、航空航天等领域[1-2]。随着人们认识的逐渐加深，钛-钢复合板的应用向海洋工程领域拓展，应用场景的转换对钛-钢复合板的界面结合质量提出了更高要求，宽板幅、高性能、低成本的复合板的稳定制备工艺成为研究趋势[3-4]。钛-钢复合板可通过爆炸复合法[5-6]、扩散复合法[7]、轧制复合法[8-10]等方法进行复合，其中真空热轧复合法因具有生产效率高、环境友好、结合强度高以及适于大规模宽幅薄规格复合板生产等优点，受到国内外研究者的广泛关注[11-13]。然而，钛与钢在热轧后的界面处易生成孔洞、Fe-Ti系金属间化合物（如FeTi、Fe_2Ti）及TiC脆性相，给高质量复合板的制备带来挑战[14-16]。因此，如何通过优化轧制工艺参数调控界面愈合与组织结构，进而提升界面结合性能，已成为该领域亟待解决的关键科学问题。

轧制压下量是影响钛-钢复合板界面结合质量的核心工艺参数之一[17]。研究表明，压下量可通过影响界面塑性变形程度、元素扩散行为以及脆性化合物的形态与分布决定界面结合强度[18-19]。近年来，学者们针对压下量对钛-钢复合板性能的影响开展了大量研究。余超[20]系统研究了热轧工艺参数对TA2/Q235复合板的影响，研究指出，随着压下率增加，复合板的剪切强度呈上升趋势；王明坤等人[21]探讨了不同组坯方式下压下率对界面化合物演化的影响，揭示了压下率促进元素扩散和化合物均匀化的作用机制。刘锦华等人[22]采用波-平轧制工艺研究了压下率对TC4-钢复合板界面组织的影响，发现压下率的提高可以使界面产生更强烈的塑性变形进而提高钛-钢复合板的界面结合质量。尽管已有研究普遍认为增大压下量有利于改善钛-钢复合板的界面结合性能，但对于具体不同材料组合条件下，压下量对界面微观组织演化、化合物破碎机制以及元素扩散行为影响的系统研究仍不够广泛深入。基于此，本文以TA1纯钛板和EH40钢板为研究对象，采用真空热轧复合法制备钛-钢复合板，系统研究不同轧制压缩比对复合板界面微观组织、元素分布、相组成及界面结合性能的影响，探讨压缩比影响界面结合质量的内在机理，为钛-钢复合板轧制工艺的优化提供理论依据和实验支撑。

1 试验材料与方法

1.1 复合板坯的制备

试验采用EH40船体钢作为基材，尺寸为240 mm×140 mm×30 mm；TA1工业纯钛作为复材，尺寸为200 mm×100 mm×10 mm。试验材料的化学成分（质量分数）如表1所示。

表1 试验材料的化学成分（质量分数）

Table 1 Chemical Composition of Experimental Materials (Mass Fraction) %

试验材料	C	N	H	O	Si	Mn	Nb	N	Fe	Ti
EH40	0.097 0	0	0	0	0.24	1.42	0.023	0.001 1	其余	0.016
TA1	0.007 1	0.011	0.001 2	0.13	0	0	0	0	0.012	其余

设计对称结构来组装复合板坯，钢/钛/钛/钢对称复合板坯示意图见图1。组坯主要流程为：①在EH40钢板表面铣出201 mm×101 mm×9.5 mm凹槽；②将TA1钛板加工为200 mm×

100 mm×10 mm；③将隔离剂涂敷于钛板表面，并将两块钛板四周封焊；④对钛板及钢板的待复合面用丙酮和酒精进行表面清洗并立即用气枪吹干，之后将钛板置于钢板的凹槽中，并将钢板四周封焊；⑤将堆叠好的复合板坯放入真空电子束焊机，抽完真空后，用机械手将堵头放入抽气孔，再采用真空电子束封焊堵头与钢板之间的缝隙。

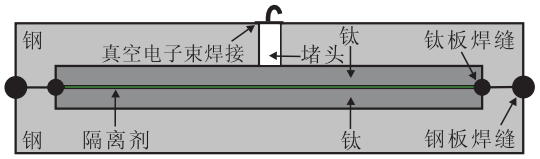


图1 钢/钛/钛/钢对称复合板坯示意图

Fig. 1 Diagram of Steel/Titanium/Titanium/Steel Symmetric Composite Plate

1.2 轧制复合工艺

对复合板坯进行热轧复合，轧制加热温度为900 ℃，保温2 h，轧制压缩比分别为3、4和6。复合板坯出炉后立即轧制，中间不待温，实施抢温轧制，轧后空冷，复合板的轧制工艺参数如表2所示。

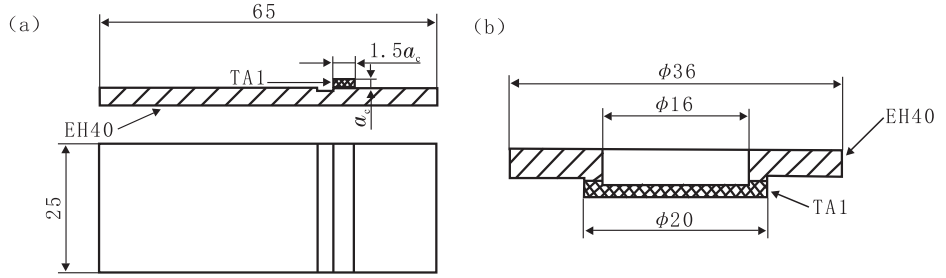
1.3 测试方法

按照GB/T 6396—2008对轧后钛-钢复合界面的剪切强度和黏结强度进行检验。试样测试示意图见图2。对钛-钢复合板的界面组织反应相进行了表征，截取复合板的横截面进行磨抛制样后，采用4%硝酸酒精侵蚀钢侧组织，利用Olympus GX51光学显微镜观察金相组织。随后使用日立IM400Ⅱ离子研磨仪对界面进行氩离子研磨，通过日本电子JSM 7200F扫描电子显微镜表征反应层形貌并进行能谱元素分析。利用FEI Helios Nanolab 600i聚焦离子束制取界面TEM薄膜样品，使用FEI Talos F200X高分辨透射电镜对界面反应相进行高分辨成像、选区电子衍射及能谱分析。

表2 复合板的轧制工艺参数

Table 2 Rolling Process Parameters of Composite Plate

压缩比	板坯厚度/mm	轧制道次/次	轧制工艺规程
3	60	6	60—55—50—42—34—27—20
4	60	7	60—55—50—42—34—27—20—15
6	60	9	60—55—50—42—34—27—20—15—12—10



(a) 剪切试验试样；(b) 黏结试验试样

图2 试样测试示意图(mm)

Fig. 2 Schematic Diagram of Sample Testing(mm)

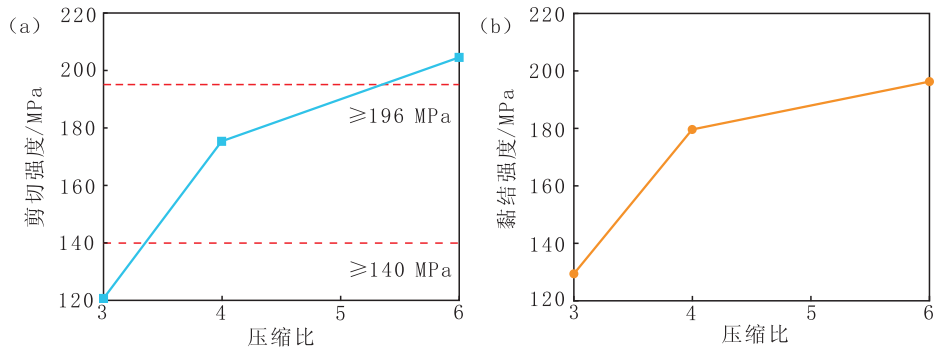
2 试验结果与分析

2.1 压缩比对界面结合性能的影响

不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的力学性能见图3。由图3可知，随着压缩比的增大，复合板界面的剪切强度和黏结强度均呈上升趋势。当压缩比为3时，剪切强度和黏结强度分别为121 MPa和131 MPa。当压缩比为6时，剪切强度和黏结强度分别为205 MPa和198 MPa，相较于压缩比为3时复合板的力学性能分别提高了84 MPa和67 MPa。压缩比为4时，复合板满足GB/T 8547—2019《钛/钢复合板》中剪切强度≥140 MPa的1类规定；而压缩比为6时，满足剪切强度≥196 MPa的0类规定。

2.2 压缩比对界面组织的影响

不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的金相组织如图4所示。由图4可知，三种压缩比下

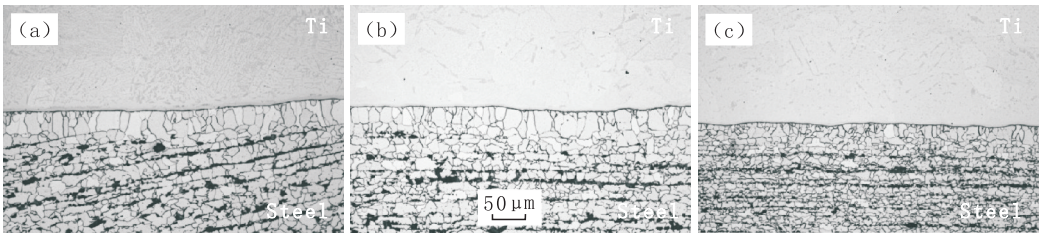


(a) 剪切强度；(b) 黏结强度

图3 不同压缩比条件下试样界面的力学性能

Fig. 3 Mechanical Property of Titanium-steel Composite Interface under Different Reduction Ratios

钛-钢界面均呈平直状连续分布。钢侧的基体组织均为铁素体和珠光体。在靠近复合界面的钢侧区域发生明显的脱碳现象，脱碳层组织主要为铁素体。随着压缩比的增大，脱碳层的铁素体晶粒发生明显细化，组织晶粒细化后，复合界面连接的晶界长度随之增加，可与复层TA1工业纯钛结合更充分，有利于提高复合板界面的结合性能[23]。

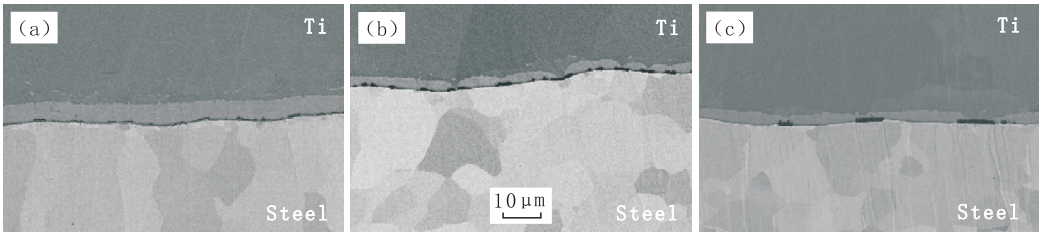


(a) 压缩比3；(b) 压缩比4；(c) 压缩比6

图4 不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的金相组织

Fig. 4 Microstructure of Titanium-steel Composite Interface under Different Reduction Ratios

通过扫描电镜观察了不同压缩比条件下钛-钢复合板界面反应相的背散射电子形貌，不同压缩比条件下钛-钢复合板界的低倍形貌见图5，不同压缩比条件下钛-钢复合板界的高倍形貌见图6，不同压缩比条件下钛-钢复合板界的脆性层形貌见图7。

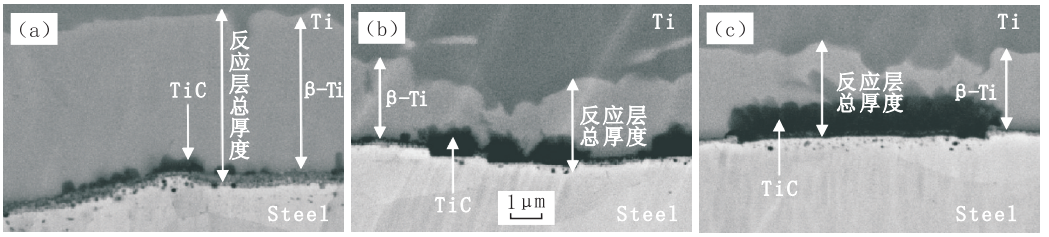


(a) 压缩比3；(b) 压缩比4；(c) 压缩比6

图5 不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的低倍形貌

Fig. 5 Low-magnification Morphologies of Titanium-steel Composite Interface under Different Reduction Ratios

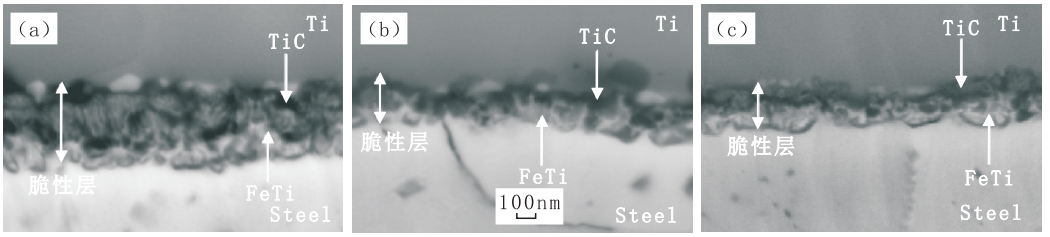
由图5可知，不同压缩比条件下界面反应相呈现层状分布，结合其组织形貌特征及界面反应规律[24]，可推断界面反应相由β-Ti、TiC和FeTi组成。



(a) 压缩比3; (b) 压缩比4; (c) 压缩比6

图6 不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的高倍形貌

Fig. 6 High-magnification Morphologies of Titanium-steel Composite Interface under Different Reduction Ratios



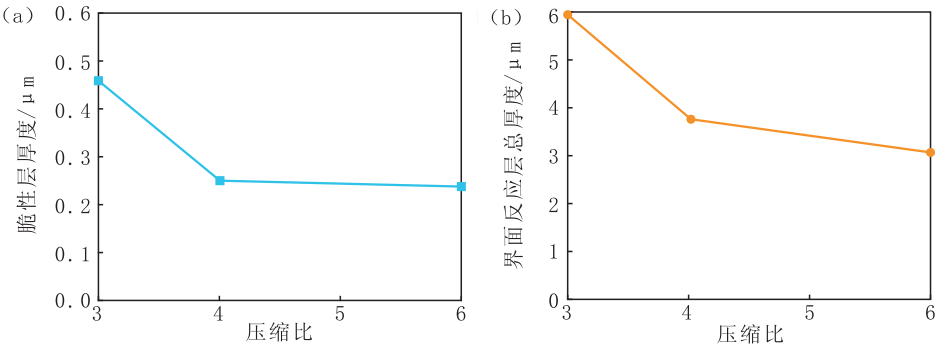
(a) 压缩比3; (b) 压缩比4; (c) 压缩比6

图7 不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的脆性层形貌

Fig. 7 Brittle Layers Morphology of Titanium-steel Composite Interfaces under Different Reduction Ratios

由图6和图7可知,随着压缩比的增加,界面反应层总厚度和脆性反应层(TiC+FeTi)厚度呈现下降趋势。压缩比为3条件下,TiC反应相分布相对均匀;压缩比增加至4和6时,出现明显的TiC团簇,TiC反应相不均匀分布程度得到明显增加,TiC反应相的不均匀分布有利于提高界面结合强度[25]。

对不同压缩比条件下钛-钢复合板界面脆性层的厚度和反应层的总厚度进行了统计,不同压缩比条件下钛-钢复合板界面的层厚尺寸见图8。



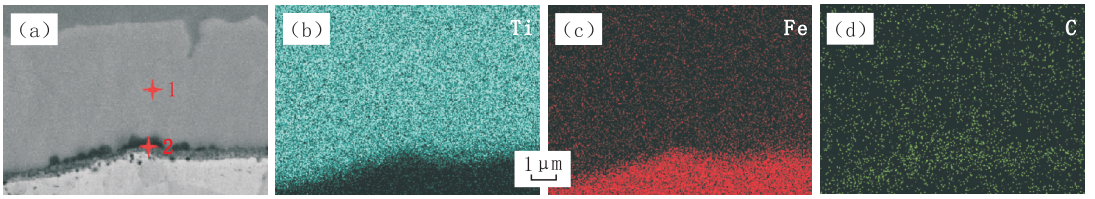
(a) 脆性层厚度; (b) 反应层总厚度

图8 不同压缩比条件下的钛-钢复合板界面的层厚尺寸

Fig. 8 Layer Thickness Dimensions of Titanium-steel Composite Interface under Different Reduction Ratios

由图8可知,当压缩比为3时,钛-钢界面脆性层厚度与界面反应层总厚度分别约为0.46 μm和5.97 μm;当压缩比增加至4时,二者分别约为0.25 μm和3.74 μm;当压缩比增加至6时,二者分别约为0.24 μm和3.08 μm。随着压缩比的增加,界面脆性层的厚度和反应层总厚度呈现明显的降低趋势,而界面反应层总厚度和脆性层厚度的减小有利于提升界面结合强度[26]。

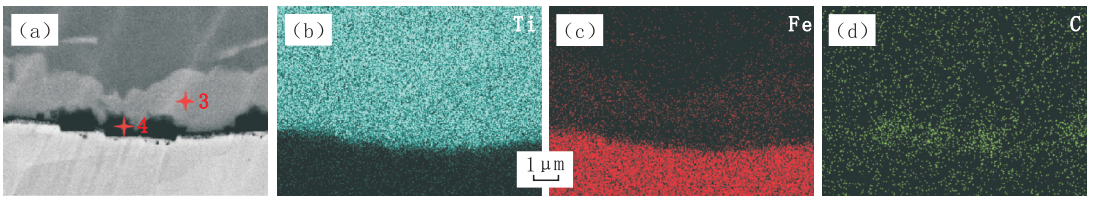
为了进一步研究不同压缩比条件下钛-钢复合界面反应扩散现象，对典型位置进行了能谱面扫描和点扫描，不同压缩比条件下钛-钢复合界面的面扫描分别见图9、图10和图11。同时对图9~图11中点1~点6位置进行点扫面，各位置的化学成分（原子百分比）见表3。由图9~图11及表3可知，钛-钢复合界面处附近区域主要存在两种现象：钢侧Fe原子向钛侧扩散和钢侧C原子在界面处聚集。三种压缩比的钛侧灰色相点扫结果如点1、点3和点5所示，钛侧灰色相富集Fe，从成分上接近β-Ti相；点2、4、6为复合界面处的黑色相中，Ti与C原子比接近1:1，从成分上接近TiC相。



(a) 钛-钢复合界面SEM图；(b) Ti元素分布；(c) Fe元素分布；(d) C元素分布

图9 压缩比为3钛-钢复合界面的面扫描

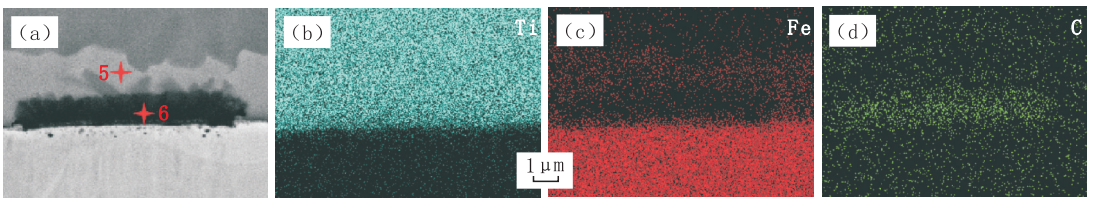
Fig. 9 EDS Mapping of Titanium-steel Composite Interface with a Reduction Ratio of 3



(a) 钛-钢复合界面SEM图；(b) Ti元素分布；(c) Fe元素分布；(d) C元素分布

图10 压缩比为4钛-钢复合界面的面扫描

Fig. 10 EDS Mapping of Titanium-steel Composite Interface with a Reduction Ratio of 4



(a) 钛-钢复合界面SEM图；(b) Ti元素分布；(c) Fe元素分布；(d) C元素分布

图11 压缩比为6钛-钢复合界面的面扫描

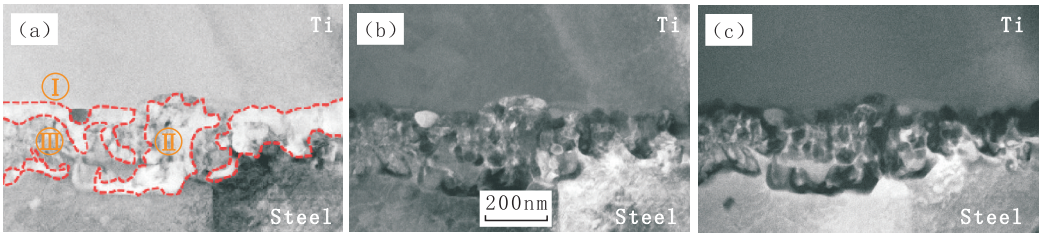
Fig. 11 EDS Mapping of Titanium-steel Composite Interface with a Reduction Ratio of 6

表3 各位置的化学成分（原子百分比）

Table 3 Chemical Composition of Each Position (Atomic Percentage) %

位置	Ti	Fe	C
点1	84.2	7.6	8.2
点2	70.0	8.4	21.6
点3	81.2	9.5	9.3
点4	62.2	3.6	34.2
点5	80.5	8.7	10.8
点6	53.9	2.5	43.6

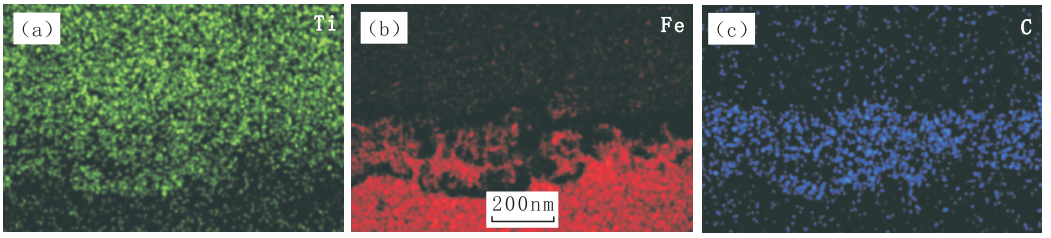
为对界面反应相进行相鉴定，选取了压缩比为6条件下钛-钢复合板界面进行了高分辨透射电镜表征，典型位置的场像形貌见图12，同时对钛-钢复合界面进行了面扫描，钛-钢复合界面的面扫描见图13，针对图12中位置Ⅰ、位置Ⅱ及位置Ⅲ进行衍射分析，钛-钢复合界面不同位置的快速傅里叶变换衍射斑点标定见图14。由图12~图14可知，钛-钢复合板经过热轧复合后，界面发生了明显的C元素聚集行为，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ三个位置形成的反应相经衍射斑点标定为β-Ti、TiC和FeTi，这证实了前述基于扫描背散射形貌和能谱



(a) 明场像;(b) 暗场像;(c) 高角环形暗场像

图12 典型位置的场像形貌

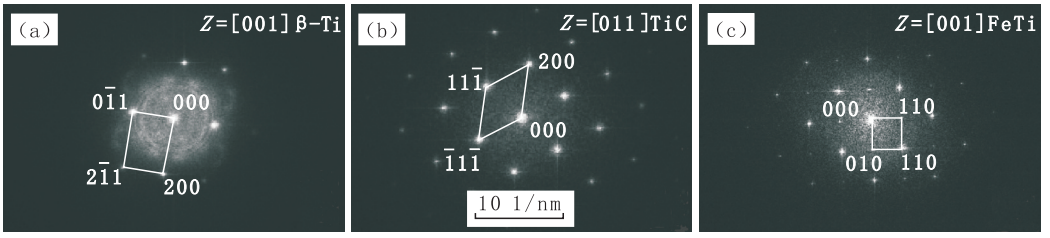
Fig. 12 Field Image Morphology of Typical Position



(a) Ti元素分布;(b) Fe元素分布;(c) C元素分布

图13 钛-钢复合界面的面扫描

Fig. 13 EDS Mapping of Titanium-steel Composite Interface



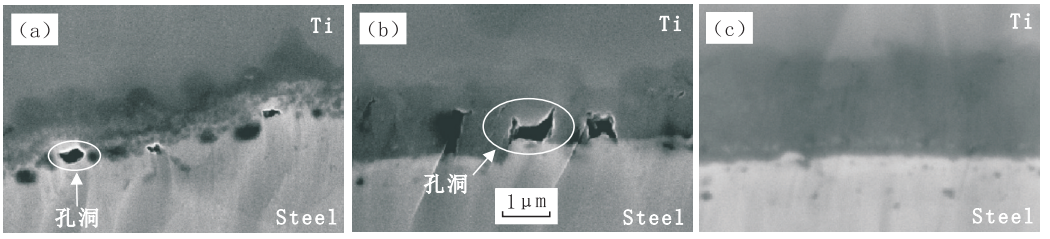
(a) 位置Ⅰ;(b) 位置Ⅱ;(c) 位置Ⅲ

图14 钛-钢复合界面不同位置的快速傅里叶变换衍射斑点标定

Fig. 14 Calibration of FFT Diffraction Spots in Different Regions of Titanium-steel Composite Interface

分析的反应相推断结果。

压缩比除了影响界面反应层外,对界面愈合程度也产生一定影响。通过扫描电镜(二次电子信号)的30 000×高倍形貌,观察了钛-钢复合板界面愈合情况,结果见图15。由图15可知,压缩比为3和4时,钛-钢复合界面存在极少量未愈合区域,微孔尺寸约为0.29~0.45 μm;当压缩比达到6时,钛-钢复合界面完全愈合,未发现孔洞缺陷。界面孔洞易成为裂纹启裂位置,降低了复合界面的结合性能,应避免界面孔洞的产生。



(a) 压缩比3;(b) 压缩比4;(c) 压缩比6

图15 不同压缩比条件下钛-钢复合界面的二次电子形貌

Fig. 15 Secondary Electron Morphology of Titanium-steel Composite Interface under Different Reduction Ratios

综上所述，在轧制压缩比为3、4、6的条件下，TA1工业纯钛-EH40钢复合板界面反应层均由β-Ti、TiC和FeTi反应相组成。随着轧制压缩比的增加，界面反应层总厚度和脆性层总厚度呈现下降趋势；在压缩比为6的条件下，TA1工业纯钛-EH40钢界面发生完全愈合。界面反应层厚度的降低和界面愈合程度提高是界面结合性能提高的微观组织原因。

3 结论

（1）轧制压缩比的增加有利于提高钛-钢复合板界面结合性能。压缩比由3增加至6时，界面剪切强度和粘结强度分别提高了84 MPa和67 MPa。压缩比达到6时，剪切强度和粘结强度分别达到205 MPa和198 MPa，满足国标0类复合板要求。

（2）不同压缩比条件下，钛-钢复合板的界面反应相均为β-Ti、TiC和FeTi。随着压缩比由3增加至6，界面愈合程度增加，界面反应层总厚度由5.97 μm减小至3.08 μm，TiC+FeTi脆性层厚度由0.46 μm减小至0.24 μm。

（3）轧制压缩比由3增加到6，促进了钛-钢复合板界面结合，减小了界面反应层的总厚度和脆性层厚度，这两方面因素使得界面结合性能随着压缩比的增加而提高。

参考文献

[1] 白于良，刘雪峰，王文静，等. 钛/钢复合板及其制备应用研究现状与发展趋势[J]. 工程科学学报，2021，43(1)：85-96.
[2] 柴希阳. 船舶与海洋工程用钛/钢复合板轧制工艺与组织性能研究[D]. 北京：清华大学，2018.
[3] 胡杰，谢荣，杜训柏. 钛钢复合板加工技术及其在船海工程中的应用[J]. 江苏船舶，2016，33(6)：6-8，12.
[4] Wei Z，Huang P，Gao Q，et al. Influence of continuous annealing on the interfacial compound evolution and mechanical behavior of hot-rolled titanium/steel composite plates[J]. Materials & Design，2025，253：113818.
[5] Chen H L，Zhang C J，Liang X J，et al. Enhanced interfacial characteristics and mechanical properties of Ti/steel clad plates fabricated by explosion welding and hot rolling[J]. Journal of Materials Processing Tech，2025，341：118920.
[6] CHU Q L，Zhang M，Li J H，et al. Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding[J]. Materials Science & Engineering A，2017，689：323-331.
[7] 陈轩. 真空扩散连接—轧制高强钛钢复合板组织调控及其力学性能研究[D]. 云南：昆明理工大学，2024.
[8] 王育田，施斌卿，孟传峰. 轧制工艺对工业化试制的真空组坯Q345R/304复合板组织性能的影响[J]. 轧钢，2016，33(6)：24-29.
[9] 陈润泽. 真空对称轧制304+Q235B复合板生产实践[J]. 轧钢，2018，35(3)：19-22，32.
[10] 张磊，聂强胜，许秋，等. 钢/铝/镁/铝/钢复合板组织与性能研究[J]. 轧钢，2025，42(3)：19-24，43.
[11] 骆宗安，杨德翰，谢广明，等. 真空制坯热轧钛/钢复合板工艺及性能[J]. 钢铁研究学报，2019，31(2)：213-220.
[12] 郭松涛，吕林，聂远超，等. 真空电子束焊接钛钢复合板组织及性能研究[J]. 冶金与材料，2023，43(5)：1-3.
[13] Xiao H，Liu W，Dai Q，et al. Improving mechanical properties of dissimilar TA3/L907A steel clad plates with multiple interlayers via hot-compression bonding[J]. Journal of Materials Research and Technology，2025，36：111-122.
[14] 柴希阳，师仲然，柴锋，等. 加热温度对轧制钛/钢复合板组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2019，48(8)：2701-2710.
[15] 吴静怡，孙新军，李建，等. 热处理对Nb中间层热轧Q235-TA2复合板界面的影响[J]. 钢铁研究学报，2018，30(3)：177-184.
[16] 贺文健，雷小玲，丁文红. 基于Ga组织调控对钛/钢复合板界面结构及结合强度的影响[J]. 轧钢，2024，41(4)：36-43.
[17] 王明坤. 真空制坯全轧制TC4钛合金/X65管线钢复合板工艺及组织性能研究[D]. 沈阳：东北大学，2018.
[18] 余伟，张蕾，陈银莉. 累积压下量对TA1/Q345复合板性能的影响[J]. 机械工程材料，2012，36(9)：78-81，88.
[19] 梁经韬，边丽萍，韩绍杰，等. 压下量对钛/钢双层直接热轧复合板结合强度的影响[J]. 热加工工艺，2025，54(5)：101-104.
[20] 余超. 热轧制备钛/钢复合板显微组织和界面性能研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2019.
[21] 王明坤，骆宗安，周宏宇，等. 组坯方式及轧制工艺对钛/钢复合板组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报，2024，34(12)：4004-4015.
[22] 刘锦华，刘鹏，栾欠欠，等. 波纹界面钛/钢复合板热轧制备与界面组织性能研究[J]. 精密成形工程，2025，17(7)：31-40.
[23] 杨德翰. 真空热轧钛/钢复合板的界面产物演变机理及工艺控制[D]. 沈阳：东北大学，2019.
[24] 赵志坡. 冷喷涂-轧制制备钛/钢复合板及其性能研究[D]. 合肥：中国科学技术大学，2020.
[25] Peng L，Sun Y H，Zhang F E，et al. A Study of Interface Microstructure and Mechanical Properties of Industrial-Scale Hot-Rolled Titanium/Steel Clad Plates [J]. Journal of Alloys and Compounds，2025，1036：181637.
[26] Yang X Y，Guo K，Gao Y Y，et al. Effect of carbon content on interfacial microstructure and mechanical properties of a vacuum hot-compressed bonding titanium-steel composite[J]. Materials Science and Engineering：A，2021，824：141802.

（编辑 白璐）
修回日期：2026-06-15