文章编号：1003-1480（2026）01-0095-05

钛铝爆炸复合板热处理界面形貌及力学性能研究

李文硕[1]，李卫士[2]，张庆辉[3]，胡晓艳[1]，刘迎彬[1]

（1.中北大学 环境与安全工程学院，山西 太原，030051；2.陆军装备部驻北京地区军事代表局某军事代表室，山西 太原，030009；3.吕梁市矿山灾害综合防护中心，山西 吕梁，033000）

摘 要：本研究采用爆炸焊接和热处理工艺制备了 TA1/1060/TA1/1060/TA1 5 层钛铝叠层复合板，运用 SEM（扫描电镜）、EDS（能量色散谱仪）等测试技术分析了界面形貌与元素分布，并开展了力学性能实验。研究表明：爆炸焊接形成波形结构界面，热处理后生成大量金属间化合物 $TiAl_3$，界面结构得到优化；未热处理时钛铝复合板抗拉强度达到 340 MPa，较理论值高出 71.7%，热处理后抗拉强度虽降至 114 MPa，但延展性显著提升；热处理后抗压强度从 601.5 MPa 提高至 688.5 MPa，提升 14.5%。研究证实热处理可优化钛铝复合板界面结合状态，通过 $TiAl_3$ 相的形成改善了材料的压缩性能与塑性变形能力。

关键词：爆炸焊接；热处理；钛铝复合材料；界面形貌；力学性能

中图分类号：TJ45+9 **文献标识码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.015

Study on the Interfacial Morphology and Mechanical Properties of Titanium-Aluminum Explosively Welded Composite Plates after Heat Treatment

LI Wen-shuo[1], LI Wei-shi[2], ZHANG Qing-hui[3], HU Xiao-yan[1], LIU Ying-bin[1]

（1.School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051; 2.A Military Representative Office of the Military Representative Bureau in Beijing of the Army Equipment Department, Taiyuan, 030009; 3. Lüliang Comprehensive Mine Disaster Protection Center, Lüliang, 033000）

Abstract： This study fabricated a five-layer TA1/1060/TA1/1060/TA1 titanium/aluminum laminated composite via explosive welding and heat treatment processes. The interfacial morphology and elemental distribution were characterized using scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), and mechanical property tests were conducted. Results indicate that the explosive welding creates a wavy interfacial structure, a large number of intermetallic compounds $TiAl_3$ are generated after heat treatment, optimizing the interface configuration; The as-welded composite plate has a tensile strength of 340 MPa, 71.7% higher than the theoretical value, while heat treatment decreases the tensile strength to 114 MPa, it significantly enhances the ductility; The compressive strength is also increased by14.5%, from 601.5 MPa to 688.5 MPa . The study shows that heat treatment effectively optimizes interfacial bonding in Ti/Al composite plates, through $TiAl_3$ phase formation, simultaneously improving both compressive performance and plastic deformation capacity.

Key words：Explosive welding；Heat treatment；Titanium - aluminum composite materials； Interfacial morphology；Mechanical properties

钛及其合金不仅具备极高的比强度，而且能够显著降低结构重量，成为航空航天、装甲坦克车辆等领域的关键材料[1-2]。而铝及铝合金材料则因其轻量化、低密度、高强度、耐腐蚀性以及易于成型的综合优势，

收稿日期：2025-02-08

作者简介：李文硕（2000-），男，在读硕士研究生，从事爆炸技术研究。

通讯作者：刘迎彬（1985-），男，副教授，主要从事爆炸加工及防护技术研究。

基金项目：国家自然科学基金资助项目(12002319)。

引用本文：李文硕，李卫士，张庆辉，等.钛铝爆炸复合板热处理界面形貌及力学性能研究[J]. 火工品, 2026(1): 95-99.

在汽车、船舶、空天等众多领域中得到广泛应用[3]。

金属层状复合材料作为一种新兴材料，能够通过复合制备工艺将两种及以上异质材料融合，实现牢固的冶金结合，互补短板，显著提升综合性能，拓宽了材料的应用范畴[4]。然而，钛与铝及其合金在物理、化学及力学性能上存在显著差异，这使得钛铝多层轻质金属复合材料的制备面临巨大挑战。

爆炸焊接技术因其材料适应性、高强度冶金结合、大面积焊接效率及独特复合结构的优势，在制备钛铝层状复合材料方面具有广阔前景[5-8]。Lazuremko 等[9]使用单枪爆炸焊接技术制备了 40 层 Ti/Al 复合材料，并发现其热处理时间比反应烧结法缩短了 4 倍。Fronczek 等[10]研究了不同退火时间对爆炸焊接 Ti/Al 复合材料焊接界面微观组织的影响，发现退火促进了 $TiAl_3$ 金属间相的生长。刘鲜鲜等[11]研究了爆炸焊接法对 5 层复合板抗拉性能的影响，证明了其有效性。郭传祥等[12]模拟了爆炸焊接过程，分析了钢纤维增强型 Ti/Al 爆炸焊接参数对结合界面微观形貌的影响。

目前，关于钛铝爆炸复合板热处理后界面和力学性能变化的研究不多。本文通过“爆炸焊接+热处理”工艺制备了钛铝叠层复合板，并全面分析其界面微观结构和元素分布。研究还深入探讨了热处理后复合板的拉伸失效机制，并对比了热处理前后复合板的拉伸、压缩性能，旨在为钛铝复合材料的应用提供更完整的理论支持。

1 实验

1.1 材料选取

本研究爆炸焊接实验选用的材料为 TA1 钛板和 1060 Al 板，尺寸为 300 mm × 200 mm × 0.5 mm，用于制备 TA1/ 1060/ TA1/1060/TA1 结构的复合板。钛合金和铝合金的化学成分及所用 2#岩石硝铵炸药的成分配比分别见表 1~3。

1.2 复合板制备

1.2.1 爆炸焊接

实验采用平行布置方式进行爆炸焊接，其原理图与实验装置如图 1 所示。2#岩石硝铵炸药的密度为 0.59 g · cm^{-3}，爆速在 2 240~2 380 m · s^{-1} 之间，装药高度设定为 24 mm，板与板间距为 1.25 mm。

表 1 TA1 钛合金的化学成分 （wt%）

Tab.1 Chemical composition of TA1 titanium alloy

钛合金	Fe	O	C
TA1	≤0.25	≤0.18	≤0.08
钛合金	N	H	Ti
TA1	≤0.03	≤0.015	余量

表 2 1060Al 铝合金的化学成分 （wt%）

Tab.2 Chemical composition of 1060Al titanium alloy

铝合金	Fe	Si	Zn	Cu
1060	0.35	0.25	0.1	0.06
铝合金	Ti	Mg	Mn	Al
1060	0.03	0.03	0.03	余量

表 3 2#岩石硝铵炸药成分配比 (%)

Tab.3 Composition ratio of 2# rock ammonium nitrate explosive

炸药	NH_4NO_3	$C_7H_7NO_2$	木粉
2#岩石硝铵炸药	85	11	4

（a） 原理图 （b） 实验装置图

图 1 爆炸焊接原理及实验装置

Fig.1 Explosive welding principle and experimental device

1.2.2 热处理

将爆炸焊接制备的板材经线切割机制备成 60 mm ×50 mm 的样板，随后将其置于 SG-GL1200 高温管式炉中实施热处理。采用阶梯式退火工艺以有效细化材料内部晶粒结构，管式炉的升温、保温及降温程序如图 2 所示。

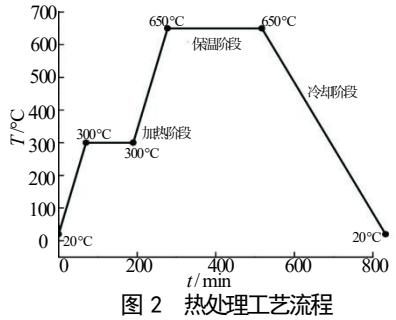
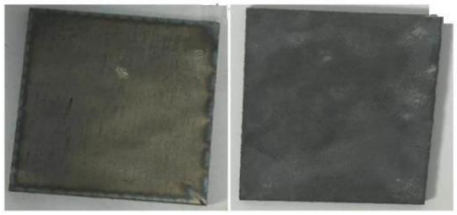


图 2 热处理工艺流程

Fig.2 Heat treatment process flow

具体工艺流程为：初始温度 20 ℃，以 4 ℃ ·min^{-1} 升温速率升温至 300 ℃，保温 2 h，以初步消除炸药爆炸产生的残余应力对叠层复合材料内部的影响；继续以 4 ℃ · min^{-1} 的速率升温到 650 ℃，保温 4 h，再以 2 ℃ · min^{-1} 的速率冷却至 20 ℃。热处理前后的样板分别如图 3（a）、（b）所示。由图 3 可见，经热处理后钛铝爆炸复合板表层原有的微小裂纹、气孔等

缺陷以及潜在的变形现象显著减少，板面平整度提高，表面光泽度提升，呈现出灰色调。



(a) 热处理前　　(b) 热处理后

图 3　热处理前后钛铝复合板宏观对比

Fig. 3　Macroscopic comparison of titanium-aluminum composite plate before and after heat treatment

1.3　微观结构表征和力学性能测试

热处理完成后，切割制备尺寸为 5 mm×10 mm 的微观组织样品。经打磨抛光以及用 4%的硝酸酒精溶液清洗后，用扫描电镜 SU5000 进行高倍观测，分析结合界面特征，并运用能量色散谱仪（EDS）对复合板结合界面进行检测，探究界面元素分布及金属间化合物情况。同时，使用电子万能试验机对复合板进行静态拉伸和压缩实验，每组实验设置 3 个平行样本，取均值以分析对比热处理前后复合板的力学性能变化，并深入研究经热处理后复合板的拉伸失效机制。

2　结果与分析

2.1　微观结构分析

2.1.1 界面形貌

热处理前的 Ti/Al 复合材料界面的扫描电镜如图 4 所示。

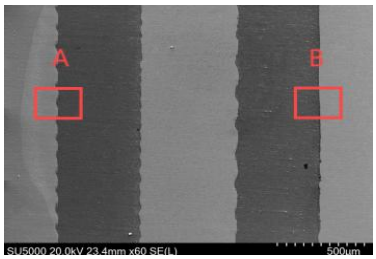


图 4　热处理前 Ti/Al 复合材料界面 SEM 图

Fig.4　SEM of the Ti/Al composite interface before heat treatment

在爆炸焊接工艺中，波纹状结合界面的波幅减小与波形连续性增强是焊接质量提升的标志。图 4 中近炸药高能结合面（结合面 A）位置与炸药距离最小，在焊接过程中首先且直接承受炸药爆轰波作用，因此具备更高的能量与速度效应，产生了最佳的焊接效果及最为连续的波纹形态。随着板材内部能量传递的逐渐衰减，后续炸药低能结合面的波纹形态逐渐增大，直至趋近于直线状结合（结合面 B）。

热处理后结合界面情况如图 5 所示。

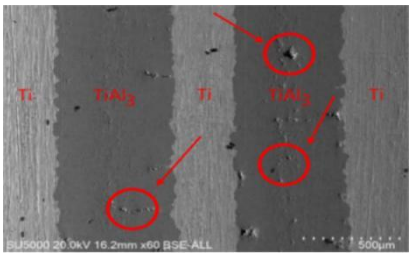


图 5　热处理后的 Ti/Al 复合材料界面 SEM 图

Fig.5　SEM of Ti/Al composite interface after heat treatment

由图 5 可见，Ti 层厚度变小，Al 层被 $TiAl_3$ 层取代，$TiAl_3$ 层产生较多空洞。在 550~650 ℃范围内，Al 在 Ti 中的溶解度超 10%，而 Ti 在 Al 中溶解度接近零，Ti 在 Al 中扩散受限，而 Al 在 Ti 中的扩散相对容易[13]。因扩散率差异，富 Al 区出现净空位迁移，空位易在晶界及缺陷处聚集，造成 $TiAl_3$ 层空洞形成。而当温度达到 650 ℃时，Al 层局部熔化导致的体积变化，会造成 $TiAl_3$ 层空洞增多。另外，结合界面处的波纹形态发生显著变化，特别是 B 界面，波长缩减而振幅有所增加，转变为易于辨识的小波纹状结构，说明热处理会优化界面的结合状况。

2.1.2 元素分布

Ti 与 Al 能发生固相反应，形成 Ti_3Al、$TiAl_3$、Ti_2Al_5、TiAl 及 $TiAl_2$ 等金属间化合物。从热力学角度看，Ti_2Al_5 与 $TiAl_2$ 自由能最低，但其形核过程复杂，通常需要先生成 TiAl 相[14]，并伴随固液或固态相变，因此，直接生成 Ti_2Al_5 与 $TiAl_2$ 较为困难[15]。对比 TiAl 与 $TiAl_3$，$TiAl_3$ 的吉布斯自由能更低，更倾向于在 Ti 和 Al 层的界面处首先成核形成。

对热处理后的复合板实施 EDS 线扫描，结果如图 6 所示。检测区域内元素分布显示 Ti 元素含量约为 30%，Al 元素含量约为 70%，与理论值相吻合，表明热处理过程中复合板材内部形成预期的 $TiAl_3$ 相结构。

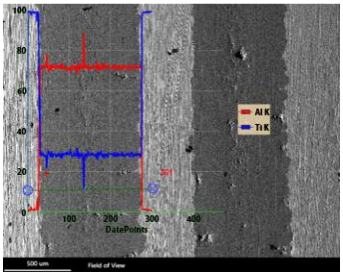


图 6 热处理后结合界面 EDS 线扫描图

Fig. 6 EDS line scan of the bonding interface after heat treatment

2.2 力学性能测试

2.2.1 拉伸性能

制备了厚度 2 mm、宽度 5 mm、总长 100 mm 热处理后的半犬骨形拉伸实验样本，采用电子万能试验机进行实验，加载速率设置为 0.02 mm·min^{-1}。拉伸实验初期，脆性 $TiAl_3$ 层作为首要应力吸收体，先于韧性 Ti 层承受拉力载荷并产生裂纹。故裂纹起源于 $TiAl_3$ 层中心区域，总体呈现波形扩展模式并向上下两侧逐渐延伸，如图 7（a）所示。随着拉伸载荷的持续施加，裂纹沿着预设路径进一步扩展，直至遍布整个 $TiAl_3$ 层。

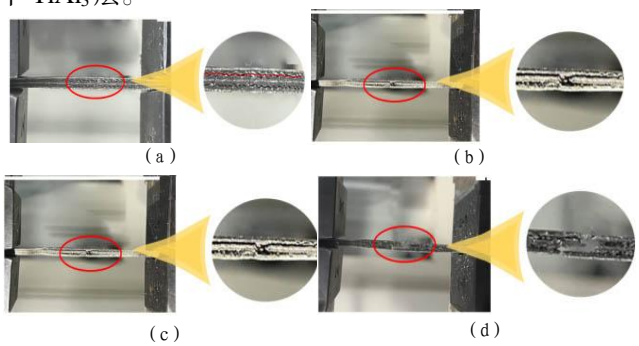


图 7 热处理后钛铝复合板拉伸实验过程

Fig.7 Tensile test of titanium-aluminum composite plate after heat treatment

在此期间，复合材料中 Ti 层保持完整，未展现出任何开裂的迹象，如图 7（b）所示。随时间推移，$TiAl_3$ 脱层断裂并完全丧失承载能力，中心区域的 Ti 层早于外侧吸收应力，导致中心 Ti 层裂纹的产生与扩展，其断裂先于外侧 Ti 层发生，如图 7（c）所示。最终，外侧 Ti 层相继断裂，整个样本完全失效，如图 7（d）所示。通过式（1）可以计算未热处理的金属叠层复合板理论抗拉强度：

$$\sigma_{Ti/Al/Ti/Al/Ti}=\frac{\sigma_{Ti}\xi_{Ti}+\sigma_{Al}\xi_{Al}+\sigma_{Ti}\xi_{Ti}+\sigma_{Al}\xi_{Al}+\sigma_{Ti}\xi_{Ti}}{\xi_{Ti}+\xi_{Al}+\xi_{Ti}+\xi_{Al}+\xi_{Ti}} \quad (1)$$

式（1）中：$\sigma_{Ti/Al/Ti/Al/Ti}$为钛铝复合板的理论抗拉强度，MPa；σ_{Ti}和σ_{Al}分别为钛、铝的抗拉强度，MPa；ξ_{Ti}、ξ_{Al}分别为钛、铝的厚度，mm。

经计算复合板理论抗拉强度为 198 MPa。未热处理复合板试样的拉伸应力——应变曲线如图 8（a）所示。由图 8 可知，在界面连续波纹形态与界面区域经历塑性变形导致的位错密度激增[16]作用下，抗拉强度峰值达到 340 MPa，相比理论值提升了 71.7%，这表明爆炸焊接显著提升了复合板的抗拉强度。而热处理后的钛铝复合板在达到屈服强度后至断裂阶段的持续时间相对延长，应变增加了 0.06，如图 8（b）所示。

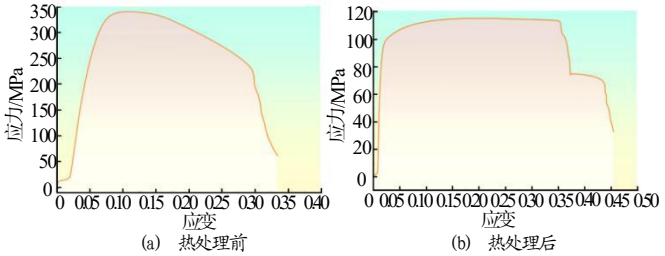


图 8 热处理前后拉伸应力——应变曲线对比

Fig.8 Comparison of tensile stress *vs* strain curves before and after heat treatment

这一现象表明，经过热处理后的复合板延展性能得到提升，但抗拉强度峰值下降到 114 MPa。此外，图 8（b）中呈现出 2 个明显的失效阶段，分别对应于复合材料中 $TiAl_3$ 层与 Ti 层断裂过程。

2.2.2 压缩性能

在 20 ℃室温下，以 10^{-3}/s 的应变率实施准静态压缩。压缩结果如图 9 所示。

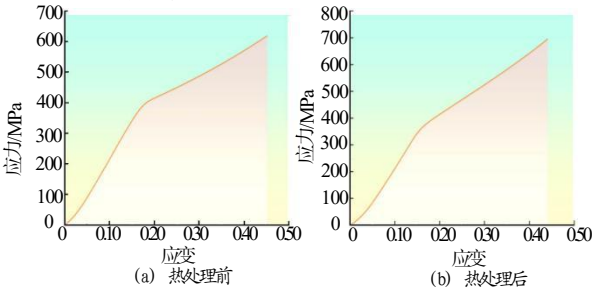


图 9 热处理前后钛铝复合板压缩应力——应变曲线对比

Fig.9 Comparison of compressive stress *vs* strain curve before and after heat treatment

在压缩试验初期，外力诱导钛铝复合板内部产生显著应力，且增长较快。当应变到达 0.2 左右，材料内部发生应力松弛，应力部分释放，减缓了后期应力的增长速率，斜率变缓。抗压强度达到 688.5 MPa，相比未处理板材的抗压强度 601.5 MPa，提高了 14.5%。热处理过程有效缓解了焊接作业中引入的残余应力，

优化了材料的晶粒尺寸及其形态结构，促进了构成元素在微观尺度上的均匀弥散，进而减少了界面区域存在的缺陷数量及脆性相的形成。这些综合效应共同促进了钛铝复合板抗压强度的提升。

3 结论

本研究通过爆炸焊接结合热处理工艺制备了 5 层钛铝叠层复合板，并对其界面形貌及力学性能进行了深入分析，得出以下主要结论：

（1）爆炸焊接形成的波纹状界面提升了结合质量，热处理后界面波纹形态变化，波长缩短、振幅增加，形成了易于辨识的小波纹状结构，优化了界面结合状况。

（2）热处理导致铝层局部熔化并与钛层发生反应，生成 $TiAl_3$ 金属间化合物层，尽管存在空洞，但整体界面结构得到优化。热处理后的复合板在界面处形成了预期的 $TiAl_3$ 相结构，EDS 线扫描显示 Ti 和 Al 元素含量与理论值相吻合，表明元素扩散与反应符合预期。

（4）未热处理复合板的抗拉强度为 340 MPa，超出理论值 71.7%，显示爆炸焊接显著提升了抗拉强度。热处理后抗拉强度降至 114 MPa，但材料的延展性显著提高。热处理使抗压强度从 601.5 MPa 提升至 688.5 MPa，增幅 14.5%，有效改善了材料的压缩性能和塑性变形能力。

综上所述，热处理工艺优化了钛铝复合板界面的结合质量，促进了 $TiAl_3$ 的形成，显著改善了材料的综合力学性能。本研究为其在航空航天等高端领域的应用提供了理论支持。

参考文献：

[1] 金帅,罗丹青,刘永华,等.航空新材料研究进展及发展趋势探析[J].机电产品开发与创新,2023,36(04):29-33.

[2] 郑超,朱秀荣,王军,等.装甲钛合金的研究与应用现状[J].钛工业进展,2020,37(04):41-48.

[3] 管仁国,娄花芬,黄晖,等.铝合金材料发展现状、趋势及展望[J].中国工程科学,2020,22(05):68-75.

[4] 高书刊,余国庆,王国迪,等.金属层状复合材料的制备工艺及应用研究[J].热加工工艺,2021,50(12):13-16,21.

[5] 吴俊杰,高永宏,陈瑶,等.钢纤维增强钢铝复合板爆炸焊接结合界面研究[J].火工品,2024(1):71-75.

[6] 曹杰,贾红新,武慧恩,等.钛-铝薄板爆炸焊接数值模拟[J].火工品,2020(3):53-56.

[7] 李岩,刘琪,李聚才,等.钛/铝爆炸焊接界面扩散行为分子动力学模拟（英文）[J].稀有金属材料与工程,2023,52(06):2017-2023.

[8] 于得水,张岩,周建平,等.钛合金与铝合金异种金属焊接的研究现状[J].焊接,2020(11):37-45,63-64.

[9] Lazurenko Daria V., et al. Explosively welded multilayer Ti-Al composites:Structure and transformation during heat treatment [J]. Materials & Design,2016(102): 122-130.

[10] Fronczek D. M., et al. Residual stresses distribution, correlated with bending tests, within explosively welded Ti gr. 2/A1050 bimetals[J]. Materials Characterization,2018(144): 461-468.

[11] 刘鲜鲜,王凤英,刘迎彬,等.爆炸焊接法制备不锈钢-铝的拉伸性能研究[J].火工品,2021(1):19-22.

[12] 郭传祥,刘迎彬,陈瑶,等.钢纤维增强型 Ti-Al 爆炸焊接结合界面研究[J].火工品,2022(6):29-32.

[13] Assari A H, Eghbali B. Solid state diffusion bonding characteristics at the interfaces of Ti and Al layers[J].Journal of Alloys and Compounds, 2019(773):50-58.

[14] Mishin Y , Herzig C .Diffusion in the Ti-Al System[J].Acta Materialia, 2000, 48(3):589-623.

[15] Sujata M , Bhargava S , Sangal S .On the formation of $TiAl_3$ during reaction between solid Ti and liquid Al[J].Journal of Materials Science Letters, 1997, 16(13):1 175-1 178.

[16] 袁嘉欣,邵飞,白林越,等.含夹层钛/铝爆炸焊接复合材料的界面特征及力学性能(英文)[J].Journal of Central South University, 2024, 31(01):43-58.