

真空爆炸焊接 TC4/09MnNiDR 钢复合板及其低温性能研究*

汪泉^{1,2}, 黄逸飞¹, 胡程³, 李雪交¹, 徐小猛¹

(1. 安徽理工大学 化工与爆破学院, 安徽 淮南 232001;

2. 安徽理工大学安徽省新型爆炸材料与爆破技术工程研究中心, 安徽 淮南 232001;

3. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 钛/钢复合板是船舶海运、低温压力容器等领域在-70°C工况下的理想候选材料, 但其大规模生产应用极大程度受限于制备工艺和界面结合质量。为探究真空压力对界面形貌与力学性能的影响机制, 利用爆炸焊接技术在 20 kPa、60 kPa (真空) 及 100 kPa (常压) 下制备了用于-70°C低温承压环境的 TC4/09MnNiDR 钛钢复合板材, 并使用电子显微镜 (SEM)、能量色散光谱 (EDS)、电子背散射衍射 (EBSD) 及电子探针 (EPMA) 对材料的形貌特征、元素分布和晶体特征进行分析, 微观结构表征表明, 真空环境显著改善界面质量, 随着真空度提高, 界面波形细小且连续均匀, 界面熔融层厚度减薄, 缺陷和脆性金属化合物减少。EBSD 分析显示真空条件下界面晶粒细化, 再结晶程度提高, 表明通过调节真空度可实现对界面微观结构的有效调控。EPMA 分析进一步揭示, 熔岛区域主要由 Fe 和 Ti 元素组成, 焊缝区域成分稳定, Ti 与 Fe 原子比例接近 1:1 或 2:1, 表明界面主要形成 TiFe 与 TiFe₂ 金属间化合物。得益于优化的界面结构, 复合板在-70°C低温下展现出优异的力学性能: 20 kPa、60 kPa、100kPa 下拉伸强度分别为 880MPa, 911MPa, 867MPa; 抗冲击能量分别为 17.5J、10.2J 和 6.4J; 弯曲强度分别为 1469MPa, 1350MPa, 1167MPa。本研究表明真空爆炸焊接是一种适用于高性能低温金属复合材料的可靠制备技术。

关键词: 真空爆炸焊接; 低温应用; 微观结构; 力学性能; 钛/钢复合板

中图分类号: TG456.6 **国标学科代码:** 13035 **文献标识码:** A

Vacuum Explosive Welding of TC4/09MnNiDR Steel Composite Plate and Its Low-Temperature Properties

WANG Quan^{1,2}, HUANG Yifei¹, HU Chen³, LI Xuejiao¹, XU Xiaomeng¹

(1. School of Chemical and Blasting Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

2. Anhui Province Engineering Research Center for New Explosive Materials and Blasting Technology, Huainan 232001, China;

3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan, 232001, China)

Abstract: Ti/steel clad plates are considered ideal candidate materials for applications such as marine engineering and low-temperature pressure vessels operating at -70°C. However, their large-scale production and application are severely restricted by the manufacturing process and the quality of interfacial bonding. To investigate the influence mechanism of vacuum pressure on interfacial morphology and mechanical properties, TC4/09MnNiDR Ti/steel clad plates were fabricated using explosive welding under ambient pressures of 20 kPa, 60 kPa, and 100 kPa. A specially designed vacuum chamber was employed to

* 收稿日期: 2025-10-29; 修回日期: 2026-03-26;

基金项目: 负压环境下爆炸容器内爆炸冲击波传播规律及筒体动态响应研究 (11872002)
安徽省自然科学基金 (2408085MA006)

第一作者: 汪泉 (1980-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事爆炸安全工作. E-mail: wqau@163.com.

通信作者: 汪泉 (1980-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事爆炸安全工作. E-mail: wqau@163.com.

precisely control the environmental pressure during the explosive process. After welding, all specimens were subjected to a uniform stress-relief annealing treatment at 550 °C for 2 h under a vacuum atmosphere to eliminate residual stresses and improve the reliability of subsequent characterization. The interfacial microstructure and chemical characteristics were systematically analyzed using multiple characterization techniques. Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe interfacial morphology, including wave formation and defect distribution. Energy dispersive spectroscopy (EDS) was applied to examine elemental distribution across the bonding interface. Electron backscatter diffraction (EBSD) was employed to evaluate grain structure, grain boundary characteristics, recrystallization fraction, and texture evolution near the interface. Electron probe microanalysis (EPMA) was conducted to quantitatively determine the chemical composition of the interfacial melting zone and vortex regions, with both mapping and point analyses performed to identify the constituent phases. Mechanical properties at -70 °C were evaluated through tensile tests, Charpy impact tests, and three-point bending tests, all carried out in accordance with relevant national standards, with the results reported as mean values ± standard deviations. Results show that the vacuum environment significantly improves interfacial quality. With increasing vacuum degree, the interfacial wave becomes finer, more continuous, and more uniform, while the thickness of the molten layer decreases, and the presence of defects and brittle intermetallic compounds is reduced. Electron backscatter diffraction (EBSD) analysis reveals grain refinement and an increased recrystallization fraction at the interface under vacuum conditions, demonstrating that the interfacial microstructure can be effectively controlled by adjusting the ambient pressure. Electron probe microanalysis (EPMA) further reveals that the vortex regions are mainly composed of Fe and Ti elements, while the weld seam region exhibits a stable chemical composition with Ti:Fe atomic ratios close to 1:1 or 2:1, indicating that the dominant intermetallic phases formed at the interface are TiFe and TiFe₂. Benefiting from the optimized interfacial structure, the clad plates exhibit excellent mechanical properties at -70 °C. The tensile strengths under 20 kPa, 60 kPa, and 100 kPa are 880 MPa, 911 MPa, and 867 MPa, respectively. The impact absorbed energies are 17.5 J, 10.2 J, and 6.4 J, and the flexural strengths are 1469 MPa, 1350 MPa, and 1167 MPa, respectively. This study demonstrates that vacuum explosive welding is a reliable technique for producing high-performance low-temperature metal composites, with 60 kPa identified as the optimal processing window.

Keywords: *Vacuum explosive welding; cryogenic application; Microstructure; Mechanical properties; Titanium/steel composite plate*

1. 引言

低温金属材料在船舶海运储罐、化工压力容器及航空航天等领域应用广泛^[1]，需要具备优异的低温强度、韧性、耐腐蚀性、密封性等特点^[2]。目前，服务于上述领域的一系列高性能合金（如殷瓦合金、9Ni 钢等）虽性能良好，但存在成本高昂、工艺复杂等局限^[3]。

为降低成本，以 Mn 代替 Ni 的低温高锰钢成为研究热点^[4]。09MnNiDR 钢作为一种可在-100°C下服役的低温压力容器用钢，凭借其低碳含量和良好的韧性，显示出巨大应用潜力^[5]。然而，在低温应用中，单一材料往往难以同时满足所有苛刻的服役要求。因此，采用复合结构，通过异种材料组合实现性能互补，成为一种有效的解决方案。例如，钛/钢复合板既能利用钛合金优异的低温韧性，又可依托钢结构的高强度和低成本，在低温压力容器领域潜力巨大。然而，Ti 和 Fe 之间巨大的物理与化学性能差异，使得传统熔焊难以实现可靠连接。因此，固态焊接技术被视为更有潜力的解决方案。但研究表明，钎焊钛/铁接头通常表现出低抗拉强度和较差的耐腐蚀性，而扩散焊接和轧制焊接需要高精度的几何形状和昂贵的设备^[6, 7]。摩擦焊和搅拌摩擦焊缓解了一些与金属融合相关的问题，但 IMC 层和宽热影响区仍然不可避免^[8, 9]。Arthur 等^[10]研究发现传统电弧焊方法存在效率低、强度不足等缺点，难以实现大规模高质量制造。

爆炸焊接是一种高效的金属材料焊接方式，它结合了压力焊、熔化焊和扩散焊的特性，为不同基体金属原子之间的结合提供了更多和更好的条件^[11, 12]。然而传统爆炸焊接过程易在焊缝处形成脆性

金属间化合物，空气中的氧在高温高压下与活性金属反应，形成氧化物并夹杂产生气孔，成为界面结合的薄弱环节，最终导致结合强度降低^[13]。真空爆炸焊接工艺可有效解决上述问题^[14, 15]。近年研究表明，真空环境可有效抑制界面氧化与缺陷生成^[16]。例如，Li 等^[17]发现，真空环境显著减少了有害影响。与大气环境相比，真空环境可以显著降低爆炸焊中的振动、噪音和冲击波；Wang 等^[18]研究发现真空相比于常压条件提高了爆炸焊接的炸药能量利用率。Sun 等^[19]在 Mg/Al 复合板研究中亦证实真空能有效防止活性金属氧化，显著提高结合质量。zhu 等^[20]比较了在真空和空气中爆炸制备的铝钢复合接头，发现真空焊接减少了界面变形，提高了韧性。目前，利用真空爆炸焊接技术制备低温复合材料及性能研究尚显不足。

本文系统地研究了 20kPa、60kPa 和 100kPa 下 TC4/09MnNiD 钢爆炸焊接复合板的界面形貌和力学性能，采用电子显微镜（SEM、EBSD）、能量色散光谱（EDS）、电子探针显微分析（EPMA）从微观结构、元素分布、晶体织构、相组成及热物理性能等多角度分析了不同真空度下界面结合特性，并利用界面拉伸、冲击、弯曲测试评估复合板材的力学性能和失效行为，为低温承压材料焊接提供理论依据和实践指导。

2. 材料与方法

2.1 爆炸焊接实验

本实验采用玻璃微球敏化的低爆速粉状乳化炸药作为焊接能源，实际装药密度 0.65g/cm³，爆速稳定在 2200m/s~2300m/s。实验采用 TC4 钛合金和 09MnNiDR 低温钢作为覆板和基板，其尺寸为 (2+10)mm×400mm×140mm，化学成分如表 1 所示。采用平行放置法，板间距 6mm，药厚 20mm，装药比 1.44。爆炸焊接实验装置如图 1 所示^[21]，通过抽真空调至预设的 20kPa、60kPa 和 100kPa 焊接环境压力。

表 1 基覆板的化学成分

Table 1 Chemical composition of base and fly plates

材料	质量分数/(wt%)								
	Fe	Ti	Al	V	Mn	C	Si	Ni	Remain
Ti6Al4V	0.3	Remain	5.5~6.75	3.5~4.5	-	0.08	-	-	0.4
09MnNiDR	Remain	-	0.02	-	1.2~1.6	0.12	0.15~0.5	0.3~0.8	

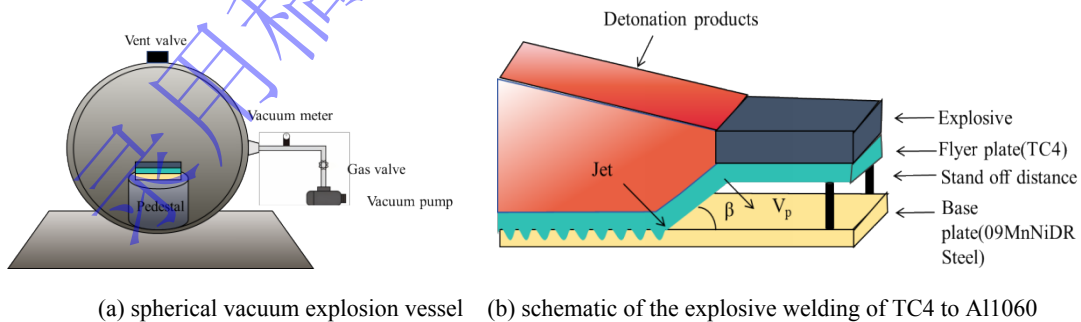


图 1 爆炸焊接装置示意图

Fig.1 Diagram of the explosive welding set-up

2.2 微观结构及力学性能表征

微观结构观察样品、拉伸、弯曲、冲击试样均沿垂直于爆炸焊接方向取样；取自复合板中心区域，以保证焊接状态的典型性。将微观结构观察试样抛光、腐蚀后，采用扫描电子显微镜（SEM、EBSD）分析界面形貌和表征界面附近的晶体学特征，利用能量色散光谱（EDS）分析元素

扩散情况并测定熔融层厚度，采用电子探针微区分析（EPMA）精确测定焊缝处的元素分布与含量。本文选用的 09MnNiDR 钢设计工况温度为-70 °C，因此所有力学性能测试均在此温度下进行，材料物理参数如表 2 所示。在恒定加载速率 2mm/min 下测量试件的拉伸、弯曲、冲击强度，其尺寸如图 2 所示。采用 SEM 观察拉伸断口形貌，以研究其失效机制。为消除焊接残余应力并提高 EBSD 标定质量，所有试样在测试前均进行了统一的去应力退火处理，即在真空环境下 550°C 保温 2 小时，并随炉冷却。需要说明的是，断口样品与界面形貌样品来源不同，前者经历了完整的力学加载过程，反映的是裂纹萌生与扩展后的断裂特征；后者为未受力状态的原始焊接界面。

表 2 TC4 和 09MnNiDR 物理参数

Table 2 Physical parameters of TC4 and 09MnNiDR

材料	密度/(g/cm ³)	体声速/(m·s ⁻¹)	硬度	抗拉硬度/(MPa)	熔点/(°C)	热导率/W·(m·°C) ⁻¹
TC4	4.51	6100	360	859	1660	7.955
09MnNiDR	7.85	5900	276	440	1500	46.500

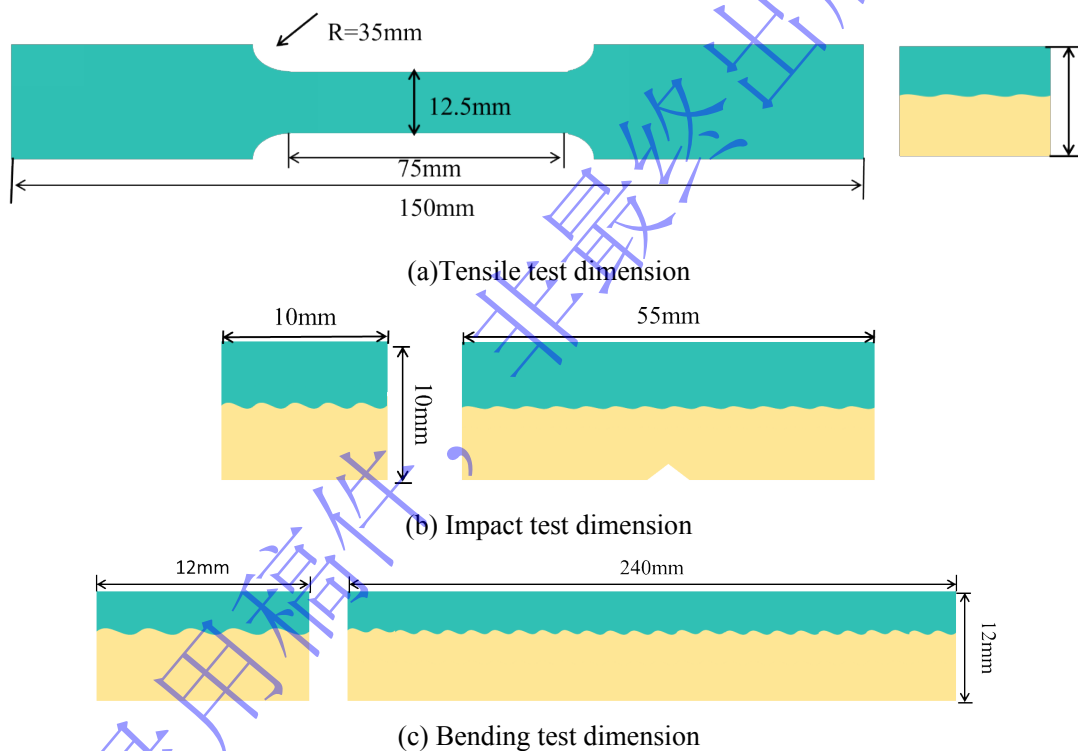


图 2 试样尺寸示意图

Fig.2 Schematic diagram of the size of the samples

3 结果与讨论

3.1 宏观力学性能

3.1.1 拉伸试验

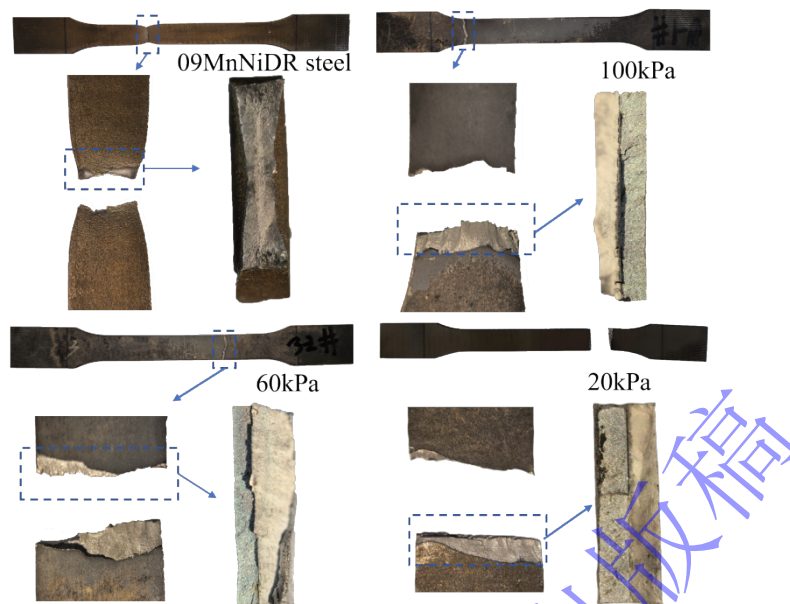


图3 拉伸试验前后试样宏观形貌对比

Fig.3 Comparison of the macroscopic morphology of the specimens before and after tensile tests

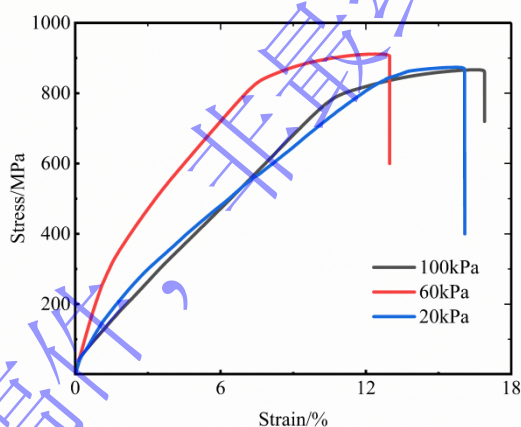


图4 拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Tensile stress-strain curves

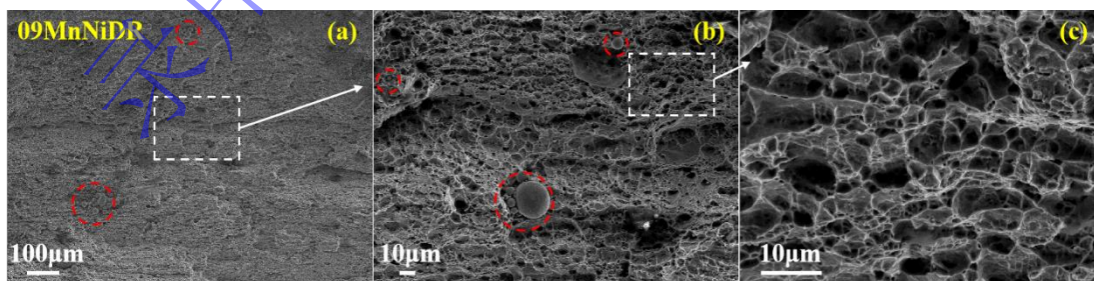


图5 09MnNiDR 钢拉伸断口图

Fig.5 Fracture morphology of 09MnNiDR steel after cryogenic tensile test

在-70°C下纯 09MnNiDR 钢宏观拉伸断口如图 3 所示，宽度与厚度方向收缩率分别为 28.18%与 52.94%，其抗拉强度为 548 Mpa，100 kPa、60 kPa、20 kPa 环境下抗拉强度如图 4 所示，分别为 867 MPa、911 Mpa、880 MPa，较 09MnNiDR 母材分别提升 58.22%、66.24%与 60.58%。纯 09MnNiDR

钢断口形貌如图 5 所示，断口由均匀韧窝构成，晶间分离处可见渗碳体球化颗粒，进一步证实其韧性断裂机制。

相比之下，所有复合板试样均表现为脆性断裂，断口平齐、无颈缩。其失效过程具有明显规律性：裂纹始终起源于钛侧 (TC4)，断面平整；随后扩展至钢侧，呈坡状延伸形貌；最终断裂终止于焊缝界面 (图 3)。这表明钛板为主要承力组件，波形界面虽无法抑制脆性开裂，但仍具备一定残余抗变形能力。断口 SEM 分析揭示其断裂机制与环境压力密切相关。100 kPa 条件下 (图 6)，钛侧可见延性塑坑，钢侧则呈现解理台阶，表现为脆-韧混合断裂^[22]；60 kPa 条件 (图 7) 下钢侧断口呈现准解理特征，含大量细小解理面与撕裂棱，微观断裂口沿着特定的结晶学平面(解理面)发生剥离；20 kPa 条件下 (图 8) 断裂形貌与 60 kPa 相似，但界面结合质量差异导致强度波动。

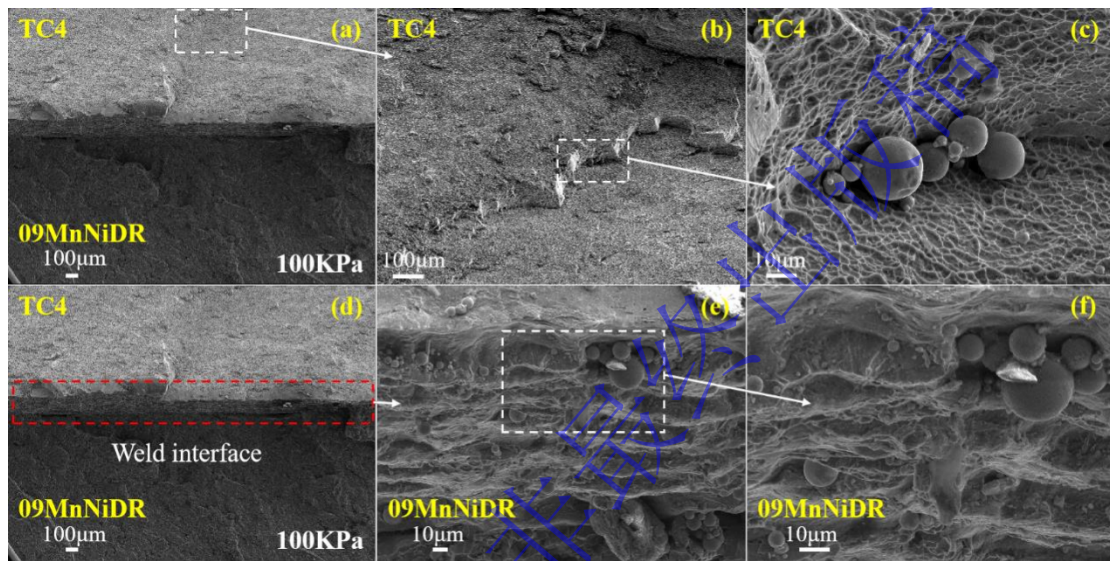


图 6 100kPa 下制备的 TC4/09MnNiDR 钢拉伸断口形貌

Fig.6 Cryogenic tensile fracture morphology of TC4/09MnNiDR steel composite fabricated at 100 kPa

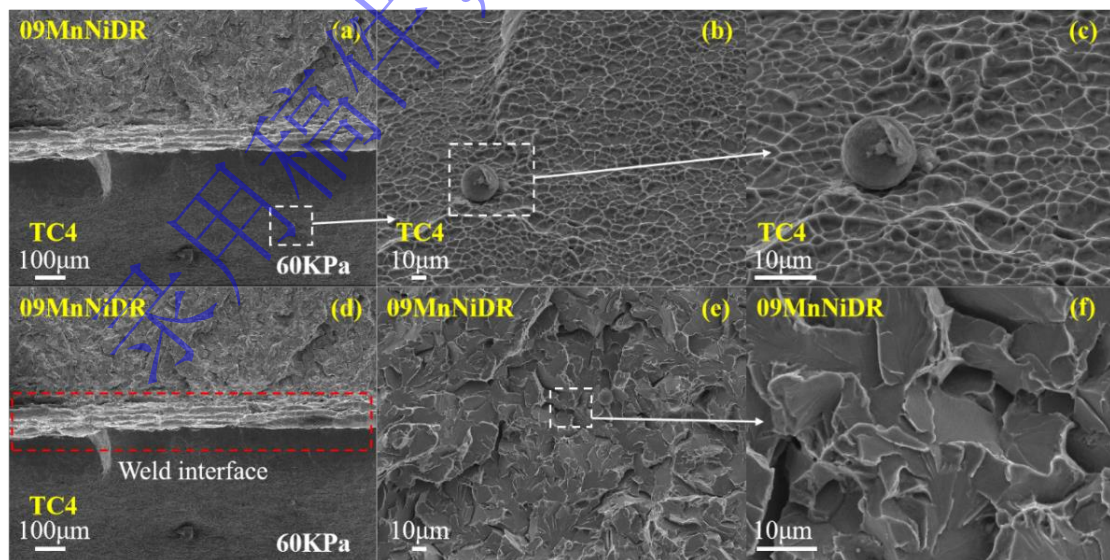


图 7 60kPa 下制备的 TC4/09MnNiDR 钢拉伸断口图

Fig.7 Cryogenic tensile fracture morphology of TC4/09MnNiDR steel composite fabricated at 60 kPa

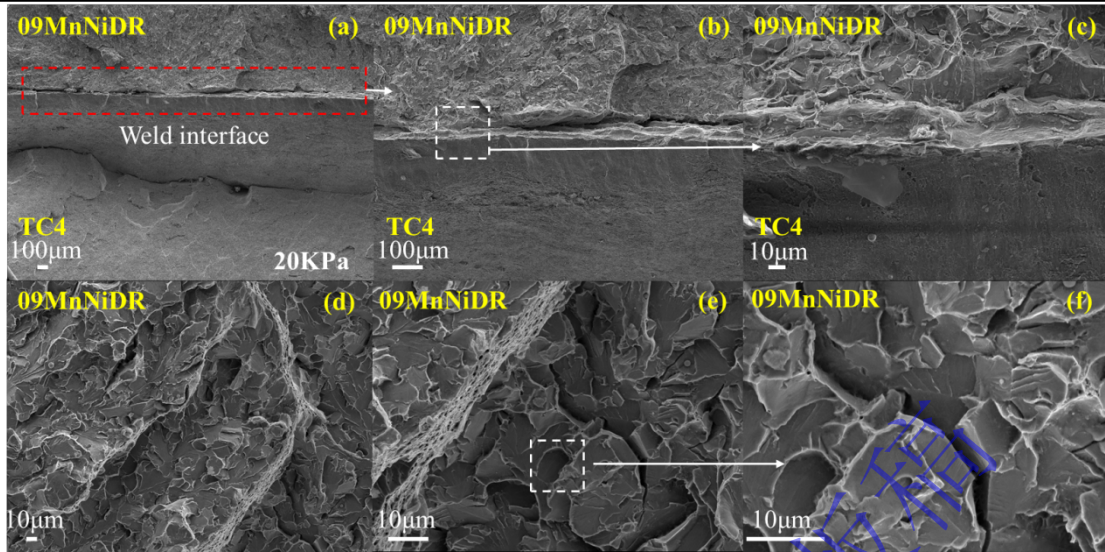


图 8 20kPa 下制备的 TC4/09MnNiDR 钢拉伸断口图

Fig.8 Cryogenic tensile fracture morphology of TC4/09MnNiDR steel composite fabricated at 20 kPa

3.1.2 复合板整体低温冲击韧性分析

-70°C下夏比冲击试验结果如表 3 所示。其中，1#和 4#试样均为 100 kPa 条件下制备，二者区别在于 V 型缺口分别开设于钢侧与钛侧；2#和 3#试样缺口均位于钢侧，其环境压力分别为 60 kPa 和 20 kPa。冲击测试结果表明，复合板整体冲击功随真空度提高而显著增加。60 kPa 与 20 kPa 条件下试样的冲击功较 100 kPa 常压试样分别提高 58.95%和 171.86%，表明真空环境显著提升了复合板整体的低温冲击韧性。需要指出的是，由于夏比冲击试样包含完整的钛层和钢层，所测得的冲击韧性主要反映钛层本征韧性的贡献，难以直接分离出界面自身的抗冲击性能。本试验的目的在于比较不同真空度下复合板整体低温冲击韧性的变化趋势。

值得注意的是，尽管制备工艺相同，缺口位于钛侧的 4#试样冲击功显著低于缺口位于钢侧的 1#试样。该现象表明，冲击载荷下钛侧（TC4）为主要承力组件，其断裂行为主导整体失效过程，进一步证实 TC4/09MnNiDR 钢复合结构在低温冲击条件下较单一 09MnNiDR 钢具有显著性能优势。

对冲击断口的宏观分析（图 9）进一步揭示了真空环境的积极作用。常压（100 kPa）试样断裂后呈现明显界面剥离，钢侧与钛侧断裂位置发生偏移，表明整体失效过程中界面结合质量相对较差。而在真空环境下（60 kPa 与 20 kPa）制备的试样未出现界面剥离，裂纹扩展路径连续、平直。同时，图 9(d)~ 9 (f)中，红色虚线为试样 V 型切口，红色实线为裂纹延伸最宽点水平线，从图 9 (e)和图 9 (f)可以看出真空试样断口裂纹扩展宽度较小，且断面呈现典型闪亮晶状特征，符合解理断裂形貌的宏观判据，表明其在 -70°C 下表现为脆性断裂机制。图 9 (h)、9 (i)中可明显发现受摆锤撞击后的裂纹扩展，低温环境降低了材料的塑性，容易使钢出现冷脆现象从而促进了解理。

表 3 低温冲击实验结果

Table 3 Results of cryogenic impact tests

样品	冲击吸收功(J)	Result	横截面积(mm ²)	试样宽度(mm)	试样厚度(mm)
1#	6.4457	Fractured	80	10	10
2#	10.2455	Fractured	80	10	10
3#	17.5236	Fractured	80	10	10
4#	3.6473	Fractured	80	10	10

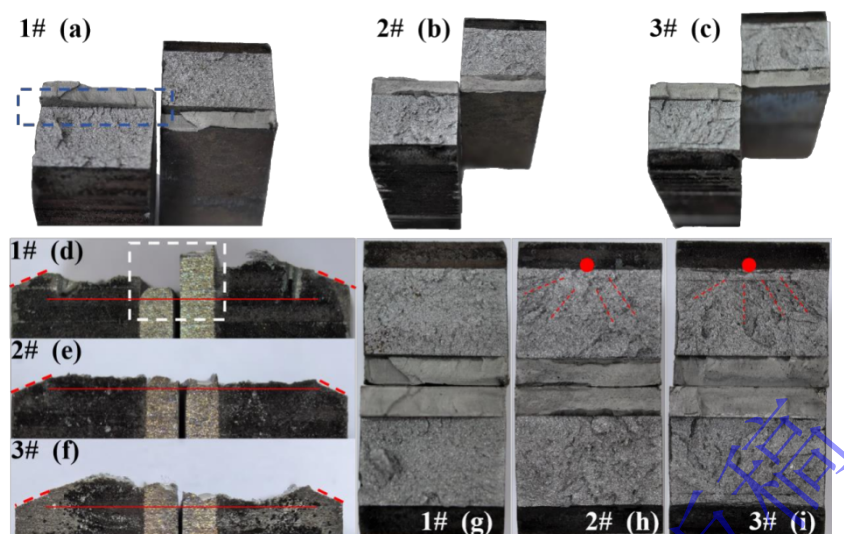


图9 低温冲击试样断口图

Fig.9 Fracture morphology of cryogenic impact test specimens

3.1.3 低温弯曲试验及分析

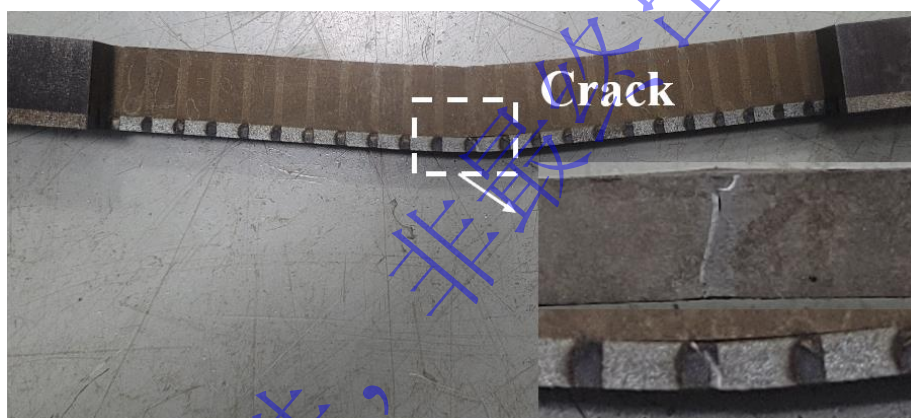


图10 100kPa 试样低温弯曲断裂图

Fig.10 Cryogenic bending fracture morphology of the specimen fabricated at 100 kPa

-70°C低温抗弯试验表明所有复合板抗弯强度均显著高于单一09MnNiDR钢(560MPa)。为进一步评估复合板界面的强韧性匹配关系,图11展示了三种真空度下复合板的-70°C三点弯曲应力-挠度曲线。20 kPa样品展现出最优的综合性能:其曲线不仅达到了三者中最高峰值强度(1469 MPa),更重要的是,在达到峰值后并未立即断裂,而是出现了一个明显的载荷缓慢下降的平台区,对应的断裂位移也最大。这表明其界面兼具了最高的承载能力和最佳的断裂韧性。裂纹在萌生后无法快速扩展,界面能通过微观塑性变形吸收更多能量。100 kPa样品表现出典型的脆性断裂特征:其曲线虽然也达到了较高的强度(1167MPa),但在达到最高点后几乎垂直下落,断裂位移极小。这与图10中观察到的钛侧脆性解理断裂和界面骤然剥离的现象完全吻合。其较高的强度源于硬脆的界面金属间化合物层,但该区域在弯曲应力下无法通过塑性变形松弛应力集中,导致一旦开裂便迅速失稳扩展,表现为极差的韧性可靠性。60 kPa样品则呈现出一种过渡状态(1350 MPa):其曲线特征介于二者之间。因此高真空环境通过抑制过量的脆性相、形成细密均匀的界面组织,能够同步提升复合板的承载能力和断裂抗力,从而获得结合质量最可靠、综合性能最优的焊接界面。

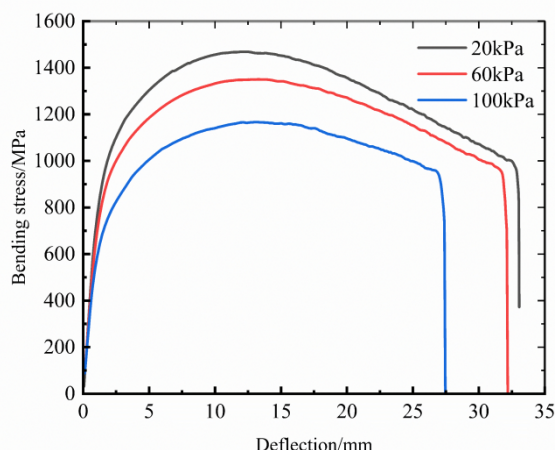


图 11 三点弯曲应力-挠度强度图

Fig.11 Deflection-bending stress intensity diagram from three-point bending tests

3.2 显微结构分析

图12显示了100kPa下TC4/09MnNiDR钢复合板界面微观形貌，可以观察到典型的波形结合界面。TC4钛合金侧的波形区域发生了明显的动态再结晶，形成了等轴状的新晶粒，其晶界清晰可见。从界面再结晶区域向母材内部，晶粒形貌呈现从等轴细晶到变形拉长组织的梯度过渡，清晰地反映了爆炸焊接过程中应变能与温度场的不均匀分布。尤为值得注意的是，在波头的涡旋区，由于经历了最极端的剪切塑性变形，形成了更为细小的超细晶组织。此外，在由钢（09MnNiDR）主导的涡旋区域内，可以观察到被卷入的白色钛合金熔岛，这直观地证明了在爆炸焊接瞬间界面金属发生了剧烈的熔融与交融，是实现冶金结合的关键证据之一。

20 kPa、60 kPa、100 kPa三种环境压力下TC4/09MnNiDR钢复合板界面波形如图13所示。结果表明：尽管三种条件下均呈典型的周期性波形界面，但环境压力显著影响了波的尺寸。真空度越高，界面波长与波高越小。定量分析显示：与100kPa条件相比，60kPa与20kPa下波高分别降低了26.1%与47.8%，波长则分别减少了17.8%与5.8%，同时波形更为规则平滑，这从微观结构上为复合界面优异性能提供了潜在保障。

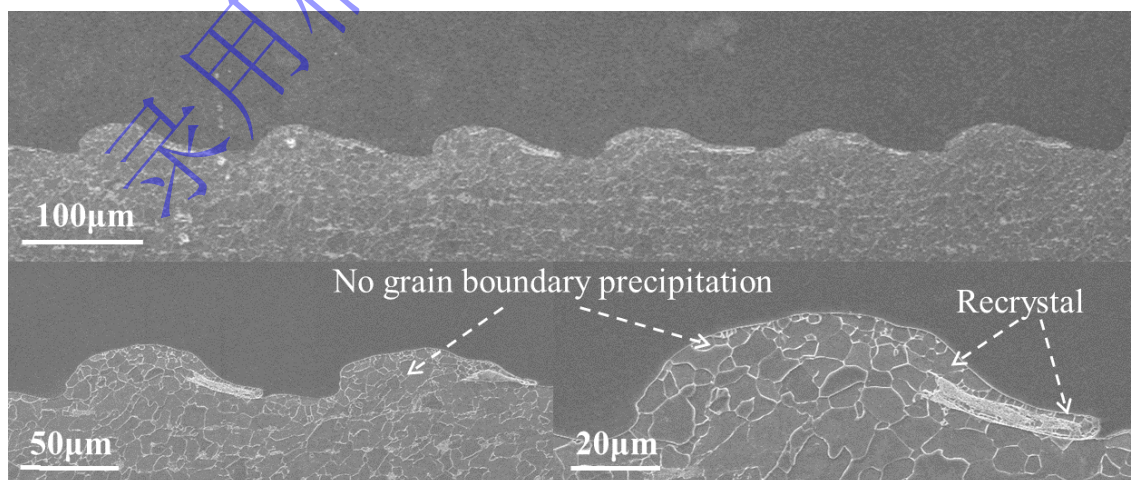


图 12 100kPa 下 TC4/09MnNiDR 钢复合板界面金相图

Fig.12 Metallographic images of the TC4/09MnNiDR steel composite interfaces at 100 kPa

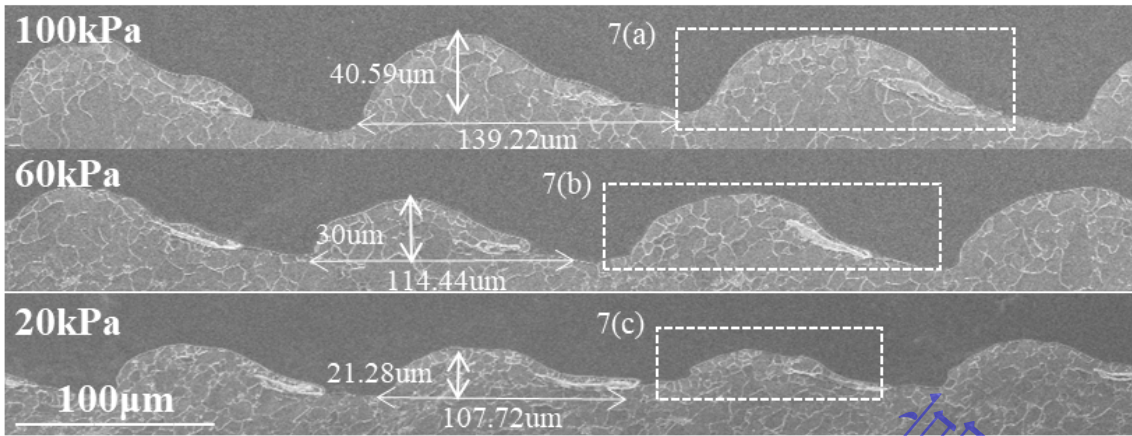


图 13 不同真空度下爆炸焊接界面波形图

Fig.13 Waveform diagrams of the explosive welding interfaces under different vacuum levels

3.3 界面元素分析

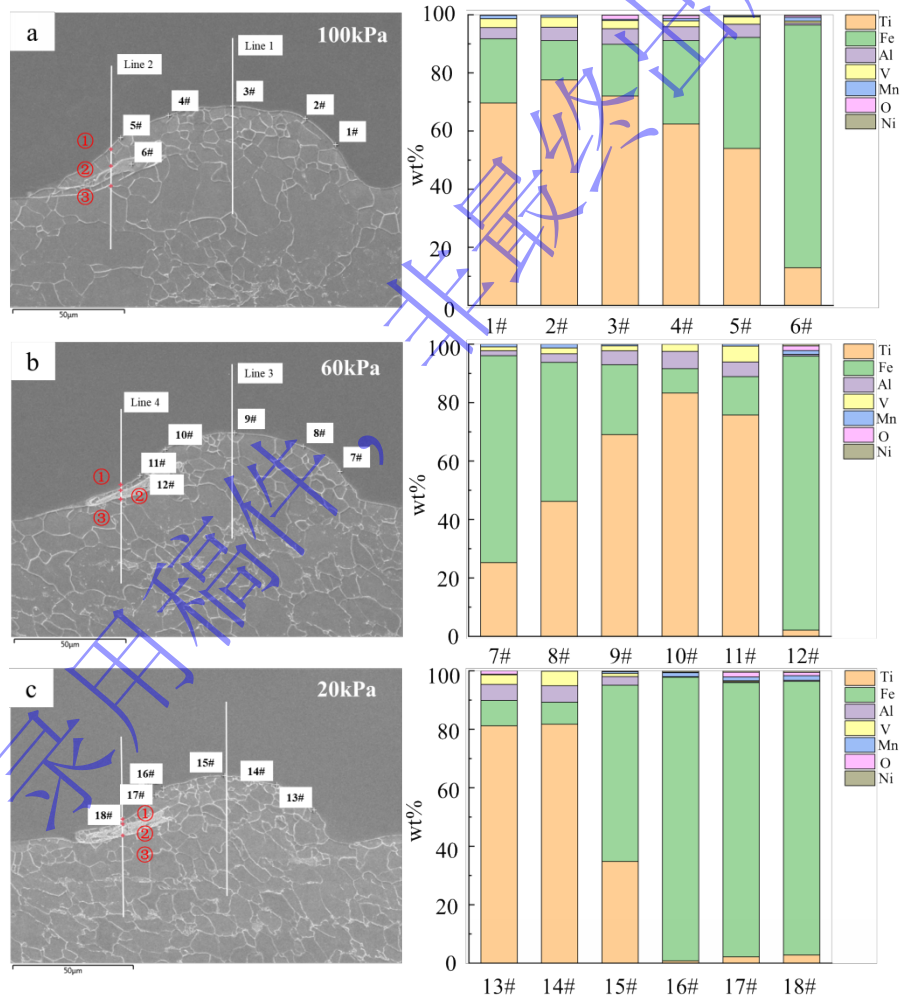
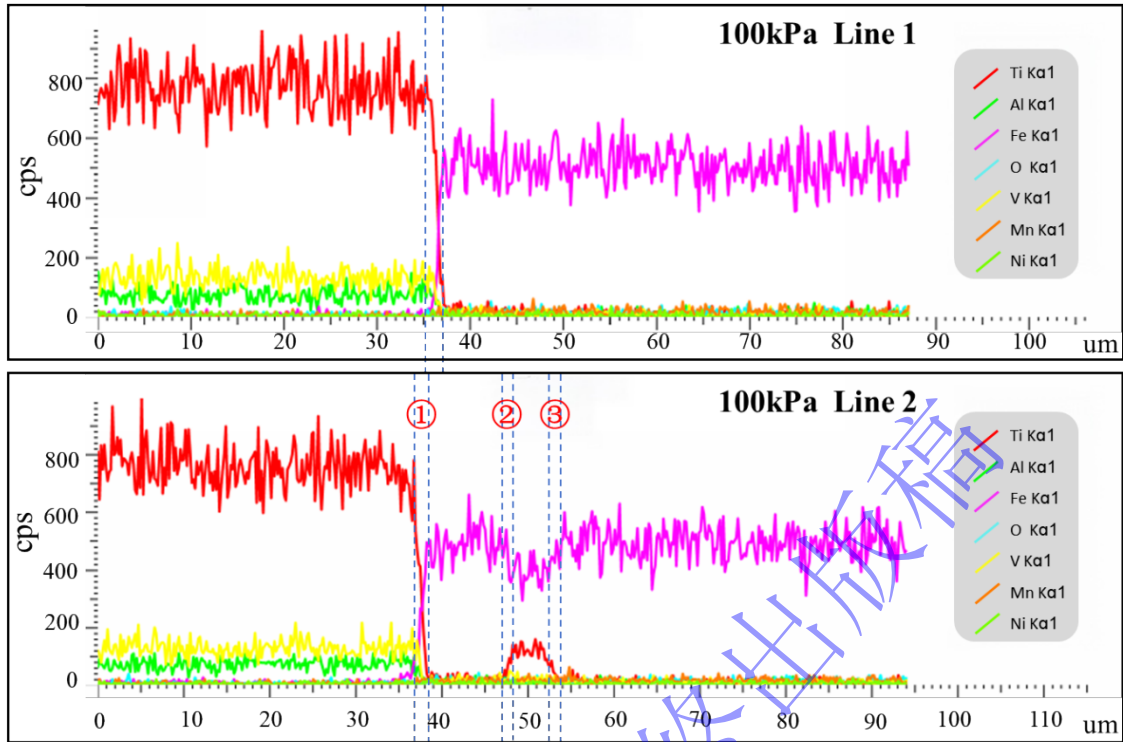
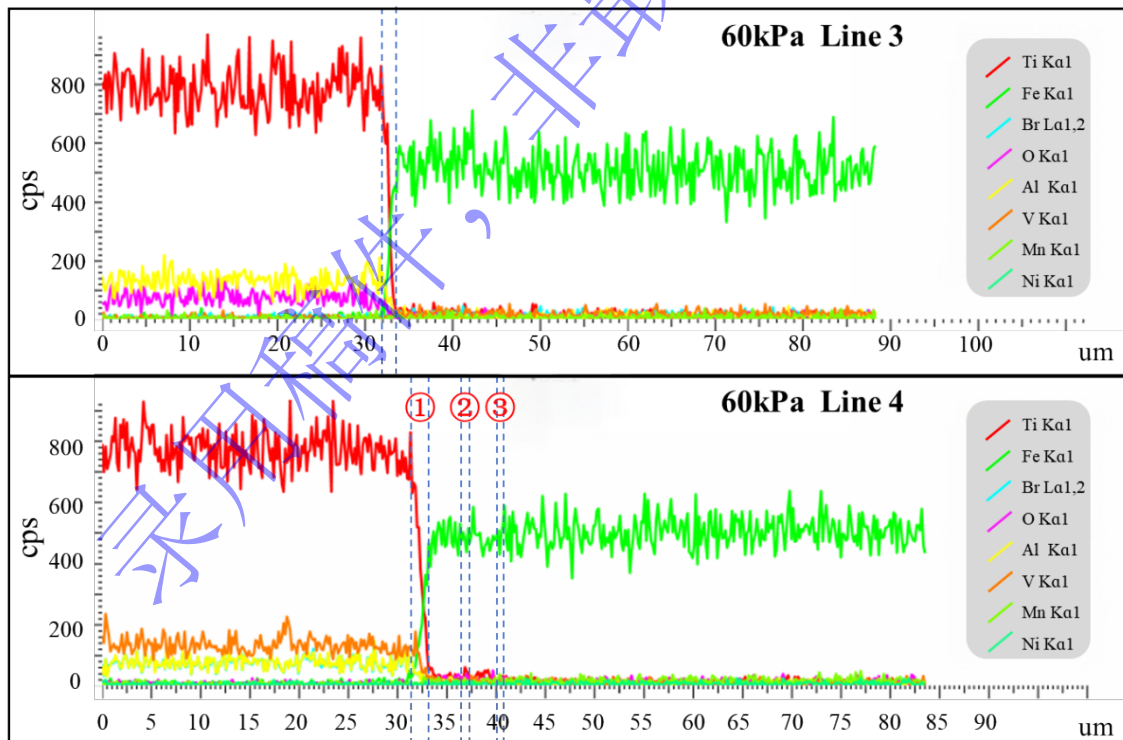


图 14 不同真空度下点扫描结果

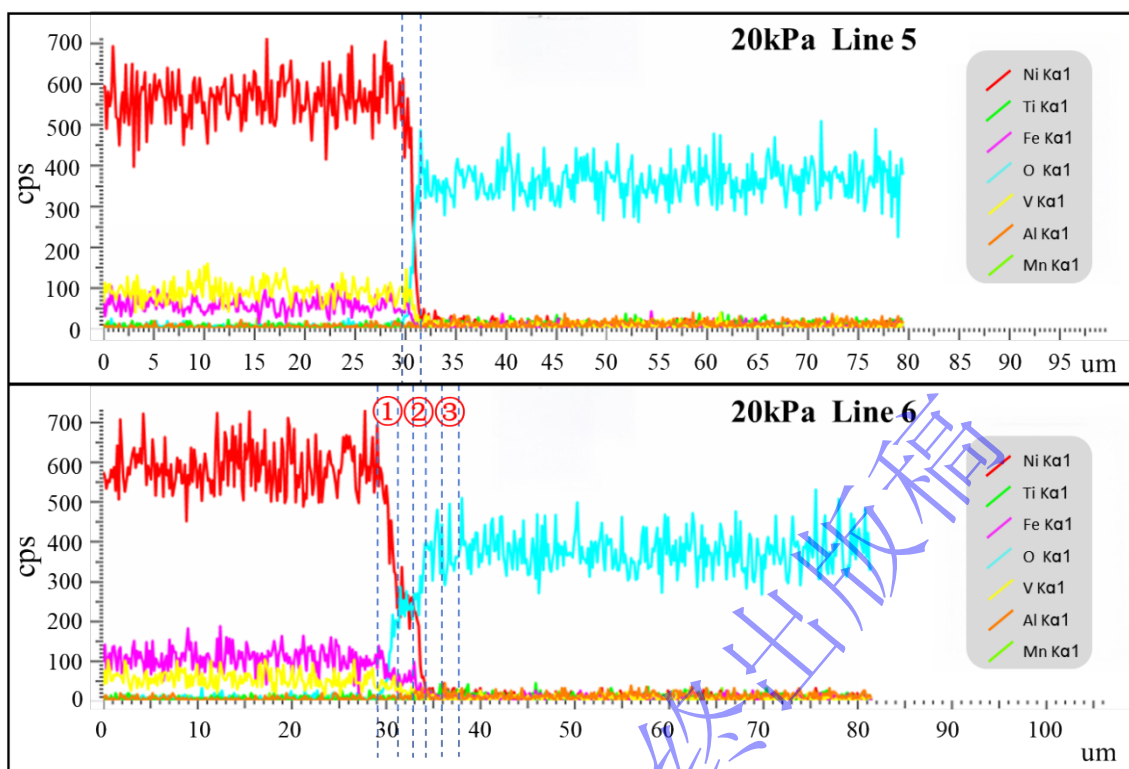
Fig.14 Point scanning results under different vacuum degrees



(a) at 100kPa, line scanning locations across the wave crest and molten zone



(b) at 60kPa, line scanning locations across the wave crest and molten zone



(c) at 20kPa, line scanning locations across the wave crest and molten zone

图 15 不同真空度下线扫描结果

Fig.15 Line scanning results under different vacuum degrees

为探究 20 kPa、60 kPa 与 100 kPa 真空度下爆炸焊接界面元素的相互扩散行为，采用 EDS 点扫描与线扫描（图 14，标示测试位置）对界面微区进行分析。测试结果表明，焊接界面发生了明显的元素互扩散行为，其主要成分为 Ti 和 Fe。对图 14 线扫描结果的定量分析显示，环境压力显著影响界面化学成分分布与均匀性。在 100 kPa 条件下，界面扩散区的元素比例在不同测量点间波动相对较小（图 14a），表明其形成过程趋于稳态，这可能源于空气绝热压缩提供的稳定热源，促进了接近平衡态的扩散反应。在 60 kPa 环境下，界面区域高度富集 Ti 元素（图 14b，Ti/Fe 原子比普遍高于 8:1），反映了在此真空度下，钛侧射流形成充分且结合效率高。在 20 kPa 的真空环境下，各点位的元素比例未呈现一致规律，成分各异（图 14c）。极高的碰撞速度导致了极端瞬态与非平衡的界面条件，温度与压力场的剧烈波动使得不同微区经历了不同的反应路径，从而生成了成分多变的金属间化合物^[22]。为进一步评估界面扩散行为，对图 15 中熔岛区域的线扫描数据进行测量可以得出：100 kPa、60 kPa 和 20 kPa 条件下的熔融区厚度分别约为 17.5 μm 、9.0 μm 与 8.5 μm 。这表明随着真空度提高，界面金属熔融区整体呈现显著减薄趋势。这意味着界面氧化反应和缺陷得到抑制，生成有害脆性化合物减少，这是界面表现出更好焊接质量的明显现象，表明真空环境有助于形成更优良的冶金结合界面。

3.4 焊缝界面微区电子探针分析

为明确界面微区成分，采用电子探针（EPMA）对熔岛及焊缝区域进行了面扫描与点扫描分析。图 16 展示了 100 kPa 与 20 kPa 试样熔岛及焊缝区域的元素面分布结果。两者均显示熔岛区域主要由 Fe 和 Ti 元素组成，同时伴有少量 Al。面扫描结果清晰表明，焊缝界面有效隔离了熔岛与两侧基体，而波前涡旋形成的熔岛作为元素互扩散最充分的区域，其边界仍受焊缝约束，说明焊缝在复合板热传导过程中扮演关键角色，为进一步定量解析界面成分，在典型波形区域的波峰及两侧腰部分别选取 5 个测点进行点扫描，

定量分析 Ti、Fe、Al、Mn、V、Ni 等元素的原子百分比，结果如图 17 所示。焊缝区域保持连续分布，成分稳定。绝大多数测点中 Fe 与 Ti 的原子比例接近 1:1 或 2:1，而 Al、Mn 等合金元素总占比低于 20%，参与形成复杂化合物的可能性较低。分析表明，环境压力变化未对焊缝主要元素的原子比例产生显著影响。根据 Ti-Fe 平衡相图，在爆炸焊接界面温度范围内，焊缝区可能形成的金属间化合物主要为 TiFe 与 TiFe₂。TiFe 与 TiFe₂ 作为脆性相，其过量生成会降低界面韧性，不利于复合板的整体力学性能。同时，它们在低温下具有较低的热导率，可在一定程度上缓解焊接界面处的热应力集中，对复合板的低温服役稳定性具有积极作用。因此，适度的化合物生成是保证界面结合质量与低温性能平衡的关键，这也解释了真空环境下复合板综合性能最优的内在原因。

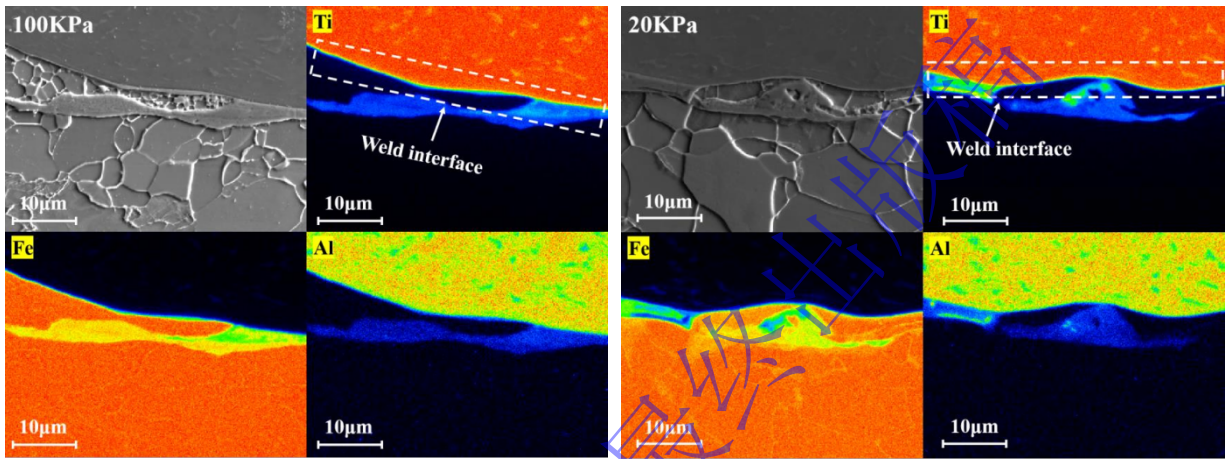


图 16 20kPa、100kPa 试样熔岛及焊缝区电子探针元素面扫描图

Fig.16 EPMA elemental mapping of the molten island and weld zone in the 20 kPa and 100 kPa specimens

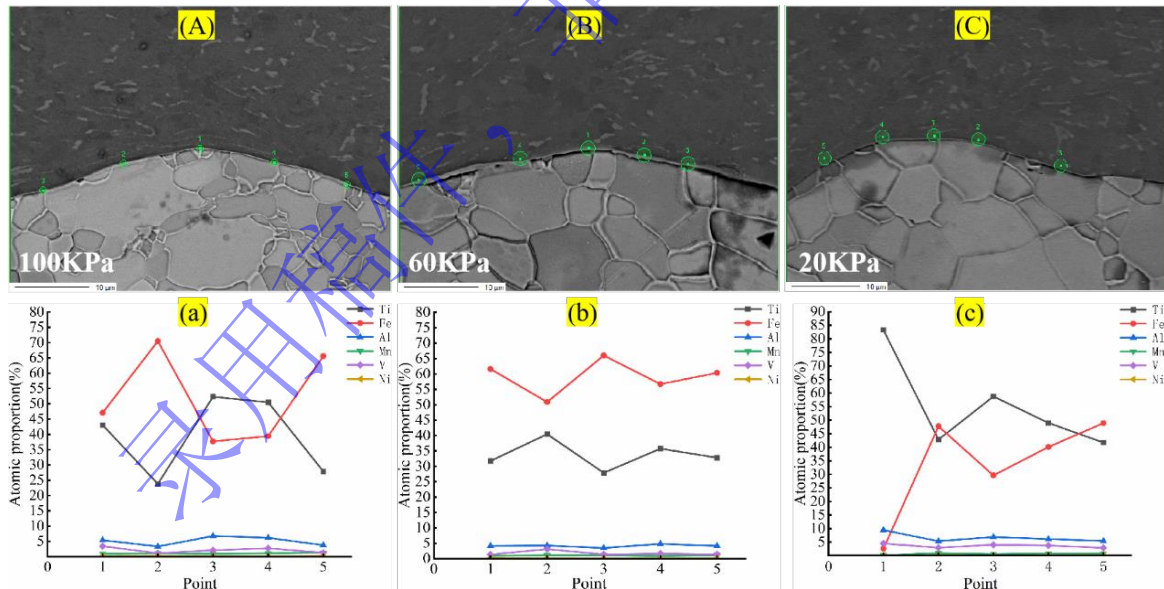


图 17 焊缝区电子探针元素点扫描图

Fig.17 EPMA point analysis within the weld zone

3.5 晶体学分析

为探究环境压力对爆炸焊接复合板界面晶体组织的影响，对 20 kPa、60 kPa 和 100 kPa 下制备的试样进行了电子背散射衍射 (EBSD) 分析。TC4/09MnNiDR 钢界面带对比图 (图 18) 显示，焊缝两侧金属的晶粒尺寸存在显著差异。钛侧晶粒明显细于钢侧，且越靠近界面，晶粒细化程度越高，分布也更为均匀，这是爆炸焊接高速冲击变形的典型特征^[23]。

不同环境压力下界面的晶体学特征呈现规律性变化。这种晶粒尺寸的非单调性变化与爆炸焊接过程中应变能积累和动态再结晶行为密切相关^[24]。图 19 的 KAM 图显示，100 kPa 条件下界面附近晶格畸变相对较小，而随着真空度提高，大取向差 ($>1^\circ$) 的分布范围逐渐扩大，表明更高真空度引入了更高的初始应变能。图 20 的 BC-IPF-GB 组合图界面取向成像图显示，焊接界面附近的钢侧发生了显著晶粒细化，形成了亚晶粒和孪晶结构，这些亚结构分布于铁素体晶粒内部，可有效阻碍位错运动，从而提高局部强度。

图 21 的重结晶统计结果表明，60 kPa 条件下界面完全再结晶比例适中，铁侧亚结构比例显著高于 100 kPa 条件，而 20 kPa 下变形晶粒残留比例最高。分析表明，真空环境通过改变爆炸焊接过程中的能量传递效率，显著影响了界面微观结构的形成。适度真空度 (60 kPa) 下，能量传递效率的提升促进了动态再结晶形核，同时避免了过度变形导致的晶粒粗化，形成了有利于强韧性匹配的界面组织。这一发现为理解真空爆炸焊接界面形成机理及其与力学性能的关联提供了重要依据。

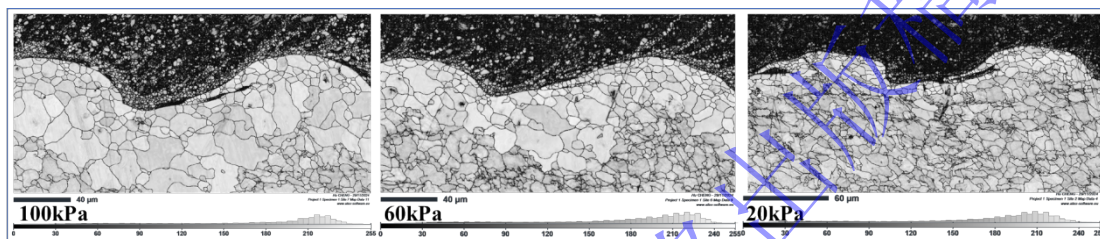


图 18 不同真空度下焊接界面带对比图

Fig.18 Comparison of welding interface zones under different vacuum levels

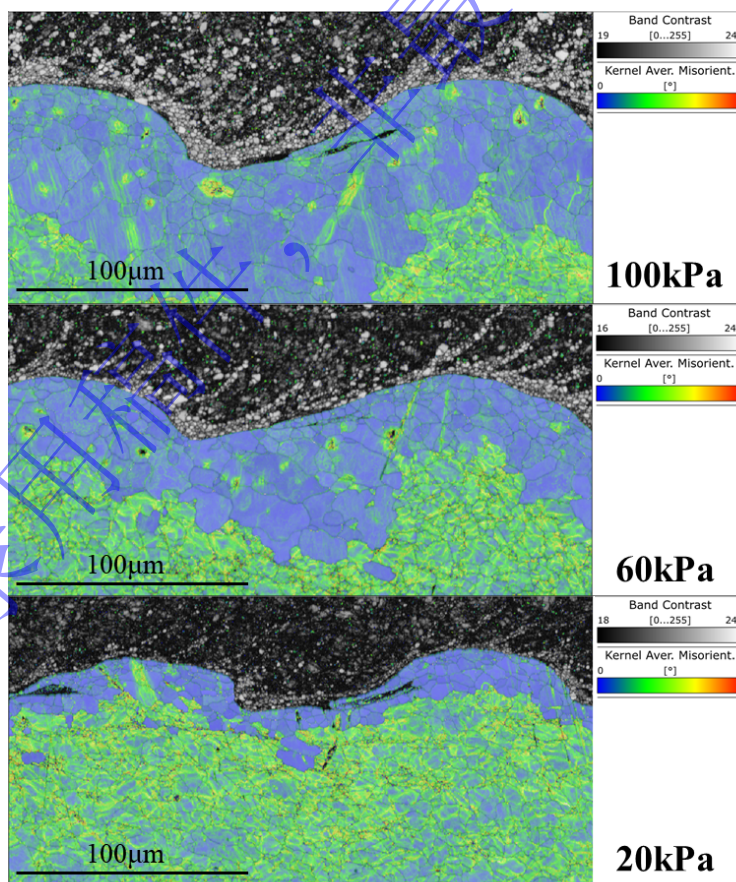


图 19 不同真空度下焊接界面退火后钢侧 KAM 图

Fig.19 Kernel average misorientation (KAM) maps of the steel side after annealing at different vacuum levels

爆炸与冲击
Explosion and Shock Waves

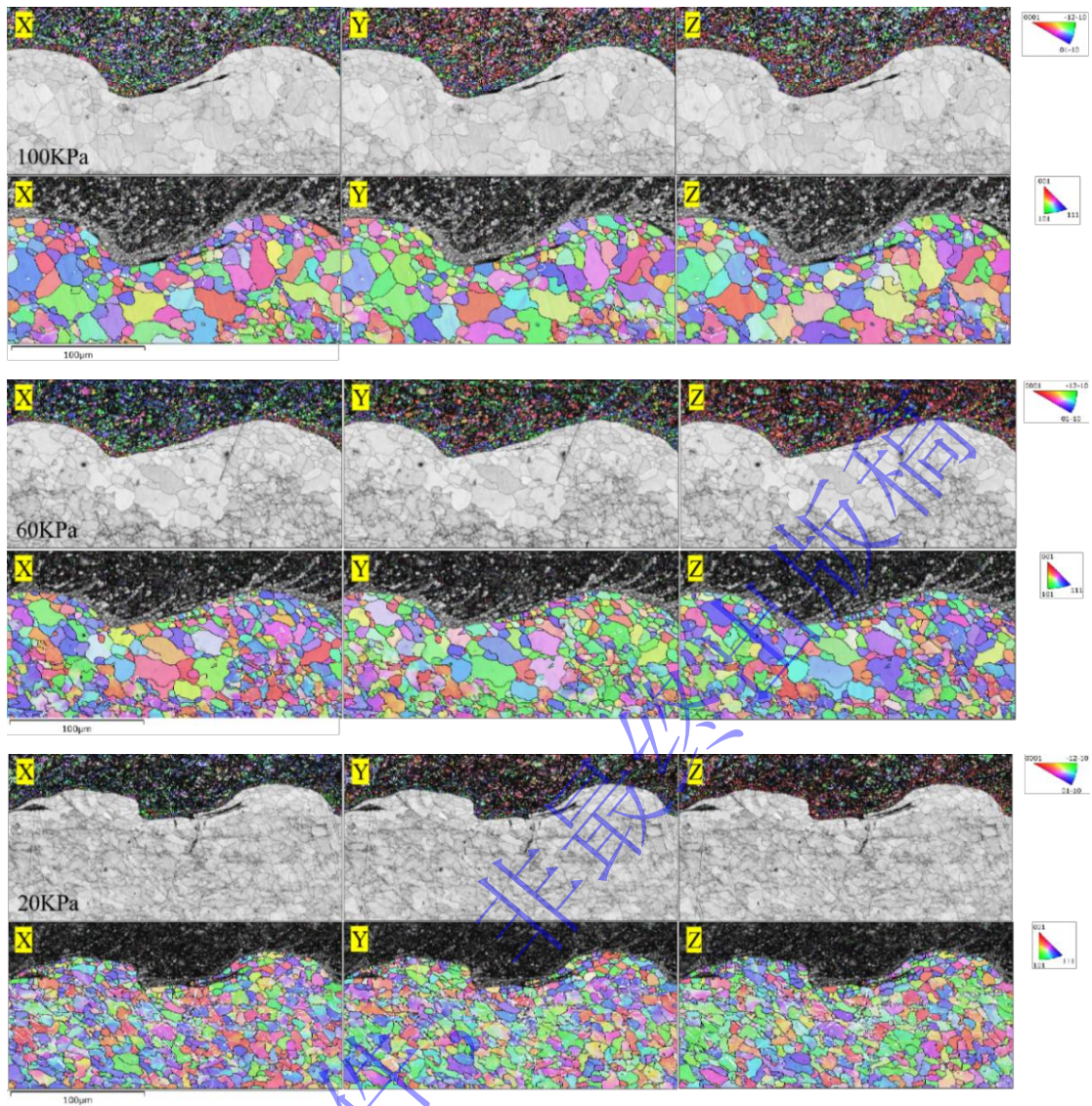


图20 不同真空度下焊接界面退火后 BC-IPF-GB 图

Fig.20 Overlaid band contrast, inverse pole figure (IPF), and grain boundary (GB) maps of the welded interface after annealing at different vacuum levels

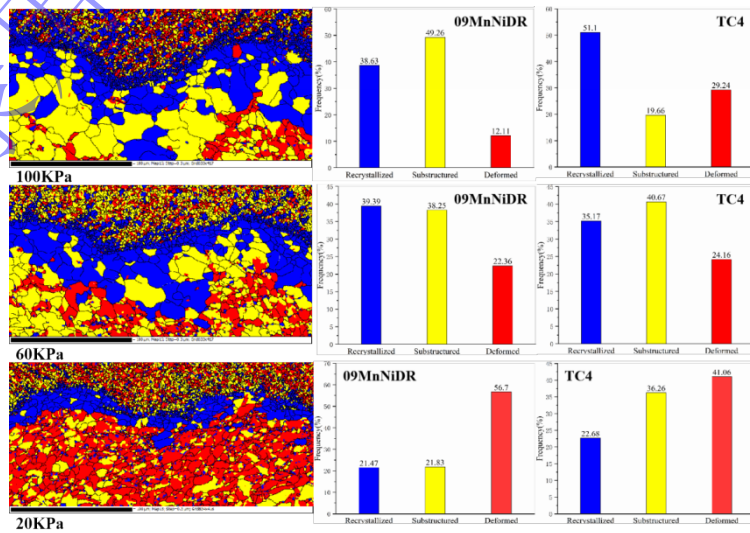


图 21 不同真空度下焊接界面退火后重结晶统计图

Fig.21 Recrystallization statistics of the welded interface after annealing at different vacuum levels

3.6 显微硬度分析

为定量评估界面微区的力学性能，对 20 kPa、60 kPa、100 kPa 环境下制备的复合板进行了显微硬度测试。图 22 展示了垂直于波形界面的硬度分布结果。界面附近的硬度远超母材，这说明爆炸焊接过程中发生了剧烈的塑性变形和加工硬化^[25, 26]。真空环境对界面硬度与变形行为的影响显著。此外真空度对硬度分布影响显著：100 kPa 条件下不仅界面峰值硬度最高（486.66 HV），其整体硬度水平在整个测试区间内也整体性地高于高真空样品；随着真空度提高，硬度曲线整体下移，60 kPa 与 20 kPa 的界面峰值硬度分别降至 455.09 HV 与 441.39 HV。结合前述 EDS 与金相分析可知，该变化趋势主要源于界面微观结构的差异。界面硬度的显著增加主要归因于形成了高硬度但脆性较大的钛-铁金属间化合物层。100 kPa 条件下最厚的熔融层生成了最多的此类化合物，导致其硬度峰值最高。而随着真空度提高，熔融层减薄，生成的脆性化合物总量减少，相应地表现为界面硬度的系统性降低。由此可见，真空环境（尤其是 20 kPa）通过抑制过量的界面熔化与脆性相生成，在保证界面强化的同时，有效改善了其韧性，这预示着高真空下的焊接界面可能具有更可靠的综合力学性能。

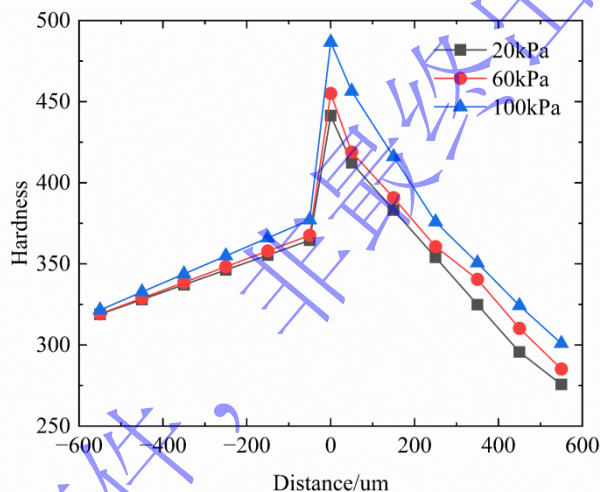


图 22 显微硬度结果

Fig.22 Microhardness results

4. 结论

本研究系统比较了 20kPa、60kPa（真空）与 100kPa（常压）环境下 TC4/09MnNiDR 钢复合板的界面微观结构及低温力学性能。得到的主要结论如下：

(1) 真空环境显著优化了界面结合质量。随着真空度提高，界面波形更为细小规则连续，熔融层厚度减薄，界面氧化物与气孔等缺陷显著减少，并有效抑制了脆性金属间化合物的过度形成，最终体现为界面脆性的降低与显微硬度的整体性下降。

(2) EBSD 分析表明，真空条件下界面区域晶粒细化程度更高，高角度晶界比例增加，且局部应变分布（KAM）更为均匀，表明真空环境促进了动态再结晶过程，提升了界面微观结构的完整性。

(3) 在 -70℃ 低温环境下，真空焊接接头表现出更优异的力学性能。20kPa、60kPa、100kPa 下拉强度分别为 880MPa，911MPa，867MPa；冲击吸收能量分别为 17.5236J、10.2455J 和 6.4457J；弯

曲强度分别为 1469MPa, 1350MPa, 1167MPa, 真空爆炸焊接成功制备出了界面结合强度显著优于母材、强韧性匹配卓越的 TC4/09MnNiDR 钢复合板。

(4) EPMA 分析表明, 界面熔岛区域主要由 Fe 和 Ti 元素组成, 焊缝区域成分稳定, Ti 与 Fe 原子比例接近 1:1 或 2:1, 表明界面主要形成 TiFe 与 TiFe₂金属间化合物。真空环境对界面化合物分布的优化, 是改善界面结合质量的重要微观机制。

综上所述, 真空爆炸焊接通过减少氧化和界面缺陷、促进再结晶和优化化合物分布, 显著提升了 TC4/09MnNiDR 钢复合板的界面结合质量和低温力学性能, 为高性能低温用 TC4/09MnNiDR 钢复合材料的制备提供了理论依据和工艺方向。

参考文献

- [1] 李军, 李亚, 韩刚, 等. 爆炸金属复合材料在低温领域的应用[J]. 材料开发与应用, 2022, 37(05): 99-102. DOI: 10.19515/j.cnki.1003-1545.2022.05.005.
LI J, LI Y, HAN G, et al. Application of explosive metal composites in the cryogenic field[J]. Development and Application of Materials, 2022, 37(05): 99-102. DOI: 10.19515/j.cnki.1003-1545.2022.05.005.
- [2] ZHOU H, SHAO F, ZHANG K, et al. Axial Compression Bearing Performance of Large-Scale Explosively Welded TA10 Titanium Alloy/6061 Aluminum Alloy Composite Pipes[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 216. DOI: 10.1016/j.tws.2025.113629.
- [3] 杜青林, 亢淑梅, 李顺涛. 超低温高锰钢焊接技术发展及在 LNG 储罐中的应用[J]. 科技创新与应用, 2021, (11): 40-43. DOI: 10.19981/j.cn23-1581/g3.2021.11.009.
DU Q L, KANG S M, LI S T. Development of cryogenic high-manganese steel welding technology and its application in LNG storage tanks[J]. Technology Innovation and Application, 2021(11): 40-43. DOI: 10.19981/j.cn23-1581/g3.2021.11.009.
- [4] 郭伟, 蔡艳, 华学明. LNG 用低温高锰钢及其焊接技术发展[J]. 电焊机, 2020, 50(11): 7-11+142. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2303.2020.11.002.
GUO W, CAI Y, HUA X M. Development of cryogenic high-manganese steel for LNG and its welding technology[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(11): 7-11+142. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2303.2020.11.002.
- [5] CHEN X, GUO A, DONG H, et al. The properties of high toughness, low-temperature -70°C steel 09MnNiDR[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1999, 76(1): 13-17. DOI: 10.1016/S0308-0161(98)00110-0.
- [6] LI T, LEI Y, CHEN L, et al. Advances in mechanism and application of diffusion bonding of titanium alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2025, 337: 118736. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2025.118736.
- [7] ARDALANI A, NAFFAKH-MOOSAVY H. Investigating the microstructure and mechanical properties in furnace brazing Ti-6Al-4V to 17-4 PH stainless steel dissimilar joint with BNi-2 filler metal[J]. Journal of Advanced Joining Processes, 2024, 9: 100215. DOI: 10.1016/j.jajp.2024.100215.
- [8] ÇAM G, MISTIKOGLU S. Recent Developments in Friction Stir Welding of Al-alloys[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6): 1936-1953. DOI: 10.1007/s11665-014-0968-x.
- [9] HUO K, HAN P, WANG W, et al. Role of intermetallic compounds in the fracture of double-sided friction stir welded titanium-steel clad plates[J]. Materials Characterization, 2025, 221: 114757. DOI: 10.1016/j.matchar.2025.114757.
- [10] DE BRIBEAN GUERRA A, FERREIRA T, BOLFARINI C, et al. Air carbon arc gouging and submerged-arc welding: Insights into sensitization and mechanical behavior of AISI 2205 duplex stainless steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 6196-6218. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.04.273.
- [11] JANDAGHI M R, SABOORI A, KHALAJ G, et al. Microstructural Evolutions and its Impact on the Corrosion

- Behaviour of Explosively Welded Al/Cu Bimetal[J]. *Metals*, 2020, 10(5). DOI: 10.3390/met10050634.
- [12] YANG M, CAO C, WANG J. Fabrication of high-quality platinum coating using explosive welding technology and its microstructure evolution mechanisms[J]. *Materials & Design*, 2023, 235: 112372. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112372.
- [13] CARVALHO G H S F L, GALVÃO I, MENDES R, et al. Explosive welding of aluminium to stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 262: 340-349. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2018.06.042.
- [14] 李晓杰, 王宇新, 王小红, 等. 爆炸焊接基复板间隙中的气体冲击波[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(07): 161-172. DOI:10.11883/bzycj-2020-0197
- LI X J, WANG Y X, WANG X H, et al. Gas shock wave in base plate gap during explosive welding[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(07): 161-172. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0197.
- [15] 周德政, 李晓杰, 王小红, 等. 覆土真空爆炸容器内部载荷及动态响应分析[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(10): 113-124. DOI:10.11883/bzycj-2023-0455.
- ZHOU D Z, LI X J, WANG X H, et al. Internal load and dynamic response analysis of earth-covered vacuum explosion vessel[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(10): 113-124. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0455.
- [16] DING Y, WEN D, WANG X, et al. Interface evolution and mechanical properties of Al/Ta laminated composites fabricated by vacuum-embedded diffusion welding[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2025, 133: 107302. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2025.107302.
- [17] LI X, ZHANG T, DAI X, et al. Hazardous effects and microstructure of explosive welding under vacuum environment[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 130(7-8): 3741-3754. DOI: 10.1007/s00170-023-12892-y.
- [18] 汪泉, 胡程, 谢守冬, 等. 负压条件对 T2/Q235 爆炸焊接复合板界面的影响[J]. *火炸药学报*, 2024, 47(01): 64-71. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202306020.
- WANG Q, HU C, XIE S D, et al. Effect of negative pressure conditions on the interface of T2/Q235 explosive welding composite plate[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2024, 47(01): 64-71. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.202306020.
- [19] 李雪交, 孙标, 张文喆, 等. Mg/Al 真空爆炸焊接微观形貌及力学性能[J]. *高压物理学报*, 2024, 38(06): 68-78. DOI: 10.11858/gywlb.20240793.
- LI X J, SUN B, ZHANG W Z, et al. Microstructure and mechanical properties of Mg/Al vacuum explosive welding[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(06): 68-78. DOI: 10.11858/gywlb.20240793.
- [20] ZHU G, GUO H, ZENG X, et al. Study on the microstructure and mechanical properties of aluminum-steel composite joints explosively welded in vacuum or in air[J]. *Materials Today Communications*, 2025. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2025.113417.
- [21] YANG M, MA H, SHEN Z. Study on self-restrained explosive welding with high energy efficiency[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 99(9): 3123-3132. DOI: 10.1007/s00170-018-2600-y.
- [22] ZHOU Q, LIU R, ZHOU Q, et al. Effect of microstructure on mechanical properties of titanium-steel explosive welding interface[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 830. DOI: 10.1016/j.msea.2021.142260.
- [23] 梁汉良, 罗宁, 陈彦龙, 等. TA2/AZ31B/2024Al 爆炸焊接复合板界面微观结构特征及其动态力学性能[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(04): 141-158. DOI:10.11883/bzycj-2023-0367.
- LIANG H L, LUO N, CHEN Y L, et al. Interfacial microstructure characteristics and dynamic mechanical properties of TA2/AZ31B/2024Al explosive welding composite plate[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(04): 141-158. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0367.
- [24] CHU Q, ZHANG M, LI J, et al. Experimental and numerical investigation of microstructure and mechanical behavior of titanium/steel interfaces prepared by explosive welding[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2017, 689: 323-331.

DOI: 10.1016/j.msea.2017.02.075.

- [25] CHU Q L, ZHANG M, LI J H, et al. Influence of vanadium filler on the properties of titanium and steel TIG welded joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 293-304. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.06.018.
- [26] LEI X-L, DING W-H, LU X-X, et al. Interfacial modification of titanium/steel composites and its effect on the growth pattern of Fe-Ti compounds[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 109289.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109289>.
- [27] ZHOU Q, LU H, LAN X, et al. Anisotropy in microstructure and shear properties of TA2/Q235 explosive welding interfaces[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 6472-6491. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.07.080.

录用稿件，
非最终出版稿