

引文格式: 张世伟, 柴禄, 张博贤, 等. Invar 钢/06Cr19Ni10 钢激光焊与 TIG 焊组织和性能[J]. 焊接学报, 2025, 46(11): 28 – 35. ZHANG Shiwei, CHAI Lu, ZHANG Boxian, *et al.* Microstructure and properties of Invar steel/06Cr19Ni10 steel by laser welding and TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2025, 46(11): 28 – 35.



Invar 钢/06Cr19Ni10 钢激光焊与 TIG 焊组织和性能

张世伟, 柴禄, 张博贤, 刘颖, 巩水利

(中国航空制造技术研究院, 航空焊接与连接技术航空科技重点实验室, 北京, 100024)

摘要: 为了获得良好的 Invar 钢 (4J36) 与 06Cr19Ni10 钢异种材料焊接接头, 系统对比了激光焊与 TIG 焊的成形、组织及力学性能特性. 采用激光焊 (功率 2 700 W, 速度 1.2 m/min) 和 TIG 焊 (电流 65 ~ 75 A, 电压 12 V) 工艺, 分析焊缝形貌、显微组织、硬度分布及拉伸、弯曲、冲击性能. 结果表明, 两种工艺均获得无缺陷焊缝, 激光焊接头因高冷却速率形成细密的柱状晶, 显微硬度 (140 ~ 150 HV) 高于 TIG 焊 (约 121 HV); 接头的拉伸强度 (431 MPa) 为 Invar 钢母材的 95% 以上, 断裂发生于 Invar 钢母材区, 优于 TIG 焊 (395 MPa, 断裂于焊缝); 两种焊接接头的弯曲测试均满足 180° 无裂纹, 冲击吸收能量激光焊 (26.1 J) 大于 TIG 焊 (25.5 J); 细晶组织与断口韧窝特征表明, 激光焊综合性能更优, 为航空异种材料焊接提供数据支撑和理论基础.

创新点: (1) 系统对比激光焊与 TIG 焊两种工艺差异, 解析异种材料焊缝组织演化和性能规律.
(2) 根据非平衡凝固工艺调控机理, 揭示了激光焊超快冷却细化晶粒, 强化接头综合性能.
(3) 基于 Griffith 理论和细晶强化理论, 阐述了微观组织与冲击性能内在关联.

关键词: Invar 钢; 不锈钢; 异种材料焊接接头; 焊缝成形; 组织和性能

中图分类号: TG 444.4; TG 456.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20250426001

Microstructure and properties of Invar steel/06Cr19Ni10 steel by laser welding and TIG welding

ZHANG Shiwei, CHAI Lu, ZHANG Boxian, LIU Ying, GONG Shuili

(Aeronautical Key Laboratory for Welding and Joining Technologies, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing, 100024, China)

Abstract: To obtain good dissimilar material welded joints between Invar steel (4J36) and 06Cr19Ni10 steel, the forming characteristics, microstructure, and mechanical properties of laser welding and TIG welding joints were systematically compared. Laser welding (power: 2 700 W, speed: 1.2 m/min) and TIG welding (current: 65–75 A, voltage: 12 V) were adopted, and the weld morphology, microstructure, hardness distribution, tensile properties, bending properties, and impact energy were analyzed. Results indicate that both processes produce defect-free welds. Laser-welded joints form fine columnar crystals due to the high cooling rate, with a microhardness of 140–150 HV, which is higher than that of TIG-welded joints of approximately 121 HV. The tensile strength of laser-welded joints is 431 MPa, accounting for over 95% of the Invar steel base metal, with fractures occurring in the Invar steel base metal zone. This outperforms TIG-welded joints, which have a tensile strength of 395 MPa and fracture in the weld zone. Both welded joints pass the 180° bending test without cracks. The impact absorption energy of laser-welded joints (26.1 J) is higher than that of TIG-welded joints (25.5 J). The fine-grained microstructure and ductile fracture dimple characteristics indicate that laser-welded joints have better comprehensive performance. This study provides data support and a theoretical foundation for the welding of dissimilar materials in aviation applications.

Highlights: (1) Differences between laser welding and TIG welding processes were systematically compared, and the microstructure evolution and performance mechanisms of dissimilar material welds were analyzed.

(2) Based on the regulation mechanism of non-equilibrium solidification, this study revealed that ultra-fast cooling in laser welding refined grains and enhanced the comprehensive performance of the joints.

(3) Based on Griffith theory and grain refinement strengthening theory, the intrinsic correlation between microstructure and impact properties was elaborated.

Key words: Invar steel; stainless steel; dissimilar material welded joint; weld morphology; microstructure and property

0 序言

随着现代工业对高性能材料的需求不断增加, 异种材料的焊接技术逐渐成为研究热点. Invar 钢以其极低的热膨胀系数被广泛应用于精密仪器和航空航天领域^[1-2], 而不锈钢则因其优异的强度和耐腐蚀性也占据重要地位^[3]. 然而, 两者物理和化学性质差异显著, 热膨胀系数、熔点和冶金相容性等问题使得异种材料焊接面临巨大挑战. 文中试验不仅为高端装备制造提供技术支持, 还为异种材料连接技术的发展提供理论依据, 具有重要的工程应用价值和学术意义^[4].

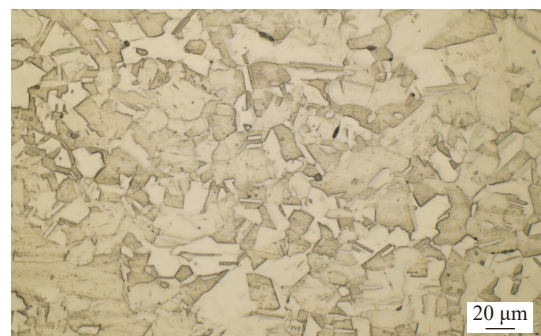
在 Invar 钢或者不锈钢异种材料焊接领域, 研究学者已开展了诸多研究, 并取得了一定成果. 研究表明, Invar 钢与不锈钢因化学成分、物理性能及热导率等方面的显著差异^[5-6], 导致焊接过程中易产生不均匀的热应力, 进而引发焊缝及热影响区出现裂纹、变形等问题^[3, 7]. 为解决这一问题, 研究者们尝试了多种焊接方法和工艺参数优化, 如采用过渡层法缓解材质差异带来的焊接问题^[6, 8], 以及通过调整焊接工艺参数优化焊缝组织^[9], 减少焊接过程中的热应力和焊接变形^[10-11]. 激光焊 (laser welding) 具有能量密度高, 焊接变形小, 材料相容性好等特点^[12-13], 对于异种材料焊接具有很大的潜力. 葛瑞荣等人^[14]采用手工钨极氩弧焊 (TIG 焊) 对不锈钢—Invar 钢进行焊接试验, 虽然接头抗拉强度较高, 但并未对不同焊接工艺下的组织和性能进行深入探讨.

研究学者多聚焦 Invar 钢与不锈钢异种材料焊接的特定方法、工艺参数优化及部分性能, 缺乏不同焊接方法接头组织和性能的系统对比, 文中针对两种焊接方法焊接接头, 开展接头焊缝成形、组织特征、硬度分布和拉伸性能的系统对比, 推动异种材料焊接技术在航空领域的应用.

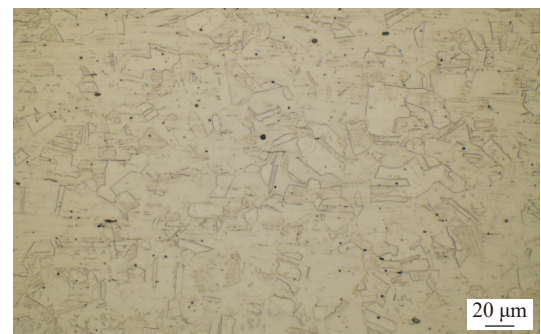
1 试验方法

采用的 4J36 合金 (对应国际牌号 Invar 36) 是

一种典型低膨胀 Fe-Ni 合金, Ni 元素含量约 36%, 辅以少量碳 C, Mn 和 Si 等元素. 显微组织以单一 γ 相为主, 呈现均匀的等轴晶结构, 晶界清晰且无显著析出相. 其核心特性是超低热膨胀系数 (室温至 300 °C 内接近 $1.5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), 在宽温域内保持尺寸稳定性, 同时兼具良好加工性和焊接性, 主要应用于精密仪器及航空航天领域, 如卫星光学支架、液化天然气储罐、航空模具等, 通过抵消温度应力确保长期可靠性. 06Cr19Ni10 钢 (应用最广的 304 不锈钢, 简称 304SS) 含 18% 铬、8% 镍, 属奥氏体不锈钢, 显微组织显示为单相奥氏体, 晶粒尺寸较为均匀, 少量奥氏体晶粒呈等轴晶状, 具有耐腐蚀、耐高温、易加工成形及无磁性特点, 广泛用于精密仪器及航空航天领域, 如储罐、管道及化工容器等. 母材的微观组织如图 1 所示, 母材及焊丝的化学成分见表 1.



(a) Invar 钢母材



(b) 304 不锈钢母材

图 1 两种母材的微观组织

Fig. 1 Microstructure of two types of base metals. (a) Invar steel base metal; (b) 304 stainless steel base metal

表1 母材和焊丝的化学成分(质量分数, %)
Table 1 Chemical composition of the base and filler metals

材料	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S	N	Fe
06Cr19Ni10	≤0.08	18.0~20.0	8.0~11.0	≤2.0	≤1.0	≤0.04	≤0.03	≤0.10	余量
4J36合金	<0.02	<0.10	36.2	0.3	0.12	<0.02	<0.02	—	余量
焊丝	≤0.03	—	36.2	2.56	—	<0.004	<0.003	—	余量

试板尺寸为 120 mm × 60 mm × 3 mm, 激光焊采用库卡机器人控制的 IPG 激光器进行对接试验, 如图 2(a) 所示. 其中激光器为 IPG YLS. 3kW 光纤激光器, 波长为 1.08 μm, 焊缝间隙控制在 0 ~ 0.1 mm, 焊接工艺参数为激光功率 2 700 W, 焊接速度 1.2 m/min, 离焦量 0, 激光倾角 9°, 如图 2(c) 所示. TIG 焊使用的是 Miller 焊机, TIG 焊接头形式如图 2(b) 所示, 坡口角度为 60°, 钝边为 1 mm, 间隙为 1 mm, 焊前清除焊缝附近的污染物. 采用前置焊丝, 焊丝与板材夹角为 45°, 采用液桥过渡, 如图 2(d) 所示. 焊接材料为 4J36 焊丝. 焊接电压为 12 V, 焊接电流为 65 ~ 75 A, 保护气体为 99.99% 氩气, 流量为 15 L/min.

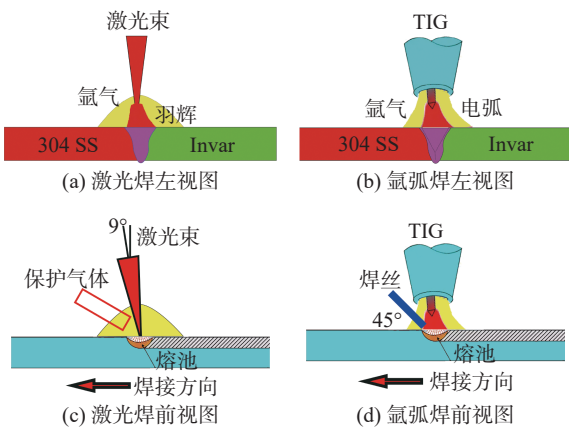
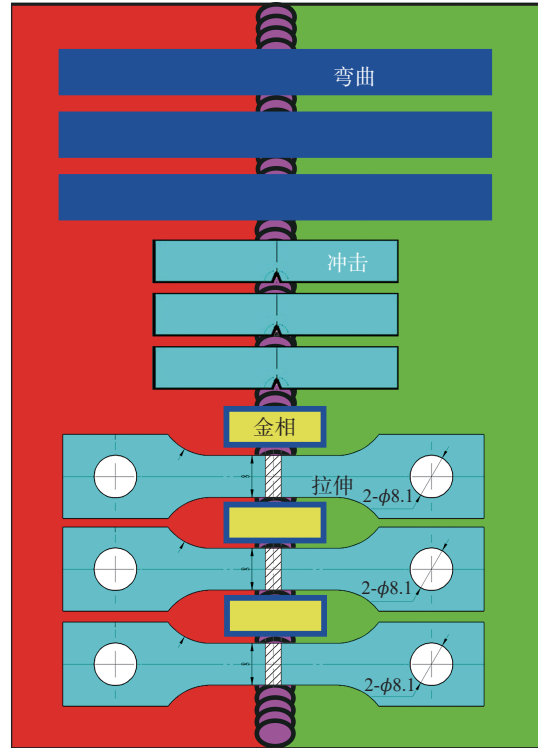


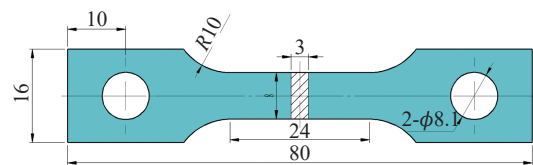
图2 激光焊和 TIG 焊试验示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laser welding and TIG welding test. (a) left view of laser welding; (b) left view of TIG welding; (c) front view of laser welding; (d) front view of TIG welding

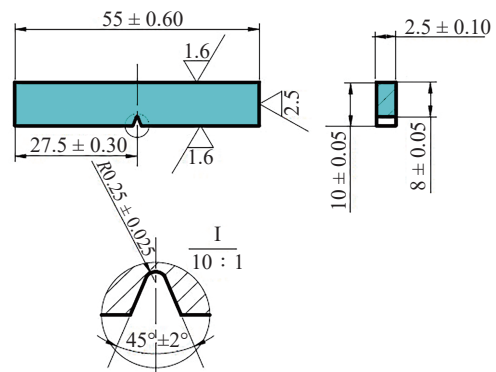
焊接完成后, 在焊缝区域截取金相、弯曲、冲击及室温拉伸试样, 取样位置和数量, 如图 3 所示. 采用 Olympus 光镜及 JSM-7900F 扫描电镜对焊接接头进行观察, Zwick-Z100 万能试验机上进行拉伸试验, 加载速率为 1 mm/min, 试样尺寸如图 3(b) 所示. 在数显维氏硬度仪进行硬度测试, 相关参数为间距 0.3 mm, 载荷 300 g, 保持 15 s. 在室温下测试焊接接头的冲击与弯曲性能, 其中弯曲试样为 80 mm × 10 mm × 3 mm, 冲击试样为 55 mm ×



(a) 取样位置



(b) 拉伸试样尺寸



(c) 冲击试样尺寸

图3 取样位置及试件尺寸(mm)

Fig. 3 Sampling location and specimen size. (a) sample sampling location; (b) dimensions of the tensile test sample; (c) dimensions of the impact test sample

10 mm × 2.5 mm, 如图 3(c) 所示, 金相试样的尺寸为 16 mm × 6 mm × 3 mm, 采用 SEM 进行观察拉伸和冲击断口形貌。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝成形

焊接工艺参数为激光功率 2 700 W, 离焦量 0, 焊接速度 1.2 m/min 时, Invar/304 不锈钢焊接接头纹路致密, 且周期一致, 宏观形貌良好, 无肉眼可见的飞溅和裂纹等, 同样的, TIG 焊也可以获得鱼鳞纹均匀连续焊缝表面质量, 且无飞溅和裂纹, 通过 X 射线探伤可知, 焊缝内部无裂纹、气孔和未焊透等缺陷, 如图 4 所示, 这表明采用两种焊接工艺均可以获得良好的焊缝成形, 即 Invar/304 不锈钢异种材料连接焊接性良好。

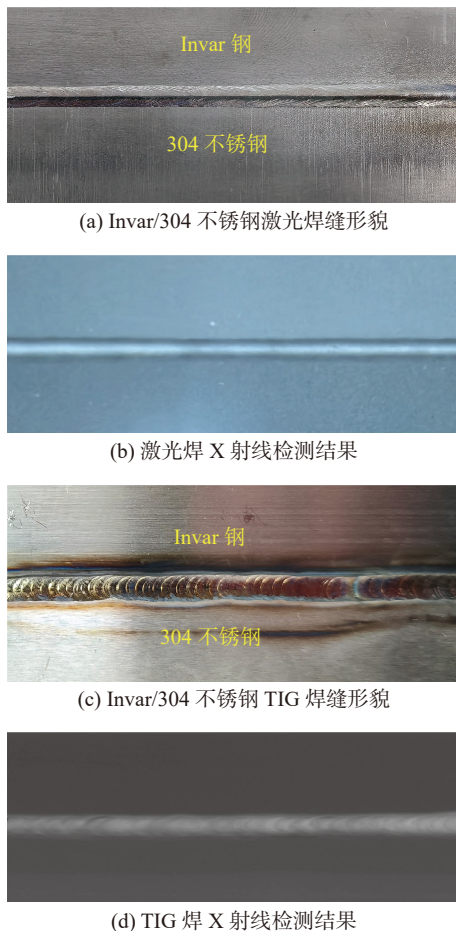


图 4 Invar/304 不锈钢焊缝形貌及 X 射线检测结果
Fig. 4 Invar/304 stainless steel welded morphology and X-ray inspection results. (a) morphology of laser-welded Invar/304 stainless steel dissimilar joints; (c) X-ray results of laser welded joints; (c) morphology of TIG welded Invar/304 stainless steel dissimilar joints; (d) X-ray results of TIG welded joints

2.2 接头微观组织

激光焊接头不同区域的显微组织, 如图 5 所示. 激光焊接头因高能量密度 ($>10^6$ W/cm²) 和快速冷却 ($>10^3$ °C/s) 特性^[15-16], 其热影响区极窄, 与母材相比, 晶粒发生了略微粗化, 奥氏体未发生再结晶; 焊缝区因非平衡凝固加剧, 外延生长方向性强, 呈现典型的柱状晶结构. Invar 钢一侧的 HAZ 受焊接热循环的作用不大, 仅熔合线附近的晶粒发现了粗化, 热影响宽度约为 500 μm.

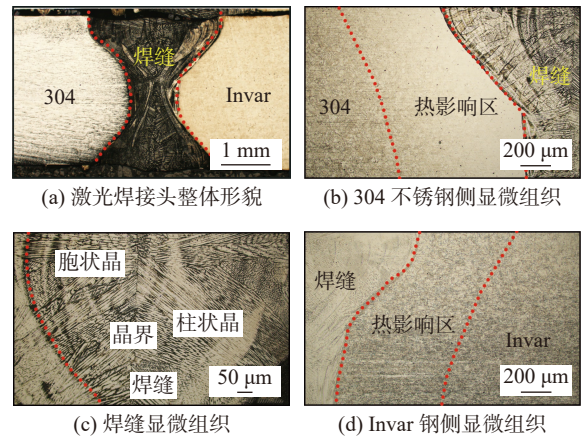


图 5 激光焊接头不同区域的显微组织

Fig. 5 Microstructure of laser welded joints in different regions. (a) overall morphology of laser welded joint; (b) microstructure of the 304 stainless steel side of laser welded joint; (c) microstructure of the weld center of laser welding joint; (d) microstructure of the Invar steel side of laser welded joint

TIG 焊接头与激光焊接头相似, 可划分为母材、热影响区及焊缝金属 3 个典型区域, 如图 6 所示. 304 母材为单一奥氏体等轴晶, 晶粒细小, 304 不锈钢一侧的热影响区受焊接热循环影响, 晶粒显著粗化, 焊缝中心呈现非平衡凝固特征, 焊缝以奥氏体为主, 主要有柱状晶和胞状晶, 柱状晶内部为胞状枝晶构成. Invar 钢一侧的热影响区受焊接热循环的作用, 不仅晶粒发现了粗化, 而且局部发生奥氏体再结晶, 形成了有取向性柱状晶。

进一步对焊缝区域的凝固组织进行分析可知, 焊缝柱状晶、胞状晶、等轴晶受成分过冷理论主导, 根据成分过冷判据, 即

$$\frac{G_L}{R} \geq \frac{-mC_0(1-k)}{D_L k} \quad (1)$$

式中: G_L 为凝固界面前沿温度梯度; R 为凝固速率; m 为液相线斜率; C_0 为溶质浓度; k 为溶质平衡分配系数; D_L 为溶质扩散系数. 图 7 为激光焊和 TIG 焊两种工艺焊缝组织形成机制, 当固液界面前沿液相

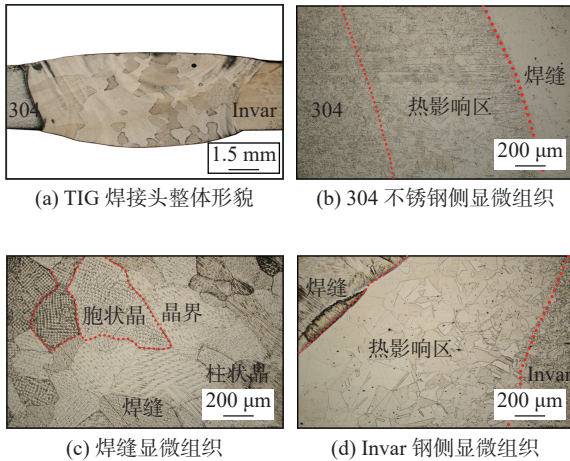


图6 TIG焊接头不同区域的显微组织

Fig. 6 Microstructure of TIG welded joints in different regions. (a) overall morphology of TIG welded joint; (b) microstructure of the 304 stainless steel side of TIG welded joint; (c) microstructure of the weld center of TIG welding joint; (d) microstructure of the Invar steel side of TIG welded joint

温度梯度 G_L 降低或凝固速率 R 增加时,焊缝内溶质富集导致液相线温度下降,形成过冷区.胞状晶出现在中等过冷度下(G_L/R 接近临界值),溶质富集引发界面失稳,形成六边形胞状结构;随着成分过冷的增大,柱状晶生长于高 D_L 区域(如熔池边缘),热流方向单一,溶质扩散充分,界面稳定性高,晶粒沿热梯度定向延伸.激光焊因凝固速率 R 极高($>10^3$ °C/s)且 G_L/R 陡峭,柱状晶占主导,柱状晶内部存在胞状组织,而TIG焊低凝固速率 R 下易形成粗大胞状晶,在枝晶间存在少量的等轴晶.

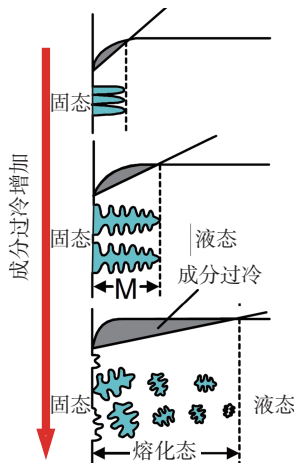


图7 激光焊与TIG焊Invar+304不锈钢焊缝组织形成机制
Fig. 7 Formation mechanism of microstructure in Invar + 304 stainless steel weld seam by laser welding and TIG welding

2.3 接头显微硬度

图8为激光焊与TIG焊Invar钢+304不锈钢

接头的显微硬度分布.图8(a)为Invar钢+304不锈钢激光焊接头横向显微硬度分布,硬度呈现典型的“L”形,硬度值从304不锈钢侧→焊缝→Invar母材,显微硬度值逐渐降低,这是因为焊丝为与Invar成分相当,硬度均低于304不锈钢的硬度值(约为218 HV),304侧热影响区的硬度值急剧下降,从218 HV降低到150 HV,这是由于热循环过程中温度1200~1400 °C的区域发生奥氏体长大,硬度显著降低,焊缝金属显微硬度位于140~150 HV之间.

图8(c)为Invar钢+304不锈钢TIG焊接头横向显微硬度分布,与激光焊接头有相似的规律,但略有不同,其表现为焊缝金属的显微硬度(约为121 HV)低于Invar母材,这是因为焊缝金属为铸态组织,而母材为轧制态,组织致密均匀.两种工艺下焊缝组织的微观硬度对比分析可知,激光焊缝金属微观硬度总体大于TIG焊缝金属,如图8(b)和图8(d)所示,这是因为激光焊热输入小、冷却速率快抑制晶粒长大,导致焊缝金属的显微硬度不同,焊接工装背部铜板进一步加快了冷却速度,导致背面硬度值略大于正面的;而TIG焊热输入大,冷却速度相对缓慢,促进晶粒粗大.

2.4 接头拉伸性能

根据国家标准GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》对激光焊和TIG焊接头的拉伸性能进行测试,两种焊接工艺焊接接头应力—位移曲线和拉伸试验结果,如图9所示,激光焊接头的抗拉强度(ultimate tensile strength, UTS)为431 MPa,达到母材Invar的95%以上,显著高于TIG焊接头(395 MPa,母材Invar的88%).激光焊接头的断裂位置均位于母材区,而TIG焊接头在焊缝处发生断裂,这与该区域微观组织粗大和显微硬度低密切相关.值得注意的是,激光焊接头的断后伸长率(26.7%)较TIG焊接头的(22.8%)也略有提高,表明其塑性变形能力更优.SEM断口形貌(图10)进一步证实,激光焊接头断口形貌以大而深韧窝(直径~15 μm)为主,表明典型韧性断裂,而TIG焊接头断口形貌以小而密的韧窝(直径~5~10 μm)为主,断裂模式也是韧性断裂,这是由于焊缝组织中主要以粗大的柱状晶有关,同时可能与焊丝成分和母材存在差异有关.

2.5 接头弯曲性能

基于国家标准GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》对TIG焊和激光焊接头进行测试,如

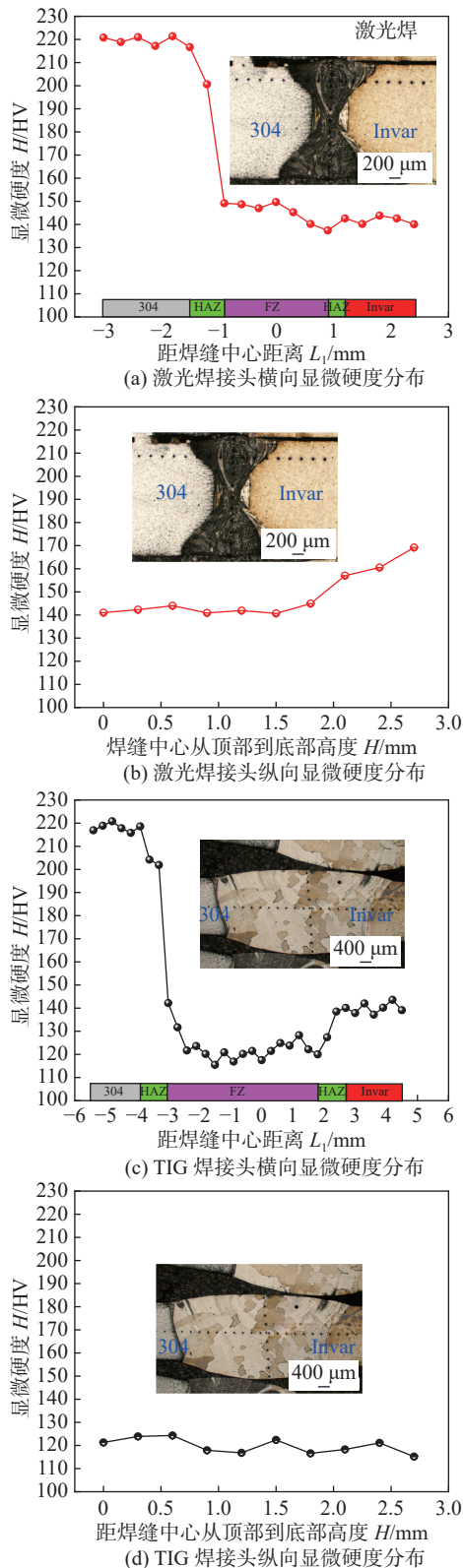


图 8 激光焊与 TIG 焊 Invar+304 不锈钢接头显微硬度分布
 Fig. 8 Microhardness distribution of Invar + 304 stainless steel joints by laser welding and TIG welding. (a) transverse microhardness distribution of laser welded joints; (b) longitudinal microhardness distribution of laser welded joints; (c) transverse microhardness distribution of TIG welded joints; (d) longitudinal microhardness distribution of TIG welded joints

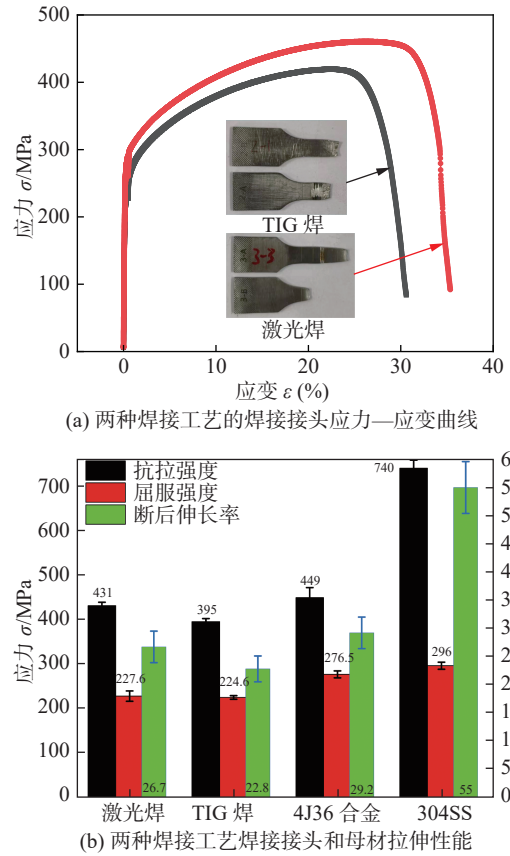


图 9 两种焊接工艺焊接接头应力—位移曲线和拉伸性能
 Fig. 9 Stress strain curves and data statistics of welded joints under two welding processes. (a) stress-strain curves of welded joints under two welding processes; (b) statistical chart of properties of welded joints and base materials

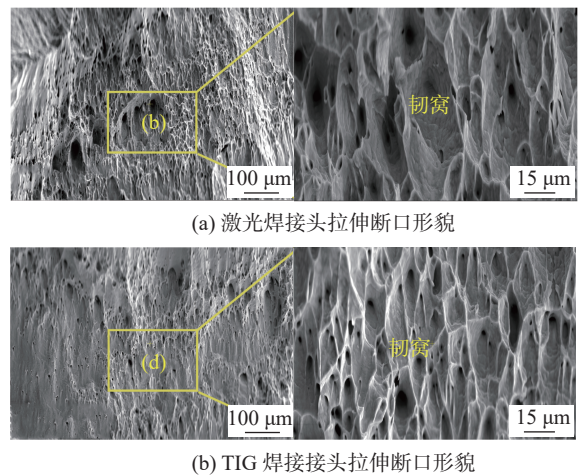


图 10 两种焊接接头的拉伸试验断口形貌
 Fig. 10 Fracture morphology of tensile test for two types of welded joints. (a) tensile fracture morphology of laser welded joints; (b) tensile fracture morphology of TIG welded joints

图 11 所示, 测试结果表明, 焊接接头的弯曲角度均大于 180° 时, 目测无裂纹, 进一步表明激光焊和 TIG 焊两种工艺下的焊接接头都具有良好的塑性。

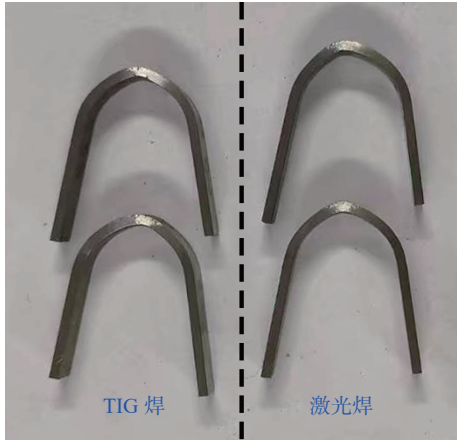


图 11 TIG 焊和激光焊接头弯曲测试结果

Fig. 11 Image of bending test results for TIG welding and laser welding joints

2.6 接头冲击性能

对母材和两种焊接接头的焊缝区域进行夏比冲击性能测试,如图 12 所示. 结果表明,冲击吸收能量由大到小依次为 304 不锈钢母材 (30.3 J ± 0.8 J)—Invar 母材 (27.1 J ± 0.3 J)—激光焊 (26.1 J ± 0.4 J)—TIG 焊 (25.5 J ± 0.5 J), 这种差异与材料微观组织及焊接热过程密切相关. 根据 Griffith 断裂理论,冲击吸收功能量 $A_K = 2E\gamma_p/\pi a$ (γ_p 为表面能, a 为缺陷尺寸, E 为). 304 不锈钢母材为奥氏体组织具有高应变硬化能力,促进位错交滑移,形成大量韧窝 (平均尺寸 ~ 5 μm). Invar 钢 (Fe-36Ni) 因 Ni 抑制 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变,保持面心立方结构,但固溶强化导致位错运动受阻,韧性略低. 焊接接头冲击吸收能量下降主要归因于焊缝区域 (FZ) 晶粒粗化,其中 TIG 焊晶粒尺寸达母材 2~3 倍 (图 6 和图 1). 根据细晶强化理论,即 Hall-Petch 效应

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}} \quad (2)$$

式中: σ_y 为屈服强度; σ_0 为材料的起始应力位错运

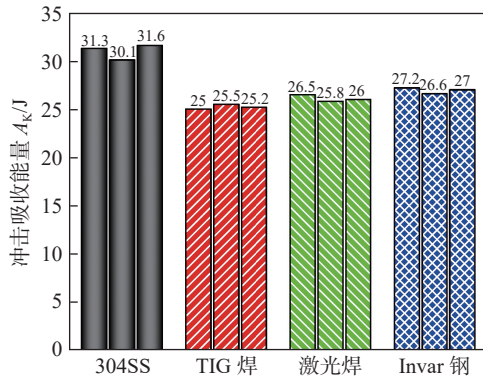
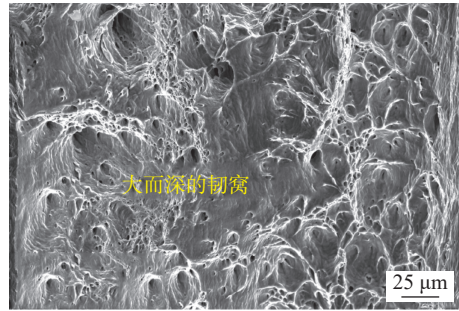


图 12 母材与两种焊接工艺焊接接头的冲击性能

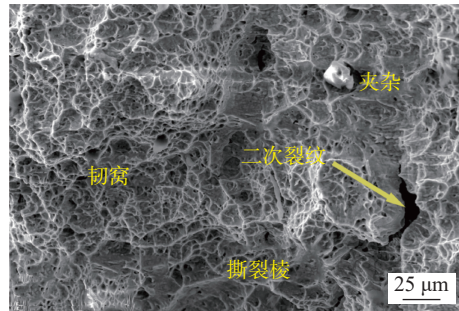
Fig. 12 Charpy impact energy of base metals and two kinds of welded joints

动常数; d 为平均晶粒直径; k_y 为强化系数. 激光焊因冷却速率快,二次枝晶间距较 TIG 焊更细小,细晶组织阻碍裂纹扩展,提高能量吸收,故冲击吸收能量略优于 TIG 焊.

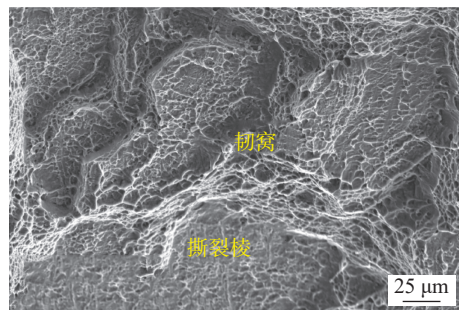
图 13 为母材与两种焊接工艺下焊接接头的冲



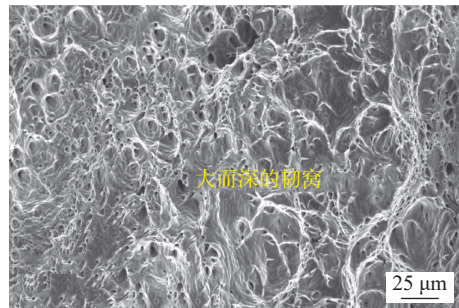
(a) 304SS 母材冲击



(b) TIG 焊接头冲击断口形貌



(c) 激光焊接头冲击断口形貌



(d) Invar 钢母材冲击断口形貌

图 13 母材与两种焊接工艺焊接接头的冲击断口形貌
 Fig. 13 Impact fracture morphology of base metals and two kinds of welded joints. (a) impact fracture morphology of 304 stainless steel; (b) impact fracture morphology of TIG welded joint; (c) impact fracture morphology of laser welded joint; (d) impact fracture morphology of Invar steel

击断面形貌。分析表明, 304 不锈钢的母材和 Invar 钢的母材冲击断面形貌均为典型韧窝断裂, 如图 13(a) 和图 13(d) 所示; TIG 焊接头出现夹杂、二次裂纹和撕裂棱等特征, 如图 13(b) 所示; 激光焊接头以韧窝形貌为主, 同时存在撕裂棱等特征, 表明产生了大量塑性变形, 如图 13(c) 所示; 而与激光焊接头相比, 由于 TIG 焊接头的粗大胞状晶组织 (图 6(c)) 易于使裂纹成核并萌生, 形成裂纹源, 促进断裂发生。

3 结论

(1) 激光焊与 TIG 焊均实现无裂纹、无气孔的高质量焊缝。激光焊因高能量密度与快速冷却形成细密柱状晶, 热影响区窄 (约为 500 μm); TIG 焊热输入较高, 晶粒粗化显著, 焊缝以胞状晶为主。

(2) 激光焊接头硬度 (140 ~ 150 HV) 高于 TIG 焊 (约 121 HV), 归因于激光焊的低热输入和快速冷却抑制晶粒粗化; 而 TIG 焊热输入大, 冷却速度相对缓慢, 促进晶粒粗大。

(3) 激光焊接头抗拉强度为 431 MPa, 为 Invar 钢母材的 95%, 断裂位于母材区, 断后伸长率为 26.7% 优于 TIG 焊 (395 MPa, 22.8%), 断裂模式均为韧性断裂; 两种焊接接头的弯曲性能均达标, 180°无裂纹。

(4) 激光焊冲击吸收能量 (26.1 J) 略高于 TIG 焊 (25.5 J), 细晶组织与韧窝形貌表明其韧性更优; TIG 焊断面存在夹杂与二次裂纹, 缺陷敏感性较高。

参考文献

- [1] YAKOUT M, ELBESTAWI M A, VELDHUIS S C. A study of thermal expansion coefficients and microstructure during selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L[J]. Additive Manufacturing, 2018, 24: 405 - 418.
- [2] LIU Z, WANG J, XU Z, *et al.* Unraveling microstructure evolution induced mechanical responses in coaxial fiber-diode laser hybrid welded Fe-36Ni Invar alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 908: 146778.
- [3] CHATTOPADHYAY A, MUVVALA G, SARKAR S, *et al.* Mitigation of cracks in laser welding of titanium and stainless steel by in-situ nickel interlayer deposition[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022, 300: 117403.
- [4] PATEL J, KUMAR M B, KAUSHIK P, *et al.* Experimental investigations and effect of parameters on friction welded AISI 304 and Invar alloys[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2024, 10(4): 3280 - 3291.
- [5] ZHOU Y, CHENG L, LI Y, *et al.* Interfacial microstructure evolution and mechanical properties in laser welded Invar alloy/TC4 dissimilar joints[J]. Intermetallics, 2024, 166: 108171.
- [6] GAO Q, JIANG X, SUN H, *et al.* Electron beam welding of 4J36 invar alloy to TC4 titanium alloy using Cu-Nb composite diffused metal interlayer[J]. Materials Letters, 2023, 352: 135172.
- [7] ZHAO J, WANG J, KANG X, *et al.* Effect of beam oscillation and oscillating frequency induced heat accumulation on microstructure and mechanical property in laser welding of Invar alloy[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 158: 108831.
- [8] ZHANG Y, JIANG X, FANG Y, *et al.* Electron beam welding of Ti-6Al-4V titanium alloy to 4J36 invar alloy using V/Fe bilayer[J]. Materials Letters, 2020, 278: 128409.
- [9] CORBACHO J L, SUÁREZ J C, MOLLEDA F. Grain coarsening and boundary migration during welding of Invar Fe-36Ni alloy[J]. Materials Characterization, 1998, 41(1): 27 - 34.
- [10] LI Y, WANG F, LIU H, *et al.* Effect of surface roughness on the performances of laser-welded Invar 36 alloy joints[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 162: 109307.
- [11] SU Y, YANG X, WU D, *et al.* Optimizing welding sequence of TIG cross-joint of Invar steel using residual stresses and deformations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 105: 232 - 245.
- [12] 彭进, 许红巧, 王星星, 等. 激光焊接过程的熔池动态行为研究[J]. 焊接学报, 2023, 44(11): 1 - 7.
PENG Jin, XU Hongqiao, WANG Xingxing, *et al.* Study on the dynamic behavior of molten pool in laser welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(11): 1 - 7.
- [13] 王徐建, 檀财旺, 何平, 等. CuCrZr/Inconel 625 异种材质合金管激光焊接工艺与接头界面组织性能[J]. 焊接学报, 2023, 44(6): 35 - 40.
WANG Xujian, TAN Caiwang, HE Ping, *et al.* Microstructure and mechanical properties of CuCrZr /Inconel 625 laser welding joints on HEPS storage ring vacuum box[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(6): 35 - 40.
- [14] 葛瑞荣, 董向群, 林培辉, 等. 不锈钢-殷钢异种金属氩弧焊接工艺及性能分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(13): 201 - 202.
GE Ruirong, DONG Xiangqun, LIN Peihui, *et al.* Analysis on argon arc welding process and properties of dissimilar metal stainless steel-Invar[J]. Hot Processing Technology, 2014, 43(13): 201 - 202.
- [15] TANMAY, ALAM Z, PANDA S S. A review on joining of dissimilar metals with highly differential thermomechanical properties[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2025, 34(10): 8219 - 8231.
- [16] HUANG W, WANG H, RINKER T, *et al.* Investigation of metal mixing in laser keyhole welding of dissimilar metals[J]. Materials & Design, 2020, 195: 109056.

作者简介: 张世伟, 博士; 主要从事金属材料的焊接与连接技术以及电弧增材制造技术研究; Email: zswht@126.com.