

钛合金扩散连接薄板的激光焊 与 TIG 填丝焊工艺研究

史吉鹏¹, 臧旭², 范雨¹, 蒋文通¹, 关峰¹, 赵兴旺¹

(¹沈阳飞机工业(集团)有限公司, 辽宁 沈阳 110034; ²空军装备部驻沈阳地区第一军事代表室, 辽宁 沈阳 110850)

摘要 针对厚度为(2.0+1.5) mm 扩散连接成形后的 TC4 钛合金的焊接技术, 开展了激光焊接和 TIG 填丝焊接的工艺研究。对两种焊接方法的接头均进行了焊后 650 °C 热处理去应力, 分析了各方法接头的微观组织, 测试了接头的力学性能, 结果显示: 采用适当的工艺, 两种焊接方法均可得到成形良好的接头; 相较于氩弧焊接, 激光焊接接头组织的晶粒更小, α' 相更多; 激光焊接剪切强度及平行于焊缝的拉伸性能高于氩弧焊接, 但弯曲强度及垂直于焊缝的拉伸性能低于氩弧焊接。

关键词 激光焊接; TIG 焊接; 钛合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20234301.018

Study of Laser Welding and TIG Filler Welding Process of Titanium Alloy Sheet with Diffusion Bonding Forming

Shi Jipeng¹, Zang Xu², Fan Yu¹, Jiang Wentong¹, Guan Feng¹, Zhao Xingwang¹

(¹Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang 110034, Liaoning, China; ²Air Force Equipment Department First Military Representative Office in Shenyang, Shenyang 110850, Liaoning, China)

Abstract Aiming at the welding technology of TC4 titanium alloy formed by diffusion bonding with a thickness of (2.0 + 1.5) mm, the laser welding and TIG filler wire welding process research were carried out. The joints of the two welding methods were subjected to post-weld heat treatment at 650 °C to relieve stress. The microstructure of the joints of each method is analyzed, and the mechanical properties of the joints are tested. Results show that the two welding methods can obtain well-formed joints with appropriate processes. Compared with argon arc welding, the crystal grains of laser welding joints are smaller, and α' phase is more. Laser welding shear strength and tensile properties parallel to the weld are higher than argon arc welding, but the bending strength and tensile properties perpendicular to the weld are lower than argon arc welding.

Key words laser welding; TIG welding; titanium alloy; microstructure; mechanical property

0 引言

随着世界各国在下一代战机的设计研制工作中, 均将更高的飞行高度与更快的飞行速度及更灵活的机动性能作为战机主要的评价指标, 战机整体的一体化成形技术与减重特性及安全性成为设计过程中必须要考虑的重要因素。因此, 当下应用最广泛的带有内置加强结构的钛合金气动蒙皮制造技术也面临新的挑战^[1]。超塑成形/扩散连接(SPF/DB)作为一种新型的带内置加强结构钛合金蒙皮的制造技术, 极大地减少了零件和工装数量, 缩短了制造周

期, 降低了制造成本, 在航空航天产品制造领域得到了广泛的应用^[2-5]。但受限于设备的制造能力, 一些大型零件难以整体一次性通过 SPF/DB 技术制造完成, 需要经过后续的材料连接技术将其拼接成所需产品外形^[6]。目前, 由于钛合金的高温化学性能极为活泼, 易产生氧化现象, 所以针对钛合金薄板钣金类零件常用的拼接方法主要有激光焊接、电子束焊接与 TIG 焊接等^[7-9]。相对于电子束焊接必须在真空环境中进行的限制, 作为高能束热源的激光焊接具有更大的工作空间, 更适合大型零件的拼接成

收稿日期: 2021-08-29; 修回日期: 2021-09-25

基金项目: 国防基础科研资助项目(JCKY2018205B023)

作者简介: 史吉鹏(1984—), 男, 博士, 工程师。研究方向为先进连接技术。E-mail: shi_jipeng@126.com

形。同时,由于 TIG 焊接具有操作简单、易实现空间任何位置焊接的特点,在零件的缺陷修复方面体现出了巨大的优势^[10-11]。然而 SPF/DB 成形后板材表面的氧化层虽然经过表面打磨清理,但难以保证将板材中的富氧层彻底清理去除从而残留在待焊零件表面,在焊接时随着熔池的流动残留在最终焊缝中,影响最终焊缝的组织特性与力学性能以及后续产品使用的安全性^[12-13]。近年来,一些学者对 SPF/DB 成形后钛合金的焊接进行了系列研究,并取得了一定的研究成果,但厚度均为 2 mm 左右,针对 SPF/DB 成形后厚度大于 3 mm 的焊接工艺鲜有研究^[14-15]。本文以航空航天常用的牌号为 TC4 钛合金扩散连接后厚度为(2.0+1.5) mm 的板材为研究对象,扩散成形后分别采用激光焊与 TIG 焊对其进行焊接,对比两种工艺焊接完成后的焊缝形貌与组织特性及力学性能,为钛合金扩散连接成形后的焊接技术提供数据支持。

1 试验材料及方法

试验首先选用厚度分别为 1.5 mm 与 2.0 mm 的 TC4 钛合金板材进行扩散连接,成形厚度为 3.5 mm 钛合金板材,而后对完成扩散连接的 3.5 mm 钛合金进行焊接成形。TC4 原材料的化学成分如表 1 所示,微观组织形貌如图 1 所示,从图中可以看出,经过高温扩散后母材的基体存在着明显

的扩散层,其组织由白色的 α 相与黑色的 β 组成晶粒细小的等轴双相组织,且该组织的基体为 α 相, β 散布在 α 相界处。原始状态时静拉伸强度为 1 070 MPa,屈服强度为 930 MPa,延伸率为 14%,剪切性能为 618 MPa,弯曲强度最大弯曲角为 42°。试片扩散连接前进行酸洗,清除板材表面氧化物与杂质,将处理干净的两板材贴合置于炉中进行扩散连接,扩散连接的参数为成形温度 900~950 °C、成形时间 30~60 min、成形压力 2~4 MPa。扩散连接成形后的板材采用激光切割制激光焊与 TIG 焊(非熔化极惰性气体保护焊)对接试片,尺寸为 150 mm×500 mm×3.5 mm,焊接前 2 h 内打磨刮削试片,使激光焊对接贴合面控制对接间隙不大于 0.1 mm,TIG 焊对接间隙为 1.5 mm,并用丙酮清洗擦拭贴合面的杂质与油污,避免焊接过程由于混入杂质引起焊接气孔等缺陷。分别采用激光焊接与 TIG 焊接对扩散成形试片进行焊接试验,由于钛合金高温化学性能极为活泼,容易产生氧化现象,导致焊缝性能下降,所以焊接过程中需要在焊缝正面安装随枪头移动的铜制保护罩进行惰性气体保护,起弧前需要提前送气 1.5 min,排尽罩中残留的空气,试验示意图如图 2 所示。TIG 焊时开单边 30°坡口,钝边高度为 1.5 mm,填充材料为与母材同成分的 TC4 焊丝。两种焊接工艺的焊接参数如表 2 和表 3 所示。

表 1 TC4 钛合金板材化学成分

Table 1 Chemical composition of TC4 titanium alloy

Element	Al	V	O	Fe	C	Ti
Mass fraction/%	5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.2	≤0.3	≤0.1	88.1~91.0

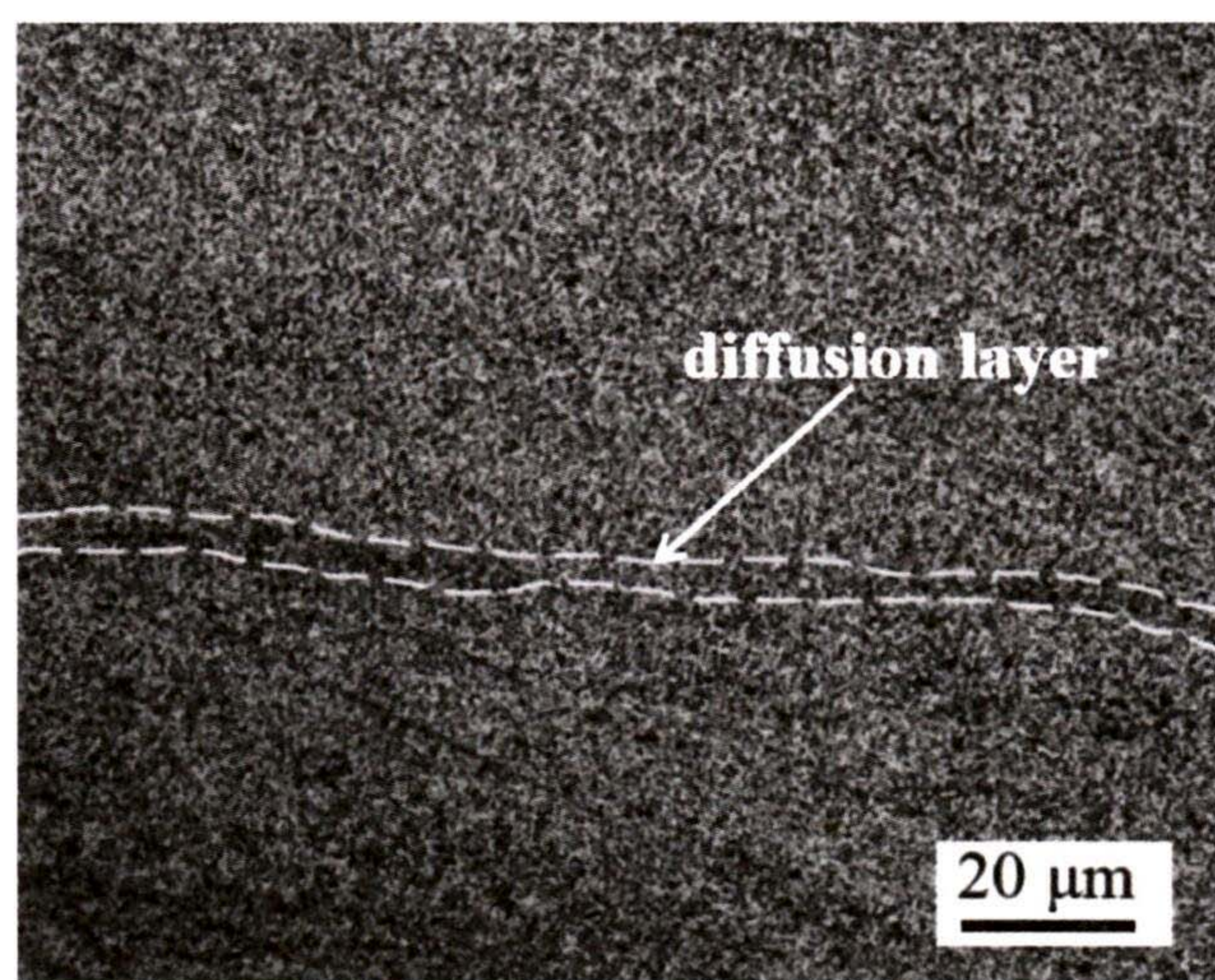


图 1 母材微观组织

Fig. 1 Microstructure of base metal

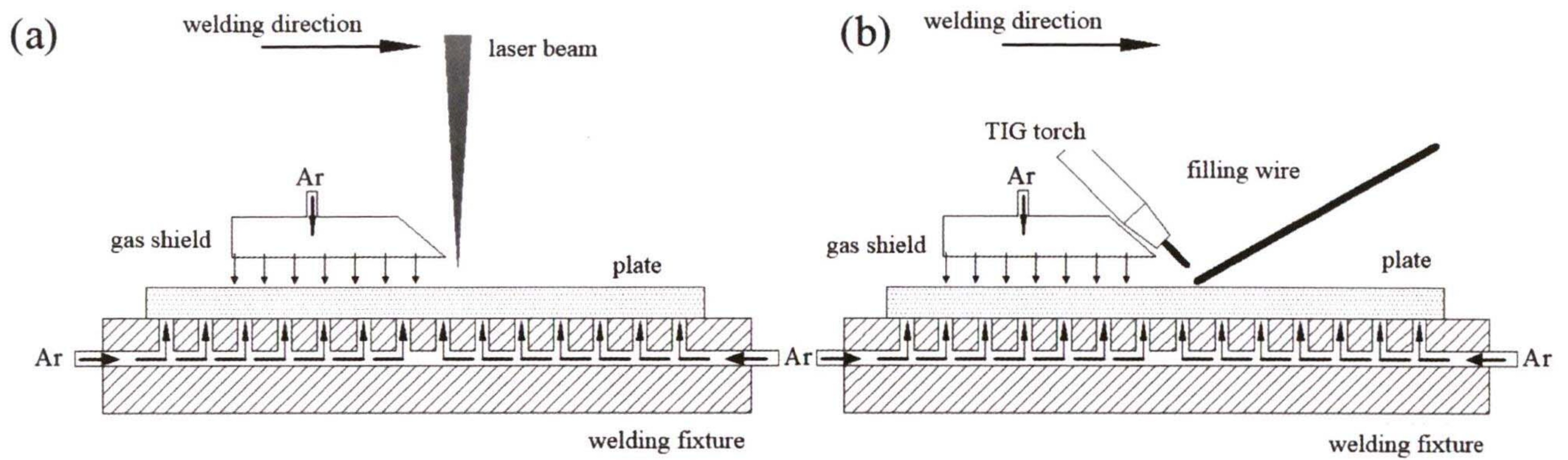


图 2 焊接试验装置示意图。(a)激光焊接；(b)TIG 焊接
Fig. 2 Schematic of welding system. (a)Laser welding; (b)TIG welding

表 2 TIG 焊接参数

Table 2 TIG welding parameters

Welding current/ A	Welding speed/ (mm · min ⁻¹)	Filling speed/ (mm · min ⁻¹)	Torch shielding gas flow/(L · min ⁻¹)	Front shielding gas flow/(L · min ⁻¹)	Back shielding gas flow/(L · min ⁻¹)
250	200	600	10	8	6

表 3 激光焊接参数

Table 3 Laser welding parameters

Laser power/ W	Welding speed/ (mm · min ⁻¹)	Defocusing amount/ mm	Front shielding gas flow/ (L · min ⁻¹)	Back shielding gas flow/ (L · min ⁻¹)
3 000	2 000	-2	20	5

焊接完成后,将两种焊接方法的焊接试片沿垂直于焊缝方向取样,通过研磨、抛光后使用 Kroll 试剂腐蚀,对焊缝各区域用光学显微镜进行金相组织观察以及显微硬度测试。同时,对两种焊接方法试片分别进行垂直焊缝与平行焊缝的拉伸与弯曲性能试片取样,以及焊缝剪切性能取样,最后对焊缝的力学性能进行测试。

2 试验结果与讨论

2.1 焊接接头成形分析

不同焊接方法完成后的焊缝横截面形貌如图 3 所示,其中(a)为 TIG 焊接,(b)为激光焊接。从图中可以看出,TIG 焊的接头区宽度明显大于激光焊接头,其中 TIG 焊缝正面半宽为 5.8 mm,背面半宽为 4.2 mm,而激光焊接明显呈现出丁字形焊缝形貌,其中上表面宽度为 3.4 mm,背面宽度为 1.1 mm。此外,对比两种焊接工艺下焊缝的焊缝区、热影响区,TIG 焊接头也均大于激光焊接头。两种焊接方法的接头焊道成形良好,没有出现气孔、夹杂等缺陷。此外,激光焊接利用表面焦点的散焦模式对焊道正面进行重熔修饰,可以有效抑制激光

焊接产生的咬边缺陷。

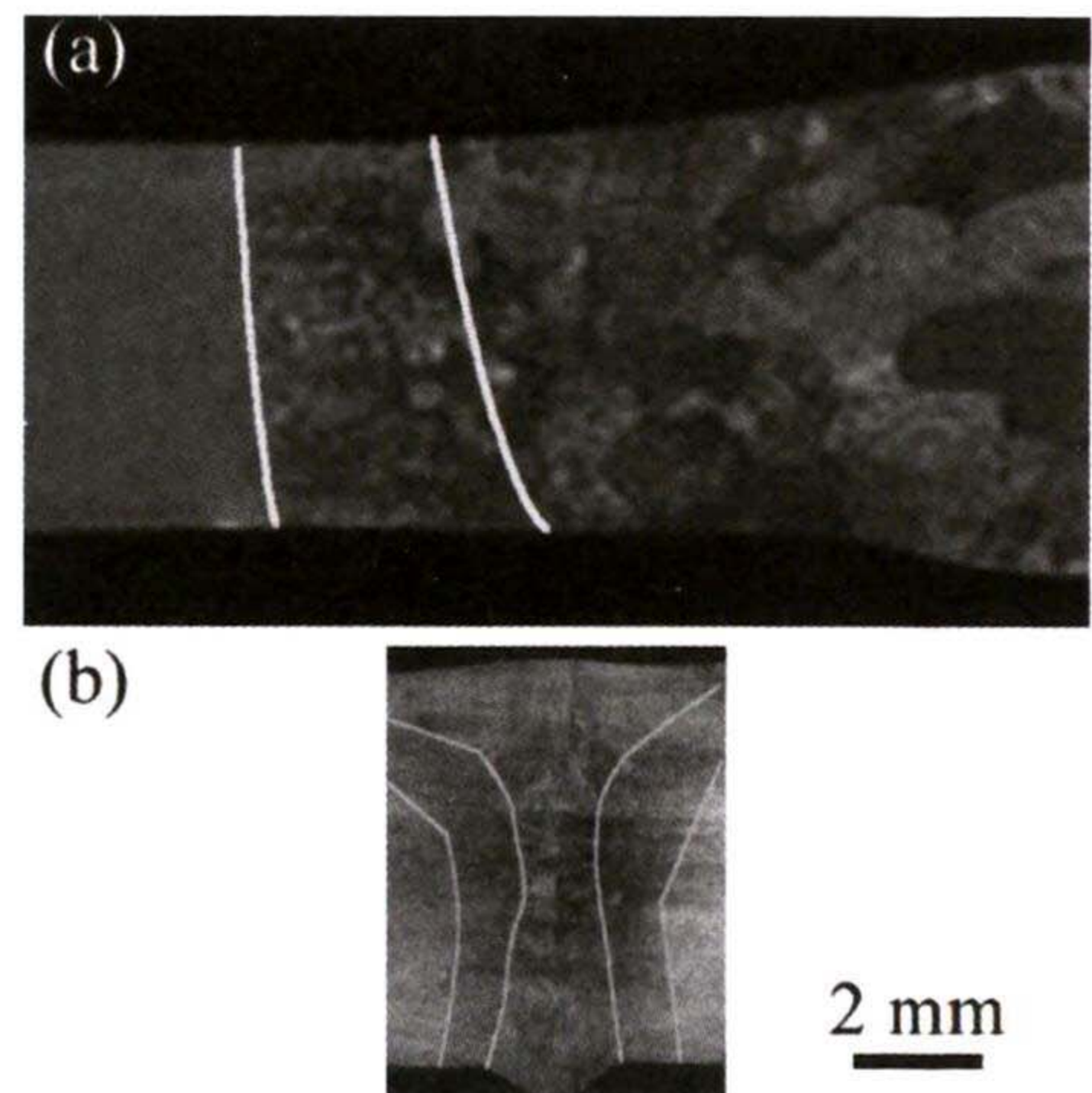


图 3 不同焊接方法接头横截面形貌。
(a)TIG 焊接;(b)激光焊接
Fig. 3 Cross-sectional morphology of joints with different welding methods
(a) TIG welding;(b) laser welding

2.2 焊接接头组织分析

对不同焊接方法的焊缝组织形貌进行分析,图 4所示为激光焊焊缝组织,图 5所示为电弧焊焊缝组织。从图中可以看出,激光焊接焊缝内部存在

明显的柱状晶,内部为纵横交错的针状马氏体结构。而晶粒主要为片状 α 、 $\alpha+\beta$ 和 α' 交错排列形成的“网篮”分布。而氩弧焊内部也是“网篮”组织,但尺度明显大于激光焊焊缝,同时还可以看出,在相同的视野范围内氩弧焊接头看不出完整的晶粒,说明氩弧焊焊缝中的晶粒尺度也远大于激光焊接,而且 α' 相也少于激光焊接。这主要是由于激光焊接的线能量明显小于氩弧焊接,因此,激光焊接的热输入较少,散热较快,相较于热输入大的氩弧焊接,更易于形成小晶粒与 α' 相。

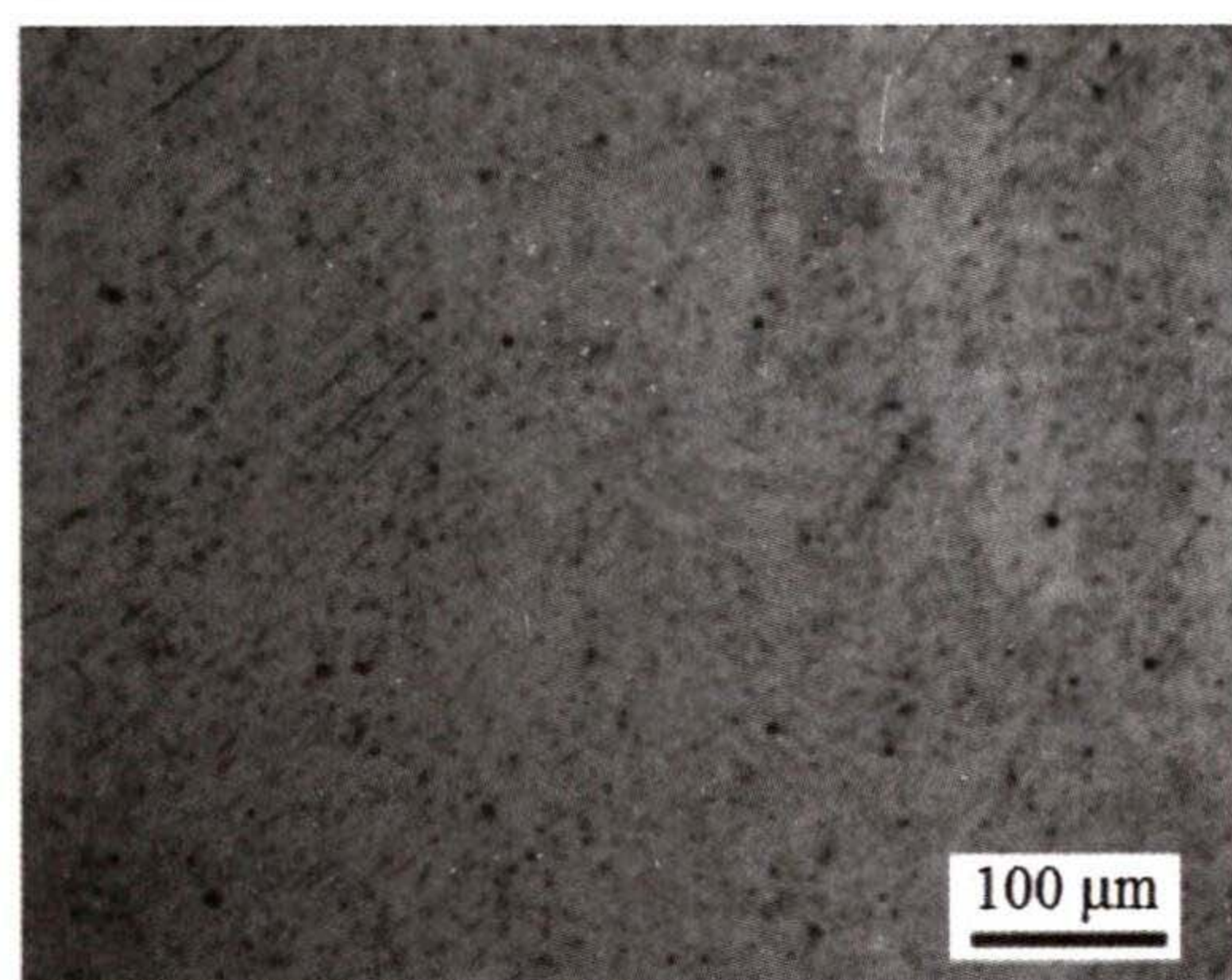


图 4 激光焊接微观组织
Fig. 4 Microstructure of laser welding

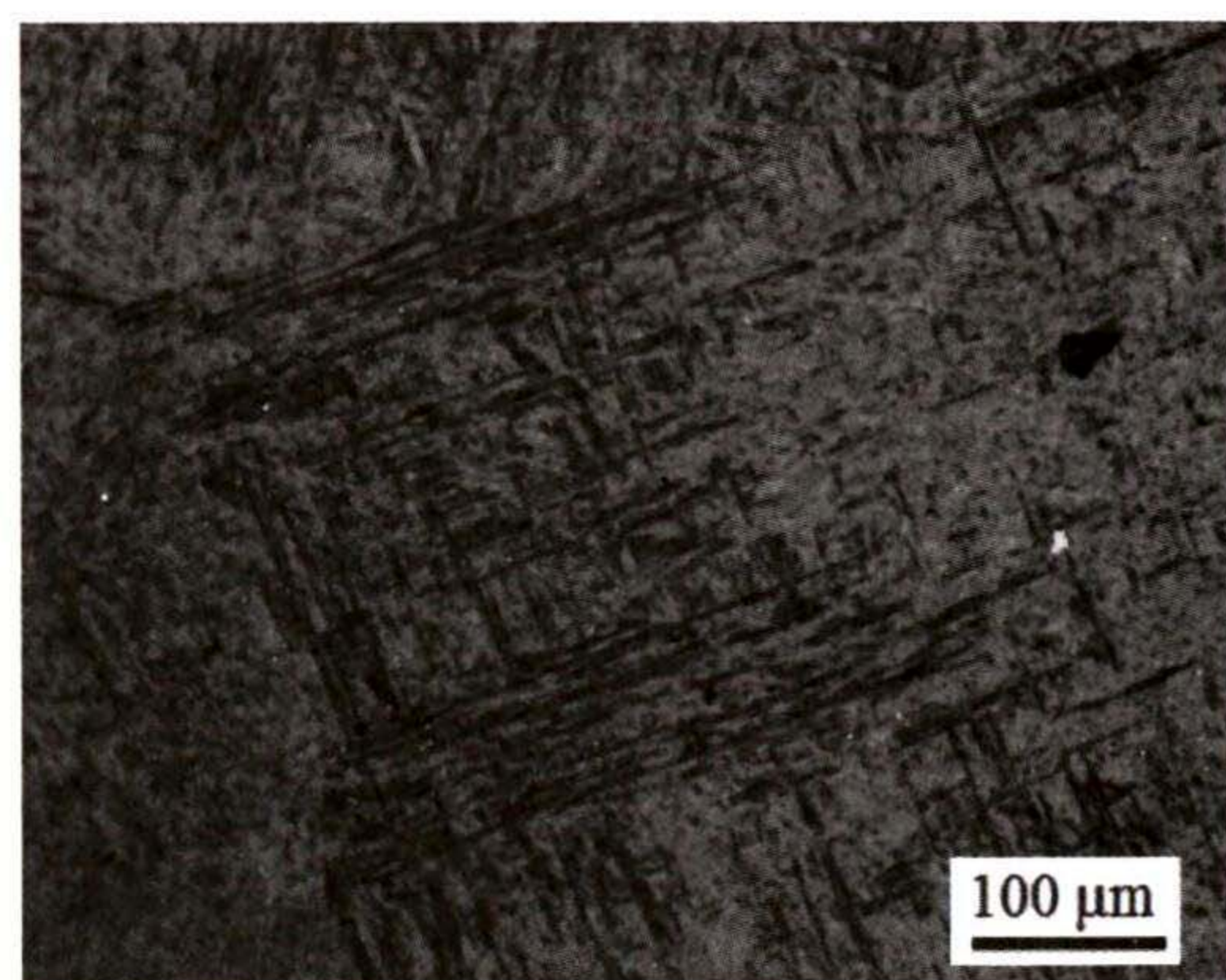


图 5 氩弧焊接微观组织
Fig. 5 Microstructure of TIG welding

2.3 焊接接头力学性能分析

图 6 为不同状态试片拉伸性能试验结果。从图中可以看出:母材经过扩散连接后,其拉伸性能均低于母材,抗拉强度为 909 MPa,约母材的 84.9%;屈服强度为 864 MPa,约为母材的 92.9%;延伸率为母材的 89.2%。经过激光焊接后,垂直于焊缝的抗拉强度为 913 MPa,约为母材的 85.3%,平行于焊缝的抗拉强度为 928 MPa,约为母材的 86.7%;垂直于焊缝的屈服强度为 809 MPa,约为母材的

86.9%,平行于焊缝的屈服强度为 877 MPa,约为母材的 94.3%;垂直于焊缝的延伸率为 9.3%,约为母材的 66.4%,平行于焊缝的延伸率为 11.2%,约为母材的 80%。

可以看出的是,经过激光焊接后,两个方向的抗拉强度基本与扩散成形后的拉伸性能相当,但平行于焊缝的屈服强度高于垂直于焊缝的屈服强度,约增加了 8%,平行于焊缝的延伸率高于垂直于焊缝的延伸率,约增加了 20.4%。这主要是因为激光焊接焊道较窄,相对于垂直焊缝的拉伸测试,在相同尺寸的试片规格下,平行于焊缝的拉伸测试有更多的母材参与了拉伸测试过程中试片的弹性变形与塑性变形,也将母材原本的力学特性更多地体现。

经过 TIG 焊接后:垂直于焊缝的拉伸强度为 951 MPa,约为母材的 88.9%;平行于焊缝的拉伸强度为 927 MPa,约为母材的 86.7%;垂直于焊缝的屈服强度为 864 MPa,约为母材的 92.9%,平行于焊缝的屈服强度为 873 MPa,约为母材的 93.9%;垂直于焊缝的延伸率为 9.9%,约为母材的 70.7%,平行于焊缝的延伸率为 5.2%,约为母材的 37.1%。

可以看出的是,经过 TIG 焊接后,两个方向的拉伸性能均高于扩散成形后的拉伸性能,且垂直于焊缝的抗拉强度高于平行于焊缝的抗拉强度,而垂直于焊缝的屈服强度与平行于焊缝的屈服强度相当,但平行于焊缝的延伸率高于垂直于焊缝的延伸率,约增加了 90.3%。测试结果反映出垂直于焊缝方向拉伸性能优于平行焊道的性能,主要原因是 TIG 填丝焊接的焊道较宽,沿不同方向取样时,试样的中间最窄区域为 15 mm,因此该区域基本全为焊道区域,不存在母材区域。同时由焊道热循环作用下焊缝晶粒处的生长机理可知,焊道的晶粒生长方向垂直于焊道方向。从焊道的组成来看,在全焊道上平行于焊道方向的晶粒远远多于垂直于焊道的晶粒,因此在试样拉伸过程中,平行于焊道方向晶粒较多、晶界较长,裂纹更容易扩展,而垂直于焊道方向受到粗大晶粒的阻挡,且晶界较短,裂纹不易扩展。

由图 6 还可以看出,TIG 填丝焊接垂直于焊缝方向的抗拉强度、屈服强度及延伸率均略优于激光焊接,但平行于焊缝方向激光焊接的性能较好。这主要是由于激光焊接为不填丝焊接,焊后的接头虽然没有明显的咬边,但焊缝背面存有背透,说明焊缝正面存在下陷,而 TIG 填丝焊为机加去除焊缝余高,其接头正面与母材齐平,因此,在垂直于焊道方向拉伸时,焊

道处厚度的差异使得激光焊的拉伸性能低于 TIG 填丝焊;当方向为平行于焊道时,由于激光焊缝较窄,而 TIG 填丝焊焊道较宽,在进行拉伸测试时,相比于

TIG 填丝焊接试样,激光焊接试样有更多的母材参与试样的各阶段变形行为,其本身的力学性能也更多地体现在拉伸测试最终结果中。

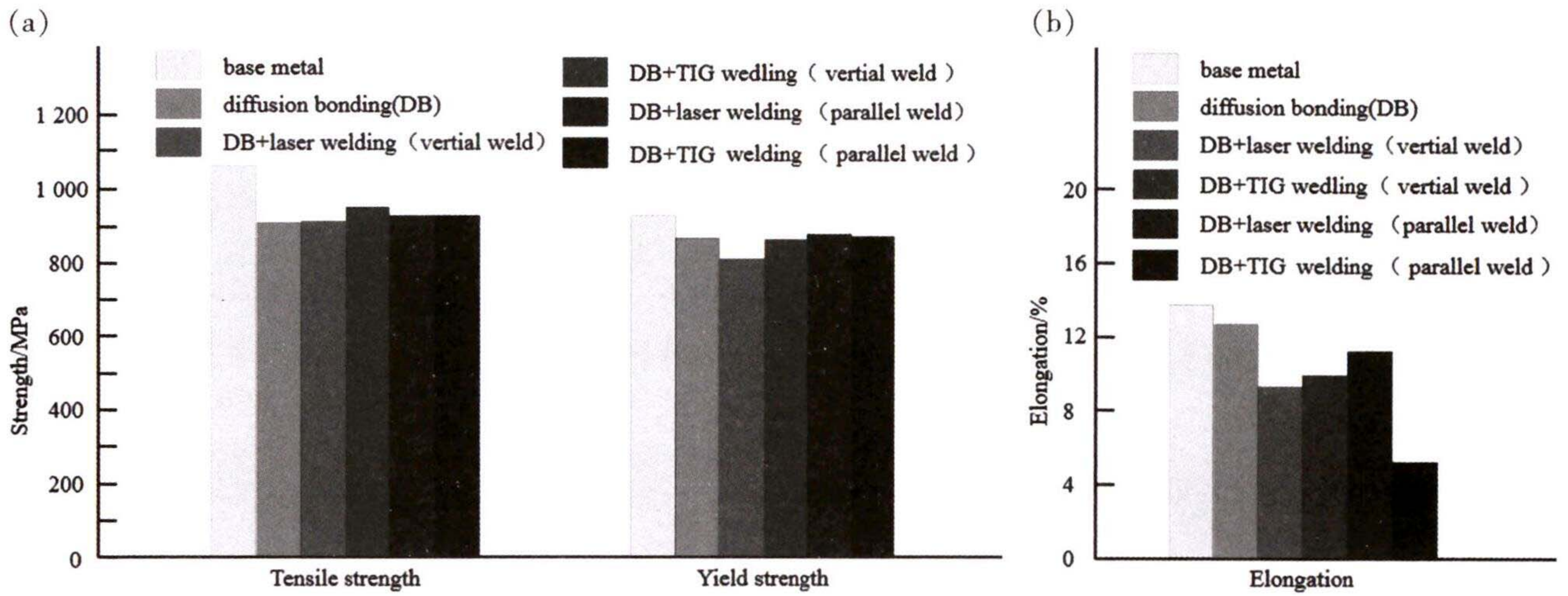


图 6 拉伸性能结果。(a)拉伸测试结果;(b)拉伸测试延伸率
Fig. 6 Results of tensile performance. (a)Tensile test results;(b)tensile test elongation

图 7 为各状态剪切性能与弯曲性能试验结果。从图中可以看出,经过扩散连接成形后材料的剪切性能为 569 MPa,约为母材的 92.1%,横弯最大弯曲角为 33°,约为母材的 78.6%,纵弯的最大弯曲角为 29°,约为母材的 69%;经过激光焊接后,焊缝的剪切性能为 659 MPa,基本与母材相当,横弯最大弯曲角为 20°,约为母材的 47.6%,纵弯的最大弯曲角为 24°,约为母材的 51.7%;经过 TIG 焊接后,焊缝的剪切性能为 621 MPa,基本与母材相当,横弯最大

弯曲角为 26°,约为母材的 61.9%,纵弯的最大弯曲角为 25°,约为母材的 59.5%。测试结果说明:不同焊接方法接头的剪切强度均高于母材,且激光焊接更好,而氩弧焊接的弯曲强度优于激光焊接。引起上述现象的主要原因是两种焊接方法的接头均有焊缝区、热影响区与母材区组织,但激光焊接接头的宽度更窄,因此激光焊接接头的组织梯度高于氩弧焊接接头。这种组织梯度的明显差异是造成两种焊接方法弯曲性能差异的主要原因。

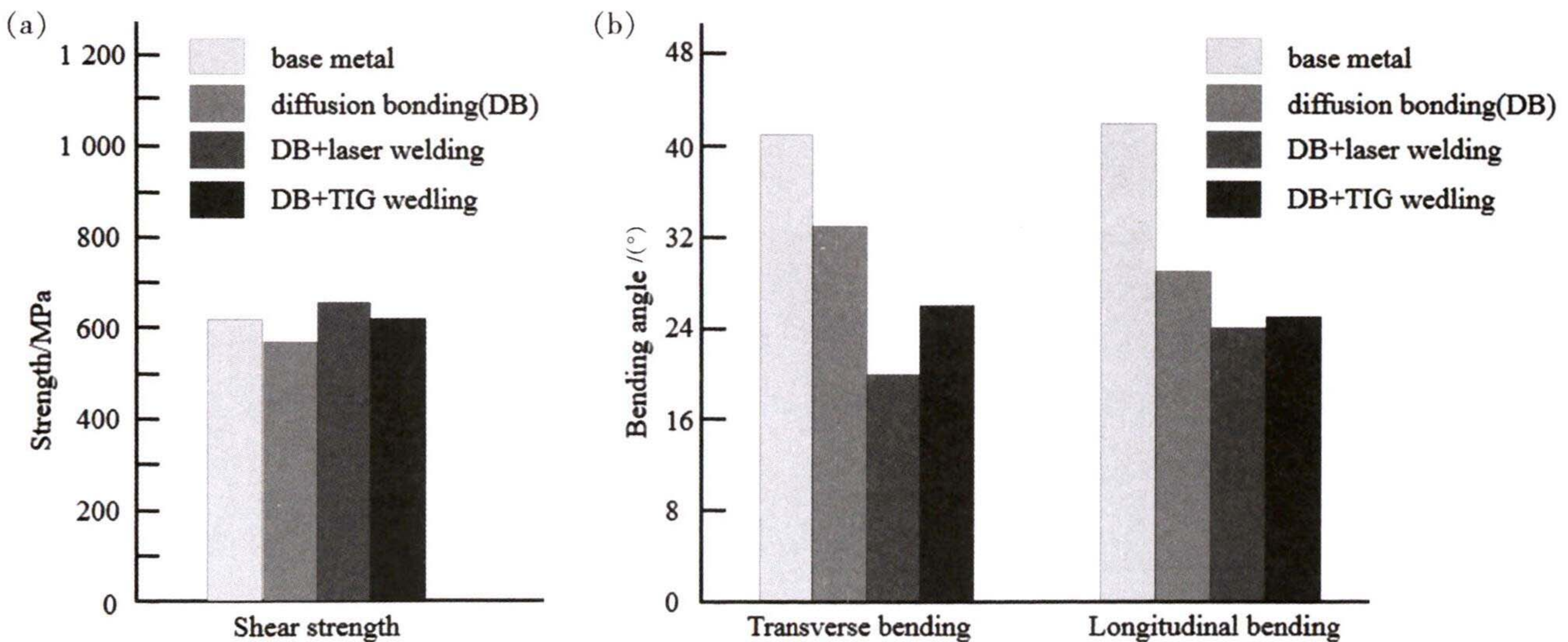


图 7 剪切与弯曲性能结果。(a)剪切性能;(b)弯曲性能
Fig. 7 Results of shear and bending performance. (a)Shear strength;(b) bending strength

3 结论

(1)两种焊接方法均可获得焊道成形良好,没有气孔、夹杂等缺陷的接头,此外,利用散焦对焊道正面进行修饰,可以有效抑制激光焊接产生的咬边缺陷。相较于氩弧焊接接头焊缝组织,激光焊接由于热输入较小,接头内部晶粒较小, α' 相较多。

(2)扩散连接后不同焊接方法下各焊接方向的剪切强度均高于母材,且激光焊接更好,而氩弧焊接的弯曲强度优于激光焊接。

(3)扩散连接后的 TIG 填丝焊接头在垂直于焊缝方向上的抗拉强度、屈服强度及延伸率均略优于激光焊接,但在平行于焊缝方向上,激光焊接的性能更好。

参考文献

- [1] 李小曼,庄明祥,段舒尧,等. 焊接方向对钛合金 H 型桁条-蒙皮结构双激光束双侧同步焊接变形的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(9): 140-143.
LI X M, ZHUANG M X, DUAN S Y, et al. Effect of welding direction on deformation of H-beam stringer-skin structure welded by double laser beam and bilateral simultaneous welding[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(9): 140-143.
- [2] 王珏,韩颖杰,谢洪志,等. TC4 钛合金双曲度复杂航空零件热成形工艺研究[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(2): 29-37.
WANG J, HAN Y J, XIE H Z, et al. Research on hot forming process of TC4 titanium alloy hyperbolic complex aviation part[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(2): 29-37.
- [3] DU Z H, ZHANG K F. The superplastic forming/diffusion bonding and mechanical property of TA15 alloy for four-layer hollow structure with squad grid[J]. International Journal of Material Forming, 2021, 14(5): 1057-1066.
- [4] 李保永,张铁军,张凯锋,等. 钛合金超塑成形/扩散连接四层结构表面沟槽控制方法研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(21): 63-67.
LI B Y, ZHANG T J, ZHANG K F, et al. Research on control method of surface groove of titanium alloy SPF/DB four-sheet structure[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(21): 63-67.
- [5] 李保永,蒋少松. Ti_2AlNb 合金超塑性能及四层立筋结构超塑成形/扩散连接工艺[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(1): 103-111.
LI B Y, JIANG S S. Superplastic forming/diffusion bonding of $Ti-22Al-27Nb$ alloy hollow four-layer structure[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(1): 103-111.
- [6] 许平,毕世权,张伟宁,等. 激光焊接大型整体壁板设计与考核方法[J]. 飞机设计, 2021, 41(4): 49-55.
XU P, BI S Q, ZHANG W N, et al. Design and assessment method of laser welded large integral panel[J]. Aircraft Design, 2021, 41(4): 49-55.
- [7] 赵晓龙,王彬,何恩光,等. 多次热处理对 TC4 钛合金激光焊接头组织和性能的影响[J]. 应用激光, 2020, 40(5): 831-835.
ZHAO X L, WANG B, HE E G, et al. Effect of multiple heat treatments on the microstructure and properties of TC4 titanium alloy laser welding joint[J]. Applied Laser, 2020, 40(5): 831-835.
- [8] 孙文君,王善林,陈玉华,等. 钛合金先进焊接技术研究现状[J]. 航空制造技术, 2019, 62(18): 63-72.
SUN W J, WANG S L, CHEN Y H, et al. Development of advanced welding technologies for titanium alloys[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(18): 63-72.
- [9] 韩秀峰,王伦,朱明亮,等. TA19 钛合金电子束焊接头微观组织与性能研究[J]. 稀有金属, 2021, 45(7): 778-785.
HAN X F, WANG L, ZHU M L, et al. Microstructures and mechanical properties research of electron beam welding joint of TA19 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45(7): 778-785.
- [10] 巴一,师文庆,韩善果,等. 不同离焦量对真空激光焊接 TA2 工业钛板的影响[J]. 应用激光, 2021, 41(3): 481-488.
BA Y, SHI W Q, HAN S G, et al. Influence of different amount of defocus on vacuum laser welding TA2 industrial titanium plate[J]. Applied Laser, 2021, 41(3): 481-488.
- [11] 姜梦,陶汪,陈彦宾,等. 真空激光焊接焊缝成形及等离子体特征[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 403010.
JIANG M, TAO W, CHEN Y B, et al. Characteristics of bead formation and plasma plume in fiber laser welding under vacuum[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 403010.
- [12] JIANG S S, LI B Y, LIU Y, et al. LBW/SPF/DB combined processing and microstructure of TA15 titanium alloy four-layer sandwich structure with square grid[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014, 6: 563047.
- [13] 韩颖杰,付和国,王会东,等. 含预置板的双层钛合金

- 超塑成形/扩散连接零件缺陷分析及工艺改进[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(4): 41-47.
- HAN Y J, FU H G, WANG H D, et al. Defects analysis and process improvement for double-layer SPF/DB structure parts of titanium alloy with pre-set panel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(4): 41-47.
- [14] 张帅锋, 张建欣, 于冰冰, 等. 铸造钛合金 α 层对补焊裂纹的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49(3): 67-70.
- ZHANG S F, ZHANG J X, YU B B, et al. Effects of α layer in cast titanium alloy on repair welding crack[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(3): 67-70.
- [15] 付刚, 胡刚. TC4 钛合金超塑成形/扩散连接后电子束焊接技术[J]. 航空制造技术, 2004, 47(12): 72-74.
- FU G, HU G. EB welding technology after SPF/DB of TC4 Ti alloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, 47(12): 72-74.