

锌铝镁镀层钢板振镜扫描激光焊与 TIG 焊 接头成形与性能对比研究

张鹏¹, 芦君泽², 李广², 石玕^{2*}, 任博³

(¹甘肃钢铁职业技术学院, 甘肃 嘉峪关 735100; ²兰州理工大学省部共建有色金属先进加工
与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050; ³中铁第五勘察设计院集团有限公司, 北京 102600)

摘要 为改善镀锌铝镁钢板钨极氩弧焊(TIG)焊缝凹陷、镀层烧损及破裂等问题,并提高接头强度,采用振镜扫描激光焊(GSL)对锌铝镁镀层钢板进行了焊接,并与 TIG 接头进行了对比分析。通过光学显微镜、扫描电子显微镜和拉伸测试机对两种不同焊接工艺下焊接接头的宏观形貌、显微组织及力学性能进行了对比分析。结果表明:GSL 接头焊缝区组织由针状和块状多边形铁素体以及少量粒状贝氏体组成,而 TIG 接头焊缝区组织则由不规则的块状铁素体和粒状贝氏体组成。另外,由于 TIG 焊热输入较高,焊缝组织中还存在魏氏组织。与 TIG 接头相比,GSL 接头的晶粒尺寸和热影响区宽度明显较小,这有利于提高接头性能。GSL 接头与 TIG 接头的抗拉强度与母材抗拉强度近似,但 GSL 接头延伸率比 TIG 接头高出近 6%,表明 GSL 接头具有更高的塑性。

关键词 振镜扫描激光焊; 钨极氩弧焊; 锌铝镁镀层钢板; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20254505.069

Comparative Study on the Microstructure and Properties of Joints of Zinc-Aluminum-Magnesium Coated Steel Sheets Joints Welded by Laser Welding with Galvanometer Scanning and Tungsten Inert Gas Welding

Zhang Peng¹, Lu Junze², Li Guang², Shi Yu^{2*}, Ren Bo³

(¹Gansu Iron and Steel Vocational and Technical College, Jiayuguan 735100, Gansu, China;

²State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; ³China Railway Fifth Survey and Design

Institute Group Co., Ltd., Beijing 102600, China)

Abstract To address issues such as weld crater defects, coating burn-off and rupture, and cracking in tungsten inert gas (TIG) welded galvanized aluminum-magnesium steel plates, as well as to enhance joint strength, galvanometer-scanned laser welding (GSL) was employed for welding zinc-aluminum-magnesium coated steel plates. The GSL joints were comparatively analyzed against TIG joints. The macroscopic morphology, microstructure, and mechanical properties of the welded joints produced by the two different processes were examined using optical microscopy, scanning electron microscopy, and a tensile testing machine. The results indicate that the microstructure of the GSL weld zone consists of acicular and blocky polygonal ferrite along with a small amount of granular bainite. In contrast, the TIG weld zone microstructure comprises irregular blocky ferrite and granular bainite. Furthermore, the higher heat input of TIG welding led to the formation of a Widmanstätten structure in the weld metal. Compared to TIG joints, GSL joints exhibit significantly finer grain size and a narrower heat-affected zone, which are beneficial for improving joint performance. The tensile strengths of both GSL and TIG joints are similar to that of the base material. However, the elongation of GSL joints is approximately 6% higher than that of TIG joints, demonstrating superior ductility.

收稿日期:2024-07-27; **修回日期:**2024-08-12

基金项目:甘肃省科技重大专项(22ZD6GA008)

作者简介:张鹏(1974—),男,本科,副教授,焊工高级技师。研究方向为金属材料先进焊接技术。E-mail:245605911@qq.com

* **通信作者:**石玕(1973—),男,博士,教授。研究方向为智能焊接方法及理论。E-mail:shiyu@lut.edu.cn

Key words galvanometer scanning laser welding; TIG welding; Zinc-Aluminum-magnesiumcoated steel sheet; micro-structure; mechanical properties

0 引言

锌铝镁镀层钢板是一种新型的镀层材料,与传统的镀锌板相比,锌铝镁钢板镀层中添加了 Al 和 Mg 元素,使其耐蚀性显著提高(耐蚀性能是普通镀锌板的 15 倍以上^[1])。锌铝镁镀层具有良好的自修复能力,能适应各种恶劣环境,在出现切口、划痕时能够进行自我修复,从而可以减少涂漆、镀膜、封蜡等二次防腐处理措施,降低生产成本并提高生产效率^[2]。同时锌铝镁镀层钢板的切边耐蚀性优于镀铝锌钢板(GL),耐蚀性和成形性能优于热镀锌板(GI)和热镀锌铁合金板(GA)^[3],适合制造冲压零部件。因此,锌铝镁镀层钢板在某些场景中可替代不锈钢、铝板和普通镀锌板等多种材料。目前,锌铝镁镀层钢板已应用于光伏制造、汽车制造、装备制造、信息通信、轻钢建筑等多种领域^[4-5]。

锌铝镁镀层钢板表面镀层成分复杂,焊接难度大^[6]。镀层中含有锌、铝、镁等低熔点低沸点元素,锌的熔点为 419.5 °C、沸点为 907 °C,镁的熔点为 650 °C、沸点为 1 170 °C^[7-9],在焊接过程中元素蒸发气化产生高压金属蒸气,影响熔池稳定性,导致焊接时产生飞溅、气孔等缺陷^[10-12]。同时,剩余锌、铝、镁元素会随熔池流动进入焊缝金属内部,改变焊接接头组织及性能,影响焊接质量。其中,铝元素对焊接质量影响较大,铝元素是铁素体形成元素,一般以固溶形式存在于基体中,具有固溶强化作用^[13-15]。焊接时镀层中的铝元素进入熔池金属中,在焊缝金属冷却过程中,若铝元素均匀分布在焊缝金属中,能够细化晶粒,提高接头性能,若铝元素未在焊缝金属中均匀分布或富集在熔合线附近,导致局部铝元素含量较高时,则会形成粗大的铁素体晶粒,影响焊缝力学性能。铝元素的含量对材料力学性能有一定影

响,当铝的质量分数不高于 4%时,能够细化晶粒,小幅提高金属强度和硬度;当铝的质量分数高于 6%时,会使金属中铁素体含量大幅增加,从而使材料的强度和硬度迅速提高,降低材料塑性^[16]。传统镀锌钢板通常采用钨极氩弧焊(tungsten iner-gas arc welding, TIG)和激光焊接方法进行焊接,但在试验中发现,TIG 和激光焊接过程稳定性较差,焊接时产生烟尘、飞溅较大,且存在焊缝表面氧化发黑、镀层破裂、焊缝咬边、气孔缺陷等焊接问题,严重影响板材使用性能^[6]。使用振镜扫描激光焊接方法(GSL)能够有效解决上述焊接问题,GSL 过程中激光束能够对熔池进行搅拌,提高熔池稳定性,减少焊缝气孔、裂纹等缺陷^[17-18],同时,能够细化晶粒,降低熔池内部最高温度,减少低熔点金属元素烧损,改善焊缝金属元素偏析等问题,有望实现锌铝镁镀层钢板的高质量焊接^[19-20]。

本文分别采用钨极氩弧焊(TIG)和振镜扫描激光焊(GSL)对锌铝镁镀层钢板进行平板对接试验,对比分析了两种焊接工艺下焊接接头表面形貌、微观组织及力学性能,本文的研究为振镜激光焊接技术在锌铝镁镀层钢板的实际焊接应用提供理论基础和数据支撑。

1 基本原理

1.1 试验材料

本试验采用的锌铝镁镀层板为甘肃酒钢生产的牌号为 SCS400 的热镀锌铝镁钢带产品,基板化学成分及力学性能如表 1、2 所示。锌铝镁镀层成分为 Zn-11%Al-3%Mg,厚度为 30 μm^[21]。母材金相显微组织如图 1 所示,主要由铁素体(F)和少量珠光体(P)组成。试验板材尺寸为 200 mm×200 mm×1.5 mm。

表 1 锌铝镁镀层板基材(SCS400)化学成分

Table 1 Chemical composition of zinc-aluminum-magnesium coating plate (SCS400)

Element	C	Si	Mn	P	S	Fe
Mass fraction/%	0.060	0.030	0.260	0.009	0.002	Bal.

表 2 锌铝镁镀层板基材(SCS400)力学性能

Table 2 Mechanical properties of zinc-aluminum-magnesium coating plate (SCS400)

Yield strength R_{eL} /MPa	Tensile strength R_m /MPa	Elongation A /%
439.0	526.0	22.5

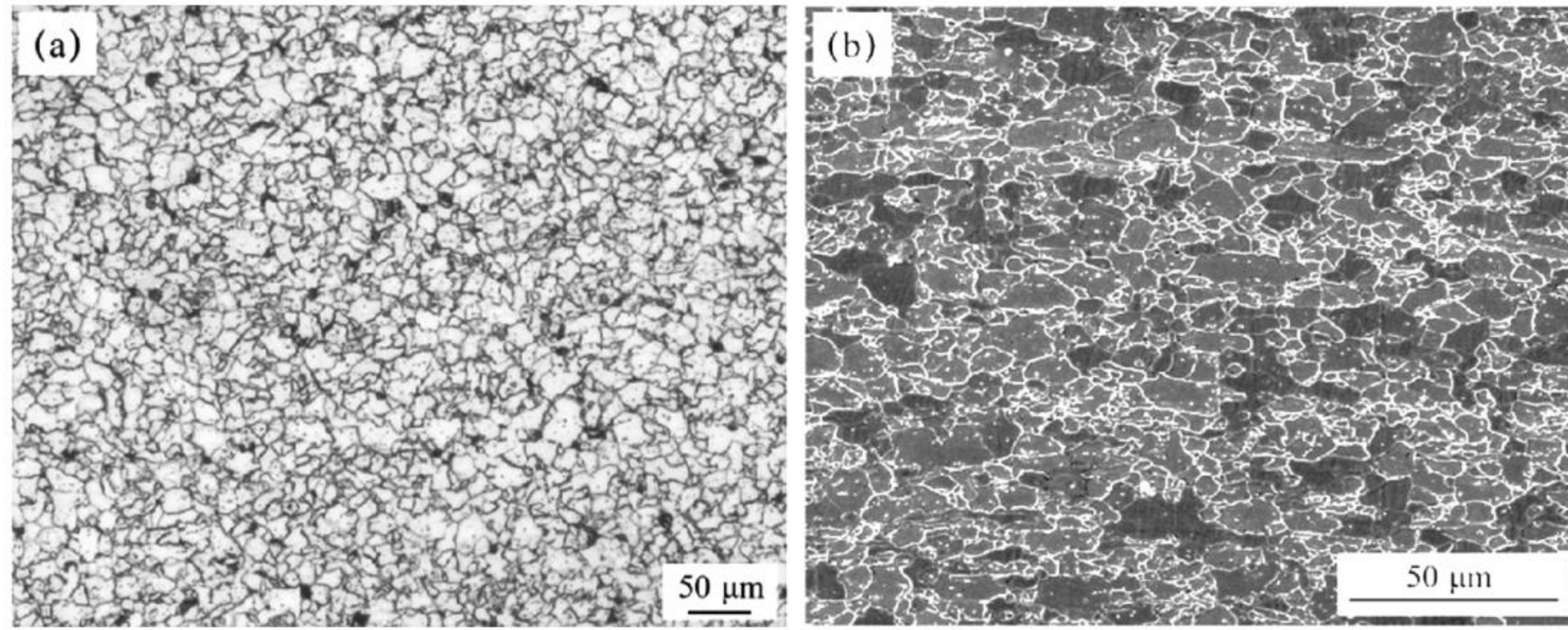


图1 母材微观组织

(a)OM;(b)SEM

Fig. 1 Microstructure of the base material

(a)OM;(b)SEM

1.2 试验方法

分别采用 TIG 和振镜激光焊对 SCS400 进行焊接试验,两种焊接方式均采用自熔焊接,接头形式为平板无坡口对接,装配预留间隙 <0.5 mm。焊前采用丙酮对试样表面进行清洗,去除待焊表面油污等杂质。

焊接完成后利用线切割对焊接接头进行切割取样,取样尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,试样截面

经过研磨抛光后,使用 4% 硝酸酒精进行腐蚀,腐蚀时间为 15 s。采用 LSM 激光共聚焦显微镜和 FEI Quanta FEG 450 扫描电子显微镜对金相组织进行观察,拉伸性能测试参照 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》进行拉伸试样制备,拉伸试样尺寸如图 2 所示,采用型号为 1232AJ 的万能拉伸试验机进行拉伸测试,拉伸速率为 1 mm/min 。

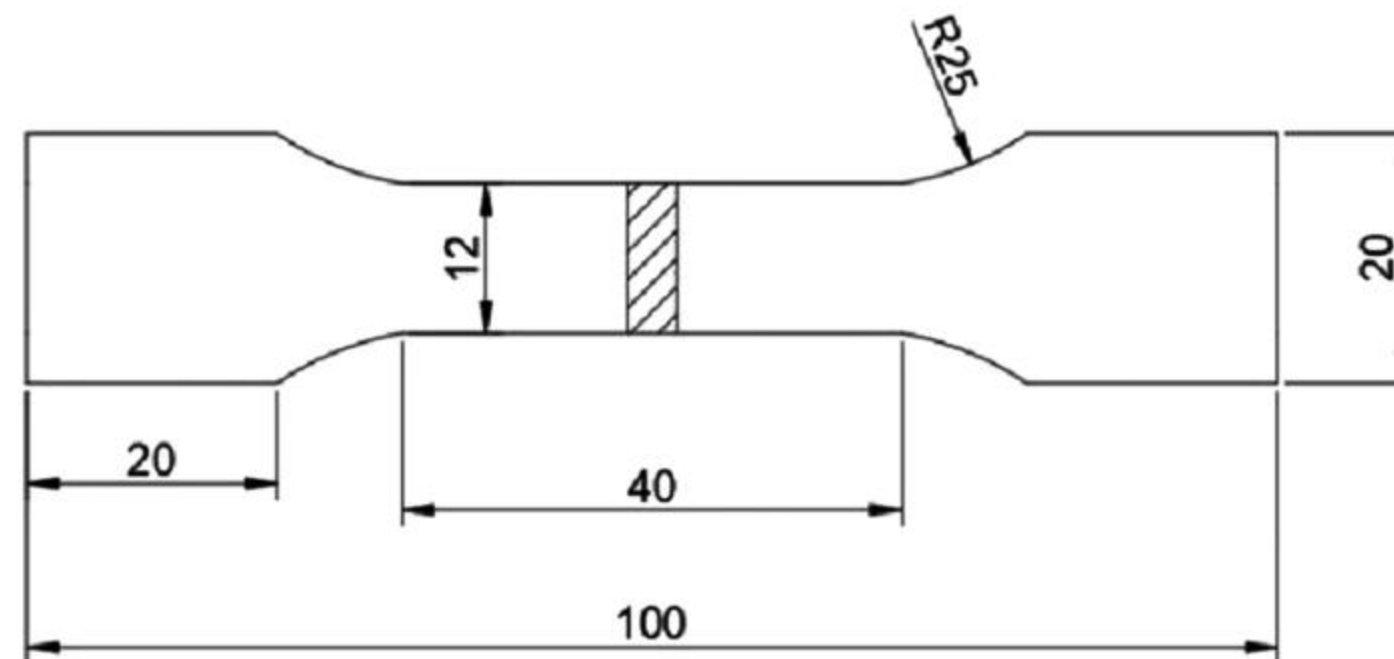


图2 拉伸试样尺寸

Fig. 2 Dimensions of the tensile test specimen

TIG 焊接试验选用型号 WSE-315 (PNE30-315ADP) 的时代逆变氩弧焊机,额定输出空载电压为 66 V,输出电流调节范围为 $12\sim 315\text{ A}$,直流脉冲

频率调节范围为 $0.5\sim 200\text{ Hz}$,使用直径为 2.4 mm 的铈钨极进行 TIG 焊接,钨极高度为 4 mm 。具体焊接工艺参数如表 3 所示。

表3 TIG 焊接工艺参数表

Table 3 TIG welding process parameter table

Peak current/A	Base current/A	Frequency/Hz	Initial current/A	Arc closing current/A	Welding speed/($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	Early gas delivery time/s	Lagging down time/s
110.0	24.0	5.0	20.0	80.0	135.0	0.5	10.0

振镜激光焊接试验使用课题组开发的全域功率调制(full domain power modulation, FDPM)激光

振镜焊接系统(以下简称 FDPM 系统)进行,主要由 MFSC 6 kW 激光器、振镜扫描焊接系统、工控机和

驱动系统组成,全域功率调制振镜激光焊接系统功率调制原理如图 3 所示。该系统可调节轨迹、幅值、频率等参数并扫描周期内 36 个点的功率大小、相位位置和运动速度,极大地拓宽了熔池调控和焊缝成型

控制能力。光纤激光器最大输出功率为 6 000 W,激光光斑直径为 0.2 μm ,焦距为 290 mm,激光波长为 1 064 nm。振镜激光焊接工艺参数如表 4 所示,分别采用 3 种不同扫描频率进行试验分析。

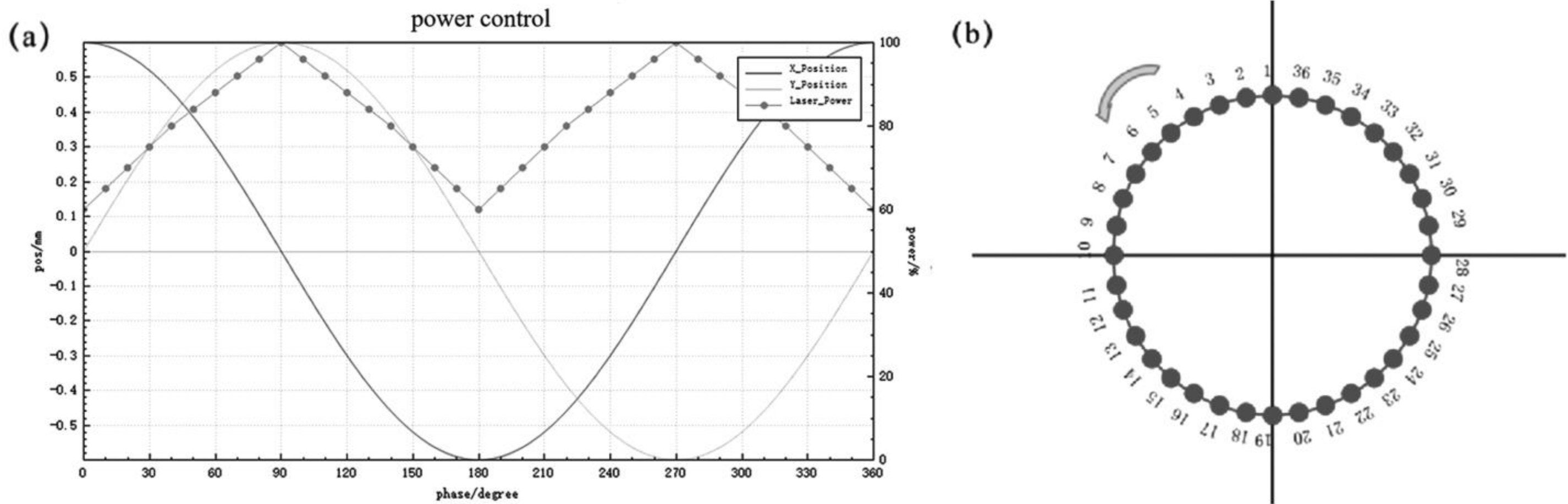


图 3 全域功率调制振镜激光焊接系统原理示意图

(a)36 相位点功率控制;(b)圆形轨迹相位点分布

Fig. 3 Schematic diagram of the full-field power modulation galvanometer laser welding system and its principle

(a)Power control of 36-phase point; (b)phase point distribution of circular scanning trajectory

表 4 振镜激光焊接工艺参数表

Table 4 Galvanometer laser welding process parameter table

Number	Laser power/W	Scanning range/mm	Scanning frequency/Hz	Defocused distance/mm	Welding speed/(mm · s ⁻¹)
①	3 600	0.8	100	+1	30
②	3 600	0.8	150	+1	30
③	3 600	0.8	200	+1	30

两种焊接工艺均采用体积分数为 99.99% 氩气作为保护气体,气体流量为 15 L/min。

2 分析与讨论

2.1 焊接接头宏观形貌分析

图 4(a)、(b)、(c)与(d)分别为 TIG 自熔焊接与振镜激光自熔焊接对接接头表面形貌,图 4(b)、(c)与(d)分别为 100 Hz、150 Hz、200 Hz 扫描频率下接头表面形貌。从图 4(a)中可以看出,TIG 自熔焊接焊缝表面成形较差,焊缝正表面轻微凹陷,焊缝背面略微凸起,且沿焊缝前进方向上下表面焊缝成形不均匀,宽度变化较大。焊缝上下表面和热影响区颜色发黑,有明显的镀层烧蚀现象,黑色物质主要为表面镀层的烧蚀物和焊接氧化物^[6],说明 TIG 自熔焊接热输入较大,焊缝表面镀层烧损且焊缝表面气保护较差,氧化较为严重。TIG 自熔焊接焊缝宽度和热影响区宽度相比激光焊接图 4(b)、(c)与(d)明显

更宽,同时,由于锌铝镁镀层熔点较低,热影响区表面镀层融化,在保护气的吹力作用下向外扩散至热影响区,形成一层断续不均匀的略微凸起的边界层。同时,在靠近此热影响区边界附近的母材表面可以发现锌铝镁镀层存在开裂现象(图 a 中黑色虚线圈出部分),这是焊接时产生的较高温度引起的^[7],镀层下基板受焊缝热量扩散体积膨胀而镀层塑性较差,从而使表面镀层被破坏,镀层下基板暴露,失去镀层防护作用。

从图 4(b)中可以看出,振镜激光自熔焊接焊缝表面成形较好,无气孔、裂纹等焊接缺陷,焊缝正表面中间略微凹陷,两边略微隆起,沿焊缝前进方向焊缝宽度略微增加。焊缝正表面镀层完全消失,在熔合线附近可以发现明显的镀层破碎边界,振镜激光自熔焊接速度和冷却速度快,焊缝热影响区宽度较窄且变形量较小,镀层无明显发黑烧蚀现象,此外,由于振镜激

光焊接时激光束对熔池具有搅拌作用,在增加熔池金属流动性的同时能够减少熔池内部温度梯度^[22],从而减少焊缝内部应力,因此热影响区和靠近热影响区的母材表面镀层完整并未破碎,然而,焊缝背面近焊缝热影响区部分区域镀层破碎。

从图 4(b)、(c)与(d)中可以看出,随着振镜激光焊接扫描频率增加,焊缝上下表面宽度有所增加,同时,由于扫描频率增加,焊缝表面能量分布更加均匀,焊缝背面宽度更加均匀,且焊缝背面热影响区附近镀层破碎量减少。

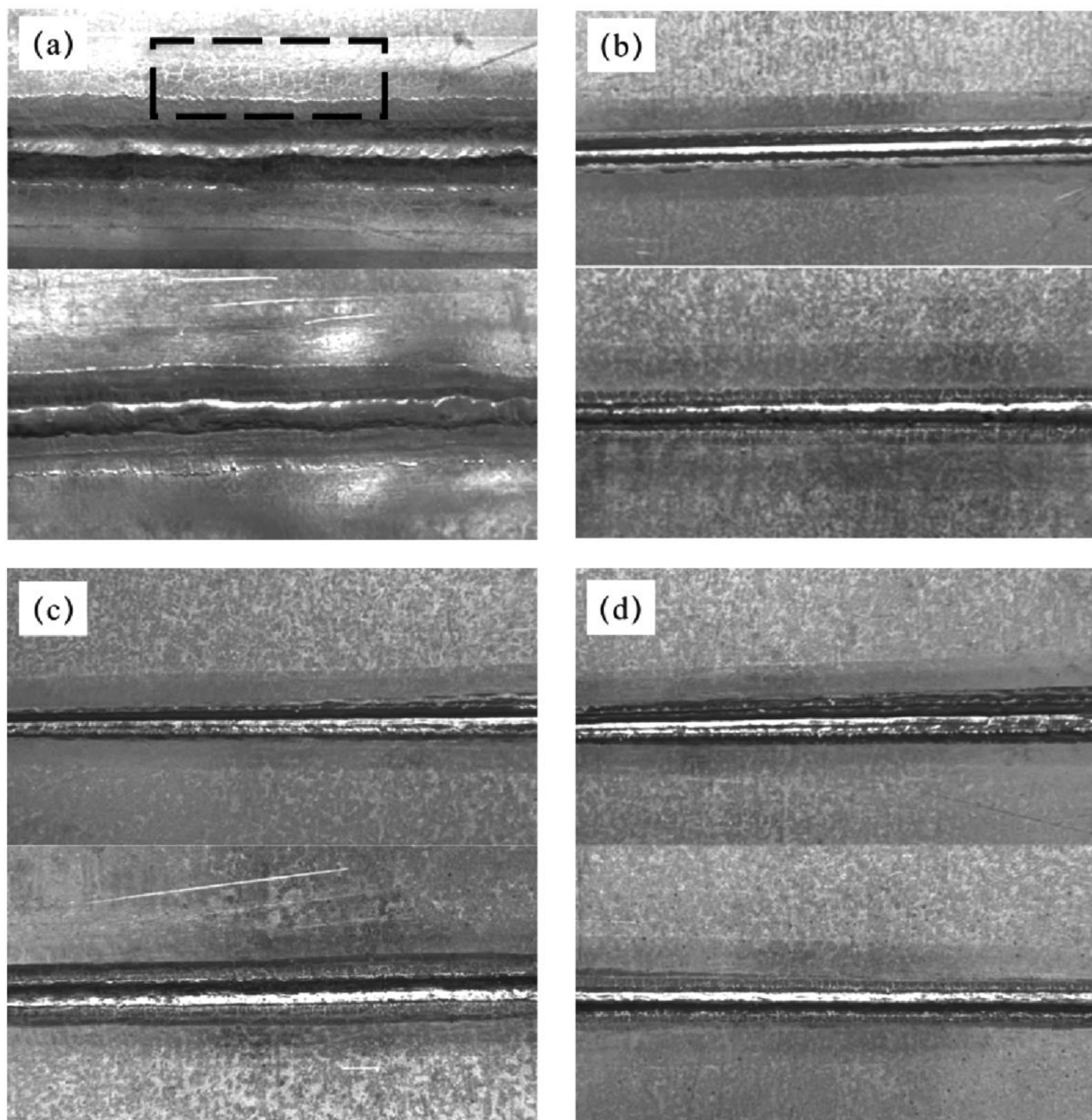


图 4 不同焊接工艺下接头宏观形貌

(a)TIG 焊接;(b)振镜激光 100 Hz;(c)振镜激光 150 Hz;(d)振镜激光 200 Hz

Fig. 4 Macroscopic appearance of joints under different welding processes

(a)TIG welding; (b)scanner laser 100 Hz; (c)scanner laser 150 Hz; (d)scanner laser 200 Hz

图 5(a)、(b)、(c)与(d)分别为 TIG 焊与振镜扫描激光焊对接接头焊缝横截面图,图 5(b)、(c)与(d)分别为 100 Hz、150 Hz、200 Hz 扫描频率下焊缝横截面形貌。由图 5 中可以看出,TIG 焊与振镜扫描激光焊焊缝金属均呈下凹状,且振镜扫描激光焊焊缝和热影响区宽度相比 TIG 焊焊缝和热影响

区宽度明显更小。由表 5 中数据可以看出,振镜扫描激光焊接头宽度和热影响区宽度远小于 TIG 焊接头,焊缝宽度为 TIG 焊接接头焊缝宽度的近 1/2,热影响区宽度为 TIG 焊接接头热影响区宽度的近 1/6,且随着振镜激光扫描频率的增加,振镜扫描激光焊接头焊缝宽度与热影响区宽度逐渐减小。

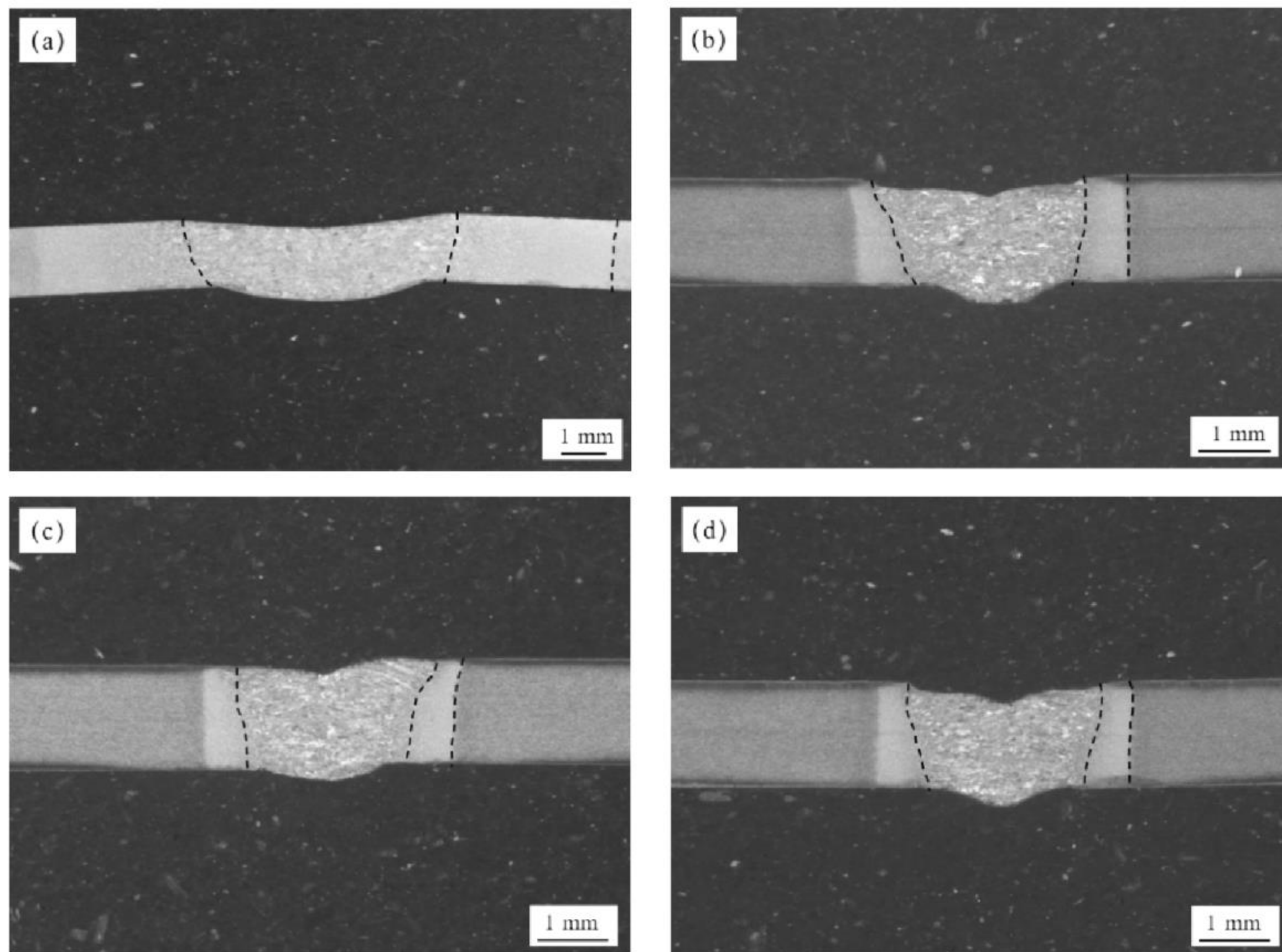


图 5 不同焊接工艺下接头截面形貌

(a)TIG 焊接;(b)振镜激光 100 Hz;(c)振镜激光 150 Hz;(d)振镜激光 200 Hz

Fig. 5 Crosssection morphology of joints under different welding processes

(a)TIG welding; (b)scanner laser 100 Hz; (c)scanner laser 150 Hz; (d)scanner laser 200 Hz

表 5 不同焊接工艺下接头焊缝及热影响区截面尺寸

Table 5 Comparison of tensile properties of welded joints

Parameter	Weld seam width/mm	Heat-affected zone width/mm
TIG	5.807	3.554
Galvanometer laser 100 Hz	2.580	0.621
Galvanometer laser 150 Hz	2.450	0.583
Galvanometer laser 200 Hz	2.360	0.492

2.2 焊接接头微观组织分析

2.2.1 焊接接头微观组织

图 6(a)和(b)分别为 TIG 自熔焊接与扫描频率为 150 Hz 时振镜激光自熔焊接接头的微观组织。焊接接头主要由焊缝区、熔合区、热影响区和母材组成,其中,热影响区又可以分为粗晶区、细

晶区和不完全相变区^[23]。从表 5 中数据可以看出,TIG 焊接接头热影响区宽度为 3.554 mm,而扫描频率为 150 Hz 时振镜激光自熔焊接接头热影响区宽度为 0.583 mm,仅为 TIG 焊接接头热影响区宽度的 1/6,说明振镜激光焊接热输入小且冷却速度快,热影响区较小。

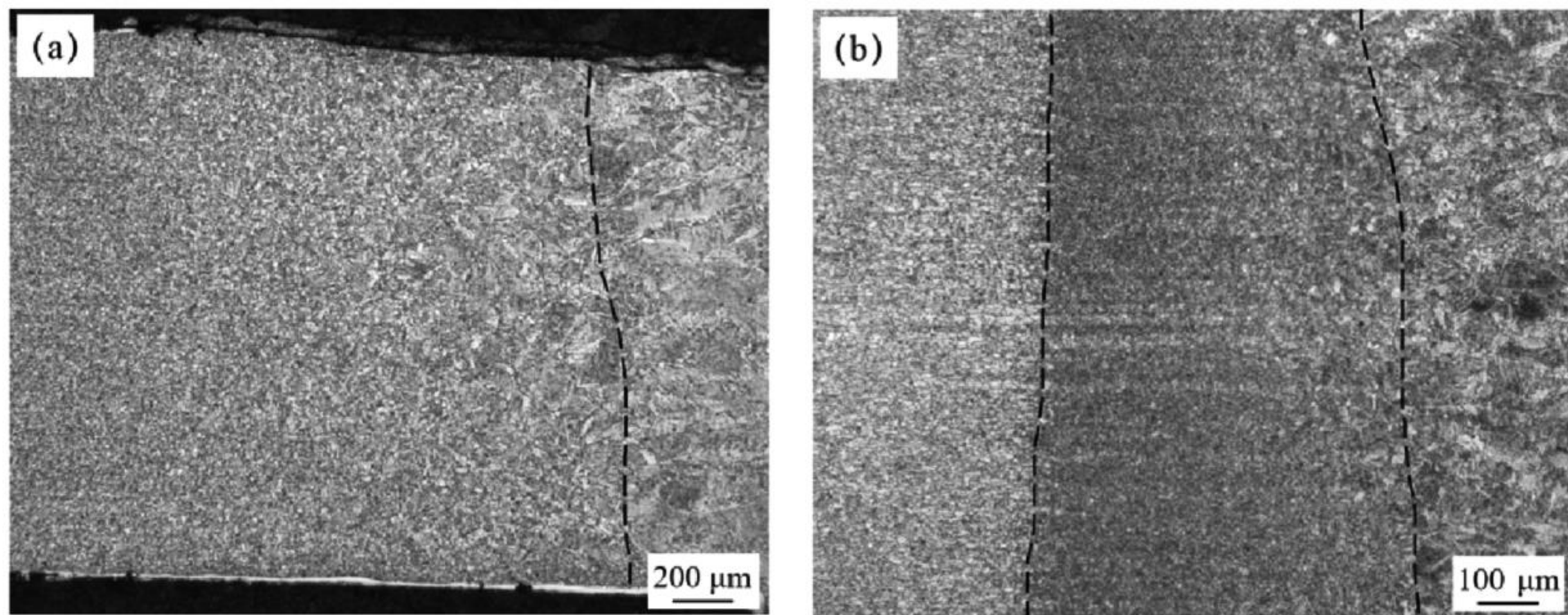


图6 TIG与振镜激光焊接接头微观组织(不完全相变区)
(a)TIG焊接;(b)振镜激光150 Hz

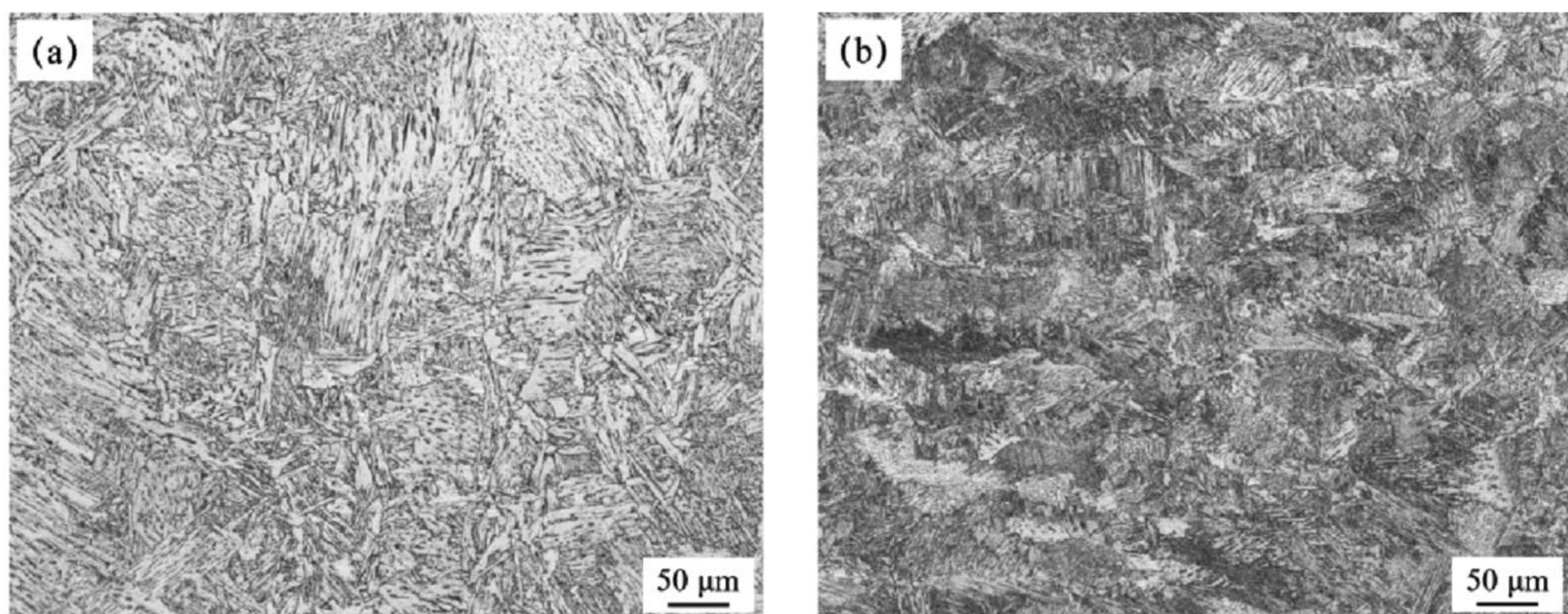
Fig. 6 Microstructure of TIG and oscilloscope scanning laser welded joints (incomplete phase change zone)
(a)TIG welding; (b)scanner laser 150 Hz

2.2.2 焊缝区微观组织

图7(a)和(c)为TIG自熔焊接接头焊缝中心区的微观组织,从图中可以看出,TIG焊接接头焊缝中心区的微观组织主要由不规则的大块状铁素体和粒状贝氏体组成,粗大的铁素体一般从原奥氏体晶界析出,沿原奥氏体晶界分布,晶内为铁素体和粒状贝氏体。由于TIG焊接热输入较大,部分晶界铁素体向晶内生长形成魏氏体组织,同时,在焊缝组织中可见少量大尺寸块状铁素体晶粒,这是由于镀层中的铝元素融入焊缝,铝元素为铁素体形成元素,有助于铁素体的形核和长大^[24],当铝元素在焊缝金属中富集于某一区域且含量较高时,会促使焊缝组织中形成粗大的铁素体晶粒,对焊接接头力学性能产生不利影响。

图7(b)和(d)为扫描频率150 Hz时振镜激光

自熔焊接接头焊缝中心区的微观组织。振镜激光焊接接头焊缝中心区的微观组织主要由不规则的块状铁素体、细小针状铁素体和少量粒状贝氏体组成,粒状贝氏体是由颗粒状富碳奥氏体和块状或岛状铁素体基体组成^[25]。对比图7(a)、(c)和(b)、(d)可以发现,振镜激光焊接接头焊缝中心区微观组织晶粒尺寸明显小于TIG焊接接头焊缝中心区的微观组织,这是由于TIG焊接过程中热输入大,焊后高温停留时间长且冷却速度较慢,晶粒有充分时间长大,才使得焊缝晶粒尺寸粗大。振镜激光焊接过程中热输入小,能量密度高且冷却速度较快,焊缝晶粒尺寸较小,此外,由于振镜激光扫描时激光束对熔池进行搅拌,在细化晶粒的同时能够使焊缝中的元素分布更加均匀。



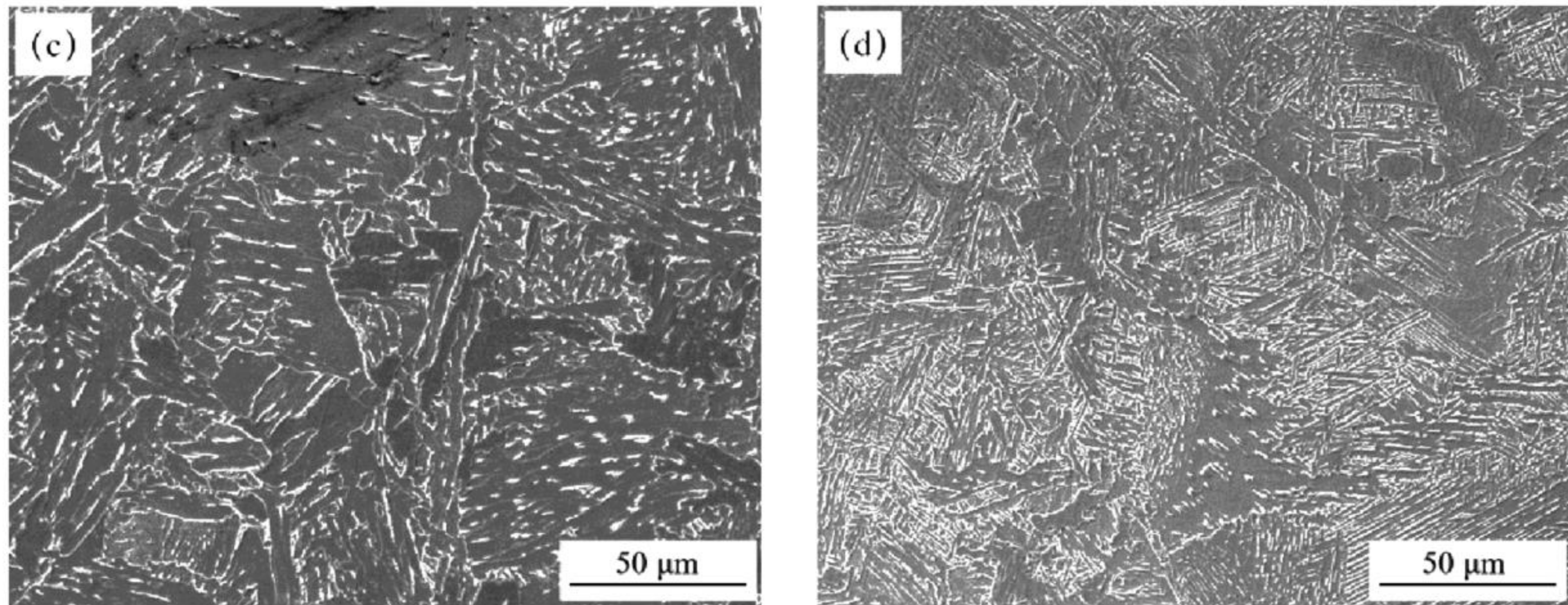


图7 TIG与振镜激光焊接接头焊缝区微观组织

(a)TIG焊接;(b)振镜激光100 Hz;(c)振镜激光150 Hz;(d)振镜激光200 Hz

Fig. 7 Microstructure of the weld zone in joints welded by TIG and galvanometer laser welding

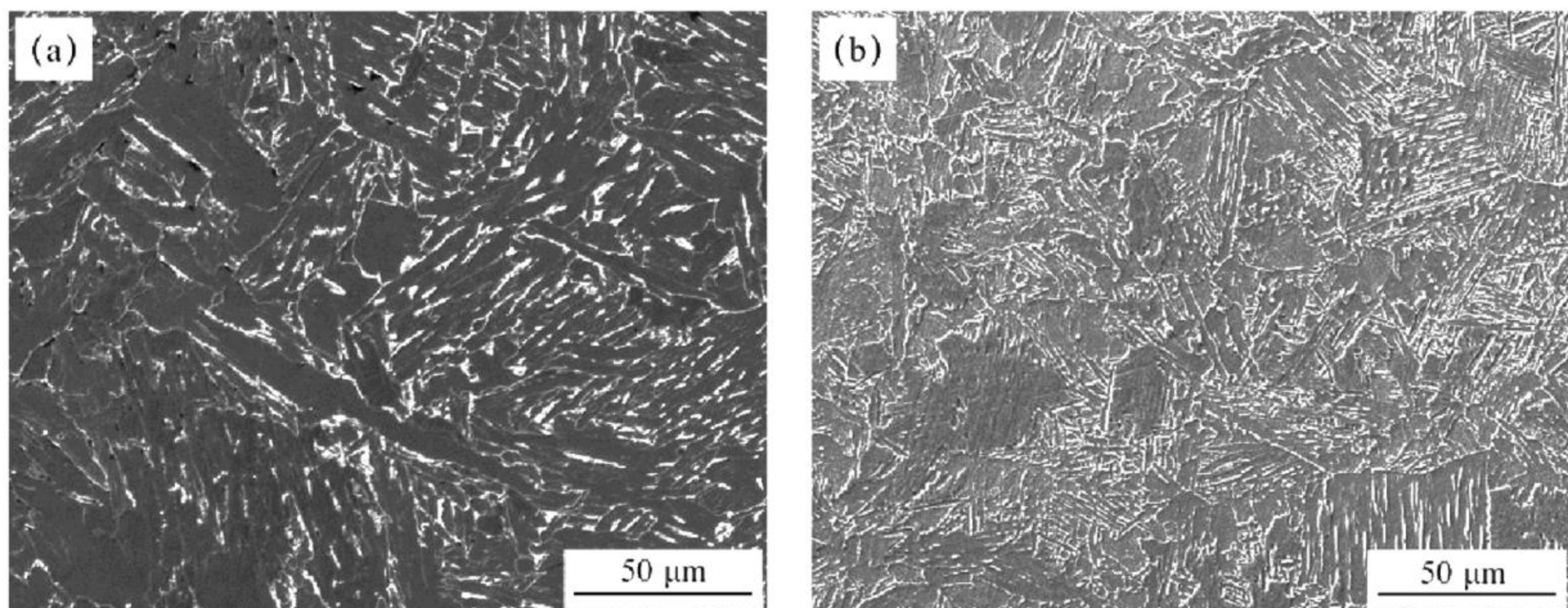
(a)TIG welding; (b)scanner laser 100 Hz; (c)scanner laser 150 Hz; (d)scanner laser 200 Hz

2.2.3 热影响区微观组织

图8(a)和(b)分别为TIG自熔焊和扫描频率为150 Hz时振镜激光自熔焊接接头热影响区粗晶区的微观组织,从图8(a)和(b)中可以看出,TIG焊接接头热影响区粗晶区的晶粒尺寸较大,而振镜激光焊接接头热影响区粗晶区的晶粒尺寸较小且更加均匀。热影响区粗晶区晶粒长大与焊接热输入和焊接热循环时间有关,TIG焊接热输入量大,冷却速度相对较慢,热影响区在高温区停留时间较长,晶粒有充分时间长大,而振镜激光焊接热输入量小,冷却速度相对较快,热影响区在高温停留时间较短,因此晶粒尺寸较小。从图8(a)中可以看出,TIG焊接接头粗晶区中存在粗大的魏氏体铁素体,使塑性和韧性大幅度降低。而从图8(b)与图7(d)可以发现,振镜激光焊接接头粗晶区晶粒尺寸与焊缝区晶粒尺寸相差较小,因此,热影响区粗晶区对焊接接头力学性能

影响较小。

图8(c)和(d)分别为TIG自熔焊和扫描频率为150 Hz时振镜激光自熔焊接接头热影响区细晶区的微观组织。从图8(c)中可以看出,TIG焊与和振镜激光焊接接头热影响区细晶区晶粒尺寸相差较大,TIG焊接接头细晶区晶粒相比粗晶区,晶粒尺寸更加细小,平均晶粒尺寸为 $20\ \mu\text{m}$,组织主要为不规则的块状铁素体和粒状贝氏体。而从图8(d)中可以看出,振镜激光焊接接头细晶区晶粒尺寸比母材晶粒尺寸更加细小,平均晶粒尺寸为 $6\ \mu\text{m}$,组织以细小的铁素体和珠光体为主,焊接时此区域母材铁素体晶粒组织在焊接热循环的作用下转变为奥氏体,由于振镜激光焊接冷却速度较快,奥氏体在高温区域停留时间较短,奥氏体晶粒未明显长大便冷却形成更加均匀细小的铁素体和珠光体组织。



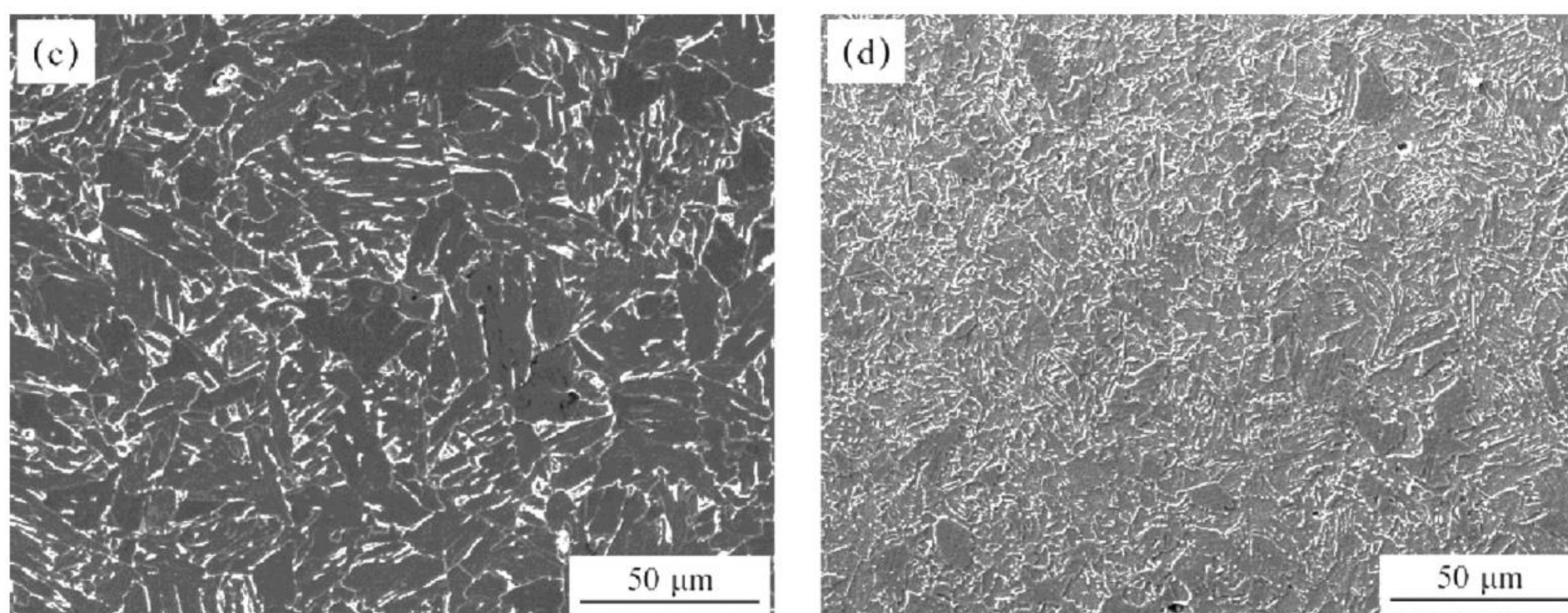


图 8 TIG 与振镜激光焊接接头热影响区微观组织

(a)TIG 焊接;(b)振镜激光 100 Hz;(c)振镜激光 150 Hz;(d)振镜激光 200 Hz

Fig. 8 Microstructure of the heat-affected zone in joints welded by TIG and galvanometer laser welding

(a)TIG welding; (b)scanner laser 100 Hz; (c)scanner laser 150 Hz; (d)scanner laser 200 Hz

2.3 焊接接头拉伸性能分析

对两种不同焊接工艺在不同焊接参数下焊接接头加工成拉伸试样并进行室温拉伸性能测试,不同工艺下拉伸测试试样断裂情况如图 9 所示。图中 A、B、C 分别为扫描频率为 100 Hz、150 Hz 和 200 Hz 时振镜激光焊接拉伸试样, D 为 TIG 焊拉伸试样。拉伸试验发现, TIG 焊拉伸试样断裂位置为热影响区部位, 颈缩较小, 且从拉伸试样应力应变曲线中可以明显看出, TIG 焊接拉伸试样拉伸位移明显小于振镜激光焊接拉伸试样拉伸位移, 如图 10 所示, 说明 TIG 焊接接头热影响区为力学性能薄弱区域且塑性较差。振镜激光焊接拉伸试样断裂位置均为母材区域, 断口两侧区域母材颈缩明显并在颈缩最严重的母材处断裂, 说明振镜激光焊接接头强度不低于母材强度。

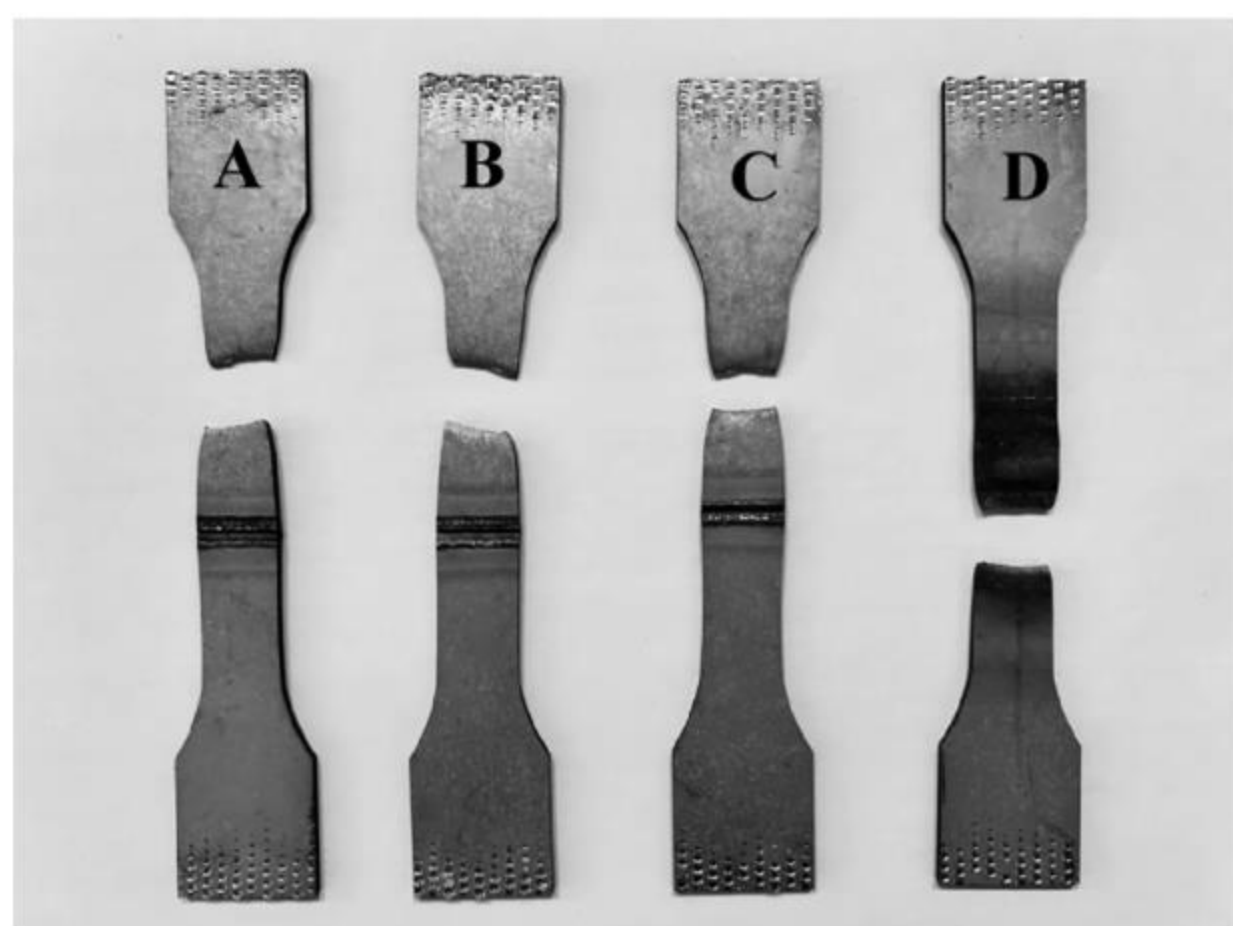


图 9 不同工艺下拉伸测试断裂试样

Fig. 9 Tensile test fracture specimens under different welding processes

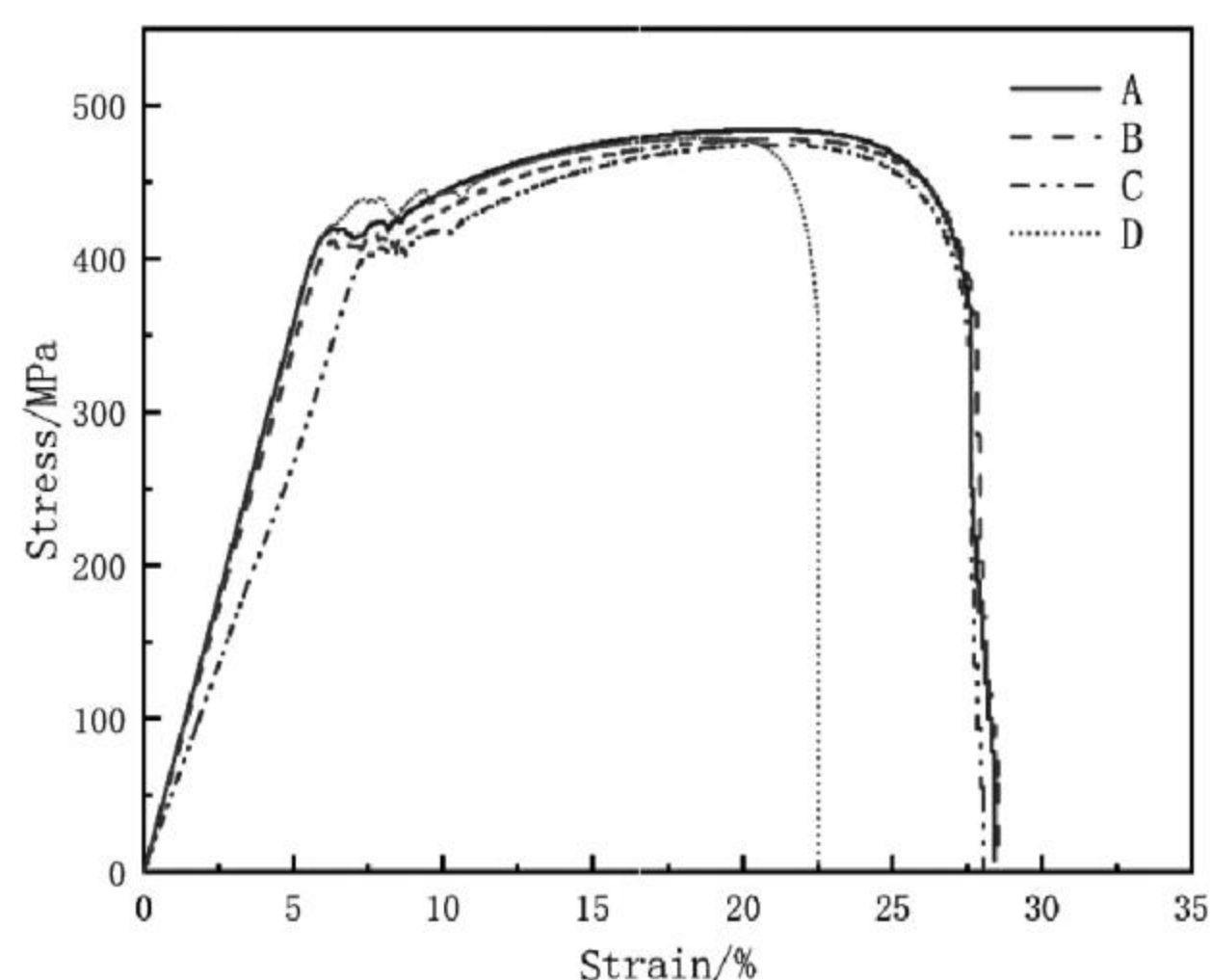


图 10 拉伸试样应力应变曲线

Fig. 10 Stress-strain curve of the tensile test specimen

从表 6 可以看出, TIG 焊接拉伸试样断后伸长率为 22.5%, 而不同扫描频率的振镜激光焊接接头断后伸长率均在 28% 以上, 比 TIG 焊接拉伸试样断后伸长率高 6% 以上, 说明 TIG 焊接热影响区塑性较差; 而 TIG 焊接拉伸试样断裂位置虽然为热影响区部位, 但其抗拉强度值为 473.5 MPa, 从拉伸试样应力应变曲线中可以看出, TIG 焊接试样拉伸最大应力与振镜激光焊接接头试样拉伸最大应力的区别较小, 而振镜激光焊接接头拉伸试样均为母材断裂, 即其拉伸测试考验的是母材的抗拉强度, 考虑到拉伸试样母材性能具有一定波动, 综合判断, TIG 焊接热影响区抗拉强度接近于母材抗拉强度, 说明 TIG 焊接接头热影响区力学性能下降主要表现为塑性下降, 对抗拉强度影响较小。

表 6 焊接接头拉伸性能对比

Table 6 Comparison of tensile properties of welded joints

Parameter	Maximum force F/N	Tensile strength R_m/MPa	Elongation $A/\%$	Rupture part
TIG	9 660.15	473.5	22.5	Heat-affected zone
Galvanometer laser 100 Hz	9 735.25	477.2	28.4	Base material
Galvanometer laser 150 Hz	9 746.37	477.9	28.5	Base material
Galvanometer laser 200 Hz	9 874.34	484.1	28.0	Base material

3 结论

本文采用振镜扫描激光焊对锌铝镁镀层钢进行了焊接,并与 TIG 焊接头成形及组织性能进行对比,研究发现:

(1) TIG 焊接头焊缝及热影响区宽度大且焊缝表面氧化发黑严重,近热影响区母材表面镀层呈网状破裂;振镜扫描激光焊接头焊缝及热影响区宽度小,焊缝正表面为蓝灰色,背面为银灰色,氧化程度较小,近热影响区母材表面镀层完整。

(2) TIG 焊接头和振镜扫描激光焊接头焊缝区组织均由铁素体和粒状贝氏体组成,但 TIG 焊热输入较高,导致晶粒尺寸粗大且存在魏氏组织;而振镜扫描激光焊热输入量小,冷却速度快,且由于激光束对熔池的搅拌作用,晶粒尺寸更加细小。

(3) 两种焊接工艺下接头抗拉强度与母材强度近似, TIG 焊拉伸试样断裂位置为热影响区且颈缩较小,说明 TIG 焊接头热影响区为力学性能薄弱区,且主要表现为塑性下降;振镜扫描激光焊接头延伸率比 TIG 焊接头高出近 6%,表明 GSL 接头具有更高的塑性。

参考文献

[1] 董世文, 骆永伟, 王向飞, 等. 锌铝镁镀层板的形貌分析[J]. 材料保护, 2020, 53(12): 146-151.
DONG S W, LUO Y W, WANG X F, et al. Morphological analysis of zinc-aluminum-magnesium coating plate[J]. Materials Protection, 2020, 53(12): 146-151.

[2] 李锋, 吕家舜, 杨洪刚, 等. 锌铝镁镀层钢板的研究进展[J]. 轧钢, 2013, 30(2): 45-51.
LI F, LÜ J S, YANG H G, et al. Research on ZnAlMg coated steel sheet[J]. Steel Rolling, 2013, 30(2): 45-51.

[3] 蒋磊, 马培兵, 王龙, 等. 基于锌铝镁镀层的汽车前门内板成形工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2021(12): 141-147.
JIANG L, MA P B, WANG L, et al. Research on form-

ing process of automobile front door inner panel based on zinc-aluminum-magnesium coated sheet[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2021(12): 141-147.

[4] 李凯良, 吴长军, 彭浩平, 等. Mg 对 Zn: 11% Al 合金镀层凝固组织及合金层生长的影响[J]. 工程科学学报, 2016, 38(8): 1123-1131.
LI K L, WU C J, PENG H P, et al. Effect of Mg on the solidification structure and growth of the intermetallic layer of a Zn: 11% Al alloy coating[J]. Chinese Journal of Engineering, 2016, 38(8): 1123-1131.

[5] 杜昕, 张满仓, 段生朝, 等. 高耐蚀锌铝镁镀层研究现状[J]. 工程科学学报, 2019, 41(7): 847-856.
DU X, ZHANG M C, DUAN S C, et al. Research status of high corrosion-resistant Zn-Al-Mg coating[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(7): 847-856.

[6] 刘美娜. 锌铝镁镀层汽车钢板 CMT 焊接性能研究[J]. 汽车制造业, 2023(4): 28-29.
LIU M N. Study on CMT weldability of Zn-Al-Mg coating automobile steel plate[J]. Automobil Industrie, 2023(4): 28-29.

[7] 范金卓, 任英, 任强, 等. 加热时间对镀锌高强钢板液态金属脆性的影响[J]. 钢铁, 2023, 58(5): 124-130.
FAN J Z, REN Y, REN Q, et al. Effect of heating time on liquid metal embrittlement of galvanized steel sheet[J]. Iron & Steel, 2023, 58(5): 124-130.

[8] 邓平, 段宇航, 赵勇, 等. AZ31 镁合金激光自熔焊工艺及接头的性能[J]. 热加工工艺, 2021, 50(5): 23-26.
DENG P, DUAN Y H, ZHAO Y, et al. Laser welding process of AZ31 magnesium alloy and performance of joint[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(5): 23-26.

[9] 刘广会, 韩赞, 刘全利, 等. 锌铝镁镀层在加热过程中的组织和耐蚀性[J]. 钢铁, 2024, 59(7): 139-149.
LIU G H, HAN E, LIU Q L, et al. Organization and corrosion resistance of zinc-aluminum-magnesium coatings during heating[J]. Steel, 2024, 59(7): 139-149.

[10] HAO Y, CHEN NN, WANG H P, et al. Effect of

- zinc vapor forces on spattering in partial penetration laser welding of zinc-coated steels[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 298: 117282.
- [11] CAO R, CHANG J H, HUANG Q, et al. Behaviors and effects of Zn coating on welding-brazing process of Al-Steel and Mg-steel dissimilar metals[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 674-688.
- [12] LIU J, JIANG S C, SHI Y, et al. Effects of zinc on the laser welding of an aluminum alloy and galvanized steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 224: 49-59.
- [13] 刘永涛. 焊剂片约束电弧焊接三明治板 Al 元素含量对焊缝性能调控机理研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2023.
LIU Y T. Study on the regulation mechanism of Al content on weld performance of sandwich plate by flux sheet constrained arc welding[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2023.
- [14] 刘闪光. Al 元素对不锈钢 310S、316L 组织性能的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2009.
LIU S G. Effect of Al on microstructure and properties of stainless steel 310S and 316L [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2009.
- [15] TAN C W, ZANG C W, XIA H B, et al. Influence of Al additions in Zn - based filler metals on laser welding - brazing of Al/steel[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34: 251-263.
- [16] 喇培清, 李玉峰, 刘闪光, 等. Al 元素对 316L 不锈钢组织和室温力学性能的影响[J]. *钢铁*, 2010, 45(5): 71-75.
LA P Q, LI Y F, LIU S G, et al. Effect of aluminum on microstructure and mechanical properties of 316L steel[J]. *Iron & Steel*, 2010, 45(5): 71-75.
- [17] 张继雪, 李小婷, 王瑾. SUS316 不锈钢激光摆动焊接工艺研究[J]. *应用激光*, 2022, 42(2): 24-32.
ZHANG J X, LI X T, WANG J. Laser wobble welding process of SUS316 stainless steel[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(2): 24-32.
- [18] HAN J, SHI Y, GUO J C, et al. Porosity inhibition of aluminum alloy by power-modulated laser welding and mechanism analysis [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 102: 827-838.
- [19] 芦伟, 马旭颐, 巩玥, 等. 光束摆动对铝合金激光搭接焊缝成形及组织的影响[J]. *应用激光*, 2022, 42(1): 9-14.
LU W, MA X Y, GONG Y, et al. Effect of laser wobble on the weld formation and microstructure of aluminum alloy lap joint[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(1): 9-14.
- [20] HAN J, SHI Y, ZHANG G, et al. Minimizing defects and controlling the morphology of laser welded aluminum alloys using power modulation-based laser beam oscillation[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 83: 49-59.
- [21] 谢英秀, 金鑫焱, 王利. 热浸镀锌铝镁镀层开发及应用进展[J]. *钢铁研究学报*, 2017, 29(3): 167-174.
XIE Y X, JIN X Y, WANG L. Development and application of hot-dip galvanized zinc-aluminum-magnesium coating[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2017, 29(3): 167-174.
- [22] 严建强, 陈永炜, 王志勇, 等. 7075 铝合金中厚板激光扫描焊接气孔抑制机理研究[J]. *应用激光*, 2023, 43(1): 1-11.
YAN J Q, CHEN Y W, WANG Z Y, et al. Study on the porosity control mechanism of medium thick 7075 aluminum alloy plate by scanning laser welding[J]. *Applied Laser*, 2023, 43(1): 1-11.
- [23] 陈靖雨, 王晓南, 吕凡, 等. 激光束摆动焊接低碳钢焊接接头的组织和力学性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0302006.
CHEN J Y, WANG X N, LÜ F, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of low carbon steels welded by laser beam oscillating welding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0302006.
- [24] 任泽良, 杨成刚, 宋友民, 等. 低碳钢 A-TIG 焊接头组织和性能研究[J]. *热加工工艺*, 2020, 49(23): 12-15.
REN Z L, YANG C G, SONG Y M, et al. Study on microstructure and properties of A-TIG welded joint of low carbon steel[J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49(23): 12-15.
- [25] 陈锦涛, 胡祺, 兰玲, 等. 点环激光超窄间隙焊与电弧焊高强钢厚板组织性能对比研究[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(5): 39-47.
CHEN J T, HU Q, LAN L, et al. Comparative study on microstructure and properties of high strength steel thick plate by adjustable dot-ring laser ultra-narrow gap welding and arc welding[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(5): 39-47.