

激光功率对 TC4 钛合金激光-TIG 复合焊焊缝成形与组织的影响

樊浩¹, 崔珊¹, 陈文静¹, 倪昱², 惠媛媛¹

(¹西安航空职业技术学院, 航空材料工程学院, 陕西 西安 710089;

²兰州理工大学, 有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要 通过采用激光-TIG 复合焊接工艺对 TC4 钛合金进行焊接, 研究了不同激光功率大小对接头成形、焊缝形貌及微观组织的影响。结果表明, 采用激光-TIG 复合焊接 TC4 钛合金, 可以形成表面成形良好, 无咬边、焊瘤等明显缺陷的焊接接头。激光束附近的熔池会产生剧烈流动, 在熔池凝固后会在焊缝表面的中心处出现凹坑。随着激光功率的增加, 焊缝横截面由“蘑菇”形状逐渐变为“沙漏”形状, 平均气孔面积则逐渐减小, 而且气孔主要集中在焊缝的底部。在激光-TIG 的复合作用下, 增加的激光功率会使得熔池流动更加剧烈, 使得晶粒逐渐减小。焊缝的显微组织为由多个相互平行的 α' 马氏体组成的 α' 马氏体束集, 之间夹杂着狭窄的残余 β 相带。 β 相带的宽度差异很大, 较宽的区域约为 $1.95 \mu\text{m}$, 较窄的区域约为 $0.45 \mu\text{m}$ 。

关键词 TC4 钛合金; 激光-TIG 复合焊; 激光功率; 焊缝成形; 显微组织

中图分类号: TG456.7

文献标志码: A

doi: 10.14128/j.cnki.al.20234308.048

Study on Weld Formation and Microstructure of TC4 Titanium Alloy Laser-TIG Hybrid Welding

Fan Hao¹, Cui Shan¹, Chen Wenjing¹, Ni Yu², Hui Yuanyuan¹

(¹School of Aeronautical Materials Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, Shaanxi, China;

²State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract The effect of different laser power on the joint formation, weld morphology, and microstructure of TC4 titanium alloy were studied by laser-tungsten inert gas (TIG) hybrid welding process. The results show that TC4 titanium alloy welded by laser-TIG hybrid welding can form a welded joint with good surface shape, and no obvious defects such as undercut and overlap. The molten pool near the laser beam will produce violent flow, and there will be pits at the center of the weld surface after the molten pool solidifies. With the increase of laser power, the cross section of the weld gradually changes from “mushroom” shape to “hourglass” shape, the average pore area gradually decreases, and the pores are mainly concentrated at the bottom of the weld. Under the hybrid of laser-TIG, the increased laser power will make the molten pool flow more intense and the grain size will gradually decrease. The microstructure of the weld is α' Martensite bundles composed of multiple parallel α' Martensitic with narrow residues β Phase band. The width of the β phase band varies considerably, the wider area is about $1.95 \mu\text{m}$, and the narrow area is about $0.45 \mu\text{m}$.

Key words TC4 titanium alloy; laser-TIG hybrid welding; laser power; weld formation; microstructure

0 引言

TC4 钛合金具有比强度高、密度低、抗疲劳性优异、焊接性好等优点, 在航空发动机的叶轮、载人

潜器的耐压壳等航空装备和航海工业中广泛应用^[1-2]。与传统单一热源焊接相比, 激光-电弧复合焊接技术已经逐渐成熟, 它同时包含了激光与电弧

收稿日期: 2023-02-12; 修回日期: 2023-03-05

基金项目: 陕西省高校青年创新团队项目(2019-73)、陕西省教育厅青年创新团队建设科研计划项目(21JPO55)、西安航空职业技术学院科研计划项目(21XHZZK-13, 21XHHTD-02, 19XHZZK-002)

作者简介: 樊浩(1991—), 男, 硕士, 讲师。研究方向为激光焊及激光-电弧复合焊工艺。E-mail: fanhao218@163.com

两种不同热源的优点,具有焊接速度快、形变小、焊接熔深大、焊接质量高等优点^[3-5]。

毕学松等^[6]发现,在船用管道进行打底焊时,采用双道激光-MAG 复合焊工艺,焊缝成形良好,并表现出较高的工况适应性,可在错边 2 mm 和间隙 3 mm 的情况下稳定焊接。杨环宇等^[7]通过对比单钨极氩弧焊和激光-电弧复合焊接工艺,采用复合焊接的焊缝区域具有更细小的晶粒和更高的显微硬度,同时具有更高的电弧压强和电弧收缩比,焊接效率也得到很大程度的提高。Wei 等^[8]研究了 Marangoni 对流(马兰戈尼对流)在激光-电弧复合焊接过程中对熔池流动的影响,发现激光-双 GMA 复合焊对合金元素的分布和焊缝组织的均匀化均有益处。Gao 等^[9]通过激光-电弧复合焊接试验发现,电弧区和激光区的尺寸差异可以通过增加电弧电流和坡口截面积而降低。大电流可以加快熔融金属向熔池根部流动,增大坡口面积可以减小金属流动的阻力。焊缝的显微组织受激光/电弧能量比影响很大。

当激光/电弧能量比较低时,焊缝具有更加良好的机械性能。

激光与电弧在激光-电弧复合焊接过程中会互相耦合,使电弧受到压缩,热源穿透能力增加,从而达到高效率、高质量的焊接^[10-11]。本文采用激光-TIG 复合焊接工艺对 TC4 钛合金进行对接焊,研究了不同激光功率大小对接头成形、焊缝形貌及微观组织的影响,为激光-TIG 复合焊在钛合金焊接中的应用提供参考。

1 试验材料和方法

试验用母材为 100 mm×50 mm×5 mm 的轧制、退火态的 TC4 钛合金,填充材料为直径 1.2 mm 的 TC4 钛合金焊丝,其化学成分如表 1 所示。试验采用 Y 形坡口焊接,其中钝边为 3 mm,坡口为 60°。为确保焊接质量,焊前对母材进行打磨和丙酮擦拭,焊接中采用纯度为 99.99% 的氩气,对正、背面进行保护。

表 1 母材和填充材料的化学成分

Table 1 Chemical compositions of base metal and filler material

Element	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
Mass fraction/%	5.600~6.500	3.500~4.500	0.300	0.080	0.050	0.015	0.200	Bal.

图 1 为试验中采用的激光-TIG 复合焊接装置。其中激光焊采用深圳大族光子生产的 HS-CM-3000-C-G2 激光器, TIG 焊采用山东奥太生产的 AOTAI-WSME-280i 多功能 TIG 焊机。如图 1 所示,沿着焊接方向,前面是焊丝,中间是激光,后面是 TIG 焊枪。其中焊丝与水平面夹角为 30°,钨极与水平面夹角为 45°,为防止焊接过程中激光的反射损害,设置激光与垂线夹角为 15°。

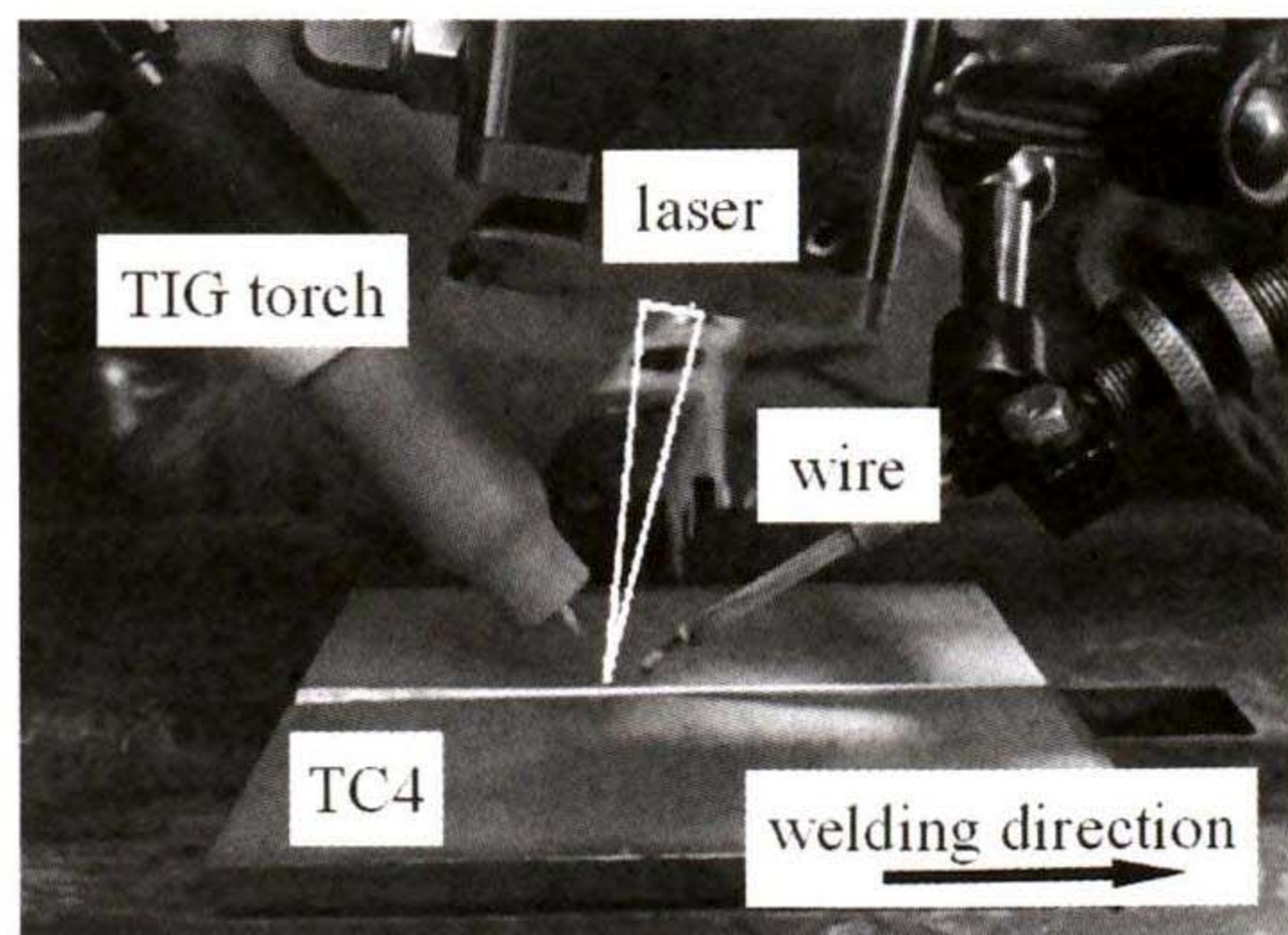


图 1 激光-TIG 复合焊接装置
Fig. 1 Laser-TIG hybrid welding device

1 400~1 600 W,离焦量 Δf 为 2 mm, TIG 焊接电流 I 为 60 A,送丝速度为 150 cm/min,焊接速度 v 为 20 cm/min,具体试验参数如表 2 所示。通过 CP-80 高速摄影仪对激光-TIG 复合焊接过程进行图像采集,摄影仪曝光时间为 100 μ s,帧速率为 1 000 帧/s,分辨率为 512 像素×512 像素。焊接完成后,制备接头金相试样,并在光学金相显微镜(LSM800)和扫描电子显微镜(FEG-450)上观察焊缝的微观组织。

表 2 试验参数

Table 2 Experiment parameters

Number	P /W	I /A	Welding speed /($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
1	1 400		
2	1 500	60	20
3	1 600		

2 试验结果与分析

2.1 激光功率对接头成形的影响

图 2 展示了 TC4 钛合金在不同激光功率下的激光-TIG 复合焊接头表面形貌。从中可以看出,焊

在激光-TIG 复合焊接过程中,激光功率 P 为

缝表面在不同激光功率下,均成形良好,无咬边、焊瘤等明显缺陷。但在焊缝表面的中心处出现凹坑,并且随着激光功率的增加,凹坑逐渐变大。当激光功率 $P=1\ 400\ \text{W}$ 时,焊缝背面出现未焊透,并在焊

缝背面结尾段焊透。从图 2 中可以看到,焊缝背面起始段的宽度均小于结尾段。当激光功率 $P=1\ 600\ \text{W}$ 时,在焊缝表面的凹坑附近出现气孔,如图 2(c) 所示。

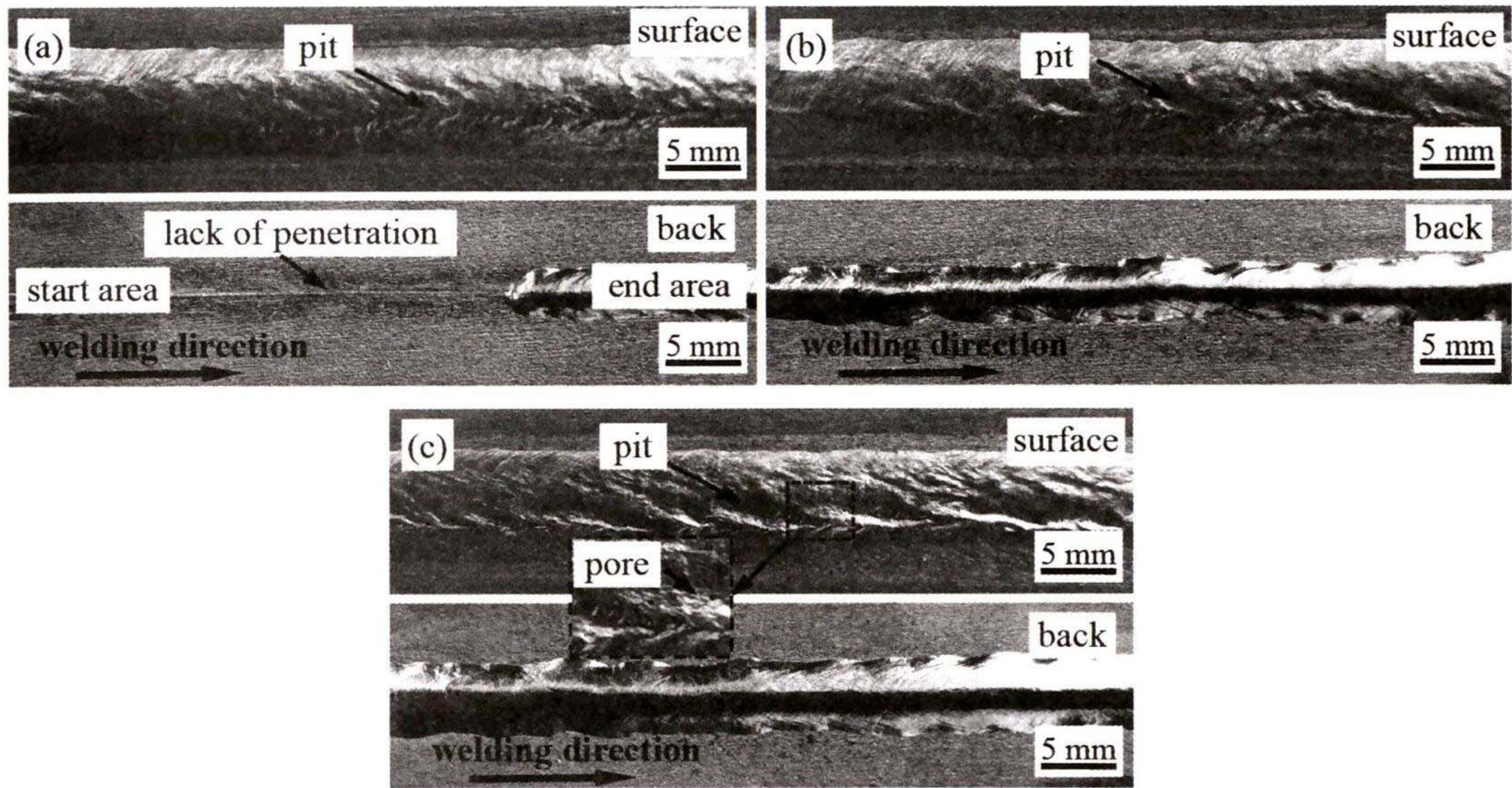


图 2 不同激光功率下激光-TIG 复合焊接头表面形貌
(a) $P=1\ 400\ \text{W}$; (b) $P=1\ 500\ \text{W}$; (c) $P=1\ 600\ \text{W}$

Fig. 2 Surface morphology of Laser-TIG hybrid welded joints with different laser power
(a) $P=1\ 400\ \text{W}$; (b) $P=1\ 500\ \text{W}$; (c) $P=1\ 600\ \text{W}$

图 3 为不同激光功率下焊缝的几何尺寸。从图 3(a) 中可见,随着激光功率的增加,焊缝宽度分别为 $7.59\ \text{mm}$ 、 $7.80\ \text{mm}$ 和 $7.92\ \text{mm}$,焊缝背面起始段宽度从未焊透增加到 $4.92\ \text{mm}$,且焊缝背面起始段与结尾段的差异从 $3.36\ \text{mm}$ 减小到 $0.32\ \text{mm}$ 。从图 3(b) 中可见,随着激光功率的增加,焊缝余高从

$0.92\ \text{mm}$ 减小到 $0.38\ \text{mm}$,焊缝背面凸起从未焊透增加到 $0.98\ \text{mm}$ 。因此,可以得出结论,焊缝背面的宽度和背面的凸起随着激光功率的增大而逐渐增大,而焊缝的余高却在逐渐降低。同时,焊缝宽度受激光功率变化的影响并不明显。

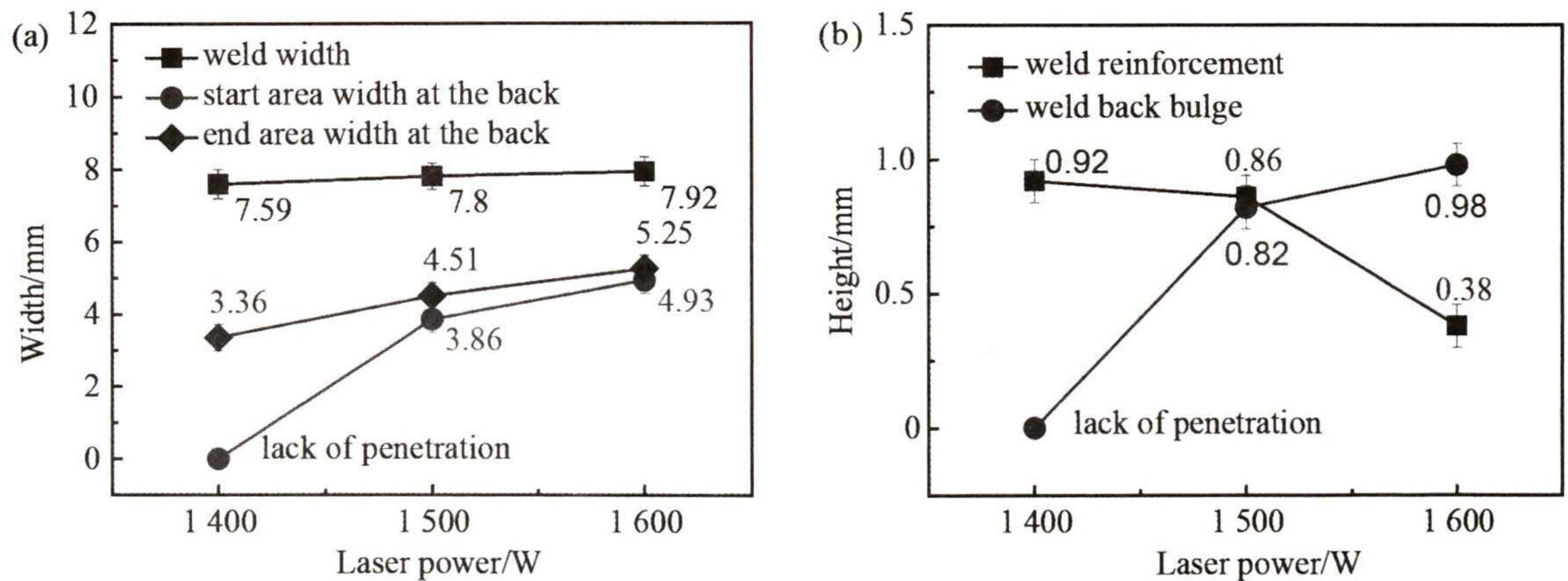


图 3 不同激光功率焊缝的几何尺寸
(a) 宽度; (b) 高度

Fig. 3 Weld geometry sizes with different laser power
(a) Width; (b) height

图 4 展示了不同激光功率下稳定状态的激光-TIG 形态。由图 4 可见,焊接过程中的熔滴过渡是稳定的接触过渡。激光、TIG 电弧、焊丝熔化、熔池形状处于相对稳定的状态。但是在熔池中的激光束附近出现较为剧烈的流动,并有飞溅产生,如图 4

(b)、(c)所示。激光束附近剧烈流动的熔池,在凝固后会导致焊缝表面的中心处出现凹坑,如图 2 所示。随着激光功率的增加,流动也越来越剧烈,因此凹坑也逐渐变大,甚至在凹坑处产生气孔,如图 2(c) 所示。

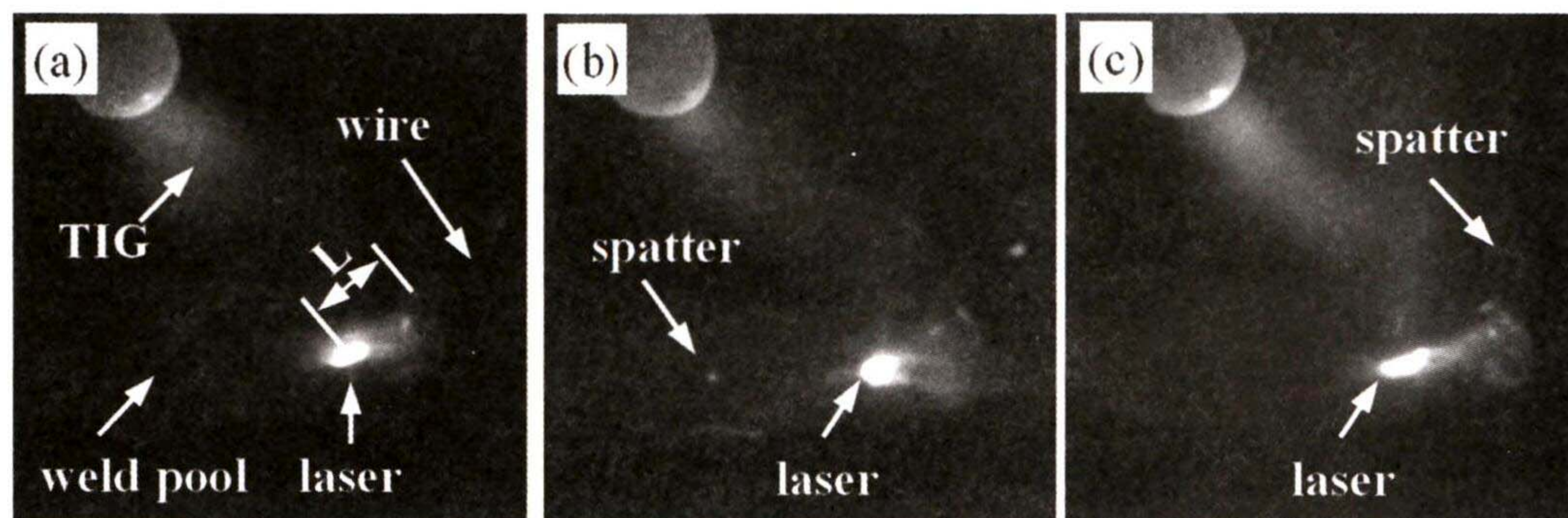


图 4 不同激光功率下稳定状态的激光-TIG 形态
(a) $P=1400\text{ W}$; (b) $P=1500\text{ W}$; (c) $P=1600\text{ W}$

Fig. 4 Laser-TIG morphology in a stable state with different laser power
(a) $P=1400\text{ W}$; (b) $P=1500\text{ W}$; (c) $P=1600\text{ W}$

图 5 为不同激光功率下激光束距未熔化焊丝端部的距离 L 。当激光功率 $P=1400\text{ W}$ 时,距离 L 较小,为 1.16 mm 。随着激光功率的逐渐增加,距离 L 增加到 1.28 mm 、 1.42 mm 。这是因为熔化焊丝的能量来自 TIG 电弧和激光束,激光功率的增加使得焊丝熔化速度增加,导致其端部到激光束距离 L 增加。

区处均出现气孔,并且焊缝底部的气孔明显多于焊缝上部的气孔数量。

2.2 激光功率对焊缝横截面宏观形貌的影响

图 6 为 TC4 钛合金在不同激光功率下的激光-TIG 复合焊接头横截面形貌。当激光功率 $P=1400\text{ W}$ 时,焊缝的横截面形貌是“蘑菇”形状,并在底部存在 0.58 mm 的未焊透缺陷,如图 6(a)所示。随着激光功率的增加,焊缝横截面的“蘑菇”形状也逐渐变为“沙漏”形状。同时在焊缝底部和毗邻熔合

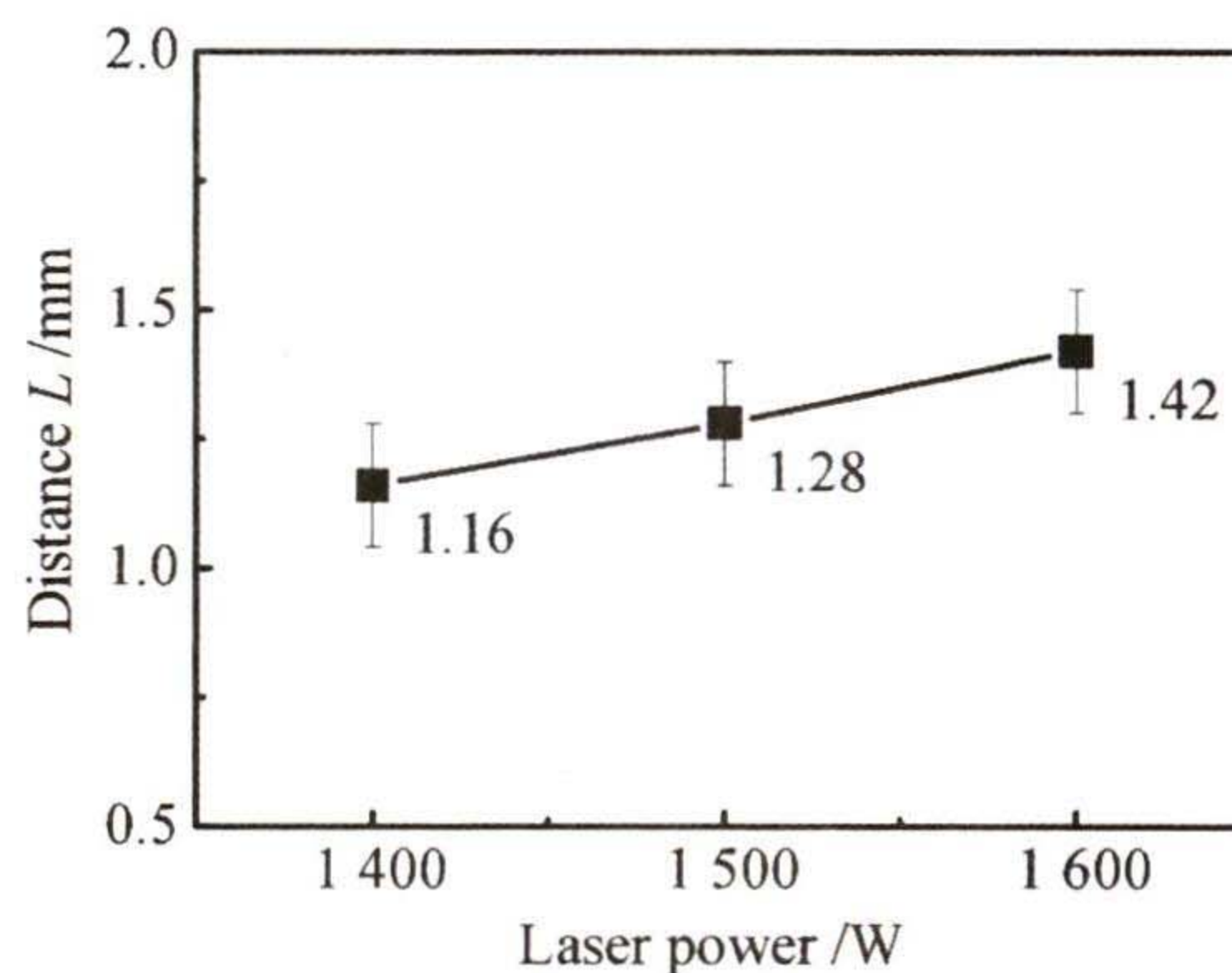


图 5 激光束距焊丝端部距离
Fig. 5 Distance between laser beam and welding wire end

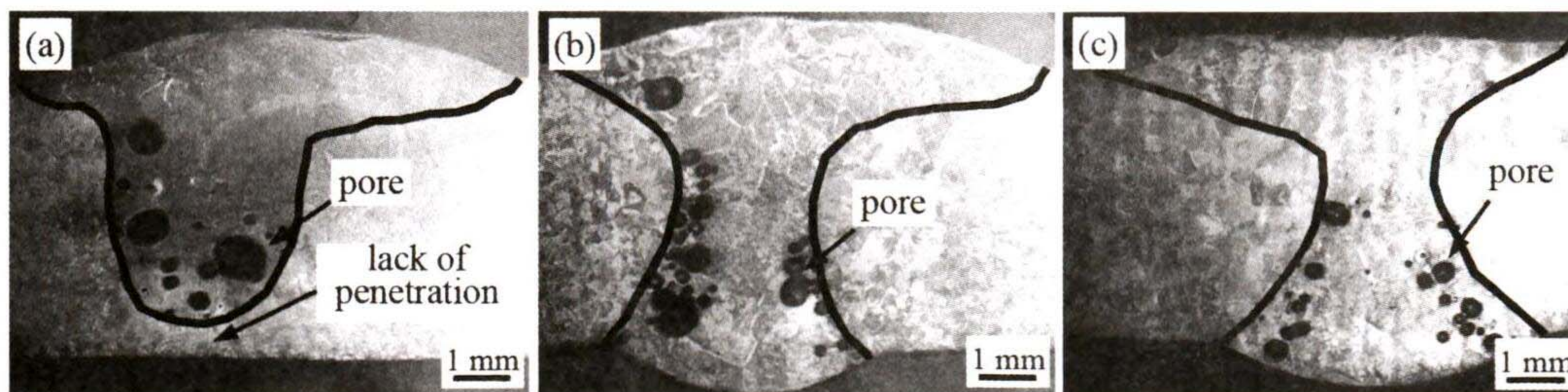


图 6 不同激光功率下焊接接头横截面形貌
(a) $P=1400\text{ W}$; (b) $P=1500\text{ W}$; (c) $P=1600\text{ W}$

Fig. 6 Cross section morphology of welded joints with different laser power
(a) $P=1400\text{ W}$; (b) $P=1500\text{ W}$; (c) $P=1600\text{ W}$

图 7 为不同激光功率下的焊缝横截面积和平均气孔面积。可见,随着激光功率的增加,焊缝横截面积逐渐增大,而平均气孔面积逐渐减小。由于不同激光功率下焊缝宽度基本不变,因此,焊缝横截面积

的增加主要是因为焊缝背面宽度和背面凸起的增加。当激光功率 $P=1\ 400\ \text{W}$ 时,较大的激光功率导致熔池凝固时间变长,增加了气孔逸出的时间,从而使得平均气孔面积减少。

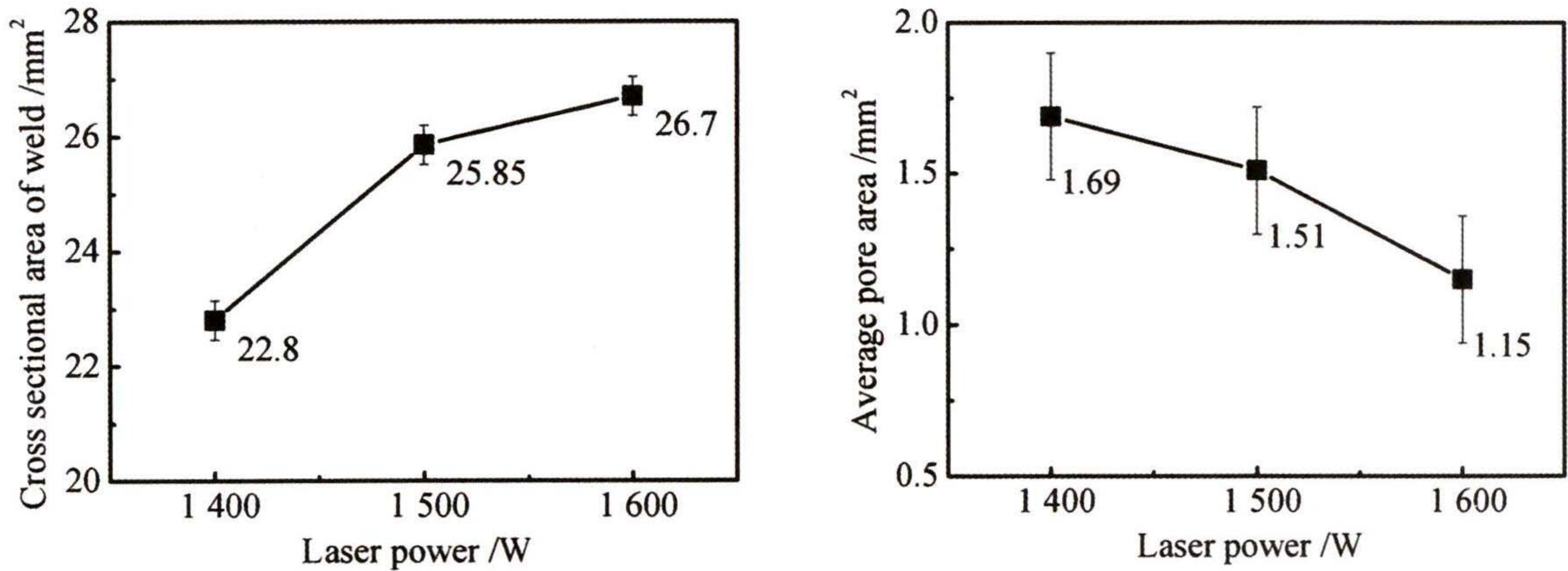


图 7 不同激光功率下焊缝横截面积和平均气孔面积

(a)焊缝横截面积;(b)平均气孔面积

Fig. 7 Average porosity area of weld cross section with different laser power

(a)Cross sectional area of weld; (b)average pore area

2.3 激光功率对焊缝微观组织的影响

图 8 为 TC4 钛合金在不同激光功率下的激光-TIG 复合焊焊缝显微组织。焊缝区域的微观组织由较粗大柱状晶(β 晶粒)构成,并且微观组织中分布着明暗相间的条纹。 β 晶粒晶界清晰,并在晶界处存在连续的晶界 α 相(α_{gb} 相),如图 8(a)所示。在 β 晶粒内部分布着细长针状 α' 马氏体以及魏氏组织。在激光-TIG 复合焊接过程中,焊缝金属中的 β 相会快速长大,最终生成粗大的柱状晶。在之后的快速冷却过程中,粗大的 β 相来不及相变成 α 相,会直接切变成晶体结构不同的过饱和 α' 马氏体,并出

现相互交错分布现象^[12]。

图 9 为激光功率 $P=1\ 500\ \text{W}$ 时焊缝的 SEM 形貌。由图可见,焊缝的显微组织为由多个相互平行的 α' 马氏体组成的 α' 马氏体束集,之间夹杂着狭窄的残余 β 相带。在图 9 中发现 β 相带的宽度差异较大,如 A 区 β 相带的平均宽度为 $1.95\ \mu\text{m}$,B 区 β 相带的平均宽度为 $0.45\ \mu\text{m}$,前者约为后者的 4.3 倍。较宽的 β 相带(A 区)出现在两个位相差较大的 α' 马氏体束集之间,较窄的 β 相带(B 区)出现在相互平行的 α' 马氏体束集中。

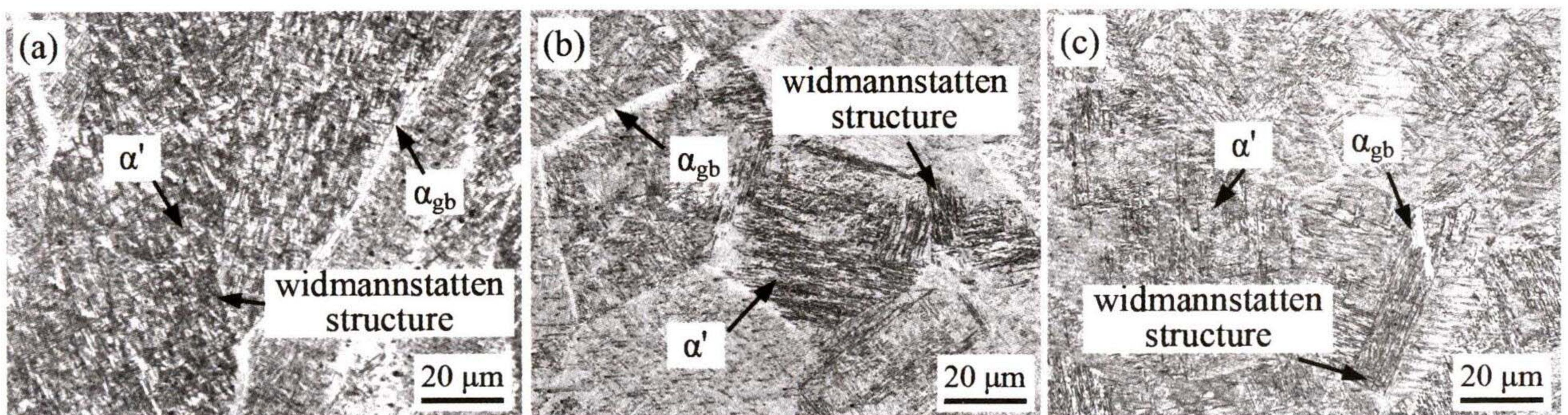


图 8 不同激光功率下焊缝的显微组织

(a) $P=1\ 400\ \text{W}$;(b) $P=1\ 500\ \text{W}$;(c) $P=1\ 600\ \text{W}$

Fig. 8 Microstructure of weld with different laser power

(a) $P=1\ 400\ \text{W}$; (b) $P=1\ 500\ \text{W}$; (c) $P=1\ 600\ \text{W}$

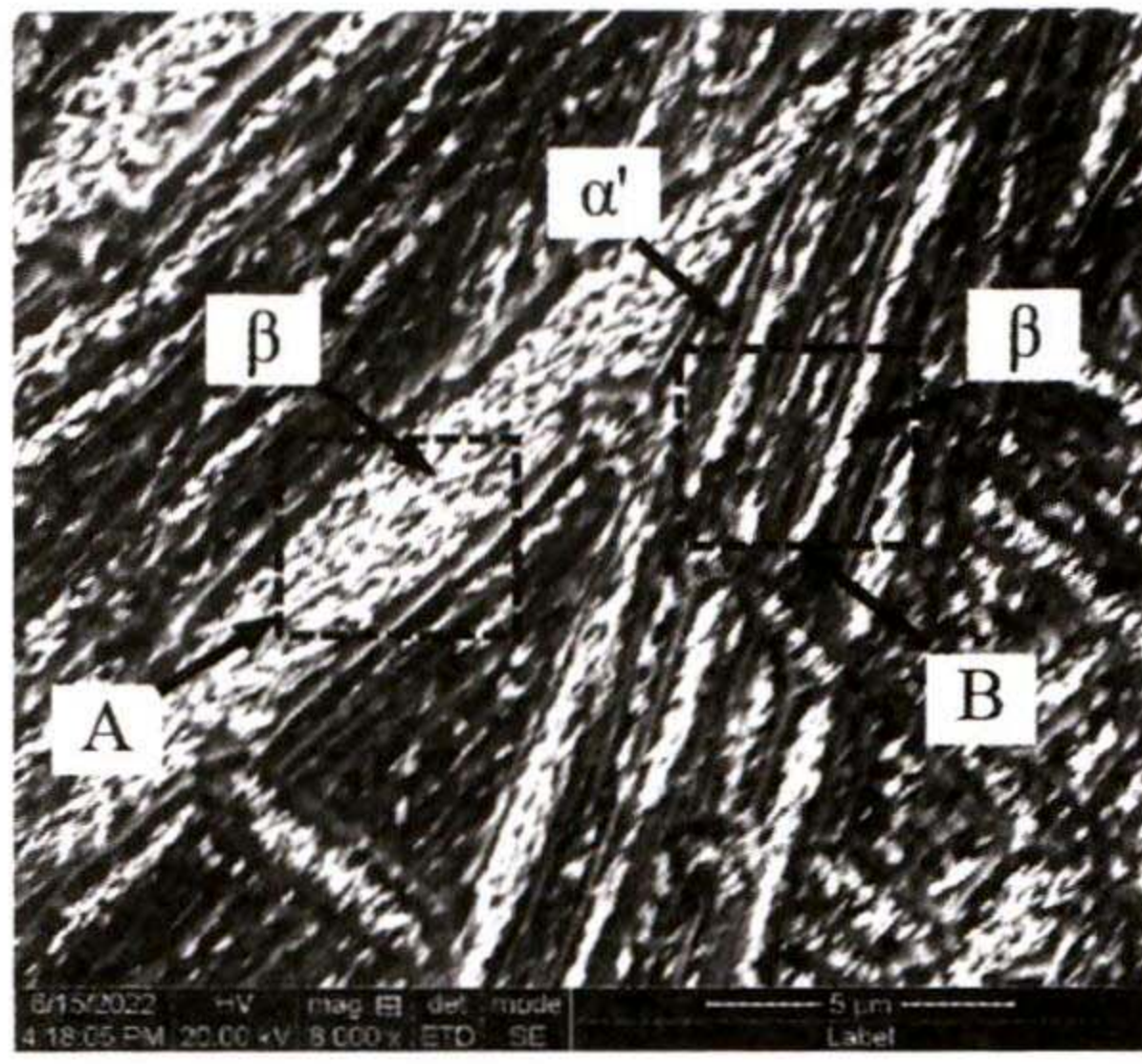


图9 焊缝的SEM形貌
Fig.9 SEM images of weld

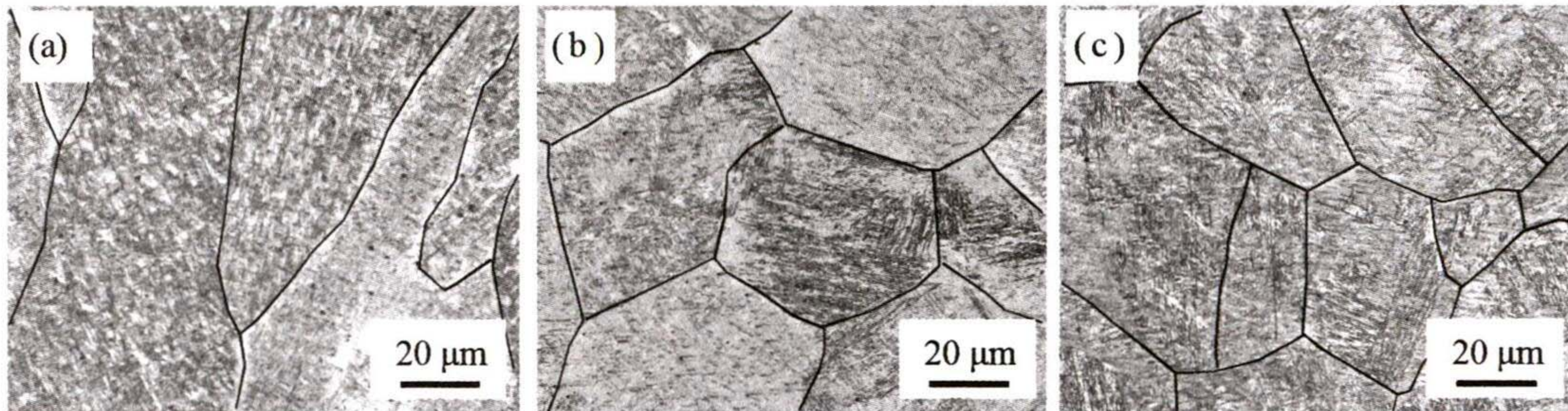


图10 不同激光功率下焊缝的晶粒
(a) $P=1\ 400\ W$; (b) $P=1\ 500\ W$; (c) $P=1\ 600\ W$
Fig.10 The grains of weld with different laser power
(a) $P=1\ 400\ W$; (b) $P=1\ 500\ W$; (c) $P=1\ 600\ W$

3 结论

(1)采用激光-TIG复合焊接TC4钛合金,可以形成表面成形良好,无咬边、焊瘤等明显缺陷的焊接接头。焊缝宽度受激光功率变化影响不明显。激光束附近的熔池会产生剧烈流动,在凝固后会致焊缝表面的中心处出现凹坑。随着激光功率的增加,凹坑逐渐变大。

(2)随着激光功率的增加,焊缝横截面的“蘑菇”形状逐渐变为“沙漏”形状,焊缝横截面积逐渐增大,而平均气孔面积逐渐减小,气孔主要集中在焊缝的底部。

(3)在激光-TIG的复合作用下,增加的激光功率会使得熔池流动更加剧烈,使得晶粒逐渐减小。焊缝的显微组织为由多个相互平行的 α' 马氏体组成的 α' 马氏体束集,之间夹杂着狭窄的残余 β 相带。 β 相带的宽度差异很大,较宽的区域约为 $1.95\ \mu\text{m}$,较窄的区域约为 $0.45\ \mu\text{m}$ 。

参考文献

[1] 房卫萍,肖铁,张宇鹏,等.超厚板TC4钛合金电子束焊接接头应力腐蚀敏感性[J].焊接学报,2019,40

图10为不同激光功率下激光-TIG复合焊焊缝的晶粒(图中的晶界已用虚线标出)。从图10中可以看到,焊缝的晶粒随着激光功率的增加而逐渐减小。分析认为,这是因为在激光-TIG的复合作用下,随着激光功率的增加,熔池流动更加剧烈,如图4所示的高速摄影下激光-TIG形态,在熔池的剧烈流动下生成的粗大柱状晶会被破碎,使得晶粒逐渐减小。

(12): 121-128.

FANG W P, XIAO T, ZHANG Y P, et al. Stress corrosion sensitivity of electron beam welded joints of super thick plate TC4 titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(12): 121-128.

[2] HUANG J K, LIU S E, YU S R, et al. Arc deposition of wear resistant layer TiN on $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ using simultaneous feeding of nitrogen and wire[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 381: 125141.

[3] 代孝红,郭紫威,王鑫.基于响应面法的DP800车用高强钢激光-电弧复合焊接焊缝成形研究[J].应用激光,2023,43(1): 12-17.

DAI X H, GUO Z W, WANG X. Study on weld formation of laser-arc hybrid welding of DP800 automotive high strength steel based on response surface method [J]. Applied Laser, 2023, 43(1): 12-17.

[4] FAN H, ZHOU P, LI J E, et al. Microstructure and mechanical properties of arc zone and laser zone of TC4 titanium alloy laser-TIG hybrid welded joint[J]. Metals, 2022, 12(11): 1854.

[5] FANG N W, GUO E J, HUANG R S, et al. Effect of welding heat input on microstructure and properties of TC4 titanium alloy ultra-narrow gap welded joint by la-

- ser welding with filler wire[J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(1): 016511.
- [6] 毕学松, 侯艳喜, 柳春恕, 等. 船用管双道激光-MAG复合焊打底焊工艺研究[J]. *应用激光*, 2022, 42(12): 1-7.
BI X S, HOU Y X, LIU C S, et al. Study on backing weld process of double-pass laser-MAG hybrid welding for marine pipes[J]. *Applied Laser*, 2022, 42(12): 1-7.
- [7] 杨环宇, 徐信坤, 巴现礼, 等. 低功率激光-双电弧焊接钛合金中厚板工艺及机理[J]. *焊接学报*, 2022, 43(12) 12-19
YANG H Y, XU X K, BA X L, et al. Technology and mechanism of low power laser-double arc welding of titanium alloy plate[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(12)12-19
- [8] WEI H L, LI H, YANG L J, et al. Arc characteristics and metal transfer process of hybrid laser double GMA welding [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5): 1019-1028.
- [9] GAO M, ZENG X Y, HU Q W, et al. Weld microstructure and shape of laser-arc hybrid welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13 (2): 106-113.
- [10] 周勇, 张成文, 张国军, 等. 高强钢激光电弧复合焊接温度场的数值模拟与试验研究[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(1): 153-158.
ZHOU Y, ZHANG C W, ZHANG G J, et al. Numerical simulation and experimental study of temperature field of hybrid laser arc welding joint of high strength steel[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(1): 153-158.
- [11] 桂晓燕, 高向东, 孙友松, 等. 激光电弧复合焊变形及残余应力的数值分析[J]. *应用激光*, 2021, 41(3): 651-656.
GUI X Y, GAO X D, SUN Y S, et al. Numerical analysis of deformation and residual stress in laser arc hybrid welding [J]. *Applied Laser*, 2021, 41(3): 651-656.
- [12] 龚玉兵, 王善林, 李娟, 等. 厚板 TC4 钛合金电子束焊接头组织演变规律[J]. *焊接学报*, 2017, 38(9): 91-96.
GONG Y B, WANG S L, LI J, et al. Microstructure evolution law of electron beam welding joint of thick plate TC4 titanium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38(9): 91-96.