

引用格式:樊浩,惠媛媛,崔珊,等. TC4钛合金激光-TIG复合焊焊缝成形与组织研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(19): 123-127.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20223530
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

TC4钛合金激光-TIG复合焊焊缝成形与组织研究

樊浩¹, 惠媛媛¹, 崔珊¹, 倪昱², 李杰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:通过对TC4钛合金进行激光-TIG(钨极氩弧焊)复合焊接,研究了不同TIG电流大小对接头表面形貌、焊缝成形、显微组织的影响。结果表明,TC4钛合金在激光-TIG复合焊接下可以形成连续完整的焊接接头。且随着电流增加,焊缝横截面由“钉子”形状逐渐转变为“漏斗”形状,平均气孔面积则先减少后增加,并在电流 $I=50\text{ A}$ 时达到最小值。在激光-TIG的复合作用下,随着电流增加,熔池流动更加剧烈,焊缝的晶粒先减小然后增大。焊缝的显微组织主要是由针状 α' 马氏体和 β 相带相互交织而成的网篮组织、 α_{ph} 相和魏氏组织组成。当电流 $I=50\text{ A}$ 时,焊缝 α' 马氏体束之间的 β 相带宽度更宽,平均宽度为 $0.91\ \mu\text{m}$ 。

关键词:TC4钛合金;激光-TIG复合焊;焊缝成形;显微组织

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2023)19-0123-05

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

FAN Hao¹, HUI Yuanyuan¹, CUI Shan¹, NI Yu², LI Jie¹

(1. School of Aeronautical Materials Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-Ferrous Metal, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Laser-tungsten inert gas (TIG) hybrid welding tests of TC4 titanium alloy were carried out, and the effects of different TIG currents on the joint surface morphology, weld formation and microstructure were studied. The results show that the continuous and complete TC4 titanium alloy welded joint can be formed under laser-TIG composite welding. With the increase of the current, the weld cross section gradually changes from "nail" shape to "funnel" shape, and the average porosity area decreases first and then increases, and it reaches the minimum value when the current is 50 A. Under the hybrid action of laser-TIG, the molten pool flow becomes more intense with the increase of current, and the grain size of the weld decreases first and then increases. The microstructure of the weld is mainly composed of mesh basket structure with acicular α' martensite and β band, α_{ph} phase and Widmannstatten structure. When the current is 50 A, the β phase band width between α' martensite bundles is wider, with an average width of $0.91\ \mu\text{m}$.

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

TC4钛合金是典型的 $\alpha+\beta$ 两相钛合金,因其低密度、高比强度、优异的耐腐蚀性、良好的焊接性和

抗疲劳性等优点,在航空航天、航海装备工业中得到了广泛应用^[1-2]。TC4钛合金的传统焊接方法主要有TIG(钨极氩弧焊)、激光焊、电子束焊等,但这些方法在焊接时却出现了很多问题^[3-5]。Fang等^[6]通过对Ti-6Al-4V钛合金进行激光焊接,发现焊缝组织的晶粒明显长大,并出现大量针状 α' 马氏体。方乃文等^[7]在超窄间隙激光焊接大厚板TC4钛合金时发现,焊缝金属中的 β 相会在激光填丝焊接时迅速长大,产生粗大的柱状晶。张宇鹏等^[8]通过电子束焊接TC4钛合金发现,焊缝组织由粗 β 柱状晶体组成,并在

收稿日期:2022-12-18

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

作者简介:樊浩(1991-),男,山西运城人,讲师,硕士,主要从事特种连接技术、激光-电弧复合焊接研究;电话:15902908561;

E-mail: fanhao218@163.com

晶界内部分布着粗大的 α 片层,且热影响区存在明显的组织不均匀性。

激光-电弧复合焊与单一热源相比,具有高效率、高质量等优点,可以有效控制焊缝外观成形^[9-10]。Frostevarg 等^[11]发现过调节激光-电弧的距离可以控制熔池中的匙孔位置,从而改变熔池流动,并有效防止咬边的发生。Liu 等^[12]对 316 不锈钢进行激光-MIG 复合焊接。结果表明,交变磁场可以通过促进激光诱导等离子体提高复合热源的穿透能力。激光与电弧在焊接过程中具有耦合作用,能将电弧吸引压缩,使电弧能量密度提高,增加热源的穿透能力,并可以实现更宽间隙、更厚板材的焊接^[13-14]。

本文通过对 TC4 钛合金进行激光-TIG 复合焊接,研究了不同 TIG 电流大小对接头表面形貌、焊缝成形、显微组织的影响,为 TC4 钛合金激光-TIG 复合焊接的应用提供可靠的理论基础。

1 试验材料和方法

试验母材和填充焊丝均为 TC4 钛合金。试验母材供货状态为轧制退火态,尺寸为 100 mm×50 mm×5 mm。试验采用的填充焊丝直径为 1.2 mm。母材和填充焊丝的化学成分见表 1。试验采用平板对接焊,试板坡口为 Y 型坡口,坡口角度为 60°,钝边为 3 mm,并留有 0~0.2 mm 的对接间隙。焊接前用丙酮擦拭母材表面,以确保表面清洁无污渍。

表 1 母材和填充焊丝的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt%)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.6~6.5	3.5~4.5	0.30	0.08	0.05	0.015	0.20	余量

焊接装置由 HS-CM-3000-C-G2 光纤激光、AOTAI-WSME-280i 多功能 TIG 焊机和 WF-007A 多功能自动送丝机组成,激光-TIG 复合焊接装置示意图如图 1 所示。试样焊接时,焊丝在前,激光在中,TIG 电弧在后,其中钨极与工件表面夹角为 45°,设置激光与垂线夹角设置为 15°,防止焊接过程中激光的反射损害,焊丝与工件表面夹角为 30°,钨极端部距离工件表面 D_A 为 3~4 mm,钨极端部与激光束距离 D_{L-A} 为 2 mm,激光离焦量 Δf 为 2 mm。

在激光-TIG 复合焊接过程中,TIG 焊接电流 I 为 0~70 A,激光功率 P 为 1.5 kW,焊接速度 v 为 20 cm/min,送丝速度为 150 cm/min。为防止焊接过程中

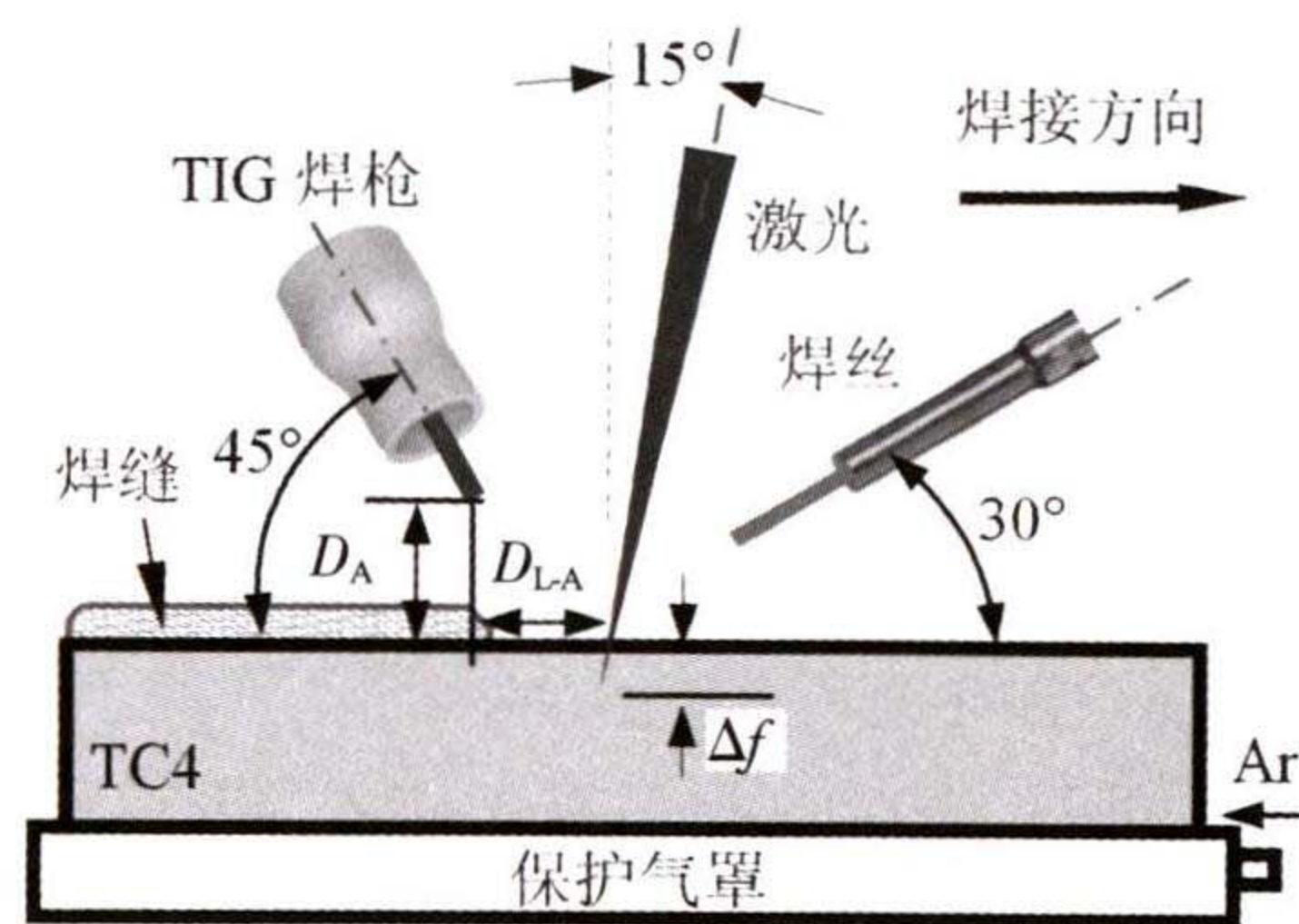


图 1 激光-TIG 复合焊接装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser-TIG hybrid welding device

接头吸入 O、H、N,采用纯度为 99.99% 的氩气,分别对正、背面进行保护,气体流速分别为 15、5 L/min。采用高速摄影仪(CP-80)对激光-TIG 复合焊接过程中的激光-电弧形态进行图像采集。

通过线切割方法从接头中切取试样。将金相试样表面进行研磨和抛光,并在腐蚀液(1 mL HF、3 mL HNO₃ 和 46 mL H₂O 溶液)中腐蚀 10~15 s。然后在 LSM800 光学金相显微镜和 FEG-450 扫描电子显微镜上观察焊缝的微观结构。并按照图 2 所示,选取焊接接头中 6 个横截面,计算出焊缝横截面的平均气孔面积。

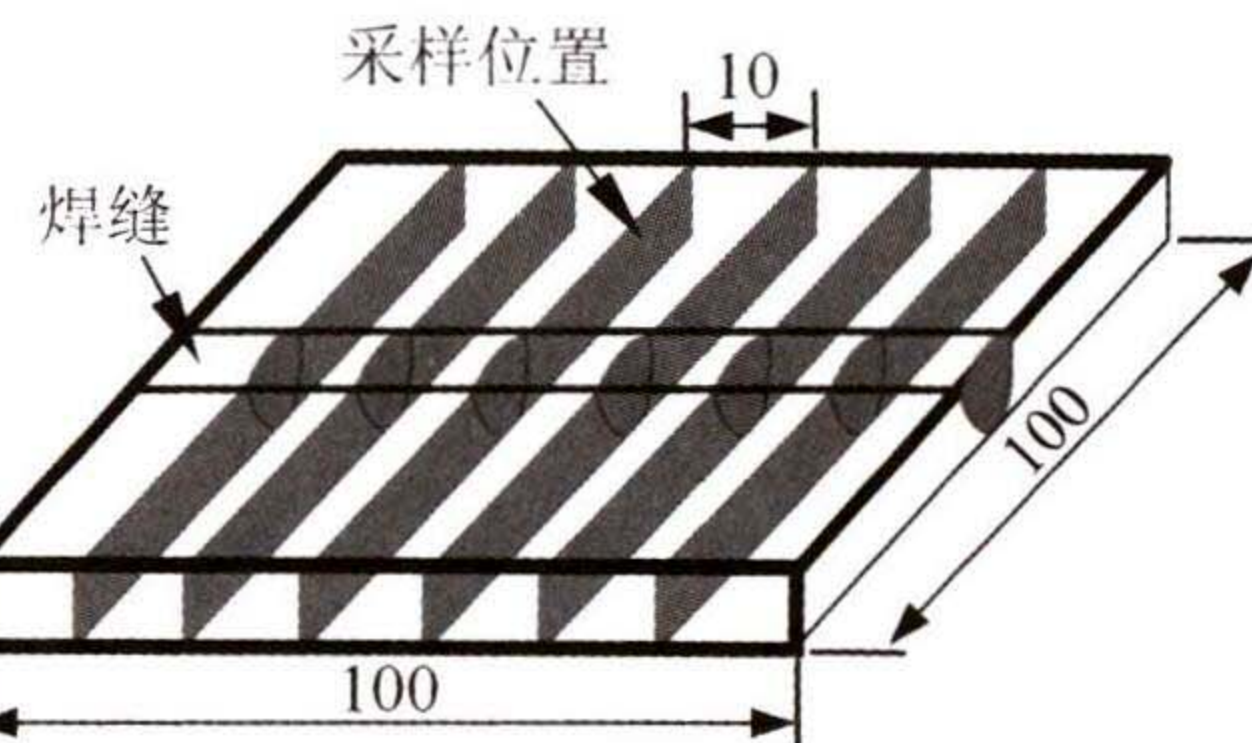


图 2 焊缝横截面气孔采样示意图(mm)

Fig.2 Schematic map of porosity sampling on cross section of weld (mm)

2 试验结果与分析

2.1 电流大小对焊缝成形的影响

图 3 为不同电流下激光-TIG 复合焊接头的表面形貌。由图可见,在不同电流下都可以形成连续完整的焊接接头。且在焊缝表面未发现未熔合、咬边、焊瘤等明显缺陷。但当电流 $I=0$ A 时,焊缝背面未焊透。当电流 I 大于 50 A 时,在焊缝表面的中心处有凹坑出现,如图 3(c)、(d)所示。

图 4 为不同电流下焊缝的几何尺寸。从图 4(a)可以看出,随着电流的增大焊缝正面宽度从 6.06 mm 增加到 8.78 mm,焊缝背面宽度从未焊透增加到 5.62 mm。从图 4(b)可以看出,随着电流的增大焊缝

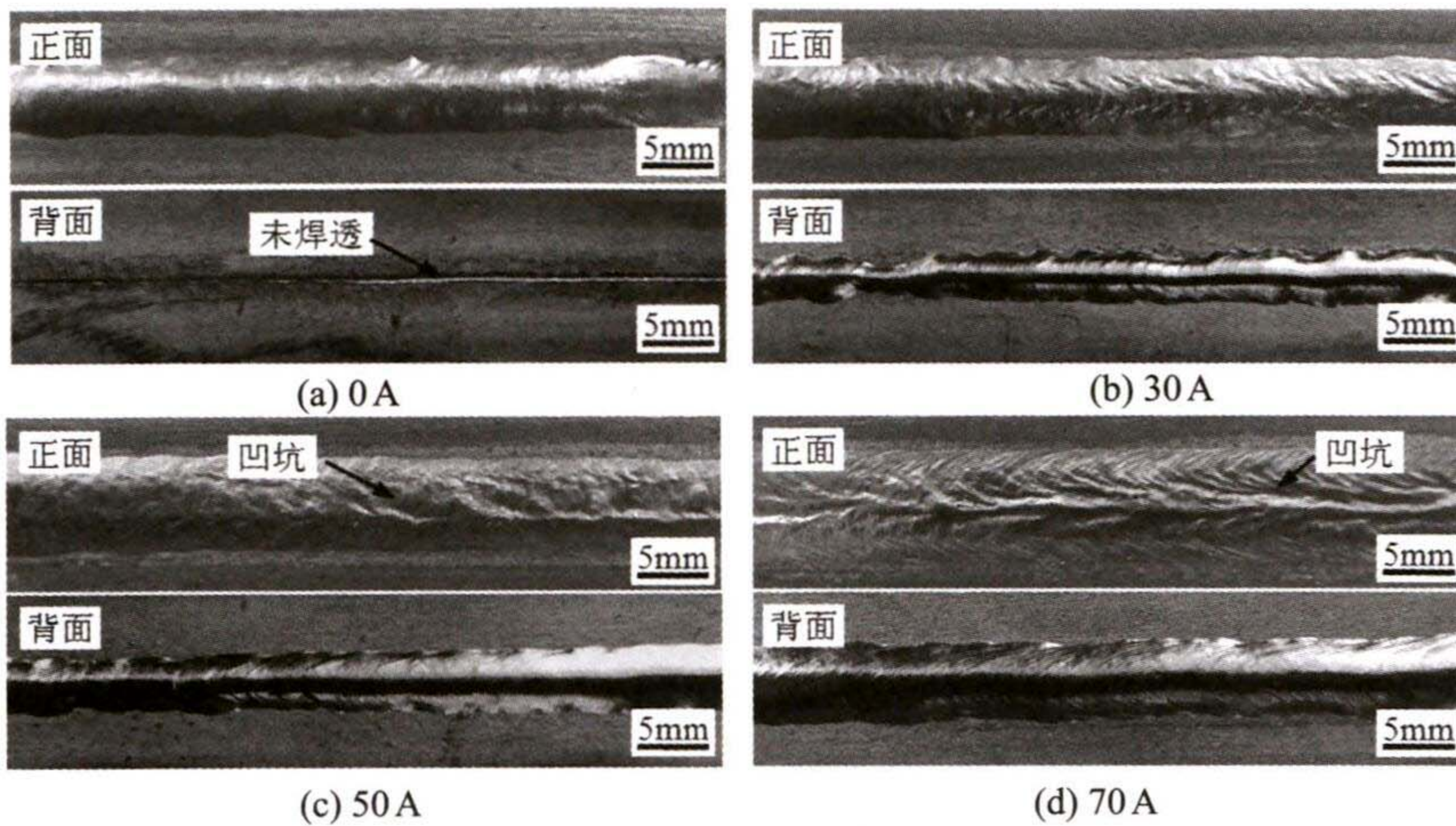


图3 不同电流下激光-TIG复合焊接头的表面形貌

Fig.3 Surface morphologies of the laser-TIG hybrid welded joints with different currents

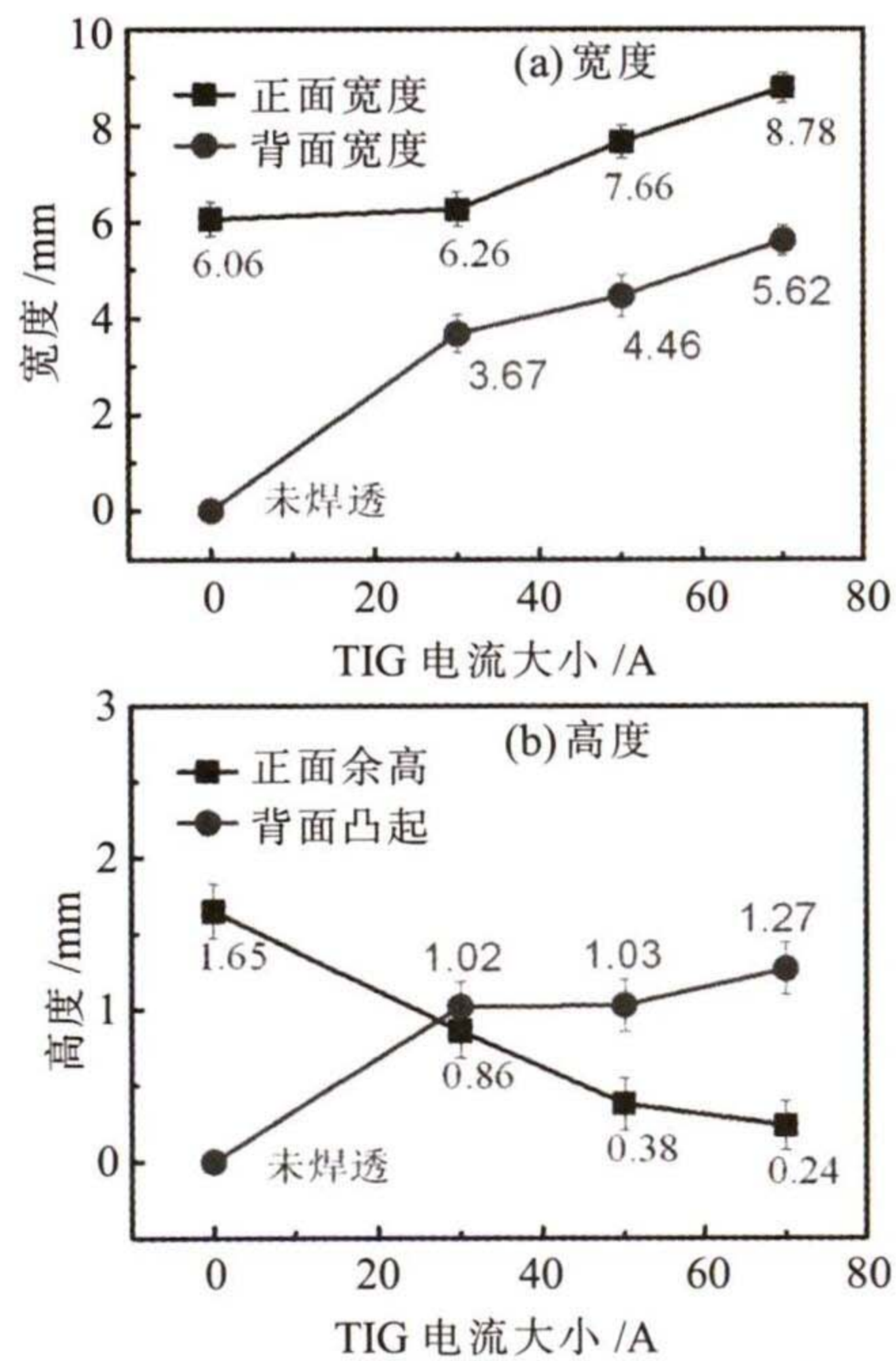


图4 不同电流下焊缝的几何尺寸

Fig.4 Geometric sizes of the welds with different currents

正面余高从 1.65 mm 减小到 0.24 mm, 焊缝背面凸起从未焊透增加到 1.27 mm。因此, 可以得出结论, 焊缝的正面宽度、背面宽度和背面的凸起是随着电

流的增大而逐渐增大的, 而焊缝的正面余高却逐渐减小。

不同电流下处于稳定状态的激光-TIG形态如图5所示。从图中可以看到, 激光-电弧形态、填充焊丝熔化、熔池形状基本处于稳定的状态。在焊接过程中, 熔滴过渡是稳定的接触过渡。在激光束附近的熔池出现剧烈流动, 并有飞溅产生, 如图5(c)、(d)所示。剧烈流动的熔池凝固后会在焊缝表面出现凹坑, 如图3(c)、(d)所示。

当电流 $I=0A$ 时, 未熔化的焊丝端部距离激光束较近, 如图5(a)所示。

而当电流增加时, 焊丝端部到激光束距离增加, 如图5(b)~(d)所示。这是因为加入TIG电弧后, 熔化焊丝的能量来自TIG电弧和激光束, 从而使得焊丝熔化速度增加, 其端部到激光束距离增加。当电流 $I=30A$ 时, 电弧形状较小, 但随着电流的增加, 电弧逐渐增大, 同时熔池宽度也逐渐增加, 这一点从图4(a)中也可以观察到。

图6为不同电流下激光-TIG复合焊接接头的截面形貌。如图6(a)所示, 当电流 $I=0A$ 时焊缝的横截面形貌是典型的“钉子”形状, 并在焊缝底部出现 0.61 mm 的未焊透。焊缝的宽度随电流的增大而逐渐增大, 接头焊缝横截面的“钉子”形状也逐渐变为“漏斗”形状。同时, 在靠近熔合区和焊缝底部均出现气孔。对比发现焊缝上部的气孔比焊缝底部的气孔数量明显减少。

图7为不同电流下焊缝横截面的平均气孔面积。可见, 平均气孔面积随电流增大先减小再增大。当电流 $I=50A$ 时, 平均气孔面积达到最小值, 为 0.53 mm^2 。

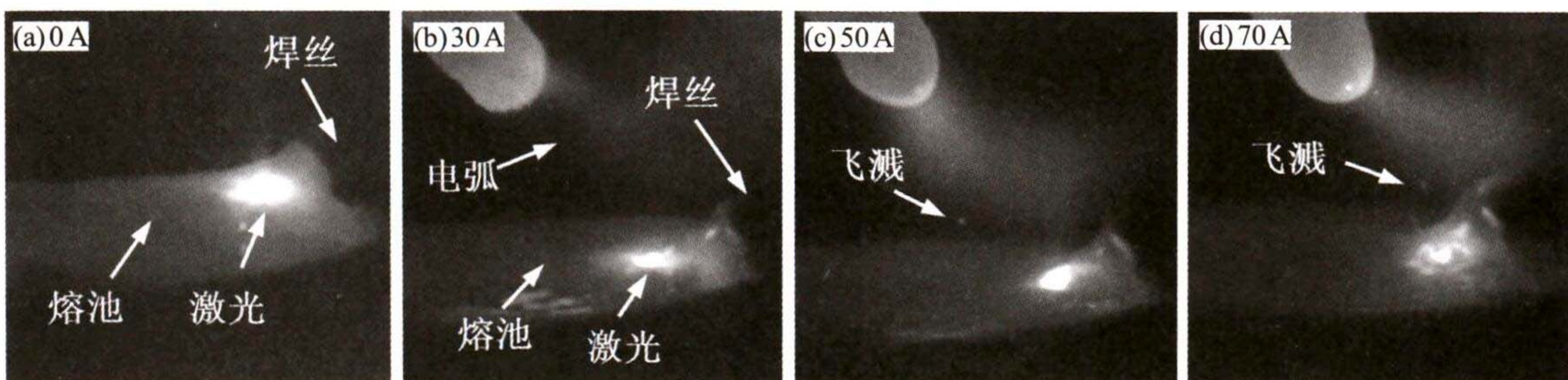


图5 不同电流下处于稳定状态的激光-TIG形态

Fig.5 Laser-TIG morphologies in stable state with different currents

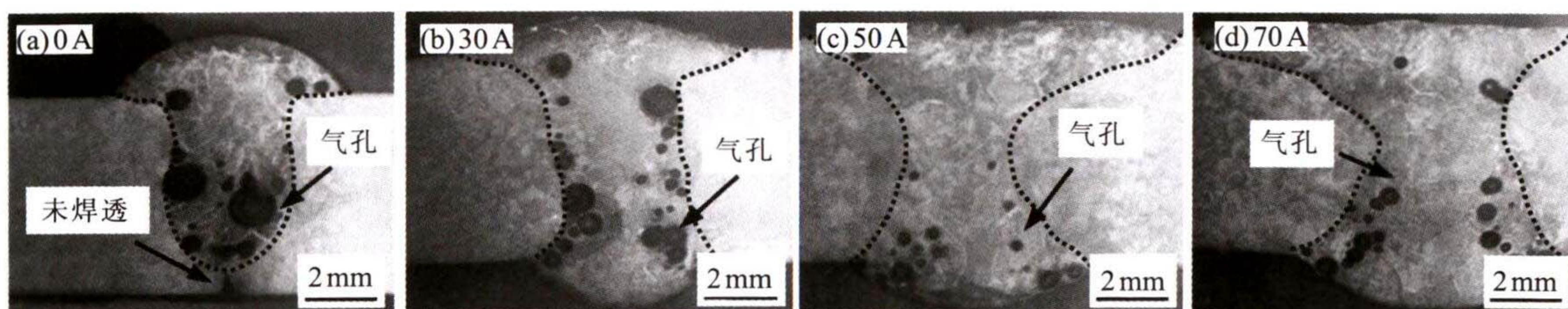


图6 不同电流下焊接接头的截面形貌

Fig.6 Cross section morphologies of the welded joints with different currents

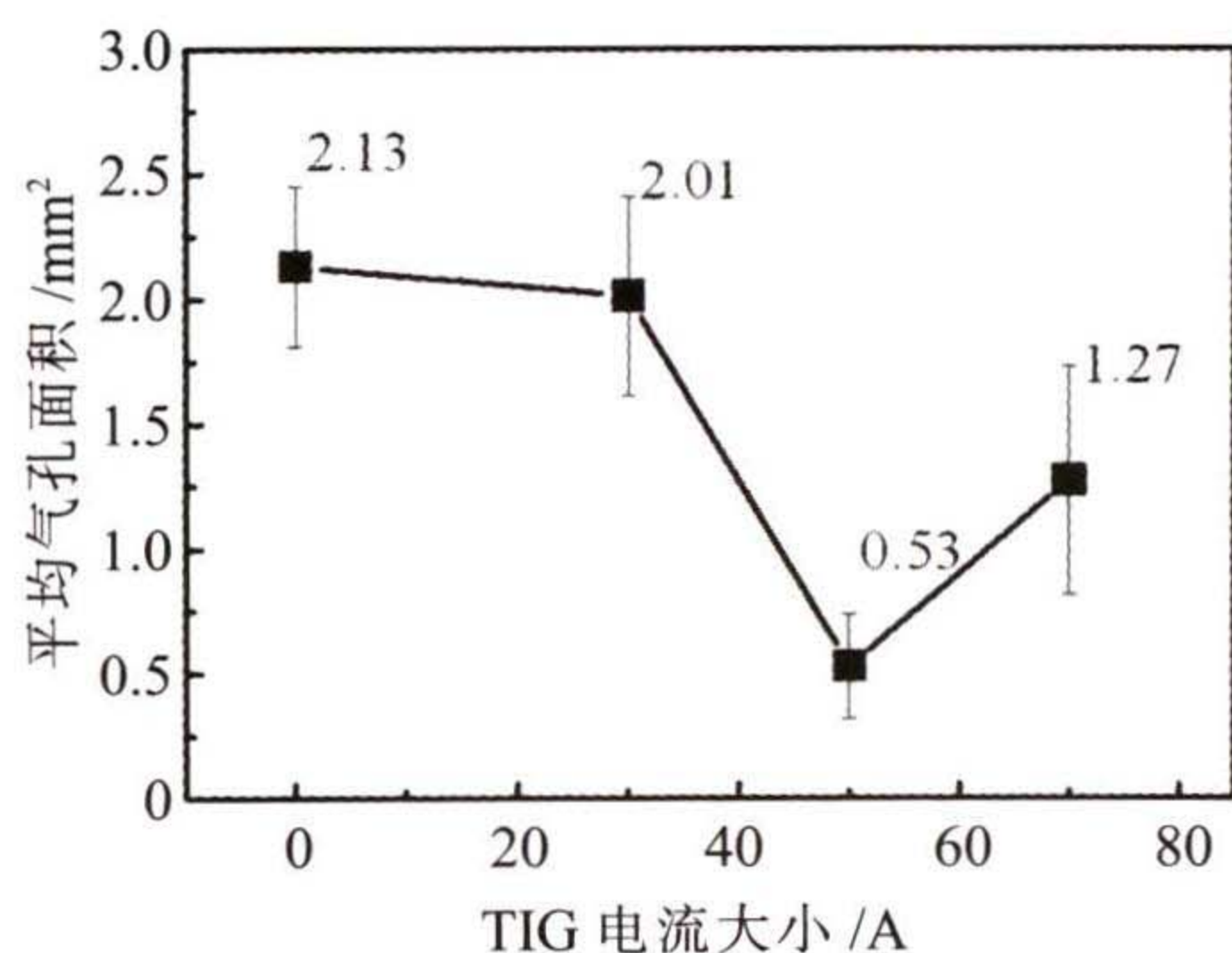


图7 不同电流下焊缝横截面的平均气孔面积

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

2.2 电流大小对接头微观组织的影响

图8为在不同电流下TC4钛合金激光-TIG复合焊接头的显微组织。可以看出,TC4钛合金焊缝区域的显微组织由较粗大的 β 晶粒组成,并且有着清晰的晶界。在 β 晶内部为大量相互交织的细长针状 α' 马氏体。在 β 晶界处存在连续的晶界 α 相(α_{gb}),同时在 α_{gb} 相两侧还发现了魏氏组织。分析认为,TC4钛合金在激光-TIG复合焊接过程中,由于激光束能量集中,焊缝金属中 β 相快速长大生成粗大柱状晶,在随后的冷却过程中, β 相来不及相变为 α 相,会直接切变成过饱和 α' 马氏体,并出现散乱交错的显微组织^[15]。

图9为在不同电流下TC4钛合金激光-TIG复合焊接头的晶粒形貌。将图中的晶界用虚线标出,以便清晰地观察晶粒形状。可以看出,随着电流的增加,焊缝的晶粒先逐渐减小然后增大,并在电流 $I=50A$ 时达到最小。分析认为,这是由于随着电流增

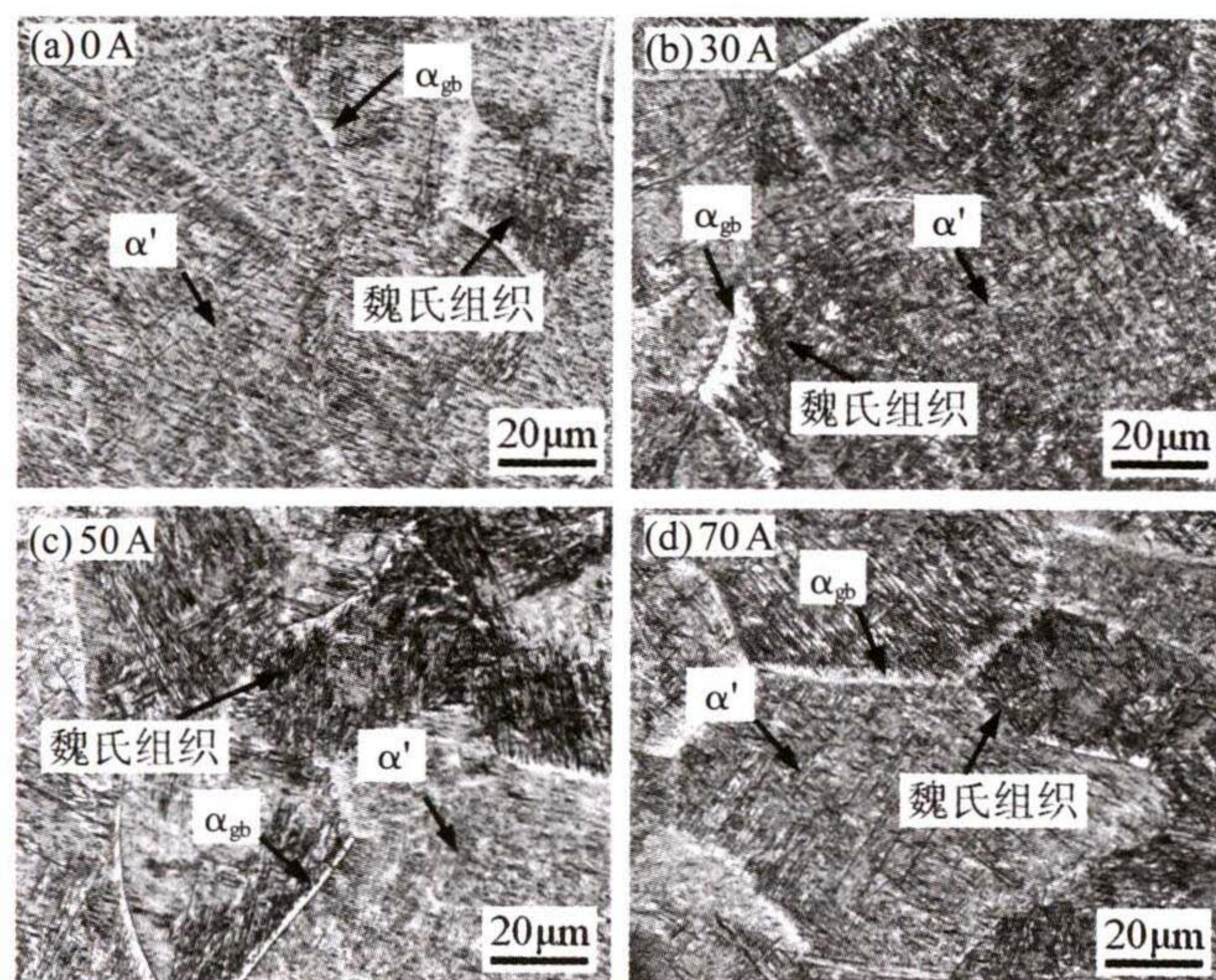


图8 不同电流下焊接接头的显微组织

Fig.8 Microstructure of the welded joints with different currents

加,在激光-电弧的复合作用下,熔池流动更加剧烈,生成的粗大柱状晶在熔池的剧烈流动下被破碎,使得晶粒逐渐减小。但是当电流 $I=70A$ 时,较大的电流导致熔池高温停留时间较长,晶粒要经历较长时间的高温才能凝固,因此又逐渐长大,如图9(d)所示。

图10为不同电流下焊缝的SEM形貌。从图中可以看出,焊缝的显微组织为多个相互平行的针状 α' 马氏体和狭窄的残余 β 相带相互交织而成的网篮组织。如图10(a)所示,当电流 $I=0A$ 时,焊缝冷却速度较快, α' 马氏体束之间的 β 相带宽度较小,平均间距为 $0.62\mu m$ 。如图10(b)所示,当电流 $I=50A$ 时,电弧的加入使得焊缝冷却速度较慢, α' 马氏体束

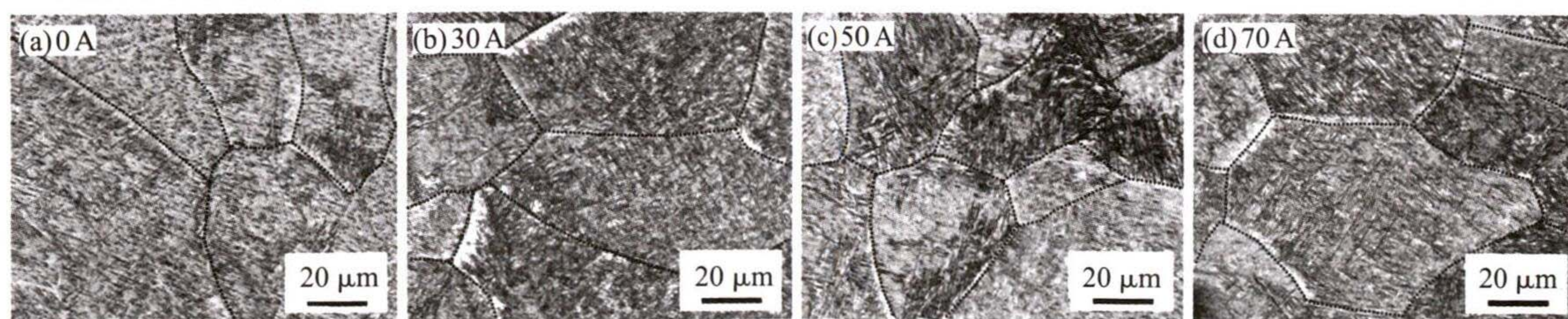


图9 不同电流下焊缝的晶粒形貌

Fig.9 Grain morphologies of the welds with different currents

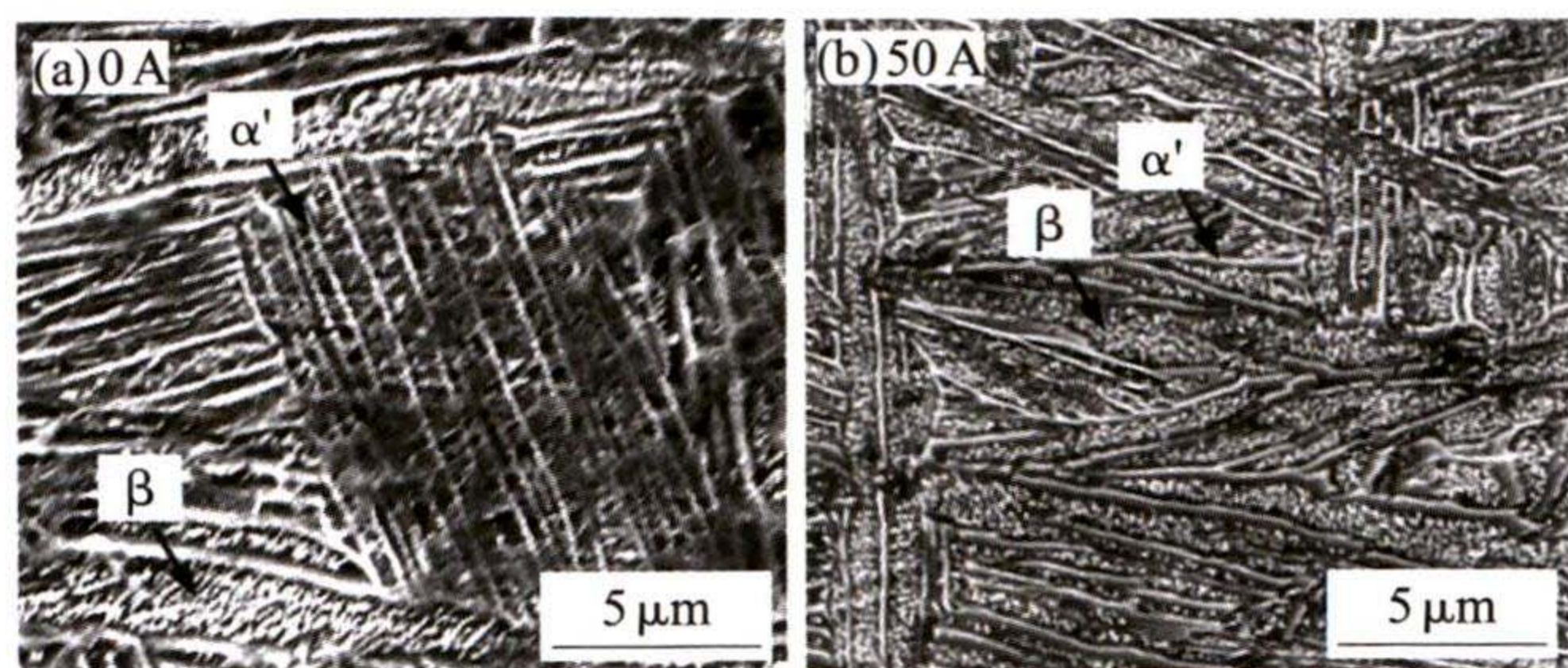


图 10 不同电流下焊缝的 SEM 形貌

Fig.10 SEM images of welds with different currents

之间的 β 相带宽度较大, 平均间距为 $0.91 \mu\text{m}$, 为 $I=0\text{A}$ 时的 1.47 倍。并且相较于 $I=0\text{A}$ 时, $I=50\text{A}$ 时焊缝的 α' 马氏体束平行度更差。

3 结论

(1) TC4 钛合金在激光-TIG 复合焊接下可以形成连续完整的焊接接头。且随着电流增加, 焊缝横截面由“钉子”形状逐渐转变为“漏斗”形状, 平均气孔面积则先减少后增加, 并在电流 $I=50\text{A}$ 时达到最小值。

(2) 在激光-TIG 的复合作用下, 随着电流增加, 熔池流动更加剧烈, 焊缝的晶粒先减小然后增大。焊缝的显微组织主要是由针状 α' 马氏体和 β 相带相互交织而成的网篮组织、 α_{gb} 相和魏氏组织组成。当电流 $I=50\text{A}$ 时, 焊缝 α' 马氏体束之间的 β 相带宽度更宽, 平均宽度为 $0.91 \mu\text{m}$ 。

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(12):121-128.
[2] Huang J,Liu S,Yu S,et al. Arc deposition of wear resistant layer TiN on Ti6Al4V using simultaneous feeding of nitrogen and wire [J]. Surface and Coatings Technology,2020,381:125141.

(上接第 122 页)

[2] 杨凤琦. 钨极氩弧堆焊 Fe 基合金粉末熔覆层组织和性能研究[D]. 济南:山东建筑大学,2013.
[3] 顾玉芬,苏艳文,朱明,等. 激光-氩弧焊电弧复合热源表面熔覆工艺及成形特征 [J]. 上海交通大学学报,2016,50(12):1902-1905.
[4] 马群双. 高强钢宽束激光熔覆镍基 / 陶瓷复合层组织与性能的研究[D]. 济南:山东大学,2017.
[5] 王新帅,静丰羽,张喜冬,等. 等离子熔覆-注射 B4C 铁基熔覆层组织耐磨性研究[J]. 表面技术,2014(5):42-46.
[6] 陶庆,王聪,沈承金,等. 等离子熔覆 Fe 基 /Co-WC 涂层的组织演变及性能 [J]. 稀有金属材料与工程,2015,44(9):2245-2249.

[3] 温锦志,卜文德,李建萍,等. 厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺,2016,45(17):66-69.
[4] Wang L,Li X,Gao M,et al. Stabilization mechanism and weld morphological features of fiber laser-arc hybrid welding of pure copper [J]. Journal of Manufacturing Processes,2017,27:207-213.
[5] Fan H,Zhou P,Li J,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.
[6] Fang N W,Guo E J,Xu K,et al. In-situ observation of grain growth and phase transformation in weld zone of Ti-6Al-4V titanium alloy by laser welding with filler wire [J]. Materials Research Express,2021,8(5):056507.
[7] 方乃文,郭二军,徐锴,等. 钛合金激光填丝焊缝晶粒生长及相变原位观察 [J]. 中国有色金属学报,2022,32(6):1665-1672.
[8] 张宇鹏,丁来法,Valerii Bilous,等. 厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头组织演变及力学性能[J]. 电焊机,2022,52(6):87-92.
[9] Shi J,Zhou Y,Liu L. Application of pulsed laser-TIG hybrid heat source in root welding of thick plate titanium alloys [J]. Applied Sciences,2017,7(5):527.
[10] 龚玉兵,王善林,李娟,等. 厚板 TC4 钛合金电子束焊接接头组织演变规律[J]. 焊接学报,2017,38(9):91-96.
[11] Frostevarg J,Kaplan A F H. Undercut suppression in laser-arc hybrid welding by melt pool tailoring [J]. Journal of Laser Applications,2014,26(3):031501.
[12] Liu F,Xu B,Song K,et al. Improvement of penetration ability of heat source for 316 stainless steel welds produced by alternating magnetic field assisted laser-MIG hybrid welding [J]. Journal of Materials Processing Technology,2022,299:117329.
[13] 蒋宝,徐富家,杨义成,等. 万瓦级激光-电弧复合穿透焊接成形缺陷研究[J]. 电焊机,2022,52(10):15-22.
[14] 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.
[15] 许鸿吉,尹丽香,李晋炜,等. TC4 钛合金电子束焊接接头组织和性能[J]. 焊接学报,2005,26(11):43-46.

[7] Xu G,K utsuna M,Liu Z,et al. Characteristics of Ni-based coating layer formed by laser and plasma cladding processes [J]. Materials Science & Engineering A,2006,417(1):63-72.
[8] Cheng J B,Xu B S,Liang X B,et al. Microstructure and mechanical characteristics of iron-based coating prepared by plasma transferred arc cladding process[J]. Materials Science & Engineering A,2008,492(1):407-412.
[9] 李莉,李勇,刘占军. 等离子熔覆技术再制造在轴类零件修复中的探索[J]. 内燃机与配件,2020(10):54-55.
[10] 李强,杨克立. 等离子束熔覆技术在缸体缺陷修复中的研究 [J]. 成组技术与生产现代化,2011,28(4):58-60.