

引用格式:殷亚运,徐希军,雷小伟,等.小孔 TIG 焊技术在中大厚度 TC4 板上的应用研究[J].热加工工艺,2023,52(11):10-14.



DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 20221153
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

小孔 TIG 焊技术在中大厚度 TC4 板上的应用研究

殷亚运, 徐希军, 雷小伟, 崔永杰, 张 浩
(洛阳船舶材料研究所, 河南 洛阳 471039)

摘 要:对 14 mm 及 26 mm 厚 TC4 板进行了小孔 TIG 焊工艺试验,研究了工艺参数对焊缝成型、内部质量及接头组织性能的影响。结果表明,采用优化的小孔 TIG 焊工艺可以不开坡口实现 14 mm 厚 TC4 板的单面焊双面成型,焊缝及热影响区出现马氏体组织转变,接头与母材相比出现明显硬化。对于 26 mm 厚 Y 型坡口试板,采用小孔 TIG 焊从背面打底可以完成 14 mm 钝边熔透焊,从正面打底可以完成 10 mm 钝边熔透焊,打底焊道美观,内部质量优,可直接采用常规 TIG 焊工艺填充盖面。制备的中大厚度 TC4 板接头强度与母材的相当,工艺性能良好,焊缝冲击性能与母材的相当,热影响区冲击性能优于母材的。

关键词:小孔 TIG 焊;钛合金;微观组织;力学性能
中图分类号:TG444+.74 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3814(2023)11-0010-05

Application of Key Hole TIG Welding Technology in Medium and Large Thick TC4 Plate

YIN Yayun, XU Xijun, LEI Xiaowei, CUI Yongjie, ZHANG Hao
(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471039, China)

Abstract:Key hole TIG welding experiments of 14 mm and 26 mm thick TC4 plates were conducted. The influence of welding parameters on the weld appearance, inner quality, microstructure and mechanical properties of the welded joints was investigated. It has been verified that one-side welding both-side formation of 14 mm thick TC4 plate without bevel preparation can be successfully obtained by using optimized welding parameters. Martensite transformation occurs in the weld and heat affected zone, which leads to obvious increase of hardness compared with the base metal. For 26 mm thick Y-groove plate, 14 mm and 10 mm blunt edge penetration with good weld appearance and inner quality can be achieved by using key hole TIG welding from back side and front side, respectively and conventional TIG welding can be used for filling and covering directly. The strength of the joints of the medium, large thick TC4 plates is equal to that of the base metal, the process performance is good. The Charpy impact toughness of the weld zone is equivalent to that of the base material, while the impact toughness of the heat affected zone is better than that of the base material.

Key words:key hole TIG welding; titanium alloy; microstructure; mechanical properties

钛及钛合金因具有密度低、比强度高、无磁以及耐腐蚀性能优异等特点,在航空航天、石油化工、船舶与海洋工程等领域应用越来越广泛。随着现代工业及国防装备的日趋大型化、高参化,厚板、大厚板钛合金焊接结构的应用也日趋广泛。

小孔 TIG 焊技术是一种创新型的大电流 TIG 焊接技术,类似于等离子弧“小孔”焊接方法。其作用形式与传统 TIG 焊相同,能形成小孔原因在于焊接过程中采用大电流并配合加强的枪身冷却,从而

获得了挺度大、穿透力强的焊接电弧,焊接过程中电弧打穿熔池形成小孔^[1]。当电弧压力、重力和液态金属表面张力达到动态平衡时小孔可稳定存在。小孔 TIG 焊的物理机制使得它非常适合焊接低热传导的材料,如不锈钢、钛合金、锆合金、镍基合金等。传统 TIG 焊不开坡口一次焊透且成型良好的板材厚度通常不大于 3 mm,而已有的研究表明:小孔 TIG 焊采用“I”型直边坡口一次可焊透 13 mm 厚不锈钢和 9 mm 厚碳素钢的对接缝,生产效率和经济效益较传统 TIG、MIG 焊的大大提高。对于更大厚度的材料,可以通过开 Y 形坡口,先从坡口正面或背面采用小孔 TIG 焊一次焊透钝边,再采用传统 TIG 或 MIG 等进行填充,从而显著减少焊接道次,提高焊接效

收稿日期:2022-04-19
作者简介:殷亚运(1991-),男,江苏沭阳人,硕士,主要研究方向:有色金属材料焊接及特种装备制造工艺;电话:0379-67256051;
E-mail:yinyayun23y@163.com

率,降低焊接应力和变形。

国内外关于小孔 TIG 焊的研究集中于碳钢、合金钢以及不锈钢^[2-5],针对钛及钛合金的研究则较为少见^[6],其中对中大厚度钛合金焊接以及将小孔 TIG 与常规焊接工艺进行组合焊的试验研究更是未见公开报道。前期已对 10mm 厚 TA2 板开展了初期试验研究,实现了不开坡口无缺陷焊接^[7]。文中针对 14mm 厚的 TC4 板开展了不开坡口小孔 TIG 单道焊试验研究,对 26mm 厚 TC4 板开 Y 型坡口,并分别在正面及背面进行了小孔 TIG 打底焊,随后采用常规 TIG 焊工艺进行了填充和盖面。研究了焊接工艺对中大厚度 TC4 板焊缝成型、内部质量及接头组织性能的影响,研究结果为小孔 TIG 焊技术在中大厚度钛及钛合金材料焊接及有关工程结构制造提供了一定的试验依据。

1 试验材料及焊接系统

1.1 试验材料

试验母材牌号为 TC4,厚度分别为 14mm 和 26mm,其中 14mm 厚的板材不开坡口,26mm 厚的板材开 Y 型坡口,坡口角度为 60°,设计多种钝边高度开展试验研究。焊接前对焊接坡口及其周围 25mm 范围内进行机械清理并用丙酮擦拭干净。装配间隙和错边≤1mm。填充及盖面焊采用常规的机动 TIG 焊,采用 φ1.2mm 的 TC3 焊丝。母材和焊接材料的成分见表 1。

表 1 母材和焊材的化学成分(质量分数,%)
Tab.1 Chemical composition of the base metals and welding wire (wt%)

材料	Al	V	Fe	C	N	H	O
TC4,δ14	6.0	4.1	0.09	0.01	0.01	0.008	0.10
TC4,δ26	6.0	4.0	0.04	0.01	0.02	0.008	0.08
TC3 焊丝	5.88	4.1	0.12	0.02	0.01	0.004	0.08

1.2 焊接系统

试验焊接系统主要包括一体化的小孔 TIG 焊机、专用的加强冷却的焊枪、弧长控制装置、冷却水箱和相应的连接电缆及管配件,电流调节范围为 50~1000 A。焊接时焊枪和拖罩保护气均为纯度 99.99% 氩气,其中焊枪气流量为 20L/min,拖罩气流量为 25L/min。

2 试验过程与分析

2.1 14mm 厚板工艺试验

对于小孔 TIG 焊而言,为了获得较好的焊缝成

型,焊接参数的选择有两个基本原则,一是要保证能够产生足够的电弧热以便穿透试板形成小孔;二是根部焊道还应足够细以便支撑液态金属熔池不至下淌。对于 14mm 厚 TC4 板,试验发现当焊接速度恒定时,实现稳定的小孔焊过程电流下限大约在 520A,电流上限大约在 560A,表明小孔 TIG 焊的工艺参数窗口尚可,具体工艺参数见表 2。对于钛合金材料,大热输入的小孔 TIG 焊工艺对焊缝保护提出了较高的要求,图 1 为 1 号板焊缝外观,可见焊道成型均匀,焊缝颜色为银白和淡黄色,表明焊接保护得较好。常规机动 TIG 完成盖面焊后的焊缝 X 射线探伤底片如图 2 所示。焊缝无裂纹、气孔、夹杂、未熔合、未焊透等冶金缺陷,焊缝质量满足 NB/T47013.2-2015I 级合格,焊缝质量较好。

表 2 14 mm 厚 TC4 板的焊接工艺参数
Tab.2 Welding parameters of 14 mm thick TC4 plate

试板编号	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)
1	520	17	240
2	560	17	240

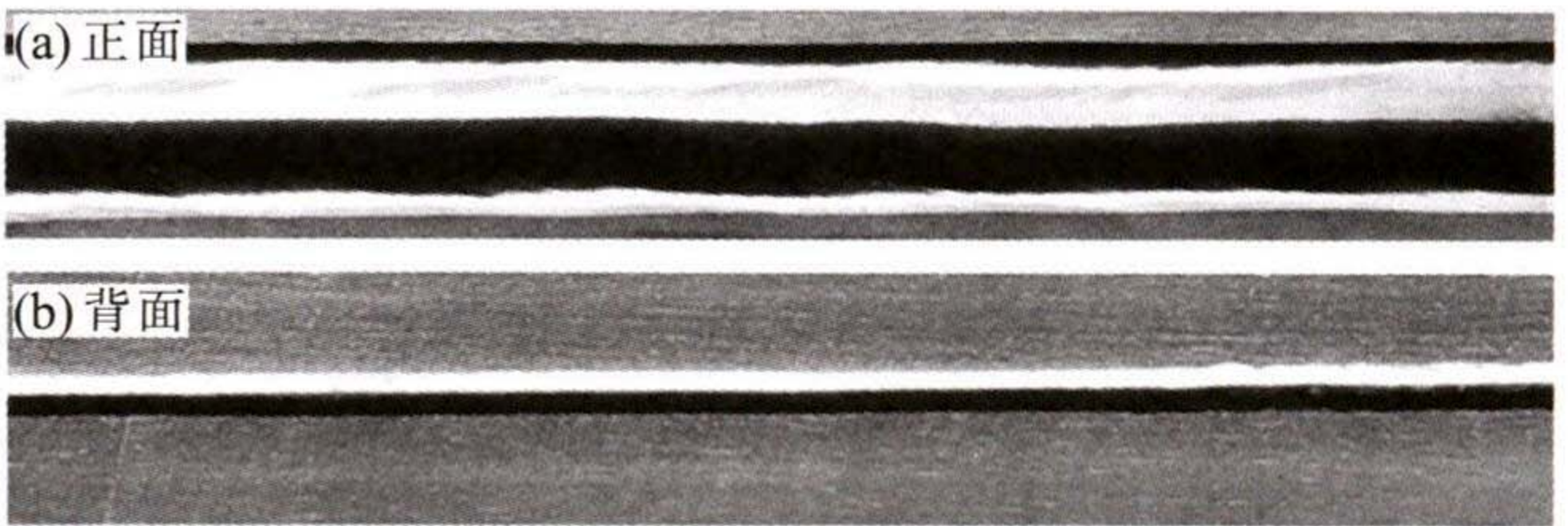


图 1 1 号板焊缝外观
Fig.1 Weld appearance of 1# plate

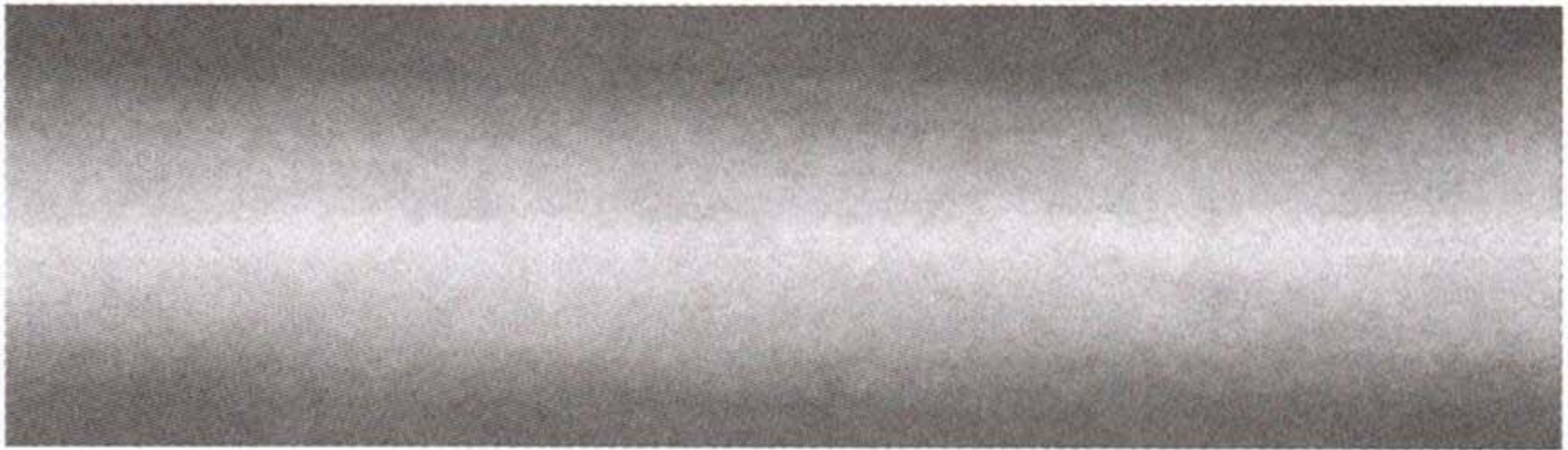


图 2 1 号板焊缝射线底片
Fig.2 Radiograph of 1# plate weld

小孔 TIG 焊打底 + 常规机动 TIG 焊盖面后的接头横截面形貌如图 3 所示。截面呈典型的铆钉状,根部焊道与表面相比非常细,焊缝下半部未熔化的母材起到了拖住液态熔池不至下淌的作用。

以 1 号试板为例分析小孔 TIG 焊接头不同区域的微观组织,2 号试板接头组织与 1 号板的并无显著差异。母材组织为片状 α+等轴 α+晶间 β,如图 4(a)所示。图 4(b)为热影响区显微组织,受焊接热循环影响,热影响区发生马氏体转变,呈现针状 α 和马氏体组织特征。图 4(c)为熔合区组织形貌,与热影响区类似,也是针状 α 和马氏体混合组织。焊

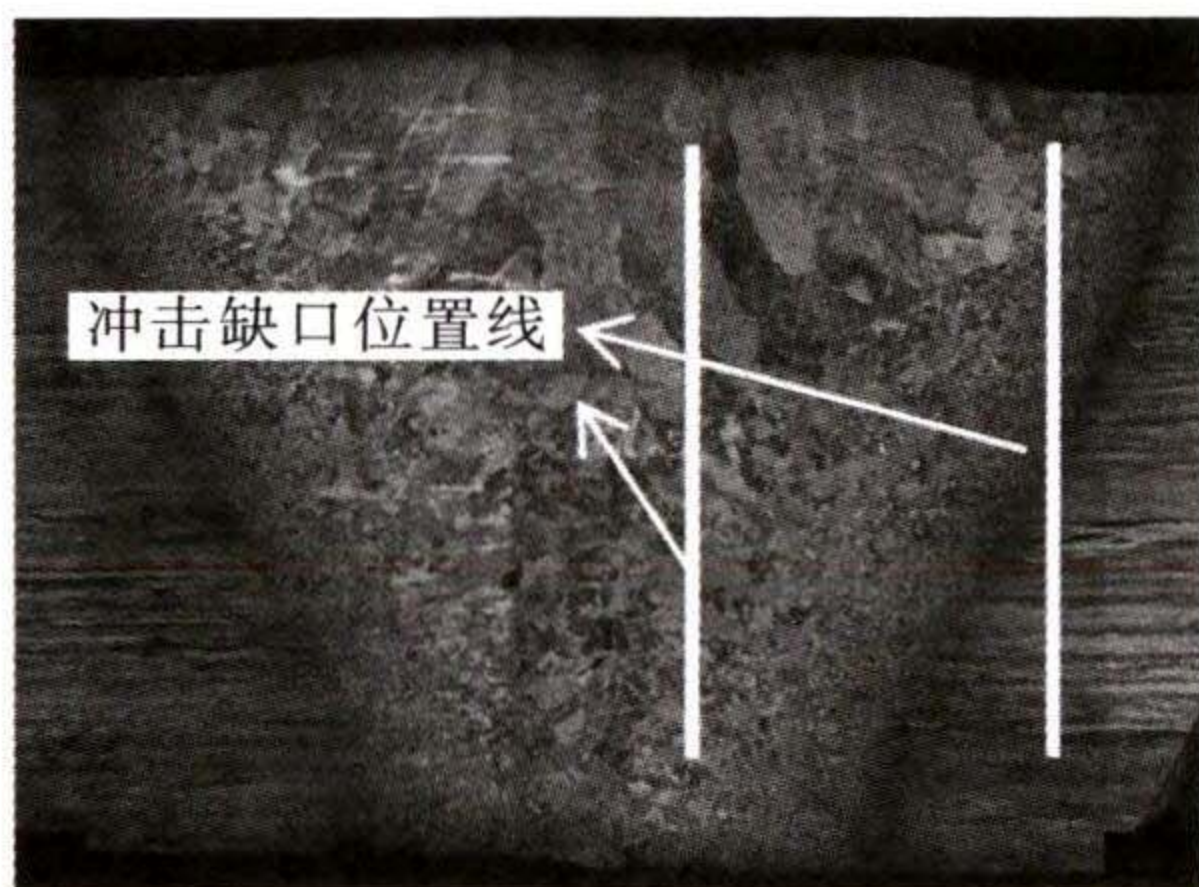


图3 小孔 TIG 焊接头横截面形貌
Fig.3 Morphology of cross section of key hole TIG weld

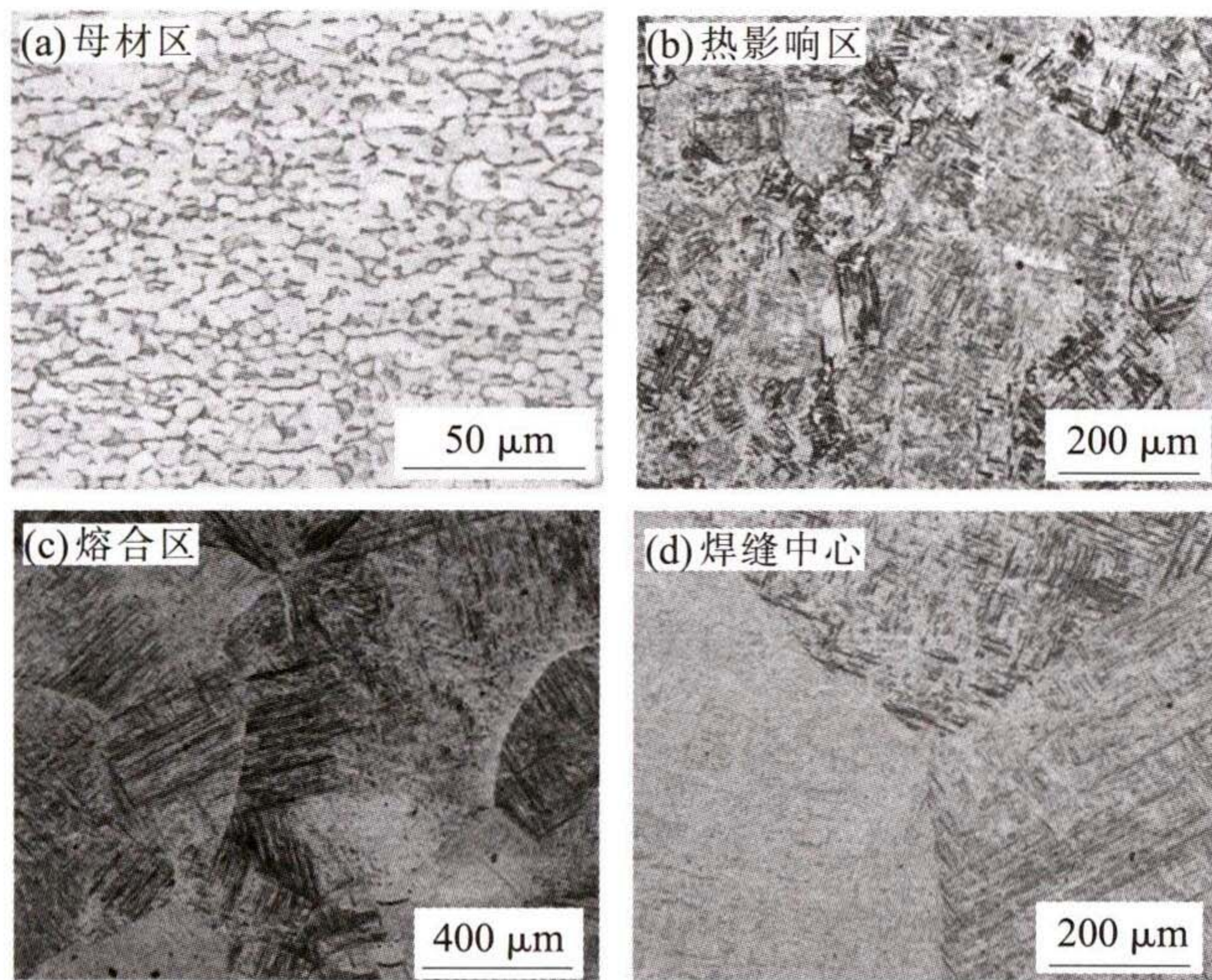


图4 1号板接头不同区域显微组织
Fig.4 Microstructure of different region of 1# plate welded joint

缝中心组织如图 4(d)所示,也是针状 α + 马氏体混合组织,与热影响区相比,晶界非常明显,晶粒粗化更为严重。

图 5 给出了 1# 板接头不同区域的维氏硬度,涵盖了焊缝上中下三个区域,每条测试线横跨母材、热影响区、焊缝、热影响区、母材。可见,焊接接头硬度值大致呈 M 型分布,焊接接头与母材相比出现轻微硬化,热影响区硬度较高,最大值可达 310HV,焊缝

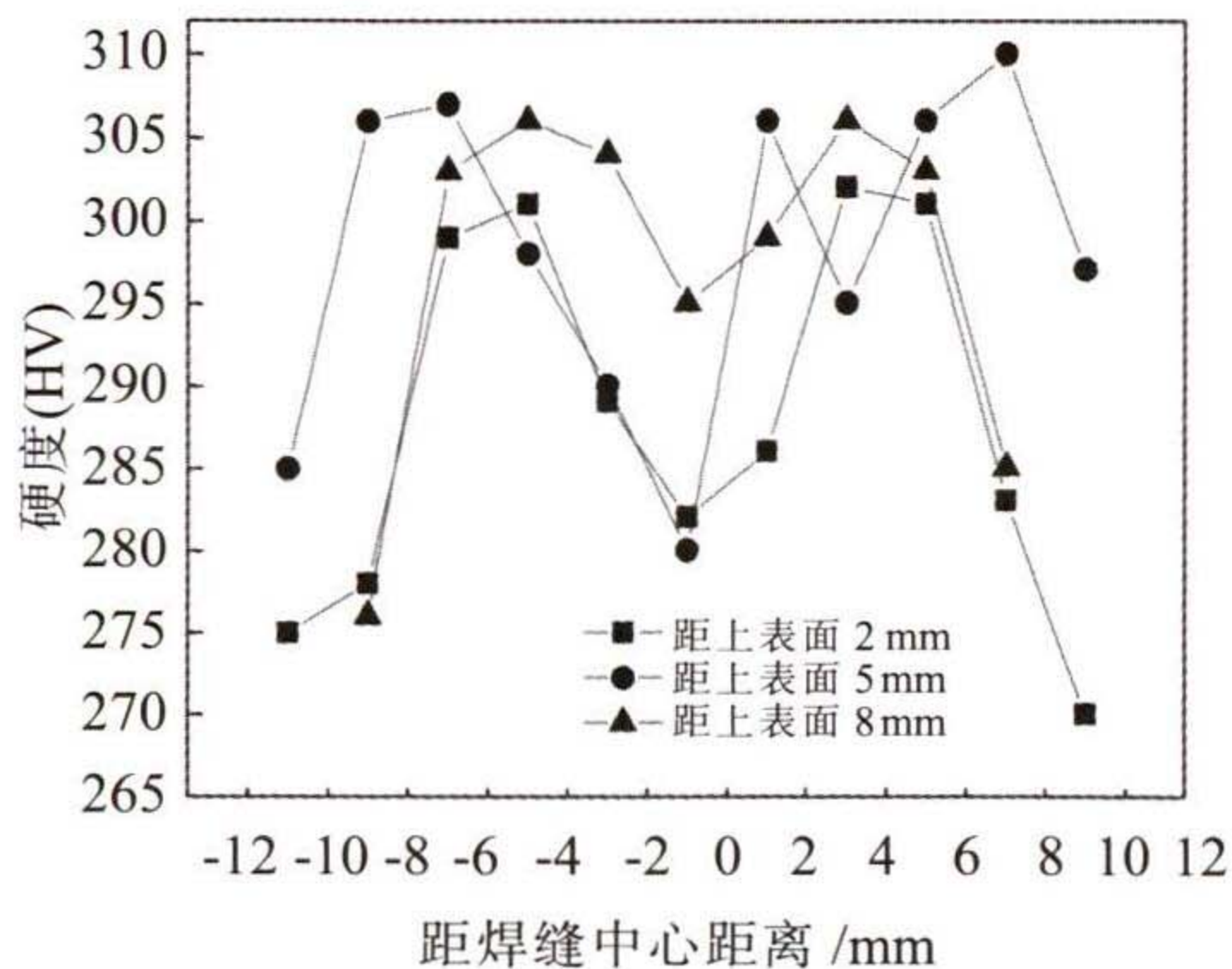


图5 1# 板接头硬度分布
Fig.5 Hardness profiles of welded joint of 1# plate

中心硬度与热影响区的相比轻微下降,这是由于手工 TIG 焊进行了盖面焊所致。焊缝区发生的马氏体组织转变导致焊接头发生硬化。

为了考察小孔 TIG 焊接头的强度和塑性,对接头进行了拉伸测试,并与母材性能进行了对比。母材性能采用圆形拉伸试样测出,焊缝性能依据 NB/T47014 标准采用全厚板拉伸试样测出,焊缝位于板拉件中心。试板 1 两件母材拉伸试样实测抗拉强度分别为 1034、1046 MPa,2 件全板厚拉伸试样实测抗拉强度分别为 1015、1019 MPa。试板 2 两件母材拉伸试样实测抗拉强度分别为 1030、1024 MPa,2 件全板厚拉伸试样实测抗拉强度分别为 1005、997 MPa。所有接头试样断裂部位全部位于焊缝,拉伸力学性能测试表明小孔 TIG 焊接头强度略低于母材的,接头系数可达 95%。

依据 NB/T47014 标准对焊接接头进行侧弯取样,并进行冷弯测试,以考察焊接头的抗弯曲变形能力,每块试板取 2 个样。结果表明,在 $D=20t$ 测试条件下,4 件侧弯试件在弯曲角度达到 90° 时均未出现裂纹缺陷,满足 CB4363—2013《船用钛及钛合金焊接工艺评定》合格指标,表明小孔 TIG 焊接头具有较好的抗弯曲变形能力,工艺性能良好。

依据 GB/T 229—2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》对焊缝进行了 20°C 夏比 V 型缺口冲击试验,试样尺寸为 $55\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,缺口分别开在焊缝中心和熔合线区域,缺口位置详见图 3。测试结果见表 3,虽然小孔 TIG 焊电流较常规 TIG、MIG 焊工艺大得多,与母材相比,焊缝区及热影响区晶粒均发生明显粗化,但是焊接接头冲击韧性并未降低,且有一定增加。

表3 14 mm 试板不同区域夏比 V 型缺口冲击吸收功 KV(J)
Tab.3 Charpy V type impact energy KV of different region of 14 mm thick plate(J)

试板编号	母材	热影响区	焊缝中心
1	29,31,31	38,42,49	51,52,59
2	34,34,36	52,54,56	50,51,52

2.2 26 mm 厚板工艺试验

前面试验结果表明,对于 TC4 材料,试验用小孔 TIG 焊机不开坡口单道焊透最大板厚可达 14 mm。对于 Y 形坡口,由于从正面焊接时,坡口区域会有材料熔化,因而钝边实际上不可留到 14 mm,否则无法焊透钝边。本试验 Y 型坡口角度统一设为

60°,重点考察 Y 型坡口小孔 TIG 焊的打底焊能力。对于从正面打底的焊接工艺,试验结果表明钝边上限约为 10mm。对于从背面打底焊的试板,由于不存在坡口侧材料的熔化,钝边高度比从正面打底焊时的要高,本试验中从背面打底焊保证稳定的焊缝成型钝边最大高度可为 14mm。通过恒定焊接速度,探索实现稳定小孔 TIG 焊的焊接工艺参数,见表 4。

表 4 26 mm 厚板的焊接工艺参数

Tab.4 Welding parameters of 26 mm thick plate

试板编号	钝边 /mm	焊接电流 /A	焊接电压 /V	焊接速度 /(cm·min ⁻¹)	备注
3 [#]	10	530	18	240	正面焊
4 [#]	10	570	18	240	正面焊
5 [#]	14	560	18	216	背面焊
6 [#]	14	620	18	216	背面焊

3[#] 板正面打底和 5[#] 板背面打底后焊缝坡口侧外观分别见图 6(a)、(b),焊道成型均匀美观,呈光亮的银白色。

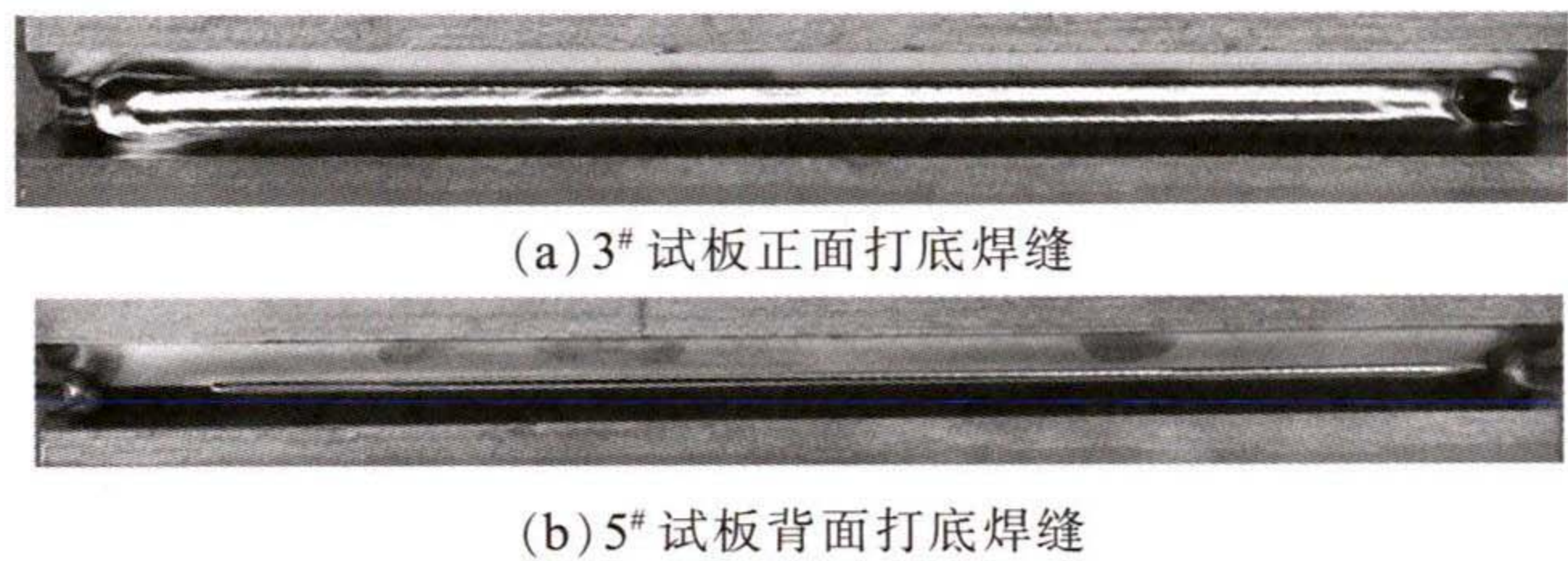


图 6 打底焊缝坡口侧外观
Fig.6 Weld appearance of back weld at groove side

图 7(a)、(b)分别为采用小孔 TIG 焊进行正面和背面打底焊(随后常规机动 TIG 填充)的接头截面形貌。试验表明小孔 TIG 工艺可以很好地实现正面或背面打底焊。金相低倍检测表明,两种工艺制备的接头均未发现裂纹、气孔、固体夹杂、未熔合和未焊透等缺陷。与正面打底 + 填充焊工艺相比,从背面进行打底后再正面填充的工艺制备的试板角变形小一些。射线检测结果表明两种工艺制备的试板对接焊缝无裂纹、气孔、夹杂、未熔合、未焊透等冶金缺陷,焊缝质量满足 NB/T 47013—2015I 级合格。

工艺试验表明,对于小孔 TIG 焊而言,通过对

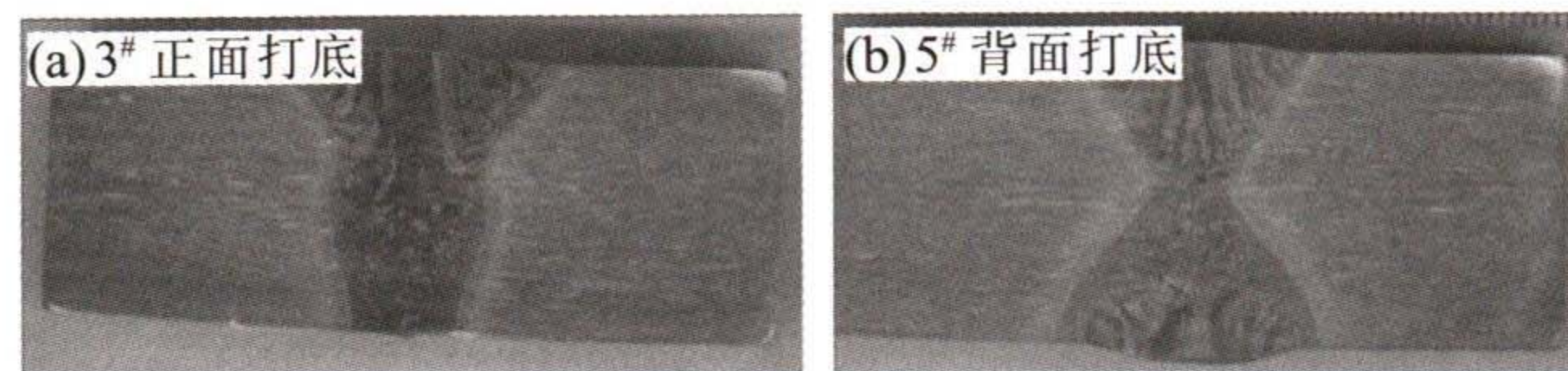


图 7 26 mm 厚板接头的截面形貌
Fig.7 Cross section morphologies of the welded joints of the 26 mm thick plate

焊缝成型的观察可以初步判断焊缝质量。如果焊缝成型均匀美观,焊缝内部通常没有超标缺陷。一旦焊道出现肉眼可见的成型不均匀,通常不均匀成型区经过射线探伤会显示非常明显的大孔洞缺陷。如图 8 所示,肉眼可见焊道前半部分由于保护不好出现氧化,后半部分焊道出现波浪状高低不平。经过射线探伤表明,焊缝存在大气孔缺陷,剖开后肉眼可见大孔洞缺陷。这主要是因为小孔 TIG 焊规范较大,电弧挺度大,穿透力强,一旦由于工艺参数逼近下限或者其他工艺因素导致不能形成稳定的小孔焊,这时熔池受到电弧的剧烈搅动就容易因为流动不连续而出现大孔洞缺陷。

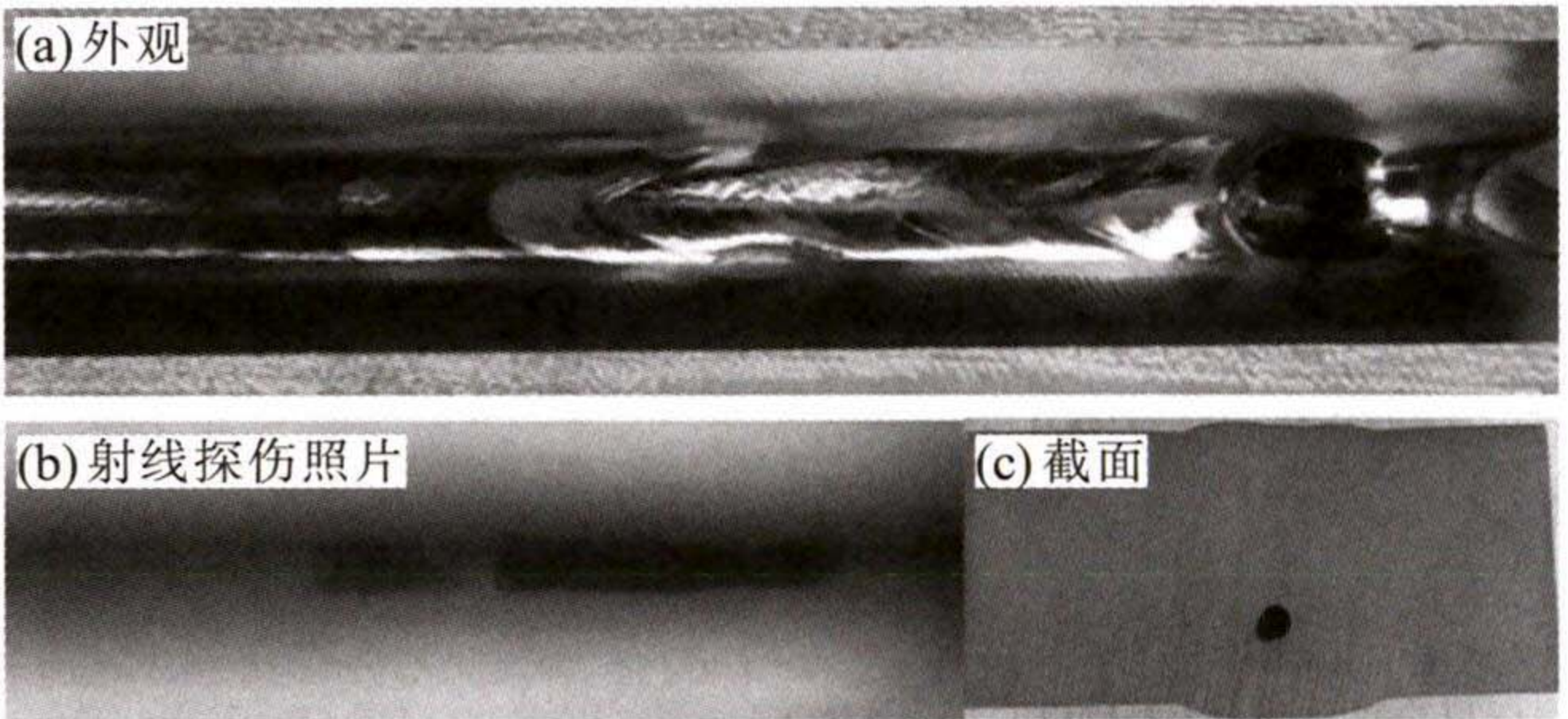


图 8 焊缝外观及内部孔洞缺陷
Fig.8 Weld appearance and inner porosity defect

26 mm 厚板母材及接头的力学性能见表 5。接头室温夏比 V 型缺口冲击吸收功见表 6。性能检测

表 5 26 mm 厚板母材及接头的力学性能

Tab.5 Mechanical properties of base material and welded joints of the 26 mm plate

试板编号	部位	抗拉强度 /MPa	冲击吸收功 KV/J
3 [#]	母材	943.95	23, 23, 22
	接头	951.95	-
4 [#]	母材	966,96	23, 24, 24
	接头	965.96	-
5 [#]	母材	964.95	23, 25, 25
	接头	963.95	-
6 [#]	母材	955.96	22, 23, 26
	接头	957.96	-

表 6 26 mm 厚板不同区域的夏比 V 型缺口冲击吸收功(J)
Tab.6 Charpy V type impact energy of different region of the 26 mm plate(J)

试板编号	热影响区		焊缝中心	
	小孔 TIG 焊道	TIG 焊道	小孔 TIG 焊道	TIG 焊道
3 [#]	39,38,39	42,42,34	22,23,23	27,28,28
4 [#]	41,43,45	38,39,42	21,22,23	26,29,31
5 [#]	39,42,42	39,40,43	38,38,41	24,25,32
6 [#]	39,42,42	39,40,43	27,34,45	24,25,32

方法与 14 mm 厚板的相同。结果表明所有接头抗拉强度与母材的相比无显著区别,满足工艺评定合格要求。对于热影响区,小孔 TIG 的冲击吸收功与常规 TIG 的几乎无区别且均显著高于母材的,这与 14 mm 板结果是一致的。对于焊缝区,小孔 TIG 与常规 TIG 焊缝的冲击功与母材的几乎等同。小孔 TIG 焊缝区和热影响区冲击断口典型形貌分别如图 9 (a)、(b)所示。断口呈准解理断裂特征,可见解理刻面和撕裂棱。与焊缝区冲击相比,热影响区冲击断口上可见微小韧窝状特征,窝孔较浅且边缘锐利,呈现出一定的混合断裂特征,与热影响区冲击吸收功较高相吻合。

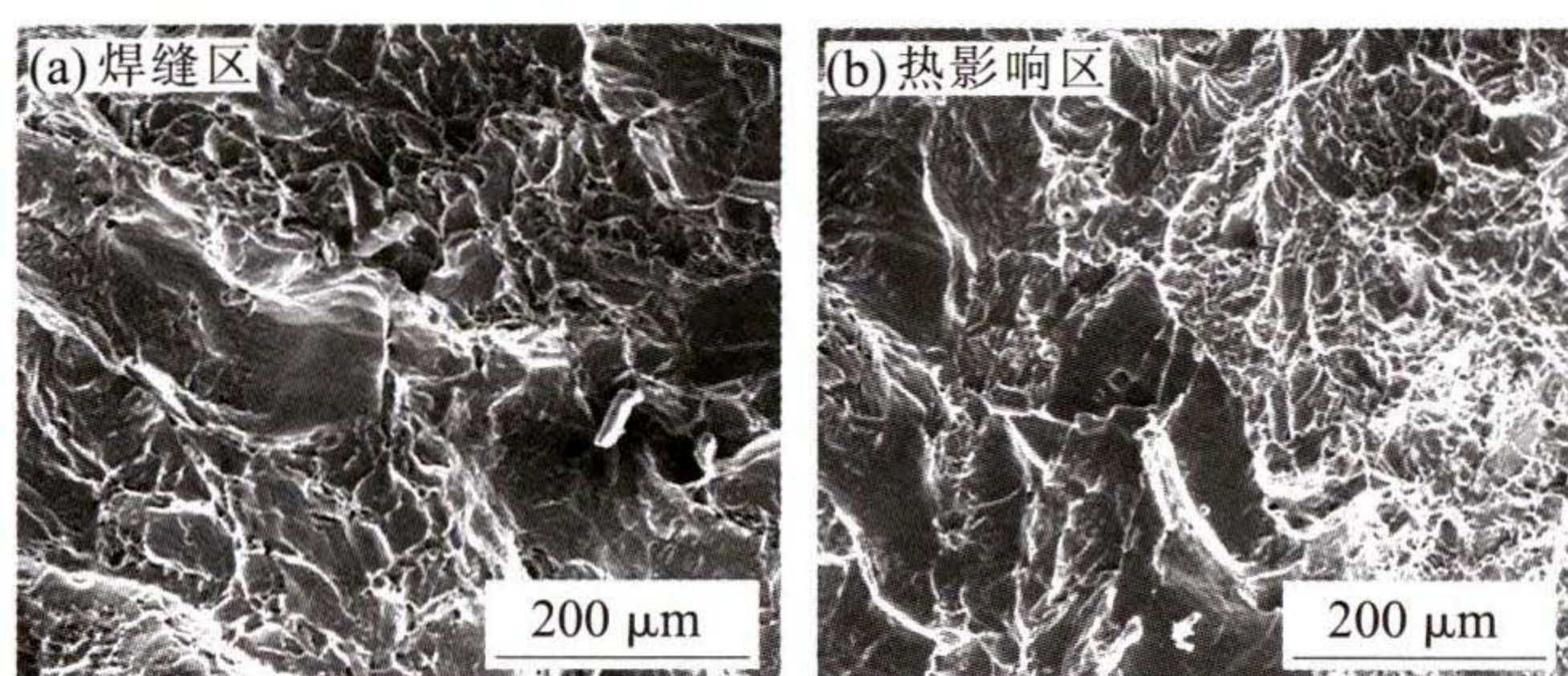


图 9 接头小孔 TIG 焊道的冲击断口典型形貌
Fig.9 Typical morphologies of impact fracture of key hole TIG weld of the welded joint

依据 NB/T47014 标准对小孔 TIG 与常规机动 TIG 组合焊工艺制备的焊接接头进行侧弯取样,并进行冷弯测试,每块试板取 2 个样。结果表明在 $D=20t$ 测试条件下,8 件侧弯试件在弯曲角度达到 90° 时均未出现裂纹缺陷,满足 CB4363—2013《船用钛及钛合金焊接工艺评定》合格指标,表明小孔 TIG 与常规机动 TIG 组合焊工艺制备的焊接接头具有较好的抗弯曲变形能力,工艺性能良好。

(上接第 9 页)

[53] Li F, Chen X, Lin W, et al. Nanosecond laser ablation of Al-Si coating on boron steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 319: 129-135.

[54] Shinozaki K, Wen P, Yamamoto M, et al. Effect of grain size on solidification cracking susceptibility of type 347 stainless steel during laser welding [J]. Quarterly Journal of The Japan Welding Society, 2013, 29(3): 90-94.

[55] Tang Z, Vollertsen F. Influence of grain refinement on hot cracking in laser welding of aluminum [J]. Welding in the World: Journal of the International Institute of Welding: Journal of the International Institute of Welding, 2014, 58(3): 355-366.

[56] Zhang W F, Liu X P, Wang H X, et al. Quantitative analysis of weld-pore size and depth and effect on fatigue life of Ti-6Al-2Zr-1Mo-1V alloy weldments [J]. Metals-Open Access

3 结论

(1) 采用优化的小孔 TIG 焊工艺可以不开坡口实现 14mm 厚 TC4 板的单面焊双面成型,焊缝及热影响区出现马氏体组织,接头相比母材出现明显硬化。

(2) 对于 26mm 厚的 Y 型坡口试板,采用小孔 TIG 焊从背面打底可以完成 14mm 钝边熔透焊,从正面打底可以完成 10mm 钝边熔透焊,打底焊道美观,内部质量优。随后采用常规焊接工艺进行填充盖面焊,从而大大减少熔敷量,提高效率,降低成本。

(3) 制备的中大厚度 TC4 板接头强度与母材的相当,工艺性能良好,焊缝冲击性能与母材的相当,热影响区冲击性能优于母材的。

参考文献:

[1] 林三宝,范成磊,杨春利. 高效焊接方法[M]. 北京:机械工业出版社,2012:41-43.

[2] 韩涛,谷世伟,徐良,等. K-TIG 焊接头的应力与变形[J]. 焊接学报,2019,40(11):125-132.

[3] 徐良,欧阳凯,杨海峰. K-TIG 焊接动态过程及组织和性能分析[J]. 焊接学报,2020,41(8):68-72.

[4] 王小军,杨健,周栋,等. Q345/316L 异种钢 K-TIG 焊接接头的组织及性能[J]. 电焊机,2021,51(1):66-72.

[5] Feng Y, Luo Z, Liu Z, et al. Key hole gas tungsten arc welding of AISI 316L stainless steel [J]. Materials & Design, 2015, 85: 24-31.

[6] Cui S W, Shi Y H, Zhang C S, et al. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy K-TIG welded joints[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(2): 416-425.

[7] 殷亚运,雷小伟,陈利阳,等. TA2 板材小孔 TIG 焊接头的组织与性能[J]. 材料开发与应用,2018,33(4):76-80.

Metallurgy Journal, 2017, 7(10): 417.

[57] Martínez C, Guerra C, Silva D, et al. Effect of porosity on mechanical and electrochemical properties of Ti-6Al-4V alloy [J]. Electrochimica Acta, 2020, 338: 135858.

[58] Ba Y, Shi W Q, Han S G, et al. Microstructure and mechanical properties of laser oscillated welded DP780 dual phase steel and 5083 aluminium alloy: Scanning oscillations at the same energy density[J]. Lasers in Engineering, 2022(1/5): 51.

[59] Xu W, Yang S, Tao W, et al. Effects of laser beam oscillation welding parameters on Al-Si coated 22MnB5 weld joint properties[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 149: 107898.

[60] Wang Z, Sun L, Ke W, et al. Laser oscillating welding of TC31 high-temperature titanium alloy [J]. Metals-Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10(9): 1185.

[61] 刘捷,谢美蓉,王梦飞,等. 激光振荡扫描焊接 $Ti_2AlNb/TC4$ 焊缝组织及力学性能[J]. 焊接, 2021(11): 21-26.