

引用格式:宋浩泽,付娟,赵勇,等.磁场辅助窄间隙激光填丝焊接工艺研究[J].热加工工艺,2024,53(13):89-93.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20221235

http://www.rjggj.net rjggj@vip.163.com

磁场辅助窄间隙激光填丝焊接工艺研究

宋浩泽¹, 付娟¹, 赵勇¹, 许海洋², 陶欣²

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003; 2. 江苏扬子鑫福造船有限公司, 山东 泰兴 225400)

摘要:采用磁场辅助窄间隙激光填丝焊工艺对 25 mm 厚 S32101 双相不锈钢板进行多层焊接, 并对其焊接性能进行了研究。观察对比了有无磁场辅助窄间隙激光填丝焊的焊缝成形, 并重点分析了磁场辅助焊接接头的力学性能、金相组织。结果表明: 有无磁场辅助得到的焊缝表面均平滑均匀, 基本无飞溅。无磁场辅助的焊缝出现气孔及未熔合缺陷, 施加磁场后焊缝无此缺陷。磁场辅助焊接的拉伸试样均断裂于母材位置, 焊接接头的抗拉强度高于母材。各焊层焊缝的平均硬度高于母材。焊缝组织为奥氏体和铁素体, 组织细密均匀, 两相比例均匀稳定, 约为 1:1。

关键词: 磁场; 双相不锈钢; 窄间隙激光填丝焊

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)13-0089-05

Research on Welding Technology of Magnetic Field Assisted Narrow-gap Laser Welding with Filler Wire

SONG Haoze¹, FU Juan¹, ZHAO Yong¹, XU Haiyang², TAO Xin²

(1. Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China; 2. Jiangsu Yangzi Xinfu Shipbuilding Co., Ltd., Taixing 225400, China)

Abstract: The multi-layer welding test of 25 mm thick S32101 dual-phase stainless steel plate was carried out by using the magnetic field assisted narrow-gap laser welding with filler wire, and the welding performance of the joint was studied. The weld forming of the narrow-gap laser wire filling welding with or without magnetic field was observed and compared, and the mechanical properties and metallographic structure of the joint under magnetic field were analyzed. The results show that the weld surface is smooth and uniform with or without magnetic field, and there is almost no splash. Porosity and non-fusion defects appear in the welding seam without magnetic field, while the welding seam has no such defects under magnetic field. Tensile specimens prepared by magnetic field assisted welding all fracture at the base metal, and the tensile strength of the welded joint is higher than that of base metal. The average hardness of each layer weld is higher than that of the base metal. The metallographic structure of the weld is austenite and ferrite, the microstructure is fine and uniform, and the ratio of the two phases is uniform and stable, about 1:1.

Key words: magnetic field; dual-phase stainless steel; narrow-gap laser wire filler welding

近年来, 从激光焊接领域发展起来的窄间隙激光填丝焊技术受到行业内的广泛关注^[1-2]。窄间隙焊的焊缝面积小, 激光自熔焊的热源集中效率高, 具备双重优势的窄间隙激光填丝焊技术在大厚度钢板焊接中具有巨大的研究价值。窄间隙激光填丝焊技术拥有热输入低、坡口尺寸小、填充金属耗材少、焊接效率高等突出优点, 可被广泛应用在核电工程、装备

制造、航空航天、石油运输、大型海洋平台等厚板结构焊接制造中^[3-5]。在窄间隙激光填丝焊中, 通过焊丝的加入来调控焊缝的成分与组织, 从而提高接头的综合性能, 同时改善了激光自熔焊对焊接间隙的容错性和适应性, 减小了接头热影响区和焊接应力变形^[6-8]。但由于窄间隙激光填丝焊单道焊缝深宽比大, 熔池中的气体在熔池凝固时很难逸出, 另外激光的能量主要作用在焊缝的底部, 因此焊缝经常出现气孔和未熔合缺陷^[9]。本文拟研究不锈钢磁场辅助窄间隙激光填丝焊技术, 通过优化焊接工艺参数, 提高焊接稳定性, 获得成形良好无缺陷的焊接接头, 为磁场辅助窄间隙激光填丝焊的推广和应用奠定理论基础。

收稿日期: 2022-04-26

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划支持项目(2021110289038Z)

作者简介: 宋浩泽(2000-), 男, 江苏镇江人, 主要从事激光焊接研究;

E-mail: songhaoze0625@163.com

通信作者: 付娟(1983-), 女, 讲师, 主要从事激光焊接研究;

E-mail: fujuan@just.edu.cn

1 试验材料及方法

试验采用 IPG 公司的 YLS-6000 光纤激光器, 最大输出功率为 6 kW、焦距 310 mm、焦点半径 300 μm 。利用 Fronius 焊机的自动送丝功能, 并配合自主设计的焊丝矫直装置实现焊丝的送给。所用板材为 240 mm×150 mm×25 mm 的 S32101 双相不锈钢, 焊

丝为直径 1.2 mm 的 ER-2209 实芯焊丝。母材和焊丝的化学成分和力学性能见表 1。在有无磁场辅助条件下使用相同的焊接参数分别进行窄间隙激光填丝焊对接试验, 焊接工艺参数见表 2, 主要工艺参数示意图如图 1 所示。图 2 为磁场辅助窄间隙激光填丝焊示意图。

试验过程中外加磁场由矩形钕铁硼永磁铁

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数, %)和力学性能

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

材料	C	Cr	Ni	Mn	Si	Mo	N	P	S	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$\delta_5(\%)$	-40°C KV/J
S32101	0.029	21.34	10.60	5.65	0.57	0.24	0.19	0.018	0.002	≥ 450	≥ 650	≥ 30	≥ 27
ER-2209 焊丝	0.02	23.00	9.00	3.3	0.55	1.20	0.160	0.013	0.008	≥ 520	≥ 690	≥ 20	≥ 38

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

道次	激光功率 P/kW	送丝速度 $V_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	焊接速度 $V_w/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	离焦距 $\Delta f/\text{mm}$	光丝交汇点高度 H_{LW}/mm	磁场强度 B/mT
1	4.8	-	0.6	+10	-	0, 90
2~6	5.0	5.5	0.48	+20	1.5	
7	5.5	4	0.36	+40	1.5	

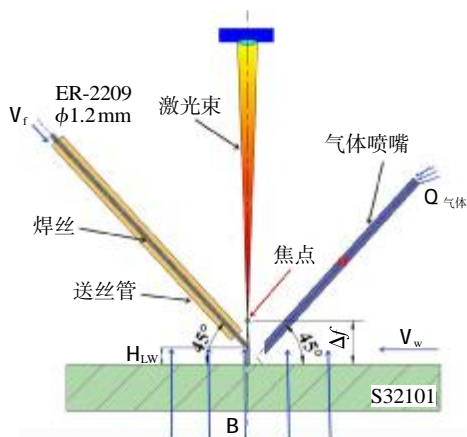


图 1 主要工艺参数示意图

Fig.1 Schematic of main process parameters

Nd2Fe14B 提供, 尺寸为 150 mm×50 mm×20 mm, 充磁方向为板厚厚度方向, 磁化表面为 150 mm×50 mm 面, 磁铁表面最大磁感应强度为 280 mT。

2 试验结果及分析

2.1 焊缝成形

采用有无磁场辅助窄间隙激光填丝焊技术对 25 mm 厚的 S32101 双相不锈钢进行平板对接, 通过 7 道焊接, 得到了两对多层多道激光填丝焊接头, 其焊缝形貌如图 3 所示。可以看到焊缝表面均匀平滑, 基本无飞溅, 焊接效果良好。

对多层多道焊缝的宏观形貌分别进行拍摄, 如

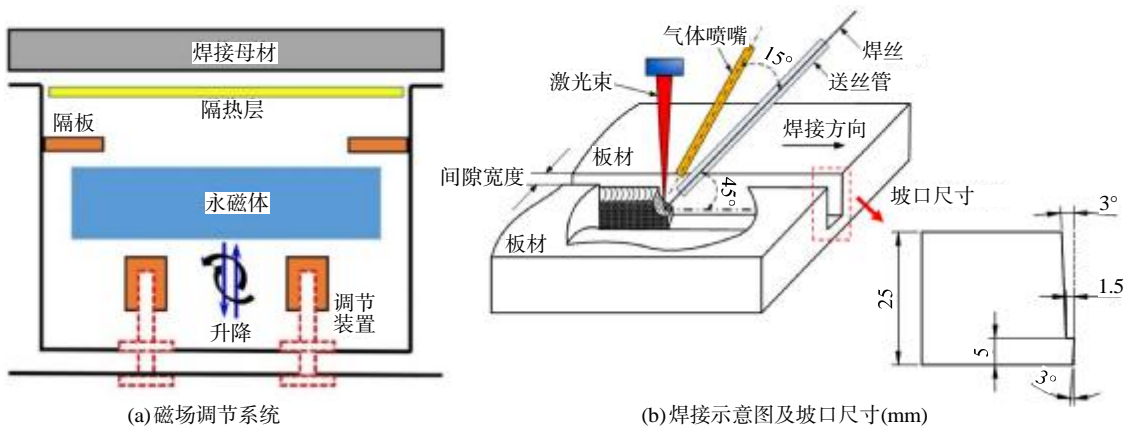


图 2 磁场辅助窄间隙激光填丝焊示意图

Fig.2 Schematic map of magnetic field assisted narrow-gap laser wire filler welding

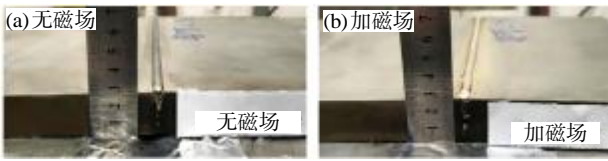


图3 磁场辅助窄间隙激光填丝焊缝形貌
Fig.3 Weld morphologies of magnetic field assisted narrow-gap laser welding with filler wire

图4所示。从纯激光打底焊焊缝开始比较,尽管坡口内焊缝表面都很均匀平滑,但是,加入磁场后打底焊缝背面成形明显更宽,说明焊缝根部的熔合情况较好。对于中间的填充焊缝来说,从焊道2~6的焊缝宏观形貌可看出,未加磁场条件下填充焊缝出现很

多的凹陷区域,并且焊缝与侧壁形成的两条角边线条比较弯曲,而加入辅助磁场后填充焊缝整体表现得更加平滑均匀,焊缝均为略微下凹的形态,并且焊缝与侧壁的角边线条近似于两条平行直线,充分说明了磁场辅助条件下填充焊缝与母材的熔合情况更好,更有利于获得优质的焊接接头。从最后的盖面焊道而言,加入磁场获得的焊缝铺展范围更大,熔宽明显更大,并且焊缝表面的焊接波纹更小,更为平滑均匀。就焊缝宏观成形而言,在其它焊接工艺条件相同的情况下,磁感应强度为90mT时,当磁场对多层单道焊缝熔化成形的辅助作用较为显著。

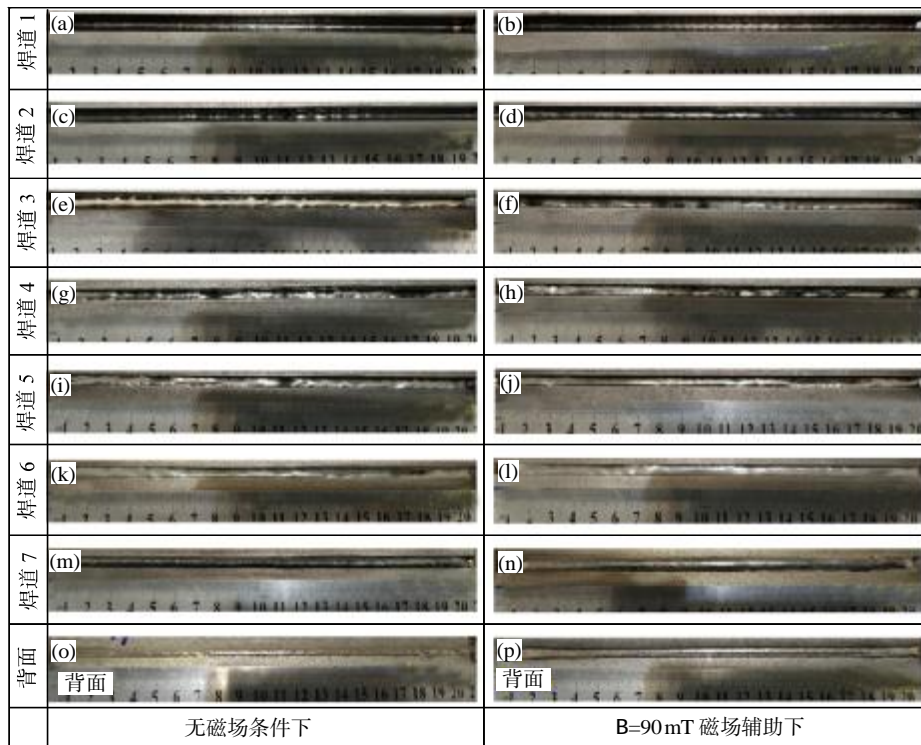


图4 有无磁场条件下的窄间隙激光填丝焊缝形貌
Fig.4 Weld morphologies of narrow-gap laser wire filler welding with and without magnetic field

有无磁场条件下的窄间隙多道焊焊缝横截面形貌如图5所示。通过对比可知,未加磁场时多道焊缝与两侧母材形成的熔合线整体呈现“蛇形”纵向分布,每一道填充焊缝的中部较宽,焊缝层间搭接部分较窄,多道焊缝的侧壁熔合和层间熔合状况并不理想,出现了多处未熔合和气孔等焊接缺陷。加入磁场后,所得多道焊缝两侧的熔合线笔直分布,与窄间隙坡口的形状完全贴合,其焊缝成形更为均匀美观,且未见常规窄间隙激光填丝焊中的气孔和未熔合等缺陷。

2.2 拉伸性能分析

对磁场辅助窄间隙激光填丝焊接板件进行拉伸试样的制备,如图6所示。在万能拉伸试验机上进行拉伸,拉伸试样均断裂在母材位置,得到的四组拉伸强度均在740~750MPa附近。试验表明:焊接接头的抗拉强度高于母材的。

2.3 硬度分析

对25mm厚磁场辅助窄间隙激光填丝焊接接头的盖面、填充以及打底焊道各进行一组硬度测试,间距为0.5mm,方向垂直于焊缝中心线,测试位置

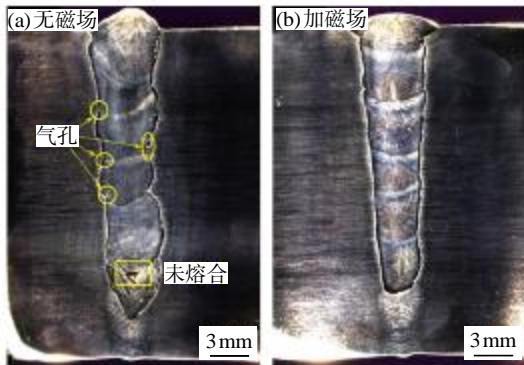


图5 窄间隙多道焊缝横截面的宏观形貌
Fig.5 Macroscopic morphologies of cross section of the narrow-gap multi-pass welding joints

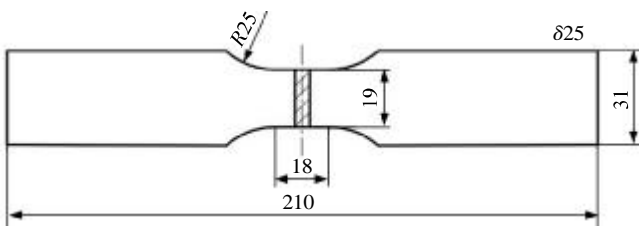


图6 拉伸试样尺寸(mm)
Fig.6 Sizes of tensile specimen (mm)

如图7所示,硬度测试结果如图8所示。

根据图8可知,各层焊道的硬度分布规律总体上保持一致,从焊缝中心到热影响区先减小,到母材处硬度再次升高。S32101 双相不锈钢母材的硬度约为 270HV,各焊层的焊缝硬度在 260~305 HV 范围内,焊缝平均硬度高于母材。

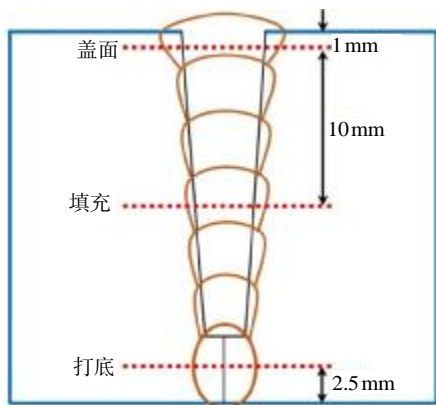


图7 硬度测试位置分布示意图
Fig.7 Schematic diagram of hardness test position

2.4 接头组织分析

图9为母材及磁场辅助窄间隙激光填丝焊接头的盖面焊道、填充焊道、打底焊道的微观组织,其中深色部分为铁素体,白色部分为奥氏体。从图9(b)可以发现,磁场辅助下的奥氏体组织在磁场搅拌作用下树枝状晶界破碎,并由原先的针状分布转化为

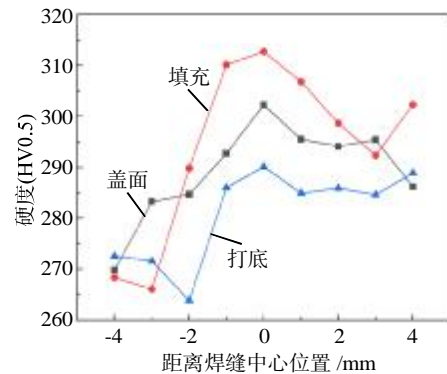


图8 接头的硬度变化曲线
Fig.8 Hardness variation curves of the joint

均匀的粒状分布,整体上晶粒尺寸变小。从图9(c)可以看出,奥氏体组织转变为均匀分布的针状形貌,且晶粒的生长方向较为一致。观察打底焊道的焊缝显微组织,从图9(d)可以看到奥氏体晶粒细化,组织呈现针状和粒状形貌。

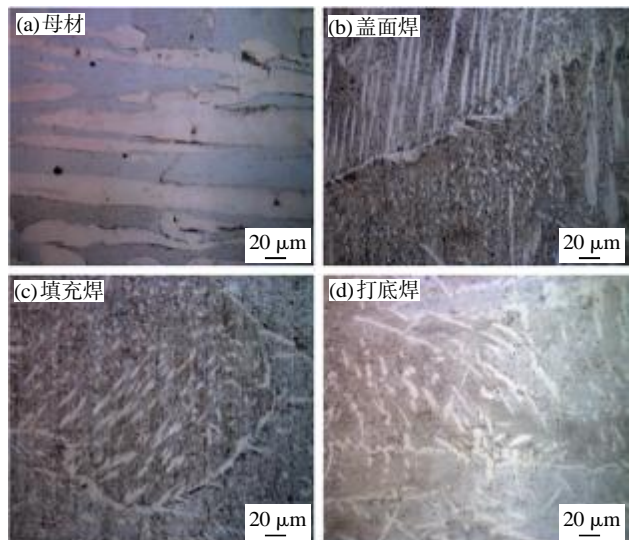


图9 母材及接头不同焊层的微观组织
Fig.9 Microstructure of the base metal and different weld layer of the joint

经实际测算,S32101 双相不锈钢母材中的奥氏体和铁素体含量分别为 47.23%、52.77%。根据 ImagePro 软件对焊接接头金相组织统计,计算得到不同焊道中两相的比例,计算结果见表3。可以发

表3 外加磁场下不同焊道中的两相含量统计结果(%)
Tab.3 Statistical results of two-phase ratio in different passes under magnetic field (%)

相	盖面焊道	填充焊道	打底焊道
奥氏体 A	49.24	42.21	44.70
铁素体 F	50.76	57.79	55.30

现,在外加磁场条件下获得的窄间隙激光填丝焊焊缝中的两相比比例更接近 1:1,且各焊道的两相比比例较为稳定。根据磁场对熔池的搅拌作用,熔池中的温度梯度减小,因而在焊缝冷却凝固过程中,冷却速度得以降低,有利于奥氏体相的析出,使得两相比比例接近且组织分布更加均匀。

3 结论


(1) 采用磁场辅助窄间隙激光填丝焊焊接 S32101 双相不锈钢,得到的焊缝表面平滑均匀,基本无飞溅,焊接效果较好。

(2) 对比有无磁场辅助窄间隙多道焊焊缝的横截面宏观形貌,未加磁场时的多道焊缝出现了多处未熔合和气孔等焊接缺陷。加入磁场所得的多道焊缝两侧的熔合线笔直分布,与窄间隙坡口的形状完全贴合,未见气孔和未熔合等缺陷。

(3) 磁场辅助窄间隙填丝焊的拉伸试样均断裂于母材位置,焊接接头的抗拉强度高于母材。各焊层的焊缝平均硬度高于母材。

(4) 磁场作用下双相不锈钢焊缝的金相显微组织为奥氏体 + 铁素体,奥氏体相在磁场搅拌作用下晶粒得以细化,呈针状和粒状形貌分布,生长方向较为一致,组织较均匀,两相比比例稳定在 1:1 左右。

参考文献:

- [1] 张晔,秦优琼,史冬夏,等. 中厚板窄间隙激光焊接研究进展[J]. 焊接技术,2015,44(8):1-5.
- [2] Zhang N J, Yang L J, Yin J N, et al. Characteristics of multi-pass narrow-gap laser welding of D406A ultra-high strength steel [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019,270:168-181.
- [3] 黄坚. 厚板窄间隙激光多层焊接技术进展[J]. 金属加工(热加工),2013(2):95-98.
- [4] 赵勇,王清墨,黄坚,等. 50mm 转子钢超窄间隙激光填丝焊接头组织与性能[J]. 中国激光,2015,42(2):117-123.
- [5] Elmesalamy A S, Li L, Francis J A. Understanding the process parameter interactions in multiple-pass ultra-narrow-gap laser welding of thick-section stainless steels [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2013,68(1/4): 1-17.
- [6] 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京:科学出版社,2005: 92-98.
- [7] 张波,黄坚,孙志远,等. 40mm 高强度窄间隙激光填丝焊接头组织与性能[J]. 热加工工艺,2016,45(17):70-73.
- [8] Li R Y, Wang T J, Wang C M, et al. A study of narrow gap laser welding for thick plates using the multi-layer and multi-pass method [J]. Optics & Laser Technology,2014,64: 172-183.
- [9] Cho W, Woizeschke P. Analysis of molten pool behavior with buttonhole formation in laser keyhole welding of sheet metal [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2020, 152:11-28. 

(上接第 88 页)

参考文献:

- [1] 杨鑫,王犇,谷文萍,等. 金属激光 3D 打印过程数值模拟应用及研究现状[J]. 材料工程,2021,49(4):52-62.
- [2] 杜雪婷,杨洋,黄文华,等. 基于医学影像技术的 3D 打印临床应用与突破 [J]. 中国组织工程研究,2021,25(18):2887-2894.
- [3] 陆声,辛欣,黄文华,等. 3D 打印骨科手术导航的临床应用进展[J]. 南方医科大学学报,2020,40(8):1220-1224.
- [4] 刘宸希,康红军,吴金珠,等. 3D 打印技术及其在医疗领域的应用[J]. 材料工程,2021,49(6):66-76.
- [5] 王蒙,郑冬,白克文,等. 基于 CT 薄层扫描数据的 3D 打印技术在跟骨关节内骨折手术治疗中的应用[J]. 创伤外科杂志,2017,19(6):421-425.

- [6] Bockhorn L, Gardner S S, Dong D, et al. Application of three-dimensional printing for pre-operative planning in hip preservation surgery [J]. J Hip Preserv Surg,2019,6(2):164-169.
- [7] 李媚璇,杨洁,王晓宇,等. 基于 CT 图像的腰椎 L4/5 节段三维重建及 3D 打印 [J]. 生物医学工程学进展,2020,41(4): 187-190.
- [8] 张文灼,高亮,刘杰,等. 基于 Geomagic 的复杂曲面产品逆向设计关键技术研究[J]. 现代信息科技,2020,4(16):152-154.
- [9] 颜威,奚小冰,蒋涛,等. 基于 Mimics 软件构建桡骨远端骨折三维模型[J]. 中国数字医学,2020,15(7):95-97.
- [10] Shang P, Zhang L, Hou Z, et al. Morphometric measurement of the patella on 3D model reconstructed from CT scan images for the southern Chinese population [J]. Chinese Medical Journal,2014,127(1):96-101. 