

CP800 高强钢高速激光焊接接头组织与性能研究

姜 彤,王大锋*,邹升光,曾浩林,马 冰,陈东高

(中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 为了进一步提高激光焊接速度,改善高速焊接过程中焊缝凹陷的问题,对 CP800 高强钢进行了 12 m/min 的高速激光焊接,研究了激光入射角对焊缝成形的影响。在最优焊接工艺参数下,对焊缝成形、焊缝质量、焊接接头组织、硬度及力学性能进行了研究。结果表明:当激光入射角度为 $+10^{\circ}$ 时,焊缝表面基本无飞溅,凹陷最小。此外在激光功率为 12 500 W,焊接速度为 12 m/min,激光入射角为 $+10^{\circ}$ 的最佳焊接参数下,焊缝表面及内部质量较好,焊缝熔宽约为 1.15 mm,热影响区宽度约为 0.35 mm。焊缝组织中,主要存在的是板条状马氏体和针状铁素体以及极少量的粒状贝氏体。焊缝的显微硬度 (HV) 值在 402.5 ~ 408.5。焊接接头抗拉强度能够达到母材抗拉强度的 96%,焊接接头室温冲击功能够达到母材室温冲击功的 87.5%。

关键词: CP800 高强钢; 高速激光焊; 激光入射角; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF76, TG456

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)03-0182-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.03.025

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Study on the microstructures and properties of high speed laser welded joints of CP800 high strength steel

Jiang Tong, Wang Dafeng*, Zou Shengguang, Zeng Haolin, Ma Bing, Chen Donggao

(Ningbo Branch of China Ordnance Research Institute, Ningbo 315103, Zhejiang, China)

Abstract: In order to further improve the laser welding speed and solve the problem of weld depression in the process of high speed welding, carried out high speed laser welding of CP800 high strength steel was carried out at 12 m/min, and the influence of laser incidence angle on weld forming was studied. Under the optimal welding process parameters, the weld forming, weld quality, weld joint structure, hardness and mechanical properties were studied. The results show that when the laser incidence angle is $+10^{\circ}$, there is basically no spatter on the surface of the weld, and the depression is minimal. In addition, under the optimal welding parameters of 12 500 W laser power, 12 m/min welding speed and laser incidence angle of $+10^{\circ}$, the surface and internal quality of the weld are better, the weld melt width is about 1.15 mm, and the width of the heat-affected zone is about 0.35 mm. Weld structure mainly con-

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 宁波市科技攻关计划项目(2022Z073); 宁波市重点研发计划项目(2023Z098); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2023MS05040); 中国兵器工业集团第五二研究所优秀青年科技人才培养基金项目(YQJJ2023-04); 中国兵器工业集团第五二所所列基金(NBFJ2022-07)。

作者简介: 姜彤, 1996 年出生, 男, 山东烟台人, 硕士研究生, 长期从事激光-电弧复合焊接技术研究工作, E-mail: 15098631631@163.com; *通讯作者: 王大锋, 1987 年出生, 男, 安徽阜阳人, 博士研究生, 副研究员, 长期从事高能复合焊接与表面工程技术研究工作, E-mail: bjing2013_saw@126.com。

sists of lathed martensitic, acicular ferrite and slight granular bainite. The measured hardness (HV) in weld ranges 402.5~408.5. The tensile strength and impact energy at room temperature of weld joint can achieve 96% and 87.5% of those of base metal respectively.

Key words: CP800 high strength steel, high speed laser welding, laser incidence angle, microstructure, mechanical property

0 引言

CP800 高强钢主要以铁素体和贝氏体组织为基体,并且通常分布少量的马氏体、残余奥氏体和珠光体组织。这种钢具有高屈服强度、良好的抗边缘开裂性、优异的弯曲性能和韧性,可以有效提高汽车零部件强度、刚度,利于发展空心零件替代实心零件实现减重,提高燃油经济性^[1-2],被广泛应用于汽车底盘的结构件,如扭力梁、悬架臂等^[3]。然而,先进高强度钢的焊接成形技术一直以来是应用中的技术难点。传统的焊接方式焊接高强钢容易出现未熔合,在随后的变形过程中产生开裂等问题,同时焊接过程稳定性差,易出现裂纹,热影响性能劣化。激光焊接由于具有热输入小、效率高、焊缝质量高等优点^[4],在汽车工业制造领域具有巨大应用前景。

国内外研究学者针对于激光焊接高强钢进行了诸多研究,发现焊接速度对焊缝表面成形、焊缝熔深以及热输入等有着重要影响。国内的杨蕾等^[5]研究了焊接热输入对 2.8 mm 厚 CP800 复相钢激光焊接接头组织性能的影响,通过改变焊接速度(4、5、7 m/min)来获得不同热输入的焊接接头。研究发现,当焊接速度为 7 m/min,激光功率为 3.5 kW 时的热输入为 30 J/mm,焊接接头出现未焊透现象。董现春等^[6]采用 4.5 m/min 的焊接速度对 HR800CP 复

相高强钢进行激光焊接,发现焊缝表面有轻微凹陷,但无其他焊接缺陷。Eric W 等^[7]通过焊接有限元模拟,分析了激光功率和焊接速度两组参数对高强度钢 100Cr6 焊接过程热条件的影响。发现高焊接速率(6 m/min)和减少能量输入,会出现极高的加热速率。Oktay 等^[8]研究了激光焊接速度、焦距对高强钢显微组织和性能的影响,发现当焊接速度为 6 m/min 时,可以获得最大的应力和焊缝宽度;当焊接速度为 7.8 m/min,焦距为±1 mm 时,吸能效果最好。综上所述,目前针对于高强钢激光焊接速度的研究主要停留在 8 m/min 以下,而对于更高焊接速度的研究,鲜有报道。

为了提高焊接效率,降低汽车用高强钢焊接的生产成本,笔者通过进一步提高焊接速度,对激光焊接 CP800 高强钢的焊接性进行研究,通过分析最优焊接工艺参数下的焊缝成形、质量,焊接接头组织、硬度及力学性能,为汽车制造行业提供理论基础。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验板材为 3.4 mm 厚 CP800 高强钢(宝钢生产),尺寸为 300 mm×150 mm,其化学成分和力学性能如表 1 所示。

表 1 CP800 钢的化学成分和力学性能
Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of CP800 steel

w/%								R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe			
0.082	0.121	1.700	0.010	0.002	0.350	0.232	余量	800	705	8.5

1.2 试验方法

试验中所用焊接系统为高能激光焊接系统,该焊接系统主要设备包括:1 台 IPG 公司生产的激光器,20 kW 光纤激光器(YLS-20000 型),焦距 295 mm,光纤直径为 300 μm;1 台 KUKA 公司生产的 KUKA 机器人(KR50)及其辅助装置,如图 1 所示,焊接保护气体为高纯氩气。Ar 气流为 20 L/min,焊接过程采用横吹气体保护方式。焊前用 500 W IPG 激光清洗设备对焊接试板进行表面清洗,接头

形式为对接,装配间隙控制在 0.25 mm。

采用最优的焊接参数进行 CP800 高强钢的高速焊接试验,得到最优的焊缝成形,进行焊缝表面及内部质量检测,按照 GJB2367A-2005 标准,对焊缝表面进行渗透检测,依据 GBT 3323.1-2019 标准,采用 XYD-225DR 检测设备,对焊接后的试板进行 DR 探伤。对焊接接头进行取样,采用 400[#]、800[#]、2000[#]、3000[#]砂纸进行金相磨抛处理,将试样磨抛后,用 4% 硝酸酒精进行金相腐蚀,制成标准金相试样,

采用 SMZ745 T 体式显微镜观察焊接接头的宏观形貌。采用捷克 TESCAN 扫描电镜进行显微组织观察,放大倍数为 1 500 倍,标尺为 30 μm 。采用 402 MVASD 型维氏显微硬度试验机,载荷为 200 g,保载时间为 15 s,以焊缝为中心,每隔 0.2 mm 打一个点。沿垂直于焊接方向制取接头拉伸试样,为了减小制备拉伸试样时表面缺陷的影响,将拉伸样表面进行打磨,去掉毛刺等缺陷的影响。按照 GB/T228.1-2021《焊接接头拉伸试验方法》对焊接接头进行拉伸性能试验,拉伸试样如图 2 所示。按照 GB/T2650-2008 对焊接接头进行冲击试验,焊接接头按照标准要求取样进行冲击试验,冲击试样开 V 型缺口,因为试样本身的厚度只有 3.4 mm,故选取冲击试样尺寸为 55 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2.5 mm,为保证试样的平整性,对试样上下表面进行了刨平处理,然后进行室温冲击试验。

2 试验结果及分析

2.1 激光入射角度的影响分析

经试验得知,在焊接速度 12 m/min,激光功率 12 500 W,离焦量+5,保护气体流量 20 L/min,装配间隙 0.25 mm,预热温度 0 $^{\circ}\text{C}$,单道单层的焊接条件

下能够保证焊透。在此焊接条件下,研究了激光入射角度对焊缝成形的影响,三种激光入射角的焊缝宏观成形以及横截面形貌如图 3 所示。



图 1 KUKA 机器人
Fig. 1 KUKA robot

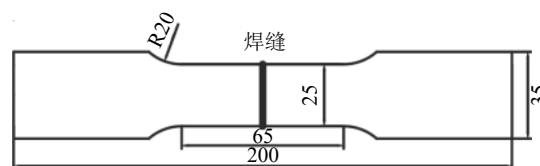


图 2 拉伸试样示意(单位:mm)
Fig. 2 Schematic of tensile specimens

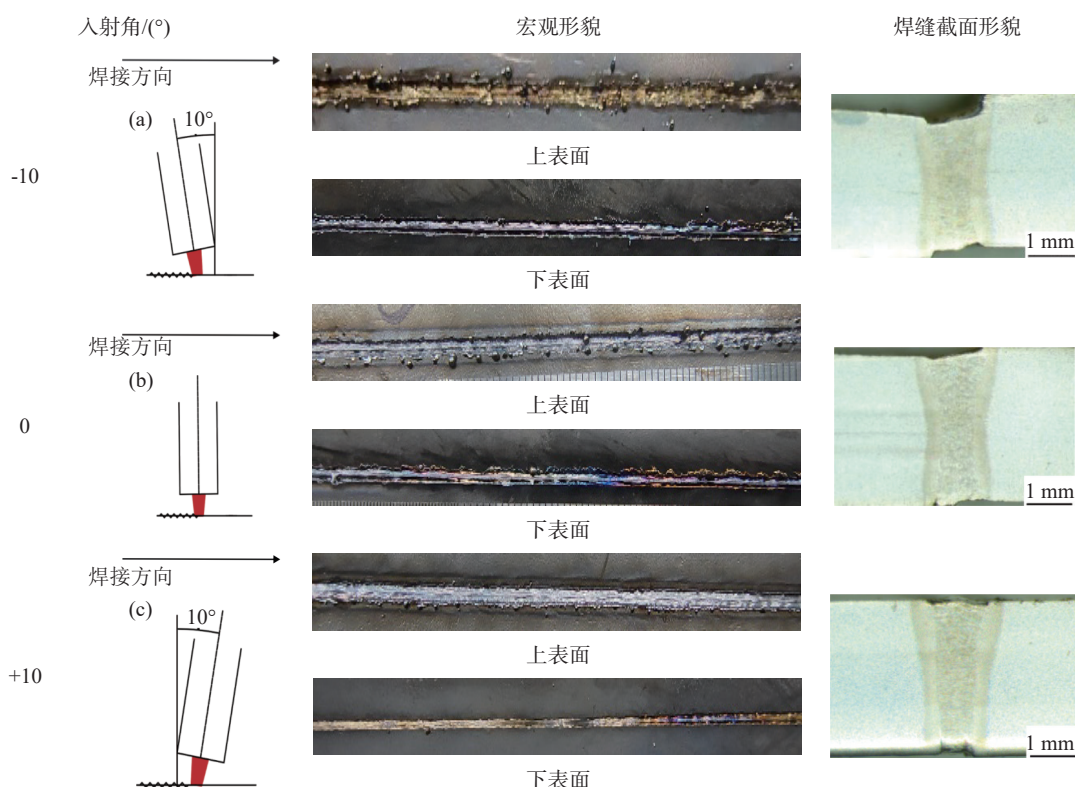


图 3 三种激光入射角的焊缝宏观成形以及横截面形貌
Fig. 3 Macroscopic forming of welds with three laser incidence angles and cross-sectional morphology

由图3可知,当激光入射角为 $+10^{\circ}$ 时,获得了较好的焊缝成形,此时的熔池最稳定^[9],几乎没有飞溅形成。当激光入射角为 0° 时,焊缝表面出现少量的飞溅;当激光入射角为 -10° 时,焊缝表面飞溅较大,且焊缝凹陷严重。因此,在最优焊接参数下,将激光入射角调整为 $+10^{\circ}$,进行对接试验,并对焊缝成形、焊缝质量、焊接接头组织、硬度及力学性能进行逐一研究分析。

2.2 焊缝表面及内部质量

图4是焊缝表面渗透结果,经渗透结果显示,焊缝及热影响区表面未发现裂纹、未焊透、未熔合等缺陷,焊缝表面质量合格。图5是DR探伤结果,焊缝内部质量良好,未发现气孔、裂纹等典型内部质量缺陷,能够达到一级标准。通过焊缝表面及内部质量的检测,检测结果均能达到较高的质量,说明在最优焊接工艺参数下,CP800 高强钢的焊接性能较好,而且能够保证在较大焊接速度的条件下同时具有较高的热输入。良好的焊缝质量对焊接接头的抗拉强度以及抗冲击性能都有很好的提升,从而会提高产品的使用寿命。



图4 焊缝表面质量
Fig. 4 Weld surface quality



图5 焊缝内部质量
Fig. 5 Weld internal quality

2.3 横截面形貌

图6是焊缝横截面的宏观形貌,高功率激光焊能量密度高,焊接速度快使得焊接形成的熔池的体积小,冷却速度大,而且熔池中的液态金属处于过热程度较大。焊缝断面形貌呈“沙漏”^[10],主要由焊缝区,热影响区、母材三部分组成。通过尺寸测量得出,焊缝表面熔深约为3.40 mm,全焊透,焊缝表面熔宽约为1.15 mm,焊缝中部熔宽约为0.79 mm,热影响区宽度约为0.35 mm。热影响区较窄,这主要是因为单激光高速焊接时,热影响区冷却速度较快,加热后迅速冷却时,会形成细小的晶粒结构,从而使热影响区较窄,焊接接头的性能较好。

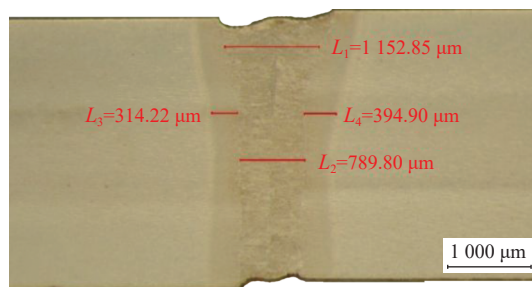


图6 焊接接头宏观形貌
Fig. 6 Macro topography of welded joints

2.4 焊接接头的组织

图7是焊接接头焊缝区、热影响区的显微组织以及焊接接头 EDS 图。分析图7(a)得出,焊缝组织中,主要存在的是板条状马氏体和针状铁素体以及极少量的粒状贝氏体,其形成原因是单激光焊接加热后,CP800 高强钢在空气中急冷至室温,使得母材中原有的贝氏体和部分铁素体转变为板条状马氏体。热影响区域各个部位距离焊缝远近不同,所经受的热循环相差较大,因而焊接热影响区是一个具有组织梯度和性能梯度的非均匀连续体。根据焊接热输入以及距焊缝位置的不同,可将热影响区分为粗晶区、细晶区和混晶区,图7(b)给出了热影响区的混晶区组织,主要是由粒状贝氏体和原始铁素体组成,由母材中原有的贝氏体和部分铁素体相经历相变重结晶形成,其铁素体组织更为细化,因为该区域冷却时间较短,晶粒更为细小。与其他各区域相比,此区域具有较高的塑形和韧性,但硬度跟强度会有所下降。EDS 分析表明,焊接接头没有第二相成分的出现,焊缝及热影响区组织中也未发现第二相颗粒。

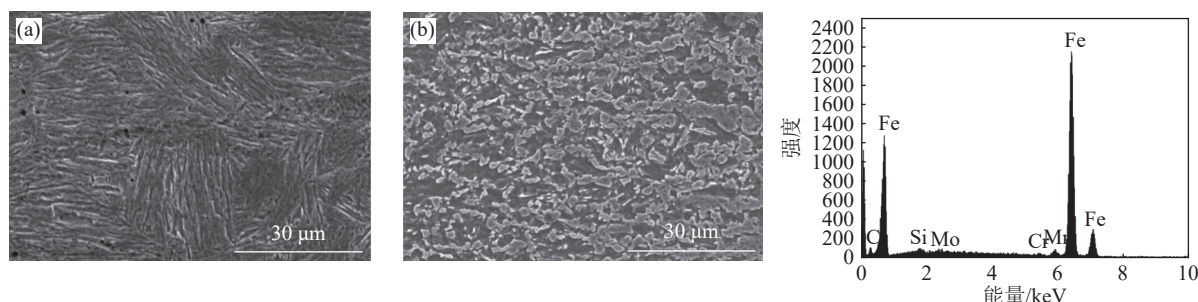
2.5 力学性能

图8是焊接接头各区域的显微硬度(HV)值,测试结果表明,热影响区显微硬度值最高,焊缝区次之,两个区域的显微硬度值都远高于母材。焊缝的显微硬度在402.5~408.5,热影响区的显微硬度在408.0~420.6,母材的显微硬度在324.1~361.2。这主要是因为焊接时环境温度低,焊口冷却速度较快,焊缝区及热影响区相当于经过了淬火处理,因而显微硬度相对于母材要高一些。在焊接接头的微观组织中,焊缝区和热影响区组织多为马氏体,马氏体的存在使得接头的硬度明显增高^[11]。

焊接接头抗拉强度为765 MPa,达到母材抗拉强度的96%,断裂位置均在焊缝处,拉伸断裂试样如图9(a)所示,断口形貌如图9(b)所示。由图9(b)

可知,拉伸断口形貌呈现大量韧窝,属于塑性断裂。焊接接头的抗拉强度虽然没有超过母材,但是也是

达到了较高的抗拉强度,其原因主要是C元素在马氏体内的固溶提高了焊接接头的抗拉强度。



(a)焊缝区;(b)热影响区;(c)EDS图

图7 焊接接头显微组织及EDS图

Fig. 7 Microstructure and EDS diagram of welded joint

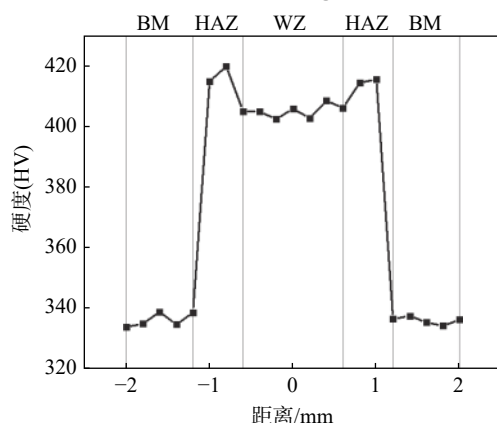


图8 焊接接头显微硬度值

Fig. 8 Microhardness value of welded joints

焊接接头室温冲击功为21 J,母材室温冲击功为24 J,焊接接头室温冲击功能够达到母材室温冲击功的87.5%,冲击断裂试样如图10(a)所示,冲击断口形貌如图10(b)所示。从图10可以看出,冲击断口形貌为韧窝花样,断裂形式为塑性断裂。焊接接头室温冲击功较高,进一步说明焊接接头缺陷较少,抗断裂能力较高,从而使得焊接接头具有很好的塑性和韧性。

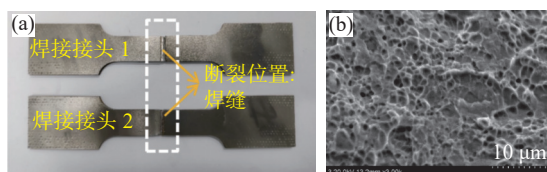


图9 焊接接头拉伸试样(a)及断口形貌(b)

Fig. 9 Tensile specimen(a) and fracture morphology(b) of welded joints

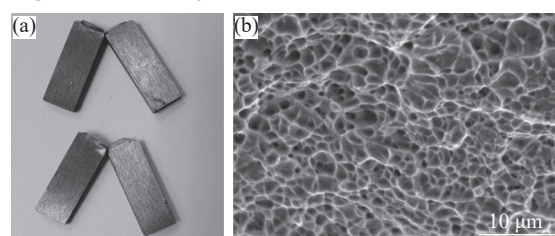


图10 焊接接头冲击试样(a)及断口形貌(b)

Fig. 10 Welded joint impact specimen(a) and fracture morphology(b)

3 结论

1)焊接速度在12 m/min,焊接功率为12 500 W,离焦量为+5 mm,激光入射角+10°的焊接条件下,焊缝凹陷较小,基本无飞溅,焊缝成形最好。

2)焊缝表面及内部质量良好,未发现裂纹、气孔等缺陷;焊缝表面熔深约为3.40 mm,全焊透,焊缝表面熔宽约为1.15 mm,焊缝中部熔宽约为0.79 mm,热影响区宽度约为0.35 mm;焊缝组织中,主要存在的是板条状马氏体和针状铁素体以及极少量的粒状贝氏体,热影响区的混晶区组织主要是由粒状贝氏体和原始铁素体组成。

3)焊接接头抗拉强度达到母材抗拉强度的96%,焊接接头室温冲击功达到母材室温冲击功的87.5%。焊缝的显微硬度(HV)在402.5~408.5,热影响区的显微硬度在408.0~420.6,母材的显微硬度在324.1~361.2。

参考文献

- [1] Kumar A P, Hrishikesh D, Ji-Woo L, et al. Texture analysis and joint performance of laser-welded similar and dissimilar dual-phase and complex-phase ultra-high-strength steels[J]. Materials Characterization, 2021, 174: 111035.

- [2] Kim Hyung-Ju, Keoleian Gregory A, Skerlos Steven J. Economic assessment of greenhouse gas emissions reduction by vehicle lightweighting using aluminum and high-strength steel[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(1): 64–80.
- [3] Sun H, Wei K, Yang X, *et al.* Effects of pre-strain and annealing on the fatigue properties of complex phase steel CP800[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 131(C): 105364.
- [4] Meng W, Li Z, Huang J, *et al.* Microstructure and softening of laser-welded 960 MPa grade high strength steel joints[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(2): 538–544.
- [5] Yang Lei, Wang Xiaonan, Huan Pengcheng, *et al.* Effect of heat input on microstructure and properties of CP800 complex phase steel laser welded joints[J]. *Apply Lasers*, 2018, 38(4): 562–569.
(杨蕾, 王晓南, 环鹏程, 等. 热输入对 CP800 复相钢激光焊接接头组织性能的影响 [J]. *应用激光*, 2018, 38(4): 562–569.)
- [6] Dong Xianchun, Zhao Yang, Han Nidan, *et al.* Microstructures and properties of HR800CP multiphase high strength steel welded joints[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(5): 144–148.
(董现春, 赵阳, 韩妮丹, 等. HR800CP 复相高强度钢板焊接接头的显微组织和力学性能 [J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(5): 144–148.)
- [7] Eric W, Nikolay D, Ralf O, *et al.* Investigations on the thermal conditions during laser beam welding of high-strength steel 100Cr6[J]. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, 2023, 6: 100118.
- [8] Oktay Çavuşoğlu, Yuce Celalettin, Aydın Hakan. Mechanical characterization and microstructure of fiber laser welded TWIP980 steel depending on welding speed and focal distance[J]. *Optik*, 2023, 274: 170541.
- [9] Shehryar M K, Sarim A, Daniel W, *et al.* The effect of laser impingement angle on the optimization of melt pool geometry to improve process stability during high-speed laser welding of thin-gauge automotive steels[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 78: 242–253.
- [10] Wang X, Sun Q, Zheng Z, *et al.* Microstructure and fracture behavior of laser welded joints of DP steels with different heat inputs[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2017, 699: 18–25.
- [11] Tao Peikang, Mi Gaoyang, Wang Chunming, *et al.* Formation, microstructure and mechanical properties of double-sided fiber laser welded ultra-high strength steel[J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 153: 108208.

编辑 张继东

(上接第 181 页)

- [6] Hindy A, Farahmand F, Pourdanesh F, *et al.* Synthesis and characterization of 3D-printed functionally graded porous titanium alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2020, 55(6): 267–272.
- [7] Zhang Zhijia, Zhao Jun, Qiao Zhijun. Nonsolvent-induced phase separation-derived TiO₂ nanotube arrays/porous Ti electrode as high-energy-density anode for lithium-ion batteries[J]. *Rare Metals*, 2021, 40(2): 393–399.
- [8] Singh H, Saxena P, Puri Y M. Materials selection and manufacturing of metal membranes for industrial applications[J]. *Mater Lett*, 2020, 269(3): 127557.
- [9] Zhang Yijie, Li Xianfeng, Chen Dong, *et al.* Si doping effects on the photocatalytic activity of TiO₂ nanotubes film prepared by an anodization process[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 60(7): 543–546.
- [10] Yu Yongmei, Guo Chengjian, Zhang Xiaoling, *et al.* Dynamic recovery model of Fe-Si alloy steel[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2018, 43(5): 28–33.
(于永梅, 郭成健, 张小玲, 等. Fe-Si 合金高温变形流变应力的本构模型 [J]. *金属热处理*, 2018, 43(5): 28–33.)
- [11] Guo Fengxue, Wu Jie, Chen Yunbo, *et al.* Pore morphologies and compressive strength of TiC/NiAl porous composites[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2020, 45(5): 1–5.
(郭丰雪, 吴杰, 陈蕴博, 等. 多孔 TiC/NiAl 复合材料的孔洞形貌及抗压强度 [J]. *金属热处理*, 2020, 45(5): 1–5.)
- [12] Yang Jianming, Tang Yang, Gu Hai, *et al.* Research and application status of 3D printing porous structures[J]. *Materials Reports*, 2018, 32(15): 163–173.
(杨建明, 汤阳, 顾海, 等. 3D 打印制备多孔结构的研究与应用现状 [J]. *材料导报*, 2018, 32(15): 163–173.)
- [13] Zhao Shu, Xie Kang, Guo Yue, *et al.* Fabrication and biological activity of 3D-printed polycaprolactone/magnesium porous scaffolds for critical size bone defect repair[J]. *Acs Biomaterials Science Engineering*, 2020, 12(4): 264–275.

编辑 杨冬梅