

海洋装备用 921 钢的增材修复专用粉体及工艺研究

王一甲^{1,2}, 李彬周^{1,2}, 段 涛³, 张大越^{1,2}, 孙瑞琪², 刘宝权²

(1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室, 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团北京研究院有限公司, 北京 102200; 3. 中国人民解放军 91697 部队, 山东 青岛 266405)

摘 要:研究了用于 921 钢材表面开展激光增材制造与修复的专用粉体及配套工艺。通过合理调控合金组分, 利用气雾化工艺, 获得尺寸均匀的球形雾化粉末; 利用激光同轴送粉设备在 921 钢基材上进行增材制造, 优化工艺参数, 可获得力学性能匹配良好, 无宏观缺陷的熔覆层, 实现对 921 钢基材的增材与修复目的。经测试, 修复层力学性能满足相关修复指标要求, 化学成分与设定保持一致, 无开裂分层等缺陷, 具备良好机加工性能, 有助于实现大型海洋结构的自主修复, 提高服役可靠性。

关键词:921 钢; 增材; 激光; 海洋; 力学性能

中图分类号: TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)02-0169-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.02.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听
语
音
与
作
者
互
动
聊
科
研

Research on additive repair special powder and process of 921 steel for marine equipment

WANG Yijia^{1,2}, LI Binzhou^{1,2}, DUAN Tao³, ZHANG Dayue^{1,2}, SUN Ruiqi², LIU Baoquan²

(1. State Key Laboratory of Metal Materials for Marine Equipment and Application, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Beijing Research Institute Co., Ltd., Beijing 102200, China; 3. No.91697 Unit of PLA, Qingdao 266405, Shandong, China)

Abstract: In this paper the specialized powder and supporting technology for laser additive manufacturing and repair on the surface of 921 steel had been investigated. By adjusting the alloy composition reasonably a spherical atomized powder with uniform size can be obtained through atomization process. A laser coaxial powder feeding equipment had been used for additive manufacturing on 921 steel substrate. As a result a well matched mechanical performance and macroscopic defect free cladding layer can be obtained, achieving the purpose of additive and repair on 921 steel substrate. Testing result indicates the mechanical properties of the repaired layer meet the relevant repair index requirements, the chemical composition remains consistent with the setting, and there are no defects such as cracking and layering. It has good machining performance, which helps to achieve autonomous repair of large marine structures and improve service reliability.

Key words: 921 steel, additive manufacturing, laser, ocean, mechanical property

收稿日期: 2024-04-16

作者简介: 王一甲, 1992 年出生, 男, 甘肃武威人, 副研究员, 博士, 主要从事粉末冶金与表面工程研究, E-mail: wangyijia@ansteel.com.cn。

0 引言

大型船舶、海上钻井平台、跨海大桥、油气输运管道等诸多海洋关键结构,在服役过程中都会面临日常维护和应急维修的需求^[1]。由于上述海洋结构服役环境恶劣,往往位于远海或深海,难以返港或上岸修理,因此开展日常维护及应急工况下的原位增材制造修复,可显著降低修复的经济成本,延长有效服役周期是一种重要的技术手段。目前,美国、俄罗斯、荷兰、英国、日本等传统海洋强国对于海洋装备增材技术的掌握最为前沿^[2-11],开发了多款以电弧、激光为热源的自动化增材设备及相关配套焊材,可显现水上水下、干态湿态的增材制造。以美国 HSLA-80/100 级船体钢为代表,已具备较为丰富的焊材及增材工艺研究,对增材产物的性能调控也较为成熟^[12-13]。我国在配套设备、原材料、修复工艺等方面处于追赶阶段,迫切需求相关领域的技术突破。

921 钢材是我国自主研发的高强度低合金结构钢,被广泛用于船舶、海洋工程、桥梁等领域。以船体为代表的水下结构,在服役过程中,钢材表面容易

因海水腐蚀、异物冲刷、交变应力等外在因素导致裂纹、剥落、凹坑等缺陷,均需要及时修复。激光增材修复具有热输入小、稀释率低、冶金结合、变形量小的特点,较传统的堆焊、喷涂等工艺有显著优势。在开展激光增材制造修复时,原材料与工艺参数是核心与难点:①由于激光工艺冷速较高,增材部分的晶粒尺寸细小且难以进行退火处理,如原料采用与 921 钢相同的合金成分,易导致增材部分的强度和硬度显著高于基材,产生较高的内应力和开裂倾向;②增材部位具有多道多层的结构特点,工艺参数不匹配会带来较多孔隙与裂纹等内在缺陷,严重影响增材部位的强韧性,易发生脆断。因此,开发适配 921 钢材的粉体材料及增材工艺具有重要研究意义与应用价值。

1 试验方法

1.1 粉体成分设计与制备

表 1 为试验所用的粉末成分设计。其中,C、Si、Mn、Mo、Ni 为主要合金元素,通过调配 Mo 元素的含量来控制材料的强度与硬度;S、P、O、N、H 等为杂质元素,需满足表中要求并尽可能降低。

表 1 粉末的化学成分设计
Table 1 Alloying design of powder

C	Si	Mn	S	P	Mo	Ni	O	N	H	Fe
0.03~0.05	0.3~0.4	1.3~1.5	≤0.004	≤0.01	0.2~0.5	3.3~3.5	≤0.005	≤0.006	≤0.005	余量

采用气雾化工艺制备:分别按比例称量上述合金成分原料,置入气雾化制粉炉坩埚;升温熔化、吹粉、筛分,得到所需粒径的粉末,如图 1 所示,粉末粒度 35 ~ 150 μm 可调。

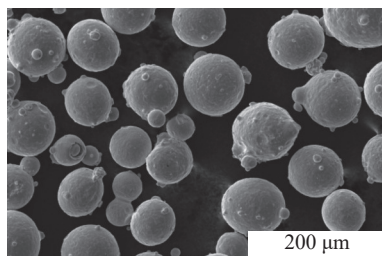


图 1 气雾化粉末显微形貌

Fig. 1 Micromorphology of aerosol powder

1.2 激光增材样品制备

在平直钢板表面进行激光熔覆,基材选用 921 钢板;采用笔者单位自主研发的同轴送粉式激光熔覆设备(图 2)开展样件制备,分别针对三种不同 Mo 含量粉体开展增材制造,样品名为:0.2Mo、

0.3Mo、0.5Mo,其实际成分见表 2,适配工艺参数见表 3。具体激光熔覆工艺参数的选择需要依据实际工况而定,均以工艺窗口形式呈现,其中,搭接率的变化可影响熔覆层的表面起伏程度;如需提高制备效率,激光功率需随激光头行走速度增大而增大,以提供足够的能量在基板表层形成熔池;载粉气流量和保护气流量增加,则单位时间内输送至表层的粉末数量增加,熔覆单道的厚度与宽度随之提高;为确保工艺稳定,激光头的工作距离需保持稳定。

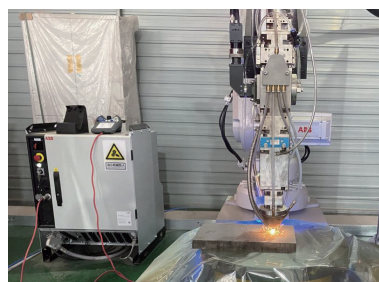


图 2 同轴送粉激光熔覆设备

Fig. 2 Coaxial powder feeding laser cladding equipment

表 2 粉末实际化学成分
Table 2 Measured chemical compositions of powder

样品名	C	Si	Mn	Mo	Ni	O	S	P	N	H	Fe
0.2Mo	0.031	0.37	1.30	0.21	3.27	0.009	0.004	0.004	0.002		余量
0.3Mo	0.023	0.34	1.29	0.33	3.48	0.012	0.004	0.004	0.002	0.002	余量
0.5Mo	0.029	0.34	1.31	0.51	3.27	0.011	0.004	0.004	0.002		余量

表 3 激光熔覆工艺参数
Table 3 Laser cladding process parameters

搭接率/%	激光功率/kW	载粉气流量/(L·min ⁻¹)	保护气流量/(L·min ⁻¹)	激光头行走速率/(m·min ⁻¹)	工作距离/mm
50 ~ 60	1 ~ 3	10 ~ 15	9 ~ 13	1 ~ 5	13 ~ 15

1.3 显微组织分析

采用 ZEISS AXIOSCOPE 5 金相显微镜(Optical Microscope, OM) 及 Thermo Fisher Axia ChemiSEM 扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)对熔覆微观组织进行观察。

1.4 力学性能测试

采用国标(GB/T 228-2002)方法测定钢材屈服强度、抗拉强度和延伸率;采用国标(GB 229-1994)方法测定钢材的冲击功,样品尺寸为 55 mm×10 mm×10 mm,中间开 2 mm V 型缺口;同种钢材的拉伸及冲击测试均进行三次,取三次测试数据的算术平均值。

1.5 耐腐蚀性能测试

电偶腐蚀也叫异种金属腐蚀或接触腐蚀,是指两种不同电化学性质的材料在与周围环境介质成回路时,电位较正的金属腐蚀速率减缓,而电位较负的金属腐蚀加速的现象。造成这种现象的原因是两种材料间存在着电位差,形成了宏观腐蚀原电池。试验通过测试基体与修复层金属之间的电位差,考察两种材料在模拟海洋大气环境下的电偶腐蚀效应。

1) 电化学试验装置

电化学试验装置采用三电极体系。工作电极(即研究电极)为待测试样,工作面积为 1 cm²;参比电极为饱和甘汞电极;辅助电极为铂丝网。

2) 试验条件

试验温度: 室温。

试验溶液: 1% NaCl 溶液。

3) 仪器设备

设备为普林斯顿多通道电化学工作站。

4) 试样

试样为基材 921 钢和熔覆试样。

将试验钢用机床加工成 20 mm×20 mm×7 mm 的试样,对试样进行如下步骤处理:热碱脱脂→热水清洗→冷水冲洗→去离子水清洗→酒精清洗→吹干。

2 结果与分析

2.1 增材样品宏观形貌

依照上述工艺参数,在钢板表面开展多道多层的激光增材,最终获得多个尺寸为 50 mm×100 mm×20 mm 的增材区域,增材区域形状规整,与基体实现冶金结合,未观察到开裂和剥落现象(图 3)。对增材区域进行打磨和着色探伤(图 4),未观察到内部存在开裂、气孔等缺陷。

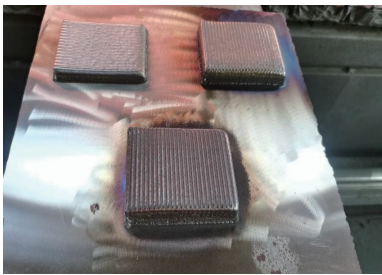


图 3 熔覆过程中的样品实物
Fig. 3 The physical sample during the cladding process

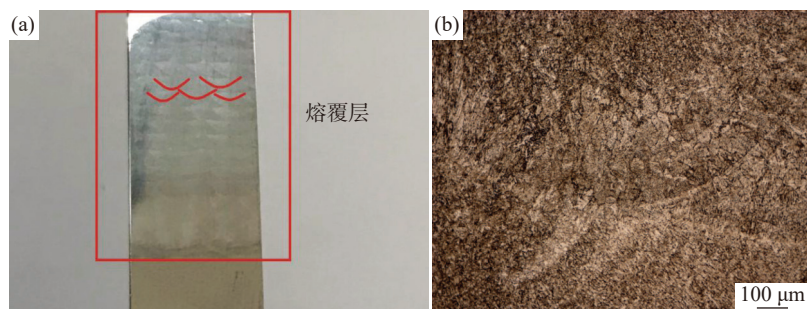


图 4 熔覆块体表面着色探伤
Fig. 4 Surface dye penetrant testing of cladding block

2.2 增材样品显微形貌

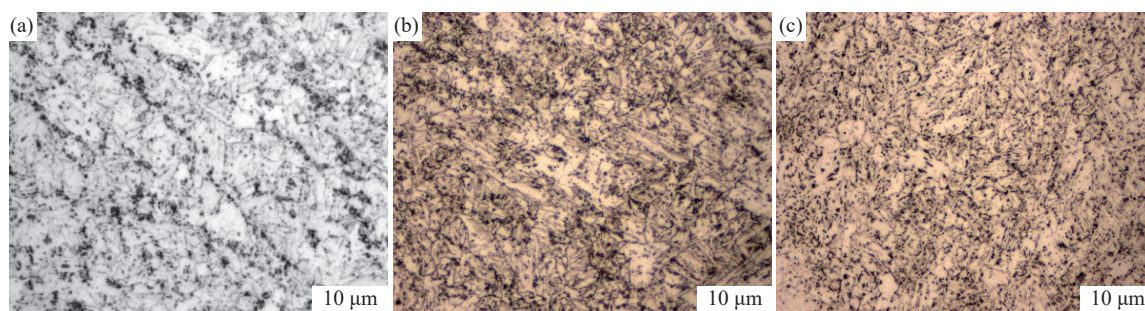
如图 5 所示,激光熔覆层微观组织为典型的鱼鳞状结构排列,鱼鳞状结构形成于熔池区域,是在微观尺度上的一种有序排列。激光局部加热金属粉末,形成熔池,而后快速冷却,导致微粒的重新结晶和鱼鳞状排列。图 6、7 分别为不同 Mo 含量激光熔覆样品单个熔覆道次内部的微观组织光镜和电镜图片。

可以看出,熔覆产物微观组织细小,主要为贝氏体+长条或多边形铁素体;当 Mo 含量升高时,铁素体晶粒减小,形成板条贝氏体,贝氏体相含量增加。观察熔覆层与界面连接处,如图 8 所示,激光熔覆层与基体结合良好,无未熔合孔洞及裂纹等缺陷,其热影响区厚度大约 1 mm,可见激光熔覆热输入较小,对基体组织的影响较浅。



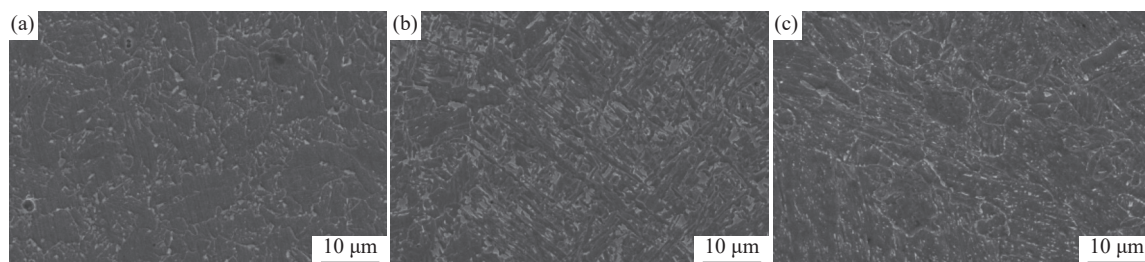
(a)沿层厚方向切割侵蚀后的宏观照片;(b)微观光镜图片

图 5 0.2Mo 激光熔覆试样
Fig. 5 0.2Mo laser cladding sample



(a)0.2Mo; (b)0.3Mo; (c)0.5Mo

图 6 激光熔覆样品微观组织光镜图片
Fig. 6 Optical image of microstructure of laser cladding samples



(a)0.2Mo; (b)0.3Mo; (c)0.5Mo

图 7 激光熔覆样品微观组织形貌
Fig. 7 SEM images of microstructure of laser cladding samples

2.3 增材样品力学性能

熔覆层力学性能测试结果如表 4 所示,随着粉末材料 Mo 含量的增加,试样的抗拉强度不断升高,延伸率降低,硬度升高,这一结果与微观组织中贝氏体含量增加及晶粒细化的变化规律是正相关的。具

体来说,作为低碳合金钢,其强韧性与碳元素关系弱化,而更多取决于钢材中富含高密度位错的相变组织;Mo 元素是较强的碳化物形成元素,在钢中产生固溶强化效果,能使钢的晶粒细化,提高淬透性,在熔覆层降温过程中,Mo 会抑制碳元素的扩散,更利

于形成贝氏体; Mo 含量增加一方面提升了板条贝氏体的含量, 另一方面会使板条平均宽度降低, 微界面与碳化物弥散程度提高, 二者均可有效提升基体强度。因此, 可以通过调节 Mo 含量这个单一变量实现对材料强韧性的调控, 便于匹配不同服役需求下的钢构件。0.2Mo 样品具有最高的塑性与低温冲击性能。

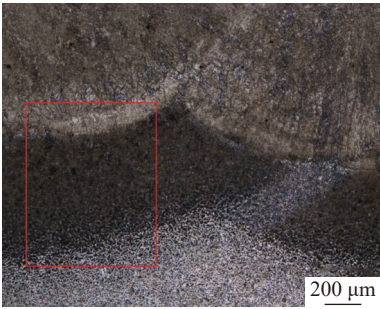


图 8 熔覆层与基体界面处熔合区微观形貌
Fig. 8 Microstructure of the fusion zone at the interface between cladding layer and matrix

表 4 增材区域力学性能

Table 4 Mechanical properties of additive region

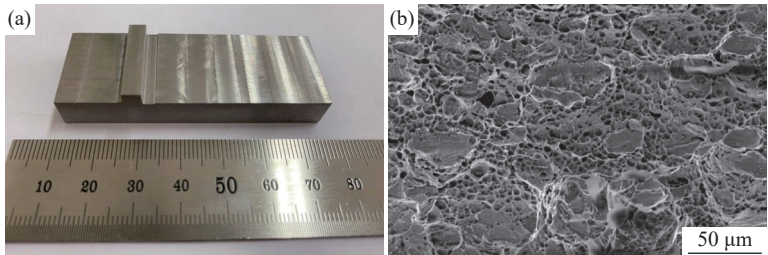
样品名	抗拉强度 /MPa	界面结合强度 /MPa	延伸率 /%	显微硬度 (HV)	冲击功 (-50 °C)/J
0.2Mo	623.3	567	25.8	212.2	103
0.3Mo	678.5	590	20.0	233.1	99
0.5Mo	750.3	631	18.1	261.2	81

以上分析可知, 通过调整合金元素的成分与激光熔覆工艺, 可对激光熔覆修复材料的微观组织进行调控, 满足最终性能的要求。

2.4 增材区域与界面结合状态分析

增材区域是否与基材形成牢固的结合界面是保证修复质量的关键因素。常见的界面结合方式有机机械结合、化学结合、冶金结合等, 通过评价增材区域与基体的界面结合强度, 可判定界面结合方式。对此, 采用凸台剪切试验法进行评价。

测试样品如图 9 所示, 上方突起部位是熔覆层, 下面为基体, 见图 9(a), 通过施加剪切力使二者分离, 获得结合区域的剪切强度数据, 修复层与基体之间的水平剪切应力在 567 ~ 631 MPa, 表明在水平剪切力下, 结合处的强度接近基体水平, 观察二者断裂面(图 9c), 可见断口主要由较大的片层状撕裂组织和大量的韧窝组成, 表明结合区域在剪应力作用下发生塑性变形。根据国内外常见的水下工艺评定标准 AWS D3.6M : 2017, 将水下各类焊缝评定分为 ABCD 四个等级, 其中 A 级最为严格, 需要满足目视、无损和力学性能等要求^[1], 具体如表 5 所示。对制备的增材区域性能(表 4)与表 5 所示标准进行对比, 可以看出, 熔覆层及结合处的各项力学性能及熔覆质量均超过 A 级标准。



(a) 剪切试样; (b) 断口形貌

图 9 凸台剪切试验试样与断口形貌

Fig. 9 Convex shear test specimen and fracture morphology

表 5 AWS D3.6M:2017 A 标准力学性能规定

Table 5 AWS D3.6M:2017 A standard mechanical properties specification

基体最小抗拉强度/MPa	平均冲击功/J	最小冲击功/J	熔覆层缺陷
≥550	34	23	目视及无损测试无缺陷

由激光熔覆的工艺特点可知: 高能光斑会在基材表面形成熔池, 粉体进入熔池并迅速熔化, 基材与熔覆层之间原子发生充分的扩散与结合; 当光斑移动时温度迅速降低, 混合的液态金属凝固; 由于熔覆层金属与基材成分较为接近, 二者具有较小的润湿角, 有利于在液态下铺展生长, 形成具有鱼鳞状搭接

特点的界面。综合力学性能测试与熔覆过程, 可知其界面结合机制为冶金结合。

界面结合质量的影响因素较多, 如表面预处理状态、元素稀释、气孔与裂纹、熔渣颗粒、多层熔凝热输入提高导致的退火软化等。因此, 如需进一步提高界面结合质量, 可在熔覆前进行预打磨, 提高激

光头行走速度, 增加冷却温度, 及时清理熔渣颗粒, 采用交叉打印路径并增加层间冷却时间, 最大程度降低对界面的影响。

综上分析, 连接区域具有韧性断裂特征, 二者形成牢固的冶金结合界面, 证明试验所制备的粉末及配套激光熔覆工艺成熟稳定, 可确保熔覆层在各种应力条件下保持与基材匹配的力学性能, 这对于高要求的工程应用非常关键。

2.5 增材样品耐腐蚀性能

试验模拟海洋大气环境, 选择 0.3Mo 样品开展自腐蚀电位曲线测试, 时间随电位的曲线变化趋势如图 10 所示。

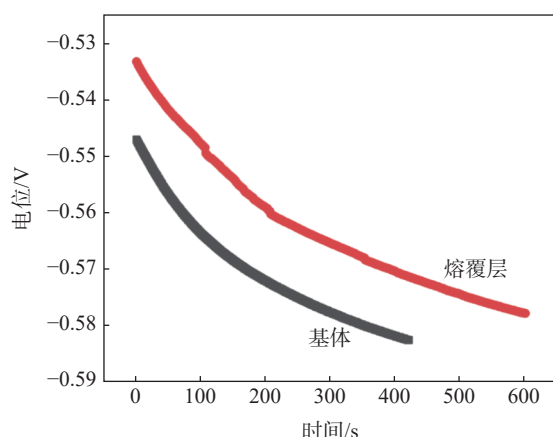


图 10 自腐蚀电位曲线

Fig. 10 Self-etching potential curve

在腐蚀环境下, 两种金属组成电偶对时, 电位高者作为阴极, 电位低者作为阳极。电偶腐蚀的推动

力是在连续的介质中两种金属的腐蚀电位差, 电位差较大的两种金属组成电偶对时, 阳极金属受到的腐蚀会较严重。通常两种金属的电位差小于 50 mV 时, 就可以不考虑电偶腐蚀效应。两种试验钢稳定后的自腐蚀电位数值分别为基材: -583 mV, 熔覆层: -578 mV, 两者电位差为 5 mV, 远小于 50 mV, 因此可以不考虑电偶腐蚀效应。说明修复材料与基体材料之间没有形成电偶, 因此不会出现一种金属在另一种金属存在下发生的电化学腐蚀。这有助于降低腐蚀的风险, 延长整体结构的寿命。同时, 有助于减少环境中的金属释放和腐蚀产物的生成, 对周围的海洋生态系统造成的影响较小。

3 结论

1) 设计了适配 921 钢表面修复的专用粉体, 通过调控 Mo 含量, 控制基体中贝氏体含量, 可实现对增材产物的力学性能的灵活调控, 便于匹配不同服役需求的钢构件。

2) 通过匹配适当的激光熔覆工艺, 获得了热影响区较小, 界面为冶金结合, 且力学性能优良的熔覆层, 其表面与内部没有孔隙与裂纹, 耐腐蚀性能与基材保持一致。

下一步, 将在现有基础上对相关粉体与工艺在水下环境开展增材制造与表面修复进行研究, 拓展其应用边界。

参考文献

- [1] KOU R K. Study on high pressure dry underwater laser cladding repair technology and properties of 921A ship steel[D]. Beijing: Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2022.
(寇荣魁. 921A 舰船钢高压干法水下激光熔覆修复工艺及性能研究[D]. 北京: 北京石油化工学院, 2022.)
- [2] FANG Z G, LIU B, LI G M, *et al.* Requirement and development analysis of warship equipment materials system[J]. Materilas China, 2014, 33(7): 385-393.
(方志刚, 刘斌, 李国明, 等. 舰船装备材料体系发展与需求分析[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 385-393.)
- [3] HART P, RICHARDSON I M, NIXON J H. The effects of pressure on electrical performance and weld bead geometry in high pressure GMA welding[J]. Welding in the World, 2001, 45: 25-33.
- [4] ZHU D F, ZHU J L, JIAO X D, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 921A steel welding joint by laser-MAG hybrid welding[J]. Welding & Joining, 2022(9): 25-29, 42.
(朱东芳, 朱加雷, 焦向东, 等. 921A 钢激光-MAG 复合焊接接头组织及性能[J]. 焊接, 2022(9): 25-29, 42.)
- [5] GARASIC I, KRALJ S, KOZUH Z, *et al.* Analysis of underwater repair technology on the jack-up platform spud can[J]. Brodogradnja, 2010, 61(2): 153-160.
- [6] WOODWARD N, KNAGENHELM H O, BERGE J O, *et al.* Hyperbaric GMA welding for contingency repair using a fillet welded sleeve at 1 000 m water depth[C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, 2007:3403.

(下转第 181 页)

Sichuan Metallurgy, 2009, 31(2): 15-18.

(刘健, 张开坚, 陆建生, 等. 微合金元素钒在钢板中的强化机理及应用[J]. 四川冶金, 2009, 31(2): 15-18.)

- [9] YIN G Q, HUANG Z Y, YANG C F, *et al.* Effects of nitrogen content and TMCP on microstructure and mechanical properties of V-N micro-alloying steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2008, 33(3): 4-8.
(尹桂全, 黄贞益, 杨才福, 等. 氮含量和 TMCP 对微合金 V-N 钢显微组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2008, 33(3): 4-8.)
- [10] WAN X L, WU K M, NUNE K C, *et al.* In situ observation of acicular ferrite formation and grain refinement in simulated heat affected zone of high strength low alloy steel[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2015, 20(3): 254-263.
- [11] LEE J L, PAN Y T. The formation of intragranular acicular ferrite in simulated heat-affected zone[J]. ISIJ International, 1995, 35(8): 1027-1033.
- [12] ZHOU X G, WANG X X, LI X, *et al.* Modeling of the dynamic recrystallization of Ti microalloyed high-strength steel[J]. Steel Research International, 2022, 93(6): 2100461.
- [13] POLIAK E I, JONAS J J. Initiation of dynamic recrystallization in constant strain rate hot deformation[J]. ISIJ International, 2003, 43(5): 684-691.
- [14] WAHABI M, CABRERA J M, PRADO J M. Hot working of two AISI 304 steels: a comparative study[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 343(1): 116-125.
- [15] CHEN Q Y, ZHOU X G, LIU Z Y, *et al.* Microstructure and properties of Ti microalloyed automobile frame steel 510L[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2018, 39(3): 339-344.
(陈其源, 周晓光, 刘振宇, 等. Ti 微合金化汽车大梁钢 510L 的组织性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 339-344.)
- [16] BHADESHIA H K D H, EDMONDS D V. The mechanism of bainite formation in steels[J]. Acta Metallurgica, 1980, 28(9): 1265-1273.

编辑 张继东

(上接第 174 页)

- [7] KARATZAS V A, KOTSIDIS E A, TSOUVALIS N G, *et al.* Experimental fatigue study of composite patch repaired steel plates with cracks[J]. Applied composite materials, 2015, 22(5): 507-523.
- [8] HAN L G, WU X M, CHEN G D, *et al.* Local dry underwater welding of 304 stainless steel based on a microdrain cover[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268: 47-53.
- [9] SHAO C L, XIAO J L, ZHU J L, *et al.* Research on surface repair technology of laser wire-filled cladding and verification on pressure environment[J]. Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology, 2021, 29(4): 14-18.
(邵长磊, 肖镌璐, 朱加雷, 等. 激光填丝熔覆表面修复工艺研究及压力环境验证[J]. 北京石油化工学院学报, 2021, 29(4): 14-18.)
- [10] SUN G, WANG Z, LU Y, *et al.* Underwater laser welding/cladding for high-performance repair of marine metal materials: A review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2022(1): 35.
- [11] MAKIHARA Y, MIWA Y, HIROSE N, *et al.* The application of the welding technique at fillet groove by the YAG-laser repair-welding robot for underwater environment[C]. 12th International Conference on Nuclear Engineering, 2004, 2, 149-155.
- [12] SRIDAR S, ZHAO Y, LI K, *et al.* Post-heat treatment design for high-strength low-alloy steels processed by laser powder bed fusion[J]. Materials Science & Engineering, A. 2020, 788: 139531.
- [13] RODRIGUES T A, DUARTE V R, TOMÁS D, *et al.* In-situ strengthening of a high strength low alloy steel during wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Additive Manufacturing, 2020, 34: 101200.

编辑 邓淑惠