

CMT 堆焊 15-5PH 工艺及组织性能研究

赖书斌¹, 刘浩然², 庞广超¹, 段清龙³, 赵旭晨², 郭龙龙^{2*}

(1.中海油能源发展装备技术有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057; 2.西安石油大学 机械工程学院, 西安 710065; 3.中石油长庆油田分公司 机械制造总厂, 西安 710021)

摘要: **目的** 针对冷金属过渡 (Cold Metal Transfer, CMT) 堆焊 15-5PH 工艺参数优化缺乏试验和数据指导的问题, 研究工艺参数对 15-5PH 堆焊层成形质量、微观组织、力学性能的影响规律。**方法** 以 CMT 的送丝速度、堆焊速度为变量开展单道堆焊试验, 厘清了送丝速度、堆焊速度对堆焊层成形质量的影响规律, 探明了工艺参数窗口; 在 CMT 工艺参数窗口内, 开展多道堆焊试验, 利用光学显微镜分析了堆焊层的微观组织, 通过拉伸试验、显微硬度试验测试了堆焊层的力学性能。**结果** 当堆焊速度恒定时, 随着送丝速度增加, 单焊道宽度增大、高度先升后降; 当送丝速度恒定时, 随堆焊速度的增加, 单焊道宽度、高度均降低; 随送丝速度的增加, 堆焊层表面波纹度和稀释率均先减小后增大。堆焊层主要由等轴马氏体、少量的柱状马氏体、铁素体和球状碳化物组成; 随送丝速度的增加, 晶粒尺寸逐渐增大, 堆焊层的抗拉强度逐渐增大, 显微硬度呈波动变化, 伸长率变化不明显。当送丝速度为 7 m/min、堆焊速度为 5 mm/s 时, 堆焊层具有良好的成形质量、较高的硬度、相对最优的拉伸性能。**结论** 探明了 CMT 工艺参数对成形质量、微观组织、力学性能的影响规律, 获得了成形质量、力学性能良好的堆焊层。研究成果为 CMT 堆焊 15-5PH 的形性调控提供试验和数据支撑。

关键词: CMT; 15-5PH; 堆焊; 微观组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2026.07.014

中图分类号: TG455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2026)07-0154-12

Process, Microstructure and Properties of 15-5PH Cladding Deposited using CMT

LAI Shubin¹, LIU Haoran², PANG Guangchao¹, DUAN Qinglong³, ZHAO Xuchen², GUO Longlong^{2*}

(1. CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd., Zhanjiang Branch, Guangdong Zhanjiang 524057, China; 2. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China; 3. Machinery Manufacturing Factory, CNPC Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to investigate the effect of process parameters on forming quality, microstructure, and mechanical properties of 15-5PH cladding layers to overcome the lack of experimental and data support for optimizing the cold metal trans-

收稿日期: 2026-03-27

Received: 2026-03-27

基金项目: 中海油能源发展装备技术公司科技攻关项目 (202515893886); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2025JC-YBMS-545); 石油天然气装备教育部重点实验室开放基金 (OGE202302-11); 西安市科技计划 (23GXFW0076)

Fund: Science and Technology Key Project of CNOOC Energy Development Equipment Technology Co., Ltd. (202515893886); Natural Science Basic Research Plan of Shaanxi Province (2025JC-YBMS-545); Open Fund of Key Laboratory of Petroleum and Natural Gas Equipment, Ministry of Education (OGE202302-11); Xi'an Science and Technology Plan Project (23GXFW0076)

引文格式: 赖书斌, 刘浩然, 庞广超, 等. CMT 堆焊 15-5PH 工艺及组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2026, 18(7): 154-165. LAI Shubin, LIU Haoran, PANG Guangchao, et al. Process, Microstructure and Properties of 15-5PH Cladding Deposited using CMT[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(7): 154-165.

*通信作者 (Corresponding author)

fer (CMT) process parameters for 15-5PH cladding. Firstly, single-pass cladding experiments were conducted with wire feed speed and welding speed as variables to clarify the effect of these parameters on forming quality and determine the optimal process parameter window. Within parameters window, multi-pass cladding experiments were performed. Then, microstructure of the cladding layer was analyzed by optical microscopy, and mechanical properties were evaluated through tensile testing and microhardness testing. At a constant welding speed, increasing the wire feed speed resulted in an increase in weld width, with height initially rising and then decreasing. At a constant wire feed speed, increasing the welding speed reduced both weld width and height. As the wire feed speed increased, the surface waviness and dilution rate of the cladding layer first decreased and then increased. The cladding layer primarily consisted of equiaxed martensite, a small amount of columnar martensite, ferrite and spherical carbides. Moreover, with increasing wire feed speed, the grain size gradually increased, the tensile strength of the cladding layer increased gradually, the microhardness showed a fluctuating change, and the elongation changed insignificantly. At a wire feed speed of 7 m/min and a welding speed of 5 mm/s, the cladding layer exhibited excellent forming quality, high hardness, and optimal tensile properties. The effect of CMT process parameters on forming quality, microstructure and mechanical properties is clarified, and high-performance cladding layers with sound forming are successfully prepared. The outcomes provide experimental reference and theoretical data for the shape-performance control of CMT cladding for 15-5PH.

KEY WORDS: CMT; 15-5PH; cladding; microstructure; mechanical properties

AISI 4130 钢是以 Cr、Mo 为主要强化元素的中碳合金钢,具有较高的强度、冲击韧性与优良的塑性,在井控阀门、防喷器、采油树、泥浆泵等油气关键装备的承压壳体制造中被广泛应用^[1,2]。这些装备服役工况恶劣、介质条件复杂多变,其内流动的高压流体通常具有腐蚀性,导致这类装备与流体接触表面易发生腐蚀^[3-5]。目前,改善上述装备耐腐蚀性能的常用方法是采用热丝 TIG 在过流壁面堆焊 Inconel 625 合金,但是热丝 TIG 的热输入相对较高,为满足堆焊层的耐腐蚀性能,至少需要堆焊 2 层,导致 Inconel 625 焊丝消耗多、设备占用时间长,因此生产成本极高^[6-10]。此外,对于腐蚀性较弱的工况,选用堆焊 Inconel 625 的装备成本较高。因此,有必要在 AISI 4130 钢表面制备合理的堆焊层,从而改善其耐腐蚀性能、降低成本。

15-5PH 不锈钢是在 17-4PH 不锈钢基础上调节 Cr、Ni 配比开发的沉淀硬化不锈钢, Cr、Ni 等元素促使其耐腐蚀性能达到 304 不锈钢的水平,在含氯离子、压裂介质环境中,使用寿命可达传统合金钢的 3~4 倍; Si、Cr 等合金元素显著提高了其硬度和耐磨性,其屈服强度达 1 205 MPa、断面收缩率为 55%、维氏硬度达 348HV^[11-12]。15-5PH 不锈钢含碳量较低,具有良好的焊接性,焊接过程无需预热和保温。而且,其材料成本显著低于 Inconel 625^[13-15]。当前, 15-5PH 作为重要的堆焊层材料,被用于堆焊在高强度合金结构钢、石油装备关键部件表面,能够满足高压、腐蚀、冲蚀等工况的服役要求^[16-19]。因此,尝试以 15-5PH 为填充焊丝,在 AISI 4130 钢表面制备 15-5PH 堆焊层。

国内外学者针对 15-5PH 的堆焊工艺、微观组织与力学性能已开展了研究。杜彦斌等^[20]利用激光熔覆技术在 17-4PH 表面制备 15-5PH 熔覆层,并对熔覆层的物相、显微组织进行分析,结果表明,熔覆层与

基体熔合区组织为平面晶,底部及中部以柱状晶为主,顶部由柱状晶和少量等轴晶组成;熔覆层主要由 Fe-Cr、马氏体和 α -Fe 构成。吴梦园等^[21]采用激光定向能量沉积工艺在 Q235 板上制备 15-5PH 熔覆层,研究指出,熔覆层由马氏体和少量奥氏体组成;沿沉积方向,晶粒形貌主要为外延生长的柱状晶;由于经历了长时间的热量累积,中部区域与顶部和底部相比组织较为粗大。杜彦斌等^[22]在 20Cr13 表面采用激光熔覆技术制备 15-5PH 熔覆层,结果表明,熔覆层由等轴晶、柱状晶颗粒状 NbC、 ϵ -Cu 组成,熔覆层的显微硬度约为基材的 2.4 倍。刘正武等^[23]利用激光熔化沉积技术制备 15-5PH 熔覆层,研究表明,焊态组织主要是向外延生长的柱状晶,且柱状晶内部含有胞状树枝晶;熔覆层纵向抗拉强度和伸长率分别为 1 128.5 MPa 和 14.0%。Chen 等^[24]采用激光熔覆技术在 17-4PH 表面制备了 15-5PH 熔覆层,研究表明,熔覆层主要由 α 相和 γ 相组成,且存在大量较大、不规则的黑色碳化物。Du 等^[25]采用激光熔覆技术在 20CrMnTi 表面制备 Cr₃C₂/15-5PH 熔覆层,结果表明,优化后的复合涂层稀释率降低了 9.38%,显微硬度提升了 4.35%。Du 等^[26]采用激光熔覆技术在 17-4PH 表面制备了 TiC/15-5PH 熔覆层,研究表明,复合涂层枝晶组织由底部至顶部逐渐细化,熔覆层显微硬度可达 445HV,相较于 17-4PH 不锈钢提升至 1.2 倍。Zhang 等^[27]以低碳 15-5PH 为熔覆材料,在 U75V 表面采用激光熔覆技术制备强化熔覆层,结果表明,稀释率约 48%的熔覆涂层显微硬度达 490HV,元素稀释引入的碳含量升高,诱导马氏体硬化与碳化物析出。郭龙龙等^[19]采用冷金属过渡 (Cold Metal Transfer, CMT) 技术在 30CrMo 板上堆焊 15-5PH,探究了工艺参数对单焊缝成形情况的影响,研究表明,微观组织主要由板条状的马氏体和奥氏体组成,奥氏体结构由等轴

状多边形晶粒组成。综上所述,现有研究主要采用激光熔覆技术制备 15-5PH 熔覆层,研究内容聚焦于 15-5PH 熔覆层的微观组织、力学性能及耐腐蚀性能。然而,激光熔覆设备投资、维护费用较高,激光器尺寸较大,无法用于小尺寸孔壁堆焊^[28-29]。

CMT 技术是以熔化极气体保护焊为基础,将焊丝送进与熔滴过渡进行数字化协同控制研发的新焊接技术。CMT 焊接过程包括:电弧引燃加热焊丝形成熔滴;熔滴接触熔池后电弧熄灭、电流骤降,与此同时,焊丝回抽加速熔滴脱落;待熔池冷却后,焊丝前端重新引弧,整个“冷-热”循环过程重复进行,直至停止焊接^[30-32]。相较于传统的电弧堆焊,CMT 具有效率高、热输入低、无飞溅、焊枪可达性好以及工艺稳定性强等优点,特别是热输入量的大幅降低,减小了变形量、减轻了组织粗大和成分偏析,有利于保证构件的尺寸精度和力学性能^[33-36]。目前,CMT 已被广泛用于镍铬铁基合金(Inconel 625)^[37]、奥氏体不锈钢(AISI 316L)^[38]、铝合金(5083、2A12)^[39-40]等材料的堆焊。然而,鲜有关于 CMT 堆焊 15-5PH 的公开研究报道。

本文选用油气装备制造常用材料 AISI 4130 为基体,15-5PH 焊丝为堆焊填充材料,以 CMT 的堆焊速度、送丝速度为变量开展单道焊试验,探明工艺参数对焊缝成形的影响规律、工艺参数窗口;基于优选的工艺参数,开展多道堆焊试验,探究工艺参数对堆焊层成形质量、微观组织、力学性能的影响规律。研究为 CMT 堆焊 15-5PH 的工艺参数设计、形性调控提供试验和数据支撑。

1 试验材料及方法

母材为调质态 AISI 4130 钢板,尺寸为 $\phi 250\text{ mm}\times 18\text{ mm}$,待堆焊表面铣削至 $Ra3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。试验用焊丝牌号为 GMS-630(15-5PH),直径为 1.2 mm。焊丝和母材的化学成分见表 1。

堆焊试验采用的设备为 Fronius 的 CMT 焊接系统,其由焊接电源、送丝机、六自由度机器人、焊枪等构成,见图 1。其中,通过送丝机控制送丝速度(v_f),通过六自由度机器人控制堆焊速度(v_c)和路径。CMT 焊接系统的可调变量为 v_f 和 v_c ,焊接电流(I)、电压(U)由 CMT 焊接系统根据设定的 v_f 和 v_c 自动匹配。堆焊过程中 80%(体积分数)Ar+20%CO₂ 的混合气为保护气体,总流量为 18 L/min。

首先,以 v_f 、 v_c 为变量开展单道堆焊试验,参数

组合见表 2;以单焊道的宽度(W)、高度(H)、稀释率(ε)为成形质量评价指标(见图 2),探明工艺参数窗口。稀释率的具体计算公式为^[41]:

$$\varepsilon = \frac{A_w}{A + A_w} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_w 为熔合区的面积; A 为堆焊层的面积。

在工艺参数窗口内,选择成形质量良好的参数组中的 v_c 且维持不变,微调 v_f ,开展 4 组多道堆焊试验。在堆焊试验中,相邻焊道间温度小于 200 ℃,搭接率为 40%,堆焊结束后,空冷至室温。以波纹度(W_a)、稀释率(ε)为指标评价堆焊层的成形质量,结果见表 3。利用线切割法切制试样制备金相试样、拉伸试样等。其中,金相试样尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm,按照标准流程打磨、抛光待腐蚀表面,利用 FeCl₃(5 mL)+HCl(50 mL)+H₂O(100 mL)混合溶液腐蚀 3 s;采用 Advance-D8 型 X 射线衍射仪进行物相分析,扫描速度为 5 (°)/min,扫描角度为 20°~90°。采用 ZEISS 光学显微镜观察微观组织。采用 JSM-IT800 扫描电镜观察马氏体的不同形态及析出物,并利用能谱仪进行化学成分测试。采用 ImageJ 软件,依据 GB/T 6394—2017,基于截线法测定光学显微组织的平均晶粒尺寸。利用 AG-IC100kN 型万能试验机开展室温拉伸试验,应变速率为 1 mm/min。采用维氏硬度法测量试样的硬度值,载荷为 200 g,加载保持时间为 20 s。

2 结果与分析

2.1 单焊道成形质量

单焊道的宏观形貌见图 3 和图 4。可见,各组试验所得单道焊均连续平滑,沿长度方向各横截面轮廓均匀,且无宏观缺陷;横截面由堆焊层、热影响区、母材 3 个区域构成,堆焊层与母材间形成了良好的冶金熔合,未见气孔、夹渣、裂纹、未熔合等缺陷。这表明试验设计的 v_f 、 v_c 的取值范围比较合理。此外,不同工艺参数组合所得焊道的几何形态以及与母材的熔合区大小有显著差异,表明工艺参数对焊缝的宏观成形有显著影响。

v_f 、 v_c 对单道焊 W 、 H 、 ε 的影响见图 5。可见,当 v_f 相同时,随 v_c 的增加, W 逐渐降低;而当 v_c 相同时,随 v_f 的增加, W 显著增大,见图 5a。由图 5b 可见,当 v_f 相同时,随 v_c 的增加, H 逐渐降低;当 v_c 相同时,随 v_f 的增加, H 先增大后减小。由图 5c

表 1 母材与焊丝的化学成分
Tab.1 Chemical compositions of substrate and filler wire

Materials	C	Mn	Si	Cr	P	S	Ni	Cu	Fe
AISI 4130	0.29	0.51	0.2	0.99	0.02	0.016	0.02	0.02	Bal
15-5PH	0.04	0.7	0.5	15.8	0.02	0.005	4.9	3.8	Bal



图 1 CMT 自动焊接系统
Fig.1 CMT automatic welding system

表 2 单道堆焊试验参数
Tab.2 Single-pass cladding parameters

No	$v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$v_c/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	U/V	I/A	H/mm	W/mm	$\varepsilon/\%$
1	6	4	14.2	171	3.75	9.48	16.7
2	7	4	14.8	193	3.86	10.33	17.4
3	8	4	15.4	213	3.92	11.63	18.6
4	9	4	16.2	237	3.85	12.94	19.7
5	6	5	14.1	171	3.51	9.18	16.1
6	7	5	14.7	192	3.57	10.05	17.2
7	8	5	15.4	214	3.73	10.69	18.1
8	9	5	16.3	238	3.63	11.87	18.8
9	6	6	13.8	171	3.19	8.23	15.3
10	7	6	14.6	192	3.25	8.97	15.9
11	8	6	15.5	215	3.35	9.75	16.7
12	9	6	16.2	238	3.19	11.2	18.0
13	6	7	14.2	173	2.95	7.93	14.5
14	7	7	14.4	193	3.03	8.47	15.1
15	8	7	15.1	214	3.17	9.18	16.3
16	9	7	16.1	238	3.08	10.12	17.5

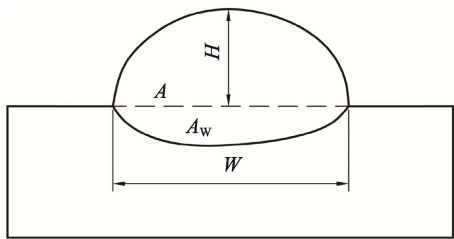


图 2 焊缝几何参数示意图
Fig.2 Schematic of weld geometry parameters

可知, 当 v_f 相同时, 随 v_c 的增加, ε 逐渐降低; 而当 v_c 相同时, 随 v_f 的增加, ε 显著增大。当 v_f 相同时, v_c 的增加导致线能量减少, 熔池的温度降低, 流动性能随之变差; 同时, v_c 的增大导致熔覆到单位长度的金属减少; 因此在金属流动性降低和熔覆金属量减少的共同作用下, W 、 H 、 ε 均逐渐变小。此外, 当 v_c 相同时, 随 v_f 的增加, 更多熔化焊丝进入熔池, 熔池的流动、铺展促使 W 、 H 、 ε 增加; 但是随着 v_f 的进一步增加, U 和 I 显著增加, 导致线能量和电磁力、电弧压力等熔池驱动力促进了熔池的流动和铺展, 因此, W 、 ε 持续增加, 而 H 减小。

2.2 堆焊层的成形质量

在 v_c 为 5 mm/s, v_f 为 6、7、8、9 m/min 条件下分别开展多道堆焊试验, 堆焊层的宏观形貌见图 6。可见, 各堆焊层与母材之间均展现出良好的冶金结合效果, 焊缝之间熔合良好, 焊缝表面均无明显焊接缺陷。这表明试验所设计的参数组合是合理的, 能够得到成形质量良好的堆焊层。

v_c 为 5 mm/s, v_f 分别为 6、7、8、9 m/min 条件下所得堆焊层的成形质量见图 7。可见, 随着 v_f 的增加, W_a 、 ε 先减小后增大。当 v_f 为 7 m/min 时, W_a 、 ε 均为最小, 其值分别为 0.3 mm、15.4%; 当 v_f 为 9 m/min 时, W_a 、 ε 均为最大, 分别为 0.5 mm 和 25%。因此, 当 v_f 为 7 m/min 时, 堆焊层具有相对最优的成形质量。

2.3 堆焊层的微观组织

v_c 为 5 mm/s、 v_f 为 7 m/min 条件下所得 15-5PH 堆焊层的 XRD 图谱见图 8。可见, 堆焊层在 $2\theta=45.42^\circ$ 、 65.71° 、 82.88° 处出现强峰, 其对应 α -Fe (JCPDS 52-0513) 的衍射峰; 在 $2\theta=44.44^\circ$ 、 51.61° 附近出现较强峰, 这与 γ -Fe (JCPDS 54-0331) 的衍射峰吻合。这表明堆焊层由马氏体、铁素体组成, 其中马氏体为主要物相。XRD 图谱中没有 Nb 或 ε -Cu 析出相的衍射峰, 这是因为 XRD 无法检测到质量分数低于 5% 的物相^[42]。

v_c 为 5 mm/s, v_f 为 6、7、8、9 m/min 条件下所得堆焊层的微观组织见图 9。可见, 堆焊层微观组织分布以等轴马氏体及柱状马氏体为主, 且不同堆焊参数下的马氏体晶粒尺寸存在差异; 此外, 等轴马氏体

表 3 多道堆焊试验参数
Tab.3 Experimental parameters of multi-pass cladding

No	$v_f/(\text{m}\cdot\text{min}^{-1})$	$v_c/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Overlap width/mm	U/V	I/A	Line heat input/($\text{J}\cdot\text{mm}^{-1}$)
1	6	5	4.94	14.4	173	499.24
2	7	5	5.38	15.1	194	585.88
3	8	5	5.85	15.8	214	676.24
4	9	5	6.72	16.4	233	764.24

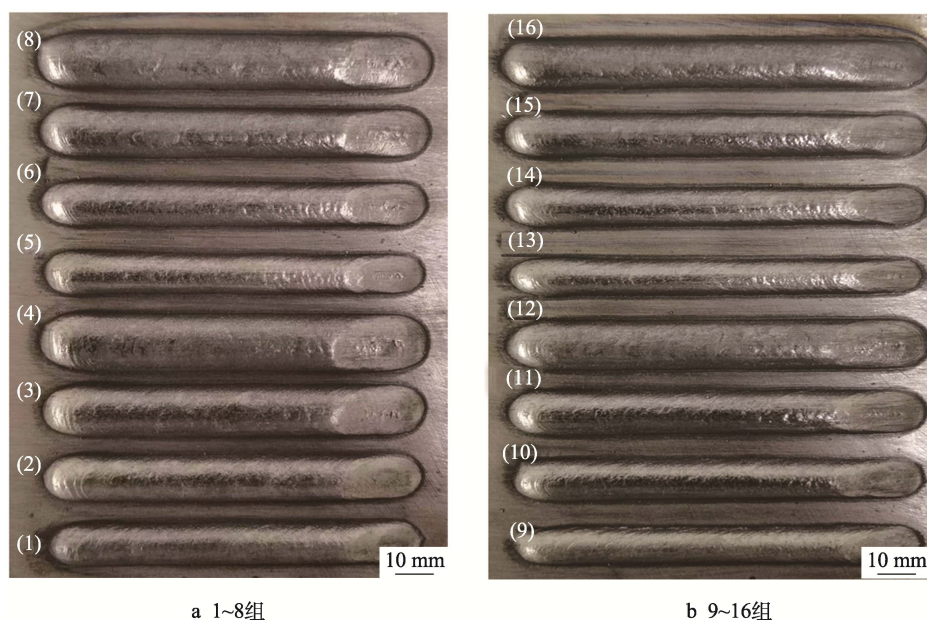


图3 单道堆焊层宏观形貌
Fig.3 Macro morphology of single-pass surfacing layer: a) Groups 1-8; b) Groups 9-16

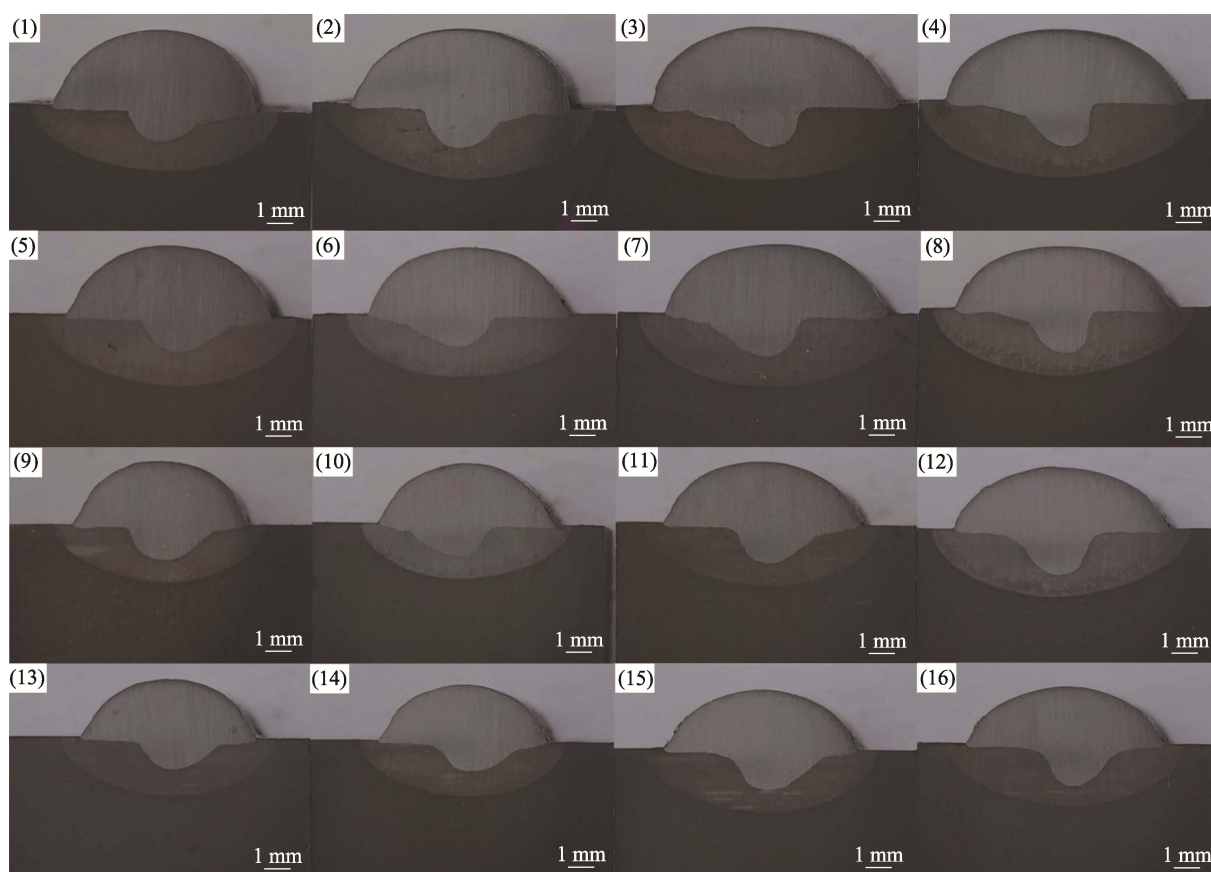


图4 单道堆焊层横截面形貌
Fig.4 Cross-sectional morphology of single-pass surfacing layer

和柱状马氏体之间分布着条状铁素体,等轴马氏体之间分布着板条状和块状铁素体。随 v_f 增加,等轴马氏体尺寸逐渐增大。这是因为随着 v_f 增大, U 和 I 均增加、热输入增加,导致熔池的冷却速率降低,晶粒生

长时间更加充分,晶粒尺寸逐渐增大。

v_c 为5 mm/s, v_f 为6、7、8、9 m/min条件下所得堆焊层的平均晶粒尺寸及等效晶粒直径分布如图10所示。可见,在不同送丝速度下,15-5PH不锈钢

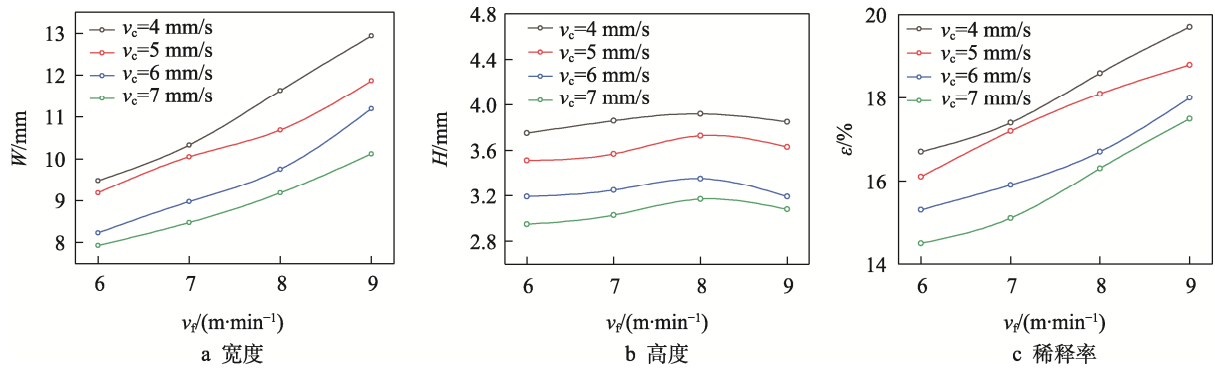


图 5 工艺参数对单道焊缝成形质量的影响
Fig.5 Effect of process parameters on formation of single-pass weld: a) width; b) height; c) dilution

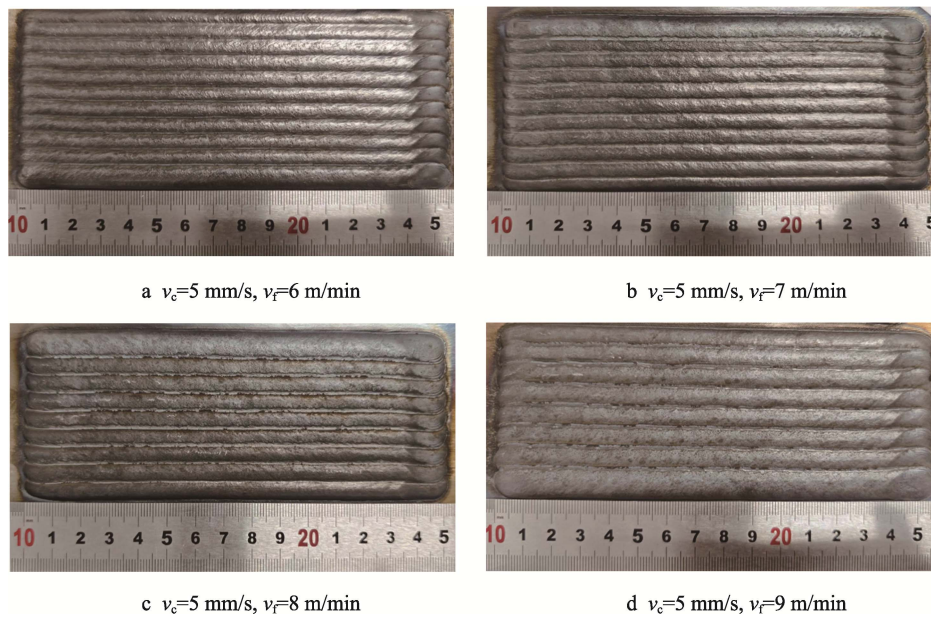


图 6 堆焊层宏观形貌
Fig.6 Macroscopic morphology of cladding layer

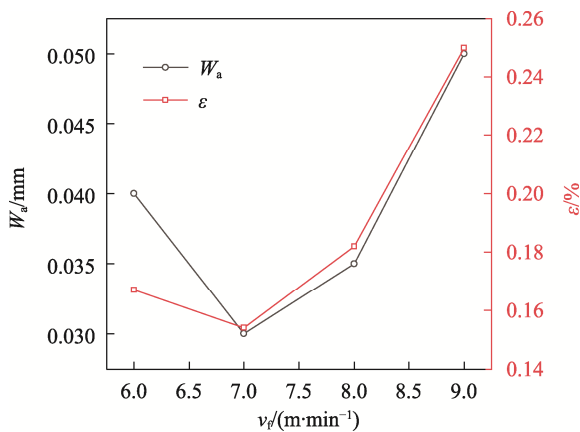


图 7 堆焊层成形质量
Fig.7 Formation quality of cladding layer

堆焊层等效晶粒直径呈现单峰分布特征, 集中于 5~15 μm 区间。随送丝速度的增加, 堆焊层平均晶粒尺寸由 10.34 μm 逐步粗化至 14.56 μm , 晶粒尺寸分布宽度增加, 大尺寸晶粒占比增加, 这表明微观组织

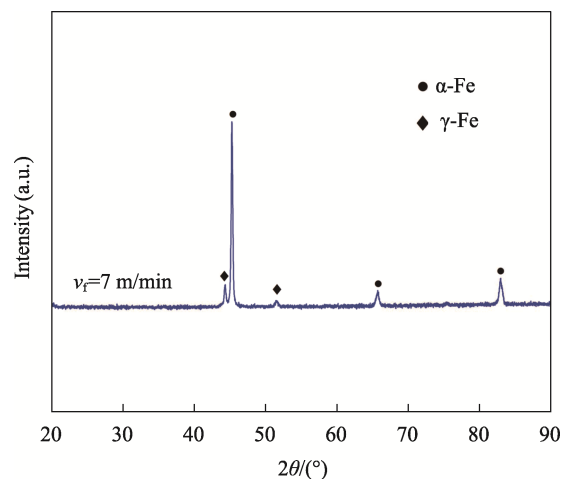


图 8 $v_c=5 \text{ mm/s}$, $v_f=7 \text{ m/min}$ 堆焊层的 XRD 图谱
Fig.8 XRD pattern of cladding layer at $v_c=5 \text{ mm/s}$, $v_f=7 \text{ m/min}$

均匀性随送丝速度提高下降。

v_c 为 5 mm/s 、 v_f 为 7 m/min 条件下的 SEM 如图

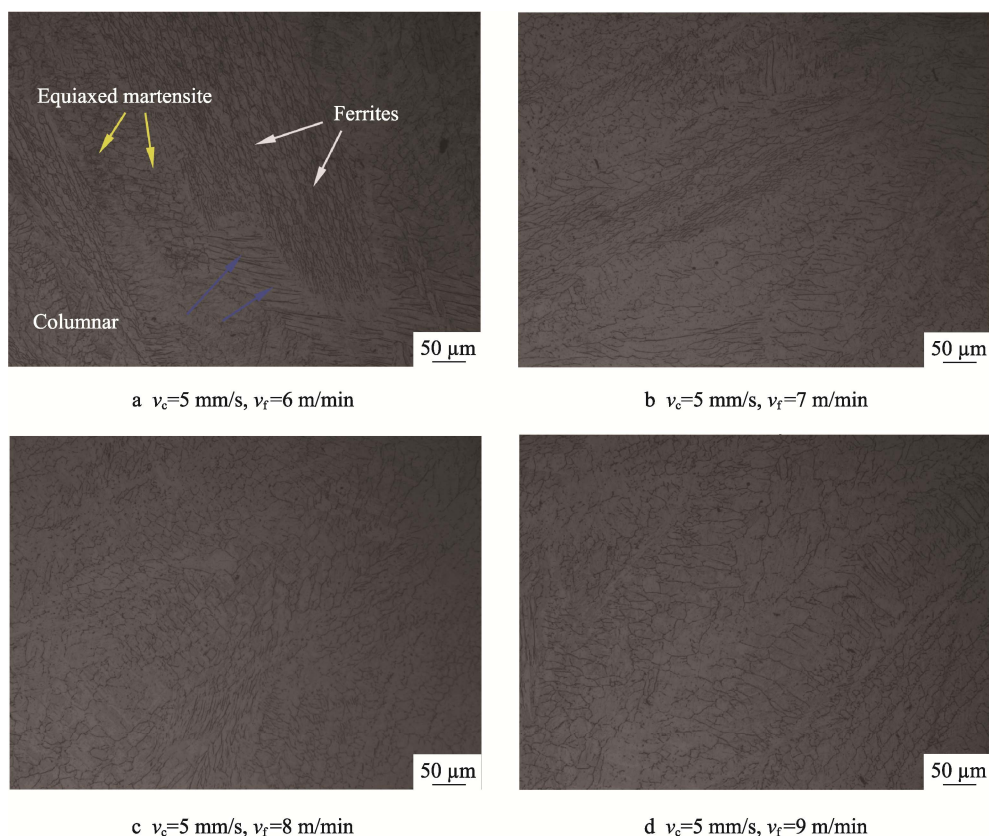


图 9 堆焊层的微观组织
Fig.9 Microstructure of lading layer

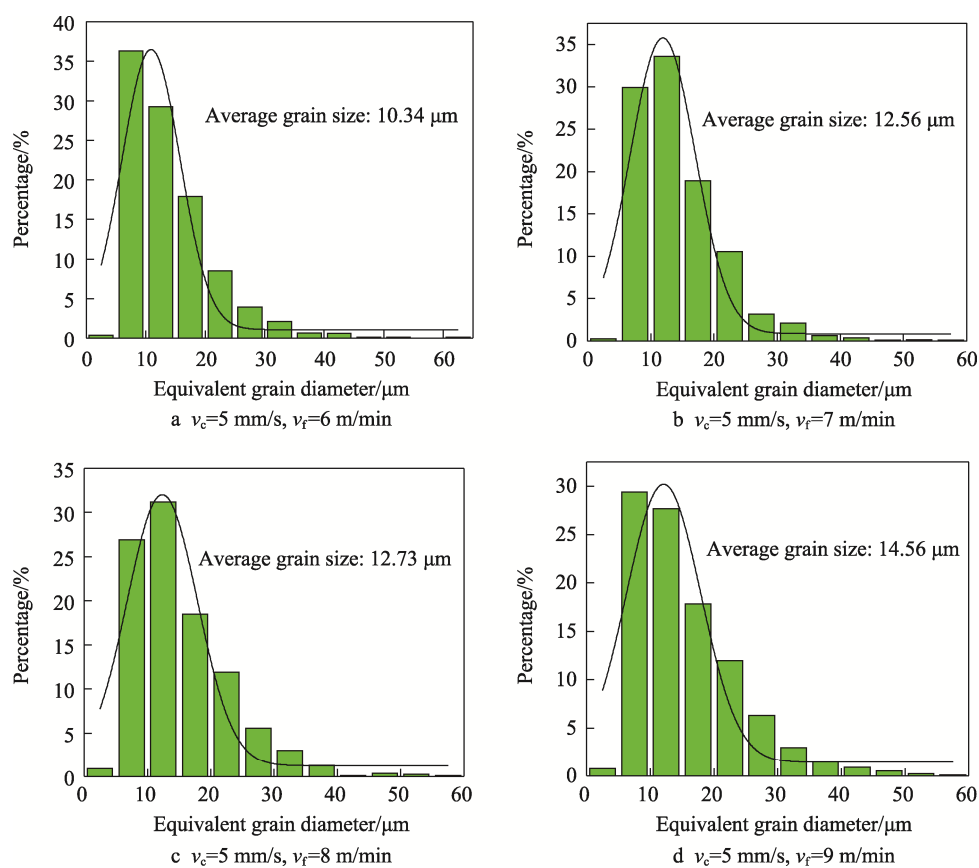


图 10 堆焊层等效晶粒直径分布
Fig.10 Equivalent grain diameter distribution of cladding layer

11 所示。可见, 马氏体晶界上分布着白色条状析出相 (LSP), 而马氏体基体上分布着一些球状析出相和弥散分布的颗粒, 其成分见图 12。其中, 球状析出物主要成分为 Fe、Cr 和 C (质量分数: Fe 56.4%、C 20.5%、Cr 13.4%), C 元素显著富集; 白色条状析出物主要成分为 Fe、Cr、Ni 和 Cu (质量分数: Fe 75.0%、Cr 15.7%、Ni 4.9%、Cu 4.1%), Ni、Cu 等奥氏体稳定化元素富集。根据析出物的形状和成分特征, 推断球状析出物为富 Cr 碳化物, 白色条状析出物为逆转变奥氏体, 弥散分布的颗粒为 ϵ -Cu 相。该特征与 Zhou 等^[43]的研究相似。

2.4 堆焊层的力学性能

2.4.1 拉伸性能

v_c 为 5 mm/s, v_f 为 6、7、8、9 m/min 条件下所得堆焊层的拉伸性能见图 13。可见, 堆焊层均具有较好的力学性能, v_f 对力学性能有影响。当 v_f 为 8 m/min 时, 堆焊层的力学性能较差, 屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为 867 MPa、1 217 MPa、5.8%; 当 v_f 为 7 m/min 时, 堆焊层的力学性能最好, 屈服强度、抗拉强度、伸长率为 911 MPa、1 227 MPa、7.0%。结合晶粒尺寸分析可知, 在 10.34~14.56 μm 的晶粒尺

寸范围内, 堆焊层屈服强度与抗拉强度保持稳定, 仅在最大送丝速度下抗拉强度略有提升; 伸长率则在晶粒尺寸为 12.56 μm 时达到峰值, 晶粒进一步粗化后呈下降趋势。因此, 在 10.34~14.56 μm 晶粒尺寸范围内, 晶粒变化对强度影响较弱; 适度晶粒粗化有利于提升塑性, 而过度粗化会导致塑性下降。这是因为, 晶界可协调变形并阻碍位错运动, 晶粒尺寸过细会限制变形协调性, 过度粗化会导致晶界面积、错位运动的阻力减小, 最终使塑性降低^[44]。

2.4.2 显微硬度

v_c 为 5 mm/s, v_f 为 6、7、8、9 m/min 条件下所得堆焊层的显微硬度见图 14。可见, 随着送丝速度的增加, 平均硬度呈先升高、后降低、再升高的波动变化。当 v_f 由 6 m/min 增大至 7 m/min 时, 对应的线能量由 499.24 J/mm 增加到 585.5 J/mm (见表 3), 线能量增加促进强化相析出, 导致硬度略微增加; 当 v_f 为 8 m/min 时, 线能量持续增加, 析出相的形成导致堆焊层基体中元素固溶强化作用降低, 对堆焊层的影响显著降低; 当 v_f 为 9 m/min 时, 电流显著增加导致熔池驱动力增加, 促使析出相破碎, ϵ -Cu 相、富 Cr 碳化物的弥散强化增加, 堆焊层硬度有微小增加^[45-46]。

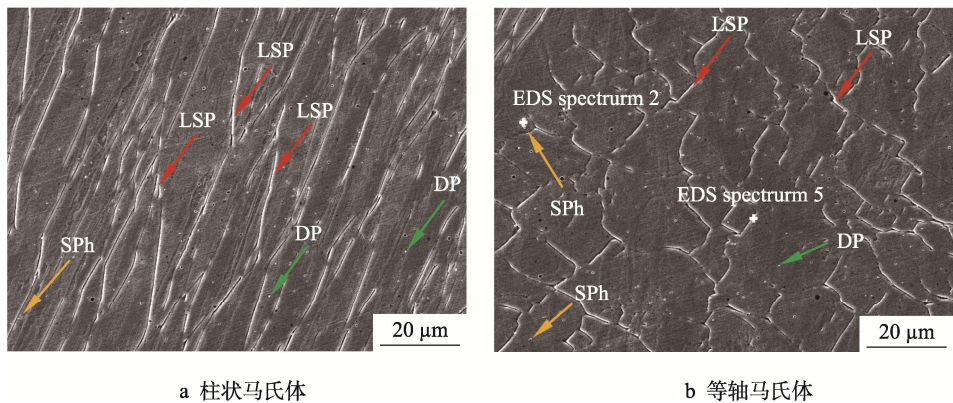


图 11 $v_c=5\text{ mm/s}$, $v_f=7\text{ m/min}$ 堆焊层 SEM 形貌
Fig.11 SEM morphologies of cladding layer at $v_c=5\text{ mm/s}$, $v_f=7\text{ m/min}$: a) columnar martensite; b) equiaxed martensite

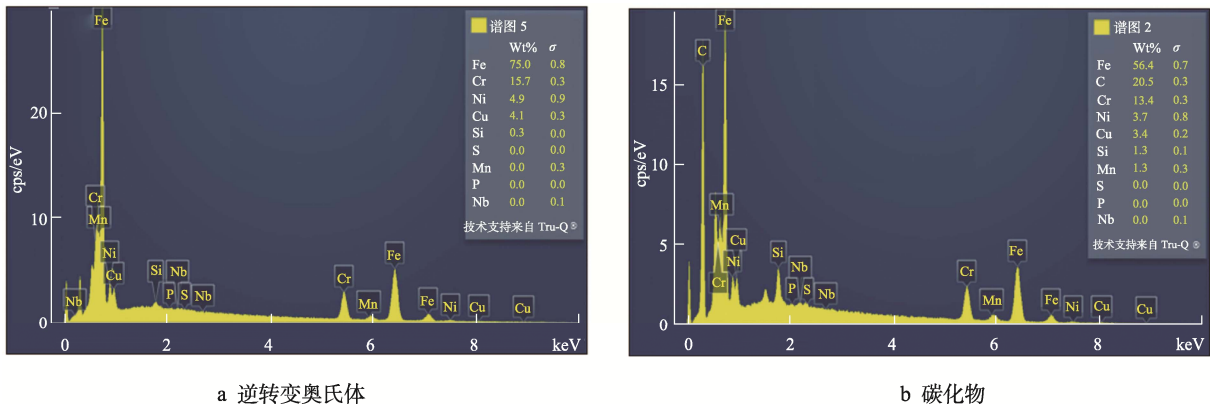


图 12 $v_c=5\text{ mm/s}$, $v_f=7\text{ m/min}$ 堆焊层析出相的 EDS
Fig.12 EDS analysis of precipitates in cladding layer at $v_c=5\text{ mm/s}$, $v_f=7\text{ m/min}$: a) reverted austenite; b) carbide

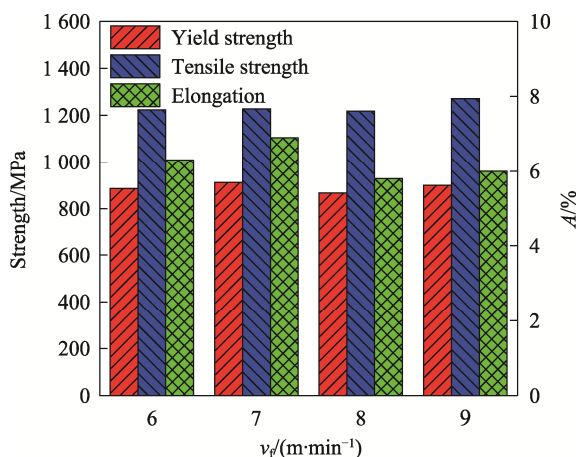


图 13 堆焊层的拉伸力学性能

Fig.13 Tensile mechanical properties of cladding layer

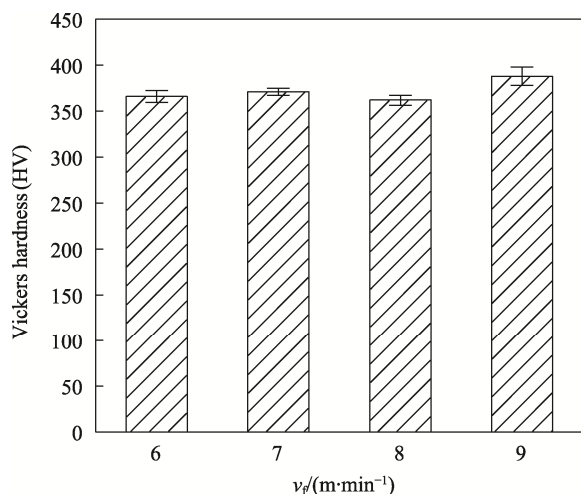


图 14 堆焊层的平均显微硬度

Fig.14 Average microhardness of cladding layer

3 结论

针对 CMT 堆焊 15-5PH 工艺参数优化缺乏试验和数据的问题,建立了 CMT 堆焊工艺-微观组织-力学性能的内在映射关系,主要结论如下:

1) 当堆焊速度恒定时,随着送丝速度的增加,单焊道宽度逐渐增加、高度先增加后减少;当送丝速度恒定时,随着堆焊速度增加,单焊道宽度、高度逐渐降低;当堆焊速度为 5 mm/s,送丝速度为 7 m/min、8 m/min 时,焊缝成形质量较好。

2) 当堆焊速度恒定时,随着送丝速度增加,堆焊层表面波纹度和稀释率先减小后增加,当送丝速度为 7 m/min 时,表面波纹度和稀释率分别为 0.03 mm、15.4%,堆焊层具有良好的成形效果。

3) 在多道焊中,堆焊层组织以等轴马氏体及少量的柱状马氏体为主,马氏体之间分布着铁素体,且晶粒尺寸细小;随着送丝速度增加,冷却速度加快,导致形核率较高,等轴马氏体晶粒尺寸逐渐增大,但

晶粒变化对强度影响较弱。

4) 随着送丝速度增加,堆焊层的抗拉强度逐渐增大,显微硬度呈波动变化,伸长率变化不明显;当堆焊速度为 5 mm/s、送丝速度为 7 m/min 时,堆焊层具有较好的力学性能,其屈服强度、抗拉强度、伸长率分别为 911 MPa、1 227 MPa、7.0%。

参考文献:

- [1] 王葛,刘胜强,郭伟,等. 30CrMo钢Q-P-T及深冷处理后的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(4): 83-91.
WANG G, LIU S Q, GUO W, et al. Microstructure and Properties of 30CrMo Steel after Q-P-T and Cryogenic Treatment[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(4): 83-91.
- [2] FU Z X, YANG G W, XU Y W, et al. Continuous Cooling Transformation Behaviour of 30CrMo Steel Simulated by CSP Process[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2021, 48(9): 1094-1101.
- [3] 祁庆花,刘佳,曹琨,等. AISI8630钢泥浆泵排出缸失效分析及工艺改进[J]. 锻压技术, 2020, 45(3): 185-189.
QI Q H, LIU J, CAO K, et al. Failure Analysis and Process Improvement on Discharge Tank of Slurry Pump for AISI8630 Steel[J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45(3): 185-189.
- [4] 吕浩. 钻井泥浆泵液缸开裂失效分析[J]. 热加工工艺, 2019, 48(7): 255-258.
LYU H. Cracking Failure Analysis of Hydraulic Cylinder in Drilling Mud Pump[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(7): 255-258.
- [5] 柯珂,胡志强,王磊,等. 极地油气钻井关键技术与装备研究进展[J]. 天然气工业, 2025, 45(8): 115-128.
KE K, HU Z Q, WANG L, et al. Research Progress on Key Technologies and Equipment for Arctic Oil and Gas Drilling[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(8): 115-128.
- [6] 郭龙龙,郑华林,刘少胡,等. 热丝脉冲TIG堆焊Inconel 625成型质量优化与耐腐蚀性能研究(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2219-2226.
GUO L L, ZHENG H L, LIU S H, et al. Formation Quality Optimization and Corrosion Performance of Inconel 625 Weld Overlay Using Hot Wire Pulsed TIG[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2219-2226.
- [7] 郭龙龙,郑华林,李悦钦,等. 热丝脉冲TIG堆焊Inconel 625的组织及性能[J]. 中国表面工程, 2016, 29(2): 77-84.
GUO L L, ZHENG H L, LI Y Q, et al. Microstructure and Performance of Inconel 625 Cladding Deposited by Hot Wire Pulsed TIG[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(2): 77-84.

- [8] 郭龙龙, 郑华林, 符运豪, 等. 热丝 TIG 堆焊 Inconel625 工艺参数优化及组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(23): 227-230.
- GUO L L, ZHENG H L, FU Y H, et al. Processing Parameters Optimization of Hot-Wire TIG Cladding Inconel625 and Reseach of Microstructure and Properties[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(23): 227-230.
- [9] 郭龙龙, 郑华林, 刘振平, 等. 考虑重合率的热丝 TIG 堆焊 Inconel625 成形质量研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(21): 230-233.
- GUO L L, ZHENG H L, LIU Z P, et al. Investigation on Formation Quality of Overlay Beads Inconel625 Considering Overlap Ratio by Using Hot-Wire TIG[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(21): 230-233.
- [10] 韩涛, 朱丽娜, 韩来慧, 等. 30CrMo 钢表面堆焊 Inconel 625 合金工艺及组织性能[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(6): 234-240.
- HAN T, ZHU L N, HAN L H, et al. Process and Microstructure Properties of 30CrMo Steel Surfacing with Inconel 625 Alloy[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2025, 49(6): 234-240.
- [11] 曹安港, 宗浩, 刘欣欣, 等. 15-5PH 不锈钢紧固件在高海水盐雾环境中的应用[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(7): 84-89.
- CAO A G, ZONG H, LIU X X, et al. Application of 15-5PH Stainless Steel Fasteners in High Seawater Salt Fog Environment[J]. Corrosion and Protection, 2024, 45(7): 84-89.
- [12] 郭龙龙, 刘浩然, 张杰, 等. 热处理对 CMT 再制造 15-5PH 组织及力学性能的影响[J]. 精密成形工程, 2026, 18(3): 165-172.
- GUO L L, LIU H R, ZHANG J, et al. Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of 15-5PH Remanufactured by CMT[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2026, 18(3): 165-172.
- [13] 冯万喜, 王子荣, 田明旭, 等. 15-5PH 沉淀硬化不锈钢三通半管等温热成形工艺[J]. 锻压技术, 2024, 49(9): 50-56.
- FENG W X, WANG Z R, TIAN M X, et al. Isothermal Forming Process for 15-5PH Precipitation-Hardening Stainless Steel Three-Way Half Pipe[J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49(9): 50-56.
- [14] 孟美情, 韩俭, 朱瀚钊, 等. 基于多丝电弧增材制造研究现状[J]. 材料工程, 2025, 53(5): 46-62.
- MENG M Q, HAN J, ZHU H Z, et al. Research Status of Arc Additive Manufacturing Based on Multi-Wire[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(5): 46-62.
- [15] 赵子锐, 段绪星, 陈青, 等. 镍基合金激光熔覆研究进展及其在反应堆的应用展望[J]. 激光杂志, 2025, 46(2): 1-9.
- ZHAO Z R, DUAN X X, CHEN Q, et al. Progress of Laser Cladding Research on Nickel-Based Alloys and Its Prospective Application in Reactors[J]. Laser Journal, 2025, 46(2): 1-9.
- [16] 邱波, 刘桐语, 程飞, 等. 15-5PH 沉淀硬化不锈钢的塑性本构建模[J]. 工具技术, 2022, 56(10): 92-97.
- QIU B, LIU T Y, CHENG F, et al. On Constitutive Mold of 15-5PH Precipitate Hardened Stainless Steel[J]. Tool Engineering, 2022, 56(10): 92-97.
- [17] 张志强, 程宗辉, 范鑫, 等. 激光增材修复 15-5PH 不锈钢的组织及力学性能[J]. 应用激光, 2022, 42(4): 80-88.
- ZHANG Z Q, CHENG Z H, FAN X, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 15-5PH Stainless Steel Repaired by Laser Additive Process[J]. Applied Laser, 2022, 42(4): 80-88.
- [18] WANG M X, WU Z X, HE J Y, et al. Microstructure and Mechanical Properties of a Cast TRIP-Assisted Multiphase Stainless Steel[J]. China Foundry, 2024, 21(3): 221-228.
- [19] 郭龙龙, 刘广阔, 徐斌荣, 等. 30CrMo 表面 CMT 堆焊 15-5PH 工艺及组织性能研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2023, 46(6): 64-69.
- GUO L L, LIU G K, XU B R, et al. Study on Microstructure and Properties of 15-5PH Surfacing on 30CrMo Surface by CMT Welding Process[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2023, 46(6): 64-69.
- [20] 杜彦斌, 雷鑫, 张文平, 等. 航空用 17-4PH 表面激光熔覆 15-5PH 涂层组织与性能分析[J]. 航空制造技术, 2024, 67(19): 135-142.
- DU Y B, LEI X, ZHANG W P, et al. Microstructure and Properties of 15-5PH Coatings by Laser Cladding on 17-4PH Surfaces for Aviation Applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(19): 135-142.
- [21] 吴梦园, 杨季鑫, 胡晓圻, 等. 激光定向能量沉积 15-5PH 不锈钢微观组织和性能[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(21): 2114006.
- WU M Y, YANG J X, HU X Q, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser-Directed Energy Deposition of 15-5PH Stainless Steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(21): 2114006.
- [22] 杜彦斌, 何国华, 周志杰, 等. 20Cr13 表面激光熔覆 15-5PH 涂层组织和性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 0914002.
- DU Y B, HE G H, ZHOU Z J, et al. Microstructure and Properties of 15-5PH Coating by Laser Cladding on 20Cr13 Surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 0914002.
- [23] 刘正武, 赵凯, 郝云波, 等. 激光熔化沉积 15-5PH 沉淀硬化不锈钢组织及拉伸性能[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(1): 150-156.
- LIU Z W, ZHAO K, HAO Y B, et al. Microstructures

- and Tensile Properties of 15-5PH Precipitation Hardening Stainless Steel Fabricated by Laser Melting Deposition[J]. *Aerospace Shanghai*, 2021, 38(1): 150-156.
- [24] CHEN H X, DU Y B, LIANG Q, et al. Effect of Double Aging Treatment on the Tribological Properties of 15-5PH Coating on 17-4PH Stainless Steel by Laser Cladding[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 35: 4378-4389.
- [25] DU Y B, MAO K Y, LEI X, et al. Multi-Objective Optimization of Process Parameters for Laser Cladding of Cr_3C_2 /15-5PH Composite Coatings on 20CrMnTi Using RSM-CMOPSO-EWM-CV[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025, 36: 5632-5645.
- [26] DU Y B, CHEN H X, LEI X, et al. Effect of Laser Specific Energy on Microstructure and Properties of Nano-TiC/15-5PH Composite Coatings on 17-4PH by Laser Cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 185: 112598.
- [27] ZHANG B, WANG H M, ZHANG S Q, et al. Optimization of the Dilution Parameters to Improve Wear Resistance of Laser Cladding 15-5PH Steel Coating on U75V Pearlitic Steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 465: 129571.
- [28] 卢君, 常云峰, 刘永华, 等. 不同激光熔覆工艺对液压油缸组织与性能的影响研究[J]. *精密成形工程*, 2025, 17(5): 166-176.
- LU J, CHANG Y F, LIU Y H, et al. Influence of Different Laser Cladding Processes on Microstructure and Properties of Hydraulic Cylinders[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2025, 17(5): 166-176.
- [29] 蒋元龙, 王星星, 彭岩, 等. 大型水电装备关键部件高性能制造新技术新工艺[J]. *精密成形工程*, 2025, 17(3): 90-101.
- JIANG Y L, WANG X X, PENG Y, et al. Advanced Technologies and Processes for High-Performance Manufacturing of Key Components for Large Hydro-power Equipment[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2025, 17(3): 90-101.
- [30] 尹俊杰, 卜文德, 张新强, 等. 固溶时效对CMT电弧增材制造2319铝合金组织与力学性能的影响[J]. *精密成形工程*, 2025, 17(11): 201-207.
- YIN J J, BU W D, ZHANG X Q, et al. Effect of Solution Aging on the Microstructure and Mechanical Properties of CMT Arc Additive Manufactured 2319 Aluminum Alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2025, 17(11): 201-207.
- [31] 徐育焱, 吴正锋, 丁立南, 等. 送丝速度对S216铜合金CMT熔敷层成形工艺及组织性能的影响研究[J]. *精密成形工程*, 2025, 17(10): 135-145.
- XU Y L, WU Z F, DING L N, et al. Influence of Wire Feeding Speed on Forming Process, Microstructure and Properties of S216 Copper Alloy CMT Deposited Layer[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2025, 17(10): 135-145.
- [32] 贾书豪, 李虹钢. Q235B钢表面冷金属过渡熔覆316L不锈钢的工艺优化[J]. *机械工程材料*, 2025, 49(12): 33-38.
- JIA S H, LI H G. Process Optimization for Cold Metal Transition Cladding 316L Stainless Steel on Q235B Steel Surface[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2025, 49(12): 33-38.
- [33] 顾江龙. CMT工艺增材制造Al-Cu-(Mg)合金的组织与性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- GU J L. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Additively Manufactured Al-Cu-(Mg) Alloys with the CMT Process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [34] 孙哲, 吕耀辉, 徐滨士, 等. 基于CMT焊接快速成形工艺研究[J]. *装甲兵工程学院学报*, 2014(2): 85-88.
- SUN Z, LYU Y H, XU B S, et al. Study on Rapid Prototyping Technology Based on CMT Welding[J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2014(2): 85-88.
- [35] 张洪涛, 冯吉才, 胡乐亮. CMT能量输入特点与熔滴过渡行为[J]. *材料科学与工艺*, 2012, 20(2): 128-132.
- ZHANG H T, FENG J C, HU L L. Energy Input and Metal Transfer Behavior of CMT Welding Process[J]. *Materials Science and Technology*, 2012, 20(2): 128-132.
- [36] 周星宇, 刘红伟, 田甜. 冷金属过渡(CMT)技术综述[J]. *材料导报*, 2024, 38(S1): 422-430.
- ZHOU X Y, LIU H W, TIAN T. A Review of Cold Metal Transition(CMT)Technologies[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(S1): 422-430.
- [37] CHU Q L, WANG Z K, YANG D, et al. Microstructural Evolutions and Mechanical Behavior of Inconel 625 CMT Cladding Layers during Accelerated Thermal Aging[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2026, 221: 105765.
- [38] RAJESH K A, SIVA S N, NAVEENKUMAR S. Effect of Arc Length Correction on Weld Bead Geometry and Mechanical Properties of AISI 316L Weldments by Cold Metal Transfer (CMT) Process[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18: 3916-3921.
- [39] 雷小伟, 马照伟, 陈利阳, 等. 不同CMT焊接工艺对5083铝合金焊缝成形及性能的影响[J]. *电焊机*, 2022, 52(9): 39-44.
- LEI X W, MA Z W, CHEN L Y, et al. Effect of Different Cold Metal Transfer Welding Technology on Weld Forming and Properties of 5083 Aluminum Alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2022, 52(9): 39-44.
- [40] CHEN C, SUN G R, ZHAO Y L, et al. Microstructure and Mechanical Properties of 2A12 Aluminum Alloy Welded Joint through CMT Double Side Welding[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*,

- 2022, 37: 258-266.
- [41] 梁恩宝. X 65钢表面热丝脉冲TIG堆焊Inconel 625合金研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- LIANG E B. The Research of Weld Cladding of Inconel 625 on the Surface of X 65 Steel by Hot Wire P-TIG Welding[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [42] KEOGH A, ARADI E, TAYLOR M, et al. Effect of Ageing Temperature on the Microstructure and Localised Corrosion of 15-5PH Stainless Steel[J]. Corrosion Science, 2025, 248: 112800.
- [43] ZHOU T, NEDING B, LIN S, et al. Cu Precipitation-Mediated Formation of Reverted Austenite during Ageing of a 15-5 PHStainless Steel[J]. Scripta Materialia, 2021, 202: 114007.
- [44] 刘颀, 朱国辉. 超细晶粒钢中晶粒尺寸对塑性的影响模型[J]. 金属学报, 2015, 51(7): 777-783.
- LIU J, ZHU G H. Model of the Effect of Grain Size on Plasticity in Ultra-Fine Grain Size Steels[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(7): 777-783.
- [45] 彭新元, 周贤良, 华小珍. 15-5PH不锈钢的时效硬化行为及耐蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(5): 988-996.
- PENG X Y, ZHOU X L, HUA X Z. Aging Hardening Behavior and Corrosion Resistance of 15-5PH Stainless Steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(5): 988-996.
- [46] CHEN W, XU L Y, HAO K D, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Performances of Additively Manufactured 15-5PH Stainless Steel[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 157: 108711.