

# 30CrMo 表面 CMT 堆焊 15-5PH 工艺及组织性能研究

郭龙龙<sup>1</sup>, 刘广阔<sup>1</sup>, 徐斌荣<sup>2</sup>, 张小龙<sup>2</sup>, 刘春伟<sup>2</sup>

(1. 西安石油大学 机械工程学院, 陕西 西安 710065; 2. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西 宝鸡 721002)

**摘要** 为探明不同工艺参数对 30CrMo 钢堆焊 15-5PH 成形质量的影响规律, 并进一步优化工艺参数, 采用 CMT 焊接技术在 30CrMo 试验钢板上开展单道及多道的熔覆试验, 探明送丝速度、焊接速度对单焊道成型宽度及高度的影响。结果表明: 焊接速度恒定时, 焊缝宽度、高度与送丝速度正相关; 送丝速度恒定时, 焊缝宽度、高度与焊接速度负相关; 当送丝速度为 7 m/min; 焊接速度为 6 mm/s 时, 焊缝的成形质量最好, 多道焊的表面平整度最优, 熔覆层的抗拉强度最高。

**关键词** 30CrMo; 15-5PH; CMT; 成形质量; 力学性能

中图分类号 TG455

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)06-0064-06

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20231130.002

## Study on microstructure and properties of 15-5PH surfacing on 30CrMo surface by CMT welding process

GUO Longlong<sup>1</sup>, LIU Guangkuo<sup>1</sup>, XU Binrong<sup>2</sup>, ZHANG Xiaolong<sup>2</sup>, LIU Chunwei<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Baoji Petroleum Machinery Co. Ltd., Baoji 721002, China)

**Abstract** In order to explore the influence of different process parameters on surfacing welding of 15-5PH on the surface of 30CrMo steel and further optimize the process parameters, the single-pass and multi-channel cladding tests on 30CrMo steel plate based on CMT welding technology were carried out to explore the influence of wire feeding speed and welding speed on the forming width and height of single weld bead. The results show that when the welding speed is constant, the width and height of the weld are positively correlated to the wire feeding speed. When the wire feeding speed is constant, the width and height of the weld are negatively correlated to the welding speed. When the wire feeding speed is 7 m/min and welding speed is 6 mm/s, the forming quality of the weld is the best, and the surface flatness of multi-pass welding is the best, and the cladding layer has the highest tensile strength.

**Keywords** 30CrMo; 15-5PH; CMT; forming quality; mechanical property

30CrMo 钢是一种中碳合金钢, 加入了 Cr 和 Mo 等强化元素, 具备较高的强度、冲击韧性和塑性, 在飞行器、汽轮机、兵器及石油天然气设备中的阀门、防喷器、泥浆泵等均有广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 15-5PH 是在 17-4PH 的基础上, 通过降低 Cr 含量, 提高 Ni 含量开发的, 属于低碳马氏体沉淀不锈钢<sup>[3]</sup>。由于添加了较多的 Ni, 15-5PH 具有较好的抗开裂能力; Si、Cr 等的存在显著提高了其硬度和耐磨性; Cr、Ni 等促使 15-5PH 的耐腐蚀性能与 304 不锈钢相当<sup>[4]</sup>。此外 15-5PH 在 480~620 °C, 经不同温度时效处理后, 可获得强韧性配比不同的力学性能, 满足不同的使用工况<sup>[5]</sup>。15-5PH 含碳量较低, 具有良好的焊接性, 焊接过程无需预热和保温<sup>[6]</sup>。因此, 15-5PH 被广泛应用于石油天然气工业、航空航天、海洋工业、核工业等领域, 如压裂泵、高压阀门、机翼梁、

汽轮机、压缩机叶片、导弹壳等的制造<sup>[7]</sup>。然而, 15-5PH 材料成本较高, 大量使用导致生产成本极高。以高端油气装备中的压裂泵为例, 其泵头体由 15-5PH 经机械加工而成, 单件材料成本约 50 万元。由于 15-5PH 具有良好的焊接性, 可以采用堆焊方法, 以 30CrMo 为基体材料, 易受损表面堆焊 15-5PH, 兼顾两者的力学性能、耐腐蚀性能, 合理的降低材料成本。

目前, 国内有关 15-5PH 的堆焊研究主要采用激光熔覆的方法制备熔覆层, 探究其显微组织和性能, 验证工艺可行性。如农晓东<sup>[8]</sup>用激光选区熔化(SLM)沉积 15-5PH, 用不同扫描策略制备的熔覆层呈现不同的奥氏体/马氏体比例, 在焊态条件下, 熔覆层的抗拉强度为 1 191 MPa, 伸长率为 18.7%; 刘海涛等<sup>[9]</sup>用激光熔覆 15-5PH, 研究了修复比例(25%、50%、75%、100%)

收稿日期: 2023-06-28; 修回日期: 2023-09-25

基金项目: 国家油气钻井装备工程技术研究中心开放基金(BOMCOJ118-JKY016-2023); 陕西省教育厅科研计划项目(22JP065);

材料腐蚀与防护四川省重点实验室开放基金(2022CL27); 西安市科技计划项目(23GXFW0076)

第一作者: 郭龙龙, 男, 副教授。E-mail: llguo@xsyu.edu.cn。

对力学性能的影响;杜彦斌等<sup>[10]</sup>用激光熔覆在20Cr13表面制备15-5PH,研究指出,焊道的宽、高、熔深与激光比能呈正比,熔覆层由等轴晶和柱状晶等组成,15-5PH熔覆层显微硬度约为基材的2.4倍;ZHOU等<sup>[11]</sup>分析了20Cr13基体和15-5PH熔覆层的相组成、组织演变、显微硬度、摩擦磨损性能和耐腐蚀性能。得出15-5PH熔覆层主要由马氏体、 $\delta$ 铁素体晶间相和球状氧化物夹杂组成。ZHANG等<sup>[12]</sup>用激光直接能量沉积法制备15-5PH,提出了 $\delta$ -铁素体的形成机制,揭示了 $\delta$ -铁素体对材料硬度的影响机理;以上研究都是基于激光熔覆及电子束等技术,适用于小型零件表面,且熔覆层较薄,对于大型机械设备,此类方法效率低下,熔覆成本较高。现考虑用冷金属过渡技术(cold metal transfer, CMT),该焊接技术效率高、热输入低、无飞溅、工艺稳定性强<sup>[13]</sup>;CMT焊枪可达性好,在焊接及增材再制造行业应用广泛<sup>[14-15]</sup>。国内、外对于CMT的研究较成熟,如周方明等<sup>[16]</sup>探讨了CMT窄间隙多层多道焊接工艺参数对焊缝成形的影响,得出了各层焊道间距与单一焊缝熔宽的比例对焊缝成形的影响规律;SELVAMANI等<sup>[17]</sup>用有限元法对CMT焊接的温度分布进行预测,探究热输入对焊缝的几何形状,显微硬度变化及显微组织的影响,得到了能消除孔隙率的热输入值;SINGH等<sup>[18]</sup>用正交试验设计优化了异种材料铝-钢等CMT点焊和钎焊的工艺参数,总结了焊接融合区强度的主要影响因素;然而,国内外鲜有关于CMT堆焊15-5PH研究的报道。

因此,本文作者以油气装备制造常用材料30CrMo为基材,以15-5PH丝材为填充材料,开展CMT堆焊15-5PH的工艺及熔覆层的组织性能研究。以送丝速度和焊接速度作为自变量,开展单焊道试验,探明工艺参数对单道焊成形质量的影响规律;基于优选的工艺参数进行多道焊试验,对熔覆层进行力学性能测试,表征熔覆层的显微组织,验证通过CMT技术在30CrMo钢材上增材15-5PH的可行性。为15-5PH的堆焊工艺及性能调控提供参考。

## 1 试验材料及方法

试验基材为300 mm×200 mm×10 mm的30CrMo钢板,堆焊前状态为锻后调质,待堆焊表面 $Ra$ 为3.2  $\mu\text{m}$ ;焊丝牌号为GMS-630、直径为1.2 mm,基板及焊丝化学成分,见表1。焊接试验在Fronius的CMT自动焊接系统上进行,CMT焊接系统见图1。送丝速度 $v_f$ 通过送丝机构调控,焊接速度 $v$ 通过机械臂调控,具体数值可在控制面板上设置,焊接时焊丝与母材表面保持垂直。堆焊过程中,以Ar(98%)+O<sub>2</sub>(2%)为保护气体,气

表1 母材及焊丝化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire (mass fraction/%)

材料	30CrMo	15-5PH	材料	30CrMo	15-5PH
C	0.290	0.013	Ni	0.020	4.57
Si	0.200	0.370	Ti	0.006	—
Mn	0.510	0.470	Cu	0.020	3.38
Cr	0.990	16.150	Mo	0.175	—
P	0.021	0.002	Al	0.006	—
S	0.016	0.001	Fe	余量	余量

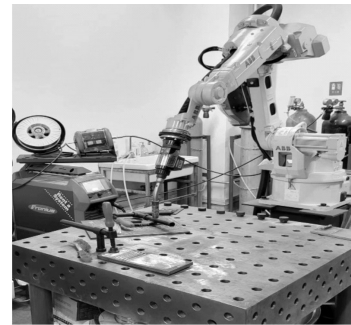


图1 CMT焊接系统

Fig.1 CMT welding system

体流量为18 L/min。

以送丝速度 $v_f$ 、焊接速度 $v$ 为变量开展单道焊试验,焊接电压 $U$ 、焊接电流 $I$ 由CMT焊接系统根据 $v_f$ 、 $v$ 自适应配置。堆焊后用线切割在焊缝中间位置切取试样,焊缝横截面示意图见图2。CMT再制造试验参数及结果见表2。试样长、宽、厚分别为20、15、15 mm;搭接角 $\theta$ 为焊缝边缘内测与基板之间的夹角,是评判焊缝在母材上铺展状态的重要参数,搭接角越小,表明焊缝在基板上的润湿铺展越好,有利于后续焊道的搭接成形。本文以单道焊缝的宽度 $b$ 、高度 $h$ 、搭接角度 $\theta$ 为指标,分析单道焊的成形质量。

在单道焊成形的基础上,优选出成形质量最好的一组参数,并以该组参数为基础进行微调开展多道焊堆焊试验。试验过程中,相邻焊道停焊测温冷却,焊道间温度控制在200  $^{\circ}\text{C}$ 以内;每道焊开焊前,用钢刷去除先前焊道上的氧化皮。相邻焊道搭接率为50%<sup>[19]</sup>。

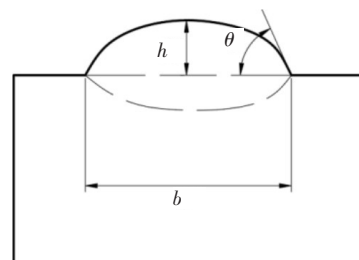


图2 焊缝横截面示意图

Fig.2 Schematic diagram of cross-section of weld

表2 CMT再制造试验参数及结果  
Table 2 CMT remanufacturing test parameters and results

编号	$v_f/(m \cdot \min^{-1})$	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$b/mm$	$h/mm$	$I/A$	$U/V$	$\theta/(^\circ)$	成形质量
1	6	5	8.49	3.33	157	21.8	—	中等
2	7	5	8.58	3.17	176	22.3	—	良好
3	8	5	9.79	3.32	197	23.8	—	中等
4	9	5	—	—	230	26.7	—	较差
5	6	6	8.28	2.80	156	21.6	—	良好
6	7	6	8.62	2.93	176	22.5	59	良好
7	8	6	9.46	2.97	196	23.6	56	良好
8	9	6	—	—	229	26.3	—	较差
9	6	7	7.45	2.63	155	21.5	—	中等
10	7	7	7.78	2.76	174	22.3	68	良好
11	8	7	8.03	2.79	194	23.3	67	良好
12	9	7	10.60	2.74	228	25.6	—	中等
13	6	8	7.01	2.44	156	21.3	—	良好
14	7	8	8.11	2.51	175	22.1	—	良好
15	8	8	8.39	2.35	195	23.4	—	中等
16	9	8	9.81	2.51	227	25.8	—	良好

堆焊结束后,用线切割截取金相组织、力学性能测试试样,拉伸试样示意图见图3。参照ISO-6892-1-2009将该试样在C64.305型液压万能试验机上进行拉伸试验,应变率为1 mm/min,得到熔覆层的力学性能曲线,分析工艺参数对熔覆层力学性能的影响规律。用100 mLHNO<sub>3</sub>+100 mLHCl+32 gFeCl<sub>3</sub>腐蚀液腐蚀金相试样的熔覆层截面,在光学显微镜下观察熔覆层的显微组织。

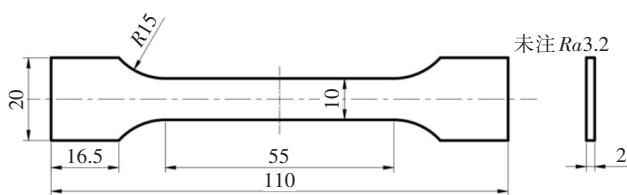


图3 拉伸试样示意图(mm)

Fig.3 Schematic diagram of tensile specimen(mm)

## 2 结果及分析

### 2.1 单道焊成形质量分析

单道焊的熔覆层形貌如图4所示。可见,不同的焊接参数对焊缝形貌有显著影响,第4、8组试验所得熔覆层连续性差,宽度、高度不均匀,尤其是第4组,焊缝宽度出现较大波动,这主要是焊接参数不匹配,送丝速度和焊接速度不协调;送丝速度大,焊接速度小,导致熔池范围扩大,热输入不均匀,在焊缝表面张力的作用下,随焊枪的移动,焊缝出现侧边不连续现象。因此,按照成形质量良好、中等、较差的等级,对单焊道进

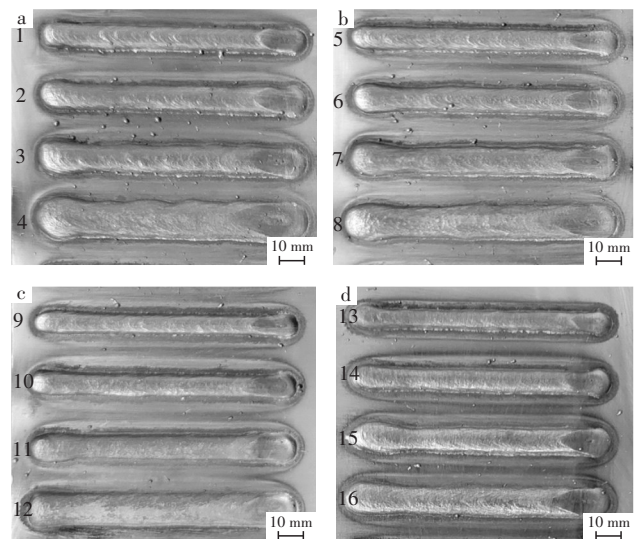


图4 单道焊熔覆层形貌

Fig.4 Morphology of single-pass welding cladding

行分类(表2)。成形质量良好的焊缝表面平整度好,无不良缺陷且连续性好。通过分析16组试验,发现每4组试验的第一条焊缝较窄,最后一条焊缝过宽,中间两条宽度适中,整体分析来看,第5~12组成形质量较好,对比分析第6、7条焊缝及第10、11条焊缝截面轮廓,结果如图5所示。对比发现,第6、7条焊缝截面的上表面相较于第10、11条焊缝表面更平整,且焊缝与母材的搭接角度 $\theta$ 更小,有利于多道焊焊接时相邻两条焊缝的搭接融合,因此,预选第6、7组试验参数进行多道焊焊接。

工艺参数对熔覆层高度和宽度的影响主要是因熔

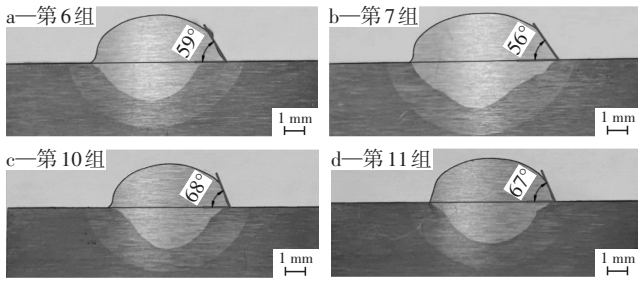


图5 单道焊缝截面轮廓

Fig.5 Cross-sectional profile of single weld

池的温度场和流场双向作用的结果,熔池驱动力是影响熔池成形质量的重要因素,主要由表面张力、电弧压力、电磁力、浮力等构成,这些因素对熔池的影响由强至弱。表面张力、电弧压力、浮力使液态金属向熔池边缘流动,而电磁力作用相反<sup>[20-21]</sup>。

连续性较好的焊缝高度、宽度数据见表2。可见在焊接速度一定时,焊缝宽度与送丝速度正相关,在送丝速度一定时,焊缝宽、高均与焊接速度负相关,这是因为随送丝速度的增大,单位时间内堆叠的焊丝体积更大,使焊缝在成形过程中熔池内的金属向四周流动更快,这导致了焊缝的宽、高增大;同理,在增大焊枪的焊接速度时,单位焊道长度上熔覆的焊丝体积减少,熔池的冷却时间缩短,熔池内的焊丝向四周流动距离减小,使得焊缝的宽、高减小,这与焊接时焊缝成形规律相符。

### 2.2 多道焊成形分析

以第6、7条单焊缝的试验参数为基础,控制焊接速度不变,在小范围内调节送丝速度,预选 $v_f$ 分别为7.0、7.5、8.0、8.5 m/min开展多道CMT再制造试验,依据焊接经验,在预定搭接率范围内选取合适的偏移量 $L$ ,多道焊试验参数如表3所示。

图6为多道焊宏观形貌。图7为熔覆层横截面。由图6、7可知,4组参数所得多道焊均融合较好,表面无宏观不良缺陷,相邻焊道之间咬合紧密,未出现空洞、夹杂、裂纹等情况,且焊缝表面没有喷溅残渣残留,但不同参数对应的焊缝平整度存在差异,由熔覆层横截面可知,4组焊缝表面的波纹度依次增大,焊缝平整度逐渐下降,由此可见,焊缝的平整度与送丝速度及焊缝间的偏移量均有关系,随送丝速度的增大,在同一时间内堆焊的焊丝体积更大,使焊缝高度增加,进而焊缝的平整度下降,焊缝表面质量变差,因此送丝速度需达到一个合适的值才能使焊缝成形质量最好,偏移量对焊缝平整度影响也较显著,当焊缝的偏移量进一步增大时,熔丝的堆积效应逐渐改善,焊缝平铺加快,表面质量较好,当然,这些效应均在一定范围内有效,当送丝速度过小或者偏移量过大均会影响焊缝表面的连续

表3 多道焊试验参数

Table 3 Experimental parameters of multi-pass welding

编号	$v_f/(m \cdot min^{-1})$	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$L/mm$	$I/A$	$U/V$
1	7.0	6	5.0	175	21.3
2	7.5	6	5.4	187	21.8
3	8.0	6	6.0	196	22.5
4	8.5	6	6.5	214	24.0

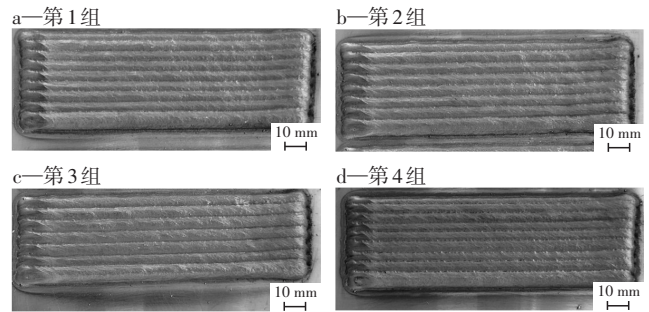


图6 多道焊宏观形貌

Fig.6 Macromorphology of multi-pass welding

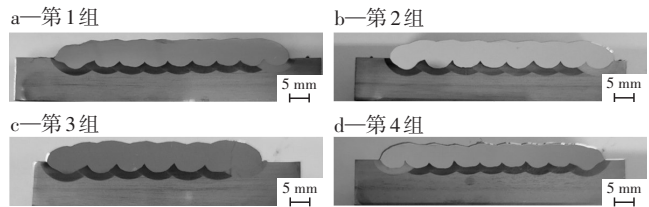


图7 熔覆层横截面

Fig.7 Cross-section of cladding layer

性,也会对焊缝成形质量产生影响。综上,第1组多道焊试验参数所得焊缝表面平整度最好,成形质量最优。

### 2.3 熔覆层力学性能

4种参数所得的熔覆层应力-应变曲线如图8所示。由图可知,拉伸曲线包括弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、断裂阶段。第1组参数所得熔覆层的屈服强度明显高于另外3组,但伸长率最小,为14%。当送丝速度逐渐增大时,熔覆层的屈服强度下降,送丝速度为7 m/min时,熔覆层的力学性能最好,当送丝速度为8 m/min时,熔覆层抗拉强度最高,为1450 MPa,送丝速度为7.5 m/min时,熔覆层的抗拉强度略次之,为1400 MPa;送丝速度为8.5 m/min时,抗拉强度最低,为1300 MPa,而伸长率最大,接近15%。4组试验所得熔覆层的伸长率差距不大,但屈服强度和抗拉强度有一定的影响,尤其是屈服强度影响较大,随送丝速度增大,材料的塑性降低。这是因为随送丝速度的增大,熔池内焊丝体积增多,焊道间的热输入增大,使晶粒粗化,大晶粒组织导致了熔覆层的抗拉强度下降,伸长率增加<sup>[22]</sup>。锻后调质30CrMo钢的抗拉强度为867 MPa,伸长率为9.3%<sup>[23]</sup>。可见,在30CrMo上堆焊15-5PH满足对材料的力学性能要求。

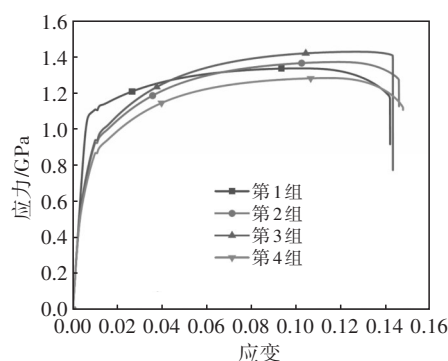


图8 多道焊熔覆层应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of multi-pass cladding layer

## 2.4 熔覆层显微组织

图9为4组多道焊焊缝中间区域的金相组织。由图9可知,15-5PH材料堆焊后显微组织基体为板条马氏体,形态为黑色板条状,马氏体板条间隙白色组织是奥氏体,晶粒边界呈不规则的弧形,并伴有富铜相沉淀析出。随送丝速度增大,马氏体的板条间距明显增大,材料的屈服强度降低,第3组试验数据所得熔覆层显微组织中奥氏体残留较少,同时析出弥散分布的碳化物、强化相,从而其强度较高,塑性、韧性低,这与拉伸试验所得结果相符。

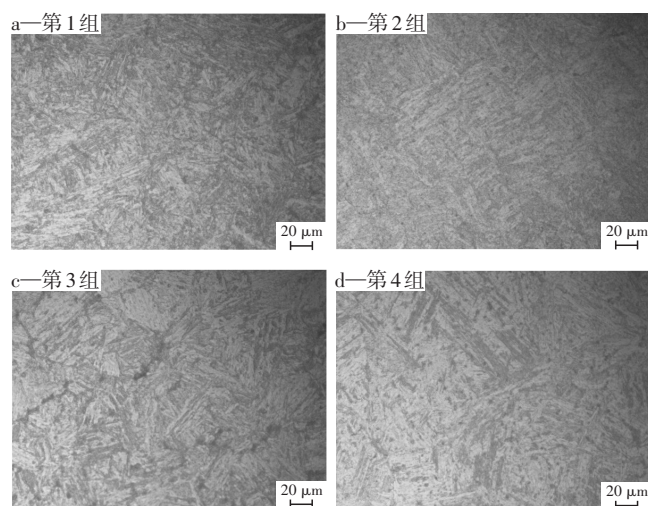


图9 焊缝中间区域金相组织

Fig.9 Metallographic structure in middle area of weld

## 3 结论

1) 送丝速度和焊接速度对熔覆层的宏观形貌有重要影响,在焊接速度一定时,焊缝宽度与送丝速度正相关,在送丝速度一定时,焊缝宽高均与焊接速度负相关。

2) 通过对单道焊成形质量分析可知,单道焊成形质量最优的焊接参数:送丝速度为7、8 m/min;焊接速度为6 mm/s。

3) 多道焊时,随送丝速度的增大,焊缝高度增加,焊缝的平整度下降,焊缝表面质量变差,偏移量对多道焊成形质量的影响也较显著,焊缝平整度越好。

4) 优选的4组焊接参数所得的熔覆层抗拉强度和伸长率均显著提高,因此在30CrMo钢上增材15-5PH可行。

## 4 参考文献

- [1] 郭建明,冯永强,李锦时,等. 30CrMo钢热处理后性能影响因素的研究[J]. 锅炉制造,2000(2):58-64.  
GUO Jianming, FENG Yongqiang, LI Jinshi, et al. Character report of steel 30CrMo after heat treatment[J]. Boiler Manufacturing, 2000(2):58-64. (in Chinese)
- [2] 李敬民,黄文荣,李昌安,等. 大型薄壁焊接30CrMoA钢壳体的热处理[J]. 金属热处理,2014,39(12):58-60.  
LI Jingmin, HUANG Wenrong, LI Chang'an, et al. Heat treatment of large-sized thin wall welding 30CrMoA steel shell[J]. Heat Treatment of Metals, 2014, 39(12):58-60. (in Chinese)
- [3] 詹中华. 15-5PH不锈钢大型铸锻件中DS类夹杂物形成机理及控制研究[D]. 北京:北京科技大学,2023.  
ZHAN Zhonghua. Study of the formation mechanism and control of DS-type inclusion in large castings and forgings of 15-5PH stainless steel [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023. (in Chinese)
- [4] 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 Bo, LIU Tongyu, CHENG Fei, et al. On constitutive model of 15-5PH precipitate hardened stainless steel[J]. Tool Engineering, 2022, 56(10):92-97. (in Chinese)
- [5] 肖亚姣,刘文庆,孙光岩,等. 15-5PH不锈钢在580℃时效过程中的析出强化行为[J]. 上海金属,2023,45(4):38-44.  
XIAO Yajiao, LIU Wenqing, SUN Guangyan, et al. Precipitation strengthening behavior of 15-5PH stainless steel during aging at 580℃[J]. Shanghai Metals, 2023, 45(4):38-44. (in Chinese)
- [6] 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 Zhiqiang, CHENG Zonghui, FAN Xin, et al. Microstructure and mechanical properties of 15-5PH stainless steel repaired by laser additive process[J]. Applied Laser, 2022, 42(4):80-88. (in Chinese)
- [7] 张秀丽,陈明昕,刘振宝,等. 热处理工艺对15-5PH沉淀硬化不锈钢的力学性能与耐蚀性的影响[J]. 钢铁,2014,49(8):70-75.  
ZHANG Xiuli, CHEN Mingxin, LIU Zhenbao, et al. Effect of heat treatment on mechanical properties and corrosion resistance of 15-5PH stainless steel[J]. Iron & Steel, 2014, 49(8):70-75. (in Chinese)

- [8] 农晓东. 增材制造15-5PH不锈钢的组织与力学性能研究[D]. 北京:北京科技大学,2021.  
NONG Xiaodong. Investigation of microstructure and mechanical properties of 15-5PH stainless steel produced by additive manufacturing[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese)
- [9] 刘海涛,司超阳,霍登平,等. 激光熔覆修复15-5PH不锈钢的拉伸性能及组织研究[J]. 航空制造技术,2017,(10):86-90.  
LIU Haitao, SI Chaoyang, HUO Dengping, et al. Study on tensile property and microstructure of laser cladding repaired of 15-5PH stainless steel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, (10):86-90. (in Chinese)
- [10] 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):302-311.  
DU Yanbin, HE Guohua, ZHOU Zhijie, et al. Microstructure and properties of 15-5PH coating by laser cladding on 20Cr13 surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9):302-311. (in Chinese)
- [11] ZHOU Zhijie, DU Yanbin, HE Guohua, et al. Optimization and characterization of laser cladding of 15-5PH coating on 20Cr13 stainless steel[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 32(3):962-977.
- [12] ZHANG Bo, WANG Huaming, RAN Xianzhe, et al. Microstructure and mechanical properties of high-efficiency laser-directed energy deposited 15-5PH stainless steel[J]. Materials Characterization, 2022, 190:112080.
- [13] 孙哲,吕耀辉,徐滨士,等. 基于CMT焊接快速成形工艺研究[J]. 装甲兵学报,2014,28(2):85-88.  
SUN Zhe, LU Yaohui, XU Binshi, et al. Study on rapid prototyping technology based on CMT welding[J]. Journal of Armored Forces, 2014, 28(2):85-88. (in Chinese)
- [14] 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 Jianglong. Study on microstructure-properties of additively manufactured Al-Cu-(Mg) alloys with the CMT process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016. (in Chinese)
- [15] 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 Hongtao, FENG Jicai, HU Leliang. Energy input and metal transfer behavior of CMT welding process[J]. Materials Science and Technology, 2012, 20(2):128-132. (in Chinese)
- [16] 周方明,孙红辉,宋辉,等. CMT窄间隙多层多道焊接工艺参数对焊缝成形的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2011,25(2):126-130.  
ZHOU Fangming, SUN Honghui, SONG Hui, et al. Effect of CMT multi-layer narrow gap welding parameters on weld formation[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2011, 25(2):126-130. (in Chinese)
- [17] SELVAMANI S T, BAKKIYARAJ M, BALASUBRAMANIAN V, et al. Investigation of heat input effects on the joint characteristics of CMT welded AA6061 sheets[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2023, 237(10):2328-2345.
- [18] SINGH J, ARORA K S, SHUKLA D K, et al. Mechanical and microstructural characterization of cold metal transfer (CMT) spot aluminium-steel weld-brazed joints[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2022, 236(12):2506-2515.
- [19] 胡彪,邓劲莲,蔡高参,等. 冷金属过渡电弧增材制造技术研究进展[J]. 机电工程,2022,39(3):375-381.  
HU Biao, DENG Jinglian, CAI Gaocan, et al. Research progress of CMT wire arc additive manufacturing technology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(3):375-381. (in Chinese)
- [20] 赵文勇,曹熙勇,杜心伟,等. CMT电弧增材制造过程传热传质数值模拟[J]. 机械工程学报,2022,58(1):267-276.  
ZHAO Wenyong, CAO Xiyong, DU Xinwei, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer in CMT-based additive manufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(1):267-276. (in Chinese)
- [21] 徐小东,李悦钦,郭龙龙,等. 热丝脉冲TIG工艺参数对焊缝成型质量影响研究[J]. 兵器材料科学与工程,2016,39(6):60-65.  
XU Xiaodong, LI Yueqin, GUO Longlong, et al. Effect of process parameters on formation quality of clads deposited by hot wire pulsed TIG[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(6):60-65. (in Chinese)
- [22] 徐鑫. 铝合金薄板CMT焊接过程有限元分析[D]. 南昌:南昌大学,2022.  
XU Xin. Finite element analysis of CMT welding process of aluminum alloy sheet[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022. (in Chinese)
- [23] GUO Longlong, XIAO Fei, WANG Fan, et al. Effect of post-weld heat treatment temperatures on microstructure, Intergranular corrosion resistance, and mechanical properties of 4130 steel with inconel 625 weld overlay[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2021, 21(5):1775-1783.