

海上风机基础用 S355NL 直缝焊管 双丝埋弧焊工艺设计

葛 兰¹, 彭 静¹, 郑家胜¹, 许 峰²

(1. 合肥紫金钢管股份有限公司, 合肥 230051; 2. 合肥高科科技股份有限公司, 合肥 230051)

摘 要: S355NL 细晶粒结构钢以其优异的性能在海上风电、石油平台、焊接钢管等方面得到广泛应用。为进一步提高焊接钢管的生产效率, 获得性能优良的海上风机基础用钢管焊接接头, 开展 S355NL 直缝焊管的焊接工艺研究。采用双丝埋弧焊方式, 选用低镍合金焊材, 不仅能够细化焊缝组织晶粒, 同时降低淬硬倾向, 提高 S355NL 直缝焊管焊缝的低温冲击韧性。在焊接过程中采用多层多道焊接, 控制热输入 ≤ 5.0 kJ/mm, 减少熔合区和热影响区在高温区域停留时间, 保证熔合线和热影响区冲击性能。试验结果表明, 该工艺所制试板及成品焊管各项力学性能试验合格, 能够满足 -40 °C 夏比冲击试验要求。生产应用表明, 该焊接工艺制定及焊材选配正确恰当, 能够提高焊接生产效率。

关键词: S355NL; 海上风机; 直缝焊管; 双丝埋弧焊; 冲击性能

中图分类号: TG445

文献标识码: B

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.03.009

Double-Wire Submerged Arc Welding Process Design of S355NL Longitudinal Welded Pipe for Offshore Wind Turbine Foundation

GE Lan¹, PENG Jing¹, ZHENG Jiasheng¹, XU Feng²

(1. Hefei Ziking Steel Pipe Co., Ltd., Hefei 230051, China;

2. Hefei Gaoco Technology Co., Ltd., Hefei 230051, China)

Abstract: S355NL fine-grained structural steel has been widely used in offshore wind power, oil platforms, welded steel pipes and other fields due to its excellent performance. In order to further improve the production efficiency of welded steel pipe and obtain the welded joint of steel pipe for offshore wind turbine foundation with excellent performance, the welding process research of S355NL longitudinal welded pipe was carried out. Adopting double-wire submerged arc welding and low-nickel alloy welding material can not only refine the grain of weld, but also reduce the hardening tendency and improve the low-temperature impact toughness of S355NL longitudinal welded pipe weld. Multi-layer and multi-pass welding is adopted in the welding process, the heat input is controlled to be ≤ 5.0 kJ/mm, the residence time of fusion zone and heat affected zone in the high temperature zone is reduced, and the impact performance of fusion line and heat affected zone is guaranteed. The test results show that the mechanical properties of the test plate and the finished welded pipe manufactured by this process are qualified and can meet the requirements of -40 °C Charpy impact test. The production application shows that the welding process formulation and welding material selection are correct and appropriate, and the welding production efficiency is improved at the same time.

Key words: S355NL; offshore wind turbine; longitudinal welded pipe; double-wire submerged arc welding; impact performance

S355NL 材料为欧标细晶粒结构钢, 广泛应用于海上风电、石油平台等结构。海上风电具有资源丰富、发电利用小时数高、不占用土地、不消耗水资源和适宜大规模开发的特点^[1], 近几年许多国家把风电开发重点转向海上, 许多大型风电开发企业、设备制造企业正积极探索海上风电发展

之路。随着海上风电项目的蓬勃发展, S355NL 材质直缝焊管作为海上风机基础的重要组成构件被广泛应用。由于海上服役的特性, 对于焊管的性能 (尤其是低温冲击韧性) 的要求特别高。此外由于需求量大、工期紧, 需要对 S355NL 直缝焊管进行焊接工艺研究, 以满足上述要求。

1 S355NL材料性能和可焊性分析

1.1 材料性能

试验采用宝钢 EN10025-3: 2004 S355NL 钢

板, 试板尺寸为 1 080 mm×300 mm×25 mm (长×宽×厚), 数量为 2 块。钢板的化学成分见表 1, 钢板的力学性能见表 2。原料的金相组织如图 1 所示, 主要组织为铁素体+珠光体。

表 1 试板化学成分

$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Als})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Ti})$	$w(\text{N})$	Ceq	Pcm
0.16	0.25	1.49	0.013 4	0.002 9	0.031	0.01	0.02	0.02	0.001	0.002 7	0.42	0.25

表 2 试板力学性能

屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	冲击功/J(-40 ℃)	
			单值	均值
504	596	25	185、186、188	186

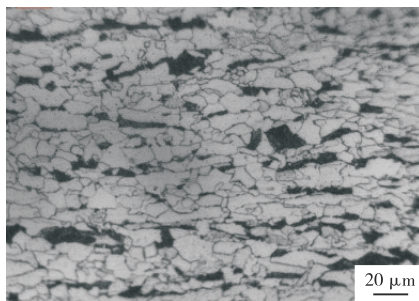


图 1 母材金相组织 (×500)

1.2 可焊性分析

S355NL 为正火状态交货钢板。由表 1 可知, 钢板的淬硬倾向明显, 并具有一定的冷裂纹敏感性。为了保证焊接质量, 在焊材选配时需注意控制焊丝中 C、P、S 含量, 并添加合适的合金元素, 减少淬硬组织产生, 提高焊缝的低温冲击韧性。综合钢板的成分特性, 最终选用低 Ni 合金焊丝, Ni 元素具有明显的细化晶粒的作用, 并能提高焊缝的冲击韧性。在焊接接头的热影响区, 尤其是熔合线的位置, 化学成分分布不均, 晶粒大小不均, 造成该区域的性能最为薄弱。针对此问题, 采取预热、控制层间温度、控制热输入等措施, 以降低冷却速度, 避免淬硬组织的形成。在焊前进行预热, 严格控制层间温度, 控制焊接热输入≤5.0 kJ/mm, 能够有效避免在高温区域的停留时间, 从而保证焊接接头的韧性。

海上风电项目构件用钢管多为厚壁钢管, 厚度基本>20 mm, 一旦项目开工, 需要在短时间内完成交货方便后续现场组对拼接, 因此对于钢管的生产效率要求很高。在对 S355NL 材料化学

成分及焊接性能分析的基础上, 采用双丝埋弧焊接方法, 能够提高厚壁直缝焊管生产效率。由于双丝埋弧焊的热输入大, 对于焊接工艺参数有更高的要求, 要同时兼顾生产效率和焊接接头性能。

2 焊接工艺试验

2.1 焊接工艺

针对 S355NL 直缝焊管生产, 采用全熔透对接接头, 坡口形式为双面 V 形。打底焊和埋弧焊分别使用符合 AWS A5.18 的 E81T1-K2C 药芯焊丝和符合 AWS A5.23 焊材组合的 F8A8-ENi1-Ni1 埋弧焊材, 焊前清理坡口并预热, 先在坡口角度大的一侧(外坡口侧)用药芯焊打底封口, 而后在另一侧(内坡口侧)进行埋弧焊焊接, 结束后用碳弧气刨去除打底焊, 打磨后再用埋弧焊进行填充。焊接过程严格控制热输入和层间温度, 并在焊接完成 48 h 后进行无损检测, 检测合格后进行力学性能试验。

2.2 焊接坡口

考虑到实际生产工序以及保证焊接接头的熔透性, 采用双面 V 形焊接坡口, 加工后对坡口及两侧进行修磨处理, 去除杂质及坡口两侧铁锈, 坡口具体尺寸如图 2 所示。

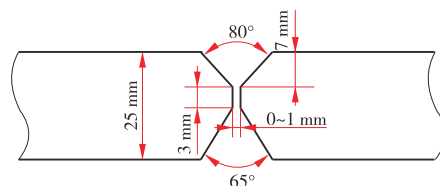


图 2 焊接坡口示意图

2.3 焊接材料及设备

焊接打底使用药芯焊, 采用美标 AWS A5.18 型号为 E81T1-K2C 的药芯焊丝, 直径

1.2 mm。埋弧焊采用美标 AWS A5.23 组合等级 F8A8-ENi1-Ni1 焊材，焊丝直径 4.0 mm，所有焊丝均为低 Ni 合金焊丝，化学成分见表 3。打底焊设

备为唐山松下焊机，埋弧焊使用设备为上海林肯焊机，电源为 DC-1500&AC-1200，焊接位置为水平位置。

表 3 焊丝化学成分

焊丝	化学成分/%										
	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)	w(Ni)	w(V)	w(Cu)	w(Al)
药芯焊丝	0.034	0.31	1.57	0.009	0.004	0.02	0.01	1.71	0.020	—	—
埋弧焊丝	0.110	0.13	1.14	0.006	0.003	0.13	0.21	0.98	0.001	0.09	0.002

2.4 焊接参数和焊接顺序

对试板坡口及边缘 30 mm 进行处理后，将试板定位组对，试板两端加装引熄弧板，焊前对坡口进行除湿预热，参考欧标规范 EN1011-2，确定焊前最低温度为 30 ℃，采用火焰加热方式进行预热。焊接层道顺序如图 3 所示，具体焊接参数见表 4。焊接过程先采用药芯焊丝气体保护焊在外坡口打底，药芯焊丝气体保护焊的保护气体为纯 CO₂。内坡口双丝埋弧焊填充盖面，背面气

刨清根，气刨深度在 15 mm 左右，然后在外坡口再用双丝埋弧焊填充盖面。焊接过程严格控制热输入，采用多层多道焊接，每道焊接热输入都控制在 5.0 kJ/mm 以下，控制层间温度≤150 ℃。

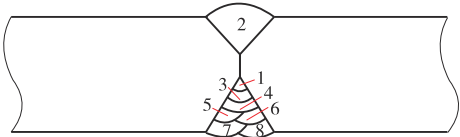


图 3 焊道分布示意图

表 4 焊接参数

焊接层道数	焊接工艺	焊接电流		电压/V	保护气体类型	焊接速度/(mm·min ⁻¹)	热输入/(kJ·mm ⁻¹)
		极性	电流/A				
1	FCAW	DCEP	225	30	CO ₂	279	1.45
2	SAW	DCEP	800	30	—	789	3.90
		AC	760	36	—	789	
3	SAW	DCEP	700	29	—	800	3.26
		AC	680	34	—	800	
4	SAW	DCEP	720	30	—	800	3.48
		AC	710	35	—	800	
5	SAW	DCEP	700	31	—	789	3.73
		AC	700	39	—	789	
6	SAW	DCEP	700	30	—	789	3.41
		AC	680	35	—	789	
7	SAW	DCEP	690	32	—	811	3.51
		AC	650	39	—	811	
8	SAW	DCEP	670	34	—	800	3.66
		AC	650	40	—	800	

2.5 无损检测

焊接完成后焊件自然冷却不做热处理，48 h 后对焊缝进行外观检验，试板双面进行 MT 磁粉检测及 UT 超声波检测，均按照 ISO 5817 B 级验收，检验结果均满足规范要求，焊接质量合格。

3 焊接性能检测及分析

按照 DNVGL-OS-C401-2018 规范要求，在焊评试板上进行板状横向拉伸试验、导向弯曲（侧弯）试验、夏比 V 形冲击试验（-40 ℃）、宏观及硬度试验。

3.1 拉伸试验

根据DNVGL-OS-C401—2018规范要求,在焊评试板上取2个板状横向拉伸试样,拉伸试验按照ISO 6892-1:2019进行,结果见表5。焊缝抗拉强度均高于母材规定最小抗拉强度(470 MPa),且断裂在母材区域,试验结果合格,焊接接头拉伸性能良好。

表5 焊接接头拉伸试验结果

取样位置	试样尺寸/ (mm×mm)	抗拉强度/ MPa	断裂位置
焊缝	25.21×24.81	573	母材
焊缝	25.14×24.86	571	母材

3.2 导向弯曲试验

按照DNVGL-OS-C401—2018规范要求,在焊评试板上进行导向弯曲试验,导向弯曲试验按照ISO 5173:2009进行,采用侧弯试样代替正弯和反弯试样,试样厚度10 mm,弯轴直径40 mm,弯曲角度180°。试验后检查试样表面无裂纹等缺陷,试验结果合格。

3.3 夏比V形冲击试验

按照DNVGL-OS-C401—2018要求分别在表面焊缝中心、表面熔合线、表面熔合线+2 mm、根部焊缝中心4个位置取冲击试样,每个位置取3个试样,试样尺寸为10 mm×10 mm×55 mm,在-40℃温度下按照ISO148-1:2016进行试验,试

验结果见表6。从表6可以看出,4个位置平均冲击功>34 J,单个试样冲击值≥27 J,满足项目要求,冲击试验结果合格。

表6 焊接接头-40℃夏比V形冲击试验结果

取样位置	冲击功/J	
	单值	均值
WM(表面)	148、136、148	144
FL(表面)	37、49、38	41
FL+2(表面)	95、196、199	163
WM(根部)	86、147、108	114

3.4 硬度试验

按照DNVGL-OS-C401—2018规范要求,检测焊接接头硬度值。按照图4所示打点位置并依据ISO 6507-1:2018规范进行维氏硬度试验,硬度测试结果见表7。焊缝中心、热影响区、母材三个位置最大硬度为253HV₁₀,未超过规范要求的350HV₁₀。

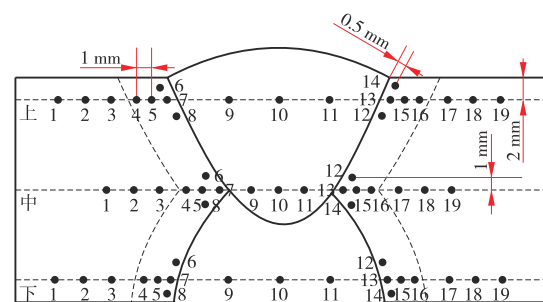


图4 硬度打点位置示意图

表7 硬度测试结果

位置	HV ₁₀																		
上	163	161	165	188	244	228	250	246	213	207	215	236	246	253	228	198	167	163	165
中	160	163	166	178	186	195	191	196	208	202	206	189	185	197	190	179	176	172	171
下	161	165	167	208	209	207	205	201	203	207	201	214	213	202	203	202	168	166	163

3.5 宏观形貌观察

按照DNVGL-OS-C401—2018规范要求,对试板进行焊接接头宏观腐蚀检查,宏观形貌如图5所示。由图5可以看出,焊缝成形良好,平滑过渡,焊缝完全焊透,无裂纹和未熔合缺陷,内外焊缝熔合充分,焊缝余高及错边量均符合要求,试验结果合格。

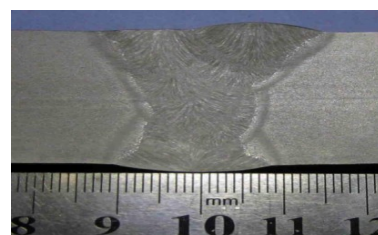


图5 焊接接头宏观形貌

3.6 金相组织分析

焊接接头金相组织形貌如图6所示。图6(a)可以看出,焊缝中心组织晶粒细小且分布均匀,主要为铁素体+珠光体+粒状贝氏体。焊缝中心组织与焊材选配有很大的关系,在冶金反应过程中,通过焊材的化学成分来调整熔敷金属的化学成分,从而使焊缝性能满足使用要求。根据试板的化学

成分及性能要求,选配低合金埋弧焊丝,降低焊丝中C、Mn含量,严格控制P、S含量,主要提高Ni元素含量,Ni元素的加入能有效细化焊缝组织晶粒,提高焊缝组织的冲击韧性以及强度,使焊缝组织的性能满足要求。试板表面、焊缝中心和根部焊缝中心的冲击试验数据、焊缝拉伸试验数据,可以证明焊材选配的正确性。

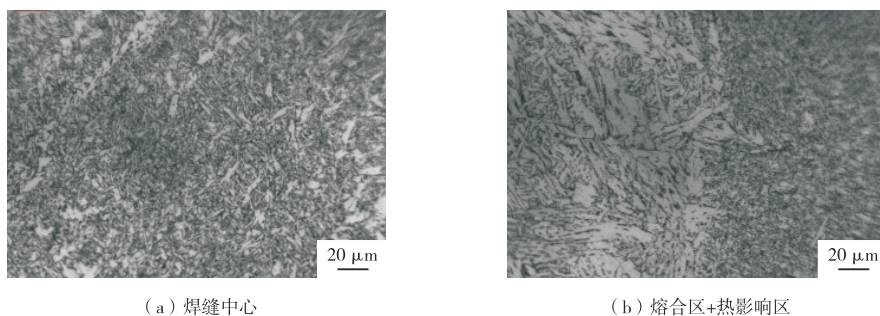


图6 焊接接头金相组织照片(×500)

图6(b)左侧为熔合区+热影响区,右侧为焊缝组织。从图6(b)可以看出,熔合区和热影响区金相组织分布不同且晶粒大小不均,主要组织为铁素体+珠光体+魏氏组织。熔合区化学成分和金相组织分布不均匀,造成该区域的性能不稳定也最薄弱。对比熔合线位置冲击数据和其他位置的冲击数据,也恰好能验证这一点。热影响区由于受热循环影响不同,分为过热区、相变重结晶区、不完全重结晶区,其中过热区距离焊缝位置最近,在焊接过程中达到的温度最高,在高温区域停留的时间最长,在加热的过程中,奥氏体晶粒迅速长大冷却后形成晶粒粗大的组织即魏氏体。过热组织由于晶粒粗大,而且由于大量的铁素体针片形成的脆弱面,使得该区域的韧性明显下降。

为了保证熔合区域及热影响区的性能,需要减少焊接过程在高温区域的停留时间,控制晶粒长大倾向,因此在焊接过程中采用多层多道工艺,每一层道的焊接热输入控制在 ≤ 5.0 kJ/mm。当热输入控制在 ≤ 5.0 kJ/mm时,能够有效避免在高温区域停留的时间,从而保证焊接接头的韧性。熔合线及热影响区的冲击试验数据合格,也证实了控制热输入的有效性。

4 生产应用

焊接工艺评定试验合格后,将该工艺应用到实际生产。随机抽取规格 $\Phi 960$ mm×30 mm成

品焊管做性能测试,截取样块分别做拉伸、弯曲、冲击等试验,结果见表8和表9。以上试验数据均合格,满足客户使用要求,此外,焊管生产效率对比前期提高约15%,证明其焊接工艺正确且有效。

表8 成品焊管拉伸试验结果

取样位置	试样尺寸/ (mm×mm)	抗拉强度/ MPa	断裂位置
焊缝	30.06×25.14	551	母材
焊缝	29.75×25.12	557	母材

表9 成品焊管夏比V形冲击试验结果(−40℃)

取样位置	冲击功/J	
	单值	均值
WM(表面)	78、76、87	80
FL(表面)	234、235、261	243
FL+2(表面)	250、264、238	251

5 结 论

(1) 针对S355NL材料,采用双丝埋弧焊焊接工艺,选配低镍合金焊材,明显提高了焊缝的低温冲击韧性。焊接中采用多层多道焊接,控制热输入 ≤ 5.0 kJ/mm,减少熔合区和热影响区在高温区域停留时间,可保证熔合线和热影响区冲击性能。

(2) 该焊接工艺应用于实际生产, 焊管生产效率对比前期提高约15%, 焊管各项性能均符合标准及项目要求。

参考文献:

- [1] 王忠锋. 海上风电场海缆登陆施工方案技术总结[J]. 风能, 2019(11):84-87.
- [2] 刘林, 葛旭波, 张义斌, 等. 我国海上风电发展现状与分析[J]. 能源技术经济, 2012, 24(3):66-72.
- [3] 蔡养川, 罗震. 高强钢焊条中Ni含量对焊缝组织和性能的影响[J]. 焊管, 2015, 38(4):5-10.
- [4] 徐慧子. 稀土Ce对大热输入埋弧焊焊缝金属显微组织与性能的影响[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [5] 戴丽娟. 金相分析基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 129-132, 163-168.
- [6] 张文钺. 焊接冶金学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 许鸿吉, 金光, 宋冰昕, 等. S355钢焊接接头的组织与力学性能[J]. 理化检验(物理分册), 2008(11):600-603.
- [8] 刘硕. 微合金元素对低合金高强钢焊缝及热影响区组织性能的影响[J]. 世界钢铁, 2014, 14(1):64-72.
- [9] 张敬斋. 高强度低合金Q345钢焊接接头的微观组织与力学

性能研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(12):3018-3020.

- [10] 杨克, 杨可, 包晔峰. Q345D钢埋弧焊接头组织与性能[J]. 电焊机, 2014, 44(1):87-90.
- [11] 汪勇, 杨杰, 王小锋. 焊接热输入对S355N/Q345B异种钢焊接接头组织和性能的影响[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2017(6):230.
- [12] 李云凯. 金属材料学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019:43-52.
- [13] 李亚江. 焊接冶金原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015: 25-39.
- [14] 高卫明. 焊接工艺[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011:66-82.
- [15] 段卫军, 邓鸿剑, 陈北平, 等. S355钢焊接温度场和应力场有限元分析[J]. 电焊机, 2021, 51(2):31-36, 110.
- [16] 王兆永. 油气结构用S355NL钢焊接裂纹敏感性研究[J]. 热处理, 2018, 33(1):37-40.

作者简介: 葛 兰 (1987—), 女, 学士, 助理工程师, 主要从事金属材料管道焊接研究等工作。

收稿日期: 2022-04-09

修改返回日期: 2022-11-23

编辑: 袁雪婷

(上接第46页)

参考文献:

- [1] 唐山松下产业机器有限公司企划课. 全数字焊机——引领焊接业进入全新的数字化时代[J]. 机械工人, 2005(1):32-33.
- [2] 秦克礼. 建设数字化智能焊管生产线存在的问题及解决措施[J]. 焊管, 2011, 34(9):44-47.
- [3] 韩保材, 李钢. 论直缝埋弧焊管生产线焊接工艺及设备[J]. 装备机械, 2017(2):20-24.
- [4] 陈亮. 埋弧焊数字焊机现场应用及其配套控制改造[J]. 焊管, 2020, 43(12):28-32.
- [5] 李鹤林. 油气输送钢管的发展动向与展望[J]. 焊管, 2004(6):1-11.
- [6] 牛爱军, 毕宗岳, 张高兰. 海底管线用管线钢及钢管的研发与应用[J]. 焊管, 2019, 42(6):1-6.
- [7] 邱令超. 福尼斯TPS4000系列数字焊机故障分析[J]. 设备管理与维修, 2021(23):59-60.
- [8] 丁强, 田永强, 张兰, 等. 一种焊接热输入监控型全数字化TIG焊机[J]. 电焊机, 2019, 49(7):47-50.
- [9] 王伟. 实现高效焊接的松下全数字脉冲MIG/MAG焊机GL4的开发与应用[J]. 金属加工(热加工), 2017(12):20-25.
- [10] 袁东旭, 王瑛, 唐志博, 等. 多功能数字焊机的人机交互系

统设计[J]. 现代信息科技, 2020, 4(6):45-47.

- [11] 殷树言, 刘嘉. 关于数字化焊机发展的几点思考[J]. 电焊机, 2009, 39(2):1-5.
- [12] 张根元, 李婧, 吴冬春, 等. 基于DSP的数字化焊机[J]. 电焊机, 2006, 36(8):18-21.
- [13] 刘福海, 刘宏博, 杨战利, 等. 数字焊机在埋弧焊接控制中的串并联应用[J]. 焊管, 2020, 43(7):36-39.
- [14] 唐子金. 优化设计管线钢埋弧焊工艺参数的方法: CN104923892B[P]. 2017-05-10.
- [15] 曾德胜. 埋弧焊熔深变量的分析[J]. 焊管, 2016, 39(1):64-68.
- [16] 吴禹胜, 陈世斌. 管线钢管现场焊缝宏观检验方法[J]. 焊管, 2020, 43(11):16-25.
- [17] 王立柱, 高振宇, 耿亮, 等. 小直径薄壁直缝埋弧焊管焊接缺陷探讨[J]. 钢管, 2017, 46(4):44-47.

作者简介: 李 慧 (1991—), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要从事直缝埋弧焊管工艺研究工作。

收稿日期: 2021-12-27

修改返回日期: 2022-12-15

编辑: 董 超