

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2025.04.16

热输入对 TTS443 铁素体不锈钢激光焊接接头组织及性能的影响

韩丽营, 王 新

唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 063009

摘 要: 采用激光自熔焊对热轧态的 1.5 mm 厚的 TTS443 铁素体不锈钢薄板进行试验, 研究了不同焊接热输入对接头组织、显微硬度和静载拉伸性能的影响。结果表明, 随着热输入增加, 熔合区平均宽度增大, 熔合区为粗大的铁素体柱状晶组织, 母材区为细小均匀的铁素体组织, 热影响区晶粒虽有明显长大但接近母材。焊接热输入低于 20 J/mm 时, 焊缝未焊透; 焊接热输入大于 20 J/mm 时, 焊缝成形良好, 但随着热输入增加, 熔合线位置颜色加深, 焊缝美观度降低。当焊接热输入为 24 J/mm 时, 接头成形美观, 显微硬度从焊缝中心到热影响区一直到母材部分呈下降趋势, 且静载拉伸性能达到母材的 95% 以上, 能够满足实际生产应用。

关键词: 激光焊; 热输入; TTS443; 铁素体不锈钢

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)04-0122-06

Impact of Heat Input on the Structure and Properties of TTS443 Ferrite Stainless Steel Laser Welding Joints

HAN Liying, WANG Xin

Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co., Ltd., Tangshan 063009, China

Abstract: Laser self-fusion welding experiments were conducted on 1.5 mm thick hot-rolled TTS443 ferrite stainless steel sheets to study the effects of different welding heat inputs on the joint structure, microhardness, and static tensile properties. The results show that as the heat input increases, the average width of the fusion zone increases. The fusion zone has a coarse ferrite columnar grain structure, while the base metal zone has a fine and uniform ferrite structure. Although the grain size in the heat-affected zone grows significantly, it is close to that of the base metal. When the welding heat input is less than 20 J/mm, the weld is not penetrated; when the welding heat input is greater than 20 J/mm, the weld formation is good, but as the heat input increases, the color at the fusion line deepens, reducing the aesthetic appearance of the weld. When the welding heat input is 24 J/mm, the joint formation is aesthetically pleasing. The microhardness shows a decreasing trend from the center of the weld to the heat-affected zone and all the way to the base metal, and the static tensile properties reach more than 95% of the base metal, meeting the requirements for actual production applications.

Keywords: laser welding; heat input; TTS443; ferritic stainless steel

引用格式: 韩丽营, 王新. 热输入对 TTS443 铁素体不锈钢激光焊接接头组织及性能的影响[J]. 电焊机, 2025, 55(4): 122-127.

Citation: HAN Liying, WANG Xin. Impact of Heat Input on the Structure and Properties of TTS443 Ferrite Stainless Steel Laser Welding Joints[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(4): 122-127.

0 引言

近年来铁素体不锈钢的合金化设计逐渐向低

碳高纯度发展, 其力学性能和加工性能得到明显改善^[1-2]。TTS443 铁素体不锈钢是含 21%Cr 的超纯中铬铁素体不锈钢, 其 Cr 含量较高并且碳、氮、氧等间

收稿日期: 2024-10-22

作者简介: 韩丽营(1987—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事材料焊接工艺研究。E-mail: hly730@163.com。

隙元素含量极低,高温引起的脆化并不显著,具有媲美 304 奥氏体不锈钢的抗应力腐蚀开裂性能,且成本低廉,从而逐渐替代奥氏体不锈钢。但由于铁素体组织固有的晶粒易粗大特性^[3-4],它在焊接时面临一个最为突出的问题,即在焊接热循环下热影响区晶粒粗大引起的焊接接头塑性下降,阻碍其在实际生产中的推广使用^[5-6]。因此,焊接铁素体不锈钢时,应尽量选择能量密度集中的热源,如等离子弧焊、电子束焊、激光焊,并选择合适的焊接工艺。

TTS443 在实际应用中,主要应用于汽车箱体、建筑幕墙和电器设备等方面,对薄板使用较多,薄板的焊接加工建议选用更低的热输入。激光焊接具有能量密度高、焊接热影响区小、焊接变形小等优势,非常适合薄板不锈钢的成形制造。国内关于铁素体不锈钢激光焊接的研究主要涵盖工艺优化、组织性能调控、缺陷控制及实际应用等多个方向。青岛科技大学赵朋成^[7]团队通过数值模拟发现,负离焦(-0.1 mm)会导致穿透匙孔形成,引发背面飞溅,而零离焦(0 mm)和正离焦(+0.1 mm)下熔池形态稳定,焊缝成形良好。AISI 409 铁素体不锈钢激光焊接时,高功率(3.4 kW)易形成粗大枝晶结构,而低功率(2.6 kW)可能导致底切缺陷。通过优

化功率(如 3.2 kW)可平衡热输入,获得细晶组织并提升接头强度^[8]。目前,针对 TTS443 铁素体不锈钢的激光焊接研究较少,本文采用激光自熔焊对 1.5 mm 厚的 TTS443 铁素体不锈钢板进行拼板焊,研究了不同焊接热输入对焊接接头组织性能的影响,为 TTS443 铁素体不锈钢的工艺选择及推广应用提供了理论依据。

1 试验材料及方法

试验试板为热轧态的 TTS443 铁素体不锈钢,由太钢自主研发,板厚 1.5 mm,试焊板尺寸 150 mm×50 mm。采用斯派克火花直读光谱仪检测化学成分,详见表 1 所示,其化学成分特点为超低的碳、氮含量,可提高耐点蚀能力;较高的铬含量可提高耐腐蚀能力;不含有镍、钼等贵金属,成本低廉。力学性能为太钢提供,详见表 2 所示。试验中使用的焊接设备为唐山松下产业机器有限公司生产的 LAPRISS 激光焊接机器人系统,此系统为机器人一体化,高度集成体积小,干涉率低,运动速度快,操作简单;激光光束品质高,波长短,能够增加材料对激光的吸收,有利于实现高品质焊接,如图 1 所示。

表 1 TTS443 铁素体不锈钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of TTS443 ferritic stainless steel (wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	N
0.005	0.38	0.094	0.015	0.001	20.95	0.006	0.23	0.025	0.024	0.42	0.24	0.18	0.029	0.013

表 2 TTS443 铁素体不锈钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TTS443 ferritic stainless steel

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度/HV
480	330	32	150



图 1 LAPRISS 松下激光焊接系统

Fig. 1 LAPRISS panasonic laser welding system

试验采用 LAPRISS 激光焊接机器人系统特有的自旋工法进行薄板对接焊,以保持低变形量。激光离焦量设定为 0 mm,焊接速度为 6 m/min,通过调整激光功率来控制焊接热输入,选取了三组不同的热输入量样品进行性能分析。样品的激光功率及焊接热输入值如表 3 所示。试验中过小的热输入(HI=16 J/mm)导致未焊透,焊接工艺参数不合适,焊接试样舍弃。

表 3 激光焊接热输入

Table 3 Welding heat input

样品编号	激光功率/W	焊接速度/(m·min ⁻¹)	热输入 HI/(J·mm ⁻¹)
1#	2 500	6	20
2#	3 000	6	24
3#	3 500	6	28

注:HI=(P/V)×0.8(激光焊接热效率值为 80%)。

焊后,使用体式显微镜 Leica S9i 观测三组热输入条件下试样的外观形貌,试板整体成形美观,变形量小,表面无飞溅、裂纹、咬边等焊接缺陷。焊缝正面和背面成形情况如图2所示。焊接试样的正面成形优良,熔合线平整,随着焊接热输入的增加,熔宽增加,焊缝熔合线处的变色区域略有增加。焊接试样的背面熔透均匀,背透宽度随着热输入的增加

而变宽。焊接热输入大($HI=28\text{ J/mm}$)时,焊缝背透的熔合线位置发黑,氧化严重,这是由于Cr元素在焊接过程中与O元素结合形成 CrO_2 。在实际应用场合,为保证焊缝美观,不必进行焊后涂装工艺,要求材料表面光洁度越高越好,因此要求尽量减小焊接热输入。本文旨在探讨热输入对焊缝组织及性能的影响,因此不过分要求焊缝表面美观性。

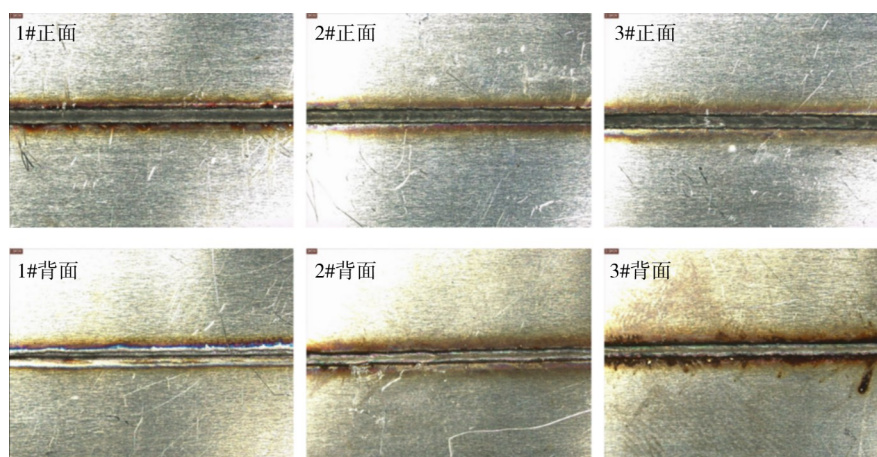


图2 不同焊接热输入下焊缝成形

Fig. 2 Weld forming under different welding heat inputs

2 试验结果与讨论

2.1 微观形貌及组织分析

通过金相显微镜 Leica DM ILM 对三组热输入条件下激光焊接接头放大50倍的微观形貌进行观测,发现热输入为 20 J/mm 时,焊缝熔合区呈V型,焊缝背透呈现出不平整不规则的外观;随着热输入增加到 24 J/mm ,焊缝熔合区呈X型;当热输入增加到 28 J/mm 时,焊缝熔合区也呈现X型,但熔合区宽度明显增加,由 $940\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $1\text{ }055\text{ }\mu\text{m}$,焊缝背透

较为平整。这是因为随着激光功率的增加,焊缝热输入量变大,熔化母材的量变多,焊缝形状变化且熔合区尺寸也随之变宽,如图3所示。

图4为放大100倍的激光焊接接头金相组织,可以看出,金相组织呈对称性分布,故每个热输入条件下焊接试样选取一侧的组织进行研究即可。图中三个不同热输入下的母材区组织均为细小均匀的铁素体组织,晶粒较小,晶粒度为6~7级。热影响区的晶粒尺寸相较于母材略有增大,但整体差异不大,且与普通熔化焊相比,激光焊的特点是加热速度快、受

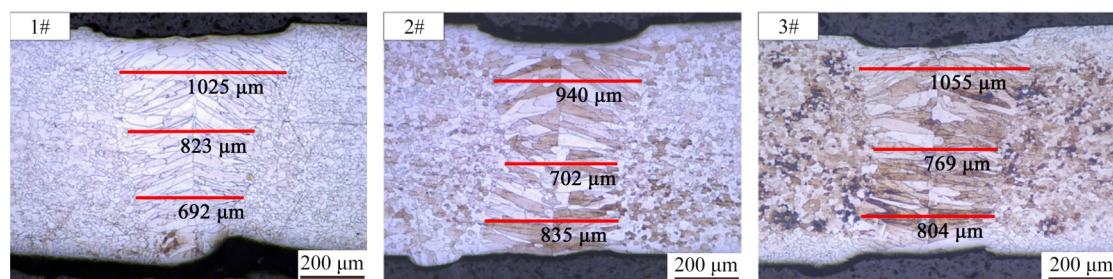


图3 焊缝熔合区显微组织

Fig. 3 Microstructure of weld fusion zone

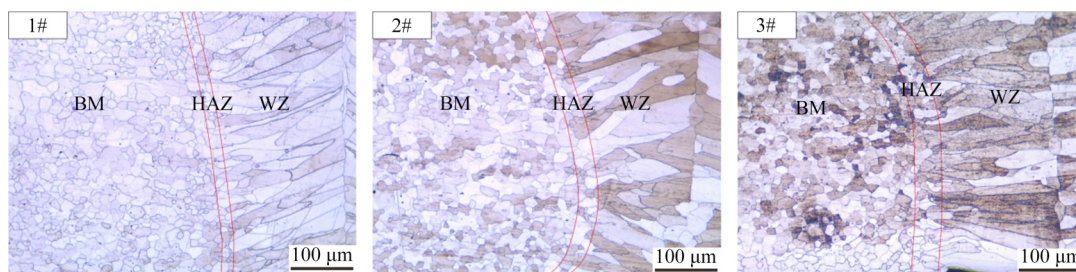


图4 不同热输入下 TTS443 焊接接头显微组织

Fig. 4 Microstructure of TTS443 welded joint under different heat inputs

热范围小、热量集中,因此其热影响区宽度很窄。图中3#试样的热影响区明显要比1#、2#试样宽,这是因为随着热输入的增加而热影响区宽度略有增宽。三个不同热输入下的焊缝区组织均为粗大的铁素体柱状晶组织,呈现为沿热流方向延伸的细长柱状晶粒,晶界平直且方向性显著,其晶体取向高度择优。这是因为激光自熔焊接时,激光能量迅速熔化试板两侧,形成窄而深的熔池,熔池两侧迅速冷却,铁素体晶粒沿熔池冷却方向快速生长,且由于侧面受到彼此的限制无法侧向生长,从而形成粗大的铁素体柱状晶。这一现象与晶体生长理论中,晶体沿着与导热方向相反的方向生长,同时也向着两侧方向生长,但由于受到相邻的正在生长的晶体所阻挡,因此晶体形成柱状形态的晶体的理论一致。

2.2 显微硬度

激光焊接接头的焊缝区晶粒较为粗大,为深入了解焊接接头的力学性能,试验采用华银维氏硬度计对焊接样品的显微硬度进行分析。从焊缝中心开始取点,沿着横向方向间隔0.2 mm依次取点进行测试,将测试结果汇总后形成不同热输入下激光焊接接头的显微硬度的分布曲线如图5所示。

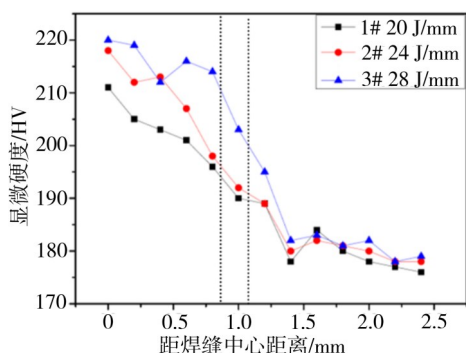


图5 不同热输入条件下焊接接头显微硬度分布曲线

Fig. 5 Microhardness distribution curves of welded joints under different welding heat inputs

由图5可知,焊缝中心的显微硬度值最高,随着距焊缝中心的距离增加,显微硬度值呈下降趋势,当距离超过1.5 mm左右后,显微硬度值变化趋于平缓。结合焊缝熔合区剖面图可以得知:焊缝中心的晶粒粗大,其显微硬度值在200~220 HV之间;焊缝热影响区较窄,其显微硬度值略高于母材,在190~200 HV之间。这是因为激光焊接能量高度集中,焊缝中心经历了重熔后再结晶的过程,形成了亚稳态组织,在这种快速凝固和再结晶的过程中,晶界在快速扩散过程中形成一定程度的位错堆积,位错的存在阻碍了位错的运动,从而提高了材料的硬度。而焊接热影响区较窄,晶粒尺寸没有明显长大,与母材区晶粒相差不大,同时,由于冷却速度快,没有脆硬析出相生成,因此硬度没有发生太大变化。

2.3 拉伸性能

通过微机控制的电子万能试验机WDW-300E对焊接接头的拉伸强度进行测试。受焊接试样尺寸的限制,未能严格按照GB/T2651—2023标准进行拉伸试样取样,取样位置和尺寸如图6所示,每组热输入条件选取3个非比例试样进行试验,测量其抗拉强度平均值。根据TTS443板材的实际使用场合,设计焊接试样过载拉伸试验,拉伸速度为0.3 mm/min。试验结果如表4所示。结果表明,采用不同热输入量进行激光自熔焊得到的焊接接头抗拉强度均在470 MPa以上,稍低于母材的抗拉强度,但能达到母材的95%以上,完全能够满足实际的使用要求。

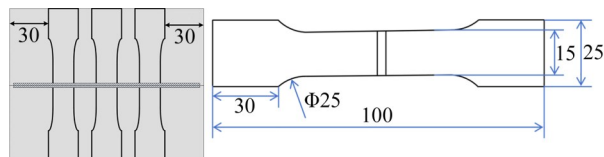


图6 拉伸试样取样及尺寸

Fig. 6 Sampling and size figure of tensile samples

表4 不同热输入下焊接接头的抗拉强度

Table 4 Tensile strength of welded joints under different heat inputs

序号	热输入/(J·mm ⁻¹)	抗拉强度/MPa
母材	—	480
1#	20	475
2#	24	477
3#	28	470

激光焊接接头的拉伸断裂宏观形貌如图7所示。焊接试样的拉伸断裂位置均在焊缝的熔合区,靠近熔合线的位置。这种断裂位置的特征与激光自熔焊的工艺特点密切相关。在激光自熔焊过程中,由于未使用焊丝或其他焊缝填充金属,焊缝金属的力学性能依赖于母材的重熔和再结晶过程。焊接热循环导致焊缝中心材料的组织发生变化,使得焊缝组织的性能和纯净度难以达到母材水平。此外,焊接接头处存在的应力集中效应也影响了其力学性能。断口处呈纤维状,边缘有明显的剪切唇,色泽灰暗,断口附近有宏观的塑性变形。

2.4 断口微观形貌分析

为进一步研究激光焊接接头的失效形式,选取与平均抗拉强度接近的拉伸试样断口进行SEM扫描电镜拍摄,获得不同激光焊接热输入量下接头拉伸

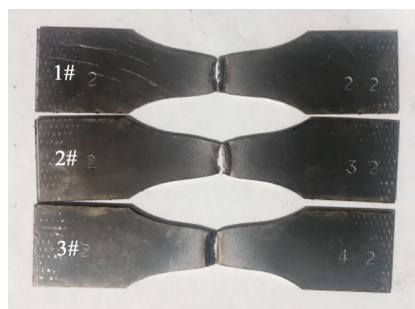


图7 焊接接头拉伸试样断裂形貌

Fig. 7 Cracking figure of welded joints

断口形貌,如图8所示。结果表明,三组热输入条件试样的断口形貌呈现典型的韧窝特征,表明断裂方式为韧性断裂。韧窝的实质是材料在微区范围内塑性变形过程中形成的显微空洞,经过形核、长大和聚集,最终相互连接导致材料断裂所留下的圆形或椭圆形凹坑。拉伸试验通过以一定速率不断加大载荷的方式拉伸试件,使试件承受的实际应力超过材料的屈服强度或强度极限,导致过载断裂。断裂机理主要包括局部位错密度的增加,促进亚裂纹的产生和扩展,最终形成宏观裂纹。试样1#和2#的断口形貌显示韧窝明显,有较深的圆形或椭圆形凹坑;试样3#的韧窝较浅,凹坑中出现明显的析出物。

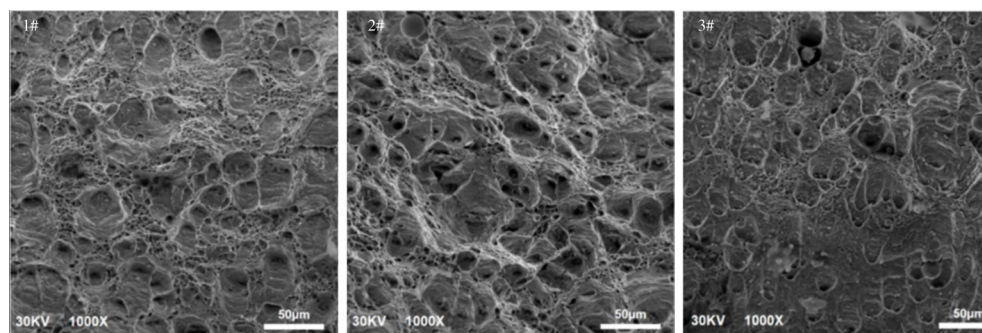


图8 不同热输入量下焊接接头拉伸断口形貌

Fig. 8 Tensile fracture morphology of welded joints under different heat inputs

通过扫描电镜附带的能谱仪(EDS)对试样3#拉伸断口的析出物成分进行分析,析出物位置见图9a,能谱见图9b。能谱分析结果表明,析出物主要为Nb和Ti的氮化物。铁素体不锈钢中,Ti和Nb是强烈的碳、氮化物形成元素,其析出温度远高于Cr₂₃C₆的析出温度且析出时间很短,可以在Cr₂₃C₆形成之前完全固定C和N,从而避免形成引起敏化的Cr碳氮化物。表5列出了析出物的能谱成分分析结果。在变形过程中,微观组织中的析出物会抑制位

错运动,导致应力集中,有利于微孔的形成,随着显微空洞长大和聚集,继而发展成韧窝^[9]。

3 结论

采用激光自熔焊,探讨了焊接热输入对1.5 mm厚的TTS443铁素体不锈钢焊接接头的焊缝成形、微观组织和力学性能的影响。主要结论如下:

(1)热输入的增大会导致熔合区宽度增大,熔合

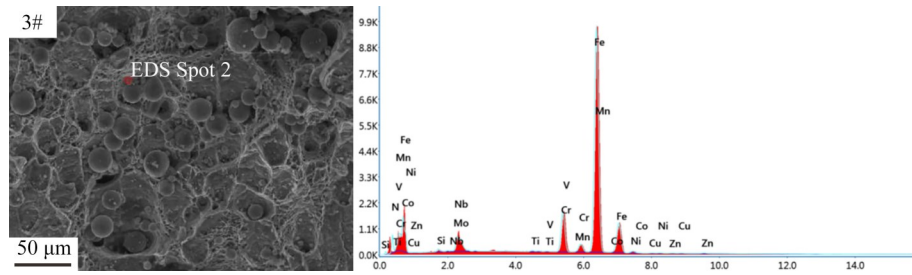


图 9 3#试样 EDS 分析

Fig. 9 EDS analysis of sample 3#

表 5 能谱成分分析(质量分数, %)

Table 5 Energy spectrum composition analysis (wt. %)

成分	Fe	Cr	Ti	Nb	N
3#	66.46	8.85	2.05	8.79	10.94

线位置颜色加深,焊缝成形美观度降低;过低的焊接热输入会导致焊缝未焊透,无法满足实际应用要求。

(2)焊缝区形成粗大的铁素体柱状晶组织,母材区保持细小均匀的铁素体组织。热影响区晶粒尺寸相较于母材略有增大,但整体差异不大。随着热输入的增大,热影响区宽度略有增宽,但总体而言,激光焊接的热影响区较窄,对焊接接头的力学性能影响较小。

(3)激光焊接热输入为 24 J/mm 时,焊接接头的抗拉强度达到母材的 95% 以上,满足实际应用需求。焊缝中心的显微硬度最高,并随着距离焊缝中心的距离增加而逐渐降低,最终趋于与母材硬度一致。断口微观形貌分析显示,断裂方式为韧性断裂,韧窝的形成与析出相的存在密切相关。

参考文献:

[1] 张心保. 新型低成本铁素体不锈钢焊接接头的微观结构及塑性研究[D]. 湖北:武汉科技大学,2023.
ZHANG X B. Study on the Microstructure and Plasticity-Toughness of a New Low-Cost Ferrite Stainless Steel Welded Joint[D]. Hubei: Wuhan University of Science and Technology, 2023.

[2] 刘振宇,江来珠. 铁素体不锈钢的物理冶金学原理及生产技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.

[3] 蔡淑娟,朱亮,龚练. 热输入对 430 铁素体不锈钢热影响区组织和韧性的影响[J]. 兰州理工大学学报, 2016,42(02):24-31.
CAI S J, ZHU L, GONG L. The effect of heat input on

the microstructure and toughness of the heat-affected zone of 430 ferrite stainless steel [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2016, 42(02): 24-31.

[4] 孙铭旭. 铁素体不锈钢超薄板冷焊工艺及接头组织与性能研究[D]. 辽宁:大连交通大学,2023.
SU M X. Study on the cold welding process and joint microstructure and properties of ultra-thin ferrite stainless steel[D]. Liaoning: Dalian Jiaotong University, 2023.

[5] 范沥元. 铁素体不锈钢焊接的研究和发展现状[J]. 机械制造文摘(焊接分册), 2014(02): 9-13.
FAN L Y. Research and Development Status of Ferrite Stainless Steel Welding [J]. Machinery Manufacturing Abstract (Welding Issue), 2014(02): 9-13.

[6] Xu L, Yang H F, Cui H, et al. Key technology and application of high power laser welding for railway vehicles [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2022, 43(4/5): 382-386.

[7] 高天,赵朋成,燕国帅,等. 430 铁素体不锈钢薄板激光焊接背面飞溅和熔池动态的数值模拟[J]. 电焊机, 2024, 54(08): 118-127.
GAO T, ZHAO P C, YAN G S, et al. Numerical Simulation of Back Spatter and Molten Pool Dynamics in Laser Welding of 430 Ferrite Stainless Steel Thin Plates [J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(08): 118-127.

[8] Palanivel R, Dinaharan I, Asfer m, et al. Effect of laser power on metallurgical and tensile properties of CO2 laser welded AISI 409 ferritic stainless steel tuber [J]. Opti and Laser Technology, 2025, 182: 112088.

[9] Doomra A, Singh B, Sandhu S S. Weldability studies of AISI 409 ferritic stainless steel thick plates using electron beam welding process [J]. International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering, 2021, 11(2): 55-67.