

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.08

大直径双直缝不锈钢焊管连续机组的开发及应用

谢 祎, 胡开磊, 沈晨霞, 莫培明, 马同杰, 郭思奇, 施慰卿

浙江德威不锈钢管业股份有限公司, 浙江 嘉兴 314000

摘要: 简述了国内外直缝焊管机组的研究情况, 并重点介绍了一种大直径双直缝不锈钢焊管连续机组的开发和应用情况。该机组采用双工位钢卷开卷装置和钢带在线自动对中及焊接装置、数控位移多角度调整的串联式柔性成形与排辊成形一体化在线成形技术、多枪复合焊接工艺和多工位焊接智能控制系统、在线自动切管及管端坡口加工一体化技术等, 实现了最大外径820 mm的大直径双直缝不锈钢焊管的生产, 且提高了生产效率, 降低了制造成本; 同时, 应用了不锈钢焊管专用MES管理系统, 可与该机组的控制系统有机结合, 实现产品的信息化管理和智能化制造。

关键词: 焊管; 不锈钢; 大直径; 双直缝; 连续机组; 智能制造

中图分类号: TG457.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0065-06

Development and Application of Continuous Mill for Large-sized Dual-straight Seam Stainless Steel Welded Pipe

XIE Yi, HU Kailei, SHEN Chenxia, MO Peiming, MA Tongjie, GUO Siqu, SHI Weiqing

Zhejiang Dewei Stainless Steel Piping Co., Ltd., Jiaxing 314000, China

Abstract: Briefed here in the essay are the research status concerning the straight weld pipe mill both at home and abroad. Focused on are the development and application of a continuous mill for large-sized dual-straight seam weld pipe. This mill is equipped with the 2-station steel coil unwinding device, and the steel strip online automatic centering and welding device, the multi-step progressive cold-bend formation system, the multi-gun composite welding process and multi-station welding intelligent control system, the online automatic pipe-cutting and pipe end beveling integration technology, etc., owing to which production of large-sized dual-straight seamless steel weld pipe with the maximum OD as 820 mm is realized with high productivity and low operation cost. Meanwhile the MES management system specialized for production of the stainless steel welded pipe is used. The system is capable of perfectly combining with the control system of the welding mill so as to realize information-based management and intelligent manufacturing of the product.

Keywords: welded pipe; stainless steel; large-size; dual-straight seams; continuous mill; intelligent manufacture

引用格式: 谢祎, 胡开磊, 沈晨霞, 等. 大直径双直缝不锈钢焊管连续机组的开发及应用[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 65-70.

Citation: XIE Yi, HU Kailei, SHEN Chenxia, et al. Development and Application of Continuous Mill for Large-sized Dual-straight Seam Stainless Steel Welded Pipe[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 65-70.

0 引言

我国不锈钢无缝钢管的加工技术成熟, 在各个领域广泛应用^[1-2], 但不锈钢焊管起步晚, 尤其大直径不锈钢管的发展相对滞后。原材料供给是大直

径不锈钢焊管核心制约因素, 国内热轧宽幅钢带产线有酒钢集团公司的700 mm、鞍钢联众与中国宝武钢1 780 mm、太钢2 250 mm等^[3], 其中2 250 mm产线生产的钢卷仅能满足最大外径711 mm不锈钢焊管的生产。受原材料的影响, 国内外不锈钢焊管生

收稿日期: 2025-10-21 修回日期: 2026-02-27

作者简介: 谢 祎(1984—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事金属材料的研发与制造。E-mail: xieyi3755@163.com。

产企业在设备选型时,通常以常规钢卷宽度为焊管机组直径的设计基础,直缝焊管机型主要集中在 $\varnothing 114\text{ mm}$ (含 $\varnothing 114\text{ mm}$ 机组)以下^[4], $\varnothing 219\text{ mm}$ 以上的不锈钢在线连续焊接生产机组数量不多,对于 $\varnothing 711\text{ mm}$ 以上的直缝不锈钢焊管无法实现在线连续成形焊接生产,只能采用UOE、JCO等单支成形工艺生产^[5],传统单支成形工艺涉及的工序多、生产效率低、成本高,交货期难以满足项目建设需求。国际上日本和意大利企业相继开发了可生产外径 630 mm 和 635 mm 的不锈钢焊管连续生产机组,分别采用FFX柔性成形技术和连续排辊成形技术^[6],被广泛推广应用^[7]。21世纪初期,我国引进了不同类型的不锈钢焊管制造设备,使不锈钢焊管在品种、工艺、质量等方面实现显著提升^[8],其中高频感应电阻焊只能用于制造要求不高的机械和结构用焊管^[9]。随着设备的多样化和制造能力的增加,不锈钢焊管的使用量也在逐年增加^[10]。

目前,小直径薄壁不锈钢焊管采用在线连续成形技术;大直径厚壁不锈钢焊管多采用离线UOE、JCO等辊压成形技术;外径超过 508 mm 的焊管,通常采用两张钢板先拼板,再成形、焊接、热处理、无损探伤、水压试验等多道工序制成。基于不锈钢钢卷宽度的限制和离线单支成形生产效率低、制造成本高、自动化水平低等行业现状,亟需开发一种可以采用不同宽度的钢卷在线连续成形制造大直径双直缝不锈钢焊管的生产机组,以打破传统制造工艺,既可以解决宽幅原材料的问题,又可以解决大直径直缝不锈钢焊管无法在线连续成形制造的技术瓶颈,提高生产效率,降低制造成本,提升设备自动化、智能化及信息管理水平。

1 机组开发与设计

1.1 机组设计

大直径双直缝不锈钢焊管连续机组以制造最大外径 820 mm 双直缝不锈钢焊管为设计目标,机组主要由错位式双工位开卷装置、矫平装置、钢带在线纵向自动对中及焊接装置、横剪装置、板材在线超声波探伤装置、柔性辊弯成形装置、自动焊接装置、在线热处理装置、定径装置、矫直装置、涡流

检测装置、数控切割及坡口加工一体化装置、智能化信息化控制系统等组成,机组设计如图1所示。本机组的核心技术是采用双开卷装置和在线纵向自动对中及焊接装置制成大宽幅钢板,实现大直径双直缝不锈钢焊管的在线连续生产,同时机组配置了在线无损检测装置、焊缝自动跟踪系统、MES管理系统等,提高了机组的智能化水平。

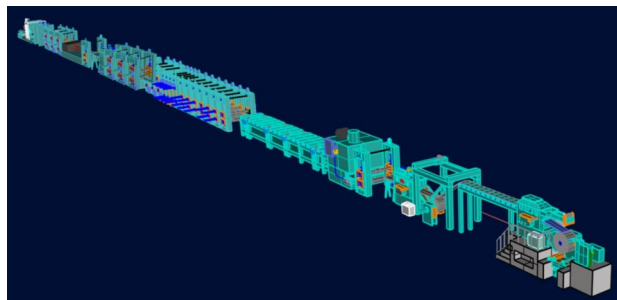


图1 大直径双直缝不锈钢焊管连续机组设计示意

Fig. 1 Schematic design of continuous production unit for large-size double straight-seam stainless steel welded pipes

大直径双直缝不锈钢焊管连续机组以不同宽度的两个钢卷为原材料,采用双工位在线开卷装置对两个钢卷同时开卷展平,由自动对中装置将两个钢卷边部及中心位置对齐,通过具有电弧自动跟踪系统和焊接熔池可视化控制的电熔焊焊接形成一条纵向焊缝的大宽幅钢带,钢带经多探头水浸式板材超声波探伤后,进入配有数控位移多角度调整的串联式柔性成形与排辊成形一体化在线连续成形机组中,在线渐进式冷弯成形形成管坯,采用高穿透力的等离子弧+钨极氩弧焊复合电弧焊焊接工艺形成大直径双直缝不锈钢焊管,经在线热处理、无损探伤等工序形成最终产品。在产品制程过程中,生产、检验以及设备运行等信息和数据通过专用制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)管理系统实时采集、分析和储存,实现产品过程可控、质量可控、信息溯源可控的信息化和智能化管理系统。

1.2 机组基本参数及工艺

大直径双直缝不锈钢焊管连续机组制造能力基本参数见表1,关键工艺参数见表2,生产工艺流程如图2所示。采用该工艺生产不锈钢焊管时,从原材料开卷到定尺切割及坡口加工均为在线流程化制造,机组自动化程度高,生产效率较传统工艺

表 1 机组制造能力基本参数

Table 1 Basic parameters of unit manufacturing capacity

生产材质	焊管规格/mm			最大成形板幅	最大生产速度	最大产能	机组功率
	外径	壁厚	长度	/mm	/(mm·min ⁻¹)	/(kg·h ⁻¹)	/kW
奥氏体、奥氏体-铁素体、镍基合金等	406~820	4.0~14.0	6 000~18 000	2 580	1 500	3 500	729

表 2 关键工艺参数

Table 2 Key process parameters

关键工序	焊管规格/mm			电流/A			电压/V			焊接速度	热处理温度
	外径	壁厚	长度	PAW	GTAW	GTAW	PAW	GTAW	GTAW	/(mm·min ⁻¹)	/℃
拼板焊接	820	10	6 000	300	300	210	29.1	18.6	15.9	210	1052
纵缝焊接				300	300	200	27.9	17.7	16.6	210	1055

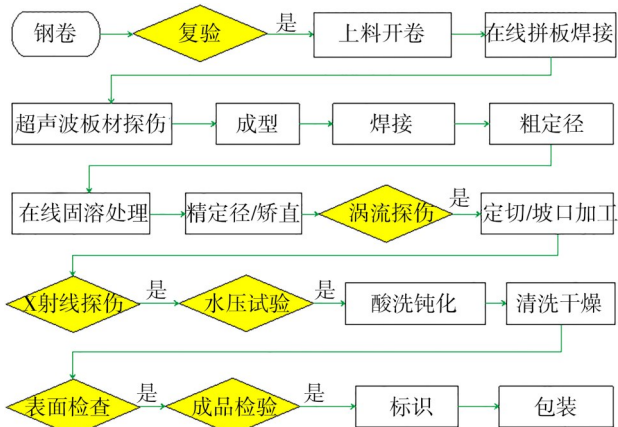


图 2 大直径双直缝不锈钢焊管生产工艺流程

Fig. 2 Process flow of large-size double straight seam stainless steel welded pipe production

显著提高。

1.3 机组技术特点

为了实现大直径不锈钢焊管的高效率、低成本生产,在国内外现有技术的基础上,浙江德威选择设计最大外径 820 mm 不锈钢焊管智能化连续生产机组,采用错位式双工位开卷装置同时将两个不同宽度的钢卷展开,并通过自动对中焊接装置焊接形成大宽幅钢带作为焊管连续生产的原材料,该工艺技术打破了不锈钢焊管连续机组单个钢卷生产模式;成形技术将 FFX 柔性成形技术与排辊成形技术融为一体,开发了具有自主知识产权的钢带冷弯成形技术,采用自动焊接工艺形成纵向直焊缝,实现“在线双直缝+连续冷弯成形”新模式生产大直径双直缝不锈钢焊管产品,大幅提高了生产效率,降低了生产成本。同时,为积极响应国家智能制造、信息化数字化政策,还开发了不锈钢焊管专用 MES 管理系统,以实现生产指令下达、工艺管理、生产进度

管理、质量过程控制、设备运行动态管理,以及生产、设备、工艺等数据采集、分析、统计、储存等信息化和智能化控制,改变了传统生产管理模式,提高了管理效率和产品质量高效溯源。

该机组的主要技术特点如下:

(1)开发了错位式双工位开卷装置和在线连续自动对中及焊接装置及制造技术。受不锈钢卷宽度的限制,加工制造 $\varnothing 820$ mm 不锈钢焊管需要宽度 2 500 mm 以上的钢卷,对原材料上游钢厂提出了更高的要求,为了有效地利用通用规格的原材料,错位式双工位开卷装置可以实现两个不同宽度的钢卷同步开卷,利用自动对中及焊接装置对齐钢卷边部并焊接形成具有一条纵向焊缝的大宽幅钢带,解决了大直径不锈钢焊管在线连续生产无原材料可用的技术难题,在提高生产效率、减少工序转运等方面有显著效果,是连续生产大直径不锈钢焊管的关键技术之一。

(2)开发了数控位移多角度调整的串联式柔性成形与排辊成形一体化在线成形技术。对现有成形技术进行了革新,将 FFX 柔性成形与排辊成形技术有机结合,自主设计了 5 组平辊+5 组旋转立辊组成的多步渐进式冷弯成形系统,实现粗成形段的模具完全兼容,生产不同规格的不锈钢焊管时不用更换成形模具,只需调整模具的位置与角度,实现 $\varnothing 406\sim 820$ mm 大直径不锈钢焊管的在线成形;同时,机组配置了数据自动采集系统,对成形模具位移和角度实时采集、分析并储存,同规格再次生产时,可实现快速精准调整,提高了生产效率。

(3)设计了多枪复合焊接工艺和多工位焊接智能控制系统。机组前工位进行钢带在线自动对中

焊接,后工位进行大直径管坯成形后的纵缝焊接,实现双直缝在线同步焊接,焊接工位配置了电弧自动跟踪和熔池可视化控制系统,对焊接质量进行实时监控,实现高效率低缺陷焊接生产。

(4)开发了在线自动切管及管端坡口加工一体化技术。传统不锈钢焊管通常采用带锯或圆盘锯进行产品定尺切断,定尺切断后进行离线坡口加工,存在效率低、切割变形大、切屑多等问题。该技术利用高速旋切加工装置,采用多刀头、多角度对不锈钢焊管进行定位切断和坡口加工,减少了离线二次坡口加工工序,实现大直径焊管的在线切管及坡口加工,且加工过程自动、高效和可靠。

(5)开发了不锈钢焊管专用MES管理系统,与机组自动化控制系统、无线通讯和网络数据有机结合,如图3所示。机组关键工序建立Profibus通讯系统并配置了高精度的线性传感器,实现数据采集、分析、储存及调用等信息化、数字化和智能化控制。

2 机组应用及产品质量情况

目前,该大直径双直缝不锈钢焊管机组已成功应用于浙江德威大直径不锈钢焊管产品的批量生产中,机组应用如图4所示。

为了验证该机组制造的大直径双直缝焊管产品的质量情况,选择牌号为06Cr19Ni10(S30408)、规格 $\varnothing 820\times 10$ mm、制造标准为GB/T 12771—2019《流体输送用不锈钢焊接钢管》的不锈钢焊管进行产品检验,包括化学成分、拉伸性能、工艺性能、冲击性能、腐蚀性能、金相组织等。

(1)在焊缝部位取样化学成分分析试样,试验方法按照GB/T 11170—2008《不锈钢 多元素含量的测定 火花放电原子发射光谱法(常规法)》进行,两条焊缝的化学分析结果见表3所示,化学成分试验结果合格。

表3 不锈钢焊管焊缝化学成分(质量分数,%)

Table 3 Chemical composition of weld seam in stainless steel welded pipes (wt. %)

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
焊缝I	0.043	0.34	1.29	0.034	0.0026	18.37	8.20
焊缝II	0.044	0.34	1.28	0.033	0.0024	18.30	8.16
GB/T 12771—2019 (S30408)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	18.00~20.00	8.00~11.00

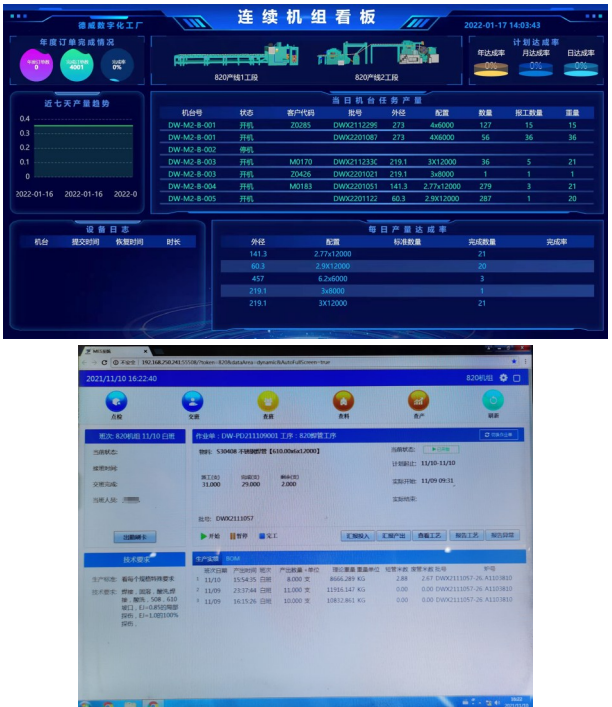


图3 机组MES系统

Fig. 3 Manufacturing execution system (MES) for the production unit



图4 大直径双直缝不锈钢焊管机组的应用

Fig. 4 Application of large-size double straight seam stainless steel welded pipe production line

(2)在焊缝位置取横向室温拉伸试样,并按GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试样 第1部分:室温试验方法》进行拉伸试验,焊缝横向拉伸试验测试结果如表4所示,拉伸试验结果合格。

(3)在焊缝位置取横向弯曲试样,每条焊缝各取一个正向弯曲试样和一个反向弯曲试样,试验方

表 4 不锈钢焊管室温拉伸试验测试结果

Table 4 Test results of room temperature tensile tests for stainless steel welded pipes

项目	抗拉强度 R_m /MPa	规定塑性延伸强度 $R_{p0.2}$ /MPa	断后伸长率 A_{50} /%
焊缝 I	656	289	56.5
焊缝 II	656	294	55.5
GB/T 12771—2019(S30408)	≥515	≥205	≥40

法按照 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》,弯芯直径 D 取 4 倍的试样厚度,弯曲角度为 180° ,试样弯曲后,焊缝区域没有出现裂纹和裂口。

(4)在焊缝位置取横向夏比 V 型缺口冲击试样,每条焊缝各取一组 3 个试样,试验方法按照 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》,试样尺寸为 $55\text{ mm}\times10\text{ mm}\times7.5\text{ mm}$,V 形缺口深度为 2 mm ,试验温度为 25°C ,试验结果见表 5。

(5)在焊缝位置取样,每条焊缝各取一组 2 个试样进行晶间腐蚀试验。试验方法按照 GB/T 4334—2008《金属和合金的腐蚀 不锈钢晶间腐蚀试验方法》E 法,磨光晶间腐蚀试样在微沸的硫酸铜、硫酸水溶液中连续腐蚀 16 h 后弯曲 180° ,试样弯曲后皆未见晶间腐蚀裂纹,试验结果合格。

(6)取样并分析焊接接头处的金相试组织,结果如图 5~图 7 所示。分析发现:母材组织为分布均匀的奥氏体,焊缝组织为比较均匀的胞状奥氏体组

表 5 不锈钢焊管焊接接头冲击试验结果

Table 5 Impact test results of welded joints of stainless steel welded pipes

项目	吸收能量 A_{KV2} /J			剪切断面率/%			断裂情况
	1	2	3	1	2	3	
焊缝 I	109	108	113	100	100	100	断裂
焊缝 II	121	130	129	100	100	100	断裂

织和少量的树枝状分布的铁素体,热影响区组织为奥氏体组织和少量的链状分布的铁素体组织。

综上所述,该机组生产的大直径双直缝不锈钢焊管产品各项指标均符合 GB/T 12771—2019《流体输送用不锈钢焊接钢管》中要求,产品质量稳定可靠。

3 结 论

大直径双直缝不锈钢焊管连续机组的设计开发及应用结束了国内外大直径双直缝不锈钢焊管

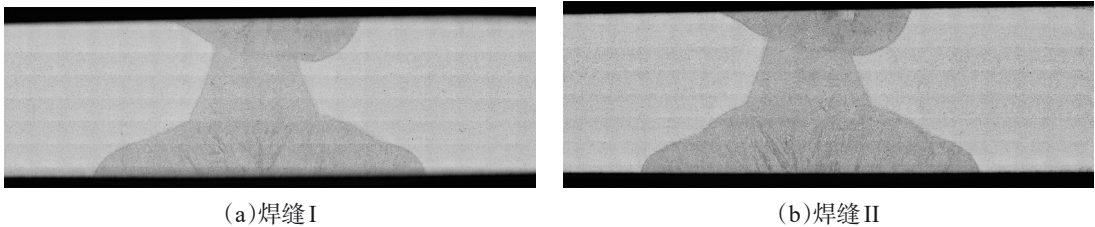


图 5 不锈钢焊管焊接接头全视场扫描金相图

Fig. 5 Full-field scanning metallographic micrograph of the welded joint of stainless steel welded pipe

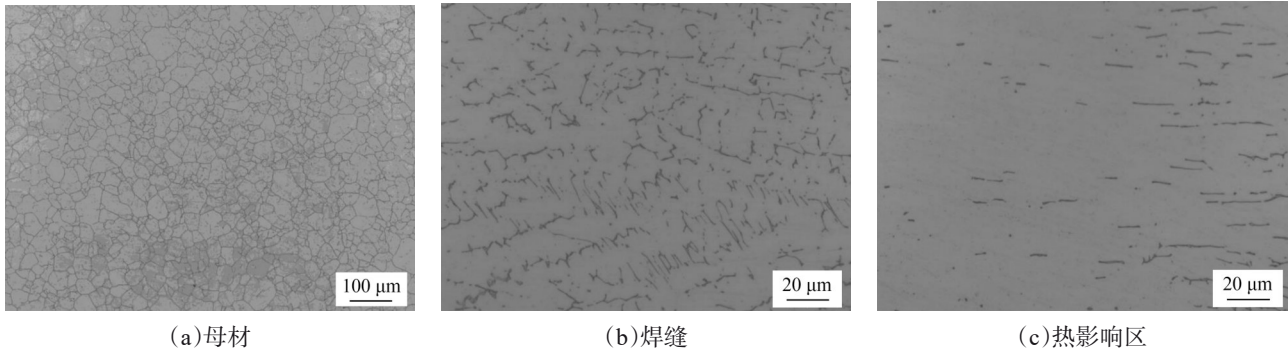


图 6 焊缝 I 金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of weld seam I

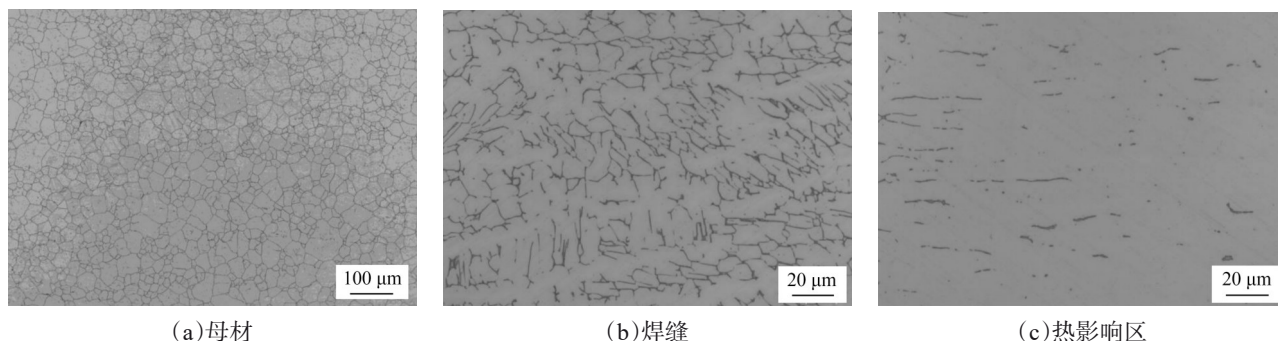


图7 焊缝II金相组织

Fig. 7 Metallographic structure of weld seam II

无法在线连续成形生产的历史,打破了传统JCO单张板成形加工工艺和不锈钢连续机组单个钢卷生产模式,解决了在线连续生产大直径焊管无料可用和离线大直径焊管工序多、生产效率低等问题,实现大直径不锈钢焊管的批量生产。该机组不仅满足了下游企业对不锈钢焊管高质量、全流程质量追溯和短周期交付等要求,同时对不锈钢产业链上下游协同发展起到了辐射带动作用,促进不锈钢焊管行业向高质量、高效率、智能化方向发展。该机组针对小批量、多规格订单的换型调试成本与周期偏高,在中小批量定制化生产场景下的经济性弱于传统JCO等单支成形工艺。机组在全工序参数实时采集、成形质量在线预测、工艺参数闭环调控和机组数字孪生平台搭建等方面仍有提升空间。

参考文献:

- [1] 付新彤,管志杰.我国不锈钢钢管发展情况[J].冶金经济与管理,2018(1):32-35.
- [2] 李平舟.不锈钢无缝管的消费市场及其需求探析[J].特钢技术,2015,21(4):8-12.
LI P Z. Analysis on Consumption Market and Its Demand on Stainless Steel Seamless Pipe [J]. Special Steel Technology, 2015, 21(4): 8-12.
- [3] 冀志宏,王兴艳.我国不锈钢产业现状分析及发展建议[J].冶金经济与管理,2017(1):40-43.
- [4] 彭在美.国内外直缝焊管机组的发展趋势[J].钢管,1998,27(4):13-18.
PENG Z M. Development Trend of Straight Welded Pipe Mills Both at Home and Abroad [J]. Steel Pipe, 1998, 27(4): 13-18.
- [5] 张洪坤,韩立坤.直缝焊管JCO成型机管型闭环控制系统设计及应用[J].钢管,2026,55(1):82-86.
ZHANG H K, HAN L K. Design and Application of Tube Shape Closed-loop Control System of JCO Forming Machine for LSAW Pipe [J]. Steel Pipe, 2026, 55(1): 82-86.
- [6] 马立东,陈硕,孙跃文.焊管FFX成形初成形段显式动力仿真及实验[J].塑性工程学报,2018,25(2):207-210.
MA L D, CHEN S, SUN Y W. Simulation and experiment on pre-forming section of welded pipe FFX forming with explicit dynamic algorithm [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(2): 207-210.
- [7] 徐阿敏,吉海,李洁泉,等.FFX成型技术在不锈钢焊管生产中的应用[J].焊管,2024,47(3):64-68.
XU E M, JI H, LI J Q, et al. Application of FFX Forming Technology in Stainless Steel Welded Pipe Production [J]. Welded Pipe and Tube, 2024, 47(3): 64-68.
- [8] 何德孚,曹志樑,周志江,等.高功率激光深熔焊及其在不锈钢焊管生产中应用的障碍(一)——Φ630 mm连续不锈钢焊管机组焊接方法研究[J].焊管,2010,33(9):19-28.
HE D F, CAO Z L, ZHOU Z J, et al. High Power Laser Deep-penetration Welding and Its Troubles During the Production of Stainless Welded Pipe (1) —A Kind of Welding Method for Φ630mm Stainless Steel Continuous Welded Pipe Unit [J]. Welded Pipe and Tube, 2010, 33(9): 19-28.
- [9] 程继兵,刘明,余晗,等.直缝埋弧焊管生产智能化转型关键技术与路径探索[J].焊管,2025,48(4):11-17.
CHENG J B, LIU M, YU H, et al. Exploration of Key Technologies and Pathways for Intelligent Transformation of SAWL Pipe Production [J]. Welded Pipe and Tube, 2025, 48(4): 11-17.
- [10] 何惠平.胡开磊在新时代的浪潮中谱写“中国智造”的传奇故事[N].中国冶金报,2025-04-03(007).DOI: 10.28153/n.cnki.ncyjb.2025.000765.