doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2026.05.003

试验研究

冷凝器管板N10276合金带极埋弧堆焊工艺研究与应用

黄孝鹏[1],王凯威[2]
(1.中化鲁西工程有限公司,山东聊城 252211;2.聊城职业技术学院 智能制造学院,山东聊城 252000)

摘　要:为探究带极埋弧堆焊工艺在大直径换热器管板上堆焊N10276耐蚀层的可行性,以某化工装置强氯腐蚀环境下服役的冷凝器16MnⅢ管板(∅2 430 mm×60 mm)为研究对象,开展镍基合金N10276堆焊工艺试验。采用H276焊带配合SJ86B焊剂的带极埋弧堆焊方案,通过优化过渡层与耐蚀层焊接参数,配套实施≥80 ℃预热、低热输入(过渡层≤1.78 kJ/cm^2,耐蚀层≤1.73 kJ/cm^2)及严格道间温度控制(过渡层100~200 ℃,耐蚀层≤100 ℃)等工艺措施,完成过渡层消应力热处理并开展系统工艺评定;对堆焊层进行了无损检测、化学成分、电化学测试、晶间腐蚀及腐蚀前后弯曲性能对比检测。结果表明,堆焊层与N10276原材料的电化学腐蚀行为相当,晶间腐蚀速率为9.3 mm/a,满足设备制造技术文件腐蚀速率≤12 mm/a的要求;腐蚀前后弯曲试验未出现裂纹等缺陷。研究表明,采用该工艺可在16MnⅢ材质的大直径管板上获得耐蚀性能与N10276原材料相当的堆焊层,工艺方案可行,可为同类大直径管板镍基合金耐蚀层制备提供工程参考。

关键词:N10276合金;冷凝器;管板堆焊;带极埋弧堆焊
中图分类号:TH49;TG146;TG457　　**文献标志码:**A

Research and application of strip submerged arc surfacing process for N10276 alloy on condenser tube sheet

Huang Xiaopeng[1], Wang Kaiwei[2]
(1.Sinochem Luxi Engineering Co., Ltd., Liaocheng 252211, China;
2.School of Intelligent Manufacturing, Liaocheng Vocational and Technical College, Liaocheng 252000, China)

Abstract: To investigate the feasibility of strip submerged arc surfacing technology for surfacing N10276 corrosion-resistant layer on the tube sheet of a large-diameter heat exchanger, a nickel-based alloy N10276 surfacing process test was carried out taking the condenser 16MnⅢ tube sheet (∅2 430 mm×60 mm) serving in a strong chlorine corrosion environment of a chemical plant as the research object. A strip submerged arc surfacing scheme using H276 strip with SJ86B flux was adopted. Through optimizing the welding parameters of the transition layer and the corrosion-resistant layer, and implementing supporting process measures such as preheating at larger than 80 ℃, low heat input (transition layer≤1.78 kJ/cm^2, corrosion-resistant layer≤1.73 kJ/cm^2), and strict interpass temperature control (transition layer 100~200 ℃, corrosion-resistant layer≤100 ℃), the stress relief heat treatment of the transition layer was completed and systematic procedure qualification was carried out; the surfacing layer was subjected to non-destructive testing, chemical composition analysis, electrochemical testing, intergranular corrosion testing, and comparative testing of bending performance before and after corrosion. The test results show that the electrochemical corrosion behavior of the surfacing layer is comparable to that of the N10276 raw material, and the intergranular corrosion rate is 9.3 mm/a, which meets the requirement of corrosion rate≤12 mm/a in the equipment manufacturing technical documents; no defects such as cracks appeared in the bending tests before and after corrosion. The research shows that by adopting this process, a surfacing layer with corrosion resistance comparable to that of N10276 raw material can be obtained on a large-diameter tube sheet of 16MnⅢ material. The process scheme is feasible and can provide an engineering reference for the preparation of nickel-based alloy corrosion-resistant layers on similar large-diameter tube sheets.

Key words:N10276 alloy; condenser; tube sheet surfacing; strip submerged arc surfacing

收稿日期:2026-02-13　修回日期:2026-04-30

0 引言

N10276是一种镍基耐蚀合金，具有优异的力学性能和耐腐蚀性[1]，常用于强腐蚀环境下的压力容器。鉴于其价格昂贵，工程上通常采用爆炸复合或堆焊工艺，将其应用于管板、筒体内壁、封头内表面及接管内壁等关键部位，以解决普通不锈钢无法应对的严重腐蚀问题。本文研究的某化工项目承制的冷凝器设备，管程主要介质为碳酰二氯，管板长期暴露于湿氯气、氯化氢等强腐蚀性介质环境中，其耐腐蚀性能将直接决定设备的服役寿命。因此，在管板表面制备N10276耐蚀层是设备制造过程中最关键、难度最大的工序之一。考虑到管板在钻孔加工及后期服役运行过程中，爆炸复合界面可能出现剥离、鼓包或缝隙腐蚀等问题[2]；同时，大尺寸、特定形状的复合板采购周期长、设计调整灵活性差。综合上述因素，本设备管板最终采用在低合金钢基材上堆焊N10276合金耐蚀层的技术方案。

文中研究的冷凝器管板材料为16MnⅢ，其直径为∅2 430 mm，厚度60 mm，设备技术文件要求管板的堆焊厚度至少为5 mm。目前，常见的镍基合金堆焊工艺主要有手工焊条电弧堆焊、自动TIG堆焊、带极电渣堆焊和带极埋弧堆焊等[3-12]。因管板堆焊量较大，采用手工焊条电弧堆焊或自动TIG堆焊工艺存在熔敷效率低、成本偏高等弊端[3-5]，难以满足大面积堆焊的工期与成本要求；相比之下，带极堆焊工艺具备较高的焊接效率且工艺较为成熟[6-10]，是满足该大直径管板N10276堆焊要求的较优选择。

以往针对N10276的带极埋弧堆焊及带极电渣堆焊技术的研究与工程应用，大多集中于筒体、封头、接管内壁等部位的耐蚀层制备领域。刘鸿彦等[7]采用带极埋弧堆焊工艺，在SA302 Gr.B分离器筒体内壁制备了C276耐蚀层，并通过纵向压道与分区对称施焊相结合的方法，有效控制了焊接变形；张继亮等[8]针对PTA反应器腐蚀问题，在2.25Cr-1Mo基材上采用带极电渣堆焊，实现了E309L+E347+C276多层耐蚀层的堆焊。然而，上述研究对象均为非换热器管板。对于大型换热器管板的带极堆焊，现有研究主要集中在不锈钢和其他镍基合金材质的耐腐蚀层制备。官云胜[9]针对直径∅4 000 mm、材质为20MnMo的锻件管板，采用埋弧带极堆焊工艺成功制备了不锈钢耐蚀层，并借助加强筋刚性固定及压力机校形等手段解决了变形问题；李双燕[10]率先将带极电渣堆焊技术应用于压水堆核电站蒸汽发生器管板大面积Inconel 690耐蚀层堆焊，使堆焊层一次合格率达99%以上。然而，目前对于大尺寸管板N10276镍基合金的系统性带极堆焊工艺，相关研究仍然较少。

因此，本文以该冷凝器管板为研究对象，开展N10276合金带极埋弧堆焊工艺研究。主要研究内容包括：开展焊接工艺评定，优化确定过渡层与耐蚀层的焊接工艺参数；通过电化学测试、晶间腐蚀试验、腐蚀前后弯曲性能对比、化学成分分析及无损检测，系统评价堆焊层的性能；优化过程管控，控制焊接变形。通过系统研究，建立大尺寸管板N10276带极埋弧堆焊的完整工艺参数体系，为同类设备制造提供参考依据，提高设备在强氯腐蚀环境下长期服役的可靠性。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

焊接试验所用基材试板材料为16MnⅢ，按NB/T 47008—2017《承压设备用碳素钢和合金钢锻件》要求，供货状态为正火+回火，该材料具有优良的综合力学性能和焊接性，广泛应用于制造中低压容器、换热器管板及大型储罐等化工设备的主体承压部件；在腐蚀性介质环境下，它多用作复合板的基层，为设备提供结构强度支撑。试板基材16Mn的化学成分如表1所示。

表1 试板基材16Mn的化学成分

Tab.1 Chemical composition of 16Mn base material for test plate %

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P
数值	0.17	0.23	1.30	0.10	0.05	0.03	0.003	0.007

试板的堆焊过渡层与耐腐蚀层均采用H276焊带（规格0.5 mm×60 mm），并配合SJ86B焊剂（规格12~60目）进行焊接。焊材质量证明书中所列化学成分见表2、表3，符合GB/T 37791—2019《耐蚀合金焊带》、NB/T 47018—2017《承压设备用焊接材料订货技术条件》中的要求。

1.2 焊接方法与设备

堆焊采用带极埋弧堆焊工艺，选用MZ-1250Ⅳ型堆焊焊机。焊接机头结构如图1所示。

表2 焊带与熔敷金属化学成分

Tab.2 Chemical composition of welding strip and deposited metal %

类别	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	Co	Fe	Cu	W	V
H276焊带	0.01	0.04	0.61	0.004	0.005 9	15.00	59.63	15.41	0.01	4.10	0.02	3.71	0.13
熔敷金属（H276+SJ86B）	0.012	0.3	0.56	0.001 5	0.005 9	14.99	59.22	15.2	0.01	4.31	0.04	3.54	0.18

表3 焊剂SJ86B化学成分

Tab.3 Chemical composition of SJ86B flux %

项目	$SiO_2+Al_2O_3+TiO_2$	MnO+CaO+MgO	CaF_2	S	P	机械夹杂物[1)]
数值	30	15	20	0.011	0.018	0.12

1)机械夹杂物为焊剂中机械混入的铁粒、氧化皮等外来杂物，按质量分数计。

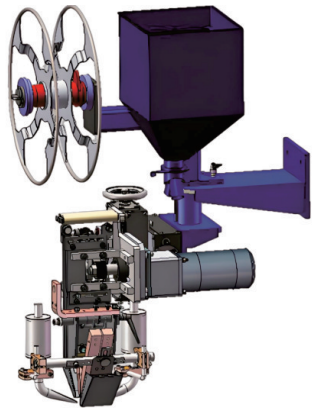


图1 带极堆焊机头结构

Fig.1 Structure of strip surfacing welding head

1.3 具体焊接工艺实施过程

1.3.1 堆焊前准备

堆焊试板规格为600 mm×350 mm×40 mm，堆焊前对试件待堆焊面进行清理，消除油污、铁锈等污染物，并打磨抛光，然后对待堆焊面做100%磁粉检测，质量符合NB/T 47013.4—2015《承压设备无损检测 第4部分：磁粉检测》中Ⅰ级要求。

1.3.2 堆焊过程

将检测合格的试件固定，待堆焊面朝上，先沿直线堆焊过渡层，焊道位置与堆焊层厚度如图2所示，相邻焊道的搭接量控制在5~10 mm。堆焊工艺参数见表4。因16Mn属于低合金高强度钢，焊接时需按照NB/T 47015—2011《压力容器焊接规程》中推荐的预热要求，进行≥80 ℃的预热处理；同时考虑到镍基合金对热输入敏感，过高的道间温度易引发热裂纹的这一材料特性[13]，在过渡层堆焊过程中，将道间温度严格控制在100~200 ℃区间内。在此温度范围内堆焊，既可以降低16Mn母材的焊接冷却速度，有效防止冷裂纹产生，也能兼顾过渡层的焊接性要求，促进焊道间的金属熔合，保证过渡层的组织性能。

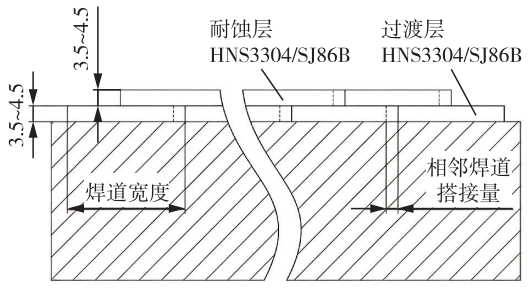


图2 堆焊示意

Fig.2 Surfacing schematic

表4 试件堆焊工艺参数

Tab.4 Surfacing process parameters of test piece

焊层	焊接方法	焊带/焊剂型号	焊带规格/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/（cm·min^{-1}）	焊接热输入量/（kJ·cm^{-2}）	道间温度/℃
过渡层	SAW	H276/SJ86B	0.5×60	900~950	25~30	16~18	≤1.78	100~200
耐蚀层	SAW	H276/SJ86B	0.5×60	930~980	25~30	17~20	≤1.73	≤100

过渡层堆焊完成后，清理焊接表面，对表面进行100%渗透检测，等级评定符合NB/T 47013.5—2015《承压设备无损检测 第5部分：渗透检测》中Ⅰ级要求。

将检测合格的试件置于热处理炉中进行消应力热处理。考虑到N10276合金在敏化温度区间（600~900 ℃）易析出晶间碳化物，进而降低材料的耐晶间腐蚀性能[14-15]，因此，本次消应力热处

理的温度控制在540~600 ℃范围内。在此温度区间内，按照GB/T 30583—2014《承压设备焊后热处理规程》中要求将保温时间延长至3~5 h，以补偿温度偏低带来的影响，既实现焊接残余应力的降低，减少后续耐蚀层堆焊过程中产生变形和裂纹的风险，同时也避免对耐蚀层的组织稳定性产生不利影响。

需要注意的是，N10276合金与16Mn钢两种材料的热膨胀系数不同，在20~600 ℃温度范围内，N10276的平均线膨胀系数约为12.8×10^{-6}/℃[13]，16Mn钢（参考Q345R）约为14.6×10^{-6}/℃[16]。在热处理的加热与冷却过程中，膨胀与收缩的不同步，可能在界面区域引起附加的热应力。因此，本工艺采取了以下措施：（1）严格控制升温速率≤100 ℃/h、降温速率≤120 ℃/h，减小温度梯度；（2）控制出炉温度≤400 ℃，避免因膨胀系数差异较大而产生较大的热应力，同时过渡层化学成分梯度分布能够在一定程度上减小基材与耐蚀层之间的物理性能突变，缓解界面处的应力集中。具体消应力热处理工艺如表5所示。

表5 过渡层消应力热处理工艺

Tab.5 Stress relief heat treatment process for transition layer

保温温度/℃	保温时间/h	升温速率/（℃·h^{-1}）	降温速率/（℃·h^{-1}）	入炉/出炉温度/℃
540~600	3~5	≤100	≤120	≤400

热处理完成后，再按图2所示位置沿直线堆焊耐蚀层，堆焊时将耐蚀层的焊缝与过渡层的焊缝相互错开，堆焊焊接工艺参数见表4。为抑制多道堆焊过程中的热累积效应，避免已焊焊道及热影响区因反复受热而产生过度偏析和碳化物沉淀，进而降低耐蚀性，在耐蚀层堆焊过程中，需严格控制道间温度≤100 ℃，配合≤1.73 kJ/cm^2的低热输入，以加快熔池冷却，缩短高温停留时间，同时细化晶粒、提升堆焊层致密性与组织均匀性，保证Cr，Mo，W等合金成分稳定。

堆焊完成后，清理焊接表面，对耐蚀层进行100%渗透检测，质量符合NB/T 47013.5—2015中Ⅰ级要求。

2 试验结果与分析

2.1 外观及无损检测

测量堆焊层厚度为7.93 mm。对堆焊层外观进行检测，焊缝成形较好，焊道均匀错开，未发现肉眼可见缺陷。按照NB/T 47013.5—2015要求，对堆焊层表面进行100%渗透检测，质量等级评定为Ⅰ级。

2.2 试件化学成分分析

按照NB/T 47014—2011《承压设备焊接工艺评定》中规定的化学成分分析测定方法，从堆焊层侧面钻孔制取屑片试样，采用光谱分析法对堆焊层屑片开展多点成分分析，结果取平均值，并与GB/T 15007—2017《耐蚀合金牌号》中要求进行对比，所得主要元素成分值均在标准要求范围内。相关分析结果见表6。

表6 堆焊层化学成分光谱分析结果

Tab.6 Spectral analysis results of chemical composition of surfacing layer %

元素	C	Cr	Fe	Mo	W	Co	V	Si	Mn	P	S	Ni
标准要求（GB/T 15007—2017）	≤0.010	14.5~16.5	4.0~7.0	15.0~17.0	3.0~4.5	≤2.5	≤0.35	≤0.08	≤1.00	≤0.040	≤0.030	余量
实测成分	0.005	14.8	5.2	16.1	3.6	1.6	0.2	0.004	0.08	0.006	0.005	58.2

与表2中焊带成分对比可知，堆焊层Fe含量由焊带的4.10%升至5.2%，主要原因为堆焊过程中16Mn母材对熔敷金属的稀释；C含量0.005%，低于标准要求上限，Cr，Mo，W等耐蚀合金元素含量均处于标准中上限水平。Fe含量仍处于标准规定的4.0%~7.0%范围内，表明耐蚀层堆焊过程中，采用≤1.73 kJ/cm^2的低热输入、≤100 ℃的道间温度的工艺，有效控制了母材稀释率，保证了堆焊层的合金成分与耐蚀性能。

2.3 电化学腐蚀行为分析

2.3.1 3.5%NaCl溶液中的动电位极化行为

为进一步从腐蚀动力学角度评价堆焊层在Cl^-介质中的耐蚀性能，并以N10276原材料为基准分析堆焊工艺对合金耐蚀性的影响，采用CS310M电化学工作站，按照GB/T 24196—2009《金属和合金的腐蚀 电化学试验方法 恒电位和动电位极化测量导则》中的要求开展动电位极化对比测试。分别以取自堆焊耐蚀层表面的试样（规

格 50 mm×50 mm×3 mm）和 N10276 原材料试样（规格 60 mm×60 mm×10 mm）作为工作电极（试样经环氧树脂封装，暴露面积 100 mm^2，工作面逐级打磨并抛光），铂电极为辅助电极，饱和甘汞电极（SCE）为参比电极；试验介质选用 3.5%NaCl 溶液，试验温度为室温（23.9 ℃）。将试样置于介质中浸泡，待开路电位稳定后，以 0.167 mV/s 的扫描速率进行动电位极化测试。极化曲线见图 3，拟合结果见表 7。

由图 3 可以看出，2 种试样的阳极分支均表现出显著的钝化特征：在自腐蚀电位以上区间，阳极电流密度长期稳定维持在 10^{-7}~10^{-6} A/cm^2 的低水平，形成钝化平台；当阳极电位正向移动至约 0.1 V（SCE）后，电流密度迅速上升，钝化膜发生击穿。对比数据显示，堆焊层的自腐蚀电流密度与腐蚀速率均略低于 N10276 原材料，二者处于同一数量级，表明堆焊层的钝化能力未因焊接热循环而降低。

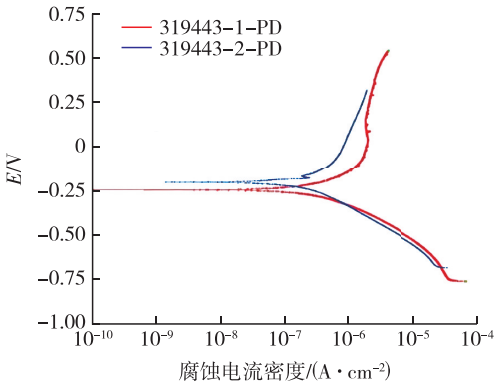


图 3 堆焊层与 N10276 原材料在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig.3 Potentiodynamic polarization curves of surfacing layer and N10276 raw material in 3.5% NaCl solution

表 7 堆焊层与 N10276 原材料在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化拟合参数

Tab.7 Potentiodynamic polarization fitting parameters of surfacing layer and N10276 raw material in 3.5% NaCl solution

试样	试样编号	开路电位 E_{OCP}/（V，SCE）	自腐蚀电位 E_{corr}/（V，SCE）	自腐蚀电流密度 i_{corr}/（A·cm^{-2}）	腐蚀速率/（mm·a^{-1}）
堆焊层	319443-1	−0.261	−0.252	3.19×10^{-7}	0.006 5
N10276 原材料	319443-2	−0.185	−0.209	4.99×10^{-7}	0.010 1

由表 7 可知，堆焊层与 N10276 原材料在中性 Cl^- 介质中均表现出低腐蚀电流密度及自发钝化特征。这一现象主要源于 N10276 合金的成分特性：堆焊层 Cr 含量达 14.8%（见表 6），可在表面生成以 Cr_2O_3 为主的致密富 Cr 钝化膜，将基体与侵蚀性介质隔离[17]；Mo，W 的合金化作用，进一步提高了钝化膜在 Cl^- 环境中的稳定性与再钝化能力，抑制了由 Cl^- 吸附诱发的局部活化溶解[18-19]。

2.3.2 硫酸铁-50% 硫酸溶液中堆焊层与 N10276 原材料的极化行为对比

为评价堆焊工艺对 N10276 合金耐蚀性能的影响，以 N10276 原材料为对比试样，在硫酸铁-50% 硫酸溶液中进行动电位极化对比测试。试验介质为按 GB/T 15260—2016《金属和合金的腐蚀 镍合金晶间腐蚀试验方法》中方法 A 配制的硫酸铁-50% 硫酸溶液（质量分数 50% 的硫酸溶液中每 600 mL 加入 25 g 水合硫酸铁），试验温度为室温（25 ℃）。采用 VersaSTAT 3 电化学工作站搭建三电极体系，分别以 N10276 原材料试样（1#）和堆焊层试样（2#）为工作电极（堆焊层试样工作面取自耐蚀层表面，逐级打磨并抛光，有效暴露面积 100 mm^2），铂电极为辅助电极，饱和甘汞电极（SCE）为参比电极。试样浸入介质后，连续监测开路电位 4 800 s，待电位稳定后开展 Tafel 极化曲线测试，电位扫描区间设定为相对开路电位 ±0.25 V，扫描速率为 0.5 mV/s。每种试样各测试 2 件平行样，极化曲线见图 4，极化曲线经 Tafel 拟合解析后的结果见表 8。

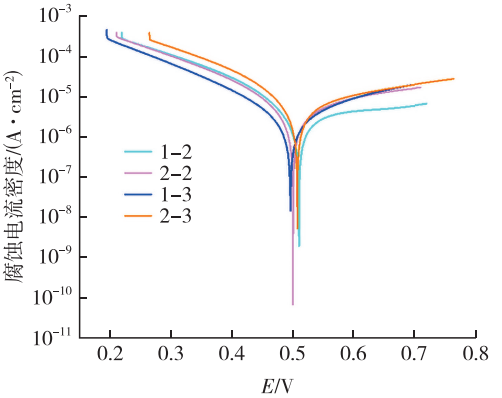


图 4 堆焊层与 N10276 原材料在硫酸铁-50% 硫酸溶液中的动电位极化曲线

Fig.4 Potentiodynamic polarization curves of surfacing layer and N10276 raw material in ferric sulfate-50% sulfuric acid solution

表8 堆焊层与N10276原材料在硫酸铁-50%硫酸溶液中的动电位极化拟合参数

Tab.8 Potentiodynamic polarization fitting parameters of surfacing layer and N10276 raw material in ferric sulfate-50% sulfuric acid solution

试样	试样编号	自腐蚀电位E_{corr}/（V，SCE）	自腐蚀电流密度i_{corr}/（A·cm^{-2}）	极化电阻R_p/（kΩ·cm^2）	腐蚀速率/（mm·a^{-1}）
N10276原材料	1#-2	0.530	2.754×10^{-6}	14.50	0.028
	1#-3	0.495	2.857×10^{-6}	12.47	0.029
	平均值	0.510	2.80×10^{-6}	13.48	0.029
堆焊层	2#-2	0.506	3.776×10^{-6}	10.14	0.038
	2#-3	0.513	5.176×10^{-6}	7.21	0.053
	平均值	0.510	4.47×10^{-6}	8.67	0.046

注：按ASTM G102—2015，腐蚀速率由i_{corr}换算（取合金密度8.89 g/cm^3、当量摩尔质量55.5 g/mol、阳极溶解平均转移电子数n=2）。

由表8可知，在该强氧化性酸性介质中，2种试样的自腐蚀电位均约为0.51 V；堆焊层与N10276原材料的平均自腐蚀电流密度分别为4.47×10^{-6}，2.80×10^{-6} A/cm^2，平均极化电阻分别为8.67，13.48 kΩ·cm^2；各项电化学参数均处于同一数量级，且2件平行试样的测试结果规律一致。堆焊层的自腐蚀电流密度平均值约为原材料的1.6倍，极化电阻略低。造成这一差异的主要原因为堆焊过程中母材对熔敷金属的稀释（耐蚀层Fe含量为5.2%，见表6），以及凝固过程中枝晶间出现的合金元素微偏析[13]。通过计算，堆焊层与N10276原材料的平均年腐蚀速率分别为0.046，0.029 mm/a，二者腐蚀速率处于同一数量级，数值差异较小，表明经低热输入、严格道间温度控制制备的堆焊层，其耐蚀性能总体与N10276原材料相当。

2.4 晶间腐蚀试验

为进一步确定堆焊层的耐腐蚀性能，重点验证严格控制道间温度的工艺能否有效避免耐蚀层敏化，按照GB/T 15260—2016中的方法A，对堆焊层试样进行了晶间腐蚀倾向性试验。制备尺寸为20 mm×20 mm×2 mm的试样，将其置于按规定配比配制的硫酸铁-50%硫酸腐蚀试验溶液中，在沸腾状态下进行24 h恒温腐蚀试验。

腐蚀试验完成后，对试样进行清洗、干燥处理并精确称重，计算得到腐蚀速率为9.3 mm/a，该值满足设备制造技术文件规定的腐蚀速率≤12 mm/a的技术条件。

镍基合金堆焊层的敏化与焊接热循环密切相关：自高温冷却经过敏化温度区间时，晶界易析出$M_{23}C_6$型碳化物及富Mo金属间化合物，形成贫Cr、贫Mo区，导致耐晶间腐蚀性能下降[8,14-15]。耐蚀层堆焊过程中，通过将热输入严格控制在≤1.73 kJ/cm^{2}的低热输入范围、道间温度控制在≤100 ℃，同时配套采用避开敏化区间的消应力热处理工艺，能够有效抑制上述有害析出行为；腐蚀速率试验结果与文献[7]中的未敏化材料水平相当，表明堆焊层未发生敏化。此外，受母材稀释影响，耐蚀层Fe含量升至5.2%（见表6），仍处于GB/T 15007—2017规定的4.0%~7.0%范围内，对耐蚀性能影响有限。该堆焊层已用于冷凝器管板，在含湿氯气及氯化氢的强腐蚀介质环境中稳定运行近5年，未出现腐蚀减薄、晶间腐蚀或局部失效问题，工程应用结果与试验评价结论一致。

需要说明的是，第2.3.2节电化学测试与本节晶间腐蚀试验所用介质均为硫酸铁-50%硫酸溶液（硫酸铁-硫酸强氧化性酸体系），介质中的阴极过程以Fe^{3+}还原反应为主导，加速了金属的阳极溶解，因此，电化学试样测得的自腐蚀电流密度处于10^{-6} A/cm^{2}量级，高于第2.3.1节中3.5%NaCl中性介质的测试结果（10^{-7} A/cm^{2}量级），这一规律与两类介质的侵蚀性强弱排序完全一致。此外，由第2.3.2节i_{corr}换算的室温腐蚀速率（0.046 mm/a）远低于本节沸腾状态下的失重腐蚀速率（9.3 mm/a）。其本质原因是沸腾状态显著加快了腐蚀反应速率。室温电化学测试结果用于堆焊层与原材料的相对比较与腐蚀机理分析，沸腾失重试验结果用于工程的耐蚀性能验收，二者从不同温度侧面相互补充，共同表明堆焊层在强腐蚀环境中的耐蚀可靠性。

2.5 腐蚀前后弯曲性能对比

依据NB/T 47014—2011要求对试板开展弯曲性能检测，设计了腐蚀前后弯曲对比试验，以此评价腐蚀作用对堆焊层塑性及界面结合质量的影响。

腐蚀前检测组：在渗透检测合格的堆焊试件上，于垂直焊接方向取4件横向侧弯试样，在压头直径40 mm下弯曲180°。

腐蚀后检测组：另取4件同规格堆焊层横向侧弯试样，先参照GB/T 15260—2016方法A，在沸腾硫酸铁-50%硫酸溶液中进行24 h腐蚀试验（条件同第2.4节），再按照腐蚀前组完全相同的工艺参数，将试样弯曲至180°。

对比2组试样受拉表面的开裂情况，试验结果见表9。

表9 腐蚀前后弯曲试验结果对比

Tab.9 Comparison of bending test results before and after corrosion

组别	试件编号	试件类型	试样厚度/mm	压头直径/mm	弯曲角度/(°)	腐蚀速率/(mm·a^{-1})	检测结果
腐蚀前	B-01	横向侧弯	10	40	180	—	无裂纹，合格
	B-02	横向侧弯	10	40	180	—	无裂纹，合格
	B-03	横向侧弯	10	40	180	—	无裂纹，合格
	B-04	横向侧弯	10	40	180	—	无裂纹，合格
腐蚀后	FB-01	横向侧弯	10	40	180	9.07	无裂纹，合格
	FB-02	横向侧弯	10	40	180	9.22	无裂纹，合格
	FB-03	横向侧弯	10	40	180	9.73	无裂纹，合格
	FB-04	横向侧弯	10	40	180	9.46	无裂纹，合格

图5示出腐蚀前试样的弯曲形貌。经观察，其受拉表面未发现长度超过1.5 mm的裂纹、未熔合或其他开口缺陷。图6示出腐蚀后试样的弯曲形貌。经24 h沸腾硫酸铁-50%硫酸溶液腐蚀处理后，4件侧弯试样进行180°弯曲试验，其受拉表面均未发现长度超过1.5 mm的裂纹、未熔合或其他开口缺陷，与腐蚀前检测组的结果一致。



图5 腐蚀前弯曲试验后的试样

Fig.5 Specimens after bending test before corrosion

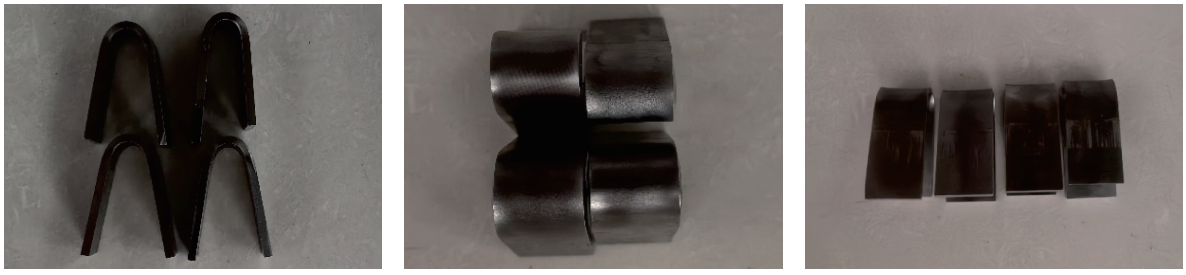


图6 腐蚀后弯曲试验后的试样

Fig.6 Specimens after bending test after corrosion

弯曲试验中，堆焊层及熔合界面处于受拉状态，对晶界弱化最为敏感：若晶间腐蚀已侵蚀晶界、削弱晶界结合力，弯曲时受拉表面将优先沿晶界萌生裂纹并扩展。腐蚀后试样未开裂，表明沸腾硫酸铁-50%硫酸溶液的腐蚀作用仅造成表层均匀溶解，未对堆焊层晶界及熔合界面造成可削弱塑性的

损伤，堆焊层在经受强腐蚀介质作用后仍保持与腐蚀前相当的塑性。该结果与第2.3节的电化学钝化行为分析、第2.4节的晶间腐蚀试验结果相互印证，说明采用本文工艺制备的N10276堆焊层，其耐蚀性能与塑性具有良好匹配性，为冷凝器在强氯腐蚀环境下的长期安全运行提供了保障。

3 工程应用案例

3.1 堆焊工艺措施

根据N10276带极埋弧堆焊试验结果，指导冷凝器管板（16MnⅢ+N10276）堆焊作业。在设备实际制造过程中，具体堆焊焊接参数见表10。

表10 冷凝器管板堆焊工艺参数

Tab.10 Surfacing process parameters for condenser tube sheet

焊层	焊接方法	焊带/焊剂型号	焊带规格/mm	焊接电流/A	焊接电压/V	焊接速度/（cm·min^{-1}）	焊接热输入量/（kJ·cm^{-2}）	道间温度/℃
过渡层	SAW	H276/SJ86B	0.5×60	940	28	17	1.55	180
耐蚀层	SAW	H276/SJ86B	0.5×60	967	29	19	1.48	90

在过渡层与耐蚀层堆焊过程中，通过变位机与焊接机头的协调运动，实施分区错位的环形焊道堆焊策略，以优化热循环与应力分布，控制焊接变形。类似的大尺寸管板堆焊过程中，通常通过合理安排焊接顺序，并结合刚性固定措施来控制焊接变形，以保证堆焊层的尺寸精度和质量稳定性[9]。

在此基础上，结合本设备结构特点，提出了由内向外的同心圆错位焊道路径。具体路径如下：以管板中心为起点，沿逆时针方向进行首圈堆焊；首圈堆焊完成后，焊接机头径向向外偏移相应距离，继续以相同方向焊接相邻外圈。为保证堆焊层组织均匀并降低残余应力，相邻焊道之间采用错位布置，避免焊缝重叠。依此逐圈向外推进，最终在堆焊表面形成一系列由内向外扩展、间隔均匀的同心圆焊道。管板堆焊焊缝与焊道实际形貌如图7所示。



图7 冷凝器管板堆焊焊缝与焊道形貌

Fig.7 Weld seam and weld bead morphology of condenser tube sheet surfacing

同时，为了进一步控制管板焊接热变形，在堆焊前采用刚性固定措施。根据管板尺寸，可在管板外圆面等距焊接一定数量的筋板，或采用背靠背刚性连接方式以提高整体刚度[9]。在设备制造过程中，为防止去除焊接筋板时损伤管板外侧表面，对固定方式进行了优化，采用可调虎口夹对管板进行周向均布固定，如图8所示。

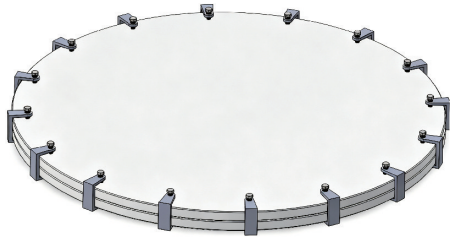


图8 堆焊前管板的刚性固定措施

Fig.8 Rigid fixation measures for tube sheet before surfacing

实际堆焊后，管板产生约3 mm的轻微变形，经立车加工找平处理，最终保证了堆焊层的厚度精度。

3.2 堆焊质量控制要点

（1）焊接前需将焊带前端剪成斜角，便于顺利起弧。

（2）焊道搭接缝需相互错开，第二层焊道的搭接位置不得与第一层焊道的搭接位置重合，需保持一定错开距离，同时每层相邻两道环缝的接头也需错开一定角度。

（3）严格控制焊接速度，保证堆焊焊道厚度，若焊接速度过快，会导致焊道偏薄、表面波纹过大，严重时还会引发咬边，甚至出现边缘熔合缺陷，如图9所示。通过多次试验，当焊道堆高约为3 mm时，其表面凝固的熔渣壳厚度约为5 mm，可以此作为判断焊接速度是否合适的经验标准：渣壳太薄，表面焊速过快；渣壳太厚，则焊速偏慢。

（4）焊接过程中，焊剂覆盖高度保持在25~35 mm之间，且必须始终完全覆盖住电弧。一旦焊剂覆盖不良，露出大量电弧光，就会造成焊接缺

陷，如图10所示。

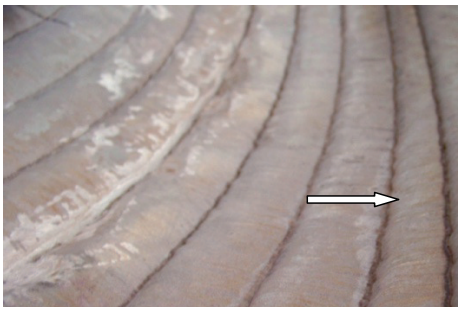


图9 设备堆焊过程中出现的咬边缺陷

Fig.9 Undercut defects appearing during equipment surfacing



图10 焊剂未完全覆盖导致的焊接缺陷

Fig.10 Welding defects caused by incomplete flux coverage

装置运行期间，该冷凝器未发生因堆焊层失效导致的泄漏或非计划停车，整体运行平稳。这一结果充分验证了堆焊工艺的合理性及堆焊层的优良性能，能够满足装置长周期运行要求。

4 结论

（1）在厚度40 mm、材料为16MnⅢ基材上，采用H276焊带（规格0.5 mm×60 mm），配合SJ86B焊剂（规格12~60目），进行过渡层与耐蚀层的带极埋弧堆焊工艺研究，按照NB/T 47014—2011和设备技术文件，对试板进行取样检测，无损检测（渗透检测）质量等级达Ⅰ级，弯曲试验未发现裂纹等缺陷。

（2）通过堆焊前预热、堆焊过程中道间温度控制（过渡层100~200 ℃，耐蚀层≤100 ℃）与低热输入（过渡层≤1.78 kJ/cm^2，耐蚀层≤1.73 kJ/cm^2），配合合适的过渡层焊后热处理参数，堆焊层未出现裂纹；耐蚀层主要合金元素含量满足相关标准要求；堆焊层在3.5%NaCl溶液中呈现自发钝化特征，自腐蚀电流密度为3.19×10^{-7} A/cm^2，略低于N10276原材料；在硫酸铁-50%硫酸中，堆焊层自腐蚀电流密度（4.47×10^{-6} A/cm^2）与N10276原材料（2.80×10^{-6} A/cm^2）处于同一数量级，2种介质中的电化学对比测试均表明，堆焊层耐蚀性能与原材料相当；晶间腐蚀速率9.3 mm/a，满足技术文件要求，且腐蚀试验后弯曲180°仍未开裂。

（3）对∅2 430 mm冷凝器管板采用同心圆错位焊道路径与可调虎口夹刚性约束，堆焊后管板变形量约为3 mm，保证了最终堆焊层厚度。通过制定质量控制措施，保证了管板堆焊质量。

（4）文中研究的N10276带极堆焊工艺及制定的质量控制要点，已在冷凝器管板上得到应用并完成设备制造。该设备在强氯腐蚀环境下稳定运行近5年，未出现堆焊层失效问题。

参考文献：

[1] 张鹏，杨凯，朱强，等.微量元素对镍基高温合金微观组织与力学性能的影响[J].精密成形工程，2018，10(2)：1-6.
Zhang P，Yang K，Zhu Q，et al.Effect of microelement on microstructure and mechanical property of nickel-base superalloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering，2018，10(2)：1-6.

[2] 李岩，王贵成，张文斌，等.爆炸焊接镍/钢复合板界面的微观组织和力学性能（英文）[J].稀有金属材料与工程，2025，54(8)：1971-1979.
Li Y，Wang G C，Zhang W B，et al.Microstructure and mechanical properties of explosively welded nickel/steel composite plate interface [J]. Rare Metal Materials and Engineering，2025，54(8)：1971-1979.

[3] 王雪骄.哈氏合金C276堆焊技术研究[C]//中国机械工程学会压力容器分会.第九届全国压力容器学术会议——压力容器先进技术.合肥：合肥工业大学出版社，2017：986-991.
Wang X J. Hastelloy C276 surfacing cladding technology research [C]//Pressure Vessel Branch of Chinese Mechanical Engineering Society. The 9th National Conference on Pressure Vessels—Advanced Technologies for Pressure Vessels. Hefei：Hefei University of Technology Press，2017：986-991.

[4] 耿亚鸽，白天祥，于成科.基于ASME规范的镍基合金耐蚀堆焊工艺评定[J].化工机械，2022，49(3)：540-543.
Geng Y G，Bai T X，Yu C K.Evaluation of corrosion resistance surfacing process of nickel-based alloy based on ASME code [J]. Chemical Engineering & Machinery，2022，49(3)：540-543.

[5] 郑明涛，王莉，周小龙，等.管板镍基合金双钨极自动TIG堆焊工艺研究及应用[J].压力容器，2024，41(9)：16-22.
Zheng M T，Wang L，Zhou X L，et al.Research and application of double tungsten automatic TIG for

tubesheet cladding nickel base alloy [J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(9)：16-22.

[6] 王天先，赵小茹.镍基合金埋弧带极堆焊工艺评定试验[J].现代焊接，2008(10)：31-32.
Wang T X，Zhao X R.Evaluation test of submerged arc strip surfacing process of nickel-base alloy[J].Modern Welding，2008(10)：31-32.

[7] 刘鸿彦，孙修圣，杜永勤，等.分离器筒体镍基C276带极埋弧堆焊工艺研究及应用[J].压力容器，2022，39(11)：22-28.
Liu H Y，Sun X S，Du Y Q，et al.Study and application of nickel-base C276 SAW strip surfacing technology for separator cylinder[J].Pressure Vessel Technology，2022，39(11)：22-28.

[8] 张继亮，朱莎莎，陈恺，等.哈氏合金C276带极电渣堆焊工艺在PTA反应器上的应用[J].大型铸锻件，2021(6)：19-21.
Zhang J L，Zhu S S，Chen K，et al. Application of hastelloy C276 electroslag build-up welding process with electrode in PTA reactor[J]. Heavy Casting and Forging，2021(6)：19-21.

[9] 官云胜.∅4 000 mm大型管板带极堆焊技术[J].中国化工装备，2011，13(1)：45-48.
Guan Y S. Technique of strip surfacing applied on 4 000 mm diameters large-scale tubeplate [J]. China Chemical Industry Equipment，2011，13(1)：45-48.

[10] 李双燕.核电设备中的镍基合金带极电渣堆焊[J].压力容器，2011，28(3)：33-37.
Li S Y. Nickel base alloy strip electroslag cladding of nuclear power equipment [J]. Pressure Vessel Technology，2011，28(3)：33-37.

[11] 邢卓.管板带极电渣堆焊双相不锈钢工艺[J].压力容器，2024，41(11)：74-84.
Xing Z.Overview of surfacing duplex stainless steel on tubesheets by electroslag strip welding [J]. Pressure Vessel Technology，2024，41(11)：74-84.

[12] 王炜铭，张明明，余春，等.核电稳压器筒体内壁不锈钢堆焊层309L过渡层裂纹产生机理分析[J].压力容器，2025，42(5)：1-11.
Wang W M，Zhang M M，Yu C，et al.Analysis of crack formation mechanism in 309L transition layer of stainless steel cladding on inner wall of nuclear power pressurizer vessel [J]. Pressure Vessel Technology，2025，42(5)：1-11.

[13] 中国机械工程学会焊接学会.焊接手册：第2卷 材料的焊接[M].北京：机械工业出版社，2013.
Chinese Welding Society. Welding handbook：Vol. 2. Welding of materials [M]. Beijing：China Machine Press，2013.

[14] 薛小军.热处理对C-276合金耐蚀性能的影响[J].山东化工，2020，49(22)：118-120.
Xue X J. Effect of heat treatment on corrosion resistance of C-276 alloy [J]. Shandong Chemical Industry，2020，49(22)：118-120.

[15] 陈斌，李亚，张绍伦，等.爆炸焊接制备C276/Q345R复合板及其热处理研究[J].铁合金，2025，56(1)：29-35.
Chen B，Li Y，Zhang S L，et al. Research on the explosive welding C276/Q345R clad plate and heat treatment[J].Ferro-Alloys，2025，56(1)：29-35.

[16] 王成刚，何凡.异种钢焊接接头的焊接残余应力及其松弛行为[J].焊接技术，2016，45(4)：66-69.
Wang C G，He F. Welded residual stress and stress relaxation behavior of dissimilar metal welded joints [J].Welding Technology，2016，45(4)：66-69.

[17] 崔静，薛安源，刘玲，等.300M钢激光熔覆C276涂层微观组织和电化学性能[J].航空材料学报，2021，41(5)：86-93.
Cui J，Xue A Y，Liu L，et al. Microstructure and electrochemical properties of laser cladding C276 coating on 300M steel [J]. Journal of Aeronautical Materials，2021，41(5)：86-93.

[18] Lloyd A C，Shoesmith D W，Mcintyre N S，et al.Effects of temperature and potential on the passive corrosion properties of alloys C22 and C276[J]. Journal of the Electrochemical Society，2003，150(4)：B120-B130.

[19] Lloyd A C，Noël J J，Mcintyre S，et al. Cr，Mo and W alloying additions in Ni and their effect on passivity [J]. Electrochimica Acta，2004，49 (17/18)：3015-3027.

作者简介：黄孝鹏(1985)，男，高级工程师，主要从事化工压力容器制造工艺与焊接技术等方面工作，通信地址：252211 山东省聊城市高新技术产业开发区化工产业园中化鲁西工程有限公司，E-mail：huangxiaopeng999@163.com。

通信作者：王凯威(1990)，男，工程师/助教，主要从事焊接机器人应用研究工作，通信地址：252000 山东省聊城市东昌府区财干东路19号聊城职业技术学院北校区，E-mail：wei8976@qq.com。

本文引用格式：
黄孝鹏，王凯威.冷凝器管板N10276合金带极埋弧堆焊工艺研究与应用[J].压力容器，2026，43(5)：20-29.
Huang Xiaopeng，Wang Kaiwei.Research and application of strip submerged arc surfacing process for N10276 alloy on condenser tube sheet[J]. Pressure Vessel Technology，2026，43(5)：20-29.