

DOI:10.16122/j.cnki.issn1001-1943.2026.02.004

C276 合金及其复合板焊接试验研究

李亚¹ 李汉¹ 陈亚斌² 郭优¹ 苏摇¹ 吴旋¹ 张绍伦¹

(1 中国船舶集团有限公司第七二五研究所 河南洛阳 471023)

(2 宇之恒(苏州)创新科技有限公司 江苏苏州 215000)

摘 要 爆炸焊接工艺制备的 C276/Q345R 复合板需要进行焊接才能满足不同的用途需求,因此本文对不同形式焊接进行研究与性能分析。通过对 C276 板拼焊、复合板补焊和对焊测试,研究了不同的焊接工艺参数和焊丝对焊接效果的影响。结果表明:焊接时采用较大的坡口角度和适宜的外观形式及焊接工艺,可以实现 C276 板材良好拼焊、C276/Q345R 复合板未复合区补焊及对接焊,焊后板材外观质量和性能良好。

关键词 爆炸焊接 C276/Q345R 复合板 焊接性能 拼焊测试 对接焊测试

中图分类号 TG456.6

文献标识码 A

文章编号 1001-1943(2026)02-0016-06

WELDING TESTING STUDY ON THE C276 ALLOY AND ITS CLAD PLATE

LI Ya¹, LI Han¹, CHEN Yabin², GUO You¹, SU Yao¹, WU Xuan¹, ZHANG Shaolun¹

(1 Luoyang Ship Material Research Institute, Henan Luoyang 471023, China)

(2 Yuzhiheng (Suzhou) Innovation Technology Co., Ltd., Jiangsu Suzhou 215000, China)

Abstract In order to meet different purpose and demand, the welding processes were carried out for the explosive welding C276/Q345R clad plates, and the different type welding processes were studied and the property test results were analyzed. After testing tailor welding C276 sheets and repair welding as well as butt welding C276/Q345R composite plates, the influences of different welding technological parameters and welding wires on the welding effects were studied. The results show: using the bigger groove angle and appropriate appearance as well as welding technology, the good welding effects with well appearances and properties are achieved for the tailor welding C276 sheets, repair welding and butt welding C276/Q345R composite plates.

Keywords explosive welding, C276/Q345R clad plate, welding property, tailor welding test, batt welding test

前言

镍及镍基合金具有极其优异的耐高温和耐腐蚀性能,广泛应用于石油化工、电力、有色金属冶炼、航空航天、海洋工程和核能工业领域中,是高温、高压、高浓度氯化盐溶液或混有不纯物等各种苛刻腐蚀环境中的较理想金属结构材料^[1-3]。在含镍和镍基合金产品中,镍-铬-钼基哈氏合金 C276 被认为是最万能的抗腐蚀合金之一^[4],为奥氏体组织,室温耐腐蚀尤其是耐晶间腐蚀性能极佳,具有

强度高、延性好、硬度高和易被加工硬化的特性,高温下仍保持良好的高温强度、抗氧化和抗应力腐蚀性能,在高端装备领域具有极高的工程价值。在工程上由于 C276 合金价格昂贵,限制了其使用,而 C276 与钢材制备的复合板兼有复材的特殊性能和基材良好的机械性能,既满足结构强度高的要求又确保在腐蚀环境苛刻的条件下较长的使用寿命,也显著降低了成本和造价,拓展了镍基合金的适用范围^[5]。

用爆炸焊接法生产的 C276 复合板规格多样、界面结合强度较高,产品质量可靠。采用爆炸焊接方法制作 C276 复合板时为满足不同尺寸和用途要

作者简介 李亚 男,1985 年 9 月出生,2008 年 7 月毕业于安徽理工大学弹药工程与爆炸技术专业,高级工程师。现从事功能材料研发及推广工作。E-mail:380520651@qq.com。

收稿日期 2025-11-12

求,需要进行一些焊接如爆炸复合时起爆点补焊、复合板在工业装置中对焊等。本文对 C276 拼焊、C276/Q345R 复合板未复合区补焊及复合板对焊工艺进行了试验研究,从而确定适宜的焊接工艺。

1 试验材料和方法

采用爆炸焊接方法制备的 C276/Q345R 复合板

规格为(3+40) mm×1 000 mm×1 500 mm,复板 C276 厚度为 3 mm,焊丝 ERNi-1 和 ERNiCrMo-4 分别用于过渡层和盖面层(复板),J507 焊丝用于焊接 Q345R 基层,复板、基板和焊丝的化学成分见表 1。

C276 属于多元合金,合金中的硅能加速 δ 或 μ 相的形成,而磷、硫杂质在焊接过程中易形成晶间液膜残留在晶界区,诱发热裂纹的产生,因此焊丝成分中应严格限制硅、磷、硫的含量。

表 1 复合用板材和 ERNiCrMo-4 以及 ERNi-1 焊丝的化学成分 %

Tab.1 Chemical composition of clad,matrix plate and ERNiCrMo-4 and ERNi-1 welding wire %

材料	化学成分/%												
	C	Si	Mn	P	S	Co	Cr	Fe	Mo	W	Ni	Cu	Ti
C276	0.02	0.02	0.75	0.01	0.02	1.53	15.49	5.51	16.03	3.71	56.98		
Q345R	0.13	0.28	1.35	0.012	0.01	—	—	余量	—	—	—		
J507	0.06	0.52	0.96	0.021	0.008	—	—	余量	—	—	—		
ERNiCrMo-4	0.003	0.01	0.39	0.004	0.001	0.01	15.85	5.77	15.41	3.33	59.23		
ERNi-1	0.11	0.04	0.82	0.008	0.007			0.76			余量	0.01	3.48

C276 板材拼焊和复合板补焊采用钨极氩弧焊工艺,用不低于 99.99%纯度的氩气作保护气体,焊丝及坡口两侧 50~100 mm 在焊前彻底清除油污和漆等所有杂质,先用丙酮或酒精擦洗,然后用不锈钢丝刷清理刷净,露出金属光泽后,再用干净的不起毛抹布和丙酮或酒精擦拭清洗;焊接时焊丝前端必须处于气体保护中,焊丝均匀送进熔池,熄弧后至少滞后 30 s 停气。在整个施焊过程中,焊丝受热端不得抽离氩气保护区,焊层焊满为止。焊后对焊缝外形尺寸及表面质量进行检查,按 NB/T 47013.5-2015《承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测》I 级要求进行 100%的渗透检测。对焊接后的金属板材和复合板采用机械切割的方法(不推荐用氧乙炔焰切割)切取试样。

Q345R 钢板和 C276/Q345R 复合板分别满足 GB/T 713.2-2023《承压设备用钢板和钢带 第 2 部

分 规定温度性能的非合金钢和合金钢》和 GB/T 13148-2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》的要求,按 NB/T 47013.5-2015《承压设备无损检测 第 5 部分:渗透检测》进行渗透探伤检验。使用 OLYMPUSGX71 金相显微镜进行组织观测,INSTRON5587 拉伸试验机进行性能测试。

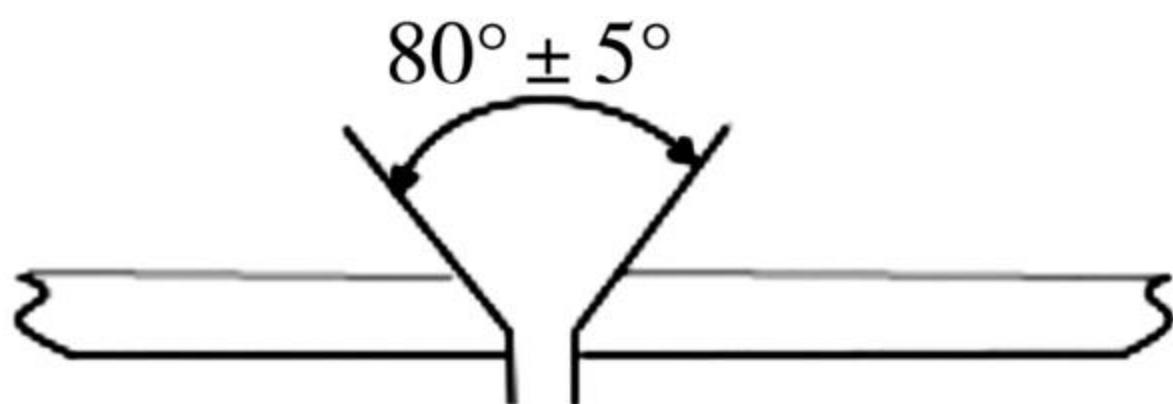
2 结果与分析

2.1 C276 板拼焊测试

对 C276 板材进行拼焊测试,由于 C276 合金热导率小、热膨胀系数大,熔液流动性差、润湿性差、熔深较浅、焊后焊缝收缩严重^[6,7],容易产生气孔、热裂纹、未焊透及未熔合等缺陷,因此接头的坡口角度和间隙需较大些,钝边要小一些并预先留出反变形量,坡口形式及尺寸见表 2。

表 2 C276 板拼焊坡口形式及尺寸

Tab.2 Groove type and size of the tailor welding C276 sheets

板厚/mm	坡口示意图	坡口型式	间隙/mm	焊接层数	坡口角度/°	钝边/mm
3		对接 V 型	0.5~1.5	两层	80±5	0.5~1.0

C276 板材拼焊的工艺参数见表 3。

表 3 C276 板拼焊工艺参数

Tab.3 Technological parameters of the tailor welding C276 sheets

层次	焊丝直径/mm	极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	氩气流量/(L/min)
1	2.4	直流正接	75~85	10~12	13~15	12~14
2	2.4	直流正接	85~95	10~12	14~16	12~14

拼焊使用的电极为 $\Phi 2.0$ mm 的铈钨极,圆锥角为 $30^\circ \sim 60^\circ$,尖端磨平,喷嘴直径 $\Phi 12$ mm,电流为直流正接。焊接时采用较小的焊接线能量和较快的冷却速度,减少高温停留时间和抑制过热倾向,层间温度控制在 60°C 以下,或者用手测温焊道不烫手为准;焊丝要紧贴坡口边缘,将坡口处母材与焊丝一起熔化,后续焊缝要与前一道焊缝圆滑地熔合在一起。

定位焊采用相同的焊接工艺,必须焊透,不允许有缺陷,如有缺陷必须彻底清除,重新进行定位焊,不允许用重熔的方法修补缺陷,定位焊后,错边量不应大于 0.5 mm。

C276 板材拼焊后外观见图 1,焊缝表面平整、成形均匀、致密,平滑地向母材过渡,焊缝无裂纹、气孔、夹渣、氧化、未熔合、咬边、弧坑等缺陷,焊接接头成形良好;焊缝渗透检测一次合格率为 100% ,满足 I 级探伤要求。

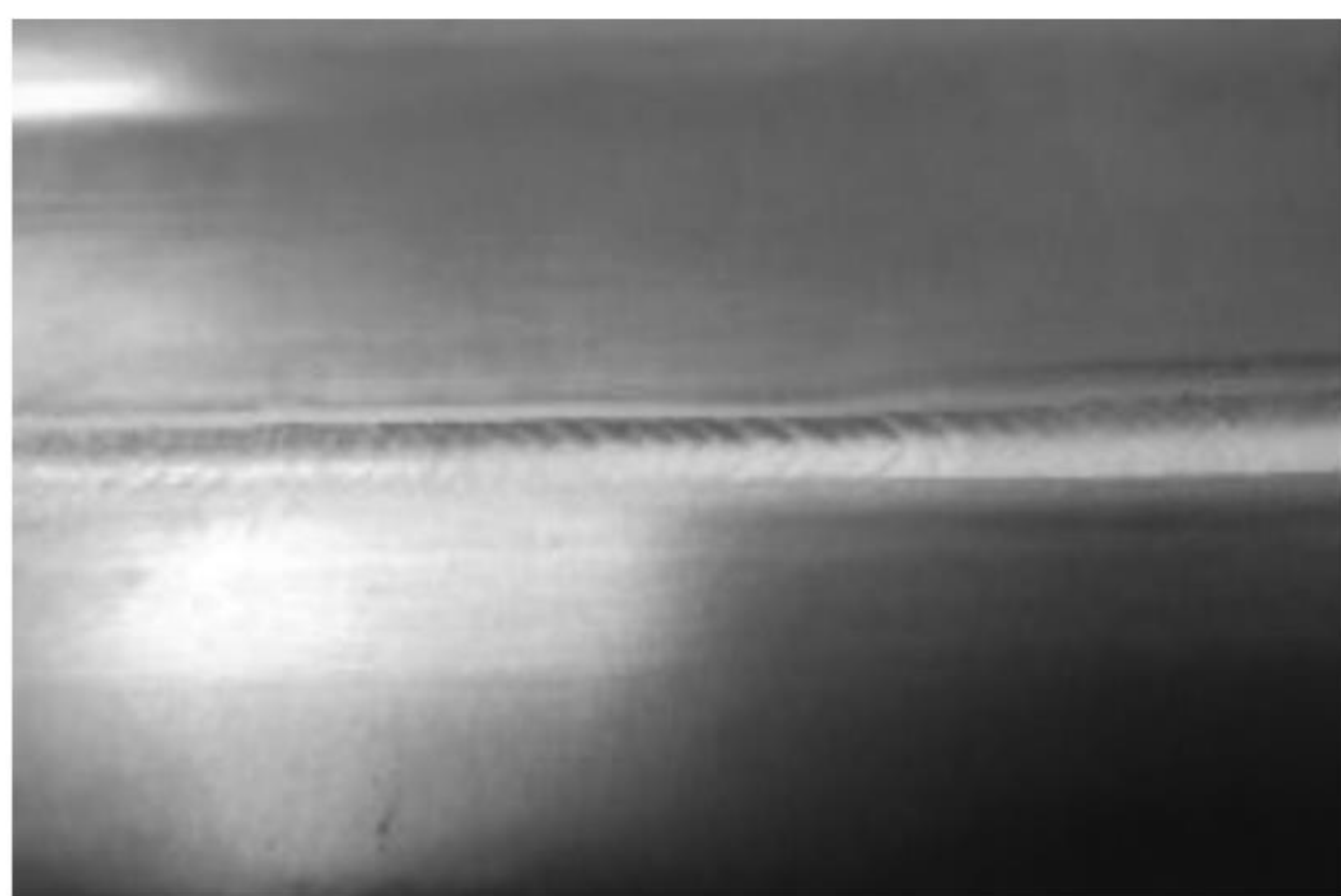
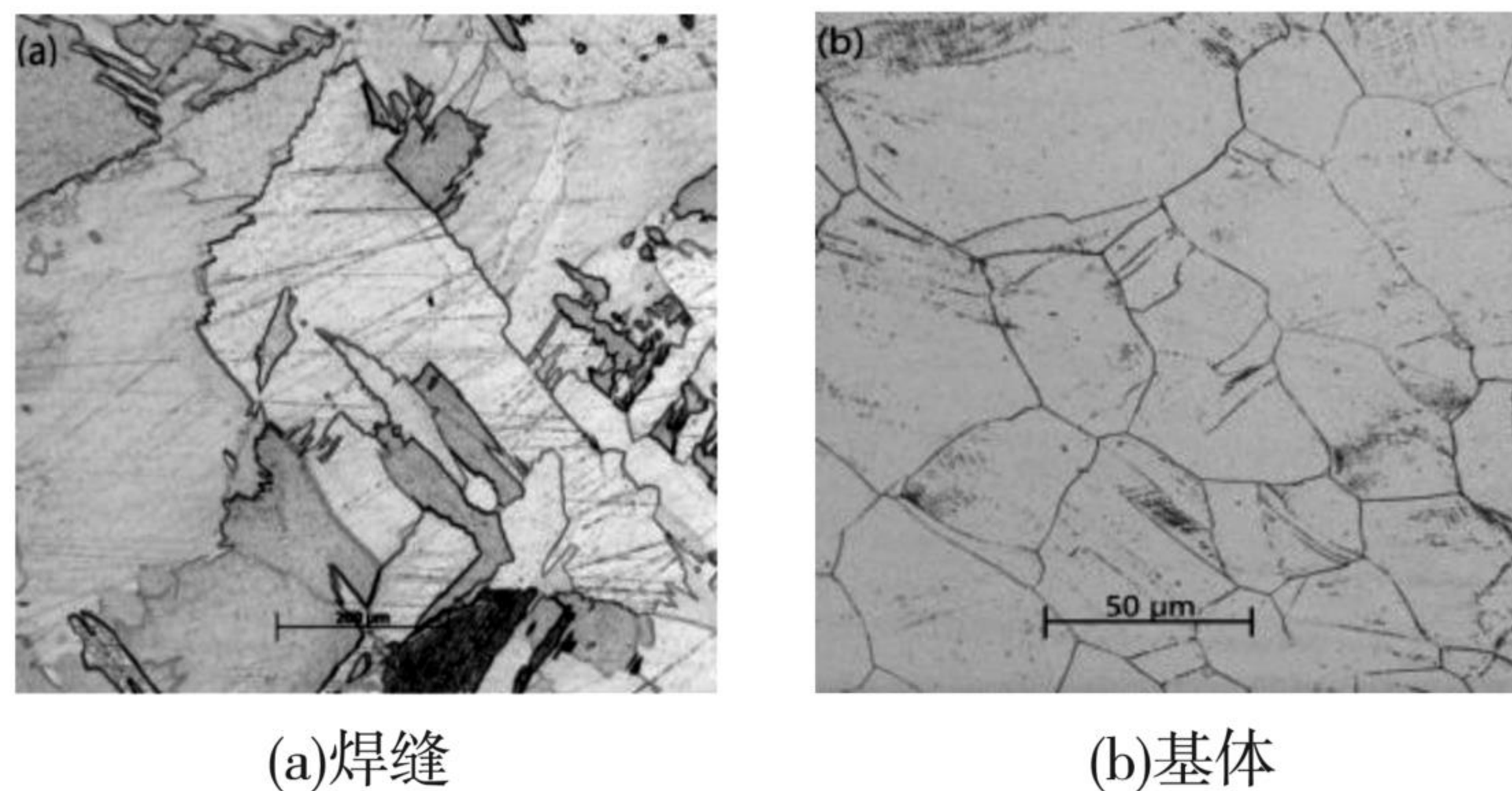


图 1 C276 板材拼焊后外观

Fig.1 Appearances of the tailor welding C276 plates

焊后热处理可以改善整个焊接接头的组织,并改善性能, $700 \sim 1\,050^\circ\text{C}$ 区间为 C276 合金的热不稳定区间,即敏化区,在生产加工过程中应避开此加热区域^[8]。焊后进行 $1\,200^\circ\text{C}$ 固溶热处理,保温时间 30 min,随后出炉水冷;焊缝和基体组织形貌见图 2,焊缝为粗大的铸造组织见图 2-(a)、基体为单相 γ 相见图 2-(b),未见晶界析出物。



(a)焊缝

(b)基体

图 2 C276 拼焊板焊缝和基体的形貌

Fig.2 Welding joint and matrix microstructures of the tailor welding C276 sheet

焊接板取样示意图见图 3,C276 板材拼焊后力学性能结果见表 4。

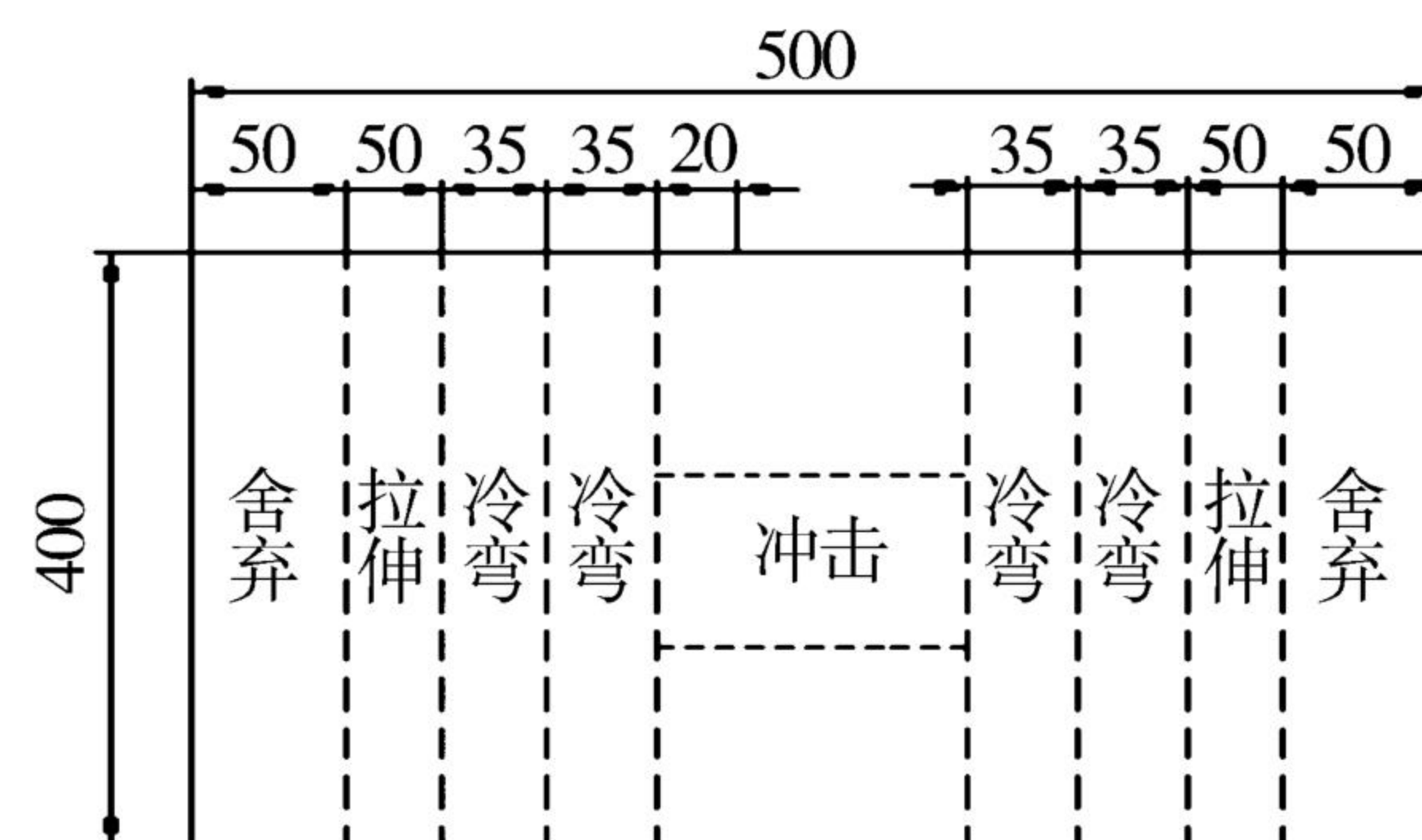


图 3 焊接板取样示意图

Fig.3 Sample schematic diagram of the welding plate

表 4 C276 拼焊焊缝力学性能

Tab.4 Welding joint properties of the tailor welding C276 sheet

厚度/mm	抗拉强度 R_m /MPa		冷弯
	标准值	测试值	$D=4a, 180^\circ$
3	≥ 485	550/590	合格/合格

由表 4 可见,C276 板材焊接接头性能满足 GB/T 13148-2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》的要求,弯曲性能合格、拉伸面完好,未发现缺陷。

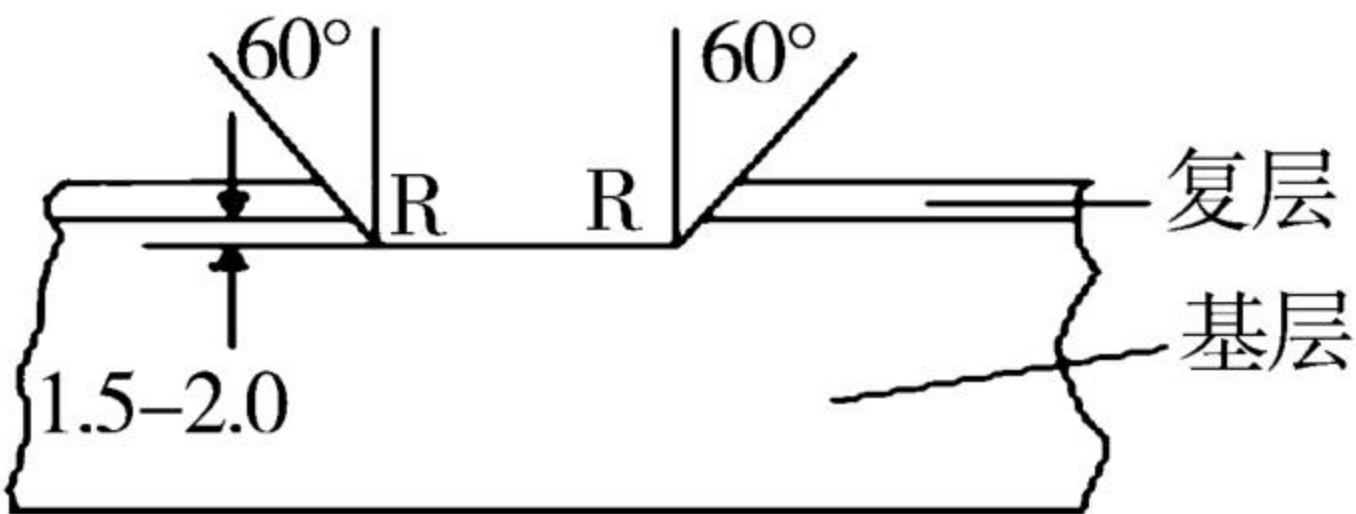
2.2 C276/Q345R 复合板未复合区补焊测试

C276/Q345R 复合板补焊测试时,对 C276 板未结合区进行修补,在基层和复层交界处采用 ERNi-1 焊丝进行过渡层的焊接,复层采用 ERNiCrMo-4 焊丝进行盖面层焊接。

焊接电极直径 $\Phi 2.5$ mm、喷嘴直径 $\Phi 12$ mm,使用角向砂轮片磨光机(专用)加工坡口,不锈钢丝刷清理。过渡层焊缝金属流动性差、熔深浅、焊后易严重收缩,因此接头的坡口角度和间隙需较大些,坡口形式及尺寸见表 5,坡口深度要低于复合界面 $1.5 \sim 2.0$ mm。

焊接时为了防止基层和复层互相稀释和侵袭而恶化性能,需要进行过渡层的焊接,要求超出复合界面 $0.5 \sim 1.0$ mm。ERNi-1 焊丝熔液流动性差,焊速过快时熔池冶金反应差,焊缝边缘熔合不好,容易在焊缝局部形成孔洞和弧坑裂纹;焊接速度慢时焊缝线能量大,容易在热影响区产生过热组织,晶粒粗大、性能下降,因此过渡层焊接时焊接速度应适当,焊后着色探伤合格再进行盖面层焊接;盖面层焊接时选用较小电流,电弧尽量压低避免空气进入焊缝熔池,适当减小焊接速度,控制层间温度在 60°C 以下。

表 5 复合板补焊坡口形式及尺寸
Tab.5 Groove type and size of the repair welding composite plate

复合板/mm	坡口示意图	焊接层数	坡口角度/°
3+40		过渡层 盖面层	60

未复合区补焊的工艺规范参数见表 6。

表 6 复合板未复合区补焊参数
Tab.6 Technological parameters of the repair welding composite plate in the non-clad zone

层次	焊丝直径/mm	极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	氩气流量/(L/min)
过渡层	3.0	直流正接	140~160	10~12	13~15	12~14
盖面层	3.0	直流正接	150~170	10~12	14~16	12~14

焊后对复合板未复合区焊缝外形及表面质量进行 100% 检查,焊缝表面平整,焊缝成形均匀、致密、平滑地向母材过渡,焊缝无裂纹、气孔、夹渣、氧化、未熔合、咬边和弧坑等缺陷,焊接接头成形良好。对焊接接头进行 100% 的渗透检测,达到了 I 级要求。

性能试样取样位置见图 3,复合板未复合区补焊焊缝力学性能结果见表 7。

表 7 复合板补焊焊缝力学性能
Tab.7 Welding joint properties of the repair welding composite plate

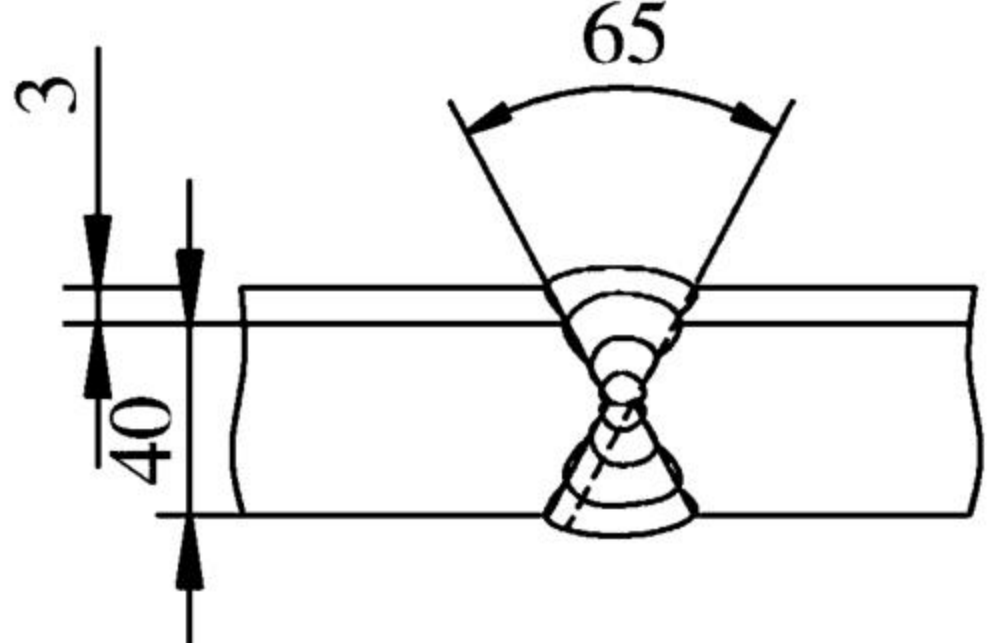
复合板/mm	抗拉强度/MPa		冷弯 $D=4a, 180^\circ$	冲击($A_{KV}, 0^\circ\text{C}$)/J		
	标准值	测试值		标准值	热影响区	焊缝区
3+40	≥ 485	575/575	合格/合格	≥ 41	170/158/118	202/206/184

由表 7 可以看出,复合板两个焊接接头横向拉伸强度远超过标准要求,冷弯性能优良,拉伸面完好,无缺陷,冲击值不低于母材标准值,满足 GB/T 13148-2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》的指标要求。

2.3 复合板对接焊测试

对 C276/Q345R 复合板进行对接焊测试,由于 C276 焊缝熔液缺点,接头的坡口采用对称 X 型,坡口角度较大,钝边要小一些,坡口形式及尺寸见表 8。

表 8 复合板对接坡口形式及尺寸
Tab.8 Groove type and size of the butt welding composite plate

复合板/mm	示意图	形式	间隙/mm	焊接层次	坡口角度/°	钝边/mm
3+40		对接 X 型	1.5~2.0	基层 过渡层 复层	65±5	1.5~2.0

为了防止焊接时基体和复层熔化互侵而恶化性能,焊接时增加过渡层,补偿 C276 复层由于稀释所引起的镍元素的降低,使复层焊缝的成分保持应有的水平。焊接顺序为基层→过渡焊缝→复层焊缝,基层焊接时焊道根部距复合界面 1.5~2.0 mm,着色检测合格后反面修磨坡口,坡口在基层与复层

处的厚度分别为 1.5~2.0 mm 和 0.5~1.0 mm;过渡层应同时熔合基层焊缝、基层母材和复层母材,且应盖满基层焊缝和基层母材;焊接盖面层前,将过渡层焊缝表面和坡口边缘清理干净,盖面层焊接时采用较小的焊接线能量、短弧、单焊道,后一道焊道应压住前一道的 1/2~1/3,相邻层焊道方向最好成

90°角,盖面层的层间温度应小于 60 ℃,盖面层焊满为止。焊接过程中焊条放在保温筒内,随用随取。

复合板基层的焊接选用 J507 焊条手工电弧焊,打底层直径为 Φ3.2 mm,后续各层焊条直径为 Φ4.0 mm;

过渡层焊接材料选用纯镍焊丝 ERNi-1,直径为 Φ3.2 mm,以补充焊接时基层对复层的稀释。复合板对接焊工艺参数见表 9。

表 9 复合板对接焊工艺参数
Tab.9 Technological parameters of the butt welding composite plate

层次	焊材直径/mm	极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(cm/min)	氩气流量/(L/min)
基层	3.2~4.0	直流反接	90~140	22~24	16~18	
过渡层	3.2	直流正接	130~150	10~12	14~16	12~14
盖面层	3.2	直流正接	130~150	10~12	14~16	12~14

复合板对焊后焊缝表面平整,焊缝成形均匀、致密、平滑地向母材过渡;焊缝中无裂纹、气孔、夹渣、氧化、未熔合、咬边、弧坑等缺陷,焊接接头成形

良好。复合板对接焊缝 100%的渗透检验,达到了 I 级要求。复合板对接焊缝力学性能结果见表 10。

表 10 复合板对接焊缝力学性能
Tab.10 Welding joint properties of the butt welding composite plate

复合板/mm	抗拉强度 R_m /MPa		冷弯	冲击(A_{KV} , 0 ℃)/J		
	标准值	测试值	$D=4a, 180^\circ$	标准值	热影响区	焊缝区
3+40	≥485	775/750	合格/合格	≥41	105/106/110	119/123/130

复合板两个对接接头横向拉伸试样均在母材断裂,冷弯性能优良,拉伸面完好,无任何缺陷,冲击值不低于母材标准值;复合板对接接头拉伸、弯曲性能和冲击韧性均满足 GB/T 13148-2008《不锈钢复合钢板焊接技术要求》的指标要求。

2.4 分析与讨论

为了保证 C276 合金焊缝的耐蚀性,氩弧焊前必须进行严格清理,清除填充焊丝和焊缝坡口及其两侧表面至少 20 mm 范围内的油污、水分、灰尘、氧化膜等,这些物质会影响电弧稳定性、恶化焊缝成形,并可能导致气孔、夹杂、未熔合等缺陷^[9],焊缝内如存在少量的氧会与镍形成低熔点氧化镍(共晶体),多处于晶粒边界,在较高的焊接残余应力作用下会导致焊缝及热影响区产生裂纹。C276 合金在一定温度范围内停留时间超过 10 min,就会析出 M_6C 碳化物和 δ 相,从而产生晶间腐蚀,导致耐腐蚀性下降^[10];在 700~1 050 ℃ 区间退火后 C276 合金呈现出较明显的晶间腐蚀敏感性^[8],700 ℃ 以下短时间内热处理不会出现析出相^[11],580+680 ℃ 分段低温退火,无析出相出现,因此 C276 合金一般进行 1 100 ℃ 以上的固溶处理。

C276 合金线膨胀系数大,具有较大的热裂倾向,气孔生成几率较高,焊丝及 C276 合金中的 S、P 等杂质在焊接过程中易形成低熔点晶间液膜残留在粗大晶粒的晶界区,如晶界间薄膜状 Ni-S 共晶

(熔点 645 ℃) 和 Ni-P 共晶(熔点 880 ℃)^[7,12],在焊接应力作用下易引发热裂纹,因此焊接时需采取措施以防止过度热输入。此外,C276 合金中的 Ni、Cr 原子非常活跃,焊接时焊缝极易氧化,严重时呈豆腐渣状,使金属耐腐蚀性能急剧下降^[7],同时也是产生裂纹的主要原因。因此钨极氩弧焊时焊缝的内外侧均应加强氩气(99.99%)保护,并采用具有提前送气和延时断气功能的氩弧焊机。

C276 板材焊接时采用较小的焊接线能量和较快的冷却速度,以达到减少高温停留时间、抑制晶粒长大和缩小高温热影响区的目的。收弧时要呈缓坡形、熄弧时填满弧坑,防止产生弧坑裂纹。焊缝成形应光滑、均匀,不得有气孔、凹坑、氧化等缺陷,如出现收缩孔或弧坑裂纹,应用角磨机磨掉后重焊,余高要求为 0.5~1.5 mm;焊完一道时,要认真清理焊道,消除目测可见缺陷后再进行下一道焊接;层间温度控制在 60 ℃ 以下,采用数字温度仪测温,也可用手测温,以焊道不烫手为准。

3 结论

(1) C276 板及其复合板焊接时,需要针对 C276 合金特点设计较大的坡口角度和间隙,减少高温停留时间和抑制过热倾向,控制较低的焊接层间温度

[下转至第 24 页]

表 5 入炉矿主要化学成分(质量分数) %
Tab.5 Main chemical composition of furnace ore (mass fraction) %

原料名称	TFe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Ni	Cr ₂ O ₃	CaO/SiO ₂
铁块矿	54.46	11.23	2.53	—	0.7	—	—	0.06
烧结矿	48.12	6.07	6.93	2.31	8.58	0.88	5.34	1.41
冷固球团	45.57	9.21	5.86	2.42	7.17	0.84	3.96	0.78

使用期间高炉用矿结构对比:使用前为烧结矿 90%+铁块矿 10%,使用后为烧结矿 88.4%+铁块矿 8%+冷固球团 3.6%,烧结矿、块矿配入比例降低。冷固球团 TFe 含量为 45.57%,配用 3.6%冷固球团后的入炉综合品位为 48.8%,入炉品位降低 0.3%,综合矿耗升高 6 kg,燃耗比为 715 kg/t,风温折算影响焦比约 1.5 kg/t,综合燃料比升高 3.3 kg/t,对高炉冶炼影响较小。透气指数 12.9%,冷压球粒度均匀,改善了高炉料柱的透气性。冷固球团碱度 0.78,烧结矿碱度 1.41,生产低镍铁高炉炉渣碱度控制在 0.85~1.0 左右,低碱度冷固球团替代部分生矿既能减少烧结矿的配入量,又能减少铁块矿的配入量,从而提高高炉熟料率。

3 结论

冷固球团工艺已基本成熟,黏结剂对烧结返矿冷固球团的冶金性能具有明显的影响。在冷固球团中添加 5%的黏结剂,低温还原粉化率(RDI+3.15)达到 74.39%,平均抗压强度为 2 073 N,热裂指数(DI-6.3)为 0.52%,铁品位降低 1.89%。在

450 m³高炉中配入不超过 8%的冷固球团,虽然矿耗和燃料比略有上升,但有利于改善高炉料柱的透气性,高炉炉况顺行。

冷固球团本身具有一定的碱度,使得高炉通过冷固球团调整炉渣碱度的范围相对较小,其主要作用是替代烧结矿,有助于缓解烧结矿产能不足的问题。此外,由于冷固球团的碱度较低,可以部分替代生矿使用,从而提高高炉熟料率,减少高炉生矿的入炉量,降低外购铁块矿的配比,具有显著的经济效益,是炼铁行业实现资源循环利用、降本增效、绿色发展的有效途径。

参考文献

[1] 胡志清,潘建,朱德庆,等.铁精矿原料特性及其对成球性能的影响[J].烧结球团,2013,38(4):42-45,49.
[2] 沈宗斌,沙永志.钢铁粉尘冷固结球团工艺研究[J].钢铁,2003,38(12):1-5.
[3] 严礼祥.烧结返矿冷压成球入炉的可行性分析[J].冶金管理,2020(11):9-10.
[4] 张汉泉.烧结球团理论与工艺[M].北京:化学工业出版社,2018:272.

[上接第 20 页]
(60 ℃ 以下),从而获得良好的焊接成形效果。
(2)采用适宜的坡口形式和焊接工艺参数,C276 板拼焊成形良好、性能合格;采用适宜的焊丝和不同层间的焊接参数设计,C276/Q345R 复合板可进行补焊和对焊,焊接后具有良好的综合性能。

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.
[2] 栗卓新,王恒,李杨,等.工艺与微量元素对镍基合金焊接热影响区液化裂纹影响的研究进展[J].机械工程学报,2016,52(6):37-45.
[3] 孙万田.哈氏合金(Hastelloy C-276)管道的焊接[J].电焊机,2011,41(1):58-60.
[4] 包国平.Hastelloy C276 合金的焊接[J].大型铸锻件,2008(4):33-35.

[5] 陈凯,马勇,何尧,等.C276/304L 爆炸焊接复合板界面熔化区微观组织及形成过程[J].精密成形工程,2020,12(2):67-71.
[6] 石记平,石国锋,王永红,等.C276 合金同种钢及异种钢焊接工艺试验[J].焊接技术,2007,36(4):38-39,63.
[7] 徐红军,陆欢军.哈氏合金 C276 焊接工艺研究[J].焊接与切割,2015(6):57-60.
[8] 万自永,闫飞昊,张云浩,等.不同加热制度对哈氏合金 C276 耐晶间腐蚀性能影响[J].材料开发与应用,2015,41(16):49-51.
[9] GB/T 13148-2008 不锈钢复合钢板焊接技术要求[S].
[10] 杨亮,朱冠妮,董建新,等.镍基耐蚀合金 C-276 时效过程析出规律研究[J].钢铁研究学报,2011,23(2):309-312.
[11] 范宇亮,王强达.C276+Q245R 复合板退火工艺研究[J].新技术新工艺,2018(6):14-16.
[12] 何峰,唐彬,蓝铎.高镍合金 C276 的焊接[J].安装,2005,144(5):41-42.