

DOI:10.16122/j.cnki.issn1001-1943.2025.01.007

爆炸焊接制备 C276/Q345R 复合板及其热处理研究

陈斌 李亚 张绍伦 孟猛 王自波 李文甫 陈凤秋 程飞

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所 河南洛阳 471023)

摘 要 开发了爆炸焊接工艺制备 C276/Q345R 复合板,研究了爆炸焊接和热处理工艺对复合板力学、工艺性能与组织的影响,测试了煤气炉中退火时表面涂层防止 C276 硫脆的效果。结果表明:装药厚度 32 mm 时用 2 号岩石制备的低爆速炸药可以制备结合良好的 C276/Q345R 复合板,使用 0.4 mm 退火铜片支撑能够避免 C276 鼓包现象;热处理能有效改善 C276/Q345R 复合板性能和组织,热处理制度采用 550~650 °C 退火后空冷或 920~1 070 °C 退火后喷雾加速冷却的方式,C276/Q345R 复合板可以获得良好的力学与工艺性能,无晶间腐蚀现象,在复层 C276 表面涂刷镍基合金抗氧化涂料在煤气炉中退火能有效避免硫脆。

关键词 爆炸焊接 C276/Q345R 复合板 热处理 喷雾冷却 硫脆

中图分类号 TG 456.6

文献标识码 A

文章编号 1001-1943(2025)01-0029-07

RESEARCH ON THE EXPLOSIVE WELDING C276/Q345R CLAD PLATE AND HEAT TREATMENT

CHEN Bin, LI Ya, ZHANG Shaolun, MENG Meng, WANG Zibo, LI Wenfu, CHEN Fengqiu, CHENG Fei
(Luoyang Ship Material Research Institute, Henan Luoyang 471023, China)

Abstract The processes of explosive welding producing C276/Q345R clad plates are developed, and the influences of explosive welding and heat treatment process on the mechanical, process properties and microstructures of clad plates are studied, where the effect of preventing C276 sulfur brittleness through surface coating is tested during annealing in the gas stove. The results show that the well-bonded C276/Q345R clad plates are prepared by 2[#] low velocity rock ammonium ladder explosive with the 32 mm thickness, and the bulges of C276 layer are avoided by using 0.4 mm annealing copper support; the properties and microstructures of C276/Q345R clad plates are effectively improved by the heat treatment, where the good mechanical and process properties of C276/Q345R plates without intergranular corrosion are obtained by annealing at 550~650 °C with air cooling or annealed at 920~1 070 °C with spray cooling, and the C276 sulfur brittleness can effectively avoided by brushing the nickel-based alloy antioxidant coating on the surface during annealing in the gas stove.

Keywords explosive welding, C276/Q345R clad plate, heat treatment, spray cooling, sulfur brittleness

前言

哈氏合金 C276 具有优异的耐蚀性,而且在变形加工和焊后状态仍具有很高的耐蚀水平^[1,2]。C276 为面心立方的奥氏体结构,强度较低,国内外

多年的工业应用实践表明,C276 作为复合钢板或结构衬里使用,不仅可以满足结构强度的要求,利用其优异的耐蚀性能,可适用于非常苛刻的腐蚀环境,包括硫酸、盐酸、氢氟酸、酸水和卤化物液体在高温下的腐蚀,同时可抵御粒子及表面点蚀的影响,而且可以确保在设备的全寿命期间内有很低的

作者简介 陈斌 男,1985 年 8 月出生,2010 年 7 月毕业于天津大学材料加工及控制成型专业,硕士研究生,高级工程师。目前从事有色金属研发推广工作。E-mail:Chenbin1527@126.com。

收稿日期 2024-04-07

维修成本和高的设备利用率^[1-3],因此 C276/Q345R 复合板广泛应用在尼龙化工用反应器、电厂烟气脱硫装置(FGD)和烟囱等工业装置结构中。爆炸焊接具有传统焊接方法无法比拟的一些特殊优点,特别是可以实现不同金属之间的高强度结合,采用爆炸焊接制造的复合板不仅复合层间有好的结合力,而且几乎所有的金属材料间都能实施复合^[4,5],通过爆炸复合工艺可以制备多种大规格的 C276/Q345R 复合板材。

由于 C276 材料的塑性较好,爆炸焊接容易造成表面支撑鼓包;另外 Fe 和 Mo 能够形成 Fe₂Mo 金属间化合物而影响结合性能,因此给爆炸焊接带来较大的难度;爆炸焊接的 C276/Q345R 复合板需要退火处理,由于 C276 合金中有较多的铬、钼原子固溶于镍基奥氏体晶格中,在 600~950 ℃ 温度区间具有亚稳定特征,在敏化温度区间内加热容易产生晶

间腐蚀。根据爆炸焊接理论和试验设计 C276/Q345R 复合板爆炸焊接炸药,对复合板的制备工艺和效果进行研究,特别是分析不同温度退火后复合板的组织和性能演变特征,确定优化的制备工艺和退火制度,得到良好的综合性能。

1 试验材料和方法

采用爆炸焊接工艺制备 C276/Q345R 复合板, C276 复板厚度 3 mm, Q345R 厚度为 38 mm 和 40 mm。爆炸焊接时采用平行安装法,单位面积布药量 3.22 g/cm²,间距 6 mm,起爆点位置为长边中点;使用 2 号岩石铵梯炸药为炸药组分的低爆速炸药,加入了适量添加剂,避免使用因受潮而结块的炸药。Q345(厚度>36~60 mm)和 C276 板材性能见表 1。

表 1 Q345R 和 C276 板材性能

Tab.1 Mechanical properties of Q345R and C276 plates

材料	项目	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	冲击/J	弯曲 $d=3a/180^\circ$	硬度 HRB
Q345R	GB 713-2023	315	490~620	≥ 21	≥ 41	合格	-
	测试值	368/374	523/528	31/30	84/108/60	合格	-
C276	ASTM B575-17(2023)	≥ 283	≥ 690	≥ 40	-	-	≤ 100
	测试值	435/441	800/807	57/59	-	-	90/92

按 GB/T 7734 进行超声波探伤,按 GB/T 6396 进行界面剪切试验和界面抗拉试验,按 LWSB8102 标准进行侧弯曲试验,按 JB/T 4730 标准进行复合板结合界面着色探伤。按 ASTM G28A 法制备 30×20×3 mm 试样进行硫酸-硫酸铁晶间腐蚀试验。使用 OLYMPUS X71 金相显微镜进行组织观测,采用 HVS-50 维氏硬度计测试金相试样维氏硬度;使用 KG3 试验机进行剪切和拉脱测试,INSTRON5587 拉伸试验机进行性能测试,使用 CTS-22B 脉冲反射式超声波探伤仪进行复合板的探伤。

2 结果与分析

2.1 炸药爆速与装药厚度测试

根据常用金属材料的声速计算,在爆炸焊接中一般采用炸药的爆速在 2 000~3 000 m/s。对于 (3+38) mm 规格的 C276/Q345R 复合板,根据理论计算,其最佳爆速为 2 145 m/s。

设计的炸药以 2 号岩石铵梯炸药为主,加入适量添加剂组成,对装药厚度为 25、35、45、55、65 mm

的炸药爆速进行测试,炸药爆速的计算公式:

$$V_n = L_n / t_n \quad (1)$$

公式(1)中: V_n 为第 n 段爆速, L_n 为第 n 段距离, t_n 为爆轰波通过第 n 段所经过的时间。

炸药爆速随装药厚度的变化曲线见图 1。

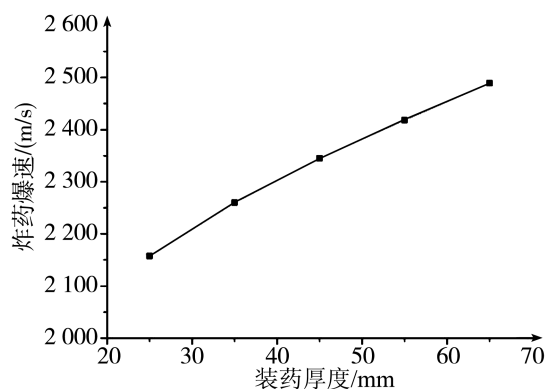


图 1 炸药爆速随装药厚度的变化曲线

Fig.1 Curve of explosive velocity with different thick powders

由图 1 可以看出,随着装药厚度的增加,爆速相应增加,装药厚度在 25~65 mm 时对应的爆速在 2 157~2 489 m/s 之间,与理论计算值(2 145 m/s)

相当,满足 C276/Q345R 复合板爆炸焊接要求。

按照爆炸焊接参数的选择原则和计算结果,对 C276/Q345R 复合板进行爆炸焊接试验,具体参数见表 2,复板和基板规格均为 1 210 mm×1 540 mm,支撑使用 0.5 mm 厚铜皮制作。

表 2 C276/Q345R 复合板爆炸焊接试验参数

Tab.2 Experiment parameters of explosive welding C276/Q345R clad plate

C276 厚度	钢板厚度	单位面积布药量	间距	起爆点
/mm	/mm	/(g/cm ²)	/mm	位置
3	38	3.22	6	长边中点

由于试板所用的支撑为 0.5 mm 铜皮制作,其硬度较高,复层 C276 塑性较好,爆炸后 C276 表面在支撑位置出现了一个个鼓包现象,分析认为是 C276 复板较硬,铜支撑未经退火处理,支撑制作的较大。对试板进行超声波探伤结果显示有效区内结合率 100%,但起爆点有 Φ20 mm 的未结合区。

C276 与 Q345R 钢复合界面金相组织见图 2,结合界面呈准正弦波形,界面结合良好,没有出现分层、裂纹等缺陷,漩涡区较小;结合界面钢侧波峰上的铁素体和珠光体呈现流线特征,基体组织为正常的铁素体+珠光体,在 C276 侧波峰金相组织为孪晶状 γ 相+碳化物,复层 C276 的基体金相组织为孪晶状单相 γ 相。

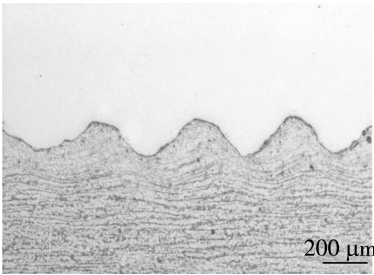


图 2 C276/Q345R 复合板结合界面组织形貌

Fig.2 Microstructure of C276/Q345R clad plate joint interface

复合板进行 180°外弯曲($d=4a$)和内弯曲($d=3a$)测试,复合界面均完好,无针孔、裂纹等缺陷;界面剪切强度平均值为 345 MPa,满足相关标准要求。

2.2 退火对复合板性能影响测试

制备 8 块 $(3+40) \times 2\,160 \times 4\,960$ mm 的 C276/Q345R 复合板,爆炸焊接试验参数见表 3,支撑改用 0.4 mm 铜皮并经过 780 ℃退火后制作。爆炸焊接后,8 块复合板在有效区的复合率均达到 100%,界面波反射高度在 15%~25% 之间,起爆点存在 Φ20 mm 未结合区;C276 表面鼓包现象消失,表面质量良好;界面着色探伤未发现任何缺陷。取样测试,180°外弯曲($d=4a$)和内弯曲($d=3a$)测试后,界面完好;界面剪切强度 349 MPa,结合良好。

表 3 C276/Q345R 爆炸复合板力学性能

Tab.3 Mechanical properties of explosive welding C276/Q345R clad plate

编号	力学性能			0 ℃冲击/J		界面剪切强度/MPa	
	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A/%	测试	平均值	数值	平均值
JB/T 4748-2002	497~635	≥303	≥21	≥31	≥31	≥200	≥200
爆炸态	635	550	18.5	38/33/37	36	359/338/349	349

C276/Q345R 复合板在爆炸焊接的过程中发生了高速倾斜碰撞和高应变率的强烈塑性变形,产生了加工硬化和表面缺陷,同时,由于两种金属的线膨胀系数的差异造成可观的残余应力的存在^[6],为了恢复复合板的内部结构和组织性能,需要进行热处理。哈氏合金 C276 不具备足够的热稳定性,在 650~1 090 ℃范围内长时间时效会在晶界附近析出碳化物或金属间化合物而产生晶间腐蚀^[7]。设计了 11 组热处理参数进行试验,结果见表 4;为了防止 C276 表面产生硫脆,采用电炉热处理。

对比 C276/Q345R 复合板进行不同热处理后的力学性能,图 3 是复合板界面剪切强度和冲击功与热处理温度的关系曲线(不包括 920 ℃空冷试样)。

表 4 C276/Q345R 复合板热处理工艺

Tab.4 Heat treatment process of C276/Q345R clad plate

工艺	保温温度/℃	保温时间/h	冷却方式
1	550	4	空冷
2	600	3	空冷
3	650	2	空冷
4	700	2	空冷
5	800	2	空冷
6	920	1	空冷
7	920	1	喷雾冷却
8	970	0.5	喷雾冷却
9	1 020	0.5	喷雾冷却
10	1 070	0.5	喷雾冷却
11	1 120	0.5	喷雾冷却

经过不同热处理工艺后的试板界面剪切强度均在 300 MPa 以上,高于 JB/T 4748-2002《压力容器用镍及镍基合金爆炸复合钢板》所要求的界面剪切强度 ≥ 200 MPa,除了 650~700 °C 剪切强度低于爆炸复合态,其他温度的热处理不会降低复合板的界面抗剪切强度(图 3-a);冲击功随着热处理温度的升高波动后逐渐增加,970 °C 后降低,在 800~1 020 °C 之间冲击值较高(图 3-b)。600 °C 和 720 °C 退火试样剪切后外观见图 4,700 °C 退火试样断口与 620 °C 相比有一些脆性特征。

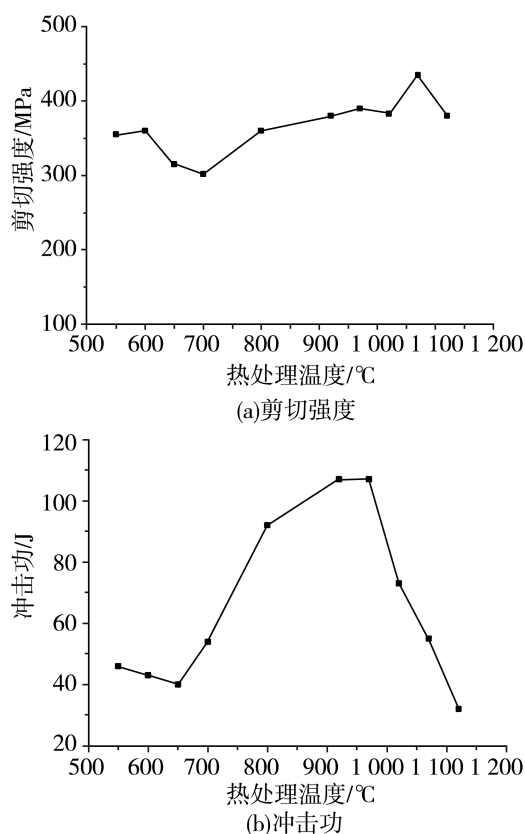


图 3 界面剪切强度和冲击功与热处理温度的关系曲线

Fig.3 Relation curves of interface shear strength and impact energy with different annealing temperatures



图 4 600 °C (左) 和 720 °C (右) 退火试样剪切后外观

Fig.4 Shear appearance of specimens after annealing at 600 °C (left) and 720 °C (right)

图 5 是复合板性能变化曲线(不含 920 °C 空冷),抗拉强度和屈服强度随着热处理温度的升高而有所降低,当温度高于 650 °C 后抗拉强度和屈服强度变化较小(图 5-a);伸长率方面,除 700 °C 外,其他温度试样的伸长率均超过爆炸焊接试样(图 5-b)。920 °C 退火相当于正火,再进行水冷处理后,由于大量马氏体形成,材料的屈服强度和抗拉强度显著提升,而伸长率明显下降,冲击功也急剧下降。经 620~650 °C 二次热处理,会形成回火索氏体,改善力学性能。

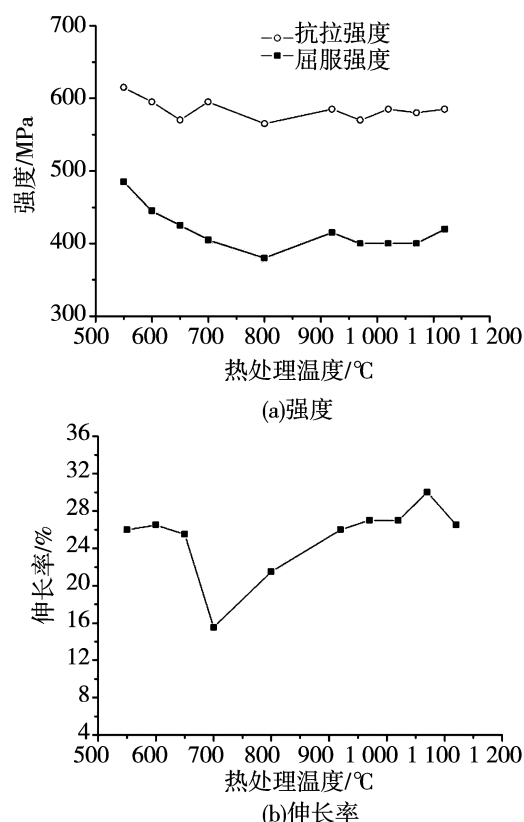


图 5 复合板性能随热处理温度的变化曲线

Fig.5 Curves of the clad plate properties with different annealing temperatures

除 920 °C 空冷外,其他试样的内外弯曲均完好,920 °C 退火空冷试样外弯曲后复层 C276 开裂,外弯曲试样外观见图 6。

由于加入 V、Ti 等合金元素后,Q345R 钢中形成了细小的 C/N 化合物第二相,阻碍了晶粒长大,因此晶粒长大倾向较小,正火后形成了较小晶粒,晶粒的细化是钢板韧性提高的主要原因。经过 920 °C 热处理后空冷时间较长,结合面和 C276 的组织变化影响了性能,造成弯曲后开裂。除 700 °C 伸



图 6 外弯曲试样外观

Fig.6 Morphologies of external bending specimens

长率和 920 °C 空冷试样外弯曲不合格外,其他试样的抗拉强度、屈服强度、伸长率、冲击功、内外弯曲均符合 JB/T 4748-2002《压力容器用镍及镍基合金爆炸复合钢板》的要求。

图 7 是热处理后复层 C276 的表面硬度,复层的表面硬度随着热处理温度的升高而降低,但是最低值仍然高于爆炸复合态硬度。

对复合板的复层 C276 进行晶间腐蚀试验,不同温度退火后的试样晶间腐蚀合格,表明热处理没

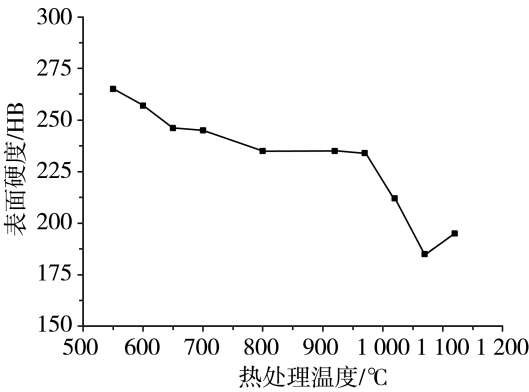


图 7 C276 表面硬度随热处理温度的变化曲线

Fig.7 Curve of C276 surface hardness with different temperatures

有降低 C276 的抗晶间腐蚀性能。

2.3 退火温度对复合板组织影响

经过不同温度退火后,复层 C276 和基层 Q345R 的基体晶粒度及结合面附近的组织形貌演变见表 5。

表 5 不同温度退火后基体和结合面附近组织状况

Tab.5 Microstructures of matrix and bonding interface after annealing at different temperatures

工艺	温度/℃	复层晶粒/级	复层波峰组织	基层晶粒/级	基层波峰组织
-	爆炸复合	6	变形带+孪晶γ+微量碳化物	8.5	变形铁素体+分散及连续珠光体
1	550+空冷	6	变形孪晶γ+微量碳化物	8.5	变形基体+分散及连续珠光体
2	600+空冷	5.5	孪晶γ+微量碳化物	11	再结晶铁素体+粒状珠光体
3	650+空冷	5.5	孪晶γ+微量碳化物	11	再结晶铁素体+粒状珠光体
4	700+空冷	5.5	孪晶γ+碳化物	8.5	粗化铁素体+球状珠光体
5	800+空冷	7	长大晶粒+晶界及分散碳化物	8.5	粗化铁素体+少量球状碳化物
6	920+空冷	4.5	粗大晶粒+分散碳化物	8.5	粗化铁素体+少量碳化物
7	920+喷水	5.5	长大晶粒+部分碳化物	9.5	马氏体+晶界碳化物
8	970+喷水	6	长大晶粒+晶界碳化物	8.5	马氏体+粗大断续奥氏体
9	1 020+喷水	6	长大晶粒+微量碳化物	9.5	马氏体+铁素体+少量碳化物
10	1 070+喷水	6	长大晶粒+微量碳化物	9	马氏体+铁素体+分散碳化物
11	1 120+喷水	6	长大晶粒+微量碳化物	9	马氏体+铁素体+微量碳化物

图 8 是复合板中 C276 基体不同退火状态的微观形貌,复层 C276 厚度较薄,在爆炸焊接的爆轰中

形成了较多孪晶和变形剪切带(图 8-a);在 600 °C 及其以上温度退火后剪切带消失,650 °C 退火后形成

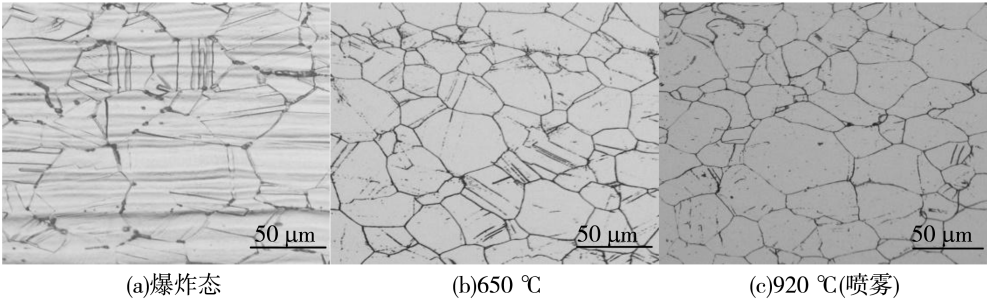


图 8 不同温度退火后复层 C276 基体的组织

Fig.8 Microstructures of C276 matrix after annealing at different temperatures

了较均匀的等轴晶组织和一些孪晶,部分晶粒内存在微量碳化物第二相(图 8-b);在 700~920 ℃退火后空冷,产生了一些第二相析出物,而在 920 ℃退火后喷雾冷却(淬火),仍基本保留着固溶态的粗化组织,有微量第二相残留(图 8-c)。

图 9 是复合板结合界面附近 C276 波峰的微观形貌,在爆炸焊接的爆轰结合界面附近中产生了局

部高温和剧烈变形,C276 波峰附近产生了剪切变形带和部析出物,晶粒内形成了较多孪晶(图 9-a);650 ℃退火后形成了较均匀的等轴晶组织,部分晶粒内存在孪晶,结合面处存在薄层扩散层(图 9-b);在 920 ℃退火后喷雾冷却,结合面附近的固溶和扩散层增厚,晶界附近有部分第二相(图 9-c)。

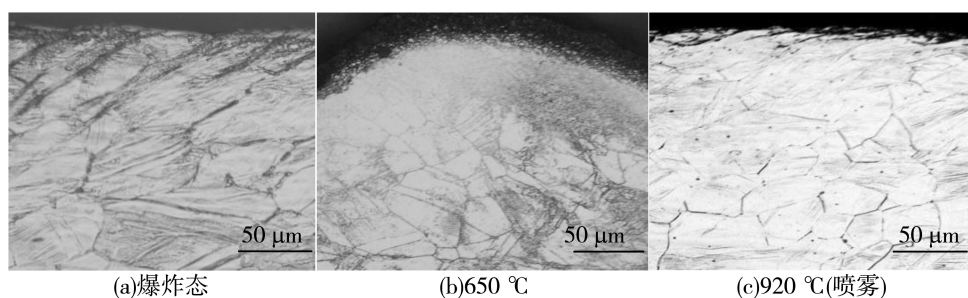


图 9 不同温度退火后结合面附近 C276 波峰的组织

Fig.9 Microstructures of C276 wave crest near the interface after annealing at different temperatures

图 10 是复合板退火后结合界面附近 Q345R 波峰的微观形貌,爆炸复合态为铁素体+珠光体组织,波峰附近基体有明显的流线状变形,在局部高温下珠光体发生分解和破碎,形成了较多分散状粒状珠光体,离波峰较远的基体上存在着较明显的带状组织(珠光体)(图 10-a);650 ℃退火后为晶粒完成再

结晶并发生轻微粗化,界面附近形成了一薄层扩散层,珠光体发生了转化分解,碳化物数量明显减少(图 10-b);在 920 ℃退火后水冷,形成了马氏体+晶界碳化物,结合面附近扩散层增厚并生成了一些化合物,晶界区域出现了较多球化碳化物第二相(图 10-c)。

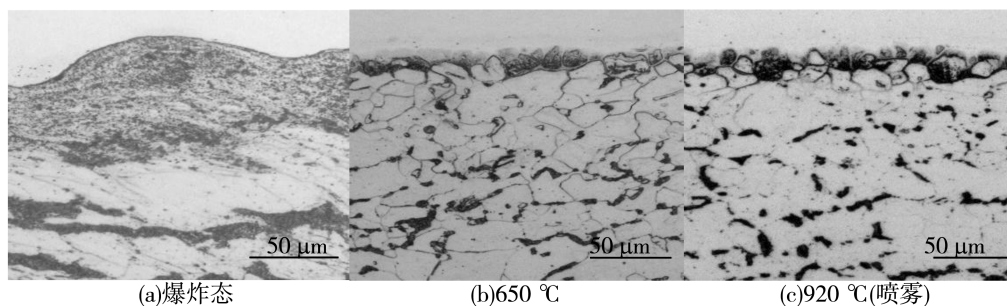


图 10 不同温度退火结合面附近 Q345R 波峰的组织

Fig.10 Microstructures of Q345R wave crest near the interface after annealing at different temperatures

综合分析,热处理制度采用 550~650 ℃退火后空冷或 920~1 070 ℃退火后喷雾加速冷却的方式,C276/Q345R 复合板可以获得良好的力学与工艺性能,无晶间腐蚀现象。

对制备的 C276/Q345R 复合板进行 600 ℃×3 h 保温,冷却方式为空冷。热处理炉采用煤气自发生炉,为了避免煤气燃烧导致复层 C276 表面产生硫脆,在 C276 表面涂刷镍基合金抗氧化涂料进行保护。退火后对复层 C276 表面进行硫脆分析,抛光态和浸蚀态形貌见图 11。复层 C276 没有出现硫脆

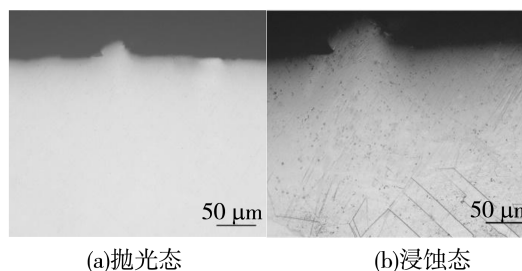


图 11 退火后复层 C276 组织

Fig.11 Microstructures of C276 layer after annealing

现象,表明镍基合金抗氧化涂料在热处理过程中有效的保护了复层 C276。

退火后的复合板取样进行力学性能测试,试验结果见表 6。

表 6 600 °C 退火后 C276/Q345R 复合板力学性能

Tab.6 Mechanical properties of C276/Q345R clad plates after annealing at 600 °C

厚度 /mm	$R_{p0.2}$ /MPa	R_m /MPa	$A/\%$	0°C 冲 击/J	弯曲 /180°	剪切强度 /MPa
3+60	415/421	582/587	26.5/26	106/98/92	合格	380/390
4+38	436/425	591/573	26.5/25.5	86/76/70	合格	380/325/360
3+40	380/400	566/585	24.5/23.5	108/95/97	合格	350/365/355
3+26	415/400	585/570	27/26	106/104/110	合格	385/400/380
3+24	400/420	580/585	30/27	66/56/59	合格	365/400/385

由图 11 可见,复合板界面结合完好,没有出现分层、裂纹等缺陷。从表 6 的力学性能结果来看,600 °C 退火后,不同厚度规格的复合板结合性能良好,满足相关标准要求。

2.4 分析和讨论

C276/Q345R 复合板经过爆炸焊接工艺测试,采用 0.4 mm 铜皮并经过热处理后制作支撑,避免了爆炸焊接后 C276 表面的支撑鼓包现象。爆炸焊接获得的结合界面是波状的,在波动传播的爆炸载荷作用下,结合界面上发生一种波状的和不可逆的塑性变形,从界面开始向钢基体金属内部的变形由强变弱并终止于波形的连线上。

金属材料在爆炸焊接后,结合区会有一薄层金属的塑性变形、熔化以及扩散。为了消除这种影响,常采用退火热处理办法,消应力退火可以消除其内部的残余应力,再结晶退火能够使塑性变形后的金属组织回复和再结晶;合适的热处理工艺能使爆炸复合材料具有良好的综合的物理及化学性能等^[9,10]。经过爆炸焊接之后,C276 合金的耐蚀性能会明显下降,经过 580 °C 退火处理后,C276 合金的耐蚀性能得到一定程度的恢复,1 020 °C 退火后会恢复到与原来相当的水平^[3]。因此,热处理是复合材料一个重要的后续加工工序。

爆炸焊接制备的 C276/Q345R 复合板,随着退火温度升高发生了再结晶和晶粒长大及第二相的球化溶解等变化;进行 920 °C 热处理,然后分别采取空冷和喷水冷却后,C276 的晶粒分别为 4.5 级和 5.5 级,说明在高温热处理时,采用快速冷却方式有利

于获得较细的组织。在复合界面形成一条亮带,由图 10 可知,这一亮带物质为 Fe 和 Ni 在变温条件下生成的固溶体,从剪切强度测试结果看,该固溶物并不会降低复合板的界面结合强度。从 Fe-Ni 二元相图中看出,Fe 和 Ni 在高温情况下只生成固溶体而不会象钛-钢复合板那样生成金属间化合物而降低界面结合强度^[8]。

3 结论

(1) C276/Q345R 复合板的爆炸焊接工艺是可行的,能够获得良好的结合性能,使用铜支撑时选用退火后的 0.4 mm 薄铜片效果良好。

(2) C276/Q345R 爆炸复合板采用 550~650 °C 的低温热处理后空冷或采用 920~1 070 °C 的高温热处理并采取喷雾冷却的方法能获得良好的综合性能,无晶间腐蚀现象。

(3) 在复合板表面涂刷镍基合金抗氧化涂料可防止在热处理过程中 C276 发生疏松。

参考文献

- [1] 万自永,闫飞昊,张云浩,等.不同热处理制度对哈氏合金 C276 耐晶间腐蚀性能影响[J].材料开发与应用,2015,30(5):49-51.
- [2] 吴冰,李晋炜,毛智勇,等.镍基高温合金电子束焊接接头疲劳性能[J].焊接学报,2013,34(8):109-112.
- [3] 孙绍恒,杨宇军,夏金民,等.热处理工艺对爆炸焊接后哈氏合金 C276 耐蚀性能的影响[J].金属热处理,2019,44(5):158-161.
- [4] 朱晓红,吕新峰,陈国琦,等.复合板爆炸焊接的失效分析[J].金属热处理,2014,39(1):144-148.
- [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].精密成型工程,2020,12(2):67-71.
- [6] 王宇飞,张金民,岳宗洪,等.321 钢/Qd370qD 钢爆炸焊接界面纳米晶组织[J].金属热处理,2009,34(10):9-11.
- [7] 刑卓.Hastelly C 系列合金综述[J].化工设备与管道,2007,44(2):51-58.
- [8] 郑远谋.爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用[M].长沙:中南大学出版社,2002.
- [9] 郑远谋,黄荣光,陈世红.金属爆炸复合材料的热处理[J].金属热处理,1999,24(1):26-30.
- [10] 万建春,郑世平.磷酸盐反应釜用 C-276+16MnR 复合板的腐蚀原因分析[J].压力容器,2006(11):34-35.