

# 爆炸焊 304/Q345R 复合板热处理工艺及分析

湖州市特种设备检测研究院(222042) 杨学明 夏临明

**摘要** 研究了不同热处理工艺对爆炸焊 304/Q345R 复合板显微组织、力学性能和耐腐蚀性的影响。结果表明 304/Q345R 复合板最佳的热处理方案为  $(880 \pm 15)^\circ\text{C}$ , 1 h, 风冷。

**关键词:** 爆炸焊 复合板 热处理

**中图分类号:** TG422

## 0 前言

金属复合板是指在一层金属板上覆以另外一种金属板,以达到在保证使用效果(防腐性能、机械强度等)的前提下节约资源、降低成本的效果,目前在石化行业的压力容器制造中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。以碳钢为基层,与不锈钢覆层结合而成的不锈钢/碳钢复合钢板就是其中应用最为广泛的一类。它充分发挥了两种材料特性优势,既具有不锈钢的耐腐蚀、耐磨性、抗磁性、豪华性和装饰性,又具有碳钢良好的焊接性、成型性、拉延性和导热性,因而它是一种多功能材料,由于节约镍铬合金的使用降低了成本,同时适用性很强<sup>[2]</sup>。

复合板的复合方法有爆炸复合、轧制复合、爆炸轧制复合等<sup>[3]</sup>。文中爆炸复合板的生产工艺是将覆板重叠置于基板上,覆板和基板之间用垫子间隔一定的距离,覆板上面平铺炸药,利用炸药爆炸产生的巨大能量驱动两块金属板高速倾斜碰撞进行焊接。从原理上来说,爆炸焊是依靠冲击及摩擦把要焊接的金

属材料的表面氧化膜破碎并消除,再加上在冲击及摩擦过程中产生的热量,从而为接触面上原子之间的冶金结合提供必要的条件。由于爆炸复合过程中基板、复板之间发生高速碰撞,因此在复合界面会产生残余应力,使界面两侧材料局部冲击硬化,爆炸复合材料内部产生宏观和微观的残余塑性变形以及熔化。由于这种残余变形和熔化的存在导致了其中残余应力的出现。文中研究了不同热处理工艺对 304/Q345R 复合板性能的影响,总结规律,以得出该试验材料最佳的热处理方案。

## 1 试验材料与方法

试验所采用的材料为 304/Q345R 爆炸焊复合板。爆炸焊工艺为采用 47# 拌沙的膨化硝酸铵炸药,间距为 10 mm(使用重金属皮制作的间隙作为支撑物),炸药高度为 38 mm,如图 1 所示。其中复板 304 不锈钢主要化学成分、力学性能见表 1,尺寸规格为 300 mm × 350 mm × 4 mm;基板 Q345R 主要化学成分、力学性能见表 2,尺寸规格为 300 mm × 350 mm × 22 mm。

表 1 复板 304 不锈钢主要化学成分及力学性能

化学成分(质量分数,%)						力学性能		
C	Mn	P	S	Ni	Cr	$R_{el}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	$A(\%)$
0.07	1.22	0.021	0.002	9.60	18.50	225	545	43

表 2 基板 Q345R 主要化学成分及力学性能

化学成分(质量分数,%)				力学性能			
C	Mn	S	P	$R_m/\text{MPa}$	$R_{el}/\text{MPa}$	$A(\%)$	$(20^\circ\text{C})KV_2/\text{J}$
0.17	1.40	0.008	0.007	520	350	34	225

采用上海中加电炉有限公司制造的 12-12 型号的热处理炉,工作区尺寸为 500 mm × 300 mm × 200 mm,

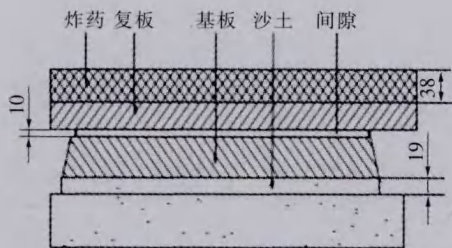


图1 爆炸焊工艺

最高工作温度 1 200 ℃。试验是将试样分为 5 组来做，试验前要先用火焰切割将其均分 5 组，有 4 组每组一块爆炸焊复合板，规格为 (22 + 4) mm × 300 mm × 70 mm；另外有一组为 2 块爆炸焊复合板，规格为 (22 + 4) mm × 300 mm × 35 mm。热处理工艺参数见表 3。

表 3 热处理工艺参数

试样编号	热处理温度 $T/^\circ\text{C}$	保温时间 $t/\text{h}$	冷却方式	入炉炉温 $t_{\text{入}}/^\circ\text{C}$
1 <sup>#</sup>	—	—	—	—
2 <sup>#</sup>	650 ± 15	1	风冷	≤ 300
3 <sup>#</sup>	830 ± 15	1	风冷	≤ 300
4 <sup>#</sup>	880 ± 15	1	风冷	≤ 300
5 <sup>#</sup>	920 ± 15	1	风冷	≤ 300

利用 XIOVERT200M 型数码金相显微镜进行显微组织观察。拉伸、剪切、冲击试验参考国家标准进行试验，采用 GB/T 4334.1—2000《不锈钢 10% 草酸浸蚀试验方法》进行晶间腐蚀试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织分析

图 2 为 304/Q345R 复合板结合部位低倍下形貌特征，焊缝为均匀的波浪状，无裂纹，表现出良好的结合性能。

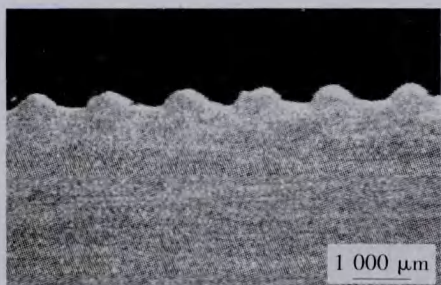
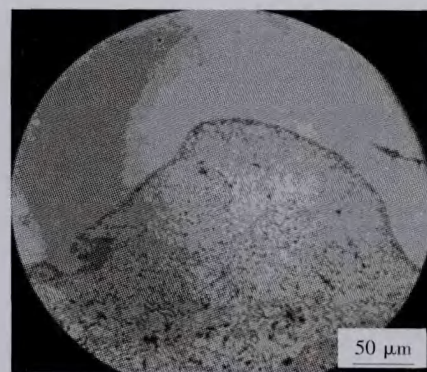
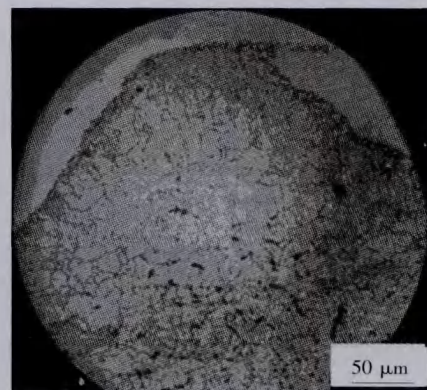


图 2 304/Q345R 复合板结合部位

图 3 为图 2 中波峰处的组织，可以清楚地看出 304 不锈钢板和 Q345R 碳钢板的结合界面，在结合界面处有明显的组织区别，形成几个不同的区域。由于不锈钢 304 的含碳量很低，为 0.07%，而 Q345R 的含碳量为 0.17%，二者的含碳量相差 2.5 倍。因此在爆炸焊冲击波形成的高温的作用下，爆炸焊的结合区出现了碳的浓度扩散现象，碳从浓度高的 Q345R 向浓度低的 304 扩散，形成一定范围的碳扩散区，如图 3a 所示。热处理时，随着温度的升高，碳扩散，但热处理对扩散范围影响不大，如图 3b 所示。



(a) 未热处理



(b) 880 ℃热处理

图 3 爆炸焊复合板焊缝微观组织

不同的热处理工艺会对复合板的组织产生影响，对于 304/Q345R 复合板，主要是基板 Q345R 组织的变化。

图 4 为基板 Q345R 的显微组织，为珠光体 + 铁素体组织，其中未热处理的基板中珠光体呈带状分布，而热处理改善了带状组织，温度越高，带状组织消除的越明显。

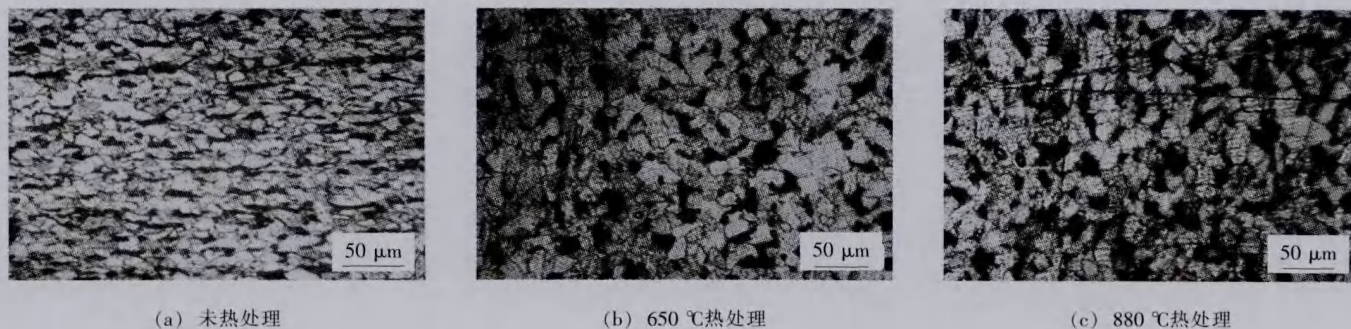


图4 爆炸焊复合板基板显微组织

## 2.2 力学性能分析

表4为爆炸焊后不同热处理规范下的试样拉伸试验数据。结果显示,未热处理时试样的屈服强度、抗拉强度分别为400 MPa,590 MPa,比热处理后要高很多,而塑性较低,断后伸长率仅为19.5%。随热处理

温度升高,抗拉强度降低,由590 MPa下降到495 MPa,下降了16%;屈服强度也降低,由400 MPa下降到315 MPa,下降了21%;塑性逐渐增大,断后伸长率由19.5%增大到34.5%,增大了77%,接近于未热处理状态时的2倍。

表4 拉伸试验数据

试样编号	拉伸部位宽度 $b/\text{mm}$	拉伸部位厚度 $a/\text{mm}$	屈服力 $F_s/\text{kN}$	屈服强度 $R_{eL}/\text{MPa}$	最大力 $F_b/\text{kN}$	抗拉强度 $R_m/\text{MPa}$	断后伸长率 $A(\%)$
1 <sup>#</sup>	30.00	19.82	237.00	400	350.48	590	19.5
2 <sup>#</sup>	29.76	20.12	236.40	395	315.17	525	26.5
3 <sup>#</sup>	30.10	20.08	191.57	315	299.46	495	32.5
4 <sup>#</sup>	30.06	20.14	190.35	315	299.23	495	33.0
5 <sup>#</sup>	30.14	20.14	196.79	315	301.48	495	34.5

由表5中数据可以看出,爆炸焊后的复合板抗剪强度很高,最高值达到362 MPa,这是因为爆炸焊结合区存在的残余应力很高,对复合板的使用性能有很大影响,结合层易分离,结合区容易断裂,而焊后热处理可以很好地改善组织,消除残余应力,因此需要进行爆炸焊后的热处理工作。

表5 剪切试验数据

试样编号	剪切部位厚度 $a/\text{mm}$	剪切部位宽度 $b/\text{mm}$	剪切力 $F_m/\text{kN}$	抗剪强度 $\tau_b/\text{MPa}$
1 <sup>#</sup>	4.92	24.30	42.05	352
2 <sup>#</sup>	4.78	23.82	41.24	362
3 <sup>#</sup>	4.82	23.96	38.25	333
4 <sup>#</sup>	4.62	24.04	36.87	332
5 <sup>#</sup>	4.76	24.10	37.95	332

每种热处理试样各做3次冲击试验,试验所得结果见表6。可以看出,爆炸焊后不热处理和热处理情况

下基板 Q345R 的冲击性能都非常好,均能达到200 J左右。由于试验所用基板 Q345R 的冲击吸收能量在200 J左右,甚至达到248 J。这说明,热处理对材料的冲击性能没有很大的影响,复合板中基板 Q345R 的冲击性能与原材料的冲击性能相似。

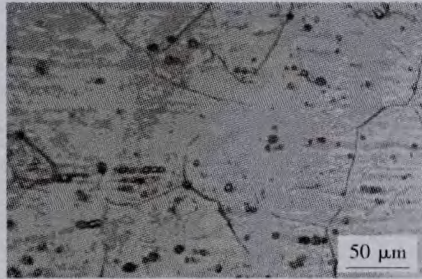
表6 冲击试验数据(20 °C)

试样编号	一次	二次	三次	平均值
1 <sup>#</sup>	248	236	229	238
2 <sup>#</sup>	206	194	218	206
3 <sup>#</sup>	198	212	208	206
4 <sup>#</sup>	205	217	196	206
5 <sup>#</sup>	211	207	202	207

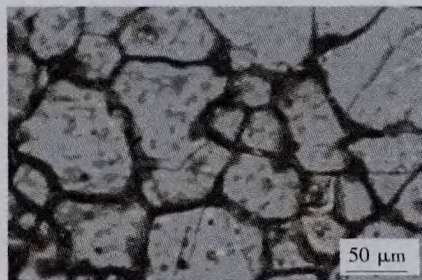
## 2.3 晶间腐蚀性能分析

对复板304不锈钢主要进行耐晶间腐蚀性能的研究,不锈钢的敏化温度区间为450~850 °C(其中以650 °C最为敏感)<sup>[4]</sup>,所以试验中2<sup>#</sup>,3<sup>#</sup>试样是在敏化区间

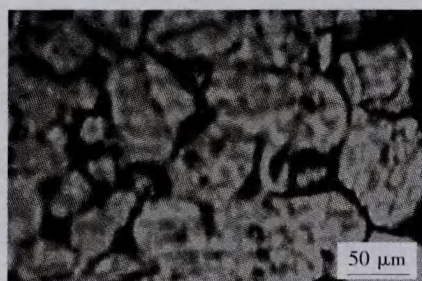
进行的热处理,从图 5b 和图 5c 也可以看到,不锈钢晶间受腐蚀,在显微镜下观察到成黑色网状,网较粗较黑,很明显。由于 2<sup>#</sup>试样是在最敏感的温度 650 °C 保温了 1 h,晶界析出碳化物(主要是 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>)严重,所以晶界全部被腐蚀,成黑色全网状。而 3<sup>#</sup>试样的热处理温度是(830 ± 15) °C,已接近敏化区间的边缘(850 °C),所以腐蚀不是很严重,只是部分晶界受腐蚀,可看到大概半网状的晶界腐蚀形貌。而爆炸焊后未热处理



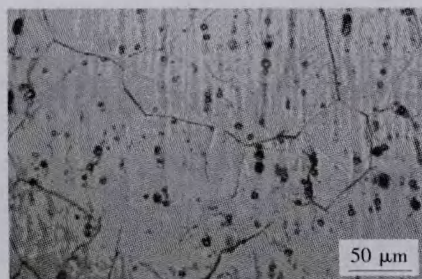
(a) 未热处理



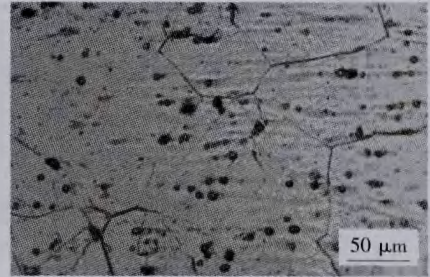
(b) 650 °C, 1 h 热处理



(c) 830 °C, 1 h 热处理



(d) 880 °C, 1 h 热处理



(e) 920 °C, 1 h 热处理

图 5 不锈钢 304 的金相显微组织

的 1<sup>#</sup>试验及高于敏化区间热处理的 4<sup>#</sup>和 5<sup>#</sup>试验,则没有腐蚀现象,只有少量的晶界处析出的碳化物被腐蚀,呈黑色点状或颗粒状,如图 5a、图 5d、图 5e 所示。

### 3 结 论

(1) 304 和 Q345R 爆炸焊复合,焊缝为均匀的波浪状,结合区有碳的浓度扩散现象。基板 Q345R 热处理前后组织均为铁素体 + 珠光体组织,未热处理时珠光体呈带状分布,热处理可以消除带状组织。

(2) 力学性能研究表明,热处理均会降低复合板的屈服强度、抗拉强度和抗剪强度,且随热处理的温度的升高而降低,而断后伸长率则相反;冲击性能较未热处理时有所下降,但不同热处理工艺对其影响不大。

(3) 晶间腐蚀结果表明,对于在敏化区间外的 880 °C 和(920 ± 15) °C 热处理,没有发生晶间腐蚀现象,所得材料的耐晶间腐蚀性能很好。

(4) 综合复合板的力学性能和耐腐蚀性能,304/Q345R 复合板适宜的热处理方案为(880 ± 15) °C, 1 h, 风冷。

### 参 考 文 献

- [1] 李永松, 沈怡琳. 不锈钢复合板制作新工艺及市场前景的研究[J]. 广西机械, 2001 (4): 34 - 36.
- [2] 杨宜生. 不锈钢复合材料的应用研究[J]. 江苏机械制造与自动化, 1997 (2): 15 - 16.
- [3] 孙 浩, 王克鲁. 不锈钢复合板生产方法和制备技术的探讨[J]. 上海金属, 2005, 27 (1): 50 - 54.
- [4] 潘 莹, 宋 维. 敏化奥氏体不锈钢的晶间腐蚀研究[J]. 青岛化工学院学报, 1998, 19 (4): 369 - 373.

作者简介: 杨学明, 1983 年出生, 大学本科, 工程师。主要从事承压类特种设备检验检测工作。