

# 焊后热处理对 S30408/Q345R 不锈钢复合板耐蚀性能的影响

刘文明, 张新明, 程新路, 欧阳凯

(中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210023)

**摘要:**研究了焊后热处理对 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头的显微组织、耐晶间腐蚀性能、抗应力腐蚀性能的影响。结果表明,经 580 °C × 2 h 焊后热处理后,焊接接头过渡层焊缝与基层焊缝熔合线附近出现了合金元素扩散,脱碳层范围减小;焊后热处理后,焊接接头的耐晶间腐蚀性能下降,腐蚀裂纹位于焊缝熔合线附近;焊接接头的抗应力腐蚀性能受焊后热处理影响不大,慢应变速率拉伸断裂接头未发现二次断裂,S30408 不锈钢覆层应力腐蚀破裂敏感性比值低,应力腐蚀敏感性小。

**关键词:**焊后热处理;不锈钢复合板;显微组织;晶间腐蚀;应力腐蚀

中图分类号: TG404; TG453.9 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2024)01-0172-07

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.01.027

## Effect of post-weld heat treatment on corrosion resistance of S30408/Q345R stainless steel clad plate

Liu Wenming, Zhang Xinming, Cheng Xinlu, Ouyang Kai

(China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 210023, China)

**Abstract:** Effect of post-weld heat treatment (PWHT) on microstructure, intergranular corrosion resistance and stress corrosion resistance of the weld joint of S30408/Q345R stainless steel clad plates was studied. The results show that after the PWHT (580 °C for 2 h), the alloying element diffusion occurs near the fusion line between transition layer weld and base layer weld of the weld joint, and the range of decarburization layer decreases. After the PWHT, the intergranular corrosion resistance of the weld joint decreases, and the corrosion crack is located near the weld fusion line. The PWHT has little influence on the stress corrosion resistance of weld joints. No secondary fracture is found at the tensile fracture of the weld joint, and the stress-corrosion cracking sensitivity ratio of the S30408 stainless steel clad layer is low, showing the stress corrosion sensitivity is small.

**Keywords:** post-weld heat treatment; stainless steel clad plate; microstructure; intergranular corrosion; stress corrosion

不锈钢复合板具有基层碳钢和复层不锈钢的综合性能,能节约贵重金属,大大降低生产成本。但由于基层和复层差异较大,容易产生较大的内应力,且在焊接过程中也容易产生应力。对于接头的应力通常需要进行焊后消应力处理,目前常用的方法主要有自然时效、热时效以及振动时效。采用自然时效<sup>[1]</sup>、回归再时效+分级时效<sup>[2]</sup>方法进行铝合金的时效处理均可获得良好的抗应力腐蚀性能。随着时效时间的延长,抗应力腐蚀敏感指数逐渐降低,但自然时效时间长会影响生产效率。相比于自然时效,热时效的生产周期大为缩短,被广泛应用于工程实践中。但不锈钢存在敏化区域,进行热时效可能恶化晶间腐蚀性能,奥氏体不锈钢诱发晶间腐蚀的敏感温度约为 650 °C<sup>[3]</sup>。采用固溶、调质、敏化和模拟消应力 4 种热处理方法<sup>[4-7]</sup>,不锈钢

复合板的显微组织中均未发现碳化物或氮化物的析出,晶间腐蚀性能均保持良好。采用 550 °C 保温 2 h 的工艺对 Q345R/316L 复合板焊接接头进行热处理后,焊接接头残余应力显著下降,但接头出现了晶间腐蚀裂纹<sup>[8]</sup>。445J2 不锈钢在敏化温度 650 °C 保温 2 h、溶液温度为 60 °C 的敏化处理条件下,表现出了最高的应力腐蚀敏感性<sup>[9]</sup>。本文以 S30408/Q345R 不锈钢复合板为研究对象,研究了焊后热处理(Post-weld heat treatment, PWHT)对 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头的抗晶间腐蚀性能及抗应力腐蚀性能的影响。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

采用 S30408/Q345R 不锈钢复合板进行研究,试

收稿日期:2023-08-02

修订日期:2023-11-09

作者简介:刘文明(1986—),男,工程师,博士,主要研究方向为先进焊接技术及热处理,E-mail:liuwm\_cscec@163.com

引文格式:刘文明,张新明,程新路,等.焊后热处理对 S30408/Q345R 不锈钢复合板耐蚀性能的影响[J].金属热处理,2024,49(1):172-178.

Liu Wenming, Zhang Xinming, Cheng Xinlu, et al. Effect of post-weld heat treatment on corrosion resistance of S30408/Q345R stainless steel clad plate[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(1): 172-178.

板尺寸为(3 + 20) mm × 400 mm × 200 mm。焊接方法为焊条电弧焊(Shielded metal arc welding,SMAW),焊接材料分别为基层焊材 E5015、覆层焊材 E308-16 以及过渡层焊材 E309-16。母材及焊接材料的化学成分如表 1 所示。

**1.2 试验方法**  
焊接坡口形式为 X 型坡口,焊接道数为 6 道,焊接坡口形式及焊接顺序如图 1 所示,焊接工艺参数如表 2 所示。焊后对不锈钢复合板进行热处理,热处理工艺如图 2 所示。

表 1 母材及焊材的化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition of the base metals and weld rods (mass fraction, %)

| Material | C     | Si    | Mn        | P      | S      | Cr          | Ni         | Mo    | N     | Cu    | Nb     | V      | Ti     | Alt    |
|----------|-------|-------|-----------|--------|--------|-------------|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| S30408   | ≤0.03 | ≤0.75 | ≤2.00     | ≤0.035 | ≤0.015 | 18.00-20.00 | 8.00-10.50 | —     | ≤0.10 | —     | —      | —      | —      | —      |
| Q345R    | ≤0.20 | ≤0.55 | 1.20-1.70 | ≤0.025 | ≤0.010 | ≤0.30       | ≤0.30      | ≤0.08 | —     | ≤0.30 | ≤0.050 | ≤0.050 | ≤0.030 | ≥0.020 |
| E308-16  | ≤0.08 | ≤1.00 | 0.5-2.5   | ≤0.03  | ≤0.02  | 18.0-21.0   | 9.0-12.0   | ≤0.75 | —     | ≤0.75 | —      | —      | —      | —      |
| E309-16  | ≤0.15 | ≤1.00 | 0.5-2.5   | ≤0.03  | ≤0.02  | 22.0-25.0   | 12.0-14.0  | ≤0.75 | —     | ≤0.75 | —      | —      | —      | —      |
| E5015    | ≤0.15 | ≤0.90 | ≤1.60     | ≤0.025 | ≤0.015 | ≤0.20       | ≤0.30      | ≤0.30 | —     | —     | —      | ≤0.08  | —      | —      |

表 2 焊接工艺参数  
Table 2 Parameters of the welding process

| Pass | Welding rod | Diameter $\phi$ /mm | Welding current/A | Arc voltage/V | Welding speed/(cm · min <sup>-1</sup> ) | Heat input/(kJ · cm <sup>-1</sup> ) |
|------|-------------|---------------------|-------------------|---------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|
| 1    | E5015       | 3.2                 | 100-102           | 20-22         | 10-12                                   | 10-12                               |
| 2-4  | E5015       | 4.0                 | 140-142           | 22-24         | 7-9                                     | 20-25                               |
| 5    | E309-16     | 3.2                 | 98-102            | 20-22         | 7-9                                     | 14-16                               |
| 6    | E308-16     | 3.2                 | 98-102            | 20-22         | 6-8                                     | 18-20                               |

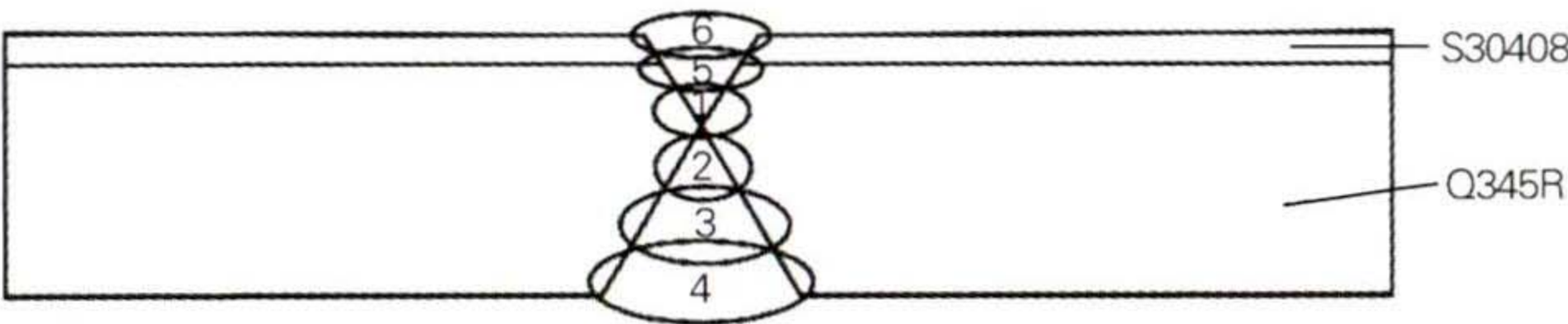


图 1 焊接坡口形式示意图  
Fig. 1 Sketch of the groove shape of the welding

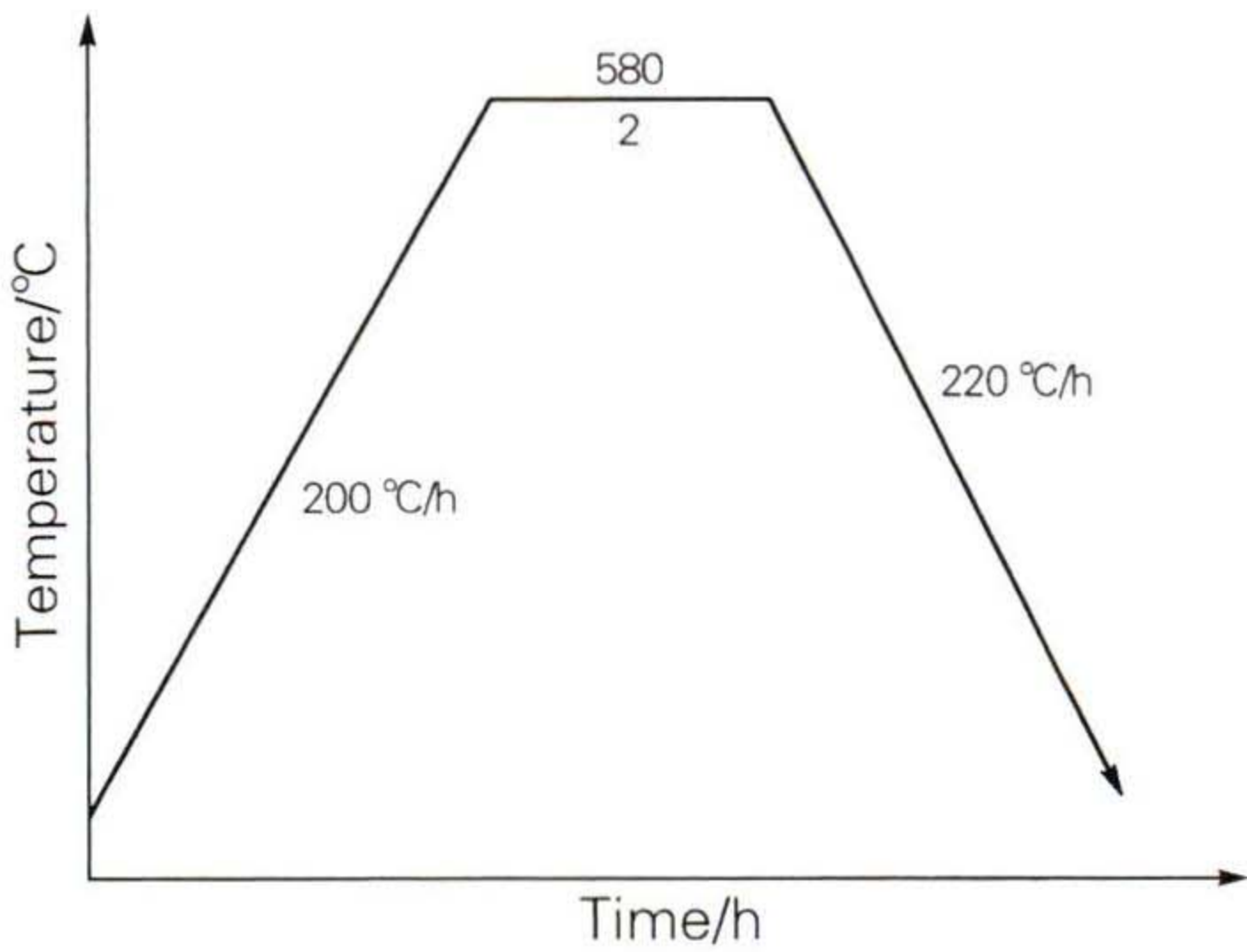


图 2 焊后热处理工艺示意图  
Fig. 2 Sketch of the post-weld heat treatment

分别对焊态及 580 °C 保温 2 h 后的焊接接头进行宏观及微观组织观察、晶间腐蚀性能检测及抗应力腐蚀性能检测。分别采用 5% (体积分数) 硝酸酒精溶液及硫酸铜: 硝酸: 水 = 1 : 5 : 5 的溶液对 Q345R 低合金钢和 S30408 不锈钢进行腐蚀后,采用 MR3000 型倒置

光学显微镜进行焊接接头各区域的微观组织观察。采用 X 射线检测法对焊接接头进行残余应力检测,检测位置为覆层侧焊缝(Weld center)、熔合线外 2 mm (FL + 2)、熔合线外 10 mm (FL + 10) 以及熔合线外 25 mm (FL + 25),如图 3 所示。晶间腐蚀性能检测参照 GB/T 4334—2017《不锈钢压力容器晶间腐蚀敏感性检验》进行不锈钢硫酸-硫酸铜腐蚀试验。抗应力腐蚀性能检测参照 GB/T 15970. 7—2017《金属和合金的腐蚀 应力腐蚀试验 第 7 部分:慢应变速率试验》,采用比较法评定应力腐蚀破裂的敏感性,腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液。

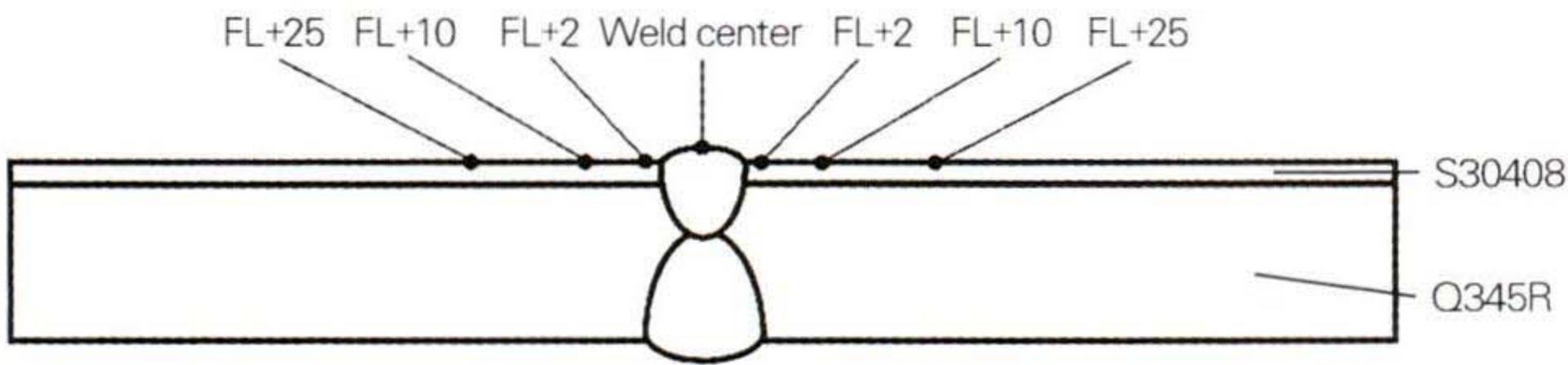


图 3 残余应力检测位置示意图  
Fig. 3 Sketch of the residual stress detection positions

2 试验结果与分析  
2.1 宏观形貌

由于 S30408 不锈钢和 Q345R 低合金钢的化学成分差异较大,导致其组织及性能相差较大,从而在焊接

过程中出现碳迁移等现象。S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头的表面成型及截面宏观形貌如图 4 所示。由图 4 可以看出,不锈钢复合板表面无缺陷,宏观形貌特征显示,Q345R 低合金钢与 S30408 不锈钢之间存在明显的分界线,过渡层焊材与基层焊材之间也存

在较为明显的分界线。焊接接头由 5 个部分组成,分别为母材 (Base metal, BM)、焊接热影响区 (Heat affected zone, HAZ)、基层焊缝区 (Base layer weld zone, BWZ)、过渡层焊缝区 (Transition layer weld zone, TWZ)、覆层焊缝区 (Clad layer weld zone, CWZ)。

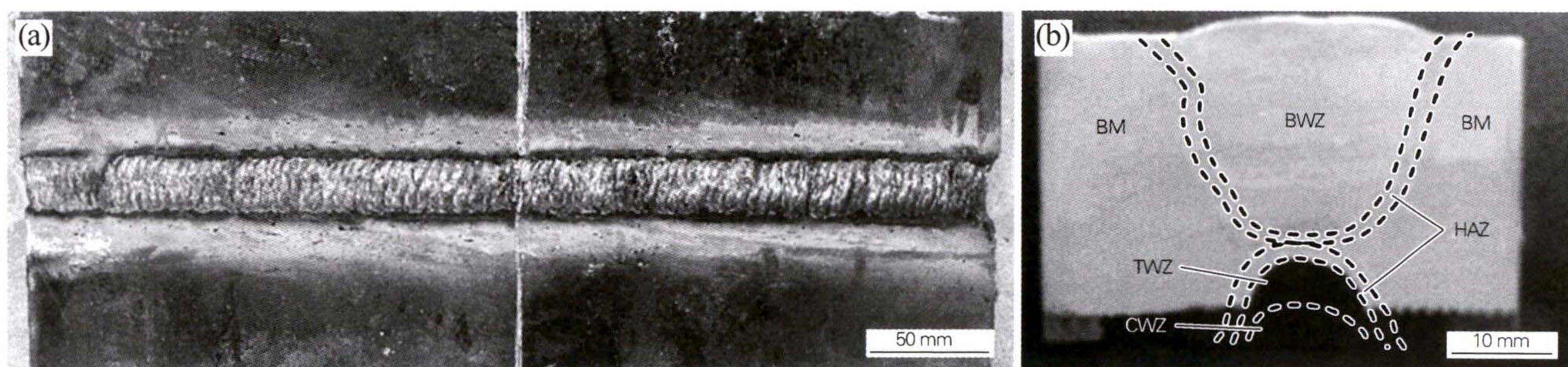


图 4 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头表面成形(a)及截面(b)宏观形貌  
Fig. 4 Macro morphologies of the surface forming(a) and cross section(b) of the weld joint of the S30408/Q345R stainless steel clad plate

## 2.2 微观组织

图 5 为焊态 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头的微观组织。由图 5 可以看出,基层母材(见图 5(a))以铁素体 + 珠光体为主,晶粒尺寸大小不一,且沿轧制变形方向呈带状分布。基层热影响区(见图 5(b))组织与基层母材相同,但晶粒尺寸明显长大,铁素体含量增多,珠光体含量减少。基层焊缝区(见图 5(c))为铸态的铁素体 + 珠光体,晶粒尺寸大小不一,晶粒包含少量的大片块状铁素体。过渡层热影响区(见图 5(d))组织以铁素体 + 奥氏体为主,晶粒较为粗大,奥氏体含量少,这是因为热影响区组织经焊接热循环后奥氏体有部分分解。过渡层焊缝区与基层焊缝区的熔合线位置(见图 5(e))有明显的分界线,且出现白色的脱碳层。过渡层焊缝区(见图 5(f))组织为铁素体 + 奥氏体,晶粒尺寸较为均匀,呈典型的柱状晶组织。覆层母材(见图 5(g))为奥氏体 + 铁素体组织,奥氏体含量较高,耐腐蚀性能较好。经焊接热循环的覆层热影响区(见图 5(h))则表现出晶粒组织粗大,奥氏体经焊接热循环后形成的第二相在铁素体晶粒边界析出。覆层焊缝区(见图 5(i))组织为铸态的铁素体 + 奥氏体等轴晶粒。

图 6 为 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头经焊后热处理后的显微组织。与图 5 对比可以看出,基层母材(见图 6(a))以铁素体 + 珠光体为主,较焊后热处理前,晶粒有部分长大,依然为沿轧制变形方向呈带状分布的晶粒尺寸大小不一的晶粒组织。基层热影响区(见图 6(b))经焊后热处理后,晶粒长大,铁素体

含量增多,珠光体含量减少,形成大量的块状铁素体聚集。基层焊缝区(见图 6(c))经焊后热处理后,铁素体组织长大明显,出现大量的块状铁素体组织,珠光体组织减少。过渡层热影响区(见图 6(d))经焊后热处理后的晶粒组织主要表现为晶界更加明显,奥氏体有部分分解。过渡层焊缝区与基层焊缝区的熔合线位置(见图 6(e))处仍有白色的脱碳层,相较于焊后热处理前,基层焊缝区与过渡层焊缝区的分界线附近出现了一定的合金元素扩散,形成逐步过渡的元素分布形式。过渡层焊缝区(见图 6(f))组织与焊后热处理前相比有更多的晶间析出相。覆层母材(见图 6(g))为奥氏体 + 铁素体,同样出现更多的晶间析出相,耐蚀性下降。经焊接热循环的覆层热影响区(见图 6(h))与焊后热处理前相差不大。覆层焊缝区(见图 6(i))组织为铁素体 + 奥氏体的等轴晶粒,晶界相较于焊后热处理前更多,表明经焊后热处理后有易腐蚀相在晶界析出,覆层焊缝区耐蚀性下降。

## 2.3 残余应力检测

图 7 为焊态和经焊后热处理后的 S30408 不锈钢覆层不同位置的残余应力检测结果。由图 7 可以看出,焊缝及热影响区附近受到较大的残余拉应力作用,最高残余拉应力值为 347.8 MPa,残余应力值随着距焊缝中心距离的增大而逐渐减小,最低残余应力值为 124.3 MPa。经过焊后热处理后,各位置的残余应力值均有所下降,最高残余拉应力仍在熔合线外 2 mm 位置处,为 303.7 MPa,熔合线外 25 mm 处残余应力值略有升高,焊缝残余应力分布相对均匀。结合图 5 和图 6 可

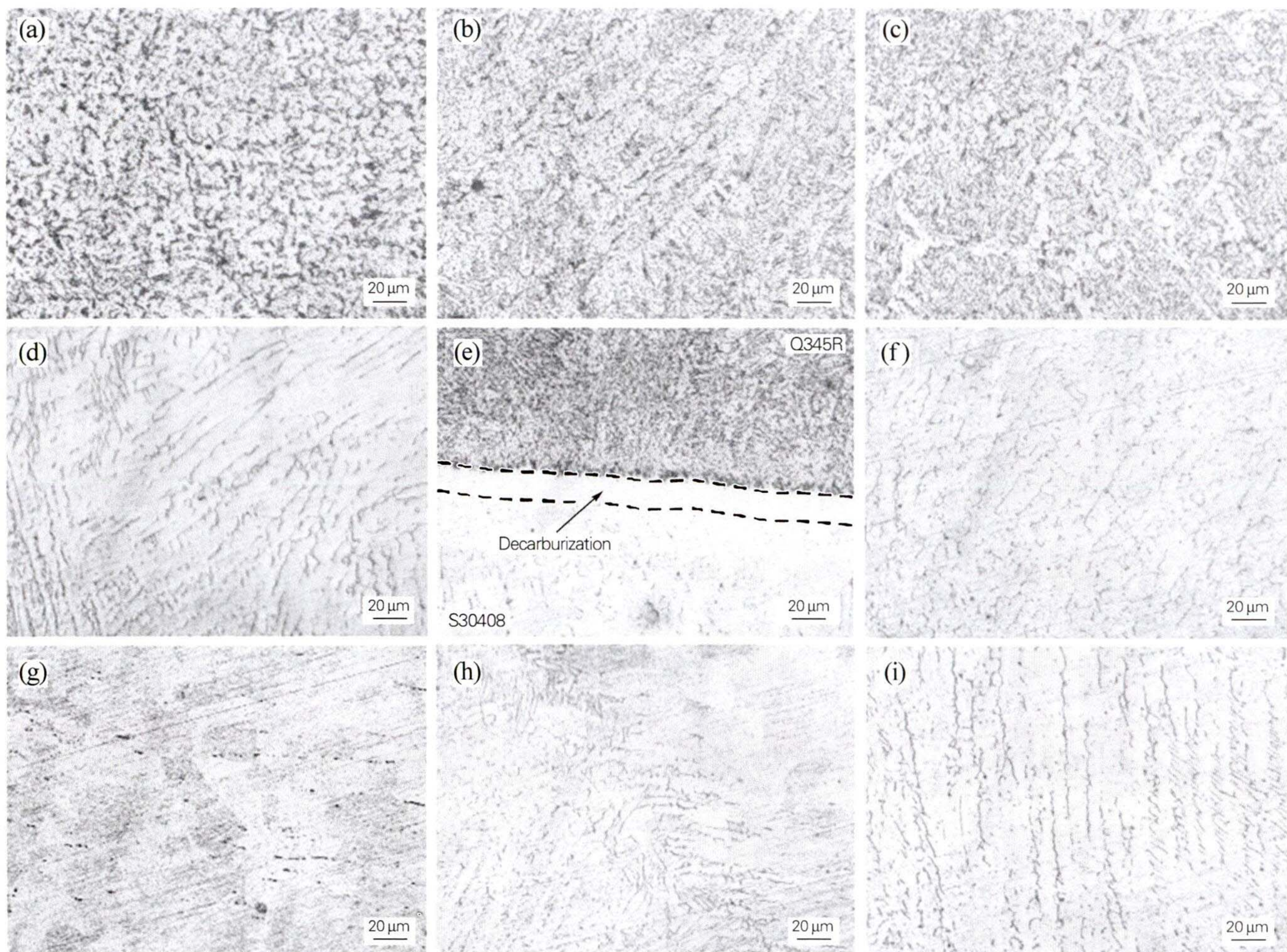


图 5 焊态 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头的显微组织

(a) 基层母材; (b) 基层热影响区; (c) 基层焊缝区; (d) 过渡层热影响区; (e) 熔合线; (f) 过渡层焊缝区;  
(g) 覆层母材; (h) 覆层热影响区; (i) 覆层焊缝区

Fig. 5 Microstructure of the weld joint of the as-welded S30408/Q345R stainless steel clad plate  
(a) base layer BM; (b) base layer HAZ; (c) BWZ; (d) transition layer HAZ; (e) fusion line; (f) TWZ;  
(g) clad layer BM; (h) clad layer HAZ; (i) CWZ

以看出,焊接接头在经历焊后热处理后,焊缝、热影响区部分经历新的热循环作用,晶粒有不同程度的长大,金属软化导致残余应力释放,并在冷却阶段重新形成<sup>[10]</sup>。

#### 2.4 晶间腐蚀性能

分别对焊态和经焊后热处理后的 S30408 不锈钢覆层进行两组晶间腐蚀性能测试,测试结果如图 8 所示。可以看出,焊态的焊接接头未出现晶间腐蚀裂纹,接头耐晶间腐蚀性能良好,经焊后热处理后的焊接接头出现晶间腐蚀裂纹,两组测试均出现在焊接熔合线位置,表明焊接熔合线位置为晶间腐蚀的薄弱位置。由图 6(h)可以看出, S30408 不锈钢覆层热影响区的晶粒大小不均匀,分布不规则,且有明显的长大趋势。相较于母材和焊缝,此区域受焊接热循环的影响,在晶界析出大量 C 和 Cr 的化合物,造成晶间贫 Cr,晶界弱

化并率先受到腐蚀,在力的作用下引起开裂,导致晶间腐蚀现象发生。

#### 2.5 抗应力腐蚀性能

分别对焊态和经焊后热处理后的 S30408 不锈钢覆层进行空气环境和 3.5% NaCl 溶液条件下的慢应变速率拉伸试验,试验条件如表 3 所示,试验结果如图 9 和表 4 所示,其中图 9(a, c)分别为焊态拉伸试样及拉伸曲线,图 9(b, d)分别为经焊后热处理的拉伸试样及拉伸曲线。由图 9(a, b)可以看出,不同条件下 S30408 不锈钢覆层慢应变速率拉伸试样均出现明显的颈缩,为塑性断裂,断裂位置均位于焊缝区,这主要是由于焊缝的组织为柱状晶组织,晶粒尺寸大小不一,且分布不均匀,导致焊缝区的抗拉强度略低于母材。而断裂接头未发现二次断裂,表明 S30408 不锈钢覆层的应力腐蚀破裂敏感性小。由图 9(c, d)可以看出,

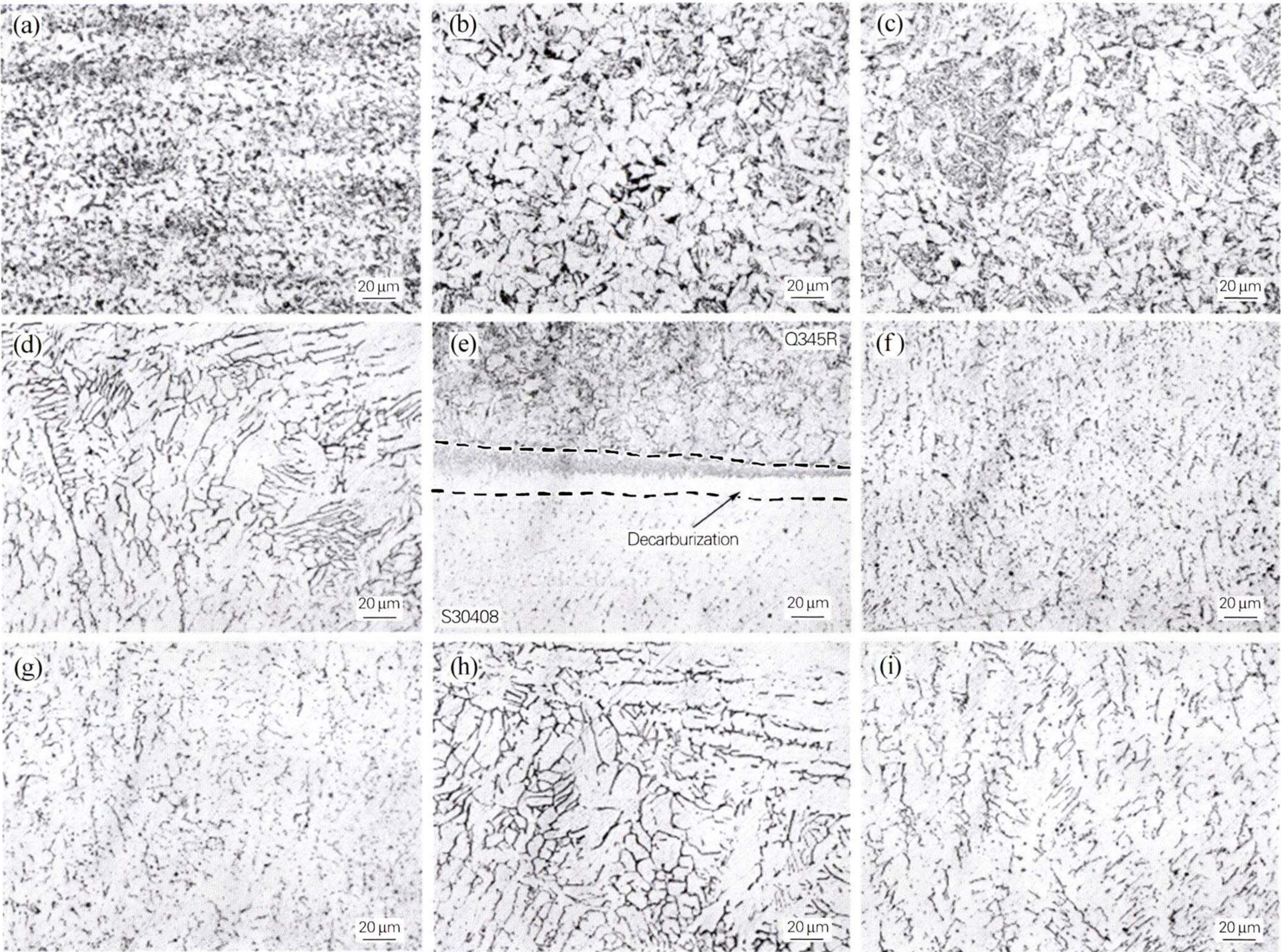


图 6 S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头经焊后热处理后的显微组织  
(a) 基层母材;(b) 基层热影响区;(c) 基层焊缝区;(d) 过渡层热影响区;(e) 熔合线;(f) 过渡层焊缝区;  
(g) 覆层母材;(h) 覆层热影响区;(i) 覆层焊缝区  
Fig. 6 Microstructure of weld joint of the S30408/Q345R stainless steel clad plate after PWHT  
(a) base layer BM; (b) base layer HAZ; (c) BWZ; (d) transition layer HAZ; (e) fusion line; (f) TWZ;  
(g) clad layer BM; (h) clad layer HAZ; (i) CWZ

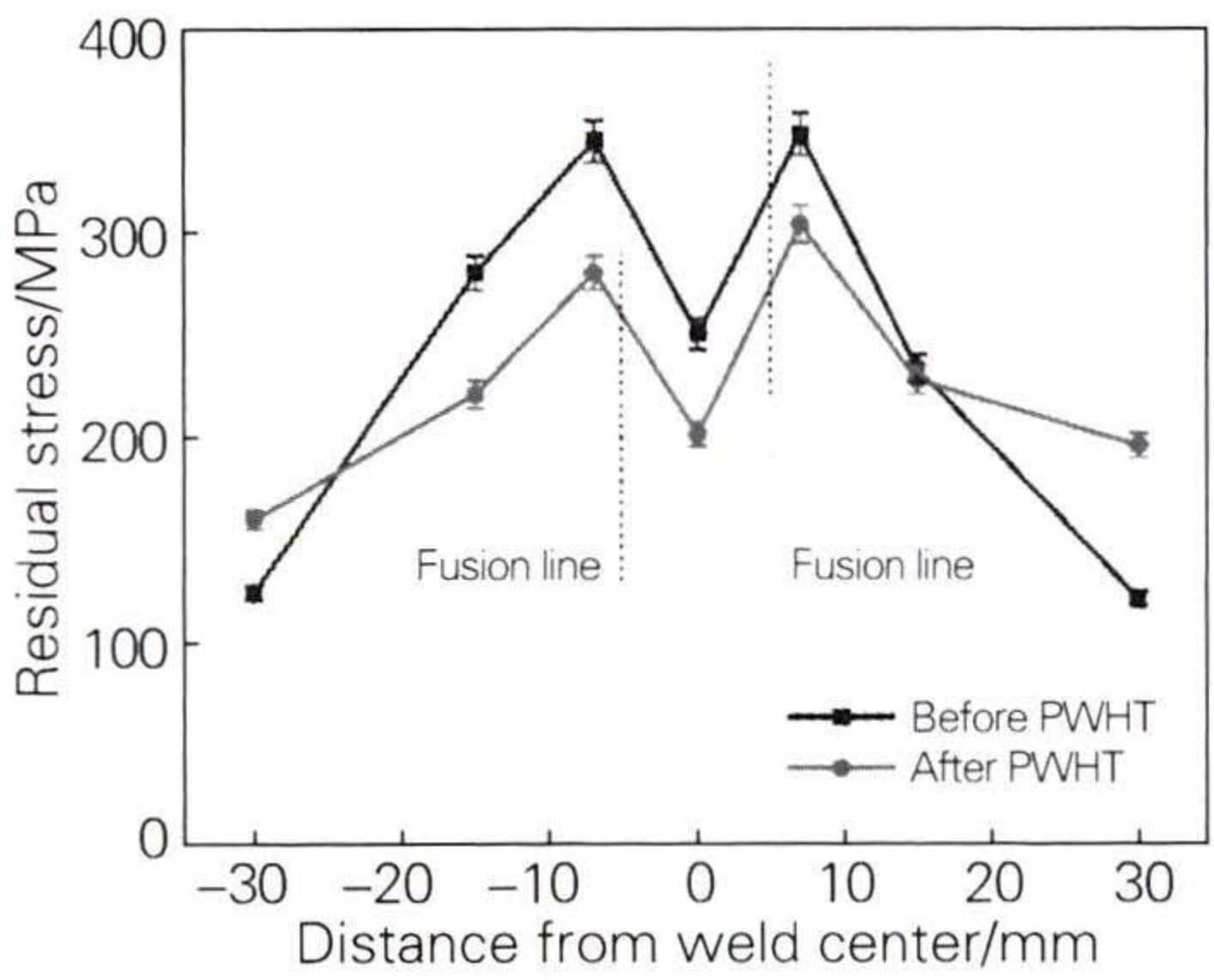


图 7 焊后热处理前后 S30408 不锈钢覆层的残余应力分布  
Fig. 7 Residual stress distributions of the S30408 stainless steel clad layer before and after PWHT

力-位移曲线上有明显的屈服现象,且断裂前拉力明显下降,其中焊态试样在 3.5% NaCl 溶液条件下的力-位

移曲线略低于空气环境下的,这主要受 3.5% NaCl 溶液中的  $\text{Cl}^-$  弱腐蚀性能有关,同时由于腐蚀介质浓度低,对试样的腐蚀作用有限,从而导致屈服力与断裂力略低。由表 3 可知,在空气环境和 3.5% NaCl 溶液条件下的焊态试样尺寸误差为 6%,而抗拉强度与屈服强度相差不超过 5 MPa(见表 4),因此推断力-位移曲

表 3 慢应变速率拉伸试验条件  
Table 3 Testing conditions of the slow strain rate tensile test

| Specimen   |          | Strain rate/<br>( $\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) | Specimen geometry/<br>(mm $\times$ mm $\times$ mm) |
|------------|----------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| As-welded  | Air      | 4.17                                                | 20.02 $\times$ 4.08 $\times$ 2.03                  |
|            | 3.5%NaCl | 4.17                                                | 20.03 $\times$ 3.94 $\times$ 1.97                  |
| After PWHT | Air      | 4.17                                                | 20.01 $\times$ 4.03 $\times$ 2.02                  |
|            | 3.5%NaCl | 4.17                                                | 20.02 $\times$ 4.05 $\times$ 2.01                  |

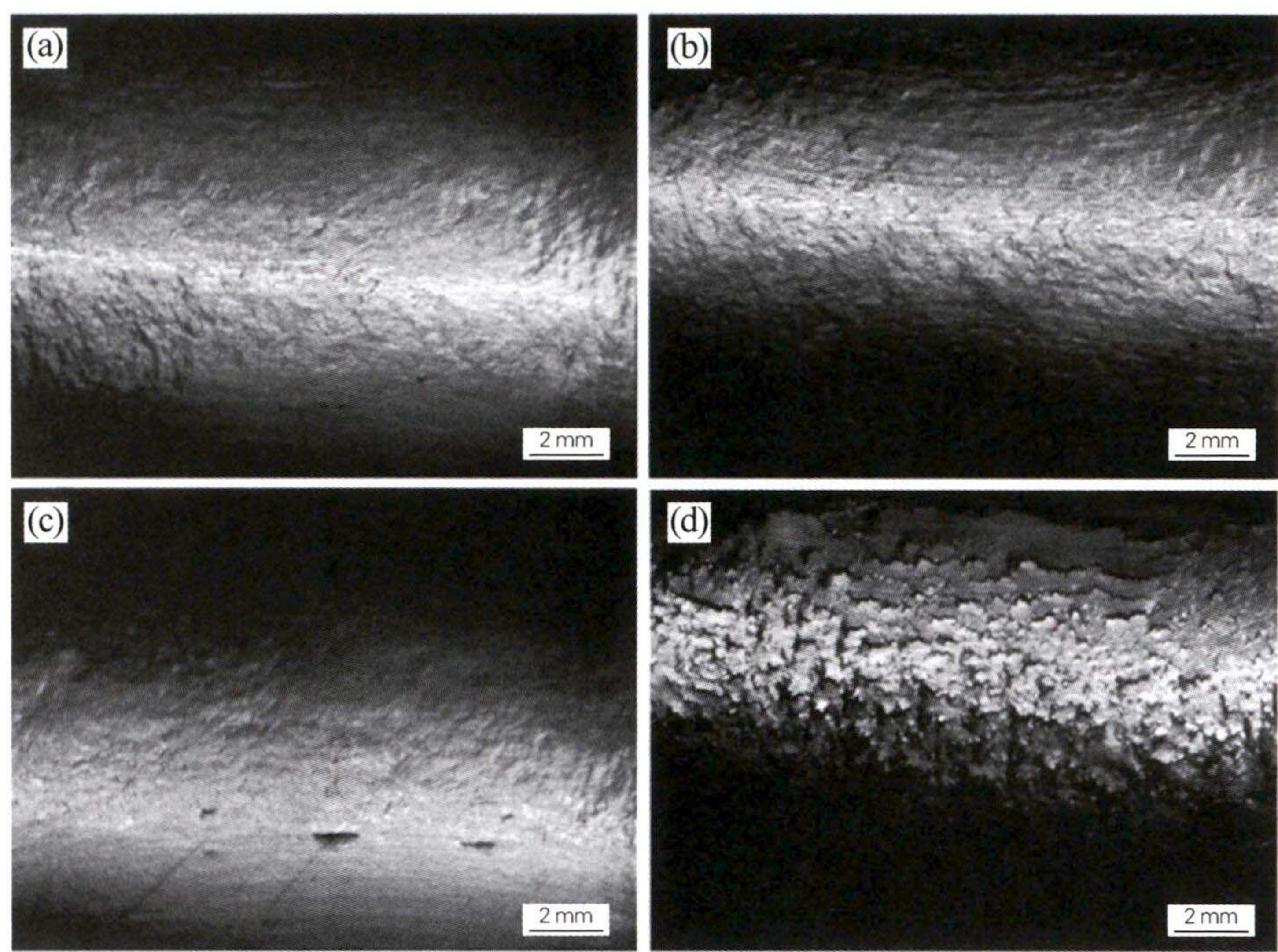


图 8 S30408 不锈钢覆层的晶间腐蚀性能测试结果  
(a,b)焊态;(c,d)经焊后热处理后  
Fig. 8 Test results of the intergranular corrosion resistance of the S30408 stainless steel clad layer  
(a,b) as-welded; (c,d) after PWHT

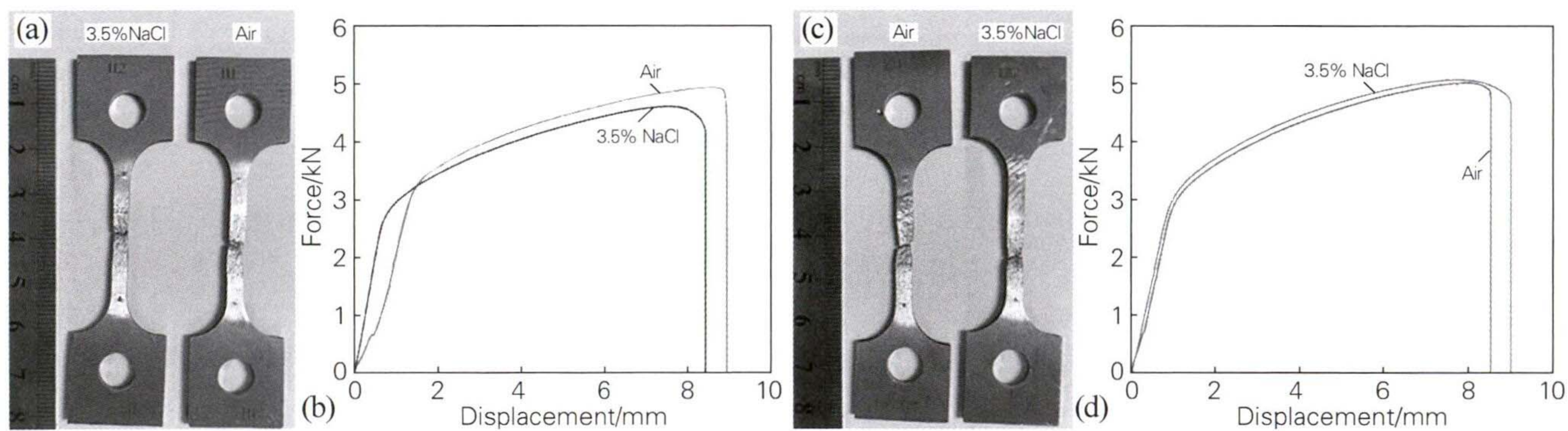


图 9 S30408 不锈钢覆层慢应变速率拉伸试验结果  
(a,b)焊态;(c,d)经焊后热处理后  
Fig. 9 Slow strain rate tensile test results of the S30408 stainless steel clad layer  
(a,b) as-welded; (c,d) after PWHT

表 4 S30408 不锈钢覆层慢应变速率拉伸试验结果  
Table 4 Slow strain rate tensile test results of the S30408 stainless steel clad layer

| Specimen   |           | Test result |                 |        |        |          | Stress-corrosion cracking sensitivity ratio |               |        |        |          |
|------------|-----------|-------------|-----------------|--------|--------|----------|---------------------------------------------|---------------|--------|--------|----------|
|            |           | $R_m$ /MPa  | $R_{p0.2}$ /MPa | $A$ /% | $Z$ /% | $T_F$ /s | $R_m$ /%                                    | $R_{p0.2}$ /% | $A$ /% | $Z$ /% | $T_F$ /% |
| As-welded  | Air       | 594         | 373             | 37.0   | 45     | 37 250   | 1.07                                        | 0.67          | 8.11   | 11.11  | 13.81    |
|            | 3.5% NaCl | 598         | 369             | 34.0   | 40     | 32 105   |                                             |               |        |        |          |
| After PWHT | Air       | 586         | 359             | 36.5   | 53     | 32 516   | 1.11                                        | 0.34          | 9.59   | 7.55   | 11.28    |
|            | 3.5% NaCl | 588         | 363             | 33.0   | 49     | 36 185   |                                             |               |        |        |          |

线偏差受试样尺寸误差影响。

由表4还可以看出,焊态 S30408 不锈钢覆层在空气环境与 3.5% NaCl 溶液条件下的抗拉强度  $R_m$ 、屈服强度  $R_{p0.2}$  均相差不大,相应的应力腐蚀破裂敏感性比值分别为 1.07% 和 0.67%。相较于空气环境下, S30408 不锈钢覆层材料在 3.5% NaCl 溶液条件下的断后伸长率  $A$ 、断面收缩率  $Z$  及断裂时间  $T_F$  均有一定程度的下降,相应的应力腐蚀破裂敏感性比值分别为 8.11%、11.11% 和 13.81%,这表明焊态 S30408 不锈钢覆层的应力腐蚀破裂敏感性小。焊后热处理后, S30408 不锈钢覆层的抗拉强度和屈服强度均较焊态有所下降,但在空气环境和 3.5% NaCl 溶液条件下相差不大,应力腐蚀破裂敏感性比值分别为 1.11% 和 0.34%。断后伸长率与焊态相比略有下降,断面收缩率有所上升,而相较于空气环境,在 3.5% NaCl 溶液条件下的断后伸长率和断面收缩率有一定程度的下降,应力腐蚀破裂敏感性比值分别为 9.59% 和 7.55%,这表明 S30408 不锈钢覆层焊后热处理后的应力腐蚀破裂敏感性也小。

### 3 结论

1) 焊后热处理后, S30408/Q345R 不锈钢复合板焊接接头的覆层及过渡层处晶界增多,过渡层焊缝与基层焊缝熔合线附近出现了合金元素扩散,脱碳层范围减小。

2) 焊后热处理后,焊接接头 S30408 不锈钢覆层出现晶间腐蚀裂纹,晶间腐蚀裂纹位于焊接熔合线附近,焊接熔合线附近为晶间腐蚀的薄弱位置。

3) 焊接接头 S30408 不锈钢覆层的抗应力腐蚀性能受焊后热处理影响不大,慢应变速率拉伸断裂接头未发现二次断裂,抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率和断裂时间的应力腐蚀破裂敏感性比值较低,应力腐蚀敏感性小。

#### 参考文献:

- [1] 王 玮, 张艳涛, 张德军, 等. 时效工艺对 7B05 铝合金型材抗应力腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22): 132-135.  
Wang Wei, Zhang Yantao, Zhang Dejun, et al. Effect of aging process on stress corrosion resistance of 7B05 aluminum alloy profile[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(22): 132-135.
- [2] 齐 跃, 郝建豪, 林忠亮, 等. 不同时效制度对 7075 铝合金组织及抗应力腐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(11): 38-45.  
Qi Yue, Xi Jianhao, Lin Zhongliang, et al. Effect of different aging

treatments on microstructure and stress corrosion cracking resistance of 7075 aluminum alloy [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(11): 38-45.

- [3] 秦丽雁, 张寿禄, 宋诗哲. 典型不锈钢晶间腐蚀敏化温度的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(1): 1-5.  
Qin Liyan, Zhang Shoulu, Song Shizhe. Sensitive temperatures for intergranular corrosion of typical stainless steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(1): 1-5.
- [4] 谷国超, 李瑞芬, 辛振民, 等. 固溶温度对 2507 双相不锈钢力学性能及耐蚀性的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(6): 1-6.  
Gu Guochao, Li Ruifen, Xin Zhenmin, et al. Effect of solution temperature on mechanical properties and corrosion resistance of super duplex stainless steel 2507[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(6): 1-6.
- [5] 高晓丹, 李晶琨, 任学平, 等. 固溶温度对 2205 双相不锈钢组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(1): 7-10.  
Gao Xiaodan, Li Jingkun, Ren Xueping, et al. Effect of solid solution temperature on microstructure and microhardness of 2205 duplex stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(1): 7-10.
- [6] 颜秉宇, 王 爽, 刘 祥, 等. 热处理对异质复合钢板覆材晶间腐蚀和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(7): 121-124.  
Yan Bingyu, Wang Shuang, Liu Xiang, et al. Effect of heat treatment on intercrystalline corrosion and mechanical properties of stainless steel composite plate [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(7): 121-124.
- [7] 黄建宁, 徐掌印, 富晓阳, 等. 敏化处理对含氮奥氏体不锈钢抗腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(5): 52-56.  
Huang Jianning, Xu Zhangyin, Fu Xiaoyang, et al. Effect of sensitization treatment on corrosion resistance of nitrogen-containing austenitic stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(5): 52-56.
- [8] 王凤会, 刘立伟, 许 静, 等. 550 ℃ 热处理对 Q345R/316L 复合板焊接接头残余应力及腐蚀性能的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46(4): 5-7.
- [9] 李 冉, 侯利锋, 杜华云, 等. 敏化温度对 445J2 不锈钢应力腐蚀开裂的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(10): 100-108.  
Li Ran, Hou Lifeng, Du Huayun, et al. Effect of sensitization temperature on stress corrosion cracking of 445J2 stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(10): 100-108.
- [10] 任森栋, 毕 涛, 李 索, 等. P92 钢多层多道焊接接头残余应力的有限元模拟[J]. 机械工程材料, 2019, 43(11): 42-46.  
Ren Sendong, Bi Tao, Li Suo, et al. Finite element simulation of residual stress in multi-layer and multi-pass weld joint of P92 steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(11): 42-46.