

焊后热处理对 S30408/Q345R 复合板焊接接头残余应力的影响

刘文明¹, 欧阳凯¹, 张新明¹, 张朝明¹, 程新路¹, 陈成²

(1. 中建安装集团有限公司, 江苏 南京 210023; 2. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816)

摘要: 采用计算机模拟、X射线衍射法和盲孔法对焊后热处理前后的 S30408/Q345R 复合板焊接接头的残余应力分布进行了研究。数值模拟结果表明:随着焊接道次的增加,焊缝区的残余应力逐渐减小并趋于稳定,熔合线附近的残余应力逐渐增大,且高于其他位置的残余应力。结果表明:采用 580 ℃ 保温 2 h 的热处理工艺,消除残余应力的作用有限。X 射线衍射法及盲孔法所获得的焊缝残余应力值最大误差为 23%;焊接接头残余应力实测值明显高于模拟值,焊缝及熔合线附近位置误差均较大,最大误差可达 33%。

关键词: 焊后热处理; 残余应力; 数值模拟; X 射线衍射法

中图分类号: TG404; TG441.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2023)03-0217-10

Influence of post-weld heat treatment on residual stress of welded joint of S30408/Q345R clad plate

LIU Wen-ming¹, OUYANG Kai¹, ZHANG Xin-ming¹, ZHANG Chao-ming¹,
CHENG Xin-lu¹, CHEN Cheng²

(1. China Construction Industrial & Energy Engineering Group Co Ltd, Nanjing 210023, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The residual stress distribution of welded joint of S30408/Q345R clad plate before and after post-weld heat treatment (PWHT) was studied by computer simulation, X-ray diffraction method and hole drilling strain-gauge. The numerical simulation results show that with the increase of welding passes, the residual stress in the weld gradually decreases and tends to be stable, and the residual stress near the fusion line gradually increases, and is higher than that in other positions. The test results show that the heat treatment process of holding at 580 ℃ for 2 h has limited effect on eliminating residual stress. The maximum error of weld residual stress obtained by X-ray diffraction method and hole drilling strain-gauge is 23%. The measured value of residual stress of the welded joint is obviously higher than the simulated value, and the error of the weld and the location near the fusion line is large, with the maximum value of 33%.

Keywords: post-weld heat treatment; residual stress; numerical simulation; X-ray diffraction method

复合板主要通过爆炸焊或热轧方法制造,制造工艺相对比较成熟。复合板不仅具有覆层的耐蚀性/耐热性,还具有基层的经济性和良好的力学性能,广泛应用于石油化工、承压设备等领域。国内学者针对复合板的焊接开展了大量的研究^[1-3],研究内容主要集中于界面组织、结构及组织演变规律^[4-6]等。由于不锈钢和低碳钢/低合金钢化学成分的较大差异,其组

织形貌和力学性能均有较大差别^[7],爆炸焊形成的复合板材料内部存在不同程度的残余应力。同时,由于焊接产生的残余拉应力不仅会加速裂纹的扩展,还可能导致应力腐蚀开裂,从而影响材料的使用寿命,因此对于不锈钢复合板焊后残余应力的研究就显得尤为必要。

检测残余应力根据其破坏程度分为全破坏检

收稿日期: 2022-08-12 修订日期: 2022-11-15

基金项目: 中建安装集团有限公司科技研发计划课题(AZ-2021-11)

作者简介: 刘文明(1986—),男,工程师,博士,主要从事先进焊接技术及热处理研究,发表SCI论文5篇,E-mail:liuwm_cscec@163.com。

通信作者: 陈成(1988—),男,讲师,博士,主要从事金属焊接及表面改性技术研究,发表论文20余篇,E-mail:chencheng_ntu@163.com。

引用格式: 刘文明,欧阳凯,张新明,等.焊后热处理对 S30408/Q345R 复合板焊接接头残余应力的影响[J].材料热处理学报,2023,44(3):217-226.

LIU Wen-ming, OUYANG Kai, ZHANG Xin-ming, et al. Influence of post-weld heat treatment on residual stress of welded joint of S30408/Q345R clad plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(3):217-226.

测法、半破坏检测法及无损检测法^[8],常用的方法有盲孔法、X 射线检测法以及超声波检测法等。盲孔法进行残余应力的检测具有一定的破坏性,仅适用于钻孔不严重影响工件使用功能的情况,且盲孔法检测结果易受人为因素影响。X 射线检测法及超声波检测法因避免了材料的破坏而受到青睐,但现存的检测设备检测精度相差较大,且操作及计算过程较为繁琐,需做大量的前期准备工作才能获得较为精确的测试结果。随着有限元方法的成熟发展,采用三维有限元模型对焊接接头进行温度场及应力场的计算,是目前较为普遍的残余应力分析方法,常用的分析软件有 ANSYS^[9]、SYSWELD^[10]、ABAQUS^[11-13]、Simufact Welding^[14] 等。通过有限元分析方法进行的计算机模拟结果显示,模拟结果与试验结果相差不大,不锈钢复合板焊缝中心区域存在较大残余拉应力,随着与焊缝中心区域的距离增大,残余拉应力逐渐减小并转变为残余压应

力^[15-16]。热处理前后的复合板残余应力由拉应力向压应力转变,并随着热处理温度的升高,覆层内残余压应力增大^[17]。本文据此开展了 S30408/Q345R 不锈钢复合板多层多道焊热处理前后的残余应力研究,分别采用数值模拟及试验的方法研究其残余应力分布并进行了对比。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本文采用 S30408/Q345R 不锈钢复合板,S30408 不锈钢覆层厚度 3 mm,Q345R 低合金钢基层板厚 20 mm,试板尺寸为 400 mm×200 mm。材料的化学成分及力学性能如表 1 所示。焊接方法为焊条电弧焊(Shielded metal arc welding,简称为“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。焊接材料的化学成分及力学性能如表 2 所示。

表 1 母材的化学成分及力学性能

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of the experimental base metals

Material	Chemical compositions/mass%														Yield strength/	Tensile strength/
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Cu	Nb	V	Ti	Alt	MPa	MPa
S30408	≤0.08	≤0.75	≤2.00	≤0.035	≤0.015	18.00–20.00	8.00–10.50	–	≤0.10	–	–	–	–	–	≥220 (<i>R</i> _{p0.2})	≥520
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	325 (<i>R</i> _{el})	500–630

*R*_{p0.2}: The yield strength at a non-proportional elongation rate of 0.2%.
*R*_{el}: Lower yield strength, refers to the minimum stress in the micro-plastic strain stage.

表 2 焊接材料的化学成分及力学性能

Table 2 Chemical compositions and mechanical properties of the welding rods

Material	Chemical compositions/mass%										Tensile strength/	Yield strength/
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	MPa	MPa
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	—	≥550	—
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	—	≥550	—
E5015	≤0.15	≤0.90	≤1.60	≤0.025	≤0.015	≤0.20	≤0.30	≤0.30	—	≤0.08	≥490	$R_{\text{eL}} \geq 400$

1.2 试验方法

焊接坡口形式为 X 型坡口,焊接道数为 6 道,焊接顺序为先焊基层,再焊过渡层,最后焊覆层。焊接坡口形式及焊接顺序如图 1 所示。焊接工艺参数如表 3 所示。

根据文献[18-19],奥氏体不锈钢产生晶间腐蚀的敏感温度为 650 ℃,降低热处理保温温度可以避免敏化温度,同时为避开不锈钢 475 ℃的脆化温度,对不锈钢复合板进行焊后热处理(Post-weld heat treatment,简称为“PWHT”)采用的工艺为:热处理

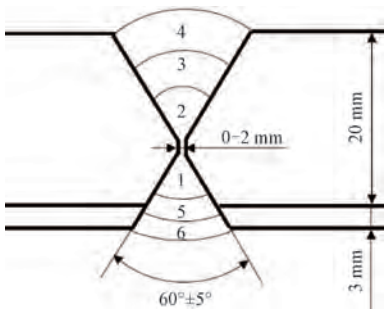


图 1 焊接坡口形式

Fig. 1 Groove shape of the welding

温度 580 ℃,保温时间 2 h,升温速度及降温速度均控制在 200 ℃/h 以下。

分别采用 X 射线衍射法及盲孔法对热处理前后的焊接接头进行残余应力检测,考虑焊接热循环对焊

接接头残余应力的影响,检测位置分别为覆层侧焊缝、熔合线外 2 mm(2 mm outside the fusion line,简称为“FL+2”,下同)、熔合线外 10 mm 以及熔合线外 25 mm。相关检测试验过程及检测位置如图 2 所示。

表 3 焊接工艺参数
Table 3 Process parameters of the welding

Passes	Welding method	Welding rod	Diameter/mm	Welding current/A	Arc voltage/V	Welding speed/(cm/min)	Heat input/(kJ/cm)
1	SMAW	E5015	φ4.0	104	21	11.3	11.6
2	SMAW	E5015	φ4.0	141	23	8.6	22.6
3	SMAW	E5015	φ4.0	141	23	9.9	19.6
4	SMAW	E5015	φ4.0	141	23	7.6	25.6
5	SMAW	E309-16	φ3.2	100	21	8.0	15.8
6	SMAW	E308-16	φ3.2	102	21	6.0	21.5

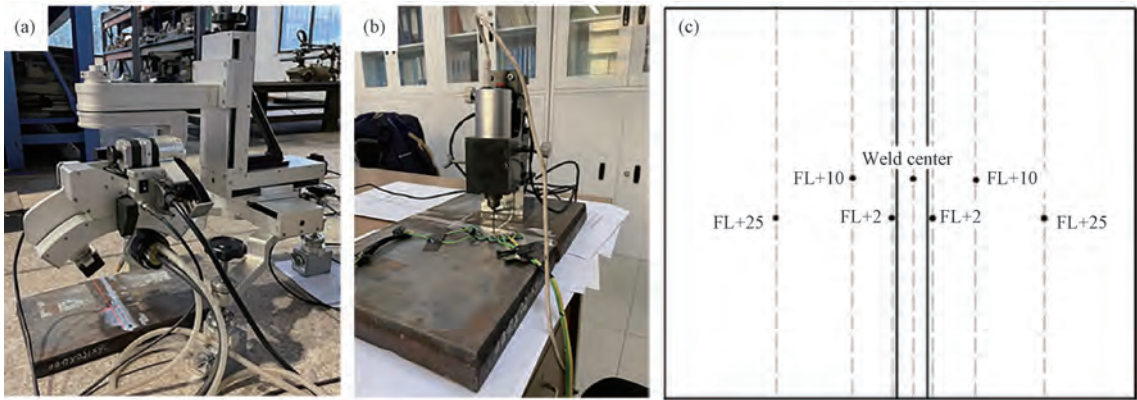


图 2 残余应力检测 (a) X 射线衍射法;(b)盲孔法;(c)检测位置

Fig. 2 The test of the residual stress (a) X-ray diffraction method; (b) hole-drilling strain-gauge; (c) test positions

2 焊接接头残余应力数值模拟

采用 ABAQUS 有限元软件对焊接接头进行残余应力数值模拟,母材和焊材的材料物理性能采用 J Mat Pro 计算得出,母材的材料物理性能如图 3 所

示。从图 3 可以看出,Q345R 及 S30408 两种材料的热膨胀系数不仅在数值上差别较大,Q345R 在 600~800 ℃之间出现的数值下降趋势,与 S30408 随温度升高而上升的变化趋势不同。S30408 的热导率随温度升高逐渐上升,而 Q345R 的热导率则呈现出随温

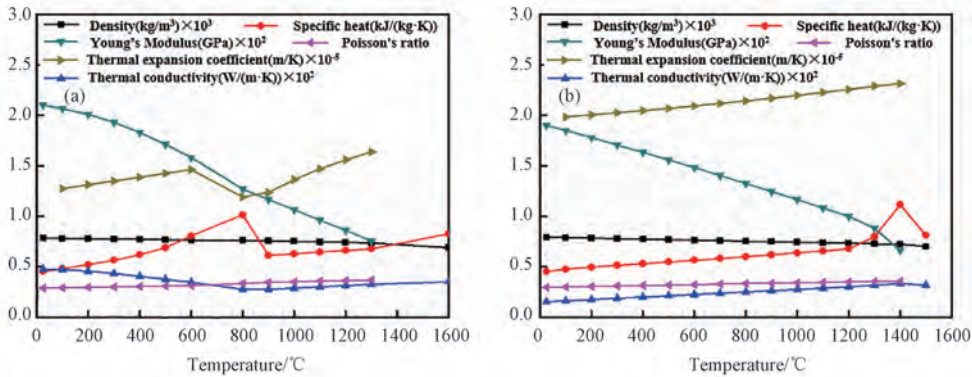


图 3 母材的物理性能及力学性能曲线 (a) Q345R;(b) S30408

Fig. 3 Physical properties and mechanical properties curves of the base metals (a) Q345R; (b) S30408

度升高先下降,在 800 ℃ 后有微弱提升的趋势。此外 Q345R 与 S30408 的比热均出现一个突变的值,但二者出现的温度不同,Q345R 的异常值出现在 800 ℃ 附近,而 S30408 的异常值出现在 1400 ℃ 附近。

基于热弹塑性力学理论建立 (20+3) mm 厚度 S30408/Q345R 不锈钢复合板三维数值模型。根据试板实际尺寸进行实体建模,采用的焊接坡口形式为 X 型坡口,并对不同材料赋予不同的材料属性,网格

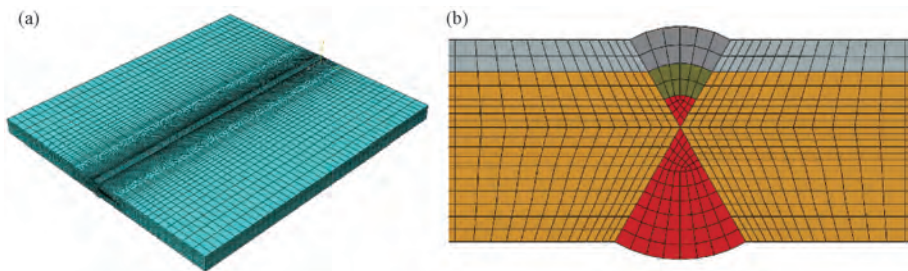


图4 残余应力数值模拟的网格划分 (a)整体模型;(b)模型截面

Fig. 4 Meshed elements for numerical simulation of the residual stress (a) whole model; (b) model cross section

双椭球热源模型相对于其他焊接热源更接近于真实焊缝,是目前采用最广泛的热源之一^[20],本文中的焊接模拟采用双椭球热源模型进行计算,热源模型由前半椭球热源 Q_f 和后半椭球热源 Q_r 组成,两部分热源热流密度分布如式(1)和式(2)所示:

$$Q_f = \frac{6\sqrt{3}f_f(\eta UIv)}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c_f^2}\right), \quad z \geq 0 \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{6\sqrt{3}f_r(\eta UIv)}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-3\frac{x^2}{a^2} - 3\frac{y^2}{b^2} - 3\frac{z^2}{c_r^2}\right), \quad z < 0 \quad (2)$$

式中: f_f, f_r 分别为前、后半椭球热源系数,且 $f_f + f_r = 2$; η 为焊接热效率; U 为电弧电压; I 为焊接电流; v 为焊接速度; x, y, z 为热源上的节点所处的坐标值; a, b, c_f, c_r 为双椭球热源参数。

在焊接行进方向右侧端部施加 X 向、 Y 向及 Z 向的约束,在焊接行进方向右侧端部施加 Y 向约束。

3 试验结果及分析

3.1 焊接温度场结果分析

采用移动热源子程序进行温度场模拟,最后一道焊缝中心位置的温度场分布如图5所示,图5(a)为试板整体模拟结果,图5(b)为放大图,图5(c)为截面图。不同道次试板中心位置垂直于焊缝的温度分布及焊缝中心点的热循环曲线如图6所示。从图

划分结果与不同材料属性的焊接接头截面形式如图4所示。为平衡计算量,不同区域采用了不同疏密程度的网格。本文通过顺序耦合法进行热-应力分析,即采用八节点线性传热六面体单元 DC3D8 进行热传递计算,再将温度场结果作为载荷,采用八节点线性六面体单元 C3D8R 进行三维应力计算。针对不同焊接道数,采用生死单元法对焊接热过程进行模拟计算。

6(a)可以看出,不同道次峰值温度与焊接热输入有关,最后一道由于试板余温存在,焊条摆动大,熔池停留时间长,峰值温度最高为 2456 ℃。图6(b)显示在焊缝中心位置,焊接峰值温度受熔池与中心点的距离影响较大,前两道峰值温度较高,最高达 2132 ℃。

3.2 焊后热处理对应力场的影响分析

采用温度场计算结果作为载荷,对焊接接头进行应力计算,再以应力场计算结果为初始条件,进行焊后热处理的应力场分布计算。不同道次的焊接接头残余应力分布如图7所示。其中第一道、第五道和第六道为覆层侧焊缝中心的残余应力曲线,第二道至第四道为基层侧焊缝中心的残余应力曲线。从图7可以看出,随着焊接道次的增加,焊缝的残余应力逐渐趋于平缓,熔合区附近的残余应力逐渐升高。这主要是由于前一道焊缝形成后,转为紧邻的下一道焊缝的热影响区,其峰值温度与母材中的焊接热影响区接近^[21],后续焊道成形过程中,焊缝及热影响区的部分金属熔化或软化,导致残余应力消失,并在冷却阶段发生残余应力的重新分配^[22]。而熔合线附近由于焊接热影响区及焊接变形的发生,导致残余应力值上升。左侧所施加拘束较大导致左侧残余应力值高于右侧。

热处理前后的覆层和基层应力场分布如图8和图9所示。从图8和图9可以看出,焊缝及热影响区附近受到较大的残余拉应力的作用,其余部分受到较

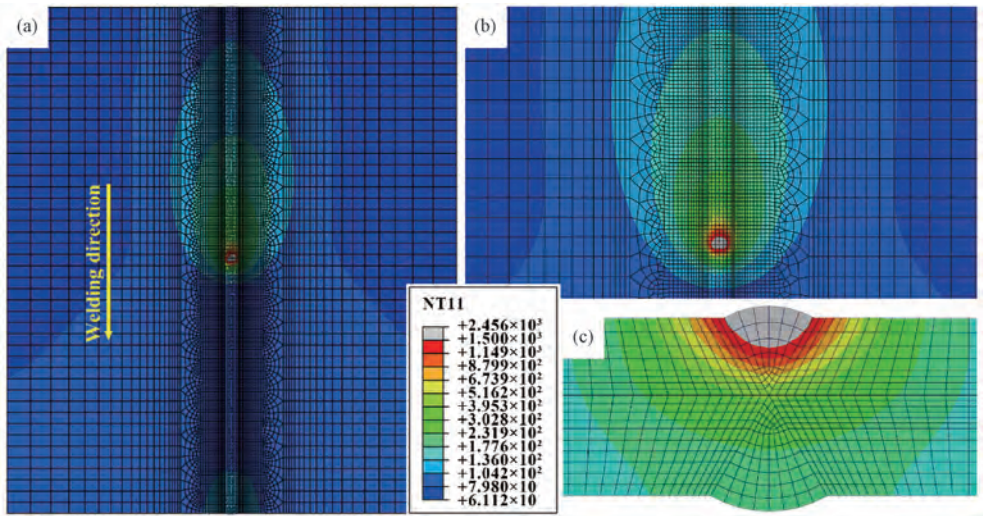


图 5 最后一道焊缝中心位置温度场 (a) 整体温度场;(b)局部温度场;(c)焊缝中心截面图
Fig. 5 Temperature field at the weld center in the last pass (a) the whole welding temperature field;
(b) part of the welding temperature field; (c) cross section of the weld center

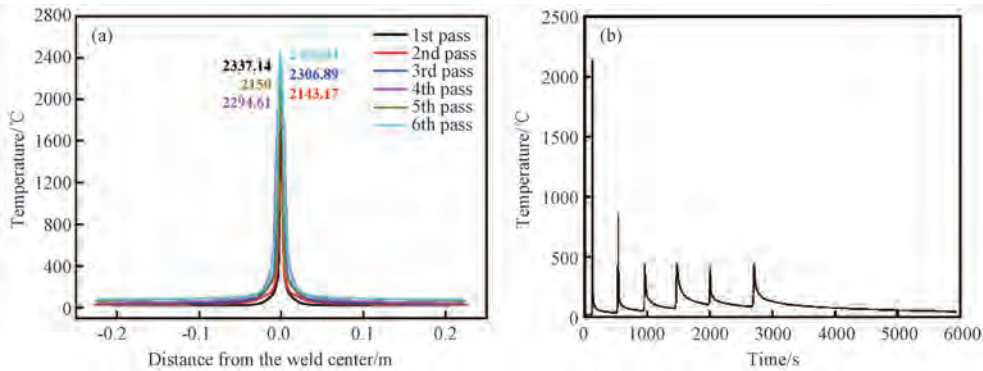


图 6 温度分布曲线 (a) 不同道次焊缝温度分布;(b) 焊缝中心点热循环曲线
Fig. 6 Temperature distribution curves (a) temperature distribution of weld in different passes;
(b) thermal cycle curve of weld center point

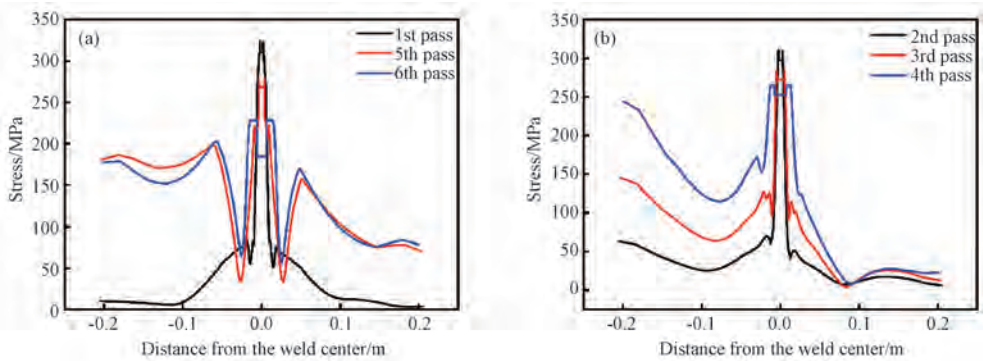


图 7 不同道次焊缝中心位置应力场分布 (a) 覆层;(b) 基层
Fig. 7 Stress distribution of the weld center in different passes (a) coating layer; (b) base layer

小的残余拉应力,且随着距焊缝中心的距离增大而逐渐减小。受焊接顺序的影响,焊接接头收弧位置有高温停留,从而出现较高的残余应力。而经焊后热处理后,焊缝峰值残余应力值略有降低,残余应力变化梯

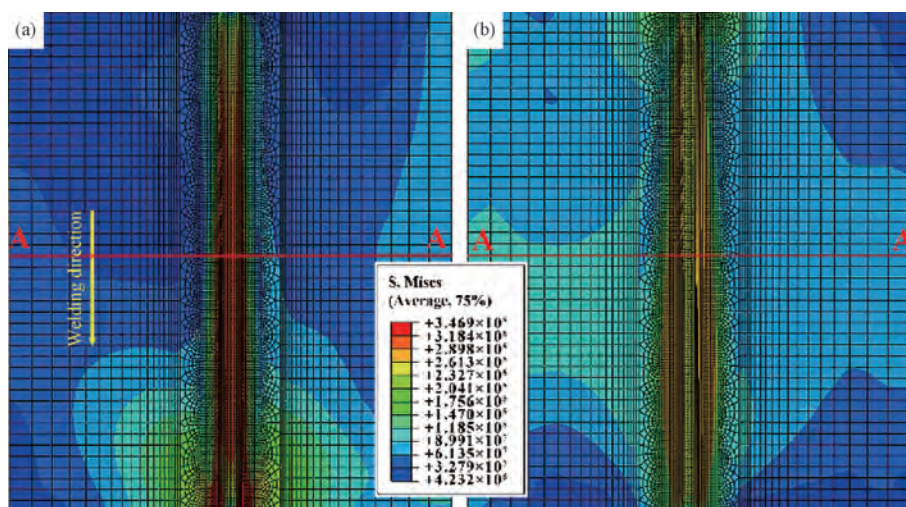


图8 焊后热处理前应力场分布 (a) 基层; (b) 覆层

Fig. 8 Stress distribution before PWHT (a) base layer; (b) coating layer

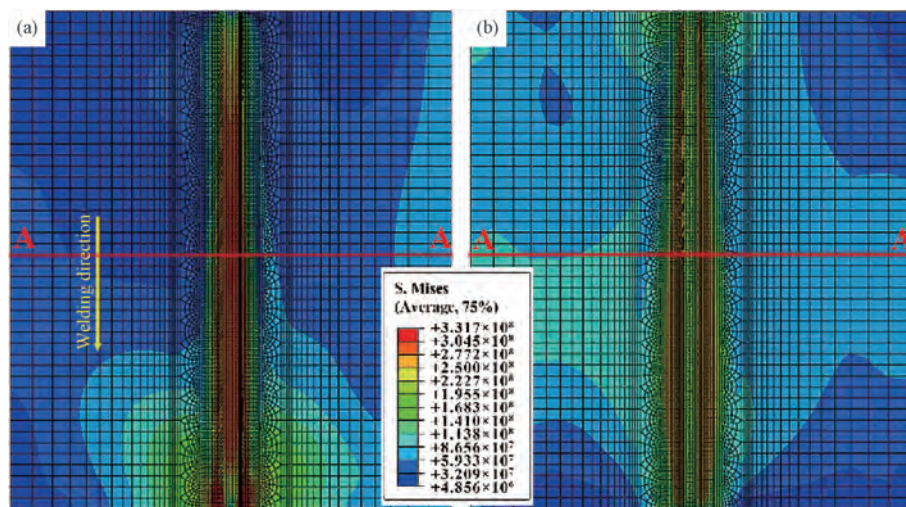


图9 焊后热处理后应力场分布 (a) 基层; (b) 覆层

Fig. 9 Stress distribution after PWHT (a) base layer; (b) coating layer

度趋于平缓。

焊后热处理前后的焊接试板的应力分布曲线如图10和图11所示。前端(图10中Front线)及后端(图10中Back线)分别为试板始末端的边缘线,中心线(图10中Middle线)为图8和图9中A-A线。从图10可以看出,基层的焊接残余应力略高于覆层残余应力,残余应力最高值出现在焊接熔合线附近。焊接接头前端和后端由于起弧、收弧作用以及边界效应^[15],从而出现残余应力值与接头中间位置相差较大的情况。图11所示为焊后热处理前后试板中心线上残余应力分布曲线对比,从图中可以看出,基层经焊后热处理后,焊缝及熔合线附近残余应力得到释放,焊缝及热影响区变化较大;覆层焊缝残余应力下

降,其中熔合线附近变化较为明显,熔合线外残余应力略有提升。基层残余应力大于覆层残余应力,主要是由于不锈钢S30408的热膨胀系数远大于低合金钢Q345R。

3.3 试验结果与模拟结果的对比

分别采用盲孔法及X射线检测法对覆层焊接接头的残余应力值进行检测,检测结果如表4和图12所示。从表4和图12可以看出,焊缝及熔合线附近位置残余应力较大,焊后热处理后,焊接接头各区域残余应力均明显下降,其中焊缝及热影响区残余应力下降较大。X射线衍射法与盲孔法检测结果相比较,焊后热处理前后误差最高值分别为14%和23%,均位于焊缝中心位置,可能是由于X射线衍射法检

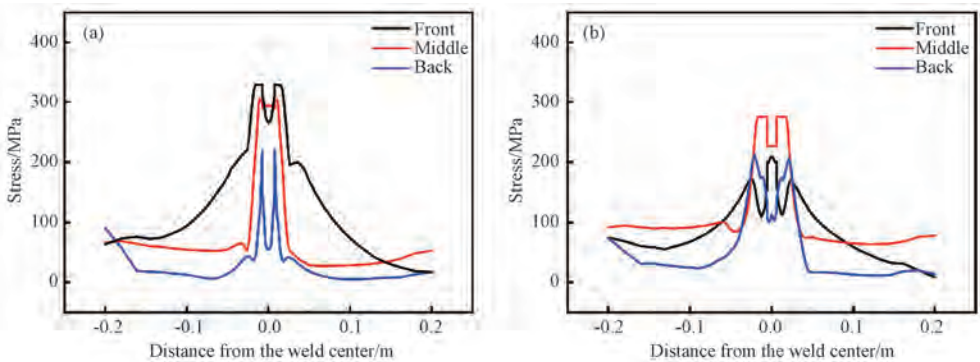


图 10 焊后热处理前焊接试板应力分布曲线 (a) 基层;(b) 覆层

Fig. 10 Stress distribution curves of the clad plate before PWHT (a) base layer; (b) coating layer

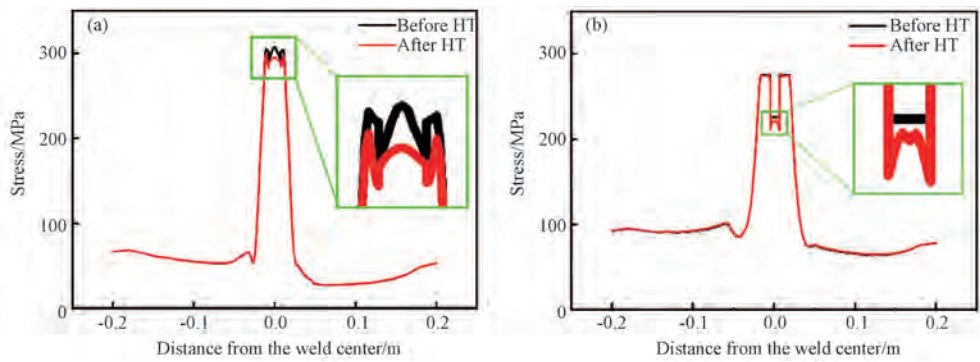


图 11 焊后热处理前后焊缝中心应力分布曲线对比 (a) 基层;(b) 覆层

Fig. 11 Stress distribution curves of the weld center before and after PWHT (a) base layer; (b) coating layer

表 4 X 射线衍射法与盲孔法测得的残余应力结果比较

Table 4 Comparison of residual stress results measured by X-ray diffraction method and hole-drilling strain-gauge								
Test method		FL+25	FL+10	FL+2	Weld center	FL+2	FL+10	FL+25
X-ray diffraction method	Before PWHT	124. 3	280. 1	344. 3	250. 3	347. 8	233. 1	121. 2
	After PWHT	150. 9	221. 1	280. 1	201. 3	303. 7	227. 6	195. 7
Hole-drilling strain-gauge	Before PWHT	121. 3	254. 6	363. 5	284. 5	357. 4	223. 2	103. 4
	After PWHT	132. 8	182. 8	225. 2	247. 7	322. 2	185. 7	166. 3

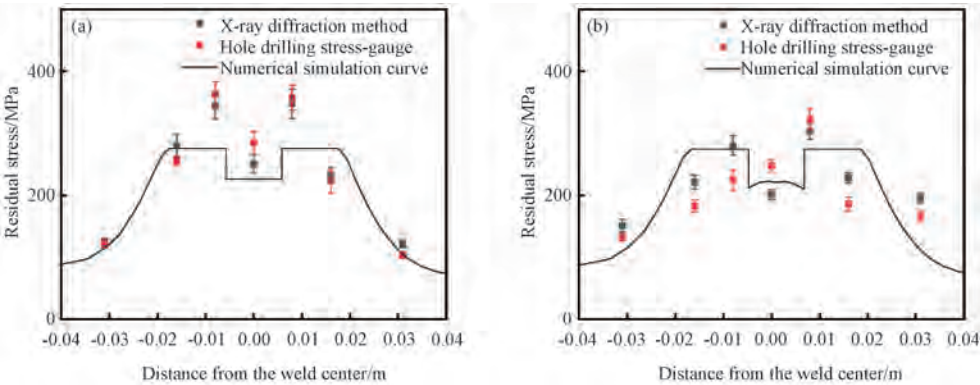


图 12 不同检测方法测得的残余应力结果比较 (a) 焊后热处理前;(b) 焊后热处理后

Fig. 12 Comparison of residual stress results measured by different testing methods (a) before PWHT; (b) after PWHT

测深度较浅^[6],主要检测结果为表面残余应力;盲孔法检测位置则为表面以下 2 mm 深度的残余应力,且受钻孔速度、应变片贴合度等人为因素影响较大,从而导致二者出现误差。此外,由于焊条电弧焊焊接接头不均匀,导致不同的位置所检测的结果会有所差别。实测值与模拟值相比较,二者呈现出相同的变化趋势,但焊接热处理前后的实测值远高于模拟值,焊后热处理前(图 12a),X 射线衍射法与模拟结果最大误差为 21%,出现在熔合线外 2 mm 处。根据文献[23],理想弹塑性模型会低估对接接头的残余应力,从而导致焊缝附近的误差较大。而母材部分的误差可能是由于爆炸复合板本身存在一定的残余应力^[24],而这部分的残余应力没有在模拟计算前作为基础应力施加在试板上,从而导致残余应力检测结果相差较大。盲孔法与模拟结果最大误差为 24%,误差较大值主要集中于焊缝及融合线附近,分析产生误差的原因,一方面由于焊接材料变形导致焊接接头的残余应力增大,从而导致焊后热处理前接头实际残余应力大,另一方面,由于计算机模拟的局限性,焊接接头的残余应力不会高于设定的残余应力值。焊后热

处理后(图 12b),X 射线衍射法及盲孔法与模拟结果最大误差分别为 24% 和 33%,误差分别位于为熔合线外 25 mm 和熔合线外 10 mm,分析认为与爆炸焊复合板不均匀性有关^[25]。

4 结论

1) 不锈钢复合板焊接接头残余应力随着焊接道次的增加,焊缝区的残余应力逐渐减小并趋于稳定,熔合线附近的残余应力逐渐增大,且高于其他位置的残余应力;

2) 焊后热处理对不锈钢复合板焊接接头残余应力有一定的消除作用,采用 580 ℃ 保温 2 h 的热处理工艺,消除残余应力的作用有限;

3) 受不锈钢复合板不均匀分布的残余应力以及焊接变形的影响,X 射线衍射法及盲孔法所获得的焊缝残余应力值最大误差为 23%;焊接接头残余应力实测值明显高于模拟值,焊缝及熔合线附近位置误差均较大,最大误差可达 33%,对不锈钢复合板进行模拟,需对母材本身的基础残余应力进行更深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 胡奉雅,许国敬,陈伟,等. 钛/钢复合板焊接技术研究现状及发展趋势[J]. 焊接学报,2021,42(6):30-43.
HU Feng-ya, XU Guo-jing, CHEN Wei, et al. Research status and development trend of titanium/steel bimetallic composite plates of welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(6): 30-43.
- [2] 缪广红,艾九英,马雷鸣,等. 不锈钢/普碳钢双面爆炸复合的数值模拟[J]. 焊接学报,2020,41(8):55-62.
MIAO Guang-hong, AI Jiu-ying, MA Lei-ming, et al. Numerical simulation of double-sided explosive welding of stainless steel/ordinary carbon steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(8): 55-62.
- [3] 张亚运,魏金山,齐彦昌,等. TA2/Q235 复合板用 Ni 基过渡层熔焊接头组织和性能[J]. 焊接学报,2019,40(1):75-79.
ZHANG Ya-yun, WEI Jin-shan, QI Yan-chang, et al. Microstructure and property of fusion welding butt joints of TA2/Q235 composite plate with Ni alloy transition layers[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(1): 75-79.
- [4] 张婷婷,王玢,张杰,等. 热处理对铝/镁合金复合板连接界面组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报,2019,40(2):77-82.
ZHANG Ting-ting, WANG Bin, ZHANG Jie, et al. Effect of heat treatment on interfacial microstructure and properties of Al/Mg alloy cladding plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(2): 77-82.
- [5] 黄钊,何维均,陈泽军. TA2/不锈钢/Q235 复合板的界面结构和失效行为[J]. 材料热处理学报,2021,42(11):11-19.
HUANG Zhao, HE Wei-jun, CHEN Ze-jun. Interface structure and failure behavior of TA2/stainless steel/Q235 composite plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(11): 11-19.
- [6] 李海斌,黄庆学,周存龙,等. 热轧碳钢/不锈钢复合板结合界面碳钢的组织演变[J]. 材料热处理学报,2014,35(4):57-61.
LI Hai-bin, HUANG Qing-xue, ZHOU Cun-long, et al. Microstructure evolution of carbon steel at interface of carbon steel/stainless steel clad plate by hot rolling[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(4): 57-61.

- [7] 王泽鹏,张红梅,付魁军,等. 热轧 304L/Q235B 不锈钢复合板界面特征及性能分析[J]. 材料热处理学报,2016,37(S1):44-49.
- WANG Ze-peng,ZHANG Hong-mei,FU Kui-jun,et al. Characteristics of bonding interface and analysis of properties of hot-rolled 304L/Q235B stainless steel clad plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2016,37(S1):44-49.
- [8] 丁稳稳,高晓龙,刘晶. 残余应力检测方法研究现状[J]. 宝鸡文理学院学报(自然科学版),2022,42(1):103-108.
- DING Wen-wen,GAO Xiao-long,LIU Jing. Research status of residual stress detection methods[J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science),2022,42(1):103-108.
- [9] 周谟金,祝明明,向晓龙,等. ZTAP/HCCI 复合材料热处理条件下的界面残余热应力[J]. 材料热处理学报,2021,42(6):188-194.
- ZHOU Mo-jin,ZHU Ming-ming,XIANG Xiao-long,et al. Interfacial residual thermal stress of ZTAP/HCCI composites under heat treatment[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2021,42(6):188-194.
- [10] 朱敏,郑乔,吴巍,等. 坡口形式对双金属复合板多层多道焊接接头残余应力演变的影响[J]. 机械工程学报,2022,58(10):51-58.
- ZHU Min,ZHENG Qiao,WU Wei,et al. Study of influences of groove type on welding residual stress evolution in bimetallic clad plate joints during multi-layer and multi-pass welding[J]. Journal of Mechanical Engineering,2022,58(10):51-58.
- [11] 张昭,葛芑. 焊后热处理对 FSW 和 TIG 焊残余应力影响的数值模拟[J]. 兵器材料科学与工程,2017,40(1):1-7.
- ZHANG Zhao,GE Peng. Finite element simulations on effects of post weld heat treatments on residual stresses in FSW and TIG [J]. Ordnance Material Science and Engineering,2017,40(1):1-7.
- [12] Wang R, Ji X Y, Qian B Z, et al. Residual stress distribution characteristics and influencing factors of 316L/Q235 composite plate during heat treatment[J]. Journal of Material Engineering and Performance,2022,31:6933-6942.
- [13] 胡效东,王吉涛,杨熠成,等. 304/Q345R 复合板焊接接头微观组织及残余应力[J]. 焊接学报,2020,41(7):39-45.
- HU Xiao-dong,WANG Ji-tao,YANG Yi-cheng,et al. Microstructure investigation and residual stress numerical simulation on welded joint of 304/Q345R composite plate[J]. Transactions of the China Welding Institution,2020,41(7):39-45.
- [14] 张文亚,曾海峰,王有伟,等. 1Cr18Ni12 奥氏体不锈钢管 Y 型连接多层多道焊温度场及应力场研究[J]. 热加工工艺,2022,51(13):143-148.
- ZHANG Wen-ya,ZENG Hai-feng,WANG You-wei,et al. Study on temperature field and stress field of Y-type connection multi-layer multi-pass welding of 1Cr18Ni12 austenitic stainless steel pipe[J]. Hot Working Technology,2022,51(13):143-148.
- [15] 苏文献,熊丽敏,耿婉懿. 316L/SA516 爆炸复合板残余应力的试验研究[J]. 机械强度,2020,42(5):1088-1093.
- SU Wen-xian,XIONG Li-min,GENG Wan-yi. Experimental residual stress of 316L/SA516 explosive welding composite plate[J]. Journal of Mechanical Strength,2020,42(5):1088-1093.
- [16] Zhu M,Zhang Y S,Zheng Q,et al. Study of residual stress evolution in SUS304/Q235 bimetallic clad plate butt-welded joints considering welding sequence[J]. Journal of Pressure Vessel Technology,2022,144(5):051507.
- [17] 沈春豫,樊科社,李莹,等. 热处理工艺对爆炸焊接 TA1/Q345R 复合板残余应力分布影响[J]. 金属热处理,2019,44(8):205-208.
- SHEN Chun-yu,FAN Ke-she,LI Ying,et al. Effect of heat treatment process on residual stress distribution of TA1/Q345R explosive welding clad plate[J]. Heat Treatment of Metals,2019,44(8):205-208.
- [18] 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 Li-yan,ZHANG Shou-lu,SONG Shi-zhe. Sensitive temperatures for intergranular corrosion of typical stainless steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection,2006,26(1):1-5.
- [19] 黄志慧,张述旺,戴婧. 不锈钢复合板压力容器的热处理[J]. 山东化工,2019,48(24):127-128.
- HUANG Zhi-hui,ZHANG Shu-wang,DAI Jing. PWHT of stainless steel clad plate pressure vessel [J]. Shandong Chemical Industry,2019,48(24):127-128.
- [20] 蒋文春,罗云,万媛,等. 焊接残余应力计算,测试与调控的研究进展[J]. 机械工程学报,2021,57(16):306-328.
- JIANG Wen-chun,LUO Yun,WAN Yu,et al. Research progress on the calculation,measurement and control of welding residual

- stress[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 306–328.
- [21] 迟艳芬, 刘照元, 王振刚, 等. X70 管线钢厚板多层多道焊残余应力数值分析[J]. 焊接, 2020, 8: 9–15.
CHI Yan-fen, LIU Zhao-yuan, WANG Zhen-gang, et al. Numerical simulation of multi-pass and multi-layer welding residual stress of X70 steel thick plate[J]. Welding & Joining, 2020, 8: 9–15.
- [22] 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 Sen-dong, BI Tao, LI Suo, et al. Finite element simulation of residual stress in multi-layer and multi-pass welded joint of P92 steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(11): 42–46.
- [23] 张超华, 王晓霞, 常茂椿, 等. 焊缝金属的屈服强度和材料的加工硬化对 Q345 钢焊接残余应力与变形计算精度的影响[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 160–168.
ZHANG Chao-hua, WANG Xiao-xia, CHANG Mao-chun, et al. Effects of yield strength of weld metal and material strain hardening on prediction accuracy of welding residual stress and deformation in a Q345 steel joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 160–168.
- [24] 唐文龙. 不锈钢/钢复合板的爆炸焊接试验与数值模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
TANG Wen-long. Trails and numerical simulation of stainless steel-steel explosive welding[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2013.
- [25] 沈春豫, 樊科社, 李莹, 等. 爆炸焊接钛/钢复合板残余应力分布状态研究[J]. 中国化工装备, 2019(4): 31–35.
SHEN Chun-yu, FAN Ke-she, LI Ying, et al. Research on residual stress distribution in explosive welding titanium steel clad plate[J]. China Chemical Industry Equipment, 2019(4): 31–35.