

AH36 钢焊接接头动态应力应变特性分析

刘伟, 朱永梅, 孙傲

(江苏科技大学, 机械工程学院, 镇江, 212008)

摘要: 基于热弹塑性法研究了 160°对接 AH36 钢焊接接头动态应力应变过程, 同时制作试样, 利用三维全场应变测量分析系统记录焊接应变的动态变化, 验证了焊接有限元结果的准确性. 分析了预热温度和焊接速度对动态应力应变的影响. 研究表明, 随着预热温度的增加, 焊接变形逐渐减小. 预热温度为 200 °C 时的平均焊接变形量比未预热时的平均焊接变形量降低了 34.6%, 同时改善了焊接应力场的分布情况, 增加焊缝及热影响区的压应力分布区域, 但应力幅值对预热温度的改变不敏感. 焊接变形随焊接速度增大而增大, 当焊接速度大于 5 mm/s 时, 增长趋势逐渐平缓, 焊接变形场等势分布面积减小. 随着焊接速度的增加, 焊接压应力场分布区域减小, 焊接拉应力场分布区域增大, 焊接速度的改变还会造成平板厚度方向中间层厚度处的应力出现波动.

创新点: (1) 基于试验法和有限元法相结合, 研究了 AH36 钢焊接接头动态应力与变形特性.
(2) 探究了预热温度和焊接速度对 AH36 钢焊接接头动态应力与变形特性的影响.
(3) 基于数字图像相关技术, 测试了 AH36 钢焊接接头的动态变形过程.

关键词: 焊接接头; 动态应力应变; 数值模拟; 预热温度; 焊接速度

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230712001

Analysis of dynamic stress-strain characteristics of AH36 steel welded joint

LIU Wei, ZHU Yongmei, SUN Ao

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, 212008, China)

Abstract: Based on the thermal elastic-plastic method, the dynamic stress-strain deformation process of AH36 steel welded joint with 160° butt joint was studied. At the same time, the sample was made, and the dynamic change of welding strain was recorded by three-dimensional full-field strain measurement and analysis system, which verified the accuracy of welding finite element results. The effects of preheating temperature and welding velocity on dynamic stress and strain were analyzed. The results show that with the increase of preheating temperature, the welding deformation decreases gradually. When the preheating temperature is 200 °C, the average welding deformation is reduced by 34.6% compared with the average welding deformation without preheating. At the same time, the distribution of welding stress field is improved, and the compressive stress distribution area of weld and heat affected zone is increased, but the stress amplitude is not sensitive to the change of preheating temperature. The welding deformation increases with the increase of welding velocity. When the welding velocity is greater than 5 mm/s, the growth trend gradually slows down, and the equipotential distribution area of the welding deformation field decreases. With the increase of welding velocity, the distribution area of welding compressive stress field decreases, and the distribution area of welding tensile stress field increases. The change of welding velocity will also cause the stress of middle layer thickness to fluctuate.

Highlights: (1) Based on the combination of experimental method and finite element method, the dynamic stress and distortion

收稿日期: 2023 – 07 – 12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52271277); 江苏省自然科学基金项目 (BK20211343); 海洋工程国家重点实验室 (上海交通大学)(GKZD010081); 江苏省研究生实践创新计划 (SJCX_2150)

characteristics of AH36 steel welded joint was studied.

(2) The effect of preheating temperature and welding velocity on the dynamic stress and distortion characteristics of AH36 welded joint was investigated.

(3) Based on digital image correlation technology, the dynamic distortion process of AH36 steel welded joint was tested.

Key words: welding joint; dynamic stress and distortion; numerical simulation; preheating temperature; welding velocity

0 序言

焊接本质上是一个材料压缩过程,在此过程中,材料会出现膨胀、熔化、凝固、收缩等现象,由于温度、约束条件、冷却速度等原因,导致材料内部出现裂纹、变形、扭曲等现象,从而导致材料内部产生内应力。焊接应力分为 2 种,焊接瞬时应力和焊接残余应力。焊接瞬时应力即焊接过程中随时间而变化的内应力^[1-2],焊接残余应力是焊接瞬时应力的最终表现形式。

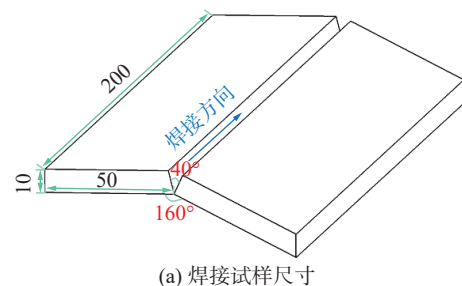
焊接残余应力会引起很多关于焊件性能方面的问题,有负面影响,也有正面影响,主要与残余应力的幅值、分布形式和应力性质有关^[3]。残余拉应力会直接影响焊件的服役时间和疲劳性能^[4-6],加速裂纹扩展速率^[7],导致焊件整体结构屈服强度的下降^[8]和抗冲击能力的减弱。残余压应力能够提高焊件疲劳性能^[9]、增强抗冲击能力和承载能力。在焊接过程中,每一时刻的内应力平衡状态会随热源的移动而发生改变。因此,了解焊接过程中焊接残余应力的演变过程,能进一步了解残余拉应力和残余压应力的形成机理,提出更有效的焊接方法,提高焊接接头性能。

将研究两块 200 mm × 50 mm × 10 mm AH36 低碳合金钢平板呈 160° 对接条件下的焊接应力应变演化过程。采用 ABAQUS 软件进行焊接应力应变的有限元模拟,得到厚度方向上的焊接应力应变演化过程,并通过试验验证了有限元结果的准确性。最后研究了焊接预热温度和焊接速度对厚度方向上焊接应力与变形的影响。

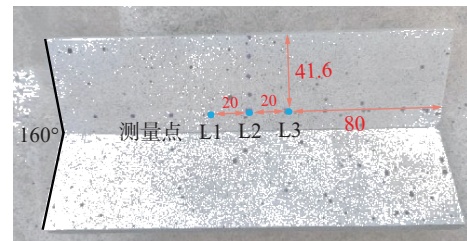
1 试验方法

使用线切割制作两块 AH36 平板,长宽高均为 200 mm × 50 mm × 10 mm,对接角度呈 160°, 根据国家标准 GB/T 985.1—2008^[10], 采用 40° V 形坡

口,如图 1a 所示。焊接过程中使用三维全场应变测量分析系统记录焊接应变的动态变化。三维全场应变测量分析系统是一种基于数字图像相关法 (Digital Image Correlation, DIC) 原理的测量物体表面应变和变形的方,测量前需要在目标样件表面制作随机灰度分布的散斑图像,如图 1b 所示,制作散斑后标记测量点 L1, L2, L3, 测量点间隔为 20 mm。



(a) 焊接试样尺寸



(b) 试样标记

图 1 焊接试样 (mm)

Fig. 1 Welding specimen. (a) size of welding specimen; (b) specimen marking

焊接接头由 3 层焊缝组成,焊缝深度依次为 3, 3, 3.5 mm, 每层焊缝的焊接参数如表 1 所示。焊接方式为氩气和二氧化碳混合气体保护焊,热效率为 0.8,焊接所用焊丝为 FRM-56,直径 1.2 mm,送丝

表 1 焊接参数
Table 1 Welding parameters

焊缝深度 h / mm	电压 V / V	电流 I / A	焊接速度 $v / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	热输入 $q / (\text{J} \cdot \text{mm}^{-1})$
3	18	80	5	230.4
3	21	110	5	369.6
3.5	23	130	5	478.4

速度 6 mm/min. 层间预热温度设置在 90 ℃, 焊接完成后冷却至室温.

2 AH36 钢焊接接头变形分析

2.1 有限元模型

有限元法模拟焊接过程已经得到了研究者的认可^[11-14], 本研究将运用热弹塑性有限元法模拟 AH36 钢板的动态应力应变过程. 有限元模型如图 2 所示, 焊缝及热影响区周围采用精细网格划分, 热分析中采用 DC3D8 单元网格, 利用 DFLUX 子程序编写双椭球热源^[15] 作为移动热源, 热辐射参考 Stefan-Boltzmann 定律^[16], 热对流参考牛顿方程^[17]. 力学分析中, 网格类型更改为 C3D8R, 约束方式如图 2 所示, 焊接起始端右侧边界约束点限制 x, y, z 方向的位移, 焊接终止端右侧边界约束点限制 y, z 方向的位移、左侧边界约束点限制 z 方向的位移. 其中, x 方向为焊接方向, 即平板的纵向, y 方向为平板的横向, z 方向为平板厚度方向.

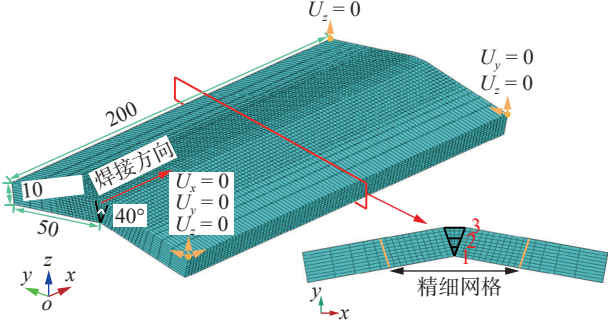


图 2 有限元模型和边界条件 (mm)
Fig. 2 Finite element model and constraint conditions

2.2 材料属性

AH36 钢板高温属性如下表 2 所示. 材料本构模型会对有限元结果的精度产生影响, 同时也会增加有限元模型的复杂程度和计算难度. 因此, 研究者通常会引入假设条件^[18] 以简化模型, 本研究的材料本构模型引入以下假设条件: (1) 假设材料是各向同性的; (2) 忽略材料塑性硬化现象; (3) 忽略金属液体的流动行为; (4) 屈服条件遵循 Von Mises 屈服准则; (5) 忽略蠕变因素引起的应变, 因其对总应变的影响微小^[19-20].

表 2 AH36 钢的高温属性
Table 2 High temperature properties of AH36 steel

温度 $T / ^\circ\text{C}$	热膨胀系数 $\alpha / (10^{-5} \cdot \text{K}^{-1})$	屈服强度 $R_{\text{eL}} / \text{MPa}$	弹性模量 E / GPa	泊松比 μ	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	比热 $C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数 $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
20	1.67	265	200	0.29	7.80	465	15.0
100	1.70	237	190	0.30	7.79	500	15.1
300	1.83	170	168	0.31	7.75	512	18.0
500	1.95	142	157	0.32	7.65	546	20.4
700	2.00	122	151	0.33	7.57	589	22.9
900	2.02	68	120	0.33	7.50	615	25.5
1 100	2.03	36	76	0.33	7.47	647	29.5
1 300	2.10	17	20	0.34	7.35	697	33.0
1 500	2.13	8	10	0.39	7.33	704	32.0

2.3 有限元结果对比分析

每层焊缝厚度方向上的中心节点 A、B、C 的温度循环曲线如图 3 所示, 节点位于焊缝中间横截面上 ($x=100 \text{ mm}$), 节点温度接近 2 500 ℃, 因使用了生死单元技术, 所以每层焊缝经历的热循环次数不同. 焊接接头熔合线如图 4 所示, 图 4a 为经过切割、清洗、标记得到的焊接试验的焊缝剖面 and 熔合线, 图 4b 为有限元数值分析得到的焊缝剖面 and 熔

合线. 从图中的熔合线易看出, 有限元计算结果是可信的, 因为有限元法的计算结果与试验结果相似, 熔合区域的形貌接近, 熔合线吻合度较高. 图 5 为 DIC 与有限元计算的位移云图, 从云图中可以看出, 位移场的分布相似. 图 6a 为有限元和试验测量点 L1, L2, L3 厚度方向的焊接变形曲线 (U_{th}), 从图中可以看出有限元法模拟的焊接变形曲线的变化趋势和试验结果吻合. 如图 6b 所示, 试验结果

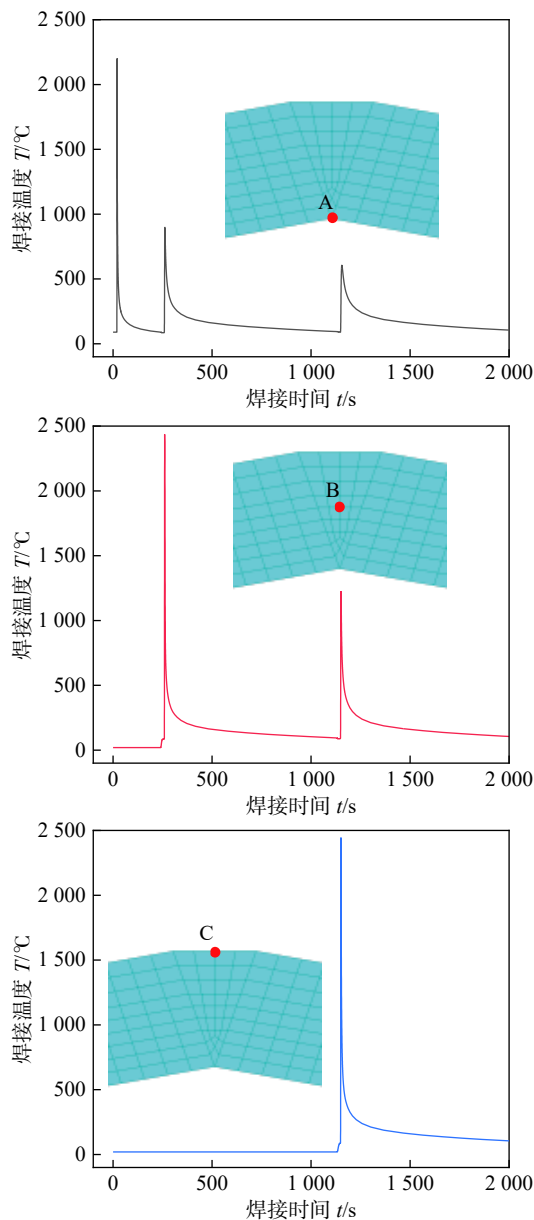


图 3 焊缝横截面温度循环曲线

Fig. 3 Temperature cycling curve of weld cross-section

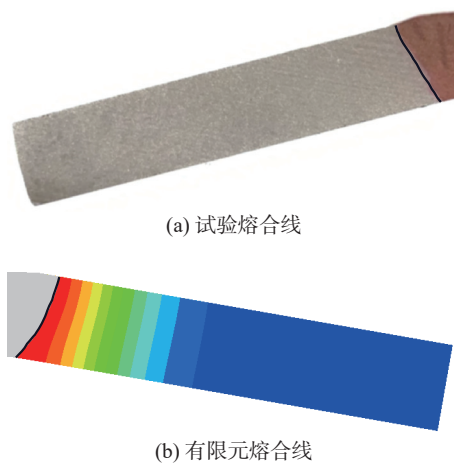


图 4 熔合线对比

Fig. 4 Fusion line comparison. (a) test fusion line; (b) FE fusion line

($U_{th-Test}$) 和有限元法结果 (U_{th-FE}) 的比值在 1.093 ~ 1.200 之间, 在可接受波动范围内, 表明有限元法的模拟结果是合理的。

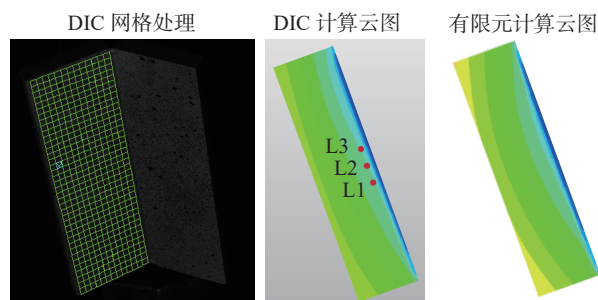
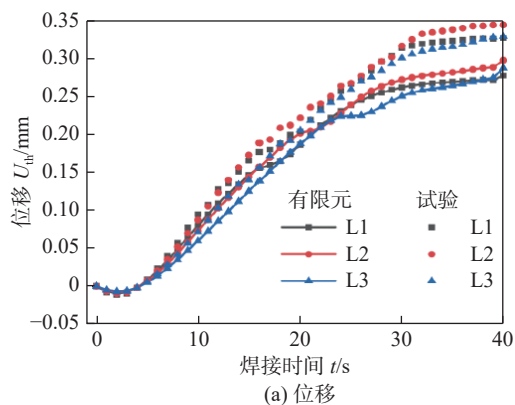
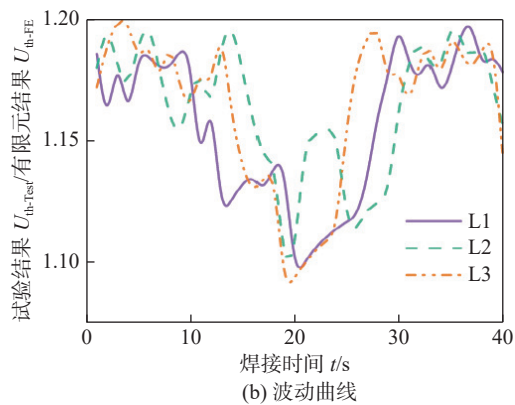


图 5 DIC 与有限元结果对比

Fig. 5 Comparison of contour of displacement field between DIC and FE



(a) 位移



(b) 波动曲线

图 6 厚度方向位移曲线

Fig. 6 Displacement curves in thickness direction. (a) displacement curves; (b) fluctuation curves

3 预热温度和焊接速度影响分析

影响焊接应力与变形的因素包括许多, 如焊接速度、焊接温度、预热温度等. 本研究将讨论不同预热温度和不同焊接速度对焊接应力与变形的影响. 测量点如图 7 所示, 选取焊接接头中间截面 ($x=100$ mm 处), 在焊缝截面厚度方向上热影响区附

近选取 5 个节点, 记为 1, 2, 3, 4, 5.

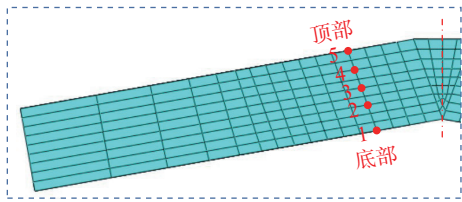


图 7 有限元测量点
Fig. 7 Finite element measured points

3.1 预热温度

3.1.1 预热温度对变形的影响

图 8a 为 4 种不同预热温度下第三层焊接热过程的位移曲线, 不同预热温度下的位移曲线有着相似的变化规律, 从底部节点 1 到顶部节点 5, 位移量值依次增大, 这是由于节点处到热源的距离不同, 导致受热温度不同造成的. 在 30 s 后, 位移值减小, 因为熔池周围应力分布情况复杂, 测量节点周围的应力会随熔池的移动而改变. 预热温度越高, 位移越小, 如表 3 所示, 为焊接位移峰值和最终位移. 和 20 °C 下的位移值相比, 200 °C 下节点位移峰值的平均值和最终位移的平均值分别增加了 56.1% 和 34.6%, 150 °C 下分别增加了 23.7% 和 15.9%, 90 °C 下分别增加了 10.9% 和 7.1%. 由表 3 还可以看出, 节点 1 到节点 5, 位移峰值和最终位移值不断增大, 表明越靠近热源, 位移值越大. 如

图 8b 所示, 预热温度为 200 °C 时, 膨胀区变得细长, 收缩区明显缩小, 焊接位移场的分布得到改善, 所以 200 °C 时各节点的焊接变形量最小.

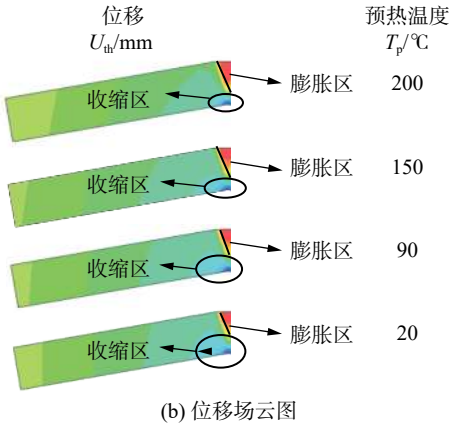
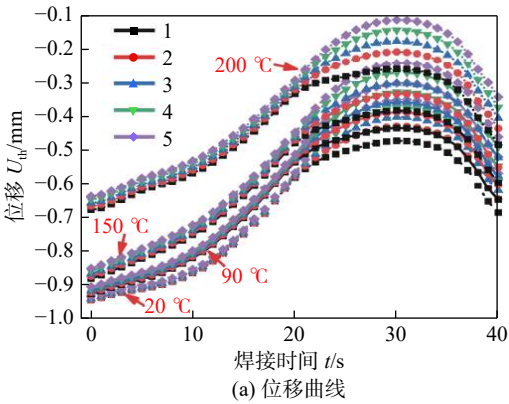


图 8 不同预热温度下的位移曲线和云图
Fig. 8 Displacement curve and contour in different preheat temperatures. (a) Displacement curve; (b) Contour of displacement field

表 3 不同预热温度下各节点的位移
Table 3 Displacement of points under different preheat temperatures

节点	20 °C		90 °C		150 °C		200 °C	
	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm
1	-0.475	-0.690	-0.438	-0.651	-0.386	-0.600	-0.262	-0.486
2	-0.432	-0.650	-0.391	-0.608	-0.336	-0.554	-0.211	-0.439
3	-0.405	-0.624	-0.361	-0.579	-0.305	-0.524	-0.179	-0.408
4	-0.378	-0.597	-0.332	-0.550	-0.274	-0.493	-0.149	-0.376
5	-0.354	-0.572	-0.305	-0.522	-0.258	-0.464	-0.116	-0.348

3.1.2 预热温度对应力的影响

图 9a 为不同预热温度下厚度方向上的焊接残余应力曲线, 焊接残余应力在热源到达前后会发生显著变化, 这与熔池周围复杂的应力分布形式有关, 造成了 20 s 前后应力剧烈波动的现象. 最后时刻, 节点 3 和 4 应力快速增加, 是因为板厚中部的

材料在冷却收缩时受到内外层材料的阻碍, 形成了高拉应力区域, 如表 4 所示, 为各节点在应力波动时的最大拉应力或压应力和焊接完成后的最终应力. 图 9b 所示为应力场分布云图, 蓝色压应力场分布区域略微增加, 黄色拉应力场分布区域减少. 上述结果表明, 预热温度对改善焊接应力场的分布有

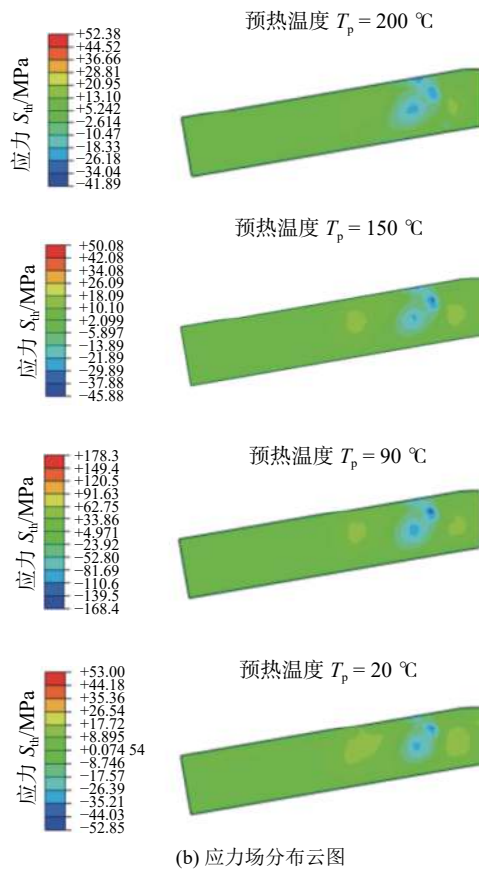
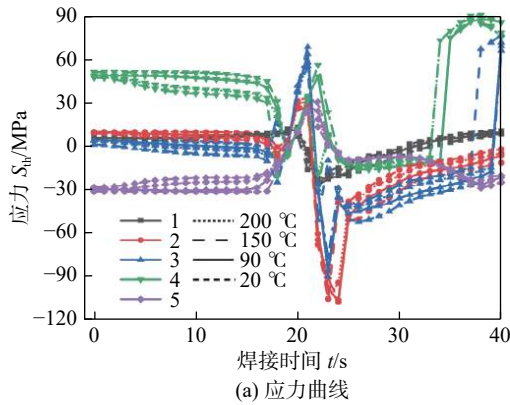


图 9 不同预热温度下的应力曲线和云图

Fig. 9 Stress curve and contour in different preheat temperatures. (a) Stress curve; (b) Contour of stress field distribution

帮助,对板厚方向中间层厚度处节点的应力波动大小存在一定影响,但对最终应力的大小影响较小。

3.2 焊接速度

3.2.1 焊接速度对变形的影响

图 10 所示为不同焊接速度下的第 3 层焊接热过程的位移曲线,3 种速度下的位移变化趋势相似。热源经过后,位移开始发生明显波动,先膨胀后收缩,造成这种现象的原因和 3.1.1 节相似,由熔池周围的应力分布引起。

表 4 不同预热温度下各节点的应力
Table 4 Stress of points under different preheat temperatures

节点	20 °C		90 °C	
	最大应力 $\sigma_{\max}$ / MPa	最终应力 σ / MPa	最大应力 $\sigma_{\max}$ / MPa	最终应力 σ / MPa
1	-24.01	8.01	-27.39	9.11
2	-107.29	-11.93	-108.46	-6.98
3	-77.97	65.77	-87.05	68.99
4	86.66	75.19	87.91	85.44
5	32.89	-20.70	-31.42	-22.27

节点	150 °C		200 °C	
	最大应力 $\sigma_{\max}$ / MPa	最终应力 σ / MPa	最大应力 $\sigma_{\max}$ / MPa	最终应力 σ / MPa
1	-26.41	9.59	-26.03	10.17
2	-106.42	-6.45	-106.57	-2.44
3	-90.92	71.39	76.84	76.84
4	90.37	85.31	87.43	77.99
5	-27.60	-25.62	-29.57	-25.71

表 5 为焊接热过程中不同焊接速度下各节点的位移峰值和最终位移,位移峰值和最终位移值随板厚的增加而增加,随焊接速度的增加而减小。2 mm/s 时所有节点的平均最终位移值比 5 mm/s 时高了 0.258 mm,焊接速度继续增大为 10 mm/s 时,平均最终位移值比 5 mm/s 时低了 0.018 mm,焊接速度对焊接变形的影响作用明显减弱。如图 11 不同焊接速度下的位移场分布云图,黑色边界线内为膨胀区域。2 mm/s 时的膨胀区明显大于 5 mm/s 和 10 mm/s 时的膨胀区,但黑线之外的压缩区分布更加均匀。结果表明,随焊接速度的增加,膨胀区减小,位移梯度减小,等势线区域分布面积略有减小。

3.2.2 焊接速度对应力的影响

3 种焊接速度下的焊接应力曲线如图 12 所示,在热源到达前后,也会出现应力波动,造成的原因在 3.1.2 节中已说明。表 6 为各节点在应力波动时的最大拉应力或压应力和焊接完成后的最终应力。从表中可以看出当焊接速度为 5 mm/s 时,节点 3 和节点 4 处的最终应力分别高达 68.99 和 85.44 MPa,这是因为随焊接速度增加,应力会向焊接接头处集中。如图 13 所示,焊接速度越快,蓝色压应力区域减小,黄色拉应力区域增加,蓝色压应力区

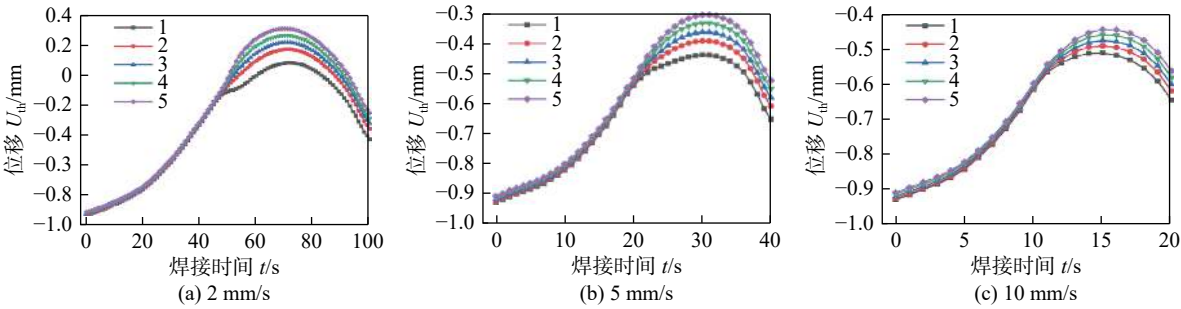


图 10 不同焊接速度下的位移曲线
Fig. 10 Displacement curve in different welding velocities. (a) 2 mm/s; (b) 5 mm/s; (c) 10 mm/s

表 5 不同焊接速度下各节点的位移
Table 5 Displacement of points under different welding velocities

节 点	2 mm/s		5 mm/s		10 mm/s	
	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm	位移峰值 $U_{\max} / \text{mm}$	最终位移 U / mm
1	0.087	-0.423	-0.438	-0.651	-0.509	-0.643
2	0.177	-0.352	-0.391	-0.608	-0.488	-0.618
3	0.223	-0.317	-0.361	-0.579	-0.473	-0.599
4	0.268	-0.283	-0.332	-0.550	-0.456	-0.579
5	0.314	-0.247	-0.305	-0.522	-0.442	-0.560

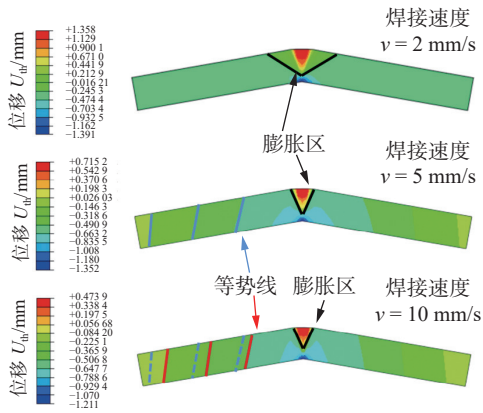


图 11 不同焊接速度下的位移场云图
Fig. 11 Contour of displacement field distribution in different welding velocities

在热影响区逐渐集中,黄色压应力区域逐渐在焊缝及热影响区周围向两边扩散,造成了热影响区两侧为拉应力而热影响区为压应力的现象.因此,焊接速度越大,拉应力和压应力的分布越集中.

讨论焊接速度对焊接应力与变形的影响时,还需要考虑熔池大小的影响,因为不同焊接速度下的熔池形貌不同.图 14 为不同焊接速度下的温度场分布云图,黑色部分为理论焊接填料区域,灰色为材料熔化区.从图中可以看出,焊接速度越快,熔化区域越小,焊接接头无法全熔透,影响焊接接头质量;焊接速度越慢时,熔化区域越大,焊接接头全熔透,影响焊件整体性能.

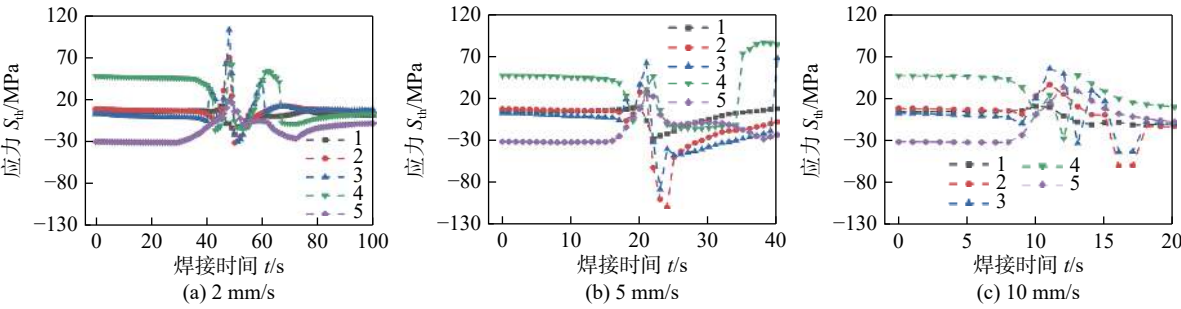


图 12 不同焊接速度下的应力曲线
Fig. 12 Stress curve in different welding velocities. (a) welding velocity 2 mm/s; (b) welding velocity 5 mm/s; (c) welding velocity 10 mm/s

表 6 不同焊接速度下各节点的应力
Table 6 Stress of points under different welding velocities

节 点	2 mm/s		5 mm/s		10 mm/s	
	最大应力	最终应力	最大应力	最终应力	最大应力	最终应力
	$\sigma_{\max}$ / MPa	σ / MPa	$\sigma_{\max}$ / MPa	σ / MPa	$\sigma_{\max}$ / MPa	σ / MPa
1	-21.94	1.94	-27.39	9.11	11.77	-9.07
2	70.79	4.78	-108.46	-6.98	38.15	-12.05
3	103.43	7.11	-87.05	68.99	56.86	-9.64
4	63.13	3.71	47.99	85.44	49.68	10.67
5	19.73	-8.42	27.44	-22.27	35.22	-6.84

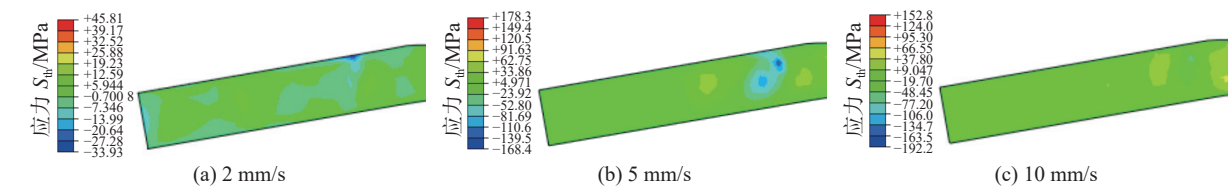


图 13 不同焊接速度下的应力场分布云图

Fig. 13 Contour of stress field distribution in different welding velocities. (a) welding velocity 2 mm/s; (b) welding velocity 5 mm/s; (c) welding velocity 10 mm/s

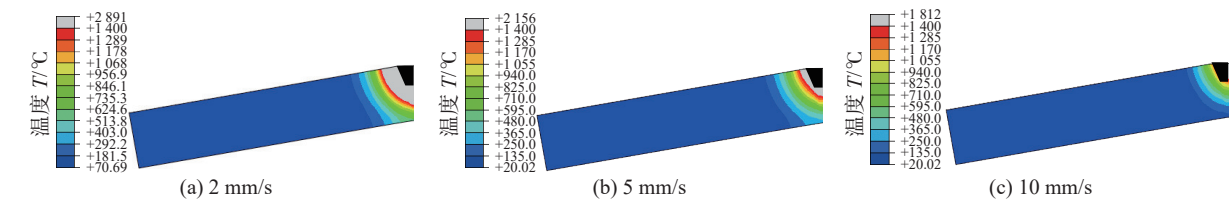


图 14 不同焊接速度下的温度场对比

Fig. 14 Comparison of temperature contour in different welding velocities. (a) welding velocity 2 mm/s; (b) welding velocity 5 mm/s; (c) welding velocity 10 mm/s

4 结论

- (1) 预热温度越大, 焊接变形越小, 当预热温度为 200 °C 时, 可以改善焊接应变场的分布情况, 其平均最终位移比无预热温度下的平均最终位移降低了 34.6%.
- (2) 预热温度对焊接应力的影响较小, 但对改善应力场的分布有作用.
- (3) 焊接速度越大, 焊接变形越大, 但焊接速度对焊接变形的影响不是线性的, 当焊接速度大于 5 mm/s 时, 其增大的趋势减缓, 焊接应变场等势分布面积减小.
- (4) 随着焊接速度的增加, 压应力场分布区域减小, 拉应力场分布区域增大, 焊接速度的改变会造成中间厚度层的应力波动.

参考文献

[1] 段斌, 马德志. 现代焊接工程手册 (基础卷)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
Duan Bin, Ma Dezhi. Modern welding engineering handbook (basic) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.

[2] 陈祝年, 陈茂爱. 焊接工程师手册 (第三版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
Chen Zhunian, Chen Maoai. Handbook for welding engineer [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.

[3] Ghafouri M, Ahola A, Ahn J, *et al.* Numerical and experimental investigations on the welding residual stresses and distortions of the short fillet welds in high strength steel plates[J]. Engineering Structures, 2022, 260: 114269.

[4] Barsoum Z, Barsoum I. Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(1): 449 – 467.

[5] Cui C, Zhang Q, Bao Y, *et al.* Fatigue life evaluation of welded joints in steel bridge considering residual stress[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 153: 509 – 518.

- [6] Jiang W, Xie X, Wang T, *et al.* Fatigue life prediction of 316L stainless steel weld joint including the role of residual stress and its evolution: Experimental and modelling[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 143: 105997.
- [7] Shajan N, Kumar R, Manik R, *et al.* Role of residual stress in the failure of HF-ERW welded tubes[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 161: 108342.
- [8] Ghafouri M, Ahola A, Ahn J, *et al.* Welding-induced stresses and distortion in high-strength steel T-joints: Numerical and experimental study[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 189: 107088.
- [9] Keränen L, Pylvänäinen M, Kaijalainen A, *et al.* Residual stresses of MAG-welded ultrahigh-strength steel rectangular hollow sections[J]. *Engineering Structures*, 2024, 305: 117719.
- [10] 朴东光, 潘乾刚, 储继君. 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2008.
- Piao Dongguang, Pan Qiangang, Chu Jijun. Recommended joint preparation for gas welding, manual metal arc welding, gas-shield arc welding and beam welding[s]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2008.
- [11] Zhu Z K, Han Y, Zhang Z, *et al.* Numerical simulation of residual stress and deformation for submerged arc welding of Q690D high strength low alloy steel thick plate[J]. *China Welding*, 2021, 30(3): 49 – 58.
- [12] 金希红, 曾燕军, 刘恒, 等. 不同残余应力测试方法与数值模拟对比研究 [J]. *焊接技术*, 2022, 51(1): 24 – 27, 113-114.
- Jin Xihong, Zeng Yanjun, Liu Heng, *et al.* Comparative study of different residual stress testing methods and numerical simulation[J]. *Welding Technology*, 2022, 51(1): 24 – 27, 113-114.
- [13] 乔瑞林, 龙伟民, 秦建, 等. YG8/GH4169 异种材料钎焊接头残余应力的数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2024, 45(3): 68 – 74.
- Qiao Ruilin, Long Weimin, Qin Jian, *et al.* Numerical simulation of residual stress in YG8/GH4169 dissimilar material brazed joints[J]. *Transaction of the China Welding Institution*, 2024, 45(3): 68 – 74.
- [14] Pavan A R, Arivazhagan B, Vasudevan M, *et al.* Numerical simulation and validation of residual stresses and distortion in type 316L(N) stainless steel weld joints fabricated by advanced welding techniques[J]. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2022, 39: 294 – 307.
- [15] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1984, 15(2): 299 – 305.
- [16] Wang Y F, Feng G J, Pu X W, *et al.* Influence of welding sequence on residual stress distribution and deformation in Q345 steel H-section butt-welded joint[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 13: 144 – 153.
- [17] 王阳. 大型复杂船体结构焊接变形分析方法的研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- Wang Yang. Investigation and application on the analysis methods of welding distortion in large-scale and complex marine structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015.
- [18] Wang B, Zhou L, Du J G, *et al.* Analysis of residual stresses in electron beam welding with filler wire of Ti62A alloy[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 23: 985 – 997.
- [19] Sun J M, Liu X Z, Tong Y G, *et al.* A comparative study on welding temperature fields, residual stress distributions and deformations induced by laser beam welding and CO₂ gas arc welding[J]. *Materials & Design*, 2014, 63: 519 – 530.
- [20] Ahn J, He E, Chen L, *et al.* Prediction and measurement of residual stresses and distortions in fibre laser welded Ti-6Al-4V considering phase transformation[J]. *Materials & Design*, 2017, 115: 441 – 457.
-
- 第一作者: 刘伟, 硕士; 主要研究方向为焊接残余应力特性研究; Email: liu9798x@163.com.
- 通信作者: 朱永梅, 硕士, 教授; Email: zymtt@163.com.

(编辑: 高忠梅)