

Q355 钢对接焊缝残余应力施工控制数值模拟

张恒¹, 郑扬¹, 孙胤栋¹, 武科^{1*}, 张茂勇², 常昊¹

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061; 2. 中国电建市政建设集团有限公司, 天津 300384)

摘要: 装配式钢结构住宅目前大量运用焊接连接, 焊接残余应力对结构质量存在不利影响。采用 ABAQUS 软件进行焊接模拟, 比较事件序列法、生死单元法和场变量关联法作为焊缝激活方法的模拟效果, 选择事件序列法以提高计算效率, 并通过试验验证模拟方法的准确性。分别探究坡口形式、焊后热处理(保温温度、保温时间)和环境温度对 Q355 钢对接焊缝残余应力的影响, 并给出施工控制建议。结果表明: U 型坡口可抑制残余应力的产生, 实际工程应结合加工成本选择坡口形式; 提高保温温度和时间有利于残余应力的消除效果, 推荐保温温度 500 °C 和保温时间 3 h 为宜; 低温有利于缩短焊接层间冷却时间, 提高焊接效率, 但考虑焊接质量, 合理的环境温度应在 5~20 °C。

关键词: Q355 钢; 焊接残余应力; 施工控制; 数值模拟; 事件序列法

中图分类号: TU391

文献标志码: A

引用格式: 张恒, 郑扬, 孙胤栋, 等. Q355 钢对接焊缝残余应力施工控制数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2026, 56(2): 82-95.

ZHANG Heng, ZHENG Yang, SUN Yindong, et al. Numerical simulation of construction control for residual stress in Q355 steel butt welds[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2): 82-95.

Numerical simulation of construction control for residual stress in Q355 steel butt welds

ZHANG Heng¹, ZHENG Yang¹, SUN Yindong¹, WU Ke^{1*}, ZHANG Maoyong², CHANG Hao¹

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong, China; 2. China Power Construction Municipal Construction Group Co., Ltd., Tianjin 300384, China)

Abstract: Welded connections are widely used in prefabricated steel residential structures, and residual stresses from welding adversely affect structural quality. Welding simulations were conducted using ABAQUS to compare the effectiveness of weld activation methods, including the event sequence method, element birth and death method, and field variable method. The event sequence method was selected to improve computational efficiency, and its accuracy was validated by experiment. The effects of groove shape, post-weld heat treatment (holding temperature and time), and ambient temperature on residual stress in Q355 steel butt welds were investigated. Results showed that U-shaped grooves suppressed residual stress, and the selection of groove shape should consider both stress control and processing cost. Increasing holding temperature and time improved stress relief, with 500 °C for 3 hours recommended. Lower ambient temperatures reduced interpass cooling time and improved welding efficiency, while a range of 5-20 °C was suggested to ensure welding quality.

Keywords: Q355 steel; welding residual stress; construction control; numerical simulation; event sequence method

0 引言

焊接连接目前被大量运用于装配式钢结构住宅中, 包括柱-柱、柱-梁和梁-梁连接^[1]。焊接连接具有节省材料、加工方便、易于自动化操作、密封性

良好和不削弱构件截面等优点^[2]。然而, 焊接残余应力和变形会降低焊接结构的屈曲强度^[3-4]、疲劳强度^[5-6]和抗震性能^[7-9]。

各种加工因素和边界条件都可能影响焊接残余应力的分布和大小。为减小焊接结构的残余应力, 国内外学者针对焊接接头、焊后热处理、环境温

收稿日期: 2025-03-20

第一作者简介: 张恒(2002—), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要研究方向为钢结构焊接残余应力控制。E-mail: 202435078@mail.sdu.edu.cn

* 通信作者简介: 武科(1978—), 男, 河北枣强人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为韧性城市防灾减灾。E-mail: wuke@sdu.edu.cn

度等影响因素做了大量研究。关于焊接接头,文献[10]发现长宽比对 SUS304 不锈钢对接接头横向残余应力影响显著,对纵向残余应力影响较小;文献[11]发现 Q235 厚板多层多道焊接接头残余应力受最后一道焊道影响大,且焊接过程存在应力反复叠加现象。文献[12]探讨焊接顺序对 Q345 钢 H 型截面对接焊接接头残余应力和变形影响;文献[13]发现双 V 型坡口对不锈钢 T 形接头横向残余应力抑制作用明显,对纵向应力影响较小。关于焊后热处理,文献[14]研究不同热处理工艺参数对 P91 钢平板对接接头残余应力消除效果;文献[15]发现焊后热处理能够有效降低窄间隙埋弧焊接接头残余应力,改善应力分布;文献[16]探讨不同温度焊后热处理对铝合金焊接接头微观结构和材料性能影响。关于环境温度,文献[17]发现 A5083 铝合金接头在常温与高温下焊接接头疲劳极限相近,低温环境下焊接接头疲劳极限显著提高;文献[18]发现不同环境温度下 5083H111 铝合金焊接接头焊缝中心是焊接接头力学性能最薄弱处,0℃以上焊接接头性能优于 0℃以下;文献[19]发现焊接接头结构形成受到焊接过程环境温度的显著影响,低温焊接时焊缝会形成更细晶粒组织。

装配式钢结构住宅的梁柱构件大多在工厂焊接,到现场后用螺栓连接,但仍有部分需要现场焊接,如图 1 所示。现场焊接影响因素较多,结构质量控制难度大,焊接产生的残余应力极易成为装配式钢结构薄弱点。因此,如何合理高效地进行现场焊接施工以减少残余应力产生值得探讨。针对这一问题,本研究采用 ABAQUS 有限元软件模拟焊接过程,比较事件序列法、生死单元法和场变量关联法

作为焊缝激活方法的模拟效果以提高计算效率,并通过单边 V 型坡口焊接试验验证模拟方法准确性。在此基础上,基于装配式钢结构住宅调研情况,采用参数化研究方法分别探究坡口形式、焊后热处理(保温温度、保温时间)和环境温度对 Q355 钢对接焊缝残余应力的影响,并给出焊接残余应力施工控制建议。

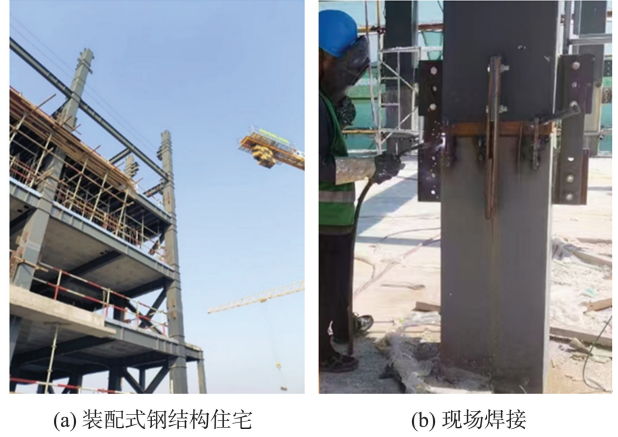


图 1 装配式钢结构住宅施工
Fig.1 Construction of prefabricated steel structure housing

1 数值模拟方法

1.1 数值模拟思路

在焊接时,应力对温度场影响很小,所以计算焊接残余应力时通常采用顺序耦合法。先进行非线性瞬态热分析获得焊接过程中的温度场,再进行非线性静态应力分析,将瞬态热分析得到的节点温度作为应力分析初始条件,获得应力场分布。焊接温度-应力顺序耦合模拟流程如图 2 所示。

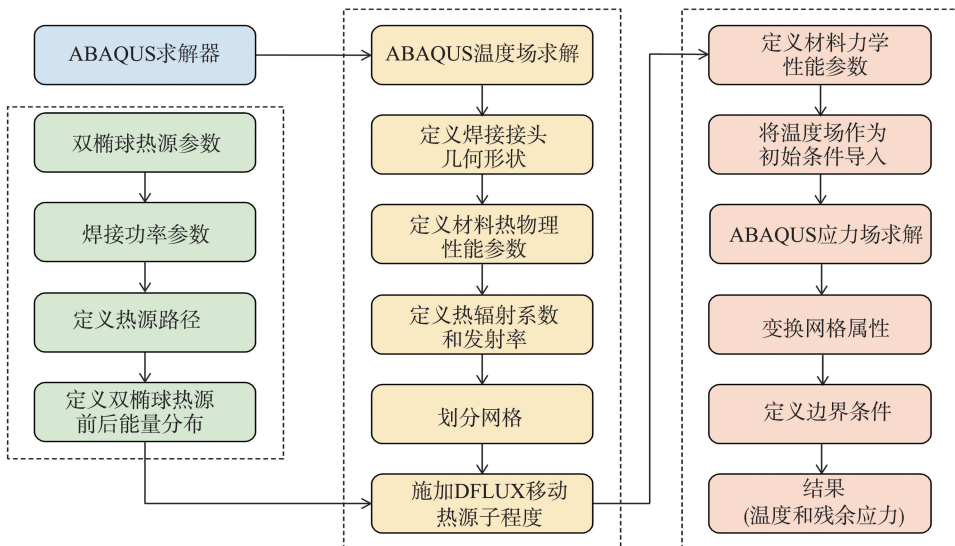


图 2 模拟流程
Fig.2 Simulation flowchart

1.2 理论依据

1.2.1 温度场计算

采用双椭球热源模型模拟焊接电弧产生的热输入,该模型分为两部分,如图3所示。

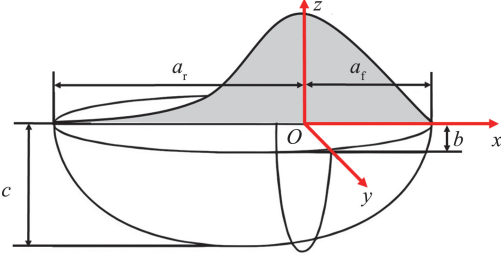


图3 双椭球热源模型

Fig.3 Double-ellipsoid heat source model

椭球前半部分热流密度^[20]

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q_w}{\pi\sqrt{\pi} a_f b c} e^{-3\left[\frac{(x-x_0-vt)^2}{a_f^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2}\right]}, \quad (1)$$

椭球后半部分热流密度

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q_w}{\pi\sqrt{\pi} a_r b c} e^{-3\left[\frac{(x-x_0-vt)^2}{a_r^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2}\right]}, \quad (2)$$

式中: Q_w 为电弧焊接功率, W, $Q_w = \eta UI$; U 为电弧电压, V; I 为焊接电流, A; η 为焊接热效率; x_0 、 y_0 和 z_0 为热源中心的坐标; a_f 、 a_r 、 b 和 c 为椭球形状参数, mm; v 为焊接速度, mm/s; t 为焊接时间, s; f_f 和 f_r 分别为前、后椭球热量分布参数, $f_f + f_r = 2$ 。

1.2.2 应力场计算

应力场计算采用与温度场相同的网格模型。弹性应变计算和塑性应变计算分别遵循各向同性 Hookean 定律和 Von-Mises 准则。在未考虑相变的情况下,材料的总应变^[21]

$$\varepsilon_{\text{total}} = \varepsilon_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{\text{th}} + \varepsilon_{\text{cr}}, \quad (3)$$

式中, ε_e 、 ε_p 、 ε_{th} 和 ε_{cr} 分别为弹性应变、塑性应变、热应变和蠕变应变。由于焊接时材料处于高温的时间很短,因此焊接模拟中未考虑蠕变应变,但焊后热处理时应考虑蠕变应变。

1.2.3 焊后热处理

焊后热处理采用文献[22]提出的蠕变模型。等效蠕变应变 ε_{cr} 和蠕变应变速率 ε'_{cr}

$$\varepsilon_{\text{cr}}(t', \sigma, T) = a' t'^{b'} \sigma^{c'}, \quad (4)$$

$$\varepsilon'_{\text{cr}}(t', \sigma, T) = a' b' t'^{b'-1} \sigma^{c'}, \quad (5)$$

由于 Q355 钢在 450 °C 以下不发生蠕变,所以令 450 °C 以下的蠕变参数 a' 为 0,其它温度段的蠕变参数为

$$\lg(a') = \begin{cases} 1.692 \times 10^{-2} T - 37.58 & (450 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 500 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ -3.642 \times 10^{-4} T^2 + 0.546 3T + 211.1 & (500 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C}) \end{cases}, \quad (6)$$

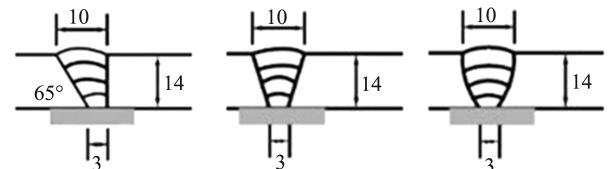
$$b' = \begin{cases} 3.641 \times 10^{-3} T - 0.820 7 & (450 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 500 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ 1 & (500 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C}) \end{cases}, \quad (7)$$

$$c' = \begin{cases} 1.796 \times 10^{-4} T + 10.99 & (450 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T < 500 \text{ } ^\circ\text{C}) \\ 1.357 \times 10^{-4} T^2 - 0.205 2T + 79.75 & (500 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T \leq 750 \text{ } ^\circ\text{C}) \end{cases}, \quad (8)$$

式中: t' 为时间, min; σ 为等效应力, MPa; T 为热处理温度, °C; 系数, a' 、 b' 、 c' 是与温度相关的常数。材料蠕变性能通过 ABAQUS 子程序 CREEP 施加,假设模型各节点温度与热处理炉温度热循环情况相同。热处理时,加热和降温过程平均速率分别取 5 °C/min 和 3 °C/min。

1.3 有限元模型

建立单边 V 型、V 型和 U 型 3 种坡口的有限元模型,试件尺寸为 100 mm×400 mm×14 mm,焊接形式为全熔透对接焊缝,坡口尺寸、有限元模型及边界条件分别如图 4、图 5 所示。设定 x 方向沿焊缝方向, y 方向垂直于焊缝, z 方向沿厚度方向。由于实际焊接过程中,试件均处于自由状态,故采用 3 点约束刚体位移作为边界条件,即取试件 3 个边角点,约束 z 方向位移,同时在其中一点上约束 x 方向位移。单边 V 型坡口焊缝及热影响区横截面单元边长为 0.7 mm,焊接方向单元边长为 2.5 mm,网格采用 3:1 过渡形式; V 型坡口和 U 型坡口焊缝及热影响区横截面单元边长为 1.4 mm,焊接方向单元边长为 8 mm,网格采用 4:2 过渡形式。3 种坡口有限元模型网格总数分别为 87 600、35 964 和 40 020。采用八结点线性传热六面体单元 (DC3D8) 和八结点线性六面体单元 (C3D8R) 分别计算温度场和应力场。假定焊缝填充材料和母材材料性能相同,二者在各温度下的热物理性能参数和力学性能参数源于文献[23],如图 6 所示。



(a) 单边V型坡口
单位: mm

(b) V型坡口

(c) U型坡口

图4 坡口尺寸

Fig.4 Groove dimensions

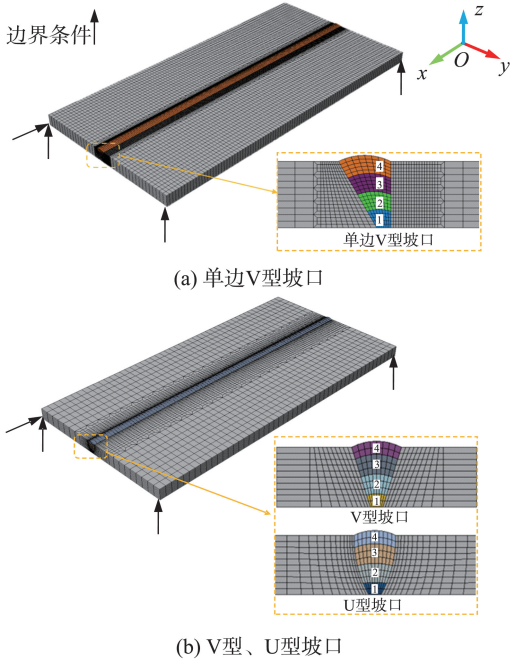
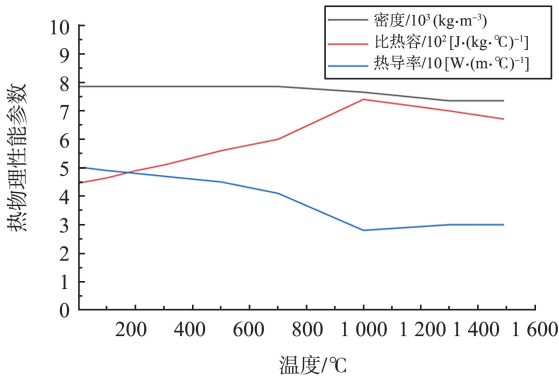
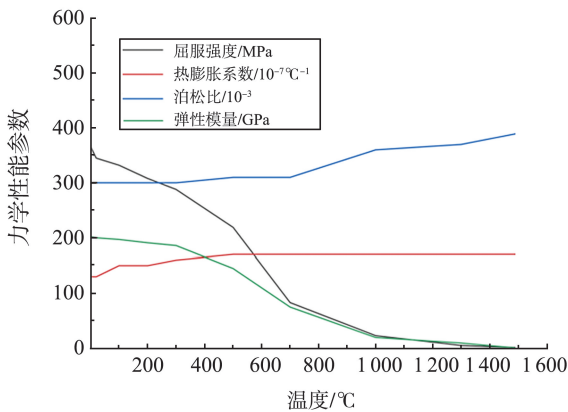


图5 有限元模型及边界条件

Fig.5 Finite element models and boundary conditions



(a) 热物性性能参数



(b) 力学性能参数

图6 Q355 钢各温度下的热物性性能参数和力学性能参数
Fig.6 Thermophysical and mechanical properties of Q355 steel at different temperatures

焊接模拟自下而上分别为焊道1、2、3、4, 分别对应打底焊、2道填充焊和盖面焊。焊接工艺为CO₂ 气体保护焊, 焊接热效率取 $\eta = 0.8$ ^[24], 工艺参数如表1所示。

表1 焊接工艺参数

Table 1 Welding process parameters

焊道	电流/ A	电压/ V	焊接速度/ (mm·s ⁻¹)	层间温度/ °C	热输入/ (kJ·mm ⁻¹)
1	180	20	5.0	100	720.0
2	240	25	4.2	100	1 428.6
3	270	30	3.3	100	2 454.4
4	270	30	3.5	100	2 314.3

1.4 参数化研究

选取坡口形式、焊后热处理(保温温度、保温时间)和环境温度作为研究对接焊缝残余应力施工控制的因素, 探究三者对残余应力影响, 如表2所示。选取单边V型、V型和U型坡口3种常用焊接坡口形式。现场焊接工件厚度较薄(≤ 16 mm), 焊后热处理温度通常在450~550 °C, 保温时间为2 h, 所以设置保温温度450、500、550 °C, 保温时间2、3、4 h的研究工况探究规律。装配式钢结构住宅项目地区分布广泛, 因季候和气候变化, 焊接环境温度不断变化, 研究其对焊接残余应力的影响, 能为施工现场采取加热、保温措施提供合理温度依据, 故根据现场施工条件选取-20、-10、0、10、20、30 °C这6个环境温度做参数化研究。

表2 参数化研究

Table 2 Parametric study

坡口形式	焊后热处理		环境 温度/ °C
	保温 温度/°C	保温 时间/h	
单边V型	—	—	—
V型	—	—	20
U型	—	—	—
U型	450、500、550	2	20
U型	500	2、3、4	20
U型	—	—	-20、-10、0、 10、20、30

注: “—”表示不适用。

1.5 事件序列法

选事件序列法作为焊缝激活方法, 相较常用的生死单元法^[25]和场变量关联法^[26], 当采用同一双椭球热源完成热源加载时, 三者计算残余应力精度相似, 如图7(a)所示, x、y、z方向残余应力 S_{11} 、 S_{22} 、 S_{33} 相差较小, 在误差允许范围内, 但三者计算效率差别较大。以单边V型坡口为例, 三者计算结果差异极小, 但事件序列法计算效率优势明显, 总计算时间分别是生死单元法和场变量关联法的30.27%和86.55%, 如图7(b)所示。

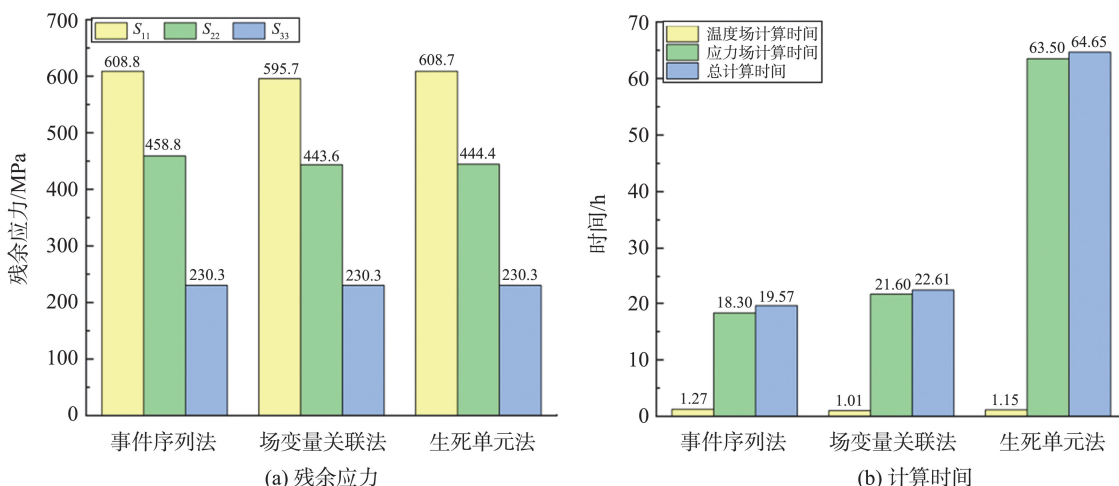


图7 效果对比

Fig.7 Comparison of results

ABAQUS 中 Event series 模块用于定义随时间和空间变化的场变量,AM Modeler 插件可通过编辑模型关键字,在分析步中根据速度和控制单元方向完成单元渐进或施加双椭圆热源等操作。事件序列法使用 Event series 模块结合 AM Modeler 插件实现焊缝材料渐进填充,其流程如图 8 所示。具体步骤为:(1)编写 Event series 表格。根据待激活焊缝集合中的节点(通常取待激活单元

特征边上的点),编写直线型或曲线型 Event series 表格,写入 inp 文件;(2)编辑单元激活命令。通过修改模型关键字或编写 Uepactivationval 子程序,实现单元渐进激活。(3)用 AM Modeler 插件实现材料沉积。实体单元统一选择 Bead 沉积工艺,依次创建“ABQ_AM_MaterialDeposition”、“ABQ_AM_MaterialDeposition_Advanced”、“ABQ_AM_MaterialDeposition_Bead”参数表,写入 inp 文件。

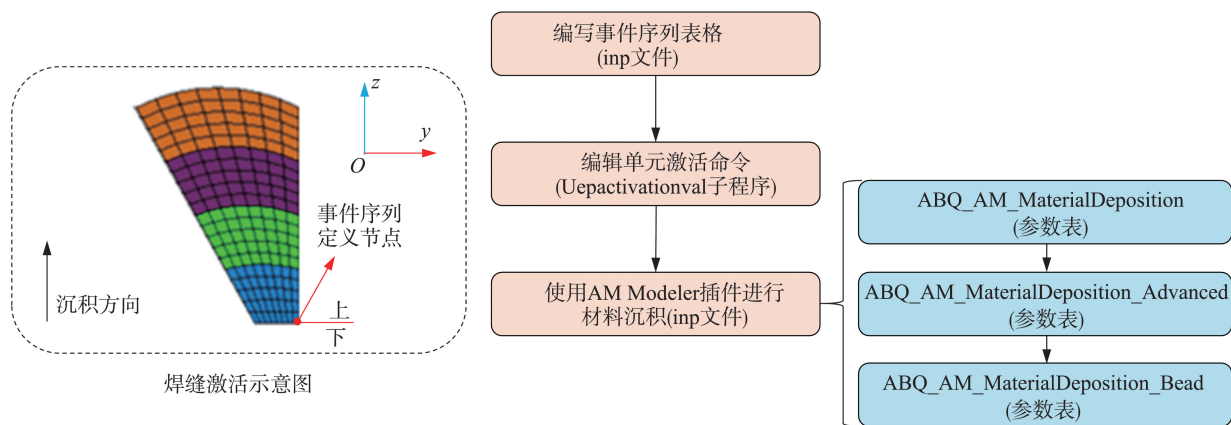


图8 事件序列法流程

Fig.8 Flow of the event series method

2 模型验证

2.1 试验设计

参照有限元模型设计 Q355 钢对接板件单边 V 型坡口焊接试验,采用盲孔法^[27]测量焊接残余应力,并进行标定试验测定应变释放系数,试验结束后切割试件获取焊缝熔池形状,如图 9 所示。盲孔直径和深度均为 2 mm。选择与 Q355 钢金属化学

成分相近、直径 1.2 mm 的 ER50-6 焊丝为焊接填充材料,焊接步骤为:(1)预先在坡口底部放置陶瓷衬垫,将试件垫高,保持水平,再通过 CO₂ 气体保护焊进行打底焊;(2)打底焊结束后进行层间冷却,将层间温度降低至 100 ℃ 以下,再进行填充焊和盖面焊过程。各层焊接工艺参数均按表 1 执行。焊接结束后需对试件进行打磨抛光,粘贴应变花,然后使用固定打孔仪器钻出直径和深度符合要求的盲孔,随后记录释放应变并计算残余应力

$$\sigma_{1,2} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2}}{4B}, \quad (9)$$

$$\tan 2\theta = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}, \quad (10)$$

式中: σ_1 、 σ_2 分别为最大主应力、最小主应力, MPa; θ 为主应力方向角(以顺时针为正), ε_1 、 ε_2 、 ε_3 分别为 0° 、 45° 、 90° 3 个方向应变片在钻孔后测得的释放应变; A 、 B 为应变释放系数, 取 3 次标定试验的平均值作为最终结果, 分别为 -2.581×10^{-7} 、 -6.353×10^{-7} 。

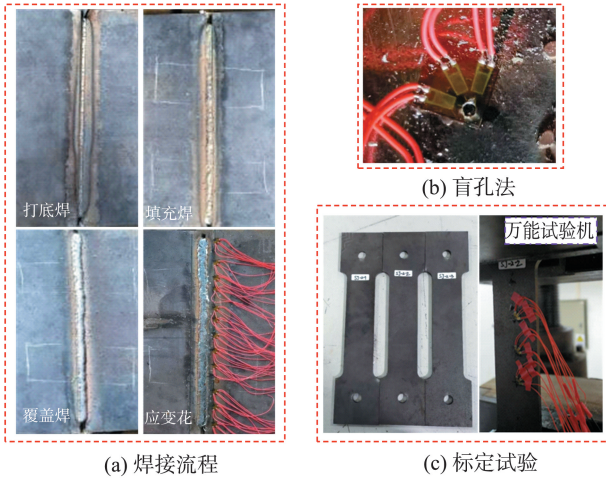


图9 试验设计
Fig.9 Experimental design

2.2 结果验证

采用事件序列法作为焊缝激活方法, 双椭球热源参数通过文献[26]提出的热源参数优化方法, 结合试验测得的熔池尺寸优化得到, 具体参数如表3所示。将模拟得到的熔池形状和残余应力与试验结果对比, 分别如图10、11所示。模拟得到的熔池形状与试验结果基本一致, 实测熔宽、熔深和模拟值的误差均在5%以内(因焊缝为全熔透焊缝, 模拟熔深应与实测熔深相等), 如表4所示, 验证了温度场数值模拟方法准确性。模拟所得残余应力, #9测点横向残余应力存在明显误差外, 其余测点实测值和模拟值误差均在 ± 20 MPa以内, 验证了应力场数值模拟方法准确性。

表3 热源参数
Table 3 Heat source parameters

单位: mm				
焊道	a_f	a_r	b	c
1	4.5	9.0	3.5	4.2
2	5.0	10.0	6.9	4.7
3	5.0	10.0	7.4	4.6
4	6.0	10.0	7.1	3.8

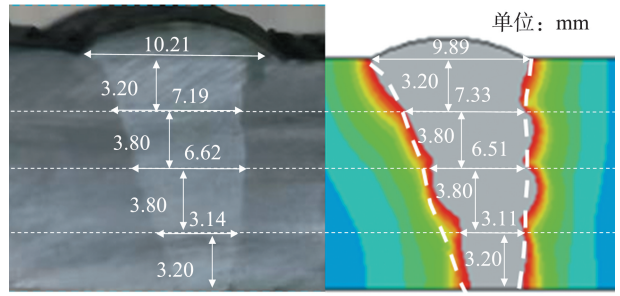


图10 熔池形状对比
Fig.10 Comparison of melt pool shapes

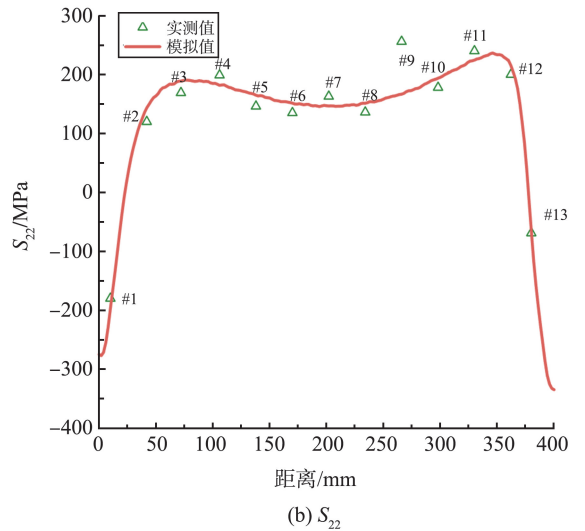
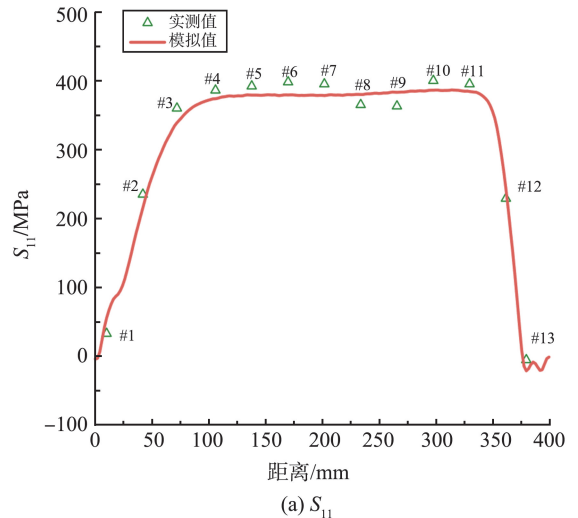


图11 残余应力分布
Fig.11 Distribution of residual stress

表4 熔池尺寸对比
Table 4 Comparison of molten pool dimensions

焊道	实测熔宽/mm	模拟熔宽/mm	误差/%	实测熔深/mm	模拟熔深/mm	误差/%
1	3.14	3.11	0.96	3.20	3.20	0
2	6.62	6.51	-1.66	3.80	3.80	0
3	7.19	7.33	1.95	3.80	3.80	0
4	10.21	9.89	-3.13	3.20	3.20	0

3 模拟结果

残余应力的提取路径如图12所示,分别为焊趾处路径 Line 1 和焊缝稳定段($x=200\text{ mm}$)横截面路径 Line 2、Line 3 和 Line 4。

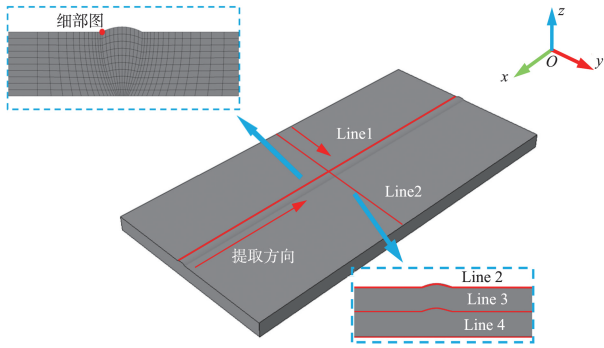


图12 提取路径

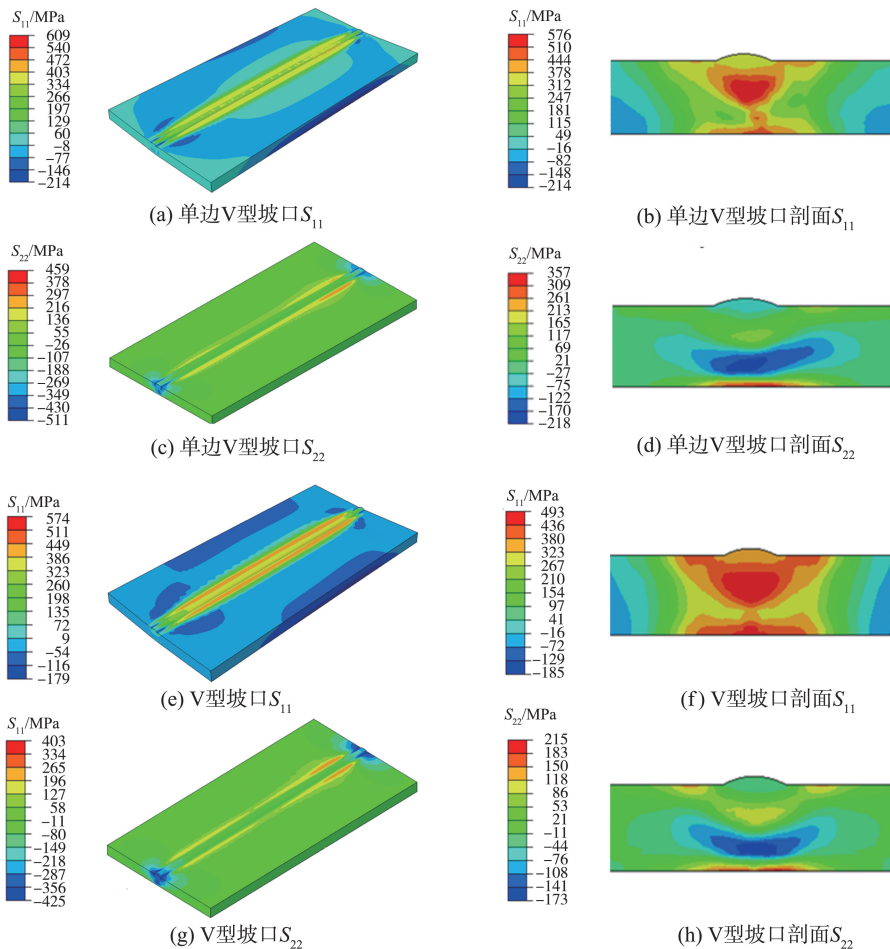
Fig.12 Extraction path

3.1 坡口形式

不同坡口形式的残余应力云图如图13所示,4条提取路径上残余应力分布如图14所示,图中 S_{11} 为纵向残余应力, S_{22} 为横向残余应力。沿焊接方向,纵向残余应力在起灭弧区呈压应力,在焊缝稳定段则转

为拉应力;横向残余应力在起灭弧区和焊缝稳定段均呈压应力。垂直于焊接方向的纵向和横向应力分布有梯度特征:以焊缝中心线为对称轴,纵向残余应力从焊缝区的拉应力向两侧母材逐渐衰减至压应力,符合残余应力自平衡原理。单边V型坡口的纵向残余应力峰值较V型和U型分别提高6.1%和12.2%;横向残余应力峰值较V型和U型分别提高13.9%和74.5%。这与坡口的几何特性相关:采用经验公式计算^[28],单边V型、V型和U型坡口应力集中因子分别为1.41、1.22和1.18,单边V型坡口相较V型坡口和U型坡口,更易放大局部应力,且单边V型坡口65°非对称斜面易导致熔池流动偏析,形成应力集中敏感区,U型坡口的圆弧过渡则能有效分散热应力。在焊缝稳定段($x=200\text{ mm}$ 处)横截面厚度方向,3种坡口均有典型夹层分布特征。单边V型坡口填充层应力集中明显,其焊缝区域纵向残余应力普遍超过550 MPa,相比之下,V型与U型坡口截面纵向残余应力分布对称,应力集中程度显著降低,应力峰值分别为493 MPa和487 MPa。

综上,U型坡口可显著抑制残余应力产生,但加工难度比V型坡口大,选择坡口时需综合考虑加工成本。



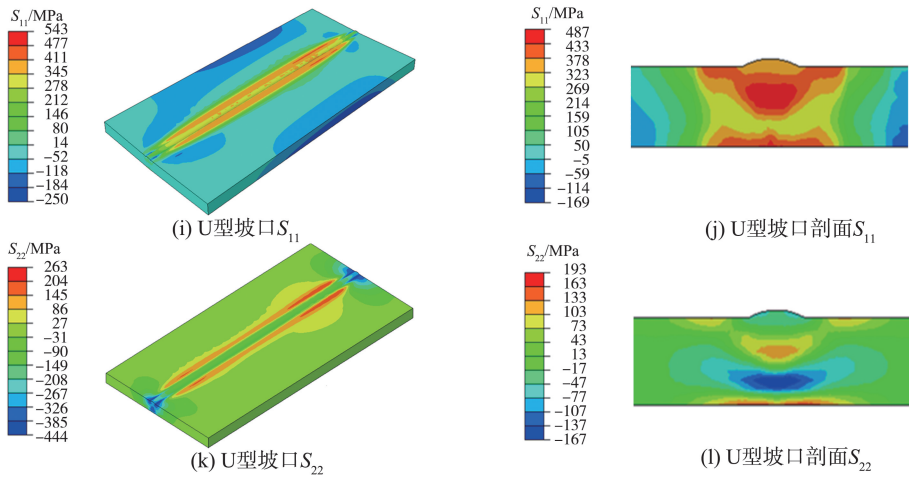
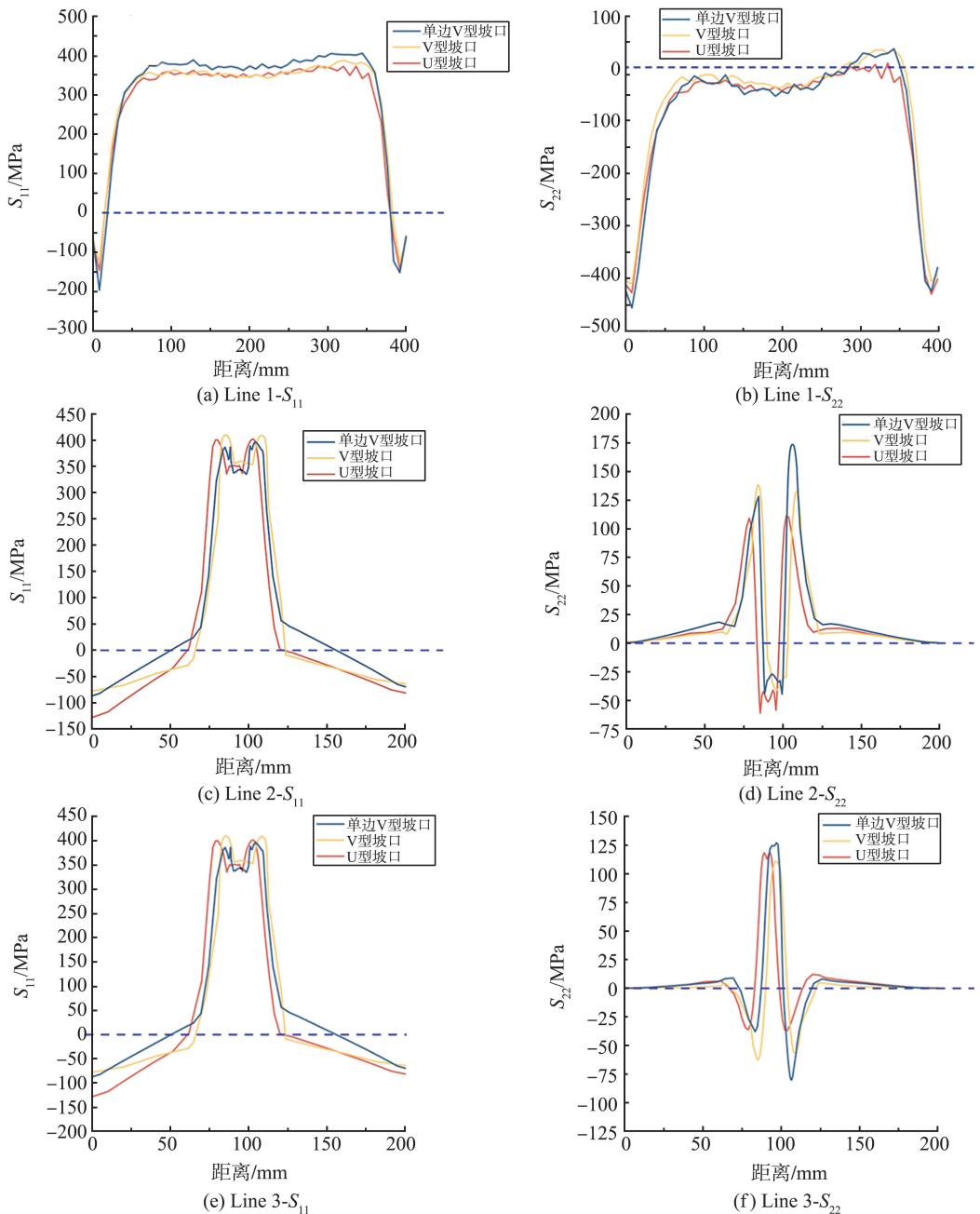


图 13 不同坡口形式残余应力云图

Fig.13 Residual stress contours of different groove forms



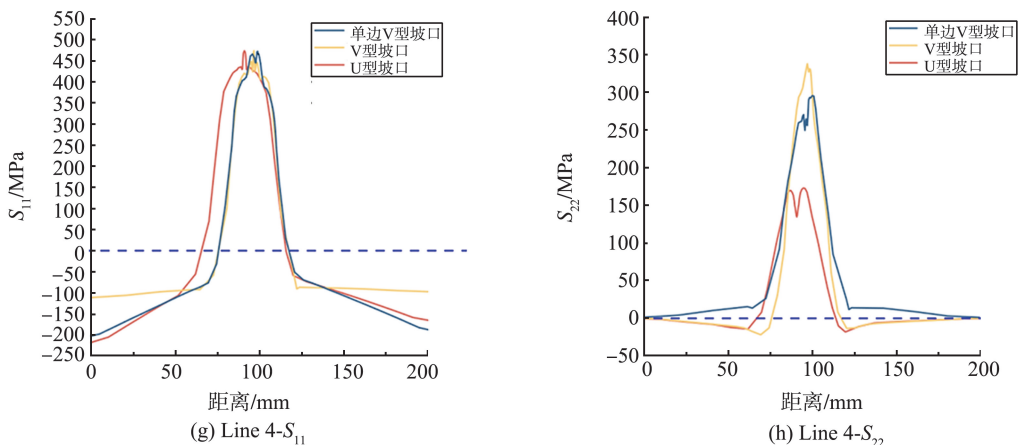


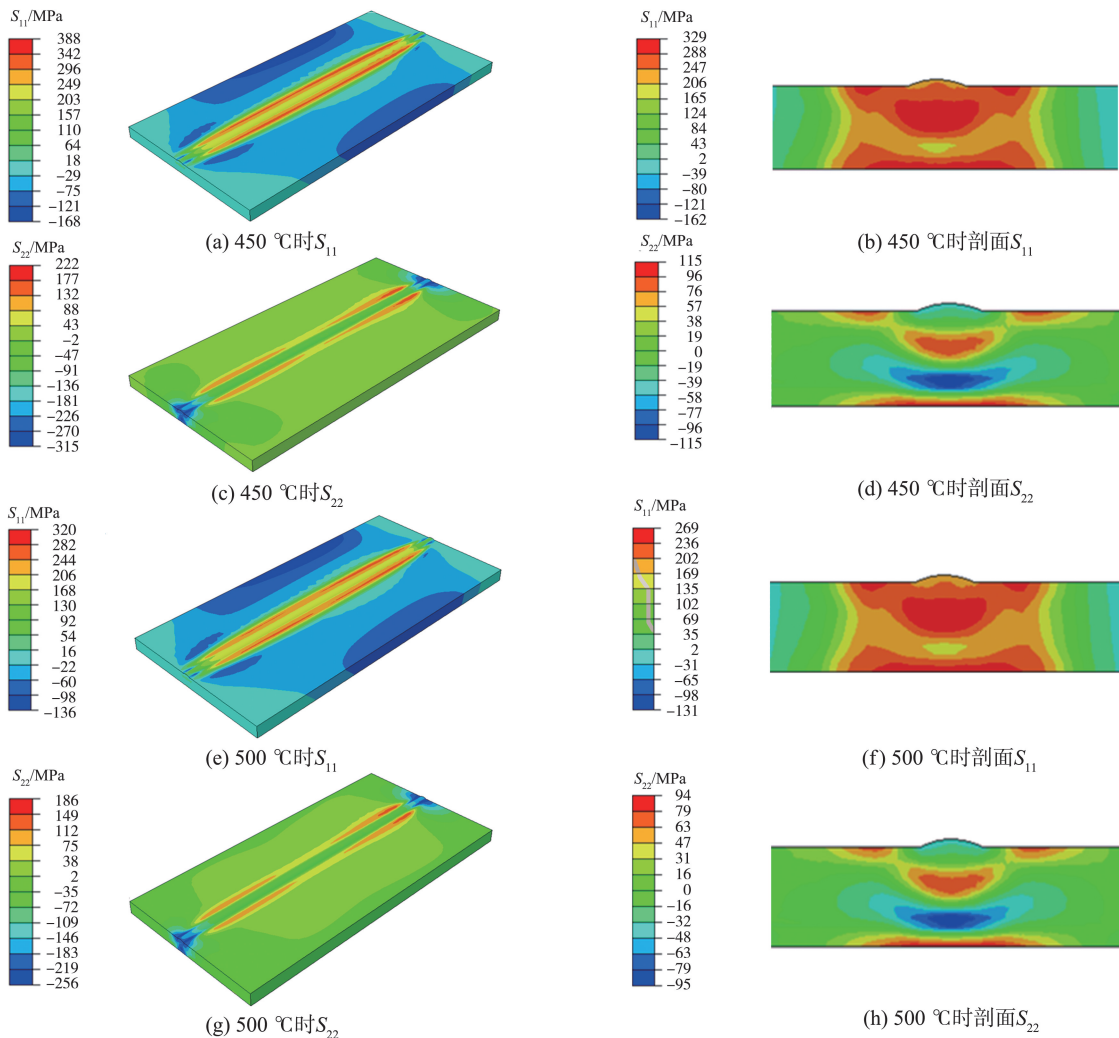
图 14 不同坡口形式残余应力分布
Fig.14 Residual stress distribution of different groove forms

3.2 焊后热处理

3.2.1 保温温度

以 U 型坡口为例,保温时间为 2 h,不同保温温度(450、500、550 °C)下的残余应力云图如图 15 所示,残余应力沿 Line 2 的分布如图 16 所示。由图 16 可知,不同保温温度下,焊后热处理基本不改变残余应力分布,仅调控残余应力大小,且残余应力

峰值消除率与保温温度正相关。在 450、500、550 °C 保温温度下,焊后热处理对纵向残余应力峰值的消除率(28.5%、41.1%、47.0%)高于对横向残余应力峰值的消除率(15.6%、29.3%、36.1%)。当保温温度由 450 °C 增至 500 °C 时,残余应力消除效果显著,而由 500 °C 增至 550 °C 时,消除效果的提升较小。



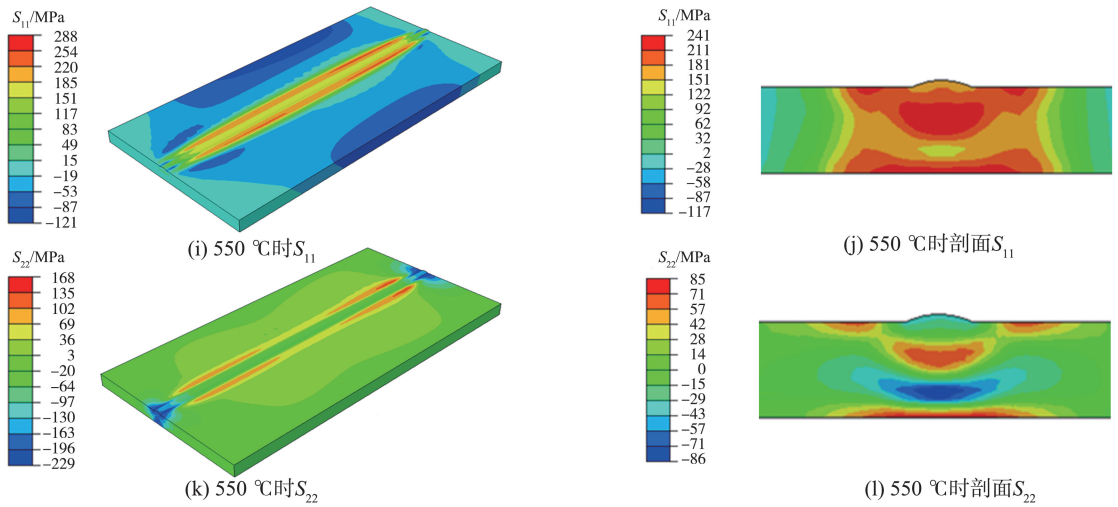


图 15 不同保温温度残余应力云图

Fig.15 Contours of residual stress at different holding temperatures

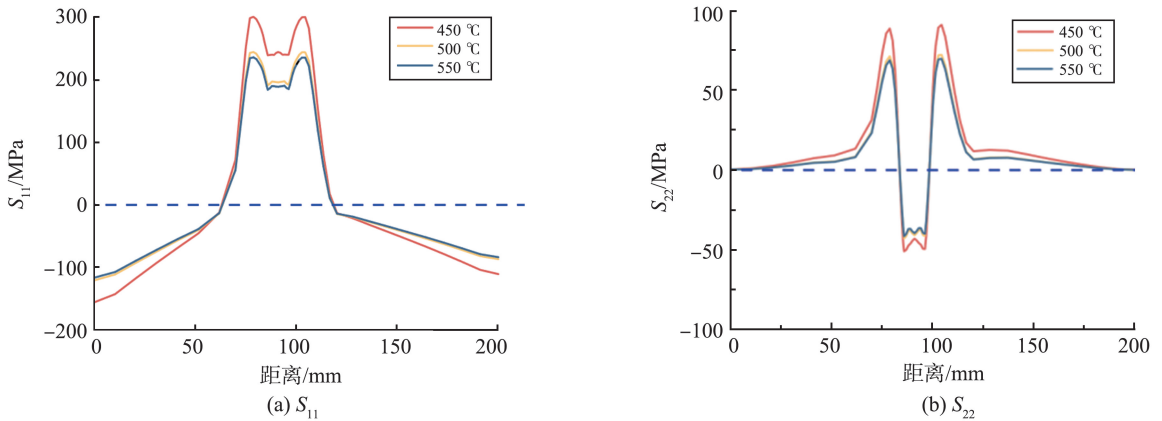


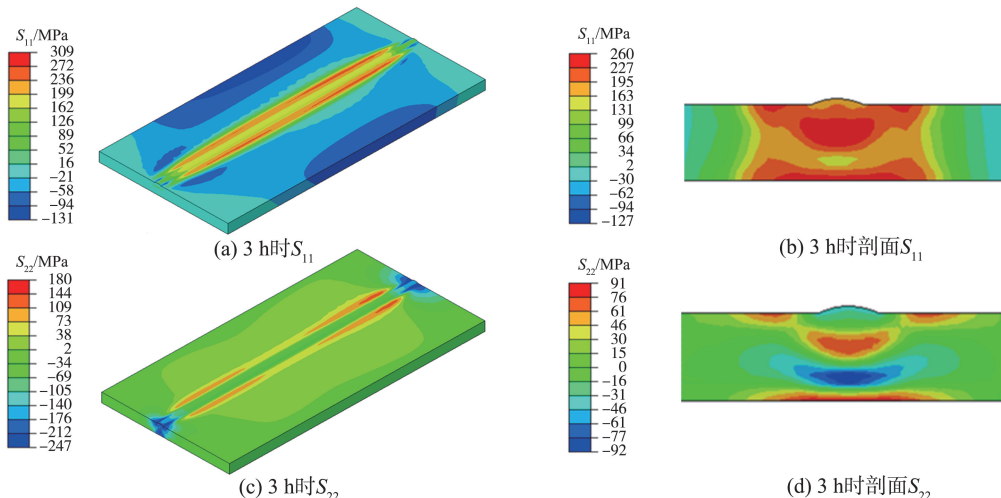
图 16 不同保温温度残余应力分布 (Line 2)

Fig.16 Distribution of residual stress at different insulation temperatures (Line 2)

3.2.2 保温时间

以 U 型坡口为例,保温温度为 500 °C,不同保温时间(3,4 h)下的残余应力云图如图 17 所示,残余应力沿 Line 2 的分布如图 18 所示。由图 18 可知,不同保温时间条件下,焊后热处理基本不改变残余应力分布,仅调节残余应力大小,且残余应力峰值消除率与保温时间正相关。保温 2、3、4 h 时,

焊后热处理对纵向残余应力峰值消除率分别为 41.1%、43.1%、44.5%,对横向残余应力峰值消除率分别为 29.3%、31.6%、33.4%。相比增加保温温度,延长保温时间对残余应力峰值消除效果的提升不明显。保温时间由 2 h 增至 3 h,残余应力消除效果较好;但从 3 h 增至 4 h 时,消除效果提升不大。



(a) 3 h时 S_{11}

(b) 3 h时剖面 S_{11}

(c) 3 h时 S_{22}

(d) 3 h时剖面 S_{22}

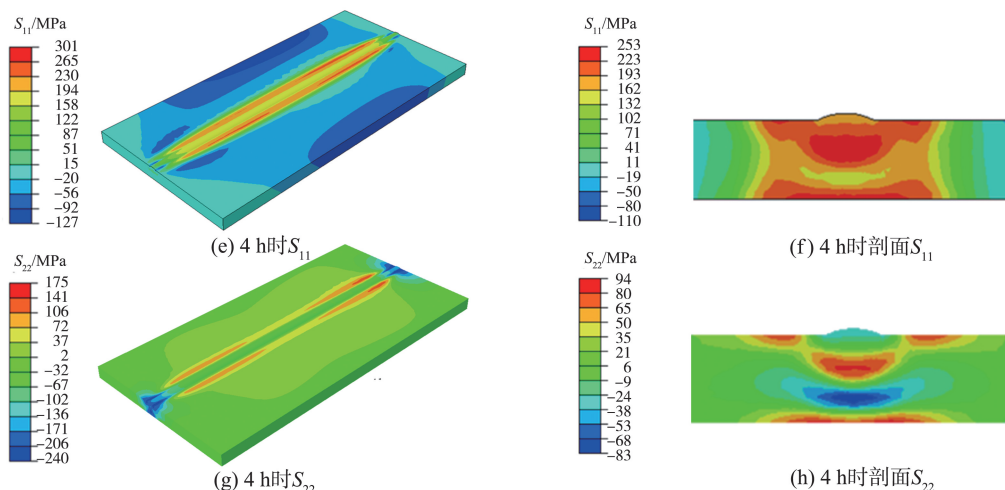


图 17 不同保温时间残余应力云图

Fig.17 Residual stress contours at different holding times

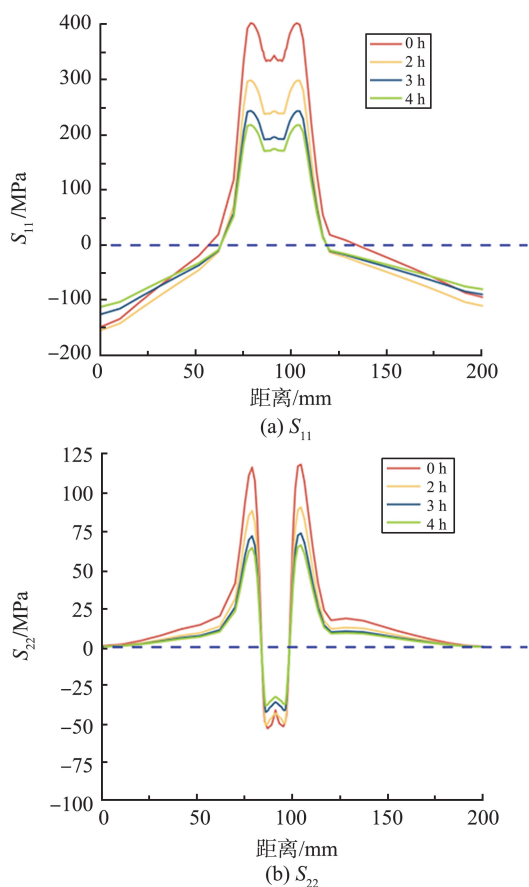


图 18 不同保温时间残余应力分布 (Line 2)
Fig.18 Distribution of residual stress at different holding times (Line 2)

综上,提高保温温度和时间有助于消除残余应力,但过高保温温度和过长保温时间并不会带来更显著的消除效果。综合经济效益,推荐保温温度 500 °C 和保温时间 3 h 为宜。

3.3 环境温度

采用双椭球热源模型加载热源,不同环境温度下焊接过程温度场分布基本一致。环境温度 20 °C 时焊接过程焊道 4 温度场分布如图 19 所

示。由图 19 可知,焊接过程中,峰值温度出现在焊缝顶部,并向后形成长长的“拖尾”,热量由此散失。

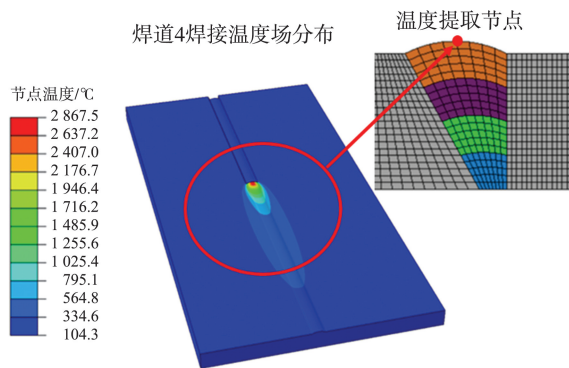


图 19 焊道 4 焊接温度场分布及温度提取节点
Fig.19 Welding temperature field distribution and temperature extraction node of weld bead 4

选取焊道 4 顶部节点为温度提取节点 (X = 200 mm 处),以焊道 3 焊接完成,开始层间冷却作为时间起点,不同环境温度下节点温度随时间变化图如图 20 所示。由图 20 可知,环境温度对峰值温度影响较小,不同环境温度下焊后试件温度变化规律相似,焊后节点温度下降较快,当温度降至 500 °C 时,下降速率减小,温度曲线较为平滑。然而,环境温度越低,焊后节点温度降至层间冷却温度所需时间越短,即温度曲线下降段越短。

以焊道 3 和焊道 4 为例,不同环境温度下的层间冷却时间如图 21 所示。由图 21 可知,环境温度对层间冷却时间影响显著,在 -20 °C 和 30 °C 时,焊道 3 和焊道 4 层间冷却时间分别相差 737 s 和 899 s,说明环境温度会制约施工效率。同时需考虑 CO₂ 气体保护焊具有低温敏感性,低温会使气体流动性变差,影响焊接质量,而高温会导致操作员疲劳,增加操作失误率。

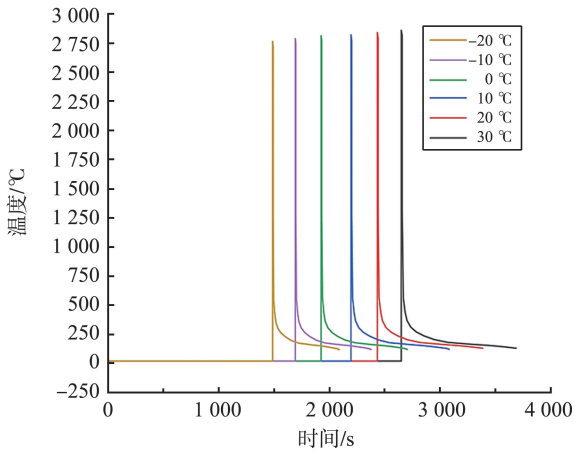


图 20 不同环境温度节点温度随时间变化图
Fig.20 Variation of node temperature with time at different ambient temperatures

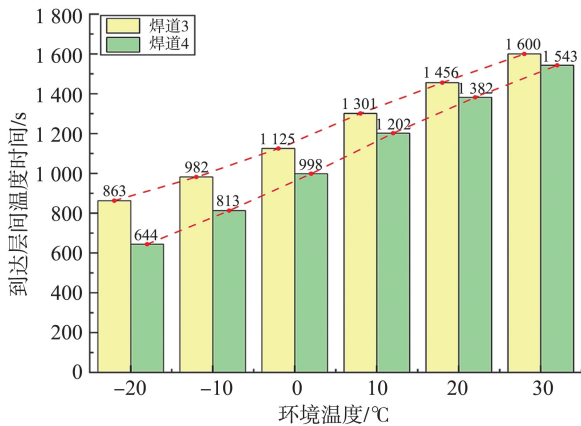


图 21 不同环境温度层间冷却时间(焊道 3、4)
Fig.21 Interlayer cooling time at different ambient temperatures (weld beads 3 and 4)

不同环境温度下, Mises 应力沿 Line 2 的分布如图 22 所示。由图 22 可知, 不同环境温度下残余应力分布和大小几乎一致, 不受环境温度影响。这是因为焊接残余应力主要取决于峰值温度和约束条件, 而峰值温度基本取决于热源模型及热输入^[29]。本研究采用相同参数热源模型和热输入, 所以残余应力几乎一样。

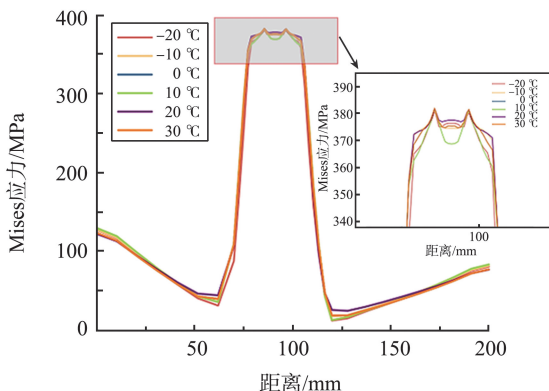


图 22 不同环境温度 Mises 应力 (Line 2)

Fig.22 Mises stress at different ambient temperatures (Line 2)

综上,合理的环境温度应为 5℃至 20℃之间,节省时间的同时,也能保证焊接质量。

4 结论

本研究采用 ABAQUS 软件模拟焊接,对比事件序列法、生死单元法和场变量关联法 3 种焊缝激活方法模拟效果。同时,基于装配式钢结构住宅施工调研情况,研究坡口形式、焊后热处理(保温温度、保温时间)和环境温度对 Q355 钢对接焊缝残余应力的影响,并给出施工控制建议。主要结论如下:

(1)事件序列法、生死单元法和场变量关联法计算精度相近,但事件序列法计算效率更高。

(2)坡口形式对残余应力分布和大小影响显著。U 型坡口可抑制焊接过程中残余应力产生,残余应力最小,应力集中程度最低,但相较 V 型坡口加工难度更大。选择坡口时需综合考虑施工要求和加工成本。

(3)焊后热处理能大幅降低残余应力大小。提高保温温度和时间有助于消除残余应力,过高保温温度或过长保温时间下的消除效果无更优表现。建议保温温度 500℃,保温时间 3 h,U 型坡口在此条件下纵向和横向残余应力峰值消除率分别达 43.1%和 31.6%。

(4)环境温度对残余应力分布和大小影响较小,对层间冷却时间影响较大。低温有利于缩短层间冷却时间。综合考虑焊接时间和质量,环境温度在 5℃至 20℃之间为宜。

参考文献:

[1] 住房和城乡建设部. 装配式钢结构住宅建筑技术标准: JGJ/T469—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

[2] ZHANG Y L, LIU X C, ZHOU Y, et al. Influence of welding method on residual stress and metallography of a mild steel welded butt-joint plate [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107640.

[3] MA T Y, LIU X, HU Y F, et al. Structural behaviour of slender columns of high strength S690 steel welded H-sections under compression [J]. Engineering Structures, 2018, 157: 75-85.

[4] KOLLÁR D, VÖLGYI I, JOÓ A L. Assessment of residual stresses in welded T-joints using contour method [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 190: 110966.

[5] LI L B, JIA Q Q, WAN Z Q, et al. Experimental and

- numerical investigation of effects of residual stress and its release on fatigue strength of typical FPSO-unit welded joint[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106858.
- [6] ZHANG Q H, MA Y, CUI C, et al. Experimental investigation and numerical simulation on welding residual stress of innovative double-side welded rib-to-deck joints of orthotropic steel decks[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 179: 106544.
- [7] ZHAO B D, FANG C, WANG W, et al. Seismic performance of CHS X-connections under out-of-plane bending[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2019, 158: 591-603.
- [8] FANG C, WANG W, QIU C X, et al. Seismic resilient steel structures: a review of research, practice, challenges and opportunities[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2022, 191: 107172.
- [9] CAI L, ZHANG W, LIU Z C. Numerical calculation on the seismic performance of a steel frame beam-to-column joint with welding residual stress[J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2022, 23(2): 130-141.
- [10] 李滋亮, 刘剑桥, 任森栋, 等. 尺寸因素对 SUS304 不锈钢残余应力和焊接变形的影响[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(10): 59-67.
- LI Ziliang, LIU Jianqiao, REN Sendong, et al. Influences of dimension factors on residual stress and welding distortion in SUS304 stainless steel butt joint[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(10): 59-67.
- [11] 张庆亚, 卓子超, 周宏, 等. 厚板多层多道对接焊残余应力轮廓法测量及热-弹-塑性有限元分析[J]. *船舶力学*, 2021, 25(5): 627-636.
- ZHANG Qingya, ZHUO Zichao, ZHOU Hong, et al. Welding residual stress in multi-pass butt joint of thick plate through contour method and thermal-elastic-plastic finite element analysis[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2021, 25(5): 627-636.
- [12] 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.
- [13] ZHANG Y L, TIAN L. The effect of joint configuration on residual stress and distortion of the 304 stainless steel multi-pass welded joints[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 30: 103070.
- [14] VENKATA K A, KUMAR S, DEY H C, et al. Study on the effect of post weld heat treatment parameters on the relaxation of welding residual stresses in electron beam welded P91 steel plates[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 86: 223-233.
- [15] 余磊. 窄间隙埋弧焊焊接残余应力及其热处理消除的模拟和优化研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017: 35-55.
- YU Lei. Welding residual stress analysis and optimization of post weld heat treatment of narrow gap submerged arc welding[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017: 35-55.
- [16] YADAV V K, GAUR V, SINGH I V. Effect of post-weld heat treatment on mechanical properties and fatigue crack growth rate in welded AA-2024[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 779: 139116.
- [17] 付宁宁, 夏宁, 王未, 等. 焊接环境温度对铝合金焊接接头疲劳性能的影响[J]. *电焊机*, 2014, 44(2): 80-83.
- FU Ningning, XIA Ning, WANG Wei, et al. Effect of welding under ambient temperature on welded joint fatigue performance of aluminum alloy[J]. *Electric Welding Machine*, 2014, 44(2): 80-83.
- [18] 高玉龙, 马传平, 宋波, 等. 环境温度对铝合金 5083H111 焊接接头组织及性能的影响[J]. *热加工工艺*, 2015, 44(11): 37-40.
- GAO Yulong, MA Chuanning, SONG Bo, et al. Effects of welding environment temperature on microstructure and mechanical properties of welding joints of A5083 al alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2015, 44(11): 37-40.
- [19] GOLIKOV N I, MAKSIMOVA E M, SARAIEV Y N. Investigation of the structure of welded joints performed at negative ambient air temperatures[J]. *Procedia Structural Integrity*, 2020, 30: 93-99.
- [20] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1984, 15(2): 299-305.
- [21] 逯世杰, 王虎, 戴培元, 等. 蠕变对焊后热处理残余应力预测精度和计算效率的影响[J]. *金属学报*, 2019, 55(12): 1581-1592.
- LU Shijie, WANG Hu, DAI Peiyuan, et al. Effect of creep on prediction accuracy and calculating efficiency of residual stress in post weld heat treatment[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2019, 55(12): 1581-1592.
- [22] ZHOU X H, YANG J J, WANG W Y, et al. Mechanical properties and creep strain of Q355 cold-formed steel at elevated temperature[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 180: 106577.
- [23] 王留中, 罗伟, 王琛, 等. Q355 钢管-管桁架结构焊接温度场及残余应力分析[J]. *材料科学与工程学报*,

2023, 41(3): 385-390.

WANG Liuzhong, LUO Wei, WANG Chen, et al. Analysis of welding temperature field and residual stress of Q355 pipe truss structure [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2023, 41(3): 385-390.

[24] 张清华. 双椭圆热源模型参数标定及其在多道焊模拟中的应用[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018: 36-54.

ZHANG Qinghua. Determination of the parameters of double ellipsoid heat source model and its application in simulation of multi-pass welding [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018: 36-54.

[25] DING H T, ZHANG W Y, ZHANG Z Y, et al. Influence of welding sequences and boundary conditions on residual stress and residual deformation in DH36 steel T-joint fillet welds [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 204: 112337.

[26] 张红卫, 桂良进, 范子杰. 焊接热源参数优化方法研究及验证[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62

(2): 367-373.

ZHANG Hongwei, GUI Liangjin, FAN Zijie. Research and verification of welding heat source parameter optimization model [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(2): 367-373.

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 金属材料 残余应力测定 钻孔应变法: GB/T 31310—2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[28] PILKEY W D, PILKEY D F, BI Z. Peterson's stress concentration factors [M]. New York: John Wiley & Sons, 2020: 57-81.

[29] 张超华. 基于有限元法的建筑钢结构焊接应力与变形预测及控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020: 13-72.

ZHANG Chaohua. Prediction and control of welding stress and deformation in constructional steel structures based on finite element analysis [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020: 13-72.

(编辑: 管昕昉)

(上接第 81 页)

[21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构通用规范: GB 55008—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.

[22] 朱超, 田雯菁, 许真, 等. 测试方法及试件深度对水泥体视电阻率的影响研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(1): 13-16.

ZHU Chao, TIAN Wenjing, XU Zhen, et al. Study on the influence of test methods and test piece depth on the apparent resistivity of cement [J]. Hydro Science and

Cold Zone Engineering, 2019, 2(1): 13-16.

[23] 金庆鹏, 刘璐, 吕侃骏, 等. 水泥混凝土含水率传感器设计与应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6): 225-232.

JIN Qingpeng, LIU Lu, LYU Kanjun, et al. Design and application of cement concrete moisture content sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 225-232.

(编辑: 管昕昉)