

Q420钢板对接接头多层多道焊数值模拟

高小飞¹, 姜华², 赵超群², 沈龙飞², 朱笛², 郭耀群², 孙国军¹

1. 北京工业大学 北京 100124

2. 中铁建工集团有限公司 北京 100071

摘要: 焊接作为一种金属连接方式在实际工程中应用广泛, 因此在设计焊接方案之前预估焊件残余应力的分布显得尤为重要。采用顺序-热力耦合的方法, 通过ABAQUS软件对Q420高强度钢对接接头多层多道焊进行模拟, 分析了其温度场及应力场的分布规律。模拟结果表明: 多层多道焊中温度场出现在焊缝及焊趾处, 在焊接单元后方呈椭球形梯度分布; 焊件在多次热循环中, 当热源到达附近时温度急剧上升, 而在热源经过后及冷却阶段其温度变化较为平缓; 在焊缝开始和结束的部位因缺乏边界约束而导致拉应力集中, 纵向应力在中间区域呈明显的椭球状分布; 横向应力在多层多道焊堆叠中存在应力重新分布现象。

关键词: 焊接; 残余应力; 热力耦合; 应力场; 温度场

Numerical simulation of multi-layer and multi-pass welding of Q420 steel plate to joint

GAO Xiaofei¹, JIANG Hua², ZHAO Chaoqun², SHEN Longfei², ZHU Di², GUO Yaoqun², SUN Guojun¹

1. Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

2. China Railway Construction Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100071, China

Abstract: Welding is widely used in practical engineering as a metal connection method. Therefore, it is particularly important to predict the distribution of residual stress in the weldment before designing the welding scheme. The multi-layer and multi-pass welding of Q420 high strength steel butt plate was simulated by ABAQUS software, and the distribution of temperature field and stress field was analyzed by sequential-thermal coupling method. The simulation results show that the temperature field in multi-layer multi-pass welding appears at the weld and weld toe, and presents an ellipsoidal gradient distribution behind the welding unit. In multiple thermal cycles, the temperature of the weldment rises sharply when the heat source reaches the vicinity, while the temperature changes gently after the heat source passes and during the cooling stage. At the beginning and end of the weld, the tensile stress concentration is caused by the lack of boundary constraints, and the longitudinal stress is obviously ellipsoidal in the middle area. The transverse stress has the phenomenon of residual stress disappearance and stress redistribution in the multi-pass weld stacking.

Keywords: welding; residual stress; thermal-mechanical coupling; stress field; temperature field

1 序言

焊接是金属连接的基本方法之一, 因其在工

业及建筑应用中所具备的可靠性、易操作性和成本效益等优势, 而被广泛采用^[1]。然而, 在焊接过程

第一作者: 高小飞, 硕士, 主要研究方向为大跨空间钢结构, E-mail: xf449442021@163.com。

通信作者: 孙国军, 博士, 副教授, 主要研究方向为大跨空间钢结构, E-mail: sunguojun@bjut.edu.cn。

中, 由于施加大量的局部热量及随后的快速冷却, 焊缝及其周围区域会发生永久性塑性变形, 因此导致残余应力和畸变的产生。在结构组装过程中, 这种变形可能是一个问题, 需要额外的时间来矫正变形。高拉伸残余应力与工作荷载产生的应力共同作用可能会加速应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹或脆性断裂的发生, 对结构的完整性和寿命产生重大的影响。因此, 为了最大限度地减少以上不良后果, 设计阶段对结构中残余应力和应变的大小和分布进行深入了解显得尤为重要。

随着计算机技术的快速发展, 数值模拟得到广泛应用。ROSENTHAL^[2]首次将傅里叶流动理论用于移动热源, 研究点状热源的热传导问题。在此基础上, RYKAILIN不考虑材料热工性能, 通过解析法和热传导微分方程, 建立了焊接热循环过程传热学的基础理论^[3]。GOLDAK等^[4]通过软件和试验熔合区的边界比较, 提出了传热的基本方程, 描述了求解这些方程的非线性瞬态有限元分析公式, 推动了焊接模拟热源模型和软件的发展。

中厚板对接在实际工程中往往需要多层多道焊, 因此通过模拟多层多道焊来预估残余应力及温度场的分布规律成为研究热点。王辉等^[5]对箱形柱超厚板焊接过程进行模拟, 发现在焊接过程中焊缝区域达到屈服状态发生塑性变形, 而钢材仅发生弹性变形, 且焊接对于相邻构件影响较小; KNOEDEL等^[6]分析了有限元类型的选择、热源模型的输入、母材和焊接材料的选择及边界条件等的影响, 评估焊接残余应力、应变的方式正在从试验慢慢转向基于计算机程序; 朱玉斌等^[7]对V形坡口多层多道焊进行试验及数值模拟, 结果表明模拟得到的热循环曲线与试验结果基本吻合; 张春侠等^[8]对箱板装配式钢结构焊接残余应力进行了试验及仿真, 结果表明: 钢材的屈服强度对焊接残余应力有着显著的影响, 同时验证了ABAQUS模拟钢板焊接的可靠性; 赵卫平等^[9]对高强圆钢管多层多道焊进行模拟, 应用生死单元技术模拟材料增材过程, 通过与试验数据对比分析, 揭示了圆形钢管纵向焊接残余应力的分布形式及影响因素。使用多道焊接模拟预测构件焊接后的变形和残余应力分布, 往往伴随着生死单元技术来模拟焊接材料的添加, 使计算时间大大增加, 且每道焊缝焊接对焊件热循环的

影响及单层多道焊影响后的应力分布规律需进一步研究。

本文对高强钢板V形坡口多层多道焊进行了模拟, 在热力耦合计算中引入了规定温度的方法, 从而大幅减少了程序计算时间。研究涉及了Q420高强钢对接接头的温度场、焊接残余应力分布规律, 以及多道焊堆叠对温度场和应力场在焊件上分布形式的影响。

2 焊接力学理论

2.1 温度位移耦合

根据傅里叶传热定理和能量守恒定理, 可以建立非线性热分析的控制方程。焊接过程中温度场会随着时间和空间的变化而变化。

瞬态温度场 $T(x, y, z, t)$ 可表示为

$$k_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho Q = \rho c_T \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中 ρ ——密度 (kg/m^3);

c_T ——比热容 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$];

k_x 、 k_y 、 k_z ——热导率 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$);

T ——温度场分布函数;

Q ——内热源强度 (W)。

在焊接过程中, 结构表面与周围环境发生热交换, 热源移动过程中允许结构中热对流和辐射。本研究中表面热交换条件中膜层散热系数为0.33, 表面辐射发射率设置为0.85, 环境温度均为 25°C 。使用GOLDAK等提供的双椭球热源模型, 移动热源为体内热通量, 其热源分布如图1所示。体内热通量以高斯方式分布在椭球的整个体积。最大热量位于中心, 以不均匀的方式逐渐向椭球两侧边缘处减少。此热源模型的优点是前半椭球热源温度梯度分级明显, 后半椭球温度梯度较为平滑, 与实际中的电弧焊热源分布较为相似。

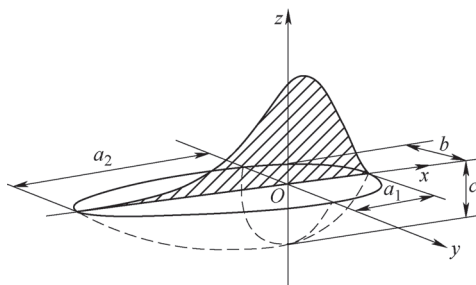


图1 双椭球热源分布模型

前半椭球热源功率分布按式 (2), 后半椭球的

热源功率按式 (3), 即

$$q_1(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_1\Phi)}{a_1bc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left[-3\left(\frac{x^2}{a_1^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] \quad x \geq 0 \quad (2)$$

$$q_2(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}(f_2\Phi)}{a_2bc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left[-3\left(\frac{x^2}{a_2^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)\right] \quad x < 0 \quad (3)$$

式中 x ——距热源中心, 焊接方向上的距离 (mm);

y ——距热源中心, 熔宽方向上的距离 (mm);

z ——距热源中心, 熔深方向上的距离 (mm);

$f_1\Phi$ 、 $f_2\Phi$ ——前后半椭球最大热流量密度 [$\text{mJ}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$];

f_1 、 f_2 ——前后半椭球能量, 且 $f_1 + f_2 = 2$, 本研究中假定 $f_1 = 0.667$ 、 $f_2 = 1.334$;

a_1 、 a_2 、 b 、 c ——焊缝熔池几何参数的大小 (mm);

Φ ——焊接热源的功率 (W), $\Phi = \eta UI$, 其中 U 为电弧电压、 I 为焊接电流、 η 为焊接热效率, 在焊接过程中热量损失不可避免, 本研究中焊接热效率取值为 0.9。

2.2 金属焊接模拟方法

金属焊接热源加载模型主要有热流密度和等效温度两种加载方式, 热流密度是通过 dflux 热源子程序将热源函数模型直接加载到焊缝上, 常见的热源模型包括高斯面热源模型、柱状热源模型、双椭球热源模型等, 通过对实际焊缝熔池尺寸进行模拟加载、校核; 等效温度通过焊接模拟的温度作为加载条件施加温度荷载, 由于温度荷载作为焊接过程中能量输入后的作用结果, 与焊道形状、数量、材料属性及散热方式有关, 因此对于多层多道焊接的模拟并不适用。本研究使用双椭球移动热源进行加载, 应用生死单元考虑焊接过程中材料的堆积, 在焊接开始时将所有焊缝移除, 并进行极短暂的自检, 之后随着分析步逐层激活焊缝, 当热源抵达所激活的焊缝单元区域时, 它们会在模型中恢复其刚度和材料特性, 且不会记录应变历史。计算中考虑了材料增加对分析结果的影响, 因此焊接结构表面的边界调节会随着激活单元而改变。

在高温下金属材料性能会显著下降, 当热源移动到已激活的焊缝区域时, 其附近的单元会发生较大变形, 导致网格畸变, 使得计算较难收敛。因此在焊接模拟过程中, 将激活的焊缝区域材料属性

定义为全弹性, 且在分析步设定材料的熔点温度为 1450°C 。模拟中将超过该温度的区域视为熔池, 可在提高计算效率的同时保证计算的精确度。

3 有限元模型建立

本文对工程中典型的两侧厚度相同的钢板对接进行了研究, 分析多层多道焊过程中, 温度及应力的分布规律。对接钢板宽 200mm、高 20mm、沿焊缝方向长度 300mm, 焊接板底面相距 4mm, 焊接采用 V 形坡口对接的形式, 其几何尺寸如图 2 所示。

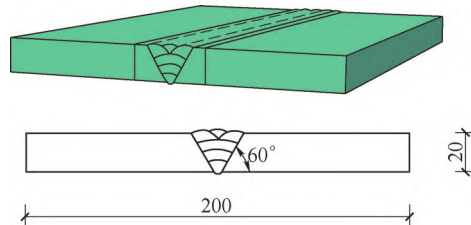
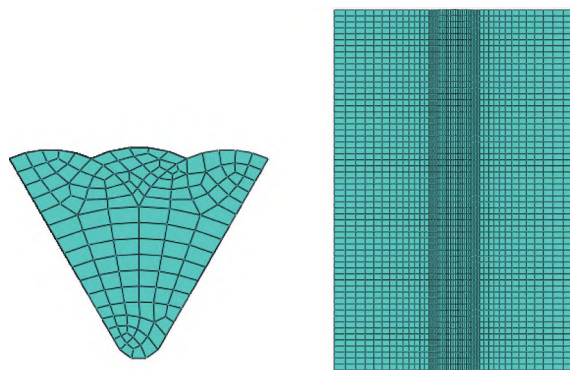


图2 有限元几何尺寸

为简化计算, 在网格划分时, 将焊缝及其邻近区域网格尺寸设置较小, 焊缝处网格尺寸为 $1.25 \sim 2\text{mm}$, 焊件厚度方向网格间隔为 1.33mm , 沿焊接方向网格宽度为 5mm , 与焊接方向垂直的方向网格设置为单精度, 随着与焊接中心线距离的增大, 网格尺寸也随之变大, 最大尺寸为 9.25mm 。网格均使用八结点热耦合六面体单元, 焊件单元总数为 42060。该单元具有三向线性位移、三向线性温度, 在保证计算精度的同时提高收敛性, 网格划分如图 3 所示。



a) 焊缝区域网格划分

b) 结构整体网格划分

图3 对接试板有限元模型

因为之前已有研究证明相变对低碳钢的影响可忽略不计, 所以本研究在焊接模拟过程中没有考虑相变对热应力的影响。在焊接过程中基础材料的力学性能参数随温度发生变化, 因此需要在不同的温度下对材料的性能参数分别定义。母材选用 Q420

钢，查阅文献^[10]获得其随温度变化的材料属性如图4、图5所示，焊接材料与母材除了屈服强度有差别外其他性能参数基本相同，因此为了计算的效率，不再进行单独考虑。

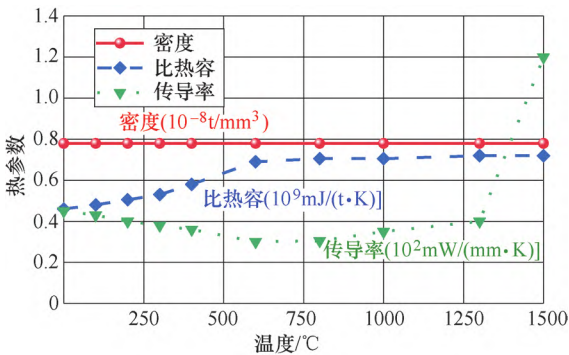


图4 Q420钢热工性能

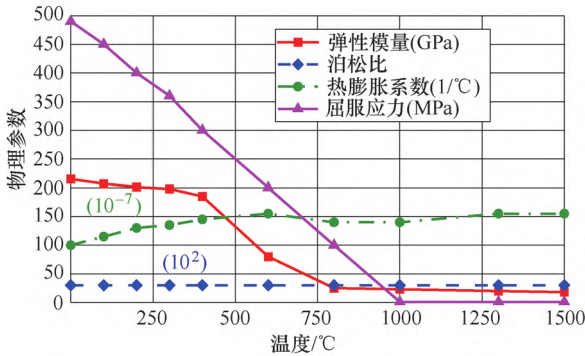


图5 Q420钢力学性能

焊道分布及焊接顺序如图6所示，每个焊道均使用双椭圆热源加载，热源形状参数和焊接参数见表1，在每道中间增加冷却分析步，冷却时间为600s，最后一道结束后整体冷却时间为3600s。

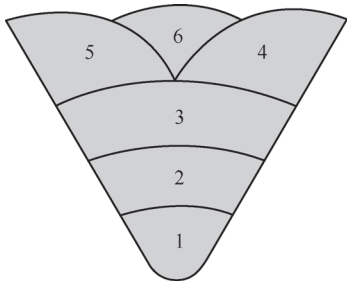


图6 焊道分布及焊接顺序

表1 焊道热源形状参数和焊接参数

焊道	a_1/mm	a_2/mm	b/mm	c/mm	U/V	I/A
1	4	8	4	5.5	20	200
2	6.3	12.6	6.3	5.5	25	200
3	7.2	14.4	7.2	5.5	30	200
4	6.4	12.8	6.4	5.5	25	200
5	6.4	12.8	6.4	5.5	25	200
6	4.5	9	4.5	5.5	20	200

4 温度场及残余应力分布分析

4.1 温度场分析

图7所示为数值模拟所得到的熔池形状，与图6所示的焊道截面对比，模拟所得的熔池尺寸和形状与实际焊道吻合较好，说明焊缝校核效果较好，模拟所得到的残余应力和温度场分布的准确度能得到保证。

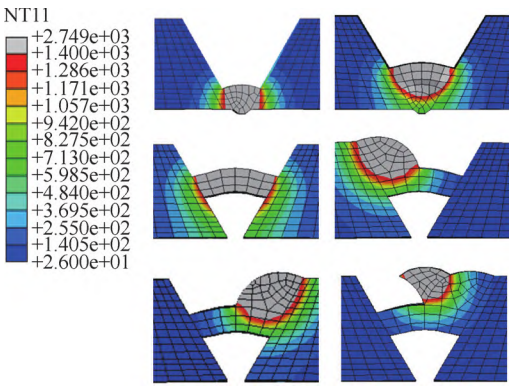


图7 模拟熔池形状

焊接过程中焊件温度场分布如图8所示。在焊接过程中，随着每条焊缝的激活，热源加载到焊缝单元上，最初的前半部热源梯度较大，随着热源的前进，热量趋于稳定，在热源后方形成一条长椭圆状的轨迹。每道焊缝的位置、熔池形状、热源参数和接触面积不一样，因此各个焊道模拟所得的温度场分布也有所差别，但峰值均在2472~2929℃区间内。每个焊道完成后待其冷却到100℃左右，下一焊道随之激活并进行热源加载。

由于前3道及最后一道焊道均位于焊件的中心位置，焊件边界条件、焊缝尺寸左右对称，因此温度场云图在横向分布上呈对称形式。第4、5道焊道位于焊件中心的斜侧，因此热量向焊缝一侧传递。第6道焊道的温度均集中在热源后方呈梯度分布。

从焊件底面中心位置开始向一侧依次选取6个节点，与焊缝中心线的距离依次为3.8mm、6.5mm、9.5mm、12.8mm、16mm、22mm。提取6个节点的表面热循环，如图9所示。由图9可知，在加热阶段不同位置的温度曲线更陡，在冷却阶段温度曲线较为平缓，这是因为焊接时瞬时热源移动速度比焊件及母材的传热速率快，当热源移动到该位置最近距离时，该点可获得热源最大功率。

取第1道焊道底面中点为特征点，提取6道焊缝

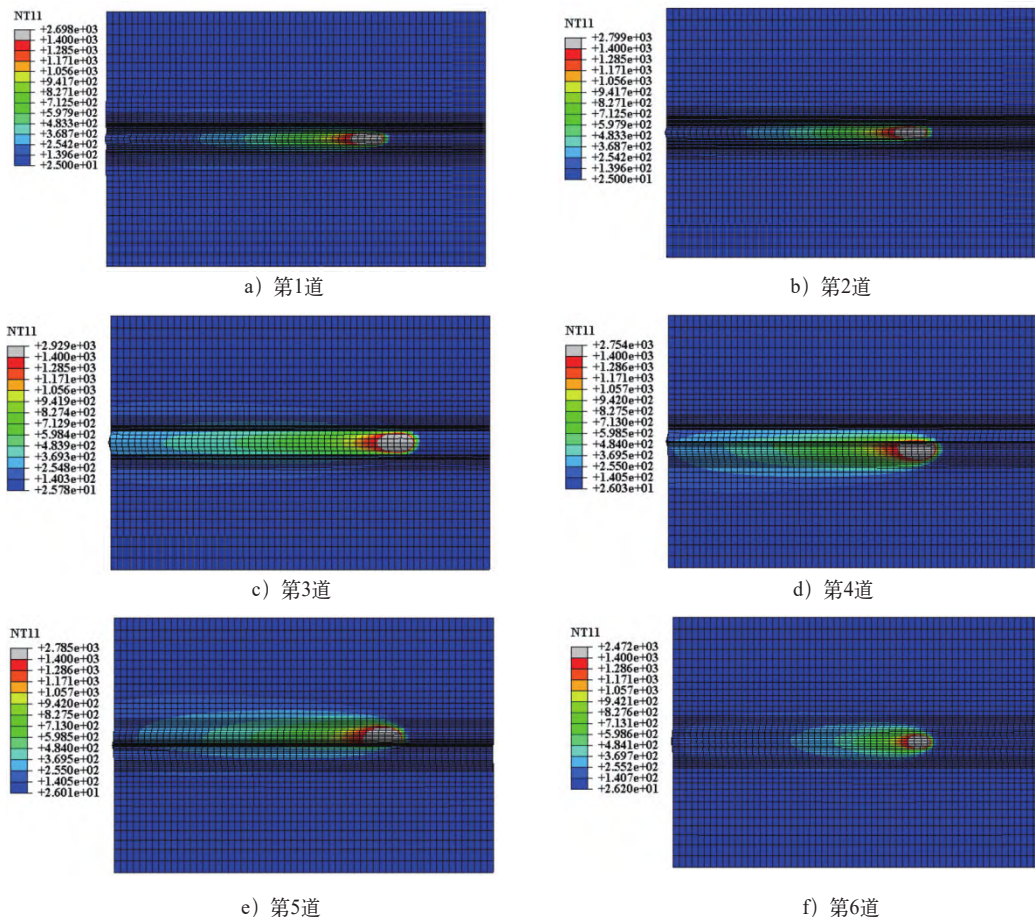


图8 焊件温度场分布云图

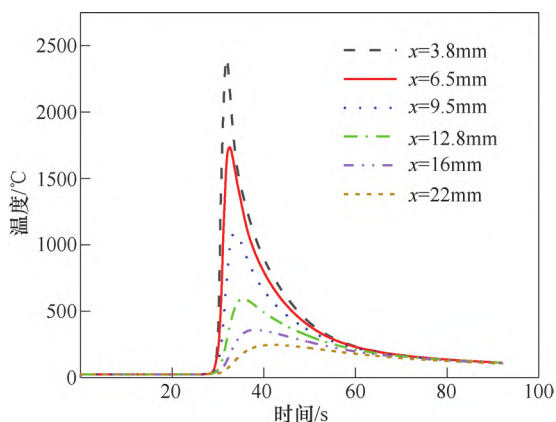


图9 焊件横向6个不同位置的热循环

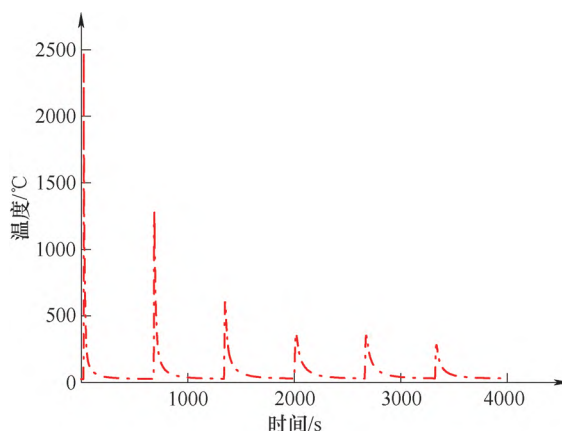


图10 多道焊底面中点热循环

焊接过中底面中点的热循环，如图10所示。从图10可看出，该点一共经过6次热循环，并随着焊缝位置的增高，传递温度随之下降，与水平方向温度的传递效率相比，焊接时热传递沿竖向传播效率降低。

4.2 残余应力分析

图11所示为6道焊道焊接过程中的应力云图，每道焊缝均选取在焊接总时间的一半左右，保证热源

相对稳定。由图11可知，沿着焊接方向，焊接单元在瞬时热源作用下达到熔点，冷却过程中对焊缝两边产生拉应力。应力主要分布在焊缝后方及两侧，在中心处最先达到最大值，随着与焊缝中心距离的增大，应力随之减小；残余应力在垂直于焊接前进方向上的分布变化较为平缓，而顺着焊缝前进方向，其应力分布较为均匀。

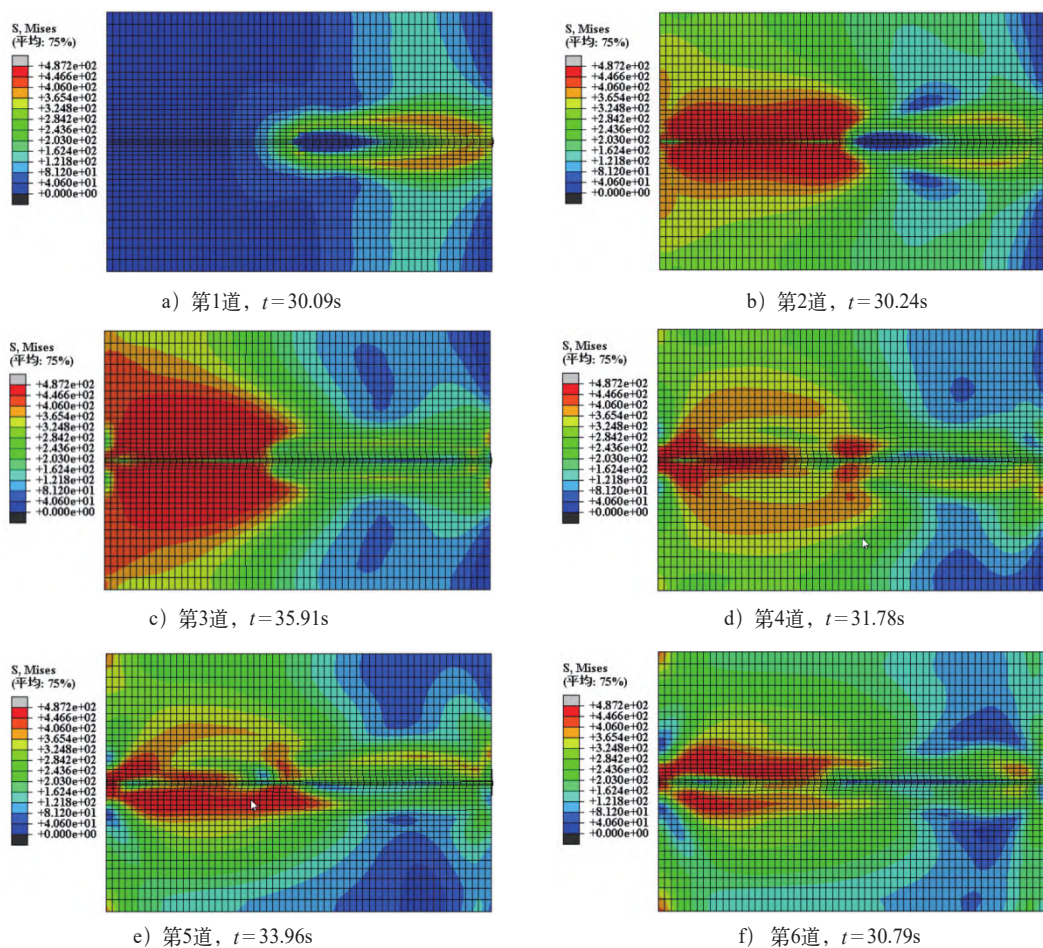


图11 不同焊缝焊件应力分布云图

选取距离焊缝中心20mm处, 且与焊接方向平行的直线为路径1, 沿其厚度方向间隔6.67mm设置路径, 分别为路径2、路径3、路径4。所有焊道焊接完成后提取4条路径的纵向应力值, 如图12所示。焊缝开始和结束位置纵向应力值为负值, 主要为残余压应力, 最大压应力达到208.96MPa, 焊缝中间位置呈现较大的残余拉应力, 最大拉应力达到407.33MPa。由此得知, 应力在纵向分布上变化梯度较大, 这是因为在开始和结束位置在结构中没有物理边界条件约束, 残余应力得以释放。从第一条焊道可知, 随着路径在厚度方向的增高, 焊道中间位置的拉应力慢慢转变为压应力。各焊道结束时产生的残余应力在不同路径上分布有所不同, 但整体分布均呈现明显的抛物线形状, 原因是新开始的焊道会将已完成焊道的部分区域重新熔化, 导致应力重新分布。

焊件横向应力分布云图如图13所示。由图13可知, 焊缝以及焊趾区域为压应力, 且后续焊道的热

量扩散会扩大压应力区域, 随着与焊缝中心线距离的增加, 应力逐渐由压应力转变为拉应力, 整体呈对称分布; 随着焊道的结束, 在两侧边界截面上的拉应力达到最大值, 这是由于焊道中心熔化后再冷却过程中, 在中心位置产生较大的残余拉应力, 从而传递到边界处; 在横向分布上, 第4道焊道引起的拉应力与前3道焊缝相比峰值变大, 但拉应力 < 125.39MPa的区域减小, 这是因为坡口焊顶面焊道通常区域较大, 因此需要多道焊道堆叠, 后成形的焊道会将已成形焊道的部分体积熔化重组, 重新分配横向应力。

5 结束语

通过对钢板对接焊接过程的模拟, 研究了焊接温度场及残余应力分布规律, 以及单层多道焊堆叠相互间的影响, 得出以下结论。

1) 熔池形状可以较好地包裹焊缝, 验证了有限元热源输入的准确性, 符合实际焊接过程中热量输

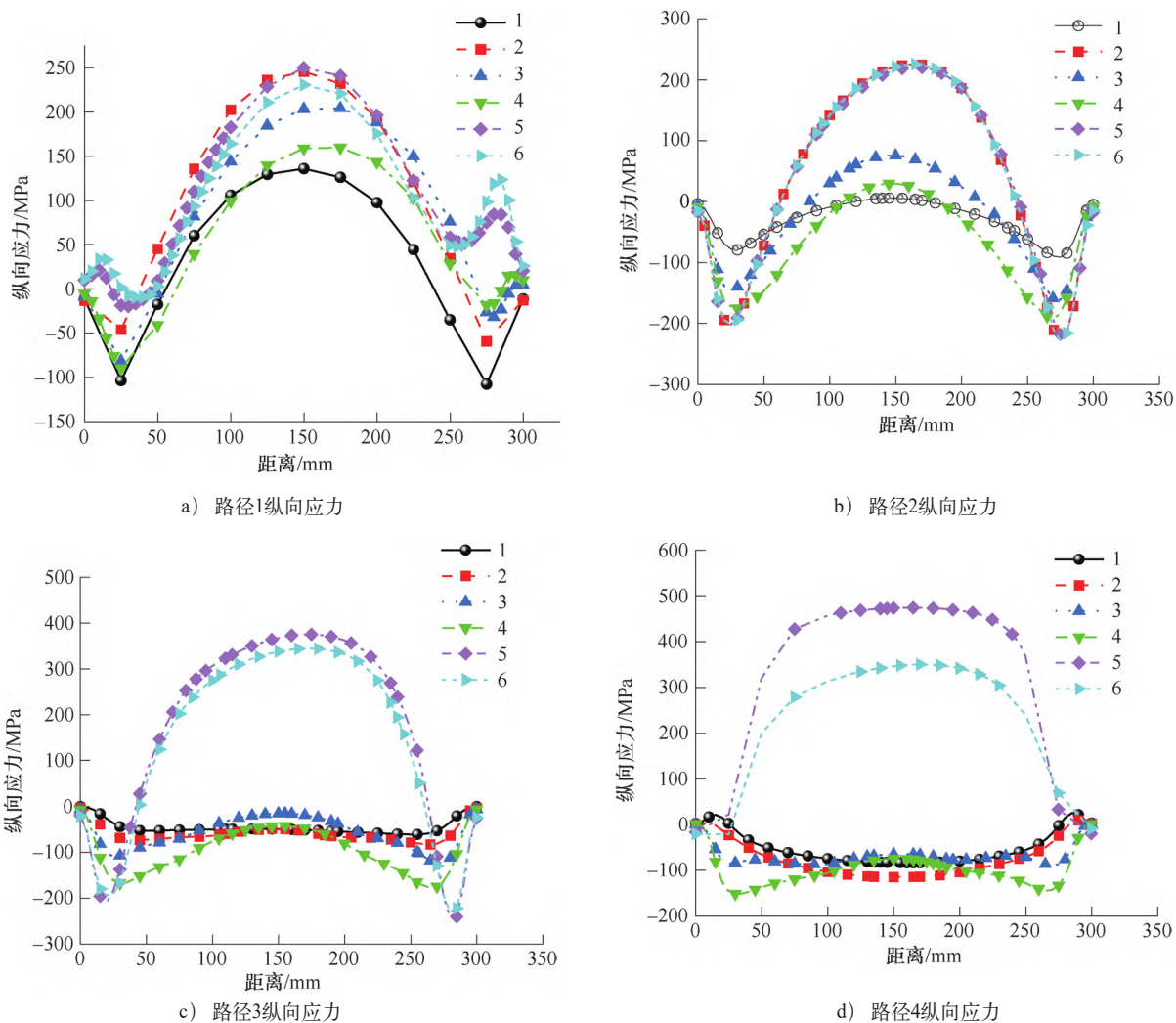
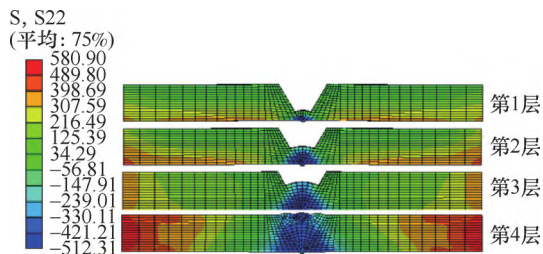


图12 沿焊缝方向的轴向残余应力



入情况。

2) 温度场沿纵向分布区域较广，形成明显的椭圆形梯度，而横向分布较窄；在焊接过程中焊缝及焊趾附近区域温度提升较快，在热源结束加载后其冷却温度梯度较为平缓。

3) 在热源开始加载和结束的区域因没有物理边界条件的约束，热残余应力得以释放，所以表现为压应力；沿焊接方向纵向应力分布呈现明显的抛物线形状；横向拉应力主要集中在焊缝及焊趾附近区

域，且同一层多焊道的堆叠相互之间产生复杂的影响，对横向应力进行重新分布。

参考文献：

- [1] 刘成，尹立孟，姚宗湘，等. 焊缝余高对复合型坡口X80管线钢多层多道焊接残余应力的影响[J]. 焊接学报，2018，39（12）：100-104，133.
- [2] ROSENTHAL D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments[J]. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1946, 68（8）：849-865.
- [3] GRONG O. Metallurgical modeling of welding[M]. 2nd Edition. London: The Institute of Materials, 1997.
- [4] GOLDAK J, BIBBY M, MOORE J, et al. Computer modeling of heat flow in welds[J]. Metallurgical Transactions B, 1986, 17: 587-600.

（下转第35页）

法，即不同的面焊接不同序号的加强筋。焊接时，先焊A面序号1，再焊B面的序号6、序号7，再焊C面的序号2、序号3，再焊D面的序号4、序号5，以此类推，分散焊接所有的加强筋。错位焊接目的是分散、均衡箱体焊接时吸收的热量，减小箱体相同部位过多的热量，抑制、减小箱本体的变形。

8 工艺优化改进后的箱体焊接效果

按优化改进后的焊接工艺方案和方法，重新焊接3件箱体，焊接完成后，检验人员对箱体4个面变形量进行了检测，结果见表2。由表2可知，箱体变形量有了明显的减小，说明改进措施可行，效果明显。

表2 箱体焊接工艺改进后变形量检测结果 (mm)		
编号	箱体整体变形量要求	箱体4个面实测结果
1	≤3.5	3.2、2.8、3.4、3.2
2		3.4、3.2、3.0、3.2
3		2.8、3.4、3.4、3.2

随后，公司按优化改进后的工艺，进行了小批量试生产，共焊接了10件箱体，焊接完成后，检验人员对箱体4个面变形量进行了检测，结果见表3。由表3可知，箱体变形量为2.6~3.4mm，满足箱体总变形量≤3.5mm的要求。说明改进后的工艺方法正确、措施得当，改进效果明显。

9 结束语

通过对薄壁铝合金箱体焊接工艺试制和优化改进，最终生产出了合格的箱体，同时对薄壁铝合金箱体焊接积累了经验，结论如下。

- 1) 影响铝合金焊接变形的因素很多，其中铝合金本身的导热特性是产生变形的根本原因。
- 2) 合理的焊接参数可以在很大程度上减少焊接

(上接第31页)

[5] 王辉, 余地华, 管昌生, 等. 117大厦超厚板箱体单元现场拼装焊接的动态模拟[J]. 钢结构, 2013, 28 (7) : 63-66, 59.

[6] KNOEDEL P, GKATZOGIANNIS S, UMMENHOFER T. Practical aspects of welding residual stress simulation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 83-96.

[7] 朱玉斌, 郭永环, 郭妍, 等. V型坡口多层多道焊温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2017, 46 (17) : 207-209.

表3 箱体小批量生产变形量检测结果 (mm)

编号	箱体整体变形量要求	箱体4个面实测结果
1	≤3.5	3.3、3.4、3.4、3.2
2		3.4、2.7、3.0、3.2
3		3.0、3.4、3.2、3.2
4		2.8、3.0、3.2、3.2
5		3.4、3.0、3.4、3.4
6		3.2、3.3、3.0、3.2
7		2.6、3.3、2.4、3.4
8		2.9、3.2、2.8、3.3
9		3.0、3.4、2.7、3.2
10		3.0、3.2、2.8、3.2

变形量。

- 3) 焊接顺序是影响铝合金焊接变形的重要因素之一，合理调整零件焊接顺序可以有效减小变形。
- 4) 通过应用合理的防变形工装，可以有效减小铝合金焊接变形。
- 5) 铝合金焊接变形原因较多，焊接工艺必须长期持续优化改进，保证产品有较好的质量，同时保证最低的加工成本。

参考文献:

[1] 刘民东, 张月红, 吕学刚, 等. 大型复杂悬臂结构铝合金焊接变形控制研究[J]. 新技术新工艺, 2012 (6) : 80-82.

[2] 田昕. 面向焊接顺序优化的焊接变形仿真技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.

[3] 刘志平, 王立夫. 铝合金部件焊接变形的产生及控制[J]. 焊接技术, 2007, 36 (5) : 52-53.

[4] 曲晓红, 郝彦荔. 城际动车组铝合金车顶制造技术及焊接工艺研究[J]. 装备制造技术, 2015 (2) : 126-127.

MW 20240516

[8] 张春侠, 吴桐, 徐海军. 箱板装配式钢结构焊接残余应力的数值模拟与研究[J]. 焊接技术, 2022, 51 (9) : 40-44.

[9] 赵卫平, 王振兴, 纪强溪, 等. 高强埋弧焊接圆钢管多层多道焊接数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54 (4) : 124-131.

[10] 徐坤, 范彩霞, 韩二阳, 等. 热源模型对Q420厚板焊接残余应力和变形预测精度的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (23) : 222-226.

MW 20240514