

文章编号:1673-2049(2014)01-0090-08

# 厚钢板对接焊接三维有限元数值模拟与分析

郭彦林, 陈航, 袁星

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

**摘要:**采用有限元数值模拟方法,建立考虑热-固耦合效应的钢板对接焊接的三维有限元模型,运用生死单元技术模拟焊接全过程,从焊接残余变形和残余应力的角度,验证了分析模型的有效性,并分析了板件边界约束、焊接层数与道数、板件厚度、焊接顺序以及施工工艺对计算结果的影响。探讨了简化计算的可能性与正确性,并考虑了保温和设置支撑等施工工艺对焊接施工的影响。研究成果可为设计与施工提供一定的参考。

**关键词:**厚钢板;对接焊接;热-结构耦合;残余应力;残余变形;有限元;数值模拟

中图分类号:TU758

文献标志码:A

## 3-D Finite Element Numerical Simulation and Analysis on Butt Welding of Thick Steel Plate

GUO Yan-lin, CHEN Hang, YUAN Xing

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Finite element numerical simulation was adopted to erect 3-D finite element model, considering heat-solid coupling effect. Meanwhile, live-dead element technology was applied to simulate the whole welding process. The effectiveness of the model was verified in the aspects of residual deformation and residual stress. The influences of plate boundary constraint, welding layer and pass, plate thickness, welding sequence and construction process on the behavior of steel plates on calculation results were analyzed. The possibility and correctness of simplified calculation were discussed. The influences of construction techniques such as heat preservation and support setting on welding were considered. The conclusions can provide some references to welding design and construction.

**Key words:** thick steel plate; butt welding; thermal-structural coupling; residual stress; residual deformation; finite element; numerical simulation

## 0 引言

目前,随着高层结构的发展,钢板剪力墙、巨型钢结构柱和复杂钢结构节点的使用越来越多。在钢结构施工过程中,焊接产生的残余应力和残余变形如果得不到有效的控制,会对结构的受力和外观产生很大的影响。

焊接过程的物理现象非常复杂,是一个涉及高温电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程<sup>[1]</sup>。焊接产生的残余应力与残余变形之间存在相互的协调,如残余变形得到了释放,则残余应力变小;反之,残余变形被约束,残余应力就变大。目前获取焊接残余应力和残余变形的的方法主要有试验测量法和数值模拟法。对于残余变形的测量比较方便,而测量残

收稿日期:2013-11-16

基金项目:清华大学自主科研计划杰出贡献专项项目(2012Z10134)

作者简介:郭彦林(1958-),男,陕西富平人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:gyl@mail.tsinghua.edu.cn。

余应力主要有应力松弛法(包括钻孔法、切条法等)、X射线法和裂纹法等。然而这些方法仅停留在实验室阶段,用于小尺寸构件的科学研究,无法适用于大型复杂构件焊接残余应力的测量<sup>[2]</sup>,因此对于钢结构焊接残余应力和残余变形的研究多采用有限元数值模拟方法。

对于简单构件焊接的有限元数值模拟方法,各国许多学者已做了一定的研究,但是大部分成果都集中在机械工程领域,主要涉及焊接温度场、残余应力场的模拟,并没有将焊接问题扩展到土木工程领域,考虑约束度、焊接顺序、施工工艺等因素对焊接残余应力与残余变形的影响,对施工实践几乎没有指导作用。焊接过程中温度梯度大,导致材料的严重非线性,进而使得求解必须采用瞬态分析并且求解过程收敛困难,各国学者的研究大多采用的是简化模型,如二维平面假设或轴对称单元<sup>[3-9]</sup>,这导致实际问题与假设存在出入,计算结果误差很大。三维有限元焊接数值模拟的文献相对较少,国外学者对单道焊和多道焊的分析结果也主要集中在焊接温度场和残余应力分布方面<sup>[10-11]</sup>,缺乏参数变化,对结构分析意义不大。现有的研究基本都集中在小尺寸钢板对接焊接的模拟上,不涉及大尺寸和大厚度钢板对接焊接的模拟,无法与工程实际接轨。

本文中笔者应用通用有限元计算软件 ANSYS,采用三维实体单元对大尺寸、大厚度钢板和焊缝进行建模,运用生死单元技术模拟焊接全过程,研究了不同的约束度、焊接层数与道数、焊接顺序和施工工艺对焊接残余变形和残余应力大小和分布的影响,为设计和施工提供参考。

## 1 有限元模型及参数选取

### 1.1 热-结构耦合关系

焊接是热-固耦合问题,因此结构的力学平衡方程为<sup>[1]</sup>

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

式中: $\sigma_{ij,j}$ 为热应力。

式(1)中包括了热应力的影响,其中 $\sigma_{ij}$ 包括了结构受外力产生的应力和热应力。结构内部应力、应变间的本构方程为

$$d\sigma_{ij} = D_{ijkl} (d\epsilon_{kl} - d\epsilon_{kl}^p - d\epsilon_{kl}^c - d\epsilon_{kl}^T) \quad (2)$$

式中: $D_{ijkl}$ 为弹性本构张拉系数; $d\epsilon_{kl}$ ,  $d\epsilon_{kl}^p$ ,  $d\epsilon_{kl}^c$ ,  $d\epsilon_{kl}^T$ 分别为总应变、塑性应变、蠕变应变和热应变。

热应变 $\epsilon_{ij}^T$ 与温度和材料热膨胀系数有关,其表达式为

$$\epsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} (T - T_r) \delta_{ij} \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\alpha_{ij}$ 为材料热膨胀系数; $T$ 为温度; $T_r$ 为参考温度; $\delta_{ij}$ 为 $\delta$ 算子。

在通用有限元软件 ANSYS 中,有 2 种考虑热-结构耦合场的单元。一种是直接耦合单元,该单元除了具有普通单元的位移自由度之外,同时具有温度自由度,在受到局部温度作用后首先按照热传导理论计算单元中的温度场,得到温度场之后将温度作为外荷载施加在单元上,再结合单元受力和位移约束得到单元内力分布。整个计算过程中,结构的内力、位移以及温度分布是同时得到的。这种类型的代表单元是实体单元 Solid5,然而 Solid5 单元为弹性单元,不能考虑塑性<sup>[12]</sup>。另一种是间接耦合单元,即首先采用计算温度场的单元计算结构在局部温度作用下的温度场分布,得到整个结构的温度场之后,将温度场单元转化为相应的结构场单元,再进行普通的内力计算。这种类型的代表单元是温度场单元 Solid70 与结构场单元 Solid185,其结构场单元 Solid185 可以考虑塑性。

采用间接耦合单元,即只进行温度场与应力、应变场的单向耦合,只考虑温度对应力-应变关系的影响,而忽略应力、应变场对温度场的影响。实践证明<sup>[1-2]</sup>,采用单向耦合的方法是合理的,本文中采用间接耦合单元进行钢板对接焊接过程的模拟和分析。

### 1.2 材料参数

选择 2 块尺寸为 1 m×1 m×0.03 m 的板进行对接焊接,焊缝为 V 形坡口,焊缝断面尺寸如图 1 所示,选用的钢材为 Q345 普通结构钢,材料密度为 7 850 kg·m<sup>-3</sup>,热胀系数为 1.48×10<sup>-5</sup> m·°C<sup>-1</sup>,泊松比为 0.29,热传导系数为 34 W·(m·°C)<sup>-1</sup>,比热容为 420 J·(kg·°C)<sup>-1</sup><sup>[13]</sup>。假设材料为理想弹塑性模型,Q345 钢材的力学性能见表 1。

### 1.3 焊接热源

ANSYS 软件中模拟焊接热输入的模型主要有高斯热源模型和内生热率热源模型。当板件厚度不是特别大时,高斯热源的热供应量是足够的,而当板件厚度比较大时,高斯热源模拟焊接就与实际情况不一致,此时应该采用内生热率热源模型。本文中的研究对象是不同厚度的钢板,采用内生热率热源模型进行模拟,通过施加内生热模拟电弧对焊缝的加热作用<sup>[14]</sup>。

内生热率热源模型的内部热生成以热生成强度

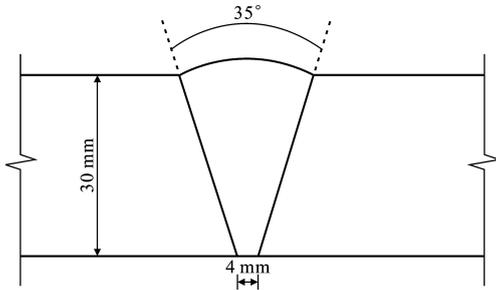


图 1 焊缝断面尺寸

Fig. 1 Cross-section Dimension of Welded Seam

表 1 Q345 钢材的力学性能

Tab. 1 Mechanical Behaviors of Steel Q345

温度/℃	20	500	800	1 200	1 500
初始弹性模量 $E_0$ /GPa	210	175	50	10	1
屈服强度 $f_y$ /MPa	345	180	30	10	5
屈服后弹性模量 $E$ /GPa	0	0	0	0	0

来表示,即将有效的焊接热输入量换算成每道焊缝单元在单位体积、单位时间内热生成强度的供给热能,在所有焊接热能都施加到焊缝上后,内部热停止生成。热生成强度  $q$  的计算公式为

$$q = \frac{\eta UI}{A_{\text{weld}} v dt} \quad (4)$$

式中: $U$  为电压; $I$  为电流; $\eta$  为电弧热效率, $\eta$  值在 0.7~0.9 范围内,本文中取 0.8; $A_{\text{weld}}$  为焊缝的横截面积; $v$  为焊接速度; $dt$  为每个荷载步的时间步长。

焊接参数见表 2。

表 2 焊接参数

Tab. 2 Welding Parameters

焊道	电流/A	电压/V	焊接速度/(mm·s <sup>-1</sup> )
首道	160	20	5
中间道	180	22	5
末道	160	20	5

### 1.4 边界条件

在进行温度场计算时,需要施加热力学的边界条件,包括恒温边界条件和热对流边界条件。恒温边界条件模拟周边的外环境温度;热对流边界条件模拟结构与空气的接触面上的热交换,假设对流换热系数为常量  $13.9 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 。

在进行结构场计算时,需要施加力学的边界条件。本文中选择了 3 个边界条件分别进行焊接计算和分析,即钢板短边固接、短边简支和短边自由,长边均完全自由,如图 2 所示。

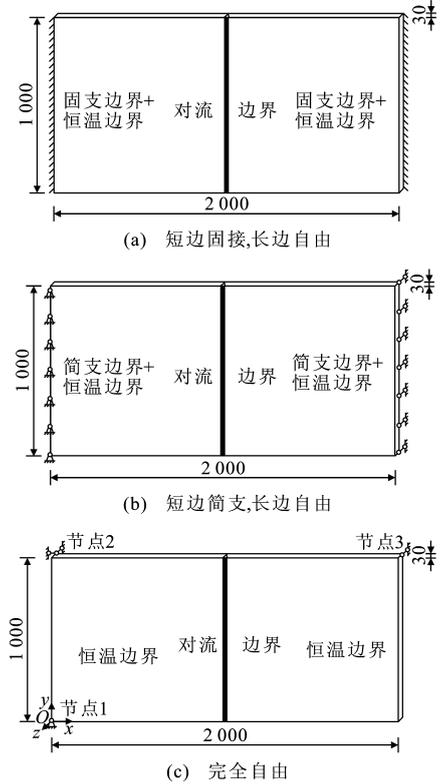


图 2 板件边界约束条件(单位:mm)

Fig. 2 Boundary Constraint Conditions of Plate (Unit:mm)

自由板的约束条件为选择模型中 3 个节点共 6 个自由度进行约束。首先约束图 2(c)中节点 1 的 3 个平动自由度,形成一个球铰,即假设自由板在该点处不发生平动位移;其次选择节点 2 和节点 3 约束平面外的位移( $z$  方向),即假设自由板在自由变形的过程中,节点 1,2,3 始终在同一平面上,即 3 个不共线的点可以确定一个平面;最后约束节点 2 的  $x$  方向的平动位移,保证整个板不会绕着节点 1 做刚体转动。经有限元计算验证,在这样的约束条件下,3 个节点的约束反力均为 0,即表明没有外力产生,板件发生自由变形,约束条件成立。

### 1.5 焊接过程的模拟方法

采用生死单元技术,将整条焊缝分为很多小段,每段分为若干道。首先将焊缝单元全部杀死,当焊接到某一小段时,将此处的焊缝单元激活,施加内生热模拟焊接时的局部高温区域,然后删除该内生热,激活下一单元并开始下一步的焊接,以此循环完成全部焊接工作。每道焊接完成后,根据焊接过程中温度的控制要求,控制冷却时间。

焊接初始的预热和焊接完成后的保温通过改变环境温度来实现,其中预热温度为  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ,焊接完成后以  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  的恒温保温 90 min。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 焊接层数与道数

在精确的焊接模拟中,焊接层数与道数的划分应该与实际施工工艺相同。然而,对于大型钢结构,如大型钢板剪力墙、巨型柱的焊接施工,如果按照实际的焊接层数与道数进行网格划分和计算,必然会产生巨大的计算量,耗费非常多的时间。因此需要找到简化算法(如减少焊接层数或道数),分析简化算法对焊接模拟结果的具体影响,评判采用该简化算法的可能性和正确性。

对本文中 30 mm 厚的钢板,选择的焊接层数分别为 1, 2, 5, 焊接层数与道数的划分如图 3 所示。图 4 为自由板面外变形示意。表 3, 4 中分别给出了自由板在道数不同时 V 形焊缝最大残余变形和最大残余应力的计算结果,其中残余应力未注明方向的均为 Von Mises 应力。

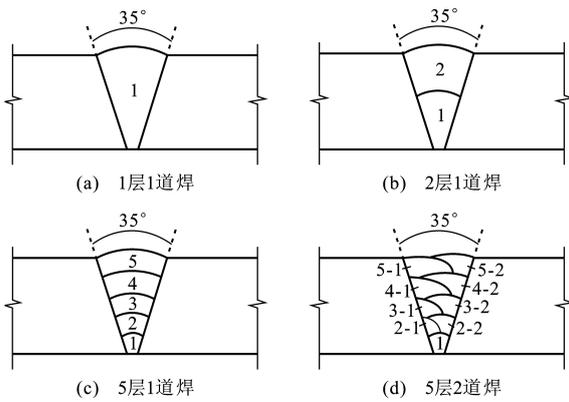


图 3 焊接层数与道数的划分

Fig. 3 Divisions of Welding Layer and Pass

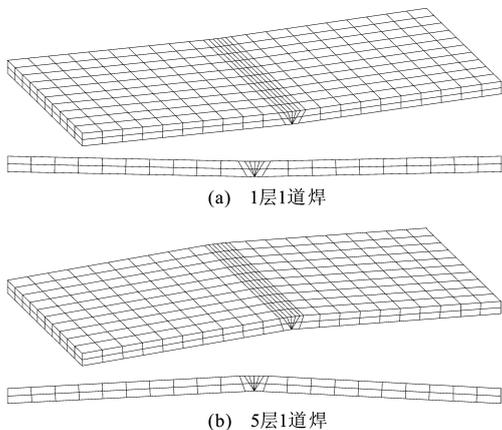


图 4 自由板面外变形示意

Fig. 4 Graphs of Out-of-plane Deformation for Free Plate

由表 3 可以看出,焊接层数为 1 层和 2 层时的面外变形与焊接层数为 5 层时的面外变形方向相

表 3 自由板 V 形焊缝最大残余变形计算结果

Tab. 3 Calculation Results of Maximum Residual Deformation of V Welded Seam for Free Plate mm

层数	1	2	5	
道数	每层 1 道	每层 1 道	每层 1 道	底层 1 道, 其他层各 2 道
面内 $x$ 方向收缩	-0.992	-1.164	-2.453	-2.571
面外变形	-4.022	-3.467	7.823	7.329

表 4 自由板 V 形焊缝最大残余应力计算结果

Tab. 4 Calculation Results of Maximum Residual Stress of V Welded Seam for Free Plate MPa

层数	1	2	5	
道数	每层 1 道	每层 1 道	每层 1 道	底层 1 道, 其他层各 2 道
保温完成	284	248	249	249
最终冷却	294	293	293	293

反,这说明划分不同的层数对焊接模拟计算结果的正确性具有重大影响。当划分层数为 1 层时,计算耗时短,但是假设整条焊缝是一次成型,其收缩过程为整个焊缝截面同时收缩。图 5 为 1 层 1 道焊收缩示意。由图 5 可以看出:对于 V 形焊缝,开口处的宽度大,冷却收缩量大;底部宽度小,冷却收缩量小,导致同时收缩时沿  $z$  轴的负向发生面外变形。

在实际焊接中,V 形焊缝的残余变形是沿图 5 中  $z$  方向的正向,即有限元模型划分层数为 1 层和 2 层时计算的结果与实际不符,而划分层数为 5 层时计算的结果从定性上来说是正确的。因此对于厚钢板多层焊接来说,有限元模型的焊接层数不能取得太少,否则会导致错误的计算结果。

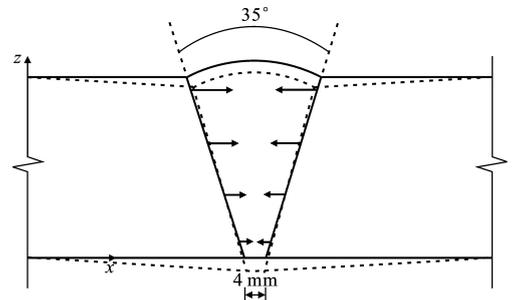


图 5 1 层 1 道焊收缩示意

Fig. 5 Graph of Cooling Shrinkage of One Layer with One Pass

对比 5 层 1 道焊与 5 层 2 道焊的计算结果可知,分道后的面外残余变形减小,最大残余应力保持不变,这说明分道使得焊接热量输入得到分散,同一层的累积收缩量相比于不分道时减小。应用 5 层 1

道焊模型的计算结果比多道焊模型的计算结果偏于保守,是可行的。

## 2.2 板件边界的约束

焊缝冷却收缩变形的过程中,板件的变形会受到周围构件的约束,进而在结构内部产生残余应力。约束程度不同,残余应力和残余变形的大小也不同。表 5、6 中分别给出了焊接层数为 5 层且每层焊接 1 道情况下,短边固接板、短边简支板和自由板的对接焊接最大残余变形和最大残余应力。

表 5 不同约束下 V 形焊缝最大残余变形计算结果

Tab. 5 Calculation Results of Maximum Residual Deformation of V Welded Seam Under Different Constraints

Different Constraints			
mm			
边界条件	短边固接板	短边简支板	自由板
面内 $x$ 方向收缩	-1.173	-2.450	-2.453
面外变形	4.117	7.731	7.823

表 6 不同约束下 V 形焊缝最大残余应力计算结果

Tab. 6 Calculation Results of Maximum Residual Stress of V Welded Seam Under Different Constraints

V Welded Seam Under Different Constraints			
MPa			
边界条件	短边固接板	短边简支板	自由板
保温完成	345	304	249
最终冷却	345	345	293

在不同的约束条件下,焊接残余应力和残余变形的大小不同。短边固接板的边界约束最强,面内和面外的变形受约束,变形量最小,但残余应力最大。短边简支板与自由板的残余变形量相近,大于短边固接板的变形量,但残余应力较小。这说明约束削弱后,变形和残余应力得到释放,且变形主要以  $x$  方向的收缩和面外的变形为主。自由板的各向变形都得到释放,最大残余应力没有达到屈服值,而短边固接板的  $x$  方向和  $y$  方向变形都被约束,短边简支板短边上的  $y$  方向变形被约束,最大残余应力达到屈服值。

自由板靠近焊缝处平行于焊缝的横截面上的平均残余应力分布如图 6 所示,其中,  $\sigma_x$  为残余应力。自由板垂直于焊缝方向钢板短跨跨中截面上的平均残余应力分布如图 7 所示。

由图 6 和图 7 得到的自由板焊接残余应力的分布与已有的定性结论相符合。对整个截面积分,得到整个截面上残余应力的合力为 0,符合自由板的条件。同时计算自由板焊接过程中所施加约束的 6 个约束的约束反力,得到约束反力均为 0,这进一步说明了自由板约束的合理性与正确性。

## 2.3 板件厚度

在现阶段的高层结构设计中,厚钢板剪力墙使

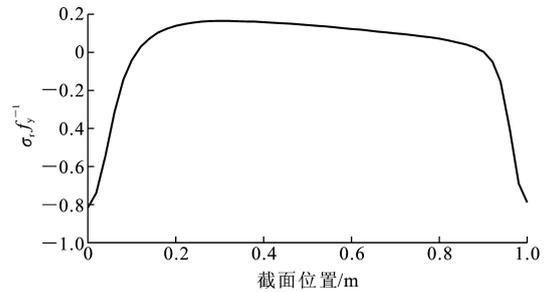


图 6 自由板跨中截面  $x$  方向残余应力分布

Fig. 6 Distribution of  $x$ -direction Residual Stress in Mid-span Section for Free Plate

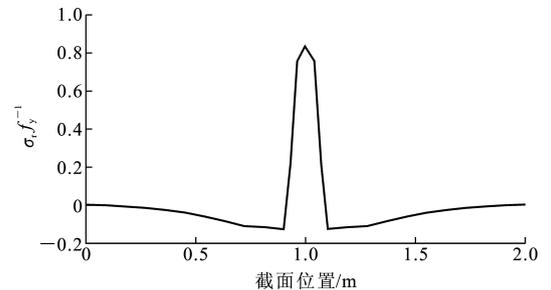


图 7 自由板垂直焊缝方向中间截面处  $y$  方向残余应力分布

Fig. 7 Distribution of  $y$ -direction Residual Stress in Middle Section Perpendicular to Welded Seam for Free Plate

用日益广泛,如天津 117 大厦中使用的核心筒钢板剪力墙的最大厚度达到 120 mm。相比于一般的薄板,厚钢板剪力墙在焊接过程中产生的残余应力和残余变形具有的特点是值得研究的。

选取板件厚度  $t_0$  分别为 30, 40, 50, 60 mm 的自由板进行 5 层 1 道焊的对比研究。图 8 中给出了焊接过程中自由板不同板件厚度条件下最大面外变形的变化过程。

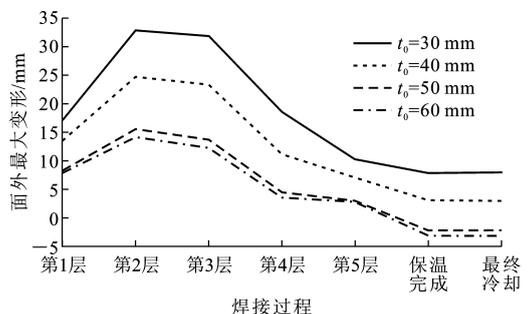


图 8 自由板不同板件厚度下最大面外变形的变化过程

Fig. 8 Changing Processes of Maximum Out-of-plane Deformation of Different Plate Thicknesses for Free Plate

从图 8 可以看出,不同板件厚度在焊接过程中面外变形的发展趋势是一样的,随着板件厚度的增加,钢板的面外刚度增加,因此最初正向面外变形的

幅值逐渐减小。对于厚板,坡口形状相同时,最外1层的焊缝宽度大,焊缝收缩量大,最终导致钢板发生负向的面外位移。

焊缝中心处  $x$  方向残余应力沿钢板厚度方向的分布如图9所示,其中,  $\sigma_{r,x}$  为  $x$  方向的残余应力;  $t_z$  为沿厚度方向的位置。图9中  $z$  方向残余应力表现为中间受拉,两端受压,与  $x$  方向和  $y$  方向的残余应力相比,沿厚度方向的残余应力幅值很小。而  $x$  方向残余应力表现为中间受压,两端受拉,应力幅值随着板件厚度的增加而变大。这说明对于厚板,垂直于焊缝方向( $x$  方向)的残余应力沿厚度方向是变化的。

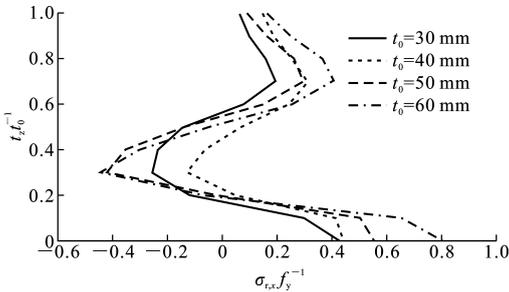


图9 焊缝中心处  $x$  方向残余应力沿钢板厚度方向的分布  
Fig.9 Distributions of Residual Stress Along Thickness of Steel Plate at Middle of Welded Seam

## 2.4 焊接顺序

钢板焊接的顺序影响着钢板的焊接残余应力和残余变形的大小。对于本文中研究的钢板对接焊接,其焊接顺序可以分为从上到下、从中间到两边和从两边到中间3种,如图10所示。

自由板不同焊接顺序下V形焊缝焊接最大残余变形和最大残余应力计算结果如表7,8所示。由表7,8可以看出,从两边到中间的焊接顺序,其面外变形要稍小于其他2种情况,3种不同焊接顺序的最终最大残余应力相差不大。

因此,在具体施工过程中,选取何种焊接顺序并没有统一的标准,要根据实际情况,以方便施工、缩短工期为原则来选取。

## 2.5 施工工艺

焊接过程中的施工工艺有很多种,包括焊接完成后是否保温及施工过程中是否设置支撑等。

表9,10中分别给出了不同保温条件下焊接层数为5层且每层1道时自由板进行对接焊接的最大残余变形与最大残余应力。

对比焊接完成后有无保温的计算结果,无论从焊接残余变形还是从残余应力上来看,有保温条件的性能都明显优于无保温的情况。有保温时,钢板

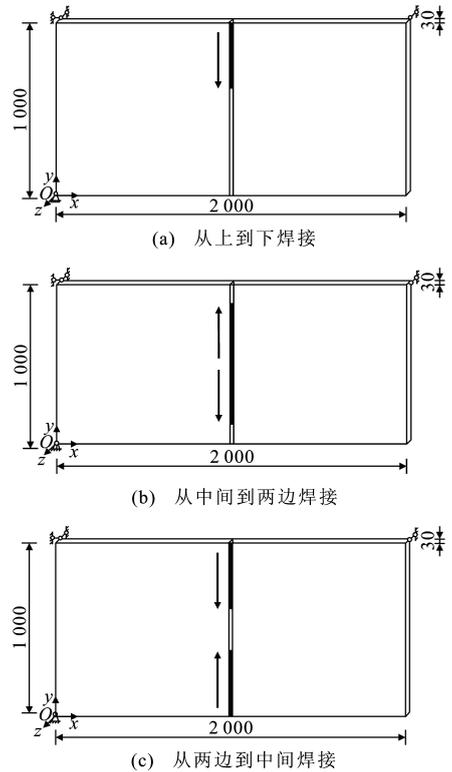


图10 焊接顺序(单位:mm)

Fig.10 Welding Sequences (Unit:mm)

表7 自由板不同焊接顺序下V形焊缝最大残余变形计算结果

Tab.7 Calculation Results of Maximum Residual Deformation of V Welded Seam with Different Welding Sequences for Free Plate mm

焊接顺序	从上到下	从两边到中间	从中间到两边
面内 $x$ 方向收缩	-2.453	-2.028	-1.887
面外变形	7.823	7.181	7.366

表8 自由板不同焊接顺序下V形焊缝最大残余应力计算结果

Tab.8 Calculation Results of Maximum Residual Stress of V Welded Seam with Different Welding Sequences for Free Plate MPa

焊接顺序	从上到下	从两边到中间	从中间到两边
保温完成	249	259	256
最终冷却	293	292	293

表9 自由板不同保温条件下V形焊缝最大残余变形计算结果

Tab.9 Calculation Results of Maximum Residual Deformation of V Welded Seam Under Different Thermal Conditions for Free Plate mm

保温条件	有保温	无保温
面内 $x$ 方向收缩	-2.453	-2.457
面外变形	7.823	8.035

表 10 自由板不同保温条件下 V 形焊缝最大残余应力  
计算结果

Tab. 10 Calculation Results of Maximum Residual  
Stress of V Welded Seam Under Different

Thermal Conditions for Free Plate MPa

保温条件	有保温	无保温
保温完成	249	
最终冷却	293	345

在冷却到保温温度后通过热传递使得温度场分布均匀,温差梯度小,撤除保温后整块钢板能均匀冷却到现场环境温度;与无保温的情况相比,有保温时钢板不均匀冷却程度小,从而使得残余变形和残余应力都较小,说明保温措施对于控制焊接残余变形和残余应力来说是必不可少的。

在钢板剪力墙焊接施工过程中,往往在 2 块需要焊接的墙板上设置侧向支撑(图 11),用来限制焊接过程中钢板的面外变形对焊接的影响。在焊接完成后,撤去支撑,钢板的面外变形增大。

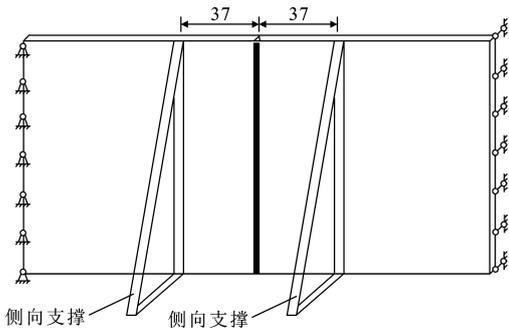


图 11 侧向支撑的设置(单位:cm)

Fig. 11 Arrangement of Lateral Support (Unit:cm)

选择两短边简支的钢板对接焊接模型,在距焊缝  $x$  方向  $\pm 37$  cm 处设置 2 道侧向支撑,约束该处的面外位移,在保温完成后撤去侧向支撑,在无支撑情况下冷却至环境温度,其最大残余变形的计算结果见表 11。焊接过程中支撑对最大面外残余变形的影响如图 12 所示。

表 11 不同支撑条件下 V 形焊缝最大残余变形计算结果

Tab. 11 Calculation Results of Maximum Residual  
Deformations of V Welded Seam Under Different

Support Conditions mm

支撑设置	有支撑	无支撑
面内 $x$ 方向收缩	-2.258	-2.450
面外变形	-12.893	7.731

由图 12 可以看出,支撑的存在限制了钢板焊接前期的面外变形,使得钢板在整个焊接过程中的面外变形都很小,这样利于焊接的实施。撤去侧向支

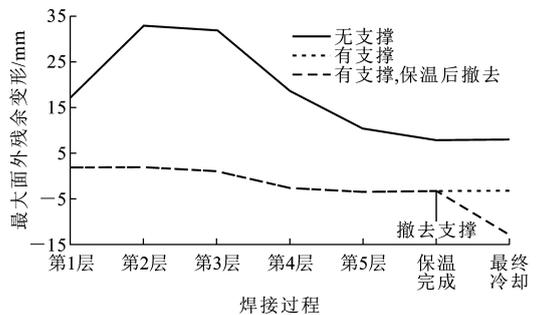


图 12 支撑对最大面外残余变形的影响

Fig. 12 Influences of Support on Maximum  
Out-of-plane Residual Deformation

撑后,钢板约束减少,变形恢复。图 12 中在有无支撑情况下最终面外变形方向相反的原因是焊接过程中每层焊缝收缩对钢板变形趋势的影响不同,支撑的存在限制了前期钢板向  $z$  轴正向的变形,而第 4 层与第 5 层焊缝的收缩会使钢板向  $z$  轴负向变形,最终导致变形方向相反。

### 3 结 语

(1)对于实际结构中厚板采用的多层多道对接焊接,不能通过将焊接层数简化成单层或双层以减少计算量的方法达到简化的目的,否则不能保证结果的正确性,应根据实际焊接所采用的层数与道数进行划分。

(2)板件的约束强弱影响焊接残余变形和残余应力的大小。本文中提出了对接焊接的自由板模型,并通过有限元计算验证了该模型的正确性。计算结果表明,厚板的残余应力沿厚度方向变化,其影响不可忽略。

(3)不同的焊接顺序和施工工艺对最终的残余变形和残余应力大小都有影响。其中,从两边到中间焊接的顺序略优于其他 2 种焊接顺序,在施工过程中,要根据实际情况,以方便施工、作业时间为原则来选取。

(4)焊接完成后的保温处理可明显减小残余变形和残余应力的幅值。焊接时施加侧向约束或支撑可以很好地控制焊接过程中板件的面外变形,但需要注意支撑撤去后变形的增加。

### 参考文献:

### References:

[1] 鹿安理,史清宇,赵海燕,等.厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟[J].中国机械工程,2001,12(2):183-186.

LU An-li, SHI Qing-yu, ZHAO Hai-yan, et al. Three

- Dimensional Numerical Simulation of Temperature and Stress Distribution in Welding of Thick Plate[J]. China Mechanical Engineering, 2001, 12(2): 183-186.
- [2] 达拉伊 D. 焊接热效应-温度场、残余应力、变形[M]. 熊第京, 译. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- RADAJ D. Heat Effects of Welding: Temperature Field, Residual Stress, Deformation [M]. Translated by XIONG Di-jing. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [3] 倪红芳, 凌 祥, 涂善东. 多道焊三维残余应力场有限元模拟[J]. 机械强度, 2004, 26(2): 218-222.
- NI Hong-fang, LING Xiang, TU Shan-dong. Simulation of 3D Residual Stresses Field of Multi-pass Welding by FEM[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(2): 218-222.
- [4] 陈 楚, 汪建华, 杨洪庆. 非线性焊接热传导的有限元分析和计算[J]. 焊接学报, 1983, 4(3): 139-148.
- CHEN Chu, WANG Jian-hua, YANG Hong-qing. Analysis and Calculation of Non-linear Welding Heat Conduction by Finite Element Method [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1983, 4(3): 139-148.
- [5] DONG P, BRUST F W. Welding Residual Stresses and Effects of Fracture in Pressure Vessel and Piping Components: A Millennium Review and Beyond [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2000, 122(3): 329-338.
- [6] 彭崇梅, 张启伟, 李元兵. 焊接残余应力对钢桁斜拉桥整体稳定性的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(6): 36-42.
- PENG Chong-mei, ZHANG Qi-wei, LI Yuan-bing. Influence of Welding Residual Stress on Stability of Steel Truss Cable-stayed Bridge [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(6): 36-42.
- [7] 郭彦林, 姜子钦. 纯弯等截面焊接工字形梁整体稳定系数研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(2): 89-95.
- GUO Yan-lin, JIANG Zi-qin. Research on Lateral Stability Factor of Welded I-section Beams Under Pure Moment [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 89-95.
- [8] 黄永辉, 王荣辉, 甘 泉. 钢桁梁桥整体节点焊接残余应力试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 83-88.
- HUANG Yong-hui, WANG Rong-hui, GAN Quan. Experiment on Welding Residual Stress of Integral Joint for Steel Truss Bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 83-88.
- [9] 程 斌, 钱 沁, 黄仁锋. 部分内填混凝土钢桁梁焊接整体节点试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 117-123, 136.
- CHENG Bin, QIAN Qin, HUANG Ren-feng. Experiment on Partially Concrete-filled and Welded Integral Joints in Steel Truss Girders [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 117-123, 136.
- [10] KARLSSON R I, JOSEFSON B L. Three Dimensional Finite Element Analysis of Temperatures and Stresses in a Single-pass Butt-welded Pipe [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1990, 112(1): 76-84.
- [11] BROWN S B, SONG H. Implication of Three-dimensional Numerical Simulations of Welding of Large Structures [J]. Welding Journal, 1992, 71(2): 55-62.
- [12] 张国智, 胡仁喜, 陈继刚. ANSYS 10.0 热力学有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- ZHANG Guo-zhi, HU Ren-xi, CHEN Ji-gang. Examples of ANSYS 10.0 Finite Element Analysis of Thermodynamics [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [13] 郭彦林, 赵思远. 深圳湾体育馆焊接合拢对结构受力性能的影响分析[J]. 施工技术, 2011, 40(3): 71-75.
- GUO Yan-lin, ZHAO Si-yuan. Welding Effects on Roof Closure Process of Shenzhen-wan Stadium [J]. Construction Technology, 2011, 40(3): 71-75.
- [14] 方洪渊. 焊接结构学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- FANG Hong-yuan. Welding Structure [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.

