

壁板结构焊接顺序模拟优化研究

Optimization of Welding Sequence for Welded Plate Structure

北京航星机器制造公司 李宏伟 奉金明 姚为 王志敏 刘洋
哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室 傅卫 杨建国

[摘要] 对于某壁板结构焊接顺序进行了数值模拟优化,主要考察了4块立板之间不同的焊接顺序、每块立板上各段焊缝焊接顺序的调整以及焊接起始端的选择对结构焊后变形的影响规律,模拟结果表明:壁板在各种顺序下都产生了马鞍型变形,即,沿焊缝纵向截面上产生了向下的挠曲变形,中部向下变形量最大;沿焊缝横向截面上产生了向上的挠曲变形,壁板两端部变形量较大,且壁板前端比后端变形大。在单块立板上采用先点固两端然后交错对称焊接,在整体上对4块立板依次焊接相同位置的焊缝,此时壁板焊后变形最小。

关键词: 焊接变形 数值模拟 焊接顺序 有限元

[ABSTRACT] As an application of this FEM preprocessing system, simulation on welding process of missile's oil box is performed, in which the effects of the welding sequence of four web plates and welds on each web plate are primarily analyzed. The simulation result shows that deformation under varied welding sequence is almost the same. Downward deflection deformation is obtained along weld longitudinal direction in structure as well as upward deflection deformation along weld traverse direction. The minimal deformation of structure is obtained by using the presented method that four web plates are first tack welded on both ends, and then the web plates are staggered welded on both sides with the same welding sequence at the same time.

Keywords: Welding deformation Numerical simulation Welding sequence FEM

焊接是航空航天结构件制造的主要方法之一,焊接结构的应力与变形是构成焊接构件质量的重要因素,是焊接质量控制的重要内容^[1]。薄板结构在航空航天构件中得到广泛的应用,而薄板的焊接变形问题尤为明显,工艺优化是控制薄板焊接变形的的方法之一,以往主要通过实验摸索的方法进行工艺优化^[2],随着计算机模拟技术的进步,已经可以实现对薄壁焊接结构的焊接变形预测及工艺优化^[3-6]。然而,在进行优化时经常出现

待优化焊缝过多的情况^[7],此时,一般要有目的地进行优化,即需要进行基于知识的有限元优化分析。本研究应用基于知识的数值模拟手段,以某多焊缝壁板结构为研究对象,考察了4块立板之间不同的焊接顺序、每块立板上各段焊缝焊接顺序的调整以及焊接起始端的选择对结构焊后变形的影响规律,为结构工艺优化打下基础。

1 结构尺寸及材料性能

壁板结构长为1030mm,宽544mm,板厚最大处为8.6mm,其中,壁板及盖板形状极其复杂,板上开有许多凹槽结构,既能保持板具有较大的刚度,还能减轻整个结构的重量。加强筋宽度分别为12.5mm、15mm和44mm。此外,还具有许多与装配相关的特征,这些特征都大大增加了结构的复杂性。有限元模型建立过程中如果把所有的这些特征都考虑进去会极大地增加有限元建模的难度,有时甚至会影响到分析结果的准确性。因此,考虑实际模型的所有细节是不现实的,也是没有必要的,在不影响分析结果的前提下,有必要对实际结构进行一定的简化。由于与装配相关的一些尺寸对结构焊接变形有限元模拟分析过程没有太大的影响,建模中可以忽略这些特征。为了不改变盖板及壁板的整体刚度,并尽可能使模型与实际结构相符,保留了凹槽结构,这样使模拟计算的结果更趋于实际值。

壁板分别与立板间组成了4个典型的T型接头,立板两侧采用分段交错焊接,每段焊缝长30mm,各段焊缝之间的间隔为50mm。焊接方法采用TIG焊填丝的方法,焊接电流为170A,焊接热输入系数取0.7,焊接速度为2mm/s。

采用有限元法模拟计算结构的应力与变形时,需要将求解区域进行空间离散,即对结构进行网格划分。由于焊缝及其附近区域温度梯度较大,应力值比较大,也是最被关注的位置,这个区域划分的网格应该用较小的单元尺寸,即较大的网格密度,而远离焊缝的母材则可以采用较大的单元尺寸以减少模型总体单元数量,从而减轻计算量,节省计算时间。针对简化后的盖板焊接结构进行了网格划分,盖板焊接结构所划分的单元总数为

71270,节点总数为116063。

本课题所用的板材为LF6。LF6合金是铝-镁系中含镁高的不可热处理强化的铝合金,易于进行氩弧焊,退火状态的耐腐蚀性良好。其力学及热学性能参数如表1所示。

表1 材料性能参数

温度 / °C	弹性模量 E/GPa	屈服强度 /MPa	热导率 / (w·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热 / (J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	线膨胀系数 10 ⁻⁶ /°C
25	66.7	170	117	—	22.8
100	60.8	150	121	921	—
200	54.4	120	126	1005	24.7
300	43.1	80	130	1047	25.5
400	—	—	138	1089	26.5

在 Marc 模拟中,随温度变化而变化的材料性能参数是以表格的方式输入的,对高温下的材料性能参数值是通过外延的方法得到的。对于弹性模量及屈服强度,在材料达到熔点附近及以上温度时,都被设置为一个很小的值;热导率、比热及线膨胀系数在各个温度下变化不是很大,高温参数值与低温部分基本保持不变。

2 初始条件和边界条件定义

本文中采用的热源为当前焊接模拟中最为通用的双椭球热源。对于焊缝填充金属的模拟采用单元死活技术,随着热源的移动,焊缝金属逐步填充。

本文中模拟的焊接结构无需预热,取环境温度为25℃。

结构表面与周围环境之间存在对流和辐射,在模拟中对于对流和辐射边界条件,利用总换热系数来处理,材料换热系数为 $60w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,环境温度取25℃。

3 壁板焊后的整体变形规律

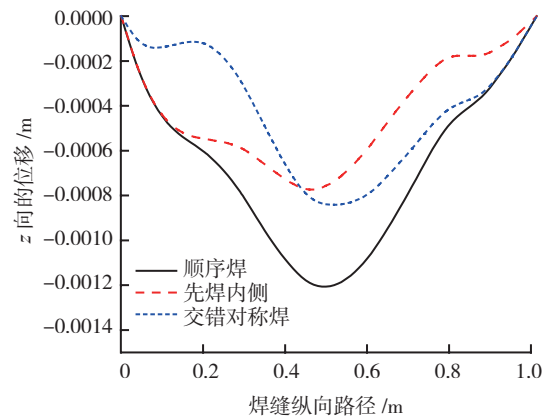
由于铝合金的导热性强而热容量大,线胀系数大,熔点低及高温强度小,在焊接过程中很容易发生焊接变形。在有限元模拟计算中壁板结构焊后在整体上出现了马鞍型的变形:壁板沿焊缝方向产生了向下的挠曲变形,壁板中部变形量最大;而在垂直焊缝的截面上产生了向上的挠曲变形,壁板两端部变形较大,且前端变形大于后端。

壁板沿焊缝方向发生的向下挠曲变形及在垂直焊缝方向产生的向上挠曲变形都是由焊接过程中焊缝冷却时产生的纵向收缩引起的。由于立板在壁板上的位置偏向壁板前端一侧,壁板前端受热比后端多且局部的刚度相对比后端小,所以焊后壁板前端比后端变形大。

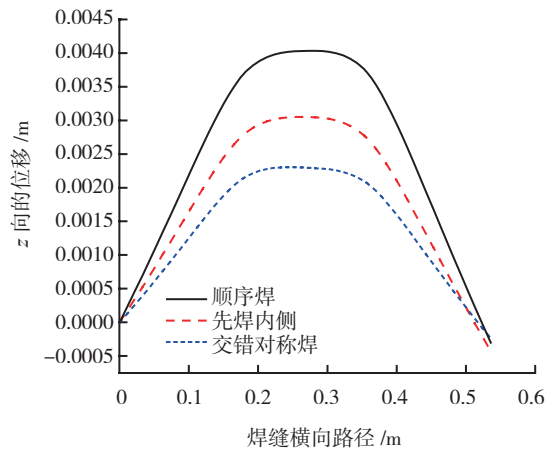
在焊接过程中为减小结构的焊后变形往往需要考

虑各构件之间的焊接先后顺序,如果采用分段焊接的方法还需考虑各段焊缝之间的焊接顺序。壁板结构上单块立板与壁板之间构成了一个典型的T型接头,在焊接过程中正是采用的分段焊接方法,每块立板两侧各有5段焊缝,每段焊缝长30mm,然后间隔50mm。显然,对这些焊缝采用不同的焊接顺序时结构焊后将产生不同的变形,因此,有必要对这些焊缝的焊接顺序进行优化。本文选取3种最典型的焊接顺序进行了模拟计算,第1种为顺序焊,即从立板一端交错焊接至另一端;第2种情况为对立板两端进行点固,然后先焊接立板内侧再焊接立板外侧焊缝;第3种情况为先对立板两端进行点固,然后采用交错对称焊接的方法。对比了3种顺序下焊后冷却壁板z向的变形量,如图1所示。

从图1可以看出,不同的焊接顺序导致了壁板焊接变形的差异,且壁板沿焊缝纵向产生了向下的挠曲变形,而在垂直焊缝方向产生了向上的挠曲变形。第1种焊接顺序即顺序焊导致的焊接变形,无论是壁板纵向的向下挠曲变形还是壁板横向的向上挠曲变形都比其他



(a) 焊缝纵向路径上的z向位移



(b) 焊缝横向路径上的z向位移

图1 单块立板上不同焊接顺序下z向的位移

Fig.1 z direction displacement of joints with different welding sequences

两种焊接顺序下的焊接变形明显,第3种焊接顺序即交错焊接的焊后整体变形最小。因此,为了减小焊后变形有必要对单块立板上的各段焊缝顺序进行优化,而且采用对单块立板先点固两端,然后交错对称焊接的方法时控制壁板焊后变形效果最好。

为了考察了壁板结构的4块立板之间不同的焊接顺序对壁板焊后变形的影响,图2中对壁板结构上的4块立板及每块立板上的各段焊缝进行了标号。

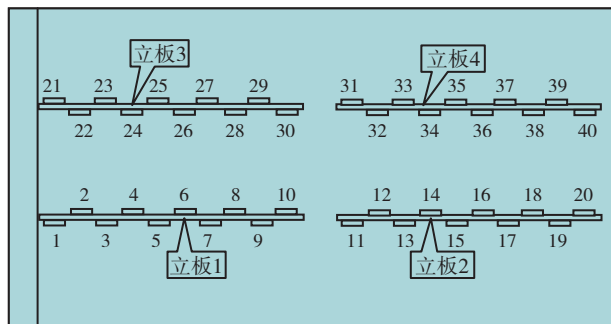


图2 4块立板及立板两侧各段焊缝的标号
Fig.2 Sequence of weld seams and sub-plates

针对4块立板设计了以下5种焊接顺序组合:1-2-3-4,1-3-2-4,1-4-3-2,对称1-3-2-4,对称1-4-3-2。其中,数字先后顺序代表了各立板的焊接先后顺序,对称焊是指在整体上4块立板依次焊接相同位置的焊缝。由上一节得到的结论,对4块立板上的各段焊缝的焊接顺序都采用了交错对称焊接的方法,各种顺序下的焊接顺序排列如表2所示。

在壁板上分别取焊缝纵向的5条路径及焊缝横向的壁板前端、后端及中部3条路径,其路径示意图如图3所示。考察了各条路径上壁板焊接冷却后的z向位移,

表2 结构及焊缝的焊接顺序

立板焊接顺序	各段焊缝焊接顺序
1-2-3-4	1-10-6-3-7-4-8-5-9-2-11-20-16-13-17-14-18-15-19-12-21-30-26-23-27-24-28-25-29-22-31-40-36-33-37-34-38-35-39-32
1-3-2-4	1-10-6-3-7-4-8-5-9-2-21-30-26-23-27-24-28-25-29-22-20-11-15-18-14-17-13-16-19-12-40-31-35-38-34-37-33-36-39-32
1-4-3-2	1-10-6-3-7-4-8-5-2-9-40-31-35-38-34-37-33-36-39-32-21-30-26-23-27-24-28-25-22-29-20-11-15-18-14-17-13-16-19-12
对称 1-3-2-4	1-10-21-30-20-11-40-31-6-26-15-35-3-23-18-38-7-27-14-34-4-24-17-37-8-28-13-33-5-25-16-36-2-22-19-39-9-29-12-32
对称 1-4-3-2	1-10-40-31-21-30-20-11-6-3-35-38-26-23-15-18-7-4-34-37-27-24-14-17-8-5-33-36-28-25-13-16-2-9-39-32-22-29-19-12

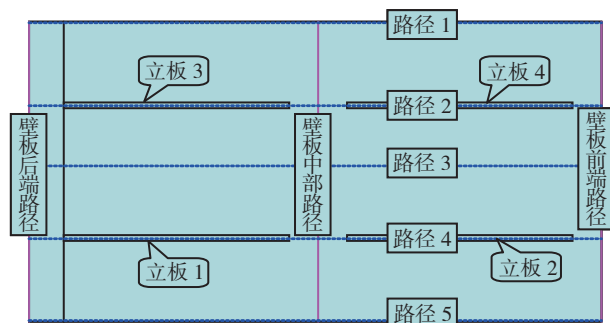


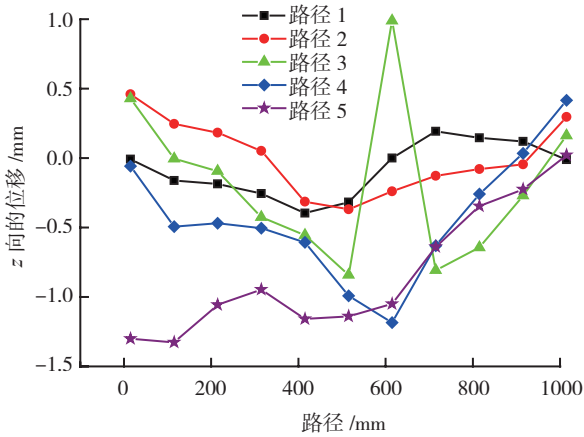
图3 路径示意图
Fig.3 Path defined to consider deformation

即板厚方向的变形。

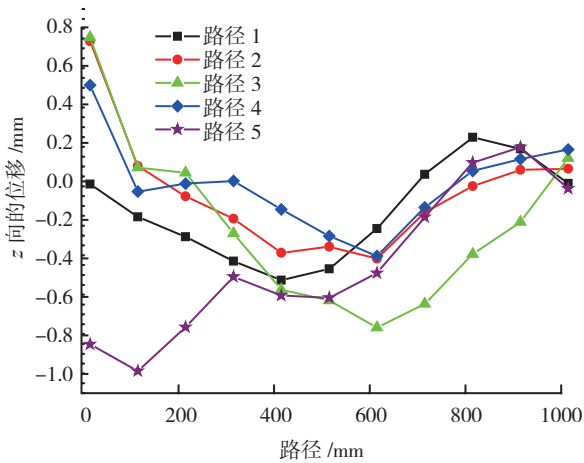
结果表明:壁板在沿焊缝纵向的5条路径上都产生了向下的挠曲变形,壁板中部变形量最大,5条路径上的向下挠曲变形量是不一样的;各种焊接顺序下壁板中部向下的挠曲变形量差距不大,最大值为1.511mm,其中,采用对称焊时比其他焊接顺序下的向下挠曲变形稍大。壁板在垂直焊缝方向截面上发生了向上挠曲变形,壁板前端、中部及后端变形各不相同,其中,壁板前端变形最大值达到了3mm,壁板后端变形最大值为1.2mm;采用对称焊时向上挠曲变形比其他焊接顺序要小得多,约1mm。综上所述可得出以下结论:4块立板之间采用不同的焊接顺序壁板焊后有变形,当采用对称焊接的方法,即对单块立板先点固两端然后采用交错对称焊接的方法,而在整体上4块立板之间依次焊接相同位置的焊缝,此时控制壁板焊后变形效果最好。采用对称焊接时壁板焊后变形最小,其原因是在整体上先对4块立板进行点固,此时结构的整体刚度变大,抵抗变形能力增强;此后焊接时4块立板同时焊接相同的位置,保证了焊缝在整体分布上的对称性。

对实际结构进行了焊接,设计了3种不同的焊接顺序,1-4-3-2,1-3-2-4及4块立板对称焊接(对称1-4-3-2)的顺序,焊接时结构处于自由状态,未安装夹具。采用TIG填丝焊的焊接方法,焊接电流为179A,焊接电压为20V。对焊后壁板板厚方向的变形采用三坐标测量机进行了测量,在壁板上沿焊缝纵向设置了5条路径如图3所示。各条路径上每隔100mm测量一个点的z向位移,每条路径上测量了10个点,对这些数据进行处理后得到了各条路径上z向位移的变化曲线如图4所示。

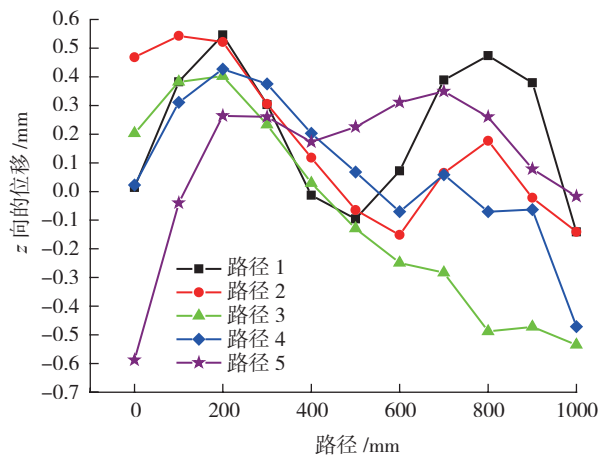
从图4中可以看出,壁板两端都有一个向上的位移量,并且壁板前端变形比后端变形稍大,而中部出现了向下的变形,这与前面模拟计算得出的壁板整体变形规律是一致的。而且对于这3种情况,采用4块立板同时对称焊接的顺序时壁板无论向上或向下的变形都比其



(a) 1-4-3-2 顺序下各路径上的 z 向位移



(b) 1-3-2-4 顺序下各路径上的 z 向位移



(c) 对称 1-4-3-2 焊时各路径上的 z 向位移

图4 各种顺序下各路径上的 z 向位移

Fig.4 Displacement of z direction under different symmetrical welding sequence

他两种情况要小,其原因是 4 块立板同时对称焊接时,结构在整体上处于一种平衡对称的状态,因而变形也相对比较小。此外实际焊接后所测结果比模拟计算的结

果要小,可能是由于模拟过程中未考虑重力的影响,而实际焊接中结构是置于工作平台上的,在结构本身的重力作用下抵消了部分焊接变形的缘故。

4 结论

考察了 4 块立板间的焊接顺序,焊接起始端以及单块立板上各段焊缝的焊接顺序对结构焊后变形的影响,分析了壁板结构焊后的整体变形规律,并对焊接顺序进行了优化。

(1) 模拟结构表明壁板结构焊后产生了马鞍型变形,即沿焊缝纵向截面上壁板发生了向下的挠曲变形,沿焊缝横向截面上壁板发生了向上的挠曲变形。

(2) 在局部对单块立板采用先点固两端然后交错焊接的方法,在整体上对 4 块立板依次焊接相同位置的焊缝,此时控制焊后变形的效果最好。

参考文献

- [1] 吴爱萍,赵海燕,史清宇,等. 航空航天焊接结构件应力与变形的预测与控制. 航空制造技术,2008(24):26-30.
- [2] 李军,杨建国,翁路露,等. 薄壁结构焊接的焊中控制研究现状. 焊接,2008(8):16-21.
- [3] Zhang Y, Yang J G, Liu X S, et al. Finite element analysis of controlling the TC4 thin plate weldment wave-like deformation by welding with impacting rotation. China Welding, 2010, 19(4):74-78.
- [4] Li J, Yang J G, Li H L, et al. Numerical simulation on buckling distortion of alloy thin-plate weldment. Frontiers of Materials Science in China, 2009, 3(1): 84-88.
- [5] Deng D, Ma N S, Murakawa H. Finite element analysis of welding distortion in a large thin-plate panel structure. Transaction of JWRI, 2011, 40(1):89-100.
- [6] 张勇,杨建国,李军,等. 随焊冲击旋转挤压控制 TC4 薄板焊接失稳变形工艺. 焊接学报,2011, 32(1):85-88.
- [7] 张学秋,杨建国,刘雪松,等. 焊接顺序对整体叶盘圆度影响的有限元分析. 焊接学报, 2010. 31(3):57-60. (责编 日午)

(上接第 18 页)

应用及发展. 航空材料学报, 2003(S1): 249-253.

- [2] 薛松柏,张亮,皋利利,等. 航空器制造中的焊接技术. 航空制造技术, 2009(19):26-29.
- [3] 李晓红. 先进焊接技术在航空制造中的应用. 航空制造技术, 2008(13):26-29.
- [4] 毛智勇. 电子束焊接技术在大飞机中的应用分析. 航空制造技术, 2009(2): 92-94.
- [5] 付刚,胡刚. TC4 钛合金超塑性成形 / 扩散连接后电子束焊接技术. 航空制造技术,2004(12):72-74.
- [6] 王向明,刘文斑. TA15 钛合金薄板氩弧焊对接焊缝疲劳特性研究. 飞机设计,2007(6):24-27.
- [7] 赵大伟,赵秀娟,罗宇,等. TC4 钛合金电子束焊接接头中值疲劳寿命研究. 航空制造技术, 2009(14):88-90. (责编 亿霖)