叉车结构件焊接变形场数值模拟研究

杭州叉车集团股份有限公司 徐 刚 戚海勇
西北工业大学 航空学院 刘 军

为了减小叉车结构件的焊接热变形并探索叉车焊缝的焊接顺序优化方法，本文首先对某型叉车结构件进行有限元网格划分，采用串热源移动模型模拟焊接热场的移动，利用 ANSYS/WORKBENCH 程序自带的 APDL 语言编程实现热移动载荷的施加。计算得到叉车结构件焊接结束后的温度场分布，然后将温度场作为已知条件输入模型，计算得到结构件的焊接变形。并将计算结果与试验结果进行对比，二者误差为 10.7%，在控制误差 15% 以内，满足计算要求，表明本文计算模型的合理性，可以此方法为依据，进行叉车焊缝焊接顺序的优化。

一、引言

叉车车辆焊接构架的焊接变形是影响构架结构设计完整性、制造工艺合理性和结构使用可靠性的关键因素之一。目前，消除焊接构架在制造过程中的焊接变形常采用的方法是变形矫正和整体退火等，这样不仅增加成本、延长制造周期，而且会改变结构残余应力的分布状态。因此，迫切需要采用数值方法模拟焊接构架的焊接过程，掌握焊接变形的规律，以制定科学的焊接工艺。

1962 年，丹麦人首次用计算机有限差分法进行铸件凝固过程的传热计算，进入 70 年代，更多的国家加入到这个研究行列，并从铸造逐步扩展到锻压、热处理、焊接。我国焊接界数值模拟研究起步于 80 年代初，近年来很多的科研单位和个人投入到了这项研究中，并取得了积极的进展。

谭兵等采用采用 SYSWELD 有限元软件对多种夹持条件下的 5 mm 厚的 L 形铝合金角接接头的激光 –MIG 复合热源焊接变形进行数值模拟，并与实际焊接结果进行比较。研究表明：该软件能较好地模拟 L 形角接接头的激光 – MIG 复合焊，模拟结果与实际变形偏差为 10%，夹持近焊缝处和焊缝冷却到室温时卸下夹具，更利于控制 L 形铝合金结构的激光 – MIG 复合焊接变形。孙凯等采用 ESI 公司焊接专用软件 SYSWELD 对 K7 转向架副构架进行了数值计算分析。根据 K7 转向架副构架建立其三维几何模型，划分网格模型，设置热源参数。考虑到实际生产时遇到的情况，采用四种焊接方式进行模拟，并与实验结果相对比，按照设计的焊接工艺仿真得到的焊接残余应力与实验吻合较好。张书权等基于有限元软件 SYSWELD 对 T 型接头温度场进行三维动态模拟，得出了瞬态温度场分布图和特征点的热循环曲线，同时也得出了焊缝上任一点的温度变化与相演变的关系。王中辉等在相同的焊接工艺参数下，采用焊接间隙为 1mm 等距和焊接起始点到焊接终止点间隙从 1mm 渐变到 3mm 两种装配方式，对薄板进行焊接，利用 SYSWELD 有限元分析软件对薄板对接焊缝进行数值模拟，得出平板对接焊缝的温度场分布、残余应力和变形，并通过试

验验证了模拟分析结果。张锦州等采用 SYSWELD 模拟软件对 X70 管线焊接进行数值模拟，建立了体积组合热源分析模型，确定热物理参数变化规律，模拟计算出焊缝区焊接应力变形的分布规律，求得应力变形最危险位置，为探索管线焊接规律提供了有益的帮助。胡建以 Q345D 低合金高强钢 T 型接头双面焊接过程的数值模拟为研究对象，利用 SYSWELD 有限元分析软件，选择双椭球热源模型，模拟不同焊接工艺下 Q345D 钢 T 型接头双面焊接过程。尹辉俊和毕齐林基于固有应变理论，采用 ANSYS 建立了叉车门架的有限元模型并进行了数值模拟分析，求出叉车门架焊接变形大小及趋势，得出了对叉车门架焊接变形进行预测与控制的一种方法。冯兆龙和朱丙坤利用大型软件 MSC MARC 有限元分析软件对 T 型接头的不同焊接方式进行了实时三维数值模拟，并对焊接残余应力分布以及角变形计算结果进行了分析说明。李娅娜等采用 MSC MARC 对焊接构架的关键部件－侧梁进行了焊接变形仿真计算，并对侧梁进行现场跟踪测量，分别得出侧梁的焊接变形计算结果与测量值，二者基本吻合。王军等针对起重机主梁盖板和腹板的箱形梁焊接残余应力及变形复杂等情况，采用 ANSYS 有限元方法，选取分段移动串行热源模型、热力耦合及生死单元技术，进行了焊接应力场及变形的数值模拟。高大晓等运用大型通用有限元计算软件 ABAQUS 对 Q235 薄板焊接温度场进行数值模拟，研究比较了常规 CO^2 保护焊及带强化散热装置的 CO^2 保护焊焊接过程中温度场的分布及发展过程。赵利华和张开林以热弹塑性理论为基础，采用 ANSYS 的 APDL 语言对侧梁进行焊接变形数值仿真计算，并对侧梁进行现场跟踪测量。其焊接变形仿真计算结果与测量值基本吻合，误差在 7% 之内。莫春立等、程久欢等、陈家权等分别总结和阐述了目前焊接问题数值模拟中采用的主要热源模型。蔡志鹏等通过分析焊接热源的特征要素，在 ANSYS 高斯热源的基础上，根据输入热功率相当提出段热源模型，并与点热源结合，进一步提出更加灵活实用的串热源模型。经验证明，可在保持精度的同时大幅度地缩短计算时间，从而使实际构件工艺的模拟、优化成为可行。

二、焊接热变形场数值模拟

1、数模简化及网格划分

叉车部件的三维数模在叉车设计部门专业的三维绘图软件中完成，然后导出成 IGES 格式的文件，由于 CAD 模型通常不会考虑 CAE 分析的需要，DesignModeler 是它们之间的桥梁。DesignModeler 全参数化实体建模，基于 ANSYS15.0 Workbench，提供适用于有限元计算的建模功能，包含具体模型的创建，CAD 模型的导入和修复，CAD 模型的简化以及概念化模型创建功能。叉车部件三维数模如图 1 所示。

根据焊接问题分析的特点，将模型中的全部体选中，组成一个新的部件，以便焊缝处能够共享节点，温度及应力结果过度平滑。本文采用串热源模型进行计算时，并且为了方便对焊缝进行分段，以三维几何模型中焊缝所在的自然线段的每段为一条焊缝。拟将所有的焊缝按照长度约为 50mm 进行分段。

Workbench 中的有限元网格算法可以分为协调分片算法和独立分片算法，协调分片算法的分片面及边界考虑零件实体间的相互影响采用小公差，常用于考虑几何体的小特征。可以用虚拟拓扑工具把一些面或者边组成，构成虚拟单元，从而减少单元数目，简化小特征，简化载荷提取，因此如果采用虚拟拓扑工具可以放宽分片限制。独立分片算法的分片不是太严格，通常用于统一尺寸的网格。本报告中车架部件的网格算法采用协调分片算法。分析此模型，最小厚度为底板厚度 30mm，为了保证计算精度，采用高阶单元算法，厚度方向上至少需要划分 2 层网格，故全局单元尺寸设置为 15mm，单元类型为六面体主导的网格类型，以六面体网格为主导，局部内部填充使用四面体单元。最终划分的网格单元数为 26044，节点数为 102768，如图 2 所示。

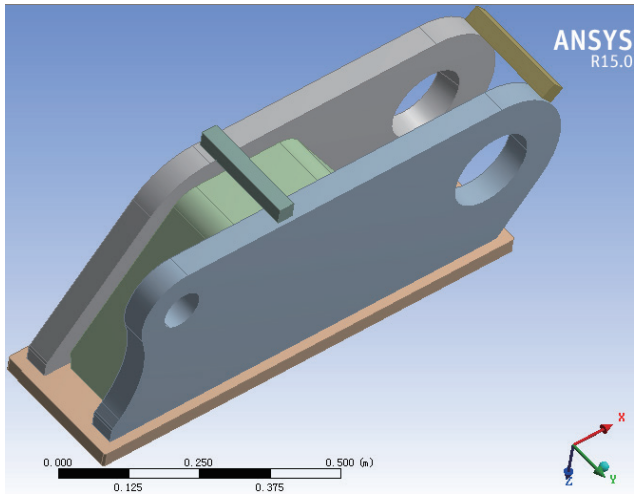

图 1 叉车结构件三维数模

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

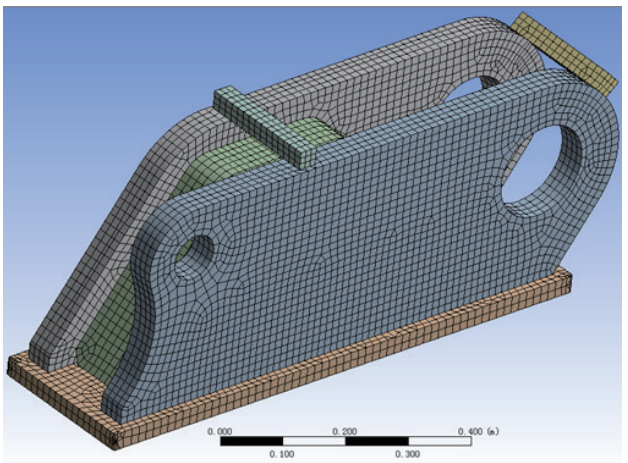

图 2 车架结构件网格模型

2、材料模型

焊接的力学性能和热物理性能参数对焊接过程数值模拟的结果和计算过程均有较大的影响，因此，也必然要对数值模拟的精度和准确性产生影响。结构件材料为 Q235 钢，输入的力学性能和热物理性能参数（弹性模量、屈服极限、比热容、热导率、线膨胀系数、泊松比等）均与温度相关，并在进行三维数值模拟时对材料高温性能参数进行假设，查阅工程材料手册可得到其主要参数随温度变化曲线，选取主要数据点如表 1 所示。

表 1 Q235 钢焊件材料热力学性能参数（国际单位）

温度 T	20	200	500	750	1000	1500	1700	2500
导热系数 λ	50	47	40	27	30	35	45	50
比热容 C	460	480	530	675	670	660	780	820
膨胀系数 α	1.1e-5	1.22e-5	1.39e-5	1.48e-5	1.34e-5	1.33e-5	1.32e-5	1.31e-5
弹性模量 E	2.05e11	1.87e11	1.5e11	0.7e11	0.2e11	0.2e11	0.2e11	0.2e11
屈服应力 σ_s	225e6	225e6	225e6	210e6	200e6	1e-5	-	-
泊松比 μ	0.28	0.29	0.31	0.35	0.4	0.49	0.48	0.5
密度 ρ	7820	7700	7610	7550	7490	7350	7300	7090

3、焊接串热源模型及参数

高斯热源模型指输入热流密度沿加热中心的半径方向为高斯函数分布。这种模型作为弧焊热输入方式的描述可以很好地模拟温度场，进而得到较好的应力、应变数值结果。但这种模型需要在空间上将焊缝附近区域的网格划分得很细，在时间上也要很多时间步进行迭代计算，计算量非常大。实际构件的工艺优化若采用高斯热源模型实现的困难很大。

点热源模型是一种理想热输出方式，描述在空间中一个无尺寸的几何点上输出热功率的大小。如果将段热源模型用一组点热源模型取代，形成一串点热源，则既可以减少计算量，又有使用上的灵活性。这种用一组点热源模型取代段热源模型的作用而形成的热源模型，称为串热源模型。对于串热源的描述只需指明在哪些节点上输入热功率的大小及加热时间。只要有节点即可施加点热源，不受节点所在面形状和方向的限制。而且可用鼠标直接点击需要施加的位置，可不用子程序去描述。

首先，斑点中心最大热流 q_M 及热源集中系数 K 的公式得到：

$$q_M = \frac{K}{\pi}\eta UI \qquad K = \frac{3}{R^2}$$

在段热源的基础上，加热长度为 d 的焊缝，单位时间内需要施加热量为：

$$Q' = q_M d\sqrt{\frac{\pi}{K}} = \frac{K}{\pi}\eta UI\sqrt{\frac{\pi}{K}}d = \eta UI\sqrt{\frac{K}{\pi}}d = \eta UI\sqrt{\frac{3}{\pi R^2}}d = \frac{\eta UI}{R}\sqrt{\frac{3}{\pi}}d$$

加热时间为：

$$t' = \frac{1}{v}\sqrt{\frac{\pi}{K}} = \frac{R}{v}\sqrt{\frac{\pi}{3}}$$

本文车架结构件的焊接工艺为 CO_2 保护焊，焊接热参数如表 2 所示。

表 2 车架结构件焊接参数

焊高 /m	电压 /V	电流 /A	焊速 /ms^{-1}	焊接热效率	有效加热半径 /m
0.02	32	300	0.005	0.7	0.02

按照上述焊接参数表，可得长度为 d 的焊缝焊接单位时间内总输入热量为：

$$Q' = \frac{\eta UI}{R}\sqrt{\frac{3}{\pi}}d = \frac{0.7\times 32\times 300}{0.02}\sqrt{\frac{3}{3.14}}d = 328000d(J)$$

焊接时间为：

$$t' = \frac{R}{v}\sqrt{\frac{\pi}{3}} = \frac{0.02}{0.005}\sqrt{\frac{3.14}{3}} = 4.10(s)$$

实际焊接时，将长焊缝分段，则每一小段的单位时间内的热输入仅与该段的长度有关，而加热时间仅仅与该段的焊速有关，焊速一定，则为常量。将车架结构件所包含的 40 条焊缝顺序用数字表示如图 3 所示。

先将件 2 和件 3 与件 1 分别焊接，将所有焊缝标记为数

字，共 8 条焊缝。

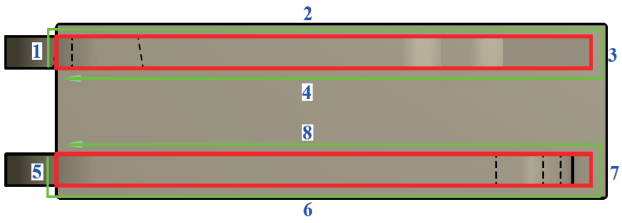

图 3(a) 焊缝 1-8 焊接顺序示意图

焊接工艺撑档 4 和 5，将所有焊缝标记为数字，共 12 条焊缝。在件 2 和件 3 的内侧堆焊，共 2 条焊缝。焊接件 6，共 12 条焊缝。焊接件 2 和件 3 的外侧，共 6 条焊缝。

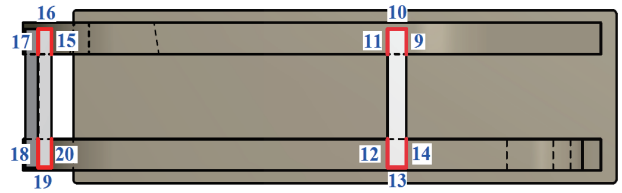

图 3(b) 焊缝 9-20 焊接顺序示意图

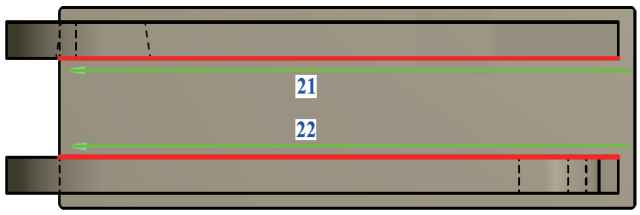

图 3(c) 焊缝 21-22 焊接顺序示意图

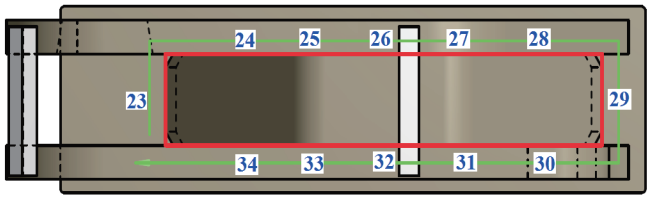

图 3(d) 焊缝 23-34 焊接顺序示意图

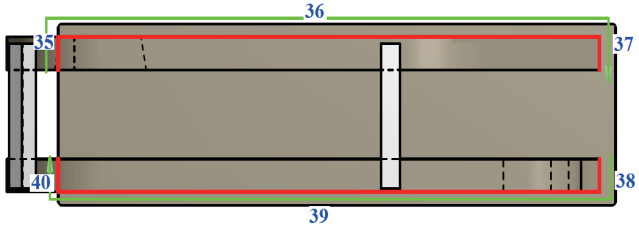

图 3(e) 焊缝 35-40 焊接顺序示意图

图 3 焊缝焊接顺序示意图

根据模型的几何尺寸，焊缝如 1、3、5、7 的长度约为 50mm 左右，是所有主要焊缝中长度最小的，因此，本项目采用串热源模型进行计算时，拟将所有的焊缝按照长度约为 50mm 进行分段，并根据本项目的焊接工艺参数及串热源模型计算得到每一小段焊缝的热流。

4、移动热源 APDL 程序加载

采用分段移动的串热源模型，其载荷施加的本质是，定义一个随时间和空间变化的热流，定义热流随时间变化主要是体现实际焊接过程中的焊接速度，定义热流随空间变化主要是体现实际焊接过程中的焊缝的逐步加热。

目前，Workbench 并不支持这种在线上施加随时间和空间变化的热流。为了能够清晰描述并施加焊缝的焊接顺序，方便检查及纠错，本文对每条焊缝分别编写一个命令流，40 条焊缝共添加了 40 个命令流。

车架部件的焊缝共有 40 条，按照长度约为 50mm 进行分段，可以将其分为 196 段，每段焊缝为一个时间求解步，所以，在创建加载的 APDL 命令流时，对分成 1 段焊缝的每个短焊缝施加一个载荷步，而对分割成许多小段的长焊缝，可以利用 APDL 的 do 循环语句施加多步载荷，多步载荷的步数与焊缝分割的段数一致。命令流较长，考虑篇幅所限，这里仅给出第一条焊缝的加载程序如下。

```
time,4.1*1          ! 焊接时间设置为 4.1s
autots,off          ! 关闭自动时间步长
fdele,all,heat      ! 删除前面施加的热边界
deltim,4.1,4.1,4.1  ! 初始、最小、最大时间步设置为 4.1s
cmsel,s,weld1       ! 选择之前定义的 weld1 几何命名组
f,all,heat,16400/4.1  ! 在选择的 weld1 节点上，施加热量
alls                ! 选择全部节点
outres,all,last     ! 仅保存最后一步的结果
lswrite,1           ! 写为载荷步文件 1
```

求解上述 196 个焊接热量施加的时间步，可以得到车架部件焊接过程的温度分布，注意在求解结果当中插入温度结果这一项。求解多个时间步的问题，采用如下的 APDL 语言命令加载，其意义可以解释为，顺序求解载荷步的第 1 步到第 196 步，记录每一步的计算结果。

```
lssolve,1,196
```

求解焊接热变形时，将焊接瞬态热分析的温度结果直接传递给瞬态应力分析，首先在工程流程图区建立瞬态应力分析模块，将瞬态热分析的几何数据、材料数据、模型数据传递给瞬态应力分析，这样在焊接变形分析时只需要定义问题

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn

的力学边界条件及加载步即可。

加载时首先将模型的底板面向上方向固定，然后求解按照 196 个焊接热量施加的时间步，便可以得到车架部件焊接过程的变形分布，注意在求解结果当中插入应力和变形结果这一项。求解多个时间步的问题，采用如下的 APDL 语言命令加载，其意义可以解释为，顺序求解由于焊接温度引起的载荷步的第 1 步到第 196 步，记录每一步的计算结果。

```
*DO,I,1,196,1
    TIME,4.1*I
    autots,on
    deltim,4.1
    outres,all,last
    alls
    ldread, temp ,,,4.1*I,, FILE, rth, 'F: files\dp0\SYS-2\MECH'
    LSWRITE, I
*ENDDO
  LSSOLVE,1,196
```

三、计算结果与试验结果对比及误差分析

计算温度场、应力场、变形场均收敛，可以对计算结果进行后处理。对于焊接过程云图，限于篇幅，本文仅给出焊接结束后结构件的焊接温度场分布、变形场分布及残余应力场分布。

1、温度分布

车架部件焊接结束后温度场分布如图 4 所示，焊缝周围的温度分布较高，远离焊缝区域温度分布较小，并且整个结构的最高温度约为 9300℃，最低温度为 36℃，比室温稍高。

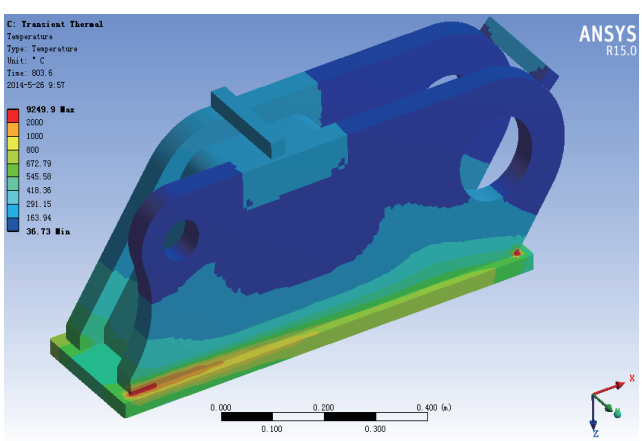

图 4 焊接温度场分布

2、变形分布及与实验结果对比

进行实际焊接时，将底板自然放置于地面，然后将其余各板件进行点加固，然后逐条焊缝进行焊接。焊接结束后，测量平板 1 和平板 2 之间距离的变化，测量时选取的测点位于图 5 的平板 1 和平板 2 的边缘红线上，经测量，发现平板 1 和平板 2 之间的距离变化为 0.50mm。

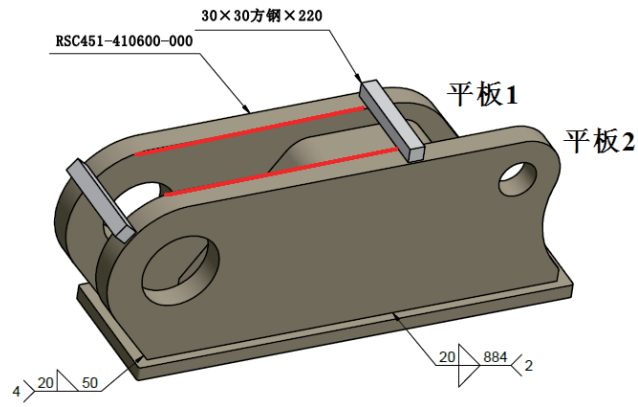

图 5 焊接变形测量示意图

按照实际焊接的测量结果，首先将部件结构变形图以网格形式显示，然后计算出与实际焊接时一致的两条线的距离，最后将此距离与实际测量结果进行对比。为了比较更加可靠，这里计算两条线距离的办法是，PROBE 出图 6 所示的平板 1 上边缘线各节点的位移，然后计算平均值，作为平板 1 边缘线的变形，依此，可以得到平板 2 边缘线的变形，具体节点位移及其平均值如表 3 所示。

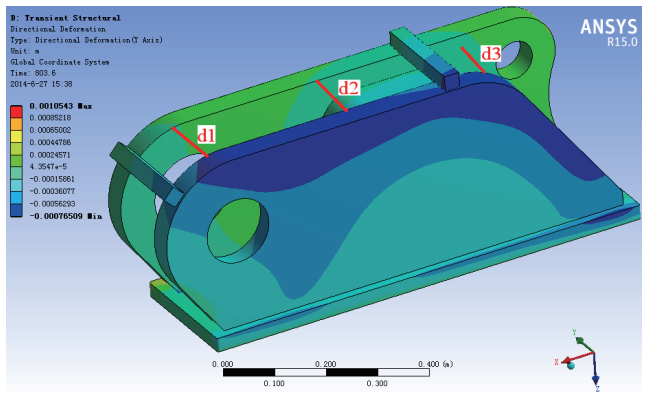

图 6 计算位移点示意图

由表 3 可见，车架部件焊接变形计算结果为 0.56mm，实验测试结果为 0.50mm，二者的误差为 10.7%，在工程实

（下转第 52 页）

为 9.9MPa，最大应力出现在固定车体的螺栓附近，转弯工况下，最大应力为 4.1MPa，最大应力位置为图示支架折弯处，颠簸工况的最大应力为 37.2MPa，位置与制动工况类似，出现在固定车体的螺栓附近。三种工况下，其最大应力都没有超过其材料的屈服强度 185MPa，整体满足设计要求。

五、结语

本文以某车型空滤器装置为研究对象，运用 CATIA 建立了空滤器装置几何模型，利用 HyperMesh 建立了装置的有限元模型，在此基础上，用 OptiStruct 求解器进行模态和冲击强度分析，分析和验证空滤器装置设计的合理性。

本文对空滤器进行模态分析后，发现其和发动机频率之间有共振分析，建议后期进行设计优化，以达到合理的频率区间，避开共振区域。

（上接第 47 页）

际和项目要求的误差 15% 的范围以内，满足要求，表明本报告所建立的焊接计算模型及算法是合理和可靠的，可以利用此方法进行后面有关车架焊接顺序的优化。

表 3 计算变形与实验测试变形比较

d1/mm	d2/mm	d3/mm	计算平均值 /mm	实验测试值 / mm	误差
0.56	0.58	0.55	0.56	0.50	10.7%

上述焊接变形图的显示与实验测试是一致的，仅仅是一个方向的位移，实际上真正的变形是三个方向的位移的合成，即本次计算及本报告最关心的焊接变形场的分布，计算结果如图 7 所示，这里给出的是总的位移变形场，可见，焊缝周边节点的位移较小，而远离焊缝的节点的位移较大，最大的焊接变形节点的位移为 1.4mm 左右。

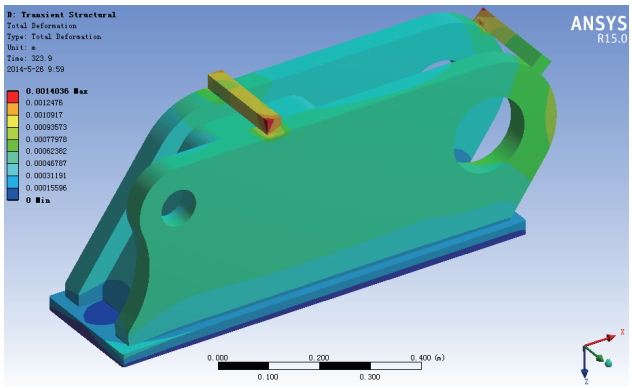

图 7 焊接变形场分布

3、焊接残余热应力分布

焊接结束后车架部件残余应力的分布如图 8 所示，可见，最大应力为 7.5GPa，最小应力为 0.18GPa，并且，焊缝周围应力水平较高，其应力水平基本上超过了材料的屈服应力，使材料进入了塑性状态，而远离焊缝处基本保持较低应力水平。

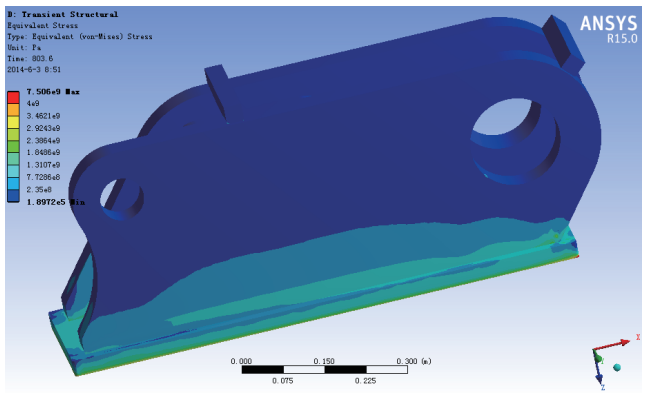

图 8 焊接应力场分布

四、结语

本文数值模拟计算得到叉车结构件的焊接温度场、应力场及变形场。对于温度场，焊缝周围的温度分布较高，远离焊缝区域温度分布较小，并且整个结构的最高温度约为 9300℃，最低温度为 36℃，比室温稍高。对于应力场，焊缝周围应力水平较高，其应力水平基本上超过了材料的屈服应力，使材料进入了塑性状态，而远离焊缝的地方基本保持了较低的应力水平。对于变形场，与实验测试结果进行了对比，二者误差为 10.7%，在要求的误差 15% 的范围以内，表明本文所建立的焊接计算模型及算法是合理和可靠的，可以利用此方法进行后面有关车架焊接顺序的优化。焊缝周边节点的位移较小，而远离焊缝的节点的位移较大，最大焊接变形节点的位移为 1.4mm 左右。

投稿邮箱 | cadcam@idnovo.com.cn
IMCHINA@idnovo.com.cn