

# 考虑焊接顺序的电力机车枕梁焊接变形预测

王 阳<sup>1</sup>, 罗 宇<sup>1</sup>, 刘海涛<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240;

2. 南车株洲电力机车有限公司, 株洲 412001)

**摘 要:** 根据枕梁实际建造工艺, 利用基于固有应变理论为基础的焊接变形分析系统软件 Weld - Sta 对电力机车枕梁的焊接变形进行计算. 首先采用分步装焊模拟法, 单独建立每一步的有限元模型, 并设置相对应的焊缝, 然后对每一步的焊接变形进行单独计算, 再将各步结果进行叠加得到最终变形结果. 然后采用整体同时焊接模拟法, 一次性计算整个模型的所有焊缝同时焊接后的变形, 最后将两种方法的最终变形结果与实测数据进行比较. 结果表明, 考虑分步焊接的方法更接近实测数据, 从而验证了该方法的可靠性, 为枕梁建造工艺的设计提供了理论指导.

**关键词:** 枕梁; 焊接顺序; 固有应变; 焊接变形; 焊接变形分析系统软件

**中图分类号:** TG 404 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 360X(2015)12 - 0101 - 04

## 0 序 言

电力机车的车底架枕梁是底架和转向架连接的部位, 是电力机车车体上的重要承载部件, 一般由枕梁型材、上盖板、下盖板、筋板、立板、簧座等部件构成. 车底枕梁的焊接变形决定了枕梁组成的平面度, 直接影响后期枕梁的加工质量<sup>[1]</sup>. 通过设计合理的焊接装配工艺, 从而获得理想的焊接变形补偿余量是控制焊接变形的有效方法. 但是在实际生产过程中, 焊接工艺的确定需要依靠大量的焊接试验从中积累足够的经验. 并且由于大型结构在焊接装配过程的随机性以及不可重复性, 使得焊接变形量的精确确定非常困难. 而采用数值模拟的方法, 通过大量的计算从而达到精度要求, 再应用于生产实践中. 对于节约焊接试验所需要花费的成本, 提高生产质量和效率, 以及电力机车车底架枕梁焊接工艺的优化有重要意义<sup>[2-4]</sup>.

为了准确地预测枕梁的装配变形, 文中根据枕梁实际的焊接顺序以及焊接工艺, 利用上海交通大学力学研究所开发的基于固有应变理论的焊接变形分析系统软件 Weld - Sta 对结构在装配过程每一个分步的焊接变形进行计算<sup>[5]</sup>. 然后将所有的变形结果进行叠加, 从而得到枕梁最终的焊接变形. 在此基础上, 通过与不考虑焊接顺序的计算方法以及实测数据在关键尺寸上进行对比, 验证了考虑焊接顺序的数值计算的必要性, 预测结果为枕梁焊接工艺

的制定提供了理论指导.

## 1 研究模型的建立

该枕梁位于电力机车 HXD1B 车底位置, 其由上盖板、下盖板、立板、簧座、枕引、隔板及筋板等部件组成, 模型零部件明细见表 1. 结构尺寸为 3 050 mm × 1 412 mm × 500 mm. 利用 Hypermesh 软件建立枕梁的有限元模型, 模型中每块板厚根据实际值确定, 并简化对整体焊接变形影响较小的附件, 如图 1 所示. 计算采用二维弹性板单元, 共有节点 4 711, 单元 4 864 个.

表 1 研究模型零部件明细  
Table 1 Parts of practical model

名称	数量	材质	厚度 t/mm
上盖板	1	20 低温容器板 16MnDR	16
下盖板	1	20 低温容器板 16MnDR	16
立板	2	20 低温容器板 16MnDR	16
簧座	2	20 低温容器板 16MnDR	16, 30
枕引	6	20 低温容器板 16MnDR	10
隔板及筋板	8	20 低温容器板 16MnDR	10, 12

## 2 枕梁装焊模拟

### 2.1 装焊工艺

枕梁装配时采用倒装法, 即装配时上盖板在下, 下盖板在上, 在工装上进行装配. 整个装焊过程为装焊簧座 (ASM1) → 组焊上盖板组成部件 (ASM2)

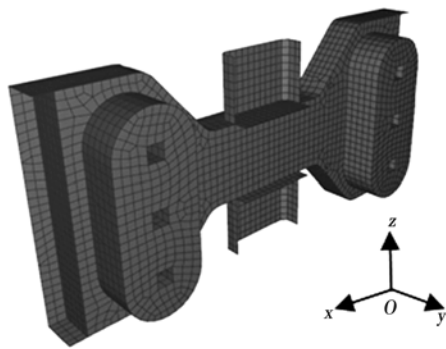


图 1 枕梁有限元模型  
Fig. 1 FE model of body bolster

→装焊内部筋板并点焊两侧立板与簧座→装焊下盖板→焊接两侧立板→焊接簧座与上、下盖板→装焊枕引,共分 7 步完成,有限元模拟装焊过程如图 2 所示.

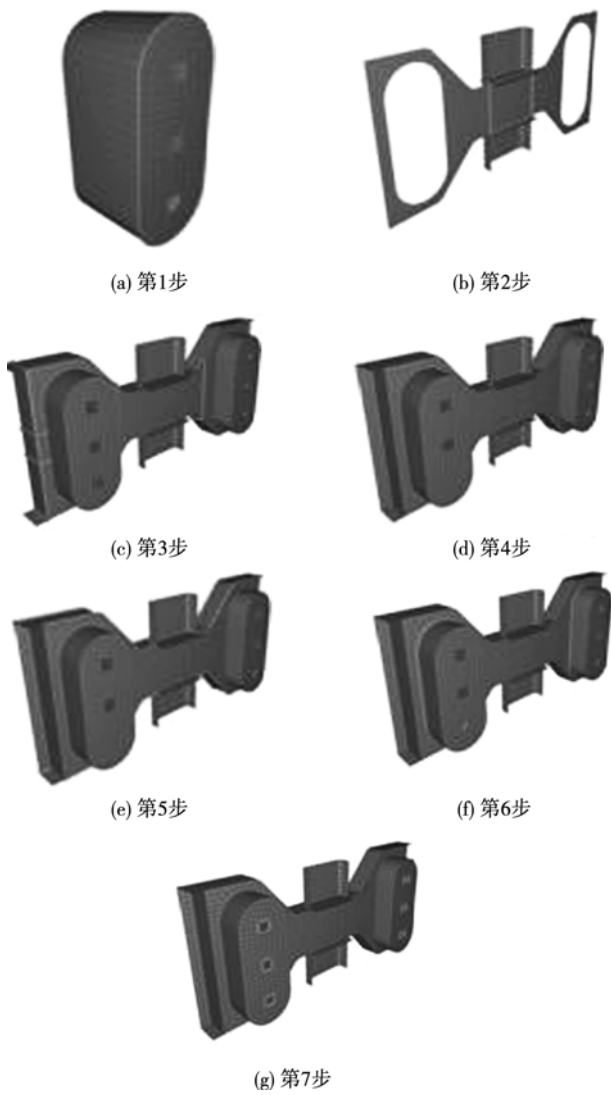


图 2 枕梁装焊过程示意图  
Fig. 2 Assembly process of body bolster

## 2.2 焊缝信息

采用固有应变法计算焊接结构的变形,需要输入结构中每一条焊缝的具体信息,包括母材材质、焊接方法、焊道数、接头尺寸、坡口尺寸、焊接电流、电弧电压、焊接速度、焊接拘束度、热效率等,然后利用固有应变数据库,计算出其在纵向与横向的固有变形.在枕梁实际的装焊过程中,采用的焊接工艺为熔化极活性气体保护焊(MAG),包括 10 种焊缝形式,以装焊第 4 步中其中一个接头为例,采用焊缝的接头形式如图 3 所示.其中立板厚度  $t_2$  为 16 mm,翼板厚度  $t_1$  为 10~12 mm,钝边  $b$  约为 1~2 mm,坡口角度  $\alpha$  约为  $45^\circ \sim 50^\circ$ .

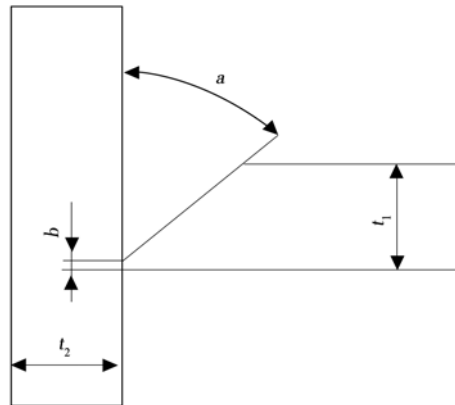


图 3 枕梁接头示意图  
Fig. 3 Weld joint of body bolster

## 2.2 同时焊接模拟

图 4 显示了同时焊接模拟的模型焊缝分布以及约束条件,为了与实际焊接工艺中的焊缝信息一致,同时焊接模拟中各个焊缝采用的固有变形值与考虑焊接顺序的模拟方法的固有变形值相同,对于约束条件,也与考虑焊接顺序的模拟方法一致.然后将所有焊缝同时进行计算,得到同时焊接模拟结果.

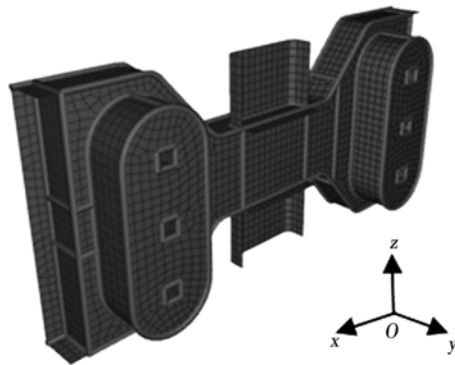


图 4 枕梁同时焊接模拟焊缝信息与约束条件  
Fig. 4 Welding lines and constraints of welding simulation without considering welding sequence for body bolster

3 结果与讨论

枕梁装焊第 5 步与整体同时焊接在  $x$  方向的变形云图如图 5 所示. 其中图 5 中的实线为结构的原始有限元模型轮廓线. 从图 5a 可以发现,由于该步焊缝均沿  $y$  方向分布,因此收缩主要发生在  $y$  方向,在  $x$  方向只产生了少量的变形. 而采用整体同时焊接模拟时, $x$  方向的最大变形发生在下盖板处,变形量的两个极值相加超过了 8 mm.

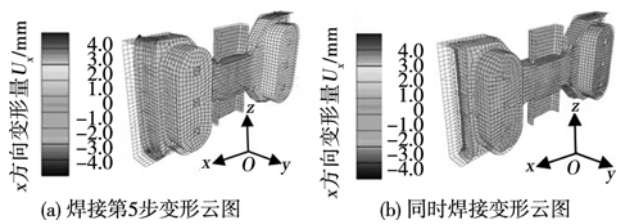


图 5 枕梁焊接变形模拟结果  
Fig. 5 Simulated results of welding distortion in body bolster

表 2 显示并计算了枕梁关键尺寸的分步焊接模拟每一步的焊接变形量与累积变形总值. 从表 2 可以发现,不同焊接步时,由于焊缝的数量和位置不同,产生的变形大小以及主要变形的方向均不相同. 在第 1 步装焊时,由于 ASM1 部件并没有涉及表 2 中所列尺寸的变形,因此在这步的焊接变形模拟值均为 0;而第 2 步到第 3 步的装焊则没有涉及到下盖板,从整个表可以发现,这两步的装焊主要影响的是结构的弯曲绕度;第 4 步装焊的 8 条焊缝主要为  $y$  方向,并且为短焊缝,且均在下盖板上,因此其对上盖板  $x$  方向的收缩影响很小;第 5 步焊接两块立板,且焊缝长度最长,其对于上下盖板以及孔距的收缩

表 2 考虑装焊顺序的枕梁焊接变形模拟数值  
Table 2 Simulated results of welding distortion in body bolster considering welding sequence

焊接步骤	上盖板 $x$	下盖板 $x$	孔距 $x$	弯曲绕度 $\gamma/\text{mm}$
	方向变形量 $U_{ux}/\text{mm}$	方向变形量 $U_{lx}/\text{mm}$	方向变形量 $U_{hx}/\text{mm}$	
第 1 步	—	—	—	—
第 2 步	0.53	—	—	0.33
第 3 步	0.46	—	0.21	1.98
第 4 步	0.33	0.840	0.30	0.34
第 5 步	3.06	3.740	2.40	0.70
第 6 步	1.25	1.570	0.69	0.31
第 7 步	0.10	0.093	0.16	0
总共	5.73	6.240	3.76	3.66

均有明显的影响;第 6 步装焊为 4 条环焊缝,焊缝长度相对较长,且主要为  $z$  方向的焊缝,但其产生的横向变形对于上下盖板和孔距的收缩量影响不如第 5 步明显;最后一步装焊,由于焊缝长度很短,且数量较少,并且此时整体结构对焊缝有较大的约束,因此其产生的变形量最小.

表 3 比较了考虑焊接顺序装焊计算结果、整体同时焊接计算结果与实测数据之间的差异. 结果表明,采用分步焊接进行预测时,变形结果更接近实测数值. 图 6 为考虑焊接顺序的下盖板各个节点第 4 步、第 5 步、第 6 步的  $x$  方向的变形与同时焊接时  $x$  方向的变形的比较. 从图 6 中可以发现,采用同时焊接的方法在下盖板在  $x$  方向的收缩量比采用分步焊接法计算得到收缩量要大. 这是因为考虑焊接顺序时,下盖板的焊接为第 4 步、第 5 步和第 6 步,之前 3 步的焊接对于下盖板的变形并没有影响,从分步焊接模拟结果可以发现,最后一步的焊接对于下盖板的收缩影响很小,因此影响下盖板收缩的焊缝只有第 4 步、第 5 步和第 6 步输入的 14 条焊缝. 而进行整体同时焊接计算时,所有的焊缝均对下盖板的收缩产生了影响,因此下盖板在同时焊接时产生的收缩量比分步焊接大;整体同时焊接所计算得到的收缩量在上盖板长度和孔距上两个尺寸小于分步

表 3 两种方法的模拟结果与实测结果比较  
Table 3 Comparison of simulated results by two methods with measured results

方法	上盖板 $x$	下盖板 $x$	孔距 $x$	弯曲绕度 $\gamma/\text{mm}$
	方向变形量 $U_{ux}/\text{mm}$	方向变形量 $U_{lx}/\text{mm}$	方向变形量 $U_{hx}/\text{mm}$	
分步焊接模拟法	5.73	6.24	3.76	3.66
同时焊接模拟法	4.11	8.15	3.40	2.27
实测	6.25	6.94	4.00	4.57

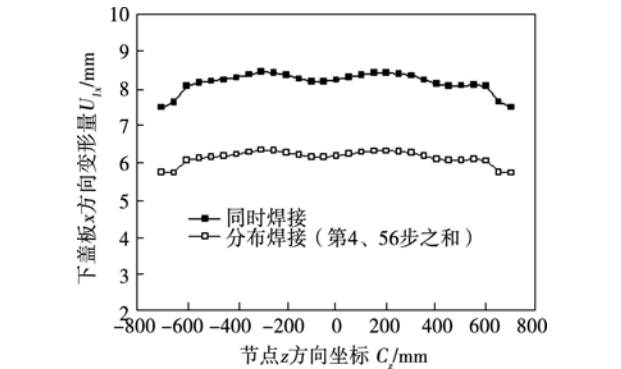


图 6 不同模拟方法对下盖板收缩的影响  
Fig. 6 Influence of different simulated methods on shrinkage of column cover

焊接所计算得到的总收缩量,这是因为进行分步焊接模拟时,这两个尺寸的在前几步均有比较明显的收缩,并且分步焊接在前几步中结构本身的约束相对于整体焊接结构本身的约束要小,结构相对于整体焊接时更易收缩;比较两种数值模拟方法在孔距  $x$  方向的变形可以发现,两种数值模拟方法得到的结果差别相对其它尺寸要小,这是因为影响孔距  $x$  方向变形的步骤主要集中在第 7 步,而此时的约束性与采用整体同时焊接法的结构约束性没有差别,并且影响孔距  $x$  方向变形的焊缝也集中在翼座上;在弯曲绕度上的变形,整体同时焊接时,结构本身产生的约束影响更为明显,采用整体同时焊接所计算出的弯曲绕度只有实测值的 49.6%,因此在需要考虑弯曲绕度时,必须采用分步焊接才能获得相对精确的数值。

## 4 结 论

(1) 考虑焊接顺序的数值模拟方法与不考虑焊接顺序整体同时焊接的数值模拟方法在计算结果上有比较明显的差别,这是由于两种方法在结构自身的约束和不同顺序焊缝的影响导致。

(2) 考虑焊接顺序的数值模拟方法更接近结构实际建造情况,得出的预测结果比不考虑焊接顺序整体同时焊接的数值模拟方法计算出的结果更接近实测值。

(3) Weld - Sta 软件对于大型结构的焊接变形

预测简单实用,为大型结构焊接时补偿量或收缩量的确定提供数据支持和理论指导。

## 参考文献:

- [1] 贺 楠, 许立勇, 谷祥帅. 大功率交流电机车枕梁簧座焊接工艺优化[J]. 技术与市场, 2013, 20(2): 13-14, 16.  
He Yu, Xu Liyong, Gu Xiangshuai. Welding techniques improving to the spring pedestal of high-power AC electric locomotive[J]. Technology and Market, 2013, 20(2): 13-14, 16.
- [2] Deng D, Murakawa H, Liang W. Numerical simulation of welding distortion in large structures[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2007, 196(4): 4613-4627.
- [3] Deng D, Liang W, Murakawa H. Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements[J]. Journal of Material Processing Technology, 2007, 183(2): 219-225.
- [4] Wang Y, Xue J, Luo Y. Sequence optimization of hull structure assembly based on prediction of welding deformation[J]. China Welding, 2013, 22(4): 47-52.
- [5] Murakawa H, Deng D, Ma N S. Concept of inherent strain, inherent stress, inherent deformation and inherent force for prediction of welding distortion and residual stress[J]. Transactions of JWRI, 2010, 39(2): 115-116.

**作者简介:** 王 阳,男,1986 年出生,博士研究生. 主要从事大型复杂结构的焊接变形预测与控制. 发表论文 7 篇. Email: maible@sjtu.edu.cn

**通讯作者:** 罗 宇,男,博士研究生导师. Email: luoyu@sjtu.edu.cn

## [上接第 68 页]

- Xing Li, Ke Liming, Liu Geping, *et al.* Microstructure and mechanical properties of a friction stir welded LD10 aluminum[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(6): 55-58.
- [6] Lin S B, Zhao Y H, Wu L. Integral and layered mechanical properties of friction stir welded joints of 2014 aluminum alloy[J]. Materials Science and Technology, 2006, 22(8): 995-998.
  - [7] 周鹏展, 李东辉, 贺地求, 等. 2219-T87 厚板搅拌摩擦焊沿厚度方向的性能差异[J]. 焊接学报, 2007, 28(10): 5-8.  
Zhou Pengzhan, Li Donghui, He Diqiu, *et al.* Through-thickness diversity of properties in friction stir welded 2219-T87 thick aluminum alloy plate[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(10): 5-8.

tion, 2007, 28(10): 5-8.

- [8] 董继红, 聂绪胜, 鄢江武, 等. 常规 FSW 与双轴肩 FSW 对铝合金接头组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(7): 85-88.  
Dong Jihong, Nie Xusheng, Yan Jiangwu, *et al.* Effect of welding ways on microstructure and mechanical properties of 6082 aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(7): 85-88.

**作者简介:** 张会杰,男,1985 年出生,博士,副研究员. 主要从事机器人化搅拌摩擦焊工艺及机理研究. 发表论文 20 余篇. Email: zhanghuijie@sia.cn