

基于有限元法的车架仿真分析与试验研究

黄丽芳,尹晓春,姜亮,肖欣
(南京理工大学 理学院,江苏 南京 210094)

摘要:针对某钢厂 250 t 钢包车车架结构的变形和局部破损问题,采用有限元方法对车体与钢水包开展静力学仿真。建立钢水包与钢包车的三维几何模型,将几何模型导入 Hypemesh;建立三维有限元模型;将有限元模型导入 ANSYS 的结构分析模块进行计算。结果显示,原有钢包车长期使用后会出现局部破坏,并且和现场一致。基于计算结果,对车体结构进行优化,显著提高了车体的局部强度和整体承载能力。

关键词:钢包车;有限元;强度分析;结构破坏;优化

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2021)05-0095-04

Simulation Analysis and Experimental Research of Frame Based on Finite Element Method

HUANG Lifang, YIN Xiaochun, JIANG Liang, XIAO Xin

(School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: With regard to the deformation and local damage of the frame of a 250 t ladle car in a steel plant, the finite element method is used to carry out the static simulation of the car body and the ladle. The three-dimensional geometric model of ladle and ladle car is established and introduced into Hypemesh, by which the three-dimensional finite element model is built. The structural analysis module of ANSYS, by import of the finite element mode, is conducted for calculation. The results show that the original ladle truck will be damaged locally in long term use, and is consistent with the site. Based on the calculation results, the structure of the car body is optimized, and the local strength and the overall bearing capacity of the car body are improved remarkably.

Keywords: ladle car; finite element; strength analysis; structure damage; optimize

0 引言

炼钢厂的钢包车用于将钢水包运输到精炼车间或连铸生产线。由于钢水包内装载着高温液态钢水,一旦在运输过程出现转向失灵或者车体断裂,极可能导致盛装钢水的钢包倾翻,造成严重的安全事故^[1]。因此,提高钢包车的结构可靠性,降低钢包车的损坏,是钢包车设计的主要任务,具有重要的工程意义。

某钢厂 5 号 250 t 钢包车于 2012 年投入生产。使用中,车体两侧出现了长约 1 m 的裂缝(图 1 和图 2 黑线),开裂位置位于传动侧距轨面标高 1.51 m、与贯穿横板焊接的东、西两侧立板焊缝处。在原始设计中,钢包车车体的最大计算应力为 245 MPa,位于台车中部。实际断裂处的设计应力约为 50 MPa,断裂处计算的应力约为屈服强度的 1/7,安全系数足够。而在实际工作中,断裂位置与设计计算不符。因此,需要进行精确的三维有限元分析,重新校核强度,找到开裂原因,进而提出结构优化的设计方案,修复结构,并使修复后的钢包车满足安全生产要求。

1 钢包车结构与材料

钢包车与钢包整体结构是由车架整体与钢包、钢水组



图 1 现场车体西侧开裂处



图 2 现场车体东侧开裂处

成,其中钢包与钢水作为辅助结构,用于验证钢包车结构的可靠性与稳定性。钢包车主要由弹簧支座(用于放置钢包)、车架体、盖板、车轮组(包括从动车轮和主动车轮)、溜槽等结构组成。该钢包车为全钢焊接的空间结

构,体积庞大,吨位重,车体承受钢水包质量和自质量、运输过程的冲击与振动以及可能的温度载荷。

车体长 12.57 m、宽 6.15 m、高(含钢水罐)5.75 m,体积 68.197 m³,总质量 535.35 t。钢包车车架材料为 Q345-B,密度 $\rho=7\ 850\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=206\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$ 。各种规格材料主要设计参数见表 1。

表 1 Q345-B 许用应力一览表

厚度/mm	屈服极限 σ_s/MPa	安全系数	许用应力/MPa	
			$[\sigma_m]$	$[\tau_m]$
$t < 16$	345	1.50	230	133
$16 < t \leq 35$	325		217	125
$35 < t \leq 50$	295		197	114
$50 < t \leq 100$	275		183	105

2 有限元理论基础

钢包车车架的静态特征主要体现在车架结构的静刚度上。静刚度是结构在特定的动态激励下抵抗变形的能力,一般用结构在静载荷作用下的变形情况来衡量。分析车架结构静刚度的主要目的是:

1) 避免车架上其他功能部件工作时由于过大的变形产生干涉现象,导致钢包倾覆;

2) 保证钢包车不会因刚度不足等原因明显地影响浇铸设备之间的连接。

在已知外载和各节点的约束条件下,就可以得到各节点的位移 δ 、应变 ε 及应力 σ 。对钢包车结构采用 8 节点实体单元进行三维建模,能够准确体现车架的应力变化情况和位移变化情况^[2]。

8 节点实体单元的几何矩阵是^[3]

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{B}_3 \cdots \mathbf{B}_8] \quad (1)$$

式中

$$\mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

根据形函数的定义可以发现,形函数的计算精度与单元体的尺寸有关。竖向隔板和横向垫板之间的垂直焊接处存在应力集中现象,该处应力场变化剧烈。因此为了提高计算结果准确性,在网格划分的处理上,缩小该部位的网格尺寸,即该部位网格加密,使载荷准确传递,并提高计算结果准确性。

8 节点实体单元的形函数表示为

$$N_i = \frac{1}{8}(1+x_i)(1+y_i)(1+z_i)$$

其中 $i=1,2,\dots,8$ 。

应力矩阵为

$$\mathbf{S} = \mathbf{D} \times [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \mathbf{B}_3 \cdots \mathbf{B}_8] \quad (2)$$

式中:

$$\mathbf{D} = 6VA_4 \begin{bmatrix} 1 & A_1 & A_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & 1 & A_1 & 0 & 0 & 0 \\ A_1 & A_1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & A_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_2 \end{bmatrix}$$

其中: $A_1 = \frac{\mu}{1-\mu}$; $A_2 = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)}$; $A_4 = \frac{E}{121+\mu A_2 V}$; V 为 8 节点实体单元个体积。

式中: μ 为泊松比; E 为弹性模量。

其中: $\mathbf{B}^e \{\sigma\}^e = \{\varepsilon\}$, $\mathbf{S}^e \{\sigma\}^e = \{\delta\}$, 按照虚功原理方程为

$$\iiint \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dx dy dz = \{\varepsilon\}^T \{\mathbf{R}\}^e \quad (3)$$

有单元刚度矩阵为

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \cdots & k_{18} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \cdots & k_{28} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{81} & k_{82} & k_{83} & \cdots & k_{88} \end{bmatrix} \quad (4)$$

通过单元刚度矩阵可得整体刚度矩阵 \mathbf{K} , 整体刚度矩阵方程为

$$\mathbf{K} \{\sigma\} = \{\mathbf{R}\} \quad (5)$$

3 有限元仿真

3.1 建立几何模型

模型的建立,一方面要尽量保留原实体结构的细节,反映局部危险部位对车架应力的影响,另一方面,为减少有限元计算量,亦需要对危险部位进行结构简化^[4]。采用 SolidWorks 建立几何模型,在满足分析要求的前提下,对现有结构的一些零件进行简化,忽略小零件的作用。根据钢包车整体图样的设计,主要简化了盖板和车轮组,去掉了溜槽部位。简化后的整体主要由钢包、弹簧座、车轮组和车架组成。图 3 为经过简化后的钢包车模型。

3.2 划分网格

在车架结构的有限元模型建立所选择的单元类型中,早期时主要采用壳单元进行结构离散,但壳单元的有限元模型计算的结果误差较大,并对复杂结构的模拟能力有限^[5]。现在主要选择 8 节点实体单元进行有限元网格划分,8 节点实体单元(Solid 185)对应力传递和结构变形都能够准确表述,并且加上荷载后,能够模拟实际工况中可能出现的变形情况^[6]。根据网格划分的规则^[7],保证计算的准确性:1) 在应力分布均匀处进行规则离散;2) 在与车轮组连接的不规则处进行手动过渡,保证网格疏密有致;3) 在实际工况中断裂部位加密网格划分;4) 有效地控制总体网格数目和质量。图 4 显示了开裂部位周围的网格划分。

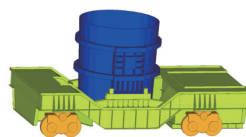


图 3 车体几何模型

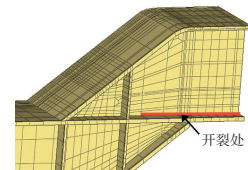


图 4 开裂周边网格分布

3.3 边界条件

由于钢包车在运行过程中,主要承担的是钢包与钢水及其自身的静力作用。主要有3个约束条件:1)实际情况中钢包是可以脱离钢包车的,因此弹簧支座与钢包之间建立接触约束,约束钢包在Z方向(即宽度方向)的位移;2)在车轮组处,轴轮与大车轮外壳两组结构建立接触约束,车轮组与车架之间建立刚性连接;3)为了准确地模拟钢包车在运行时的受力与变形,将车轮组放置在轨道上,建立接触约束,并对轨道底面施加完全约束。主要约束位置如图5所示。

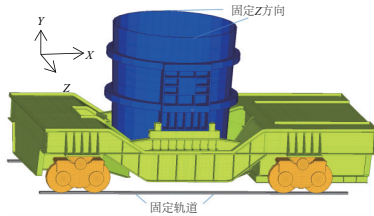


图5 边界约束布置

3.4 施加荷载

钢包车荷载参数见表2。

表2 钢包车荷载参数 单位:t

运载能力	最大冲击荷载
250	375

在分析钢包车的结构强度时,考虑了在各种工况中的受力情况。本文展示了对其中最危险的一种工况的分析,即考虑作用在钢包车上的所有荷载。荷载的传力路线主要是:钢包和钢水的质量最初施加在车架的弹簧支座处,随后再由弹簧支座通过刚性连接传递给车架其他部分,最后通过车架整体与车轮组的刚性连接传递至车轮组及轨道上。

根据《YB/T4224—2010 冶金用钢水罐车和铁水罐车技术规范》行业标准,初步设计计算只选择最恶劣的工况,即钢包满载时垂直冲击工况,并且考虑钢包车在运行过程中的横向冲击荷载^[8]: F (竖向模型施加载荷) $=G$ (满载钢包自质量载荷) $\times h$ (动载冲击系数) $=250 \times 1.5 = 375 \text{ t}$ 。将375 t的竖向模型施加载荷作为面载荷均匀施加在罐座载荷面上,并且在X方向施加 1.5 m/s^2 的加速度。将有限元模型导入ANSYS结构静力学分析模块,进行计算。

4 有限元计算结果与分析

4.1 钢包车有限元云图分析

图6显示了车架体的整体应力云图。位于车架体腹板与边部相焊接处,传动侧东侧和西侧各构件交接处,最大应力达到413 MPa,超过Q345-B的屈服强度。因此,可以推测传动侧东侧和西侧裂纹是由此处开裂并延展的。在车架传动西侧板,最大应力为557 MPa,在车架传动东侧板,最大应力为489 MPa,两侧最大应力远超Q345-B

的屈服强度。由于底部应力传递到竖向隔板,导致竖向隔板和横向垫板之间的垂直焊接处出现了裂缝。图7显示了车架体的整体位移分布。由图可见,中间腹板部分位移最大,车体与车轮组连接处位移最小,车架体的位移分布符合受力情况。根据有限元结果,没有出现车架体发生位移突变现象,虽然车架体表面有局部破裂,但是不影响整体变形。

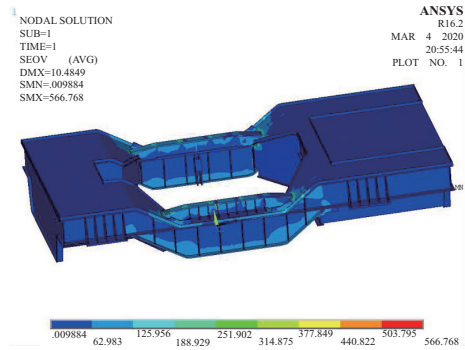


图6 车架应力分布图

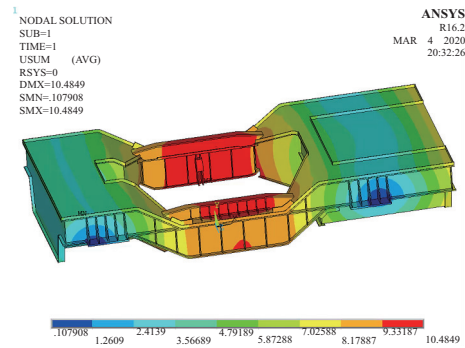


图7 车架位移分布图

钢包车的车架体结构复杂,为了清晰地呈现有限元计算结果,绘制应力分布曲线与位移分布曲线。选取沿X方向具有应力分布代表性的某一直线提取数据,该直线通过东、西侧破裂点。如图8和图9所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者),车架体东、西侧的应力曲线和位移曲线基本吻合,由于车架体的南北方向(X方向)不是对称结构,东西方向(Z方向)为对称结构,在理论计算下,对称结构的应力应变结果也基本对称,证明有限元模型契合实际且可靠。图8显示,车架体应力在车体破损处急剧升高,超过了钢的屈服强度,且明显高于两侧应力,产生了显著的应力梯度。

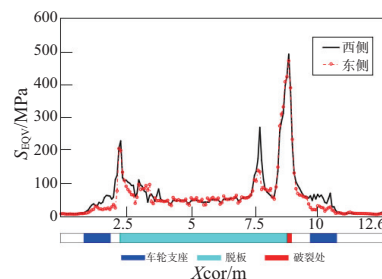


图8 应力分布曲线图

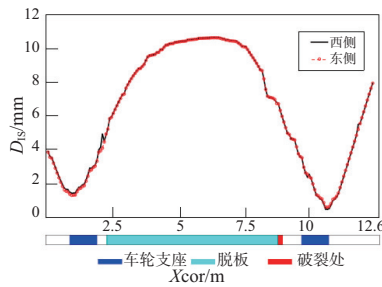


图9 位移分布曲线图

4.2 钢包车开裂原因

通过现场照片和现场察看可以明显看出:焊缝裂纹沿焊缝方向延伸,焊肉完整但与母材脱离,母材表面完好无撕裂。据此分析,钢包车车体存在未焊透、未熔合等焊接缺陷。未焊透会降低焊缝的疲劳强度,可能使裂纹源造成焊缝破坏。通过有限元模型的计算,发现钢包车在实际使用过程中的开裂部分,与有限元模型计算所得的结果相吻合,即出现裂缝处达到了 Q345-B 的屈服强度,力从折角连接处传递到了上部焊接处,导致焊接处出现开裂。

4.3 车架结构优化方案

由于现场条件的限制,无法快速地重新设计钢包车,即在无法改变钢包车的长、宽、高的情况下,初步按照以下步骤对现有损坏的钢包车进行调整^[9]:

- 1) 将损坏部位去除,包括部分贯穿横板和裂纹处的上部部分钢板;
- 2) 上部钢板(立板厚度为 50 mm,中间增加抗弯人字筋)按图样要求预制好,将与原贯穿横板及中部连接梁等结合部位处打剖口。添加构件具体部位如图 10 所示,钢板结构尺寸如图 11 所示;
- 3) 与原车体焊接,剖口处必须焊透,焊后超声波探伤检查;
- 4) 新焊接部位去应力处理。

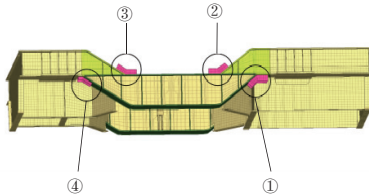


图10 优化添加的构件

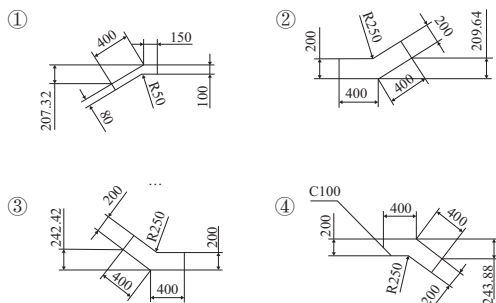


图11 加固构件结构图

结构优化后,相同约束条件和冲击荷载下,车架东西侧板部位的最大应力从 413 MPa 降低至 180 MPa 左右(图 12-图 13)。通过添加构件的优化方式,极大地提高了车架的承载能力。

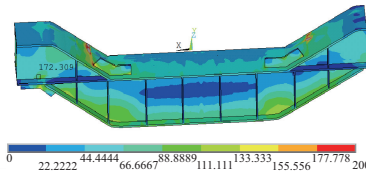


图12 优化后西侧局部应力图

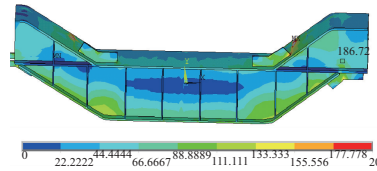


图13 优化后东侧局部应力图

5 结语

1) 结合某钢厂的实际工况,有限元分析结果与现场实际工况一致,表明有限元模型准确可靠,计算结果真实可信。有限元分析表明,在实际工况下,钢包车整体位移分布无异常,局部破裂处位移没有突变。局部应力突然变大,应力梯度明显,符合现场破损情况。

2) 基于钢包车的应力和应变分析,对车体结构进行优化,使局部应力从 400 MPa 下降至 180 MPa 左右,证明该优化方案符合结构设计要求,结构优化过程操作简单,经济性良好。

3) 车体的有限元建模方法适用于各种大型结构件,能够准确分析车体的强度和刚度性能,为车体设计、校核与优化提供可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] 于宾,樊斌,任中立,等. 多轴式无轨钢包车转向机构仿真与优化设计[J]. 现代制造工程,2018(7):74-78.
- [2] 黄妮,冯燕,戴作强,等. 氢燃料电池客车车架多工况疲劳可靠性分析[J]. 机械制造与自动化,2019,48(5):17-21.
- [3] 赵海丰,蒋迪. ANSYS 8.0 工程结构实例分析[M].北京:中国铁道出版社,2004.
- [4] 高广军,田红旗,姚松. 有限元三维实体单元与壳单元的组建模问题研究[J]. 中国铁道科学,2002,23(4):52-54.
- [5] 冯国胜. 客车车身结构的有限元分析[J]. 机械工程学报,1999(1):91-95.
- [6] 刘鹏,冯国胜. 某重型钢水罐车车架结构的有限元分析及优化[J]. 石家庄铁道学院学报,2006,19(2):68-71.
- [7] 马星国,王旭旭,尤小梅,等. 高速行驶工况下履带车辆车体刚强度分析[J]. 中国工程机械学报,2014,12(2):168-171.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. YB/T 4224—2010 冶金用钢水罐车和铁水罐车技术规范[S]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [9] JIAO M, GUO X H, WAN D D. Finite element analysis and lightweight research on the bed of a large machine tool based on HyperWorks [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 121/122/123/124/125/126:3294-3298.

收稿日期:2020-09-28