

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2014.04.009

# 条烟配送笼车的结构强度分析与轻量化设计

李庆, 李光

(湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 采用ADAMS分析软件对条烟配送笼车在主副笼叠加运输方式中的载荷进行了分析, 得到主笼车在设定条件下的最大载荷值。在此基础上, 利用有限元分析软件对主笼车进行应力和形变计算, 结果表明, 现有的笼车强度和刚度均有较大的设计裕量, 可对其进行轻量化设计。按照方管设计的国家标准, 通过减薄钢管壁厚进行了轻量化设计, 并对其进行了应力和形变分析。对比分析结果可知, 对笼车开展的轻量化设计, 不仅可以满足现有条烟配送运输要求, 同时节约了笼车的制造成本, 减轻了配送运输过程中的空载质量, 有效地提高了运输效能, 减小了运输能耗。

**关键词:** ADAMS; 条烟配送; 有限元分析; 轻量化设计

中图分类号: TB125

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2014)04-0049-05

## Structural Strength Analysis and Light-Weight Design of Cigarette Distribution Cage Vehicle

Li Qing, Li Guang

(School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** The maximum load of the main cage in the setting condition was obtained through analyzing the load of cigarette distribution in the main and auxiliary cage car transportation mode by ADAMS analysis software. Based on it, the stress and deformation of the main cage were calculated through the finite element analysis software. The result showed both stiffness and strength of the current cage could be re-designed to achieve weight reduction. According to the national standard, the tube wall thickness was reduced with the subsequent analysis of the stress and deformation. The lightweight design of cage car could not only meet the current cigarette distribution requirements, but also reduce manufacturing cost and unladen weight in the transportation process, which could effectively improve the transport efficiency and reduce energy consumption.

**Key words:** ADAMS; cigarette distribution; finite element analysis(FEA); lightweight design

## 0 引言

随着烟草行业由卖方市场转向买方市场, 我国开始实行城乡一体、“一库制”集中配送新模式<sup>[1]</sup>。该

配送模式以各地配送中心为依托, 各城市配送中心以城市范围为配送范围, 直接配送到最终用户卷烟零售商, 再由其销售到用户手中。因此, 其配送过程具有多品种、少批量、多用户的特点。具体的配

收稿日期: 2014-06-16

基金项目: 湖南省研究生科研创新基金资助项目(CX2014B426)

作者简介: 李庆(1989-), 男, 江苏苏州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为包装机械, E-mail: 416590279@qq.com

通信作者: 李光(1963-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事包装机械方面的教学与研究,

E-mail: liguanguw@126.com

送流程如图 1 所示。

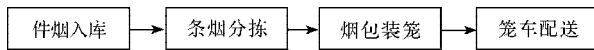


图 1 条烟配送流程

Fig. 1 The cigarette distribution process

目前, 各个配送中心均采用具有金属框架的笼车对烟包进行二次封装, 再将笼车装载至配送车上, 最后以笼车为单元送到零售商店。因此, 二次封装用笼车在配送过程中起着极为重要的作用。其设计应满足如下要求: 1) 封装安全可靠, 不容易被破坏; 2) 具有一定的强度和刚度, 能承受装卸和运输过程中的冲击和碰撞, 有效地保证内包装物(条烟)不受到挤压而损坏; 3) 在满足强度和刚度的前提下, 尽量减轻质量, 以减少运输过程中的空载质量。

运输过程中的冲击和振动是引起包装件破损的主要原因<sup>[2]</sup>, 因此, 本研究拟针对某烟草物流中心的配送笼车进行运输过程中的载荷分析。

ADAMS 软件是目前世界上具权威性的多体动力学仿真软件, 它能进行高精度仿真, 再现工程中出现的实际情况。ADAMS 中的 Contact Force 可用来描述物体运动时的相互作用力, 本文拟通过它进行仿真求解货车行驶过程中颠簸主笼受到的碰撞力。通过有限元软件对笼车进行强度分析, 以期在保证笼车强度、满足运输要求的前提下, 通过适当设计以减轻笼车的质量, 为优化笼车结构, 提高运输效率提供设计依据。

## 1 笼车运输过程的载荷分析

### 1.1 包装笼车介绍

图 2 所示为目前各个配送中心对烟包进行二次封装时常用的笼车模型。

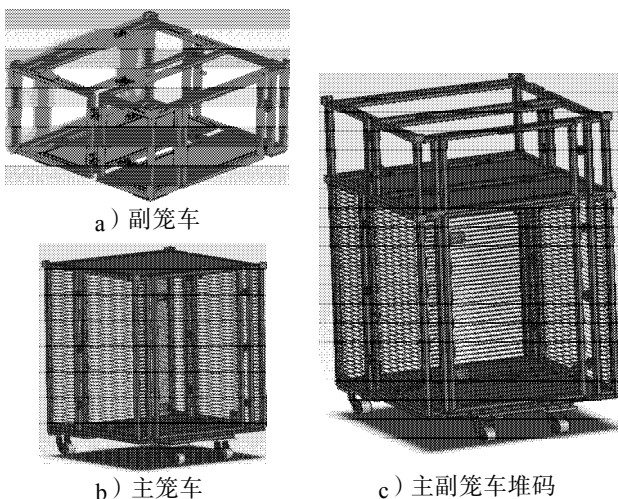


图 2 笼车模型

Fig. 2 The model of cage car

条烟配送笼车由具有金属框架的主、副笼车组成, 该笼车采用型钢做框架, 再焊上筛网的形式。笼车的材质采用 Q235 钢, 型钢是 30 mm × 30 mm × 2.5 mm 的方管, 具体的尺寸及结构参数见表 1。

表 1 包装笼车的相关参数

Table 1 Related parameters of packing cage

笼车	内腔长 $L$ /	内腔宽 $W$ /	高 $H$ /	空载质量 / 满载质量 /	
	mm	mm	mm	kg	kg
主笼	930	900	1 420	180	432.0
副笼	930	900	540	60	152.4

### 1.2 载荷分析

笼车在运输过程中主要承受本身的自重、内装条烟的载荷以及运输过程中由于路面起伏不平而产生的冲击重力载荷等作用。相较而言, 其中的冲击载荷较大, 笼车的应力变形主要是由运输过程中的冲击载荷产生的。

#### 1.2.1 冲击力的计算

由于城市道路中货车行驶遇到的路障大多数是减速带, 故本文以货车行驶减速带为例分析笼车所受到的碰撞力, 将减速带对货车车厢造成的冲击力近似为向上的半正弦冲击激励, 如式 (1)<sup>[3]</sup>:

$$x(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} h \sin\left(\frac{\pi vt}{s}\right), & 0 \leq t \leq \frac{s}{v}; \\ 0, & t > \frac{s}{v}. \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中:  $h$  为减速带的高度;

$v$  是货车的行驶速度;

$s$  是减速带的宽度。

由于货车自身有一定的缓冲减振功能, 使得车厢所受的激励幅值比实际路面障碍物高度小, 实测型号为 EQ1156W3 的东风汽车在 B 级路面行驶的缓冲减振程度约为 50%<sup>[4]</sup>。

#### 1.2.2 碰撞力的计算

ADAMS 中有两种计算碰撞力的方法: 一种是补偿法 (restitution), 即用恢复系数来计算碰撞力; 另一种是冲击函数法 (impact), 即用刚度系数和阻尼系数来计算碰撞力。本文选用冲击函数法求解主笼受到的碰撞力, 其函数定义为:

$$F = \begin{cases} 0, & q > q_0; \\ k(q_0 - q)^e - C_{\max} \left(\frac{dq}{dt}\right) \text{step}(q, q_0 - d, 1, q_0, 0), & q \leq q_0 \end{cases} \quad (2)$$

式 (2) 中:  $k$  为刚度系数;

$e$  为碰撞指数;

$C_{\max}$  为最大阻尼系数;

$d$  为切入深度;

$q$  为函数中的距离变量;

$q_0$  为开关量, 指初始距离, 利用函数计算去确定其值。

式(2)中采用 step 函数, 它的形式为  $\text{step}(x, x_0, h_0, x_1, h_1)$ , 按下式计算:

$$\text{step} = \begin{cases} h_0, & x \leq x_0; \\ h_0 + a \cdot \Delta^2 (3 - 2\Delta), & x_0 < x < x_1; \\ h_1, & x \geq x_1. \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中:  $a = h_1 - h_0$ ;  $\Delta = (x - x_0) / (x_1 - x_0)$ 。

### 1.2.3 碰撞参数的设定

碰撞中涉及刚度系数、碰撞指数、阻尼系数和切入深度4个参数。由于本文模型的碰撞是钢与钢碰撞, 因此刚度系数  $k$  在这里取默认值, 碰撞系数  $e$  取1.5; 最大阻尼系数  $C_{\max}$  表示碰撞能量的损失, 其值一般设定为刚度系数的0.1%~1.0%<sup>[6]</sup>; 切入深度  $d$  表示用时非常短, 作用力非常大, 具有高度非线性, 本研究中取0.1。

### 1.2.4 仿真参数的设定

仿真过程中的参数主要包括积分器、积分格式、积分误差和步长控制<sup>[6]</sup>。

1) 积分器。ADAMS 积分器中常用的数学积分方法有 Gstiff 和 Wstiff。由于主笼车和副笼车的车厢碰撞时间较短, 需要高稳定性的积分器, 故这里使用 Wstiff 积分器。

2) 积分格式。ADAMS 里面有 I3、SI2 和 SI1 3种积分格式, 其中 I3 的计算速度快但精度较差, SI1 的求解准确度高但是计算量较大。这里主要考虑碰撞力的精确度, 故选用 SI1。

3) 积分误差。积分误差大, 计算速度快, 最终结果会产生较大误差。系统默认误差是0.001, 考虑到降低误差, 一般使用误差为0.000 1。

4) 步长控制。本文的碰撞过程是一个比较短暂的过程, 所以步长是对结果影响最大的因素。如果步长过大, 结果与实际情况相差很大, 故本研究中选取步长精度在  $10^{-4}$  s 以上。

### 1.2.5 碰撞结果的分析

由分析可知: 主副笼车堆码时, 主笼车不仅受到上面的副笼车产生的碰撞力, 而且还受到下面车厢地板对它的碰撞力。因主笼车相对于副笼车受到的载荷较大, 故只对主笼车进行分析。汽车以40 km/h 的车速路过不同高度的路障(减速带)时, 主笼车所受的碰撞力如图3所示, 汽车以不同的速度路过高度为50 mm 的路障(减速带)时, 主笼车所受的碰撞力如图4所示。

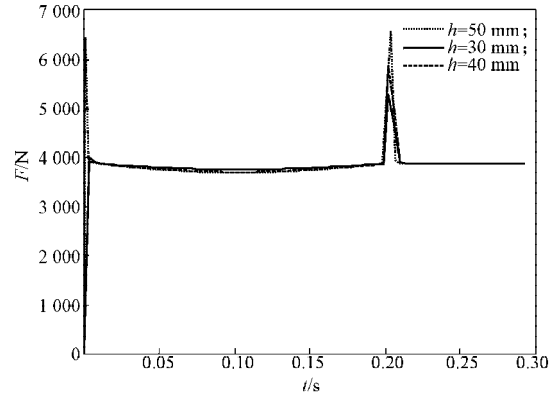


图3 不同高度路障下主笼车受到的碰撞力

Fig. 3 The impact on main cage from barriers with different heights

由图3可知, 当汽车以40 km/h 的车速路过高度为30 mm 的路障(减速带)时, 主笼车所受的碰撞力为5369.5 N; 路过高度为40 mm 的路障(减速带)时, 主笼车所受的碰撞力为5919.3 N; 路过高度为50 mm 的路障(减速带)时, 主笼车所受的碰撞力为6543.6 N。这一结果表明, 路过路障的高度越高, 汽车所受的碰撞力越大。

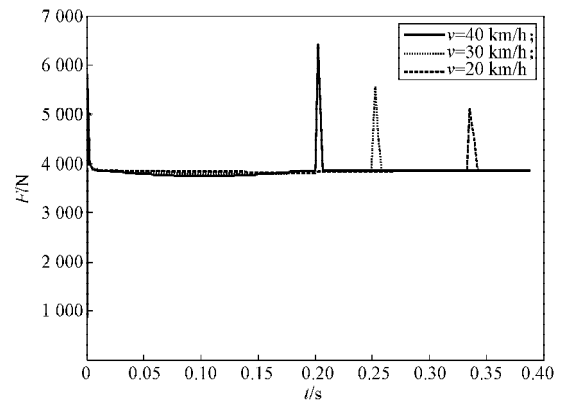


图4 不同速度下主笼车所受的碰撞力

Fig. 4 The impact on main cage with different speeds

由图4可以看出, 汽车以不同的速度路过高度为50 mm 的路障(减速带)时, 主笼车所受的碰撞力随着速度的增加呈增大的变化趋势。

### 1.2.6 碰撞力的求解

根据 ADAMS 软件仿真结果分析, 可知影响主笼车受到碰撞力大小的因素有车速和路面障碍物高度, 且随着它们取值的增加而增大。当以货车速度  $v=40$  km/h, 减速带高度为50 mm 进行计算时, 可得此时主笼车受到的碰撞力  $F=6543.6$  N。

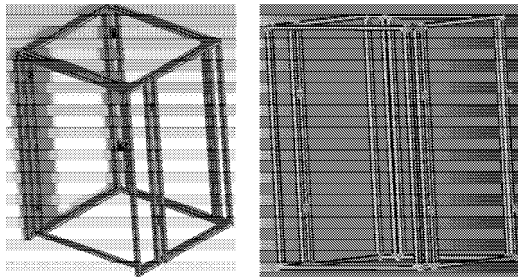
## 2 包装笼车的有限元分析

本文采用 Hypermesh<sup>[7]</sup> 软件作为网格划分工具。该软件能在保证质量的前提下, 快速完成整个笼车

模型的网格划分工作。采用 Hypermesh 软件快速划分复杂模型四面体网格时的基本思想是先生成面网格，然后由面网格生成体网格。安装在笼车上的铰链先采用小尺寸划分网格，随后其他方管用较大尺寸划分，最后修复连接处的网格。完成面网格之后需进行网格清理，清理 2D 网格可采用 Hypermesh 自带的 Auto Cleanup 功能自动清理加手动调整，然后检查模型网格的封闭性，最后由面网格生成体网格。当某些网格不能生成体网格时，必须要重新调整，直至能生成体网格为止。

### 2.1 笼车模型的建立

使用 solidworks<sup>[8]</sup>软件建立笼车模型，并且保存为 .step 格式，再导入 Hypermesh 软件中，见图 5。



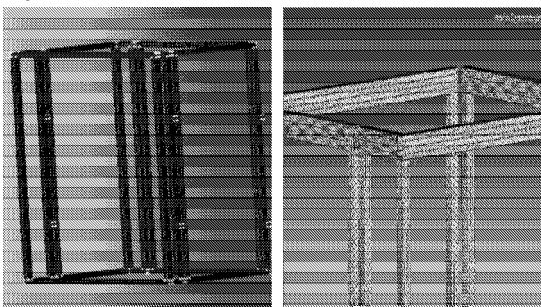
a) solidworks 模型 b) 导入 Hypermesh 后模型

图 5 包装笼车模型

Fig. 5 The packing cage model

### 2.2 模型网格的划分

将模型中的一些倒角、圆角以及不主要承受力的小型零件忽略，对笼车模型进行简化，然后将所有零件粘接在一起的简化模型进行有限元分析。设定该模型的弹性模量  $E=2 \times 10^5$  MPa，泊松比  $\mu=0.3$ ，密度  $\rho=7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>。进行网格划分后的笼车模型如图 6 所示。



a) 网格划分 b) 局部放大

图 6 笼车模型网格划分

Fig. 6 Mesh cage car model

### 2.3 约束与施加载荷

把划分网格后的笼车模型导入 ABAQUS<sup>[9]</sup>软件中，进行定义约束、载荷和约束边界条件后，利用软件对此受到载荷作用产生的变形、应力等进行计算，最后分析计算结果，得到物体受力后的应力及

位移分布图。这种有限元分析可用于形状复杂的零件，且计算结果精确度较高，所以在诸多工程领域的分析中获得了广泛应用。

利用 Hypermesh 软件划分网格后，将其保存并导入 ABAQUS 软件中进行应力-应变分析。边界条件完全约束住底面的所有自由度，在主笼车与副笼车接触的平面施加均布载荷，如图 7 所示。

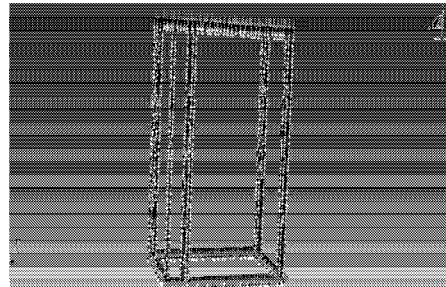


图 7 约束与加载

Fig. 7 Constraint and load

### 2.4 有限元分析结果

图 8 所示为主笼车碰撞力的变形分析结果，图 9 所示为主笼车碰撞力的应力分析结果。

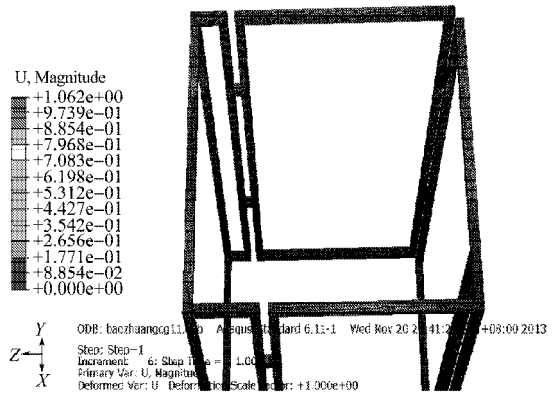


图 8 冲击载荷下的变形分析结果

Fig. 8 The deformation analysis result under impact load

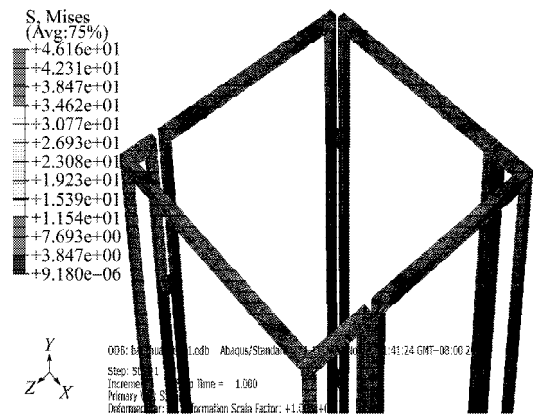


图 9 冲击载荷下的应力分析结果

Fig. 9 The stress analysis result under the impact load

由图 8 可得，包装笼车在冲击碰撞时刻产生的最大变形为 1.062 mm，小于标准材料 Q235 钢的许可变

形量(为2 mm);由图9可得,包装笼车在冲击碰撞时刻产生的最大应力为46.16 MPa,小于许可应力(为158 MPa)。

### 3 包装笼车的轻量化设计

根据上述有限元分析结果可以得知,现有的笼车强度和刚度均有较大的设计裕量,可以对其进行轻量化设计。按照方管设计的国家标准,将钢管壁厚减薄到1.2 mm,经计算可得每组主副笼车质量减轻61.4 kg。此时,由轻量化后的笼车ADAMS仿真分析得知,在前述设定条件下,笼车所受的碰撞力 $F=4\ 548.9\text{ N}$ 。图10所示为轻量化后的碰撞力变形分析结果,图11所示为轻量化后的碰撞力的应力分析结果。由图10可得,在冲击碰撞时刻,笼车的最大变形为1.548 mm,小于标准材料Q235钢的2 mm许可变形量;由图11可得,在冲击碰撞时刻,笼车的最大应力为59.40 MPa,小于许可应力158 MPa。

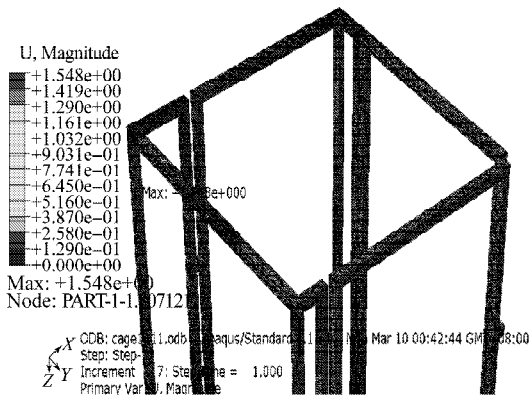


图10 轻量化后冲击载荷下的变形分析结果

Fig. 10 The deformation analysis result under impact load with lightweight design

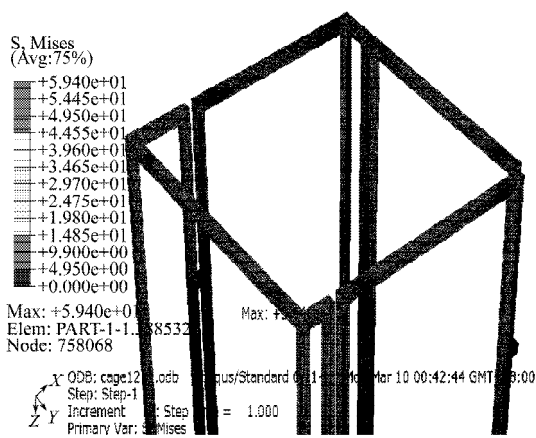


图11 轻量化后冲击载荷下的应力分析结果

Fig. 11 The stress analysis result under the impact load with lightweight design

在笼车强度满足运输要求的前提下,轻量化后

的主副笼车减轻了61.4 kg,以每辆汽车装载10组主副笼车计算,轻量化设计后每辆汽车装载减轻了614 kg,很大程度上节约了笼车的制造成本,还减轻了配送运输过程中的空载质量,有效地提高了运输效能,减小了运输能耗。

### 4 结语

本文分析了现有烟草物流配送过程及其二次包装笼车的设计要求。在此基础上,根据运输的路况特点,以ADAMS软件计算出主副笼车在运输颠簸时受到的碰撞力,得出车速、路面障碍物高度对碰撞力的影响。货车行驶的速度越快、障碍物高度越高,系统的响应越激烈,碰撞力越大。通过有限元分析软件Hypermesh和ABAQUS软件对已有笼车进行了强度和刚度计算,发现其设计有较大的安全裕量。因此,根据型钢厚度的国家标准,选择壁厚规格小一个级别的型材对其进行了轻量化设计,所设计的笼车质量减轻了10.5%,同时,在运输过程中的振动冲击载荷作用下,其强度与刚度仍然满足设计标准的要求。

笼车的轻量化设计不但能节约笼车的制造成本,还能有效地降低物流配送过程的空载载荷,有效地提高其运输效能,减小运输能耗。本研究为优化笼车结构、提高运输效率提供了设计参考依据。

### 参考文献:

- [1] 罗伟,罗孝龙,吴漫,等.烟草条烟物流包装转运系统优化研究[J].物流工程与管理,2014,36(7):127-129,65.  
Luo Wei, Luo Xiaolong, Wu Man, et al. Tobacco Logistics Packaging Transport System Optimization Research[J]. Logistics Engineering and Management, 2014, 36(7): 127-129, 65.
- [2] 张连文,杨传民,孟宪文,等.圣女果运输包装件振动冲击性能实验研究[J].振动工程学报,2011,24(1):73-77.  
Zhang Lianwen, Yang Chuanmin, Meng Xianwen, et al. Vibration and Impact Performance Tests of Saint Fruit Transport Packages[J]. Journal of Vibration Engineering, 2011, 24(1): 73-77.
- [3] 杨晓谦.运输过程中堆码包装件碰撞分析[D].无锡:江南大学,2011.  
Yang Xiaolian. The Analysis of Collision of Stacking Package in the Transportation Process[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011.

(下转第68页)

