

# 基于 CAE 的机械式双模轮胎定型硫化机底座结构分析与优化

张志<sup>1</sup>, 侯文超<sup>2</sup>, 张晓琳<sup>1</sup>, 刘全泽<sup>1</sup>

(1. 青岛海琅智能装备有限公司, 山东 青岛 266400 ;  
2. 陕西延长石油集团橡胶有限公司, 陕西 西安 710000)

**摘要** : 机械式双模轮胎定型硫化机作为主要的轮胎硫化设备之一目前在我国轮胎行业中大量使用, 虽然其传动结构特性导致精度不如新兴的液压结构硫化机高, 但是其凭借较低的成本价格仍然有较可观的市场价值。因此对于现有机型设备挖掘提升其精度也是技术升级的一个重要方向。本文基于专业 CAE 软件 *ansysworkbench*, 对机械双模硫化机现有部分机型中底座的结构进行结构静力学分析, 着重对于影响合模精度的底座刚度变形进行仿真和优化, 为 CAE 参与已有设备优化升级提供参考借鉴。

**关键词** : 轮胎定型硫化机 ; CAE 结构静力学仿真 ; 底座结构优化

**中图分类号** : TQ330.8

**文献标识码** : B

**文章编号** : 1009-797X(2024)06-0065-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2024.06.014

全钢 B 型机械式双模轮胎定型硫化机 (本文以 LL-B1665 热板加热机型为例, 以下简称机械式双模硫化机) 是轮胎进行定型硫化的主要现用设备之一。其对轮胎模具提供合模压力的工作原理为通过电机减速机和齿轮传动系统, 将电能转化来的机械能通过连杆和横梁以及调模结构施加到硫化室的模具上固定板上, 由固定安装有隔热板和热板的底座上面和上下垂直移动的模具上固定板组成最终的合模加力空间。机械式双模硫化机在实际的设备使用过程中, 会出现轮胎硫化产品飞边、合模力不足或超合模力等与力结构相关的问题。发生上述故障问题的主要原因多与合模限位开关位置不准确、调模位置不准确、合模面凹凸不平, 左右合模力不均匀等有关。从设备参与合模加力的结构上看底座、热板和模具上固定板是直接影响合模加力后形变的主要部件。本次我们排除上述调试和制造因素, 单纯选择加力部件中的底座, 结合 CAE 软件进行结构静力学分析, 探究旧有机型底座单纯在力学机构上的优缺点, 优化其结构, 使其总体设备精度得到提高。

CAE 技术是指运用计算机辅助求解复杂工程和产品结构强度、刚度、屈曲稳定、动力响应等多学科的一种仿真技术。通过赋予关键的数据信息如材料、载荷、约束等结合合理的网格化模型可通过大量的数据算法实现对真实事物的实景模拟。模拟结果的逼真程

度与各关键数据的真实性、数学算法的适用性以及计算机性能等息息相关。目前主流的商用工业应用 CAE 软件有 *ansysworkbench*、*abaqus*、*fluent*、*adams* 等, 不同软件根据模拟场景的不同可在结构、流体、电磁、热等方面进行模拟, 既可以进行单个场的模拟也可进行复合场的模拟。经过多年的软件和计算机硬件发展, 目前的模拟结果对大部分场景已经有较大参考价值。本次我们对机械式双模硫化机底座进行结构静力学分析使用的是 *ansysworkbench* 软件。在使用 CAE 技术时, 根据研究的对象不同, 尽量分析剥离出主要影响模拟的因素并依此合理的简化模型是得到可靠结果并降低计算量的有效方法。由于我们此次分析的底座是已有的产品结构, 通过长期实用验证可知其强度已满足实际使用要求, 刚度才是影响精度的主要因素, 所以我们本案例模拟主要围绕底座在最大额定压力下的刚度形变展开。

本次探究的思路是: 首先结合实际机械式双模硫化机生产时存在问题分析底座结构, 针对其结构可能造成问题的点提出假设; 然后通过构建理想化的简化模型使用 CAE 软件进行分析验证; 对于验证产生的不

作者简介: 张志 (1989-), 男, 工程师, 工艺工程师, 主要从事硫化机、成型机等橡塑装备的生产工艺制定、制造可行性评估, 结构成本优化等工作。

收稿日期: 2024-01-02

利结果进行结构优化并再次使用 CAE 技术验证, 最后逐步迭代优化改进至相对理想的目标状态。以下为主要实施过程:

## 1 结合实际分析并提出假设

结合实际机械式双模硫化机生产时存在问题分析底座结构, 并提出假设。机械式双模硫化机生产过程中的主要与力结构有关问题有轮胎定型硫化时飞边, 通过对硫化机合模情况分析, 观察底座现有结构(见图 1)后可得目前影响合模精度跟底座相关的可能因素有:

(1) 底座上面板与热板(隔热板)的接触面不足, 热板在伸出底座情况下, 伸出部分的热板在满负荷压力下产生了比较大的形变, 从而影响合模精度造成轮胎飞边。

(2) 底座现有结构刚性不足, 在满负荷压力下产生不均匀的较大形变, 影响合模精度造成轮胎飞边。

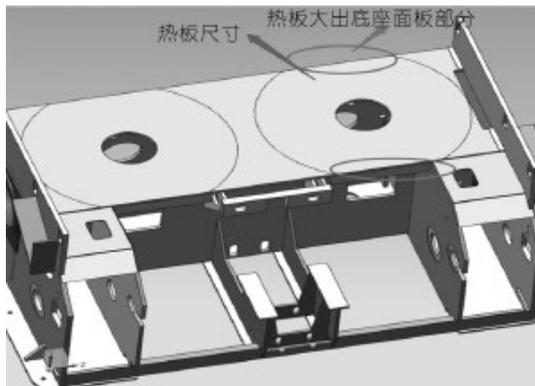


图 1 底座现有结构

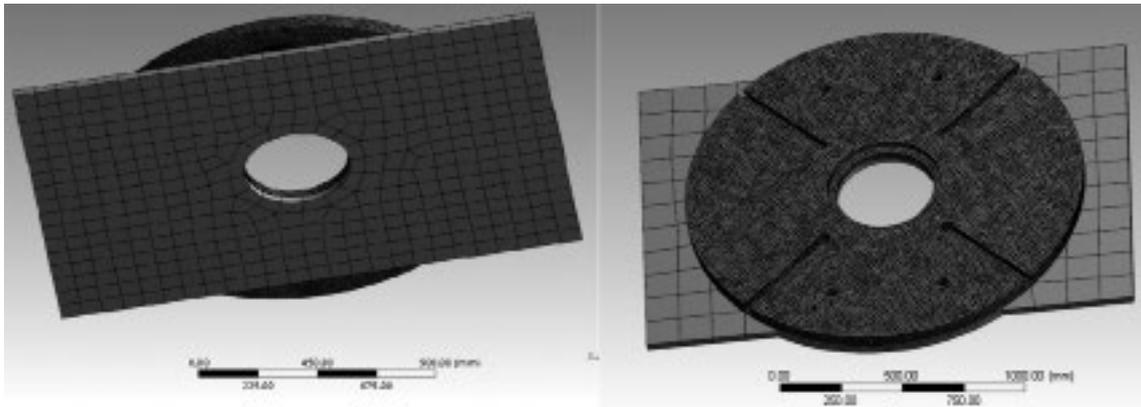


图 2 不同上面板接触情况的简化网格模型

而在面全接触状态下, 热板的形变均匀有序, 无两侧变形情况(见图 4)。所以从仿真结果可知, 以目前的

## 2 通过 CAE 手段验证假设

### 2.1 对比验证底座上面板现尺寸是否对热板形变造成较大影响

#### 2.1.1 模型简化

验证底座上面板尺寸大小对热板形变的影响可简化为热板在现有结构情况下和全面接触情况下两者不同的形变对比。对此首先理想化认为底座的刚度完全满足要求(隔热板刚性较低, 简化掉不予考虑, 实际工况中的温度因素在模拟中不予考虑)。据此我们建立用于模拟的简化对比模型。(见图 1)

#### 2.1.2 CAE 结构静力学分析主数据设定

(1) 材质:

a. 底座上面板 -Q235B

质量密度:  $7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量:  $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、泊松比: 0.274, 屈服强度:  $2.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

b. 热板 -Q345

质量密度:  $7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量:  $2.06 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ 、泊松比: 0.28, 屈服强度:  $3.45 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

(2) 约束条件: 上面板底面固定, 上面板与热板间摩擦接触, 热板模拟螺栓孔连接固定。

(3) 受力: 顶面 4 220 kN 压力。

其它影响模拟结果因素控制: 热板模型一致, 热板网格划分一致(网格密度 扭曲度 网格质量基本一致且满足分析要求)(见图 2)。

#### 2.1.3 CAE 仿真结果对比

通过 CAE 仿真可得, 在现有上面板的尺寸结构下, 热板在两个悬空位置有较为明显的形变倾向(见图 3)。

热板刚度, 底座上面板与热板(隔热板)的接触面不足会造成热板产生一定的形变, 但形变的大小值暂不

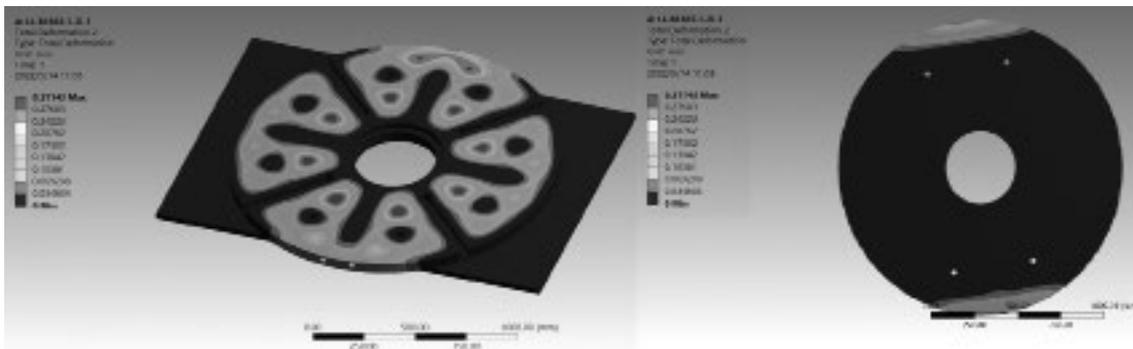


图 3 现结构底座上面板与热板接触 - 热板变形

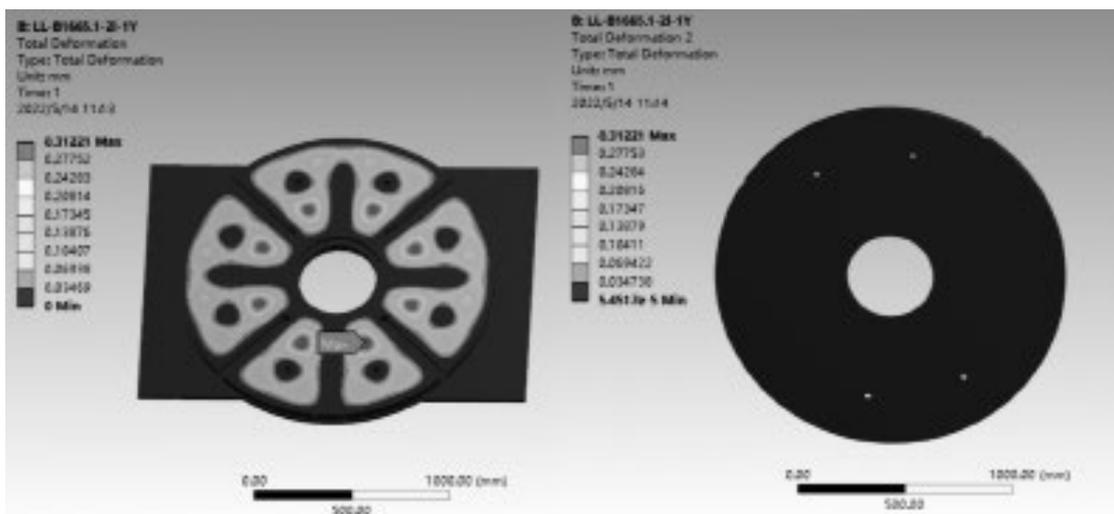


图 4 全接触底座上面板与热板全接触 - 热板变形

能直接判定对轮胎飞边造成了直接影响。

虽然此仿真假定在底座结构整体刚度完全达标，且被硫化的轮胎规格为最大尺寸，最大合模力下的极端情况下，与实际的工况有一定差异性。但是依然可推断出在现有热板结构下，使用全面接触的底座面板对提高整体设备的精度有积极意义。所以后期结构设计时对于热板接触面的设计尺寸应尽量满足全接触。

## 2.2 CAE 验证底座现有结构是否刚性不足，在满负荷压力下产生不均匀的较大变形

### 2.2.1 模型简化

通过对机械式双模硫化机合模结构分析，简化后用于分析的模型只需保留底座、曲柄齿轮，以及两者间传力的铜套。为降低计算量，对于双模硫化机的对称结构，底座可只取一半结构进行对称设置分析。同时简化模型可将与仿真结果相关不大的孔等特征进行

优化去除。(见图 5)

### 2.2.2 CAE 结构静力学分析主数据设定

(1) 材料：

a. 底座 - Q235B (板)

质量密度： $7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量： $2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，泊松比：0.274，屈服强度： $2.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

b. QT500-7 (轴承板) / 曲柄齿轮 - QT500-7

质量密度： $7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量： $1.62 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，泊松比：0.293，屈服强度： $3.2 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

c. 铜套 - QSn4-3

质量密度： $8.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量： $1.1 \times 10^{12} \text{ N/m}^2$ ，泊松比：0.33，屈服强度： $1.1 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

(2) 约束条件：铜套与底座绑定接触，曲柄齿轮与铜套摩擦接触，底部板固定约束。

(3) 受力：上热板 (隔热板) 接触面施加力向下力 4 220 kN，曲柄头施加向上轴承力 4 220 kN。

其它相关设置：网格集中于上面板区域加密，网格核心区密度，网格质量，扭曲度等满足分析要求（见图 5）。

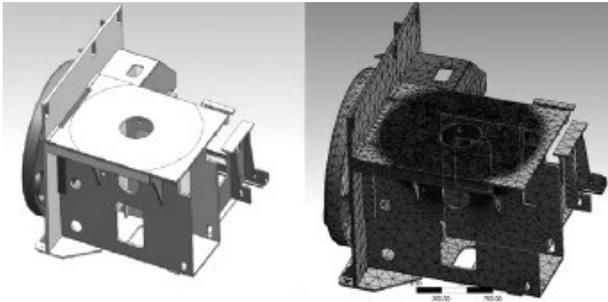


图 5 底座简化模型和网格化模型

### 2.2.3 CAE 仿真结果

通过 CAE 仿真可得，原有结构底座在与热板接触相关的四个区域内出现了较为显著的形变，尤其是与热板（隔热板）接触的核心区域。这些位置的形变在一定程度上影响合模精度（见图 6），由此可见底座在现有结构和材质下会产生不均匀的较大形变。

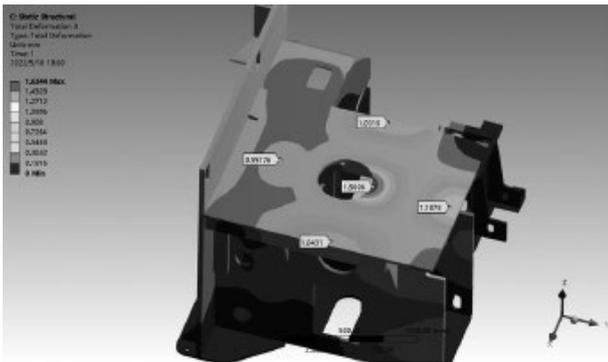


图 6 原结构底座形变图

## 3 CAE 仿真分析

根据前期 CAE 仿真分析可知，目前底座顶面与热板接触面积大小和底座的整体结构确实存在造成轮胎硫化产生飞边的可能。现针对以上问题对底座结构进行优化补强，在不改变材质情况下，使用 CAE 仿真验证优化效果，并根据验证效果逐次分析迭代至较好结果。优化迭代过程思路如下：

### 3.1 优化 1

(1) 上面板与热板接触面改为圆形，满足热板（隔热板）全接触要求。

(2) 上面板中央区、底座中间区、两侧变形区四处形变较大区域增加支撑筋板（筋板厚  $t=25\text{ mm}$ ）。

CAE 模拟设定条件与初始 CAE 模拟设定相同，

网格密度及质量基本一致（相关过程图片略）。

优化后仿真结果对比可知（见图 7）：

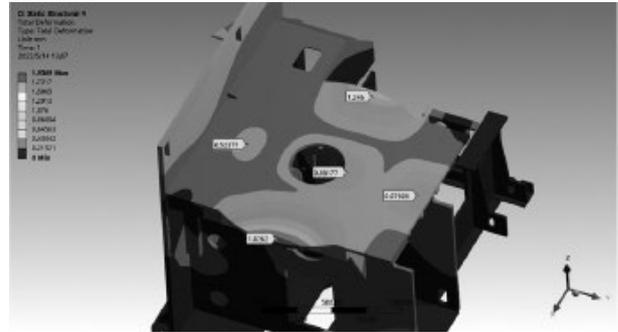


图 7 优化 1 底座形变图

与原结构相比底座安装热板的核心区域形变量减小，但在其远端位置优化效果不大仍有较大形变。因此针对此次结果需要再次优化。

### 3.2 优化 2

(1) 上面板与热板接触面改为圆形，满足热板（隔热板）全接触要求。（与优化 1 一致）

(2) 上面板中央区、底座中间区、两侧变形区四处形变较大区域增加支撑筋板。（筋板位置保持与优化 1 一致，筋板厚度改为  $t=35\text{ mm}$ ，同时增长原有主筋板  $100\text{ mm}$ ）

CAE 模拟设定条件与初始 CAE 模拟设定相同，网格密度及质量基本一致（相关过程图片略）。

优化后仿真结果对比可知（见图 8）：

与结构优化 1 相比底座的周边形变量减小明显，但是中间圆孔区变化不大。说明中间区域优化方案效果不佳，需调整此处优化方案。

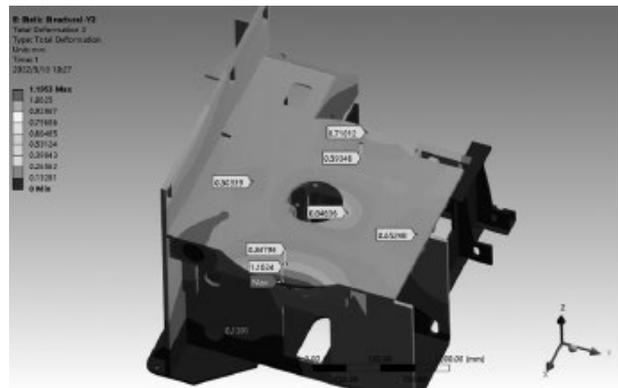


图 8 优化 2 底座形变图

### 3.3 优化 3

(1) 上面板与热板接触面改为圆形，满足热板（隔热板）全接触要求；（与优化 2 一致）

(2) 上面板中央区、底座中间区、两侧变形区四处形变较大区域增加支撑筋板(筋板厚度改为  $t=35$  mm, 同时增长原有筋板 100 mm, 与优化 2 一致; 调整圆孔中间位置筋板位置和结构样式)。

CAE 设定条件与初始 CAE 设定相同, 网格密度及质量基本一致。

优化后仿真结果对比可知(图 9):

与结构优化 2 相比底座的中间圆孔位置形变减小, 且整个与加力后精度相关的上面板核心区呈现大体均匀的环形弹性形变规律。

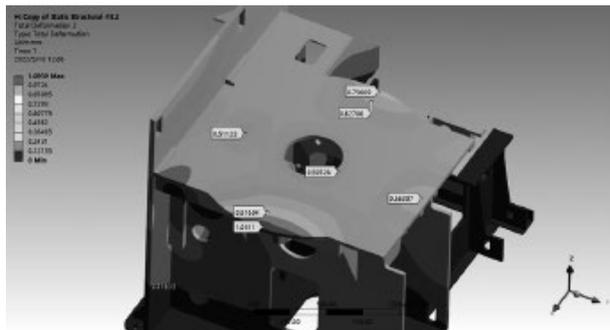


图 9 优化 3 底座形变图

已知由于材料存在不可避免的弹性变形, 所以本次优化方向一是尽量使底座的变形量变小, 二是使变形趋势呈现出与热板圆形结构对应的小梯度规律均匀渐变。考虑到本次 CAE 分析优化仅考虑了底座的刚度, 实际工况下硫化机底座上平面与热板固定, 两者结合刚度会有有一定的增强。所以鉴于优化的成本效益, 在不更改原有底座大结构和原材料的情况下, 本次迭代三次后认为已经可较好的提高原有结构的使用刚度性能。

#### 4 结语

目前随着 CAE 和计算机科学技术的发展和推广应用, 越来越多的新产品开发使用其进行各类仿真校核, 有效的缩短了新产品研发调试周期, 降低了研发投入成本。同时运用此技术按照一定的方法步骤(通过对现有出现问题假设原因——抽离简化出可验证的合理模型——通过 CAE 技术验证假设真伪——针对存在问题进行结构优化——CAE 技术验证优化结果——多次迭代至理想效果)对已有产品进行优化迭代也是值得推广的低成本优化方法。

## Analysis and optimization for the base structure of mechanical dual-mode tire shaping and vulcanizing machine based on CAE

Zhang Zhi<sup>1</sup>, Hou Wenchao<sup>2</sup>, Zhang Xiaolin<sup>1</sup>, Liu Quanze<sup>1</sup>

(1. Qingdao Hailang Intelligent Equipment Co. LTD., Qingdao 266400, Shandong, China;

2. Shaanxi Yanchang Petroleum Group Rubber CO. LTD., Xi'an 710000, Shaanxi, China)

**Abstract:** As one of the main tire vulcanization equipment, the mechanical dual-mode tire shaping and vulcanizing machine is currently widely used in China's tire industry. Although its transmission structure characteristics result in lower accuracy than emerging hydraulic vulcanizing machines, it still has considerable market value with its lower price. Therefore, for existing equipment models, improving their accuracy is also an important direction for technological upgrading. This article is based on the professional CAE software AnsysWorkbench to conduct a structural static mechanical analysis of the base structure of some models of mechanical dual-mode vulcanization machines. This analysis mainly simulates and optimizes the deformation of the base stiffness that affects the precision of mold closing, providing reference for CAE to participate in the optimization and upgrading of existing equipment.

**Key words:** tire shaping vulcanization machine; CAE structural static simulation; base structure optimization

(R-03)

