

# 辊式立磨摇臂部件的有限元分析

赵冬梅

西南科技大学研究生部,四川绵阳 621010

**摘要** 为获得辊式立磨摇臂的变形位移、应力云图和安全系数,为辊磨机传动装置的关键零部件设计提供科学依据和解决方案,在阐述辊式立磨结构、工作原理和受力分析的基础上,采用基于 ANSYS Workbench 平台的计算机辅助工程 (Computer Aided Engineering, CAE) 技术对辊式立磨的摇臂和磨辊部件结构进行简化,建立了摇臂和磨辊的三维实体模型,并对其进行了网格划分。定义了摇臂和磨辊部件的材料属性、接触类型、载荷和约束条件,经数值计算后得到摇臂的位移变形、等效应力云图和安全系数。结果表明,上摇臂的最大位移为 1.1mm;下摇臂的最大位移为 6.61mm,上摇臂的顶部和下摇臂的底端转动半径最大,此外两处受力也较大;上摇臂的最低安全系数为 1.36,主要集中在摇臂固定销孔处和附近的小圆角处,下摇臂的最低安全系数为 0.485,主要集中在摇臂与摇臂轴配合处。

**关键词** 辊式立磨;摇臂;有限元分析;ANSYS Workbench

**中图分类号** TH164

**文献标志码** A

**DOI** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.h2.008

## Finite Element Analysis on Rocker Arms of Vertical Roller Mill

ZHAO Dongmei

Graduate Department Office, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan Province, China

**Abstract** To get the vertical roller mill radial stress nephogram, deformation displacement and safety coefficient, and provide a scientific and solution basis for designing key parts of the roll grinding machine transmission device. Based on the structure, working principle as well as force analysis of vertical roller mill, the finite element analysis of rocker arms is carried out on ANSYS Workbench platform by using the CAE technology. First of all, the structure of rocker arms and grinding roll components are simplified, then the three-dimensional entity model and meshing model of vertical roller mill both are established, and then meshed. Secondly, the material attribute, contact type, load and constraints of rocker arms and grinding roll components are defined, and the total deformation, equivalent stress and safety factor of rocker arms are obtained by numerical calculation. Results show that, the maximum displacement of the up rocker arm is 1.1 mm, and the maximal displacement of lower rocker arm is 6.61 mm. The rotating radii are the largest both on the top of the up rocker arm and under the bottom of lower rocker arm, and stress are bigger in these two places. The minimum safety factor of the up rocker arm is 1.36, mainly concentrated in the fixed pin hole on a rocker and near the small fillet, and the minimum safety factor of the lower rocker arm is 0.485, mainly concentrated in joint place of the rocker arm and rocker arm shaft.

**Keywords** vertical roller mill; rocker arm; finite element analysis; ANSYS workbench

### 0 引言

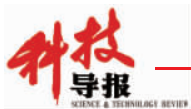
辊式立磨是一种广泛应用于水泥行业的粉磨设备,它与传统球磨机相比具有能耗低、粉磨效率高、占地面积小、质量轻、烘干能力强、易损件寿命长、入磨粒度大等特点<sup>[1-3]</sup>。辊式立磨是基于料床粉碎理论发展起来的,并且成为当今粉磨工业中粉磨系统的首选设备。由于目前辊磨机的设计理论尚不完善,其主要工作参数的确定多采用经验类比法,运用传统

理论对实际模型进行简化,以确定模型参数<sup>[4-6]</sup>。辊式磨传动装置比较复杂,简化成简单梁杆模型显然是不合理的。

目前对辊式立磨的研究多是针对结构改进<sup>[7,8]</sup>和应用效果分析<sup>[9,10]</sup>。近年来,随着计算机技术的发展和有限元技术的普及,计算机辅助设计为辊式立磨的开发与设计提供了必要的技术支撑,对辊式立磨的有限元分析成为研究热点。胡其涛<sup>[11]</sup>对辊式立磨摇臂、动臂以及磨盘进行了位移变形和应力分布

收稿日期:2013-05-16;修回日期:2013-07-17

作者简介:赵冬梅,讲师,研究方向为机械制造及其自动化,电子邮箱:zdongmei@swust.edu.cn



分析,验证了立磨关键部位设计的合理性和安全性,并对磨盘形状进行了优化;郑锐锋<sup>[12]</sup>以中型矿渣立式磨为研究对象,通过有限元分析得出了摇臂构建的应力应变分布和十阶振型;程福安等<sup>[13]</sup>研究设计了辊磨机传动装置结构并建立了传动装置有限元模型,给出了传动装置的优化结构建议。本研究对辊磨机传动装置的关键零部件——摇臂进行有限元分析,分别考察上、下摇臂的变形位移、应力云图和安全系数,得到各自的变形特性和应力分布特性,并研究上、下摇臂的转动半径和受力特性,对比分析上、下摇臂最低安全系数和集中位置,以为辊磨机传动装置的关键零部件设计提供科学依据和解决方案。

### 1 辊式立磨摇臂的结构与受力分析

#### 1.1 辊式立磨工作原理

辊式立磨主要由转动磨盘和摇臂系统组成,如图1所示。辊磨机工作时,电动机驱动减速机带动磨盘转动,需粉磨的物料由锁风喂料设备送入旋转的磨盘中心,在离心力作用下,物料向磨盘周边移动,进入粉磨辊道。液压缸通过传动装置对磨盘施加压力,在磨辊压力的作用下,物料受到挤压、研磨和剪切作用而被粉碎。辊式立磨的关键零件是用于施加压力的摇臂系统,如图2所示。摇臂系统主要由辊芯、辊套、磨辊轴、轴承、摇臂轴、上摇臂和下摇臂组成。其中上、下摇臂是辊式立磨的关键零件,它们的应力分布是立磨设计的主要研究对象。

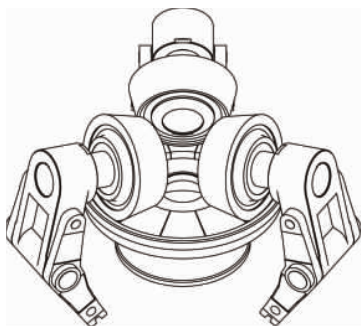
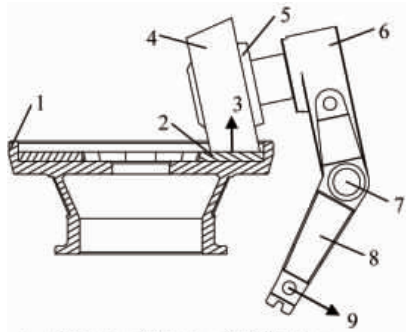


图1 辊磨机示意

Fig. 1 Schematic diagram of roller mill



1—磨盘; 2—衬板; 3—衬板作用力;  
4—辊套; 5—辊芯; 6—上摇臂;  
7—转动中心; 8—下摇臂; 9—液压缸作用力

图2 摇臂系统及辊磨受力

Fig. 2 Rocker arm and force of roller

#### 1.2 辊式立磨受力分析

辊式立磨通过对料床施加高压实现物料的粉碎。摇臂的受力情况如图2所示,摇臂由磨机的机身立柱通过轴承座支撑,上摇臂的顶端与磨辊刚性连接在一起,下摇臂的底端与加压油缸连接。辊式立磨的施力系统主要是液压缸和传动装置,液压缸在下摇臂尾部施加拉力,利用杠杆原理使磨辊压紧磨盘;磨盘对磨辊的反作用力对摇臂轴中心产生力矩,以平衡液压缸和传动装置重力对摇臂轴产生的力矩,使传动装置处于平衡状态。液压缸的工作拉力计算公式为

$$F = p \cdot S \tag{1}$$

式中, $p$ 为磨辊对磨盘的压力(kN),已知单个磨辊对磨盘的压力为600kN;油缸的截面积 $S=1.473\text{m}^2$ ,代入式(1)计算得 $F=883.6\text{kN}$ 。磨盘与磨辊的摩擦力对磨盘中心形成的力矩与电机输出扭矩相平衡,电机输出扭矩的计算公式为

$$T = \frac{9550P}{\omega} \tag{2}$$

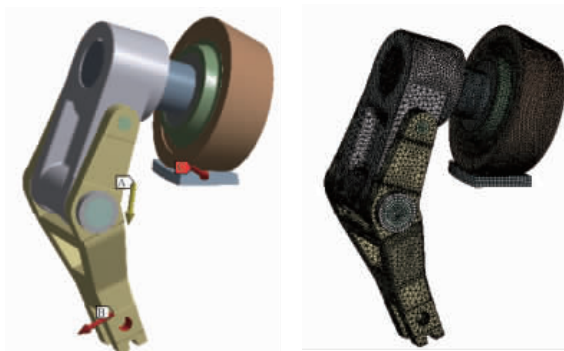
式中,电机功率 $P=700\text{kW}$ ,转速 $\omega=36\text{r/min}$ ,带入式(2)得 $T=185.69\text{kNm}$ ,单个磨辊所受的摩擦力的计算公式为

$$f = \frac{T}{n \times R} \tag{3}$$

式中,加载平均半径 $R=0.875\text{m}$ ,磨辊数量 $n=3$ ,带入式(3)得 $f=70.74\text{kN}$ 。

### 2 网格划分与有限元模型

依据辊式磨工作参数,采用Pro/E软件设计出辊式立磨摇臂系统。摇臂系统主要由下摇臂、上摇臂、摇臂轴、轴承、磨辊轴、辊芯、辊套和衬板等零件组成。建模时,对实际结构进行简化,轴承和胀套均用实体代替,去掉连接螺栓孔及部分小圆角,得到摇臂系统的三维几何模型,如图3(a)所示。首先在ANSYS Workbench Environment (AWE)中建立一个Static Structural分析模块,然后将建好的三维模型直接导入AWE的Geometry<sup>[14,15]</sup>,打开Model即可看到建立的模型。AWE的DS模块含有网格划分功能的Mesh子模块,可用其对辊式磨传动装置模型进行网格划分。网格划分时,采用AWE自带的



(a) 辊磨机摇臂系统 (b) 网格划分模型  
(a) Rocker system of roller mill (b) Meshing model

图3 辊磨机摇臂系统和网格划分模型

Fig. 3 Rocker system of roller mill and meshing model

网格自动划分功能, 设定网格类型为 Mechanical, 设定 Element Size 为 30mm, 其他参数采用系统默认<sup>[6]</sup>, 最终建立的有限元网格模型如图 3(b)所示, 共划分出 156322 个网格单元体。

### 3 材料属性与求解边界条件

#### 3.1 材料属性与接触定义

通过 AWE 的 Engineer Data 分别添加铸钢、高铬铸铁、40Gr、轴承钢 4 种材料, 并赋予它们弹性模量、泊松比、密度、屈服强度、抗拉强度等材料属性。然后在 DS 中定义辊芯、上摇臂、下摇臂的材质为铸钢, 定义辊套的材质为高铬铸铁, 定义摇臂轴、磨辊轴的材质为 40Gr, 定义轴承的材质为轴承钢。考虑到实际衬板上铺了一层石料, 将衬板的弹性模量降低为  $2.1 \times 10^{10}$  Pa, 同时, 设定轴承与摇臂轴的摩擦因数为 0.002, 衬板与辊套的摩擦因数为 0.1, 以此将摩擦力传递到辊套。辊式磨的加压装置主要依靠杠杆原理磨碎生料, 为保证液压缸施加的力全部传递到衬板上, 在摇臂轴与固定轴承、辊套与衬板之间用接触单元定义, 其接触类型定义为 Frictional; 此外摇臂和摇臂轴间有配合尺寸, 也采用接触单元连接, 定义接触类型为 No Separation; 其他零件通过合并重合节点使之刚性连接, 定义接触类型为 Bonded。

#### 3.2 载荷与约束

辊式磨摇臂主要承受液压缸拉力、物料摩擦力和自身重力 3 个载荷。液压缸拉力是辊式磨传动装置受到的主要作用力, 也是最大的载荷。在液压缸拉力的作用下, 磨辊通过对磨盘上物料进行碾压来粉磨产品, 整个装置以摇臂轴为转动中心进行转动, 经计算, 液压缸拉力大小为 883.6kN。在 AWE 中, 通过沿坐标轴分解将液压缸拉力均匀加载到施力孔处, 同时, 在衬板与磨辊的相对运动中, 会产生相对摩擦力, 以此平衡电机输出扭矩。经计算, 摩擦力大小为 70.74kN, 通过 AWE 将摩擦载荷均匀加载到衬板截面上。在摇臂轴处, 轴承外壁假定没有位移, 限制其所有自由度, 设定轴承的外圆面约束类型为 Fixed Support; 在衬板处, 衬板内外侧及底部在加载开始时限制所有自由度, 在加载末端时释放掉切向自由度限制, 使摩擦力传递到辊套上。

### 4 计算结果与分析

#### 4.1 摇臂位移分析

在液压缸拉力、物料摩擦力和自身重力 3 个载荷作用下, 辊式磨上摇臂的总位移如图 4(a)所示, 下摇臂的总位移如图 4(b)所示。由图 4 可看出, 上摇臂的顶部位移最大, 位移量约为 1.1mm; 下摇臂的最大位移为 6.61mm, 主要发生在摇臂底端的液压缸施力处。原因在于摇臂与轴承发生轻微转动时, 上摇臂的顶部和下摇臂的底端转动半径最大, 此外两处受力也较大, 因而变形比较大。由于转动半径最小, 摇臂轴安装孔处位移最小。由图 4(a)不难看出, 由于物料摩擦力的作用, 上摇臂的左侧位移略大于右侧位移。由此可见, 在大型辊式立磨的设计中, 物料摩擦力对摇臂的影响不可忽视。

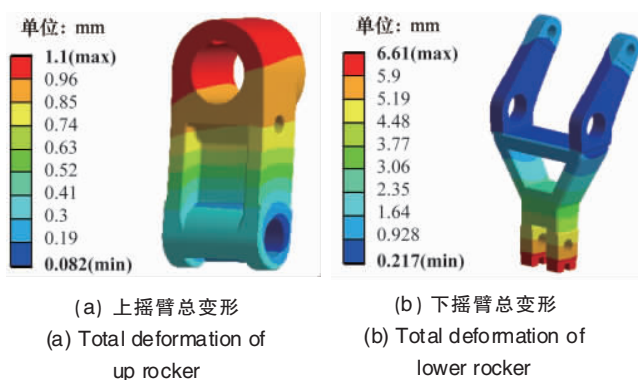


图 4 上、下摇臂总变形

Fig. 4 Total deformation of up and lower rocker

#### 4.2 摇臂应力分析

辊式立磨上、下摇臂的应力云图如图 5(a)、(b)所示。由图 5 可看出, 上摇臂的最大等效应力为 148MPa, 主要集中在摇臂固定销孔处和附近的小圆角处; 下摇臂的最大应力为 412MPa, 集中在摇臂与摇臂轴配合处, 整个加压装置的力矩就是通过摇臂轴将液压缸的力矩传递给磨辊的, 此处所受力矩最大, 因此在摇臂轴孔和附近小圆角处极易出现应力集中。摇臂采用铸钢材质, 其屈服强度为 200MPa, 抗拉强度为 400MPa, 显然上摇臂的应力在许用应力范围内, 工作安全, 符合使用要求; 而下摇臂的多处应力超过材质的许用应力, 存在屈服和断裂危险, 不符合使用要求, 需加以改进。

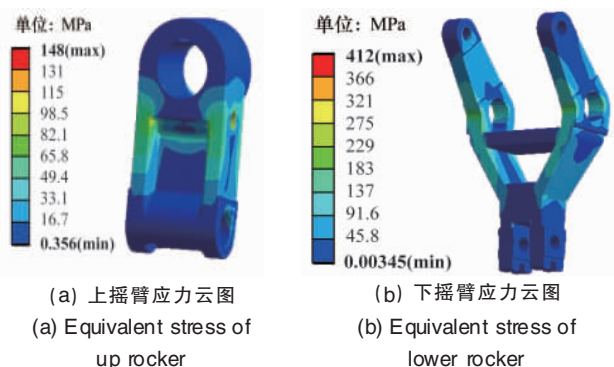


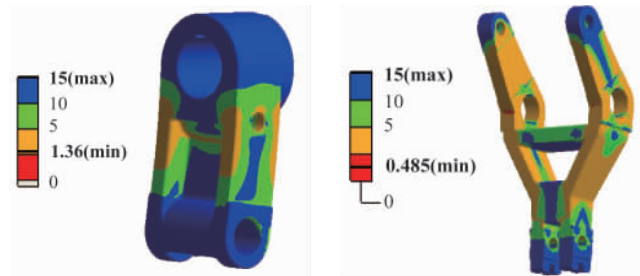
图 5 上、下摇臂应力云图

Fig. 5 Equivalent stress of up and lower rocker

#### 4.3 摇臂安全系数分析

辊式立磨工作时上、下摇臂的安全系数如图 6(a)、(b)所示。由图 6 可以看出, 上摇臂的最低安全系数为 1.36, 位置与应力集中区域一致, 主要集中在摇臂固定销孔处和附近的小圆角处, 大部分区域的安全系数大于 5; 而下摇臂的最低安全系数为 0.485, 主要集中在摇臂与摇臂轴配合处, 大部分区域的安全系数小于 5。这是由于整个加压装置的力矩是通过摇臂轴将液压缸的力矩传递给磨辊的, 因此在摇臂轴孔和附近小圆角处的应力较大, 故安全系数极低。

综合分析可以看出, 辊式立磨的上摇臂基本能够满足使用要求, 只需对局部结构尺寸进行优化, 如增大摇臂固定销



(a) 上摇臂安全系数 (a) Safety factor of up rocker  
(b) 下摇臂安全系数 (b) Safety factor of lower rocker

图6 上、下摇臂安全系数

Fig. 6 Safety factor of up and lower rocker

孔处的部分小圆角,适当减小上摇臂顶部和底部的材料厚度,增加摇臂固定销孔处材质厚度,既可使上摇臂的应力分布更加均匀,安全系数得以提高,也能节省材料和减轻零件重量。而下摇臂基本不能满足强度要求,大部分区域安全系数过低,可以通过增加左右两侧壁厚、增大连接筋板宽度、增大轴安装孔处圆角来提高下摇臂的安全系数。

## 5 结论

(1) 上摇臂的顶部位移最大,下摇臂的最大位移在摇臂底端的液压缸施力处,原因在于摇臂与轴承发生轻微转动时,上摇臂的顶部和下摇臂的底端转动半径最大,此外两处受力也较大;上摇臂的最大等效应力主要集中在摇臂固定销孔处和附近的小圆角处,下摇臂的最大应力集中在摇臂与摇臂轴配合处;上摇臂的最低安全系数为 1.36,主要集中在摇臂固定销孔处和附近的小圆角处,且大部分区域的安全系数大于 5;而下摇臂的最低安全系数为 0.485,主要集中在摇臂与摇臂轴配合处,且大部分区域的安全系数小于 5。

(2) 辊式立磨上摇臂应力分布比较均匀,基本能够满足使用要求,只需对局部结构尺寸进行优化;而下摇臂的安全系数过低,基本不能满足强度要求,必须通过增加零件厚度和结构优化来提高安全系数。有限元作为一种有效的数值分析方法,能够比较全面真实地反映整个部件受力状况,能够缩短研究对象的设计时间,改善结构,降低生产成本,对今后的工程设计实践具有重要的指导意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 张路明. 国内外立磨发展概况及 LGMS4624 矿渣立磨的研制与使用(一)[J]. 矿山机械, 2008, 36(3): 62-68.  
Zhang Luming. Mining & Processing Equipment, 2008, 36(3): 62-68.
- [2] 韩仲琦. 立磨技术在水泥工业的应用与发展[J]. 中国水泥, 2009(12): 53-56.  
Han Zhongqi. China Cement, 2009(12): 53-56.
- [3] 童聪, 李双跃, 蔡海军, 等. 立磨选粉机叶片结构对分级区速度场影响

分析[J]. 化工进展, 2012, 31(4): 778-783.

Tong Cong, Li Shuangyue, Qi Haijun, et al. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(4): 778-783.

- [4] 邓岭. 高压辊磨机关键工艺参数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
Deng Ling. Study on optimization of key process parameter of high pressure grinding roll[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [5] 江晓红. 立式辊磨机动态特性及非稳态振动机理的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2009.  
Jiang Xiaohong. Study on dynamic characteristics and non-steady state vibration mechanism of vertical roller mill [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2009.
- [6] 杨洪刚. 5000T 辊式磨关键部件有限元分析[D]. 天津: 河北工业大学, 2006.  
Yang Honggang. Finite element analysis of key components of ring-roller mill[D]. Tianjing: Hebei University of Technology, 2006.
- [7] 颜晨悦. 浮碾环辊磨机的结构设计与应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011.  
Yan Chenyue. The structural design and application of floating roll mill [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [8] Schaefer H U. Loesche vertical roller mills for the comminution of ores and minerals[J]. Mineral Engineering, 2001, 14(10): 1155-1160.
- [9] Lee D, Cho S, Joo W. Safety evaluation of table liner for vertical roller mill by modified fatigue limit[J]. Engineering Failure Analysis, 2008, 15(4): 989-999.
- [10] Gao H, Qu L G. 3D design and analysis of the crushing roller of a high-pressure grinding roller [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 129(9): 649-652.
- [11] 胡其涛. 立磨关键部件有限元分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.  
Hu Qitao. Finite elements analysis of key components of vertical mill [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [12] 郑锐锋. 基于 CATIA 的中型矿渣立式磨摇臂构件的有限元分析及优化设计[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2012.  
Zheng Ruifeng. Finite elements analysis and optimum design of rocker arm of medium-sized slag vertical mill on CATIA [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2012.
- [13] 程福安, 陈延信, 刘宁昌. 高压辊式立磨关键部件的有限元分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2010(2): 142-146.  
Cheng Fu'an, Chen Yanxin, Liu Ningchang. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2010(2): 142-146.
- [14] 李强. 计算机辅助立式辊磨机设计研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004.  
Li Qiang. Study on computer aided roller mill design [D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [15] 李兵, 何正嘉, 陈雪峰. ANSYS Workbench 设计、仿真与优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
Li Bing, He Zhengjia, Chen Xuefeng. ANSYS Workbench design, simulation and optimization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [16] 齐有军. 基于有限元分析法的减速器的优化设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.  
Qi Youjun. Research on optimum design of reducer based on finite element method[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009.

(责任编辑 王媛媛)