

超长筒体与滚圈三维多体接触体系的力学特征

梁小玲¹, 肖友刚², 李学军¹

(1. 湖南科技大学, 湖南湘潭 411201; 2. 中南大学轨道交通安全重点实验室, 长沙 410075)

[摘要] 针对筒体、滚圈结构重复性强的特点, 基于多重子结构技术, 建立了超长筒体与滚圈三维多体接触模型; 应用参数二次规划法, 对中铝公司河南分公司 2 号窑筒体与滚圈的多体接触模型进行了有限元数值计算, 得出结论: a. 从 0°到 360°, 档位段筒壳的等效应力突变 5 次, 筒节段筒壳的等效应力突变 4 次; b. 档位段筒壳强度较弱, 筒节段筒壳强度有一定富余; c. 2, 3 档位段筒壳是筒壳强度的薄弱环节。

[关键词] 筒体; 多体接触; 多重子结构; 力学特征

[中图分类号] TQ172.6; O343.3 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)12-0041-04

1 引言

回转窑是冶金、化工、水泥等行业生产流程的核心设备, 筒体是回转窑的主体部件。在生产过程中, 筒体常常过早地出现细微裂纹、甚至超长的环向裂纹, 严重危及回转窑的正常生产。为了改善这种状况, 人们根据筒体应力应变情况, 总结出筒体的维修维护计划^[1~3]。然而, 由于没有考虑筒体、滚圈间的接触关系及窑衬对筒体的加强作用, 求得的筒体应力及变形不太准确, 因而在此基础上制定的筒体维护计划也不尽合理。

筒体长度可达百米, 一般活套于数个滚圈内, 滚圈与筒体呈大面积接触。若用“试验-误差”的常规方法对这类大面积多体接触问题逐次迭代求解, 计算工作量非常大, 收敛性难以保证。由于筒体、滚圈结构重复性较强, 子结构具有降阶凝聚、分阶段求解的特点, 通过子结构的多重调用即可获得重复结构, 计算效率很高。有限元参数二次规划法求解接触问题无需迭代, 收敛迅速、平稳, 计算精度高, 因此将多重子结构技术与有限元参数二次规划法相结合, 对筒体与滚圈的大面积多体接触问

题进行有限元分析, 可大大缩短计算时间, 提高计算精度。据此制定的筒体设计和维护计划更为合理。

2 多重子结构技术及参数二次规划法

2.1 多重子结构技术

根据圣维南原理, 接触问题具有局部的性质, 为此, 可将整个结构分成非接触区和接触区; 前者可用多重子结构技术将其再划分成多级子结构, 后者定义为一个或数个独立的子结构。利用子结构法, 把非接触区的结构刚度阵向接触点凝聚, 把非接触点的独立位移作为子结构凝聚掉, 最后要求的独立位移仅仅是接触点位移, 可用有限元参数二次规划法求解。

用多重子结构方法分析时, 整体结构是由若干子结构构成的。对于第 i 个子结构, 可按出口节点自由度 $\{u_o\}$ 与内部节点自由度 $\{u_i\}$ 写成如下分块矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} k_{\infty} & k_{oi} \\ k_{io} & k_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_o \\ u_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_o \\ F_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 k_{∞} 为出口刚度阵; k_{ii} 为内部刚度阵; k_{oi} , k_{io}

[收稿日期] 2005-03-08; **修回日期** 2005-09-14

[基金项目] 湖南省自然科学基金重点资助项目 (04JJ3050); 湖南省教育厅重点科研项目 (03A052)

[作者简介] 梁小玲 (1970-), 女, 湖南益阳市人, 湖南科技大学讲师, 主要从事机械系统动态监控与维护、机电一体化研究

为交互刚度阵； F_o 为相邻子结构对本子结构的作用力，未知； F_i 为已知的外界作用力。

将式(1)展开得

$$k_{oo}u_o + k_{oi}u_i = F_o \quad (2)$$

$$k_{io}u_o + k_{ii}u_i = F_i \quad (3)$$

由式(3)得

$$u_i = k_{ii}^{-1}(F_i - k_{io}u_o) \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)得

$$(k_{oo} - k_{oi}k_{ii}^{-1}k_{io})u_o = F_o - k_{oi}k_{ii}^{-1}F_i \quad (5)$$

令 $k'_o = k_{oo} - k_{oi}k_{ii}^{-1}k_{io}$, $F'_o = F_o - k_{oi}k_{ii}^{-1}F_i$,

则式(5)可变为

$$k'_o u_o = p'_o \quad (6)$$

由式(6)可知，在子结构“凝聚”后，只有出口点位移作为基本未知数，其他内部点位移在子结构刚度阵凝聚时被消掉。至此，通过以上子结构凝聚的办法，可将庞大的刚度阵和载荷向量凝聚在极少量的出口点上，形成出口刚度阵 k'_o 和出口载荷向量 p'_o 。按照这种办法，可完成对各子结构模式的逐级组装，直至最高级子结构模式。

如果有部分结构是重复的，其刚度阵只需生成一次，向出口点凝聚也只需做一次，重复结构的有关数据通过扫描即可获得，计算效率高。因此对重复结构多的模型，子结构技术有更大的优势。

2.2 有限元二次参数规划法

对处于平衡状态的两接触体 A, B ，若各点的状态和变形历史已知，在给定荷载增量后，应力增量 $\Delta\sigma_{ij}$ 和位移增量 Δu_i 或应变增量 $\Delta\epsilon_{ij}$ 的数学描述为平衡方程：

$$\Delta\sigma_{ij,j} + \Delta b_i = 0 \quad (7)$$

几何方程：

$$\Delta\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i}) \quad (8)$$

本构方程：

$$\Delta\sigma_{ij} = D_{ijkl}\Delta\epsilon_{kl} \quad (9)$$

在已知位移边界 $\Gamma_u^{(\beta)}$ 上满足：

$$\Delta u_i^{(\beta)} = \Delta \bar{u}_i^{(\beta)} \quad (10)$$

在已知面力边界 $\Gamma_p^{(\beta)}$ 上满足：

$$\Delta\sigma_{ij}^{(\beta)} n_j^{(\beta)} = \Delta \bar{p}_i^{(\beta)} \quad (11)$$

在接触边界 $\Gamma_c^{(\beta)}$ 上满足^[4]：

$$f(u_c, \lambda) + v = 0$$

$$v^T \lambda = 0, \lambda \geq 0, v \geq 0 \quad (12)$$

式(7)至式(12)中，上标 $\beta = A, B$; $\Delta\sigma_{ij,j}$ 为应

力梯度增量； Δb_i 为体积力增量； $\Delta u_{i,j}$ 为位移梯度增量； $\Delta \bar{u}_i, \Delta \bar{p}_i$ 分别为给定的位移和面力增量； D_{ijkl} 为本构关系矩阵； n 边界外法线方向余弦； v 松弛变量； λ 为滑移参量。

根据弹性接触问题的参变量最小势能原理^[4]，在所有满足几何方程和几何边界条件的可能位移场中，接触问题的真实解使总势能泛函在接触状态方程的控制下取最小值。接触问题的总势能泛函为

$$\begin{aligned} \Pi = \int_{\Omega} \left[\frac{1}{2} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \Delta \boldsymbol{\varepsilon} - \Delta \mathbf{b}^T \Delta \mathbf{u} \right] d\Omega - \\ \int_{\Gamma_p} \Delta \mathbf{p}^T \Delta \mathbf{u} d\Gamma + \\ \int_{\Gamma_c} \left[\frac{1}{2} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_c^T \mathbf{D}_c \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_c - \lambda^T \tilde{\mathbf{R}} \Delta \boldsymbol{\varepsilon}_c \right] d\Gamma \quad (13) \end{aligned}$$

式中， $\tilde{\mathbf{R}} = (\partial \tilde{g} / \partial \mathbf{F}_c) / \mathbf{D}_c$ 为常量矩阵，表征当发生单位滑动时的接触弹性松弛力， \tilde{g} 为滑动势函数， \mathbf{F}_c 为接触内力， \mathbf{D}_c 为接触面弹性矩阵。

将式(13)与式(12)做离散化处理，即可使弹性接触问题转化为参数二次规划问题：

$$\begin{aligned} \min \quad \Pi = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T \mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{u}^T (\boldsymbol{\Phi} \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{p}) \\ \text{s.t.} \quad \mathbf{C} \Delta \mathbf{u} - \mathbf{U} \boldsymbol{\lambda} - \mathbf{d} + \mathbf{v} = 0 \quad (14) \\ \mathbf{v} \boldsymbol{\lambda} = 0, \boldsymbol{\lambda} \geq 0, \mathbf{v} \geq 0 \end{aligned}$$

二次规划问题的求解有多种成熟的稳定收敛算法（如 Lemke 算法）。因此用参数二次规划法求解接触问题具有较高的计算效率和计算精度。

有限元软件 ANSYS 程序具有开放的二次开发系统，可以定制 ANSYS 程序界面、扩充其计算功能。ANSYS 提供的二次开发工具有用户界面设计语言 UIDL、用户可编程特性 UPFs 和参数设计语言 APDL 等几种，其中 UPFs 是 ANSYS 给予用户最大主动权的二次开发技术，UIDL 则起着用户程序与 ANSYS 之间的桥梁作用。

笔者利用 ANSYS 的 UIDL 和 UPFs 技术，以 Visual Fortran 作为二次开发平台，编写了多重子结构技术和有限元二次参数规划法在 ANSYS 中的实现程序，应用其对超长筒体与滚圈的大面积多体接触问题进行了细致分析。

3 超长筒体与滚圈多体接触模型

3.1 基本子结构及其有限元网格划分

筒体包括筒壳和窑衬两部分，在热态工作时，筒壳和窑衬紧密贴合，可视为一个整体。筒壳由档位段、铆接段、连接档位段与铆接段的筒节段（筒

称连接段)和其余筒节段(简称其余段)组成。档位段、铆接段、连接段的规格一致,其余段及窑衬的规格则不同。筒壳和窑衬的基本子结构定制为:对筒壳的铆接段、档位段和连接段,分别取其中一段的一半作为基本子结构模式;对筒壳的其余段和窑衬分别取每段的一半作为基本子结构模式;对滚圈利用结构的轴对称性,取圆心角为 90°的扇形作为基本子结构模式。筒壳、窑衬、滚圈的其余部分,由超级单元的逐级几何调用生成。对各个基本子结构进行有限元网格划分,然后组装形成总体有限元模型。根据结构特性,筒壳的档位段、窑衬、滚圈采用八结点三维实体单元,筒壳的其余部分采用壳单元进行离散。中铝河南分公司 2 号回转窑(以下简称 2 号窑)有 5 档支撑,直径为 4 m,长度 100 m,档位段、铆接段、连接段各 5 段,其余段 6 段,窑衬 4 段,滚圈 5 个。按上述原则建立的筒体滚圈接触有限元模型的子结构模式为 16 个,壳单元 13 680 个,块单元 25 344 个,节点 52 536 个,接触单元 1 130 个,整个模型的计算网格见图 1。



图 1 超长筒体与滚圈多体接触有限元模型

Fig.1 Multi-body contact FEM model of long shell and tyre

窑衬由多种材料组成,各种材料的弹性模量有一定差异。但对于 2 号窑而言,各种耐火砖的物性参数与高铝砖相近,在缺乏各种耐火砖详细物性参数的情况下,统一使用高铝砖的物性参数。高铝砖的弹性模量为 36.8 GPa,泊松比 0.2,密度 2 600 kg/m³;筒壳和滚圈材料均为 45 号钢,其弹性模量为 204 GPa,泊松比 0.3,密度 7 800 kg/m³。

3.2 计算结果分析

为了得出档位段及筒节段筒壳的应力分布规律,取筒体截面 A-A~I-I 进行研究(见图 2),

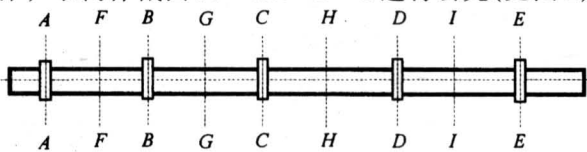


图 2 筒体截面位置示意图

Fig.2 Shell section distribution

其中 A-A~E-E 为各档位段中间位置处的筒体截面,F-F~I-I 为各档位段之间中间位置处的筒体截面。

档位段筒壳及筒节段筒壳分别具有相同的应力分布规律^[5],因此只针对 B-B,G-G 截面进行研究。图 3、图 4 分别为 B-B,G-G 截面筒壳的等效应力分布曲线。可以看出,在 0°~360° 范围内,B-B 截面筒壳的等效应力突变 5 次,G-G 截面筒壳的等效应力突变 4 次。这表明在运转过程筒壳承受的是复杂交变应力,最终将发生疲劳破坏。在 B-B,G-G 截面的 0°,90°,180° 处,筒壳都出现了应力峰值,说明上半圆周档位段和筒节段筒壳的应力分布规律基本相同,惟幅值不等。在 B-B 截面的 240°,300° 处(托轮在该两处支承滚圈),筒壳出现

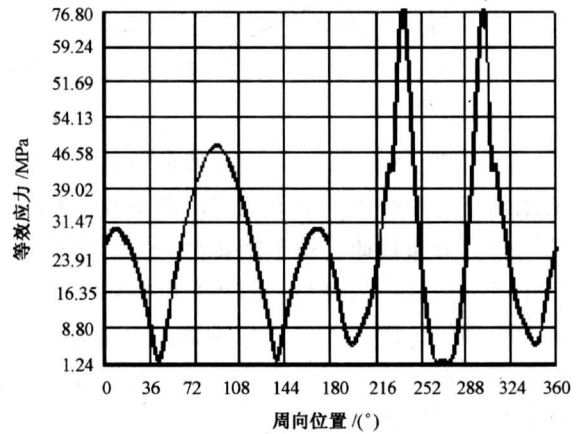


图 3 B-B 截面筒壳的等效应力分布曲线

Fig.3 Equivalent stress distribution of B-B shell section

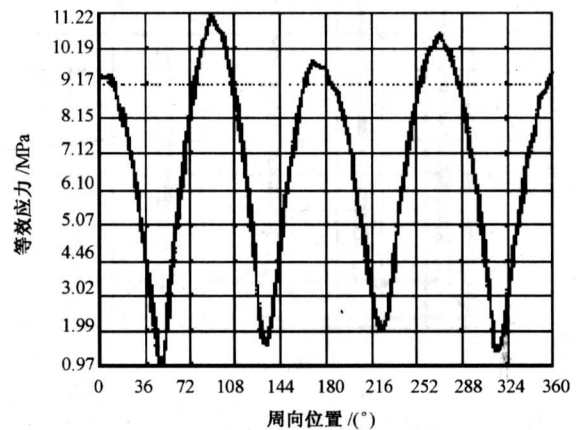


图 4 G-G 截面筒壳的等效应力分布曲线

Fig.4 Equivalent stress distribution of G-G shell section

应力尖峰, 达到了 76.8 MPa; 在 $G-G$ 截面的 240° , 300° 处应力却无突变, 且数值较小, 说明支承角主要影响档位段的筒壳应力。在抗疲劳设计中, 对档位段和筒节段可分开处理, 将大大减少设计工作量。对比图 3、图 4, 还可看出档位段筒壳的峰值应力远大于筒节段筒壳的峰值应力, 且档位段筒壳的应力受支承位置的影响很大。通过优化, 寻找一个最佳的支承位置, 减少档位段的筒壳应力, 可有效提高筒体的结构强度。

将圆心角 0° 处筒壳档位段 1, 2, 3, 4, 5 的峰值应力记为 $\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_3^0, \sigma_4^0, \sigma_5^0$, 90° 处的峰值应力记为 $\sigma_1^{90}, \sigma_2^{90}, \sigma_3^{90}, \sigma_4^{90}, \sigma_5^{90}$, 300° 处的峰值应力记为 $\sigma_1^{300}, \sigma_2^{300}, \sigma_3^{300}, \sigma_4^{300}, \sigma_5^{300}$, 则 $\sigma_1^{300} : \sigma_1^{90} : \sigma_1^0 = 2.58 : 1.58 : 1, \sigma_2^{300} : \sigma_2^{90} : \sigma_2^0 = 2.55 : 1.54 : 1, \sigma_3^{300} : \sigma_3^{90} : \sigma_3^0 = 2.60 : 1.58 : 1, \sigma_4^{300} : \sigma_4^{90} : \sigma_4^0 = 2.55 : 1.58 : 1, \sigma_5^{300} : \sigma_5^{90} : \sigma_5^0 = 2.54 : 1.56 : 1$, 即 $\sigma_1^{300} : \sigma_1^{90} : \sigma_1^0 \approx \sigma_2^{300} : \sigma_2^{90} : \sigma_2^0 \approx \sigma_3^{300} : \sigma_3^{90} : \sigma_3^0 \approx \sigma_4^{300} : \sigma_4^{90} : \sigma_4^0 \approx \sigma_5^{300} : \sigma_5^{90} : \sigma_5^0$, 表明回转窑的载荷分布状况只影响档位段筒壳的应力幅值, 而不改变档位段筒壳的应力分布规律。由于回转窑的载荷分布状况决定了各支承载荷的大小, 因此可以推知支承载荷的大小跟档位段筒壳的峰值应力近似于正比关系。这一规律为通过研究支承载荷大小来评价筒壳的安全状况提供了依据。

为了解筒壳应力分布的全貌, 将沿轴线方向, 圆心角为 300° 处筒壳的等效应力映射到相应路径上, 得到它们的应力分布曲线 (见图 5) 与结论:

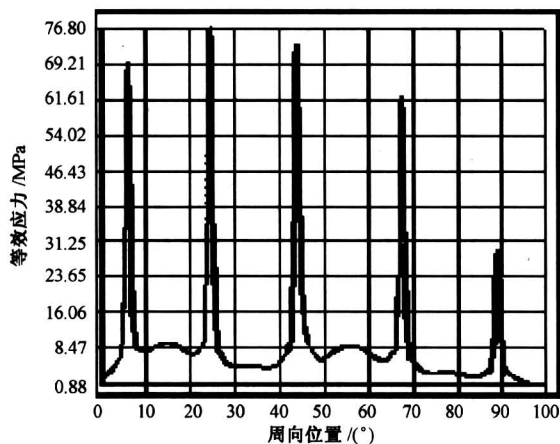


图 5 圆心角 300° 处筒壳等效应力分布曲线

Fig.5 Equivalent stress distribution of shell at the station of central angle 300°

1) 各档位段筒壳应力大小的顺序为 2, 3, 1, 4, 5, 应力越大, 表明该处强度越弱, 越容易受到破坏, 因此, 2、3 档是该回转窑的薄弱环节, 也是故障的多发地带, 应采取有效措施加强这两处筒体的强度。

2) 相对于档位段筒壳的应力而言, 筒节段筒壳的应力很小, 从应力均等的优化原则出发, 档位段筒壳应该加厚, 筒节段则可以减薄。

4 结论

1) 从 0° 到 360° , 档位段筒壳的等效应力突变 5 次, 筒节段筒壳的等效应力突变 4 次, 且档位段筒壳的等效应力远大于筒节段筒壳的等效应力。档位段筒壳强度较弱, 筒节段筒壳强度有一定富余。

2) 各档位段筒壳应力从大到小的顺序为 2, 3, 1, 4, 5, 应力越大, 强度越弱, 越容易破坏, 因此, 2, 3 档位段处的筒壳是该回转窑的薄弱环节。

3) 回转窑的载荷分布状况只影响筒体的应力幅值, 而不改变筒体的应力分布规律。这一规律为通过优化调窑, 均衡分配回转窑载荷, 以改善筒壳的安全状况提供了依据。

参考文献

- [1] Bouzakis K D, Kouremetis A, Gainaros K. Time schedule for the replacement of corroded rotary kiln sections based on measurements and calculations [J]. ZKG International, 1999, 52(8): 444~450
- [2] David W. Broberg P E. FEA and FMA reveal weak spots in rotary kiln designs [J]. World Cement, 1995, 26(5): 70~75
- [3] 周 贤, 刘义伦, 赵先琼, 等. 回转窑筒体应力分布研究 [J]. 湘潭矿业学院学报, 2002, 12(3): 42~45
- [4] 钟万勰, 张洪武, 吴承伟. 参变量变分原理及其在工程中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [5] 肖友刚. 多支承回转窑接触体系的力学特征研究及参数优化 [D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2004

(下转第 53 页)

Study on Acquisition Risk Identification for Weapon and Equipment Based on the Full Life Cycle

Li Zhongmin^{1, 2}, Tang Shuchun³, Li Jun⁴, Chen Jian³

(1. *Institute of Policy and Management, CAS, Beijing 100080, China;*

2. *Business School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

3. *The Equipment Institute of the Second Artillery, Beijing 100085, China;*

4. *Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China*)

[Abstract] Risk identification is the key technology of acquisition risk management for weapon and equipment. It has a direct and essential effect on the success of acquisition risk management for weapon and equipment. This paper discusses the concept of the full life cycle, presents the principle and the procedure of acquisition risk identification. In addition to this, the paper studies the method of acquisition risk identification and puts forward the selective scheme of acquisition risk identification method in every phase of the full life cycle. In the end, the paper analyzes the risk in every phase of the weapon and equipment's full life cycle. All of this plays a basic role in the systematic management of acquisition risk for weapon and equipment.

[Key words] risk identification; acquisition risk management for weapon and equipment; the full life cycle

(cont. from p.44)

The Mechanics of 3D Multi-body Contact System of Long Shell and Tyres

Liang Xiaoling¹, Xiao Yougang², Li Xuejun¹

(1. *Hunan Science and Technology University, Xiangtan, Hunan 411201, China;*

2. *Key Lab of Railway and Traffic Safety, Central South University, Changsha 410075, China*)

[Abstract] According to the high iterative feature of shell and tyre structure, the multi-level substructure technique is adopted to set up the multi-body contact model between tyres and long shell. Applying parametric quadratic programming method, the multi-body contact FEM analysis of the No.2 rotary kiln in Henan Branch of China Aluminum Company is done, and the conclusions are as follows: The equivalent stress of shell at supports changes 5 times, and at other parts changes 4 times; the strength of shell at supports is weak, and at other parts is affluent; the strength of shell at the supports 2 and 3 is the weakest.

[Key words] shell; multi-body contact; multi-level substructure; mechanical property