

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2017.06.004

基于 DEM-FEM 耦合的球磨机梯形衬板参数研究

李昆源, 童昕, 李占福, 叶一青

(福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 通过 DEM-FEM 耦合的试验方法对半径为 4 300 mm 的大型球磨机进行试验仿真, 研究梯形衬板在不同的倾角、顶边长度和高度的情况下, 衬板所受到的总变形程度、应变和应力大小, 借助正交试验分析, 得出优方案和显著性影响因素。

关键词: 球磨机; 梯形衬板; 离散元; 有限元; 正交试验

中图分类号: TD453.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)06-0523-05

Research on parameters of ball mill's trapezoidal liner based on DEM-FEM coupling approach

Li Kunyuan, Tong Xin, Li Zhanfu, Ye Yiqing

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A large-scale ball mill with a radius of 4300mm is simulated by DEM-FEM coupling. The total deformation, strain and stress of the trapezoidal liner at different inclinations, top edge lengths and heights were studied. Then, the optimized scheme and significant influencing factors were obtained through orthogonal tests.

Keywords: ball mill; trapezoidal liner; discrete element; finite element; orthogonal test

球磨机是一种广泛应用于建材、化工、机械、选矿、机械等部门的磨料设备, 衬板是球磨机中极其重要的一部分, 又以梯形衬板使用较为广泛^[1]。球磨机在工作过程中, 衬板不仅受到磨料和钢球等的冲击和摩擦作用, 还受到矿浆原料等化学物质的腐蚀, 导致衬板磨损。选择梯形衬板的合理尺寸以改善衬板的抗磨损能力, 提高衬板的强度一直是急需解决的工程问题。

M.Rezaeizadeh^[2]利用离散元法研究了衬板数量、宽度、高度等参数对衬板磨损量的影响; M.Yahyaie^[3-4]对衬板的轴向方向的磨损进行研究, 并对其进行改进。N.Djordjevic^[5-6]研究了衬板高

度、提升条数目、衬板与介质间的摩擦系数对磨矿效率的影响; P.Jonsén^[7-8]利用 DEM 与 FEM 相互耦合为衬板的结构设计提供了新途径。本文以大型球磨机为例, 利用 DEM 与 FEM 相互耦合的方法进行仿真, 对球磨机衬板的磨损进行研究, 得出衬板的应力分布、变形程度, 通过正交分析耦合结果来获得因素的显著性及衬板结构的优方案, 进而提高球磨机的寿命和经济效益。

1 试验方法介绍

离散单元法 (discrete element method, DEM) 是在岩土工程领域里发展起来的一种模拟岩土块

收稿日期: 2017-08-08

基金项目: 福建省科技创新平台设计 (2014H2002); 福建省科技重大专项 (2014HZ0004-4); 福建省教育厅科技项目 (JZ160460)

通讯作者: 童昕 (1964-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 计算机辅助设计与工程。

统模块,将 Results 与 Setup 连接起来,形成数据共享。导入球磨机衬板几何模型,进入 Mechanical 界面,定义球磨机衬板的材料、密度、泊松比;划分网格,考虑到网格数量和质量,将网格尺寸定为 50 mm,网格节点数量为 118 389 个,网格单元数为 22 710 个。添加约束,载入 Pressure,建立衬板的有限元模型,如图 2。

2.4 有限元求解处理

在对衬板的磨损正交试验中,选择变形、应力、应变 3 个指标来判定衬板的磨损情况,共 9 组试验,每组重复 3 次,求解平均值。将试验结果记录在正交表中,记录结果如表 4 所示。

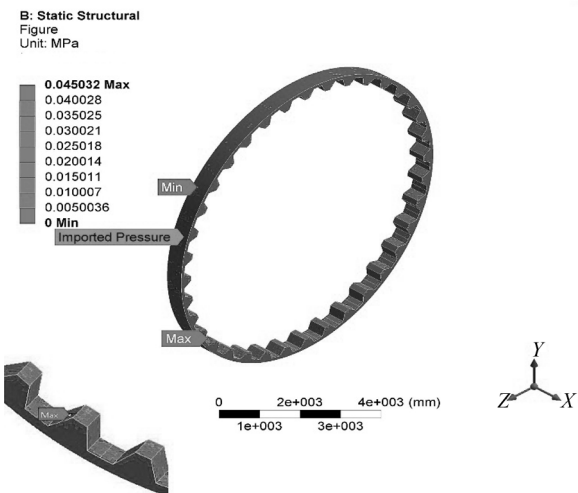


图 2 衬板有限元模型

Fig.2 Finite element model of the liner

表 3 颗粒模型物理属性

Tab.3 Physical properties of particle models

颗粒模型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/GPa	滚动摩擦系数	恢复系数	静摩擦系数
衬板	7 800	0.25	70	0.5	0.2	0.01
钢球	7 800	0.25	70	0.5	0.2	0.01
矿石	3 140	0.30	0.1	0.5	0.2	0.01

表 4 正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results

试验号	倾角/($^{\circ}$)	空列	顶边长度/mm	高度/mm	最大变形/ μm	最大应变	最大应力/Pa
1	22	1	130	200	58.511	3.19×10^{-7}	61 976
2	22	2	150	225	56.510	3.54×10^{-7}	69 671
3	22	3	170	250	53.882	2.82×10^{-7}	55 083
4	26	1	150	250	47.830	2.86×10^{-7}	56 737
5	26	2	170	200	44.392	3.37×10^{-7}	65 741
6	26	3	130	225	53.150	2.56×10^{-7}	50 689
7	30	1	170	225	46.463	2.67×10^{-7}	52 393
8	30	2	130	250	47.602	3.19×10^{-7}	62 333
9	30	3	150	200	46.391	2.98×10^{-7}	59 311

3 分析结果

3.1 正交试验-直观分析

通过正交试验,将得出的结果进行分析,求其极差。根据极差 R 的大小来分析因素主次,比较算术平均值 k_1 、 k_2 、 k_3 ,确定其优方案。表 5 为变

形的直观分析。从表中可以看出,对于总变形的影响因素主次为衬板的倾角>衬板顶边长度>衬板高度。从他们的极差值中可以看出,优方案的衬板倾角为 22° ,衬板顶边长度为 130 mm,衬板高度为 225 mm。同样地,由表 6、7 中可以得出,等效应力的影响因素主次为衬板高度>衬板的倾

角>衬板顶边长度,优方案的衬板高度为 200 mm,衬板的倾角为 22°,衬板顶边长度为 150 mm;等效应变的影响因素主次为衬板高度>衬板的倾角>衬板顶边长度,优方案为衬板高度为 200 mm,衬板的倾角为 22°,衬板顶边长度为 150 mm。

表 5 各因素的变形极差表
Tab.5 Deformation range table

算术 平均值	倾角/ (°)	空列	顶边长度/ mm	高度/ mm
k_1	56.301	50.934	53.088	49.765
k_2	48.457	49.501	50.244	52.041
k_3	46.818	51.141	48.246	49.771
极差 R	9.48	1.64	4.84	2.27

注:极差 R =最大 k 值-最小 k 值

表 6 各因素的等效应力极差表
Tab.6 Equivalent stress range table

算术 平均值	倾角/ (°)	空列	顶边长度/ mm	高度/ mm
k_1	62 243	57 035	58 332	62 342
k_2	57 722	65 915	61 906	57 584
k_3	58 012	55 027	57 739	58 051
极差 R	4 521	10 888	4 167	4 758

注:极差 R =最大 k 值-最小 k 值

当筒体的半径和转速一定时,倾角的大小是确定的,即仿真速度为 1.126 8 rad/s 时,其倾角应为 22°。顶边长度决定了相邻物料间的最小距离,过小的距离虽然可以使物料产生的冲击力集中,但加剧了衬板磨损。本次试验顶边长度为 130、150 mm 都为优方案的尺寸,对衬板有明显的磨损作用,在设计衬板的顶边长度时,应选择更大的尺寸,从本次试验来看,170 mm 是最合适的。在衬板的高度对物料有一定的提升能力情况下,提高衬板的高度可以提升衬板的寿命,本次试验中,200、225 mm 都为优方案,即会产生较大的变形量或者较大的应变或应力。因此,衬板高度为 250 mm 会有效缓解衬板的磨损,提高衬板的寿命。

表 7、8 可看出,空列的极差大于任何一列的极差,从而可以推断存在不可忽略的交互作用,或

者漏掉了对试验结果有重要性的其他影响因素。本文仅对衬板的结构尺寸进行研究,而现实中,球磨机的工作环境及其复杂,存在众多因素会对球磨机的衬板磨损产生影响,因而分析出来的结果是可信的。

表 7 各因素的等效应变极差表
Tab.7 Equivalent strain range table

算术 平均值	倾角/ (°)	空列	顶边长度/ mm	高度/ mm
k_1	3.18×10^{-7}	2.91×10^{-7}	2.98×10^{-7}	3.18×10^{-7}
k_2	2.93×10^{-7}	3.37×10^{-7}	3.13×10^{-7}	2.93×10^{-7}
k_3	2.95×10^{-7}	2.79×10^{-7}	2.95×10^{-7}	2.95×10^{-7}
极差 R	2.50×10^{-8}	5.80×10^{-8}	1.80×10^{-8}	2.50×10^{-8}

注:极差 R =最大 k 值-最小 k 值

表 8 变形方差分析
Tab.8 Variance analysis of deformation

差异源	离差 平方和	自由度	均方	F 值	显著性
倾角	154.12	2	77.061	32.206	*
空列	4.79	2	2.392		
顶边长	35.525	2	17.763	7.424	无
高度	10.33	2	5.167	2.159	无
误差 e	4.79	2	2.392		
总误差	4.79	2	2.392		

注: $F_{0.05}(2,2)=19$, $F_{0.01}(2,2)=99^{[12]}$

3.2 正交试验-方差分析

正交试验中,需要对试验结果进行方差分析,来弥补直观分析法的不足。表 8 是对最大变形的方差分析,通过对 F 值大小的比较,来判断因素的显著性。当 $F_{0.05}<F$ 值 $<F_{0.01}$ 时,因素有显著性影响; F 值 $<F_{0.05}$ 时,因素不显著; $F_{0.01}<F$ 值时,因素非常显著。从表中可以看出衬板的倾角这一因素对衬板的变形具有显著影响,而衬板的顶边长度和高度的 F 值都小于 $F_{0.05}(2,2)$,可见这两因素对衬板的变形影响显著性不高。同样的,从表 9、10 可看出,3 个因素对等效应力和等效应变的影响不显著,即这 3 个因素对衬板的应力应变的分布影响不大。

表 9 等效应变方差分析

Tab.9 Variance analysis of equivalent strain

差异源	离差平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	显著性
倾角	1.18×10 ⁻¹⁵	2	5.92×10 ⁻¹⁶	0.561	无
空列	5.56×10 ⁻¹⁵	2	2.78×10 ⁻¹⁵		
顶边长	5.31×10 ⁻¹⁵	2	2.65×10 ⁻¹⁶	0.252	无
高度	1.16×10 ⁻¹⁵	2	5.80×10 ⁻¹⁵	0.55	无
误差 <i>e</i>	5.56×10 ⁻¹⁵	2	2.78×10 ⁻¹⁵		
总误差	8.43×10 ⁻¹⁵	8	1.05×10 ⁻¹⁵		

注: $F_{0.05}(2,8)=4.46$, $F_{0.01}(2,8)=8.65$

表 10 等效应力方差分析

Tab.10 Variance analysis of equivalent stress

差异源	离差平方和	自由度	均方	<i>F</i> 值	显著性
倾角	3.84×10 ⁷	2	1.92×10 ⁷	0.493	无
空列	2.01×10 ⁸	2	1.01×10 ⁸		
顶边长	3.05×10 ⁷	2	1.52×10 ⁷	0.391	无
高度	4.13×10 ⁷	2	2.06×10 ⁷	0.529	无
误差 <i>e</i>	2.01×10 ⁸	2	1.01×10 ⁸		
总误差	3.12×10 ⁸	8	3.89×10 ⁷		

注: $F_{0.05}(2,8)=4.46$, $F_{0.01}(2,8)=8.65$

4 结论

本次试验以衬板的磨损状况为目的进行研究,衬板的磨损量越小越好。对正交分析得出的结论做进一步分析,所得最优方案为衬板倾角 22°,顶边长度 170 mm,衬板高度 250 mm。

运用有限元与离散元的耦合方法对衬板的结构尺寸进行研究,通过正交分析将变形、应力、应变作为衬板磨损的判定指标,发现衬板的倾角对

衬板的磨损具有显著的影响。因而在改善衬板磨损的情况时,应对衬板的倾角做进一步优化。而衬板的顶边长度和衬板高度虽然分析结果表明影响不显著,但同样存在优方案,可加以考虑。

球磨机的实际工况极其复杂,存在众多影响因素,如球磨机转速,球磨机内的化学环境等。本文只对衬板的倾角、顶边长度、高度进行研究,旨在提供一种可供参考的研究方案。

参考文献:

[1] 朱祥,王国强,邵明亮.球磨机梯形衬板设计[J].矿山机械,1993(5):5-7.

[2] Rezaeizadeh M, Fooladi M, Powell M S, et al. A new predictive model of lifter bar wear in mills[J]. Minerals Engineering, 2010,23(15):1174-1181.

[3] Yahyaei M,Banisi S, Hadizadeh M. Modification of SAG mill liner shape based on 3-D liner wear profile measurements[J]. International Journal of Mineral Processing,2009,91(3):111-115.

[4] Yahyaei M, Banisi S. Spreadsheet-based modeling of liner wear impact on charge motion in tumbling mills[J]. Minerals Engineering,2010,23(15):1213-1219.

[5] Djordjevic N. Discrete element modelling of the influence of lifters on power draw of tumbling mills[J]. Minerals engineering,2003,16(4):331-336.

[6] Djordjevic N. Influnce of charge size distribution on net-power draw of tumbling mill based on DEM modeling[J]. Minerals Engineering.2005,18(3):375-378.

[7] Jonsén P, Pålsson B I, Tano K, et al. Prediction of mill structure behaviour in a tumbling mill[J]. Minerals Engineering, 2011,24(3):236-244.

[8] Jonsén P, Pålsson B I, Häggblad H Å. A novel method for full-body modelling of grinding charges in tumbling mills[J]. Minerals Engineering,2012,33(6):2-12

[9] Mindlin R D. Compliance of Elastic bodies in Contact[J]. Journal of Applied Mechanics,1949,16:259-268.

[10] 孙其城,王光谦.颗粒物质力学导论[M].北京:科学出版社,2009.

[11] 侯亚娟.基于离散元与有限元耦合的大型球磨机衬板性能研究[D].长春:吉林大学,2015.

[12] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据分析[M].北京:化学工业出版社,2008.