

文章编号: 1673-3363-(2014)02-0310-05

固体充填采煤物料垂直投放 缓冲装置振动和冲击分析

刘展¹, 张吉雄², 巨峰¹

(1. 中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 缓冲装置的稳定性是固体充填采煤物料连续投放的重要保障。在 ABAQUS 软件中根据缓冲装置的典型设计建立了有限元模型, 对缓冲装置进行了模态分析和频响分析, 并使用刚性球形物料颗粒进行了模拟工况下的冲击响应分析。缓冲装置在垂直周期激励作用下将在第 1 阶固有频率 4.8 Hz 附近发生共振, 提示在物流投放过程中应避免流量以该频率反复波动, 模拟工况分析表明缓冲装置能够承受 700 t/h 的投料流量带来的冲击, 潜在危险点为各关键部件之间的连接部位。

关键词 固体充填采煤; 垂直投放; 缓冲装置; 数值模拟

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

Vibration and impact analysis of buffer device of vertical material feeding system in solid backfilling coal mining

LIU Zhan¹, ZHANG Jixiong², JU Feng¹

(1. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. School of Mines,

China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract Stability of the buffer device ensures the continuous solid materials feeding progress in backfilling coal mining. This paper models the buffer device according to a typical design with FEM software ABAQUS, then carries out modal analysis and frequency-response analysis under vertical excitation, and analyzes the impact response under simulated working conditions in which the material particles are represented by rigid balls. The buffer device's resonance area under vertical excitation is near the first natural frequency 4.8 Hz, and this indicates fluctuations of flow rate should be avoided during the feeding progress. The response under simulated working condition shows that the buffer device can bear the impact load under feeding flow at a rate of 700 t/h, and the critical spots are the joints of the key parts.

Key words fully mechanized backfilling coal mining; vertical transportation and feeding; buffer device; numerical simulation

收稿日期: 2013-01-10

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB227905); 国家自然科学基金项目(51074165); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-11-0728); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2012ZDP01)

作者简介: 刘展(1988-), 男, 山西省潞城市人, 博士, 从事工程力学和固体充填采煤方面的研究。

E-mail: liuzhan001st@163.com

Tel: 13585477191

综合机械化固体充填采煤技术能够有效控制采动引起的岩层移动和地表沉陷等破坏^[11-9], 在“三下”开采中具有独特的优势, 同时还可解决固体废弃物在地面堆放带来的一系列安全和环境问题, 是实现煤矿安全、高效和绿色开采的新途径^[10-12]。

为实现固体充填物料从地面到井下的输送, 目前广泛采用充填物料垂直投放系统, 充填物料在地面经筛分、破碎处理后通过投料井到达储料仓, 为避免充填物料反复高速冲击引起的储料仓及其附属结构的损坏, 在储料仓上口设置有缓冲装置, 其稳定性是充填物料连续投放的重要保障。

缓冲装置的工作载荷取决于充填物料在投料井下口的速度, 充填物料在下落过程中和空气相互作用, 运动过程极其复杂, 对此已有较为系统的研究, 并建立了运动过程的数学模型。缓冲装置的构型设计和投料冲击过程也已得到了研究, 取得了一系列富于实践意义的成果^[13-16]。

由于缓冲装置尺寸较大, 对其进行振动特性测试需要搭建成本较高的测试平台, 而且物料颗粒冲击速度较高, 井下工作环境恶劣, 实测其工作中的冲击响应也有较大的难度和危险性, 所以数值模拟将成为研究的主要方法。本文将在前述研究的基础上, 通过数值模拟的方法对固体充填采煤物料垂直投放缓冲装置振动特性和模拟工况下的冲击响应做进一步分析。

1 缓冲装置的结构原理和有限元模型

1.1 缓冲装置的结构原理

缓冲装置由保护罩、蓄能机构和支撑结构3部分组成。保护罩形状为一锥形曲面, 用来直接承受充填物料颗粒的冲击和改变颗粒运动方向, 并保护其下方的蓄能机构; 蓄能机构由2层圆形弹性支承座和它们之间的弹簧以及阻尼材料组成, 用以缓冲各构件的受力和耗散物料冲击带来的动能; 支撑结构采用2根减振梁布置, 作用是将缓冲装置固定在周围结构上。保护罩与1根导向轴固定相连, 导向轴穿过2层弹性支承座中心孔并与上弹性支承座固定连接, 下弹性支承座则与双减振梁固定连接。缓冲装置的结构组成如图1所示^[13]。

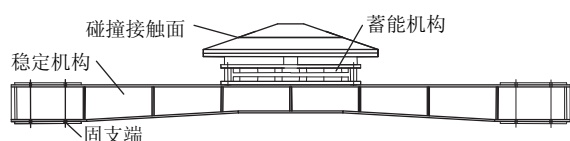


图1 缓冲装置结构简图

Fig.1 Structural sketch of the buffer device

1.2 有限元模型的建立

缓冲装置由多个形状不同的构件组成, 构件之间的连接方式也不同, 系统的运动和受力较为复杂, 且物料颗粒碰撞产生的载荷也难以准确计算, 很难得到装置的振动特性和冲击响应的解析解。

根据现有缓冲装置的典型设计, 在 ABAQUS 软件中建立缓冲装置的有限元模型, 为减小计算规模, 对缓冲装置的几何特性做了合理简化, 保护罩和上、下弹性支承座采用壳单元划分, 导向轴和双减振梁由梁单元划分。划分单元后的模型如图2。

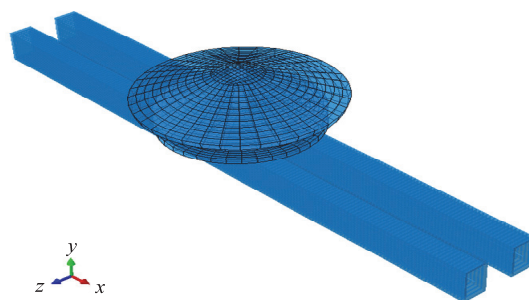


图2 缓冲装置的有限元模型

Fig.2 FEM model of the buffer device

构件材料为钢, 弹性模量 $E=210 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu=0.27$; 2层弹性支承座之间通过18个弹簧和阻尼材料连接, 采用弹簧元件模拟弹簧的作用, 弹簧元件布置如图3所示。

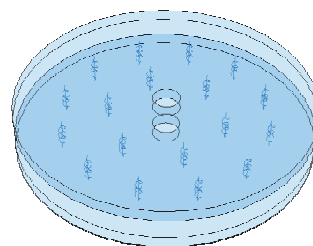


图3 弹簧元件布置

Fig.3 Layout of the springs in FEM model

每个弹簧的刚度 $K=3.2 \times 10^5 \text{ N/m}$, 采用 Rayleigh 阻尼^[17]来体现阻尼材料的作用:

$$C = \alpha M + \beta K \quad (1)$$

式中: C 为阻尼矩阵; M 为质量矩阵; K 为刚度矩阵; α 和 β 分别为质量和刚度阻尼比例系数, 经过理论分析和试算, 模型中取 $\alpha=0.2$, $\beta=0$ 。

模型边界条件为分别固定2根减振梁的两端。

2 缓冲装置的模态和频响分析

通过模态分析获得缓冲装置振动的固有特性, 模态分析在 ABAQUS/Standard 模块中完成。缓冲

装置的前 10 阶固有频率见表 1。

表 1 缓冲装置的前 10 阶固有频率

Table 1 The first 10th natural frequencies of the buffer device

| 模态阶数 | 固有频率/Hz |
|------|---------|
| 1 | 4.8126 |
| 2 | 10.925 |
| 3 | 10.935 |
| 4 | 17.382 |
| 5 | 26.642 |
| 6 | 28.224 |
| 7 | 28.235 |
| 8 | 37.918 |
| 9 | 47.818 |
| 10 | 47.928 |

在保护罩上表面中心附近区域施加均布压力 2.1 MPa, 该载荷在静载作用时将引起 100 mm 的保护罩顶点垂直位移, 以此载荷幅值做 0~15 Hz 范围内的频响分析, 得到保护罩顶点垂直位移的幅频特性曲线, 如图 4 所示。

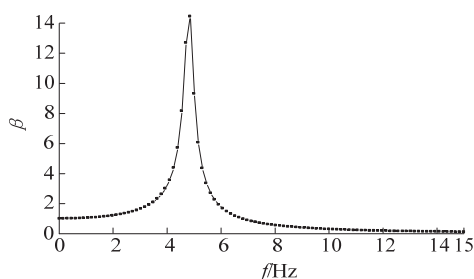


图 4 缓冲装置的垂直位移幅频特性曲线

Fig.4 Vertical displacement amplitude-frequency response curve of the buffer device

图 4 表明缓冲装置垂直振动在频率 4.8 Hz 附近发生共振, 对应的位移振幅放大系数 β 可达 14.5, 从表 1 可知该频率即系统的第 1 阶固有频率, 共振将引起结构的严重破坏, 因此应该避免在频率附近对保护罩施加垂直载荷。注意到该频率较低, 投料流量的波动即可能造成该频率的冲击, 所以投料流量应保持均匀, 在投料开始和结束阶段, 流量也应匀速增减, 避免长时间周期性的波动。

3 模拟工况下的冲击响应分析

3.1 冲击响应模拟方案

模拟工况下冲击响应分析在 ABAQUS/Explicit 模块中完成。缓冲装置在工作中所受载荷是充填物料颗粒和保护罩碰撞产生的作用力, 碰撞作用时间是影响碰撞作用力大小的主要因素, 而碰撞时间难

以通过实测获得, 所以直接在有限元模型中用球形物料颗粒冲击保护罩, 为得到偏于保守的结果, 小球采用刚体建模。结合实际投放物料的粒径要求, 球面直径 $h=50$ mm, 以球心为参考点, 附加质量 $m=0.164$ kg, 转动惯量 $I_{11}=I_{22}=I_{33}=0.0041$ kg·m²。采用通用接触方法处理所有可能出现的接触, 接触条件为法向弹性、切向无摩擦。

考虑到投料管的尺寸, 物料颗粒布置在保护罩顶点上方直径为 500 mm 的圆(圆柱)形区域内, 设计了 2 种模拟工况来考察缓冲装置在 5 s 内的冲击响应, 颗粒布置见表 2。

表 2 2 种模拟工况的物料颗粒布置

Table 2 Material particles layout of the two simulated working conditions

| 工况名称 | 物料颗粒布置 |
|----------|---------------------------------|
| 单次碰撞 | 圆形布置, 1 层, 共 13 个 |
| 20 次连续碰撞 | 圆形布置, 20 层, 每层 13 个, 层间距 0.44 m |

单次碰撞工况对应实际情况中的少量物料突然落下, 20 次连续碰撞工况则等效于一段物料以约 700 t/h 的流量下落。根据物料下落过程的动力学模型^[14-16], 如果投料井足够深, 物料颗粒将在自重和空气阻力的作用下先加速后恒速, 将球形颗粒碰撞前的垂直速度设置为 700 t/h 的投料流量下的最大值 40 m/s。

3.2 冲击响应模拟结果分析

保护罩顶点在 2 种工况下的垂直位移响应如图 5 所示。

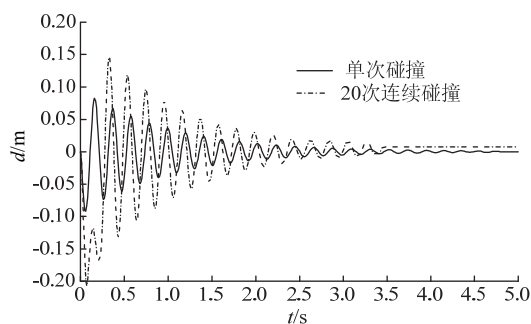


图 5 保护罩顶点的垂直位移响应曲线

Fig.5 Vertical displacement response curve at the top point of the shield

由图 5 可知, 缓冲装置在被物料颗粒撞击后以第 1 阶固有频率自由振动, 单次碰撞和 20 次连续碰撞后保护罩最大振幅分别为 91.7 mm 和 206.8 mm。阻尼材料起到了较好的减振作用, 保护罩顶点在经过约 20 个周期的垂直振动后回到平衡位置。

图6为2种工况下缓冲装置关键部件的 Mises 等效应力在出现最大值时刻的分布。

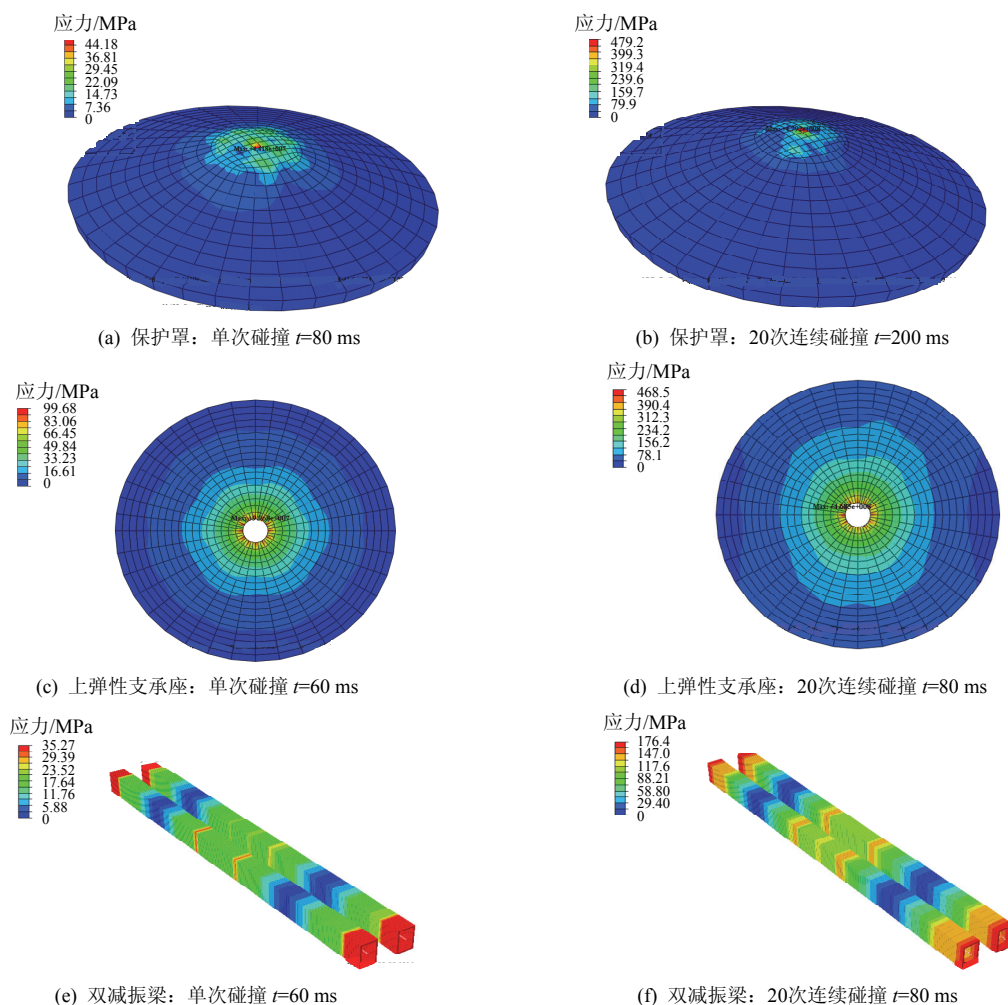


图6 缓冲装置各关键部件的 Mises 等效应力云图(最大值时刻)

Fig. 6 Mises equivalent stress contour plot of key parts of the buffer device

图6显示保护罩、上弹性支承座和双减振梁的 Mises 等效应力最大值在单次碰撞条件下分别为 44.18, 99.68, 35.27 MPa; 在 20 次连续碰撞条件下分别为 479.2, 468.5, 176.4 MPa。缓冲装置的潜在危险点为保护罩与导向轴的连接部位、上弹性支承座与导向轴的连接部位和双减振梁的固支端等应力集中点。考虑到目前已经应用的物料垂直投放系统的实际投料流量为 400~500 t/h 左右^[14-16], 而模拟中 20 层连续碰撞的模拟工况等效于 700 t/h 的投料流量, 且物料颗粒为刚性小球, 产生的冲击力大于实际的物料颗粒, 可以认为目前采用的缓冲装置设计能够满足安全要求。但在这些部位仍然应采用高强度材料, 并改善连接方式以减小应力集中。

4 结论

1) 通过模态分析得到了缓冲装置的各阶固有

频率, 在垂直激励下, 缓冲装置将在第 1 阶固有频率 4.8 Hz 附近发生共振, 为避免以该频率对缓冲装置反复激励, 投料流量应保持均匀, 投料开始和结束阶段也应匀速增减流量, 避免长时间反复波动。

2) 阻尼材料的正确运用能够消耗冲击后缓冲装置的动能, 垂直振动在经过约 20 个周期后衰减至平衡位置。

3) Mises 等效应力分布表明缓冲装置在冲击中的潜在危险点为保护罩与导向轴的连接部位、上弹性支承座与导向轴的连接部位和双减振梁的固支端。本文用刚性小球作为物料颗粒模拟的 700 t/h 投料流量工况较为极端, 所以得到的结果偏于保守。但仍然应在这些部位使用高强度材料, 并改善连接方式以减小应力集中。

本文的研究方法和结果可以作为缓冲装置设计和强度校核的依据。缓冲装置及其周边结构的疲

劳和耐久性设计、保护罩表面磨损机理与防护等课题还有待大量更深入细致的研究。

参考文献:

- [1] 缪协兴, 黄艳利, 巨峰, 等. 密实充填采煤的岩层移动理论研究[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(6): 863-867.
MIAO Xiexing, HUANG Yanli, JU Feng, et al. Strata movement theory of dense backfill mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41(6): 863-867.
- [2] 缪协兴. 综合机械化固体充填采煤技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2012, 37(8): 1247-1255.
MIAO Xiexing. Progress of fully mechanized mining with solid backfilling technology[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1247-1255.
- [3] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体废弃物充填采煤方法与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 24-37.
- [4] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 1-6.
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong, GUO Guangli. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [5] ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, HUANG Yanli, et al. Strata movement controlling effect of waste and fly ash backfillings in fully mechanized coal mining with backfilling face[J]. Mining Science and Technology, 2011, 21(5): 721-726.
- [6] ZHANG Qiang, ZHANG Jixiong, HUANG Yanli, et al. Backfilling technology and strata behaviors in fully mechanized coal mining working face[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 151-157.
- [7] LI Jian, ZHANG Jixiong, HUANG Yanli, et al. An investigation of surface deformation after fully mechanized, solid backfill mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(4): 453-457.
- [8] 缪协兴, 张吉雄. 矸石充填采煤中的矿压显现规律分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 379-382.
MIAO Xiexing, ZHANG Jixiong. Analysis of strata behavior in the process of coal mining by gangue backfilling[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 379-382.
- [9] 张吉雄, 吴强, 黄艳利, 等. 矸石充填综采工作面矿压显现规律[J]. 煤炭学报, 2010, 35(增刊 1): 1-4.
ZHANG Jixiong, WU Qiang, HUANG Yanli, et al. Strata pressure behavior by raw waste backfilling with fully-mechanized coal mining technology[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(Sup 1): 1-4.
- [10] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1-14.
MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.
- [11] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343-348.
QIAN Minggao, XU Jialin, MIAO Xiexing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [12] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [13] 巨峰, 张吉雄, 安百富. 充填采煤固体物料垂直投料井施工工艺研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(1): 38-43.
JU Feng, ZHANG Jixiong, AN Baifu. Key construction technology of vertical feeding bore hole for solid materials in backfilling coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(1): 38-43.
- [14] 吴强. 综合机械化充填采煤固体物料垂直投放系统关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- [15] 张吉雄, 安百富, 巨峰, 等. 充填采煤固体物料垂直投放颗粒运动规律影响因素研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 312-316.
ZHANG Jixiong, AN Baifu, JU Feng, et al. Influence factors of solid material particles motion in the feeding system of fully mechanized coal mining and backfilling [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(3): 312-316.
- [16] 巨峰. 固体充填采煤物料垂直输送技术开发与工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [17] 殷祥超. 振动理论与测试技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2007: 53-72.