

某动力设备基础振动检测与治理

肖轲

陕西长武亭南煤业有限责任公司, 陕西 长武 713602

DOI:10.61369/ME.2026040039

摘 要 : 某洗煤厂破碎机采用钢筋混凝土框架基础, 生产使用过程中设备异常振动导致地面及附近办公用房振感显著, 造成人体不适与生产效率降低。为消除异常振动, 确保建筑安全生产, 现场采用拾振仪采集振源与受迫建筑实时动力特性参数, 基于有阻尼体系受迫振动原理, 结合低频振动在黄土状粉土中的传播特征, 总结目前减隔振常见做法, 提出“嵌固柱+独立基础”设备异常振动治理方案。

关 键 词 : 动力设备; 振动; 动力特性; 阻尼

Vibration Detection and Mitigation of Foundations for Power Equipment

Xiao Ke

Shanxi Changwutingnan Coal Industry Co., Ltd., Changwu, Shaanxi 713602

Abstract : A coal washing plant's crusher employs a reinforced concrete frame foundation. During operation, abnormal equipment vibration caused significant ground shaking and noticeable vibrations in nearby office buildings, leading to physical discomfort and reduced production efficiency. To eliminate the abnormal vibration and ensure construction safety, a vibration detector was deployed on-site to collect real-time dynamic characteristic parameters of both the vibration source and the structure. Based on the principles of forced vibration in damped systems, a comprehensive mitigation plan for equipment-induced abnormal vibration was developed.

Keywords : power equipment; vibration; power characteristics; damping

一、引言

洗煤厂是动力设备密集场所, 据不完全统计, 全国规模洗煤厂约2150个, 每年因设备振动引起的安全问题较突出, 深入研究设备的振动问题有利于保障安全生产。由于工艺需求实际运用中部分动力设备基础采用剪切型为主的框架体系, 受限于使用空间, 体系整体刚度有限, 体系自振频率多为10Hz内的低频范围, 洗煤厂颧式破碎机、齿辊式破碎机、强力分级破碎机等均属于此频率区间设备^[1], 振源与受迫体易出现共振现象。设备支承体系为有阻尼多自由度体系, 目前研究体系运动方程主要采用四种基本力学原理, 简单直观且运用较广泛的D'Alembert原理, 对于复杂分布质量和弹性问题多采用虚位移原理, Hamilton原理及Lagrange方程为标量方法, 表达简洁, 主要分析弹性恢复力, 不需要直接分析惯性力和保守力^[2]。体系强迫振动时不考虑体系P-Δ效应的运动方程表达式为式1-1^[3], 动力设备的激振力一般为稳态简谐、无衰减无增幅, 表示为式1-2。阻尼主要为构件变形时的内摩擦, 对于洗煤厂场景外部介质引起的阻尼较小, 对能量的耗散贡献可忽略。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P\} \quad (1-1)$$

$$\{P_t\} = \{P_0\} \sin \omega t \quad (1-2)$$

$[M]$ 为质量矩阵, $\{\ddot{u}\}$ 为加速度向量, $[C]$ 为阻尼矩阵, $\{\dot{u}\}$ 为

速度向量, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{u\}$ 为位移向量, $\{P\}$ 为激振力向量, $\{P_0\}$ 为荷载的幅值向量, ω 为简谐荷载圆频率。

动力设备振动问题主要归因于设备旋转部件长期磨损、连接节点松动、支承结构刚度不足。振动问题的治理方法通常分为隔振、调频及减振, 对于设备基础或配置刚度较大情况可采用加装橡胶或弹簧减隔振垫^[4-6], 对于因共振引起的振动放大情况可采取调整设备转动频率避开共振区, 因基础或配重刚度较小则应采取增大截面或增加冗余支撑增加刚度。增加冗余支撑对于多自由度体系一方面可减少自由度, 另一方面可增加体系的整体刚度及体系质量。体系的刚度由单元刚度组合而成。

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{1N} \\ K_{21} & \cdot & \cdot & K_{2j} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ K_{N1} & \cdot & \cdot & K_{NN} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

二、工程概况

某洗煤厂破碎机由功率为250KW的电机驱动, 用于对煤块的破碎处理, 破碎机采用钢筋混凝土框架基础, 场房地基土自上而下依次为填土、黄土状粉土、圆砾岩、砾岩。以破碎机所在厂房为中心向四周100m左右范围内地基土层分布一致近期设备异常振动导致地面及附近建筑物振感强烈, 对生产与人员产生一定影响。

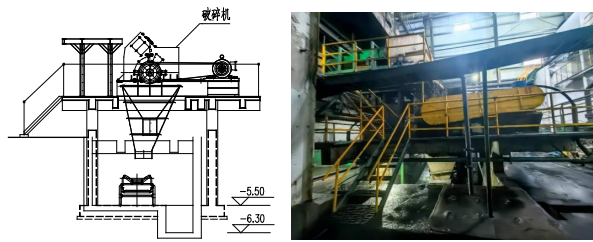


图2-1 设备基础剖面图

三、动力参数采集

(一) 测点布置

结合设备平面布置实际,现场分别选取设备基础、地面及邻近建筑地面振感显著部位布置水平与竖向高精度拾振仪采集实时振动物理量,采用 DASP 专用软件对数据进行处理。测点以破碎机为中点圆周向外辐射布置,间距分别为2m、3m、5m、10m、15m、30m,累计布设105个测点,每一侧点均包含 X、Y、Z 三个方向分量。拾振仪与各测点表面接触良好,测试过程无人员及交通运输设备运行扰振,数据可真实反映测点实际状态。

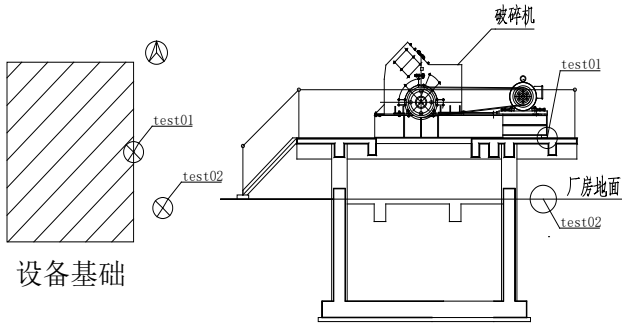


图3-1 典型测点布置示意图

(二) 测点参数时域图

现场采集破碎机启动运行时各测点的速度时域图,测点一与测点二采集工况一致,同一时间采集,采样时间200s。由测点速度时域图可看出,设备基础上,以9.42 Hz为基频,包含明显的2次、3次谐波,是典型的单一频率主导的周期振动,竖向峰值速度为7.45m/s,距离设备基础20m左右处地面竖向峰值速度为0.8m/s,频率与设备基础频率一致,持续时间一致,具有强烈的相关性,表明临近建筑振动由破碎机激发。

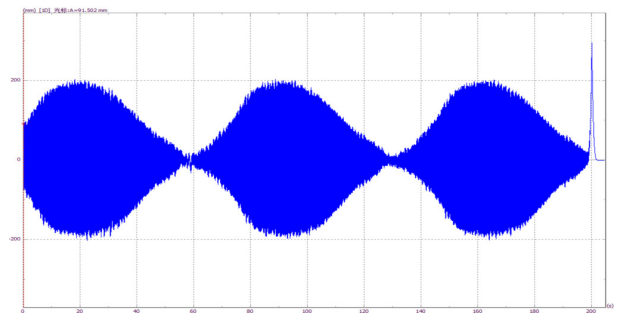
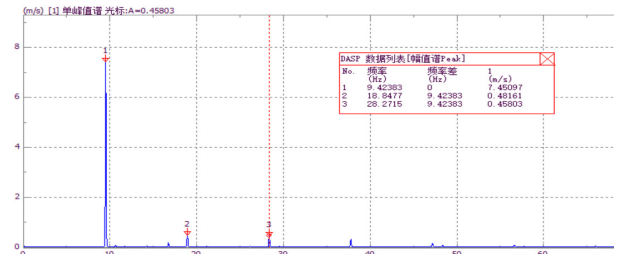


图3-2 test01时域图

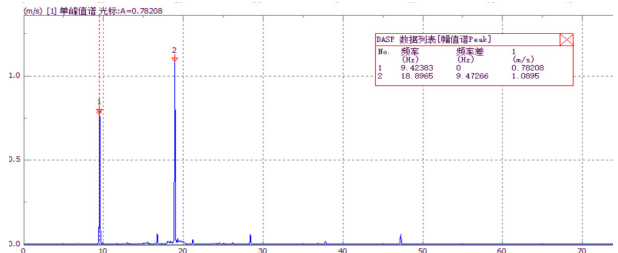


图3-3 test02时域图

邻近建筑室内地面竖向振动峰值速度为0.42m/s,频率同样与设备基频保持一致,实测数据表明振动幅值与测点距呈负相关关系,但衰减速率较低,符合低频振动在土层和建筑结构中传播衰减较慢,容易引发大范围振感不适特点。对比各测点水平向与竖向振动数据,水平向振动峰值速度整体小于竖向,各测点参数增量较小,振动频率特征与竖向保持一致,说明本次异常振动以竖向激振为主,振动能量由破碎机通过地基层向周边传播,带动邻近建筑产生同步受迫振动。

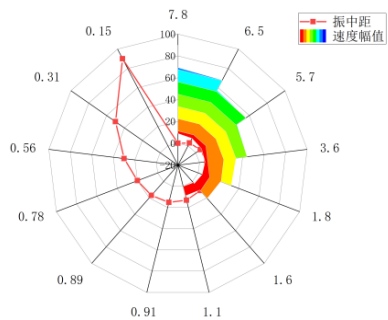


图3-4 测点速度峰值分布图

四、振动治理方案

(一) 结构安全分析

设备基础竖向峰值速度为7.45m/s,峰值振动位移为200mm,远超《建筑工程容许振动标准》^[7](GB 50868-2013)规定限值0.15mm。基础在现有的振动位移下,易发生疲劳破坏。根据《工业建筑可靠性鉴定标准》^[8](GB 50144-2019),设备基础相关构

件存在安全隐患,应采取必要的措施减小设备异常振动。

(二) 异常振动成因分析

由破碎机设备基础原始设计资料可知,破碎机基础柱放置于地下剪力墙上,墙厚300mm,剪力墙锚固于混凝土底板上,底板厚400mm,底板埋深约6m,厂房基础土层分别为填土、黄土状粉土、圆砾岩、砾岩,其中黄土状粉土厚度接近6米,剪力墙深度范围内均为填土和黄土状粉土,该土层细粒土黏粒含量低、结构性强、阻尼小、能量损耗少、衰减慢、传播距离远、低频振动可长距离扩散、波形平缓、持续时间长,易出现共振放大^[9-10]。黄土垂直节理发育,振动易沿水平向远距离传播,振动持续时间长,远距离仍有明显振动,这与现场检测到距离破碎机外80m~100m处办公楼板振动异常相符合,且由于地下剪力墙较薄,其面外刚度较小,剪力墙北侧未封闭,对上部破碎机的激振力耗散较小。破碎机整机放置于单跨混凝土框架上,该体系整体刚度较低,且部分设备直接布置于楼板,楼板频率接近设备频率,存在共振放大效应。

(三) 减振方案

减振应基于振动能量耗散,破碎机工作环境相对潮湿,可忽略动能到热能的转化,式(3-1)左侧表示激振力能量。振动结构耗散能量的机制通常可以理想化为黏性阻尼,对于破碎机混凝土框架基础,阻尼主要来自构件变形时的内摩擦,因此在输入的振动能量不变的前提下,增加设备基础的构件数量对能量的耗散理论可行。结合设备基础周围设备布置较多、空间受限等实际情况,可采取的处理方案一是对破碎机组件进行检修,对旋转组件进行动平衡试验,排除组件因缺陷或安全偏差引起的偏心激振;二是基于增大基础刚度原理,对设备基础进行加固,主要的加固措施为增加钢筋混凝土柱及相应基础,将原电机下混凝土悬挑梁端通过混凝土柱嵌固于独立基础,同时新增混凝土连系梁将嵌固柱串联,提高柱子强弱轴强稳定性,新增嵌固柱截面尺寸与原有

尺寸一致,新增连梁尺寸为250mm×450mm。

$$\int_{t_0}^T P_t \dot{u}_t dt = \int_{U_0}^U M \dot{u} du + \int_{U_0}^U K \dot{u} du + \int_{t_0}^T C \dot{u}^2 dt \quad (3-1)$$

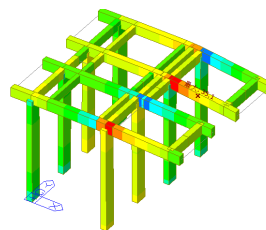


图4-1 原结构时程应力云图

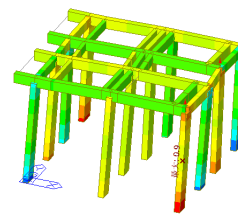


图4-2 减振结构时程应力云图

由有限元计算结果可知,基础未加固之前,激振力周期荷载作用下构件最大应力出现在设备悬挑梁端且应力已超出材料许用应力,基础加固后构件应力重分配,最大应力出现在新增混凝土柱,最大应力远低于材料的许用应力,最大应力减小97%,加固方案可有效改善设备基础受力情况,大幅提升构件在当前荷载工况下的安全系数。嵌固柱独立基础埋置于砾岩中,块状岩石的摩擦可大幅吸收振动能量,缩短振动传播距离,显著减小破碎机振动对其周围土体和建筑的影响。

五、结论

对于破碎机等动力设备应建立定期检修制度,定期检测基础动力特性,减少因设备偏心激振力引起的疲劳破坏。对于洗煤厂等有限空间区域增加设备基础整体刚度能大幅减小支承结构受迫振动响应,针对含有黄土状粉土、砾岩地基土,设备基础设计时地基土持力层应优先选择砾岩,且基础埋深应穿入持力层一定距离。项目针对有限空间下开展的振动检测、安全分析及减振加固方案,可为同类工程中动力设备基础振动问题的检测分析与治理提供参考。

参考文献

- [1] 煤炭工业建筑结构设计标准: GB 50583-2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [2] 刘晶波, 杜修力. 结构动力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [3] 李德葆, 陆秋海. 工程振动试验分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [4] 周警. 精密设备基础减振隔振技术研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [5] 刘涛, 董祥祥, 万益恒. 破碎机设备振动问题的分析及治理 [J]. 设备管理与维修, 2022 (21): 68-70.
- [6] 王彬, 张建宇, 高立新. 旋转设备基础振动信号特征分析 [J]. 振动与冲击, 2020, 39 (15): 212-218.
- [7] 建筑工程容许振动标准: GB 50868-2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
- [8] 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [9] 牛富航, 严武建. 黄土场地地面振动实测与衰减规律分析 [J]. 北京交通大学学报, 2020, 44 (03): 89-96.
- [10] 李鹏, 王兰民. 黄土介质中低频振动传播特性试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43 (S1): 112-116.