

# 基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法

刘俊利<sup>1 2 3</sup> 赵豪杰<sup>1</sup> 李长有<sup>1</sup>

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 河南理工大学 矿山空间信息技术国家测绘局重点实验室, 河南 焦作 454003; 3. 冀中能源集团有限责任公司, 河北 邢台 054000)

**摘要:** 分析煤岩界面识别技术发展的现状, 提出一种利用采煤机滚筒截割振动信号来进行煤岩界面辅助识别的方法。对采煤机的滚筒进行受力分析, 建立摇臂截割振动模型, 通过理论分析验证该方法的可行性; 设计采煤机模拟截割振动测试试验装置, 并利用该装置截割 2 种不同性质材料, 验证振动信号应用于煤岩识别的可行性; 理论分析及试验结果表明振动信号可以应用于煤岩界面的辅助识别, 并通过对试验结果分析给出试验与实际工况可能存在的差异, 提出一种改进的建议。

**关键词:** 煤岩识别; 采煤机; 振动信号; 振动模型

中图分类号: TD421

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2013)10-0093-03

## Coal - Rock Recognition Method Based on Cutting Vibration Features of Coal Shearer Drums

LIU Jun-li<sup>1 2 3</sup> ZHAO Hao-jie<sup>1</sup> LI Chang-you<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Power Engineering Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. National Administration of Surveying Key Lab of Mine Space Information Technology Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

3. Jizhong Energy Group Corporation Ltd. Xingtai 054000, China)

**Abstract:** The paper analyzed the development status of the coal - rock interface recognition technology and a coal - rock interface auxiliary recognition method with the cutting vibration signals of the coal shearer drums was provided. A stress analysis was conducted on the cutting drum of the coal shearer. A cutting vibration model of the ranging arm was established. The feasibility of the method was obtained from the theoretical analysis. A simulated cutting vibration test experiment device of the coal shearer was designed, two different property materials were cut by the device and the feasibility of the vibration signals applied to coal - rock interface recognition was verified. The theoretical analysis and the experiment results showed that the vibration signals could be applied to the coal - rock interface auxiliary recognition. The analysis on the experiment results showed that there was difference between the experiment and the real performances possibly and improved proposal was provided.

**Key words:** coal - rock interface recognition; coal shearer; vibration signal; vibration model

## 0 引 言

煤岩界面识别是采煤机自动控制的基础,也是实现无人自动化开采的先决条件。目前已有 20 多种方法对此展开研究,包括人工  $\gamma$  射线法、自然  $\gamma$  射线法、机械振动法、雷达探测法、红外反射和记忆截割法等<sup>[1-2]</sup>。其中记忆截割技术已被应用于生产中,但不能处理岩层突变和工作面突发情况。笔者

基于采煤机截割煤和岩石产生的振动信号特征提出一种煤岩辅助识别新技术,该技术能直观反映出采煤机的当前截割状态,并通过对采集到的振动信号进行处理,达到对其实现控制的目的。

## 1 煤岩识别理论可行性分析

采煤机工作时,由于煤层物理、力学性能无规则变化和参与截割的截齿数量的变化,致使采煤机滚

收稿日期: 2013-04-09; 责任编辑: 赵 瑞

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205112); 河南省科技攻关资助项目(112102210105); 国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(KLM201106)

作者简介: 刘俊利(1979—),男,山东烟台人,副教授,博士。Tel: 15838961375, E-mail: lj@hpu.edu.cn

引用格式: 刘俊利,赵豪杰,李长有. 基于采煤机滚筒截割振动特性的煤岩识别方法[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(10): 93-95, 116.

筒所承受的外载荷随机变化<sup>[3-4]</sup>。此外,因滚筒在制造、装配中存在偏心问题,滚筒旋转过程产生的偏心质量必然使调高机构产生振动。因此,滚筒的受力情况是采煤机结构设计和振动分析的重要依据。通过分析可知,当采煤机在工作面自右向左采煤时,左滚筒受力情况如图1所示。假设滚筒受到推进阻力 $F_x$ 、截割阻力 $F_y$ 和轴向力 $F_z$ ,则 $F_x = R_1 \sin(\omega_1 t)$ ,  $F_y = R_2 \sin(\omega_2 t)$ ,  $F_z = R_3 \sin(\omega_3 t)$ 。其中: $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 分别为3个方向外载荷的最大幅值, N;  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$ 分别为3个方向外载荷的变化频率, rad/s。

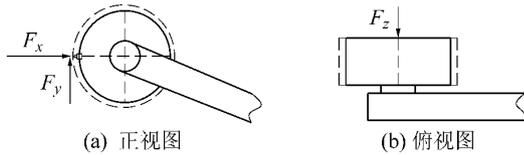


图1 采煤机滚筒受力情况

据图1所示滚筒受力情况,采煤机的摇臂可视为绕定点转动的刚体,调高压缸可等效为有阻尼的液压弹簧<sup>[5-6]</sup>(图2),则调高机构动力学方程为

$$J\theta'' + k_h x L_R \sin \varphi_1 + c_h x' L_R \sin \varphi_2 = \sum M \quad (1)$$

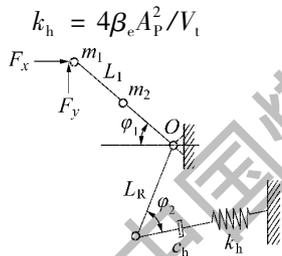


图2 调高机构的振动模型

式中: $J$ 为滚筒对摇臂 $O$ 点的转动惯量,  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ;  $\theta''$ 为摇臂绕 $O$ 点转动的角加速度,  $\text{rad/s}^2$ ;  $k_h$ 为液压缸的液压弹簧刚度(最小近似值),  $\text{N/m}$ ;  $\beta_e$ 为液压油的有效体积弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $A_p$ 为液压缸两腔作用面积平均值,  $\text{m}^2$ ;  $V_1$ 为液压缸两腔当量总容积平均值,  $V_1 = A_p S$  ( $S$ 为液压缸行程),  $\text{m}^3$ ;  $c_h$ 为液压缸的液压黏性阻尼系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $x$ 为液压缸位移,  $\text{m}$ ;  $x'$ 为液压缸移动速度,  $\text{m/s}$ ;  $\varphi_1$ 为大摇臂相对于水平面的夹角, ( $^\circ$ );  $\varphi_2$ 为小摇臂与液压缸活塞杆的夹角, ( $^\circ$ );  $\sum M$ 为对 $O$ 点所有的外力矩之和,  $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

根据图2,调高机构在 $O$ 点存在激振力矩和偏心力矩,则式(1)可变为

$$J\theta'' + k_h x L_R \sin \varphi_2 + c_h x' L_R \sin \varphi_2 = R_1 L_1 \sin(\omega_1 t) \times \cos \varphi_1 + R_2 L_1 \sin(\omega_2 t) \cos \varphi_1 + m\omega^2 L_1 \sin(\omega t) \times \cos \varphi_1 + m\omega^2 L_1 \cos(\omega t) \sin \varphi_1 \quad (2)$$

其中: $m$ 为螺旋滚筒因加工、装配及截齿排列等因素而产生的偏心质量,  $\text{kg}$ ;  $e$ 为螺旋滚筒因加工、装配及截齿排列等因素而产生的偏心距,  $\text{m}$ ;  $\omega$ 为螺旋滚筒的旋转角速度,  $\text{rad/s}$ 。此外,由于摇臂绕 $O$ 点的摆角 $\theta$ 较小,可近似认为 $\sin \theta = \theta$ , 则

$$x = L_R \sin \theta = L_R \theta \quad (3)$$

$$J = m_1 L_1^2 + m_2 L_1^2 / 3 = (3m_1 + m_2) L_1^2 / 3 \quad (4)$$

式中  $m_1$ 、 $m_2$ 分别为采煤机滚筒和摇臂的质量,  $\text{kg}$ 。

螺旋滚筒外载荷的变化频率与滚筒旋转角速度相关,令 $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ ,根据式(2)至式(4)得

$$\theta'' + A_1 c_h \theta' + A_1 k_h \theta = A_2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

$$A_1 = 3L_R^2 \sin \varphi_2 / [(3m_1 + m_2) L_1^2]$$

$$A_2 = \frac{3}{(3m_1 + m_2) L_1} [(R_1 \cos \varphi_1 + R_2 \sin \varphi_1 + m\omega^2 \cos \varphi_1)^2 + (m\omega^2 \sin \varphi_1)^2]^{1/2}$$

$$\varphi = \arctan \frac{R_1 \cos \varphi_1 + R_2 \sin \varphi_1 + m\omega^2 \cos \varphi_1}{m\omega^2 \sin \varphi_1}$$

式中  $\theta'$ 为摇臂绕 $O$ 点转动的角速度。

式(5)为采煤机截割过程摇臂的振动模型,通过该方程可获取采煤机截割煤和岩石产生的振动情况,为煤岩界面的识别提供重要的理论依据。

## 2 基于截割振动煤岩识别的试验分析

### 2.1 试验方案的设计

根据理论分析,滚筒因截割不同硬度材料而产生截割负载不同,其产生的振动信号可以间接传递给摇臂结构,并通过摇臂传递至整个采煤机调高机构。为了能够快速准确获取振动信息,通过试验在模拟装置的不同位置进行采样分析,由于电动机和摇臂变速箱都是振动源,为了更好地采集滚筒的截割信号,将振动传感器安装在滚筒转轴附近的摇臂下方。在模拟采煤机设备上进行了试验,试件固定在小车上,并用液压缸对小车进行驱动,模拟采煤机的牵引运动。模拟采煤机装置滚筒转速为100 r/min,牵引速度为1 m/min,截割宽度分别为40和25 mm。在试验过程中采用测振仪和加速度传感器等对采集信号进行采集和处理。模拟采煤机试验装置简图及数据采集系统如图3所示。

### 2.2 试验材料的制作

以山西省某煤矿工作面煤岩情况为参照,制作模拟材料。该矿工作面煤质为贫煤,普氏系数为1.8~2.0;工作面直接顶石灰岩,普氏系数为3~4,厚度

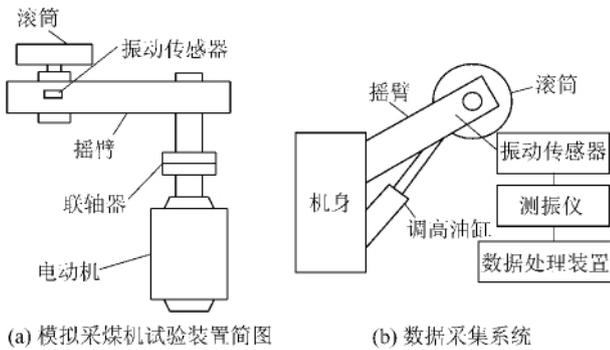


图 3 模拟采煤机试验装置简图及数据采集系统

1.4 m, 深灰色, 厚度不稳定, 含动物根化石。直接底为细砂岩, 厚度 2.7 m, 灰色, 中部为中粒状薄层, 以石英长石为主, 含植物根化石。

由于煤体的非均匀性、各向异性, 以及地下三向应力作用等因素的影响, 要使模拟材料与原材料完全相似很困难, 甚至是不可能的, 因此需判明各种因素中哪些因素是决定性的。通过分析得出煤岩截割材料的特性主要取决于抗压强度和硬度两参数。根据煤岩的特性, 制作了岩石和煤的模拟材料, 尺寸为 800 mm × 500 mm × 500 mm 的试件。

### 2.3 采样周期的确定

采样周期是一个很重要的参数, 它的选择将直接影响系统的控制效果。采样周期不仅要满足采样定理的要求, 同时要考虑采煤机牵引速度、滚筒截割速度、顶板形状变化率、液压支架和刮板输送机推移要求以及煤层顶板落差的影响, 而且油缸的驱动伺服机构存在机械延时, 因此滚筒调高的实际调整频率不能过于频繁<sup>[7-9]</sup>。滚筒记忆程控调高主要应用于煤岩层走向变化相对比较缓慢, 但实际截煤过程中可能会遇到断层或其他突发情况。当采煤机遇到这种情况时, 控制系统可以快速识别, 降低滚筒的转速, 减少截深, 降低牵引速度安全推进。综合考虑以上因素, 振动特性处理间隔时间取 2 s。

### 2.4 数据采集与试验结果分析

通过测振仪对 2 种材料振动试验数据进行傅里叶变换, 进而得到幅值谱幅值  $R_m$ 。

1) 试验 1: 滚筒转速 100 r/min, 截割深度 40 mm, 牵引速度 1 m/min 时, 材料 1 和材料 2 振幅均方根  $R_m$  结果如图 4 所示。通过采样结果分析可以看出, 当采煤机模拟装置截割不同材料时, 两者的  $R_m$  不同, 即 2 种情况下振动的程度不同。模拟岩石材料 1 的  $R_m$  最大值为 1.016 3, 模拟煤材料 2 的  $R_m$

最大值为 0.876 8。通过振动幅值的差异可以快速获得在稳定工况下, 采煤机截割材料的变化, 从而为采煤机高度的调整提供判定依据。

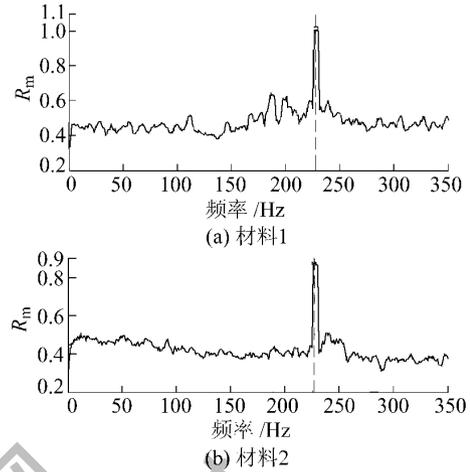


图 4 试验 1 材料 1 和材料 2 振幅均方根  $R_m$

2) 试验 2: 滚筒转速 100 r/min, 截割深度 25 mm, 牵引速度 1 m/min 时, 材料 1 和 2 的  $R_m$  如图 5 所示, 当采煤机模拟装置截割不同材料时, 两者的  $R_m$  同样具有明显差异。模拟岩石材料 1 的  $R_m$  最大值为 0.987 2, 模拟煤材料 2 的  $R_m$  最大值为 0.818 9, 与试验 1 的参数对比可知, 随着采煤机工作参数的变化, 其振动幅值也相应发生变化, 因此在识别过程中也要考虑当前采煤机的工作状况等多种因素。

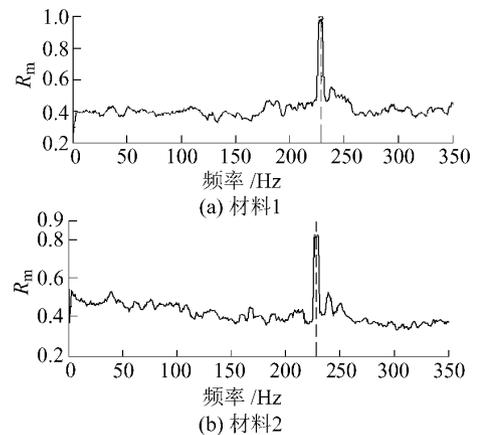


图 5 试验 2 材料 1 和材料 2 振幅均方根  $R_m$

将 2 种材料固定一起, 进行连续截割, 发现在经过分界面后, 振动的幅值特性发生变化, 因此可以根据实际工作情况的统计规律设定在一种材料下的  $R_m$ , 可以认为此时采煤机截割的是煤, 反之, 采煤机截割的是岩石。因此该方法能够有效识别采煤机的截割状态, 为采煤机的自动调高技术提供依据。

(下转第 116 页)

学坐标系不同,展点和坐标查询时需要将 $X$ 和 $Y$ 坐标对换,坐标方位角是顺时针旋转,而数学坐标系中的角度是以逆时针方向旋转的,所以在旋转测量角度前加负号。

3) 旋转和缩放导线前,需将导线整体设置为AutoCAD中多段线形式,不能用直线的方式相连。

4) 使用AutoCAD中ID命令查询各点坐标时,须使用“对象捕捉”模式精确查询,还可以方便地查询和标注每条导线边坐标方位角。

5) 利用AutoCAD图解计算,只适用于坐标测量的计算,对于高程的计算需单独进行。

6) 利用AutoCAD作图计算,只适用于单一形式的导线测量,对于地下空间交叉导线、结点导线的几何解算方法还有待于进一步探讨。

## 5 结 语

对于两井定向,采用不同的数学模型和计算方法,其计算结果都是有微小差别的,而利用AutoCAD进行两井定向的图解计算,可以做到简单快捷、直观明了,减少测量人员的内业计算工作量,提高工作效率,还可以直观检查或避免测量与计算过程中的错误,通过实例验算,计算的成果和精度与传统公式法

计算是一致的,该方法同样适用于地面支导线和无定向附和导线测量的计算,在矿山工程和线路工程测量中可以推广应用。

### 参考文献:

- [1] 张国良. 矿山测量学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006: 52-74.
- [2] 田发, 姜斌. 两井定向在矿山中的应用[J]. 西部探矿工程, 2010(12): 142-146.
- [3] 徐茂林, 杨风云, 李冬梅, 等. 利用一井定向资料完成两井定向的方法[J]. 测绘通报, 2002(1): 29-31.
- [4] 孙晓非. AutoCAD2010中文版标准教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [5] 廖四海, 刘艳红. AutoCAD在道路工程测绘中的应用[J]. 湖南城市学院学报: 自然科学版, 2011, 20(1): 32-34.
- [6] 彭伟平. 两井定向内业计算的新方法及其应用[J]. 金属矿山, 2005(8): 49-51.
- [7] 彭伟平. 探讨提高两井定向成果解算精度的方法[J]. 金属矿山, 2005(7): 38-41.
- [8] 沙从术. 现代测量学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 126-130.
- [9] 高井祥, 肖本林, 付培义, 等. 数字测图原理与方法[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 158-162.
- [10] 高井祥. 测量学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 173-177.

(上接第95页)

## 3 结 语

通过模拟截割试验,并对采集到的振动信号进行处理和分析得出,当截割参数相同时,不同材料的振动信号幅值不同。试验验证了运用振动信号进行煤岩识别的可行性,尤其是该方法是基于振动的频谱特性对煤岩分界进行识别,不是通过实时振动信号进行分析,因此可以避免采煤机自身抖动或其他因素影响造成的意外振动加剧,而导致做出错误判断。但是井下工作环境复杂,需要在工作面现场采集信号,进一步验证振动信号识别煤岩的效果。后期现场试验研究将主要是实现现场工况下的振动信号识别与噪声信号的分离,并且与其他煤岩识别技术相结合实现对煤岩分界的准确识别。

### 参考文献:

- [1] 王国法. 高效综合机械化采煤成套装备技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2008.
- [2] 刘春生. 滚筒式采煤机记忆截割的数学原理[J]. 黑龙江科技

学院学报, 2010, 20(2): 85-90.

- [3] 刘春生, 于信伟, 任昌玉. 滚筒式采煤机工作机构[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.
- [4] Singha M K, Rupesh Daripa. Nonlinear Vibration of Symmetrically Laminated Composite Skew Plates by Finite Element Method[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2007, 42(9): 1144-1152.
- [5] XING Yu-feng, LIU Bo. Characteristic Equations and Closed-Form Solutions for Free Vibration of Rectangular Mindlin Plates[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2009, 22(2): 125-136.
- [6] 李萍, 刘春生, 李晓谿. 采煤机调高机构的动力学分析[J]. 黑龙江矿业学院学报, 2000, 10(4): 18-20.
- [7] QIU Zhi-cheng, WU Hong-xin, YE Chun-de. Acceleration Sensors Based Modal Identification and Active Vibration Control of Flexible Smart Cantilever Plate[J]. Aerospace Science and Technology, 2009, 13(6): 277-290.
- [8] Yang J, Kitipornchai S, Liew K M. Large Amplitude Vibration of Thermo-Electro-Mechanically Stressed FGM Laminated Plates[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2003, 192(35): 3861-3885.
- [9] 张伟. 基于采煤机DSP主控平台的自动调高预测控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.