

# 坚硬顶板冒落的离层遥测预报系统研究

谭云亮<sup>1</sup>, 何孔翔<sup>2</sup>, 马植胜<sup>2</sup>, 闫相宏<sup>3</sup>

(1. 山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266510; 2. 北京昊华能源有限公司, 北京 102300;  
3. 尤罗卡有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 煤矿坚硬顶板冒落时对回采工作面造成的冲击较大, 将严重影响开采安全。针对用顶板挠曲变形量值来预报顶板冒落时, 预报阈值随着顶板岩性不同而有较大的差异的不足, 提出用顶板离层速度高峰段的出现作为预报下位顶板冒落的方法, 并研制开发顶板离层遥测系统, 经在木城涧煤矿坚硬顶板预报实践表明, 该预报系统可以实现对顶板冒落的遥测预报, 该成果对地下工程顶板冒落的监测预报具有一定的推广应用价值。

**关键词:** 采矿工程; 坚硬顶板; 离层速度; 遥测系统; 冒落预报

**中图分类号:** TD 327.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2006)08 - 1705 - 05

## RESEARCHES ON REMOTE MONITORING AND FORECASTING SYSTEM FOR HARD ROOF FALL

TAN Yunliang<sup>1</sup>, HE Kongxiang<sup>2</sup>, MA Zhisheng<sup>2</sup>, YAN Xianghong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Mine Disaster Prevention and Control of Ministry of Education, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266510, China;  
2. Beijing Haohua Energy Co., Ltd., Beijing 102300, China; 3. Uroica Instrument Ltd., Tai'an, Shandong 271000, China)

**Abstract:** Hard roof fall will have great adverse impacts on mining engineering; and it will affect the safety of mining. Generally, the value of distortion or bedding separation of roof may be used as the indicator of roof fall, but it is very difficult to give a definite separation value to forecast roof fall because the separation threshold of roof fall changes with the lithology of roof. A new method using the curve peak segment pattern of separation velocity in roof is presented to forecast the roof fall below separation. A new computer-controlled remote monitoring roof separation and a forecasting roof fall system have been invented. It is shown by the hard roof fall forecast practices in Muchengjian Mine in China that the system is accurate and reliable; and it can forecast roof fall ahead 15 - 29 hours. The system can provide references to the roof fall predication in various underground engineerings.

**Key words:** mining engineering; hard roof; separating velocity; remote monitoring system; roof fall forecast

## 1 引言

煤矿顶板岩层一般为典型的层状结构, 顶板岩

层之间的离层往往预示着顶板失稳破坏的开始。在煤矿巷道顶板支护中, 往往把离层大小作为对顶板支护效果的好坏。因此, 对离层的研究引起国内外学者的高度重视, 如 B. K. Hebblewhite 和 T. Lu<sup>[1]</sup>对

**收稿日期:** 2005 - 03 - 23; **修回日期:** 2005 - 06 - 20

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目(50534080); 山东省自然科学基金资助项目(Y2004F11); 山东科技大学矿山灾害预防控制教育部重点实验室开放基金项目; 山东省“泰山学者”建设工程专项经费资助项目

**作者简介:** 谭云亮(1964 -), 男, 博士, 1996年于东北大学工程力学专业获博士学位, 现任教授, 主要从事岩石力学方面的教学与研究工作。  
E-mail: tyllp@163169.net

综采顺槽软顶板的离层进行监测，为顺槽稳定性加固设计提供基础；A. Yassien 等<sup>[2]</sup>通过顺槽顶板离层的监测，评价全长锚固加固效果；刘长武和郭永峰<sup>[3]</sup>、鞠文君<sup>[4]</sup>、李红涛等<sup>[5]</sup>、张文军等<sup>[6]</sup>和孔恒等<sup>[7]</sup>等研究锚网巷道、锚网锚索联合支护巷道的顶板离层的机制，并对顶板离层与锚固系统的变形协调条件及离层临界值等进行大量研究，这些为锚杆(索)支护巷道的稳定性判别奠定坚实的基础。由于采空区大面积失稳冒落时往往给开采带来很大威胁，并严禁工作人员进入采空区作业对顶板稳定性进行监测。尽管声波探测等技术<sup>[8~11]</sup>可用于监测顶板稳定性，但其可靠性难以保障，如何对采空区顶板冒落进行监测预报一直是采矿工程中需要解决的难题之一。为此，本文提出在回采工作面内通过安设顶板离层系统，随着推进离层传感器将进入采空区，实现遥测预报顶板冒落的成果。

## 2 基于离层监测顶板冒落预报机制

如图 1 所示，若将顶板视为各向同性体，按照平面应变模型进行简化可视为弹性梁结构，梁内最大挠度为

$$w_{\max} = \frac{\gamma L^4}{32Em^2} \tag{1}$$

式中： $E$  为顶板弹性模量， $m$  为顶板厚度， $\gamma$  为顶板容重， $L$  为巷道顶板的跨度。

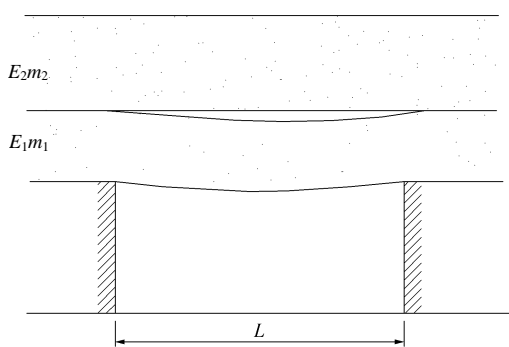


图 1 顶板离层示意图

Fig.1 Schematic diagram of roof separation

当  $w_{\max 1} > w_{\max 2}$  时，离层将要产生，此时有

$$E_1m_1^2 < E_2m_2^2 \tag{2}$$

式中： $E_1$ ， $m_1$  分别为下部岩层的弹性模量和厚度； $E_2$ ， $m_2$  分别为上部岩层的弹性模量和厚度。

式(2)为上、下两层顶板产生离层的变形条件。研究表明，离层是顶板冒落的前奏<sup>[6]</sup>，但由于岩层的刚度和韧性等差异，不同岩层产生离层后冒落时所发生挠曲变形量将有很大不同，如脆性砂岩，在离层量很小时就要发生冒落，而石灰岩岩层离层量和挠曲变形很大也不发生冒落，呈现出缓慢下沉状态。因此，单纯用离层量的大小来判定顶板是否将要冒落是不科学的。根据顶板挠曲下沉速度变化及其非线性特征来预报顶板冒落取得成功<sup>[8~10]</sup>。因此，作为尝试，本文采用离层速度的高峰段作为预测顶板冒落的前兆。

## 3 顶板冒落预报离层遥测系统

目前，顶板离层监测主要用于巷道，大部分是机械式离层计，人工读数，其主要缺陷有：(1) 人工读数易产生较大的量测误差，且精度不高，一般为 1 mm。(2) 易对传感器产生人为的挠动，造成失效。顶板冒落预报离层遥测系统不仅精度高，一般为 0.01 mm，而且可消除人工读数的影响。

### 3.1 离层遥测监测系统结构

采空区顶板离层监测使用 KJF - 1 - 4 矿用顶板离层报警仪分站和 KGD - 1 - 150 矿用顶板离层传感器。该系统主要用于煤矿井下巷道或工作面顶板离层位移检测和报警。采用安全电路，可用于井下含有瓦斯等爆炸性气体的危险场所。

该监测系统的主要特点是：(1) 采用高性能的微处理器和高精度的位移传感器。(2) 具有精度高、连续记录、现场显示、报警、数据通讯和计算机数据处理等功能。监测系统单元组成如图 2 所示。

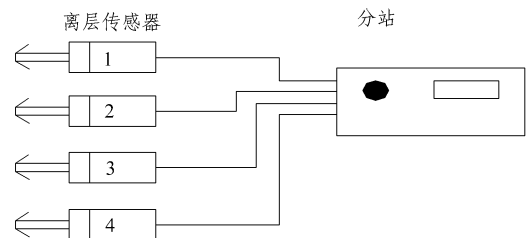


图 2 监测系统单元组成示意图

Fig.2 Schematic diagram of components of cells in the monitoring system

监测分站与 1~4 个离层传感器组成一个基本监测单元，这样多个测量单元可组成监测系统。KJF - 1 - 4 分站和 KGD - 1 - 150 传感器分别如图 3，4

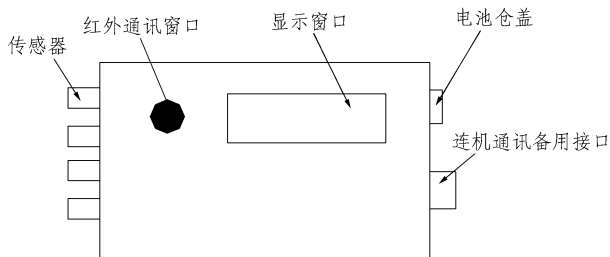


图 3 分站结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of sub-stations

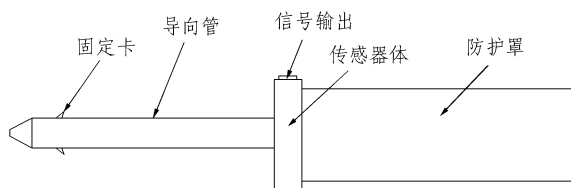


图 4 离层仪传感器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of separating sensors

所示。

### 3.2 工作原理

分站采用 AT89C55 单片计算机控制, 信号的接收由传感器输出的数字信号, 解算出绝对位移数据, 保存在数据存储器中, 同时显示每个通道的绝对位移量和相对位移量, 当顶板的位移量超过设定阈值时, 分机发光指示报警。

基本传感器部分采用容栅式位移传感器, 当顶板内部产生离层时, 通过不同深度的固定点牵引传感器的运动, 使传感器产生相对位移变化, 位移的变化引起传感器极板电容的变化, 电子测量电路通过测量瞬间电容的变化量从而计算出位移量, 位移信号通过 SDLC 接口数字输出。

这样, 传感器测到的位移信号经过分机储存, 并通过电缆传输到地面计算机, 由开发的专用软件对监测到的数据进行处理和分析, 绘制成相应预报曲线。

需要指出的是, 应选择顶板完整性好, 没有断层等构造的区域。

## 4 坚硬顶板冒落离层遥测预报实践

### 4.1 顶板冒落的离层速度预报模式

研究表明<sup>[8, 10]</sup>, 坚硬顶板冒落前夕, 将产生下沉速度“波峰段”, 尔后顶板处于暂时的平衡状态。因此, “波峰段”成为顶板冒落的前兆。同时, 巷道离层监测研究<sup>[6]</sup>, 顶板离层后顶板下沉速度加

大, 并会滞后出现垮落。因此, 有理由把离层速度的“波峰段”作为顶板冒落预报的前兆信息。但应当指出, 对于不同岩性、不同厚度的顶板, 其离层“波峰段”速度波峰值将不同, 需要进行大量的现场试验研究来确定离层“波峰段”速度波峰值的范围。

### 4.2 测区布置

本系统在木城涧煤矿 3 槽坚硬顶板高柱工作面进行预报实践。当工作面推进到 30 m 左右时, 在离上顺槽 10, 30 m 处各安装一离层传感器, 并在下顺槽安设一分机, 开始对顶板离层情况进行监测(如图 5 所示), 且每推进 20 m, 便安设一组。其中, 钻孔深度为 3.2 m, 远点安设在 3.2 m 处, 中点安设在 2.2 m 处, 近点为 0.8 m。

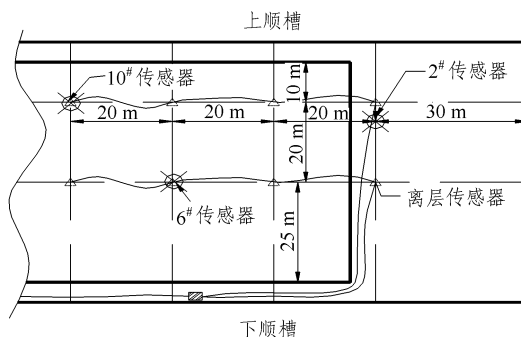


图 5 离层传感器位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of locations of separating sensors

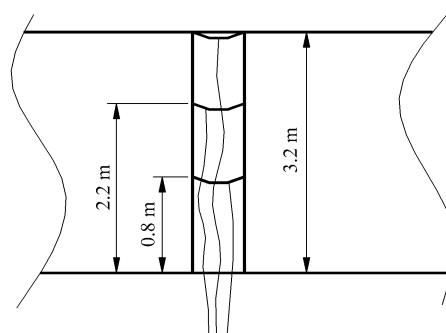


图 6 离层传感器安装示意图

Fig.6 Schematic diagram of separating sensors installation

### 4.3 预报实践

#### (1) 实例 1

如图 7 所示, 在 2004 年 4 月 6 日 00: 00 时, 2# 传感器处离层速度出现高峰, 此时发出顶板冒落的预报。4 月 6 日 15: 00, 位于采空区内的 2# 传感器附近, 有厚度为 0.7 m 左右、面积约为 20 m<sup>2</sup> 的顶板发生冒落, 离层遥测系统提前 15 h 对该次顶板冒落进行预报。

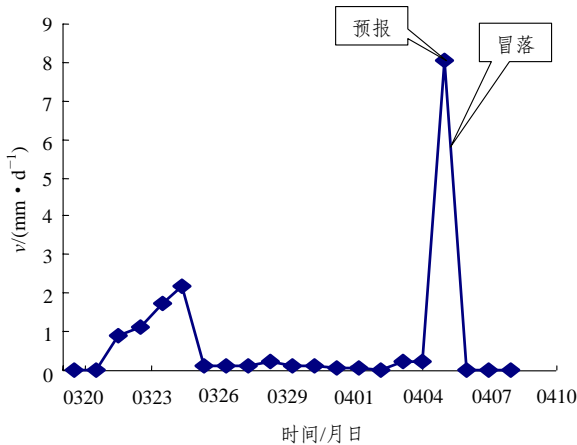


图 7 2# 传感器处离层速度变化图(2004 年)

Fig.7 Separating velocity at the location of sensor No.2(in 2004)

(2) 实例 2

如图 8 所示, 2004 年 6 月 26 日 8: 00, 6# 传感器在采空区内顶板离层速度出现高峰, 此时发出顶板冒落预报。6 月 27 日 19: 05, 工作面采空区顶板在 6 号传感器附近冒落 100 m<sup>2</sup> 左右, 厚 1 m 左右, 离层遥测系统提前 35 h 该次顶板冒落进行预报。

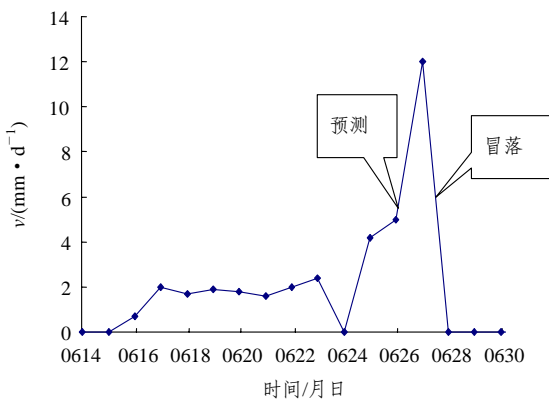


图 8 6# 传感器处离层速度变化图(2004 年)

Fig.8 Separating velocity at the position of sensor No.6(in 2004)

(3) 实例 3

如图 9 所示, 2004 年 7 月 29 日 00: 00, 10# 传感器在采空区顶板离层速度出现高峰, 此时发出预报。7 月 30 日 15: 20, 工作面采空区顶板在 10# 传感器附近冒落 350 m<sup>2</sup>, 厚 1.5 m, 离层遥测系统提前 39 h 该次顶板冒落进行预报。

由上述 3 个实例的应用结果表明, 本文研制的坚硬顶板冒落的离层遥测预报系统对实际工程具有一定的现实意义, 其合理性也得到验证。

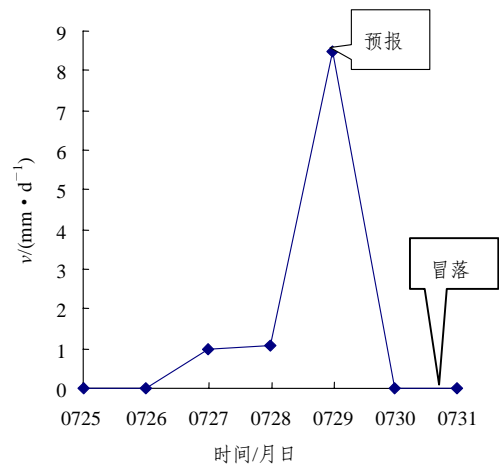


图 9 10# 传感器处离层速度变化图(2004 年)

Fig.9 Separating velocity at the location of sensor No. 10(in 2004)

### 5 结 论

(1) 顶板离层速度高峰段的出现, 标志着下位顶板显著挠曲变形迅速增加, 是顶板冒落的前兆, 因此用顶板离层速度高峰段的出现作为预报下位顶板冒落是十分准确的, 这样避免用顶板挠曲变形量值大小预报顶板冒落时, 预报阈值随着顶板岩性不同而有所不同的不足。

(2) 研制开发的顶板离层遥测系统, 经实践证明, 可以实现对顶板冒落的遥测预报, 该成果对地下工程顶板冒落的监测预报具有参考价值。

(3) 该顶板离层遥测系统, 对坚硬顶板非常有效, 但对中等稳定及破碎顶板的冒落不适合。

(4) 由于顶板沉积建造的复杂性, 不同岩性和不同厚度顶板离层速度值不同, 且出现波峰段出现后, 顶板滞后冒落的时间也将不同, 这将是今后需要进一步深化研究之处。

#### 参考文献(References):

[1] Hebblewhite B K, Lu T. Geomechanical behaviour of laminated, weak coal mine roof strata and the implications for a ground reinforcement strategy[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(1): 147 - 157.

[2] Yassien A, Heasley K, Khair A, et al. Analysis of Failure Modes for Fully Grouted Resin Bolts[M]. Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2004. 1 009 - 1 016.

[3] 刘长武, 郭永峰. 锚网(索)支护煤巷顶板离层临界值分析[J]. 岩土

- 力学, 2003, 24(增 2): 231 - 234.(Liu Changwu, Guo Yongfeng. Analysis of roof bedding separation critical value of coal mining gallery supported with bolts(cables)[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(Supp.2): 231 - 234.(in Chinese))
- [4] 鞠文君. 锚杆支护巷道顶板离层机制与监测[J]. 煤炭学报, 2000, 25(增): 58 - 61.(Ju Wenjun. Monitoring technology for rock bolting engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(Supp.): 58 - 61.(in Chinese))
- [5] 李红涛, 李化敏, 邹友平. 顶板离层仪在锚杆支护参数优化中应用[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 16(4): 73 - 75.(Li Hongtao, Li Huamin, Zhou Youping. Applications of separating meter in bolt support optimizing[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 16(4): 73 - 75.(in Chinese))
- [6] 张文军, 张宏伟, 于世功. 锚杆支护巷道顶板离层监测方法探讨[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(4): 421 - 424.(Zhang Wenjun, Zhang Hongwei, Yu Shigong. Study on the monitor method of roof separation in bolter support roadway[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(4): 421 - 424.(in Chinese))
- [7] 孔 恒, 马念杰, 王梦恕, 等. 基于顶板离层监测的锚固巷道稳定性控制[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(3): 55 - 58.(Kong Heng, Ma Nianjie, Wang Mengshu, et al. Controlled stability of rock bolting roadways based on roof abscission layer monitor[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(3): 55 - 58.(in Chinese))
- [8] 谭云亮, 王学水. 煤矿坚硬顶板活动过程中声发射特征的初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 275 - 284.(Tan Yunliang, Wang Xueshui. Initial study on AE of hard roof movement in mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 275 - 284.(in Chinese))
- [9] 谭云亮, 朱浮声, 王永嘉. 矿山岩层非线性动力学反演预测方法[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(4): 16 - 19.(Tan Yunliang, Zhu Fusheng, Wang Yongjia. Nonlinear dynamics back analysis predicting method for strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(4): 16 - 19.(in Chinese))
- [10] 蒋金泉, 谭云亮, 潘立友, 等. 矿山压力监测及预报[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999. 46 - 48.(Jiang Jinquan, Tan Yunliang, Pan Liyou, et al. Monitoring and Forecast for Strata[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1999. 46 - 48.(in Chinese))
- [11] 赵 奎. 岩金矿山采空区及残留矿柱回采稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1 404.(Zhao Kui. Stability study on mined-out areas and recovery of residual pillars in rocky gold mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1 404.(in Chinese))

## 下期内容预告

下期《岩石力学与工程学报》主要发表下列内容的文章:

- (1) 软岩遇水软化膨胀特性及其对拱坝的影响;
- (2) 土工合成材料界面特性的研究和试验验证;
- (3) 基于改良型平面应变仪的砂土特性研究;
- (4) 综放沿空巷道围岩系统混沌动力学特征研究;
- (5) 软岩类材料冻融过程水热迁移的实验研究初探;
- (6) 深部巷道围岩的分区破裂机制及“深部”界定探讨;
- (7) 岩石破裂过程分析系统并行计算方法研究;
- (8) 二维动静组合加载下岩石破坏的试验研究;
- (9) 短文(研究进展与工程实录)。