

文章编号: 1673-3363-(2013)03-0343-05

# 大倾角孤岛综采面支架-围岩稳定性控制研究

谢生荣, 张广超, 张守宝, 何富连, 肖殿才, 田春阳

(中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083)

**摘要** 针对1523大倾角工作面进入孤岛区后支架-围岩事故频发的开采难题, 探析了支架-围岩事故频发原因, 采用现场测试与回归计算分析方法研究冒漏片帮与支护参数的相关性关系, 并提出了支架故障诊断、防倒防滑装置、稳定性控制指标和设备操作工艺等综合控制技术。结果表明: 采用该技术后端面顶板冒高大于0.40 m的冒顶频率由76%减小到16%, 端面煤体片深大于0.5 m的片帮频率由72%减小到23%, 未发生恶性片帮冒顶与支架倒架现象, 有效解决了大倾角孤岛面支架-围岩失稳的控制难题。

**关键词** 大倾角孤岛面; 片帮冒顶; 故障诊断; 支架-围岩关系

**中图分类号** TD 32

**文献标志码** A

## Stability control of support-surrounding rock in the large inclination fully mechanized island face

XIE Sheng-rong, ZHANG Guang-chao, ZHANG Shou-bao, HE Fu-lian,

XIAO Dian-cai, TIAN Chun-yang

(College of Resource and Safety Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract** In allusion to the problem of support-surrounding rock accidents when No.1523 fully mechanized face with large inclination advanced to the island district, we analyzed the cause of the accident. The relative relationship between roof fall and rib spalling and support parameters was studied by spot testing and regression analysis. Then the synthetical control technology including fault diagnose, device for anti-falling and anti-slipping, stability control indices, equipment operation process and so on was put forward. Result shows that the frequency of roof fall height over 0.40 m decreased from 76% to 16%, and the frequency of rib spalling over 0.50 m decreased from 72% to 23% after the technology was applied in coal face of No.1523. So no serious accidents of rib spalling and roof fall occurred, the control problem of support-surrounding rock instability in the coal face of large inclination and island district were solved.

**Key words** large inclination fully mechanized island face; rib spalling; fault diagnose; relationship of support-surrounding rock

我国煤层倾角大于35°的煤炭资源储量约占总储量的五分之一, 其中西部50%以上的矿井均赋存

有大倾角煤层<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着煤炭资源开采强度和范围的不断增加, 我国中东部矿区赋存条件较好

收稿日期: 2012-05-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51234005)教育部博士点新教师基金项目(20110023120002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010QZ06)

作者简介: 谢生荣(1981-), 男, 江苏省六合县人, 讲师, 博士, 从事矿井灾害治理方面的研究。

E-mail: xsrxcq@163.com

Tel: 13810521426

煤炭资源接近枯竭,大倾角煤层开采成为一些矿区实现可持续发展的必然选择,要保持其安全高效和可持续发展就必须解决大倾角煤层开采的难题。冀中能源葛泉矿在大倾角煤层开采方面积累了一定的实践经验,基本能解决地质条件较好区域的开采问题,但工作面进入孤岛区域后,出现了不同程度的支架-围岩事故。本文在探究支架-围岩事故原因的基础上,通过对现场矿压观测数据回归分析,确定影响支架-围岩事故的关键因素,并提出相应的控制技术,有效解决了大倾角孤岛面的开采难题。

## 1 大倾角孤岛面支架-围岩事故原因分析

1523 大倾角综采面开采 2 号煤层,为无烟煤,硬度系数  $f=1.0$ ,黑色,煤层内生裂隙发育,易碎,平均厚度为 2.7 m,倾角为  $27^{\circ}\sim 41^{\circ}$ 。伪顶局部发育,岩性为粉砂岩;直接顶为泥质粉砂岩,局部不稳定发育粉砂岩形成伪顶,平均厚度 1.7 m;基本顶为中砂岩,灰白色,中粒结构,平均厚度为 6.2 m;直接底为黑色粉砂岩,局部夹细砂薄层,中厚层状,具水平条理,平均厚度 6.8 m。

1523 综采面位于南翼一采区 1525 与 1521 采空区之间,西北为一采区轨道运输上山,东北为 1525 工作面采空区。采用走向长壁后退式综合机械化采煤法,支架为 ZY3200/13.5/28 型和 ZY3200/14/32 型老旧支架。

1523 大倾角综采区段地质构造复杂,断层较发育,孤岛区域分别赋存有  $F_{506}$ ,  $F_{505}$  和  $f_{25-7}$  3 条断层,落差分别为 5, 2.5, 3 m。1523 区段平巷孤岛区域掘进揭露十余条落差在 0.4~1.6 m 的小断层。1523 大倾角综采面进入孤岛区域后的一系列复杂地质生产条件导致支架-围岩事故频发,使得 2011 年 1 月至 4 月期间,工作面仅回采了 100 余米。工作面曾发生大范围(冒长 16 m、冒高 6 m 以上)冒顶事故,仅处理该事故就花费了半个多月的时间,严重制约矿井安全高效生产。图 1 为 1523 大倾角孤岛综采面支架-围岩事故照片。

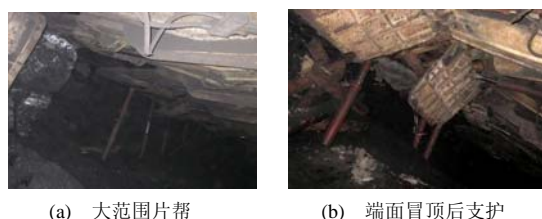


图 1 1523 大倾角孤岛面支架-围岩事故

Fig.1 Support-surrounding rock accidents in large inclination island face No.1523

依据葛泉矿 1523 大倾角孤岛面地质生产条件和支架系统特点,分析得出 1523 综采面支架-围岩事故原因主要有以下几个方面:

1) 大倾角复杂地质条件综采液压支架受力状态复杂。随着工作面倾角增大,支架自身重力的法向分力减小,切向分力增大,即倾角增大引起支护系统失稳的外载荷增大,因此,支架倒架及架间挤架、咬架现象加剧<sup>[3]</sup>。在支架故障或冒顶等区域处于弱支撑状态或自由状态时,支架更易发生失稳现象。当工作面来压时,由于顶、底板的运动,支架亦极易产生失稳现象,或出现非正常工作状态。

2) 支承应力大。建立 1523 大倾角孤岛面支承应力的数值模拟模型<sup>[4-6]</sup>,模拟结果如图 2 所示。1523 孤岛面围岩所受的垂直支承应力呈马鞍形分布,应力范围为 18~32 MPa,集中系数可达 2 倍以上;水平支承应力范围为 8~12 MPa,应力集中系数达 1.5 倍以上。围岩应力的倍增,引起大倾角综采支架支护系统失稳的外载荷变大,导致工作面支架-围岩事故频发,基本顶周期来压期间的支架-围岩系统控制难度显著增加。

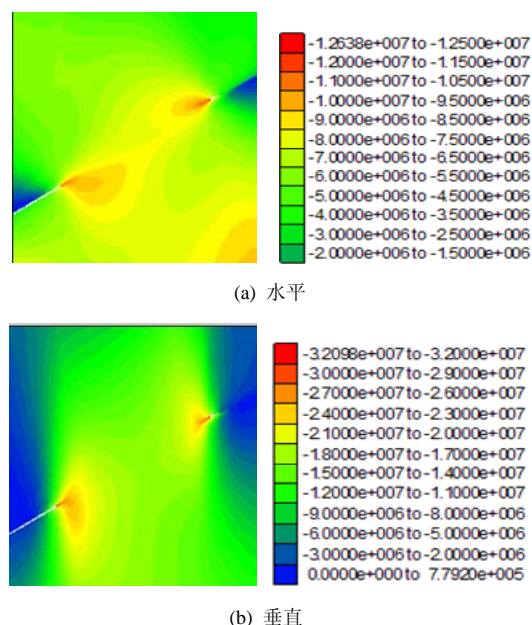


图 2 孤岛面围岩支承应力云图 (Pa)

Fig.2 Cloud picture of abutment stress in the island face

3) 1523 综采面采用 ZY3200/13.5/28 型和 ZY3200/14/32 型 2 种老旧液压支架,均趋近于液压设备故障率规律曲线的耗损故障区,支架液压系统故障率高,支架工作阻力不足,控顶可靠性差,影响支架正常操作和支护质量。1523 综采面支架液压系统泄漏故障见图 3。



图3 支架液压系统泄漏故障

Fig.3 Leakage fault of the support hydraulic system

4) 煤体强度低、节理裂隙发育。煤壁在采动应力作用下发生较小的挠曲变形,达到极限值时,一般在煤壁上0.35倍采高处产生破裂,之后煤壁全部片落,形成煤体片帮现象<sup>[7]</sup>。煤壁片帮使支架实际控顶距增大,从而支架承受的压力增大,加之复杂地质条件易造成支架接顶不实,初撑力较小,进而形成冒顶片帮与支架失稳的恶性循环<sup>[8]</sup>。

## 2 端面片冒与支护参数的相关性关系研究

项目组对1523大倾角孤岛综采工作面支架立柱液压、几何位态与端面冒漏片帮信息进行现场矿压信息实测。为了使矿压观测测站布置具有代表性,能反映出整个工作面的情况,项目组在1523大倾角孤岛面共布置6个测站,1~6号测站依次位于6<sup>#</sup>,17<sup>#</sup>,28<sup>#</sup>,39<sup>#</sup>,50<sup>#</sup>和61<sup>#</sup>。选取具有片冒特征的60组样本,以支架液压、端面距、顶梁台阶、顶梁俯仰角等影响支架-围岩系统稳定性参量为自变量,以冒高和片深为控制目标,运用MATLAB软件进行回归计算分析,选定相关系数 $r$ 值最大的回归曲线为最佳回归关系,并检验回归效果的显著性,即得冒漏片帮与支护参数的相关性关系<sup>[9]</sup>。冒漏顶片帮与支护参数的回归关系见表1。回归分析结果表明,冒高和片深均随端面距、顶梁台阶、顶梁俯仰角值的减小而减小,随支架液压值的减小而增大,其相关性关系见表1。

表1 冒顶片帮与支护参数的回归关系

Table 1 Regression relation between roof fall and support parameters

| 回归函数     | 相关因素                  | 回归方程                                       |
|----------|-----------------------|--|
| 冒高 $h/m$ | 支架端面距 $d/m$           | $h = 0.654d - 0.021$                       |
| 冒高 $h/m$ | 顶梁台阶 $c/m$            | $h = 0.161e^{7.122c}$                      |
| 冒高 $h/m$ | 顶梁俯仰角 $\gamma/^\circ$ | $h = 0.007\gamma^2 - 0.004\gamma + 0.217$  |
| 冒高 $h/m$ | 支架液压 $p/MPa$          | $h = 9407.1p^{-3.02}$                      |
| 片深 $e/m$ | 支架端面距 $d/m$           | $e = 0.499d + 0.730$                       |
| 片深 $e/m$ | 顶梁台阶 $c/m$            | $e = 0.132e^{7.308c}$                      |
| 片深 $e/m$ | 顶梁俯仰角 $\gamma/^\circ$ | $e = -0.006\gamma^2 - 0.002\gamma + 0.196$ |
| 片深 $e/m$ | 支架液压 $p/MPa$          | $e = 165.0p^{-1.89}$                       |
| 冒高 $h/m$ | 片深 $e/m$              | $h = 0.702e + 0.068$                       |

冒高与片深之间关系密切,煤壁片帮导致端面距加大,从而端面顶板冒漏程度增加,而冒顶程度严重亦易引起煤体片帮。在工作面液压支架初撑力值不小于24 MPa的条件下的观测结果显示,1523大倾角孤岛面67架液压支架的故障率达46.3%,端面顶板冒高大于0.40 m和煤体片深大于0.5 m的片帮频率达70%以上。

由图4可知,支架液压值保持在30 MPa以上的区域端面煤岩体无冒顶现象或冒高小于0.4 m,能较好地控制端面煤岩体冒顶现象。1523工作面采用的ZY3200/13.5/28型和ZY3200/14/32型液压支架基本能满足大倾角孤岛综采面正常条件下回采的需要,但现场实践中端面煤岩体片冒现象严重。究其原因是1523大倾角工作面液压支架均为老旧支架,处于设备故障率规律曲线的耗损区。井下恶劣环境和复杂生产地质条件使得液压系统泄漏故障率高,多数支架液压值低于30 MPa,且液压系统内部泄漏较为隐蔽,难以靠人们的视觉、触觉、听觉直观发现<sup>[10]</sup>,得不到及时维修。此外,乳化液泵站供给压力仅为31.5 MPa,一旦发生泄漏,即使是液压系统微泄漏,支架液压亦极易降至30 MPa以下,支护效能低,大倾角孤岛工作面支架-围岩系统稳定性显著下降,制约工作面安全高效回采。因此,研制一种能够在综采面及时进行故障检测与故障定位且便携实用、准确可靠的检测仪器,成为提高支架检测效率和大倾角孤岛综采面安全可靠性的迫切要求。

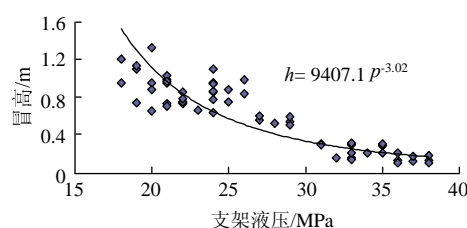


图4 冒高与支架液压的相关性关系图

Fig.4 Dependence relationship between caving height and support hydraulic

## 3 大倾角孤岛面支架-围岩稳定控制技术

针对上述的分析结果和实践经验,提出了支架故障诊断、防倒防滑装置安设、端面稳定性控制指标和设备操作工艺等综合控制技术措施。

### 3.1 综采支架液压系统故障诊断

针对现场矿压监测的迫切需求和现有国内外矿压监测存在投资巨大与不能立即准确定位支架



故障发生位置的难题<sup>[11]</sup>,依据液压系统中高压乳化液泄漏必然产生高频振动和频率较宽噪声信号的特征,提出了利用高频声波传感器和高灵敏度压电加速度传感器来检测该信号特性实现故障检测和准确定位的支架故障检测原理,并运用现代无损检测及微电子技术设计了具有放大高压泄漏产生的噪声信号并滤除液压系统低频噪声信号的输出数字信号的集成电路系统,研发了适用于煤矿井下综采液压支架液压系统泄漏故障现场检测的隔爆兼本安型矿用泄漏检测仪<sup>[12-13]</sup>。YHX 型泄漏故障检测仪的有效检测距离大于 80 cm,频率范围为 10~40 kHz,其泄漏故障诊断判据为: $Z \leq 25$  时无故障; $25 < Z \leq 250$  时为轻微泄漏故障; $250 < Z \leq 750$  时为明显泄漏故障; $750 < Z \leq 1500$  时为严重泄漏故障; $Z > 1500$  时为极严重泄漏故障。

### 3.2 大倾角工作面防倒防滑装置

工作面下端头区域前 3~5 架支架是工作面支架防倒防滑的稳固点。1523 大倾角工作面支架立柱前部平台处焊接有钢板座,其上安装可以左右旋转的耳轴。第 4 架支架前部平台耳轴通过千斤顶和  $\Phi 22 \times 86\text{-C}$  大链与第一架支架顶梁连接,形成下端头区域支架防倒的底座顶梁连锁装置,如图 5a 所示。千斤顶技术指标:缸径/杆径  $\Phi 80/\Phi 60\text{ mm}$ ,推力/拉力 158/69 kN,行程 380 mm。

液压支架底座耳轴通过千斤顶和大链与刮板输送机连接,形成一套输送机防滑装置,如图 5b 所示。千斤顶技术指标:缸径/杆径  $\Phi 100/\Phi 70\text{ mm}$ ,推力/拉力 251/128 kN,行程 700 mm;大链选用  $\Phi 22 \times 86\text{-C}$ ,长度 4.5 m。每 5~10 架设置一组,可视工作面倾角及地质条件变化情况增减防滑装置的数量,防滑措施要经常保持紧拉状态。

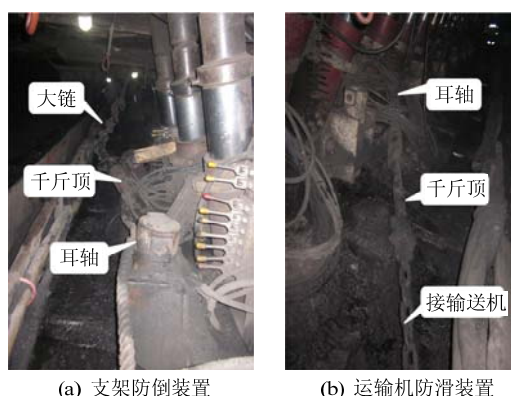


图 5 1523 工作面防倒防滑装置

Fig.5 Device for anti-falling and anti-slipping in the large inclination face No.1523

### 3.3 支架-围岩稳定性控制的关键指标

由冒漏顶片帮与支护参数的回归关系可得支架-围岩稳定性控制的关键指标。1523 大倾角孤岛综采面的支架-围岩控制指标如下:综采面端面距应该不大于 0.7 m,支架液压值尽可能维持在 30 MPa 以上,支架顶梁台阶应该不大于 0.13 m,支架顶梁俯仰角绝对值不大于  $5^\circ$ 。

### 3.4 综采面三机设备防倒防滑操作工艺

#### 1) 液压支架

拉架前调整支架方向、倾斜度,保证第 1 架底板平整,调整好支架以后拉靠升紧,为下一支架的拉移创造好条件。端头前 3 架支架移架先移第 2 架,移架时用防倒防滑设施上拉下顶,保证支架不倒不滑,接顶良好;然后带压移第 1 架,并在该架下侧的顶梁、掩护梁及支架底座上打斜撑单体,确保降移第 1 架时不倾倒、不下滑;移到位后,要将防滑防倒紧上,防止倒架,最后移第 3 架,操作工艺同第 2 架。当支架出现失稳现象时,利用支架的侧护、防滑千斤顶等装置及时移正支架。

工作面支架移架时先校验支架与溜子的位置是否垂直,如不符合要求,可利用侧护和底调及时调整支架位置。在推溜移架过程中,采用自下而上方式,及时逐次移架,推移杆全程导向,减小推移杆和底座间隙,并尽量带压擦顶移架,防止支架处于自由滑移状态,注意调整支架中心距,防止挤、咬、倒架现象。

#### 2) 刮板输送机

工作面采用单向下行割煤,上行推溜方式,防止刮板输送机下滑;移机头前,在机头正前与下帮煤壁之间打一斜撑单体,防止输送机下滑。采用工作面机头超前机尾一定量的伪斜推进,根据工作面煤层倾角及时调整。

#### 3) 采煤机

机组下行割煤时,严格控制上下行速度不超过 2 m/min。机组上行装煤时,及时移溜,机组与移溜点间距离不超过 15 m。为了防止采煤机在突然停电时下滑,应保持采煤机主副牵引部抱闸完好。加强机组的检修维护,保持机组工作防滑和事故防滑功能的灵敏可靠,防止机组失控下滑。

### 3.5 支架故障诊断与顶板控制的试验效果

项目组运用支架故障泄漏检测仪对 1523 大倾角孤岛面 67 架液压支架进行检测与泄漏位置确定。检测结果为:31 架支架存在液压系统各种类型泄漏

故障共计 126 处,其中外部泄漏故障为 20 处,内部串液故障为 106 处;从故障严重程度来看,严重的内串故障为 7 处,占故障总数的 5.6%,中等严重内串故障为 81 处,占故障总数的 64.3%,轻微内串故障 18 处,占故障总数的 14.3%,严重的泄漏故障为 5 处,占故障总数的 3.97%,中等严重泄漏故障为 7 处,占故障总数的 5.6%,轻微泄漏故障 8 处,占故障总数的 6.35%;从支架故障的元器件来看,立柱和千斤顶故障 52 处,操纵阀故障 44 处,单向阀故障 26 处,管路及连接件等损坏 4 处。检测结果表明,支架中液压系统故障率偏高,其中立柱上下腔交接处故障率最高且程度最严重,导致工作面初撑力不足,这亦是工作面进入孤岛高支承应力区后片帮冒顶现象严重的原因之一。

在第 1 循环检测后,矿方检修人员对工作面支架进行了全面及时维修后,严格执行相关支架-围岩控制技术措施,同时进行支架-围岩信息观测和支架故障诊断,检验控制技术效果。采取支架泄漏故障诊断与维修、支架-围岩关键控制指标、防倒防滑装置与操作工艺等综合技术措施后,综采面端面顶板冒高大于 0.40 m 的冒顶频率由实施前 76%减小到实施后 16%,未发生超过 3 架以上范围的冒顶事故,冒落块度基本不成大块冒落;端面煤体片深大于 0.5 m 的片帮频率由实施前 72%减小到实施后 23%,片帮块度最大为 0.6 m×0.3 m×0.4 m(长×宽×高)。在第 2 个检测循环,整个工作面 67 架支架共检测出有故障的支架只有 8 架,故障率为 12%。实践表明,该技术措施能有效减少大倾角孤岛综采面支架-围岩事故,促进大倾角煤层安全高效开采。

## 4 结 论

1) 数值模拟表明,1523 孤岛面围岩所受的垂直支承应力近似呈马鞍形分布,应力范围为 18~32 MPa,集中系数可达 2 倍以上;水平支承应力范围为 8~12 MPa,应力集中系数达 1.5 倍以上。围岩应力的增加是 1523 大倾角工作面进入孤岛区域回采后,支架-围岩事故频发的关键影响因素。

2) 1523 大倾角孤岛面端面片冒与支护参数的相关性关系实测分析表明,支架液压值保持在 30 MPa 以上的区域端面煤岩体无冒顶现象或冒高小于 0.4 m,能较好地控制端面煤岩体冒顶现象。

3) 研发的 YHX 型隔爆本安型泄漏故障检测仪能迅速准确进行故障检测与故障定位,避免严重故障产生,有效保障了支架支护力的充分发挥,且为

液压系统内部泄漏提供了检测方法。

4) 大倾角孤岛面采取了支架故障诊断、防倒防滑装置、稳定性控制指标和设备操作工艺等综合控制技术措施,大幅减少了支架-围岩事故,促进了大倾角复杂条件煤层的安全高效开采。

## 参考文献:

- [1] 尹光志,李小双,郭文兵.大倾角煤层工作面采场围岩矿压分布规律光弹性模量拟模型试验及现场实测研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊):3336-3343.  
YIN Guang-zhi, LI Xiao-shuang, GUO Wen-bing. Photo-elastic experimental and field measurement study of ground pressure of surrounding rock of large dip angle working coalface[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Supp): 3336-3343.
- [2] 袁永,屠世浩,窦凤金,等.大倾角综放面支架失稳机理及控制[J].采矿与安全工程学报,2008,25(4):430-434.  
YUAN Yong, TU Shi-hao, DOU Feng-jin, et al. Support instability mechanism of fully mechanized top coal caving face with steep coal seams and its control[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4): 430-434.
- [3] 章之燕.大倾角综放液压支架稳定性动态分析和防倒防滑措施[J].煤炭学报,2007,32(7):705-709.  
ZHANG Zhi-yan. Dynamic analysis on stability of hydraulic powered support in deep inclined fully mechanized wall and prevention slips measures[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(7): 705-709.
- [4] XIE Sheng-rong, HE Fu-lian, YANG Hong-zeng, et al. Mining research of coal replaced with gangue in folded fault area[J]. Advanced Materials Research, 2011, 243: 2039-2043.
- [5] 伍永平,解盘石,杨永刚,等.大倾角煤层群开采岩移规律数值模拟及复杂性分析[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):391-395.  
WU Yong-ping, XIE Pan-shi, YANG Yong-gang, et al. Numerical simulation and complexity analysis of strata movement in exploiting steep coal seams group[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 391-395.
- [6] 黄炳香,刘长友,郑百生,等.超长孤岛综放工作面煤柱支承压力分布特征研究[J].岩土工程学报,2007,29(6):932-937.  
HUANG Bing-xing, LIU Chang-you, ZHENG Bai-sheng, et al. Distribution abutment pressures on laneway pillars for super-wide isolated fully mechanized top coal caving face[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(6): 932-937.

(下转第 354 页)