

# 急倾斜特厚煤层采空区煤自燃治理关键技术研究

曹 凯<sup>1,2</sup>, 司卫彬<sup>1,2</sup>, 王德明<sup>2</sup>

(1. 徐州安云矿业科技有限公司, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学 通风防火研究所, 江苏 徐州 221008)

**摘 要:** 针对陈兴远煤矿 42-43 号急倾斜特厚煤层采空区易发生煤自燃的问题, 通过分析岩层移动规律发现, 受采动影响形成的顶板侧裂隙漏风与采空区大量遗煤复合作用是影响采空区煤自然发火的主要因素。针对火区地表漏风严重、浮煤区域分布广且呈立体分布的特点, 提出构建地表回填堵漏风, 井下钻套一体化快速灭火钻孔施工、立体式灌注三相阻化泡沫泥浆快速降温防复燃的火区综合治理技术。应用这些技术有效抑制了火区的蔓延, 并成功扑灭了该火区。

**关键词:** 采空区煤自燃; 急倾斜特厚煤层; 裂隙漏风; 三相阻化泡沫泥浆

**中图分类号:** TD75 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)11-0064-04

## Study on key technology of coal spontaneous combustion control in steeply inclined ultra thick seam goaf

Cao Kai<sup>1,2</sup>, Si Weibin<sup>1,2</sup>, Wang Deming<sup>2</sup>

(1. Xuzhou Anyun Mining Technology Company Limited, Xuzhou 221008, China; 2. Research Institute of Mine Ventilation and Fire Prevention and Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** According to coal spontaneous combustion accidents occurred in No. 42-43 steeply inclined ultra thick seam goaf in Chenxingyuan Mine, the analysis on rock strata movement law showed that roof side crack air leakage affected by mining activities and great left coal complex role would be main factor affected to coal spontaneous combustion in goaf. According to the serious air leakage at surface ground of fire area and the wide distribution and three dimensional distribution features of falling down coal area, fire comprehensive control technology of fire zone with backfill to seal air leakage, borehole construction of underground mine borehole drilling and casing integration rapid fire distinguishing was provided. The application of those technologies could effectively control firing zone to be extended and could successfully extinguish firing zone.

**Key words:** coal spontaneous combustion in goaf; steeply inclined ultra thick seam; crack air leakage; three phase inhibition foam mud

## 0 引 言

乌鲁木齐矿区赋存 30 多层厚度、间距迥异的急倾斜煤层<sup>[1]</sup>, 特别是倾角高达 86°~89°, 厚度大于 50 m 的独特赋存煤层, 多采用水平分段综合机械化放顶煤的采煤方法。但这种采煤方法必然会残留一部分三角煤和顶煤, 加之开采向下部水平不断延伸, 地表多次重复塌陷产生大量裂隙, 在负压作用下造成采空区大量漏风<sup>[2]</sup>, 从而导致该类煤层在开采过程中一直受本煤层自然发火和上部采空区复燃的严重威胁。因此, 笔者结合乌鲁木齐矿区实际情况, 深入剖析急倾斜特厚煤层水平分段综放采空区煤自燃影响因素, 并应用有效的火区治理技术, 以保证矿井的安全高效生产。

## 1 火区概况

新疆乌鲁木齐市陈兴远煤矿 42-43 号煤层东翼火区位于西山窑组下部, 平均可采厚度 48.5 m, 煤层倾角为 86°~89°, 为急倾斜特厚煤层, 煤层自燃倾向性经鉴定为 II 类自燃煤层。该煤层已采 +560、+542、+521 m 三分层, 采用水平分段综放顶煤开采工艺, 采高 2.8 m, 平均放顶高度 18.2 m。煤层发育稳定, 全区可采, 顶底板岩性一般为泥岩、粉砂岩, 开采区域地表塌陷严重。2012 年 12 月 1 日, 该矿开采 +521 m 水平采空区发生煤自燃事故, 并引发大量的浓烟和间歇性瓦斯爆炸, 从而导致全矿井的封闭, 井下火区位置如图 1 所示。目前该矿仅有 2 台额定流量 600 m<sup>3</sup>/h 的地面固定式制氮机,

收稿日期: 2015-04-19; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.11.013

基金项目: 国家自然科学基金煤炭联合基金资助项目(51134020)

作者简介: 曹 凯(1984—), 男, 江苏沛县人, 博士。Tel: 15952228828, E-mail: caokai@cumt.edu.cn

引用格式: 曹 凯, 司卫彬, 王德明. 急倾斜特厚煤层采空区煤自燃治理关键技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(11): 64-67.

Cao Kai, Si Weibin, Wang Deming. Study on key technology of coal spontaneous combustion control in steeply inclined ultra thick seam goaf[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(11): 64-67.

防灭火系统不能满足火区治理要求。

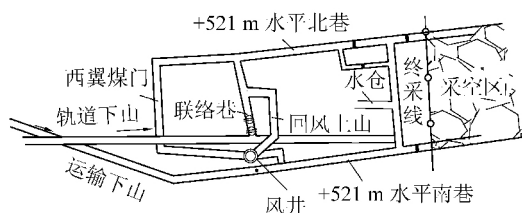


图1 井下火区位置

Fig. 1 Underground fire area position

## 2 采空区煤自然发火原因分析

### 2.1 采空区漏风规律

受水平分段放顶煤采动影响形成的顶板侧裂隙漏风是造成 +521 m 水平工作面及上部采空区发火的主要原因。上部多分层采空后,顶板围岩向采空区弯曲并伴随岩面向下移动,底板岩层向采空区凸起并沿层面下滑,随着采空区的延续伸长,上部覆岩将产生断裂、冒落,煤岩运动稳定后,顶板岩层会出现垮落带、断裂带和弯曲下沉带,底板会出现弯曲下沉带<sup>[3]</sup>,如图 2 所示。

假定工作面采空区的漏风流仅沿一维流动,当松散煤体内漏风强度恒定不变时,漏风强度与氧浓度存在如下关系:

$$\bar{Q}(x_i) = V_0(T) (x_{i+1} - x_i) / C_0 \ln \frac{C_i}{C_{i+1}}$$

式中:  $\bar{Q}(x_i)$  为采空区在  $x_i$  处的漏风强度,  $\text{cm}^3/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ ;  $C_0$  为新鲜风流氧气体积分数,取  $9.375 \text{ mol}/\text{cm}^3$ ;  $V_0(T)$  为松散煤体在试验条件下煤温为  $T$ 、氧体积分数为 21% 时的耗氧速率;  $x_i, x_{i+1}$  为松散煤体内部坐标和表面坐标,  $\text{m}$ ;  $C_i, C_{i+1}$  为采空区  $x_i, x_{i+1}$  处氧气体积分数, %。

若工作面向上各分层采空区至地表存在大量漏风,就会使浮煤达到自然发火必要条件而导致火灾事故。

根据现场观测,在 +521 m 水平开采放煤过程中,回风孔及支架后部均出现过地表黄土被放出等现象。结合上述急倾斜煤层开采岩层移动规律可知: +521 m 水平工作面顶板一侧形成发育丰富裂隙带,且分层放顶导致地表形成巨大的沉陷区,这些裂隙与顶板岩层中形成的裂隙相贯通,从而为采空区顶板侧遗煤自燃提供了良好的漏风供氧途径,造成采空区顶板侧遗煤自燃,并随着顶煤放落进入本

工作面及下分层工作面。

### 2.2 采空区遗煤规律

该矿水平分层综放开采 42-43 号煤层时,采空区遗煤主要有 3 个来源。

1) +521 m 水平煤层松散,支护强度需求大,为保证工作面支架的安全回撤,距终采线 30 m 时开始铺网不放顶煤,随着工作面推进采空区内遗煤成倍增加。

2) +521 m 水平工作面顶板是 +542、+560 m 水平分层的采空区,各上分层工作面的采空区均有大量遗煤,并随着工作面的回采,全部垮落到本工作面的采空区,进一步增加本分层浮煤量。

3) 42-43 号煤层分层布置工作面的两巷位于煤层的顶底板侧,为了便于巷道支护,两巷与煤层顶底板均留有一定厚度的煤皮,随着工作面的回采,这部分浮煤垮落到采空区中进、回风巷附近,且在工作面的煤层底板侧还有一段无法开采的三角煤<sup>[4]</sup>。

以上 3 个因素使得 42-43 号煤层开采时采空区浮煤大幅增加,在上述漏风供氧情况下导致采空区煤自然发火。

## 3 火区治理技术及应用

鉴于该火区存在地表漏风严重、浮煤区域分布广且呈现立体分布的治理难点,提出构建地表回填堵漏风,井下灭火钻孔快速施工、立体式灌注三相阻化泡沫泥浆快速降温防复燃的火区综合治理技术,并进行现场应用。

### 3.1 地表回填堵漏

急倾斜特厚煤层浅地表覆盖黄土能有效减少地表漏风,夯实的土层能克服急倾斜煤层开采后地表裂隙的进一步扩大,在土层上均匀渗水增强黄土的胶结性,填堵地表裂隙效果更佳<sup>[2]</sup>。为有效隔绝漏风通道,该矿利用丰富的地表黄土层,先在地表塌陷和断裂的区域覆盖黄土填堵,再用推土机压实,最后利用构建的水管网均匀渗水覆盖黄土层。

### 3.2 三相阻化泡沫泥浆灭火技术

近年来防治煤自燃三相泡沫是被广泛认可的一种新型矿井火灾防治技术<sup>[5-6]</sup>。含氮气的三相泡沫利用黄泥的覆盖性、水的吸热降温性以及氮气的抑爆性进行防灭火,大幅提高了防灭火效率<sup>[7]</sup>。

现场应用时在原有三相泡沫基础上构建了高效三相阻化泡沫泥浆灭火技术。该灭火技术提高了黄土的利用效率,增强煤体之间的黏附性;含有强阻化剂的高倍数泡沫能够快速向上堆积,可大范围覆盖

和包裹浮煤;同时对于浅埋深、漏风严重的区域,含氮气三相泡沫利用泡沫的固氮特性进行了有效惰化,避免了直接注氮气易流失的缺点<sup>[8]</sup>,适于扑灭急倾斜特厚煤层分层开采条件下较大区域内的高位火源和隐蔽地点的火源<sup>[9]</sup>。

### 3.2.1 灭火钻孔快速施工

采空区火区治理中,破碎煤体灭火钻孔的布置是关键。为有效克服采空区松散煤岩体普通钻孔施工过程中出现的卡钻、塌孔问题,提出应用钻套一体化钻孔施工工艺<sup>[10]</sup>,即稳钻、接钻杆、到位后封孔、防灭火作业。钻杆留在孔内,对钻孔起到了有效的支撑作用,因而能够避免普通打钻存在的垮孔缺陷。

应用该钻孔工艺技术,在 +521 m 水平防灭火措施巷 1、2、3、4 号钻场,仅用 8 天完成向 +521 m 水平和 +542 m 水平分层顶部裂隙带、采空区后部 30 m 范围内 29 个高低位灭火钻孔的施工(图 2),时间缩短 1/2,钻孔成孔率提高 30% 以上,为火区的快速治理赢得时间。

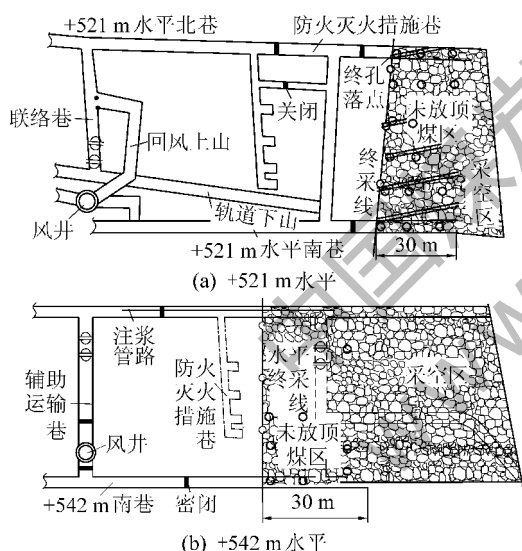


图 2 +521、+542 m 水平灭火钻孔终孔点示意

Fig. 2 Final hole position schematic of outfire boreholes in +521 and +542 m levels

### 3.2.2 应用工艺及技术参数

该防灭火系统采用“地面添加式发泡工艺”,即发泡剂通过定量添加泵添加到地面注浆管路中,通过在注浆管路中充分预混合后经过发泡器装置二次发泡,产生的泡沫泥浆通过 +521 m 水平措施巷的灭火钻孔,从 +521 m 分层至 +542 m 分层灌注到采空区火区。该工艺有效降低了浆压,且利于增强浆液的黏稠度和增大泡沫产生量,工

艺流程如图 3 所示。

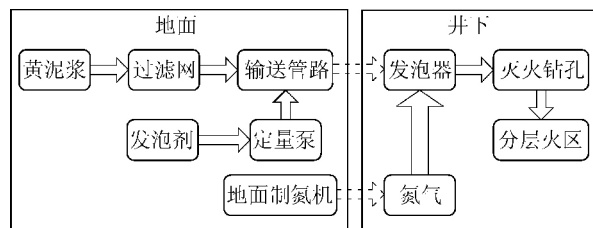


图 3 三相阻化泡沫泥浆工艺流程

Fig. 3 Technique process of three-phase inhibition foam slurry

经现场反复测试,确定该灭火系统运行各项技术参数。其中,黄泥灌浆量 15~25 m<sup>3</sup>/h,水土质量比 1:1~2:1,供氮气量不少于 1 000 m<sup>3</sup>/h,发泡剂添加比例约为 0.5%,测试发泡倍数不小于 25 倍。

### 3.3 应用效果分析

#### 3.3.1 地表填堵效果分析

该矿对 42-43 号煤层东翼火区对应的浅地表裂隙区进行回填黄土约 5 000 m<sup>3</sup>,并均匀渗水 500 m<sup>3</sup>。地表塌陷裂隙区已全部被胶结黄土覆盖,通过井下回风密闭内外压差观测,回填前后压差由 300 Pa 减少至 10 Pa 左右,地表漏风明显减弱,为上覆高温煤自燃治理创造良好条件。

#### 3.3.2 三相阻化泡沫泥浆灌注效果分析

通过 +521 m 水平防灭火措施巷的钻孔及 +542 m 水平南、北进回风巷预埋注浆管路,连续集中分层大流量灌注约 307 660 m<sup>3</sup> 的高效三相阻化泡沫泥浆新型防灭火材料,取得了显著的灭火效果。大量的三相泡沫在采空区预测火区迅速堆积,起到了灭火抑爆的作用,火区内氧气的体积分数也迅速降低到 4.6% 以下。

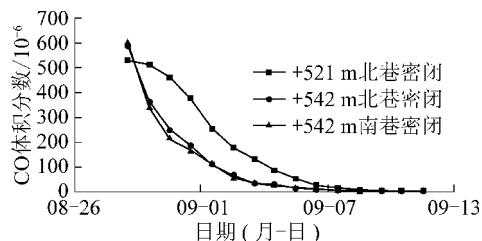


图 4 +521、+542 m 水平密闭内 CO 浓度变化

Fig. 4 CO concentration change in sealed zone in +521 and +542 m levels

在火区治理期间,用气相色谱仪对火区密闭内气样分析,结果显示火区内 CO 等火灾标志性气体呈快速连续下降趋势,其中 CO 体积分数快速降至  $6 \times 10^{-6}$  以下(图 4)。

在火区治理观测期,利用 WRNK-194 型铠装热电偶和 WSK-101 测温仪,对分层灭火钻孔采空区温度探测,并应用 Matlab 软件对探测结果进行分层区域模拟,得出采空区内部温度等值线,根据分析结果可知,在三相阻化泡沫覆盖、降温、惰化等防灭火功能<sup>[11]</sup>作用下,两分层采空区内温度快速下降到 23℃ 以下,并持续稳定。表明火区已得到有效的控制,扑灭后的火区也再未发生复燃。

## 4 结 论

1) 在急倾斜特厚煤层水平分段综放开采条件下,由于顶板侧裂隙漏风及采空区遗煤复合作用易导致采空区煤自然发火。

2) 急倾斜特厚煤层浅埋深、地表裂隙发育条件下,地表回填可显著减少采空区漏风。

3) 应用的钻套一体灭火钻孔工艺,有效解决了采空区灭火钻孔成孔率低的难题。

4) 地表回填基础上,构建以高效三相阻化泡沫泥浆技术为主的综合治理技术,适宜于急倾斜特厚煤层综放立体采空区煤自燃的治理。

### 参考文献:

- [1] 蒋新军,武建文,石平五. 急倾斜水平分段放顶煤放煤规律的离散元模拟研究[J]. 煤矿开采, 2006, 11(5): 1-3.  
Jiang Xinjun, Wu Jianwen, Shi Pingwu. Top coal caving rule research of horizontal section caving in deeply inclined coal seam with DEM simulation[J]. Coal Mining Technology, 2006, 11(5): 1-3.
- [2] 邵小平,石平五. 急斜煤层开采覆岩漏风途径生成演化模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4): 453-456.  
Shao Xiaoping, Shi Pingwu. Dynamic evolution of air leakage channel in overburden rocks in mining steep coal seams[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4): 453-456.
- [3] 缪协兴,陈荣华,浦海,等. 采场覆岩厚关键层破断与冒落规律分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2005, 24(8): 1289-1295.  
Miao Xiexing, Chen Ronghua, Pu Hai, et al. Analysis of breakage and collapse of thick key strata around coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1289-1295.
- [4] 曹凯,连玉中,王帅领,等. 急倾斜特厚煤层分层开采工作面防灭火技术研究现状及对策[J]. 煤矿安全, 2012, 43(4): 124-126.  
Cao Kai, Lian Yuzhong, Wang Shuailing, et al. Research status and countermeasures of fire prevention and extinguishment technology at slice miningwork face of steep-inclined and extremely thick coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(4): 124-126.
- [5] 秦波涛,王德明. 矿井防灭火技术现状及研究进展[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(12): 80-85.  
Qin Botao, Wang Deming. Present situation and development of mine fire control technology[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(12): 80-85.
- [6] 秦波涛,王德明,陈建华,等. 高性能防灭火三相泡沫的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(1): 11-15.  
Qin Botao, Wang Deming, Chen Jianhua, et al. Experimental investigation of high-performance three-phase foam for mine fire control[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(1): 11-15.
- [7] 周福宝,宋体良,王德明,等. 特大型火区的地面钻孔注三相泡沫灭火技术[J]. 煤炭科学技术, 2005, 33(7): 1-3.  
Zhou Fubao, Song Tiliang, Wang Deming, et al. Extinguishing technology with three phase foam grouting from surface boreholes for mine special large fire disaster[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(7): 1-3.
- [8] 秦波涛,王德明,毕强,等. 三相泡沫防治采空区煤炭自燃研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 162-166.  
Qin Botao, Wang Deming, Bi Qiang, et al. Three-phase foam for preventing spontaneous combustion of coal in goaf[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 162-166.
- [9] 周福宝,王德明,张玉良,等. 含氮气三相泡沫的固氮及惰化特性[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 11-14.  
Zhou Fubao, Wang Deming, Zhang Yuliang, et al. Nitrogen fixation of three-phase foam and its inerting properties[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(1): 11-14.
- [10] 吕建立,魏向志. 义煤矿区极易自燃厚煤层快速治理技术[J]. 华北科技学院学报, 2007, 8(3): 8-11.  
Lyu Jianli, Wei Xiangzhi. The rapid disposal technology of Yimei spontaneous seam coal mine[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2007, 8(3): 8-11.
- [11] 王德明,章永久,张玉良,等. 高瓦斯矿井特大火区治理的新技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2006, 23(1): 47-51.  
Wang Deming, Zhang Yongjiu, Zhang Yuliang, et al. New technologies for fighting extraordinary fire in a high-gassy coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 47-51.