

# Determining the Spontaneous Combustion Boundary of Northern Shaanxi Coal Seam Using High Precision Magnetic Method

Jiang Liu<sup>1,2</sup>, Jiangwei Cui<sup>1,2</sup>, Guoqiang Xue<sup>3,4,5</sup>, Xihui Feng<sup>1,6</sup>, Zhixiong Han<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, MLR, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>Shaanxi Coal Geophysical Prospecting and Surveying Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

<sup>3</sup>Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>4</sup>The Institutes of Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing

<sup>5</sup>Chinese Academy of Sciences University, Beijing

<sup>6</sup>Shaanxi Coal Geology Group Co., Ltd., Xi'an Shaanxi

Email: 327419086@qq.com

Received: May 1<sup>st</sup>, 2019; accepted: May 15<sup>th</sup>, 2019; published: May 22<sup>nd</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the analysis of the spontaneous combustion process of coal seam in a mining area in northern Shaanxi Province, this paper establishes the oblique step model including normal coal seam, extinguishing zone, self-combustion variable belt and so on, and carries on the forward calculation of numerical simulation of theoretical model, synthetically analyzes and studies the measured data of magnetic method, and adopts the anomaly feature point method. The fire boundary of coal seam is accurately identified by high precision magnetic exploration, and the exploration effect is good by combining drilling data and geological data of field investigation. The research results are applied in the coalfield of northern Shaanxi province, which can provide a strong basis for the calculation of reserves, fired areas boundary division and safe production and design of the well field, and better serve the decision-making and planning of the government management department.

## Keywords

Fired Areas, Coal Seam Spontaneous Combustion Boundary, Magnetic Exploration, Thermal Residual Magnetism

---

# 利用高精度磁法圈定陕北地区煤层火烧边界

刘江<sup>1,2</sup>, 崔江伟<sup>1,2</sup>, 薛国强<sup>3,4,5</sup>, 冯西会<sup>1,6</sup>, 韩志雄<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安

<sup>2</sup>陕西省煤田物探测绘有限公司, 陕西 西安

<sup>3</sup>中国科学院地质与地球物理研究所, 北京

<sup>4</sup>中国科学院地球科学研究所, 北京

<sup>5</sup>中国科学院大学, 北京

<sup>6</sup>陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安

Email: 327419086@qq.com

收稿日期: 2019年5月1日; 录用日期: 2019年5月15日; 发布日期: 2019年5月22日

## 摘要

文章通过对陕西省陕北某矿区煤层自燃过程的分析, 建立了包括正常煤层、熄灭带、自燃烧变带等“三位一体”的斜台阶模型, 并进行理论模型数值模拟的正演计算, 对磁法的实测资料进行综合分析和研究, 采用异常特征点法, 用高精度磁法勘探准确圈定煤层的火烧边界, 结合钻探资料、野外调查的地质资料加以验证, 勘探效果良好。这一研究成果应用于陕北煤田中, 能够为井田的储量计算、火烧区边界划分以及安全生产和设计提供有力的依据, 更好地为政府管理部门的决策和规划服务。

## 关键词

火烧区, 煤层自燃边界, 磁法勘探, 热剩磁

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

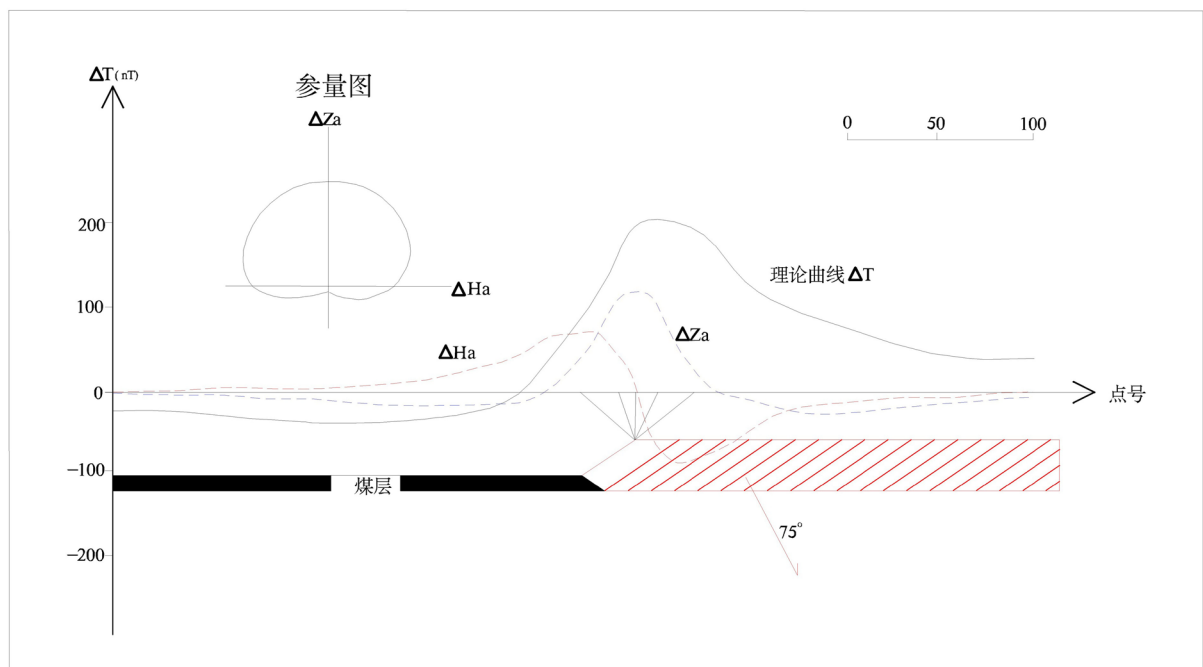
随着我国社会与经济的快速发展、科学技术的进步, 对资源的需求与日俱增, 随着当今世界多元化的利用矿产资源, 我国矿产资源对外的依存度则会越来越大[1] [2]。煤炭作为我国传统能源, 还将在很长一段时间内承担着主体能源的地位, 在有些区域还存在煤层的自燃现象。煤层自燃不仅导致了大量煤炭资源的损失, 同时由于煤层的自燃, 会往大气中排放大量的二氧化碳和有害气体, 使人类的生存资源和生存环境进一步减少, 不利于加快构建生态文明体系, 破坏了绿色发展, 不利于生态文明的提升。而且井田内的火烧区界限不清也会严重影响煤矿的采区划分、工作面的布设、煤矿的安全生产和提高煤矿的生产效率等[3] [4] [5] [6] [7]。因此查明、圈定煤层火烧区, 为矿区的合理规划和煤矿安全生产提供可靠的技术保障。

对于火烧区而言, 一般采用钻探方法确定煤层的火烧边界、燃烧程度是直接的勘探方法之一, 但是钻探施工时, 不仅地表植被会受到不同程度的破坏, 而且施工过程中的泥浆还会影响钻孔周边的生态环境, 同时钻孔的施工成本偏大, 施工周期较长, 取得的地质成果只是一孔之见, 两个钻孔之间的火烧边界只能靠地质推断, 不能准确圈定煤层的火烧边界[8]。所以, 现在一般火烧边界的勘探思路是, 选取合适的物探方法, 通过面积性的施工, 控制煤层的自燃边界的范围和埋深, 通过钻探在重点地段的施工, 一方面为物探资料的解释提供参数和物性的依据, 另一方面也可以验证物探解释的地质成果, 最终达到精确确定煤层的自燃边界、火烧程度和煤层熄灭带的宽度等, 并且能最大程度的降低成本[9] [10]。

关于煤田火区的探测，陕西省煤田物测队从上世纪八十年代初开始在陕北进行利用磁法勘探圈定煤层火烧区试验，经过了二十多年的生产和科研项目，研究了煤层烧边岩的物性特征，总结出一套适合于陕北地区煤层火烧边界的施工及资料处理解释方法，能根据磁异常变化较快速的圈定火烧区的范围，为井田储量计算、井田边界的划分及矿井安全生产和设计提供依据[11][12][13]。

## 2. 理论模型设计与仿真

当煤层自燃时，上覆岩石受到高温烘烤，其中的铁质矿物成份发生化学变化，形成含铁磁性矿物成份的烧变岩。当岩石冷却后，烧变岩就保留有较强的热剩磁。未烧变岩石磁性微弱或没有磁性，磁化率(K)常见值一般在  $140\pi \times 10^{-6}$  SI 单位以下，而烧变岩磁化率(K)常见值一般在  $1286\pi \times 10^{-6}$  SI 单位，因此用磁异常法来探测火烧区成为一种可行的方法。又由于从煤层完全燃烧到正常煤层之间，一般是煤层完全燃烧、煤层部分燃烧到正常煤层，煤层燃烧程度逐渐变弱[12][14]，煤层上覆的岩石的燃烧程度也逐渐变弱，直至为完全正常的岩石，相应烧变岩的磁性也逐渐变弱。从上面的分析，我们在设计理论模型时，将煤层自燃边界附近的岩石近似地等效为以煤层底板为界的近似无限水平斜台阶状磁性体建立物理模型(见图1)，通过二维组合棱柱的物理模型，利用陕煤物测公司的自编软件进行正反演拟合解释，拟合精度较高，解释成果可靠，并经钻孔验证。



200

**Figure 1.** Theoretical layered magnetic body model and magnetic anomaly response curve

**图 1.** 理论层状磁性体模型及磁异常响应曲线

对图1下方所示的模型进行了水平磁场、垂直磁场以及总强度磁异常等响应计算，所采用的计算公式如下[15]：

$$H_a = \sin i_s H_a^k - \cos i_s Z_a^k \tag{1}$$

$$Z_a = \cos i_s H_a^k + \sin i_s Z_a^k \tag{2}$$

$$\Delta T = \sin(i_s^0 + i_s) H_a^k - \cos(i_s^0 + i_s) Z_a^k \quad (3)$$

其中,  $i_s$  为磁倾角,  $i_s^0$  为  $xoy$  平面内的有效磁倾角, 且

$$\begin{cases} H_a^k = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S \frac{M_s}{r^4} \{2(z-\zeta)(x-\xi)\} dS \\ Z_a^k = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_S \frac{M_s}{r^4} \{(z-\zeta)^2 - (x-\xi)^2\} dS \end{cases} \quad (4)$$

图 1 中  $H_a$  曲线是水平磁场强度响应曲线, 从图中可以看出该曲线几乎呈反方向对称状;  $\Delta Z_a$  曲线为垂直磁场强度响应曲线, 该曲线在形态上两端对称, 且极大值点位于  $H_a$  曲线转折点的上方;  $\Delta T$  曲线为总强度磁异常曲线, 该曲线在形态上没有明显规律, 极大值点与  $\Delta Z_a$  曲线的极值点、 $H_a$  曲线的转折点位置一致。但是这三条曲线的极值点或转折点都不处于火区正上方, 这是由于从煤层完全燃烧到正常煤层之间, 一般是煤层完全燃烧、煤层部分燃烧到正常煤层, 煤层燃烧程度逐渐变弱, 煤层上覆的岩石的燃烧程度也逐渐变弱, 直至为完全正常的岩石, 相应烧变岩的磁性也逐渐变弱。在分析解释时, 一般是将煤层附近的岩石近似地等效为以煤层底板为底界的近似无限水平斜台阶状磁化率和磁倾角不同的磁性体, 在正常煤层处, 一般磁性很弱或没有磁性, 具体煤层的自燃边界的解释位置应视该处烧变岩的磁化率的强弱而定[10] [16] [17] [18] [19]。

### 3. 典型实例

测区位于陕西省神木县西南部, 根据以往地质资料, 区内地层平缓, 地层倾角  $1^\circ$  左右, 为一缓慢向 NNW 方向倾斜的单斜构造(图 2)。无褶皱, 尚未发现落差 20 m 以上的断层。但从神府东胜矿区已投产的矿井地质资料揭示来看, 可能存在落差小于 10 m 的小断层, 其延伸长度一般在 1 km 以上。区内地层由老至新有: 三迭系上统永坪组(T3y)、侏罗系下统富县组(J1f)、侏罗系中统延安组(J2y)、直罗组(J2z)第三系(N2)及第四系(Q)。



Figure 2. Location map of the measuring area

图 2. 测区位置图

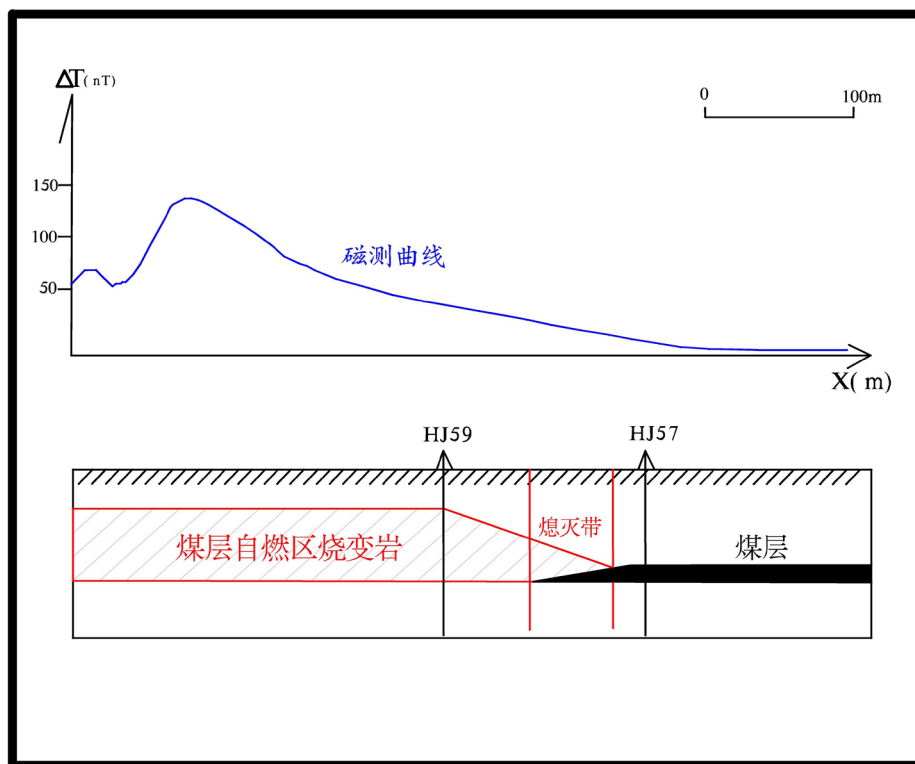
侏罗系中统延安组为本区的含煤地层, 该地层为一套陆源碎屑沉积, 在横向上变化较大, 垂向上具有明显的层序韵律结构。其岩性为粗、中、细粒长石石英砂岩, 岩屑以长石砂岩及钙质砂岩为主, 次为

灰至灰黑色粉砂岩、砂质泥岩、泥岩及煤层，少量炭质泥岩。

本次磁法工作使用的仪器为美国产 G-856 型高精度数字式质子磁力仪,磁测精度为全区总均方误差± 2.536 nT。

在对磁测资料进行处理时，除对野外原始磁法观测数据进行包括日变改正、纬向梯度改正和正常场改正等的各项改正外，还应针对地表磁干扰(主要为农房、高压线、地表烧变岩碎块等)根据野外的地面调查进行干扰异常的剔除，同时对磁测曲线进行分类统计，分类对有效磁异常进行解释。根据仿真计算结果以及本区的地质情况可对各测线进行二维组合棱柱模型正反演拟合解释。

对测试曲线进行解释，根据测量值的大小、变化情况，把整个测线解释出煤层、熄灭带、自燃区三个部分。**图 3** 为区内一典型剖面，从图中可以看出烧变岩带解释结果与测区内的已经知钻孔 HJ59 一致，正常煤层解释结果与钻孔 HJ57 揭露一致。



**Figure 3.** Measurement curve and interpretation results of drilling position  
**图 3.** 钻孔位置实测曲线与解释结果

#### 4. 平面探测成果

由实测  $\Delta T$  磁异常剖面平面图(**图 4**)分析，北部磁测曲线的异常幅值较大，南部磁测曲线的异常幅值较小。当煤层有一定的埋深时，磁测曲线在烧变岩区的磁异常形态各异，无一定规律，仅在煤层自燃边界附近，磁测曲线的异常相对平滑、稳定，一般处在磁测曲线的起跳点与峰点之间，异常走向有一定对比规律。

从实测磁异常等值线平面图(**图 5**)上看，在煤层未自燃区等值线稀疏，而在 2<sup>-2</sup> 煤层自燃区等值线密集。正负封闭圈分布众多，形态不一，多为椭圆形，在煤层自燃边界附近有平行等值线存在。测区北部磁异常等值线密集，测区南部磁异常等值线稀疏。



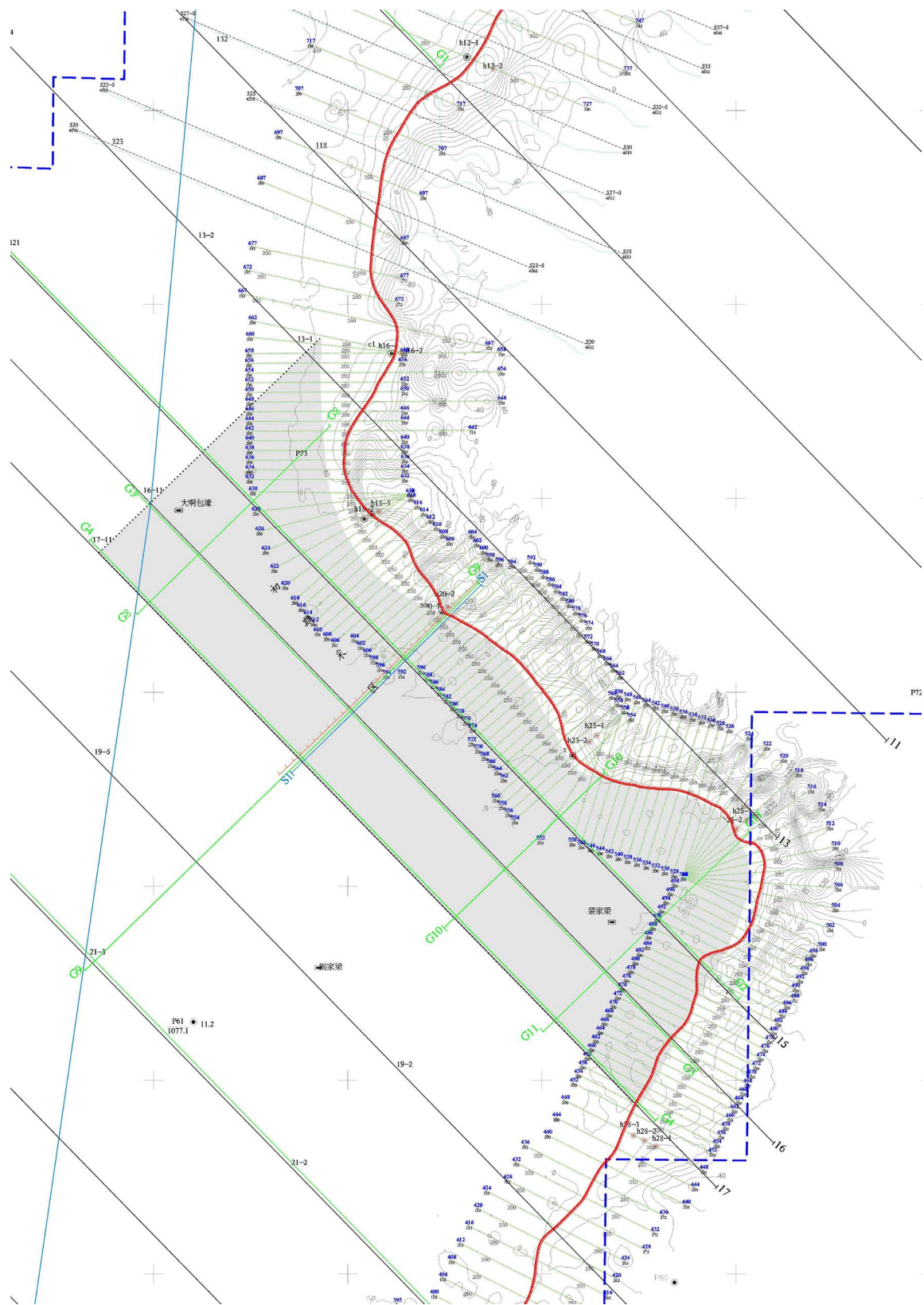


Figure 5. Magnetic anomaly contour plan and result diagram  
图 5. 磁异常等值线平面图及成果图

综上所述,区内煤层自燃随着向覆盖区的延伸,通风供氧条件变差,煤层自燃随之变弱并趋于尖灭,对应的烧变岩磁性随之变弱,故一般在靠近沟边观测的磁异常幅度较大,而在自燃边界附近和埋藏较深的地段,观测到幅度相对较小的园滑异常。由区内钻孔资料分析,测区内 $2^{-2}$ 煤层厚6至11米,埋深一般50至130米。根据钻孔揭露和实测磁异常及露头调查分析,区内实测磁异常主要为 $2^{-2}$ 煤层自燃引起。

## 5. 结论

由于煤田火烧区的影响,井田的勘探和划分、煤矿的建设阶段、安全生产以及矿区周围的生态环境都会受到一定的危害。煤层发生自燃后,煤层的上覆基岩经燃烧、冷却后形成的烧变岩的磁性得到了大幅的提升,一般磁性的强弱和煤层的燃烧程度相关。本文通过对煤层自燃的过程分析后,建立包括煤层、熄灭带、自燃烧变带等“三位一体”的斜台阶模型,通过分析计算发现,火烧区与背景区具有一定的磁差异,首先通过理论模型正演模拟计算,利用模拟计算的结果为实测资料的解释提供理论依据,结合钻探资料和野外露头调查资料,进行综合分析,最终准确圈出煤层的自燃边界。

经实践证实,圈定煤层自燃边界主要采用地面高精度磁法勘探面上控制,以地质钻探验证辅助的勘探方法是一种经济、快速和准确有效的方法,同时还可为井田储量计算、井田边界的划分及矿井安全生产和设计提供地质依据。

## 基金项目

陕西省重点研发计划项目(2017GY-175)、国土资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室(ZP2015-1)课题联合资助。

## 参考文献

- [1] 滕吉文. 强化第二深度空间金属矿产资源探查, 加速发展地球物理勘探新技术与仪器设备的研制及产业化[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(3): 729-748.
- [2] 齐朝华. 煤层火烧区的 TEM 响应及视电阻率分布规律研究[D]: [硕士学位论文]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [3] 陈小龙, 任金礼. 高精度磁测在陕北煤田火烧区的应用[J]. 陕西地质, 2013, 31(2): 76-80.
- [4] 郭毅. 煤田火烧区物探勘探方法浅析[J]. 新疆有色金属, 2011, 34(4): 24-26.
- [5] 蒋泽泉, 孟庆超, 王宏科. 陕西神南矿区煤炭开采保水煤柱留设分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(2): 87-91.
- [6] 李涛. 陕北煤炭大规模开采含隔水层结构变异及水资源动态研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
- [7] 宁靖, 张建民, 宁书年. 磁导成像方法研究及在宁夏汝箕沟煤田火区探测中的应用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(3): 66-69.
- [8] 徐跃军. 浅谈煤田火烧层钻井技术[J]. 新疆有色金属, 2010, 33(6): 25, 27.
- [9] 李斯昊, 张景岗. 同位素测氦法在浅煤层地质火源探测中的应用[J]. 华北科技学院学报, 2011, 8(2): 9-11.
- [10] 卢国栋. 大面积煤田火区范围圈划及燃烧机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学, 2009.
- [11] 万兆昌. 综合物探圈定多煤层自燃边界[J]. 中国煤田地质, 1996, 8(2): 38-40.
- [12] 王星明, 郭栋, 马伏生. 磁法在煤田自燃区勘探中的应用[J]. 陕西煤炭, 2008, 27(4): 49-50.
- [13] 张秀山. 新疆煤田火烧区特征及灭火问题探讨[J]. 中国煤田地质, 2004, 16(1): 18-21.
- [14] 武建军, 蒋卫国, 刘晓晨, 等. 地下煤火探测、监测与灭火技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2009, 35(12): 1669-1674.
- [15] 邹建. 重磁交互式正反演计算研究和应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [16] 吴晓瑞, 刘岩波, 高峰. 地面高精度磁测在划定煤田火烧区中的应用[J]. 中州煤炭, 2013(6): 62-64.
- [17] 肖海红, 陈虎维, 李霞. 卫星遥感技术在煤田火区探测与监测中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2009(2): 117-119.
- [18] 张建星. 枣泉煤矿 T-2 火烧区下开采岩层移动规律研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [19] 张福英, 齐福辉, 武军. 浅析东胜煤田地下煤火的探测方法[J]. 内蒙古煤炭经济, 2010(5): 65-67.



**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)