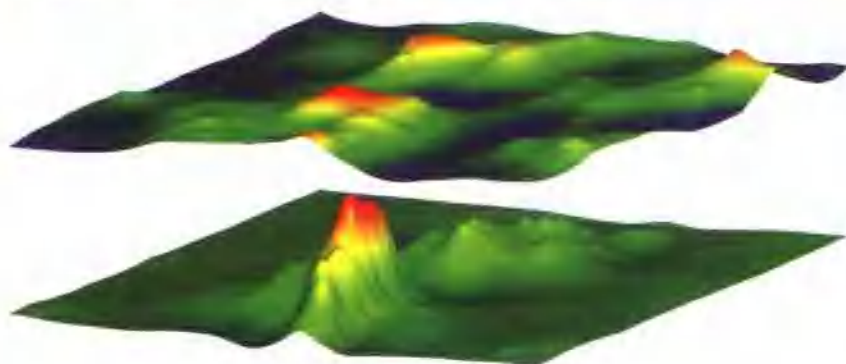


国家高技术研究发展计划（“863”计划）
中国地质调查局 联合资助

地下煤层自燃遥感 与地球物理探测技术



熊盛青 陈 斌 于长春
党福星 张建民 李 京 等 著

地质出版社



国家高技术研究发展计划（“863”计划） 联合资助
中 国 地 质 调 查 局

地下煤层自燃 遥感与地球物理探测技术

熊盛青 陈 斌 于长春
党福星 张建民 李 京

著

（以下以姓氏笔画为序）：

万建华 王卫平 李志忠 张润泉
张松梅 杨 波 郇中丹 聂跃平
曹代勇 眭素文 管海晏

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是在国家“863”计划资助课题和中国地质调查局有关项目研究成果的基础上,经过总结、提炼和再研究后编撰而成。内容涉及目前国内外地下煤层自燃探测主要采用的遥感与地球物理探测方法技术与应用效果。

全书共分5章。主要介绍以内蒙古乌达和宁夏汝箕沟煤矿为试验区,研究地下煤层自燃的发火机理与燃烧规律,及建立的探测体系;在国内首次将直升机高分辨率航空电磁、磁综合测量方法技术用于地下煤层自燃探测的成果;与探测目标有关的磁性体、电性体、放射性异常体和热异常体等的定量反演技术;基于遥感与地球物理方法建立的地下煤层自燃立体探测模型等。本书是我国迄今为止首次全面采用航空物探、地面物探及多种遥感方法完成地下煤层自燃探测的综合研究与应用的专著。

本书可供煤田地质、遥感和地球物理等方面的科技人员借鉴,亦可作为应用地球物理及相关专业的教学参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

地下煤层自燃遥感与地球物理探测技术/熊盛青等编
著. —北京:地质出版社, 2006. 9

ISBN 7-116-04996-7

I. 地... II. 熊... III. ①煤层—内因火灾—遥感
技术②煤层—内因火灾—地球物理勘探 IV. TD75

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第110190号

DIXIA MEICENG ZIRAN YAOGAN YU DIQIU WULI TANCE JISHU

责任编辑:陈军中

责任校对:郑淑艳

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:889mm×1194mm¹/₁₆

印 张:9.875

字 数:260千字

印 数:1—800册

版 次:2006年9月北京第一版·第一次印刷

定 价:30.00元

ISBN 7-116-04996-7/P·2728

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

前 言

地下煤层自燃,是指埋藏在地下的煤层因自燃或人为因素引燃后,随着时间的推移逐步蔓延发展形成规模较大的煤田火灾(简称煤火)。地下煤层自燃是一种自然灾害,美国、澳大利亚、印度、塔吉克斯坦、印度尼西亚等世界上许多国家都存在着煤田火灾的严重问题。中国也是地下煤层自燃灾害十分严重的国家,北方煤田自燃的现象已有很长的历史,每年损失近百万吨的煤炭资源。煤火不仅造成煤炭资源的损失,同时也破坏了生态环境,造成大气污染,影响了煤田火区人民群众的生活质量。

近年来,世界各国在治理地下煤火方面做了大量的工作,特别是对地下煤火探测方法的研究,为调查地下煤层自燃灾害、治理地下煤火和确保矿山安全生产提供了可靠的技术支撑和手段。在中国,各级政府及企业均投入了大量资金开展地下煤层自燃探测和防火、灭火工作。

煤火的探测是煤田火区灾害探测和治理的前提和基础。由于煤火发生在地下,其分布、发展状态十分复杂多变,有效地探测煤火的分布位置、燃烧状态、埋深和供氧通道等信息一直是世界性难题。国内外科技工作者在煤火探测方面开展了大量的工作,发展了包括地质普查、遥感、物探、化探、钻探等5大类共36种方法,这些方法在地下煤火探测中发挥了积极的作用。尤其是遥感和地球物理技术在煤火探测中一直发挥着主导作用,为煤火探测和灭火治理提供了重要依据。

卫星遥感和航空遥感方法对地表、近地表煤火的调查十分迅速有效,使用较广泛。国内有关单位做了大量工作,并与欧共体国家有过国际合作研究工作。

地球物理探测方法主要有:磁法、电法、气体探测法、温度探测法等方法,其中应用较多的是磁法、氦气测量方法。在山西平定,山东枣庄,河北唐山、邢台,宁夏等地区煤矿火区探测中取得了较好的效果。国外曾利用航空物探方法进行地下煤层自燃探测的试验,取得了很好的效果;在作者研究以前,国内这方面尚属空白。

由于遥感方法探测的是地表信息,无法直接获得地下煤火的深度和燃烧状态信息,而地球物理探测方法对地下燃烧体相关信息的探测比较有效,将遥感和地球物理方法进行有效地组合,可以弥补单一探测方法的不足,是一种较有效的探测煤火的途径。

为了解决地下煤层自燃探测的关键技术问题,提高火情探测以及防火、灭火的工作效率,国家“863”计划信息获取与处理技术主题设立了“地下煤层自燃遥感与地球物理探测关键技术研究”课题。该课题由中国国土资源航空物探遥感中心负责,北京师范大学、北京市国土资源遥感公司、中国科学院遥感应用研究所为参加单位。中国地质调查局设立了“内蒙古乌达地区直升机航空电磁测量试生产”、“物探技术在新领域中的应用研究”等勘查和科研项目,通过采用遥感和地球物理这两大对地观测(探)测方法针对同一探测目标的全面、深入研究和有机结合,从地下煤层自燃形成的地质机理与遥感、地球物理探测机理研究出发,在地下煤层自燃信息的提取(包括煤火的位置分布、埋深、地下形态、发展趋势等)基础上,总结出一套相应的遥感与地球物理探测有效的探测方法组合和技术指标,建立基于遥感和地球物理探测技术的地下煤层自燃的三维模型与探测方案,达到从地表到地下煤火三维立体探测的目的,以推动煤火探测技术的发展。

本书是上述研究工作的技术总结,系本领域国内最新研究成果。部分解释结果已得到验证,相应技术已用于防灭火工程实际工作。主要成果如下。

(1) 在较深入讨论地下煤层自燃的地质过程 and 环境影响标志的基础上,将内蒙古乌达煤矿煤火的发生发展分为12个递进期;初步描述了现代采煤工艺条件下煤火的发生和演化规律,提出了基于煤矿导火带理论的煤火燃烧地质模型。

(2) 在国内首次将测量技术指标和性能先进的IMPULSE航空电磁测量系统用于地下煤层自燃探

测,获得内蒙古乌达地区区域性地下煤层自燃磁、电磁测量资料。测量线距 50 m,电磁测量采样每秒 30 次,磁测量采样每秒 10 次,测量质量和技术指标完全采用了国际标准。

(3) 研究了燃烧裂隙、燃烧塌陷区、燃烧系统、烧变岩及采煤工作面等煤火信息在高分辨率 QuickBird 图像上的影像特征和信息提取方法,初步形成了卫星高空间分辨率多光谱遥感、多光谱热红外遥感、地面热红外测温和热红外成像的煤火遥感立体探测体系。

(4) 较系统地分析和研究了地下煤层自燃区岩石的磁、电、放射性等物性特征,初步总结出处于不同燃烧阶段的岩石地球物理场的变化模式。通过对多种物探方法探测效果的对比分析,提出了在航空物探测量基础上,以高精度地面磁法为主,辅以氦气测量、电法、地面米测温的地球物理综合探测方法组合。

(5) 研究了煤火深度的磁异常三维反演、电性体反演、氦气测量深度反演、点火源深度和强度的地面温度场反演等方法。以 Surpac Vision 为平台,建立了地下煤火探测的三维分析模型,为煤火探测和治理提供了三维可视化分析环境。

(6) 通过系统研究,建立了地下煤火遥感和地球物理探测指标,研究出一套较实用的探测地下煤层自燃的遥感和地球物理优化组合探测技术。

此外,结合实际资料处理和实例研究,介绍了 OASIS、AirProbe、三维重磁正反演软件、EMIGMA V7.8 等国内外先进的重磁电软件, SurpacVision 大型数字矿山软件, ArcGIS 等 GIS 软件的功能使用方法和效果。

参加本项研究工作的主要人员有(以姓氏笔画为序):于长春、马洁、马建伟、孔冰、万建华、尤文顺、王梅、王卫平、王宇飞、王守坦、火有德、田源、冯中贵、孙玉林、孙玉静、刘英才、朱文泉、朱晓颖、李志中、李加洪、李京、李晓琴、余明高、吴查查、吴晓英、张建民、张宗贵、张松梅、张润泉、杨波、杨文久、邹为雷、陈云浩、陈斌、周锡华、范正国、赵学军、郇中丹、郑立刚、金龙哲、段鹏、相亚玲、郭杉、郭良德、徐昆、聂跃平、贾跃荣、党福星、曹代勇、睦素文、管海晏、熊盛青、樊新杰等。

地下煤层自燃遥感与地球物理探测研究得到了“863”项目办领导、“863-13”主题专家组和国家遥感中心的大力支持。还需要特别提到的是,中国地质调查局科技外事部和基础调查部、德国地质调查局(BGR)、德国宇航中心(DLR)、神华集团乌达煤田矿务局,以及课题各参加单位的领导与有关专家从研究工作开始就给予了许多有益的支持与指导。

研究工作还得到了下列单位和专家具体的支持和帮助:高分辨率地电阻率法测量得益于宁夏煤炭地质勘查院良好的合作;高分辨率地电阻率法深化处理得到了煤炭科学研究总院西安分院闫述博上的帮助;野外氦气、钍射气测量及土壤样品的 U、Th、K 含量分析得到了江苏大学万骏教授的大力协助;岩石样品室内磁化率加温试验得到了中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室帮助;岩石样品室内磁化强度加温试验得到了中国地质大学原古地磁实验室帮助;岩石样品室内电阻率加温测试得到了中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用实验室戴立东博士的帮助;岩石光片分析得到了中国地质大学地质教研室伍大茂教授的帮助;航遥中心制图室在数据成图及数据矢量化方面做了大量工作;航遥中心郭志宏教授协助完成了磁性体边界计算工作,等等。在此谨表示衷心的感谢!

由于时间紧及编者学识水平有限,错误之处敬请读者批评指正。

作 者

2006 年 6 月于北京

Abstracts

Underground coal spontaneous combustion, means that the coal layers underground are burned by natural or some artificial factors. Changing with time, the coal fires spread bigger and bigger, and the coalfield fire disasters (here briefly called coalfires) gradually generate. Underground coal spontaneous combustion is a kind of nature disasters, it is the very serious problem in many countries in the world, such as United States, Australia, India, Indonesia etc. Coalfires occurred very seriously in coalfields in northern China, and have been lasting for a long period. The coalfires not only result in the loss of million of tons of coal resources annually, but also break the ecological environment, cause air pollution, and influence the people's living quality of the coalfire areas.

In recent years, many countries in the world make a lot of efforts to fight the underground coalfires, especially in the detection of underground coal fire, all these researches provide the reliable techniques and methods for the coalfires investigations, managements and mining safety. In our country, the government and enterprises, have put in a lot of funds to carry out coalfires detections, preventions and extinguishments. The probes of coalfires are the premises and foundations of the coalfires managements, because the occurrences, the distributions and developments of underground coalfires appear complicatedly. It is a very difficult problem in the world to probe the information about the underground coalfires positions, burning appearances, oxygen supply passages available. A lot of researches have been done in coalfires explorations in China and foreign countries, 36 kinds of probe methods have been developed in 5 major survey fields which are geological survey, remote sensing, geophysical and geochemical explorations, drillings. All these methods have shown good results, and the remote sensing and geophysical detection technologies are the key methods, they have played an very important role in the coalfires explorations and provided the important basis for the coalfires detecting, managing and extinguishing.

Compared with airborne remote sensing, satellite remote sensing method is quickly and effective for the earth's surface and vicinity surface coalfires survey, and it is extensively used. In coal fire areas of Northern China, a lot of satellite remote sensing projects have been finished by domestic organizations, some European countries and international organizations joined in the cooperation researches.

Geophysical detections of coalfires mainly include the magnetic, electric, temperature probe methods etc. Among them, the magnetic and radon measurement are mostly used, they are the two effective methods which have shown very good results in coalfires explorations in the regions of Pingding, Shanxi province, Zaozhuang, Shandong, province Tangshan and Xingtai, Hebei province Ningxia Ruqigou etc. Airborne geophysical survey has been used for coalfires detections in abroad, and the good results have been achieved. In Wuda, it is the first case in China to use airborne geophysical survey for coalfires exploration.

Normally remote sensing can get the information of coalfires on the earth surface only, and geophysical exploration methods can probe effectively the information of underground combustion bodies. So, it is a relatively comprehensive and effective method to integrate geophysical and remote sensing methods for coalfires detections. The combined method can overcome the shortages of a single probe method.

In order to resolve the key technical problems of underground coalfires detection and improve the efficiency of exploration, prevention and extinguishment of coalfires, the office of Information Acquisition and Processing Topic of National 863 Plan established the research project— "The Key Technology Research of Remote

Sensing and Geophysical Detection of Underground Coal Spontaneous Combustion". The typical coalfires areas in northern China had been chosen as the application study regions. As the two major exploration methods, remote sensing and geophysics are completely applied in the same underground coal spontaneous combustion target, a set of effective integrated methods and procedures of remote sensing and geophysical coalfires detections has been summarized by the project. The 3-D inversion model based on remote sensing and geophysical data has been successfully set up, and the aim to detect the coalfires from surface to underground has been realized, the project promotes the development of underground coalfires detection technologies greatly.

The main task of this project is that the key technology of high resolution remote sensing data and geophysical methods for underground coalfires should be applied in the typical coalfield or coal fire areas. In order to provide monitoring technologies of coalfires in northern China, the 3-D detection model and monitoring methods based on remote sensing and geophysical probe technologies should be established.

The main research is the effective and feasible geophysical and remote sensing detection methods, including the technologies of information acquisition, processing and analysis of underground coalfires, the establishment technologies of 3-D detection model and the technologies of coalfires monitoring indicator system. As the important research aspects, geological mechanism of underground coal spontaneous combustion and the mechanism of geophysical & remote sensing detections have been researched and mastered. One of the key research problems is to extract of the information of underground coal spontaneous combustion which includes coal fire distribution, depth, underground appearance and the develop trend etc., and the effective combination of detection methods and the monitoring technology indexes.

China Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources (here briefly named AGRS) is responsible for the project. Beijing Remote Sensing Company for Land and Resources, Peking Normal University and Remote Sensing Application Institute of Chinese Academy of Science joined in the research and completed the project with AGRS. Based on the good cooperation of many units and organizations, the research solved some key technique problems of coal fire detections, the achieved results are mainly as the followings:

1. Based on the researches of geology courses and the ecological environment indexes of underground coal spontaneous combustion, coalfires in Wuda can be divided into 12 successive burning phases. The rules of coal fire generation and development under the condition of modern mining technologies are principally obtained, the coal fire combustion geological model which is based on coal fire transmit belt theory has been established.

2. With the implementing of Sino - Germany international cooperation project, the advanced IMPULSE HEM system was first time used in coal fire detection in China. Regional magnetic and EM data of coal fire survey has been obtained for the first time, the flight line space is 50 m, the EM sampling interval is 1/10 second, and the international quality & technique standards are completely adopted in the survey.

3. Image character and information extracting methods of QuickBird data for burning cracks, collapse, burnt rocks, mining face have been researched. A lot of remote sensing data is used to establish the stereo detection system, such as high resolution satellite multispectral remote sensing data, thermal infrared data, ground thermal infrared temperature data and remote sensing data in the drillings.

4. The magnetic, electric and radioactive physical characters have been analyzed and researched. The rule of geophysical character variations of the rocks for different burning phases has been concluded. By the comparing and analyzing of different effective airborne geophysical survey methods, the optimal comprehensive geophysical detection methods are pointed out. The high sensitivity magnetic survey is the main effective method, and the radon, EM and temperature measurements are the very important supplement methods.

5. Magnetic anomaly inversion of coal fire depth in 3-D, EM inversion, radon inversion, ground temperature and intensity version of the coalfires sources have been researched. 3-D analysis models of

underground coal fire have been established based on SurpacVision professional software which provides the visual 3-D analysis environment for coal fire detection and management.

6. The underground coal fire monitoring and detection index system of remote sensing & geophysical methods has been established, the detection method and practical scheme are designed. Facing different coal fire phases and detection demands, the integrated detection techniques of remote sensing and geophysics are summarized.

This book is the research conclusions of underground coal fire detection, the main results reflect the up to date progresses in the research field in the world, some of them have been verified in coalfield, and some techniques have been adopted in coal fire prevention and extinguishment.

The implementing of this “863” project — “The Key Technology Research of Remote Sensing and Geophysical Detection of Underground Coal Spontaneous Combustion” has strongly supported by National “863” Plan Office, the experts of thirteenth topic and National Remote Sensing Center. Thanks should be expressed to Science & Foreign Affairs Department and Basic Survey Department of China Geology Survey, BGR and DLR of Germany, Wuda Coalfield Bureau of ShenHua Group, the leaders and experts participating in the researches from the organizations, they provided a lot benefit supports and instructions throughout the “863” project.

This book could be a reference for coalfield geological and geophysical prospecting technicians, and it also could be as a reference book for applied geophysics and correlative professional teaching.

Due to the limited time and knowledge, perhaps there are some mistakes in this book. The comments and corrections to this book are appreciated. Many thanks.

Authors
June 2006, Beijing

目 录

前 言

Abstracts

第一章 地下煤层自燃遥感与地球物理探测研究概况	(1)
第一节 国内外研究现状	(1)
一、国内外遥感研究现状	(1)
二、国内外物探研究现状	(2)
第二节 研究区概况	(2)
一、乌达试验区	(3)
二、汝箕沟试验区	(6)
第二章 地下煤层自燃遥感与地球物理探测机理分析	(7)
第一节 地下煤层自燃的地质模型	(7)
一、地下煤层自燃形成的地质过程	(7)
二、地下煤层自燃的环境影响标志	(8)
三、乌达煤田火区燃烧模型	(10)
四、乌达煤田导火带模型	(12)
第二节 地下煤层自燃遥感特征信息分析	(13)
一、结构信息分析	(14)
二、光谱信息分析	(15)
三、热辐射信息分析	(21)
第三节 地下煤层自燃岩石物性特征与地球物理探测基础	(24)
一、地下煤层自燃磁性特征分析	(24)
二、地下煤层自燃电性特征分析	(34)
三、地下煤层自燃放射性特征分析	(37)
四、地下煤层自燃探测的地球物理前提	(38)
第三章 地下煤层自燃遥感探测关键技术研究	(39)
第一节 地下煤层自燃遥感探测体系	(39)
一、卫星遥感探测	(39)
二、航空遥感探测	(41)
三、地面遥感探测	(42)
第二节 煤火热异常遥感探测方法	(43)
一、基于卫星遥感的热异常提取方法	(43)
二、基于地面高分辨测量的热异常提取方法	(53)
三、热异常探测效果分析	(58)
第三节 基于高分辨率遥感的煤火探测方法	(59)
一、烧变岩信息提取方法	(59)
二、地表燃烧裂隙信息提取方法	(59)
三、地表燃烧系统信息提取方法	(70)
四、采煤工作面煤火信息提取方法	(70)
五、煤火信息探测效果分析	(74)
第四节 基于多光谱遥感的煤火探测方法	(74)

一、煤火灾害多光谱遥感信息提取方法	(74)
二、煤火灾害热红外遥感信息提取方法	(78)
三、煤火灾害变化信息提取分析	(78)
四、煤火灾害变化信息探测效果分析	(82)
第四章 地下煤层自燃地球物理探测关键技术研究	(84)
第一节 高分辨率航空物探测量方法技术	(84)
一、直升机航空物探测量系统集成	(84)
二、航空物探数据处理与解释方法	(86)
三、航空物探地下煤层自燃探测效果分析	(86)
第二节 地面地球物理探测方法	(93)
一、地面高精度磁测	(93)
二、地面电磁法	(97)
三、地面伽马能谱法	(102)
四、氡气测量	(105)
五、地面米测温方法	(107)
六、小结	(107)
第三节 地球物理探测信息提取方法研究	(107)
一、地下煤层自燃区磁性体二维反演	(108)
二、地下煤层自燃区电性体反演	(122)
三、地下煤层自燃区高温体反演方法探讨	(122)
四、地下煤层自燃地球物理信息提取的应用效果分析	(131)
第五章 遥感与地球物理综合探测方法研究	(133)
第一节 煤火探测的地球物理三维显示模型	(133)
一、地球物理探测三维模型的建立与应用	(133)
二、基于 ArcGis 的煤火监测图库研建	(136)
第二节 煤火遥感与地球物理综合探测方案	(139)
一、地下煤层自燃遥感和地球物理探测指标	(139)
二、遥感与地球物理探测实施方案	(140)
三、地下探测	(146)
参考文献	(147)

第一章 地下煤层自燃遥感与地球物理探测研究概况

第一节 国内外研究现状

一、国内外遥感研究现状

地下煤层自燃遥感探测,大致经历了热红外遥感探测、基于 GIS 的遥感探测和现在的多平台、多传感器综合探测等三个主要阶段。

(一) 国外遥感探测研究现状

1963 年 5 月,HRB-Singer 公司在美国宾夕法尼亚州的斯克兰顿用热感相机 RECONOFAX 红外侦察系统,进行探测和定位煤矸石煤火的可行性试验,这是科技人员首次利用热红外遥感技术研究和探测煤火。

20 世纪 80 年代以来,由于煤层自燃引起的环境破坏问题突出,美国开始应用陆地卫星数据调查研究煤层自燃与煤矿环境;进入 90 年代,印度开始了应用遥感技术调查煤层自燃,帮助解决煤矿灭火和安全生产等问题。同时针对煤火的时空变化特点,相关研究人员 (Anderson, 1980; Chandra, 1983; Mukherjee, 1991; Mansor, 1994; Saraf & Prakash, 1995; Genderen, 1996; Prakash, 1997, 1999, 2001) 对地面亚像元温度信息提取、地表参数和热通量问题、地表温度异常与地面发射率的影响、煤自燃倾向性估计、卫星遥感地表热通量计算模型和点源燃烧体正演模型、地表高温异常局部双窗滑动方法、热红外遥感数据估计埋藏的热源深度等问题进行了研究,促进了煤火遥感信息的提取研究。

随着高分辨率遥感卫星的相继发射升空,能提供用于煤火探测的遥感数据也越来越多,其推动当今这个领域的研究迅速进入到一个多平台、多传感器综合探测阶段。

(二) 国内遥感探测研究现状

我国遥感技术应用于煤火调查具有代表性的工作主要体现在以下三个阶段:

(1) 1987 年,原地质矿产部遥感中心在宁夏汝箕沟矿区开展的航空遥感调查煤层自燃工作,较系统地研究了煤层自燃机理,提出了灭火方法。

(2) 20 世纪 80 年代后期,煤炭地质总局航测遥感局 (1988, 1989)、北京市遥感公司 (1999) 等有关单位相继利用卫星遥感、航空热红外遥感及地面红外测温等手段开展了中国北方地区煤火调查和火区环境灾害动态监测工作,初步圈出了我国在北纬 35° 以北地区正在燃烧的火区 56 个,主要分布在新疆、宁夏、内蒙古、甘肃、青海、陕西、山西等 7 省区。以 GIS 为工具,集成煤火探测、环境影响评估、防灭火工程中所需要的专用工具,初步开发出适用于煤田火区监测与治理的信息管理与分析支持系统。

(3) 随着高空间、高光谱遥感新型传感器 (如 SPOT、IRS、ASTER、IKONOS、QuickBird、AVIRIS、HyMap、Hyperion 等) 以及各种方法技术的不断发展,煤火遥感探测进入一个新的发展阶段。主要针对煤田环境和矿山安全生产两种需求,在深入开展地下煤层自燃机理、煤田火区地质环境、空间分布规律、治理方法、防灭火工程与材料等研究基础上,初步建立了动态监测物理模型和基于卫星、航空和地面遥感、地面地质、地球物理和地球化学测量方法同步探测方法体系。

（三）遥感探测存在的主要问题

目前，国内利用遥感技术开展煤火灾害调查和相关的研究，已积累了许多先进的技术方法与重要成果，为地下煤层自燃的探测和治理提供了重要依据和技术手段。但以往的煤火遥感工作仍然存在一些问题：①由于受卫星遥感空间和光谱分辨率的限制，还无法提取地面燃烧裂隙、燃烧系统等信息；②没有充分应用不同尺度遥感影像的空间和光谱信息，对煤层自燃的发生、发展和熄灭过程中的遥感主要监测指标及地质环境意义进行系统性研究；③对于较大规模的煤火调查，已经形成了航空、航天、地面遥感相结合的探测方法，但尚无形成基于高分辨率遥感与高精度航空地球物理探测方法相结合的探测方法。

二、国内外物探研究现状

（一）物探探测研究现状

自 20 世纪 60 年代开始，我国科学家积极探索应用地面物探方法探测地下煤火技术，并取得较好效果。

在磁法探测方面，1964 年张秀山在新疆、宁夏等地使用 ΔZ 异常圈定着火区范围和采用定期观测同一条剖面磁异常特征点移动方法监测火区燃烧方向及速度。1996 年，万兆昌、董守华采用二维最优化反演确定地下烧变岩分布，进而圈定火区边界。2001 年，宁靖在宁夏利用高精度磁测剖面进行磁场磁导小波函数和磁导成像方法得到地下磁性体分布图像，并与已知火区分布相一致。

在电法探测方面，1964 年，张秀山通过样品试验及野外观测发现煤层高温燃烧区有明显的自然电位负异常。

在放射性探测方面，主要采用测氦法。测氦法是核物探的一种，近年来在煤火探测方面很受欢迎。刘洪福等在 20 世纪 90 年代中期研究了测氦法探测煤层自燃火源位置及范围的机理；建立了天然放射性介质测氦试验台；研究了氦析出与温度之间的关系；开发出了 CDTH（测氦探火）专用软件；并在山东枣庄矿业集团公司柴里矿等 15 个矿局推广应用。太原理工大学、原长春科技大学、宁夏煤炭地质勘查院河北邢台矿务局葛泉煤矿、石圪节煤矿等单位对测氦法圈定地下煤层着火范围做了不少研究，并在实际生产中取得了很好的效果。

其他方面有效的方法有测温法，包括米测温法和红外测温法。测温法的主要优点是直观、易测。温度是火灾的敏感指标，它是着火区的直接反映，是一种较为有效的着火区测量方法。

荷兰有关部分（ITC）和我国宁夏有关地质勘查部门合作在宁夏汝箕沟地区使用地面高分辨率电阻率法探测已燃烧区的空洞，取得了一些成果。Fugro 公司曾经使用直升机电磁测量法进行过地下煤层自燃探测。德国地质调查局（BCR）从事地球物理勘探的技术人员在欧洲用地面少量物探剖面测量圈定煤层地下燃烧的范围，认为磁法和电法在确定死火区和活火区方面比较有效。

（二）物探探测中存在的主要问题

由于煤田火区地下情况十分复杂，煤层燃烧后塌陷严重，活火区温度往往达到几百度，地面勘探十分危险，大部分活火区无法进行地面物探工作。以往地面物探工作还存在一些问题：①矿区及科研院所基本是各自为战，缺少不同探测方法间横向对比。②国内外还没有在煤火探测方面投入比较多的物探工作量，区域性物探资料缺乏，获得的一些研究结果缺乏验证。

第二节 研究区概况

我国北方煤炭资源主要分布在北纬 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 之间，主要产煤省份有黑龙江、宁夏、内蒙古、新疆等。这些区域煤矿的煤质好，燃点低，极易发生自燃，因此也成为我国煤田自燃火灾的多发区及重灾区。根据现有的煤火自燃资料、煤火实地考察结果，作者确定位于贺兰山以北的内蒙古乌达煤田煤层

自燃区为煤火探测的第一试验区，它是煤火探测的重点地区；宁夏汝箕沟煤层自燃区为第二试验区。研究范围见图 1-2-1。

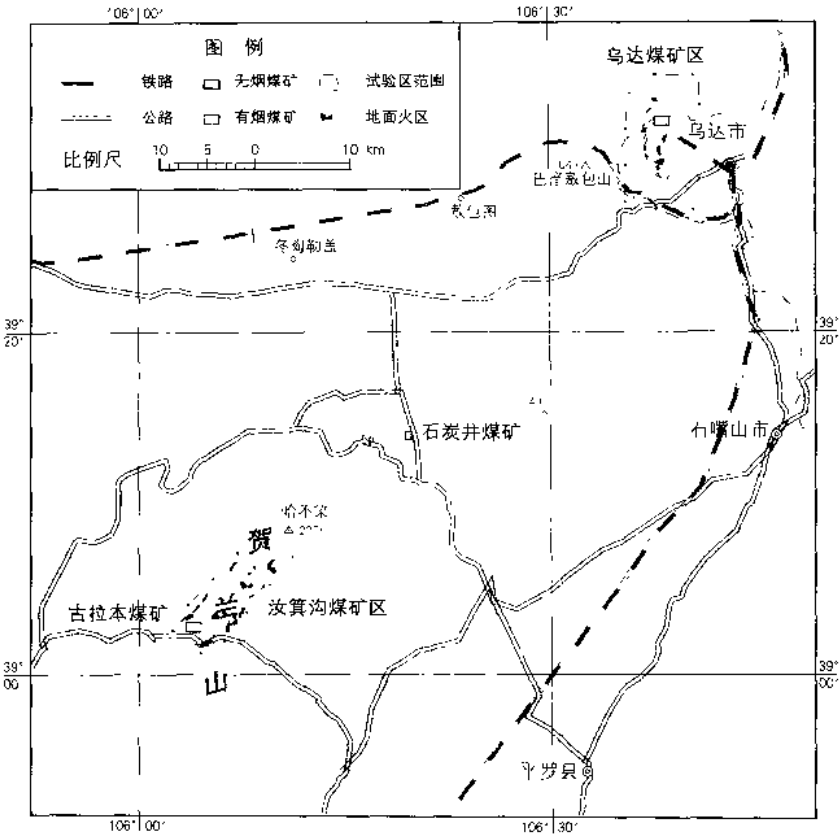


图 1-2-1 煤火探测试验区交通位置图

国内外煤火研究，主要集中在两种成因的煤火区。一种是由煤层露头自燃形成的煤火；另一种是因小煤窑开采形成的煤火。对于大型现代化煤矿开采中引发的煤田火区的研究，国内外相关文献较少。乌达煤田 20 世纪 60 年代以前没有煤火发生，自 1958 年以来有关部门建设了苏海图、黄白茨、五虎山三个大型现代化煤矿，在大型煤矿开采中由于采空区遗煤自燃逐步形成了大规模的煤火。选择乌达煤火区作为重点研究区，对现代开采工艺条件下的大煤矿煤火探测技术研究具有一定的典型性。

一、乌达试验区

（一）地理位置与自然条件

乌达煤田（包括五虎山、苏海图、黄白茨三个井田）位于东经 $106^{\circ}34'41'' \sim 106^{\circ}38'41''$ ，北纬 $39^{\circ}27'00'' \sim 39^{\circ}34'04''$ ，在内蒙古自治区乌海市境内，贺兰山北端、乌兰布和沙漠南缘。东距黄河 11 km，西靠巴音善旦。乌达煤田南北长 16 km，东西宽 13 km，面积约 208 km²。

乌达煤田平均海拔 1150 ~ 1300 m，为低山丘陵地貌，煤田内沟谷发育，基岩出露良好，局部有风沙覆盖。煤田地表渗水性良好，无地表水体，只有季节性冲沟，大气降水是地表水补给来源。

乌达煤田春季风大干燥，夏季炎热少雨，秋季多雨、气温适中，冬季寒冷、温差大，常年日温差大。全年最大降雨量 299.4 mm，全年蒸发量在 2923.6 mm 以上，年平均气温 10℃，年日照射数 3227.3 h 以上。主导风向西北，最大风速 28 m/s。年降雨量少，蒸发量大，干旱多风沙，这一地区是典型的内陆干旱沙漠气候。这种气候特征极易使露头煤层长期处于干燥状态，或经过短暂湿润又很快恢复到干燥的循环之中，引发煤层的氧化自燃。

(二) 研究区地质环境条件

地下煤层自燃与其赋存的地质环境息息相关,如地质构造、煤层条件、采矿工程及其环境影响和采空区等。乌达研究区地层岩性单一,地质构造简单,火成岩体很少。

1. 地质构造环境

乌达煤田处于鄂尔多斯盆地西缘,属华北石炭-二叠纪煤田。乌达煤田处于盆状向斜之中,向斜南北长 12 km,轴向南北;北端轴向偏向北东,向斜西北翼开阔平缓,倾角在 10° 左右;向斜东部受乌达逆掩断层切割,地层倾角 $40^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 倒转。乌达逆掩断层断距 5 ~ 600 m,倾向东,倾角 $34^{\circ} \sim 75^{\circ}$,南北长 9 km。乌达盆状向斜和乌达逆掩断层是控制煤田的主要构造。煤田次一级构造由褶皱束和断裂组成。

分布在煤田中部的褶皱成束出现,包括苏海图沟褶皱束(由 6 个平行排列的背斜和向斜组成,轴向北西);补 8 孔褶皱束(由两个平行排列的向斜构成,轴向南北);梁家沟褶皱束(由两个近乎平行排列的向斜组成);奇里格沟褶皱束(由 3 个平行排列的向斜、背斜组成)。

分布于煤田内的次一级断裂成组出现,如煤田西缘的羊圈沟、F35 断裂组,煤田西北部的 F9、F37、F38 断裂组以及煤田中部的露天正断层等。

乌达煤田地处半沙漠干旱地区,地表径流少而小,降雨量小于蒸发量,地貌形态单一,地层出露简单,含水层含水性弱,地表补给水源有限。虽然煤系地层位于侵蚀基准面以下,因距黄河较远,黄河水不可能直接补给到煤系地层中,整个煤田水文地质条件属简单类型。

2. 煤层条件

乌达煤田地层由上而下划分为第四系(Q)、第三系(R)、上二叠统石盒子组(P_2sh)、下二叠统山西组(P_1s)、上石炭统太原组(C_3t)、中石炭统本溪组(C_2b)等。其中上二叠统石盒子组(P_2sh)含煤线及不稳定煤层 7 ~ 9 层,均不可采;下二叠统山西组(P_1s)为煤田主要含煤地层,共含煤 10 层,1[#]、2[#]上、2[#]、3[#]、4[#]上、4[#]、4[#]下、5[#]、6[#]、7[#]在煤田内分布广泛,其中 1[#]、2[#]、4[#]、6[#]、7[#]稳定,是煤田主要可采煤层,其他煤层局部可采;上石炭统太原组(C_3t)也是煤田主要含煤地层,含煤层 17 层:8[#]、9[#]、10[#]、11[#]、12[#]上、12[#]、12[#]下、13[#]上 3、13[#]上 2、13[#]上 1、13[#]、13[#]下、14[#]、15[#]、16[#]、17[#]、18[#],主要可采煤层 9 层;中石炭统本溪组(C_2b)的中上部有煤线 10 ~ 12 层,均不可采。

3. 采矿工程及其环境影响

乌达现代化煤矿始建于 1958 年,1962 年开始投产;现有五虎山、苏海图、黄白茨 3 个煤矿,矿井设计生产能力 390×10^4 t/a,核定生产能力 410×10^4 t/a。

乌达煤田地质储量 6.36×10^8 t,已累计产出约 3×10^8 t,尚有工业储量 3.36×10^8 t。煤田 35 km^2 的面积已经全面开采。乌达煤田采用长臂式采煤,在工作面回采中和回采后顶板岩石产生垮落,又因为煤层埋藏较浅,致使地面严重塌陷,地形地貌与原有状态产生巨大差异,为煤火提供了大量的供氧通道。

4. 采空区概况

根据现场调查,乌达煤田井下采空区较为复杂,具体体现在以下三方面:

(1) 埋藏深度浅:太阳辐射的热量可被采空区遗煤充分吸收,太阳辐射构成了采空区的天然热源。

(2) 采空区空间大。由于煤层顶板大多数为孔隙率较大的砂岩,硬度较大,采煤过程中,煤层顶板不易冒落,致使采空区内部空间大,利于漏风。

(3) 采空区之间相互贯通。由于乌达煤田已有很长的开采历史,井下采空区众多。特别是大批小煤窑出现并无序开采,使采空区星罗棋布,许多采空区相互贯通,采空区的状况更具复杂性。

(三) 地下煤火概况

乌达煤田燃烧时间长,面积广,损失大,环境污染严重。1958 年开始建井,1961 年苏海图煤矿井下 9[#]、10[#]高硫煤自燃。从 1978 年开始苏海图煤矿井下采空区先后形成 IV-1、IV-2 等 6 个地面火区。

在 1985 ~ 1995 年, 乌达煤田开采量在压缩, 小煤窑崛起。在这 10 年间, 小窑开采形成 10 个煤田火区, 乌达煤田采空区形成 8 个煤田火区。2004 年 12 月“乌达煤田火区详查补充报告”中划定 16 个火区, 火区总面积达到 $349.6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。目前, 由于缺乏必要的灭火工程以及废旧小煤窑巷道不断被发展中的煤火相互贯通, 乌达煤田煤层自燃趋势仍在继续扩大。2002 ~ 2004 年两年半内火区面积累计增加 $42 \times 10^4 \text{ m}^2$, 增幅达 13.65%。

1. 燃烧煤层

乌达煤田可采煤层 19 层, 可采煤层平均总厚度 33.6 m。其中主燃煤层 8 层, 主燃煤层平均厚度 25.44 m。主燃煤层平均厚度占可采煤层平均总厚度的 75.7%, 主燃煤层在燃烧中分为 5 个燃烧层组 (表 1-2-1)。

表 1-2-1 乌达煤田主燃煤层燃烧层组

燃烧层组	层组煤层	层组描述
第一燃烧层组	1 [#] + 2 [#]	1 [#] 煤层厚度 3.65 ~ 1.76 m, 平均厚度 2.6 m; 2 [#] 煤层厚度 8.32 ~ 2.43 m, 平均厚度 4.45 m; 1 [#] 煤与 2 [#] 煤间距 5.5 ~ 32.3 m
第二燃烧层组	4 [#]	4 [#] 煤层厚度 8.31 ~ 3.23 m, 平均厚度 5.19 m; 第二燃烧层组与第一燃烧层组间距 4.9 ~ 48.6 m
第三燃烧层组	6 [#] + 7 [#]	6 [#] 煤层厚度 1.43 ~ 0.25 m, 平均厚度 0.93 m; 7 [#] 煤层厚度 3.05 ~ 1.25 m, 平均厚度 1.99 m; 7 [#] 煤与 6 [#] 煤间距 0.6 m; 第三燃烧层组与第二燃烧层组间距 6.25 ~ 11.5 m
第四燃烧层组	9 [#] + 10 [#]	9 [#] 煤层, 高硫煤, 厚度 5.21 ~ 0.88 m, 平均厚度 2.96 m; 10 [#] 煤层, 局部高硫煤, 厚度 3.49 ~ 0.61 m, 平均厚度 2.31 m; 9 [#] 煤与 10 [#] 煤间距 0.4 ~ 15.5 m; 第四燃烧层组与第三燃烧层组间距 30.9 ~ 46.15 m
第五燃烧层组	12 [#]	12 [#] 煤层厚度 8.05 ~ 0.20 m, 平均厚度 5.01 m; 第五燃烧层组与第四燃烧层组间距 9.3 ~ 48.9 m

2. 煤火区特征

煤火区主要分布在煤层浅部大矿采空区。

(1) 煤火区燃烧特征。历史上小煤窑密集排列、小煤窑开采巷道长、采掘深度大的地区高温点最多, 地下火势猛, 明火较多。地表塌陷或成星点状, 或出现强烈塌陷, 部分地区见到烧变岩。若地下煤火与大矿采空区相连, 则在地表大面积塌陷之处的裂隙中出现许多热异常。沿煤层露头出现的火区, 随灭火程度不一样, 有地表出现蒸汽、青烟、硫磺结晶体、植被遭煤火烘烤等热异常现象, 个别地方直接出现燃烧的明火。

(2) 煤火地表特征。在煤层浅部露头火区与国有煤矿采空区相连接的地区, 地表出现大面积塌陷, 裂隙发育且无规律, 煤火则由浅部向回采区蔓延, 火区面积迅速增大。反之, 小煤窑开采深度小, 浅部煤层形成较大采空区, 沿煤层露头之处则出现岩石崩塌, 靠近煤层露头附近地表塌陷成串珠状分布。火区燃烧形成的高温气流, 正是在地表裂隙、塌陷与废弃井口、巷道的相互贯通的环境下, 与地面大气沟通, 形成地下高温气流与地表低温气流的循环交换, 为地下煤火提供了燃烧所需要的氧气。

部分火区因小煤窑生产时间不长, 主巷道不长, 煤层发火后井口被迅速封堵, 煤火只能在地下巷道中蔓延, 沿煤层倾向发展速度缓慢。因相互排列的小煤窑巷道已被煤火贯通, 因而沿煤层露头走向形成条带状火区。

根据勘查综合结果, 煤田火区在形成过程中存在着一定的燃烧规律, 地下、地表都有着煤火燃烧过程中所形成的特殊环境和现象, 是煤火遥感和地球物理探测的目标。

二、汝箕沟试验区

(一) 地质概况

汝箕沟生产的太西煤是世界上最好的煤炭之一，为低灰（灰分 0~9%）、低硫（0.2%~0.3%）、高碳化（固定碳 > 89%）优质无烟煤，它的挥发分为 4.54%~6.92%，每千克发热量为 30550~33440 kJ，具有最理想的“三低”、“六高”特点，长期大量出口。

地层从老至新有上三叠统延长群、下侏罗统延安组、中侏罗统直罗组及第四系松散堆积。区内延长群底部出露不全，主要为套黄绿色巨厚层粗中粒砂岩、粉砂岩及泥岩。上部泥岩中夹有煤线。延安组为本区主要含煤地层，上部为灰白色厚层石英粗砂岩夹主要煤层、粉砂岩，下部为灰白色石英粗砂岩、粉砂岩互层夹薄煤层，底部有含鲕状菱铁矿粉砂岩与延长群呈平行不整合接触，厚度在 230~270 m 之间。直罗组以灰白、黄绿色粗砂岩为主，中夹细砾岩、巨粒砂岩透镜体及细砂岩、粉砂岩薄层，上部被剥蚀程度不一，出露厚度为 130~190 m。第四系主要分布在沟谷中，以砂、砾石为主，残坡积物仅在山坡低洼处分布。

汝箕沟矿区位于褶皱宽缓的汝箕沟向斜构造内，构造轴向为北东—南西向。

区内断层较少。断距除白茆沟断裂断距达 38 m 外，其余均为 5~10 m。

区内岩层含煤八至九层，自上而下顺序编号为一、二及 二_1 、 二_2 、三、四、五、七₁₁、七₂₁，及七₂（表 1-2-2），其中二、 二_1 、 二_2 、三、五为主要可采煤层；其余除一层不可采外，多数局部可采。

表 1-2-2 汝箕沟煤矿煤层特性及岩石顶底板岩性

煤层编号	煤厚度/m	顶板厚度/m	顶板岩性	底板岩性
-	0.0~5		粉砂岩	粉砂岩
一 (二_1 、 二_2)	(2.0~12, 6.0~20)	(1.0~13, 0.3~0.6)	粉砂岩	细砂岩、砂质泥岩
二	0.3~3	12~43	粉砂岩	粉砂岩、砂质泥岩
四	0.0~2		粉砂岩	粉砂岩
五				
七 ₁₁	0.0~4	13~44		
七 ₂₁	0.0~3	2.0~13		
七 ₂	0.0~1	3.0~15		

(二) 火灾情况

据宁夏煤炭设计院资料，矿区煤层火灾的发生可追溯到清朝同治年间，距今已有百余年历史。成灾原因被认为主要与小煤窑开采过程中失火有关，有些火区可能源于煤层自燃或地质灾害引起。

由于本区煤系地层位于潜水面之上，地层含水微弱，煤层厚度大，煤质高碳、低灰。一旦起火，火势猛烈，温度高，且延燃时间很长而不易自熄。

本区煤层上覆层多以砂岩为主，质地坚硬，裂隙发育。当受到高温烧烤及因烧空引起冒落时，上覆岩层中原有裂隙将不断扩大、连通，从而形成良好的通风供氧通道。此外，由于向斜周边煤层出露良好，沿露头有大量小煤窑的坑口分布，以及深部老空区纵横交错，这些为煤层火灾的发生、蔓延、扩大提供了良好条件。

煤层自燃→上覆岩层裂隙增生、扩大→烧空区冒落、坍塌→上覆岩层中坍塌、牵引裂隙大量产生，通风供氧条件改善→燃烧部位向深处推进。这一过程循环往复，成为本区煤层火灾向纵深蔓延的一种典型模式。

第二章 地下煤层自燃遥感与地球物理探测机理分析

第一节 地下煤层自燃的地质模型

一、地下煤层自燃形成的地质过程

通过对我国北方煤田火区 50 年来积累的资料进行分析和大面积野外实地观察,结合甘肃窑街火区、新疆硫磺沟火区、宁夏汝箕沟火区、内蒙古乌达火区的典型研究,可初步把地下煤层自燃的形成分成四个阶段。

(一) 自燃阶段

煤在自然环境中与空气的接触,吸附氧气并产生氧化作用,氧化产生热量;当煤层中发热量大于散热量时开始聚热增温,增温达到 110℃ 以前煤中水分蒸发,煤层冒白气;温度达到 110℃ 以上时,煤体进入烘干阶段,热解作用加速进行,增温过程不可逆转,煤层开始冒灰烟;当某个点增温量达到煤自燃临界值时,开始自燃着火,生成明火点或冒黑烟点。

煤的自然着火过程。煤的自然着火在地表、地下和矿井中普遍发生。由于煤质和赋存状态吸氧能力不同,受温度和供氧能力的影响,煤在开始自然着火阶段时燃时熄。当煤层温度逐步升高后,由少数自然着火点,发展成几个、几十个着火点,但仍处于时燃时熄状态。当较大空间的煤体达到着火临界值时,为形成燃烧中心准备了条件。

控制煤从氧化到自然着火的条件。煤质和供氧聚热环境是控制煤从氧化到自然着火的主要条件。乌达煤田采空区、采空塌陷的遗煤,氧化发热聚温 18 年才发生自燃着火。

(二) 燃烧中心形成阶段

煤火形成初期均是由一个点开始的,这个点具备供氧充足且有利于聚热的环境。此点周围的煤被氧化产生热量,并只在此点聚集起来,使此点煤温逐渐增高直至自然着火,这样就形成了燃烧中心。

地下煤体自燃着火后,与地表形成热压差,地表大气通过各种渠道,如以裂隙、洞穴、渗漏等方式与自燃着火点连通,形成以地表大气输气供氧,燃烧后烟雾向地表大气排放的空气动力系统。空气动力系统与燃烧体结合,形成具有一定能量的燃烧动力系统。燃烧动力系统形成煤层以喷出点为中心的燃烧中心,地下煤层燃烧后进入低温干馏阶段,并且以燃烧中心的能量向更大空间发展。燃烧中心的面积在几平方米到数百平方米之间。

(三) 燃烧系统发展阶段

燃烧中心形成后,由于煤层的温度进一步上升和燃烧裂隙的发展,改变了煤层的燃烧条件,形成更好的燃烧环境,由几个或几十个燃烧中心发展成一个燃烧系统。在燃烧系统阶段,各燃烧中心的输气供氧渠道连网成片,地下煤层燃烧形成规模,进入半焦—焦化—石墨化阶段。

燃烧系统阶段构成煤火灾害。一个火区由一个或数十个燃烧系统构成,燃烧系统是煤田火区灭火和探测的基本单位,面积在数百平方米到数万平方厘米之间。

(四) 熄灭降温阶段

地下煤层局部燃烬熄灭,上覆岩石在高温作用下,进入由沉积岩向烧变岩的变质阶段。随着温度的降低,产出一系列标志性燃烧产物,例如刚玉 (2400℃),熔变角砾岩 (1600~1200℃),烧变天然