

文章编号:0253-9993(2009)08-1009-06

# 内蒙古乌达煤田火区相关裂隙研究

曹代勇<sup>1</sup>, 樊新杰<sup>2</sup>, 吴查查<sup>2</sup>, 王国林<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 神华(北京)遥感勘查有限责任公司, 北京 100085)

**摘 要:** 针对当前煤层自燃研究中的薄弱环节, 以强化地质因素研究为切入点, 选择内蒙古乌达石炭二叠系煤田为工作区, 深入研究裂隙系统在煤田火区形成的点→线→面扩展演化动力学过程中所起的重要作用. 从成因角度将与煤田火区相关的裂隙划分为构造裂隙、采动塌陷裂隙、燃烧裂隙等3种基本类型和5种复合类型. 其中, 构造裂隙对采动塌陷裂隙和燃烧裂隙具有控制作用, 燃烧裂隙通常在构造裂隙和塌陷裂隙基础上发育, 单独的燃烧裂隙少见. 野外调查和高分辨遥感解译证实, 乌达煤田火区分布在裂隙密度较大的区域, 裂隙类型与火区类型具有良好的相关性.

**关键词:** 乌达煤田; 煤田火区; 构造裂隙; 采动塌陷裂隙; 燃烧裂隙

**中图分类号:** P618.11 **文献标识码:** A

## Study on the fractures related with coalfield fire area in Wuda coalfield, Inner Mongolia

CAO Dai-yong<sup>1</sup>, FAN Xin-jie<sup>2</sup>, WU Cha-cha<sup>2</sup>, WANG Guo-lin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Shenhua (Beijing) Remote Sensing & Geo-engineering Company Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** Aimed at the weak points in spontaneous combustion research, strengthened the study of geology controlling factors, selected Wuda coalfield of Permo-Carboniferous system in Inner Mongolia as the working area, and studied thoroughly the fracture system which played an important role in the dynamic process of coalfield fire area formation based on the model of burning spot→fire line→fire area. From the viewpoint of genesis, the fractures related with coalfield fire area can be divided into three basic types: structure fracture, mining collapse fracture, combustion fracture, and five compound types. The basic style of the structure fracture controls on the mining collapse fracture and combustion fracture, and the combustion fracture develops generally based on the structure fracture or mining collapse fracture, independent combustion fracture is rare. The field geological survey and high resolution remote sensing interpretation show that the coal fires in Wuda coalfield distribute in the area with a large density of fractures and the type of fractures has a good interrelation with the type of coalfield fire area.

**Key words:** Wuda coalfield; coalfield fire area; structure fracture; mining collapse fracture; combustion fracture

煤层自燃蔓延可形成大面积火区, 烧毁大量煤炭资源, 危及矿井安全生产, 引发一系列生态环境问

收稿日期: 2008-09-25 责任编辑: 王婉洁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40572092, 40872105)

作者简介: 曹代勇(1955—), 男, 重庆人, 教授. Tel: 010-62331409, E-mail: cdy@cumt.edu.cn

题,给社会经济发展和人民身体健康带来极大的危害<sup>[1-2]</sup>。煤层自燃作为一个复杂的物理、化学和环境作用过程是多种内在原因和外在条件综合作用的结果<sup>[3-4]</sup>,本文着重讨论对煤田火区形成和扩展起到控制作用的宏观裂隙系统。

## 1 裂隙在煤层自燃和火区形成中的作用

自17世纪Plott提出黄铁矿导因学说以来,煤层自燃机理研究取得了长足进展,出现了多种学说,其中,煤氧复合作用学说得到大多数学者的赞同<sup>[5]</sup>。人们从煤有机大分子结构、活化能、煤氧反应热等方面对煤氧复合反应的机理进行了深入探讨,认识到漏风供氧和热量积聚是燃烧得以持续的必要条件,从矿井通风角度开展了采空区漏风强度、风速、风压与供氧、散热条件的关系研究<sup>[6]</sup>。对浅部煤层自燃扩展动力学的研究亦从漏风规律入手,认为煤体温度差和风速动压构成氧气向空隙性煤体内渗流的动力源<sup>[7]</sup>;将露头煤火熄灭的原因归结为自燃扩展至深部后因上覆岩层过厚,燃烧形成的裂隙不能达到地表而缺氧窒息<sup>[8]</sup>。

裂隙是煤层或岩层中发育的各类破裂面的总称,可以从几何形态、成因机制等角度对其进行描述和分类。根据裂隙的规模可划分煤层裂隙和煤系及上覆岩层裂隙两大类,二者在火区形成过程中所起作用不同。煤氧复合理论认为煤低温氧化是一种表面反应,生热速率取决于氧的浓度、煤体表面积和氧气的流通性。煤层是由宏观裂隙、显微裂隙和孔隙组成的三元介质,其孔隙、裂隙结构直接影响到氧气的吸附和渗流,是煤氧复合作用的基础;而使煤自热氧化和自热发火得以持续,进而扩展蔓延形成具有一定规模的火区,则需要合适的供氧、排气条件。由于构造变形等地质因素和采矿活动等人为因素造成的宏观裂隙通达地表,沟通了氧气与地下煤层的联系,构成漏风供氧、散热、排烟和排气循环的主要通道,在煤层自燃扩展动力学过程中起到至关重要的作用<sup>[9]</sup>。管海晏等(2007,2008)认为,乌达煤田火区的形成与开采方式有关,长壁式采煤工艺在回采后采空区遗留浮煤,顶板岩石产生垮落带和断裂带,形成遗煤带、垮落带、断裂带等3个带,当断裂带通达地表后,空气可沿3个带贯通,遗煤与空气接触氧化放热,聚热增温达到燃点自燃,烟雾通过垮落带和断裂带排出地表,形成矿区火区燃烧动力系统,构成火区灾害<sup>[5]</sup>。

## 2 与煤火有关的裂隙分类

本文所称与煤火有关的裂隙是指规模为米级以上的切层裂隙,多数通达地表,是煤层与空气接触和自燃后放热散气的主要通道。通过对乌达煤田火区的野外观察,识别出构造裂隙、采动塌陷裂隙、燃烧烘烤裂隙等3种基本成因类型以及5种复合类型,其成因和主要特征见表1。

## 3 裂隙与煤火扩展模型

由煤层自然着火到形成火区是燃烧动力系统发展的结果。大气圈与岩石圈相互作用,形成由大气圈输气供氧、煤层燃烧、烟雾向大气排放的燃烧动力系统,裂隙在该系统中起到循环通道的作用。煤火空间演化过程大体可以分为3个阶段,概括为由点到线、再由线到面逐渐扩大的过程<sup>[9]</sup>。

(1) 自燃点(燃烧中心)的形成。煤层自然着火是由1个点开始的,这个点具备供氧充足且有利于聚热的环境,周围的煤被氧化产生热量在此点聚集,使煤体温度逐渐增高直至自然发火,形成燃烧中心(图1)。燃烧中心通常沿裂隙分布,多位于裂隙转折端或2组裂隙交叉点。

(2) 燃烧线(燃烧裂隙)的形成。多个自然发火点沿着裂隙(构造裂隙和采动裂隙)分布,呈温度异常、冒烟冒气的燃烧线,即形成燃烧裂隙。多个发火点沿着裂隙扩展,彼此相连,使燃烧裂隙持续发展、规模加大(图2)。

(3) 燃烧面(火区)的形成。几条燃烧线(裂隙)相互贯通,形成1个燃烧面,即火区。如乌达煤田Ⅷ号火区是NS向的采动塌陷-燃烧裂隙(包括采空区型塌陷裂隙和煤柱型塌陷裂隙)和3组构造-燃烧裂隙相互交错形成的(图3)。

表 1 与煤田火区有关的裂隙成因类型  
Table 1 Genesis types of fractures related with coalfield fire area

分 类	成 因	主要特征和鉴别标志
简单类型	构造裂隙 构造变形的产物，根据力学性质，分为张裂隙和剪裂隙等 2 个亚类	通常等同于节理构造，也包括小型断层。构造裂隙延伸方向受区域构造应力场控制，大范围内稳定 剪裂隙（节理）方向性明显，延伸远，节理面平直、闭合，常呈共轭成组出现；张裂隙（节理）产状不甚稳定，延伸不远，常追踪 X 型剪节理呈锯齿状
	采动塌陷裂隙 主要指煤层开采覆岩断裂带的穿层裂隙，即竖向破断裂隙，包括采空区型塌陷裂隙、煤柱型塌陷裂隙等 2 个亚类	采动塌陷裂隙分布范围受地下开采方式和范围控制，具有局部发育特征。采空型塌陷裂隙延伸方向一般与工作面的推进方向垂直，多呈弧形、阶梯形；煤柱型塌陷裂隙与遗留煤柱平行，呈线性延伸
	燃烧裂隙 由于地下煤层燃烧产生的高温对上覆岩层烘烤，使其脱水、收缩、塌陷产生的裂隙	燃烧裂隙通常呈串珠状的燃烧中心，在地表表现为冒烟、冒气、高温等特点 单纯的燃烧裂隙少见
复合类型	构造 - 采动塌陷裂隙 采动促使岩层构造薄弱面（即构造裂隙）再活动	采动局部应力场对构造裂隙的改造，在形态和延伸方向上保持构造裂隙的特征，但裂隙面呈张开状、伴随地表塌陷；分布于开采区范围
	构造 - 燃烧裂隙 地下煤层沿构造断裂带燃烧扩展	在原有的构造裂隙的基础上发育，继承了构造裂隙的特征，但由于受地下煤火烘烤影响，裂隙宽度变大，具有燃烧特征；分布于火区范围
	采动塌陷 - 燃烧裂隙 在采动塌陷裂隙的基础上发生遗煤自燃，形成采空区燃烧裂隙	处于全面燃烧期，地表沿裂隙燃烧现象剧烈，裂隙内可见明火，往往构成为燃烧塌陷区；分布于着火开采区范围
	构造 - 采动塌陷 - 燃烧裂隙 在构造裂隙的基础上发育采动塌陷裂隙，继而由于采空区遗煤自燃发展为燃烧裂隙	在形态和延伸方向上保持构造裂隙的特征，沿裂隙有冒烟、冒气、高温等燃烧现象，通常伴随地表塌陷；分布于着火开采区范围
	构造 - 燃烧 - 塌陷裂隙 首先在构造裂隙的基础上形成燃烧裂隙，继而因地下煤层烧失发展为塌陷裂隙	此类裂隙具有构造裂隙的特征，但规模较大。此处的地下煤火一般处于熄灭期，地表沿裂隙有冒烟、冒气现象，但温度趋于背景值



图 1 有芒硝硫磺析出的燃烧点

Fig. 1 Burning spot with separated mirabilite and sulfur

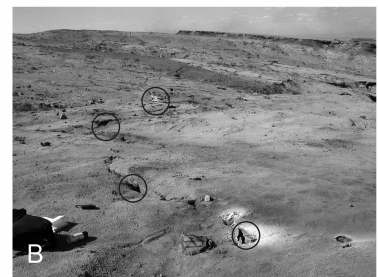


图 2 4 个发火点形成的燃烧线

Fig. 2 Fire line formed by four combustion spots

## 4 乌达煤田裂隙发育特征

乌达煤田位于内蒙古自治区西部乌海市境内，有五虎山、苏海图、黄白茨 3 个煤矿，核定生产能力 410 万 t/a，是内蒙古自治区重要的焦煤生产基地。1961 年在苏海图井田内首次发现煤层自燃，20 世纪 70 年代以来，由于开采规模的扩大，造成多个煤层相继发生自燃。2004 年“乌达煤田火区详查补充报告”



图 3 燃烧裂隙交错形成的燃烧面

Fig. 3 Combustion system formed by crossed fractures

划定火区 16 个，总面积达到 349.6 万 m<sup>2</sup>，煤层燃烧平均深度 35 m，最深 80 m<sup>[5]</sup>。

乌达煤田位于华北赋煤区外环强挤压变形带的鄂尔多斯盆地西缘褶皱逆冲带，中生代以来经历较强烈的构造运动，使晚古生代煤系及其上覆岩层发生明显变形。经现场调查，煤田范围内基岩大面积出露，煤层上覆岩层中砂岩占较大比例，节理发育，密度达 6 ~ 10 条/10 m，其中，剪节理占绝对优势，单条节理延伸数十米至数百米，多呈 X 型共轭状产出。

采矿引起覆岩破坏，形成垮落带、断裂带和沉降带，导致地表裂缝发育和塌陷，采动裂隙发育高度与采厚呈非线性正比，其中，竖向破断裂隙通常在煤层顶板以上数十米高度范围内发育<sup>[10]</sup>。乌达煤田地层平缓，倾角仅 10 余度，煤层采深不足百米，采动竖向裂隙容易通达地表，沟通氧气与采空区遗煤的联系，为煤自热氧化创造了条件。采动覆岩破坏在很大程度上受岩层结构和构造控制，往往沿构造裂隙发育；另一方面，采动塌陷裂隙是煤层开采的产物，受采掘工程制约，在野外和遥感影像上根据分布的局部性和结构图案（图 4（a）），易与区域稳定发育的构造裂隙（图 4（b））相区别。

燃烧裂隙是乌达煤田火区在地表的主要表现形态。小型裂隙长数十米，地下热流、烟流沿裂隙连续喷出，大型的燃烧裂隙长数百米到数千米，由多条裂隙组成裂隙群，呈不连续的分段燃烧。燃烧裂隙通常在构造裂隙和塌陷裂隙基础上发育（图 5），单独的燃烧裂隙少见。燃烧裂隙一般继承了构造裂隙和塌陷裂隙的特点，但由于地下煤层的烧失和上覆岩层的烘烤脱水，地面塌陷更为严重，一般规模要大于构造裂隙和采空塌陷裂隙。

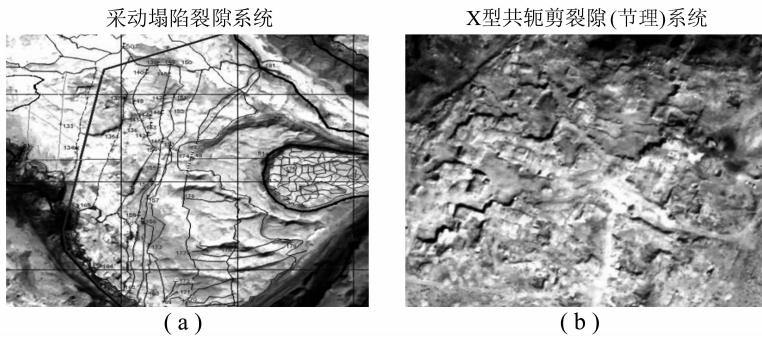


图 4 Quickbird 遥感影像上的裂隙系统

Fig. 4 The fractures system of Quickbird remote sensing image



图 5 典型的构造 - 燃烧裂隙和构造 - 塌陷 - 燃烧裂隙

Fig. 5 Typical structure - combustion fracture and structure - mining collapse - combustion fracture

不同种类裂隙发育具有一定的规律：构造裂隙全煤田普遍发育，是其他两大类裂隙的基础；采动塌陷

裂隙多受构造裂隙的控制，初期沿构造裂隙破裂，中后期沿采空区边缘或煤柱切穿构造裂隙，形成裂隙群并与采空塌陷伴生；燃烧裂隙数量较少，但宽度和长度较大，最终导致火区塌陷。

### 5 乌达煤田火区基准观测带裂隙的遥感解译

基于 Qucekbird 高分辨遥感图像（成像时间为 2003 年 10 月，全波段星下点分辨率为 0.61 m）建立了乌达煤田火区遥感基准观测带<sup>[5]</sup>。观测带呈 EW 向展布位于煤田中南部，长 4 km、宽 0.8 km，穿越Ⅷ、Ⅸ和 X 号等 3 个火区（图 6）。

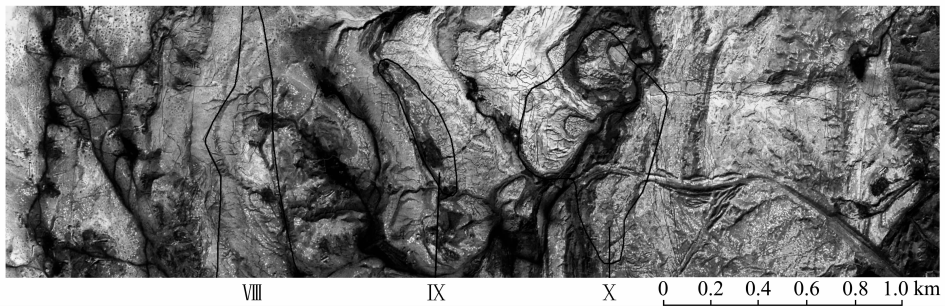


图 6 乌达煤田火区遥感基准观测带

Fig. 6 Based survey zone of remote sensing in Wuda coalfield fire area

通过遥感图像处理 and 野外现场验证，建立了不同成因类型裂隙的遥感解译标志，识别出构造裂隙、构造-燃烧裂隙、采动塌陷-燃烧裂隙等 3 类裂隙。观测带裂隙密度背景值（以构造裂隙为主）为 10 ~ 20 条/100 m<sup>2</sup>，3 个火区的裂隙密度明显高于背景值。裂隙类型与火区类型<sup>[11]</sup>有关（表 2），Ⅸ号火区为小煤窑遗煤自燃型，煤层埋深浅，煤层自燃多以构造裂隙作为供氧排烟通道，构造-燃烧型裂隙所占比例高；X 号为大矿采空区自燃型，煤层埋深较大，穿越煤层通达地表的构造裂隙数量较少，但由于采空区面积较大，采动塌陷裂隙或构造-采动塌陷裂隙较发育，构成采空区遗煤自燃的主要通道，故塌陷-燃烧型裂隙比例最高；Ⅷ号火区具有过渡性质。

表 2 遥感基准观测带火区裂隙特征

Table 2 The fractures characters based survey zone of remote sensing

火区 编号	裂隙密度/ (条·(100 m <sup>2</sup> ) <sup>-1</sup> )	裂隙类型/%			火区类型	燃烧煤层	最大燃烧 深度/m	燃烧面 积/m <sup>2</sup>
		构造型	构造-燃烧型	塌陷-燃烧型				
Ⅷ号	20 ~ 30	40	30	30	大矿采空区-小煤窑型	9,10 号	50	477 000
Ⅸ号	40 ~ 60	30	40	30	小煤窑型	6,7 号	14	54 000
X 号	20 ~ 50	20	30	50	大矿采空区型	1,2,4 号	76	327 000

### 6 结 论

(1) 切割煤层和覆岩通达地表的裂隙系统沟通了地表氧气与地下煤层或采空区遗煤的联系，构成漏风供氧、散热、排烟和排气循环的主要通道，在煤田火区形成的点→线→面扩展演化动力学过程中起到重要的作用。

(2) 根据裂隙的成因及其在煤层自燃和形成火区等方面所起的作用，划分出构造裂隙、采动塌陷裂隙、燃烧裂隙等 3 种基本类型及 5 种复合类型。其中，构造裂隙是基础；采动塌陷裂隙初期多沿构造裂隙发育，后期扩大形成塌陷裂隙群；燃烧裂隙通常在构造裂隙和塌陷裂隙的基础上发育，单独的燃烧裂隙少见。

(3) 乌达煤田主采煤层顶板岩性以砂岩为主，构造裂隙发育，生产矿井采用走向长壁回采工艺，留

设煤柱,采空区面积大;煤层埋藏浅、采动塌陷裂隙易于通达地表,沟通地表氧气与采空区的联系,导致煤柱和遗煤氧化自燃。随乌达煤田开采强度的增加,大矿采空区煤层自燃构成乌达煤田火区的主要类型。

(4) 煤层自燃和火区的形成是多种内在原因和外在外在条件综合作用的结果,相对于煤氧复合反应和采矿通风条件研究而言,自燃动力学过程的地质因素研究是一个较薄弱的环节。因此,加强对不同类型裂隙的鉴别标志、展布规律及其发展演化过程的研究,是煤田火区研究的基础性工作。

#### 参考文献:

- [1] 管海晏,冯·亨特伦,谭永杰,等. 中国北方煤田自燃环境调查与研究 [M]. 北京:煤炭工业出版社,1998.  
Guan Haiyan, Van Ganderen, Tan Yongjie, et al. Study and investigation on spontaneous combustion environment of coalfield in Northern China [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [2] Stracher G B, Taylor T P. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe [J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 59: 7-17.
- [3] Erdogan K, Vedat D. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters [J]. Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2002, 26 (1): 59-64.
- [4] 曹代勇,樊新杰,时孝磊,等. 乌达煤田煤层自燃内因分析与自燃类型划分 [J]. 煤炭学报, 2005, 30 (3): 288-292.  
Cao Daiyong, Fan Xinjie, Shi Xiaolei, et al. Analysis of spontaneous combustion internal factors and division of spontaneous combustion types of coal seam in Wuda coalfield, Inner Mongolia [J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30 (3): 288-292.
- [5] 张建民,管海晏,曹代勇,等. 中国地下煤火研究与治理 [M]. 北京:煤炭工业出版社,2008.  
Zhang Jianmin, Guan Haiyan, Cao Daiyong, et al. Underground coal fires in China: origin, detection, fire-fighting, and prevention [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008.
- [6] 文 虎,徐精彩,李 莉,等. 煤自燃的热量积聚过程及影响因素分析 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (4): 370-374.  
Wen Hu, Xu Jingcai, Li Li, et al. Analysis of coal self-ignite heat accumulating process and its effect factor [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28 (4): 370-374.
- [7] 邓 军,徐精彩,文 虎. 汝箕沟2~(-2)煤层露头自燃特性研究 [J]. 西安矿业学院学报, 1999, 19 (1): 1-4.  
Deng Jun, Xu Jingcai, Wen Hu. Investigation into the characteristics of spontaneous combustion of Rujigou coal 2-2 crop [J]. Journal of Xi'an Mining Institute, 1999, 19 (1): 1-4.
- [8] Heffern E L. Geologic history of natural coal-bed fires, Poeder River Basin, USA [J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 59: 25-47.
- [9] Cao Daiyong, Fan Xinjie, Guan Haiyan, et al. Geological models of spontaneous combustion in the Wuda coalfield, Inner Mongolia, China [A]. Stracher G B. Geology of Coal Fires: Case Studies from around the World [C]. Review in Engineering Geology XVIII. Colorada: The Geological Society of America, Inc., 2007: 23-30.
- [10] 杨 科,谢广祥. 采动裂隙分布及其演化特征的采厚效应 [J]. 煤炭学报, 2008, 33 (10): 1 092-1 096.  
Yang Ke, Xie Guangxiang. Caving thickness effects on distribution and evolution characteristics of mining induced fracture [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33 (10): 1 092-1 096.
- [11] 樊新杰,曹代勇,时孝磊,等. 乌达矿区煤层自燃综合成因分类 [J]. 煤田地质与勘探, 2005, 33 (S1): 61-64.  
Fan Xinjie, Cao Daiyong, Shi Xiaolei, et al. Comprehensive cause division of spontaneous combustion types of seams in Wuda coalfield, Inner Mongolia [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33 (S1): 61-64.