



您可能感兴趣的文章、专题：

“煤矿智能化综述及关键技术”专题

“我国煤矿瓦斯防治理论技术研究进展”专题

“煤地质与煤结构”专题

“煤矿安全+智能化”专题

“深部煤层瓦斯精准抽采”专题

“中国煤科首席科学家”专题

“矿井冲击地压灾害防治技术及工程实践”专题

2020 年度《煤炭科学技术》“领跑者 5000”论文

2021《煤炭科学技术》封面文章

煤炭行业青年科学家论坛(2021 年)



移动扫码阅读

郑凯歌,孙四清,赵继展,等. 黄陵矿区围岩气体成因及致灾机理研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(8):139-146.doi:10.13199/j.cnki.cst.2021.08.018

ZHENG Kaige,SUN Siqing,ZHAO Jizhan,*et al.* Study on genetic and destructive mechanism of gas from surrounding rock in Huangling Mining Area [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49 ( 8 ) : 139 - 146. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2021.08.018

## 黄陵矿区围岩气体成因及致灾机理研究

郑凯歌<sup>1,2</sup>,孙四清<sup>1</sup>,赵继展<sup>1</sup>,陈冬冬<sup>1</sup>

(1.中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710054;2.安徽理工大学,安徽 淮南 232001)

**摘 要:**鄂尔多斯盆地南缘黄陵矿区黄陵二号等煤矿在采掘过程中出现井下围岩大量油气异常喷涌现象,导致矿井停采停掘,对矿井的安全生产构成严重威胁。为了揭示黄陵矿区煤层围岩气体来源、运移途径,探讨采掘扰动下灾害发生机理。通过围岩气样地球化学参数测试结果分析,采用烩源岩对比、油型气类型鉴定、数值模拟等方法,结合研究区构造、沉积特征分析,综合采掘扰动效应围岩气灾害诱导作用进行了研究和探讨。研究结果表明:围岩气  $\delta_{13}C_2$  含量平均低于 2.88%,结合 Schoell 关系鉴别图版判识,该围岩气为典型的原油伴生热解类油型气,顶板气中夹有少量煤成气与油型气混合气;其为产于三叠系延长组烩源岩,通过基底构造形成的裂隙通道首次运移至底板围岩,在砂体运移通道及后生裂隙作用下,运移至煤层及顶板围岩的成因机制。采掘扰动效应下,打破原始应力平衡,地应力、构造应力耦合作用下,围岩发生变形和破坏,形成围岩气运移通道,在瓦斯压力催化作用下,加速围岩气异常涌出,导致灾害的发生。

**关键词:**围岩气;油型气;采掘扰动;成因机制;灾害

中图分类号:P618.11;TE132.14

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2021)08-0139-08

### Study on genetic and destructive mechanism of gas from surrounding rock in Huangling Mining Area

ZHENG Kaige<sup>1,2</sup>,SUN Siqing<sup>1</sup>,ZHAO Jizhan<sup>1</sup>,CHEN Dongdong<sup>1</sup>

(1.Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp., Xi'an 710054, China;

2.Anhui University of Science and Technology,Huainan 232001,China)

**Abstract:** As the mining process of coal mines (e.g. No.2 Huangling Coal Mine) in Huangling Mining Area along the southern margin of Ordos Basin, a great amount of gas flows come from the surrounding rocks underground, leading to mining suspension and serious threat to the safe production of coal mines. Based on the geochemistry parameters of gas samples from coal surrounding rock, the geological structure and sedimentary characteristics of Huangling Mining Area. Source rock correlation, identification of oil type gas and numerical simulation methods are used to reveal the source and migration pathway of gas from coal surrounding rock. Further, the mechanism of disaster occurrence under mining disturbance is also discussed. The results show that the gas from coal surrounding rock is a typical oil type gas associated with pyrolysis of crude oil which are discriminated by the average value of  $\delta_{13}C_2$  is lower than 2.88% and Schoell Plate analysis, the roof gas sandwiched with a small amount of coal gas and oil gas mixture. The genetic mechanism of the gas from coal surrounding rock in the study area is mainly from the source rock of Yanchang Formation, transporting to floor rock at the first with migration pathway of fissure channels formed by basement structures, transporting from bottom to coal seam and roof by the sandstone reservoir and epigenetic fissure providing the secondary migration pathway for the bottom oil type gas. Due to mining disturbance, the balance of original stress and completeness of surrounding rock was broken that formed the transport channels of gas, through these channels, accelerating the abnormal emission happens under the comprehensive catalysis of gas pressure. These factors lead to the occurrence of surrounding rock gas disaster.

**Key words:** surrounding rock gas; oil type gas; mining disturbance; genetic mechanism; disaster

收稿日期:2020-06-06;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05045002-002);中煤科工集团科技创新基金资助项目(2018XAYMS08)

作者简介:郑凯歌(1988—),男,河南周口人,工程师,博士研究生。E-mail:13655617009@163.com

## 0 引言

鄂尔多斯盆地是多旋回发育的中生代克拉通盆地,是我国陆上最大的煤、油气沉积盆地之一<sup>[1-2]</sup>。黄陵矿区位于鄂尔多斯盆地南缘,自晚三叠系后,经历了“发生-发展-消亡”的沉积演化,形成了完整的湖泊-三角洲相沉积演化旋回,发育多套煤、油气储盖层组合<sup>[3-4]</sup>。煤田勘查过程中有近150个钻孔直接揭露区内油气,其中,多个钻孔出现气体大量喷出或逸出,气体喷出高度达10~30 m,常伴随有油带出。近年来,随着开采深度的不断增加,黄陵一矿、芦村一号井及黄陵二矿等多个矿井在采掘过程中发生了数十次围岩气体异常涌出,造成工作面停采停掘。该围岩气以游离状态为主,赋存于煤层顶底板围岩中,来源多样化,储集层本身、煤层及油气产气层均可为其生气来源<sup>[5]</sup>。该围岩气异常涌出具有突发性、隐蔽性(异常涌出前无明显征兆)、涌出集中(24 h累计涌出量约6.4万m<sup>3</sup>)和涌出量大(最大涌出21万m<sup>3</sup>)等特点,在黄陵矿区尚属首次发现,在国内外也极为罕见,对煤矿安全生产构成了严重威胁。因对其成因类型,来源研究不明,灾害诱导原理认识不清,无法精确针对性开展灾害治理。多通过“广撒网,密布钻”的治理方式,大范围施工抽采钻孔进行围岩气抽采。该治理方式工程量大、成本高、针对性差,延长了施工周期,降低了回采效率。因而查明该异常涌出围岩气的成因机制及致灾机理是精确采取预抽和防治措施的关键。

据此,唐恩贤等<sup>[6]</sup>利用底板围岩气样同位素测试结果,分析了底板围岩气类型,通过围岩气储集层研究,结合运移通道构想预测了底板气来源,但未能提供有效数据支撑,缺乏致灾机理阐述。陈冬冬<sup>[7]</sup>通过对围岩气储集层探测,结合控气要素分析,进行了围岩气赋存区域预测和划分。但整体尚未阐明围岩气来源、赋存特征、涌出致灾原理,预测区域广,无法提供准确的灾害区域预测,治理难度大,针对性不够强。当前我国矿井瓦斯防治研究的主要对象依然是煤层瓦斯,现有煤层瓦斯灾害诱导机理的研究较多<sup>[8-9]</sup>。文献[10-12]开展了煤与瓦斯突出、煤层瓦斯异常涌出等灾害的规律研究和机理探讨,围岩气多以游离态气体赋存为主,与煤层瓦斯存在较大差异,现有的瓦斯致灾机理研究成果无法直接应用。基于此,笔者以研究区围岩气探测工程为基础,结合气样地化特征对黄陵矿区围岩气体成因进行分类;运用盆地构造热演化史模拟研究和烃源岩对比方法,结合研究区构造演化特征分析,对研究区围岩气

来源进行研究,提出了研究区围岩气成因机制,探讨其致灾机理,以期为黄陵矿区围岩气异常涌出防治工作提供科学依据。

## 1 矿区概况

研究区域包括黄陵矿区中芦村一号和二号井、黄陵一号和二号井、双龙井等煤油气共存典型矿区,下简称“研究区”。该区地处华北板块鄂尔多斯盆地陕北斜坡带庆阳单斜东南角,南与渭北隆起褶皱带毗邻,东与晋西挠褶带接壤,总体构造格架为褶皱包络面向北西缓倾斜的单斜构造,倾角一般2°~4°(图1),其上有起伏不大的宽缓褶皱,轴向以北东为主。含煤地层走向北东,倾向北西,倾角1°~5°。构造变形微弱,构造形迹简单。矿区构造形迹以包络面内部次级平缓褶皱为主,小型断层次之,大中型断层不发育,勘探结果显示,砂岩储层整体呈透镜状分布一般为泥岩包围(图2)。

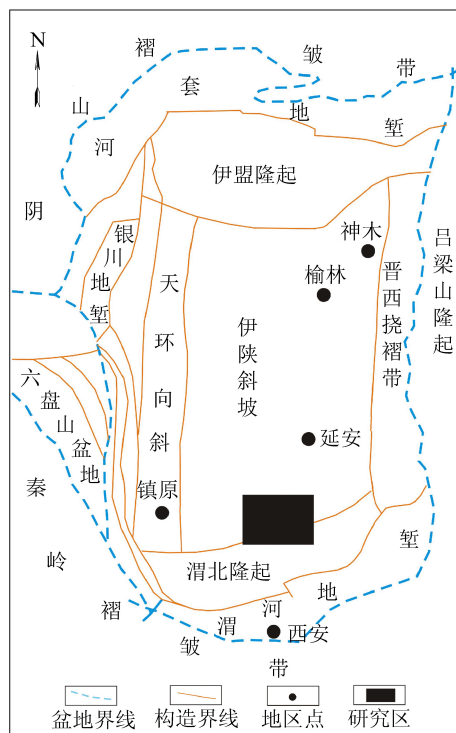


图1 研究区位置

Fig. 1 Position graphs in the study area

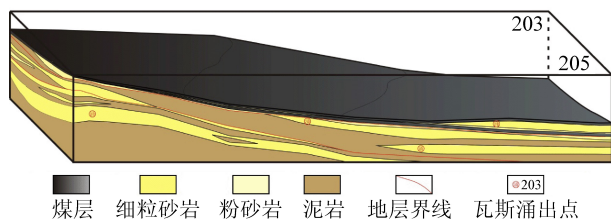
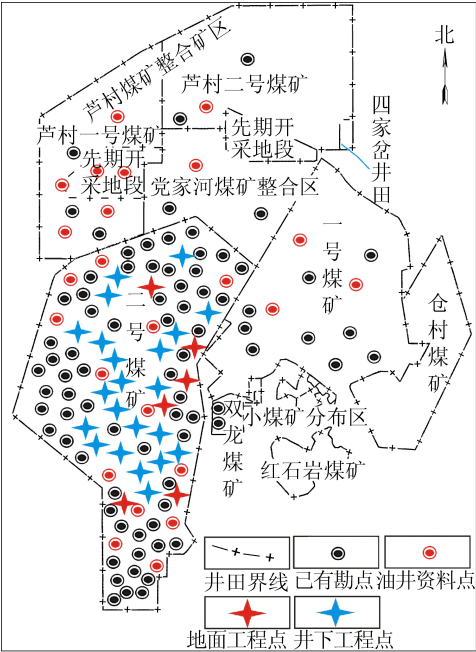


图2 底板储集层三维分布

Fig. 2 Three-dimensional distribution of floor reservoir

通过区内实施 21 个井下绳索取心和 6 个地面补勘围岩气探测钻孔,显示砂岩储集层整体呈透镜状分布,整理矿区 174 个钻孔地球物理测井、岩屑录井及气测录井资料(图 3a),通过钻探工程气显示层

位记录及测井、录井资料精细再解译的方法,确定了侏罗系直罗组一段砂岩、延二段七里镇砂岩、富县组下部砂岩、三叠系瓦窑堡组顶部砂岩等 4 个连续性较好的砂岩含气层(图 3b)。



(a) 钻孔资料收集点分布

地层	单位	类别	综合柱状	岩性
系统	组			
侏罗系中统	直罗组 J <sub>2</sub> z	盖层	---	泥岩
		储集层	.....	细粒砂岩
	延安组 J <sub>2</sub> y	延四段	---	泥岩
			.....	粉砂岩
		延三段	---	泥岩
			.....	粉砂岩
			.....	细粒砂岩
		延二段	---	泥岩
			---	细粒砂岩
		盖层	---	泥岩
		储集层	.....	细粒砂岩
			.....	粉砂岩
		储集层	.....	2号煤层
侏罗系下统	富县组 J <sub>1</sub> f	储集层	.....	细粒砂岩
		储集层	.....	3号煤层
三叠系上统	瓦窑堡组 T <sub>3</sub> w	盖层	---	泥岩
		储集层	.....	细粒砂岩

(b) 围岩气储集层探测结果

图 3 围岩含气层探测

Fig. 3 Gas bearing formation detection of surrounding rock

2 围岩气成因机制

2.1 围岩气体稳定同位素特征

利用采集的 204 个顶底板围岩及煤层气样,送中国科学院兰州地质研究所,采用 GB/T 6041—2002《质谱分析方法通则》进行气体稳定碳同位素测定。根据含气层与煤层的空间位置关系,将直罗组一段砂岩、延二段七里镇砂岩气样划分为顶板气样,富县组下部砂岩、瓦窑堡组顶部砂岩气样划分为底板气样,

煤层气样品统称为煤层气样。测定结果见(表 1),顶板气乙烷  $\delta^{13}\text{C}$  测值为  $-3.72\% \sim -2.11\%$ ,平均  $-3.17\%$ ,重烃  $\text{C}_{2+}$  测值  $0 \sim 38.93\%$ ,平均  $8.49\%$ ;煤层气乙烷  $\delta^{13}\text{C}$  测值为  $-3.37\% \sim -2.39\%$ ,平均  $-2.69\%$ ,重烃  $\text{C}_{2+}$  测值  $0 \sim 6.68\%$ ,平均  $0.79\%$ ;底板气乙烷  $\delta^{13}\text{C}$  测值为  $-3.88\% \sim -2.90\%$ ,平均  $-3.24\%$ ,重烃  $\text{C}_{2+}$  测值  $0\% \sim 20.9\%$ ,平均  $17.90\%$ 。各类气体甲烷碳同位素( $\delta^{13}\text{C}_1$ )值差别不明显,但整体上顶底板气样( $-6.15\% \sim -4.91\%$ )重于煤层气样( $-6.13\%$ )。

表 1 稳定碳同位素分布特征

Table 1 Distribution of stable carbon isotope

测试类型	甲烷 $\delta^{13}\text{C}$ 测值/%	乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 测值/%	丙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 测值/%	重烃 $\text{C}_{2+}$ 测值/%	甲烷 $\delta\text{D}$ 测值/%
顶板气	$-6.15 \sim -4.91$ $-5.22(22)$	$-3.72 \sim -2.11$ $-3.17(10)$	$-3.36 \sim -2.53$ $-2.88(4)$	$0 \sim 38.93$ $8.49(19)$	$-25.20 \sim -20.12$ $-22.05(19)$
煤层气	$-7.03 \sim -5.22$ $6.13(47)$	$-3.37 \sim -2.39$ $-2.69(21)$	$-2.98 \sim -2.13$ $-2.69(8)$	$0 \sim 6.68$ $0.97(29)$	$-26.80 \sim -22.40$ $-24.04(29)$
底板气	$-5.22 \sim -4.28$ $-4.89(135)$	$-3.88 \sim -2.90$ $-3.24(61)$	$-3.58 \sim -2.56$ $-2.96(28)$	$0 \sim 20.90$ $17.90(57)$	$-24.64 \sim -20.17$ $-23.29(52)$

注:表中数据分子为数值分布范围;分母为平均值;括号中为样品数。



2.2 围岩气体成因类型

2.2.1 煤成气与油型气类型鉴定

陈敬铁等<sup>[13]</sup>通过利用重烃碳同位素测试数据分析,认为伊盟隆起上古生界部分天然气可能来自泊尔江海子断裂以南地区。曹晓宏等<sup>[14]</sup>利用碳氢同位素分析结果,尤其是重烃碳同位素含量,确定了中生界天然气的成因类型主要为油型气。陈安定等通过研究指出,重烃碳同位素具有较强的母质烃源岩类型继承特征,是判识不同气体母质烃源岩类型的重要指标<sup>[15]</sup>。戴金星等<sup>[16]</sup>利用天然气碳同位素差异稳定性,对煤成气、油型气重烃同位素含量界限进行了划定;文献[17-19]分别通过试验测试、数据分析和模拟试验对腐泥型和腐植型天然气类型划分界限进行了研究。通过以上研究,我国煤成气与油型气乙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  判识界限为  $-2.88\%$ ,油型气乙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  含量小于  $-2.88\%$ 。

由表 1 测试结果可知,研究区底板测试气样乙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  值全部小于  $-2.90\%$ ,表现为典型的油型气特征;顶板气样乙烷碳同位素  $\delta^{13}\text{C}$  值最大  $-2.11\%$ ,平均  $-3.17\%$ ,小于  $-2.88\%$ ,整体表现为油型气类型特征,但部分样品显示煤成气特征,为煤成气和油型气的混合型气体;煤层气气样中最低值  $-3.37\%$ ,表现为油型气特征,平均  $\delta^{13}\text{C}_{2+}$  测值为  $-2.69\%$ ,整体呈现煤成气特征,为煤成气和油型气的混合型气体。

表 2 天然气类型划分标准<sup>[15]</sup>

Table 2 Division standard of natural gas type<sup>[15]</sup>

成因种类		成因类型			
		未成熟	未熟-低熟	成熟阶段	过熟阶段
有机成因	腐泥型(油型气)	油型生物气	油型过渡带气	油型热解气(原油伴生和凝析油气)	油型裂解气
	腐植型(煤成气)	煤型生物气	煤型过渡带气	煤型热解气(常伴生凝析油)	煤型裂解气
无机成因		幔源气、岩浆成因气、放射成因气、无机盐分解气			
混合成因		异岩两源混合气,同岩同源混合气			

2.3 油气来源分析

2.3.1 烃源岩对比分析

有机碳含量及成熟度特征决定了烃源岩的生烃、排烃和产气能力,采集煤层顶底板围岩含气层附近泥页岩等烃源岩,进行有机碳含量和镜质组反射率测试。测试结果显示(表 5),围岩气储集层烃源岩有机碳质量分数(TOC)多处于 1.5%,与表 3 对比可知<sup>[17]</sup>,处于差-非常差阶段,少部分达到中等程度。煤层顶板泥页岩有机质成熟度为  $0.62\% \sim 0.72\%$ ,平均  $0.66\%$ ;底板泥页岩有机质成熟度为  $0.49\% \sim 0.78\%$ ,平均  $0.67\%$ ,均处低成熟阶段,难以

2.2.2 油型气类型鉴定

采用 Schoell<sup>[20]</sup>提出的甲烷  $\delta^{13}\text{C}$  与甲烷  $\delta\text{D}$  关系鉴别图版(图 4),结合研究区不同含气层位采集气样的碳同位素和氢同位素测定结果,进一步来判识研究区天然气成因类型。由图 4 知,底板气样测值主要集中在原油伴生热解气(油型气)区域,含极少量混合气,为油型气中原油伴生热解气;顶板气样主要为原油伴生气(油型气)和混合气;煤层气主要为陆源生物气、混合气(油型及陆源生物气)。

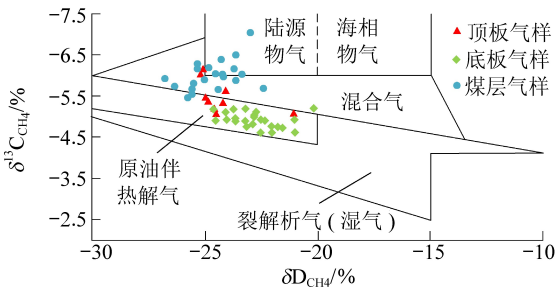


图 4  $\delta^{13}\text{C}_1 \sim \delta\text{D}$  含量判识图版

Fig. 4 Identification chart of  $\delta^{13}\text{C}_1$  and  $\delta\text{D}$

结合天然气类型划分标准<sup>[10]</sup>(表 2)可知,研究区顶底板围岩气体为油型热解气中的原油伴生气,是典型的低等生物腐泥型母质烃源岩在成熟阶段通过热解作用产生的原油伴生型油型气。煤层中气体主要为高等植物的腐植型母质烃源岩,在未熟-低成熟阶段形成的煤型生物气。

形成规模性油气。煤层为腐植型烃源岩,产气类型为煤成气,不具生油气条件。

表 3 煤系烃源岩有机质丰度评价标准

Table 3 Organic matter abundance evaluation standard in coal source rock

级别	非	差	中	好	很好
TOC/%	<0.75	0.75~1.50	1.50~3.00	3.00~6.00	>6.00

通过烃源岩评价和油源对比分析可知,鄂尔多斯盆地延长组属大型内陆湖盆沉积,油源充足,在沉积过程中形成一套深湖-半深湖相干酪根类型为混合型至腐泥型的高产烃能力的烃源岩(图 5)。主要

为延长组长 9—长 4+5 组,其中又以长 7 期烃源岩生烃能力突出,有机碳质量分数为 2.45%~5.81%,生烃强度大(氯仿沥青“A”质量分数 0.254%~0.506%、总烃(HC)  $407.1\times 10^{-6}\sim 5\,754.45\times 10^{-6}$ ),有机质成熟度大部分达到了成熟-高成熟早期( $R_o$  为 0.9%~1.3%)。其沉积中心为华池-正宁-黄陵一带,研究区正处于该烃源岩沉积中心位置处,生烃强度为  $400\times 10^4\text{ t/km}^2$ ,初步分析这应是研究区存在油气显示的主要原因之一。

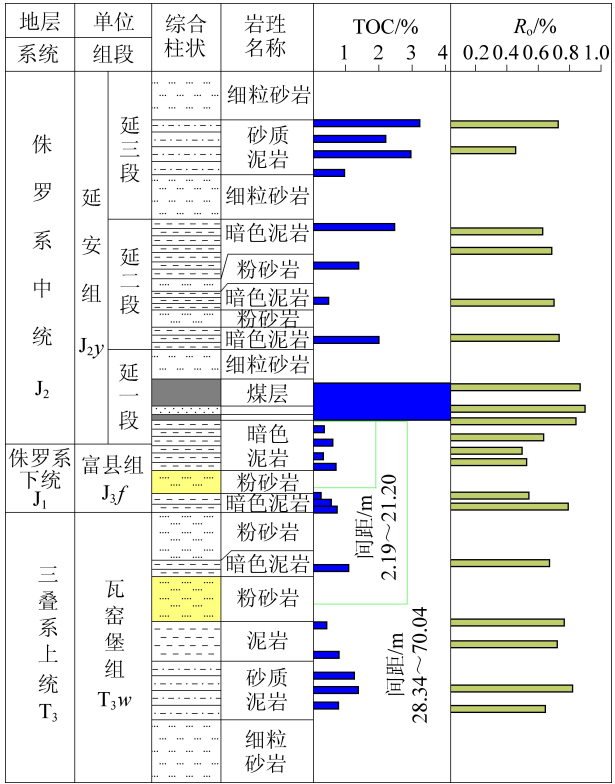


图 5 煤层及顶底板泥页岩有机碳含量和镜质体反射率  
Fig. 5 Organic carbon content and vitrinite reflectance of shales in coal seams, roof and floor

通过鄂尔多斯盆地侏罗系与三叠系油源对比研究分析,一致认为侏罗系延安组与三叠系延长组原油地球化学特征相似(图 6),油源岩同为三叠系延长组长<sub>4+5</sub>~长<sub>8</sub>段半深湖-深湖相腐泥型暗色泥页岩,特别是长 7 段优质烃源岩,而与侏罗系煤系地层烃源岩相差甚远,从油源岩的角度印证了研究区围岩气体来源于三叠系延长组长<sub>7</sub>等段的判识结果。

2.3.2 热演化史分析

盆地构造热演化史是影响烃源岩成熟度、煤油气生成、运移和聚集的关键因素之一,常用镜质体反射率有机质成熟度、磷灰石裂变径迹、流体包裹体等古温标进行反演,镜质体反射率法是目前最常用的方法<sup>[21-22]</sup>。利用 BARKER 和 PAWLEWICZ 提出<sup>[23]</sup>的镜质体反射率平均  $R_o$  及其对应的最大温度  $T_{max}$

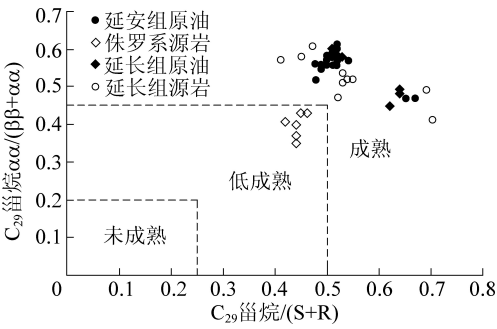


图 6 C29 甾烷异构化参数特征  
Fig. 6 Parameter Characteristics of C29 sterane isomerization

的回归公式计算模型,结合研究区各个层位实测  $R_o$  数据,运用 Basin-Model 盆地模拟软件,对研究区进行构造热史进行模拟分析(图 7)。通过模拟分析知,鄂尔多斯盆地整体为沉降盆地,研究区三叠系延长组为盆地湖泊沉积发育的鼎盛时期,尤以长 7 段沉积期为代表,盆地快速沉降,湖盆面积达到最大,形成了研究区全部为湖泊覆盖的湖湘沉积环境,发育了一套厚度大、有机质丰度高的腐泥型主力烃源岩。

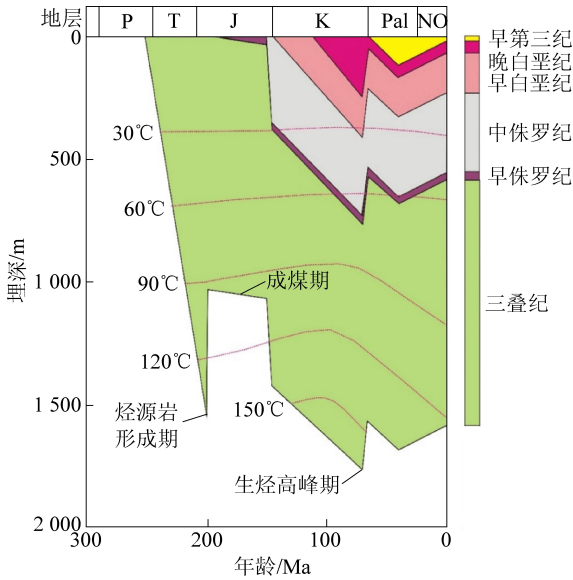


图 7 构造热演化特征模拟  
Fig. 7 the simulation of tectonic-thermal evolution Characteristics

在晚三叠纪末-早侏罗纪研究区整体不均匀抬升,导致湖盆大面积泥炭沼泽化,形成了三叠纪瓦窑堡组到侏罗系的煤系地层,发育高等植物形成的腐殖型母质烃源岩。晚侏罗-早白垩纪初期后,在燕山运动作用下,研究区发生了地层持续拗陷产生的埋深热和岩浆岩侵入的构造热事件,地层温度达到最高 175℃,导致三叠纪延长组烃源岩成熟度大幅度升高,在早白垩纪中期(97 Ma)达到生烃产气高峰。由此可知三叠系具备大量生油气条件,发育了腐泥型为主的烃源岩,三叠纪瓦窑堡组到侏罗系围岩

气储集层附近烃源岩为典型的腐植型母质烃源岩。

### 2.3.3 运移通道分析

鄂尔多斯盆地经历了加里东、海西、印支、燕山喜山5大构造旋回叠加与改造,中生代以来印支、燕山期2大构造旋回对研究区构造演化作用影响深远。印支运动促使大华北盆地整体平稳抬升,上三叠遭遇长期侵蚀,奠定了中生代盆地的形态和构造格局,最终形成了鄂尔多斯盆地晚三叠系延长组暗色湖相生油岩。

晚侏罗系的燕山运动中期,在青藏板块对中国大陆的挤压作用下,盆地在西缘发生了600 km以上长度的逆冲、逆掩断层的强烈构造活动及大规模火山运动,引导了全区重要的构造热事件,促使延长组的生油岩进入生排烃高峰。在盆地大型构造作用下,促使鄂尔多斯盆地向东移动,在盆地北侧阴山-燕山褶皱带的阻隔下,形成了北东向的基底断裂,并发生逆时针剪张活动,并在基底断裂附近发育了大规模垂直裂缝油气运移通道(图8),为研究区三叠油气向侏罗系煤层底板运移提供了空间。通过油岩对比及同位素测试结果分析,围岩气呈现来源于三叠系延长组长<sub>4+5</sub>~长<sub>8</sub>段,通过北东向基底断裂运移至煤层底板,过煤层集聚于顶板砂岩中的运移机制。

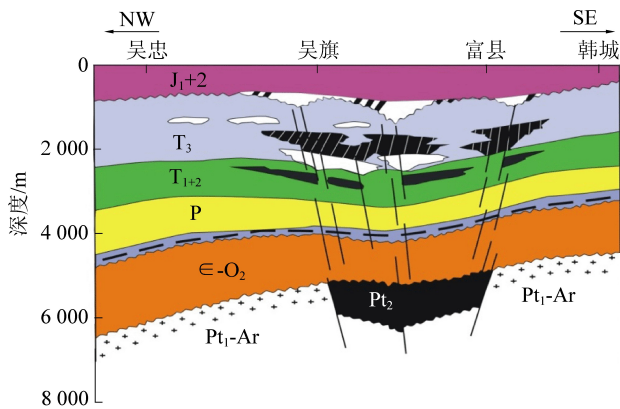


图8 油气垂向运移示意

Fig. 8 Vertical migration of oil gas

## 3 围岩气致灾机理

### 3.1 地应力、构造耦合控制作用

传统的弹塑性理论将岩石的变形破坏过程定义为应力-应变的力学相应过程,并构建了本构方程和力学理论。但随着研究的不断深入,郭建强等<sup>[24]</sup>提出了岩石变形破坏能量驱动下的一种状态失稳现象,并研究了岩石变形过程中能量传递及变化关系。谢和平等<sup>[25]</sup>提出岩石的灾变是以能量释放为其主要特征,并构建了单位体积岩样所吸收的能量计算方程。

研究区围岩气储层在上覆、下伏地层的地应力综合作用下,发生变形并伴随着与外界不断的能量转化,即通过变形效应不断蓄积能量。地质构造的存在,促使岩层变形破坏并产生裂隙,增加了软弱面的变形量,并转化为围岩体的内能。围岩体整体处于能量平衡状态,而岩体软弱面及构造作用形成软弱结构面处于亚平衡状态,当出现额外外力作用时,平衡状态被打破,瞬时释放能量。根据应力及变形关系构件了围岩气蓄积能量 $W_s$ 计算方程。

$$W_s = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (1)$$

式中: $E$ 、 $\mu$ 为围岩弹性模量和泊松比; $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 为围岩单元体3个主应力。

### 3.2 采动效应的诱导作用

采掘活动的发生,围岩体经历了“支承压力集中压缩-应力解除膨胀-应力恢复再压缩”的过程,造成变形和裂隙率增大,伴随有竖向张裂隙、层向裂隙、剪切裂隙的形成,打破围岩原始能量平衡状态。在围岩体达到新的平衡状态过程中,煤层本身及围岩中产生卸压变形(压力降低)及应力集中现象。打通了围岩气层与采掘空间的通道,诱导了蓄积能量的释放,导致围岩气大量异常涌出。

通过数值模拟方法进行底板扰动破坏深度分析,为了消除边界效应,在模型走向上,两端各留140 m宽度边界,倾向两端留150 m边界,模型下端采用全部约束,左右侧面分别约束 $x$ 方向位移,前后侧面约束 $y$ 方向位移,上端面为自由端。模型顶面受到上覆地应力作用,根据岩体自重计算公式( $P = \gamma H$ ,  $\gamma$ 为岩层容重, $H$ 深度)计算获得上覆岩层初模型外垂直应力为11.25 MPa。模拟结果显示采掘过程中底板围岩破坏深度达40 m,卸压程度最高为0,变形量最大为570 mm(图9)。富县组下部和瓦窑堡组顶部围岩气储集层分布距离煤层底板分别为2.19~21.2 m、28.34~70.04 m(图5),多处于底板扰动破坏带范围,采掘扰动为围岩气的异常涌出提供了二次能量聚集和围岩气运移空间,并诱导了原始蓄积能量的释放。

### 3.3 围岩气压力的催化作用

围岩气储集层主要为细粒砂岩,吸附能力较弱,气体主要以游离形式储存于砂岩孔隙及裂隙中,并形成围岩气压力,该压力与围岩应力相互平衡。通过现场井下测试,围岩气压力为0.48~1.12 MPa,具有大量的气体压缩能。伴随的采掘活动的发生,围岩体发生了压力减弱(卸压),并出现了大量变形和



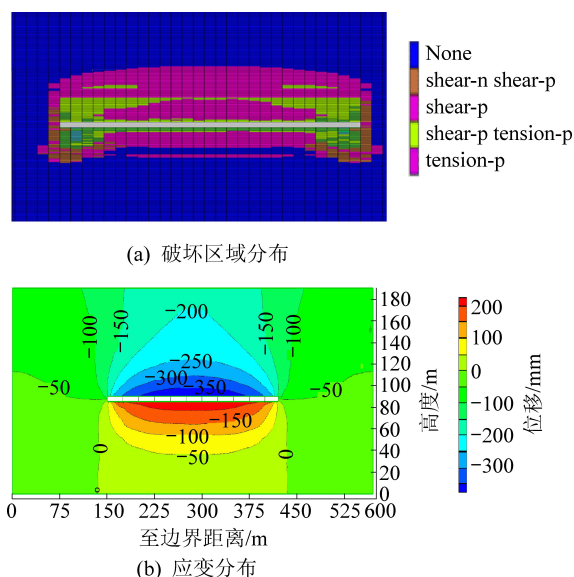


图9 应变变化和破坏区域分布

Fig. 9 Distribution of vertical strain and failure regional

裂隙发育,为围岩气压缩能量的释放提供了空间。而该围岩气膨胀又同时对围岩体做功,促进围岩体变形蓄积能量和气体运移裂隙的进一步扩大释放更多能量,导致围岩气异常涌出加大。鉴于围岩气压力能量释放的瞬时效应,一般在40 s以内完成,围岩气从储集层中脱离并涌出至采掘空间的过程可以近似看作绝热状态,利用热力学定理,推导出围岩气膨胀能 $W$ 的计算公式为:

$$W = \frac{M}{U} c_v T_2 \left[ \left( \frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] \quad (2)$$

式中: $M$ 、 $U$ 为油型气的质量和分子量; $c_v$ 为定容分子热容量; $n$ 为绝热指数; $p_0$ 、 $p_1$ 为油型气原始压力及卸压后压力; $T_2$ 为采掘工作面瓦斯的绝对温度。

由式(2)分析知围岩气膨胀能大小的主要因素为原始油型气压力和卸压后的油型气压力的比值 $p_0/p_1$ ,若 $p_0=p_1$ ,采掘活动的发生导致围岩储集层发生卸压现象, $p_0/p_1$ 将急剧增加,围岩气压缩能量大幅增多,促使围岩气膨胀能大量释放,进而形成围岩气大量异常涌出,导致研究区发生煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸、采掘面瓦斯超限等灾害的发生。

## 4 结 论

1) 黄陵矿区底板围岩气乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值均低于 $-2.88\%$ ,为典型的油型气;顶板围岩气与煤层气乙烷 $\delta^{13}\text{C}$ 值 $-3.72\% \sim -2.11\%$ ,表现为典型的煤成气与油型气混合气。

2) 利用黄陵矿区围岩气同位素值,结合Schoell关系判别图版分析,底板气为原油伴生型油型气,顶板及煤层气主要为陆源生物气与油型气的混合。

3) 通过油源对比,热演化模拟分析,认为黄陵矿区围岩气呈现来源于三叠系延长组烃源岩,在东北向基底断层作用下,运移至底板围岩;通过砂体运移通道,短距离运移至煤层及顶板围岩的成因机制。

4) 采掘扰动效应导致底板发生40 m范围作用的变形破坏带,打破围岩原始能量平衡状态,在围岩气压力作用下,加速诱导了蓄积能量的释放,导致围岩气大量异常涌出致使灾害的发生。

## 参考文献 (References):

- [1] 肖 晖,赵靖舟,王大兴,等.鄂尔多斯盆地奥陶系原生天然气地球化学特征及其对靖边气田气源的意义[J].石油与天然气地质,2013,34(5):601-609.  
XIAO Hui, ZHAO Jingzhou, WANG Daxing, et al. Geochemical characteristics of primary gas in the Ordovician and their significance for the gas source of Jingbian gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5):601-609.
- [2] 杨俊杰.鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M].北京:石油工业出版社,2002:104-163.
- [3] 赵龙军,谭成仟,刘池阳,等.鄂尔多斯盆地油、气、煤、铀富集特征分析[J].石油学报,2006,27(2):58-63.  
ZHAO Longjun, TAN Chengqian, LIU Chiyang, et al. Enrichment features of oil, gas, coal and uranium in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2):58-63.
- [4] 李相博,刘显阳,周世新,等.鄂尔多斯盆地延长组下组合油气来源及成藏模式[J].石油勘探与开发,2012,39(2):172-179.  
LI Xiangbo, LIU Xianyang, ZHOU Shixin, et al. Hydrocarbon origin and reservoir forming model of the lower Yanchang formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2):172-179.
- [5] 赵继展,张 群,郑凯歌,等.黄陵矿区煤矿井下围岩喷涌气体致灾机理及防治措施[J].天然气工业,2018,38(11):114-121.  
ZHAO Jizhan, ZHANG Qun, ZHENG Kaige, et al. Disaster-causing mechanism of surrounding rock gas flowing underground in the Huangling coal mine and prevention measures[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(11):114-121.
- [6] 唐恩贤.黄陵矿区煤层底板异常涌出气体成因类型[J].煤田地质与勘探,2015,43(6):8-11.  
TANG Enxian. Genetic type of abnormal gas emission from coal seam floor in Huangling mining area [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6):8-11.
- [7] 陈冬冬.煤油气共生矿井围岩气多因素耦合区域预测技术——以鄂尔多斯盆地黄陵矿区为例[J].煤田地质与勘探,2018,46(2):49-53.  
CHEN Dongdong. Prediction technology of surrounding rock gas zones by multiple factor coupling in coal mines with coal-oil-gas coexistence [J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(2):49-53.
- [8] 李长兴,魏国营,王 蔚,等.瓦斯地质规律法在煤层瓦斯含



- 量预测中的应用[J]. 煤矿安全, 2014, 42(12):145-148.
- LI Changxing, WEI Guoying, WANG Wei, *et al.* Application of gas-geology law method in prediction of coal seam gas content[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 42(12):145-148.
- [9] 马玉姣, 程根银, 赵东云. 神经网络技术在煤层瓦斯含量预测中的应用[J]. 煤炭工程, 2010(1):117-119.
- MA Yujiao, CHENG Genyin, ZHAO Dongyun. Application of neural net work technology to prediction of seam gas content[J]. Coal Engineering, 2010(1):117-119.
- [10] 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理[M]. 北京: 科学出版社, 2013:4-13.
- [11] 袁 亮, 薛 生. 煤层瓦斯含量法预测煤与瓦斯突出理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014:15-23.
- [12] 谢广祥, 殷志强, 胡祖祥, 等. 深井瓦斯煤层采动扩容致灾力学机理[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1):24-29.
- XIE Guangxiang, YIN Zhiqiang, HU Zuxiang, *et al.* Disaster-causing mechanical mechanism of coal mining dilatancy of gassy seam in deep mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1):24-29.
- [13] 陈敬轶, 贾会冲, 李永杰, 等. 鄂尔多斯盆地伊盟隆起上古生界天然气成因及气源[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2):205-209.
- CHEN Jingyi, JIA Huichong, LI Yongji, *et al.* Origin and source of natural gas in the upper Paleozoic of the Yimeng uplift, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2):205-209.
- [14] 曹晓宏, 倪志英. 鄂尔多斯盆地中生界天然气同位素特征及成因类型[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(5):617-621.
- CAO Xiaohong, NI Zhiying. Isotope characteristic and forming cause of nature gas in the Mesozoic of Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(5):617-621.
- [15] 陈安定. 陕甘宁盆地中部气田奥陶系天然气的成因及运移[J]. 石油学报, 1994, 15(2):1-10.
- CHEN Anding. Origin and migration of natural gas in Ordovician reservoir in Shaan-Gan-Ning Basin central gas filed [J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(2):1-10.
- [16] 戴金星, 李 剑, 罗 霞, 等. 鄂尔多斯盆地大气田的烷烃气碳同位素组成特征及其气源对比[J]. 石油学报, 2005, 26(1):18-26.
- DAI Jinxing, LI Jian, LUO Xia, *et al.* Alkane carbon isotopic composition and gas source in giant gas fields of Ordos Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1):18-26.
- [17] 陈世加, 马力宇, 付晓文, 等. 塔里木盆地海相腐泥型天然气的成因判识[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(4):416-421.
- CHEN Shijia, MA Liyu, FU Xiaowen, *et al.* Genetic discrimination of marine saprogenic type gas in Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4):416-421.
- [18] 张士亚. 鄂尔多斯盆地天然气气源及勘探方向[J]. 天然气工业, 1994, 14(3):1-4.
- ZHANG Shiya. Natural gas source and explorative direction in Ordos Basin [J]. Natural Gas Industry, 1994, 14(3):1-4.
- [19] 刚文哲, 高 岗, 郝石生, 等. 论乙烷碳同位素在天然气成因类型研究中的应用[J]. 石油实验地质, 1997, 19(2):164-167.
- GANG Wenzhe, GAO Gang, HAO Shisheng, *et al.* Carbon isotope of ethane applied in the analyses of genetic types of natural gas [J]. Experimental Petroleum Geology, 1997, 19(2):164-167.
- [20] SCHOELL M. Genetic characterization of natural gases [J]. AAPG Bulletin, 1983, 67(12):2225-2238.
- [21] 黄 方, 刘琼颖, 何丽娟. 晚喜山期以来四川盆地构造—热演化模拟[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11):3742-3753.
- HUANG Fang, LIU Qiongying, HE Lijuan. Tectono-thermal modeling of the Sichuan Basin since the late Himalayan period [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11):3742-3753.
- [22] 刘会虎, 胡宝林, 徐宏杰, 等. 淮南潘谢矿区二叠系泥页岩构造热演化特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(9):1696-1674.
- LIU Huihu, HU Baolin, XU Hongjie, *et al.* Tectono-thermal evolution characteristics of Permian mud shale in Panxie Mining Area of Huainan [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(9):1696-1704.
- [23] BARKER C E, PAWLEEICZ M J. The correlation of vitrinite reflectance with maximum temperature in hemic organic matter [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1986:79-93.
- [24] 郭建强, 刘新荣, 王军保, 等. 基于弹性应变能的岩石强度准则[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2):129-136.
- GUO Jinqiang, LIU Xinrong, WANG Junbao, *et al.* Strength criterion of rock based on elastic strain energy [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2):129-136.
- [25] 谢和平, 彭瑞东, 鞠 杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15):2603-2608.
- XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, *et al.* On energy analysis of rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15):2603-2608.