

煤田火区发展演化的多场耦合作用过程

马砾^{1,2}, 刘庚^{2,3}, 肖旻^{1,2,3}, 鲁军辉^{2,3}, 何勇军^{2,3}

1. 西安科技大学西部煤矿安全教育部工程研究中心, 西安 710054
2. 西安科技大学能源学院, 西安科技大学西部矿井开采及灾害防治教育部重点实验室, 西安 710054
3. 西安科技大学能源学院, 西安 710054

摘要 针对煤田火区发展演化多场耦合作用过程, 分析了热-流-固耦合机理及不同时期煤体燃烧状态及产物。揭示了煤田火区发展演化是由煤氧复合化学反应而放热升温, 产生热应力及烧空区致使上覆岩层失稳塌陷, 形成煤岩体裂隙网络产生裂隙场, 从而为氧气及燃烧产物对流循环提供通道, 进一步促使火区向深部扩展延伸的灾变机理。因此, 煤田火区温度场、裂隙应力场、渗流场及化学场之间的耦合作用是加速煤体燃烧的非线性动力循环过程。

关键词 煤田火区; 发展演化; 多场耦合; 非控燃烧

煤田火灾是指在自然或人为因素影响下, 由初始露头燃烧引起煤层由浅部向深部不断发展, 严重污染环境和威胁生产安全的大面积火灾。据统计中国现有 200 多个煤田火区, 总面积达 720 km², 正在燃烧的面积为 17~20 km², 其中新疆煤田火区系世界最大的煤田火区^[1]。美国、澳大利亚、印度、塔吉克斯坦等许多国家也同样存在着严重的煤田火灾问题^[2,3]。

煤田火区是由高温火源点演变形成的, 主要是煤蓄热过程的温度场、煤岩体裂隙变化的应力场、由空气动力学及燃烧气体产物形成的渗流场以及煤氧复合燃烧过程的化学场共同耦合作用的结果^[4]。煤岩体多孔介质特性及其所处的环境, 影响着高温点产生及气体的运移。因此, 研究煤田火灾发展演化过程, 掌握其发展演化规律, 是煤田火区研究的重要问题。本文拟通过分析煤田火区发展演化过程的温度场、裂隙场、热动力引起的气体渗流与热量传递流场及化学反应场之间的作用机理, 将现有的热-流-固耦合模型与不同时期煤体燃烧状态方程的化学反应速率模型联立建立四场耦合模型, 以为预测不同时期煤田火区燃烧速率及燃烧进程提供依据。

1 煤田火区发展演化过程的多场耦合作用机理

煤田火区煤岩体作为流体、热量传输的直接载体, 可简化为由基质煤岩块和裂隙组成的裂隙介质模型^[5]。火区中心温度高达 1000℃ 以上^[6], 热量以传导的方式向周围煤岩体释

放。煤体受热产生热解气或瓦斯, 岩体受热破裂形成裂隙, 为空气及热解气体提供通道, 进一步促使烧空区向前发展, 导致上覆岩体由于断裂及失重而塌陷。构成了一个完整的热-流-固-化耦合作用过程^[7], 如图 1 所示。

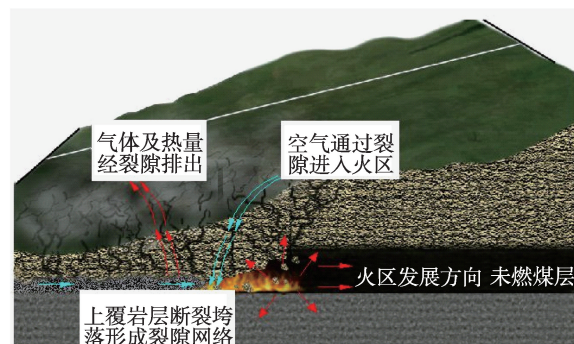


图 1 煤田火区发展演化过程

Fig. 1 Process of coalfield fire area development and evolution

1.1 热-固耦合

火区内部煤岩体由于高温作用而膨胀变形, 最终破坏产生裂隙; 煤岩体内固有结构及特性参数的不同又导致其温度场分布不均, 从而构成了完整的热固耦合问题。将热传导、固体弹性力学及耦合方程的定解条件全部给出就构成了热

收稿日期: 2015-04-13; 修回日期: 2015-07-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134019); 国家自然科学基金青年项目(51204135, 51204136)

作者简介: 马砾, 副教授, 研究方向为矿山重大灾害及其防治、安全技术及工程, 电子信箱: malifuture@126.com

引用格式: 马砾, 刘庚, 肖旻, 等. 煤田火区发展演化的多场耦合作用过程[J]. 科技导报, 2016, 34(2): 190-194; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.2.031

固耦合完整数学模型。

Wessling等^[3]针对煤田火区地表温度场异常变化现象,解释了煤体燃烧热固耦合机理,并进行了数值模拟分析。Drebenstedt等^[8]建立了煤田火区传播的数学模型,对煤田火区上覆岩层的破断和裂隙进行了分析和研究,研究表明上覆岩层断裂的大裂隙为火区直接供氧通道,火风压的作用导致了微裂隙的贯通;Elick^[9]研究了美国宾夕法尼亚煤火导致的地表下沉而形成的大量裂隙。Heffern和Coates^[10]研究了美国粉河盆地(Powder River basin)的煤火燃烧地质历史,并演示了燃烧后形成众多的裂隙。Rosema等^[11]通过对煤氧化导致自燃过程的研究,建立并求解了煤自燃动力学模型。

1.2 热-流耦合

火区内部的热流关系较其他工程问题有所不同,由于空气通过裂隙或通道的流入,煤氧复合产热升温,同时由热动力产物气体外渗与空气对流循环换热。高温点到地表之间的温度梯度与气体渗流风压构成了耦合问题。

曾强等^[12,13]根据火区裂隙、温度及烟气流动特性,建立了描述烟气流动特性的模型,并提出了单元火区单位时间耗氧量的计算方法。通过对火区火风压物理过程的分析,提出了主要由温差形成的密度差导致对流的火风压理论。李唐山等^[14]对火风压影响因素进行了分析,认为自燃点深度、煤层赋存倾角、渗透率、地形和风速等因素均对火风压有一定影响。王海燕等^[15]建立露头自燃渗流-热动力耦合模型,对新疆某煤田火区进行了数值模拟。

1.3 热-流-固耦合

基于上述耦合方程的逐步完善与解决,工程上需要更贴近实际的模型。流体的对流传热、煤岩体的应力应变与流体的传导传热、流体沿孔隙裂隙的渗流构成了热流固耦合问题。随之应运而生的热-流-固耦合模型,结合数值模拟手段为揭示煤火发展演化机理提供了新途径。

张春阳等^[16]结合流固耦合基本原理,建立了流固耦合模型,研究了渗流对围岩应力场、围岩变形及开挖卸载的影响。Nowak等^[17]针对地下工程热-流-固耦合过程进行了数值模拟,提出了解决耦合非线性有限元方案初边值问题的新方法。Shaik等^[18]根据热-流-固耦合理论,利用流体介质(水)在天然地表裂隙流动提取置换地下热量,给出了估算热量置换模型。Zhu等^[19],Zhang等^[20]建立热-流-固模型,得出了应力、温度、气体解吸影响下煤体渗透率的变化规律。Xia等^[21]利用热-流-固全耦合理论研究地下煤层煤氧复合引发自燃的多孔介质应力场、氧浓度场及导热规律,并针对实际煤层进行了数值模拟。

2 煤田火区发展演化过程的THMC耦合模型

近年来,热-流-固-化(thermal hydrological mechanical chemical, THMC)耦合作用模型与仿真技术成为了研究工程力学与设计的新课题,广泛应用于深层复杂地质条件下的资源开采^[22,23]。Taron等^[24]针对地热化学形成的化学场,提出了

岩体多孔介质的热-流-固-化多场耦合模拟方法。王永岩等^[25]以深部软岩内部流体pH值为参数提出化学场的概念,数值模拟研究表明岩体内部化学腐蚀直接影响其应力变化,且比温度场影响更大。康志勤等^[26]以不同阶段油页岩化学反应放出的热量为参数提出了化学场,并建立了热-流-固-化耦合模型。

2.1 煤田火区THM耦合数学模型

针对煤田火区煤岩体及其裂隙渗流与温度场,国内外学者结合工程实际提出了基于热-流-固耦合的控制方程^[18,19,27-29]。煤岩块简化为连续介质模型及热弹性体;煤岩体裂隙作为裂隙介质模型,变形服从节理单元模型,渗流服从Darcy定律;基质煤岩块遵循热弹性本构规律;煤岩体中热量通过传导、对流和辐射3种方式传递,通常忽略辐射与对流传热,热传导满足傅里叶定律。方程包括:基质煤岩块及裂隙温度场控制方程、裂隙气体渗流控制方程与煤岩体变形方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho c_{vw} T_w)}{\partial t} = \lambda_w \nabla^2 T_w - (\rho c_{pw} T_w K_i p_{,i})_i + Q(x, y) \\ K_i \frac{\partial^2 p}{\partial x_i^2} = p \frac{\partial n}{\partial t} + n \frac{\partial p}{\partial t} + I_s \\ (\mu(\sigma, \eta) + \nu(\sigma, \eta)) u_{i,jj} + \nu(\sigma, \eta) u_{i,jj} + F_i + (\alpha \sigma)_{,i} = 0 \\ \sigma'_n = k_n \varepsilon_n; \sigma'_s = k_s \varepsilon_s \end{array} \right\} \Leftrightarrow (THM) \quad (1)$$

式中, K_i 为渗透系数,m/s; p 为流体压力,Pa; n 为孔隙率; ρ 为流体密度, kg/m^3 ; c_w 和 c_{pw} 为比定容和比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_w 为流体温度, $^{\circ}\text{C}$; λ_w 为热传导系数, $\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$; I_s 表示固体煤与氧化反应生成气体的物质的量,mol; $Q(x, y)$ 表示氧化反应产生的新的热量,J; μ 为拉梅常数,Pa; ν 为泊松比; μ, ν 是应力 σ 和黏滞系数 η 的函数,有效应力改变反映在 $(\alpha \sigma)_{,i}$, α 为有效应力系数; u 为位移,m; F_i 为外力; σ'_n 和 σ'_s 分别为裂隙的法向和切向有效应力,Pa; k_n 和 k_s 分别为裂隙法向和切向刚度; ε_n 和 ε_s 分别为裂隙法向和切向变形。

2.2 化学场控制方程

上述热-流-固耦合控制方程,包括了化学反应产物气体形成的渗流源汇项。然而,煤层的自加热过程是一个与氧进行非均相的表面反应,从常温至自燃需经历多级化学反应^[30]。不同阶段的反应所放出的热量与反应速率有较大差别,而热量的蓄积与煤岩体温度场有直接相关性,从而形成了反应速率 R 与温度 T 之间的耦合关系。煤体燃烧分为3个阶段^[31]:1)热解,释放出挥发物,煤粒碳化;2)气态烃类着火和燃烧;3)残余固体粒子本身被点燃和燃烧。各阶段都有其化学反应速率 R ,满足化学反应动力学阿仑尼乌斯(Arrhenius)准则^[32]。结合煤田火区实际,以化学反应速率为耦合变量提出煤岩体化学反应速率控制方程:

$$R_{fu} = A_0 P^a m_{fu}^b m_{ox}^c \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, R_{fu} 为化学反应速率, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$,即煤田火区煤岩体燃烧速率; m_{fu} 、 m_{ox} 分别为不同温度下煤热解产生的可燃性气体与

空气的混合气中可燃性气体与氧的质量浓度, kg/m^3 ; A_0 为指数前因子; E 为表观活化能, a, b, c 分别为指数因子; R 为摩尔气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K 。式中 A_0, a, b, c 和 E 都是实验数据。 E/R 值随煤岩体热解气体与氧气的混合体的当量比和温度而变, 此时化学反应速率由温度控制方程中 T_u 与渗流控制方程中流速决定, 化学反应前后能量守恒。

对于煤田火区内部燃烧过程的富燃料燃烧, 则有 m_{fu} 和 m_{ox} 随反应度 ξ 的变化规律:

$$\begin{aligned} m_{fu} &= m_{fu,u} - \xi(m_{fu,u} - m_{fu,b}) \\ m_{ox} &= m_{ox,u} - \xi m_{ox,u} \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $m_{fu,u}$ 和 $m_{fu,b}$ 分别为初始状态和任一时刻的可燃性气体质量浓度, kg/m^3 ; $m_{ox,u}$ 和 $m_{ox,b}$ 分别为初始状态和任一时刻的氧质量浓度, kg/m^3 。反应度表示在反应过程中温度升高的程度或者煤岩体烧去多少, 在煤田火区煤岩体燃烧过程中, 为简化计算 ξ 取 0.2~0.8, 取 0 时表示反应尚未开始, 取 1 时燃烧结束。

根据火区化学场控制方程及热流固耦合方程, 将式(1)、式(2)联立可建立热-流-固-化耦合模型。研究煤岩体在燃烧过程中的温度场分布、流体渗透及扩散规律、煤岩体及周围岩体应力分布及化学反应燃烧速率, 需初始温度 T 、不同阶段反应活化能 E 、气体压力 P 及煤岩体基本物理参数, 求出不同时刻不同状态下的煤岩体燃烧速率及火区发展进程。

3 热-流-固-化耦合作用过程

煤田火区的发展演化是一个极其复杂、动态演变的物理化学场作用过程。起初, 因采肥弃瘦的薄煤层或露头煤层, 在漏风供氧的条件下发生物理及化学吸附放出热量。随着热量堆积, 煤氧化学反应进一步蓄热升温, 在煤体内部形成单元温度场。由于热应力作用, 作为双隙结构的煤体受热膨胀变形, 单元应力场发生改变产生微裂隙, 进而为氧的扩散提供通道, 煤氧化学反应加剧, 高温点增多, 煤层逐渐进入贫氧阴燃阶段。煤体发生化学反应后强度减小, 使岩体失稳而剪切破坏裂隙贯通, 为产物气体及空气提供了对流通路。由于中心火源点及外界的温度差, 内部气体及外界空气的密度差形成了热力风压的渗流场, 促使空气大量流入火区, 加速

煤氧化学反应。进而煤层燃烧由浅部向深部延伸, 上覆岩层由于失稳塌陷而形成大面积裂隙网络为气体提供通道, 加速火区发展。此时, 由于煤氧化学反应的化学场而蓄热升温形成的温度场, 对煤岩体应力场产生热破坏, 进一步形成了气体渗流场。全过程都伴随着不同阶段的化学反应。因此, 化学场的反应速率作为主导因素影响其他场的相互作用, 构成了 THMC 全耦合循环系统。图 2 解释了热-流-固-化耦合作用机制。

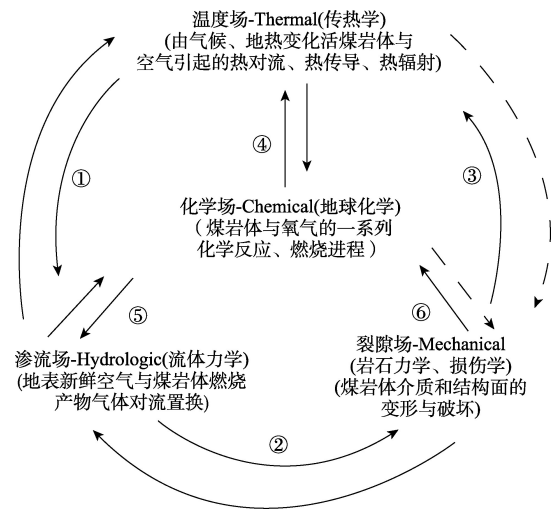


图 2 煤田火区发展演化过程 THMC 耦合作用机制

Fig. 2 THMC coupling mechanism of coal fire area development and evolution

煤体从自热升温至燃烧, 整个过程的燃烧速度是一个随时间的变量。其主要影响因素为煤氧复合反应速率。而反应速率在 dt 时间内为一定量。不同阶段的反应速率直接影响煤体的放热速率及温度场 T 变化, 从而改变煤岩体应力 σ 、应变 ϵ 及刚度 k , 进而改变渗透系数 K 。而煤岩体高温下热固耦合及化固耦合为单向弱耦合, 热化、热流及流化为双向强耦合。具体表征参数分析如表 1 所示, 进一步分析了图 2 耦合作用机制的作用关系。

表 1 煤田火区 THMC 耦合作用关系及特征参数

Table 1 Characteristic parameters and relationship of THMC coupling for coalfield fire area

序号	耦合场	耦合变量	边界/域耦合	双向/单向耦合	耦合关系
1	温度场 ↔ 渗流场	温度/流速	域	双向	热传导与对流/气体弹性
2	渗流场 ↔ 裂隙场	流速/应力	域	双向	气体压力作用/改变裂隙宽度
3	温度场 → 裂隙场	温度	域	单向	力学能量转换/热应力
4	化学场 ↔ 温度场	反应速率/温度	域	双向	反应放热/改变反应产物、速率
5	化学场 ↔ 渗流场	反应速率/流速	域	双向	固流转换/改变反应物及产物
6	化学场 → 裂隙场	反应速率	域	单向	燃烧相变引起失重断裂

4 结论

对煤田火区发展演化过程的研究,是认识煤田火实质及研究其防控技术的重要前提。本文从多场耦合角度系统分析了煤田火区发展演化过程。

1) 揭示了煤田火区发展演化过程中涉及的煤氧复合化学场、由反应放热升温的温度场、因热应力使煤岩体变形的应力场以及通过裂隙对流的气体渗流场之间的作用机理。

2) 在热-流-固耦合模型的基础上,建立了以化学反应速率为参数的化学场控制方程,分析了更接近工程实际的热-流-固-化全耦合机理及其表征参数,为建立耦合模型提供依据。

3) 煤田火区发展演化是一个缓慢持续的过程,其影响因素多变。使得火区燃烧过程的边界条件及控制因素难以确定。因此,需深入系统研究煤田火区传热传质及燃烧特性,确立不同阶段的燃烧反应速率,建立热-流-固-化耦合模型,为防控煤田火区发展提供依据。

参考文献(References)

- [1] 邓军, 文虎, 张辛亥, 等. 煤田火灾防治理论与技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2014.
Deng Jun, Wen Hu, Zhang Xinhai, et al. Theory and technology of coalfield fire prevention and control[M]. China University of Mining and Technology Press, 2014.
- [2] Taron J, Isworth D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(5): 855-864.
- [3] Wessling S, Kuenzer C, Kessels W, et al. Numerical modeling for analyzing thermal surface anomalies induced by underground coal fires [J]. International Journal of Coal Geology, 2008, 74(3-4): 175-184.
- [4] Wessling S, Kessels W, Schmidt M, et al. Investigating dynamic underground coal fires by means of numerical simulation[J]. Geophysical Journal International, 2008, 172(1): 439-454.
- [5] 蔡强, 牛丛丛, 刘曰武, 等. 煤层中双重孔隙介质渗流理论的应用[J]. 科技导报, 2012, 30(24): 17-22.
Cai Qiang, Niu Congcong, Liu Yuwu, et al. Theory of dual-porosity media in coal bed methane and its application[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(24): 17-22.
- [6] 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(1-2): 7-17.
- [7] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Zhao Yangsheng. Multiple field coupling action of the porous medium and its engineering response[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [8] Drebenstedt C, Gusat D, Wang C. Numerical modelling of surface impact of coal fires on coal fire areas[C]//Latest Developments in Coal Fire Research- Bridging the Science, Economics, and Politics of a Global Disaster. Proceeding of Second International Conference on Coal Fire Research. Berlin, Germany: TU Bergakademie Freiberg Press, 2010: 244-248.
- [9] Elick J M. The effect of abundant precipitation on coal fire subsidence and its implications in Centralia, PA[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 105: 110-119.
- [10] Heffern E L, Coates D A. Geologic history of natural clay-bed fires, powder river basin, USA[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 59(1-2): 25-27.
- [11] Rosem A, Guan H, Veld H. Simulation of spontaneous combustion to study the causes of coal result in the Ru jigou Basin[J]. Fuel, 2001, 80 (1): 7-16.
- [12] 曾强. 新疆煤田火灾烟气流动与传热特性的研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 792-796.
Zeng Qiang. Study on the regularity of gas/smoke flow and the characteristics of heat-transfer with spontaneous combustion in Xinjiang coalfield[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 792-796.
- [13] 曾强, 常心坦. 新疆煤田火区火风压模式研究及其应用[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 955-958.
Zeng Qiang, Chang Xintan. Study on the model of fire-heating airflow and its application to Xinjiang coal-field fires[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 955-958.
- [14] 李唐山, 周心权, 谷红军. 煤田露头自燃火风压数值的理论分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 737-740.
Li Tangshan, Zhou Xinquan, Gu Hongjun. Theoretical analysis of numerical value of the spontaneous combustion fire-heating air pressure for coalfield outcrop[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 737-740.
- [15] 王海燕, 周心权, 张红军, 等. 煤田露头自燃的渗流-热动力耦合模型及应用[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(2): 152-157.
Wang Haiyan, Zhou Xinquan, Zhang Hongjun, et al. Seepage-thermal dynamical coupling model for spontaneous combustion of coalfield outcrop and its application[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(2): 152-157.
- [16] 张春阳, 曹平, 靳瑾, 等. 金川矿区深部巷道围岩流固耦合稳定性数值模拟[J]. 科技导报, 2013, 31(33): 31-36.
Zhang Chunyang, Cao Ping, Jin Jin, et al. Numerical simulation of fluid-structure interaction stability for Jinchuan Deep Roadway[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(33): 31-36.
- [17] Nowak T, Kunz H, Dixon D, et al. Coupled 3-D thermo-hydro-mechanical analysis of geotechnological in situ tests[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2011(48): 1-15.
- [18] Shaik A R, Rahman S S, Tran N H, et al. Numerical simulation of Fluid-Rock coupling heat transfer in naturally fractured geothermal system[J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31: 1600-1606.
- [19] Zhu W C, Wei C H, Liu J, et al. A model of coal gas interaction under variable temperatures[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2-3): 213-221.
- [20] Zhang Hongbin, Liu Jishan, Elsworth D. How sorption-induced matrix deformation affects gas flow in coal seams: A new FE model[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45 (8): 1226-1236.
- [21] Xia Tongqiang, Zhou Fubao, Liu Jishan, et al. A fully coupled hydro-thermo-mechanical model for the spontaneous combustion of underground coal seams[J]. Fuel, 2014(125): 106-115.

- [22] 周创兵, 陈益峰, 姜清辉, 等. 论岩体多场广义耦合及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1329-1340.
Zhou Chuangbing, Chen Yifeng, Jiang Qinghui, et al. On generalized multi-field coupling for fractured rock masses and its applications to rock engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1329-1340.
- [23] 赵阳升, 杨栋, 冯增朝, 等. 多孔介质多场耦合作用理论及其在资源与能源工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1321-1328.
Zhao Yangsheng, Yang Dong, Feng Zengchao, et al. Multi-field coupling theory of porous media and its applications to resources and energy engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1321-1328.
- [24] Taron Joshua, Isworth D. Thermal-hydrologic-mechanical-chemical processes in the evolution of engineered geothermal reservoirs[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(5): 855-864.
- [25] 王永岩, 王艳春. 温度-应力-化学三场耦合作用下深部软岩巷道蠕变规律数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 275-279.
Wang Yongyan, Wang Yanchun. Numerical simulation of creep law in deep soft rock tunnel under thermal-mechanical-chemical coupling effect[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 275-279.
- [26] 康志勤, 吕兆兴, 杨栋, 等. 油页岩原位注蒸汽开发的固-流-热-化学耦合数学模型研究[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2008, 23(4): 30-34.
Kang Zhiqin, Lü Zhaoxing, Yang Dong, et al. The solid-fluid-thermal-chemistry coupling mathematical model for oil shale in-situ steam injecting development[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2008, 23(4): 30-34.
- [27] 何学秋, 王恩元, 魏建平, 等. 煤岩电磁辐射的力-电耦合模型[J]. 科技导报, 2007, 25(17): 46-51.
He Xueqiu, Wang Enyuan, Wei Jianping, et al. The mechanical-electrical coupling model for EME of coal or rock[J]. Science & Technology Review, 2007, 25(17): 46-51.
- [28] Yang Dong, Zhao Yangsheng, Hu Yaoqing. The constitute law of gas seepage in rock fractures undergoing three-dimensional stress[J]. Transport in Porous Media, 2006, 63(3): 463-472.
- [29] Xia Tongqiang, Zhou Fubao, Liu Jishan, et al. A fully coupled coal deformation and compositional flow model for the control of the pre-mining coal seam gas extraction[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014, 72: 138-148.
- [30] Ide T S, Pollard D, Franklin M, et al. Fissure formation and subsurface subsidence in a coalbed fire[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(1): 81-93.
- [31] Liu Quanrun, Hu Haoyun, Zhou Qiang, et al. Effect of inorganic matter on reactivity and kinetics of coal pyrolysis[J]. Fuel, 2004, 83(6): 713-725.
- [32] Cai Junmeng, He Fang, Yi Weiming, et al. A new formula approximating the Arrhenius integral to Perform the noniso thermal kinetics[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 124(1-3): 15-18.

Research on multi-field coupling process of coalfield fire area development and evolution

MA Li^{1,2}, LIU Geng^{2,3}, XIAO Yang^{1,2,3}, LU Junhui^{2,3}, HE Yongjun^{2,3}

1. Engineering Research Center of West-China Coal Mine Safety, Ministry of Education; Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
2. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education; College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China
3. College of Energy Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China

Abstract Aiming at the multi-field coupling process of coalfield fire area development and evolution, this paper analyzes the thermal-hydrological-mechanical coupling mechanism and states together with products of coal combustion in different periods. This paper also reveals the disaster mechanism of development and evolution of coalfield fire area as a series of activities: Heat releasing originated from coal oxygen complex chemical reactions and overlying strata collapse made by burn out area, followed by the fracture network formed by cracks in coal and rock mass, which provide circulation channel for oxygen and combustion products, ultimately the expansion of the fire disaster mechanism extending to the deep. Thus, the coupling of the coal fire thermal hydrological mechanical and chemical field is an accelerating nonlinear dynamic cycle process of coal combustion. The results provide a scientific basis for the prevention and control of coalfield fire.

Keywords coalfield fire area; development and evolution; multi-field coupling; uncontrolled burning

(责任编辑 王媛媛)