

# 深井采空区煤自燃多场耦合作用及致灾机理探讨

蒋云霞<sup>1</sup>, 符琦<sup>2</sup>, 牛会永<sup>3\*</sup>

(1. 湖南科技大学 期刊社, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 计算机科学与工程学院, 湖南 湘潭 411201;  
3. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 基于深井煤矿开采高应力、高地温的特点, 分析了深部采动裂隙演化及破断规律, 采空区遗煤自燃机理, 煤自燃数值模拟研究的相关成果, 探讨了深井采空区煤自燃多场耦合作用的进一步研究方向, 为煤自燃机理理论的完善提供了理论研究参考。

**关键词:** 矿井防灭火; 煤自燃; 自然发火; 自燃机理; 自燃预测

**中图分类号:** TD752      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2018)04-0040-05

## Study on Multi-field Coupling and Disaster Mechanism of Coal Spontaneous Combustion in Goaf of the Deep Coal Mine

Jiang Yunxia<sup>1</sup>, Fu Qi<sup>2</sup>, Niu Huiyong<sup>3</sup>

(1. Periodical Press of Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** Based on the characteristics of high stress and high ground temperature in the deep coal mine, the evolution and breaking rules of deep mining-induced fractures, the spontaneous combustion mechanism of residual coal in goaf, and the related research results of numerical simulation of coal spontaneous combustion are analyzed, and the further research direction of multi-field coupling of coal spontaneous combustion in goaf of deep well is discussed, which provides theoretical research reference for the improvement of coal spontaneous combustion mechanism theory.

**Keywords:** mine fire prevention and fire extinguishing; coal spontaneous combustion; spontaneous combustion; spontaneous combustion mechanism; spontaneous combustion prediction

煤矿自燃火灾是煤矿重大灾害之一, 可能会引起瓦斯和煤尘爆炸等重大事故<sup>[1]</sup>。目前, 我国煤层资源中有90%以上为(易)自燃煤层, 矿井火灾的85%~90%皆由煤炭自燃引发, 其中煤矿内火灾约60%以上为采空区自燃火灾。由此可见, 煤炭的自燃现象直接影响着各大中型煤矿的安全生产, 给煤矿企业埋下了重大隐患。与此同时, 随着浅部煤炭资源的逐渐减少甚至枯竭, 矿产资源开采已逐步进入1 000~2 000 m以深水平。越来越多的矿井将面临严峻的深部开采问题, “深部开采”将成为常态。

随开采深度的增加, 导致高地温、高地应力、高渗透压等“三高”现象突发, 从而诱发突水、地压冲击、瓦斯与煤突出等灾害<sup>[2,3]</sup>。面对1 000~2 000 m以深的深部资源, 有必要重新考量传统基于浅部及中等深

度煤层资源开发相关理论是否仍适应深部开采新特性的需求.与传统浅部开采相比,深部开采虽能有效提高采矿成本,但随着开采深度的增加和开采环境的变化,也给深层煤矿开采的生产、安全均带来了极大的挑战和新问题,如由温度高、矿压大及湿度大等潜伏的地质灾害导致的岩爆、突水和冲击地压等新问题.

用浅部开采条件下的规律来分析处理深部问题,蕴含着极大的风险.达到深部开采后,高地压以及高原始地温使得煤炭自然发火问题将较浅部更为严重,容易触发矿井火灾、瓦斯爆炸等继发性事故的发生.有鉴于此,结合煤矿深部开采高地应力、高地温的特性,深入研究应力场、渗流场以及温度场等多物理场耦合作用下,深井采空区煤自燃氧化特性及其致灾机理,具有重要的研究意义.

## 1 深部采动裂隙演化及其破断规律的研究

煤层开采导致了围岩的原始应力失衡与重新分布,并引发围岩的变形破坏,致使岩层形成采动裂隙.为了更好地研究这种现象导致的破断规律,国内外学者通过力学分析、物理相似实验等方法,对煤层采动后的覆岩移动、裂隙扩展和形态分布等规律及其特征进行了深入分析,如早期有国外的 Palchik V 等人<sup>[4,5]</sup>把上覆岩层分为垮落带、连续变形带和裂隙带3个不同的移动带.张金才<sup>[6]</sup>结合煤层现场实测和物理相似模拟实验结果,对比分析了工作面底板和永久煤柱下的底板在回采前后的变形规律.刘天泉<sup>[7]</sup>通过对采动对底板、顶板及煤层自身的影响规律的现场实测和理论分析,提出竖三带与横三区概念.姜岩<sup>[8]</sup>对上覆岩层中出现离层裂隙的原因及分布规律进行了分析,针对沉陷问题提出了离层空间体积的相关计算方法.钱鸣高院士<sup>[9]</sup>等人在分析关键层对覆岩裂隙生成和演变的影响规律后,发现了裂隙的演化规律,以及“O”形圈的分布特征,提出了绿色开采的核心内容.涂敏等<sup>[10]</sup>基于潘谢矿区煤层的实际情况,研究了不同采高情况下覆岩移动、裂隙演化的规律特征,以及离层裂隙带分布特征,从而建立了相关力学模型.

张春等人<sup>[11,12]</sup>通过分析采空区应力的变化规律、分布特点及其对采空区破碎岩石碎胀系数的影响,获得了采空区应力与破碎岩石碎胀系数的关系及其系数变化的影响相关规律,并得出了应力场在改变采空区内各处渗透的系数时对采空区内的“三带”划分、煤炭自燃位置和流场等的影响情况.国内学者马占国等研究了煤矿采空区破碎岩石的空隙分布、渗透特性以及碎胀系数的变化.缪协兴等<sup>[13]</sup>利用 MT815 系列岩石力学试验系统进行了破碎岩体渗透特性的试验测试,并且得到了不同岩性以及不同应力状态下破碎岩体的渗透性变化规律.李顺才<sup>[14]</sup>基于破碎岩石渗透仪与 MT815.02 型岩石力学实验系统,采用轴向位移控制法,对不同粒径的煤矸石、破碎灰岩随孔隙率变化的渗透规律进行了研究.

## 2 采空区遗煤自燃机理

煤自燃机理研究的学说主要包括细菌导因、黄铁矿导因、煤氧复合、酸基导因等学说,而煤氧复合作用理论则是公认的学说.为此,许多学者建立了与煤自燃相关的各种数学模型,并通过煤自燃过程的数值模拟对数据模型进行了各种验证与完善,如徐精彩、文虎等<sup>[15-17]</sup>推导出了引起采空区煤自燃的极限参数的方法,并简化了巷道煤层自燃的物理模型,提出了与巷道煤层相关的二维自燃危险性预测模型;徐精彩等<sup>[18]</sup>建立了采空区的温度场,分析了时间与温度分布的相关性,推算出温度的分布和工作面推进速度之间的关系,从而建立了温度分布随时间变化的动态数学模型;余明高等<sup>[19]</sup>从升温吸热平衡和煤氧化放热之间关系出发,对已有的煤层最短发火期的计算模型进行了修正与完善.

地温与煤自燃特性影响研究相对较少,如文虎、郭兴明、徐精彩等<sup>[20-22]</sup>通过对比分析煤体氧化的放热性、自燃的蓄热条件和供氧条件,以及它们与地温的关系,推导了煤温与耗氧速度、放热强度之间的关系式、热风压和升温必要条件的表达式.理论分析与实验结果表明,地温的升高在增强煤体自身的氧化放热性能的同时,煤体的自燃危险性也随之增强.在不改变其他实验条件的情况下,耗氧速度和煤体放热强度将随地温的增加而近似呈指数递增.与此同时,地温的增加也将增强漏风动力中的热风压动力,促进了煤自燃供氧条件;J.Sargeant 等<sup>[23]</sup>基于新南威尔士州的煤绝热氧化相关测试数据,研究了不同变质程度的煤起始氧化温度对自然发火期的影响,结果表明,不同种类的煤受起始氧化温度变化的影响程度不同,其中,25℃和40℃的起始氧化温度对自然发火期有明显的影响.

水分对煤自燃的影响是一个较为复杂的重要因素.国内外学者均对其影响进行了大量相关研究,如 King 等<sup>[24]</sup>认为,水在煤氧的复合反应过程中,能够快速催化过氧络合物的生成;Saurabh 等人则发现水在抑制煤体氧化的同时,其冷凝释放气化潜热现象也在促进着煤体氧化;Kurose<sup>[25]</sup>从水分对煤颗粒燃烧特性影响的实验中,得出煤颗粒的燃烧温度会随水分的增加而降低的结论;Clemens 等人分析了煤层湿度对煤自热过程的影响情况,分析表明湿度能极大促进煤氧化,导致热效应的增强;Beamish<sup>[26]</sup>等人的实验数据表明,超过临界含水量时,煤体自热将随着水分的增加而被延迟;何启林和李超等人分别研究了煤的含水量对煤的放热量与吸氧量的影响,以及不同氧浓度下的水蒸气对煤粉的燃烧特性的影响情况;王继仁等探索了煤在氧化自燃的过程中对不同温度下的气体产物和水的产生机理的影响问题;姜德义等人则对煤体湿度与煤自燃的倾向性影响情况进行了分析,分析数据表明一定程度下的煤体湿度能延迟煤体的自热;梁晓瑜等在分析了水分在煤炭的自燃初始阶段的催化作用,以及对煤炭自燃的抑制作用基础上,讨论水分在煤炭的自燃过程中的物理与化学机理;刘文永等人对不同的含水量煤样的气体产生率、放热强度及耗氧速率等变化规律进行研究.

### 3 煤自燃数值模拟

有关煤自燃数值模拟方面,国内外专家学者进行了许多研究<sup>[27-32]</sup>,如 J. Bruining 等为了研究火区形成过程,分析并建立了有效的二维煤田火灾流场与温度场模型;Wessling 等利用数值模拟对采空区的浮煤自然发火过程进行模拟实验,并对采空区的自燃环境条件进行了分析;李光亮等利用传统三维可视化建模技术,构建了火灾三维模型;王继仁和邓存宝等从微观角度研究了煤表面与氧的物理吸附及化学吸附机理、煤的分子结构,并建立了煤微观结构与组分量质差异的自燃理论;吴晓光等则利用 ANSYS 软件进行数据求解,从而研究煤自燃的温度场相关规律;文虎等通过对煤自燃过程进行了数值模拟实验,提出了综放面采空区和巷道自然发火相关预测理论;卢山等则建立了与煤堆自燃过程相关的二维非稳态数学模型,有效地应用于煤堆自燃的数值模拟实验;这些浅部煤自燃理论的研究能否适应深部的煤自燃理论有待于进一步的研究.

### 4 多场耦合作用及致灾机理

上述研究成果表明,相关学者对煤自燃的主要影响因素、发火期预测、自燃危险性判定、实验及数值计算等方面进行了深入研究,其成果对煤炭自燃火灾的有效预测和及时防治起到巨大作用.然而,随着浅部煤层资源的逐渐枯竭,我国即将进入深部煤层开采阶段,为此我们将遇到各类深部灾害问题,特别是动力灾害显著,与其相关的产生机理仍未有完整的理论支撑,并且技术方法也难以精确地预测和防治动力灾害.因此,根据深井开采环境的特殊性及其复杂多变性,研究多场耦合作用下,深部采空区煤自燃机制及其发展过程就显得尤为重要.

为此,作者提出了一个如图 1 所示具有一定可行性的研究框架,此框架提出可从以下几个方面深入开展深井采空区煤自然多场耦合作用及相关致灾机理研究:

#### 1) 深部煤矿采空区应力对煤层自燃环境的影响机制的研究

在深井煤矿采空区应力作用下,易引起采空区冒落带不同位置孔隙率的变化,而孔隙率的变化影响其渗透率以及向采空区的漏风强度,进而对采空区遗煤自燃的氧化进程产生影响.因此,深入研究应力作用下采空区松散煤体孔隙率的变化规律,揭示应力条件下的渗透率动态演化机制,以及深井高应力环境对采空区漏风的影响规律研究,对建立科学有效的影响机制及相关模型有重要的指导意义.

#### 2) 高地温条件下的采空区遗煤氧化特性研究

随开采深度的增加,井下地温逐渐升高,而地温是煤的起始氧化温度,起始氧化温度的不同一定程度上会影响煤的氧化进程.因此,可考虑通过测试煤在不同起始温度及氧化升温过程中产生的  $C_2H_6$  和  $C_3H_8$  等烷烃气体的变化规律,从而确定各种指标气体的相关影响机理,并正确分析出各种指标气体的临界判定指标值随地温的变化规律.

### 3) 水浸风干对煤自燃特性的影响规律及其作用机理研究

水分对煤自燃的影响具有双重性,一方面较高的含水量会起到阻氧、降温和抑制煤自燃的作用;同时,适宜的含水量又会促进氧化放热,从而促进煤层自燃的发生、发展.因此,通过现场采集不同变质程度的新鲜煤样,利用已有的实验设备,选择蒸馏水对煤样进行浸泡实验,对所得原煤和风干后煤样进行程序升温实验,对水浸风干煤程序升温过程耗氧速率和其自燃标志性气体进行分析,对比研究长期水浸煤风干后煤低温氧化的过程及其温度分布,氧化气体产物浓度变化等因素,以便开展适应于高地温条件下不同浸水时间煤二次氧化特性影响的实验测试,从而获得水浸风干对煤自燃特性的影响规律及其作用机理.

### 4) 耦合作用下深部煤矿采空区煤自燃灾害演化规律

深井煤矿采空区环境的复杂多变性,应力场、渗流场以及温度场等相互关联、相互影响.因此,可考虑深入分析深井煤矿采空区环境的特点,研究应力场、渗流场以及温度场等相互关联、相互影响的规律,利用 COMSOL Multiphysics 多物理场软件,构建采空区多场耦合物理及数学模型,并创建物理参数模型,进而开展应力、渗流、温度多场作用模拟研究,揭示其耦合作用过程,分析其对煤自燃的影响规律,并结合理论分析结果,构建深井采空区煤自燃的多场耦合作用机制,分析采空区煤自燃的发生与发展过程,为采空区煤自燃防治技术与方法提供理论依据.

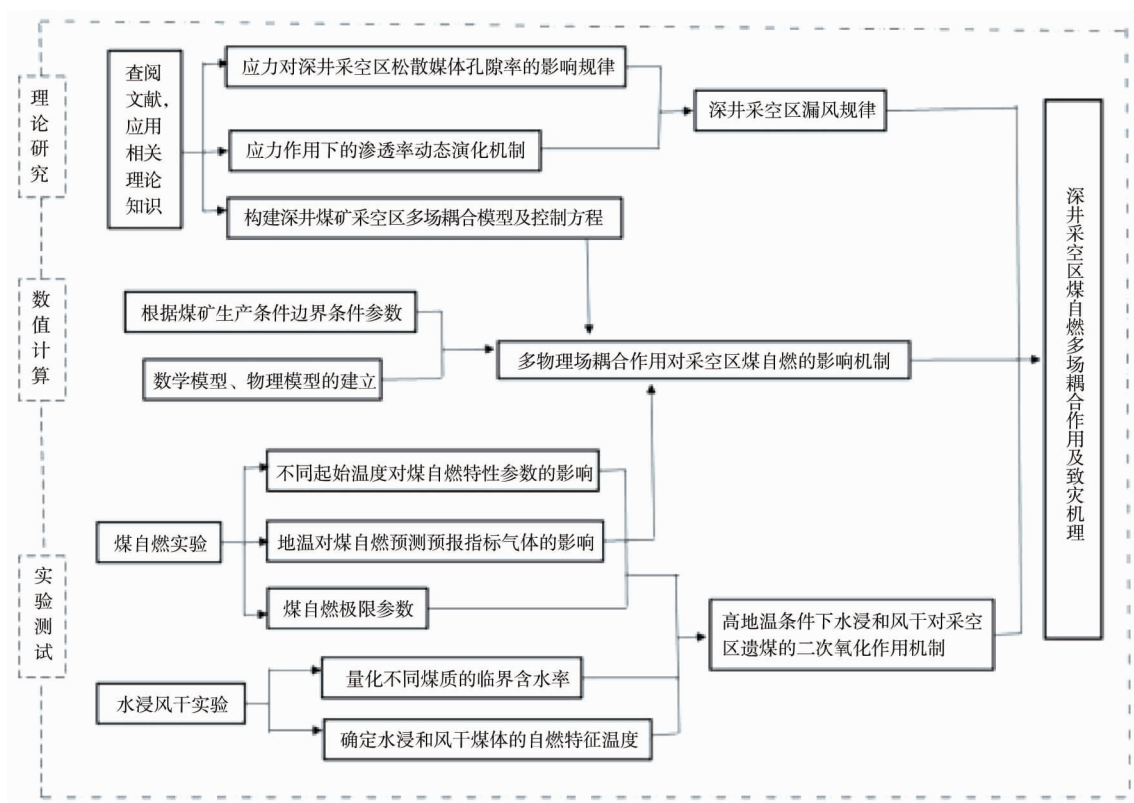


图1 深井采空区煤自燃多场耦合作用及致灾机理研究技术路线

上述针对深部煤矿高应力、高地温的特点的深井采空区煤自燃多场耦合作用及致灾机理的深入研究,可以提高我国深井防灭火技术及方案正确实施的有效性与科学性,促进我国应急救援决策和实施从经验分析过渡到经验、定性和定量综合分析阶段,从而减少原发性火灾灾害的损失,减少或避免继发性灾害发生的可能性或损失,提高矿井的防灾和抗灾能力,为救灾决策提供技术支持.

## 5 结论

- 1) 本技术路线能有效揭示采空区遗煤自燃的氧化进程影响机制.
- 2) 对已有的煤自燃程序升温实验设备进行升级改造,可以得到测试煤在不同起始温度的氧化温升过

程中的耗氧速率、放热强度等参数,并可以分析煤自燃和指标气体相关参数随地温的变化规律。

### 参考文献:

- [1] 周心权,吴兵.矿井火灾救灾理论与实践[M].北京:煤炭工业出版社,1996.
- [2] 谢和平,高峰,鞠杨,等.深部开采的定量界定与分析[J].煤炭学报,2015,40(1):1-10.
- [3] 谢和平.“深部岩体力学与开采理论”研究构想与预期成果展望[J].工程科学与技术,2017,49(2):1-16.
- [4] Mao B, Elsworth D. Some aspects of mining under aquifers in China[J]. Mining Science & Technology, 1990, 10(1):81-91.
- [5] Palchik V. Influence of physical characteristics of weak rock mass on height of caved zone over abandoned subsurface coal mines[J]. Environmental Geology, 2002, 42(1):92-101.
- [6] 张金才,刘天泉.论煤层底板采动裂隙带的深度及分布特征[J].煤炭学报,1990,15(2):46-55.
- [7] 刘天泉.矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J].煤炭学报,1995,20(1):1-5.
- [8] 姜岩.采动覆岩离层及其分布规律[J].山东矿业院学报,1997,16(1):19-22.
- [9] 钱鸣高,许家林,缪协兴.煤矿绿色开采技术[J].中国矿业大学学报,2003,32(4):343-348.
- [10] 涂敏,余忠林.巨厚松散含水层下开采覆岩移动破坏分析[J].矿山压力与顶板管理,2004,21(2):1-3.
- [11] 张春,题正义,李宗翔.采空区加荷应力场及其多场耦合研究[J].长江科学院院报,2012,29(3):50-54.
- [12] 张春,题正义,李宗翔.采空区多场耦合的理论研究[J].煤炭技术与工程,2009,18(6):328-331.
- [13] 缪协兴,刘卫群,陈占清.破碎岩体渗流理论[M].北京:科学出版社,2003.
- [14] 李顺才.破碎岩体非 Darcy 渗流的非线性动力学研究[D].徐州:中国矿业大学,2006.
- [15] 徐精彩,文虎,邓军.煤自燃极限参数研究[J].火灾科学,2000,9(2):15-18.
- [16] 文虎,徐精彩,李莉.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):371-373.
- [17] 邓军,徐精彩,文虎.综放采煤法中沿空巷道煤层自然发火预测模型研究[J].煤炭学报,2001,26(1):63-66.
- [18] 邓军,徐精彩,张辛亥.综放面采空区温度场动态数学模型及应用[J].中国矿业大学学报,1999,28(2):179-181.
- [19] 余明高,王清安.煤层自然发火期预测的研究[J].中国矿业大学学报,2001,30(4):385-387.
- [20] 郭兴明,徐精彩,邓军,等.地温在煤自燃过程中的作用分析[J].煤炭学报,2001,26(2):160-162.
- [21] 郭兴明,徐精彩,邓军,等.地温对煤层自燃危险性的影响研究[J].西安交通大学学报,2000,34(11):23-26.
- [22] 文虎,赵阳,肖旻,等.深井综放采空区漏风流场数值模拟及自燃危险区域划分[J].煤矿安全,2011,42(9):12-15.
- [23] Sargeant J, Beamish B, Chalmers D. Times to Ignition Analysis of New South Wales [J]. Coal Operators Conference, 2009: 254-358.
- [24] King J, Krug D, Zeep D. The role of oxygen complex in oxidation of carbonaceous compounds[J]. Journal of the Chemical Society-Faraday Transactions, 1964, 42(2): 297-299.
- [25] Kurose R, Tsuji H, Makino H. Effects of moisture in coal on pulverized coal combustion characteristics[J]. Fuel, 2001, 80(10): 1457-1465.
- [26] Beamish B B, Hamilton G R. Effect of moisture content on the R 70 self-heating rate of Callide coal[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 64: 133-138.
- [27] Zhu M S, Xu Y Q, Wu J. Computer simulation of spontaneous combustion in goaf [C]//Proceedings of the US Mine Ventilation Symposium. Morgentown Wo USA; SME, Littleton, Co, 1991:88-93.
- [28] 李宗翔,孙广义,王继波.综放工作面煤柱内漏风与耗氧过程的数值模拟[J].力学与实践,2001,23(4):15-18.
- [29] 王继仁,邓存宝.煤微观结构与组分量质差异自燃理论[J].煤炭学报,2007,32(12):1291-1296.
- [30] 吴晓光.煤自然发火实验台温度场数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2005.
- [31] 文虎.煤自燃过程的实验和数值模拟研究[D].西安:西安科技大学,2003.
- [32] 卢山,孙培雷.煤堆自燃的理论与计算[J].工业锅炉,2004(4):26-29.