

文章编号: 1001-1986(2010)01-0007-07

# 煤与瓦斯突出机理研究现状及分析

李希建<sup>1,2</sup>, 林柏泉<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳 550003)

**摘要:** 对现有的煤与瓦斯突出机理研究成果进行了评述; 阐述了煤与瓦斯突出机理的研究思路与方法及其历史发展过程和研究现状; 分析了这些研究成果的不足之处, 提出了煤与瓦斯突出机理的研究方向。研究表明, 煤与瓦斯突出机理已经从单因素向多因素发展, 综合作用假说得到了普遍认可, 这为防突工作提供了理论依据。认为, 煤与瓦斯突出准备机理、失稳与平衡机理、发展机理、传播机理和煤与瓦斯突出带分布规律研究是煤与瓦斯突出机理需要深入研究的方向。

**关键词:** 煤与瓦斯突出; 机理; 研究现状; 研究方向

中图分类号: TD713.1 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.01.002

## Status of research and analysis on coal and gas outburst mechanism

LI Xijian<sup>1,2</sup>, LIN Baiquan<sup>1</sup>

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. School of Mining, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** In order to discuss the orientation of research on coal and gas outburst mechanism, research findings of coal and gas outburst mechanism were presented in this paper. Different thoughts and methods of research on coal and gas outburst mechanism were expounded, so were the processes of development and current situation of research on coal and gas outburst mechanism. Limitations of existing research findings on coal and gas outburst mechanism were analyzed. Orientation of research on coal and gas outburst mechanism was proposed as well. Currently, research on coal and gas outburst mechanism has developed from single-factor level to multiple-factor level and hypothesis of comprehensive function of multiple-factor has received wide acceptance, which has built theoretical basis for outburst prevention measures in coal mine. Domestic researchers have made abundant achievements in the research on mechanism of coal and gas outburst, which has advanced and developed the mechanism. It was believed that the mechanisms of outburst preparation, outburst instability and balancing, outburst development, outburst transmission of coal and gas, as well as the regularity of distribution of regions where coal and gas outburst tend to take place are the research orientation for deepened study of the mechanism of coal and gas outburst.

**Key words:** coal and gas outburst ; mechanism ; research actuality ; orientation of research

煤与瓦斯突出是一种复杂的矿井瓦斯动力现象,也是一种非常严重而又比较普遍的威胁煤矿安全生产的自然灾害。自从 1834 年 3 月 22 日,在法国的鲁阿雷煤田伊萨克矿井发生了世界上第一次煤与瓦斯突出开始,据报道,目前大约有 18 个国家有煤与瓦斯突出发生,分别是中国、法国、俄罗斯、波兰、日本、匈牙利、比利时、英国、捷克、保加利亚、澳大利亚、荷兰、德国、加拿大、罗马尼亚、南斯拉夫、印度和南非。其中前 5 个国家的突出情况最为

严重<sup>[1-9]</sup>。我国是世界上煤与瓦斯突出最严重的国家,自 1950 年发生有记载的第一次煤与瓦斯突出现象以来,在安徽、四川、重庆、贵州、江西、湖南、河南、山西、辽宁、黑龙江等省区都发生了煤与瓦斯突出。随着采掘深度不断增加,地应力与瓦斯压力不断加大,煤与瓦斯突出矿井的数目会不断增多,突出次数也将日益频繁。因此,解决矿井煤与瓦斯突出灾害问题是实现煤炭工业可持续发展的当务之急。

收稿日期: 2009-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(50534090); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB221506); 贵州省科技厅工业攻关项目(黔科合 GY 字(2006)3029); 贵州省科技厅科技基金项目(黔科合 J 字(2006)2109); 教育部春晖计划项目(Z2007-1-52010)

作者简介: 李希建(1967—), 男, 湖南张家界人, 博士, 教授, 从事矿井瓦斯防治研究工作。

自从世界上第一次发生煤与瓦斯突出事故以来,世界各主要产煤国都投入了大量的人力、物力,开展煤与瓦斯突出的研究工作,取得了丰富成果。对煤与瓦斯突出机理,各国研究者经过长期的努力提出了包括瓦斯主导作用、地应力主导作用、化学本质作用和综合作用等假说,基本定性地解释了煤与瓦斯突出现象,为煤与瓦斯突出危险性预测和防治措施的制定与实施提供了依据。但由于影响煤与瓦斯突出的主要因素中,煤岩物理力学性质是非线性假说性的,煤岩体破坏形式是多样性的,瓦斯赋存与运移过程是复杂性的,这导致对于突出的原因、过程及一些细节还不十分明确。实际矿井观测资料表明,现有的这些突出机理还不能解释所有突出现象,还停留在定性或近似定量的假说阶段,没有形成定量的统一完整的理论体系。

本文旨在对现有的煤与瓦斯突出机理作一个总体评述,分析目前突出机理假说存在的问题,并提出关于煤与瓦斯突出研究方向的建议。

## 1 国内外研究现状

### 1.1 国外研究现状

国外关于煤与瓦斯突出机理的研究成果可以归纳为以下 4 个方面<sup>[1-12]</sup>:

a. 瓦斯主导作用假说 这类假说认为煤体内存储的高压瓦斯在突出中起主要作用。其中“瓦斯包”说占重要地位,认为“瓦斯包”是突出的动力来源。

瓦斯主导作用假说主要有:“瓦斯包”说、粉煤带说、煤空隙结构不均匀说、突出波说、裂缝堵塞说、闭合空隙瓦斯释放说、瓦斯膨胀说、卸压瓦斯说、火山瓦斯说、地质破坏带说、瓦斯解吸说等 11 种假说。

b. 地应力主导作用假说 这种假说认为煤和瓦斯突出主要是高地应力作用的结果。高地应力包括 2 个方面,一方面指自重应力和构造应力,另一方面指工作面前方存在的应力集中。

地应力主导作用假说主要有:岩石变形潜能说、应力集中说、塑性变形说、冲击式移近说、拉应力波说、应力叠加说、放炮突出说、顶板位移不均匀说等 8 种假说。

c. 化学本质作用假说 这种假说认为突出主要是在化学作用下形成高压瓦斯和产生热反应。

化学本质主导作用假说主要有:瓦斯水化物说、地球化学说、硝基化合物说等 3 种假说。

d. 综合作用假说 这种假说认为,突出是由地

应力、包含在煤体中的瓦斯及煤体自身物理力学性质等综合作用的结果。但对各因素在突出中所起的作用没有统一认识。

综合作用假说主要有:振动说、分层分离说、破坏区说、游离瓦斯压力说、地应力不均匀假说、能量假说等 6 种假说。

### 1.2 国内研究现状

我国从 20 世纪 60 年代起开始对突出煤层的应力状态、瓦斯赋存状态、煤的物理力学性能等开展了研究,并根据现场资料和实验研究对煤和瓦斯突出机理进行了探讨。特别是近几年随着研究的深入及新手段的应用,产生了许多新的认识。

#### 1.2.1 代表人物及其主要观点<sup>[1-12]</sup>

我国煤地质与煤矿安全科研工作者对煤与瓦斯突出机理进行了深入的研究,在前人研究的基础上提出了自己的观点,完善与发展了煤与瓦斯突出机理。主要代表人物有:

a. 于不凡(1975, 1979)提出了中心扩张学说。他认为,煤与瓦斯突出是从离工作面某一距离处的发动中心开始的,而后向四周扩散,由发动中心周围的煤-岩石-瓦斯体系提供能量并参与活动。在煤和瓦斯突出地点,地应力场、瓦斯压力场、煤结构和煤质是不均匀的。煤和瓦斯突出发动中心就处在应力集中点,且该点向各个方向的发展是不均匀的。

b. 郑哲敏(1982)从力学角度对突出问题进行研究,通过量纲分析给出了突出判据的一般形式。认为高瓦斯是大型突出所需能量的主要提供者,突出煤层中瓦斯内能要比煤体的弹性潜能大 1~3 个量级。

c. 李中成(1987)认为,煤巷掘进工作面煤与瓦斯突出是工作面煤壁盘形拉伸破坏的连锁反应过程,突出过程就是煤体所积存的弹性应变能和瓦斯内能突然释放的过程。

d. 李萍丰(1989)提出了二相流体假说。认为突出的本质是在突出中心形成了煤粒和瓦斯的二相流体,这种二相流体受压积蓄能量,卸压膨胀放出能量,冲出阻碍区,从而导致突出。突出的主要动力源是二相流体压缩积蓄、卸压膨胀放出的能量。

e. 丁晓良(1989)对煤在瓦斯渗流作用下的破坏与持续发展进行了研究,认为突出的发生是煤体的破坏与瓦斯渗流耦合的结果。

f. 周世宁和何学秋(1990)提出了流变假说。认为煤与瓦斯突出是含瓦斯煤受采动影响后地应力与孔隙瓦斯气体耦合的一种流变过程。在突出准备阶段,含瓦斯煤体在采动影响区域内就开始了蠕变破

坏,使煤体进一步被切割,形成发育的裂隙网。在某区域加速破坏发生时,如果该区域瓦斯能量足够冲跨已遭破坏的煤体,则突出发生和发展,突出过程中的瓦斯气体部分由前一蠕变区域通过发育的裂隙网补给。流变假说除考虑瓦斯、地应力和煤的物理力学性质外,还考虑了时间因素。

g. 俞善炳(1992)首次建立了煤层暴露面外气固两相各以不同速度做一维运动,两相间有质量输运的气相质量守恒与动量守恒方程。在一维模型中将煤体破坏分为层裂和层裂片的粉碎2个阶段,并将最大有效拉应力准则作为破裂准则。他认为破裂是不连续的,破裂阵面跳跃式发展,层裂片的形态在运动中不稳定并可进一步的粉碎<sup>[11]</sup>。

h. 林柏泉(1992)提出了煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯、煤的物理力学性质和卸压区宽度4部分作用的结果。由于采掘工作面前方卸压区的存在,在远离采掘工作面处的煤体,即使处于高地应力、高瓦斯和煤破碎的突出危险区,也不会发生突出现象。因为,足够的卸压区宽度抑制了高能量体的失控。因此,如果适当加大卸压区的宽度,可有效预防煤与瓦斯突出的发生。

i. 蒋承林和俞启香(1995)提出球壳失稳假说。认为煤和瓦斯突出过程的实质是地应力破坏煤体,煤体释放瓦斯,瓦斯使煤体裂隙扩张并使形成的煤壳失稳破坏。煤体的破坏以球盖状煤壳的形成、扩展及失稳为主要特点,破坏的煤体抛向巷道后,煤体内部继续破坏。

j. 梁冰和章梦涛(1995)提出煤与瓦斯突出固流耦合失稳理论。认为突出是含瓦斯煤体在采掘活动影响下,局部发生迅猛、突然破坏而造成的,是地应力、瓦斯及煤体3个主要因素作用的结果。采深和瓦斯压力的增加都将使突出的危险增大。

### 1.2.2 近几年的研究进展

虽然煤与瓦斯突出机理的研究由于其复杂性而仍未能取得突破性进展,尚未形成完整的统一理论体系,但科研工作者一直在努力地探索,并不断取得一些成果,继续完善与发展煤与瓦斯突出机理。

a. 封富<sup>[13]</sup>(2003)指出,矿井动力现象一般都要经历弹性变形—非弹性变形—应变软化—失稳破坏过程。构造活动和应力场变是不同规模的地质构造在活动过程中的伴生现象,是次级断裂裂隙发育、形成以及应力场变化的结果。

b. 徐学锋<sup>[14]</sup>(2003)阐述了区域活动断裂及构造应力场分布的地质动力区划方法。全球板块构造运动控制着区域构造块体及构造应力场的分布,区

域地质构造及其活动性制约着矿区构造应力场,而构造应力是煤与瓦斯突出的主要因素。

c. 张国辉<sup>[15]</sup>(2005)提出煤层及其顶底板岩层的原岩应力基本由垂直的重力和近水平的构造应力叠加作用形成。构造应力场是一种形变场,并主要体现在坚硬稳定的顶底板岩层中。煤层采动与支承压力产生于重力作用,取决于上覆岩层强度性质的压力角所圈定的充分移动区范围。

d. 蔡峰<sup>[16]</sup>(2005)利用数值模拟方法,分别用隐式和显式计算方法对地应力和煤与瓦斯突出进行了模拟研究,再现了煤与瓦斯突出的全过程,指出了煤与瓦斯突出的条件及影响因素,验证了煤与瓦斯突出的“球壳失稳”机理。

e. 韩光<sup>[17]</sup>(2005)提出了煤与瓦斯突出的耦合动力学模型,并采用有限元法进行了数值求解。当岩体围压增大时,煤体微结构发生变化,孔隙、裂隙闭合对瓦斯的吸附作用增加,使渗透率减小;而随孔隙增大,煤样吸附容积加大,吸附应力使其煤样产生向外膨胀变形,变形量增加。

f. 高雷阜<sup>[18]</sup>(2006)提出了动态反演假说,将煤与瓦斯突出过程看成是一个动力演化的过程。假设在不同时空,各个因素对突出的影响是不断变化的,对各个指标在突出前的历史数据,按时间序列分别重构相空间,对各个指标未来时刻(突出时刻)的值进行预测。

g. 穆朝民<sup>[19]</sup>(2006)采用煤与瓦斯突出“固流耦合”理论,利用有限元程序(RFPA)动态模拟了掘进工作面煤与瓦斯突出孕育、启动及其发生过程。提出了失稳判据,即突出是否发生,主要以拉应力破坏为主,由去除约束后的总刚度的行列式值的大小来确定。

h. 程建圣<sup>[20]</sup>(2006)构造了突变势函数,应用突变理论对立井煤与瓦斯突出动力现象发生过程进行解释。利用尖点突变模型对突出的启动和终止进行系统定性分析,找出影响突出的因素。

i. 张玉贵<sup>[21]</sup>(2006)提出构造煤的分布受地质构造逐级控制。强挤压剪切构造破坏带、高应力区是煤与瓦斯突出发生的背景环境;高能瓦斯和构造煤控制着煤与瓦斯突出。探讨了构造煤结构演化和力化学作用演化过程,提出了构造煤形成过程中的力化学作用机制,明确地提出构造煤是煤力化学作用的产物。

j. 刘志伟<sup>[22]</sup>(2006)提出地应力是煤与瓦斯突出的动力条件。随着工作面向前推进,煤岩体破坏了

原岩应力平衡状态,引起岩体内部的应力重新分布,出现支承压力,并且最终形成采动应力场。支承压力的峰值强度和影响范围对顶底板活动及煤与瓦斯突出的发生具有决定作用。

k. 赵玉林<sup>[23]</sup>(2007)认为,根据量子力学理论,煤岩体破裂产生的电磁波在一定频率范围内能够被煤与甲烷吸附伴生分子体系以量子化形式吸收,导致该体系由基态变为激发态。大量瓦斯由吸附态突然转变为游离态,导致煤与瓦斯突出。

l. 赵志刚<sup>[24]</sup>(2007)提出在应力波的作用下,巷道围岩中交替出现拉应力和压应力,随着应力波峰值的增大,巷道围岩的应力数值出现不同程度的增大。层裂体的形成和失稳破坏是煤与瓦斯突出发动的基本环节。煤与瓦斯突出的过程可简化为层裂体在地应力与瓦斯压力的耦合作用下发生失稳的过程。层裂体的演化经历了从 3 个周期到混沌的过程。

m. 郭德勇<sup>[25-26]</sup>采用构造物理学的理论和方法,对地质构造控制煤与瓦斯突出机理及分布规律进行了研究。指出煤与瓦斯突出的构造物理环境由构造组合特征、构造应力场、构造煤和煤层瓦斯 4 因素组成。发现在煤与瓦斯突出过程中存在粘滑失稳现象,其特征受多种因素影响,提出了煤与瓦斯突出的粘滑失稳机理。

n. 徐涛<sup>[27-28]</sup>建立了含瓦斯煤岩突出过程固气耦合作用的 RFPA<sup>2D</sup>Flow 模型。利用该模型对石门掘进诱发的含瓦斯煤岩突出进行了初步的数值模拟,再现了煤岩介质在瓦斯压力、地应力和煤岩力学性质等因素综合作用下,由裂纹萌生、扩展、相互作用、贯通直至失稳抛出的突出全过程。揭示了采动影响下煤岩介质渐进破坏诱致突变的非线性本质,包括含瓦斯煤岩破裂过程中应力场的演化。

o. 马中飞<sup>[29]</sup>将突出煤体视为煤与瓦斯承压散体,提出了煤与瓦斯承压散体失控突出机理;导出了煤与瓦斯承压散体的动量方程;结合突变理论导出了煤与瓦斯承压散体运动突变势函数;分析了突出过程、运动突变条件、影响煤与瓦斯突出因素。

p. 颜爱华<sup>[30]</sup>通过物理试验,发现瓦斯压力越大,突出强度越大;当瓦斯压力相近时,吸附和解吸能力大的瓦斯突出强度大。通过数值模拟对煤与瓦斯突出进行研究,再现了煤矿开采过程中诱发煤与瓦斯突出的全过程,验证了煤与瓦斯突出是瓦斯压力、地应力及煤岩体的力学性质综合作用的结果。

q. 王继仁<sup>[31]</sup>构建了煤表面与  $\text{CH}_4$  的吸附模型,提出了煤与瓦斯突出微观机理。煤与瓦斯的吸附为物理吸附,煤与  $\text{CH}_4$  吸附形成的伴生分子体系以量

子化形式吸收宽频电磁波。采掘等活动导致分子体系由基态变为激发态,使得瓦斯由吸附态脱附变为游离态,形成大量的游离态瓦斯,在弱面发生煤与瓦斯突出。

r. 韩军<sup>[32]</sup>分析了煤层与围岩组成的软硬互层系统的层间滑动特征和应力-应变特征、煤体宏观与微观结构特征、瓦斯压力与瓦斯含量分布特征。

s. 彭苏萍<sup>[33]</sup>和张许良等<sup>[34]</sup>研究了三维地震勘探探测瓦斯突出危险带的技术。通过对断层破坏和褶皱变形程度的定量评定划分出瓦斯突出危险带。研究了不同结构煤层的测井曲线特征及其与煤层气富集之间的关系。首次明确指出煤层气富集区和煤矿瓦斯突出灾害区有本质不同,并在地球物理标志中有明显的分辨特征。

## 2 存在问题及分析

### 2.1 各类假说难以解释的煤与瓦斯突出现象<sup>[1-12]</sup>

已有的煤与瓦斯突出机理虽然能够对突出发生的原因、条件、过程和能量来源作定性的解释和近似定量计算,但由于各种假说都是针对某类具体条件提出的,而实际资料说明其都有一定的局限性,难以用某种假说来解释所有的矿井突出现象。

#### 2.1.1 瓦斯主导作用假说

瓦斯主导作用假说难以解释以下煤和瓦斯突出现象:a. 在煤层中从未发现可以积聚瓦斯的空洞,即“瓦斯包”或特定的粉煤带;b. 突出危险性与煤层瓦斯含量之间没有直接的联系;c. 在突出空洞周围出现过重复突出;d. 强烈声响往往发生在突出之前的煤体深处;e. 打小直径排放钻孔,并不能有效地防治突出;f. 突出地点煤和岩石的温度升高,抛出的煤体温度也有上升;g. 煤层的自行揭开;h. 过煤门时的突出;i. 突出空洞发生变形(体积缩小);j. 大多数平巷的突出空洞位于上隅角。

#### 2.1.2 地应力主导作用假说

地应力主导作用假说难以解释以下突出现象:a. 在瓦斯不大的矿井,即使开采深度很深(400~500 m),也不会发生突出;b. 二氧化碳参与突出的平均强度比甲烷参与突出的大;c. 突出前出现回风流中瓦斯浓度增大或忽大忽小预兆;d. 从突出煤的分选现象中可见到大量的细尘状粉煤;e. 突出空洞常常是一些口小腔大的特殊形状空洞(如梨形、椭球形等);f. 在一些大型、特大型突出中,每 t 喷出煤的瓦斯涌出量比煤层瓦斯含量高得多,即可以在短时间内涌出数十万至上百万  $\text{m}^3$  瓦斯气体,逆流运行并可充满数千 m 的巷道;g. 准备巷道中地压显现不如回采巷道明显,但准备巷道的突出次数与

强度均比回采巷道的大;h. 在平巷及下山也发生突出;i. 在进行工作面支护甚至无人作业时,地压作用并不大,也有突出发生。

### 2.1.3 化学本质作用假说

化学本质作用假说难以解释地质构造破坏带、采动影响带、煤层埋深大的区域易发生突出等现象,也从未在现场发现瓦斯水化物和硝基化合物。

### 2.1.4 综合作用假说

综合作用假说难以解释以下突出现象:a. 突出的区域性分布;b. 过煤门时的大强度突出;c. 震动爆破诱发突出;d. 突出发生时的突出时间很短;e. 当增加煤体水分降低煤体强度时,煤的突出危险性反而降低;f. 难以定量评价地应力、瓦斯及煤的物理力学特性各自在突出中起的作用。

## 2.2 现有研究成果总体评述

煤与瓦斯突出机理已经从单因素向多因素发展,综合作用假说得到了普遍认可,为突出危险性预测预报、防突措施的选择及防突效果的检验提供了理论依据。煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯和煤的物理力学性质 3 者综合作用的结果,是积聚在围岩和煤体中大量潜能的高速释放。并认为高压瓦斯在突出的发展过程中起决定性的作用;地应力(构造应力、自重应力、采动应力、温度应力等)突变和采矿活动扰动是激发突出的因素;而煤的物理力学性质则是阻碍突出的因素。

我国煤地质与煤矿安全科研工作者对煤与瓦斯突出机理研究取得了丰富成果,完善与发展了煤与瓦斯突出机理。主要成果体现在以下方面:

a. 将参与煤与瓦斯突出的煤体、岩石、瓦斯和应力场看成一个统一体系,并且认为它们是不均匀的,突出是气固两相流运动。

b. 进一步明确了煤与瓦斯突出的动力来源。煤(岩)体所积存的弹性应变能和瓦斯内能是突出发生的能量,并且高压瓦斯是大型突出所需能量的主要提供者,地应力和瓦斯压力增加使突出危险性增大。

c. 进一步明确了煤与瓦斯突出的准备、激发、发展和终止过程。突出是煤体破坏、地应力突变与瓦斯渗流耦合作用下发生失稳的过程,是卸压膨胀和煤(岩)体阻碍共同作用的结果。地应力突变和采掘活动扰动是激发突出的因素,而足够的卸压区宽度可以抑制高能量体的失控。在应力波的作用下,煤岩体中交替出现拉应力和压应力,并出现应力波峰值。

d. 进一步明确了煤与瓦斯突出的失稳破坏过程,解释了延期突出、大强度突出及突出伴生大量

瓦斯问题。从蠕变破坏到裂隙网发育,从裂隙扩张到失稳破坏,从内部延续到终止条件,考虑了时间因素。煤体破坏分为层裂和层裂片的粉碎 2 个阶段,破裂是不连续的并呈破裂阵面跳跃式发展。层裂体的形成和失稳破坏是突出发动的基本环节,最大有效拉应力准则为破裂准则。

e. 进一步明确了地质构造在煤与瓦斯突出中的作用,及不同地质构造中地应力分布、煤体结构特征和瓦斯赋存规律。全球板块构造运动控制着区域构造块体;区域地质构造及其活动决定着矿区构造应力场。煤层及顶底板岩层的原岩应力基本由垂直的重力和近水平的构造应力叠加作用形成,构造应力场是形变场,并主要体现在坚硬稳定的顶底板岩层中。采动应力取决于上覆岩层强度性质的压力角所圈定的充分移动区范围。地质构造带往往具备高地应力、高瓦斯压力(含量)和构造煤发育等 3 个因素。

f. 进一步明确了地应力与瓦斯之间的相互关系。当地应力增大时,煤体微结构中的孔隙、裂隙闭合,对瓦斯的吸附作用增加,使渗透率减小;当地应力减小时,随孔隙、裂隙增大,煤体吸附容积加大,并产生向外膨胀变形。

g. 探讨了影响煤与瓦斯突出各因素的作用关系,在突出的动力演化时空过程中,各个因素对突出的影响是不断变化的,并通过按时间序列对影响因素分别重构相空间进行突出预测。

h. 探讨了构造煤结构演化和力化学作用演化过程,提出了构造煤形成过程中的力化学作用机制,明确了构造煤是煤受力化学作用的产物。构造煤的分布受地质构造逐级控制,强挤压剪切构造破坏带、高应力区是煤与瓦斯突出发生的背景环境,高能瓦斯和构造煤控制着煤与瓦斯突出。构造煤破碎、裂隙多、大孔和中孔发育,但渗透性较差。

i. 通过物理实验与数值模拟,再现了煤岩介质在瓦斯压力、地应力和煤岩力学性质等因素综合作用下由裂纹萌生、扩展、相互作用、贯通直至失稳抛出的突出全过程;揭示了采动影响下煤岩介质渐进破坏诱发突变的非线性本质,包括含瓦斯煤岩破裂过程中应力场的演化;得出了吸附和解吸能力大时突出强度大的结论。

j. 利用构造物理学、量子化学、突变理论等探讨了煤与瓦斯突出机理。研究认为,煤与瓦斯突出构造物理环境由构造组合特征、构造应力场、构造煤和煤层瓦斯 4 因素组成,其综合作用控制着地质构造带煤与瓦斯突出,并存在粘滑失稳现象;煤岩

体破裂产生的电磁波在一定频率范围内能够被煤与甲烷吸附伴生分子体系以量子化形式吸收,采掘等活动导致分子体系由基态变为激发态,使得瓦斯由吸附态脱附变为游离态,形成大量的游离态瓦斯,在弱面发生煤与瓦斯突出;突出是煤与瓦斯承压散体失控,导出了散体动量方程和运动突变势函数,并利用尖点突变模型对突出的启动和终止进行系统定性分析,找出影响突出的因素。

k. 研究了利用三维地震勘探探测瓦斯突出危险带的技术。通过定量评定断层破坏和褶皱变形程度划分瓦斯突出危险带,并通过分析测井曲线特征区分煤层气富集区和煤矿瓦斯突出灾害区。

随着煤与瓦斯突出机理研究的逐步深入,对煤与瓦斯突出发生的原因、条件、过程和能量认识也逐步深入。但目前仍对突出的一些细节缺乏全面了解,还基本停留在定性解释和近似定量计算阶段,没有形成统一的完整理论体系。地应力、瓦斯、煤的物理力学性质是影响突出的 3 个方面,而每个方面又受很多因素作用。且突出是一个动态的时空演变的过程,从而决定了煤与瓦斯突出机理研究的困难性。这主要有以下方面研究不足:

a. 现有的研究往往从地应力、瓦斯、煤的物理力学性质和突出条件的单一方面研究其对突出的影响,缺乏将其作为一个统一整体进行研究,导致各因素在突出中的作用阐述不清。

b. 对突出过程研究较多,而对突出物及其运动规律和动力学破坏特征缺乏深入研究。

c. 深部矿井条件下,地应力与瓦斯对突出的作用,及煤与瓦斯突出与冲击地压的演化等,缺乏深入系统地研究。

d. 对突出影响因素地应力、瓦斯、煤的物理力学性质和突出条件,不能用数学模型定量地描述各因素的作用和突出判据。

e. 目前将煤与瓦斯突出与冲击地压等其他动力现象分别进行研究,由于其动力现象的动力学特征相似,从而缺乏对井下动力现象的统一认识,并不能从量化的角度予以定量区分。

### 3 研究方向及建议

从现有研究成果看,对煤与瓦斯突出机理研究主要有 5 个方面:一是通过突出事故调查和现场观测对突出原因、条件、过程及突出特征进行定性解释;二是利用数学和力学对突出物理模型进行近似定量研究;三是对突出数值模型进行计算机模拟研究;四是通过现场试验评价防突措施效果;五是通过物理、化学、构造地质学等对瓦斯赋存、地质构

造和构造煤特性进行研究。采用的研究手段主要有:理论分析、物理模拟、数值模拟、现场测试和现场试验等。

从现有煤与瓦斯突出机理存在的问题和目前现场需求出发,笔者提出了以下研究方向和建议:

a. 对煤与瓦斯突出准备机理进行研究。将煤体、岩体、瓦斯和应力场看成一个统一时空体系,研究煤体、岩体、瓦斯和应力场之间的耦合关系;地应力、瓦斯压力与煤岩特性之间的演化规律;及煤岩体物理力学特性(包括宏微观结构、煤岩组分、力学性质与化学性质等)。

b. 对煤与瓦斯突出失稳与平衡机理进行研究。研究煤与瓦斯突出的失稳激发条件和平衡终止条件,确定发生突出与终止突出的临界力学条件、能量条件和突出体的物理力学特性条件,及卸压区的合理宽度。

c. 对煤与瓦斯突出发展机理进行研究。研究突出体(岩和煤的粒、层、体)破坏微观过程,煤岩体物理力学特性、瓦斯特性(包括突出体与邻近体的瓦斯含量、瓦斯压力、吸附与解吸)、瓦斯运移通道(空隙与裂隙)、应力场和能量(包括煤岩体弹性能、瓦斯内能和瓦斯膨胀能)之间的耦合关系及动态演化规律。

d. 对煤与瓦斯突出传播机理进行研究。研究突出物及其运动规律和动力学破坏特征;气固两相流的时空动态演化规律及伴生物理现象(如冲击波、高速运动等)产生的物理本质。

e. 对煤与瓦斯突出带分布规律进行研究。研究原岩应力场(包括构造应力场、自重应力场、温度应力场等)、采动应力场(由采矿活动引起的原岩应力和支护应力重新分布,即应力集中)的发生与演变规律,及其动态耦合关系。研究瓦斯赋存与涌出规律,及煤体物理化学特性与吸附和解吸的关系。研究瓦斯参数(包括瓦斯含量、瓦斯压力、解吸能力、渗透性等)与地质构造、围岩特性、煤体特性和煤质等之间的关系。研究构造活动和采矿活动与构造煤和破碎煤的时空演化规律,与煤岩体空隙、裂隙的动态耦合关系,及构造煤与破碎煤的成因、分布规律及其物化特性。研究利用三维地震、微震、声发射、电磁辐射等物探技术,定量评定断层破坏和褶皱变形程度、煤岩物理化学力学特性、瓦斯富集程度等的探测方法,进而划分瓦斯突出危险带。

### 4 结 论

煤与瓦斯突出是一种复杂的矿井瓦斯动力现象,经过长期对大量矿井煤和瓦斯突出现象的观测和研究,已

基本掌握了突出发生的原因、条件和过程;明确了参与突出的煤体、岩石、瓦斯和应力场是一个统一体系;煤(岩)体所积存的弹性应变能和瓦斯内能是突出发生的能量,地应力突变和采掘活动扰动是激发突出的因素。

突出机理研究仍然停留在定性解释和近似定量计算的假说阶段,还需要更深入地研究其物理本质,从而定量地描述突出现象。尤其要研究煤与瓦斯突出的准备机理、失稳与平衡机理、发展机理、传播机理和煤与瓦斯突出带的分布规律,确定煤体、岩体、瓦斯和应力场之间的时空能耦合关系及其动态演化规律,突出失稳激发条件和平衡终止条件,定量评价煤与瓦斯突出危险性。

## 参考文献

- [1] 蒋承林,俞启香.煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998.
- [2] 梁冰.煤和瓦斯突出固流耦合失稳理论[M].北京:地质出版社,2000.
- [3] 何学秋.煤岩流变电磁动力学[M].北京:科学出版社,2003.
- [4] 郭勇义,何学秋,林柏泉.煤矿重大灾害防治战略研究与进展[M].徐州:中国矿业大学出版社,2003.
- [5] 于不凡.煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M].修订版.北京:煤炭工业出版社,2005.
- [6] 胡殿明,林柏泉.煤层瓦斯赋存规律及防治技术[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [7] 李建铭.煤与瓦斯突出防治技术手册[M].徐州:中国矿业大学出版社,2006.
- [8] 周世宁,林柏泉.煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [9] 范维唐,卢鉴章,申宝宏,等.煤矿灾害防治的技术与对策[M].徐州:中国矿业大学出版社,2007.
- [10] 周世宁,何学秋.煤和瓦斯突出机理的流变假说[J].中国矿业大学学报.1990,19(2):1-7.
- [11] 方健之.煤与瓦斯突出的层裂-粉碎模型[J].煤炭学报.1995,20(2):149-153.
- [12] 李中锋.煤与瓦斯突出机理及其发生条件评述[J].煤炭科学技术.1997,25(11):44-47.
- [13] 封富.地震与煤与瓦斯突出统一机理研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2003.
- [14] 徐学锋.地质构造对煤与瓦斯突出的影响研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2003.
- [15] 张国辉.煤层应力状态及煤与瓦斯突出防治研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2005.
- [16] 蔡峰.煤巷掘进过程中煤与瓦斯突出机理的研究[D].淮南:安徽理工大学,2005.
- [17] 韩光.煤和瓦斯突出的气固耦合机理及分析研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2005.
- [18] 高雷阜.煤与瓦斯突出的混沌动力系统演化规律[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006.
- [19] 穆朝民.潘三矿煤巷掘进中煤与瓦斯突出过程的数值模拟[D].淮南:安徽理工大学,2006.
- [20] 程建圣.立井掘进中的煤与瓦斯突出动力现象研究[D].淮南:安徽理工大学,2006.
- [21] 张玉贵.构造煤演化与力化学作用[D].太原:太原理工大学,2006.
- [22] 刘志伟.构造和应力对煤与瓦斯突出的控制作用研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2006.
- [23] 赵玉林.煤与瓦斯突出机理及防治技术研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2007.
- [24] 赵志刚.煤与瓦斯突出的耦合灾变机制及非线性分析[D].泰安:山东科技大学,2007.
- [25] 郭德勇.煤与瓦斯突出的构造物理环境及其应用[J].北京科技大学学报.2002,24(6):581-592.
- [26] 郭德勇,韩德馨.煤与瓦斯突出粘滑机理研究[J].煤炭学报.2003,28(6):598-602.
- [27] 徐涛.含瓦斯煤岩突出过程数值模拟[J].中国安全科学学报.2005,15(1):108-110.
- [28] 徐涛.含瓦斯煤岩破裂过程流固耦合数值模拟[J].岩石力学与工程学报.2005,24(10):1667-1673.
- [29] 马中飞,俞启香.煤与瓦斯承压散体失控突出机理的初步研究[J].煤炭学报.2006,31(3):329-333.
- [30] 颜爱华,徐涛.煤与瓦斯突出的物理模拟与数值模拟研究[J].中国安全科学学报.2008,18(9):37-42.
- [31] 王继仁.煤与瓦斯突出微观机理研究[J].煤炭学报.2008,33(2):131-135.
- [32] 韩军.向斜构造煤与瓦斯突出机理探讨[J].煤炭学报.2008,33(8):908-913.
- [33] 彭苏萍.不同结构类型煤体地球物理特征差异分析和纵横波联合识别与预测方法研究[J].地质学报.2008,82(10):1311-1322.
- [34] 张许良.瓦斯突出危险带的三维地震探测技术[J].煤炭科学技术.2003,31(12):12-15.
- [35] 孙叶.煤瓦斯突出研究现状及其研究方向探讨[J].地质力学学报.2008,14(2):117-134.