

煤与瓦斯突出机理及主要影响因素研究现状*

杨秀贵¹, 潘昌树¹, 陈云²

(1. 重庆市高新工程勘察设计院有限公司, 重庆 401120;

2. 重庆国际复合材料股份有限公司, 重庆 400082)

摘要:煤与瓦斯突出是煤矿灾害的典型类型之一,是一种复杂的动力现象,其后果是破坏性、灾难性的。为进一步系统了解煤与瓦斯突出机理及其当前的研究现状,给后续学者研究煤与瓦斯突出及其防治技术提供参考,通过查阅国内外大量文献,总结了煤与瓦斯突出机理及主要影响因素方面的研究成果。阐述了突出机理的3种主要假说,概括了煤与瓦斯突出的发生、发展过程;统计了针对突出机理的研究手段及各类方法占比,并分析了研究方法差异化、多样化的原因,提出了更为科学、合理的研究手段。概括了煤与瓦斯突出影响因素的主要类型,并构造了影响因素结构示意图;总结了学者们对影响因素研究的侧重点,分析了各影响因素对突出强度的影响。指出了当前研究的不足之处,并对今后在煤与瓦斯突出方面的研究提出了建议。

关键词:煤与瓦斯突出;突出机理;影响因素

0 引言

煤与瓦斯突出是煤矿生产过程中产生的一种极为复杂的动力现象,是矿井灾害的典型类型之一,严重制约着井下煤炭的安全生产。自1834年在法国发生了世界上第一次煤与瓦斯突出事故以来,许多国家也相继发生了突出事故,目前累计约有20个国家发生过煤与瓦斯突出事故,而中国记载的第一次突出事故发生于1950年,且中国是发生煤与瓦斯突出事故最为严重的国家,占世界突出事故的40%以上^[1-2]。

自1834年以来,世界各国投入了大量的人力、物力及财力,对煤与瓦斯突出进行研究,也取得了非常可喜的成就,我国也不例外。据统计,2001至2020年这20年间,煤与瓦斯突出次数虽呈下降趋势,但死亡人数在矿难死亡人数中却呈波动性增长,说明煤与瓦斯突出事故在矿井灾害中仍占较高水平^[3]。而随着煤层开采深度的增加,突出的复杂性及防治措施的局限性更为明显。要想防治突出事故,需要从根本的突出机理及突出影响因素入手,以

往的综述论文,大多集中在突出机理分析或单因素对突出过程的影响,对突出影响因素的综合分析较少,近几年则尤其侧重于煤与瓦斯突出防治理论技术的综合分析。基于此,笔者收集并分析了大量文献,对煤与瓦斯突出机理及主要影响因素进行了研究。

1 煤与瓦斯突出机理

近一个世纪以来,国内外诸多专家学者针对煤与瓦斯突出机理进行了深入研究,并根据各自的研究成果提出了诸多假说^[4],总体可归纳为瓦斯主导作用假说、地应力主导作用假说、化学本质作用假说及综合作用假说^[5-7]。认可度较高的为瓦斯主导作用假说、地应力主导作用假说及综合作用假说^[8]。而从力学角度分析,可认为煤与瓦斯突出是一个力学作用过程,先后需要经历准备、启动、发展和终止等4个阶段,如图1所示^[9]。

1.1 瓦斯主导作用假说

俞启香^[10]认为煤层中存在瓦斯含量及压力比相邻区域高很多的煤窝,即“瓦斯包”。煤层质地相

* 收稿日期: 2023-04-25

作者简介: 杨秀贵(1981—),男,重庆大足人,高级工程师,主要从事地质矿产、地质灾害防治及水工环地质方面的研究及技术工作,E-mail:8780276@qq.com。

通信作者: 潘昌树(1991—),男,四川宜宾人,硕士,工程师,主要从事地质矿产、地质灾害防治、岩土工程、水工环地质方面的研究及技术工作,E-mail:604241222@qq.com。

对较软、裂隙相对发育,被透气性较差的围岩包围,具有很好的瓦斯储存能力,当“瓦斯包”被采掘工作

揭穿时,高压瓦斯便将松软煤体破碎并抛出,从而产生煤与瓦斯突出现象。

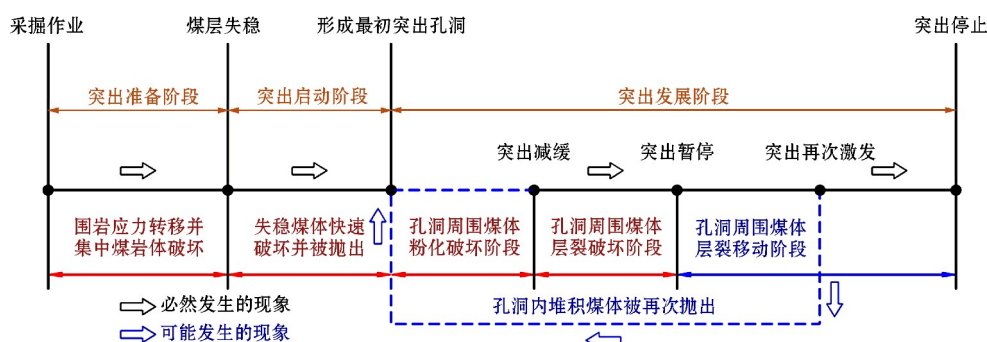


图 1 煤与瓦斯突出的力学作用过程描述

ODINTSEV^[11] 也认为瓦斯快速从煤体中解吸出来,使瓦斯含量逐渐增大并往外膨胀,在有限空间内致使瓦斯压力增大,最后导致煤体破坏产生突出。而部分学者^[12-13] 还发现,突出过程中瓦斯内能做功比煤体弹性潜能做功大 3~4 个能量级。而且通过敏感性分析^[14],发现瓦斯涌出量、突出强度以及突出过程中释放的能量对瓦斯含量敏感性最高。

通过分析以上学者的研究成果可以发现,“瓦斯包”是煤与瓦斯突出的动力源;瓦斯内能是突出的主要能量来源,且在突出过程中瓦斯含量起主导作用;因此,专家学者认为煤与瓦斯突出是煤体内高压瓦斯起主导作用而产生的动力现象。

1.2 地应力主导作用假说

韩军等^[15] 通过测量淮南、平顶山、阜新等地区多个煤与瓦斯突出矿井的地应力,发现突出区地应力远高于非突出区,且最大主应力约为最小主应力的 2 倍,认为地应力是突出产生的核心主导因素。

LITWINISZYN^[16] 及 PATERSON^[17] 认为在振动作用下瓦斯由吸附态转变为游离态,形成较大的应力变化,而高梯度的压力使煤体发生破坏,继而产生煤与瓦斯突出。而且在不同应力状态下,煤与瓦斯突出的破坏模式具有较大差异^[18]。利用 RFPA2D 软件分析断层附近煤与瓦斯突出过程^[19],可以发现采掘扰动改变了煤岩体的应力、应变情况,使煤岩体产生裂隙为瓦斯运移提供通道,继而在断层上下盘产生瓦斯压力差,当此压力差达到断层面的极限强度后,便会产生突出事故。

通过分析以上学者的研究成果可以发现,地应力对瓦斯含量、瓦斯压力、煤体强度及瓦斯运移有较大影响,高应力状态增加了瓦斯含量及压力,降低了煤体强度,使瓦斯突出阻力减小,继而产生煤

与瓦斯突出。因此,认为煤与瓦斯突出是地应力(包括自重应力、构造应力及扰动应力)起主导作用而产生的结果。

1.3 综合作用假说

尹永明等^[20] 通过现场调查及理论分析,利用层次分析法结合模糊综合评价法,分析了冲击型煤与瓦斯突出的突出机理,发现煤与瓦斯突出是瓦斯、应力及煤体物理力学性质综合作用的结果,是煤岩体弹性势能及瓦斯内能综合作用转化为煤岩体动能的结果^[21]。蔡成功^[22] 利用自行研制的试验装置,研究了瓦斯压力、煤体强度及三向应力对突出强度的影响,并根据试验结果对数据进行拟合,建立了突出强度与瓦斯压力、煤体强度及三向应力的组合模型;而部分学者认为煤与瓦斯突出过程是一个近似恒温的过程^[23-24]。研究突出过程中煤体的能量耗散过程,可发现地应力引起的煤体弹性潜能使煤体破碎,仅为突出创造条件,而决定煤与瓦斯是否突出的关键因素是瓦斯膨胀能^[25-26]。从岩石破裂过程分析,也可发现突出事故是地应力、煤体力学性质及瓦斯压力综合作用的结果,且不管是延期突出还是瞬时突出,均先后经历 4 个阶段,即应力集中阶段、开采扰动诱发煤岩破裂阶段、瓦斯压力驱动裂隙扩展阶段及突出阶段^[27]。

通过数值分析研究断层活化诱导煤与瓦斯突出的作用机理,发现煤与瓦斯突出是开采扰动、瓦斯压力及地应力共同作用的结果,且扰动应力是诱发断层活化、使煤岩体破裂,为瓦斯运移创造运输通道、产生煤与瓦斯突出的主要原因^[28]。同时还发现在有气源补充条件下,突出过程中瓦斯压力变化呈 U 形状,且煤体初始瓦斯压力、地应力及渗透率越大,瓦斯压力在突出过程中变化越快^[29]。用颗粒

法从微观角度研究煤与瓦斯突出的细观机理^[30],发现突出过程中煤岩体形成的裂纹分为拉裂纹及剪切裂纹,其中拉裂纹扩展到煤岩体深部,而剪切裂纹仅集中在突出前端部位。在突出过程中,裂纹数量在短时间内急剧上升,而后逐渐趋于平缓,且由于煤岩体抗拉强度远小于抗剪强度,致使突出中产生的裂纹以拉裂纹为主,如图2所示^[30]。在高瓦斯压力条件下,拉裂纹与剪切裂纹的延伸深度基本一致,但瓦斯压力较小时,拉裂纹延伸深度较深,剪切裂纹则主要集中在突出前端;同时不管瓦斯压力多大,突出完成后的裂纹总数变化不大,但达到最大裂纹数所需时间差异较大。当瓦斯压力较大时,裂纹数达到最大值所需时间较短,如图3所示^[30]。

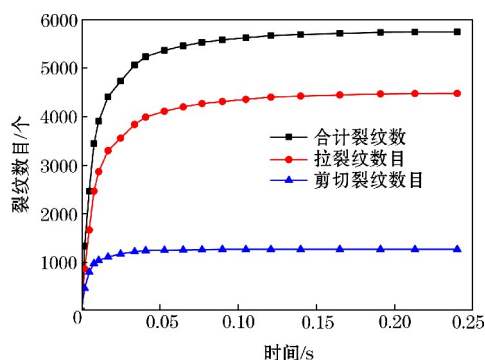


图2 微裂纹数目随时间变化曲线

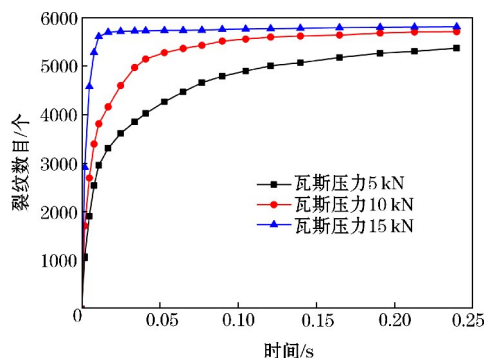


图3 不同瓦斯压力下总裂纹数目随时间变化曲线

研究发现,突出所需最小瓦斯压力与地应力呈反向线性关系,即地应力越大,诱导突出所需最小瓦斯压力越小。高应力条件下,突出前期煤体受剪切应力及拉应力的混合作用;低应力条件下,突出前期煤体则主要受拉应力作用。在突出过程中,地应力作用使煤体以楔形破坏发展,瓦斯压力作用使煤体以弧形破坏发展,突出洞口的大小与形状则由瓦斯压力与地应力共同决定^[31]。当瓦斯压力或轴向应力较大时,煤体强度较低,更容易发生突出事

故,且突出强度更高;相比煤体强度及轴向应力,瓦斯压力对突出强度的影响更大^[32]。

通过分析以上学者的研究成果可以发现,在准备至发动前期阶段地应力起主导作用,而在发动后期至发展阶段瓦斯起主导作用;地应力及煤体强度是突出强度的决定性因素,而瓦斯压力则是突出的必要条件,并非突出强度的决定性因素。因此,认为煤与瓦斯突出是煤体内高压瓦斯、地应力、煤体物理力学性质、顶底板岩性及完整性等因素综合作用的结果。

2 煤与瓦斯突出主要影响因素

影响煤与瓦斯突出的因素很多,主要包括煤体瓦斯、地应力、煤层赋存状态、煤体物理力学性质、地质构造、顶底板完整性等6个方面。

2.1 煤体瓦斯

2.1.1 煤体瓦斯含量

煤体瓦斯含量是影响煤与瓦斯突出危险程度的重要因素。因此,以瓦斯含量作为变量,研究突出过程具有重要意义。由于氮气、氦气、二氧化碳和甲烷的吸附性存在差异,故可利用以上气体对煤与瓦斯突出试验装置充入等量气体,模拟瓦斯含量对突出强度的影响。而突出煤粉质量、煤粉平均粒径以及煤粉瞬时速度等指标可反映突出强度大小。基于此,王汉鹏等^[33]研究发现,瓦斯含量越多,突出煤粉质量及瞬时速度越大,而突出煤粉平均粒径则越小,说明瓦斯含量越多,煤体发生突出的危险性越大,且突出强度越大。通过收集中梁山煤矿的实测数据,也证明此结论合理^[34]。

2.1.2 煤体瓦斯压力

研究发现煤与瓦斯突出发生与否存在一个瓦斯压力阈值,这个阈值一般介于0.5~0.75 MPa之间,当瓦斯压力超过这个阈值之后,突出强度随瓦斯压力增大而增强,且突出后煤体粒度随瓦斯压力增大而减小^[35-36]。

当瓦斯压力较小时,煤体发生塑性破坏区域随瓦斯排放时间的增加而变化不大,而当瓦斯压力较大时,煤体发生塑性破坏区域随瓦斯排放时间的增加而增大,如图4所示^[37]。同时煤体最大塑性应变随瓦斯排放时间的增加而减小,且变化幅度随瓦斯压力的增加而增大。冲击力峰值在巷道前端(临近突出面)受瓦斯压力影响较小,但在巷道中段出现突出过程中的最大值,且瓦斯压力对冲击力的影响

幅度在此段最大,但并非呈正相关关系;在巷道末端(远离突出面)瓦斯压力对冲击力峰值影响较大,呈正相关关系,即在巷道末端冲击力峰值随瓦斯压力的增大而增大,如图5所示^[38]。

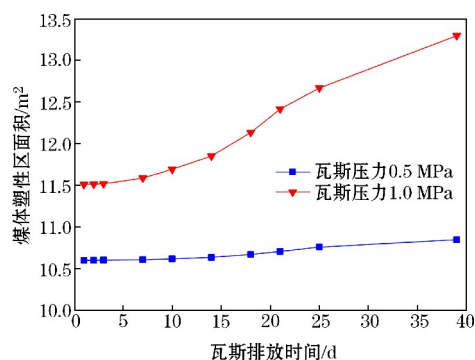


图4 不同瓦斯压力煤体塑性破坏区与瓦斯排放时间关系

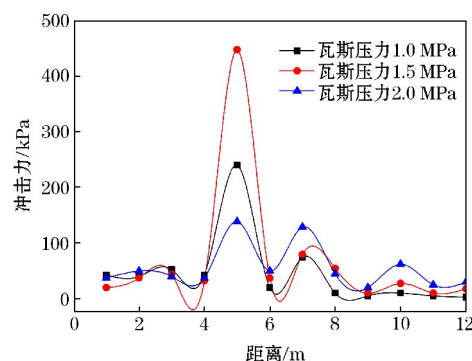


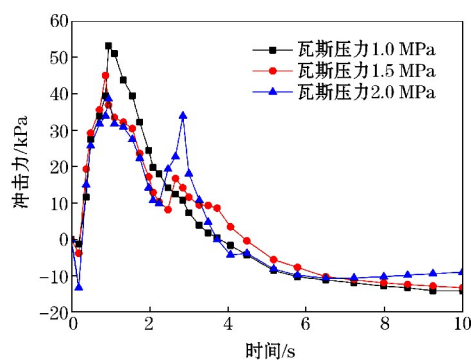
图5 不同瓦斯压力下巷道中各测点冲击力峰值分布

在不同瓦斯压力作用下,煤与瓦斯突出后,距突出面不同位置处的突出冲击力随时间的变化规律如图6所示^[38]。从图6可以看出,当瓦斯压力较小,冲击力在短时间内迅速达到峰值,而后逐渐减小;而当瓦斯压力较大时,冲击力在短时间内会先后出现两个峰值,且第二个峰值小于第一个峰值,而后随突出继续发展而逐渐减小。出现第二个峰值的原因是突出过程中煤体内部因高压瓦斯引起第一次突出后产生新的弱面,并在新的弱面处发生二次突出。说明瓦斯压力较小时,煤体仅产生一次突出,甚至不发生突出;瓦斯压力较大时,煤体将产生2次甚至多次突出,从而在冲击力曲线上呈现两个甚至多个峰值。同时,也说明煤与瓦斯突出过程并非单纯的一次性突出,而是随着瓦斯压力增大而产生的复合性突出。

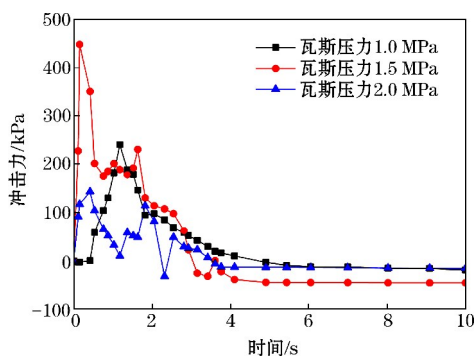
2.2 地应力

众所周知,地应力是影响煤与瓦斯突出的关键因素之一,研究突出事故必然离不开研究地应力。

苏联学者加卢什科认为水平应力对突出具有重要影响。当水平应力较小时,不会发生煤与瓦斯突出;而当水平应力较大,远大于垂直应力时,则突出危险性较大^[39]。朱兴珊等^[40]通过诸多实测数据,发现突出危险性较大区域内煤层及围岩的水平应力远超其自重应力,且突出强度随水平应力的增加而增强。



(a) 距离突出口 2944 mm



(b) 距离突出口 4944 mm

图6 不同瓦斯压力下突出冲击力随时间变化曲线

研究发现水平应力及垂直应力均与煤体突出距离、突出强度呈正相关关系,但不是呈线性增长关系,而是幂指数增长关系^[41]。即随着水平应力及垂直应力增大,煤体突出距离增大、突出强度增强。说明煤与瓦斯突出强度随地应力的增加而增强^[42]。

2.3 煤层赋存状态

2.3.1 煤层埋藏深度

随着煤层埋深增加,瓦斯压力、地应力及瓦斯向地表运移距离随之增加,使煤层及围岩透气性变差,煤层在长期地质演化过程中对瓦斯的封存能力增强,从而使煤层瓦斯含量增加^[43]。同时地温也随着埋深增加而升高,且随着温度升高,瓦斯分子逐渐活跃,继而降低瓦斯的黏度系数,使瓦斯越容易从煤体中解吸出来,增加瓦斯含量及压力^[44]。因此,突出强度随煤层埋藏深度的增加而增加,且增

加幅度随埋深的增加而减小,而产生突出所需的临界瓦斯压力则随埋深的增加而减小,如图7所示^[45]。从图中还可看出煤与瓦斯突出强度的变化趋势,存在一个分界深度(1700 m),当煤层埋深小于1700 m时,突出强度变化剧烈,处于快速增长阶段;而当煤层埋深大于1700 m后,突出强度变化缓和,处于缓慢增长阶段。研究还发现,突出发生后的持续时间、冲击力峰值均随煤层埋深的增加而增大^[46]。

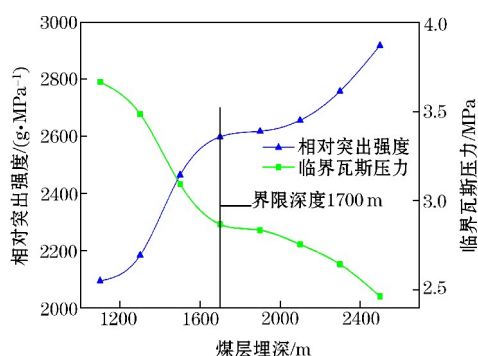


图7 突出强度及临界瓦斯压力随埋深变化曲线

2.3.2 煤层厚度

瓦斯赋存在煤层中,煤层厚度越大,瓦斯生成量越大,当具有良好的瓦斯保存条件时,厚煤带一般也是瓦斯富集带^[47]。煤层厚度及其变化对突出危险程度有影响,其主要原因是煤层厚度大小与瓦斯生成量有关。厚煤带为瓦斯的储集提供了场所,绝对瓦斯涌出量也与煤厚呈明显的正比例变化。煤厚变化造成了瓦斯分带上的差异,变化的梯度在一定程度上反映了瓦斯的变化梯度,造成了瓦斯突出点的不均衡性。可见在其他条件不变的情况下,煤层厚度越厚,瓦斯涌出量越多,继而产生强度更大的突出事故^[48]。

2.4 煤体物理力学性质

2.4.1 煤体瓦斯吸附/解吸特性

煤体表面瓦斯解吸特性是造成煤体瓦斯涌出的根本原因,也可表现为煤体对瓦斯的吸附特性。当煤体吸附能力很强时,即便瓦斯含量较大,煤体向采掘空间涌出的瓦斯量也不多;反之,当煤体吸附能力很差时,即便瓦斯含量不高,煤体也会向采掘空间涌出大量瓦斯。这就造成煤体本拥有较多的瓦斯含量,却因为煤体本身对瓦斯吸附特性的不同,使得采掘空间内的瓦斯涌出产生显著差异。研究表明,在其他条件保持一定时,煤与瓦斯突出强度随煤体对瓦斯解吸能力的增大而增强^[49-50]。

2.4.2 煤体渗透性

在同一地质构造单元,煤体可近似地认为是一多孔介质,不仅可以吸附大量瓦斯,也可成为瓦斯流通的通道,帮助瓦斯从高应力区向低应力区流动,这种流动现象称为瓦斯在煤体内的渗透现象。矿井瓦斯涌出得以持续、近乎无限向采掘空间涌入,其主要原因在于煤体的渗透性。原始煤体经过长期的地质演化后,其瓦斯含量与压力是相对平衡的,但煤矿的采掘活动改变了这种相对平衡。暴露煤体表面的瓦斯压力与井下空间连通,造成瓦斯在内部煤体与暴露煤体间产生压力差,致使瓦斯向采掘空间涌入,继而使煤体内瓦斯流失。一般来说,煤体渗透性越好,瓦斯越易流失,煤体内瓦斯含量越低,反之则瓦斯含量越大。正如2.1.1节所述,煤体瓦斯含量越大,发生突出的可能性越大,且突出强度也越大,因此,煤体渗透性越好,发生突出的可能性越小,突出强度越弱。

通过数值模拟研究发现,当煤体透气性较小时,煤与瓦斯突出所需启动压力梯度较小,瓦斯扩散速度较慢,突出破坏以拉伸破坏为主;当煤体透气性较大时,突出所需启动压力梯度相对较大,瓦斯扩散速度较快,突出破坏以剪切破坏为主。而且随着煤体透气性的增大,煤体破坏程度降低,产生突出的时间延迟^[51]。

2.4.3 煤体煤化程度

煤经变质作用在煤层内产生瓦斯,且煤的变质程度决定了瓦斯生成量的大小,一般来说,煤的变质程度越高,煤层瓦斯的生成量越大^[52]。而煤的变质程度可用煤工业指标中的挥发分衡量,一般来说煤变质程度与挥发分成反相关关系,即煤的挥发分越低,煤变质程度越高。而煤化程度越高,其在煤质变化过程中生成的瓦斯越多,煤体内部的瓦斯潜能也就越大。煤体变质程度越高,突出过程中瓦斯的初始放散速度越快^[53],瓦斯初始放散速度的快慢表征了突出强度的大小,说明煤体变质程度越高,煤与瓦斯突出强度越大。

2.5 地质构造

2.5.1 褶皱构造

褶皱构造是岩层长期受地壳运动挤压作用而发生塑性变形后形成的波状弯曲的构造形态,由一系列向、背斜构成。一般来说,煤层所受挤压作用主要来自水平方向,使向、背斜翼部受力大于轴部受力,煤层逐渐从翼部向轴部转移,故向、背斜轴部

煤层厚度大于翼部^[54-55]。正如 2.3.2 节所述,煤层厚度越厚,瓦斯生成量越多,因此向、背斜轴部瓦斯生成量大于翼部。

一般来说,向斜轴部受压力影响,相比于两翼形成致密性结构,瓦斯不易逸散,易于保存;两翼则在外力作用下产生张拉裂隙,有利于瓦斯排放,不易保存^[56-57]。而背斜轴部地层剥蚀严重,产生较多的张拉裂隙,瓦斯封存能力较弱,易于排放,瓦斯含量较低;两翼地层则破坏较轻,裂隙发育相对较差,有利于瓦斯保存。研究发现向、背斜轴部煤的变质程度较两翼更高,且向斜轴部煤变质程度高于背斜,使向斜轴部瓦斯含量及压力大于背斜轴部。因此,相比背斜,向斜构造更易发生煤与瓦斯突出事故^[58]。

2.5.2 断裂构造

岩层在地壳运动挤压作用下会发生塑性变形,当挤压力过大超过岩体极限强度时,岩体破裂,使岩层形成断裂面,表现出不连续性,以此形成的构造形态称为断裂构造,其中断层便是典型的断裂构造。断层根据断面开闭程度,分为封闭性断层及开放性断层。一般来说,封闭性断层因其断裂不够发育,贯通性较差,对瓦斯排放起着阻隔作用,有利于瓦斯保存,且离断层越近,瓦斯含量越高;而开放性断层因其断裂发育较好,为瓦斯逸散提供了排放通道,有利于瓦斯排放,且离断层越近,瓦斯含量越低^[59-60]。通过对某矿区断层带煤厚及瓦斯含量进行测定,发现结果与上述结论一致。

根据该矿区采样试验结果,发现封闭性正断层附近煤的变质程度总体上高于离断层较远处的变质程度,且在一定范围内,离断层越远,煤变质程度越低;说明封闭性正断层附近的瓦斯生成量较远离断层处更多。而且研究还发现断层影响带内应力比较集中,增加了突出的危险性^[28];因此,断层影响带相比非断层带更易发生突出事故。

2.6 其他影响因素

通常情况下,地下水活跃的地区,煤层瓦斯含量较少。尹光志等^[61]发现煤体含水率越高,突出煤量越少(非线性关系),突出强度越小,突出产生的喷射距离越小,发生突出的可能性越小,且含水率与突出强度呈二次函数关系。煤与瓦斯突出会产生一系列声发射事件,而声发射事件能量表征了煤体破坏时释放的能量大小,那么可用声发射事件总能量间接反映突出强度。研究发现,声发射事件总

能量随煤体含水率的增加而减小。当含水率较低时,声发射事件总能量增长较快,在短时间内即可达到最大值;而当含水率较高时,声发射事件总能量则增长缓慢,需要更多的时间才能达到最大值,如图 8 所示^[62]。

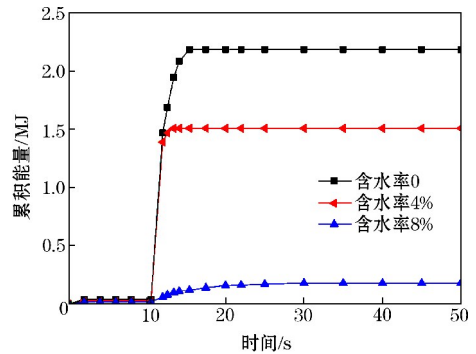


图 8 不同含水率下声发射事件总能量随时间变化曲线

研究发现,在相同断裂韧度条件下,煤体颗粒越小,发生突出所需的最小瓦斯压力越大。一般粒径为 1 mm 左右的煤体颗粒发生突出所需的最小瓦斯压力在 0.01~0.98 MPa 之间,且随断裂韧度的增加而增大;而粒径小于 100 μm 的煤体颗粒则需较高的瓦斯压力才能产生突出。且当煤体粒径相同时,发生突出所需的最小瓦斯压力也随断裂韧度的增加而增大,如图 9 所示^[63]。说明煤体粒径越小,发生突出的可能性相对越小,但突出危险程度越高,突出强度更大^[64]。

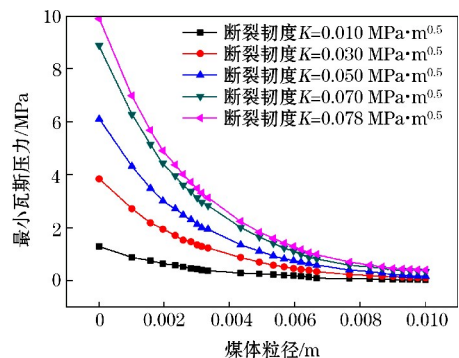


图 9 不同粒径煤体突出所需最小瓦斯压力

事实表明,石门揭煤过程中,因煤体暴露面不同会产生不同程度的突出事故,说明突出口径大小也是影响突出强度的影响因素。研究发现,突出口径影响了破裂煤体中的瓦斯逸散,使瓦斯压力梯度变化不同,从而导致不同程度的突出。一般来说,突出口径越小,突出持续时间越长,瓦斯压力降低越慢,对煤体的破坏越小,从而产生强度更低的突

出^[65];突出口径越大,煤体越易破裂而发生煤与瓦斯突出事故。

煤层顶底板完整性因直接影响瓦斯逸散过程,对瓦斯赋存具有较大影响,故而对煤与瓦斯突出影响较大。煤层顶底板对瓦斯逸散的主要影响指标为顶底板围岩的渗透性。一般来说,顶底板围岩完整性越差、贯通性越好,其渗透性越好,继而为瓦斯排放提供较好的逸散通道,故赋存于煤层内的瓦斯含量较少,反之则吸附在煤层上的瓦斯含量较多^[66-67]。正如 2.1.1 节及 2.4.2 节所述,煤体渗透性越好,瓦斯含量越低,发生突出的可能性越小,突出强度越弱。因此,煤层顶底板完整性越好,渗透性越低,当煤体被揭露时,发生突出的可能性越大,且突出强度越强。

3 讨论

3.1 突出机理及研究手段

根据收集的较为权威的期刊文献^[10-32, 68-88],对于煤与瓦斯突出机理的研究主要有瓦斯主导作用假说、地应力主导作用假说及综合作用假说。如图 10 所示,瓦斯主导作用假说占 8.6%,地应力主导作用假说占 36.2%,综合作用假说占 55.2%。可见综合作用假说占据主导地位,更受广大研究学者所认可。

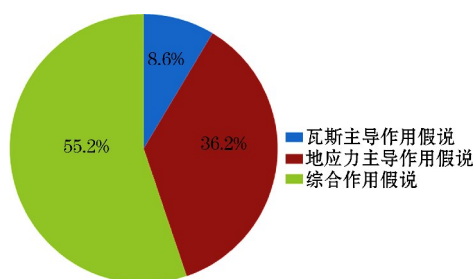


图 10 突出机理假说分布

通过分析以上 3 种假说可知,瓦斯主导作用假说及地应力主导作用假说只是在强调瓦斯或地应力在煤与瓦斯突出过程中所起的主导作用,并没有否认煤体物理力学性质、顶底板岩性及完整性等其他因素对突出的影响及各因素间的相互影响。例如瓦斯主导作用假说认为,当“瓦斯包”被采掘工作揭露时,高压瓦斯便将松软煤体破碎并抛出,从而产生突出现象。仔细分析这一观点不难发现,当采掘工作揭露“瓦斯包”时,其地应力必然发生变化,只是该假说认为瓦斯在突出中的作用最大。再如

地应力主导作用假说认为,地应力对瓦斯含量、瓦斯压力、煤体强度及瓦斯运移有较大影响,高应力状态增加了瓦斯含量及压力,降低了煤体强度,使瓦斯突出阻力减小,继而产生煤与瓦斯突出。该假说也承认了瓦斯与地应力的相互作用,只是强调地应力是突出产生的核心主导因素。而综合作用假说则将各因素的相互作用表达出来,认为突出是高压瓦斯、地应力、煤体物理力学性质、顶底板岩性及完整性等因素综合作用的结果,并没有指出哪种因素在突出中的贡献更大。

通过分析以上 3 种假说可知,各假说都是围绕煤与瓦斯突出产生的原因、条件及发生、发展过程开展学术研究。经过前人的大量研究,可以大致将突出机理阐述如下:采掘作业使地应力转移并集中,继而使煤体产生损伤→煤体解吸瓦斯使裂纹扩张→高压瓦斯通过裂隙向低压侧采掘空间排放→高压瓦斯携带煤体向低压侧采掘空间喷出→突出壁产生初始孔洞→孔洞周围煤体粉化→孔洞周围煤体产生流变变形→孔洞由小变大、由浅入深逐渐破坏→突出停止。

在综合作用假说中,学者们的研究手段可分为模型试验、数值模拟及理论分析三大类,部分学者则采用试验及数值模拟相结合的方式开展煤与瓦斯突出机理研究。其中模型试验占 59.4%,数值模拟占 25%,理论分析占 9.4%,试验及数值模拟相结合占 6.2%,如图 11 所示。

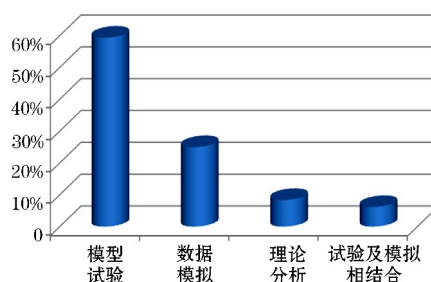


图 11 综合作用假说中研究方法分布

由图 11 可知,学者们更喜爱采用模型试验方式对煤与瓦斯突出机理开展研究,这是因为计算机技术在前期不够发达(还未进入工程技术模拟),且模型试验可以更为直观地还原现场情况,得出待研究的成果。但模型试验毕竟是按一定比例还原现场,必然会存在尺寸效应,其结果也不能完全还原真实数据。随着计算机技术的不断发展,基于理论分析的数值模拟也迅速进入煤与瓦斯突出研究工作中,

这也是仅次于模型试验的研究手段。这种手段只需要根据现场实际情况,对参数进行设置后即可建模以获得待研究的成果,且该手段还可直观地反映应力场、瓦斯分布的变化,让研究者更加通俗地明白突出过程。但现场情况复杂多变,并不能通过修正系数而完美复制现场,这必然导致模拟结果与实际情况有一定的出入。基于以上研究手段的优缺点,少部分学者则采用模型试验与数值模拟相结合的方式对煤与瓦斯突出开展研究,这种方式虽增加了较多的工作量,但可将试验结果与模拟结果相互验证,以提高研究成果的可靠度,是一种比较科学合理的研究手段。

3.2 突出影响因素

通过分析国内外学者的研究成果,可以发现对煤与瓦斯突出产生影响的因素主要包括煤体瓦斯、地应力、煤层赋存状态、煤体物理力学性质、地质构造、顶底板完整性 6 个方面,如图 12 所示。从图 12 可以看出,6 方面影响因素可细分为 14 种影响因素。其中煤体瓦斯包括瓦斯含量及压力,地应力包括自重应力、构造应力及扰动应力,煤层赋存状态包括煤层厚度、倾角及埋藏深度,煤体物理力学性

质包括煤体渗透性、煤化程度及瓦斯吸附/解吸特性,地质构造包括褶皱构造及断裂构造,除此之外煤体粒径、含水率及突出口径也会影响煤与瓦斯突出。

通过总结前人的研究成果可以发现,在诸多影响因素中,瓦斯含量及压力、构造应力、地质构造、煤层厚度及埋藏深度等因素被研究较多,而煤体渗透性、煤化程度、煤体瓦斯吸附/解吸特性、煤体粒径及含水率、突出口径等因素则相对研究较少,尤其是煤体含水率研究甚少。可见研究学者们对影响程度较高的因子研究较多,而对影响程度相对较小的因子则研究较少。虽然煤与瓦斯突出影响因素较多,但几乎没有研究学者将众多影响因素放在一起开展权重分析,仅有少部分学者对部分影响因素开展了敏感性分析。分析前人的研究成果可知,突出强度随瓦斯含量及压力、地应力、煤层埋深及厚度、煤体解吸能力、煤化程度增加而增强,而随着渗透率的增大而减弱。此外,突出在构造带更易发生,且强度更强;相比背斜,向斜构造更易发生煤与瓦斯突出事故。

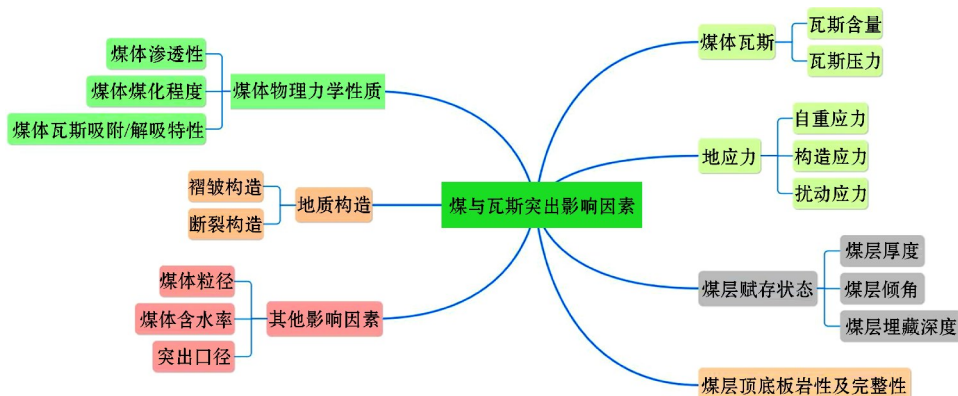


图 12 煤与瓦斯突出影响因素结构

3.3 存在的不足及展望

国内外学者通过理论分析、模型试验、数值模拟、现场测量等手段对煤与瓦斯突出进行了诸多深入研究,揭示了煤与瓦斯突出的突出机理,找出了对突出造成影响的诸多影响因素,并获得了各影响因素对突出的影响方向及程度,取得了非常优秀的成绩,但仍存在一些不足之处。

(1) 针对突出机理,学者们虽更认同综合作用假说,但在实际研究中更多是改变某一因素,固定其他因素来进行数值模拟或试验研究,而很少将诸

多影响因素考虑为一个“整体”,开展耦合作用分析。建议今后重点开展多因素耦合作用下的突出机理研究,并分析各因素间的相互作用关系,结合敏感性分析找出各因素对突出影响的主次关系,为防治措施提供参考。

(2) 对突出过程的研究以宏观研究为主,通过宏观现象定性分析突出的启动、发展、停止阶段,而少有学者对微观现象进行深入分析,相比宏观研究,微观分析更能反映突出的发生、发展过程。建议今后从微观角度研究突出过程,分析煤岩破碎发

展历程,找出突出启动时各影响因素的临界条件。

(3) 相比非构造煤,构造煤发生突出的可能性及危险性更强^[89],而目前对构造煤的研究相对较少且不够深入,未能分析构造煤体的孔隙结构,建议今后对构造煤开展宏细观研究,分析其孔隙结构特征及力学性质,研究其低渗透率的形成机制,完善构造煤瓦斯吸附/解吸性质与孔隙结构的关系。

(4) 低参数条件下也时有发生煤与瓦斯突出事故^[90],这种条件下的发生条件及判别依据尚不明确,且该类研究更是少之又少。建议今后对此类突出开展重点研究,查明此类突出的地质条件、突出条件以及宏观判别依据,不可忽视低参数条件下的突出事故。

(5) 对深部煤层开采利用产生煤与瓦斯突出的研究较少。根据我国煤层赋存特征及开采利用情况,深部开采煤炭资源是必然趋势。随着采深的增加,地应力、温度、瓦斯含量及压力也会增加,且地质情况更加复杂,发生煤与瓦斯突出的可能性及危险性更大。建议今后对深部煤层的煤与瓦斯突出进行深入研究。

4 结论

(1) 针对煤与瓦斯突出机理,国内外学者对综合作用假说更加认可,在此基础上对突出机理的研究更多、更深入,认为突出是煤体内高压瓦斯、地应力、煤体本身物理力学性质、顶底板完整性等因素综合作用的结果。

(2) 影响煤与瓦斯突出的主要因素包括煤体瓦斯(瓦斯含量及压力)、地应力、煤层赋存状态(煤层埋深及厚度)、煤体物理力学性质(煤体解吸能力、渗透力及煤化程度)、地质构造(褶皱构造及断裂构造)、顶底板完整性。其中突出强度随着瓦斯含量及压力、地应力、煤层埋深及厚度、煤体解吸能力、煤化程度的增加而增强,随着渗透率的增大而减弱;突出在构造带更易发生,且强度更强;相比背斜,向斜构造更易发生煤与瓦斯突出事故。

参考文献:

[1] 李希建,林柏泉.煤与瓦斯突出机理研究现状及分析[J].煤田地质与勘探,2010,38(1):7-13.
[2] 刘业娇,袁亮,薛俊华,等.煤与瓦斯突出机理和模拟试验研究现状及发展趋势[J].工矿自动化,2018,44(2):43-50.
[3] 张超林,王恩元,王奕博,等.近20年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J].煤田地质与勘探,2021,49(4):134-141.

[4] 李绍泉.近距离煤层群煤与瓦斯突出机理及预警研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2013.
[5] 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.
[6] 于不凡.煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册(修订版)[M].北京:煤炭工业出版社,2005.
[7] 霍多特 B·B.煤与瓦斯突出[M].宋士钊,王佑安,译.北京:中国工业出版社,1998.
[8] 王健,王超,郑赞,等.煤与瓦斯突出机理探讨及其预报方法[J].煤矿安全,2016,47(6):173-177.
[9] 胡千庭,周世宁,周心权.煤与瓦斯突出过程的力学作用机理[J].煤炭学报,2008,33(12):1368-1372.
[10] 俞启香.矿井瓦斯防治[M].徐州:中国矿业大学出版社,1992.
[11] ODINTSEV V. Sudden outburst of coal and gas-failure of natural coal as a solution of methane in a solid substance[J]. Journal of Mining Science,1997,33(6):508-516.
[12] VALLIAPPAN S, ZHANG W. Numerical modelling of methane gas migration in dry coal seams[J]. International Journal For Numerical And Analytical Methods In Geomechanics, 1996,20(8):571-593.
[13] 王刚,程卫民,谢军,等.瓦斯含量在突出过程中的作用分析[J].煤炭学报,2011,36(3):429-434.
[14] 王刚,武猛猛,王海洋,等.基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(2):238-248.
[15] 韩军,张宏伟,宋卫华,等.煤与瓦斯突出矿区地应力场研究[J].岩石力学与工程学报,2008(增刊2):3852-3859.
[16] LITWINISZYN J. A model for the initiation of coal-gas outbursts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1985,22(1):39-46.
[17] PATERSON L. A model for outbursts in coal[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1986,23(4):327-332.
[18] ALEXEEV A D, REVVA V N, ALYSHEV N A, et al. True triaxial loading apparatus and its application to coal outburst prediction[J]. International Journal of Coal Geology, 2004,58(4):245-250.
[19] 姬鹏.低渗透断层煤与瓦斯突出的数值模拟[J].煤,2019,28(1):9-10+21.
[20] 尹永明,张兴凯,姜福兴,等.冲击型煤与瓦斯突出力学机制及危险性评价技术研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(4):801-809.
[21] 师皓宇,马念杰,许海涛.基于能量理论的煤与瓦斯突出机理探讨[J].中国安全生产科学技术,2019,15(1):88-92.
[22] 蔡成功.煤与瓦斯突出三维模拟实验研究[J].煤炭学报,2004(1):66-69.
[23] YIN G Z, JIANG C B, WANG J G, et al. A new experimental apparatus for coal and gas outburst simulation[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2016,49(5):2005-2013.
[24] 姜永东,郑权,刘浩,等.煤与瓦斯突出过程的能量分析[J].重

- 庆大学学报, 2013, 36(7): 98-101+120.
- [25] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(2): 173-178.
- [26] 熊阳涛, 黄滚, 罗甲渊, 等. 煤与瓦斯突出能量耗散理论分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 2): 3694-3702.
- [27] 徐涛, 唐春安, 宋力, 等. 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(10): 1667-1673.
- [28] 潘超. 采动影响下断层活化诱导煤与瓦斯突出机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [29] 罗小航. 基于煤与瓦斯突出物理模拟试验的数值模拟分析研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [30] 黄维新, 刘敦文, 夏明. 煤与瓦斯突出过程的细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(2): 429-436.
- [31] 朱立凯, 杨天鸿, 徐涛, 等. 煤与瓦斯突出过程中地应力、瓦斯压力作用机理探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(5): 1038-1044.
- [32] 王伟, 王汉鹏, 张冰, 等. 煤与瓦斯突出多因素影响规律与能量判据实验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(4): 582-590.
- [33] 王汉鹏, 张冰, 袁亮, 等. 吸附瓦斯含量对煤与瓦斯突出的影响与能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2449-2456.
- [34] 王刚, 武猛猛, 程卫民, 等. 煤与瓦斯突出能量条件及突出强度影响因素分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2974-2982.
- [35] 颜爱华, 徐涛. 煤与瓦斯突出的物理模拟和数值模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2008(9): 37-42.
- [36] 王维忠, 陶云奇, 许江, 等. 不同瓦斯压力条件下的煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 82-86.
- [37] 安丰华. 煤与瓦斯突出失稳孕育过程及数值模拟研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [38] 程亮, 许江, 周斌, 等. 不同瓦斯压力对煤与瓦斯突出两相流传播规律的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2619-2626.
- [39] GAIUSHENKO Л Я. The result of in-situ stress research in Warren-lvov and Donbass coal field[C]//The stress state of crustal. Translated by Information Room of Earthquake and Geology Team of National Earthquake Administration. Beijing: Seismological Press, 1978: 66-70.
- [40] 朱兴珊, 徐凤银. 论构造应力场及其演化对煤和瓦斯突出的主控作用[J]. 煤炭学报, 1994, 19(3): 304-313.
- [41] 唐巨鹏, 杨森林, 王亚林, 等. 地应力和瓦斯压力作用下深部煤与瓦斯突出试验[J]. 岩土力学, 2014, 35(10): 2769-2774.
- [42] 陈鲜展. 地应力对煤与瓦斯突出强度影响研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(7): 159-160.
- [43] 张春华, 刘泽功, 李尧斌, 等. 深部矿井煤与瓦斯突出特性数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(8): 49-52.
- [44] 杨森林. 深部矿井不同采深煤与瓦斯突出实验与数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2012.
- [45] 唐巨鹏, 任凌霄, 潘一山, 等. 高地应力条件煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(2): 113-121.
- [46] 唐巨鹏, 张昕, 潘一山, 等. 深部巷道煤与瓦斯突出及冲击演化特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1081-1092.
- [47] 许满贵, 王娇娇, 曹艳军, 等. 合阳煤矿瓦斯赋存特征及控制因素分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(2): 137-138.
- [48] 李树仁. 煤与瓦斯突出矿井采面瓦斯涌出特征及影响因素分析[J]. 煤炭技术, 2018, 37(9): 241-243.
- [49] 刘延保, 曹树刚, 李勇, 等. 煤体吸附瓦斯膨胀变形效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2484-2491.
- [50] 张遵国. 煤吸附/解吸变形特征及其影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [51] 段东, 唐春安, 高坤. 瓦斯突出过程中煤体渗透性作用机理研究[J]. 中国矿业, 2008, 17(11): 95-98.
- [52] 徐德宁. 构造变形对煤与瓦斯突出的控制作用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [53] 魏宗勇, 薛梦华, 胡宇航, 等. 煤的瓦斯放散特性多因素影响试验[J]. 煤矿安全, 2019, 50(9): 9-12.
- [54] 陈继福. 地质构造对煤层厚度影响研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(6): 80-82.
- [55] 刘程, 李向东, 杨守国. 地质构造对煤层厚度的影响研究[J]. 煤矿安全, 2008(5): 14-16.
- [56] 马东晓. 褶皱构造及其对瓦斯赋存控制规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2011.
- [57] 史南南. 阳泉新景煤矿褶皱构造发育规律及其对瓦斯赋存的控制[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [58] 韩军, 张宏伟, 霍丙杰. 向斜构造煤与瓦斯突出机理探讨[J]. 煤炭学报, 2008(8): 908-913.
- [59] 崔峥. 断层对矿井煤与瓦斯突出的影响分析[J]. 山西焦煤科技, 2020, 44(3): 14-16.
- [60] 李辉, 魏国营, 牛浩. 断层与瓦斯赋存分布规律的关系研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2014, 10(10): 131-136.
- [61] 尹光志, 赵洪宝, 许江, 等. 煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1674-1680.
- [62] 许江, 耿加波, 彭守建, 等. 不同含水率条件下煤与瓦斯突出的声发射特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1047-1054.
- [63] 马延崑. 基于煤体微结构和应力扰动特征的煤与瓦斯突出机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.
- [64] 许江, 刘东, 彭守建, 等. 煤样粒径对煤与瓦斯突出影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1231-1237.
- [65] 许江, 刘东, 彭守建, 等. 不同突出口径条件下煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 9-14.
- [66] 王国华, 冯光俊, 刘刚, 等. 东欢坨矿瓦斯地质特征及其控制因素分析[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2): 149-152.
- [67] 宋训东, 王平, 赵长闯. 新庄煤矿瓦斯地质单元划分与瓦斯防治[J]. 煤炭科技, 2022, 43(1): 78-82.
- [68] 秦恒洁, 魏建平, 李栋浩, 等. 煤与瓦斯突出过程中地应力作用机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(5): 933-942.
- [69] 段东, 唐春安, 李连崇, 等. 煤和瓦斯突出过程中地应力作用机理[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(9): 1326-1329.
- [70] 张超林, 王恩元, 王奕博, 等. 多功能煤与瓦斯突出模拟试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(5): 995-1007.

- [71] 许江,陶云奇,尹光志,等.煤与瓦斯突出模拟试验台的改进及应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(9):1804-1809.
- [72] 许江,陶云奇,尹光志,等.煤与瓦斯突出模拟试验台的研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2008(11):2354-2362.
- [73] 聂百胜,马延崑,孟筠青,等.中等尺度煤与瓦斯突出物理模拟装置研制与验证[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1218-1225.
- [74] 张超林,许江,王恩元,等.突出煤体破碎抛出及粒度分布规律试验研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):784-792.
- [75] 袁亮,王伟,王汉鹏,等.巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):205-214.
- [76] 许江,周斌,彭守建,等.基于热-流-固体参数演变的煤与瓦斯突出能量演化[J].煤炭学报,2020,45(1):213-222.
- [77] 卢义玉,彭子烨,夏彬伟,等.深部煤岩工程多功能物理模拟实验系统——煤与瓦斯突出模拟实验[J].煤炭学报,2020,45(增刊1):272-283.
- [78] TU Q Y, CHEN Y P, GUO P K, et al. Experimental study of coal and gas outbursts related to gas-enriched areas[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(9): 3769-3781.
- [79] 李术才,李清川,王汉鹏,等.大型真三维煤与瓦斯突出定量物理模拟试验系统研发[J].煤炭学报,2018,43(增刊1):121-129.
- [80] 文光才,孙海涛,曹偲,等.深井煤岩瓦斯动力灾害模拟实验系统[J].煤炭学报,2020,45(1):223-231.
- [81] 刘东,许江,尹光志,等.多场耦合煤矿动力灾害大型模拟试验系统研制与应用[J].岩石力学与工程学报,2013,32(5):966-975.
- [82] 刘杰.煤与瓦斯压出动力演化过程及机理实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
- [83] 欧建春,王恩元,马国强,等.煤与瓦斯突出过程煤体破裂演化规律[J].煤炭学报,2012,37(6):978-983.
- [84] MA Y K, HE X Q, LI Z H. A unified model with solid-fluid transition for coal and gas outburst and FEM-LIP modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 99(2):103349.
- [85] 徐涛,杨天鸿,唐春安,等.含瓦斯煤岩破裂过程固气耦合数值模拟[J].东北大学学报,2005(3):293-296.
- [86] 徐涛,郝天轩,唐春安,等.含瓦斯煤岩突出过程数值模拟[J].中国安全科学学报,2005(1):107-110.
- [87] XUE S, WANG Y C, XIE J, et al. A coupled approach to simulate initiation of outbursts of coal and gas-Model development[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(2/3):222-230.
- [88] ZHOU A T, WANG K, PENG T F, et al. Effects of fast-desorbed gas on the propagation characteristics of outburst shock waves and gas flows in underground roadways[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119:295-303.
- [89] 程远平,雷杨.构造煤和煤与瓦斯突出关系的研究[J].煤炭学报,2021,46(1):180-198.
- [90] 王恩元,张国锐,张超林,等.我国煤与瓦斯突出防治理论技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(1):297-322.