

文章编号: 1001-4888(2019)05-0833-08

含水率对煤与瓦斯突出能量转化影响试验^{*}

唐巨鹏, 孙胜杰, 丁佳会

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 为获得煤层注水对煤与瓦斯突出弱化的影响规律,以阜新孙家湾煤矿埋深 1100m 突出煤层为研究对象,建立了煤与瓦斯突出能量转化模型,并利用自主研发的煤与瓦斯突出模拟试验系统,进行了含水率对煤与瓦斯突出试验影响研究,分析了煤样含水率与临界孔隙压力、突出强度、能量转化率之间的关系。试验结果表明:孔隙压力是煤与瓦斯突出的主要动力源,煤样含水率与临界孔隙压力间呈指数关系递增。煤样含水率由 0% 增加到 3%、6% 时,相对突出强度分别降低了 5.67%、1.2%,随煤样含水率增加,相对突出强度与绝对突出强度将逐渐降低。瓦斯内能是影响煤体突出能量大小的关键因素,与突出孕育和突出激发过程均密切相关。随含水率增加,突出孕育能量和突出激发能量均线性增加,但突出能量转化率线性减小,不易发生煤与瓦斯突出。

关键词: 煤与瓦斯突出; 含水率; 能量转化率; 临界孔隙压力; 突出强度

中图分类号: TD713 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-069

0 引言

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的矿井瓦斯动力灾害,它的频繁发生严重制约了我国煤矿安全生产^[1-3]。煤层注水作为一种有效防突措施,其力学作用机理一直是国内外学者研究的重点。蒋承林^[4]根据“球壳失稳”理论,认为煤层注水防突的机理在于注水降低煤层中硬煤的强度,煤层塑性增加,导致整个煤层的力学强度降低,卸压带长度增加,瓦斯缓慢释放达到防突效果。王俊峰等^[5]通过研究发现煤体吸收水分后,既影响了煤体的物理力学性质,又影响了其对瓦斯吸附解吸的特性。李家卓等^[6]针对松软煤层工作面煤壁片帮难以控制的问题进行研究,结果表明松软煤天然含水率较低,且随着含水率的改变,抗压抗剪强度随之改变。张辉等^[7]研究饱水煤样拉伸破坏过程中能量耗散规律,对煤样在不同含水率状态下进行巴西劈裂试验,分析了不同含水率条件下煤样应力、强度及能量变化情况。李祥春等^[8]认为水分子与煤表面的作用力比较强,可降低煤对甲烷吸附量。李志强等^[9]通过试验手段研究煤层孔隙结构对煤层吸水的影响,表明煤层润湿角 $<42^\circ$,饱水率为 32% 时,易于煤层注水。石必明等^[10]通过试验研究了煤层含水率对煤的普氏系数和瓦斯放散初速度的影响,结果表明注水煤层瓦斯解吸速度降低,煤层突出危险性降低。蒋长宝等^[11]的研究也得出了突出危险性随煤体原始含水率升高而降低的结论。韦纯福等^[12]通过不同含水率下煤与瓦斯突出试验得到了含水率与相对突出强度之间的关系。许江等^[13]利用声发射测试分析系统监测了不同含水率条件下煤与瓦斯突出试验,对突出过程声发射事件及能量进行了分析。

^{*} 收稿日期: 2018-04-04; 修回日期: 2018-07-17

基金项目: 国家重点研发计划资助(2016YFC0600901); 国家自然科学基金面上项目(51374119); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2015028); 辽宁省自然科学基金项目(201602353)

通讯作者: 唐巨鹏(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事煤与瓦斯突出机理和实验研究。Email: jupengt@126.com

综合以上研究成果可以看出,煤层注水防治煤与瓦斯突出的作用机理主要体现在两个方面:一是煤层注水湿润可以改变煤的力学性质,降低煤体弹性,硬煤软化,塑性增加,掘进面前端的应力集中区向后移动,降低了煤体中应力集中系数;二是煤体湿润后,煤层透气性大幅度降低,煤层孔隙裂隙中的水对瓦斯运移起到明显阻碍作用,煤层中瓦斯涌出速度和瓦斯涌出量成倍降低。但现有文献尚未从能量转化角度分析煤层注水对煤与瓦斯突出弱化的影响。本文以前人煤与瓦斯突出理论及模拟试验为基础,利用自主研制的突出模拟试验装置,对典型高瓦斯矿——阜新孙家湾矿埋深 1100m 的突出煤层煤样进行了相似模拟试验,分析了含水率与临界孔隙压力、突出强度之间的关系,并从能量转化角度分析了含水率对煤与瓦斯突出的影响,所得结论对煤与瓦斯突出的防治具有一定参考意义。

1 煤与瓦斯突出能量分析

煤与瓦斯突出能量的来源主要为含瓦斯煤层中吸附态和游离态瓦斯所具有的瓦斯内能,以及煤体由于高地应力、强烈开采扰动和自重作用而变形破碎导致的弹性应变能。当煤层所受应力状态突然变化,瓦斯内能和弹性应变能爆发突然释放发生煤与瓦斯突出。遵从能量守恒定律,实际上煤与瓦斯突出能量释放也是能量转化过程。瓦斯内能、弹性应变能将转化为对破碎煤体抛出功、突出孔洞煤体破碎功及突出过程中其他形式能量损耗(包括突出过程与顶底板间涡旋摩擦耗能、巨量瓦斯解吸导致温度降低热能、破碎煤体间摩擦耗能等)。煤与瓦斯突出能量转化关系为^[14]

$$W_1 + W_2 = A_1 + A_2 + A_3 \quad (1)$$

式中, W_1 为含瓦斯煤层具有的瓦斯内能, J; W_2 为煤体在高地应力下所受弹性应变能, J; A_1 为突出煤体所受破碎功, J; A_2 为突出煤体所受抛出功, J; A_3 为射流突出过程中其他形式能量损耗, J。

1.1 突出孕育能量

依据热力学观点:当瓦斯发生膨胀时,因为煤体热容量较大,所以瓦斯解吸过程可视为等温过程。当发生突出时,瓦斯涌出同时伴随煤体破碎和抛出,使得补偿热量减少^[15]。由于煤与瓦斯突出具有瞬时性,整个瓦斯膨胀过程很短,可以将煤与瓦斯突出视为绝热过程,则参与突出过程做功的瓦斯内能可以表达为^[16]

$$W_1 = \frac{p_0 V_0}{n-1} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] \quad (2)$$

式中, W_1 为瓦斯内能, J; p_0 为突出后瓦斯压力,近似为大气压,取 $p_0 = 101325 \text{ Pa}$; 参与突出的吨煤瓦斯体积 $V_0 = \alpha \sqrt{p}$, m^3/t , 根据阜新孙家湾矿煤层瓦斯含量系数 $\alpha = 3.5 \text{ m}^3/(\text{t} \cdot \text{MPa}^{0.5})$, 可确定不同突出瓦斯压力下参与突出的瓦斯体积; n 为绝热系数, $n = 1.31$; p 为突出煤层的瓦斯压力, Pa, 在地应力加载条件不变时, p 受煤体水分含量影响,大小可通过试验测得。

鲜学福等^[17]指出,由于地应力作用而产生的能量以两种形式存在,即塑性应变能和弹性应变能,但仅有弹性应变能可释放出来对外做功,煤体弹性应变能可表达为

$$W_2 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (3)$$

式中, W_2 为煤体弹性应变能, kJ; E 为煤体的弹性模量, MPa; μ 为煤体的泊松比; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为煤体三个方向的主应力, MPa。

假设发生煤与瓦斯突出时巷道端部前方煤岩体为三向受压状态,其应力集中系数为 k ,同时考虑水平地质构造应力等的作用,可近似地认为三个主应力的数值相等^[18],即

$$\sigma_e = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = k\gamma H \quad (4)$$

式中, γ 为巷道上部岩层的平均容重, kN/m^3 ; H 为巷道上部岩层的厚度, m。

将(4)式代入(3)式,可以化简为

$$W_2 = \frac{3\sigma_e^2}{2E} (1 - 2\mu) \quad (5)$$

其中 σ_e 采用易俊等^[19]经试验推导的平均有效应力公式,即

$$\sigma_e = \frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) - \frac{1}{2}(p - p_0) \quad (6)$$

式中, σ_v 为轴压, MPa; σ_h 为围压, MPa。

突出孕育能量 W' 为

$$W' = W_1 + W_2 = \frac{p_0 V_0}{n-1} \left[\left(\frac{p}{p_0} \right)^{(n-1)/n} - 1 \right] + \frac{3 \left[\frac{1}{3}(\sigma_v + 2\sigma_h) - \frac{1}{2}(p - p_0) \right]^2}{2E} (1 - 2\mu) \quad (7)$$

1.2 突出激发能量

突出激发时会发生煤体材料强烈破碎。破碎时消耗能量与材料新增表面积及有效表面能成正比, 考虑到突出发生前煤体内部已经存在了大量裂隙面, 新增表面积难以计量, 根据对全国主要突出矿井 21 个煤样的冲击破碎试验, 得到发生突出时所需煤体破碎功为^[14]

$$A_1 = 5021.1 \rho_c f^{1.437} V_s \quad (8)$$

式中, f 为煤坚固系数; ρ_c 为煤密度, t/m^3 ; V_s 为煤体突出破碎带孔洞体积, m^3 。

根据质量、体积、密度三者之间的关系, 得

$$V_s = \frac{m_c}{\rho_c} \quad (9)$$

式中, m_c 为试验突出煤粉质量, t 。

式(8)可整理为

$$A_1 = 5021.1 f^{1.437} m_c \quad (10)$$

煤体突出动能即为破碎煤体抛出功

$$A_2 = \frac{1}{2} m_c v^2 \quad (11)$$

式中, m_c 为突出煤体质量, t ; v 为碎煤抛出速度, m/s 。

突出激发所做功 A' 为

$$A' = A_1 + A_2 = 5021.1 f^{1.437} m_c + \frac{1}{2} m_c v^2 \quad (12)$$

1.3 突出能量转化率

突出过程中其他能量损耗包括顶底板间涡旋摩擦耗能、巨量瓦斯解吸释放热能、破碎煤体间摩擦耗能以及与其他障碍物产生的震动、摩擦等能量, 此部分能量小且无法准确界定。因此, 可将煤与瓦斯突出过程视为瓦斯内能与煤体弹性应变能转化为煤体破碎功、抛出功的能量转化过程^[20], 其能量转化率为

$$C = \frac{A'}{W'} \times 100\% \quad (13)$$

式中, C 为突出能量转化率。

以上即煤与瓦斯突出过程中能量转化计算的理论依据。

2 试验装置及方案设计

2.1 试验装置及原理

基于实际煤与瓦斯突出情况, 自主设计研制了可同时改变轴压、围压和孔隙压的三轴突出模拟压力仪^[21](图 1)。

轴压、围压通过三轴压力仪顶端和两侧的活塞式油压缸体加载以模拟地应力作用, 孔隙压通过外接氮气瓶(出于试验安全考虑由氮气代替甲烷施加孔隙压)由数字压力表控制加载以模拟孔隙压力作用。试验装置中突出口设计成可自行打开, 即在突出口位置设计安装抗压强度 20MPa 突出弱面挡板(与煤

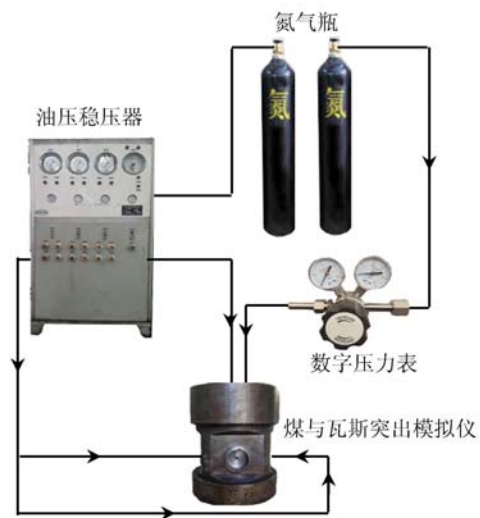


图 1 煤与瓦斯突出设备

Fig. 1 The equipment of coal and gas outburst

样抗压强度均值 22.85MPa 接近),用以模拟揭煤面,当含瓦斯受载煤体达到突出条件时,挡板将被破坏自行喷射而出,从而模拟揭煤过程中发生的煤与瓦斯突出^[22]。

2.2 试验方案设计

试验煤样取自辽宁阜新孙家湾煤矿突出煤层,该煤层为中富灰长焰煤,煤层相关参数如表 1。具体试验步骤如下:(1)将原煤试样人工粉碎,分别筛选得到 20~40 目、40~60 目、60~80 目、大于 80 目四种不同粒径的煤粉;(2)根据试验设定孔隙率计算所需煤粉质量,再根据粒径配比计算出不同目数煤粉质量;(3)将煤粉用烘干箱进行干燥处理,按水分质量占比,制作含水率为 0%、3%、6%、9% 的煤粉样品,逐次将不同含水率煤粉置于设备压力腔内,用 2000kN 压力机将其压制成型,稳压 30min,型煤试样不再取出;(4)将试验装置与加载系统连接后,对其密封性进行测试,确认无误后外接真空压缩机,预抽真空 24h,然后将氮气充入突出模拟装置,使型煤饱和吸附 24h;(5)连接伺服压力机,对型煤煤样按照设定围压、轴压进行加载,稳压 30min 以上,若不发生突出,逐级加载孔隙压,当孔隙压小于 2.0MPa 时,每级增加 0.2MPa,当孔隙压大于 2.0MPa 时,每级增加 0.1MPa,每级稳压 5min,直到发生突出为止,记录数据,如此,完成一次试验。分别对含水率为 0%、3%、6%、9% 的煤样进行煤与瓦斯突出试验,记录试验数据,分析并讨论试验结果。

表 1 煤层基本物理力学参数

Tab. 1 The basic parameters of coal seam

层厚/m	瓦斯含量/(m ³ /t)	含水率	孔隙率	抗压强度/MPa	视密度/(g/m ³)	真密度/(g/m ³)
1.2~2.2	15.1	3%	6.2%~11.3%	14.42~31.28	1.193~1.217	1.267

由相似理论^[18]得到原煤与型煤应力比值为 8.3。设定试验模拟深度为 1100m 突出煤层,地下垂直地应力 σ_v 为 25.8MPa,水平地应力 σ_h 为 11.08MPa,根据应力比值 8.3 得到试验应力加载条件为轴压 3.2MPa、围压 1.4MPa。

本文采用相似模拟的试验方法,重点模拟煤与瓦斯的突出情况,参考前人的研究结果,型煤能较好地达到煤与瓦斯共同突出的试验现象,试验考虑型煤试件,坚固系数 $f=0.2$,为使试件密度与原煤密度相同,设定型煤孔隙率为 11%。经计算煤粉质量取为 4620g,成型压力为 21.9MPa,压力稳定时间为 30min^[23]。四组试验煤粉配比均为 20~40 目占 50%、40~60 目和 60~80 目各占 20%、大于 80 目占 10%。

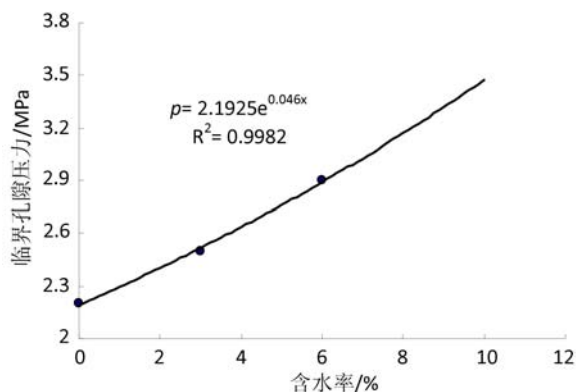


图 2 煤样含水率与临界孔隙压力拟合关系

Fig. 2 Curves of critical pore pressure and water content of coal sample

3 试验结果分析

试验分别模拟了含水率为 0%、3%、6%、9% 时煤与瓦斯突出情况,当煤样含水率为 9% 时,孔隙压增加到 3.0MPa,稳压 5min 后,仍未发生突出,考虑安全因素,未进行加压突出试验。文中定义绝对突出强度指突出煤体质量,相对突出强度指突出煤体质量占总煤体质量百分比^[24]。

3.1 临界孔隙压力分析

孔隙压力是煤与瓦斯突出的主要动力因素,试验重点考察了临界孔隙压力对煤与瓦斯突出的影响作用。煤样含水率为 0%、3%、6% 时,临界孔隙压力分别为 2.2MPa、2.5MPa、2.9MPa,

两者的拟合关系如图 2 所示。分析结果表明,临界孔隙压力与煤样含水率之间呈指数关系,其拟合关系式为: $p=2.1925e^{0.046x}$ (孙家湾矿井煤样平均含水率为 6.28%,为拟合关系的实用性 x 取值范围设定为 0~10%,单位为“%”),当煤样含水率由 0% 增加到 6% 时,临界孔隙压力分别增加了 13.6% 和 31.8%,

煤样含水率越高,发生突出时临界孔隙压力越大,越不容易满足突出条件。这是因为煤体中水分子占据了煤体基质内表面原本孔隙气体吸附的面积,使得吸附态气体减少,导致煤体中气体含量减少,根据理想气体状态方程: $PV=nRT$,吸附态气体体积减小,必然引起突出发生时临界孔隙压力升高。由竞争吸附理论可知,当煤体含水率增加时,煤体表面稳定吸附位被水分子占据,吸附态瓦斯解吸为游离态,随着含水量增多,吸附态瓦斯相应降低,导致突出时临界孔隙压力随之增大,不易发生煤与瓦斯突出。

3.2 突出强度分析

典型煤与瓦斯突出的一个重要特征是抛出大量煤,煤量可达到数吨至数万吨,现场突出强度以每次抛出煤体质量和瓦斯涌出量为指标,实验室环境下瓦斯涌出量难以检测,本次试验突出强度以抛出煤粉量为指标。考察不同含水率下煤与瓦斯突出强度,结果如图 3 所示。分析表明:当煤样含水率由 0%增加到 3%时,绝对突出强度由 2992g 降低到 2730g,相对突出强度由 64.76%降低到 59.09%,其降幅均为 5.67%;煤样含水率增加到 6%时,绝对突出强度为 2697g,相对突出强度降低到 58.4%,降幅为 1.2%;随着煤样含水率增加,突出强度逐渐降低,且突出强度降低幅度将趋于平缓。在实际生产中,随着掘进面推进,软煤逐渐被开采,卸压带长度减小,硬煤逐渐暴露,但煤层注水后,煤岩弹性和强度降低,塑性增强,煤质相对变软,应力集中区向深部转移,降低突出强度与突出危险性,这与周文杰^[25]的研究结果吻合。

3.3 煤样含水率对突出能量影响特征分析

依据煤与瓦斯突出能量理论,结合试验结果分别计算不同含水率条件下突出孕育阶段的瓦斯内能、煤体弹性应变能及突出后煤体的破碎功、抛出功,煤体抛出速度 $v=s/t$,假设突出时间为 1s,突出距离经测量分别为 16.3m、19.3m、24.5m,突出速度可求,能量计算结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,在模拟孙家湾矿井埋深 1100m 处真实应力条件下,计算得到的不同含水率下瓦斯内能高于煤体弹性应变能 3 个数量级,与王刚等^[20]的研究结果一致,表明孔隙压力是煤与瓦斯突出的主要动力源,是影响煤体突出能量大小的关键因素,与突出孕育和激发均密切相关,且随着含水率增加,瓦斯内能逐渐增加,突出所需能量增大,不易发生煤与瓦斯突出。煤体弹性应变能对煤体突出作用相对较弱,所以含水率对弹性应变能的影响在此不做详细研究。对突出孕育能量 W' 和突出激发能量 A' 分别进行拟合,如图 4 所示,其中突出孕育能量指突出孕育阶段瓦斯内能、煤体弹性应变能,突出激发能量指突出后煤体破碎功、抛出功。

表 2 不同含水率的煤与瓦斯突出能量表

Tab. 2 The outburst energy of different water content

含水率 /%	临界孔隙压力 /MPa	瓦斯内能 W_1 /J	煤体弹性 应变能 W_2 /J	破碎功 A_1 /J	抛出功 A_2 /J	突出能量 转化率 C	突出强度 /g
0	2.2	1.81×10^6	0.54×10^3	1.39×10^6	0.4×10^6	98.9%	2992
3	2.5	2.04×10^6	0.38×10^3	1.36×10^6	0.51×10^6	91.7%	2730
6	2.9	2.34×10^6	0.22×10^3	1.34×10^6	0.81×10^6	91.9%	2697

由图 4 分析表明:突出孕育能量、突出激发能量随含水率增加均呈线性关系增加,其拟合关系分别为: $W'=0.0883x+1.7983(R^2=0.9942)$, $A'=0.06x+1.7567(R^2=0.9067)$ 。煤样含水率增加对煤与瓦斯突出影响显著,随着煤样含水率增加,突出孕育所需能量越大,而转化为突出激发能量越小,说明煤

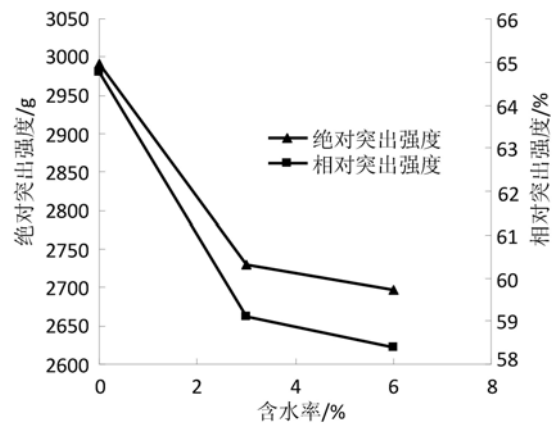


图 3 煤样含水率与突出强度的关系

Fig. 3 Curves of coal and outburst intensity and water content of coal sample

层注水后硬煤软化,增加煤层卸压带长度,瓦斯释放速度缓慢,为达到突出条件,则需积聚更多的能量。结合公式(13)及图 4 拟合结果计算不同含水率下煤与瓦斯突出能量转化率,计算结果如图 5 所示。

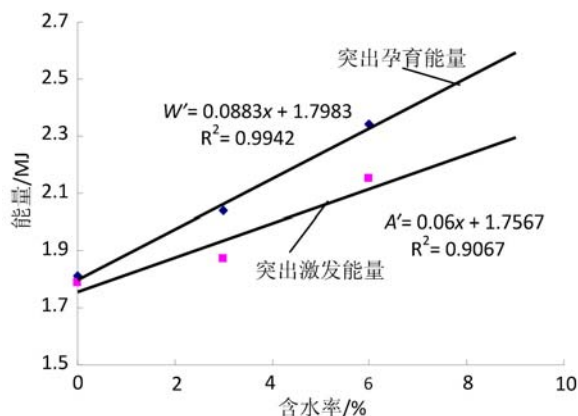


图 4 煤样含水率与突出能量拟合关系

Fig. 4 Relationship between water content of coal sample and outburst energy

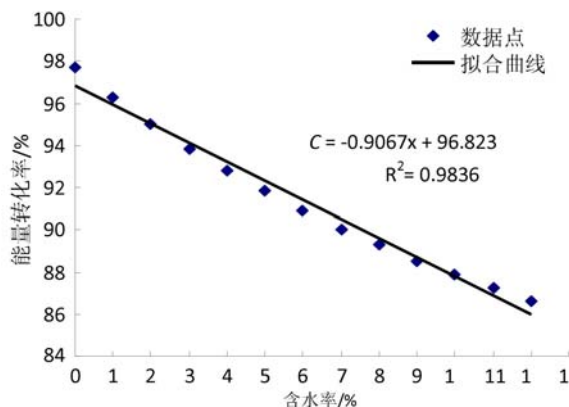


图 5 煤样含水率与突出能量转化率拟合关系

Fig. 5 The fitting relationship between coal sample water content and outburst energy conversion rate

从图 5 可以看出,突出能量转化率与煤样含水率呈线性关系递减,其拟合关系为: $C = -0.9067x + 96.823$ ($R^2 = 0.9836$)。随煤样含水率增大,突出能量转化率逐步减小,说明煤层注水后,煤体物理力学性质产生改变,突出孕育能量向突出激发能量转化率减小,煤与瓦斯突出更不容易产生,且发生突出后煤与瓦斯突出强度也随之减小,以上从能量转化角度分析了煤层注水对煤与瓦斯突出弱化作用。

以阜新孙家湾埋深 1100m 突出煤层为研究对象,定量分析含水率对煤与瓦斯突出过程中能量转化的影响规律。计算所取参数:气体绝热指数为 1.31,煤弹性模量为 1.0×10^9 Pa,泊松比为 0.3,垂直地应力 σ_v 为 25.8MPa,水平地应力 σ_h 为 11.08MPa,临界孔隙压力为 2.5MPa,突出后石门巷道的气体压力为 0.1MPa。经公式(7)计算突出孕育能量约为 2.04×10^6 J,若将含水率增加至 6%,则临界孔隙压力为 2.9MPa,提高了 16%,达到临界突出孕育能量 W' 约为 2.34×10^6 J,对比含水率 3%时,突出孕育能量增加了 14.7%,即相当于煤与瓦斯突出能量孕育门槛值增加,显著降低了煤与瓦斯突出危险。以上从能量转化角度对煤层注水防治煤与瓦斯突出效果进行了定量分析,所得结果可为该矿煤与瓦斯突出防治提供参考。

4 结论

(1) 煤与瓦斯突出临界孔隙压力与煤样含水率呈指数关系递增,含水率在 0~6%区间内,临界孔隙压力随煤样含水率增加而增大,因此含水率越大,煤体越不容易满足突出条件。

(2) 随着煤样含水率增加,煤岩弹性降低,塑性增强,煤质相对变软,临界孔隙压力增大,突出强度降低,突出危险性降低。

(3) 孔隙压力是煤与瓦斯突出过程中主要动力诱导因素,在煤体突出孕育能量中占主导地位,与突出孕育和激发均密切相关,且随着含水率增加,突出能量转化率越小,越不容易发生煤与瓦斯突出。

参考文献:

- [1] 程远平,刘洪永,赵伟. 我国煤与瓦斯突出事故现状及防治对策[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6):15-18 (CHENG Yuanping, LIU Hongyong, ZHAO Wei. Status and prevention countermeasures of coal and gas outburst accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6):15-18 (in Chinese))
- [2] 刘雪莉,游继军. 新型煤与瓦斯突出预测指标确定及应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(3):56-58, 63 (LIU XueLi, YOU Jijun. Determination and application on new coal and gas outburst prediction index[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(3):56-58, 63 (in Chinese))

- [3] 于不凡. 煤和瓦斯突出机制[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1985 (YU Bufan. The mechanism of coal and gas outburst[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1985 (in Chinese))
- [4] 蒋承林. 煤层注水的防突机理分析[J]. 湘潭工学院学报, 1999, 14(3):1-4 (JIANG Chenglin. Analysis of anti outburst mechanism of water injection in coal seam[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 1999, 14(3):1-4 (in Chinese))
- [5] 王俊峰, 张力, 赵东. 温度及含水率对切削原煤吸附瓦斯特性的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(12):2086-2091 (WANG Junfeng, ZHANG Li, ZHAO Dong. Effect of temperature and moisture on raw coal adsorption characteristics[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(12):2086-2091 (in Chinese))
- [6] 李家卓, 朱传奇, 刘万荣, 等. 极松软煤层工作面片帮力学机制分析与煤体加固实验研究[J]. 实验力学, 2017(4):559-567 (LI Jiazhao, ZHU Chuanqi, LIU Wangrong, et al. Experimental study of coal seam reinforcement and mechanism analysis of working surface rib spalling for very soft coal seam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017(4):559-567 (in Chinese))
- [7] 张辉, 程利兴, 李国盛. 基于巴西劈裂法的饱水煤样能量耗散特征研究[J]. 实验力学, 2016, 31(4):534-542 (ZHANG Hui, CHENG Lixing, LI Guosheng. Study of energy dissipation characteristic of saturated coal sample based on Brazil splitting method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(4):534-542 (in Chinese))
- [8] 李祥春, 聂百胜. 煤吸附水特性的研究[J]. 太原理工大学学报, 2006, 37(4):417-419 (LI Xiangchun, NIE Baisheng. Characteristics of coal adsorbed water[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(4):417-419 (in Chinese))
- [9] 李志强, 唐旭, 王兆丰. 煤层注水增湿区域防突试验与参数优化的渗流力学数值解[J]. 煤矿安全, 2012, 43(9):10-13 (LI Zhiqiang, TANG Xu, WANG Zhaofeng. Regional outburst prevention test by coal seam infusion humidification and permeation fluid mechanics numerical solution of parameter optimization[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(9):10-13 (in Chinese))
- [10] 石必明, 穆朝民. 突出煤层注水湿润防突试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(9):147-150 (SHI Biming, MU Chaomin. Experiment study on water injection and moist role for outburst prevention of outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(9):147-150 (in Chinese))
- [11] 蒋长宝, 尹光志, 许江, 等. 煤层原始含水率对煤与瓦斯突出危险程度的影响[J]. 重庆大学学报, 2014, 37(1):91-95 (JIANG Changbao, YIN Guangzhi, XU Jiang, et al. The effect of original moisture content in coal beds on coal and gas outburst risk level[J]. Journal of Chongqing University, 2014, 37(1):91-95 (in Chinese))
- [12] 韦纯福, 李化敏, 袁瑞甫. 含水率对煤与瓦斯突出强度影响的试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6):118-121 (WEI Chunfu, LI Huamin, YUAN Ruifu. Experimental study on intensity of coal and gas outburst effected by coal water content[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6):118-121 (in Chinese))
- [13] 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 (XU Jiang, GENG Jiabo, PENG Shoujian, et al. Acoustic emission characteristics of coal and gas outburst under different moisture contents[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(5):1047-1054 (in Chinese))
- [14] 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 (HU Qianting. Mechanical mechanism of coal and gas outburst[M]. Beijing: Science Press, 2013 (in Chinese))
- [15] 文光才, 周俊, 刘胜. 对突出做功的瓦斯内能的研究[J]. 矿业安全与环保, 2002, 29(1):1-3 (WEN Guangcai, ZHOU Jun, LIU Sheng. Study on the internal energy of gas with outstanding work[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2002, 29(1):1-3 (in Chinese))
- [16] 文光才. 煤与瓦斯突出能量的研究[J]. 矿业安全与环保, 2003, 30(6):1-3 (WEN Guangcai. Study of coal and gas outburst energy[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2003, 30(6):1-3 (in Chinese))
- [17] 鲜学福, 许江, 王宏图. 煤与瓦斯突出潜在危险区(带)预测[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2):39-46 (XIAN Xuefu, XU Jiang, WANG Hongtu. Predication of potential danger region(zone) of coal and gas outburst[J]. Engineering Science, 2001, 3(2):39-46 (in Chinese))
- [18] 谢雄刚. 石门揭煤过程煤与瓦斯突出的注液冻结防治理论及技术研究[D]. 中南大学, 2010:22-23 (XIE Xionggang. Study on the control theory and technology by injecting liquid and freezing of the coal and gas outburst during uncovering coal seam in cross-cut[D]. Central South University, 2010:22-23 (in Chinese))
- [19] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验研究 [J]. 中国矿业, 2007, 16(5):113-116 (YI Jun,

- JIANG Yongdong, XIAN Xuefu. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(5): 113–116 (in Chinese))
- [20] 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 (WANG Gang, WU Mengmeng, WANG Haiyang, et al. Sensitivity analysis of factors affecting coal and gas outburst based on a energy equilibrium model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 238–248 (in Chinese))
- [21] 唐巨鹏, 潘一山, 杨森林. 三维应力下煤与瓦斯突出模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 960–965 (TANG Jupeng, PAN Yishan, YANG Senlin. Experimental study of coal and gas outbursts under tridimensional stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 960–965 (in Chinese))
- [22] 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(10): 2769–2774 (TANG Jupeng, YANG Shenlin, WANG Yalin, et al. Experiment of coal and gas outbursts under ground stress and gas pressure in deep mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014(10): 2769–2774 (in Chinese))
- [23] 唐巨鹏. 煤层气赋存运移的核磁共振成像理论和实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2006 (TANG Jupeng. Theoretical and experimental research of storage and transport of coalbed methane by NMR technique[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2006 (in Chinese))
- [24] 程明俊. 煤渗透性能及煤与瓦斯突出过程模拟实验研究[D]. 重庆大学, 2008: 71–72 (CHENG Mingjie. research on the permeability of coal and the simulation of coal and gas outburst process [D]. Chongqing University, 2018: 71–72 (in Chinese))
- [25] 周文杰. 煤与瓦斯突出因素的模拟实验研究[D]. 重庆大学, 2012 (ZHOU Wenjie. Experimental study on the factors of coal and gas outburst[D]. University of Chongqing, 2012 (in Chinese))

Experimental study on the influence of water content on energy conversion of coal and gas outburst

TANG Ju-peng, SUN Sheng-jie, DING Jia-hui

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to obtain the influence of water content on coal and gas outburst, the outburst coal seam of burial depth 1100m in Sunjiawan mine of Fuxin was taken as the research object. The energy conversion model of coal and gas outburst was established, and the relationships between water content of coal samples and the critical pore pressure, the outburst intensity and the energy conversion rate were analyzed experimentally by using self-developed simulated test system for coal and gas outburst. The results show that the pore pressure is the main power source of coal and gas outburst, and the water content increases with the critical pore pressure exponentially. When the water content is increased from 0% to 3% and 6%, the relative protruding strength is decreased by 5.67% and 1.2% respectively. With increasing water content of coal samples, the absolute and relative outburst intensities decrease gradually. The gas internal energy turns out to be the key influential factor for the outburst energy, and is closely related to the outburst preparation and excitation processes. With the increase of water content, both energies of outburst preparation and excitation increase linearly, but the conversion rate of the outburst energy decreases linearly. Coal and gas outburst thus are not easy to occur.

Keywords: coal and gas outburst; water content; energy conversion rate; critical pore pressure; outburst intensity