

# 含瓦斯煤层的真实突出危险性及其判别试验

袁瑞甫<sup>1,2</sup>

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院 河南 焦作 454003;

2. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理省部共建国家重点实验室培育基地 河南 焦作 454003)

**摘要:** 由于含瓦斯煤层突出危险性的判别是预防煤与瓦斯突出的关键,因此通过分析煤层开挖现场的应力和瓦斯条件,提出了煤层“真实突出危险性”的定义,认为含瓦斯煤层如不存在瓦斯卸压带,在应力、煤层原始瓦斯压力作用下的稳定性代表了真实的突出危险性。利用 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 软件和相似模拟试验方法,以煤体强度为分组指标,研究了各组煤体在应力、瓦斯压力作用下的真实突出危险条件。煤层突出的瓦斯压力-应力临界条件可分为3个阶段:①在低水平应力范围内,应力阻碍突出,此阶段发生的突出主要以瓦斯压力作用为主,应力的增加对煤体起加固作用;②随着应力的增加,应力的作用由加固煤体转变为破坏煤体,应力加剧突出;③随着应力继续增加,突出发生的瓦斯压力降低并基本固定在某一水平,不再随应力增加而变化,此时煤体在高应力作用下发生宏观破坏,煤体状态处于峰后阶段,瓦斯压力的作用主要是破坏具有残余强度的煤体并抛出。最后,根据煤体破坏瓦斯压力-应力临界关系方程,得到了利用煤体强度参数确定煤体真实突出危险性的方法。

**关键词:** 含瓦斯煤层; 煤与瓦斯突出; 突出危险性; 判别试验

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2016)06-0117-06

## Real outburst danger and discrimination experiment of gassy coal seam

Yuan Ruifu<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Cultivation Base Provincial and MOE Joint Key Lab of Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** Due to the outburst danger discrimination of the gassy seam would be a key to prevent the coal and gas outburst occurred, therefore, with the analysis on the excavation site seam stress and gas conditions at the excavation site, the paper provided the definition of the real outburst danger of the seam and held that to suppose the gas pressure released zone removed, under the stress and seam insitu gas pressure role, the stability of the gassy seam represented the real outburst danger. Based on the coal strength as the grouping index, the RFPA<sup>2D</sup>-Flow software and similar simulation experiment method was applied to study the real outburst danger conditions of each group coal under the stress and gas pressure role. The gas pressure - stress critical conditions of the seam outburst could be divided into three stages. At the first stage, within the low level stress range, the stress would hinder the outburst occurred. The outburst occurred at this stage mainly would be the gas pressure role as the main and the stress increased would play a reinforced role to the coal mass. At the second stage, with the stress increased, the stress role would be changed from the coal mass reinforced to the failure of the coal mass. The stress would intensify the outburst occurred. At the third stage, with the stress continuously increased, the gas pressure to occur the outburst would be decreased, would be fixed at a certain level and would be not varied with the stress increased. At this moment, the macro failures would be occurred on the coal mass under the role of the high stress. The coal mass status would be at the stage after peak and the role of the gas pressure mainly would damage the coal with the residual strength and throw the coal mass out. Finally, according to the equation of the critical relationship between the gas pressure and stress of the coal mass failure, the coal strength parameters were applied to obtain the method to determine the real outburst danger of the coal mass.

**Key words:** gassy coal seam; coal and gas outburst; outburst danger; discrimination experiment

收稿日期: 2016-03-05; 责任编辑: 赵瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.06.019

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51374096); 河南理工大学博士基金资助项目(SZB2013-17)

作者简介: 袁瑞甫(1977—),男,河北定州人,副教授,博士。E-mail: yrf@hpu.edu.cn

引用格式: 袁瑞甫. 含瓦斯煤层的真实突出危险性及其判别试验[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(6): 117-122, 199.

Yuan Ruifu. Real outburst danger and discrimination experiment of gassy coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(6): 117-122, 199.

## 0 引言

迄今为止,煤与瓦斯突出仍然是威胁煤炭安全开采的最重要灾害之一,其发生机理和防治技术也一直是研究的热点问题<sup>[1-3]</sup>。对于煤与瓦斯突出机理的解释仍然停留在各种假说阶段,其防治技术也仍然是以实践经验积累的方法和指标为主<sup>[4-5]</sup>。预防煤与瓦斯突出最为关键的是判断含瓦斯煤层的突出危险性,因此,如何确定科学合理的判断条件,根据具体煤层特性明确各判断条件的具体指标是最需要解决的问题。从20世纪90年代起,借鉴欧洲及前苏联的经验,我国实施了煤与瓦斯突出防治细则,明确规定了煤层突出危险性的判断条件和指标<sup>[6]</sup>,即利用煤的破坏类型、瓦斯放散初速度、煤的普氏系数、瓦斯压力这4个单项指标判断煤层突出危险性。虽然这些判定条件和指标是根据现场经验确定的,但在大多数煤矿能够达到预测突出危险性目的,并且由于这些指标测试方便、可行性强而得到普遍应用。

上述4种突出鉴定的单项指标及其临界值仅依据现场经验确定,虽然在绝大多数煤矿适用,但也出现了测试未达到指标临界值而发生动力现象的问题,例如:在松软煤层中会出现瓦斯压力小于0.74 MPa而发生动力现象;在瓦斯压力很大的煤层,会在中硬煤层(普氏系数 $f > 0.5$ )中发生动力现象。这些现象反映了单项指标预测方法仍具有一定的局限性<sup>[7-13]</sup>。单纯降低指标的预测临界值,又会造成防突措施工作量的大幅增加,影响了采掘进度,增加成本。近几年,随着开采深度的增加,地应力和瓦斯压力大幅增加,受到突出威胁的矿井越来越多,突出的预测和治理难度越来越大,现有的鉴定指标适用性越来越受到限制。笔者通过分析现场煤层开挖和瓦斯运移状态,利用数值模拟和实验室相似模拟试验,提出了含瓦斯煤的真实突出危险性的定义,并研究了煤层真实突出危险性的判断条件和方法。

### 1 含瓦斯煤层的真实突出危险性

“真实突出危险性”是指假设掘进空间前方煤层中不存在瓦斯卸压带(保护带),煤层在内部原始瓦斯压力与矿井气压压差梯度作用下,同时承受掘进支承压力而发生失稳破坏的可能性。

现场条件下,煤层中的瓦斯一直处于向外界释放状态。当煤层揭露后,暴露面附近煤体的瓦斯很

快释放,同时受支承压力影响,采掘工作面前方煤层裂隙更加发育,瓦斯释放更为容易,因此,会在应力峰值之前形成突出保护带(即瓦斯卸压带),掘进工作面附近的应力场和瓦斯压力场如图1a所示。在保护带的阻碍下,即使内部含瓦斯煤体有突出危险,也不会发生突出。实际上,保护带的存在掩盖了煤层的真实突出危险性,一旦保护带受到外力破坏,如爆破、开采扰动、岩层垮落等,就可能引发突出。因而,判断煤层的突出危险性应考虑无保护带作用下的含瓦斯煤层是否能够发生突出,即假设将保护煤柱完全去除,煤体所受的瓦斯压力梯度为煤层内部瓦斯压力与矿井空气压力之差(图1b)在这种条件下如果煤体不发生破坏,则表示此煤层不具有突出危险性。

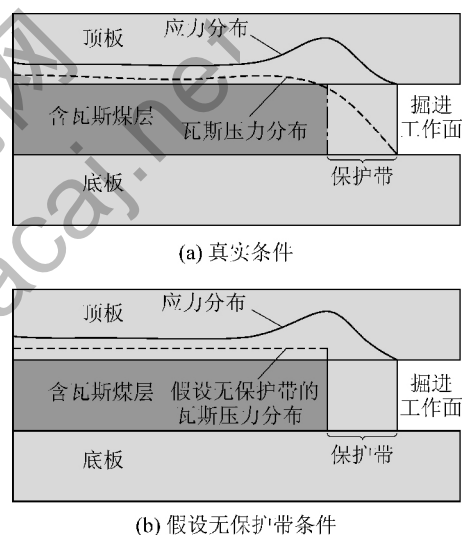


图1 含瓦斯煤层掘进工作面前方应力和瓦斯压力分布  
Fig. 1 Stress and gas pressure distribution in the area of ahead the heading face in gassy coal seam

现有预测突出的指标及临界值都是依据现场工程实践而定的,并非严格经过理论推导。由于保护带的阻隔作用,利用现有预测指标确定的无突出危险煤层虽然大部分不会发生突出事故,但并不是煤层完全不具有突出危险,一旦保护带煤柱被突然破坏,突出仍然会发生,所以煤矿现场会出现“低指标”突出现象。

从工程灾害预测应偏于安全角度考虑,测试含瓦斯煤层的真实突出危险性意义重大。煤矿地下开采受众多条件影响,开采工序复杂,地质条件多变,开采方法多样,管理水平和人员素质差别较大,尤其是不同矿区自然条件差异巨大,煤岩动力灾害发生条件各不相同,因此,以现场经验为主要依据的预测

和防治技术虽然在绝大多数情况下能够起到防灾减灾的效果,但仍不能完全可靠地防治煤岩瓦斯动力灾害。例如,许多矿区采掘现场发生低于突出危险预测指标值的突出事故、在实施解危措施过程中发生突出事故、深部开采冲击-突出互为诱因的复合型动力灾害等。

基于此,研究煤层的真实突出危险性具有重要的理论和现场指导价值:①判断含瓦斯煤层是否具有真正的突出危险。尤其是利用现行鉴定指标确定为非突出危险的煤层,可以判断其是否真正具有突出危险性,以指导矿山安全生产。②指导预留合理宽度的保护煤柱。保护煤柱宽度应与地应力、瓦斯压力、煤体强度等诸多因素有关。根据煤层的真实突出危险性,判断阻隔突出安全煤柱宽度。③指导现场解危措施及指标检验。

## 2 突出模拟试验及结果分析

含瓦斯煤的突出危险性由地应力、瓦斯压力、煤体强度 3 个因素来决定,因此对 3 个因素进行不同水平的排列组合,对不同的组合条件进行模拟,分析突出发生的条件及强度。

利用自行研制的含瓦斯煤动态破坏模拟试验装置<sup>[14]</sup>模拟软煤突出现象。压制型煤模拟煤层,煤体强度  $R_c = 0.3 \text{ MPa}$ ,瓦斯压力为  $0.2 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 。突出瞬间的录像截图如图 2 所示,突出的瞬间能量巨大,大量粉煤从卸压口喷出,第 1 号粉煤槽上的有机玻璃挡板被冲开,部分煤粉喷出粉煤槽。喷出整个过程持续了  $0.5 \text{ s}$ 。根据高速摄像头拍摄的录像计算粉煤的喷出速度达到  $50 \text{ m/s}$ 。

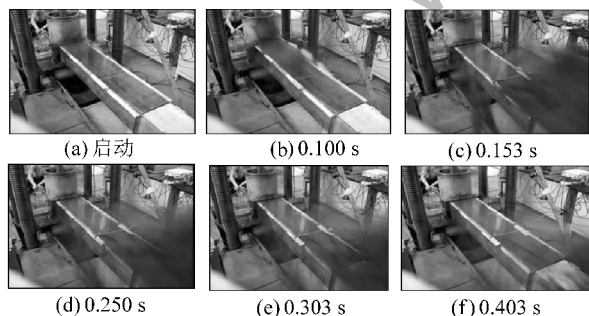


图 2 突出瞬间录像截图

Fig. 2 Video screenshot of outburst moment

突出后缸体内型煤孔洞照片如图 3 所示。由于煤体强度较小,所以突出强度大,大量型煤被喷出,缸体内留下突出孔洞,大部分遗留的型煤已松散,失去了强度。这表明残余的型煤也在气体压力作用下

被破碎。从残留型煤顶部裂隙也能明显看出气体作用下引起的张拉破坏痕迹。

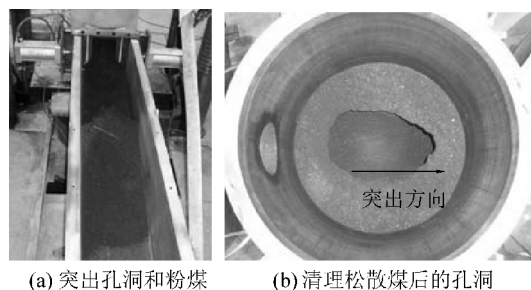


图 3 煤在  $0.2 \text{ MPa}$  气体压力下的突出情况

Fig. 3 Outburst circumstance at gas pressure of  $0.2 \text{ MPa}$

为了解突出与瓦斯压力及垂直应力的关系,分别进行了同一轴压下不同瓦斯压力,以及相同瓦斯压力、不同轴压作用下的突出试验,轴向压力一定时,相对突出强度与瓦斯压力的关系如图 4 所示。试验过程中发生突出的最小气体压力为  $0.2 \text{ MPa}$ ,在一定条件下煤与瓦斯突出发生的瓦斯压力值很低。由图 4 可知,当气体压力小于  $0.5 \text{ MPa}$  突出距离和煤量均较少,突出粉煤分选性不明显,与现场煤的压出现象相似。当气体压力较大时( $>0.5 \text{ MPa}$ ),突出距离和煤粉量大幅增加,突出煤有明显的分选现象,瓦斯搬作用明显。

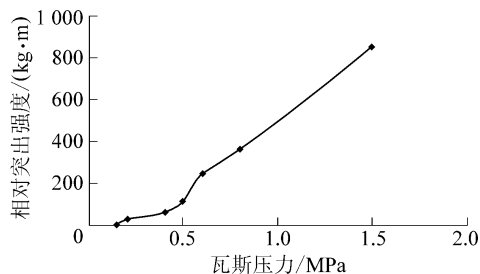


图 4 相对突出强度与瓦斯压力的关系

Fig. 4 Relationship between relative outburst strength and gas pressure

## 3 数值模拟及分析

### 3.1 数值模型

采用 RFPA<sup>2D</sup>-Flow 软件进行数值模拟,该软件已被证明能够成功模拟含瓦斯煤的渗流及失稳破坏<sup>[15-17]</sup>。模型分为上、中、下 3 层,中间为含瓦斯的煤层,上层为煤层顶板,下层为煤层底板,均是不含瓦斯的坚硬岩石层。由于数值模型为二维模型,所以采用平面应变状态分析,模型长×宽为  $40 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ ,划分为  $200 \times 400$  个单元。模型的上下边界岩层

不透气的瓦斯气体流量为零,煤层左边界气体压力 $p_x$ 为一个大气压(约0.1 MPa),以模拟采掘空间的矿井空气压力状态;煤体及右边界气体压力模拟煤层中的瓦斯压力。地应力通过模型的边界条件给定。软煤突出的力学与渗流数值模型如图5所示,模拟过程为煤巷掘进过程中的突出。

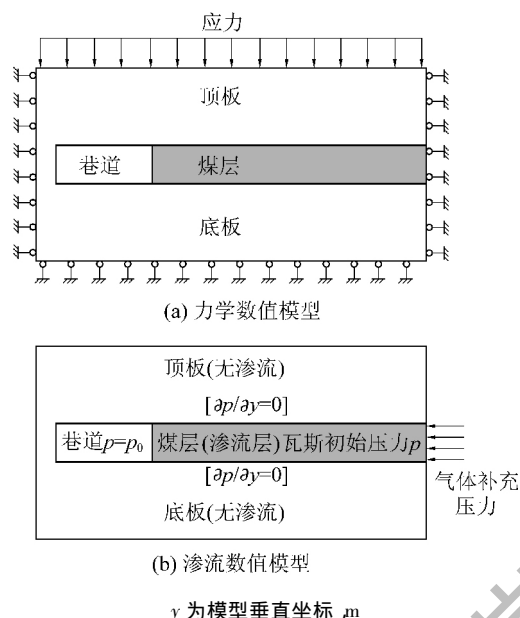


图5 软煤突出的力学与渗流数值模型

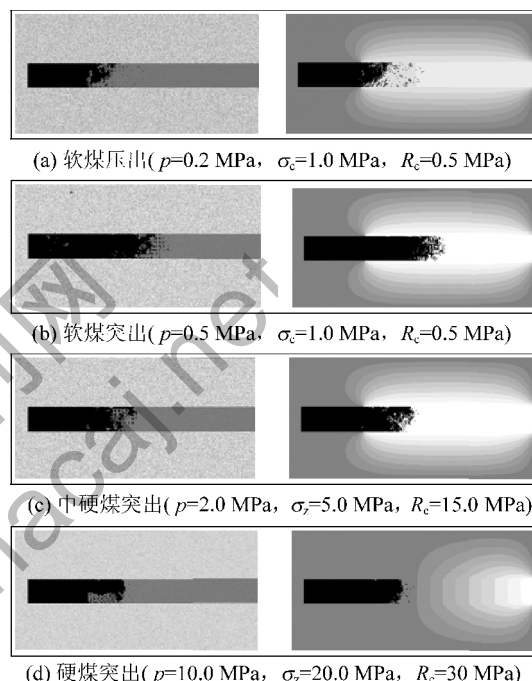
Fig. 5 Numerical mechanical and seepage model of soft coal and gas outburst

### 3.2 试验结果及分析

瓦斯压力、煤体强度和应力是决定煤层是否具有突出危险性的3个重要因素,只有当3个因素满足一定条件情况下,煤层才具有突出危险。通过变换3个因素的水平,可以找到不同组合情况下煤层突出危险的临界条件。3个因素中的煤体强度指标最易分类,以煤体强度 $R_c$ 的不同水平进行分类,分为软煤、中硬煤、硬煤3个类别,其强度分别包括0.5、2.5、10、15以及25、30 MPa,共6个水平。垂直应力水平从最小0.5 MPa开始,以1 MPa梯度递增,瓦斯压力水平从最小0.1 MPa开始,以0.1 MPa梯度递增。

各类煤的破坏类型如图6所示,由图6可知,数值模拟能够很好地模拟含瓦斯煤的各种破坏类型,逼真地再现了煤矿现场的各种突出灾害。图6a为软煤压出,此类破坏发生在软煤中,破坏启动需要的瓦斯压力很小,破坏发生后煤层被压出而倾倒在暴露面附近,粉煤被抛出的距离很近,破坏持续性不强,煤体压出后突出很快停止,在煤矿现场,软煤层浅部开采时经常遇到这种情况。图6b为软煤突出,

当瓦斯压力较大时(相对于煤的强度),强度较低的软煤在瓦斯压力作用下破坏成碎粉状,抛出剧烈,抛出距离较远,突出持续性较强。图6c为中硬煤突出,要求瓦斯压力和垂直应力均较高,破坏后煤体呈碎块状,抛出强烈,抛出距离较远,突出持续性较强。图6d为硬煤突出,要求有很高的瓦斯压力和垂直应力,煤体被破坏成较大块状,抛出距离较近,突出发生后很快停止,瓦斯释放较快。



$\sigma_c$  为峰值应力;  $\sigma_z$  为垂直应力

图6 各类煤的破坏类型

Fig. 6 Failure type of coal with different strength

游离瓦斯以孔隙压力方式作用于煤体骨架,瓦斯压力越大突出的危险性越大,突出强度越大。应力对突出的作用则与煤体强度以及应力自身水平有关系。为探寻含瓦斯煤的突出条件,对同一强度煤体,模拟不同应力水平下发生突出的最小瓦斯压力值,然后拟合突出发生条件的瓦斯压力-应力曲线,得到不同强度煤体导致突出发生的应力-瓦斯压力组合关系以及拟合曲线结果,如图7所示。图中散点标记表示模拟试验值,曲线为应力-瓦斯压力平面上突出条件的拟合曲线。显然,曲线以下应力-瓦斯压力组合表示不发生突出,曲线以上则表示发生突出破坏。虽然拟合关系曲线是数值模拟计算得到的,与现场煤矿开采相比,忽略了很多因素,但其反映出来的煤体强度-应力-瓦斯压力三因素组合关系仍具有重要价值。

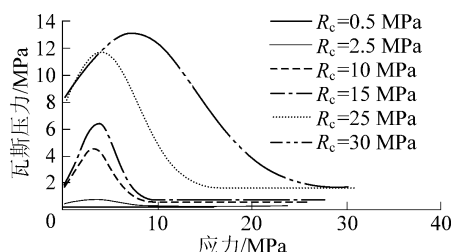


图 7 含瓦斯煤突出最小瓦斯压力 - 应力拟合曲线

Fig. 7 Fitting curves of gas minimum pressure - stress for gassy coal outburst

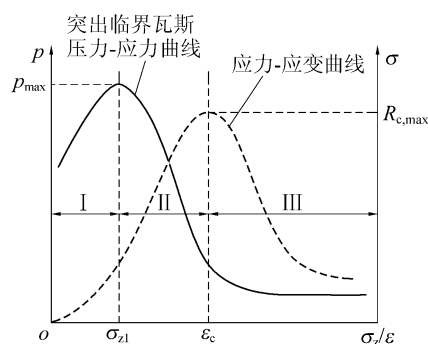
首先无论煤体强度如何, 应力 - 瓦斯压力曲线均有 2 个拐点, 应力水平与突出危险性的大小并不一直成正比关系。第 1 个拐点出现在低水平应力范围, 在此范围内, 随着应力的升高, 发生突出需要的瓦斯压力增加, 即此时应力增长对突出危险性起到负作用。但应力超过一定水平后, 曲线出现峰值拐点, 应力继续增加, 发生突出需要的瓦斯压力很快减少, 此时应力表现出对突出的正作用。随着应力继续增加, 曲线出现又一个拐点, 拐点后突出发生的瓦斯压力基本固定在某一水平, 不再随应力增加而变化。

某一强度煤体突出临界瓦斯压力 - 应力条件与煤体的应力 - 应变曲线的对比如图 8 所示。在瓦斯压力 - 应力曲线峰值以前, 发生突出主要以瓦斯压力作用为主, 应力的增加对煤体起到了加固作用, 相当于对煤体加固提高了其抵抗外力破坏的能力, 此阶段应力水平使煤体受压加密。瓦斯压力 - 应力曲线峰值以后, 应力水平已超过了使煤体压密的阶段, 应力开始成为破坏煤体的因素, 此阶段应力水平对应于煤体受压的线弹性阶段和屈服阶段。当曲线达到第 2 个拐点后, 较高的应力已经对煤体产生了宏观破坏, 瓦斯压力的作用主要是破坏具有残余强度的煤体, 并使煤体抛出, 因此突出需要的瓦斯压力较低。

根据试验结果, 应用 Matlab 智能非线性拟合功能, 选择出最适合此规律的 Gauss 方程进行拟合, 得到各组试验的拟合曲线。拟合 Gauss 方程如下:

$$p = p_i + \frac{a}{w \sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(\sigma_z - \sigma_c)^2}{w^2}} \quad (1)$$

式中:  $p$  为瓦斯压力;  $p_i$  为初始破坏的瓦斯压力;  $\sigma_z$  为垂直应力;  $\sigma_c$  为峰值应力, 即第 1 个拐点时的应力;  $a$ 、 $w$  为待定常数。



I—应力加固煤体阶段; II—弹性阶段; III—应变软化阶段;

$p_{\max}$ —随加载应力变化突出发生需要的最大瓦斯压力;

$\sigma$ —加载应力;  $\epsilon$ —加载方向应变;  $\sigma_z$ —垂直应力;

$\sigma_{z1}$ —加密阶段最大垂直应力;  $R_{c, \max}$ —煤体最大强度;

$\epsilon_c$ —峰值应力对应的应变

图 8 某一强度煤体突出临界瓦斯压力 - 应力与煤体的应力 - 应变曲线的对比

Fig. 8 Comparison of coal stress and strain curve with a certain strength coal outburst critical gas pressure and stress curve

各组试验拟合曲线的参数见表 1, 不同强度的煤体均有最小突出瓦斯压力, 最小突出瓦斯压力随煤体强度增加而增大。各个拟合曲线的方差  $R^2$  均接近或超过 0.9, 表示拟合曲线与试验数据相关性较好。

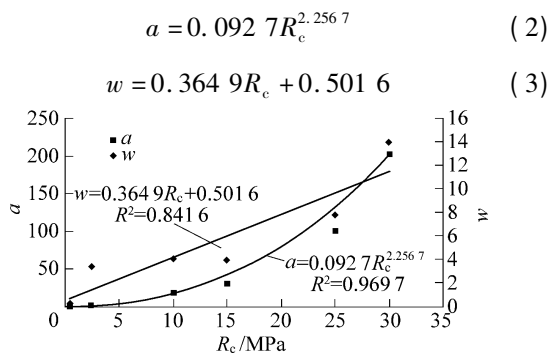
表 1 各组试验拟合曲线参数

Table 1 Parameters of each group test fitting curves

分类	$R_c$ / MPa	$P$ / MPa	$\sigma_c$ / MPa	$a$	$w$	$R^2$
软煤	0.5	0.13	4.16	0.01	0.3	0.88
	2.5	0.38	3.30	2.30	3.4	0.92
中硬煤	10.0	2.50	3.60	19.60	4.0	0.92
	15.0	2.60	4.00	29.00	3.9	0.91
硬煤	25.0	4.56	4.12	100.20	7.8	0.86
	30.0	4.60	7.60	200.50	13.9	0.97

各组试验拟合曲线的对比如图 9 所示, 由图 9 可知, 煤体强度对突出危险性影响显著。随着煤体强度增加, 曲线以下的安全区域面积呈几何倍数增加。另外, 与物理模拟试验结果相似, 发生突出的瓦斯压力下限值与应力和煤体强度均有关系, 当煤体强度很低时, 突出瓦斯压力的下限值也极低, 如对  $R_c = 0.5$  MPa 的低强度煤体, 安全瓦斯压力的下限值仅为 0.13 MPa, 也解释了松软煤层瓦斯动力现象 (压出、倾出) 的原因。

拟合 Gauss 方程中的另外 2 个常数  $a$ 、 $w$  是与材料特性有关的常数, 根据表 2 中的数据, 可以将  $a$ 、 $w$  与煤体强度  $R_c$  拟合 (图 9), 得到如下关系:

图 9  $a$ 、 $w$  值与煤体强度拟合关系Fig. 9 Fitting curves of  $a$ 、 $w$  and gassy coal strength

可以通过现场或实验室测试煤体强度  $R_c$ , 然后由式 (2) 和式 (3) 计算参数  $a$ 、 $w$ , 代入式 (1) 可以得到含瓦斯煤体破坏的瓦斯压力 - 应力临界条件。

#### 4 结 论

1) 通过分析煤层开挖现场应力和瓦斯条件, 从煤体强度理论角度, 提出了煤层真实突出危险性的定义, 认为煤体在应力、最大瓦斯压力梯度作用下的稳定性是煤体的真实突出危险性。

2) 分析了不同强度煤体的突出过程及特点。软煤在突出过程中瓦斯压力起主导作用, 发生突出的临界值低, 突出强度大, 持续性强。硬煤突出破坏过程中应力的作用更为显著, 硬煤的突出门槛较高, 突出持续性不强。

3) 以煤体强度为指标分组, 对各组煤体在应力、瓦斯压力作用下的真实突出危险性进行了详细研究, 得到了突出的应力 - 瓦斯压力关系拟合曲线。结果表明, 应力 - 瓦斯压力曲线有 2 个拐点, 应力水平与“突出”危险性并不一直成正比关系, 在低水平应力范围, 应力增长对突出危险性起到了负作用, 即应力阻碍突出; 曲线峰值以后, 应力增长对突出起到了正作用, 即应力加剧突出; 随着应力继续增加, 曲线出现第 2 个拐点, 此后突出发生的瓦斯压力基本固定在某一水平, 不再随应力增加而变化。

4) 运用煤岩材料的应力 - 应变关系解释了突出的应力 - 瓦斯压力关系曲线所表达的煤体内部状态。在峰值以前, 发生突出主要以瓦斯压力作用为主, 应力的增加对煤体起到了加固作用, 应力作用对应于应力 - 应变关系曲线的加密阶段。曲线峰值以后, 应力、瓦斯压力共同作用破坏煤体, 使突出发生的瓦斯压力随应力水平增加而降低, 应力作用对应于应

力 - 应变关系曲线的线弹性阶段或屈服阶段。当曲线达到第 2 个拐点后, 瓦斯压力降到较低水平, 此时高应力已经使煤体发生宏观破坏, 瓦斯压力的作用主要是破坏具有残余强度的煤体, 并使煤体抛出。

5) 根据煤体强度参数确定出了煤体真实突出危险性的瓦斯压力 - 应力条件判断方法。

#### 参考文献 (References):

- [1] 国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 未来 10 年中国学科发展战略: 工程科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 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.  
Hu Qianting, Zhou Shining, Zhou Xinquan. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1368 - 1372.
- [3] 金洪伟. 煤与瓦斯突出发展过程的实验与机理分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(S1): 98 - 103.  
Jin Hongwei. Experiment and mechanism analysis of the developing process of coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S1): 98 - 103.
- [4] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [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] 中华人民共和国煤炭工业部. 防治煤与瓦斯突出细则 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995.
- [7] 赵旭生. “低指标突出现象”原因分析及防范对策 [J]. 煤矿安全, 2007, 38(5): 67 - 69.  
Zhao Xusheng. Analysis of causes and precaution on “Low - index outburst phenomenon” [J]. Safety in Coal Mines, 2007, 38(5): 67 - 69.
- [8] 金 斯. 突出危险性预测过程中低指标突出原因分析 [J]. 中州煤炭, 2012(8): 116 - 118.  
Jin Si. The reasons of low - index outburst in the forecasting process of outburst dangerousness [J]. Zhongzhou Coal, 2012(8): 116 - 118.
- [9] 陈进朝, 王兆丰, 杨宏民, 等.  $K_1$  值预测时低指标突出现象的原因分析及解决方法 [J]. 煤矿安全, 2012, 43(6): 145 - 147.  
Chen Jinchao, Wang Zhaofeng, Yang Hongmin, et al. The cause analysis and solutions of low - index outburst phenomenon during  $K_1$  value forecast [J]. Safety in Coal Mine, 2012, 43(6): 145 - 147.
- [10] 袁 亮, 薛 生, 谢 军. 瓦斯含量法预测煤与瓦斯突出的研究与应用 [J]. 煤炭科学技术, 2011, 39(3): 47 - 51.  
Yuan Liang, Xue Sheng, Xie Jun. Study and application of gas content to prediction of coal and gas outburst [J]. Coal Science and Technology, 2011, 39(3): 47 - 51.
- [11] 梁 冰, 秦 冰, 孙维吉, 等. 基于综合评判模型的煤与瓦斯突

(下转第 199 页)

- 217.
- [8] 徐冰寒,高 岳,徐亚飞.改进型化学浆液在钱营孜煤矿副井井筒防水堵漏中的应用[J].煤田地质与勘探,2012,40(3):55-58.  
Xu Binghan, Gao Yue, Xu Yafei. Application of transformed chemical slurry in water prevention and leakage blocking of the auxiliary shaft in Qianyingzi Coal Mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(3): 55-58.
- [9] 王档良,童培国,武善元.化学注浆治理巨厚表土层立井井壁漏水[J].水文地质工程地质,2007,34(3):107-109.  
Wang Dangliang, Tong Peiguo, Wu Shanyuan. Chemical Grouting for Preventing Leakage in huge thick overburden shaft wall [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2007, 34(3): 107-109.
- [10] 李海燕,王 琦,江 贝,等.深立井大水工作面注浆堵水技术[J].煤炭学报,2011,36(S2):444-448.  
Li Haiyan, Wang Qi, Jiang Bei *et al.* Technology of grouting and blocking water on workign face with massive water in deep vertical shaft [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 444-448.
- [11] 隋旺华,姜振泉,王档良.一种矿用化学注浆材料:中国,200810123239[P].2008-12-03.
- [12] 洪晓东,杨东旭,周 莹.改性脲醛树脂注浆材料的制备及性能研究[J].材料导报,2013,27(8):117-119.  
Hong Xiaodong, Yang Dongxu, Zhou Ying. Study on preparation and performance of modified Urea-formaldehyde resin grouting materials [J]. Materials Review, 2013, 27(8): 117-119.
- [13] 曹晨明,冯志强.低黏度脲醛注浆加固材料的研制及应用[J].煤炭学报,2009,34(4):482-486.  
Cao Chenming, Feng Zhiqiang. Development and application of low viscosity urea formaldehyde resin grouting material [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 482-486.
- [14] 郑先军,王新锋,段存业.煤矿用聚氨酯灌浆加固材料性能研究及应用[J].聚氨酯工业,2015(5):34-37.  
Zheng Xianjun, Wang Xinfeng, Duan Cunye. Performance and application study on polyurethane grouting reinforcement material for coal mines [J]. Polyurethane Industry, 2015(5): 34-37.
- [15] 张虎仕,向剑飞.新型矿用化学注浆材料的研制与应用[J].煤炭科学技术,2012,40(2):36-39.  
Zhang Hushi, Xiang Jianfei. Development and application of new mine chemical grouting material [J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 36-39.
- [16] 许明路,何小芳,李杰飞,等.矿用聚氨酯注浆材料的应用研究[J].材料导报,2014,28(17):96-100.  
Xu Minglu, He Xiaofang, Li Jiefei *et al.* Research on application of polyurethane grouting material for mining [J]. Materials Review, 2014, 28(17): 96-100.
- [17] Sui Wanhua, Liu Jinyuan, Wei Hu *et al.* Experimental investigation on sealing efficiency of chemical grouting rock fracture with flowing water [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2015, 50: 239-249.
- [18] 国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.煤矿防治水规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009.
- [19] 隋旺华,高 岳, Liu Jinyuan.透明土试验技术现状与展望[J].煤炭学报,2011,36(4):577-582.  
Sui Wanhua, Gao Yue, Liu Jinyuan. Status and prospect of transparent soil experimental technique [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 577-582.
- [20] 《岩土注浆理论与工程实例》协作组.岩土注浆理论与工程实例[M].北京:科学出版社,2001.

## (上接第122页)

- 出危险程度预测[J].中国安全生产科学技术,2015,11(7):129-134.  
Liang Bing, Qin Bing, Sun Weiji *et al.* Prediction on dangerous level of coal and gas outburst based on comprehensive evaluation model [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(7): 129-134.
- [12] 胡千庭,孟贤正,张永将,等.深部矿井综掘面煤的突然压出机理及其预测[J].岩土工程学报,2009,31(10):1487-1492.  
Hu Qianting, Meng Xianzheng, Zhang Yongjiang *et al.* Mechanism and forecast of coal sudden extrusion of fully mechanized driving face in deep mine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1487-1492.
- [13] 马玉林.煤与瓦斯突出渗滤机理与演化规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2011.
- [14] 袁瑞甫,李怀珍.含瓦斯煤动态破坏模拟实验设计的研究与应用[J].煤炭学报,2013,38(S1):117-123.  
Yuan Ruifu, Li Huaizhen. Development and application of simulation test apparatus for gassy coal dynamic failure [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 117-123.
- [15] Xu Tao, Tang Chunan, Yang Tianhong *et al.* Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43: 905-919.
- [16] Zhu W C, Liu J, Sheng J C *et al.* Analysis of coupled gas flow and deformation process with desorption and Klinkenberg effects in coal seams [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44(7): 971-980.
- [17] 徐 涛,唐春安,杨天鸿.含瓦斯煤岩破裂过程与突出机理[M].北京:煤炭工业出版社,2009.