

文章编号:1000-582X(2011)04-013-07

煤与瓦斯延期突出模拟试验及机理

李晓泉^{1,2}, 尹光志¹, 蔡波, 蒋长宝¹, 李高帅¹

(1. 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 广西大学资源与冶金学院, 广西南宁 530004)

摘要:利用自行研发的“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”,进行了非均衡荷载的无扰动和钢球捶击扰动情况下的煤与瓦斯延期突出试验。结果表明:延期突出过程可划分为准备、发生、发展和结束 4 个阶段,突出煤粒表现出很好的分选性,突出后的煤岩体可分为突出孔洞、松动区和未动区 3 个部分;在外力诱导作用下,延期突出门槛值降低,发生突出的可能性增大;发生延期突出的临界瓦斯压力和水平应力呈线性关系,临界瓦斯压力和突出强度呈非线性关系。重新定义了煤与瓦斯延期突出概念:在主要破煤岩作业结束形成新的采掘空间一段时间后或人员在从事辅助作业时,发生的煤与瓦斯突出;并根据试验结果初步分析了延期突出机理。

关键词:延期突出机理;模拟试验;突出强度;瓦斯压力;扰动

中图分类号:TD713

文献标志码:A

Simulation and analysis of mechanics of coal and gas delay outburst

LI Xiao-quan, YIN Guang-zhi, CAI Bo, JIANG Chang-bao, LI Gao-shuai

(1. Key Laboratory for the Exploitation of Southwest Resources and the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;

2. College of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning 530004, Guqngxi, P. R. China)

Abstract: By using the large-scale test device for coal and gas outburst simulation, the experiments of coal and gas delay outburst are conducted under the conditions of no disturbance and ball stricked disturbance of unbalanced load. The results show that delay outburst has four stages: preparation, occurrence, development and dissolution. The coal particle of outburst has size classification. The outburst coal can be divided into three parts: outburst holes, disturbed and no disturbed zone. The threshold value of delay outburst decreases and outburst possibility increases under the disturbance. The critical gas pressure has linear relation with the horizontal stress of delay outburst. The relationship between the intensity of outburst and the critical gas pressure is nonlinear. The conception of coal and gas delay outburst is redefined as the coal and gas outburst that is occurred when the main breaking coal or rocks works completed and the new mining spaces formed or when the auxiliary operation finished. The preliminary analysis of mechanics of coal and gas delay outburst is also presented.

Key words: mechanics of delay outburst; simulation experiment; outburst intension; gas pressure; disturbance

收稿日期:2010-12-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB201203);国家自然科学基金资助项目(50874124);中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11 24 00 04);重庆大学“211 工程”三期创新人才培养计划建设项目(S-10220)

作者简介:李晓泉(1972-),男,重庆大学博士,研究方向为矿山安全,(E-mail)lxq0927@cina.com。

尹光志(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65111228;(E-mail)gzyin@cqu.edu.cn。

煤与瓦斯突出灾害是煤矿井下生产过程中发生的一种严重的动力灾害,延期突出也是一种突出现象,一般认为在爆破几秒钟到几个小时甚至更长时间后发生的突出为延期突出^[1]。延期突出可能在人员作业期间(如支护、打钻、清理浮渣等)发生,令人措手不及,危害性非常大。早在20世纪50年代,前苏联学者Г. Д. 李金就提出了延期突出的问题^[2];国内一些学者对延期突出进行了研究,得到了很多有意义的成果,对延期突出机理有了一定的认识^[3-7]。国外一些学者从不同角度研究了煤与瓦斯突出机理^[8-13]。但是目前关于延期突出其动态机理尚不清楚。为研究煤与瓦斯突出机理重庆大学自行研发出“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”^[14-17],并进行了多次模拟煤与瓦斯突出试验,取得了一定成果。

1 试验设备及方案

1.1 试验设备

利用重庆大学自主研发的“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”进行模拟煤与瓦斯延期突出试验,该设备曾用于模拟煤与瓦斯突出试验多次,效果均比较好。本次试验是模拟煤与瓦斯延期突出,主要考虑卸压区和扰动作用时延期突出的临界条件,对研究延期突出机理有一定的现实意义。延期突出模具及加载方式如图1所示。

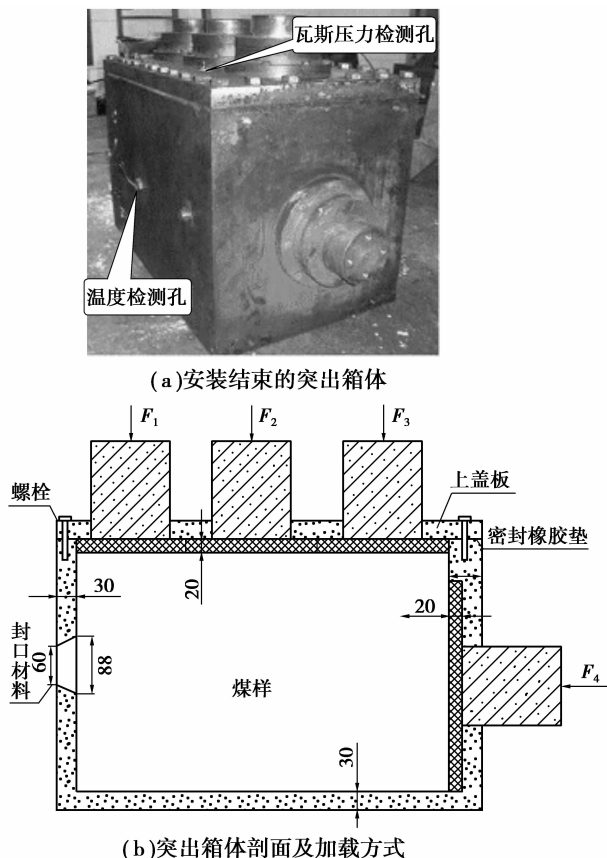


图1 突出模具箱体及加载方式

1.2 试验方案

根据现有文献及煤与瓦斯突出假说,突出是具有突出危险煤层在地应力、瓦斯压力、煤的物理力学特性等综合作用的结果,延期突出发生条件需考虑有阻挡层(卸压带)的参与,普遍认为作用在卸压区上的应力低于原始应力。

试验煤炭取自重庆市天府煤业有限责任公司三汇一矿K₁分层,该层为软弱分层,曾发生过煤与瓦斯延期突出。将原煤粉碎,粉煤粒径为80~10目(不同粒径便于考察突出后分选性),该试样可以满足模拟原煤进行力学试验的要求。选取突出口直径 $\phi=60$ mm,厚30 mm,采用煤粉:石膏:水=40:30:3配比作为封口材料,该材料配比脆性强,达到破坏强度后残余强度下降很快,较符合硬煤岩的力学性质,其力学性质接近硬煤岩强度,有利于模拟阻挡层实现延期突出试验。本试验研究两种不同情况下的延期突出,试验1是考虑卸压区,采用非均衡垂直应力加载,考察不同水平应力情况下发生延期突出的临界瓦斯压力;试验2是考虑扰动影响,所施加的应力和试验1相同,采用质量为300 g的钢球摆,自距突出口20 cm高度作自由钟摆式下落,打击突出口,考察打击后临界瓦斯压力的变化。因为钢球打击突出口可能产生火花,考虑安全因素,本试验采用纯度为99%的CO₂作为试验气体代替瓦斯气体。具体方案如下:

1)用配比好的封口材料封堵好箱体的突出口,自然干燥约42 h开始装煤。

2)将粉碎好的煤炭加入一定比例的水,并搅拌均匀后,直接装入箱体,每次装入的粉煤需称重并测试粉煤的含水率,以便得到突出强度。在型煤机上压制成型后,将箱体安装在“大型煤与瓦斯突出模拟试验台”上,关好门挡,试验2须在关门挡前安装钢球摆,并调试好高度。

3)检查气密性,抽真空至箱体内压力低于50 Pa后,通入纯度99%的CO₂气体,压力为0.7 MPa,通过操作控制系统观测气体压力达到预订压力并稳定10 min后,开始试验。

4)启动液压系统,施加垂直压力和水平压力30 min后,快速开启气动门挡。试验1直接将气瓶出口压力调到2 MPa(为试验设备允许上限压力);试验2释放钢球摆打击突出口,并立即将气瓶出口压力调到2 MPa。电脑自动记录箱体内气体压力变化,实现延期突出试验。

5)突出后立即关闭气瓶开关,释放空气压缩机内残余气体,称量箱体内剩余煤粉重量,计算突出强

度,即突出煤量与初装时煤量的比值。

6)为减小试验误差,对发生延期的每组应力情况做2次试验。

2 试验结果分析

依据陶云奇的博士论文^[18]中的研究成果,本试验设备模拟煤与瓦斯突出和煤矿突出现场具有相似性,并给出了本试验设备的相似比。因此,该设备用于模拟煤与瓦斯延期突出同样可以实现试验目的,不再累述相似理论模型。

2.1 延期突出现象描述

由图2可以看出:延期突出过程可以明显的分为几个阶段:1)突出的准备阶段:包括图2中(a)~(e)4个过程,在此阶段中(a)为稳定状态,煤岩体相当于处于原始应力状态,未受到采掘作业开挖影响,此时不可能发生突出;(b)和(c)为相对稳定状态,表示开挖后煤岩体的状态,外层煤岩体由三向

应力状态变为二向或单向应力状态,如果此时满足突出条件,开门后会立即发生突出;开门后未突出,煤岩体所承受的地应力将发生重新分布,特别是卸压区(阻挡层)的出现对煤岩体起到保护作用,此时煤岩体内游离瓦斯增加^[14],瓦斯压力是由游离瓦斯产生的,当瓦斯压力超过延期突出的临界状态,在地应力和瓦斯压力共同作用下,卸压区的阻挡作用破坏,就可能发生延期突出;(d)为卸压区破坏初期,在地应力和瓦斯压力共同作用下,卸压区作为阻挡层产生剪切破坏,这类似于煤矿现场有时出现的煤壁整体出现外移现象,但突出并未发生,此时已经具备了突出的条件,但未发生;(e)为卸压区破坏后期,卸压区阻挡作用已经遭到破坏,但是还有一定的强度,此时发生突出是不可阻挡的,突出只是时间问题,这相当于煤矿现场突出前煤壁发生大量煤体垮落,并伴随煤炮等响声,突出可能随时发生,这是延期突出准备阶段的最后过程。

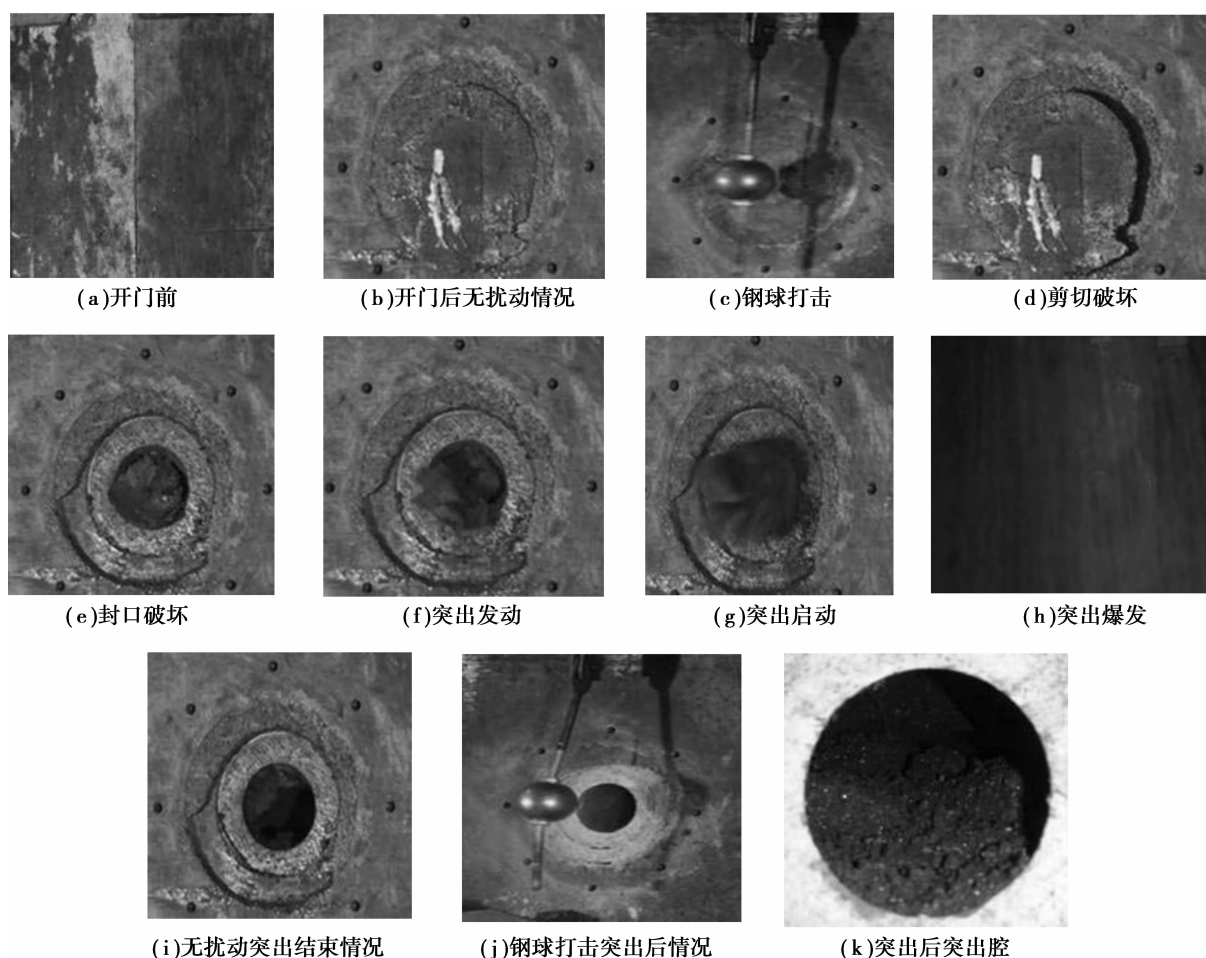


图2 煤与瓦斯延期突出全过程

2)突出的发动、发展阶段:包括图2中(f)~(h)3个过程,在此阶段中(f)为突出的初始阶段,封口材料彻底的破坏,卸压区的阻挡作用完全失去,煤岩

体自身的强度无法抗拒地应力和瓦斯压力的共同作用,但是卸压区的残余强度还有一定的阻挡作用,因此此时只有少量的煤炭被压出,并伴随瓦斯气体涌

出,煤体内瓦斯解吸量快速增加;(g)为突出启动阶段,煤炭开始从突出口涌出,这时突出真正发生,如果没有后续的煤炭和瓦斯的参与,突出煤量可能很少,破坏程度也相对较小,这也是为什么有些突出煤量和瓦斯涌出量较小的原因,有些类似于现场的压出和倾出的情况;(h)为突出爆发阶段,由于煤炭中的大量吸附性瓦斯快速的解吸为游离瓦斯,并形成较高的瓦斯压力参与突出,煤炭被释放出的瓦斯膨胀能做功抛出很远,并伴随巨大的响声,本试验煤粒

被抛出十多米远,并表现出很好的粒度分选型,较好的模拟出延期突出的基本情况。

3)突出结束:由(i)~(l)可以看出:突出后煤岩体重新恢复至应力平衡状态,及时卸载施加的应力,可以看到较好的突出孔洞(1),(j)是钢球打击后发生延期突出的情况,钢球被突出的煤流冲击打到上方支架上,摆杆发生弯曲成“S”型,说明突出具有很大的冲击力,试验相对于现场发生突出的规模要小得多,现场发生大规模突出危害非常巨大。

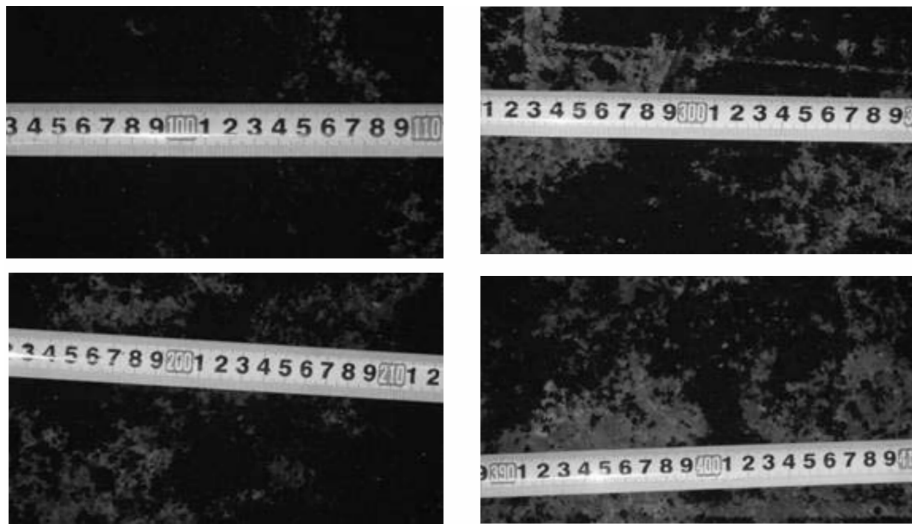
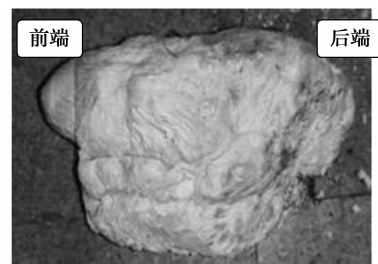


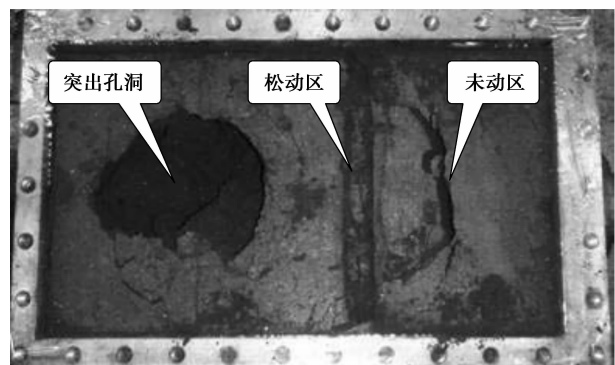
图3 延期突出后煤粒分选情况

图3反映出距突出口不同距离煤粒粒径分布情况,从中可以看出:突出后的煤炭有很好的分选型,在距离突出口1 m左右煤炭多,而且粒度较大;在距离突出口4 m左右煤炭量明显减少很多,并且粒度相对较小,这和煤矿突出现场距离突出地点越近块度越大、越远块度越小现象是相似的。形成这种现象的原因可能是在突出过程中煤粒间产生摩擦、碰撞及瓦斯对煤炭的破坏作用综合作用的结果,块度或粒径大的煤粒质量大,被突出风暴抛出时在同样动能的情况下,被抛出的距离相对较短,块度或粒径小的煤粒则被抛出相对较远的距离。

突出孔洞形状及煤体表现出的分区性如图4所示,图4(a)是将突出孔洞灌入石膏,待石膏干燥成型后取出的石膏模型,该模型基本可以反映出突出孔洞的形状,明显看出突出孔洞是口小腔大,呈现出较为规则的形状,这和突出现场表现出的突出孔洞相似;由图4(b)可以看出突出后的煤体明显可以划分为3个区,而图4(a)的形状主要反映出突出孔洞的形状,松动区内的煤体较为松散,裂隙较多,裂隙中的煤粉也随突出被抛出,而石膏模型不能反映出这



(a)孔洞石膏模型



(b)突出后煤体分区情况

图4 突出后孔洞形状及分区

部分煤量,这可以反映出突出现场孔洞容积小于清理后的突出煤量体积,突出孔洞壁形成自然压力拱的稳定形状,松动区可以视为突出后的卸压区,由于此卸压区的稳定性降低了继续发生突出的可能;未动区内的煤体不参与突出,该区内的煤体基本上处于原岩应力状态,表现出较好的稳定性。

2.2 延期突出数据分析

根据试验方案一共做试验 27 次,其中无扰动 21 次,成功 6 次;钢球打击扰动 6 次均成功,为对比效果根据无扰动成功的应力水平设置,成功率较高。未成功实现突出的情况主要原因是应力水平选择不当。试验结果见表 1。

表 1 是发生延期突出时的基本情况,未突出或打开门挡即突出的未列入。在 $F_2 = F_3 = 4$ MPa 时, F_1 低于 3.5 MPa 时气体压力达到 2 MPa 也不突出,从而证明了卸压程度对突出影响很大,当卸压区

达到一定宽度就不会发生突出,因此,人为的增加卸压区宽度是防治煤与瓦斯突出的有效方法。另外,将垂直应力降至 3/3.5/3.5 MPa 时,发现水平应力达到本试验机最大值 2.5 MPa,气体压力达到 2 MPa 仍未突出,这可能是在煤矿现场煤与瓦斯突出的发生有临界深度的原因。

从表 1 可以看出:1)在固定垂直应力情况下,发生煤与瓦斯延期突出时的临界瓦斯压力随着水平应力的增加而降低的。2)在应力条件完全相同的情况下,钢球打击扰动后发生延期突出的临界瓦斯压力要低于未受扰动情况,说明外力扰动可以降低突出的门槛值,增大突出危险性。(3)延期时间和达到临界突出时间有关,即延期时间和吸附态瓦斯解吸为游离瓦斯速度有关,还与卸压区中硬煤岩对瓦斯阻挡作用有关,当达到或超过临界突出条件时突出就可能发生。

表 1 不同情况下延期突出试验结果

序号	$F_1/F_2/F_3/\text{MPa}$	F_4/MPa	P/MPa	L/kg	L'/kg	$L'/L/\%$	t/s	$M/\%$	备注
1	3.5/4/4	1.7	1.89	87.241	26.563	30.45	67	8.69	无扰动
			1.93	89.343	27.324	30.58	78	9.63	
2	3.5/4/4	2	1.75	88.248	26.147	29.63	63	8.34	
			1.79	86.684	25.897	29.88	65	10.23	
3	3.5/4/4	2.5	1.51	85.947	24.975	29.06	58	9.56	
			1.48	87.348	25.476	29.17	53	9.47	
4	3.5/4/4	1.7	1.74	87.657	26.035	29.70	64	10.26	
			1.69	89.573	26.325	29.37	68	8.56	
5	3.5/4/4	2	1.64	88.674	25.756	29.05	62	8.84	钢球打击扰动
			1.61	87.469	25.257	28.88	58	9.36	
6	3.5/4/4	2.5	1.35	89.346	25.447	28.48	37	9.67	
			1.37	86.635	24.783	28.61	46	8.65	

注: P 为发生延期突出时的临界瓦斯压力; L 为装煤量; L' 为突出煤量; t 为延期时间; M 为含水率。

2.3 临界气体压力和水平应力关系

由图 5 可以看出:在考虑卸压区时,无扰动情况和钢球捶击扰动时发生延期突出时的水平应力和临界瓦斯压力均呈线性关系,只是钢球打击扰动后发生延期突出的临界瓦斯压力相对较低,即在采掘作业面内,发生延期突出条件中,水平应力包括岩层自重引起的水平方向应力和地质构造应力,由岩层自重引起的水平应力可以通过计算得到,构造应力则变化较大,较难预测。在试验中变化的水平应力相当于在自重引起的水平应力的基础上添加了一定的构造应力。从图中可以看出水平应力较大时,发生延期突出所需的临界瓦斯压力较小,反之亦然。说明了卸压区的破坏是在地应力和瓦斯压力共同作用的结果,如地应力增大到一定值,即使没有瓦斯压力

的参与,煤岩体同样会发生破坏,只是不会发生突出而已,因此在地应力较大时,瓦斯压力较小时也会发生煤与瓦斯突出,式(1)同样可以反映此关系。

由图 4 可以得出发生延期突出时的水平应力和临界瓦斯压力拟合关系式:

$$P = aF_4 + b. \quad (1)$$

式中: a 、 b 为拟合系数;其他符号同前。

2.4 临界瓦斯压力和突出强度关系

图 6 反映了临界瓦斯压力和突出强度符合二次多项式的非线性关系:

$$Y = cP^2 + dP + e. \quad (2)$$

式中: $Y = \frac{L'}{L}$; c 、 d 、 e 为拟合系数。

式(2)和图 6 可以反映出延期突出强度和临界瓦斯压力密切相关:突出所需临界瓦斯压力较大时,

产生的突出强度增加较为明显,反之亦然。说明突出时抛出煤岩的能量主要是由瓦斯膨胀能提供的。根据我们以前的研究突出强度受地应力影响较小,由表1可以得出这个结论,在此不再累述。

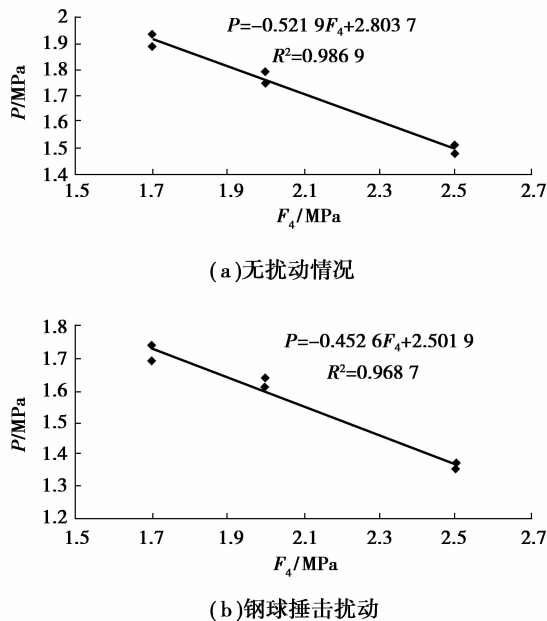


图5 水平应力和临界瓦斯压力的关系

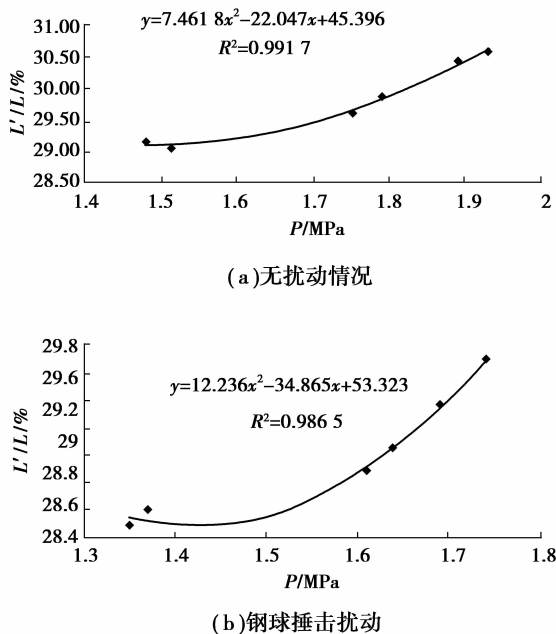


图6 瓦斯压力与突出强度的关系

3 延期突出机理探讨

由于采掘技术的发展,特别是综合机械化大规模的投入使用,延期突出的概念需要重新定义:在主要破煤岩作业结束形成新的采掘空间一段时间后或人员在从事辅助作业时,如支护、清理煤岩、检测瓦

斯等,发生的煤与瓦斯突出为延期突出。延期突出是地应力、瓦斯和煤体物理力学性质三个因素综合作用的结果,也是时间、空间因素达到适当组合的结果。根据试验结果可以得出:在主要的破煤岩工作结束一段时间内,煤岩体内的应力重新分布,煤岩体中的裂隙孔隙发生变化,大量的吸附性瓦斯快速的解吸为游离瓦斯^[18],卸压区内存在强度较高的硬煤岩,对瓦斯有较好的封闭阻挡作用,使煤岩体内瓦斯压力增高形成较高的瓦斯内能,不能及时得到释放,加之构造应力为主的水平应力和岩层自重形成的垂直应力共同作用;在外力诱导下,如支护不及时引起的空顶、风镐或手稿挖棚腿引起的振动、施工钻孔等,形成激发因素,有可能打破煤岩体的平衡状态,降低其自身强度,使得延期突出的临界条件降低,卸压区硬煤岩体产生剪切破坏,引发延期突出。一般延期突出多发生在应力集中带,如构造发育等,且与顶底板岩性、煤层瓦斯含量、煤层厚度、以及作业工序和防突措施等密切相关。

4 结论

1) 试验中煤与瓦斯延期突出分为准备、发动、发展和结束4个阶段,突出前封口材料出现整体外移现象,封口材料发生明显的剪切破坏;煤粉突出时具有非常大的能量,突出煤粒表现出很好的分选型,距离突出口越近煤粒粒径越大,远处的煤粒粒径相对较小;突出孔洞呈口小腔大的腔体,突出后煤体形成突出孔洞、松动区和未动区3个部分,松动区裂隙较多,部分煤粉参与突出,是突出煤量体积大于突出孔洞容积的主要原因;松动区形成自然平衡状态,成为突出后剩余煤体的卸压区,阻挡了未动区的煤体参与突出,降低突出继续发生的可能。

2) 通过表1的对比可以看出:在相同应力条件下,钢球打击扰动后,发生延期突出时的临界瓦斯压力低于未扰动情况,说明在外力诱导作用下,延期突出的临界门槛值降低,发生突出的可能性增大;延期时间和达到临界突出时间有关,即延期时间和吸附态瓦斯解吸为游离瓦斯速度有关,还与卸压区中硬煤岩对瓦斯阻挡作用有关,当达到或超过临界突出条件时突出就可能发生。

3) 发生延期突出的临界瓦斯压力和水平应力呈线性关系,即水平应力较大时,发生延期突出所需的临界瓦斯压力较小,反之亦然;临界瓦斯压力和突出强度符合二次多项式的非线性关系,突出所需临界瓦斯压力较大时,产生的突出强度增加较为明显,反之亦然。

4) 重新定义了煤与瓦斯延期突出概念:在主要

破煤岩作业结束形成新的采掘空间一段时间后或人员在从事辅助作业时,如支护、清理煤岩、检测瓦斯等,发生的煤与瓦斯突出为延期突出;延期突出是地应力、瓦斯和煤体物理力学性质三个因素综合作用的结果,也是时间、空间因素达到适当组合的结果。并根据试验结果初步分析了延期突出机理。

参考文献:

- [1] 罗新荣,夏宁宁,贾真真. 掘进煤巷应力仿真和延时煤与瓦斯突出机理研究[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(5):571-576.
LUO XIN-RONG, XIA NING-NING, JIA ZHEN-ZHEN. Research on stress simulation and mechanism of delaying coal and gas outburst in coal driving [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006,35(5):571-576.
- [2] Г. Д. 李金. 煤和瓦斯突出[M]. 于不凡,译. 北京:煤炭工业出版社,1959.
- [3] 徐涛,唐春安,宋力,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.
XU TAO, TANG CUN-AN, SONG LI, etc. Numerical simulation of coupled gas flow in failure process of gas-sy coal-rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(10):1667-1673.
- [4] 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.
GUO DE-YONG, HAN DE-XIN. The stick-slip mechanism of coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 2003,28(6):598-602.
- [5] 蒋承林,郭立稳. 延期突出的机理与模拟试验[J]. 煤炭学报,1999,24(4):373-378.
JIANG CHENG-LIN, GUO LI-WEN. The mechanism of delay outburst and its simulated tests [J]. Journal of China Coal Society, 1999,24(4):373-378.
- [6] 刘保县,鲜学福,姜德义. 煤与瓦斯延期突出机理及其预测预报的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(5):647-650.
LIU BAO-XIAN, XIAN XUE-FU, JIANG DE-YI. Research on the mechanism and prediction of delay outburst of coal and gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(5):647-650.
- [7] LIU BAO-XIAN, WANG ZE-YUN, LIU Li. A catastrophe model of coal and gas delay outburst [J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology, 2003(sup.):86-89,102.
- [8] Yunxing Cao, Dingdong He, David C. Glick. Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults [J]. International Journal of Coal Geology, 2001(48):47-63.
- [9] MARÍA B. DÍAZ AGUADO, C. GONZÁLEZ NICIEZA. Control and prevention of gas outbursts in coal mines [J]. Riosa-Olloniego coalfield, Spain. International Journal of Coal Geology, 2007(69):253-266.
- [10] KARACAN C Ö, DIAMOND W P, SCHATZEL S J. Numerical analysis of the influence of in-seam horizontal methane [J]. International Journal of Coal Geology, 2007(72):15-32.
- [11] XU T, TANG C A, YANG T H, etc. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006(43):905-919.
- [12] ELIZABETH J P JONES, MARY A VOYTEK, PETER D WARWICK, etc. Bioassay for estimating the biogenic methane-generating potential of coal samples [J]. International Journal of Coal Geology, 2008(76):138-150.
- [13] ALEXEEV A D, FELDMAN F P, VASILENKO T A. Methane desorption from a coal-bed [J]. Fuel, 2007(86):2574-2580.
- [14] 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,2008,27(11):2354-2362.
XU JIANG, TAO YUN-QI, YIN GUANG-ZHI, et al. Development and application of coal and gas outburst simulation test device [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(11):2354-2362.
- [15] 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.
XU JIANG, TAO YUN-QI, YIN GUANG-ZHI, et al. Amelioration and application of coal and gas outburst simulation experiment device [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(9):1804-1809.
- [16] 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.
YIN GUANG-ZHI, ZHAO HONG-BAO, XU JIANG, et al. Experimental study of simulation of coal and gas outburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(8):1674-1680.
- [17] 陶云奇. 含瓦斯煤 THM 耦合模型及煤与瓦斯突出模拟研究[D]. 重庆:重庆大学,2009.
- [18] 鲜学福,辜敏,李晓红,等. 煤与瓦斯突出的激发和发生条件[J]. 岩土力学,2009,30(3):577-581.
XIAN XUE-FU, GU MIN, LI XIAO-HONG, et al. Excitation and occurrence conditions for coal gas outburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009,30(3):577-581.