

文章编号: 1001-1455(2012)02-0185-05

煤体中爆炸应力波传播与衰减规律模拟实验研究*

褚怀保¹, 杨小林^{1,2}, 侯爱军^{1,2}, 余永强¹, 梁为民¹

(1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 洛阳理工学院, 河南 洛阳 471023)

摘要: 在岩石爆破理论的基础上分析了煤体中爆炸应力波的作用机理, 借助损伤力学理论探讨了煤体在爆炸应力波作用下的损伤断裂准则。煤体中爆炸应力波传播与衰减规律模拟实验结果表明: 煤体中爆炸应力波一般包含 2 段波形, 第 1 段由压缩相和拉伸相组成简单波形, 第 2 段是由多种作用形成的复杂波形; 爆炸应力波作用下, 煤体首先承受压应力, 而后承受拉应力, 且压缩相的作用时间较拉伸相作用时间短; 煤体中爆炸应力波的衰减速度较一般岩体中的快, 实验条件下应力波衰减因数符合 $\alpha = 3 - \mu / (1 - \mu)$, 爆炸应力波的主要作用是在煤体中形成少量新裂隙、激活煤体中原生裂隙并打破煤体中瓦斯气体的平衡状态。

关键词: 爆炸力学; 传播与衰减规律; 模拟实验; 煤体

中图分类号: O382

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

从本质而言, 煤体也属于岩石, 煤体和岩体的最大不同在于煤体内含有瓦斯气体。在外部应力和瓦斯压力作用下, 煤体变形和破坏在不同的作用阶段均受本体和结构有效应力的双重作用。且煤体内部裂隙更发育, 强度也远低于常规岩石, 因此, 不能简单地将岩石爆破机理直接应用于煤体。而关于煤体爆破机理的相关理论和实验研究的报道很少, 现有文献仅初步探讨了坚硬煤体中爆炸应力波传播和爆炸能量的转化及煤体爆破裂缝扩展规律等煤体爆破的基本特点^[1-3]。目前的理论研究还远落后于工程实践, 同时也制约了爆破技术在煤体中的应用和发展。爆炸应力波理论一直是工程爆破界的重大研究课题, 掌握爆炸应力波的传播与衰减规律是了解受载介质动态应力场并进行爆破理论分析、计算及设计的基础。所以, 对煤体中爆炸应力波进行实验测试, 深入探讨煤体爆破作用机理, 具有重要意义。

1 理论分析

1.1 煤体中爆炸应力波作用机理

炸药在煤体中爆炸后, 将产生爆炸应力波和爆生气体, 爆炸应力波作用先于爆生气体作用。爆破近区, 爆轰波直接作用于孔壁形成爆炸冲击波, 且爆炸冲击波的压力远高于煤体的动态抗压强度, 煤体固体骨架发生变形破坏; 孔壁产生初始裂隙的同时, 部分原生裂隙被扩展, 炮孔周围产生压缩粉碎区并形成爆炸空腔。粉碎区边界上, 冲击波衰减为应力波, 并以弹性波的形式向煤体内传播, 产生的切向拉应力大于煤体的动抗拉强度, 将使煤体产生拉伸破坏, 形成与粉碎区贯通的径向裂缝, 而后由于积聚的弹性变形能释放形成环向裂隙, 且在压拉应力共同作用下造成煤体的剪切破坏。随着应力波的传播, 应力波逐渐衰减为地震波, 在远区煤体中产生爆破振动区。同时, 爆炸应力波的扰动将使煤体中瓦斯的赋存状态发生改变, 进而打破原生裂隙中瓦斯的力学平衡状态, 非平衡状态的瓦斯压力场将在爆破作用的中后期与爆生气体准静态应力场叠加共同作用于已产生的裂隙内, 使裂隙进一步扩展。

1.2 爆炸应力波作用下煤体的爆破断裂准则

煤体爆破作用机理是以岩石爆破理论和损伤力学为理论基础。岩石爆破理论认为^[4], 岩石的爆破

* 收稿日期: 2010-12-23; 修回日期: 2011-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(50874039); 河南省教育厅基金项目(2010B410001);

河南理工大学杰出青年基金项目(J2010-1)

作者简介: 褚怀保(1978—), 男, 博士研究生, 讲师。

破坏是爆炸应力波的作用和爆生气体的准静态作用共同作用的结果。当炸药在无限大的煤体中爆炸时,在煤体内部将产生爆炸冲击波作用下的粉碎区(近区)、爆炸应力波和爆生气体作用下的裂隙区(中区)以及爆炸地震波作用下产生的弹性振动区(远区)。为了简化,可以将冲击波的作用区近似为应力波作用的一部分,而忽略爆破近区;其次,由于瓦斯压力远小于爆炸应力波产生的压力,在研究煤体中爆炸应力波的作用时,可以忽略瓦斯压力对应力波传播的影响。所以,根据岩石中的爆炸作用机理,可得煤体在爆炸应力波作用下的损伤断裂准则。

(1)爆炸冲击波作用下,煤体产生强烈的压缩破坏,形成宏观裂隙区,因此,可采用动态抗压强度作为破坏准则,即

$$p_2 \geq \sigma_d \quad p_2 = p_c(1 + N)/[1 + N\rho_0 D/(\rho_{r0} D_2)] \quad N = \rho_0 D/[\rho_1 (D'_2 + u_1)] \quad (1)$$

式中: p_2 为耦合装药时炸药爆轰作用在煤体上的初始压力; p_c 为爆轰波阵面的压力; σ_d 为煤体动态抗压强度; $\rho_0 D$ 、 $\rho_1 (D'_2 + u_1)$ 和 $\rho_{r0} D_2$ 分别为炸药冲击阻抗、爆轰产物阻抗和煤体的冲击阻抗。

煤体^[5-6]作为一种含有大量原始损伤的微观非均质体,由形状不同、大小不同的块状颗粒叠压而成,存在许多微孔洞、微裂隙以及颗粒胶结物,同时受节理、层理等软弱结构面的影响,即便煤体中炸药爆炸形成冲击波,冲击波也会迅速衰减,作用范围非常有限,故近似认为爆轰波与炮孔壁煤体的碰撞是弹性的,煤体中直接生成弹性应力波,进而按弹性波理论或声学近似理论确定煤体界面上的初始压力,根据声学近似理论可推得煤体中的初始压力为

$$p_2 = 2p_c/[1 + \rho_0 D/(\rho_{r0} c_p)] \quad (2)$$

式中: $\rho_{r0} c_p$ 为声学近似理论条件下煤体的波阻抗, c_p 为煤体纵波波速。

(2)在爆炸应力波作用下,煤体往往表现为强脆性,可以采用 Lemaitre 等效应力概念定义的纯脆性损伤断裂准则^[7];当等效应力 σ_e 达到煤体的动态断裂应力 σ_u 时,煤体发生断裂,即 $\sigma_e \geq \sigma_u$ 。

考虑到瓦斯吸附的膨胀应力,根据有效应力原理,煤体骨架中任意一点的有效应力等于该点所受总应力 σ_i 减去孔隙膨胀应力,其中瓦斯吸附所产生的膨胀应力可以用下式计算^[8]

$$\sigma_s = [2aRT\rho(1 - 2\mu)\ln(1 + bp)]/(3V) \quad (3)$$

因此,煤体所受有效应力可表示为 $\sigma_e = \sigma_i - \sigma_s = \sigma_i - a\rho p$,其中 a 、 b 均为瓦斯吸附常数; p 为瓦斯压力, μ 为煤体泊松比; ρ 为密度, R 为摩尔气体常数; T 为绝对温度; V 为摩尔体积; $\alpha = 2aRT\rho(1 - 2\mu)\ln(1 + bp)/(3\rho V)$ 为孔隙压力因数,且 $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

2 模拟实验

通过煤体中爆炸应力波传播与衰减规律模拟实验,对模拟煤体中爆炸应力波进行实测,进而分析煤体中爆炸应力波传播与衰减规律、爆炸应力波波形特点及对煤体的作用机理。

2.1 实验方法

根据文献^[9],配置 3 类煤体试块进行室内煤体内部爆破作用实验,试块材料质量配比及物理力学性能参数如表 1 所示,表中 $w_1 : w_2 : w_3 : w_4 : w_5 : w_6 : w_7$ 为水泥、沙子、石膏、水、珍珠岩、发泡剂和云母碎的质量配比, ρ 为密度, c 为波速, φ 为孔隙率, σ 为单轴强度, E 为弹性模量。其中 I、II 类煤体各制作试块 3 块,III 类煤体制作 2 块,试块尺寸为 500 mm×500 mm×400 mm,人工搅拌,在模板中配以小型振动棒振动捣固成形,人工养护 28 d。第 III 类配比中沙子替换为碎煤,碎煤过 0.6 mm 筛;云母碎的加入量以试块骨料质量为参照。在试块中间预留直径为 16 mm 的装药孔,孔深分别为 120、140、160、180 和 200 mm,装 2.3 g 的黑索金炸药(10%颗粒状石蜡钝化的黑索金,以尽量保证实验用炸药与实践工程中煤体爆破用炸药性能相近),集中装药,用湿润黄土填塞,引火药头起爆。

应变砖尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm,材料及质量配比与被测试块的材料和质量配比相同,在养护室养护 7 d 后使用,用 AB 环氧胶作防潮层和粘结剂,经防水绝缘处理后浇筑于试块中的设计位置。应变片采用浙江黄岩测试仪器厂生产的型号为 BX120-3BA 和 BX120-3AA 的应变片,每个试块埋设 4 个应变砖,应变砖布置在药包中心水平位置的对角线上,为准确测试到爆炸应力波波波形,应变砖分

布在应力波作用区,距离药包中心的距离分别为 50、80、130、200 mm。爆炸应力波采集仪器为 USB8516,采集后用 DasView2.0 软件进行分析。为减少边界效应对爆破效果的影响,爆破时采用厚度为 20 mm 的钢板对试块进行夹制,并在试块与钢板的缝隙处充填细沙进行耦合。

表 1 各组试块材料质量配比及物理力学性能参数

Table 1 Material ratios for test models and their physical and mechanical properties parameters

类别	$\omega_1 : \omega_2 : \omega_3 : \omega_4 : \omega_5 : \omega_6 : \omega_7$	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$c / (\text{km}/\text{s})$	$\varphi / \%$	σ / MPa	E / MPa
I	1.70 : 4.10 : 0.00 : 0.80 : 0.014 : 0.060 : 0.015	1.82	2.480	1.6	30.0	9.10
II-1	1.32 : 4.50 : 0.20 : 0.60 : 0.030 : 0.046 : 0.060	1.65	1.798	2.7	20.8	5.15
II-2	1.40 : 3.90 : 0.20 : 0.60 : 0.027 : 0.048 : 0.028	1.56	1.505	5.1	13.2	3.14
II-3	1.60 : 2.80 : 0.20 : 0.60 : 0.019 : 0.054 : 0.040	1.52	1.350	6.4	7.60	2.62
III	1.70 : 4.10 : 0.30 : 0.55 : 0.021 : 0.055 : 0.030	1.41	1.017	8.3	4.50	1.32

2.2 实验结果

对 3 类煤体的 14 个试块的 56 个测点的径向和切向爆炸应力波进行了测试,采集到 84 个有效波形,由于应变砖制作、应变片防潮处理、仪器参数设置等原因,造成 28 个波形无效。可直接用 DasView2.0 软件导出波形图像,为了便于进行分析,对实测波形图进行数据输出,并截取其中波形特征明显部位用 EXCEL 输出,代表性波形如图 1 所示。对采集到的有效波形,读取每个测点的径向和切向应变峰值,对于同一类模拟煤体的同一位置测到的应变峰值,取平均值作为最终的实验数据,各测点爆炸应变波峰值如表 2 所示, $\epsilon_{r,\max}$ 为径向应变峰值, $\epsilon_{\theta,\max}$ 为切向应变峰值。

由各测点应变峰值 ϵ_{\max} 乘以煤体动态弹性模量 E_d 得到各测点的动态应力峰值。以 II-3 类煤体为例,将煤体和炸药参数带入式(2)计算出初始应力,对实验数据进行回归,取置信因数为 0.9,得到 II-3 类煤体中爆炸应力波衰减规律为 $\sigma_r = 5\ 317r^{-2.96}$, $\sigma_{\theta} = 3\ 197r^{-2.49}$ 。

其余 4 类煤体的径向应力波衰减指数分别为 2.18、2.34、2.58、3.18,本实验条件下应力波衰减指数基本符合 $\alpha = 3 - \mu / (1 - \mu)$ 。且 $E_d = c_p^2 (1 + \mu_d) (1 - 2\mu_d) / (1 - \mu_d)$, μ_d 为煤体动态泊松比。

表 2 不同位置处的爆炸应变峰值

Table 2 Peak strains of explosion strain waves at different positions

类别	$\epsilon_{r,\max} / 10^{-3}$				$\epsilon_{\theta,\max} / 10^{-3}$			
	50 mm	80 mm	130 mm	200 mm	50 mm	80 mm	130 mm	200 mm
I	-9.615 0	-4.368 0	-2.640 0	-1.482 0	3.356 0	1.276 0	0.983 2	0.693 3
II-1	-8.946 0	-4.051 0	-2.058 0	-1.135 0	2.457 0	1.276 0	0.761 2	0.545 9
II-2	-7.640 0	-3.286 0	-1.748 0	-0.9369	2.352 0	1.131 0	0.573 1	0.308 5
II-3	-6.125 0	-2.357 0	-1.021 0	-0.521 6	1.862 0	0.916 5	0.432 4	0.278 5
III	-4.557 0	-1.895 0	-0.801 8	-0.418 2	1.237 0	0.553 8	0.389 7	0.179 7

2.2 实验结果分析

(1)从图 1 可以看出,各测点处一般形成 2 段应力波形,与文献[10-12]测试结果类似。从测点第 1 段完整应力波波形可以看出,测点首先承受爆炸应力波的压应力,而后承受拉应力;应力波压缩相的作用时间较拉伸相的作用时间短,且压缩相作用时间随到炮孔中心距离的增加而延长。

炮孔中装药爆炸后,爆炸能对药包周围试块进行加载,爆轰波直接入射试块介质产生的扰动在试块

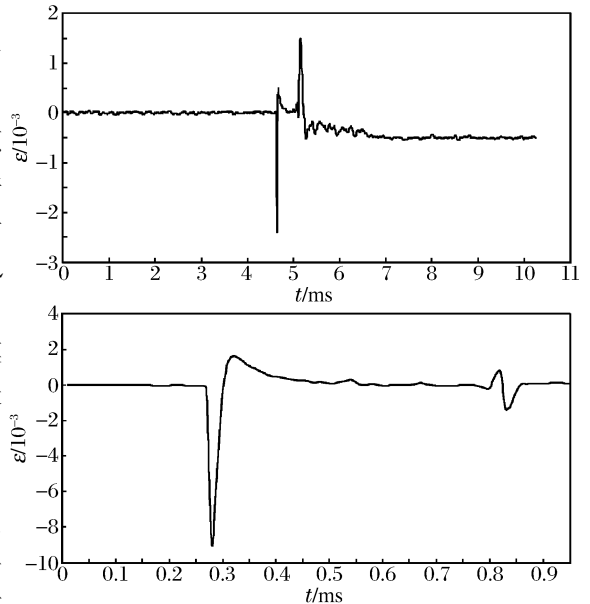


图 1 爆炸应变波典型波形

Fig.1 Explosive strain waveforms

中传播引起第 1 段由压缩相和拉伸相组成的完整的平滑应力波形。第 2 段波形的形成是爆炸压缩应力波、发射应力波、爆生气体和瓦斯气体准静态应力场共同作用的结果,波形复杂。波形图显示,压缩相的作用时间为 40~50 μs ,拉伸相作用时间基本为 100 μs 以上。

(2)从表 2 和应变分析可以看出,煤体中爆炸应力波衰减速度较一般岩石中大,实验条件下,模拟煤体中爆炸应力波衰减因数基本符合 $\alpha=3-\mu/(1-\mu)$,应力波作用范围减小。

一般岩石的爆炸应力波衰减指数为 $\alpha=2-\mu/(1-\mu)$ (μ 为煤体的泊松比,0.14~0.30),实验条件下,模拟煤体中爆炸应力波衰减因数基本符合 $\alpha=3-\mu/(1-\mu)$,也就是煤体中应力波衰减速度较一般岩石中大。煤体内存在许多微孔洞、微裂隙以及颗粒胶结物,且节理、层理等软弱结构面更发育,而应力波的衰减与孔隙度具有良好的线性关系,所以煤体中应力波的衰减速度较一般岩石中大。煤体作为一种较弱的脆性介质,在爆炸载荷作用下极易形成粉碎区而消耗大量的能量,致使爆炸应力波形成裂隙区的能量降低,不利于初始新裂隙的形成,最终也影响爆生气体后期的楔入作用。

(3)煤体中爆炸应力波的测试受煤体物理力学性能和结构特征、实验设备和实验技术等因素影响,煤体中爆炸应力波测试难度增大。

对 3 类煤体的 14 个试块的 56 个测点的径向和切向爆炸应力波进行测试,采集到 84 个有效波形,28 个无效波形。药包爆炸在爆破有效作用区范围内激起的爆炸应力波,具有频带宽、上限频率高以及幅值变化大的特点。所以要求测试系统有较好的频响性能,以保证测试到的波形不发生畸变甚至采集不到。从本次实验测试结果以及爆破后实际观察应变砖和应变片的破坏情况看,产生 28 个无效波形的主要原因是:测试系统对部分爆炸应力波的频响不够;应变砖制作过程中应变片的粘贴、防潮以及应变砖由于制作养护等因素影响导致的与大试块之间波阻抗匹配和刚度匹配存在差异。

3 结 论

在岩石爆破损伤断裂理论的基础上,对煤体中爆炸应力波作用机理及爆炸应力波作用下损伤断裂准则进行了分析,并设计了模拟煤体爆炸应力波测试实验,通过综合分析得出以下结论:(1)爆炸冲击波作用下,煤体被强烈压缩破坏而形成宏观裂隙区,可采用动态抗压强度作为破坏准则;在爆炸应力波作用下,考虑瓦斯压力作用,以等效力 σ_e 达到煤体的动态断裂应力 σ_0 为断裂准则。(2)在本实验条件下,煤体中的爆炸应变波波包含了 2 段及以上的波形。在测点初始时刻形成的第 1 段完整应力波中,测点首先承受爆炸应力波的压应力,而后承受拉应力;在作用时间上,应力波压缩相的作用时间较拉伸相的作用时间短,且压缩相作用时间随到炮孔中心距离的增加而延长。煤体中爆炸应力波衰减速度更快,本实验条件下应力波衰减因数基本符合 $\alpha=3-\mu/(1-\mu)$ 。在进行煤体中爆炸应力波测试时应在炸药选择,应变砖制作和与试块的波阻抗、刚度匹配以及测试系统选择上谨慎处理,以期获得良好的测试效果。(3)煤体中爆炸应力波的主要作用是在煤体中形成少量的新生裂隙、激活煤体中原生裂隙扩展,并打破煤体中瓦斯气体的平衡状态,使瓦斯气体参与爆生气体对煤体的作用过程。

参考文献:

- [1] 罗勇,沈兆武.深孔控制卸压爆破机理和防突试验研究[J].力学季刊,2006,27(3):469-475.
LUO Yong, SHEN Zhao-wu. Study on mechanism and test of controlled stress relaxation blasting in deep hole[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2006,27(3):469-475.
- [2] 索永录.坚硬顶煤弱化爆破的破坏区分布特征[J].煤炭学报,2004,29(6):650-653.
SUO Yong-lu. Distribution characteristic of breaking extending area of weakening-blast in hard top-coal[J]. Journal of China Coal Society, 2004,29(6):650-653.
- [3] 郑福良.含瓦斯煤体爆破裂隙发展规律的探讨[J].煤炭科学技术,1997,25(2):23-26.
ZHENG Fu-liang. The law of development of explosion fracture in gas coal[J]. Coal Science and Technology, 1997,25(2):23-26.
- [4] 杨小林,王树仁.岩石爆破损伤断裂的微观机理[J].爆炸与冲击,2000,20(3):247-252.

- YANG Xiao-lin, WANG Shu-ren. Meso-mechanism of damage and fracture on rock blasting[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000,20(3):247-252.
- [5] 杨永杰. 煤岩强度变形及微震特征的基础试验研究[D]. 山东:山东科技大学,2006.
- [6] 戴俊,王小林,梁为民,等. 爆破工程[M]. 北京:机械工业出版社,2007:108-124.
- [7] 尹光志,王登科. 含瓦斯煤岩耦合弹塑性损伤本构模型研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2009,28(5):993-999.
YIN Guang-zhi, WANG Deng-ke. A coupled elastoplastic damage model for gas-saturated coal[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009,28(5):993-999.
- [8] 吴世跃,赵文. 含吸附煤层气煤的有效应力分析[J]. *岩石力学与工程学报*,2005,24(10):1674-1678.
WU Shi-yue, ZHAO Wen. Analysis of effective stages in adsorbed methane-coal system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005,24(10):1674-1678.
- [9] 褚怀保,杨小林,余永强,等. 煤体爆破模拟材料选择试验研究[J]. *煤炭科学技术*,2010,38(5):31-33.
CHU Huai-bao, YANG Xiao-lin, YU Yong-qiang, et al. Experimental research of the choice for coal blasting simulation material[J]. *Coal Science and Technology*, 2010,38(5):31-33.
- [10] 高祥涛,颜事龙,谢兴华. 岩石中条形药包爆破瞬态应变的测量[C]//中国力学学会2009学术大会. 郑州,2009.
- [11] 赵建平. 近中区瞬时爆炸波识别及其作用规律研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [12] 段乐珍,徐国元. 爆炸应力波测试技术的研究[J]. *湖南有色金属*,1999,15(3):7-9.
DUAN Le-zhen, XU Guo-yuan. Study on the testing technique of explosive stress wave[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 1999,15(3):7-9.

A simulation-based experimental study on explosion stress wave propagation and attenuation in coal*

CHU Huai-bao¹, YANG Xiao-lin^{1,2}, HOU Ai-jun^{1,2},
YU Yong-qiang¹, LIANG Wei-min¹

(1. *College of Civil Engineering, Henan Polytechnic University,
Jiaozuo 454000, Henan, China;*

2. *Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China*)

Abstract: Based on the theory of rock blasting, the action mechanism of explosion stress wave in coal was analyzed. The damage fracture criteria for coal subjected to explosion stress wave was explored according to the damage mechanics theory. And, simulation experiments were conducted to obtain the attenuation law of explosion stress wave propagation in coal. The experimental results show that the stress wave at each measured point contains two or more waveforms, there are compression phase and tensile phase in the first wave, the waveform of which is simple and smooth, and the second wave is the result of a variety of action, the waveform of which is complex; that the coal media is first under compressive stress and then under tensile stress, the action time of the compressive stress was shorter than that of the tensile stress; and that the decay rate of explosion stress wave in coal is faster than in general rock. The main effects of explosion stress wave in coal consist of forming a small number of new crannies, activating the native cranny, and breaking the balance of coal gas.

Key words: mechanics of explosion; propagation and attenuation; simulation experiment; coal

* Received 23 December 2010; Revised 29 July 2011

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50874039)

Corresponding author: CHU Huai-bao, chuhuaibao@hpu.edu.cn

(责任编辑 张凌云)