

文章编号: 1001-1455(2005)01-0054-05

煤体不偶合装药爆腔扩展过程*

索永录, 王小林

(西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘要: 采用脉冲 X 射线摄影方法研究了煤体不偶合装药爆破时的爆腔扩展过程, 得到了实验煤体的爆腔扩展速度、扩展范围、冲击波能量传递系数及距炮孔中心不同距离处的质点位移速度等规律。

关键词: 爆炸力学; 爆腔扩展; 脉冲 X 射线; 煤体; 位移速度

中图分类号: O381; TD235.4

国标学科代码: 130 · 3510

文献标志码: A

1 引言

综采放顶煤采煤法是开采特厚煤层的高产高效新技术, 但顶煤坚硬时必须超前回采工作面对其进行预先爆破弱化处理。通过预先爆破形成的破坏区可以改变顶煤的整体结构力学特性, 它的主要作用机制是引起应力集中和控制顶煤垮落位置。由于顶煤预先爆破弱化的孔深达 30 m 以上、单孔装药量达 45 kg 以上、一次起爆药量可达 250 kg 以上, 而且为了保护作业空间不允许出现抛掷现象, 因此它不同于常规的井下煤体爆破, 有关爆破参数的合理确定、安全控制和管理等都面临着许多新问题。为认识坚硬煤体中爆破作用的特点和性质, 本文中从有关矿井采集大煤样对其爆破特性进行了脉冲 X 射线摄影爆腔扩展规律和超动态应变特性的实验, 得到到了一些很有意义的结果, 为综放开采坚硬顶煤预先爆破弱化预处理方案和参数的合理确定提供了一定的科学依据。研究结果已在红会一矿等多个坚硬煤层综放面得到应用。

2 实验方法和技术

2.1 实验方法

炸药爆炸过程所需时间极短, 由于爆炸产物膨胀形成的极高爆炸压力要冲击压缩被炸介质, 使炮孔壁面质点发生位移, 形成高速运动扩展的爆炸空腔, 空腔壁面后介质被压实而形成了压密层。通过测量孔壁质点及试样上预先埋置的铜箱在不同时刻的位移量, 便可测得爆炸近区及中区煤体内的质点位移量和位移速度与时间以及比例距离之间的关系。脉冲 X 射线具有很强的物质穿透能力, 当 X 射线通过被测煤样时, 由于在爆炸荷载下, 煤样形状和密度发生变化, 导致其出射强度改变, 用 X 光底片予以接收, 则底片就摄下黑密度不同的图像。通过分析爆炸后不同时刻拍摄的图像, 可得到煤样内物质密度的变化以及孔壁变形、质点位移的过程, 也就得到爆腔发展的动态过程。

测试时, MX-22 型闪光 X 射线发生器由操纵台(操纵台由 E324A 型通用计数器、E3341 型时间间隔测定器等构成)通过数控脉冲式同步机控制, 起爆与拍摄同步进行, 整个测试系统的精度可控制在 10 ns 内。共进行 10 次爆腔测试, 其中 7 次可用, 共进行了 6 次质点位移测试, 其中 5 次可用。

2.2 试样制作及实验技术

实验煤样来自红会一矿 2[#] 煤层, 其单轴抗压强度为 39.2 MPa, 尺寸为 0.5 m × 0.5 m × 0.4 m, 井下采集时采用了密集钻孔切割方法, 升井后立即蜡封装箱运到西安。试件在石材厂专门加工制作。

* 收稿日期: 2003-12-29; 修回日期: 2004-12-06

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(04JK168)

作者简介: 索永录(1960—), 男, 博士, 教授。

由于受闪光 X 射线源强度和穿透能力的制约，实验前，首先对煤样进行了静止穿透实验，以确定煤样的最大合理厚度。静止穿透实验是在预计实验药量爆炸后，在防护情况下保证仪器安全的最近距离上进行的。通过比较 3 个不同厚度试件的实际拍摄，最后确定试件的厚度为 140 mm。

煤样装药如图 1，实验采用不偶合装药，不偶合系数为 1.25。考虑到炸药的临界直径和试件尺寸的限制，实验采用粉状纯化泰安炸药。药卷尺寸为 $\varnothing 8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ，密度为 0.95 g/cm^3 ，药量为 1.0 g，用 8# 电雷管一端起爆。炮孔深 130 mm，用砂土堵塞，堵塞长 70 mm。采用预先在煤样中刻槽粘贴埋置 0.1 mm 厚的铜箔来测量煤体装药爆炸后不同位置的质点位移。因为煤体的密度与铜的密度相差较大，且铜箔较薄，爆后铜箔可随煤体一同运动，通过 X 射线摄影仪拍摄爆后某一时刻铜箔的位移，即可求出质点位移及其平均位移速度。测试系统拍摄的时间提前在数控脉冲式同步机中设定。测试时通过设于炮孔中的压力靶来控制起爆和拍摄同步。

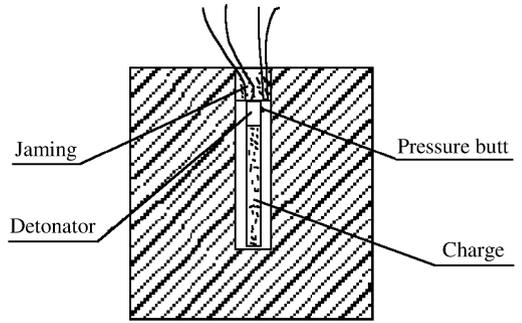


图 1 煤样装药示意图

Fig. 1 Sketch of charge in coal sample charge

3 主要实验结果分析

3.1 煤体爆腔发展过程

实验得到了装药起爆后不同时刻拍摄的 X 射线照片，典型照片见图 2。这些照片记录了起爆后 300 μs 内爆炸空腔发展及质点位移的动态过程。爆炸初期，由于爆生产物膨胀形成了以每秒几百米速度扩展的空腔，腔壁后的煤体被压实，形成了压密层。在空腔扩展运动中期，由于空腔径向与轴向运动的差异，使空腔长径比变化较大，从而也影响空腔运动。装药爆轰结束后，形成初始爆炸空腔，该爆腔的壁面呈圆锥面，起爆端直径大，爆腔两端为曲率不同的弧形曲面。

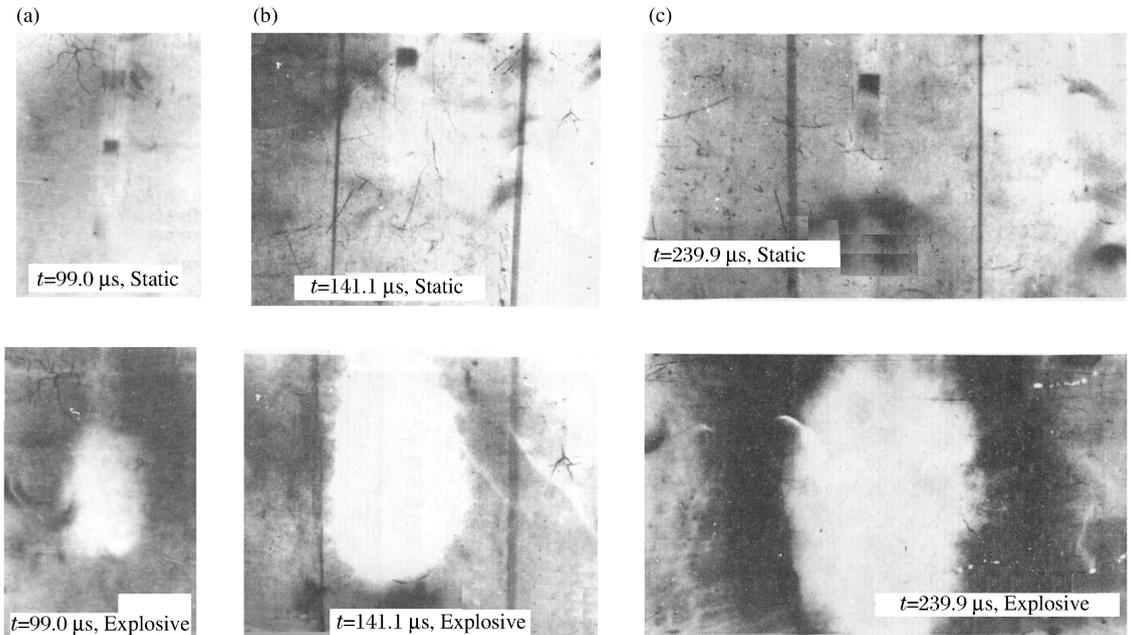


图 2 典型的煤体爆破爆腔 X 射线照片

Fig. 2 Coal body blast cavity X-radiation photos

实验测得的爆后不同时刻 t 爆腔壁面中部后压密层的平均半径 r_m , 其中 7 个可利用爆破试件的数据见表 1。相对压密层半径 $\bar{r}_m = r_m/r_0$, r_0 为炮孔半径。经拟合分析, \bar{r}_m 与 t 为幂函数关系

$$\bar{r}_m = 1.3249t^{0.291} = (t/t_0)^\alpha \quad \text{相关因数为 } 0.9895 \quad (1)$$

式中: α, t_0 为常数, 在实验条件下, $\alpha = 0.291, t_0 = 2.627 \mu\text{s}$ 。根据式(1)作出的曲线见图 3。从图 3 可以看出, $150 \mu\text{s}$ 以前曲线曲率较大, 而在该时刻后曲线变得平缓, 壁面后压密层的扩展速度下降加快。对(1)式微分, 得爆腔壁面后压密层的扩展速度公式为

$$v = v_0(t/t_0)^{\alpha-1} \quad (2)$$

式中: $v_0 = r_0\alpha/t_0$ 为速度特征函数, 将 r_0, α, t_0 值代入后得 $v_0 = 553.86 \text{ m/s}$, 所以爆腔中部壁面后压密层的扩展速度 v 与时间 t 的关系为

$$v = 553.86(t/2.627)^{-0.709} \quad 30 \mu\text{s} \leq t \leq 300 \mu\text{s} \quad (3)$$

表 1 爆腔壁面中部压密层的半径及比例距离
Table 1 The proportional distances and the radii of the middle wall of the blast cavity

$t/\mu\text{s}$	r_m/mm	\bar{r}_m	$t/\mu\text{s}$	r_m/mm	\bar{r}_m
30.0	17.0	3.4	180.9	31.0	6.2
50.0	22.0	4.4	239.9	32.5	6.5
99.0	25.0	5.0	300.0	34.0	6.8
141.1	28.0	5.6			

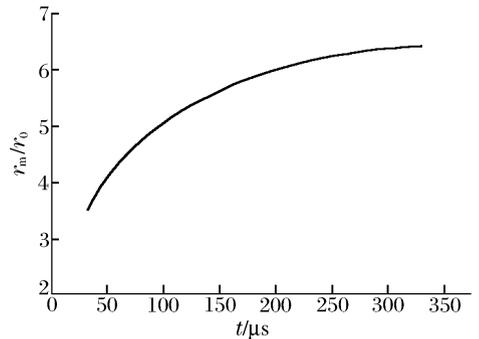


图 3 爆腔壁面中部相对压密层半径与时间的关系

Fig. 3 \bar{r}_m-t plot of the middle wall of blast cavity

3.2 煤体中爆炸质点位移测试

实验测得煤体中刻槽粘帖埋置的铜箱不同时刻的位移量, 及煤体中距炮孔中心不同距离 r 处的点在爆后不同时刻 t 的质点位移 u , 5 个可利用试件的数据见表 2。比例距离 $\bar{r} = r/r_0$ 。

表 2 距炮孔中心不同距离处的质点位移

Table 2 The particles displacements in different distances from the blast hole

\bar{r}	u/mm				
	$t=100 \mu\text{s}$	$t=140 \mu\text{s}$	$t=180 \mu\text{s}$	$t=240 \mu\text{s}$	$t=300 \mu\text{s}$
4	4.0	10.0	15.5	19.50	21.50
5	3.0	7.5	11.5	13.50	15.00
6	2.5	6.0	9.0	10.00	11.00
10	2.0	4.0	5.5	6.30	6.80
16	1.5	3.0	3.8	4.25	4.55

对表 2 中的数据进行分析, 可得到不同 \bar{r} 处质点位移 u 与时间 t 的关系(见图 4)为

$$u = \begin{cases} -70.706 + 16.357\ln t & \bar{r} = 4, \text{ 相关因数为 } 0.9914 \\ -47.179 + 11.047\ln t & \bar{r} = 5, \text{ 相关因数为 } 0.9845 \\ -32.503 + 7.754\ln t & \bar{r} = 6, \text{ 相关因数为 } 0.9726 \\ -17.866 + 4.395\ln t & \bar{r} = 10, \text{ 相关因数为 } 0.9792 \\ -10.714 + 2.726\ln t & \bar{r} = 16, \text{ 相关因数为 } 0.9673 \end{cases} \quad (4)$$

煤体装药爆炸后不同时刻质点平均位移速度 \bar{v} 与比例距离 \bar{r} 的关系曲线(见图 5)为

$$\bar{v} = \begin{cases} 567.151(\bar{r})^{-1.01} & t = 100 \sim 140 \mu\text{s} \\ 927.755(\bar{r})^{-1.389} & t = 140 \sim 180 \mu\text{s} \\ 399.422(\bar{r})^{-1.464} & t = 180 \sim 240 \mu\text{s} \\ 213.314(\bar{r})^{-1.379} & t = 240 \sim 300 \mu\text{s} \end{cases} \quad (5)$$

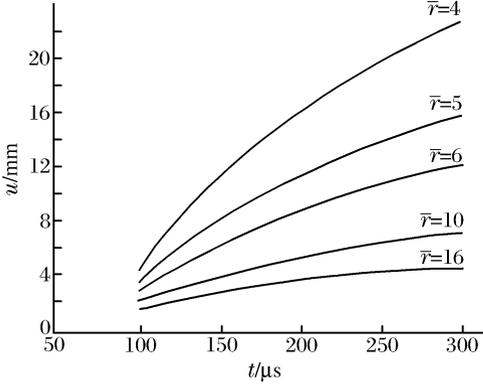


图 4 不同距离质点位移与时间的关系曲线

Fig. 4 The particle displacement vs. time plot at different distances

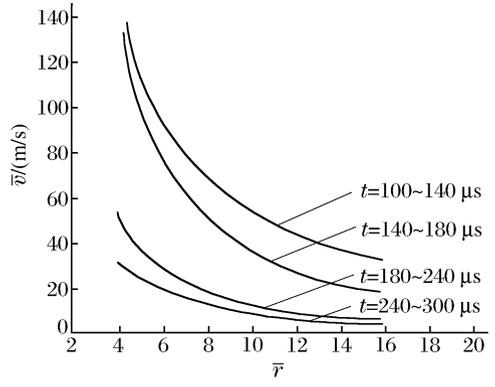


图 5 质点位移平均速度与比例距离的关系

Fig. 5 The plot of average particle displacement vs. proportional distance

3.3 煤体爆腔过程中炸药能量传递分析

爆腔形成过程炸药能量传递到煤体中的能量传递因数 $\eta = E_T / E$ ，其中炸药总能量 $E = GQ$ ， G 为装药总重量（包括雷管药量）， Q 为炸药的爆热； E_T 为冲击波能量^[1]，且

$$E_T = S\rho_0 D \int_0^\tau [v(t)]^2 dt$$

S 为冲击波作用面积， τ 为爆炸空腔形成时间， D 为冲击波速度。在质点位移速度已知的情况下，联立式 $v = D(1 - 1/\bar{\rho})$ 和

$$\bar{\rho}^5 - \bar{\rho}^4 - \bar{\rho} \left[1 + \left(\frac{2v}{c_p} \right)^2 \right] + 1 = 0$$

通过计算机迭代计算可得出冲击波速度 D ，从而得到 E_T 。式中： $\bar{\rho} = \rho/\rho_0$ 为煤的冲击压缩性； c_p 为煤体中的纵波波速。通过计算得到实验煤体中爆破冲击波的能量传递因数为 0.39，这个值要小于其它岩体中的冲击波能量传递因数^[2]。

从实验结果可发现，煤体装药爆破时，爆炸冲击波能量传递因数相对较小，150 μs 后爆腔壁面压密层扩展速度下降相对较快，煤体内质点位移量及其平均速度随比例距离下降相对较快，这说明煤体爆破时随比例距离的增加，爆炸能量的耗损较一般岩石大。造成这种情况的主要原因是，与一般岩石相比，煤体中各种裂隙等弱面相对发育，特别是构造裂隙较多，且裂隙中充填物多为方解石等松软矿物所致。因此在顶煤爆破弱化时应采用不耦合装药结构，以便合理减少爆炸的动作用，增大爆炸的准静态作用。

4 结 论

在本实验条件下，可得到以下主要结论：

(1) 坚硬煤体不耦合装药爆破时，形成的初始爆炸空腔的壁面呈圆锥面，起爆端直径大，爆腔两端为曲率不同的弧形曲面。初始爆腔形成后，爆炸产物呈准静态向外膨胀，使爆腔不断扩大。爆腔壁面后压密层径向扩展速度按幂指数下降。

(2) 爆炸初期，冲击波能量占炸药能量的 39%，其值小于硬岩中冲击波的相应值，说明煤体中爆炸的波耗损大。

(3) 煤体装药爆炸后，质点位移随时间按对数形式变化，近距离质点位移增幅大，远距离次之。质点

位移平均速度随比例距离按指数形式衰减,初期衰减幅度大,后期次之。

本实验得到 204 所袁秋长高级工程师等的大力支持,在此表示衷心感谢。

参考文献:

- [1] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984.
- [2] 高金石,张奇. 爆破理论与爆破优化[M]. 西安:西安地图出版社,1993.
- [3] 林大能,胡伟,彭刚. 爆炸挤压成腔中的不耦合效应研究[J]. 煤炭学报,2002,27(2):144-147.
LIN Da-neng, HU Wei, PENG Gang. Study of de-coupling effect in the form of underground space compacted by explosion[J]. Journal of China Coal Society, 2002,27(2):144-147.
- [4] 席道瑛,郑永来,张涛. 大理石和砂岩动态本构的实验研究[J]. 爆炸与冲击,1995,15(3):260-266.
XI Dao-ying, ZHENG Yong-lai, ZHANG Tao. The experimental research in dynamic constitutive laws of marble and shale[J]. Explosion and Shock Waves, 1995,15(3):260-266.

Experimental research on the expansion of blast cavity of de-coupling charge in coal

SUO Yong-lu^{*}, WANG Xiao-lin

(Xi'an University of Science & Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: The expansion of the blast cavity of de-coupling charge in coal is investigated using the pulse X-radiation photography. The expansion speed and bound of the cavity, the energy transferring factor of shock wave, and the particle velocity at different distances from the blast hole centers are obtained.

Key words: mechanics of explosion; expansion of blast cavity; pulse X-radiation; coal body; displacement speed

* Corresponding author: SUO Yong-lu
E-mail address: shiya@xust.edu.cn
Telephone: 029-85583254