

不同耦合装药结构的爆破效果分析

高保彬^{1,2,3}, 刘云鹏^{1,3}, 王祖洸^{1,3}

(1. 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室, 河南 焦作 454000;
2. 河南理工大学 深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南 焦作 454000;
3. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了研究不耦合装药结构与不同介质耦合装药结构的定向断裂光面爆破效果, 得到最佳装药结构, 从而解决工程爆破中存在的技术问题, 以华泰煤矿为工程背景, 采用4种装药结构, 分别通过实验室实验和现场工业实验对水-空气耦合、水耦合、空气耦合和水不耦合进行巷道围岩的爆破效果进行分析对比, 实验结果证明, 在华泰煤矿采用水耦合爆破, 可使围岩或预留岩面的完整性、稳定性较好。

关键词: 不耦合装药; 光面爆破; 应变测试; 应变砖; 水耦合爆破

中图分类号: TD235.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2014)03-0010-05

Analysis of blasting effect under different coupling charge structure

GAO Baobin^{1,2,3}, LIU Yunpeng^{1,3}, WANG Zuguang^{1,3}

(1. Stage Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control (Henan Polytechnic University), Jiaozuo 454000, China;
2. Opening Project of Key Laboratory of Deep Mine Construction, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;
3. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to study the effect of smooth blasting directional fracture under decoupled and coupling of different media charge structure, get the best charge structure and then solve the technical problems existing in the engineering blasting, four kinds of charge structure were used (water-air coupling, water coupling, air coupling and water decoupled) as the engineering background of Huatai coal mine in the laboratory and in the field, the blasting effect was analyzed and contrasted, the experimental results show that it make the surrounding rock or reserved rock face have a good completeness and stability to in Huatai coal mine with water coupling blasting.

Key words: decoupled charge structure; smooth blasting; strain test; strain brick; water coupling blasting

随着控制爆破技术的广泛应用,许多工程中涉及到高含水控制爆破的问题,例如井巷工程中的含水孔和井下码头建设中的光面爆破、预裂爆破和定向断裂控制爆破等。而巷道围岩的物理力学性质在本质上决定了爆破效果的好坏,同时,炸药和周围介质之间的耦合程度也是影响爆破效果的关键因素之一,不耦合或耦合不好将会使岩体中由炸药激发的爆炸应力波的强度降低^[1-2]。

针对不同耦合介质以及不耦合作用下巷道的

爆破效果,国内一些学者做了大量研究^[3-5]。姜鹏飞等^[6]采用动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,对柱状炸药与药孔壁之间为空气或其他介质以及空隙间距变化时碳酸盐岩岩石中爆炸应力波的传播规律进行了数值模拟研究,得到了不耦合装药爆炸时岩石应力、振动速度的衰减规律以及不耦合系数、间隙介质的关系;闫国斌等^[7]利用 LS-DYNA 建立了三维单孔不耦合装药爆破模型,并进行数值模拟,再现了不耦合装药爆破的应力发展过

收稿日期:2013-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1304502);河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地开放基金项目(WS2012B06);教育部博士点基金项目(20134116120001)

通信作者:高保彬(1978-),男,河南民权人,博士,讲师,主要从事矿山安全开采方面的研究。E-mail:gaobaobin@163.com

程,得出了爆破应力云图、应力和位移时程曲线图;罗云滚等^[8]建立了爆炸载荷作用下岩石的动态应力场,并求出了炮孔水耦合装药爆破时裂隙区半径、粉碎区半径和光面爆破或其它成型控制爆破的最佳装药不耦合系数;Hakan Ak等^[9]针对菱镁矿地下爆破所引起的地面震动问题,设计出合理的爆破装药结构;M. Hajihassani等^[10]采用人工神经网络的方法模拟了井下爆破作用对周围岩体的影响;P. K. Singh等^[11]通过设计合理的爆破方式和爆破参数,解决了深井爆破过程中所引发的超挖、欠挖等问题;卢应发等^[12]在理论研究的基础上,建立了岩石与水相互作用的力学模型和耦合参数的表述形式;刘永胜等^[13]在分析空气介质耦合切缝药包装药结构的基础上,结合含水炮孔爆破技术的成果,提出了一种新的水耦合切缝药包装药结构;赵华兵等^[14]在分析炮孔水耦合装药爆破时孔壁岩石上的初始透射压力和投射能量的基础之上,研究了爆破荷载与岩石介质的相互作用,得出其初始透射压力和投射能量不仅与炸药性能和岩石性质有关,还与不耦合系数有着密切的关系;梁为民等^[15]采用模拟试验方法得出单孔爆破试验,复合型切缝药包水介质耦合装药是最佳装药结构。

从这些研究中可以发现,大部分学者都只是采用单一介质进行耦合,或者采用不耦合的方式进行装药,介质选用的好坏与否不能够得到合理的证实.因为在水耦合装药时,炸药和被爆岩石之间出现了不同于空气的中间介质-水,水的性质和空气有很大的不同,所以2种耦合装药结构的特点有很大的差别.为解决此类问题,本文以华泰煤矿为工程背景,采用4种装药结构,分别对水-空气耦合、水耦合、空气耦合和水不耦合进行巷道围岩的爆破效果进行研究,从而得出适合于本矿井的最佳耦合装药结构,为实现定向断裂光面爆破提供了理论依据和数据支撑。

1 实验设计

1.1 装药结构的设计

本文以华泰煤矿为工程背景,在华泰煤矿二采区回风上山掘进工作面选取岩样,通过加工,在实验室进行工业实验.根据前人研究的成果和理论分析,结合非爆破方式破岩(高压水射流)和爆破方式破岩的研究方法和相关理论,考虑加入水介质条件下,并在综合分析了众多装药结构的基础上提出了4种结构设计,通过实验室模拟试验分析优化出一种适合含水炮孔条件且定向效果最好的装药结构,如图1所示,图中炮孔直径均为32 mm。

1.2 应变测点的布置

应变砖的布置见图2,本次共实验了9个模

型,对27个测点进行了测试,共测到有效波形22个(其余由于测误触发、应变片及干扰等原因没有采集到数据或者是无效的波形)。

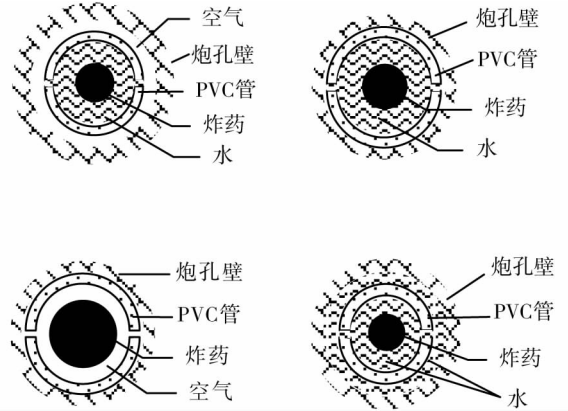


图1 4种装药结构示意图

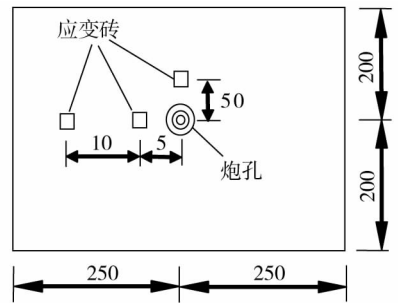


图2 应变测点布置示意图

2 测试结果及分析

2.1 测试结果

用窗函数截取波形,并输出数据,经过简单的5点3次平滑和零线修正后,读取其应变波峰值和峰值时间,其结果见表1~表4所示.所测到的波形见图3所示(在生成的22个有效波形中选取代表性的4个图形进行说明),图中A、B分别表示径向和切向,前2位数字表示试件编号,第3位数字表示应变砖的位置,后3位数字表示应变砖到炮孔中心的距离。

2.2 测试结果分析

1)水-空气耦合结构产生的应变不仅受不耦合系数的影响很大,而且受PVC管的缝宽的影响也比较大.如缝宽相同的情况下,03试件(药量1.5 g,不耦合系数1.28)A031050($S_m = 2\ 718$),A033050($S_m = 1\ 886$);而01试件(药量2.0 g,不耦合系数1.60)A011050($S_m = 2\ 691$),A013050($S_m = 1\ 625$).而在相同药量和不耦合系数情况下,02试件(药量1.5 g,缝宽6 mm)A021050($S_m = 2\ 473$),A022100($S_m = 1\ 232$)而03试件(药量1.5 g,缝宽4 mm)A031050($S_m = 2\ 718$),A033100($S_m = 1\ 520$).

2)水耦合装药结构在定向方向产生的应变与垂直定向方向的应变之差很大.如 A141050($S_m = 4897$)和 A143050($S_m = 1995$),前者是后者的2.46倍.

3)相同药量、PVC管径同为32mm时,水耦合结构和空气耦合结构测试结果比较看,前者在定向

方向产生的应变比后者大得多,在垂直定向方向,前者产生的应变比后者也要大.如 A141050($S_m = 4897$)和 A143050($S_m = 1995$)而 A151050($S_m = 2085$)和 A153050($S_m = 1021$).这是由于药包在水中爆炸时,在水中产生的冲击强度大于空气间隔中的冲击波强度.

表1 水-空气耦合结构应变测试结果

| 试件和应变砖位置 | 缝宽/mm | 不耦合系数 | 药量/g | 药卷半径/mm | 径向 | | |
|----------|-------|-------|------|---------|---------------------|---------------|-------|
| | | | | | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值时间/ μs | |
| 01 | 1# | 4 | 1.60 | 2.0 | 6 | 2 691 | 160 |
| | 2# | 4 | 1.60 | 2.0 | 6 | 1 167 | 160 |
| | 3# | 4 | 1.60 | 2.0 | 6 | 1 425 | 160 |
| 02 | 1# | 6 | 1.28 | 1.5 | 6 | 2 473 | 70 |
| | 2# | 6 | 1.28 | 1.5 | 6 | 1 232 | 290 |
| 03 | 1# | 4 | 1.28 | 1.5 | 6 | 2 718 | 70 |
| | 2# | 4 | 1.28 | 1.5 | 6 | 1 520 | 330 |
| | 3# | 4 | 1.28 | 1.5 | 6 | 1 886 | 380 |
| 04 | 1# | 4 | 1.60 | 1.2 | 5 | 1 813 | 80 |
| | 2# | 4 | 1.60 | 1.2 | 5 | 748 | 180 |
| | 3# | 4 | 1.60 | 1.2 | 5 | 1 240 | 1 196 |

表2 水耦合结构应变测试结果

| 试件和应变砖位置 | 缝宽/mm | 药量/g | 药卷半径/mm | 径向 | | |
|----------|-------|------|---------|---------------------|---------------|-----|
| | | | | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值时间/ μs | |
| 05 | 1# | 4 | 1.0 | 5 | 3 035 | 30 |
| | 2# | 4 | 1.0 | 5 | 2 425 | 30 |
| | 3# | 4 | 1.0 | 5 | - | - |
| 06 | 1# | 4 | 1.0 | 5 | 4 897 | 90 |
| | 2# | 4 | 1.0 | 5 | 1 801 | 110 |
| | 3# | 4 | 1.0 | 5 | 1 995 | 110 |

表3 空气耦合结构应变测试结果

| 试件和应变砖位置 | 缝宽/mm | 药量/g | 药卷半径/mm | 径向 | | 切向 | | |
|----------|-------|------|---------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|-----|
| | | | | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值时间/ μs | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值时间/ μs | |
| 07 | 1# | 4 | 1.0 | 5 | - | - | 2 988 | 120 |
| | 2# | 4 | 1.0 | 5 | 788 | 120 | 1 035 | 120 |
| | 3# | 4 | 1.0 | 5 | 1 219 | 120 | 1 601 | 120 |
| 08 | 1# | 4 | 2.0 | 6 | 2 085 | 200 | - | - |
| | 2# | 4 | 2.0 | 6 | 469 | 250 | - | - |
| | 3# | 4 | 2.0 | 6 | 1 021 | 210 | - | - |

表4 水不耦合结构应变测试结果

| 试件和应变砖位置 | 缝宽/mm | 不耦合系数 | 药量/g | 药卷半径/mm | 径向 | | 切向 | | |
|----------|-------|-------|------|---------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|----|
| | | | | | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值时间/ μs | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值时间/ μs | |
| 09 | 1# | 4 | 1.60 | 1.0 | 5 | 2 099 | 80 | -6 093 | 50 |
| | 2# | 4 | 1.60 | 1.0 | 5 | 996 | 140 | -2 985 | 50 |
| | 3# | 4 | 1.60 | 1.0 | 5 | 1 495 | 160 | -8 306 | 60 |

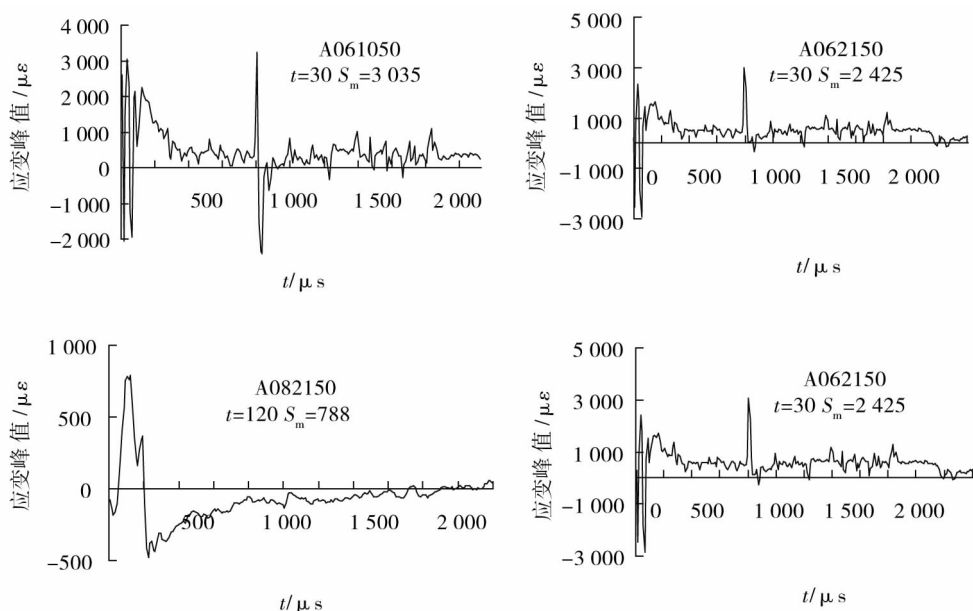


图3 不同耦合方式下应变波测试结果

4) 水不耦合结构(管径为2 cm)装药结构比水-空气耦合结构产生的应变大.如12试件(药量1.0 g) A121050($S_m = 2\ 099$), A122100($S_m = 996$), A123050($S_m = 1\ 495$)而04试件(药量1.2 g) A041050($S_m = 1\ 813$), A042100($S_m = 748$), A043050($S_m = 1\ 240$).

5) 空气耦合装药和水-空气耦合结构对比来看,水的加入明显加强了射流的能量,同时也增加了垂直定向方向的能量.如A031050($S_m = 2\ 718$), A033050($S_m = 1\ 886$)而A151050($S_m = 2\ 085$)和A153050($S_m = 1\ 021$).

6) 应变的衰减分析见表5.

表5 应变的衰减分析

| 装药结构 | 试件和应变砖位置 | 应变峰值/ $\mu\epsilon$ | 峰值比值 |
|--------|----------|---------------------|-------|
| 水-空气耦合 | 01 | 1# | 2 696 |
| | | 2# | 1 167 |
| | 02 | 1# | 2 473 |
| | | 2# | 1 232 |
| | 03 | 1# | 2 718 |
| | | 2# | 1 520 |
| | 04 | 1# | 1 813 |
| | | 2# | 748 |
| 水耦合 | 14 | 1# | 4 897 |
| | | 2# | 1 801 |
| 空气耦合 | 15 | 1# | 2 085 |
| | | 2# | 469 |
| 水不耦合 | 12 | 1# | 2 099 |
| | | 2# | 996 |

注:1#应变砖距离孔中心5 cm,2#应变砖距离炮孔中心15 cm

从表5中可以看出,加水时应力波比不加水时应

力波衰减得慢.由此可见,加水时应力波在近区的作用比不加水时明显,因为其作用范围和作用强度更大.而同为加水的各种装药结构衰减效果相差不大.

3 现场工业实验

3.1 工业实验过程

在华泰煤矿各级领导和科室、队组的相关技术人员的大力支持协助下,在二采区回风上山巷道掘进施工过程中,进行了为期4个月的工业性试验.在为期4个月的现场工业性试验过程中,分别进行了定向断裂控制爆破技术在空气耦合和水耦合作用的试验.在现场工业性试验期间开挖轮廓成形规则,岩面平整,岩面上留下的半眼痕率坚硬岩石为>90%以上,中硬岩石为>80%.在软岩中,由于炮眼残痕保留时间很短,但巷道整体成型好,巷道爆破后岩面无松动、无危石,以及无明显的爆破裂隙.尤其在水耦合的试验时,巷道表面温度明显降低.部分统计结果如表6所示.

3.2 实验结果分析

从华泰煤矿二采区回风上山巷道掘进过程中爆破工业性实验结果可以看出:

- 1) 无论是空气耦合还是水耦合下的光面爆破,炮眼利用率基本达到95%以上,平均96%;
- 2) 水耦合下炮眼的利用率高于空气耦合下光面爆破炮眼的利用率;
- 3) 水耦合下光面爆破的平均超挖量在+60~+130 mm,大于空气耦合下光面爆破的平均超挖量+43~+110 mm.这是因为,水耦合结构比空气耦合结构在定向方向和垂直定向方向产生的应变

都大得多,爆破瞬间产生的冲击波作用于水体上形成的应变能也就高于作用于空气形成的应变能;

4)工业实验结果和实验室情况下得出的结果基本相吻合.

表6 巷道爆破开挖效果部分统计表

| 编号 | 地点 | 耦合方式 | 炮眼利用率/% | 超挖(欠挖)量/mm | 周边眼炮痕保存率/% | 有效进尺/m |
|----------------|------------|------|---------|------------|------------|--------|
| A ₁ | 回风上山巷道(硬岩) | 空气 | 95 | +50 ~ +100 | 91 | 2.1 |
| A ₂ | 回风上山巷道(中硬) | 空气 | 94 | +40 ~ +100 | 82 | 2.2 |
| A ₃ | 回风上山巷道(中硬) | 空气 | 96 | +40 ~ +120 | 83 | 2.2 |
| B ₁ | 回风上山巷道(硬岩) | 水 | 98 | +50 ~ +150 | 93 | 2.3 |
| B ₂ | 回风上山巷道(中硬) | 水 | 97 | +50 ~ +100 | 94 | 2.2 |
| B ₃ | 回风上山巷道(中硬) | 水 | 96 | +70 ~ +120 | 87 | 2.3 |

4 结论

1)水耦合装药结构在定向方向产生的应变值最大,其定向方向和其垂直方向的差值也是最大的.这说明水耦合装药结构具有能更好的传递能量.同时,水耦合装药结构应变波的衰减是最慢的,这使得应力波在近区的作用得到加强.

2)含水炮孔的装药结构以水耦合结构效果最好,该装药条件下定向裂纹没有大的弯曲,且形成的裂纹面比较平整.这种装药结构下,PVC管缝宽在2~6 mm范围内、药卷半径5 cm左右都能形成明显的定向效果.经过比较分析,缝宽为4 mm、药卷半径为5 cm左右效果最好.

3)因为水的密度大、具有不可压缩性,炸药在水中爆炸后的气体产物的膨胀速度要比在空气中慢的多;根据帕斯卡原理,水能够把压强更加均匀、缓和的作用在周围的介质上.水耦合对炮孔压力的均匀、缓和作用,降低了炮孔周围的过粉碎现象(全耦合中很常见的现象),使炸药能量的利用更加均匀、合理.水耦合爆破对围岩的破坏要比全耦合中有很大的改善,使围岩或预留岩面的完整性、稳定性都比较好.

参考文献:

[1] 陈世海,林从谋. 水压爆破岩石的破坏特征[J]. 煤炭学报,1996,21(1):24-29.
 [2] 钟冬望,廖乃正. 导爆索水孔爆破切割技术探讨[J]. 爆破,2001,18(4):11-14.
 [3] 杨小林,王树仁. 岩石爆破损伤及数值模拟[J]. 煤炭学报,2000,25(1):18-23.
 [4] 杨小林,王梦恕,王树仁. 爆破对岩体基本质量影响及试验研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(4):461-464.

[5] 宗琦,杨吕俊. 石中爆炸冲击波能量分布规律初探[J]. 爆破,1999,16(2):1-6.
 [6] 姜鹏飞,唐德高,龙源. 不耦合装药爆破对硬岩应力场影响的数值分析[J]. 岩土力学,2009,30(1):275-279.
 [7] 闫国斌,于亚伦. 空气与水介质不耦合装药爆破数值模拟[J]. 工程爆破,2009,15(4):13-19.
 [8] 罗云滚,罗强,宗琦. 炮孔水耦合装药爆破破岩机理研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版),2004(增刊):60-63.
 [9] Hakan A, Melih I, Mahmut Y, et al. Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2009(29):669-676.
 [10] Hajihassani M, Armaghani D J, Sohaei H, et al. Prediction of airblast - overpressure induced by blasting using a hybrid artificial neural network and particle swarm optimization [J]. Applied Acoustics, 2014(80):57-67.
 [11] Singh P K, Roy M P, Ranjit K P. Controlled blasting for long term stability of pit - walls [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2014(70):388-399.
 [12] 卢应发,孙慧,陈高峰. 岩石和水耦合参数在破裂过程中的演化规律[J]. 工程力学,2010,27(2):19-28.
 [13] 刘永胜,傅洪贤,王梦恕,等. 水耦合定向断裂装药结构试验及机理分析[J]. 北京交通大学学报,2009,33(1):109-112.
 [14] 赵华兵,龙源,胡新印,等. 水耦合装药爆破荷载与岩石介质相互作用研究[J]. 西部探矿工程,2012(3):16-20.
 [15] 梁为民,黄小广,杨小林,等. 水耦合炮孔毫秒爆破成缝试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版),2007,26(4):419-423.