

文章编号: 0253 - 9993 (2006) 06 - 0765 - 05

# 定向断裂爆破装药结构实验研究

梁为民, 刘永胜, 杨小林, 谢华刚

(河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454003)

**摘要:** 在分析不同切缝药包的基础上, 提出一种适合含水炮孔条件的新型水介质不耦合切缝药包, 与其它不同形式切缝药包进行对比实验。在单孔、3孔条件下进行了模拟爆破试验, 测试和分析了不同切缝药包爆破应变波, 并对 3孔条件下爆破的定向断裂效果和损伤进行了测试分析。结果表明: 水介质不耦合切缝药包具有很好的定向断裂效果, 切缝宽度为 2~6 mm、不耦合系数为 1.2~2.0 时都有明显的定向效果。最后分析了爆炸水射流切缝药包作用下的岩体开裂机理。

**关键词:** 定向断裂; 装药结构; 剪切破坏; 开裂条件

**中图分类号:** TD235.373 **文献标识码:** A

## Experimental study of charging constitution of directional splitting blasting

LIANG Weimin, LU Yongsheng, YANG Xiaolin, XIE Hua-gang

(Institute of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

**Abstract:** A new water uncoupled charge with slots which was adapted to water-bearing blasthole blasting was proposed based on the study of other charges with slots. Some contrast tests between this new charging constitution and other charges with slots were carried. Through single hole and triple holes simulation tests, some strain-wave pictures and their parameters under tests of different styles of charges with slots were tested, cracking and damage effects were also tested. The results prove that good directional effect by using this new charging constitution when the width of slot is from 2 to 6 mm and the nominal uncoupled coefficient is from 1.2 to 2.0. At last, the crack mechanism of rock in the condition of charge with slots was analyzed preliminarily.

**Key words:** directional splitting; charging constitution; shear failure; cracking condition

随着现代工程爆破技术的发展, 人们对工程爆破的要求也越来越高。如何精确控制爆破时裂缝的产生位置和发展方向以及断裂面的形成, 获得较为平整的开挖面正引起越来越多学者的关注。定向断裂控制爆破技术<sup>[1-4]</sup>为这一需求提供了可行的解决办法。前苏联科学院西伯利亚分院矿业大学的 Isakov A L 博士<sup>[1]</sup>提出了紧贴炮孔壁放置一个与孔深一样长的轴向刻槽的固体壳(带切缝)的装药方式。试验表明, 壳体的强度和厚度以及空腔的初始爆压是影响爆后破裂分布的基本因素。王树仁教授<sup>[2]</sup>提出了采用 PVC 管作为药包外壳、空气不耦合的装药方式。通过实验发现, 不耦合系数为 1.33、切缝宽度为 4 mm 时能取得很好的定向效果。但 PVC 管很容易在炸药爆炸形成的强大冲击力下被劈开成两半, 定向方向的能量利用率不高。另外, 由于 PVC 管和炮孔壁之间是空气介质耦合, PVC 管会获得巨大的冲击速度并对炮孔壁形成冲击, 形成了反定向裂缝。朱振海、杨永琦教授<sup>[5]</sup>等对炮孔爆破中径向裂纹扩展的复合型应力强度因子进行了研究。戴俊教授<sup>[6]</sup>对利用数值模拟为工程实践中切缝管宽度取 3~5 mm 找到了理论依据。王汉军、

收稿日期: 2006-01-17

基金项目: 河南省杰出青年基金资助项目 (0312000500); 河南省高校杰出科研人才创新工程师资助项目 (2006KYCX012); 河南省教育厅科技攻关基金资助项目 (200510460005)

作者简介: 梁为民 (1967-), 男, 河北承德人, 博士, 副教授。E-mail: liangwm@hpu.edu.cn

黄风雷教授<sup>[7]</sup>等对岩石定向断裂爆破的力学模型及参数进行了研究。张志呈教授<sup>[8,9]</sup>对岩石断裂控制爆破的裂纹扩展等多个方面进行了研究。

在含水炮孔方面, 美国科学家 Bridgman, Cole 等对 TNT、特屈儿和偏托里特等炸药的球形药包水下爆炸冲击波进行了研究; 保姆、萨多夫斯基等前苏联和捷克科学家对水中冲击波的传播等爆炸流体动力学问题进行了研究; 日本发明了 ABS 法并应用于小炮眼爆破中。陈士海等教授<sup>[10]</sup>对水压爆破岩石的破坏特征进行了研究, 建立了水压爆破模型, 对装药量进行了计算, 但对含水炮孔的定向断裂研究很少。

## 1 切缝药包的装药结构形式

针对目前国内外的研究, 考虑到工程实际的特殊需要, 提出一种新型的水介质耦合切缝药包爆破技术(图 1)。该装药结构有如下优点: 水中爆炸形成的冲击波比空气冲击波的波峰压力强得多, 切缝对炮孔壁进行冲击; 水介质的不可压缩性和良好的传能效果减少爆炸能量的损耗; 水介质的密度比空气介质大, 增大射流的能流密度, 爆炸水射流利于裂缝形成、发展和贯穿, 提高炸药能量的利用率。

另外, 为了分析含水条件下水介质对定向效果和围岩的影响以及 PVC 管位置对定向效果的影响, 设计了另外 3 种切缝药包装药型式, 分别进行对比试验, 装药结构型式如图 1 所示。

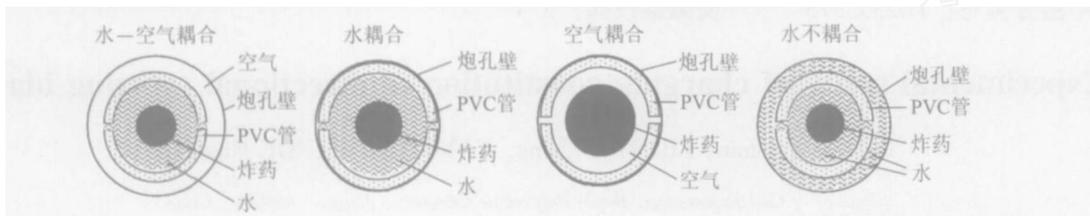


图 1 4种装药结构

Fig. 1 Four charging constitution

## 2 定向断裂试验与含水炮孔切缝药包爆破岩体的开裂机理

实验炸药选用单质黑索金, 其主要性能参数: 做功能力为 500 mL, 猛度为 16 mm, 爆速为 8 300 m/s, 爆热为 5 350 kJ/kg。选择模型: 单孔试块尺寸为 500 mm × 400 mm × 200 mm, 双孔试块尺寸为 600 mm × 400 mm × 200 mm, 3孔试块尺寸为 400 mm × 400 mm × 270 mm。单孔和双孔试件炮孔直径均为 32 mm, 孔深均为 130 mm; 3孔试件炮孔直径为 12 mm, 孔深 180 mm。炮孔用黄土炮泥堵塞。试件和应变砖配比均为 1 2.5 0.6 (水泥 砂 水), 所用水泥标号为复合 PC32.5 水泥。试件力学参数: 抗压强度为 13.5 MPa, 抗拉强度为 1.3 MPa, 弹性模量为 20 GPa。

### 2.1 定向断裂应变测试与分析

采用 USB 便携式数据采集仪和专用的 DaSView2 虚拟仪器对数据进行采集。应变元件为与模型相同配比的应变砖, 尺寸为 20 mm × 20 mm × 20 mm。选用 BX120 - 3AA 型箔式应变片, 栅长为 3 mm × 2 mm, 单孔装药爆破测点布置如图 2 所示。对 11 个模型、36 个测点进行了测试, 共测到有效波形 30 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。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, 其中部分结果见表 1, 测试部分波形如图 3 所示, 其中  $s_{max}$  为应变值。由表 1 及图 3 可以看出:

(1) 比较相同药量下水耦合与空气耦合可以看出, 在定向方向, 前者产生的应变值 (4 897) 是后者 (2 085) 的 2.35 倍; 在垂直定向方向, 前者产生的应变值 (1 995) 是后者 (1 021) 的 1.95 倍。这说明在水中产生的冲击强度大于空气间隔中的冲击波强度, 同时, 水中冲击波的衰减速度要远低于空气介质中冲击波的衰减速度。

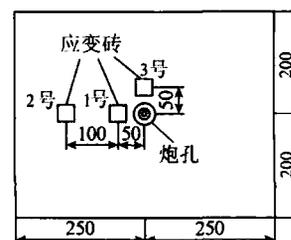


图 2 应变砖布置

Fig. 2 Layout of measuring point of strain

表 1 动态应变测试结果

Table 1 Testing results of dynamic strain

装药方式和 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 $\mu$	1, 3号应变 片峰值比值
1 - 1号	4	1.6	1.2	5	1 813	
1 1 - 2号	4	1.6	1.2	5	748	1.460
1 - 3号	4	1.6	1.2	5	1 240	
2 - 1号	4	1.0	1.0	5	4 897	
2 2 - 2号	4	1.0	1.0	5	1 801	2.460
2 - 3号	4	1.0	1.0	5	1 995	
3 - 1号	4	1.0	2.0	6	2 085	
3 3 - 2号	4	1.0	2.0	6	469	2.042
3 - 3号	4	1.0	2.0	6	1 021	
4 - 1号	4	1.6	1.0	5	2 099	
4 4 - 2号	4	1.6	1.0	5	996	1.404
4 - 3号	4	1.6	1.0	5	1 495	

(2) 从水不耦合结构和水 - 空气耦合结构的比较来看, PVC管在外层水介质的包裹保护之下, 对 PVC管内部的水介质具有更好的约束能力, 形成了更强的水射流, 因为药量为 1 g 时水不耦合结构在定向方向产生的应变值为 2 099  $\mu$ , 而水 - 空气耦合结构药量为 1.2 g 在定向方向产生的应变值为 1 813  $\mu$ . 这说明 PVC管很容易被爆炸产生的冲击力劈开成两半, 切缝药包定向爆破中应注意 PVC管的加固. 用水介质进行约束及直接利用炮孔壁对 PVC管进行加箍都是好方法.

(3) 从相同药量下水耦合和水不耦合的比较来看, 定向方向应变值前者是后者的两倍多, 说明 PVC管的位置对定向方向的应变值影响很大. 这是因 PVC管紧挨炮孔壁放置使其不易被爆炸产生的冲击力撑开, 更有利于定向方向射流的形成. 可见, 含水炮孔切缝药包定向断裂爆破中, PVC管应紧挨炮孔壁放置.

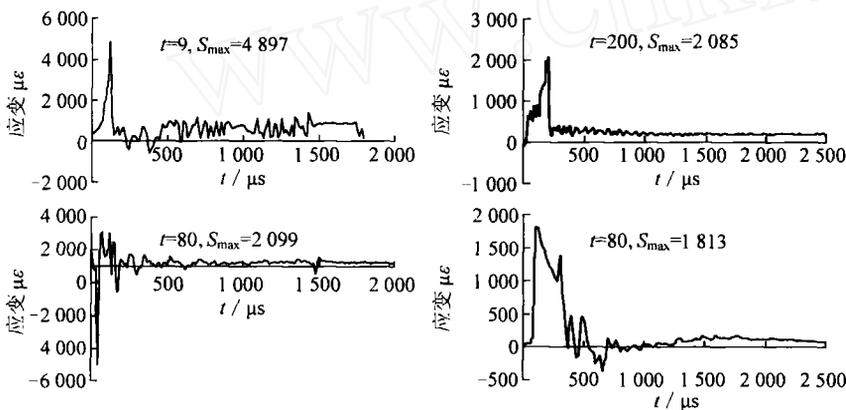


图 3 部分动态应变测试波形

Fig. 3 Some testing oscillogram of dynamic strain

## 2.2 定向断裂效果分析

在水 - 空气耦合装药结构中, 无论如何改变炮孔参数 (不耦合系数、缝宽、药径和缝长) 都没能在定向方向形成开裂, 而只是在短边形成了贯穿裂纹. 但应变测试结果表明, 炮孔参数无论是何种组合, 在定向方向的应变总比垂直定向方向距炮孔中心同一距离的应变大. 这说明该装药结构还是形成了一定程度的水射流, 只是该射流的强度不够 (表 1), 而没有能在定向方向形成开裂, 但在定向方向的炮孔壁上形成了 1~2 mm 不等的凹槽. 相反, 在抵抗线小的短边即使应变值只有 748  $\mu$ , 但却能形成开裂.

在水不耦合装药结构中, 水对 PVC管有一定的保护和加箍作用, 从而增强了 PVC管的聚能作用, 由表 1 可见, 即使比水 - 空气耦合装药方式的药量少 0.2 g, 在定向方向形成的动态应变值却比它大. 但是, 该装药方式并没有使模型在定向方向形成开裂, 只是在定向方向的孔壁上形成了宏观可见的开裂纹.

水耦合装药结构能够形成很好的定向作用, 在模型不对称的情况下, 能够在抵抗线大的方向形成贯穿裂纹, 而且裂纹面非常平整, 表面裂纹线几乎是直线, 相反在模型短边方向形成的裂纹面不很平整. 可见, 在定向方向的能量分布占很大优势. 在定向方向产生的应变与垂直定向方向的应变比值最大 (表 1). 这个应变差值的存在正是炮孔壁得以开裂的原因. 因为图 1(a)和图 1(d)装药结构的比值分别为 1.44和

1.404, 这两种情况都没能把模型按定向方向裂开。但图 1(c)装药结构产生的比值为 2.042, 该情况下模型在定向方向形成了宏观可见的微细裂纹。由应变的差异分析可知, 定向方向和定向缝边缘存在比较大的应力差是模型得以在定向方向开裂的一个重要原因。该应力差的存在, 使得炮孔壁上定向缝方向首先形成剪切破坏面, 从而控制了裂纹的开裂方向。通过改变该模型下的各爆破参数(名义不耦合系数、PVC管缝宽)发现: PVC管缝宽为 2~6 mm, 名义不耦合系数在 1.2~2.0时都能形成明显的定向效果。

空气耦合装药结构中, 药量为 1.2和 1.5 g时模型依然完好。当药量增大到 2 g时, 模型从短边开裂, 而在定向缝方向的炮孔壁上形成了宽 4 mm、长 500 mm、深 2 mm的冲击痕迹。可见, 虽然爆炸产生的初始冲击在炮孔壁上形成了有利于在定向方向形成开裂的条件, 但模型却没有从定向方向开裂。这是由于定向方向空气射流的冲击强度不够而垂直定向方向由于抵抗线最小, 当药量增大时, 该方向首先形成了开裂。由此看出, 水介质比空气介质的传能效果好得多, 因为在同样的名义不耦合系数下, 水耦合装药结构形成了定向开裂而空气耦合却不能。

### 2.3 3孔试件爆破后对围岩影响的声波测试分析

为了测试不同结构下的定向效果和对围岩的损伤理论, 利用 3孔试件分别在水耦合、空气耦合以及水不耦合 3种装药结构下进行测试, 探头布置和炮孔分布如图 4所示。采用声波检测仪和专用软件对模型爆破前后的声速进行测量, 利用声速算出模型在爆破后的损伤因子, 从而利用损伤因子对采用不同装药结构进行爆破对模型产生的损伤情况进行评价, 声波测试结果见表 2。损伤因子的计算公式为  $D = 1 - (C_h/C_q)^2$ , 其中,  $C_q$ ,  $C_h$ 分别为试块爆破前、后的声速, km/s

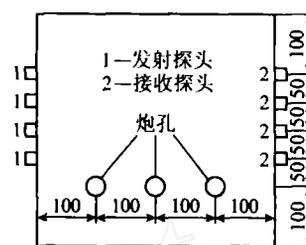


图 4 3孔试件布置和声发射测点布置

Fig. 4 Layout of triple bores and detector of sound emission

表 2 3孔试件损伤测试结果

Table 2 Testing results of damage in triple holes model

装药方式	测点位置	距炮孔连线距离/mm	波速 /m · s <sup>-1</sup>		损伤参量 D	爆破效果
			爆前	爆后		
水耦合	4	200	3 791	3 743	0.025	药量为 0.50 g 孔, PVC管外径 12 mm, 断裂面很平整, 眼痕率高, 但孔与界面间裂纹面有缺角
	3	150	3 396	3 315	0.047	
	2	100	3 777	3 386	0.196	
	1	50	3 592	2 775	0.403	
空气耦合	4	200	3 298	3 175	0.070	药量为 0.50 g 孔, PVC管外径 12 mm, 裂纹面较平整, 眼痕率比较高
	3	150	3 245	3 156	0.054	
	2	100	3 296	3 115	0.106	
	1	50	3 351	2 782	0.311	
水不耦合	4	200	3 225	3 218	0.040	药量为 0.50 g 孔, PVC管外径 8 mm, 断裂面比较平整, 但自由面处有缺角
	3	150	3 135	3 001	0.083	
	2	100	3 283	2 987	0.172	
	1	50	3 285	2 694	0.327	
水耦合	4	200	3 214	3 157	0.035	药量为 0.35 g 孔, PVC管外径 12 mm, 断裂面很平整, 眼痕率高
	3	150	3 189	3 056	0.082	
	2	100	3 295	3 082	0.125	
	1	50	3 286	2 735	0.307	

分析实验结果可以看出: 在有水介质时距离炮孔中心线较近(50 mm以内)区域损伤较没有水介质时严重, 有的炮孔壁甚至出现了较大的微裂纹, 但远区(大于 50 mm)损伤较没有水介质时小。在近区应力波作用较强, 形成初始裂纹, 之后主要是爆生气体的作用形成宏观裂缝。由图 5可以看出, 在距离

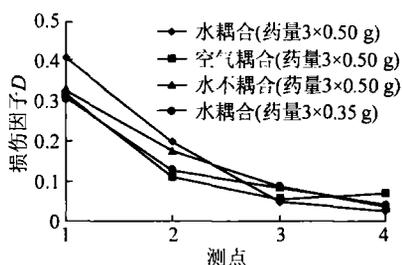


图 5 损伤参量随距离的变化曲线

Fig. 5 Change curves of damages parameter with distance

量下都低 (表 2)。由表 2 可见, 虽然在同药量 ( $3 \times 0.5 \text{ g}$ ) 时, 该装药结构所引起的损伤值比较大, 但是, 由于水耦合装药结构在定向方向形成了水射流, 具有了更好的聚能效果, 从而可以降低炸药量 ( $3 \times 0.35 \text{ g}$ ), 同样能起到好的爆破效果, 而此时损伤值是最低的。

#### 2.4 含水炮孔切缝药包爆破岩体的开裂机理

由于定向缝的存在, 改变了爆炸能量的分布, 在 PVC 管缝定向方向的边缘形成了压力突变, 取这一区域内的任一单元体分析, 由图 6 可知, 所形成的剪切应力  $\tau = P_1 - P_2$ 。这一应力差相当于“切槽作用”, 在炮孔壁的定向方向形成了初始开裂纹。开裂纹的形成使得炮孔壁在非定向方向形成了应力松弛, 爆炸形成的“水楔作用”和高压爆生气体的“气楔作用”使得定向方向的开裂纹得到优先扩展并贯穿。

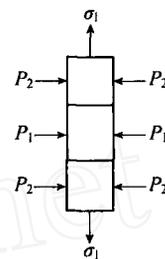


图 6 切缝处孔壁受力模型

Fig. 6 Mechanics model of hole wall in directional slots

$P_1$ ——爆炸形成水射流直接作用在炮孔壁上的压力;  $P_2$ ——通过切缝外壳作用在炮孔壁上的压力;  $\tau$ ——拉应力

### 3 结 论

在含水炮孔条件下, 切缝药包装药结构 (PVC 管紧贴炮孔壁, 药卷和 PVC 管之间用水介质耦合) 具有很好的定向效果, 定向裂纹基本呈直线, 且形成的裂纹面比较平整。在这种装药结构下, PVC 管缝宽在  $2 \sim 6 \text{ mm}$  内、不耦合系数在  $1.2 \sim 2.0$  时都能形成明显的定向效果。定向缝处存在比较大的压力差是试件沿定向方向开裂的一个重要原因。压力差使孔壁定向缝方向首先形成剪切破坏面。水耦合结构比空气耦合结构在定向方向和垂直定向方向上产生的应变都大得多。炮孔内加水时, 岩石内应力波比炮孔内不加水时衰减得慢, 炮孔内加水时应力波在近区的作用比炮孔内不加水时明显。3 孔模型爆破试验发现, 在相同爆破效果下, 水耦合装药结构用药量最小, 围岩损伤值最低。

#### 参考文献:

- [1] Isakov A L. Directed fracture of rocks by blasting [J]. Soviet Mining Science, 1983, 19 (16): 479 ~ 488
- [2] 王树仁, 魏有志. 岩石爆破中断裂控制的研究 [J]. 中国矿业学院学报, 1985 (3): 113 ~ 120
- [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] 朱振海, 杨永琦, 孙燕君. 炮孔爆破中径向裂纹扩展的复合型应力强度因子的研究 [J]. 煤炭学报, 1989, 14 (3): 103 ~ 111.
- [6] 戴俊. 切缝药包定向断裂爆破切缝管切缝宽度的确定 [J]. 有色金属, 2004, 56 (4): 110 ~ 113
- [7] 王汉军, 黄风雷, 张庆明. 岩石定向断裂爆破的力学分析及参数研究 [J]. 煤炭学报, 2003, 28 (4): 399 ~ 402
- [8] 张志呈. 岩石断裂控制爆破的裂纹扩展 [J]. 西南工学院学报, 2000, 15 (1): 6 ~ 11.
- [9] 唐中华, 张志呈, 向开伟. 切缝药包爆破的作用机理 [J]. 云南冶金, 1998, 27 (4): 7 ~ 12
- [10] 陈士海, 林从谋. 水压爆破岩石的破坏特征 [J]. 煤炭学报, 1996, 21 (1): 24 ~ 29.