

文章编号:1000-582X(2003)07-0108-05

层状复合岩体路堑开挖中预裂爆破技术实验^{*}

邱贤德¹,余永强¹,杨小林²,王心飞¹,章勇武³,杜小平³,刘亮³

(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 400030;

2.焦作工学院,河南焦作 454000;3.渝东高速公路有限公司,重庆 401147)

摘要:层状复合岩体中岩层性质的差异常常导致预裂爆破效果不理想。利用超动态应变测试系统对复合岩体预裂爆破装药量、装药结构等影响因素进行了实验研究,并通过超声波仪对爆破后保留区的岩体进行了损伤检测。其结果指出在层状复合岩体中进行预裂爆破时须采用不耦合分层装药,并采用不同的线装药密度是符合实际的,对工程应用有指导意义。

关键词:层状复合岩体;预裂爆破;实验

中图分类号:TD235.1

文献标识码:A

采用预裂爆破技术目的是将主爆区与保留区岩体分离开,在主爆区爆破时,路堑边坡受到的震动和破坏大为减轻,获得平整的开挖坡面。岩体愈完整愈均匀,愈有利于预裂爆破。非均质、破碎和多裂隙的岩层则不利于预裂爆破,特别是岩体的层理产状对预裂爆破的效果影响很大^[1-2]。由于岩层性质的差异,层状复合岩体中预裂爆破效果常常不理想。影响预裂爆破效果的主要因素有岩层性质、装药量、装药结构和堵塞状况等。通过对层状复合岩体预裂爆破影响因素的实验研究,以期得到有价值的结论。

1 测试系统和模型制作

1.1 测试原理和系统

应变测试的基本原理是利用贴在模型上的应变计在爆炸瞬间感受到的应变(伸长或缩短)转化为电量的参数变化,对信号进行处理,得到应变波形图,测试系统见图1。爆破损伤检测基本原理为超声脉冲发射源向模型内发射高频脉冲弹性波,根据波的初至时间和距离,自动计算波速的大小。经过处理分析就能判别模型内存在缺陷的性质、大小及参考强度。

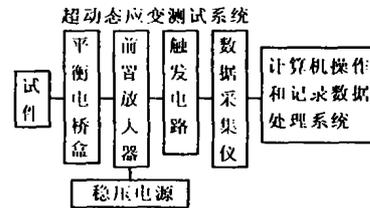


图1 超动态应变测试和数据处理系统

1.2 相似模型和应变砖的制作

层状复合岩体的模拟,除了应当满足单一岩层的相似关系外,还应满足组成复合岩体结构后要求的相似关系。实验假定层状岩体层间是有粘结,而且随着外力的改变,变形是一致的。于是,在弹性状态下,依据层状复合岩体相似准则,复合岩体结构的有关物理量的因次如表1所示。

表1 复合岩体结构物理量的因次^[3]

物理量	应力 σ	外荷载 p	形态 L	介质 aE'	介质 bE	泊松比 μ	层间摩擦系数 η
M	1	1	0	1	1	0	0
L	-1	1	1	-1	-1	0	0
T	-2	-2	0	-2	-2	0	0

收稿日期:2003-04-25

基金项目:重庆市渝东高速公路有限公司(SJ-43-0106191);重庆市交通委员会资助项目[2002]23号-3^号和河南省杰出青年基金(0310053100)。

作者简介:邱贤德(1940-),男,四川荣县人,重庆大学教授,博士生导师,主要从事采矿及岩土工程、安全技术及工程和爆破工程研究方向。

依据相似准则和国际岩石力学协会实验室及现场实验标准委员会关于“岩体中不连续面定量描述建议方法所建议的参数为基准，制作试件尺寸为0.4 m × 0.4 m × 0.27 m的立方体8个。模型为2层的试件4个，上层模拟软岩，下层模拟硬岩，编号依次为1[#] - 4[#]；模型为3层的试件共4个，上层与下层模拟硬岩，中层模拟软岩，编号依次为5[#] - 8[#]。材料配比为3: 5: 2: 3（第1位数字表示砂胶比为3: 1；第2位数字表示胶结物中膨润土含量的组分；第3位数字表示胶结物中石膏粉含量的组分；第4位数字表示胶结物中水泥含量的组分）的模拟软岩；材料配比为1: 2: 0.45（水泥: 砂子: 水的重量比）的模拟硬岩。

根据相似计算，采用直径为0.008 m，深度0.24 m的双炮孔，间距为0.05 m，两孔连线与边平行，距离边界为0.15 m。为了消除试件四周自由面对爆破效果的影响，实现边界条件相似，在施爆时，钢板涂上黄油，夹制四周和底部，见图2。为了减少误差，应变砖的配比与模型材料一致。应变砖的尺寸为0.02 m × 0.02 m × 0.02 m。应变计与试件之间绝缘电阻，要求在200 MΩ以上，见图3。试验前对模拟材料作了物理力学性能参数测试，试验结果符合相似准则，见表2。



图2 模型钢板框架固定 图3 制作的部分应变砖

表2 模拟材料的物理力学性能参数

配比	密度 /10 ³ kg · m ⁻³	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比	弹性模量 /GPa
3: 5: 3: 2	1.93	1.176	0.119	0.18	2.0
1: 2: 0.45	2.08	11	1.15	0.23	18.4

2 测试结果及分析

2.1 装药量的确定^[4-5]

根据相似准则原理，使得炸药波阻抗与模型材料的波阻抗相匹配，炸药选用黑索金，模型材料平均密度2 × 10³ kg · m⁻³；纵波波速平均3.4 × 10³ m · s⁻¹，黑索金装药密度约为1.1 × 10³ kg · m⁻³，爆速为6 × 10³ m · s⁻¹。分层装药时，由于各层材料强度不同，根据材料特性分别计算线装药密度q_l，按经验公式：

$$q_l = 0.36K_0\sigma_c \cdot a^{0.67} \quad (1)$$

式中 σ_c 为材料极限抗压强度，MPa；K₀ 为装药结构不耦合系数；a 为钻孔间距，试验中 a = 0.05 m。

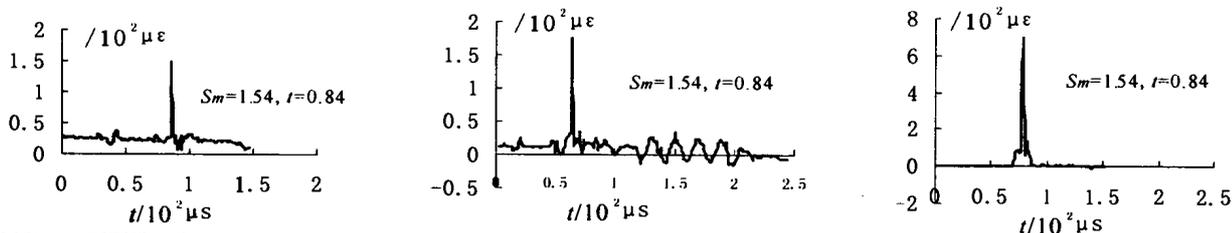
装药方式为耦合装药和不耦合装药（不耦合系数为1.7），见表3。集中装药时依据分层装药的量来确定，并根据试验目的来最终决定装药量。采用电雷管引火药头引爆。为保证填塞效果，炮孔装药长度以外全部填塞，填塞材料采用摩擦系数大、粘性好的橡皮泥。

表3 模型试验装药状况

编号	装药位置	装药量/g	装药方式
1	上层	0	耦合
	下层	0.3	
2	上层	0.1	不耦合
	下层	0.2	
3	上层	0.3	不耦合
	下层	0	
4	上层	0.1	不耦合
	下层	0.2	
5	上层	0	不耦合
	中层	0.2	
	下层	0.2	
6	上层	0.2	不耦合
	中层	0	
	下层	0.2	
7	上层	0.2	不耦合
	中层	0	
	下层	0.2	
8	上层	0.2	耦合
	下层	0.2	

2.2 测试结果

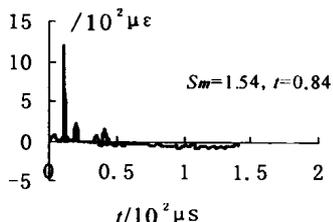
实验共进行了42个测点的应变波测试，测试到的有效波形有31个，其余由于误触发、应变计及干扰等原因没有波形或是无效波形。经过采用窗函数截取和简单的5点3次平滑及零线修正后，读取其应变峰值和峰值时间，其结果见表4，部分应变波形如图4所示，预裂爆破效果见图5。爆破前，在层状复合岩体试件中的每一层中部水平布置声波测点，爆破后的同一测点进行测试。结果见表4。



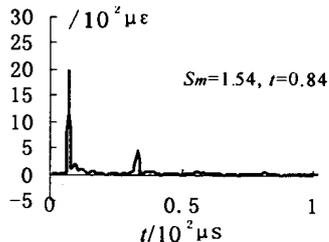
(a) 为试验1表面距模型中心25 mm点径向的应变波形

(b) 为试验1表面距模型中心25 mm点切向的应变波形

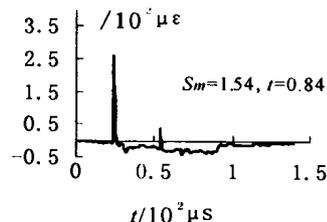
(c) 为试验1上层距模型中心50 mm点径向的应变波形



(d) 为试验7表面距模型中心25 mm点切向的应变波形;



(e) 为试验7下层距模型中心50 mm点径向的应变波形;



(f) 为试验7表面距模型中心25 mm点径向的应变波形

图4 部分应变波形图

表4 超动态应变和损伤测试结果

试件号	与模型中心 距离/mm	径向		切向		爆速		平均损伤变量 D	爆破效果
		应变峰值 / $\mu\epsilon$	峰值时间 / μs	应变峰值 / $\mu\epsilon$	峰值时间 / μs	爆前 / $m \cdot s^{-1}$	爆后 / $m \cdot s^{-1}$		
1	25(表面)	154	84	168	84	-	-	0.59 1	上层沿预裂孔产生宏观裂纹,下层已破碎
	50(上层)	656	68	647	68	2 320	1 480		
	50(下层)	3 395	60	3 130	45	4 570	-		
2	25(表面)	2 019	19	2 030	19	-	-	0.36 0.19	沿预裂孔产生一条贯穿整个模型的预裂缝
	50(上层)	2 421	30	-	-	2 390	1 878		
	50(下层)	2 590	29	2 389	29	4 490	4 040		
3	25(表面)	796	26	1 143	27	-	-	0.17 0.15	沿预裂孔在模型上层产生细微裂纹,而下层几乎无损伤
	50(上层)	1 384	24	1 271	23	2 190	2 000		
	50(下层)	981	24	939	24	4 440	4 082		
4	25(表面)	1 573	21	1 267	21	-	-	0.23 0.39	沿预裂孔产生一条贯穿整个模型的预裂缝
	50(上层)	-	-	-	-	2 150	1 880		
	50(下层)	1 638	21	-	-	4 470	3 478		
5	25(表面)	2 250	15	1 877	26	-	-	0.18 1 0.19	上层无宏观裂纹,中部已破碎,下层沿预裂孔方向产生预裂缝
	50(上层)	-	-	-	-	3 880	3 509		
	50(中层)	-	-	581	27	2 440	-		
	50(下层)	-	-	2 050	16	4 410	4 040		
6	25(表面)	480	23	620	23	-	-	0.1 1 0.08	上层沿预裂孔产生裂纹,中层已破碎,下层沿预裂孔方向产生预裂缝
	50(上层)	-	-	1 110	24	3 950	3 738		
	150(中层)	-	-	634	26	2 240	-		
	50(下层)	-	-	1 773	23	4 546	4 167		
7	25(表面)	2 625	18	1 200	17	-	-	1 1	整个模型破碎成几块
	50(中层)	249	19	205	18	-	-		
	50(下层)	2 000	19	2 000	20	-	-		
8	25(表面)	2 000	18	2 000	18	-	-	1	沿预裂孔连线产生预裂缝
	50(上层)	-	-	-	-	3950	-		
	50(中层)	1 605	19	545	19	2 760	-		
	50(下层)	1 247	17	-	-	4 300	3 922		



(a) 是 2 层模型预裂爆破面 (b) 是 3 层模型预裂爆破面

图 5 预裂爆破后部分效果图

2.3 结果分析

2.3.1 应变测试结果分析

1) 集中装药产生的爆炸应力波进入另一种介质时,在分界面处发生了反射和透射,应力波值降低,同时在分界面产生的反射应力波又与初始爆炸产生的应力波叠加,如试件 1[#]、2[#]。上层和下层均装药时,表面测得应变波形出现了 3 个大的峰值,如 7[#] 试件 B7025;在下层测得的应变波形出现了双峰值,如 7[#] 试件 A7350。

利用 2 种介质面上的位移连续和应力平衡条件可得到入射压力 σ , 反射压力 σ_r , 透射压力 σ_t 及 2 种介质波阻抗比 n 的关系。

设分界面到装药中心的距离为 r , 应力波到达分界面处径向应力峰值为^[6]

$$\sigma_r = \sigma_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中, σ_0 为孔壁压力; r_0 为装药半径; r 为装药中心至分界面的距离; α 为衰减指数。

则分界面的透射应力、反射应力分别等于透射系数和反射系数与入射应力的乘积,

$$\sigma_t = \frac{2}{1+n} \cdot \sigma \quad (3)$$

$$\sigma_r = \frac{1-n}{1+n} \cdot \sigma \quad (4)$$

在模型爆破中波阻抗比平均值 $\bar{n} = 4.23$, 因此透射应力波值比入射应力波值低。由于反射系数小于 1, 反射应力波比入射应力波值低, 并与入射应力波叠加, 产生增大或减少的应力波峰值。由于上层爆炸产生的应力波和下层爆炸产生的应力波经过中间软弱岩层进入界面, 又因为入射应力波在界面产生了反射, 所以产生了 3 个大的峰值, 而在底面反射波被表面一层黄油耦合掉, 下层测得的应变波形只出现了双峰值。

2) 集中在底部装药时, 表面应变计测出的应变波形峰值很小, 如试件 1[#]。当装药在软弱夹层时, 表面应变计、上层和下层中应变均很小甚至测不出, 如试件 5[#]。说明中间的软弱夹层对应力波的传播产生很大的影响。

设 σ_r 为距装药中心为 r 点处的应力波峰值, 则对

于 $r + \Delta r$ 处应力峰值由式(2)可推得

$$\sigma_{(r+\Delta r)} = \sigma_0 \frac{r_0^\alpha}{(r + \Delta r)^\alpha} = \sigma_r \frac{1}{(1 + \Delta r/r)^\alpha} \quad (5)$$

即以任一点处的应力波峰值做始点, 从该点开始应力波峰值按指数衰减。应力波波峰随距离分段衰减。由于在软弱岩层中衰减指数 α 较大, 因此表面测出的应变波形峰值很小甚至测不出。

3) 耦合装药比相同药量情况下不耦合装药的应变峰值大, 但持续时间比不耦合装药时短。如试件 1[#]、2[#] 和试件 7[#]、8[#]。不耦合装药时, 作用于孔壁的压力为高速运动的压缩空气和爆生气体质点冲击孔壁产生的增压, 由于空气冲击波压力及增压相对于总压力小得多, 因此降低了应力波峰值, 减少了预裂面的破碎作用。耦合装药产生爆轰波直接作用于孔壁上, 因此爆炸应力波产生的应变峰值大, 但衰减快。

4) 在相同药量条件下, 当药装在上层, 爆破后岩体只产生了一些细微裂纹, 如试件 3[#], 而装在下层则产生了预裂面。这说明堵塞作用, 即增强爆生气体的作用, 可以使爆炸应力波的作用加强, 从岩石的爆破损伤断裂机理来看, 这有利于岩石的损伤和破坏。不同的装药方式对爆破效果也产生很大的影响, 在相同药量条件下, 由于试件 7[#] 采用耦合装药, 炸成碎块, 试件 8[#] 装药采用不同线装药密度的不耦合装药, 爆破产生的预裂效果好。

2.3.2 超声波测试结果分析

根据弹性纵波波速和弹性模量的关系及损伤的定义, 可以得到损伤变量与波速的关系为

$$D = 1 - (C_p/C_0)^2 \quad (6)$$

式中 C_p 、 C_0 分别为损伤岩石及未损伤岩石的弹性纵波速度。

根据测试结果表 3 及式(6) 可以计算出岩样受爆破作用后的损伤值 D 。 D 值越小损伤破坏越小, $D = 1$ 表明岩样测点部位产生了一定宽度的宏观裂纹或是已经破碎。当岩样破碎或有较大的宏观裂纹时, 声波不能穿透, 此时记录的声波速度为 0。从表中发现, D 值反映了岩样爆破后的损伤和破坏程度, 并与爆破后产生的裂纹及破坏情况的宏观描述一致。

3 结 论

1) 在层状复合岩体中进行预裂爆破时, 集中装药对预裂面的损伤较大, 甚至使软岩完全破碎。对于层状复合岩体预裂爆破分层装药必须注意采取不同的线装药密度, 软岩的线装药密度要小, 硬岩线装药密度要大, 才能使保留区侧损伤较小。

2)爆生气体对岩石的预裂成缝起了十分重要的作用,如果没有爆生气体的作用,而仅仅只有爆炸应力波的作用(填塞较短或不填塞时出现此种情况),几乎无法形成预裂缝,只产生一些宏观裂纹。

3)耦合装药时,岩样基本上全部都产生了破裂,但损伤大,而不耦合装药时,较好的形成了预裂缝且保留区侧损伤较小。

4)对于层状复合岩体的预裂爆破,从岩石爆破损伤断裂机理出发,不耦合装药和分层装药爆破时,岩石内部的应变波作用时间长,应变波的峰值减小有利于预裂缝的形成且降低对保留区侧的损伤和破坏。

5)在非均质层状复合岩体中实施爆破成缝,欲得理想爆破效果,除精心设计爆破参数外,还须从爆破工艺方面采取相应措施,才能达到控制较好的成缝效果。

参考文献:

- [1] 陶振宇. 裂隙岩体特性与洞群施工力学问题[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1993. 85 - 86.
- [2] 余永强, 邱贤德. 路堑爆破开挖地震效应分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(10): 105 - 109.
- [3] 王宏图, 鲜学福. 层状复合岩体的相似模拟[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, (2): 81 - 83.
- [4] 高全臣, 刘殿书. 岩石爆破测试原理与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996, 43 - 47.
- [5] 杨小林. 炸药岩石阻抗匹配与爆炸应力、块度的试验研究[J]. 煤炭学报, 1991, 16(1): 89 - 95.
- [6] 纽强. 岩石爆破机理[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986. 200 - 201.

Experiment Research of Pre-splitting in Bedded Composite Cutting Blasting Digging

QIU Xian-de¹, YU Yong-qiang¹, YANG Xiao-lin², WANG Xin-fei¹,
ZHANG Yong-wu², DU Xiao-ping², LIU Liang²

(1. China Southwest Resource Exploitation and Enoinronmental Disaster Control Engineering under
the State Ministry of Education Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo 454000, China

3. Chongqing Yudong Superhighway Engineering Co. Ltd., Chongqing 40147, China)

Abstract: The rock property difference of bedded composite rock often does not lead to ideal Pre-splitting blasting effect. The influence factor of Pre-splitting such as the dynamite quantity and explosive structure was studied by experiment with transient dynamic strain gauge testing system. At the same time, the damaged rock reduced by blasting was examined with RS - STOIC ultrasonic gauge. The results indicate that different dynamite densities are taken for considering especially property of bedded composite rock. The conclusion for cite.

Key words: bedded composite rock; pre-splitting blasting; experiment

(编辑 姚 飞)