

节能环保工程水压爆破研究与应用

何广沂¹, 段昌炎², 荆山², 王太超²

(1. 铁道建筑研究设计院, 北京 102600; 2. 中铁11局集团工程有限公司, 湖北襄樊 400013)

[摘要] 节能环保工程水压爆破是一种新的爆破技术, 文章主要介绍该项技术提高炸药能量利用率和保护环境的理论分析和模拟试验, 着重是创新突破点、关键技术和实际应用所取得的显著技术经济效果。

[关键词] 工程水压爆破; 模拟试验; 能量利用率

[中图分类号] TB41 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)09-0043-06

1 引言

工程爆破分属露天石方开挖爆破(简称露天爆破)和地下掘进爆破(简称地下爆破)。露天爆破主要是风枪打眼浅孔爆破和钻机钻眼深孔爆破, 而洞室爆破仅限于前苏联和我国, 因受环境、地质地形的限制以及它固有的缺陷, 如爆后岩石块度不均匀清方困难、爆后边坡地基不稳定、污染环境等, 国内修建高速公路、建设核电站等设计, 文件明文规定不允许实施洞室爆破, 其应用范围就受到制约, 生命力不强, 前景不被看好。鉴于此, 笔者所谓的“露天爆破”泛指浅孔和深孔爆破。地下爆破主要是隧道(洞)和巷道掘进爆破。综上所述, 文章所指的工程爆破, 其内涵为“露天爆破”和“地下爆破”。无论露天还是地下爆破, 以往炮眼均“怕水”, 施工时炮眼有水必须排除干净, 此外, 地下爆破, 除煤矿外, 其炮眼常采取无回填料堵塞或仅用炸药箱纸壳卷成的纸卷堵塞在炮眼口; 露天爆破, 其炮眼用土或岩屑回填料堵塞。而工程水压爆破是以水封和用专用设备制作的“炮泥”代替土或岩屑回填料堵塞(图1)。而工程水压爆破相对工程爆破的突破点就在于往炮眼中注入一定量的水并用特制炮泥回填料堵塞, 借以达到提高炸药能量利用率和保护爆破区域环境的目的。

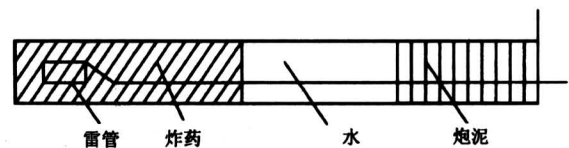


图1 炮眼充水炮泥堵塞

Fig.1 The boreholes stemming filled with water

2 工程水压爆破实验室研究

炮眼充水后再用炮泥堵塞与仅用土或无回填料堵塞相比, 爆破效果如何, 经研究分析认为, 只要测定不同回填料炮眼四周相同位置的应变大小对比即可, 于是进行了应变测试的模拟试验。

试验采用水泥砂浆试块, 水泥:砂=1:2, 水:水泥=1:2.5; 试块尺寸为300 mm×300 mm×300 mm, 上表面中心处预留 $\phi 8$ mm×135 mm的炮眼。试验采用BE-1AA型应变片制成应变砖作传感器(应变砖材料与试块材料相同), 用CS2092H动态数据分析仪及超动态应变仪作为数据采集与分析系统。信号流程图如图2所示, 试验程序如图3。

应变块分3层埋设在试块中, 每层两个应变砖, 分别为炮眼的径向和切向。模拟试验应变测试的内容有3部分: 1[#]试件为炮眼除装药(实际就是一个8[#]电雷管, 下同)外, 全部用水充填炮眼;

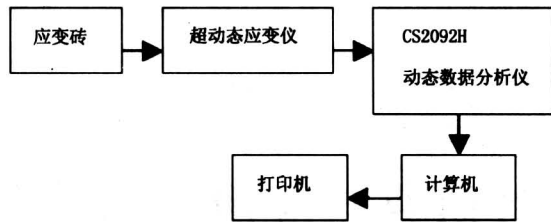


图 2 信号流程示意图

Fig.2 Diagram of signal flowing



图 3 试验程序示意图

Fig.3 Diagram of experiment process

2# 试件为炮眼除装药外，全部用砂回填堵塞；3# 试件为炮眼除装药外，炮眼其余部分先置放水袋 28 mm 高，然后回填砂 47 mm 长。应变砖布置及装药结构如图 4 所示。

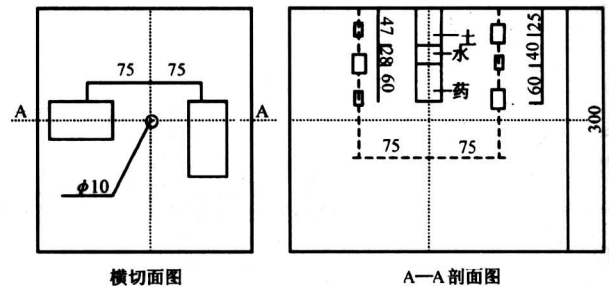


图 4 应变砖布置 (/cm) 及装药结构

Fig.4 The structure of the location of strain brick and detonator

以上 3 种不同充填条件下的各试块内同一测点最大应变峰值对比列于表 1。从表 1 可知，不同装药结构切向拉应变（岩石破碎主要作用）大小依次是 3# 试件 > 2# 试件 > 1# 试件，从岩石爆破破碎机理分析，试件 3# 十分有利于岩石破碎，验证了炮眼先注水，然后用炮泥堵塞能提高炸药能量利用率，即节省单位耗药量的理论分析的正确性。

表 1 不同充填条件下同一测点应变值

Table 1 Compare of strain value at the same point but different condition of filling

试件	充填条件	测点位置						备注
		切向微应变			径向微应变			
		上	中	下	上	中	下	
1#	水	4 348/-1 913	4 767/-2 442	4 953/-3 208	2 857/-2 556	5 130/-2 662	5 266/-3 636	最大正应变/
2#	砂	4 048/-4 048	5 847/-5 388	5 264/-4 974	4 233/-4 269	6 523/-5 969	5 378/-5 691	最大负应变
3#	水 砂	5 443/-2 754	6 284/-3 851	5 935/-4 451	3 894/-1 716	1 887/-1 321	5 449/-3 397	

模拟试验应变测试，解释了实际爆破中的炮眼水压爆破比常规炮眼爆破能提高炮眼利用率、避免石坎的出现和岩石破碎均匀及大块率低，是由于应变增大的结果，从表 1 计算可知，在同样装药量的前提下，同是炮眼装药部位，前者比后者切向拉应变增大了 34%（炮眼利用率高、不出现石坎）；同是炮眼中部和上部，切向拉应变分别增大了 7% 和 13%（岩石破碎均匀和大坎率低）。3# 试件炮眼应变时程曲线见图 5。

3 应用研究试验

3.1 炮泥制作

3.1.1 炮泥制作设备 采用近年生产的 PNJ-1 型炮泥机，质量 310 kg，外形尺寸 1 362 mm × 590

mm × 1 293 mm。使用这种炮泥机，由 2 名工人操作，每小时可制作长 200 mm、直径 40 mm 的炮泥 500 多个，可供单线隧道全断面一次爆破使用。

3.1.2 炮泥成分 炮泥是由土、砂和水 3 种成分组成（土：砂：水 = 0.75：0.1：0.15）。土是主要成分，砂是为增加炮泥质量和抑制爆炸气体膨胀冲出炮眼，水是“粘合剂”，能起到降尘作用。要指出的是，砂过多，炮泥成形较差，容易破裂；水要适中，否则起不到粘合和降尘作用，炮泥软堵塞也不严实。炮泥放置时间不宜过长，最好在使用前 2~3 h 制作，否则失水变硬。合格的炮泥，表面光滑，用手略微使劲捏可变形。

3.2 炮眼充水

把水装入塑料袋（称为水袋）、封口，然后填

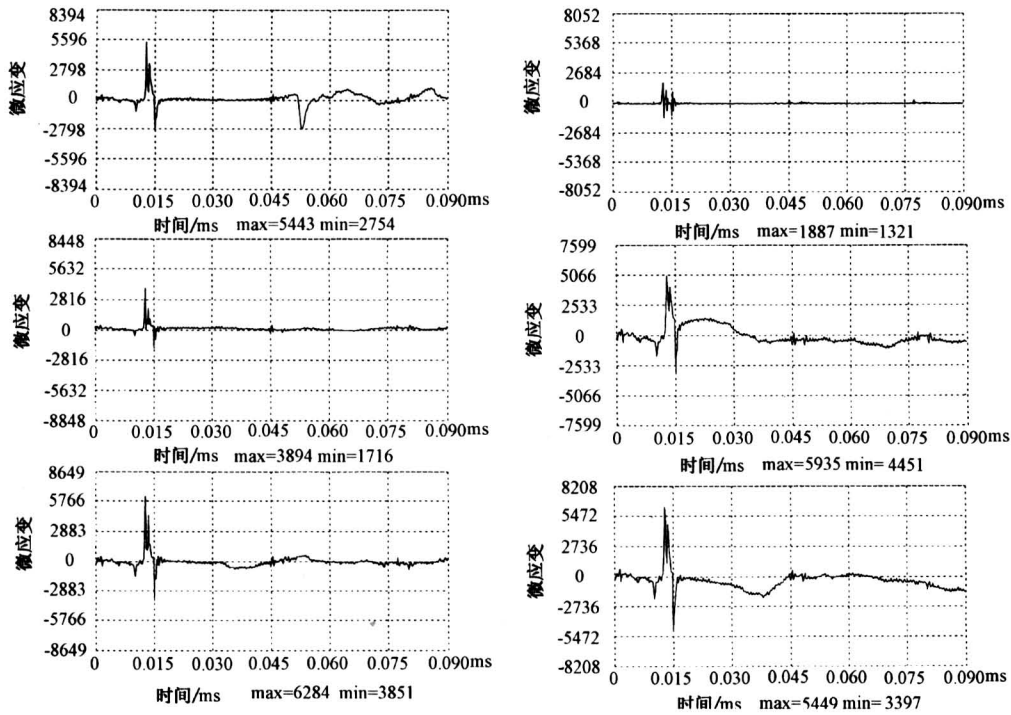


图 5 3# 试件炮眼应变时程曲线

Fig.5 Strain curve of period of time of sample 3#

注：图左自上而下为上切、上径、中径应变砖；图右自上而下为中径、下切、下径

入炮眼所设计的位置。塑料袋用聚乙烯塑料制成，袋厚为 0.8 mm，直径 35 mm。浅孔水压爆破用的袋长 300 mm，深孔水压爆破用的塑料袋长 800~1 500 mm。

3.3 炮眼装药结构

炮眼中有炸药、水和炮泥等 3 种材料和介质。研究这 3 种材料和介质在炮眼中所占的体积，使三者达到最佳比例关系，这是工程水压爆破技术的关

键所在。

露天开挖水压爆破研究试验选在重庆较场口基坑露天爆破现场。较场口基坑露天水压爆破试验以常规爆破作对比，设计的垂直炮眼深 2.2 m，2# 岩石硝铵炸药。常规爆破每炮眼装 4 卷炸药，每卷 150 g、长 200 mm，用土回填堵塞深 1.4 m。水压爆破对装药量、水袋长和炮泥长的不同比例做了以下 3 种试验，结果如表 2 所示。

表 2 不同充填条件水压爆破试验

Table 2 Hydraulic explosion test under different filling conditions

试验	药量/%	药长/m	水袋长/m	炮泥长/m	冲炮现象	水袋长:炮泥长	评价
I	90	0.72	0.8	0.68	强	1.2:1	劣
II	85	0.68	0.76	0.76	弱	1:1	中
III	85	0.68	0.65	0.87	无	0.75:1	优

注：药量为常规爆破药量的百分数

上述 3 种试验表明，水袋长为炮泥长的 3/4 左右，可充分提高炸药能量利用率。水压爆破达到常规爆破同样爆破效果时，可节省炸药 15 % 左右，同时，其爆破的岩石要比常规爆破破碎。

隧道掘进水压爆破是在露天基坑开挖水压爆破基础上进行试验的，水袋长:炮泥长=3:4，获得了

显著的爆破效果，炮眼利用率高达 100 %。

3.4 实际应用

3.4.1 隧道掘进水压爆破 在重庆市歌乐山隧道出口进行水压爆破实际应用前，采取炮眼无回填堵塞爆破方法，楔形掏槽光面爆破全断面开挖，掘进炮眼 3.8 m，其爆破效果是：每循环进尺多数为

3.3 m, 少数为 3.5 m, 炮眼利用率为 86.2 %; 岩爆平均用药量 1.25 kg/m^3 ; 爆堆长度 27.9 m, 岩石破碎不均匀, 有大块; 爆破后掌子面粉尘浓度平均为 16 mg/m^3 。

在进行水压爆破实际应用的同时, 也进行炮眼用炮泥回填堵塞 9 个循环爆破。在装药量和炮眼参数与常规爆破一样的条件下, 每个循环平均进尺为 3.47 m, 炮眼利用率为 92 %。

在歌乐山隧道出口实际应用水压爆破的基本条件是, 其炮眼参数与常规无回填堵塞一样, 只对每个炮眼减少一卷药, 水袋长与炮泥长之比为 3/4 (0.75) 左右。歌乐山隧道出口从 2002 年 6 月至隧道贯通始终采用水压爆破, 累计共进行 200 个循环, 每循环平均进尺 3.7 m, 炮眼利用率 97.4 %; 岩爆平均用药量 1.04 kg/m^3 ; 爆渣与常规爆破相比不但均匀, 而且大块率低于 2 %; 爆堆抛散距离比常规爆破缩短 6 m 左右, 爆破后掌子面粉尘浓度比常规爆破降低 42.5 %。

3.4.2 露天开挖浅孔水压爆破 较场口基坑爆破从开挖至 2002 年 5 月底, 采用常规爆破, 即用土回填堵塞炮眼。常规爆破台阶高度为 2 m, 垂直打眼深度 2.2 m, 炮眼排距 1 m, 眼距 1.2 m, 每个炮眼装药量 0.6 kg, 采取同列同段眼外等间隔控制微差起爆方法, 使用“炮被”防护覆盖。爆破后岩石块径大于 80 cm 的占总体积的 30% ~ 45%, 机械挖装较慢; 经测试, 粉尘增量为 8.5 mg/m^3 , 振速为 1.1 cm/s; 无飞石。

较场口实施水压爆破与常规爆破炮眼参数、起

爆方法和防护措施等一样, 所不同的是: 减少装药 15%; 炮眼中充水, 水袋长 0.65 m; 用炮泥代替土回填堵塞, 炮泥长 0.9 m。自 2002 年 6 月至爆破开挖完, 采取水压爆破工程量 $9.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其爆破效果与常规爆破相比有明显改善: 爆破后岩石块径超过 80 cm 的占 15% ~ 25%, 机械挖装容易; 经测试, 粉尘增量为 0.67 mg/m^3 , 振速为 0.91 cm/s; 无飞石。

3.4.3 露天开挖深孔水压爆破 露天开挖深孔水压爆破分别在浙江绍兴杭甬高速公路、陕西银川三铜公路、青岛火车站站前广场、南昆铁路新段大起垭工点及老寨工点、北京密云铁矿和湖北五峰锁金山电站大坝基础开挖等 6 处, 进行了与常规深孔爆破 (炮眼仅用土回填堵塞) 对比的实际应用。针对不同的地质、梯段高度、炮眼直径、装药结构、炸药品种等, 深孔水压爆破实际爆破炮眼 2 942 个, 爆破工程量 $15 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[1]。现仅就北京密云铁矿实际应用情况做一简介。

在北京密云铁矿进行深孔水压爆破与常规爆破实际应用对比包括 4 项内容: 深孔水压爆破体积不耦合装药结构与常规深孔爆破对比, 其有关参数见表 3; 深孔水压爆破体积和孔径不耦合装药结构与常规深孔爆破对比, 和一次起爆多排孔径不耦合装药结构与常规深孔爆破对比, 其参数见表 4; 一次起爆多排体积不耦合装药结构与常规深孔爆破对比, 其参数见表 5。一次起爆 45 个炮眼 (水压爆破 12 个) 布置见图 6。

表 3 体积不耦合装药结构

Table 3 Tests of volume non-coupling charge

爆破时间	试验内容	爆区名称	梯段高度/m	孔数/个	单孔药量/kg	单耗 kg/m^3	不耦合系数/ k_1	炸药种类	充水方式	堵塞长度/m
1995-07-16	体积不耦合装药结构	常 1		43	600	0.982	1.00	乳化		6
		水 1	12.5	3	540	0.803	1.19	乳化	积存	5
		水 2		3	510	0.758	1.28	乳化	水柱	5
1995-07-20	装药量为常规爆破的 70%、80%	常 2		35	660,360	0.948,0.521	1.00	乳化, 铵油		6,7
		水 3	12.5	5	540,285	0.771,0.407	1.36	乳化, 铵油	积存水柱	5
		水 4		8	480,255	0.685,0.364	1.58	乳化, 铵油	外加水柱	5
1995-08-03	装药量为常规爆破的 80%、75%	常 3		41	600	0.892	1.00	乳化		6
		水 5	12.0	2	480	0.714	1.36	乳化		5
		水 6		3	450	0.670	1.46	乳化	外加水柱	5

注: ①孔径均为 250 mm, 孔网参数为 $14 \text{ m} \times 4 \text{ m}$, 均为梅花布孔排间微差起爆网络; 地质条件均为片麻岩混杂磁铁矿石英岩; ②表格中的两种数据分别对应于乳化炸药和铵油炸药, 其余均为乳化炸药; ③ $k_1 = (\text{孔深} - \text{堵塞长度}) / \text{装药长度}$ 。

表 4 体积与孔径不耦合装药结构

Table 4 Tests on charging structure of non-coupling of volume and drill diameter

爆破时间	试验内容	爆区名称	孔数 / 个	单孔药量 / kg	单耗 / kg·m ⁻³	不耦合系数	炸药种类	充水方式	堵塞长度 / m
1995-08-10	体积与孔径不耦合装药结构	常 4	42	600,400	0.857,0.571	$k_1=1.00$	乳化, 铵油		6
		水 7	3	480	0.686	$k_1=1.36$	乳化	外加水柱	5
		水 8	3	315	0.450	$k_2=1.25$	铵油	外加空隙	5
1995-08-13		常 5	36	600,400	0.857,0.571	$k_1=1.00$	乳化, 铵油		6
		水 9	3	480	0.686	$k_1=1.36$	乳化	外加水柱	5
		水 10	3	315	0.450	$k_2=1.25$	铵油	外加空隙	5
1995-08-28	多排孔径不耦合装药结构	常 6	36	600,400	0.857,0.571	$k_1=1.00$	乳化, 铵油		6
		水 11	9	315	0.450	$k_2=1.25$	铵油	外加空隙	5

注：① 应用试验的孔径均为 250 mm，孔网参数为 14 m×4 m，均为梅花布孔排间为差起爆网络；地质条件均为片麻混杂磁铁石英岩；
 ② 表格中的两种数据分别对应于乳化炸药和铵油炸药；③ $k_1 = (\text{孔深} - \text{堵塞长度}) / \text{装药长度}$ ；④ 试验梯度高度均为 12.5 m；⑤ k_1 、 k_2 分别为体积不耦合和孔径不耦合装药结构的不耦合系数。

表 5 多排炮孔体积不耦合装药结构

Table 5 Tests on volume of non-coupling charging structure of multi-row blastholes

爆破时间	试验内容	爆区名称	孔数 / 个	单孔药量 / kg	单耗 / kg·m ⁻³	不耦合系数	炸药种类	充水方式	堵塞长度 / m	梯段高度 / m	起爆网络
1995-08-30	体积与孔径不耦合装药结构	常 7	40	600,400	0.853,0.568	$k_1=1.00$	乳化, 铵油		6	12.5	方形布孔 斜 1 起爆
		水 12	11	480	0.683	$k_1=1.36$	乳化	外加水柱	5	12.5	
		水 13	3	315	0.448	$k_2=1.25$	铵油	外加空隙	5	12.5	
1995-09-15	多排炮孔	常 8	36	480,320	0.853,0.569	$k_1=1.00$	乳化, 铵油		6	10.0	
		水 14	12	385	0.684	$k_2=1.45$	乳化	外加水柱	5	10.0	
1995-09-19	体积不耦合装药结构	常 9	29	600,400	0.889,0.593	$K_1=1.00$	乳化, 铵油		6	12.0	方形布孔 斜 2 起爆
		水 15	12	480	0.711	$K_1=1.36$	乳化	外加水柱	5	12.0	
1995-09-30		常 10	33	480,320	0.853,0.569	$K_1=1.00$	乳化, 铵油		6	10.0	
		水 16	12	385	0.684	$K_1=1.45$	乳化	外加水柱	5	10.0	

注：试验炮孔孔径为 250 mm，孔网参数为 7.5 m×7.5 m；地质条件为片麻岩混杂磁铁石英岩

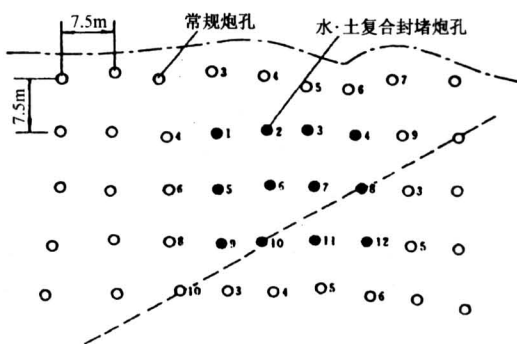


图 6 多排炮孔水-土复合封堵分布

Fig.6 Arrangement of multi-row blastholes with water-soil compound stemming

实际应用对比结果是：在达到常规深孔爆破同

样爆破效果时，深孔水压爆破可节省炸药 20% ~ 25%；体积与孔径不耦合装药结构相比，爆破效果无区别；深孔水压爆破一次起爆多排炮眼与常规深孔爆破效果一样；深孔水压爆破与常规深孔爆破相比，减少了振动和减弱了爆破后冲效应，保护了矿山边坡稳定，此外，消除了爆破一瞬间硝烟灰尘飞扬的现象。

4 技术经济效果

1) 节省炸药。隧道爆破节省 19%，露天浅孔爆破节省 15%，深孔爆破（钻孔直径 100 ~ 250 mm）节省 20% 以上。

2) 隧道爆破炮眼利用率为 97.4%，露天浅孔爆破无石坎，深孔爆破可以减小超钻深度。

3) 爆后岩石破碎均匀。隧道爆破岩石粒径缩小25%，露天浅孔爆破大于80 cm的岩块下降44%~50%，深孔爆破无须二次破碎。

4) 爆堆抛散距离缩短，隧道爆破缩短21%，露天开挖爆破岩石原地松动。

5) 粉尘含量大幅度降低。隧道爆破降低42.5%，露天浅孔爆破降低92%，露天深孔爆破不再出现常规深孔爆破的硝烟灰尘腾空升起的现象。

6) 爆破振动速度经实测，露天浅孔爆破比常规爆破降低21%。

7) 露天开挖水压爆破无飞石、无噪声（指城市允许噪声标准以下）。

8) 节省费用加快施工进度。露天浅孔水压爆破节省费用22.3%，缩短工期20%；露天深孔水压爆破节省费用20%以上；隧道爆破节省爆破费用19.1%，节省人工、机械费9%，减少钻爆循环10%。

9) 具有显著的社会效益。我国铁路隧道近几年以每年200 km速度增长（新华社重庆10月22日电 记者朱沼德），如按歌乐山隧道采用水压爆破每延米可节省170元的保守数字计算，仅铁路隧道

爆破以每年增加200 km计，可节省3400万元；如按歌乐山隧道采取水压爆破掘进740.1 m计，可节省20个钻爆循环，那么增建200 km隧道可节省5400个循环。

综上所述，节能环保工程水压爆破与以往常规工程爆破相比，具有提高炸药能量利用率、提高施工效率、提高经济效益和保护环境的显著特点，符合土木工程可持续发展的战略方针。节能环保工程水压爆破技术成果“露天石方深孔水压爆破技术”和“隧道掘进和城市露天开挖水压爆破技术”，鉴定认为是“在国内外首次提出的‘露天石方深孔水压爆破技术’，并在实践中取得了良好的爆破效果，具有创新性和实用性”^①；“‘隧道掘进和城市露天开挖水压爆破技术’采取炮孔充填水袋，并用炮泥回填堵塞，提高了炸药能量利用率，改善了爆破对环境的影响，具有可操作性，实现了浅孔爆破的工艺技术创新”^②；必将对工程爆破的发展作出重要贡献。

参考文献

- [1] 何广沂. 工程爆破新技术 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000

Research and Application of Engineering Water-pressure Blasting for Economizing Energy and Environmental Protection

He Guangyi¹, Duan Changyan², Jing Shan², Wang Taichao²

(1. Research and Design Institute of Railway Construction, Beijing 102600, China;

2. Zhongtie Eleventh Engineering Group corp., Xiangfan, Hubei 400013, China)

[Abstract] The engineering water-pressure blasting for economizing energy and environmental protection is a new blasting technique. In this paper, the theoretic analysis and simulation experiment of the technique have been introduced in respect of enhancing explosive energy utilization ratio and protecting environment. The emphasis lie in innovating surmount feature, key technique and outstanding technique and economy effect has been obtained from factual use.

[Key words] engineering water-pressure blasting; simulation experiment; energy utilization ratio

① 露天石方深孔水压爆破技术鉴定证书, 1995

② 隧道掘进和城市露天开挖水压爆破技术鉴定证书, 2002