DOI: 10.11883/1001-1455(2016)05-0695-08

上覆岩土条件下孤石爆破预处理炸药单耗实验*

张庆彬[1,2],阳军生[2],吴从师[1],张学民[2],梁奎生[3],刘洪震[4],方风华[5]

(1. 长沙理工大学土木与建筑学院,湖南 长沙 410004;
2. 中南大学土木工程学院,湖南 长沙 410075;
3. 中铁隧道股份有限公司台山核电站取水隧洞工程项目,广东 台山 529228;
4. 中铁隧道集团科研所,河南 洛阳 471009;
5. 湖北省宜昌市港航管理局,湖北 宜昌 443000)

摘要: 盾构机在风化花岗岩地层掘进会遇到高强度孤石,为降低施工风险、避免刀盘及刀具严重损坏,常采用地面钻孔爆破对前方孤石进行预处理,但其炸药单耗一般由经验公式确定,导致爆破效果不理想。结合实际工程对爆破块度小于 30 cm 的特殊要求,采用爆破模型实验对炸药单耗进行研究。实验结果表明:满足特殊块度要求的陆地钻孔爆破炸药单耗是常规钻孔爆破的 5.4～6.5 倍;上覆地层厚度与炸药单耗呈线性递增关系;实验得出的炸药单耗是瑞典经验公式计算值的 3.4～4.9 倍。由此提出满足工程需要的炸药单耗修正公式,应用于实际工程并通过验证取得良好效果,为类似工程孤石爆破预处理炸药单耗的计算提供依据和参考。

关键词: 爆炸力学;炸药单耗;爆破;孤石;盾构;预处理;模型实验

中图分类号: O381 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

盾构机穿越坚硬花岗岩基岩和孤石地段时,先通过爆破预处理后进行掘进的方案在地下工程中已有成功应用,如:深圳地铁 5 号线宝翻区间、翻灵区间和民五区间[1],日本茨城县日立市下水道工程[2],台山核电引水隧道工程[3-5]等。为保障盾构机出渣系统正常运转,台山核电引水隧道经爆破预处理后块度须控制在 30 cm 以内[6];炸药用量过低会导致爆破后块度过大,增加盾构机出渣难度甚至破坏盾构机刀盘和出渣系统,炸药用量过大会增加成本,且会挤压周围软弱岩层形成较大空腔,增加爆后注浆量及盾构机保压难度,所以本文中将对此特殊情况的炸药单耗进行研究。

目前各国类似工程炸药单耗确定以经验公式为主,最常用的为水下爆破炸药单耗经验公式,但其研究成果较少,主要有:刘美山等[7]通过 10 个混凝土试件的陆地和水下爆破效果对比分析,探讨了在 25～30 m 水深时炸药单耗的增量问题;刘慧等[8]从理论上推导了炸药单耗与爆破块度分布均匀性指数的关系;陈运轩[9]通过研究得出了平均块度增大一倍、炸药单耗减少一倍的结论。以上结论以水下爆破为主要研究对象且都基于分析现场实验数据得出,都有一定局限性,不能简单直接套用。本工程的爆破预处理属于上覆岩土条件下爆破,与水下爆破存在较大差异。首先被爆体周围介质差异性较大,水下爆破周围介质以水为主而深孔基岩爆破周围介质以土、岩为主;其次对于块度的要求不同,本工程对爆破后岩块块度有小于 30 cm 的特殊要求,所以需对炸药单耗的确定进行研究。

本文中,依托台山核电引水隧道项目,引入爆破实验相似准则,结合基岩和周围软弱岩层物理、力学特性确定相似律,在现场进行小比例爆破模型实验,测量不同埋深条件下满足特殊块度要求的炸药单耗,进而分析炸药单耗和上覆岩层深度的对应关系,将其与常用的炸药单耗经验公式进行对比,在此基础上推导适用于本工程的炸药单耗经验公式,为现场爆破预处理的炸药单耗提供计算依据。

* **收稿日期:** 2014-11-10; **修回日期:** 2015-06-30
基金项目: 国家自然科学基金项目(51508038,51274049,51378505);湖南省教育厅项目(15C0051);长沙理工大学土木与建筑学院重点学科(13ZDXK11)
第一作者: 张庆彬(1980—),男,博士,讲师,cslgzqb@126.com。

1 工程概况

台山核电站取水隧洞位于陆域腰古咀至大襟岛之间的海域中，隧洞全长 4 330.6 m，隧洞两端有陆域侧工作井及大襟岛侧工作井各 1 座。取水隧洞为双洞取水方式，开挖洞径为 9.03 m，隧洞埋深 11～29 m，两洞中线间距 29.2 m。取水隧洞大部分采用泥水平衡盾构施工，进出洞取水构筑物及隧洞硬岩部分采用钻爆法施工。根据地勘结果，隧洞线路内有多处花岗岩残留体和基岩凸起，平均强度约 100 MPa，个别区段岩石强度甚至达到 180 MPa。

2 模型实验参数确定

2.1 爆破相似准则的建立

模型实验主要解决无自由面深孔爆破预处理的炸药单耗问题，即关注特定爆破块度对应的炸药单耗 q（或炸药量 Q），所以相似准则的建立和各影响参数的确定主要考虑影响炸药单耗 q（或炸药量 Q）和爆破块度的参数。根据材料相似、几何参数相似和实验的爆破动力相似三原则建立[10-15]模型的相似准则，然后采用 π 定理及量纲分析法确定现场爆破的相似准则，模型实验选取的现场物理量及其量纲和数值见表 1。

表 1 模型实验中选取的现场物理量、量纲及数值

Table 1 Dimensions and values of on-the-site physical quantities in model test

编号	符号	名称	单位	量纲	数值
1	Q	炸药量	kg	M	—
2	v	炸药爆速	m/s	LT^{-1}	4 000
3	ρ	炸药密度	kg/m^3	ML^{-3}	1 200
4	R	装药半径	m	L	0.045
5	h	装药长度	m	L	0.90
6	ρ_r	岩石密度	kg/m^3	ML^{-3}	2 800
7	v_r	岩石纵波波速	m/s	LT^{-1}	4 000
8	σ_r	岩石强度	N/m^2	$ML^{-1}T^{-2}$	1×10^6
9	L	岩石尺寸（正方体）	m	L	1.00
10	D	岩石破碎的平均块度	m	L	0.30
11	H	岩石埋深	m	L	—
12	ρ_c	上覆层密度	kg/m^3	ML^{-3}	2 600
13	v_c	上覆层纵波波速	m/s	LT^{-1}	2 400

模型实验炸药量的影响方程为：

$$Q=f(v,\rho,R,h,\rho_r,c_r,\sigma_r,L,D,H,\sigma_c,v_c) \tag{1}$$

式中：Q 为因变量，其余为自变量，基本量纲为 3 个，取 v、ρ、R 为独立量纲量。按 π 定理及量纲分析法，求得下列量纲为 1 的相似判据：

$$\begin{cases} \pi_1=R/h, \quad \pi_2=R/L, \quad \pi_3=R/D, \quad \pi_4=L/H \\ \pi_5=\sigma_r/\rho v^2, \quad \pi_6=\rho v/\rho_r v_r, \quad \pi_7=\rho_r v_r/\rho_c v_c, \quad \pi_8=Q/\rho R^3 \end{cases} \tag{2}$$

这些量纲一量满足：

$$f=(\pi_1,\pi_2,\pi_3,\pi_4,\pi_5,\pi_6,\pi_7,\pi_8) \tag{3}$$

这就是无自由面条件下爆破模型实验的相似律，其含义和具体数值见表 2。

2.2 模型尺寸及材料确定

按几何相似比1∶7考虑，模型尺寸为15 cm，由相似准则得模型实验的相关参数：装药半径为

表 2 相似律各参数含义及数值

Table 2 Parameters and values of similarity law

参数	数值	参数含义
π_1	0.05	模型和实际的装药尺寸相似比
π_2	0.045	模型与实际爆破的尺寸相似比
π_3	0.15	模型与实际爆破的爆破块度相似比
π_4	0.143	实验模型和几何原型的相似比
π_5	0.005 2	炸药的爆轰压力与岩石强度的相似比
π_6	0.43	炸药与岩石的波阻抗相似比
π_7	1.8	岩石与覆盖层的波阻抗相似比
π_8	62.8	装药量与装药半径的相似比

0.68 cm、装药长度为 13.5 cm；炸药密度约为 1 000 kg/m^3，爆速 3 200 m/s；试块强度为 53.2 MPa、密度 2 200 kg/m^3、波速为 3 382 m/s；上覆层材料选取波阻抗为 4 100 t/(m^2 · s)的材料，确定为砂子，密度为 1 600 kg/m^3，波速 2 562 m/s。装药时考虑雷管参数：外径为 6 mm，每发雷管药量为 0.7 g，雷管长度为 7 cm，并考虑实际操作问题；爆破块度为 4.5 cm。

3　爆破模型实验

3.1　试块制作及参数测定

现场试块制作时参照标号为 C50 的混凝土进行，通过实验要求参数对混凝土试块进行强度、波速和密度测试，不断调整其配合比，最终达到实验要求的混凝土配合比，见表 3，模型试块密度在 2 200～2 300 kg/m^{3}之间，波速在 3 300～3 500 m/s 之间，强度范围为 52.0～55.0 MPa。

表 3 混凝土试块配合比(kg/m^3)

Table 3 Proportions of components in concrete sample (kg/m^3)

标号	水泥	砂	碎石(5～10 mm)	碎石(10～20 mm)	粉煤灰	聚羧酸高效减水剂	水
C50	376	659	468	703	94	4.7	145

3.2　模型实验

模型实验时，根据覆盖层厚度的不同考虑了 6 种工况的实验，分别为上部无覆盖层、上部覆盖层厚度分别为 30、50、70、100 和 150 cm 的情况，上部无覆盖层条件时将试块按照爆破得出不同厚度覆盖层条件对应的最佳炸药单耗，并对爆破现象进行了记录整理，见表 4，其中：q_b 为最佳炸药单耗。

3.3　实验数据分析

从以上 6 种工况的模型实验结果看以总结出以下规律：

(1)满足实验块度要求时的陆地爆破(上部无覆盖层)炸药最佳单耗为 3.26 kg/m^3，为常规爆破炸药单耗(0.5～0.6 kg/m^3)的 5.4～6.5 倍；

(2)随着覆盖层厚度从无到 2 倍试块尺寸，爆破对覆盖层表面的影响从形成爆破漏斗到覆盖层表面塌陷，影响区域逐渐减小；覆盖层从 2 倍试块尺寸到 3.3 倍试块尺寸(上部覆盖层 50 cm)时，地表塌陷逐渐消失，地表形成环形裂纹；

(3)将实验的覆盖层厚度(H)和最佳炸药单耗(q_b)通过 MATLAB 软件进行拟合分析，得到其对应关系为：

$$q_b = 1.736\,8H + 3.385\,5 \tag{4}$$

式中：H 为覆盖层厚度(m)，即岩石埋深；q_b 为最佳炸药单耗(kg/m^3)。由公式(3)可以得出最佳炸药单耗和覆盖层厚度成 1.736 8 倍的线性增加关系。

表 4 试块爆破装药量及爆后块度统计

Table 4 Charge weight of samples and fragmentation statistics

试块	Q/g	D/cm	q/(kg·m^{-3})	H/cm	实验场地	q_b/(kg·m^{-3})	实验现象
1-1	20	2.00	5.93				
1-2	11	4.50	3.26	0	实验用水池	3.26	在砂层表面形成明显爆坑
1-3	8	5.54	2.37				
2-1	12	4.63	3.56				
2-2	13	4.54	3.85	30	实验用水池	3.85	覆盖层表面出现了直径约 30 cm 左右的塌腔
2-3	14	4.40	4.15				
3-1	14	4.67	4.15				
3-2	13	5.33	3.85	50	实验用水池	4.44	表面出现直径约 45 cm 的环状裂纹且试块上部出现空腔
3-3	15	4.48	4.44				
4-1	16	4.46	4.74				
4-2	17	4.28	5.04	70	工地料场	4.74	表面无裂纹,试块周边出现空区
4-3	18	3.98	5.33				
5-1	15	4.85	4.44				
5-2	18	4.09	5.33	100	工地料场	5.04	表面无裂纹,试块周边出现空区
5-3	17	4.45	5.04				
6-1	22	3.78	6.52				
6-2	20	4.65	5.93	150	工地料场	5.93	表面无裂纹,试块周边出现空区
6-3	19	4.31	5.63				

(4) 当覆盖层深度达到或大于 4.7 倍试块尺寸时,试块爆破不会对地表产生任何影响,但爆破会使试块周边区域(主要是试块上部区域)的砂层挤密而形成空腔。在实际工程中,若爆后不处理或处理不到位,爆破导致的空腔会使盾构机掘进到此位置时产生压力突变进而保压困难,甚至威胁掌子面的稳定和盾构机的压力平衡系统,导致重大工程事故。

3.4 现场爆破炸药单耗

根据模型实验结果和爆破相似准则可以得出现场爆破对应的炸药单耗,并通过 MATLAB 软件对现场爆破的埋深和炸药单耗数据(见表 5)进行拟合,得出两者为线性关系:

$$q_b = 0.2481H + 3.3855 \tag{5}$$

表 5 模型实验和现场爆破的炸药单耗

Table 5 Explosive consumption in model experiment and on-the-tsite blasting

H_m/m	H_f/m	q_b/(kg·m^{-3})	H_m/m	H_f/m	q_b/(kg·m^{-3})
0	0	3.26	0.7	4.9	4.74
0.3	2.1	3.85	1.0	7.0	5.04
0.5	3.5	4.44	1.5	10.5	5.93

4 实验结果与经验公式的对比及修正

4.1 常用水下爆破炸药单耗经验公式比对

无自由面深孔基岩爆破预处理时炸药单耗的确定无较成熟的经验公式或研究成果可以借鉴,只能参考类似情况的爆破。目前各国工程遇到类似情况在确定炸药单耗时一般借鉴水下爆破的炸药单耗公式,常用的经验公式见表 6,但水下爆破常用的炸药单耗经验公式[16-17]都是在陆地土岩爆破基础上修正得来的,在参考使用时难免产生较大误差。

对水下爆破常用的 4 个经验公式对比得出：中国水利系统常用的计算公式、日本炸药协会公式和瑞典公式 3 者较相似，均考虑了水深、覆盖层影响，另外中国水利系统和瑞典经验公式形式简单且较为接近，考虑因素也比较全面，但以上经验公式均没有考虑爆后块度的特殊要求，都是按照常规爆破的采、运要求为控制指标。为对比分析模型实验结果与常用水下爆破炸药单耗经验公式的差别，以及在此基础上进行修正，最终确定采用形式简洁和应用广泛的瑞典经验公式进行，其计算公式如下：

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 \tag{6}$$

式中：q_1 为基本装药量，是一般陆地梯段爆破的 2 倍，对水下垂直钻孔，再增加 10%；q_2 为爆区上方水压增量，$q_2 = 0.01h_2$，h_2 为水深；q_3 为爆区上方覆盖层增量，$q_3 = 0.02h_3$，h_3 为覆盖层（淤泥或土、砂）厚度；q_4 为岩石膨胀增量，$q_4 = 0.03h$，h 为梯段高度。

表 6　水下爆破炸药单耗经验公式对比

Table 6　Comparison of explosive consumption empirical formula in underwater explosion

公式来源	表达式	考虑的主要因素
中国水利系统	$q_{水} = q_{陆} + 0.01H_{水} + 0.02H_{介质} + 0.03H_{梯}$	水深、炸药埋深、梯段高度
日本炸药协会	$\begin{cases} L_a = HC_a & \text{（水压修正）} \\ L_\beta = H_0C_\beta & \text{（上覆土岩修正）} \end{cases}$	水深、上覆层厚度
瑞典经验公式	$q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4$	水深、梯段高度、覆盖层高度
《工程爆破实用手册》	$Q = KWaH[1.45 + 0.45\mathrm{Exp}(-0.33H_0/W)]$	水深、抵抗线、孔距、梯段高度

4.2　经验公式与实验结果对比

为对比实验结果和瑞典经验公式得出的炸药单耗在实际工程中的差别，结合台山核电具体工程，根据实验结果得出的式(5)与常用的水下爆破瑞典经验公式分别进行计算，得出在不同覆盖层深度条件下的单耗结果，并将其数据进行对比，对比数据见表 7，其中：η 为瑞典经验公式与式(5)的结果之比。

表 7　瑞典经验公式和本文拟合公式的炸药单耗对比

Table 7　Comparison of explosive consumption between results of Sweden empirical formula and fitting formula

H/m	q/(kg·m^{-3})		η	H/m	q/(kg·m^{-3})		η
	式(5)	瑞典经验公式			式(5)	瑞典经验公式	
0	1.10	3.39	3.39	15	1.67	7.11	4.26
5	1.37	4.63	3.38	20	1.82	8.25	4.53
10	1.52	5.87	3.86	25	1.97	9.59	4.87

由表 7 看出瑞典经验公式得出的炸药单耗小于模型实验得出的炸药单耗，究其原因主要是因为瑞典经验公式对于爆破块度仅以常规的采、运为标准，与本工程的不大于 30 cm 块度要求出入较大。在无自由面深孔爆破时，根据不同埋深情况炸药单耗为常用的瑞典经验公式计算结果的 3.4～4.9 倍。

5　现场爆破预处理方案及效果验证

5.1　爆破预处理方案

陆域段施工主要从 K0＋201 向 K0＋159 方向施工，在有孤石或基岩的地段采用地质钻机垂直钻孔，钻孔直径为 90 mm。选用标准直径为 60 mm 的乳化炸药，为了减小爆破振动，采用孔内分层装药和延时起爆，孔内雷管选用毫秒导爆管雷管，地表连接成非电复式起爆网路，最后采用 2 发瞬发电雷管起爆。装药结构见图 1。

5.2　爆破效果

为研究模型实验在实际工程中的应用效果，在爆破预处理完成后进行了 51 组岩芯取样验证（如图 2 所示），取芯结果表明其爆破后块度大部分均在 30 cm 以内。

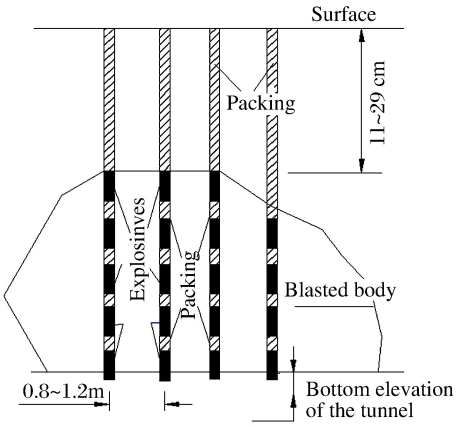

图 1 爆破预处理装药结构示意图

Fig. 1 Charge structure of blasting pretreatment

图 2 爆破预处理后芯样

Fig. 2 Rock fragmentations after blasting

另外，在盾构机掘进过程中，对掘进参数中的掘进速度、掘进推力和掘进时间进行了分析，分析结果证明其应用效果良好，盾构机在掘进过程中未发现异常现象，正常通过了孤石和基岩突起区域。

由于不存在未爆破孤石段，因此只能对比爆破后的孤石段（K0＋310～360，106～138 环）与正常段的掘进参数，如果 2 段掘进参数差别不大，以此说明对孤石爆破取得了良好的效果。同样也从掘进速度、每环掘进时间、掘进推力 3 项参数进行对比。由于 K0＋360～406（139～170 环）段不含孤石，且地质情况与孤石段类似，因此选取此段与孤石段进行对比，对比结果见表 8，其中：$\bar{v}$、$\bar{t}$、$\bar{F}$ 分别为平均掘进速度、平均平均每环掘进时间和平均掘进推力。

表 8 孤石段与正常段盾构掘进参数对比表

Table 8 Comparison of boulder's driving parameters with those of normal section

掘进段	$\bar{v}$/(mm · min^{-1})	$\bar{t}$/min	$\bar{F}$/kN
孤石段	15.5	121	18 739
正常段	13.8	108	18 035

从表 8 可以看出，爆破后孤石段平均掘进速度为 15.5 mm/min，正常段段掘进速度为 13.8 mm/min，两段掘进速度差别不大；爆破后孤石段平均每环掘进时间为 121 min，未爆破段平均每环掘进时间为 108 min，两段平均每环掘进时间差别不大；爆破后孤石段平均掘进推力为 18 739 kN，正常段平均掘进推力为 18 035 kN，两段平均每环掘进推力差别不大。从盾构机的 3 项掘进参数来看，孤石段爆破后与正常段掘进相差无几，达到了理想的效果。

6 结 论

（1）根据模型实验结果得出在满足 30 cm 块度要求的前提下，陆地爆破炸药单耗是常规爆破单耗的 5.4～6.5 倍。

（2）从爆破实验可以看出，不同上覆层厚度会影响爆破现象。上覆层厚度在被爆体 3 倍尺寸内时会对地表产生影响，大于 3 倍则不会对地表产生明显影响。

（3）水下爆破炸药单耗的瑞典经验公式和实验结果偏差较大。原因有：对爆破后块度的要求不同、被爆体周围介质不同。

（4）无自由面深孔爆破预处理时，满足本工程对爆破块度特殊要求的前提下，炸药单耗为常用水下爆破瑞典经验公式的 3.4～4.9 倍，基于此提出了适合本工程特殊要求的炸药单耗修正公式，解决本工程实际问题的同时也为类似工程炸药单耗的确定提供了计算依据和参考价值。

参考文献：

[1] 刘建国.深圳地铁盾构隧道技术研究与实践[M].北京：人民交通出版社，2011.

[2] 杜力编译.无自由面爆破破碎岩盘[J].爆破，1990(4)：66-69.
Du Li Translated. Blasting rock without free surface[J]. Blasting，1990(4)：66-69.

[3] 徐朝辉.台山核电站取水隧洞基岩及孤石处理技术[J].陕西水利，2010(6)：81-82.
Xu Zhaohui. Treatment technology of bedrock and boulders in Taishan nuclear intake tunnel[J]. Shaanxi Water Resources，2010(6)：81-82.

[4] 洪开荣.水下盾构隧道硬岩处理与对接技术[J].隧道建设，2012，32(3)：361-365.
Hong Kairong. Case study on hard rock treatment technology and shield docking technology in boring of underwater tunnels[J]. Tunnel Construction，2012，32(3)：361-365.

[5] 路耀邦，刘洪震，游永锋.海底盾构隧道孤石爆破预处理关键技术[J].现代隧道，2012，49(5)：117-122.
Lu Yaobang，Liu Hongzhen，You Yongfeng. Key techniques for the pretreatment of boulder blasting in an undersea shield-driven tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology，2012. 49(5)：117-122.

[6] 海瑞克股份公司.台山核电引水隧道盾构机说明书[M].海瑞克股份公司，2010.

[7] 刘美山，吴新霞，张恒伟.混凝土水下爆破炸药单耗试验分析[J].爆破，2007，24(1)：10-15.
Liu Meishan，Wu Xinxia，Zhang Hengwei. Experimental analysis on specific charge of underwater explosion of concrete[J]. Blasting，2007，24(1)：10-15.

[8] 刘慧，冯叔瑜.炸药单耗对爆破块度分布影响的理论探讨[J].爆炸与冲击，1997，17(4)：359-362.
Liu Hui，Feng Shuyu. Theoretical research of the effect on the blasting fragentation distribution from the explosive specific charge[J]. Explosion and Shock Waves，1997，17(4)：359-362.

[9] 陈运轩.爆破块度效应对炸药单耗的影响[J].爆破，1996，13(3)：19-22.
Chen Yunxuan. Effect on the explosive specific charge considering blasting fragmentation[J]. Blasting，1996，13(3)：19-22.

[10] 马建军，熊祖钊，段卫东，等.工程爆破模拟试验的相似律[J].武汉科技大学学报：自然科学版，2001，24(2)：170-173.
Ma Jianjun，Xiong Zuzhao，Duan Weidong，et al. Similarity law in simulation test of engineering blasting[J]. Jounal of Wuhan University of Science & Technology：Natural Science Edition，2001，24(2)：170-173.

[11] 杨振声.工程爆破的模型试验与模型律[J].工程爆破，1995，1(2)：1-15.
Yang Zhensheng. Modeling experiment of exgineering blasting and model theory[J]. Engineering Blasting，1995，1(2)：1-15.

[12] 秦绍兵，秦绍红.井下中深孔爆破模型试验的相似性研究[J].工程爆破，2001，7(2)：9-12.
Qin Shaobing，Qin Shaohong. Study on the similarity of model experiment of underground medium-length-hole blasting[J]. Engineering Blasting，2001，7(2)：9-12.

[13] 王伟，李小春.无临空面深层岩体爆破增渗模型试验相似律研究及相似条件的实现[J].岩土力学，2009，30(7)：1892-1898.
Wang Wei，Li Xiaochun. Study of similar law of model test of blasting echanced permeability in deep rock mass without free surface and its implementation[J]. Rock and Soil Mechanics，2009，30(7)：1892-1898.

[14] 左启东.模型试验的理论和方法[M]. 北京.水利水电出版社，1984.

[15] Ma Qinyong，Cai Meifeng. Determination of similarity of explosives for a model experiment[J]. Combustion，Explosion and Shock Waves，2003，39(5)：606-609.

[16] 李泉.几种水下钻孔爆破炸药单耗计算公式的分析与比较[J].爆破，2012，29(1)：94-97.
Li Quan. Analysis and comparision of several calculation formulas of specific charge underwater drilling blasting[J]. Blasting，2012，29(1)：94-97.

[17] Arpaz E，Uysal O，Tola Y，et al. Comparison of blasting-induced ground vibration predictors in Seyitomer coal mine[M]. Harmonising Rock Engineering and the Enviroment，2011，25(2)：153-175.

Experiment of explosive consumption by blasting pretreated boulders with overlying stratum of rock-soil

Zhang Qingbin[1,2], Yang Junsheng[2], Wu Congshi[1], Zhang Xuemin[2], Liang Kuisheng[3], Liu Hongzhen[4], Fang Fenghua[5]

(1. *School of Civil Engineering and Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410004, *Hunan, China*;
2. *School of Civil Engineering, Central South University, Changsha* 410075, *Hunan, China*;
3. *Intake Tunnel Project of Taishan Nuclear Power Station, Department of China Railway Tunnel Stock Co., LTD, Taishan* 529228, *Guangdong, China*;
4. *China Railway Tunnel Group Research Institute, Luoyang* 471009, *Henan, China*;
5. *Yichang Part and Channel Administrative Bureau, Yichang* 443000, *Hubei, China*)

Abstract: During the tunneling construction in hard granite strata utilizing shield machines, pretreatment of boulders by blasting was commonly used to prevent the abrading cutter from serious damages and reduce construction risks, but the explosive consumption was usually determined based on empirical formula, resulting in that the blasting effect was often far from satisfactory. In the present work, aiming to meet the special requirement that rock fragments from the blasting should be less than 30 cm in practice, we investigate the explosive consumption using a model test of blasting. The results show that the explosive consumption of land blasting is 5.4-6.5 times that of conventional blasting when the requirement of rock fragmentation is satisfied; the explosive consumption increases linearly with the depth of overlying stratum; and the explosive consumption of model test was 3.4-4.9 times that of the empirical formula. Thus, the revised empirical formula is derived and proved valid based on the on-the-site practice. The revised formula can serve as calculation basis and reference value for similar projects of tunneling construction.

Key words: mechanics of explosion; explosive consumption; blasting; boulder; shield; pre-treatment; model experiment

(责任编辑 王小飞)