

青藏铁路多年高含冰量冻土爆破漏斗的试验研究

张俊兵¹, 潘卫东², 傅洪贤³

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 中国铁道科学研究院, 北京 100086)

摘要: 在青藏高原多年冻土区的铁路建设中, 大量多年高含冰量冻土需要爆破开挖。国内外科研人员针对多年高含冰量冻土的爆破研究较少。对青藏高原沱沱河地区某一高含冰量冻土爆破漏斗的试验和爆破试验方法进行了研究。通过研究冻土特性、装药量和爆破深度之间的关系, 得出了单位药包的最佳埋深、最大体积, 进而推导出了最佳爆破参数。

关键词: 土力学; 青藏铁路; 冻土爆破; 爆破漏斗; 爆破技术

中图分类号: TD 235.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)06-1077-05

EXPERIMENTAL STUDY ON THE EXPLOSION CRATER OF ICE-RICH FROZEN SOIL ALONG QINGHAI—TIBET RAILWAY

ZHANG Jun-bing¹, PAN Wei-dong², FU Hong-xian³

(1. *School of Resource and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

2. *School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;*

3. *China Academy of Railway Sciences, Beijing 100086, China*)

Abstract: Qinghai—Tibet railway is now being built, and much more frozen soil is needed to be blasted. However, only a few research works on the blasting of frozen soil had been performed. A number of explosion crater tests on ice-rich frozen soil were carried out along Qinghai—Tibet railway. The optimum depth and maximum volume are obtained, and the optimum blasting parameters are also achieved.

Key words: soil mechanics; Qinghai—Tibet railway; frozen blasting; explosion crater; blasting technologies

1 引言

青藏铁路约 560 km 修筑在多年冻土地区, 保护冻土环境是施工规范的基本要求之一。为了在满足规范要求的同时, 提高高含冰量冻土地段的施工进度, 工程爆破就成为首选的方法。20 世纪 70 年代中国铁道科学研究院在青藏高原上进行了冻土爆破漏斗的试验。但是, 经过 30 a, 钻孔机械和爆破器材有了较大发展, 有些试验结果应在现有的技术

条件下进行补充试验, 才能更好地提出合理的爆破参数和钻机类型。

爆破漏斗的试验选择在青藏铁路 DK1210+310~DK1210+490 进行。试验区平均海拔 4 560~4 600 m, 属青藏高原干燥型气候区, 年平均气温 -4℃, 极端最低气温 -45.2℃。试验区线路与青藏公路并行, 线路“低填深挖”经过一山包, 地形宏观上属低山丘陵地貌, 有草皮覆盖, 地表景观的稳定性差。地表层向下 0~3.4 m 为粉土, 其下为砾砂、中砂。

收稿日期: 2004-03-30; **修回日期:** 2004-05-20

作者简介: 张俊兵(1962-), 男, 现为兰州大学博士研究生、高级工程师, 主要从事铁路及道路工程设计与施工方面的教学与研究工作。E-mail: zjb6211@163.com。

试验区多年冻土上限 3.0~3.2 m。进行试验时，将上部 3.0~3.2 m 的季节冻土层予以清除，只剩下无法用电铲开挖的高含冰量多年冻土。

2 试验区冻土物理力学性质的测定

2.1 冻土密度和含冰量

冻土密度和含水量是研究冻土爆破机理的重要物理力学指标。在试验区各钻 2 个孔径 20 mm，孔深 50 cm 的探孔，并利用孔径 40 mm，孔深 170 cm 的炮孔，使用美制 MC-3C 型密度/湿度测试仪测定冻土的密度和含水量。试验测量结果列于表 1 中。

表 1 试验区冻土密度和湿度测量结果

Table 1 Measuring result of humidity and density of frozen soil in test area

测量位置	密度/g · cm ⁻³		湿度/% (液态含水量, 不包括固态冰)	孔径/mm	孔深/cm
	湿	干			
1#孔	1.727	1.599	8.00	20	50
2#孔	1.686	1.524	10.64	20	50
3#孔	1.960	1.787	9.66	40	170
均值	1.791	1.637	9.43		

2.2 冻土抗压强度

试验区处于富冰地段，根据地质勘探资料：少冰冻土抗压强度 $\sigma_0 = 800$ kPa，多冰冻土抗压强度 $\sigma_0 = 800$ kPa，富冰冻土抗压强度 $\sigma_0 = 640$ kPa。故选取冻土抗压强度 $\sigma_0 = 640$ kPa。

2.3 冻土温度

试验区为高温不稳定多年冻土。在 2002 年 9~10 月份的试验期间，对冻土温度进行多次测量，在炮孔中放入温度计，根据炮孔孔深，温度计分别设置在距地面 0.5，1.0，1.5 和 1.8 m 处。试验期间，孔口外气温为 3 ~ 10，实测冻土温度为 0 ~ -1.0。

2.4 冻土波速

波速是冻土物理力学指标的综合反映。在进行扩壶爆破试验时，利用扩壶爆破既不产生破坏，又能产生较强振动波的条件来测定冻土波速。小药包扩壶在冻土中产生体积波和表面波，体积波包括横波和纵波。纵波传播速度最快，与冻土物理力学性质密切相关，药包重量和起爆方法只影响波的频率和传播距离。在炮孔周围布置 2 个拾振器，利用小药量起爆，测得高含冰量冻土的最大波速为 3 774

m/s，最小波速为 3 734 m/s。用同样方法测得含土冰层的最大波速为 2 684 m/s，最小波速为 2 656 m/s。使用该方法得到的波速值大约有 1% 的误差，满足精度要求。

3 爆破漏斗的试验

3.1 钻孔机械和起爆器材

钻孔采用超强岩石电钻，起爆器材采用 2# 岩石乳化炸药(炸药换算系数 $e = 1$)、非电导爆管毫秒雷管、火雷管、导火索和导爆索。

3.2 扩壶爆破漏斗的试验

由于使用超强岩石电钻，钻孔直径 40 mm，要想做球状药包漏斗试验，必须扩壶。总共做了 4 个扩壶爆破漏斗的试验，4 个漏斗全部清挖。试验结果整理后如表 2 所示。

4 试验数据分析

漏斗的直径、深度和体积的大小与药包的重量和深度有关，要对在同一地点进行的不同药量和不同深度的漏斗试验进行比较，必须对数据进行处理使其具有可比性。通常用比值深度即药包深度与药量立方根的比值来表示深度，用可见漏斗比值半径(直径)即漏斗半径(直径)与药量立方根的比值来表示漏斗半径(直径)，用漏斗比值体积即漏斗体积与药量的比值来表示体积。

4.1 可见漏斗数据分析

(1) 可见漏斗深度与药包位置的关系

以药包比值深度为横坐标，可见漏斗比值深度为纵坐标，绘制二者的关系离散图(图 1)。由图 1 可以看出，可见漏斗比值深度(H_a)开始时随着药包比值深度的增加而增加，达到最大值后开始减小，该类冻土的药包最佳比值深度为 0.89 m/kg^{1/3}。

(2) 可见漏斗直径与药包位置的关系

以药包比值深度为横坐标，可见漏斗比值直径为纵坐标，绘制二者的关系曲线图(图 2)。由图 2 可以看出，可见漏斗比值直径开始随药包比值深度的增加而增大，然后又减小。

回归结果为

$$\left. \begin{aligned} R_a &= -97.397h^2 + 175.6714h - 76.549 \\ R &= 0.99 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： R_a 为可见漏斗比值直径， h 为药包比值深度， R 为相关系数。

表 2 爆破漏斗的试验结果
Table 2 Blasting crater test result table

序号	药包深度 /m	装药量 /kg	药包比值深度 /m · kg ^{-1/3}	可见漏斗参数					实际漏斗参数						
				可见漏斗深度 /m	可见漏斗比值深度 /m · kg ^{-1/3}	可见漏斗体积 /m ³	可见漏斗比值体积 /m ³ · kg ⁻¹	可见漏斗直径 /m	可见漏斗比值直径 /m · kg ^{-1/3}	实际漏斗深度 /m	实际漏斗比值深度 /m · kg ^{-1/3}	实际漏斗体积 /m ³	实际漏斗比值体积 /m ³ · kg ⁻¹	实际漏斗直径 /m	实际漏斗比值直径 /m · kg ^{-1/3}
1	1.4	3.90	0.89	0.9	0.57	4.2	1.10	4.2	2.67	1.75	1.11	13.7	3.5	5.5	3.49
2	1.9	8.10	0.95	0.9	0.45	5.7	0.70	4.9	2.44	2.10	1.05	19.3	2.4	5.9	2.94
4	1.7	8.25	0.84	1.0	0.49	5.5	0.67	4.6	2.28	1.87	0.93	12.5	1.5	5.1	2.52
5	1.7	6.00	0.94	0.6	0.33	3.2	0.53	4.5	2.48	1.90	1.05	17.0	2.8	5.8	3.19

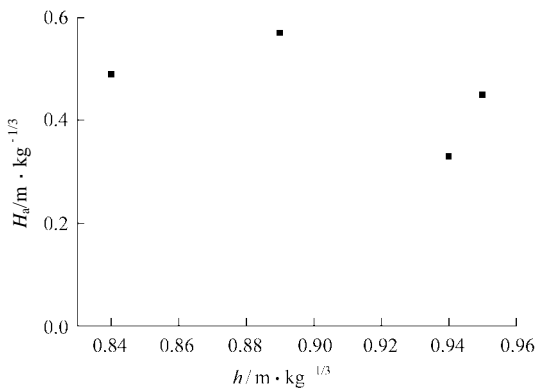


图 1 可见漏斗比值深度与药包比值深度关系离散图
Fig.1 Scatter diagram of visual funnel depth and globular explosive charge depth

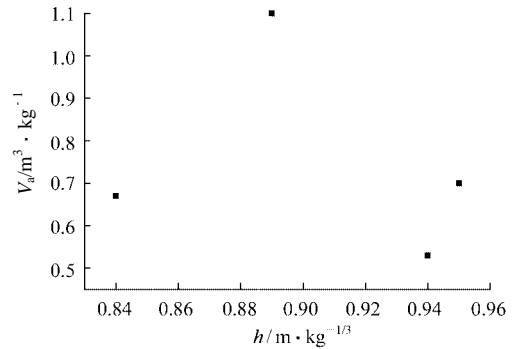


图 3 可见漏斗比值体积与药包比值深度关系离散图
Fig.3 Scatter diagram of visual funnel volume and globular explosive charge depth

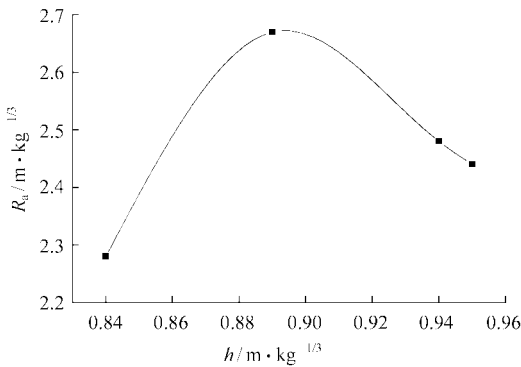


图 2 可见漏斗比值直径与药包比值深度关系曲线
Fig.2 Relation curve of visual funnel diameter and globular explosive charge depth

由式(1)可得,该类冻土的药包最佳比值深度为 0.90 m/kg^{1/3}。

(3) 可见漏斗体积与药包位置的关系

以药包比值深度为横坐标,可见漏斗比值体积为纵坐标,绘制二者的关系离散图(图 3)。

回归结果表示为

$$\left. \begin{aligned} V_a &= -67.43h^2 + 120.48h - 52.9 \\ R &= 0.65 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: V_a 为漏斗比值体积。

由图 3 可以看出,可见漏斗比值体积开始随着药包比值深度的增加而增大,然后又减小。

由式(2)可得,该类冻土的可见漏斗的最大比值体积和药包最佳比值深度分别为 0.92 m³/kg 和 0.89 m/kg^{1/3},炸药单位用药量为 1.09 kg/m³。

4.2 实际漏斗数据分析

(1) 实际漏斗深度与药包位置的关系

以药包比值深度为横坐标,实际漏斗比值深度为纵坐标,绘制二者的关系曲线图(图 4)。

回归结果表示为

$$\left. \begin{aligned} H_t &= -12.255h^2 + 23.37h - 9.951 \\ R &= 0.78 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: H_t 为实际漏斗比值深度。

由式(3)可得,该类冻土的药包最佳比值深度为 0.95 m/kg^{1/3}。

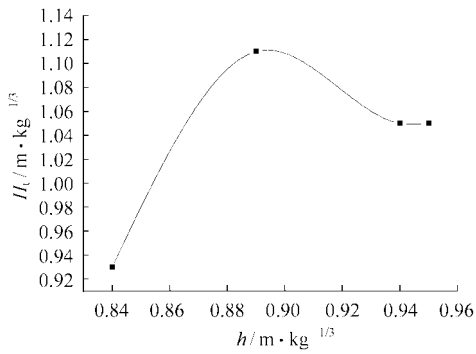


图 4 实际漏斗比值深度与药包比值深度关系曲线
Fig.4 Relation curve of real funnel depth and globular explosive charge depth

(2) 实际漏斗直径与药包位置的关系

以药包比值深度为横坐标，实际漏斗比值直径为纵坐标，绘制二者的关系图(图 5)。由图 5 可以看出，实际漏斗比值直径开始时随药包比值深度的增加而增大，然后又减小。

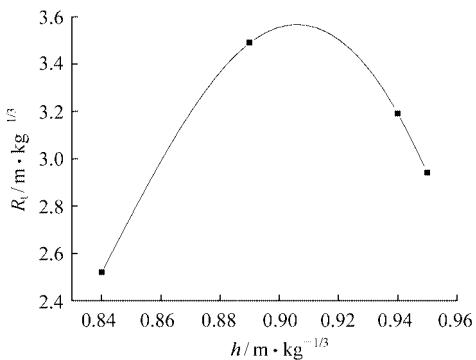


图 5 实际漏斗比值直径与药包比值深度关系曲线
Fig.5 Relation curve of real funnel diameter and globular explosive charge depth

回归结果表示为

$$\left. \begin{aligned} R_f &= -99.69h^2 + 184.491h - 82.01 \\ R &= 0.73 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： R_f 为实际漏斗比值直径， h 为药包深度。

由式(4)可得，该类冻土的药包最佳比值深度为 $0.93 \text{ m/kg}^{1/3}$ 。

(3) 实际漏斗体积与药包位置的关系

以药包比值深度为横坐标，实际漏斗比值体积为纵坐标，绘制二者的关系曲线图(图 6)。从图 6 中可以看出，实际漏斗比值体积开始时随药包比值深度的增大而增大，然后又减小。

回归结果表示为

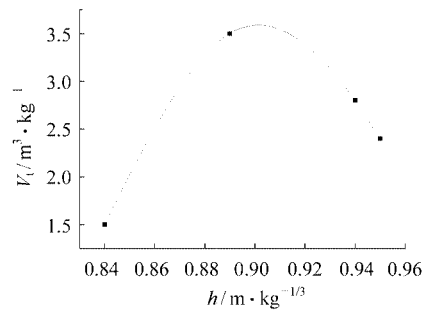


图 6 实际漏斗比值体积与药包比值深度关系曲线
Fig.6 Relation curve of real funnel volume and globular explosive charge depth

$$\left. \begin{aligned} V_t &= -174.2h^2 + 324.43h - 147.9 \\ R &= 0.70 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中： V_t 为实际漏斗比值体积。

由式(5)可得，该类冻土的实际漏斗的最大比值体积和药包最佳比值深度分别为 $3.15 \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 $0.93 \text{ m/kg}^{1/3}$ ，炸药单位用药量为 0.32 kg/m^3 。

5 爆破参数的验证

5.1 单位用药量的确定

在实际爆破试验中，由于冻土条件的复杂性，在试验中很难做成标准漏斗试验，可根据爆破作用指数 n 的规定：

$$n = \frac{r}{w} \quad (6)$$

当 $r \neq w$ 时，采用爆破作用指数函数 $f(n)$ 去修正标准抛掷漏斗的单位用药系数 k 的值^[1]，即

$$k' = \frac{kw^3}{w^3(0.4 + 0.6n^3)} = \frac{k}{0.4 + 0.6n^3} \quad (7)$$

式中： k' 为实际漏斗的单位用药系数， w 为最小抵抗线。

试验漏斗的爆破作用指数和单位用药系数见表 3。

青藏铁路施工时遇到的冻土爆破应为松动爆破，不同松动爆破时的单位用药量 q 和标准抛掷漏斗的单位用药系数 k 的关系为^[1]

$$q = (0.125 \sim 0.44)k \quad (8)$$

这里， $q = (0.125 \sim 0.44) \times 1.32 = 0.165 \sim 0.581 \text{ kg/m}^3$ 。

5.2 药包最佳比值深度

冻土中药包最佳比值深度列于表 4 中。

表 3 试验漏斗的爆破作用指数和单位用药系数

Table 3 Index of blasting action and unit detonator coefficient of explosion funnel test

序号	爆破作用指数 n	实际漏斗的单位用药系数 k'	标准抛掷漏斗的单位用药系数 k	冻土的标准抛掷漏斗的单位用药系数
1	1.95	0.28	1.36	
2	1.56	0.42	1.12	1.32
3	1.49	0.66	1.57	
4	1.72	0.35	1.21	

表 4 冻土中药包最佳比值深度

Table 4 Optimum depth of explosive charge in frozen ground $m \cdot kg^{-1/3}$

可见漏斗			实际漏斗		
由深度确定的最佳比值深度	由半径确定的最佳比值深度	由体积确定的最佳比值深度	由深度确定的最佳比值深度	由半径确定的最佳比值深度	由体积确定的最佳比值深度
0.88	0.90	0.89	0.95	0.93	0.93

冻土中药包最佳比值深度随漏斗类型和漏斗参数的不同而变化。由可见漏斗确定的药包最佳比值深度为 $0.88 \sim 0.90 m/kg^{1/3}$, 变化率约 2%; 由实际漏斗确定的药包最佳比值深度为 $0.93 \sim 0.95 m/kg^{1/3}$, 变化率约 2%。但是, 由实际漏斗确定的最佳比值深度比由可见漏斗确定的最佳比值深度要约大 5%。

5.3 爆破参数验证

根据漏斗试验结果, 进行了 3 次生产试验, 爆破飞石在 20~30 m 处, 冻土鼓起, 爆破效果良好。最终确定的深孔爆破参数为:

(1) 钻爆参数

炮孔直径 $d = 80 \text{ mm}$, 前排最小抵抗线 $w = 2.5 \text{ m}$, 排距 $b = 2.0 \text{ m}$; 孔距 $a = 2.6 \sim 3.4 \text{ m}$ (孔深较

小时用小值), 孔深 $l = 5.5 \sim 10.5 \text{ m}$ (垂直孔, 含超钻深度 0.5 m), 单位用药量 $q = 0.25 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 单孔装药量

$$Q = qwal \text{ 或 } Q = qbal$$

(3) 装药结构

采用直径 $d = 60 \text{ mm}$ 的药卷进行连续装药, 堵塞长度取 $(0.8 \sim 1.0)w$ 或 $(0.8 \sim 1.0)b$ 。

(4) 起爆网路和起爆顺序

采用塑料导爆管起爆系统和梯形微差起爆网路。为便于施工, 一律采用孔内微差, 同时提高起爆网路的可靠度以降低成本。

(5) 钻孔机械

冻岩爆破时, 采用简易潜孔钻机, 钻孔速度 0.2 m/min , 钻 6 m 孔需要 $40 \sim 50 \text{ min}$, 可满足施工需要; 冻土爆破时, 采用由石油物探特种车辆厂制造的沙驼牌地质钻机, 钻孔速度 $1 \sim 2 \text{ m/min}$, 孔深小于 20 m 时, 单日进尺达 1000 m 以上, 非常适合于冻土层施工。

高含冰量冻土地区铁路工程的施工, 首先应进行爆破漏斗试验, 确定松动爆破的初始参数; 然后进行深孔爆破试验; 最后确定最佳爆破参数^[2]。此方法简洁有效, 确定的爆破参数合理, 已被现场多个施工队采用, 效果良好。

参考文献(References):

- [1] 冯叔瑜, 马乃耀. 爆破工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1980. (Feng Shuyu, Ma Naiyao. Blasting Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1980.(in Chinese))
- [2] 傅洪贤. 青藏线冻土爆破特性的研究[R]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2003.(Fu Hongxian. The study of blasting character on frozen soil along Qinghai—Tibet railway[R]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2003.(in Chinese))