

# 野外小型圆锥地形爆破的实验研究

中国科学院力学研究所 许连坡

**提要:** 通过野外小型爆破实验, 本文研究了圆锥地形及爆破后各有关参数和比药量的关系及坡度的影响; 分析了堆积体和爆破坑的变化特征, 并指出了它们在工程上的影响。

## 一、问题的提出

实际的工程爆破, 临空面是一个平面的情况并不多; 而经常遇到的却是各种形状的山包, 也有许多是类似圆锥地形的山包。对于前者, 由于问题简单, 因而较容易处理, 所以一百年前便有了包氏公式——平地单药包爆破的药量计算公式。相反, 对于后者则缺乏这样的公式。为了完成工程任务, 爆破工作者便借用包氏公式。近年, 由于经验的增加和工作的需要, 各部门都有一些方法来完成这类任务<sup>[1, 2]</sup>, 特别是王鸿渠同志<sup>[3]</sup>提出了一系列多临空面爆破的计算公式, 促进了这一问题的研究和发展。

本文是这一问题在最简单最基本情况下的实验结果。正如包氏公式可借用于有关其他爆破工程一样, 本结果也可提供给有关情况下的爆破工程参考。

## 二、实验方法

人工堆制的土锥体如图 1, 锥体高度为  $H$ , 底半径  $R_0$ , 药包埋在  $O$  处, 药量为  $Q$ , 最小抵抗线为  $W$ , 土质和使用的炸药均不变, 于是  $Q$  可化成装药半径  $r_0$ , 这里我们用的耦合装药。参数  $H$ ,  $R_0$  和  $W$  中, 有一个是

不独立的。它们的关系可由图一中  $\triangle AOB \sim \triangle ACO$  得到:

$$R_0^2 = \frac{H^2}{\left(\frac{H}{W}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

即  $R_0$  可写成  $H$  和  $W$  的函数。于是本问题中, 独立的无量纲参数只有二个:  $\frac{W}{H}$  和  $\frac{r_0}{W}$ 。

由于地形是轴对称的, 而药包又放在对称轴上, 故爆后结果也是轴对称的。于是爆破坑开口直径  $D$ , 它的最低点的高度  $h$ , 爆堆高度  $b$ , 最大抛掷距离  $L$  等均是参数  $\frac{W}{H}$  和

$\frac{r_0}{W}$  的函数, 即如对  $D$  有

$$D = Wf\left(\frac{W}{H} \cdot \frac{r_0}{W}\right) \quad (2)$$

把  $r_0$  换成  $Q$  后:

$$D = W\varphi\left(\frac{W}{H} \cdot \frac{Q}{W^3}\right) \quad (3)$$

由此式把  $Q$  解出, 则有:

$$Q = W^3F\left(\frac{D}{W} \cdot \frac{W}{H}\right) \quad (4)$$

这些表达式, 当  $\frac{W}{H} = 1$  时, 均应退化为平地爆破的相应公式。

对其他参数也有类似的结果。

为了寻求上述各函数的具体形式, 我们

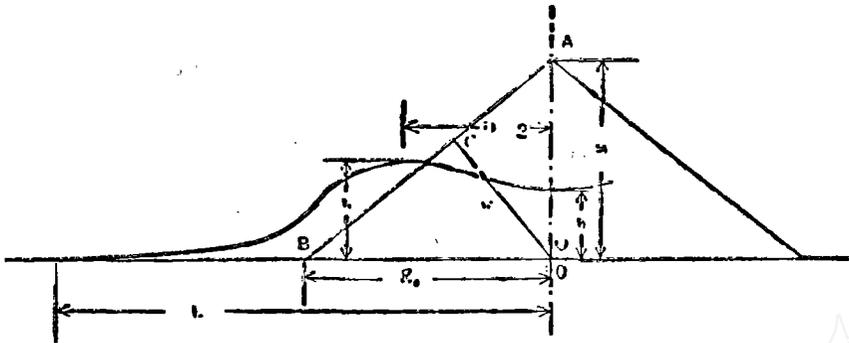


图1 圆锥地形爆破实验布置图

在野外进行了三类实验：第一类是 $W = 90\text{cm}$ ， $\frac{W}{H} = 0.75$ ，即坡角为 $41^\circ$ 左右；第二类是 $W = 30\text{cm}$ ， $\frac{W}{H} = 0.75$ ，坡角也相同；第三类是 $W = 30\text{cm}$ ， $\frac{W}{H} = 0.85$ ，坡角为 $32^\circ$ 左右。土质为细砂壤土，在制做土堆时，对水分和压实均进行了控制，同时，土堆在做完后还留了7—10天的恢复期，使其结构和水分进行自然恢复和均匀化。然后进行装药爆破，爆后实测上述各参数。

### 三、实验结果

1、爆破坑开口尺寸 为了和实际对比方便，我们在整理数据时，用比药量 $\frac{Q}{V}$ 代替参数 $\frac{Q}{W^3}$ ，这里 $V$ 是锥体体积：

$$V = \frac{\pi}{3} \frac{\left(\frac{H}{W}\right)^3}{\left(\frac{H}{W}\right)^2 - 1} W^3 \quad (5)$$

$$\text{或 } W^3 = \frac{3}{\pi} \left[ \frac{W}{H} - \left(\frac{W}{H}\right)^3 \right] V \quad (6)$$

二种 $\frac{W}{H}$ 之下的 $\frac{D}{W}$ 和比药量 $\frac{Q}{V}$ 的关系如图2的曲线1和2。我们看到，在二种情况下，爆破坑的开口度 $\frac{D}{W}$ 均随 $\frac{Q}{V}$ 而增加，但直观上其变化特征则不同：前者比药量小时 $D/W$ 变化不大，而当 $\frac{Q}{V}$ 超过 $0.25\text{kg}/\text{m}^3$ 时，则增加较快；后者则相反；当 $\frac{Q}{V} < 0.4\text{kg}/\text{m}^3$ 时增长较快，而当 $\frac{Q}{V} > 0.4$ 时则变化不大了。

这里可以看出 $\frac{W}{H}$ 值，即坡度的影响，因而平地的公式用到圆锥地形的爆破是不合适的。

图3，是总结了龙首山大爆破<sup>[4]</sup>的实际资料而得到的，可以看到，曲线的形状和缓坡的情况类似，只是开口尺寸比实验的情况小得多，这是因为二者介质不同：一个是强度很小的土，一个是岩体。

图2的曲线1的近似关系可写成：

$$\text{当 } \frac{W}{H} = 0.75, \quad 0.15 < \frac{Q}{V} < 0.34 \text{ 时}$$

$$\frac{D}{W} = 1.9 + 4.3 \left(\frac{Q}{V}\right)^2 \quad (7)$$

而曲线2的近似关系可写成：

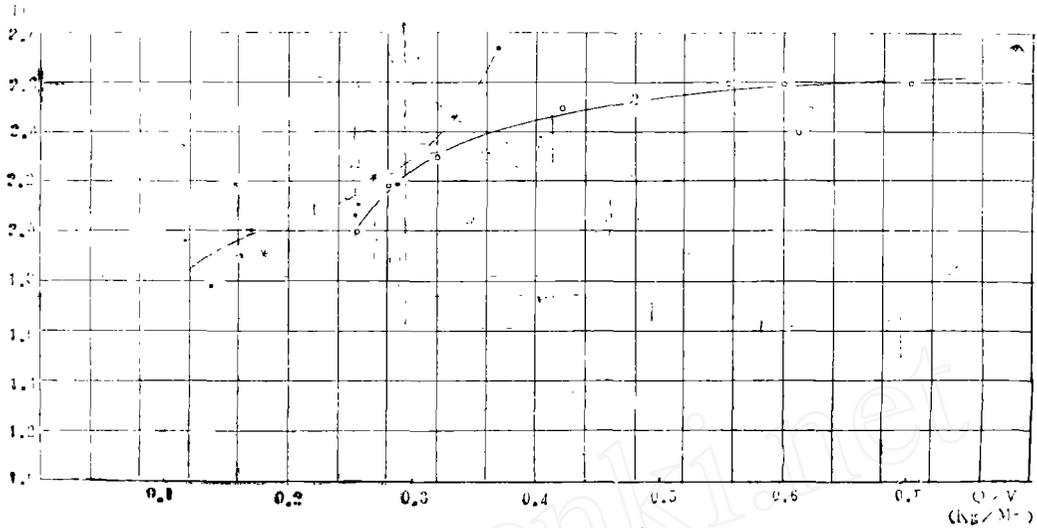
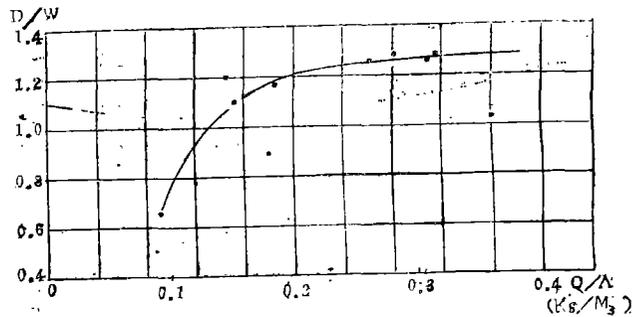


图2  $\frac{D}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系, 1—  $\frac{W}{H} = 0.75$  2—  $\frac{W}{H} = 0.85$ 。 \* —  $W = 30\text{cm}$ ,  $\frac{W}{H} = 0.75$ ; • —  $W = 90\text{cm}$ ,  $\frac{W}{H} = 0.75$  o —  $W = 30\text{cm}$ ,  $\frac{W}{H} = 0.85$

图3 一次实际爆破的  $\frac{D}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系。



当  $\frac{W}{H} = 0.85$ ,  $0.25 < \frac{Q}{V} < 0.7$  时

$$\frac{D}{W} = 2.6 - 3.9e^{-8\frac{Q}{V}} \quad (8)$$

对这两个关系作出理论分析, 目前还做不到。

2、爆破坑底高  $h$ ,  $\frac{W}{H}$  为 0.75 和 0.85 的实验结果如图 4 的曲线 1 和 2。可以看到: 曲线 1 可用直线表示, 即:

当  $\frac{W}{H} = 0.75$ ,  $0.1 < \frac{Q}{V} < 0.35$  时

$$\frac{h}{W} = 0.77 - 2.25 \frac{Q}{V} \quad (9)$$

图 4 曲线 2 的近似关系可写成:

当  $\frac{W}{H} = 0.85$ ,  $0.4 < \frac{Q}{V} < 0.7$  时有:

$$\frac{h}{W} = 0.43 - 2.2 \left( \frac{Q}{V} \right)^5 \quad (10)$$

它已不是直线关系了。

图 5 是总结龙首山实际爆破<sup>[4]</sup>资料得到的。为了整理数据的方便, 图中用  $\frac{H-h}{R_0}$

代替了  $\frac{h}{W}$ ，自然，这种代替是不影响实际

结果的。我们可以看到， $\frac{h}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  关系也是直线关系，即和图 4 的曲线 1 类似。自然，由于二者的介质和自然坡度不同，曲线的具体参数是不同的。

3、爆堆高度  $b$  当  $\frac{W}{H} = 0.85$  时，

$\frac{b}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系如图 6。我们看不到  $\frac{b}{W}$

和  $\frac{Q}{V}$  有明显的依赖关系，可以认为，当

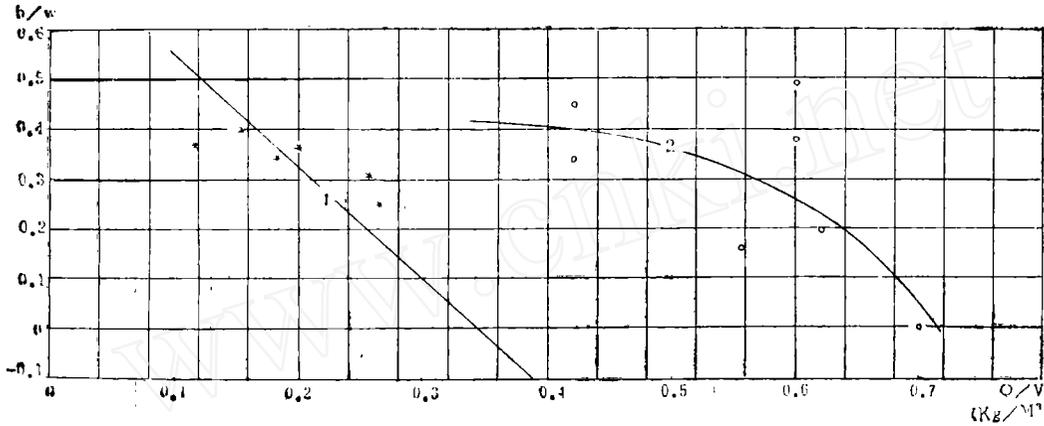


图 4  $\frac{h}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系

- 1 —  $\frac{W}{H} = 0.75$ , 2 —  $\frac{W}{H} = 0.85$
- \* —  $W = 30 \text{ c m}$ ,  $\frac{W}{H} = 0.75$ ;
- —  $W = 90 \text{ c m}$ ,  $\frac{W}{H} = 0.75$ ;
- 0 —  $W = 30 \text{ c m}$ ,  $\frac{W}{H} = 0.85$ 。

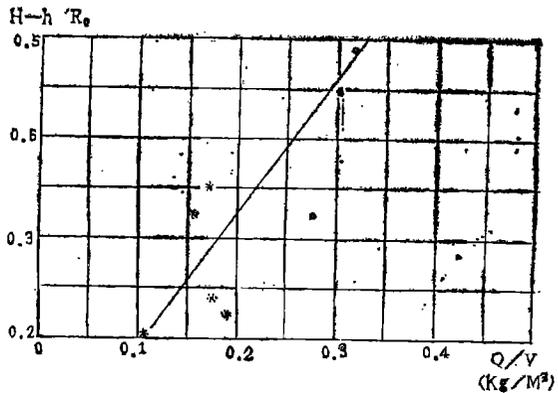


图 5  $\frac{H-h}{R_0}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系

$\frac{Q}{V}$  在 0.2 到 0.7 kg/m<sup>3</sup> 时， $\frac{b}{W}$  在 0.5 到

0.8 之间，多数点在 0.6 附近，平均值为 0.62。这一结果表明：比药量对  $h$  的影响可能不敏感，其  $h$  值约为 0.6W，或 0.5H，即堆积高度约为山高的一半。这一结果是十分重要的。

4、最大抛掷距离  $L$  不同  $W$  和  $\frac{W}{H}$  时

的  $\frac{L}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系如图 7，在这里我们看

到二个现象：一是  $\frac{L}{W}$  不只和  $\frac{W}{H}$ ， $\frac{Q}{V}$  有

图6  $\frac{b}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系,

$$\frac{W}{H} = 0.85, W = 30\text{cm}$$

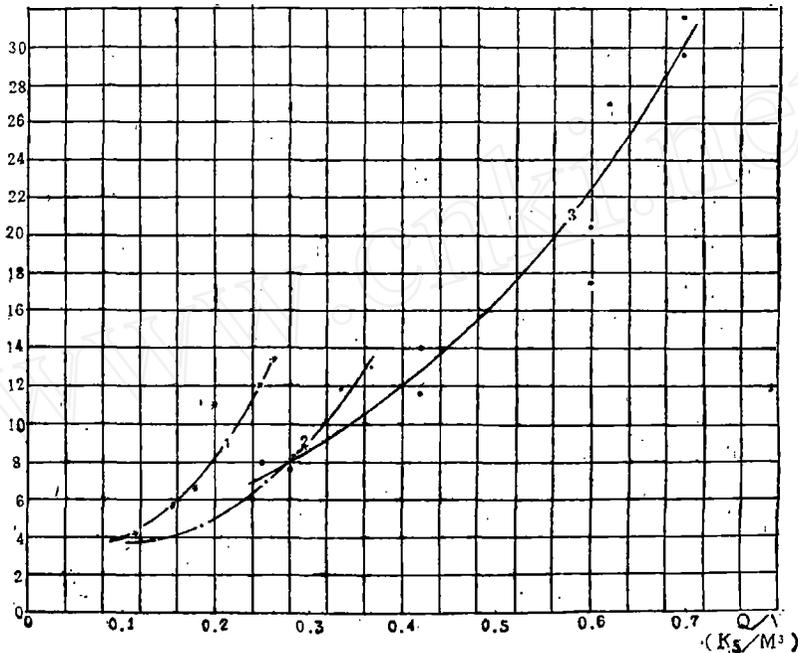
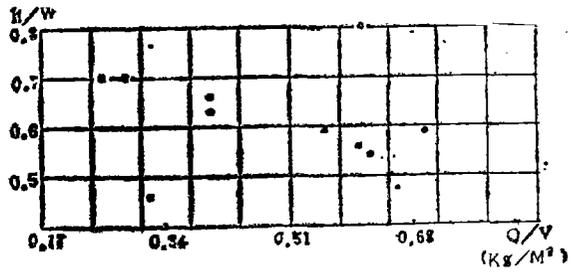


图7  $\frac{L}{W}$  和  $\frac{Q}{V}$  的关系

- 1 —  $W = 30\text{cm}, \frac{W}{H} = 0.75$
- 2 —  $W = 90\text{cm}, \frac{W}{H} = 0.75$
- 3 —  $W = 30\text{cm}, \frac{W}{H} = 0.85$

关，而且和W有关了；二是三个曲线的特征是相同的。前者是非常重要的现象，这就是几何相似律的问题，我们将在下边讨论。

这里曲线1的近似关系为：

当  $0.1 < \frac{Q}{V} < 0.25$  时，有：

$$\frac{L}{W} = 27 + 310 \left( \frac{Q}{V} \right)^{2.5} \quad (11)$$

曲线2的近似关系为：

当  $0.1 < \frac{Q}{V} < 0.4$  时，有：

$$\frac{L}{M} = 2.7 + 132 \left( \frac{Q}{V} \right)^{2.5} \quad (12)$$

而曲线3的近似关系可写成：

当  $0.2 < \frac{Q}{V} < 0.7$  时，

$$\frac{L}{W} = 2.7 + 12.4 \frac{Q}{V} + 44.2 \left( \frac{Q}{V} \right)^{2.5} \quad (13)$$

这里, 我们看到几个重要结果。

(1) 关系(11)一(13)中, 均含常数项, 且数值相同, 这表明, 当 $\frac{Q}{V}$ 较小时三个曲线是相近的。

(2) 在关系(11)和(12)中, 把 $W$ 乘到等式右端, 考虑到(11)式的 $W$ 为 $0.3\text{m}$ , (12)的 $W$ 为 $0.9\text{m}$ 。这样, 二式的 $(\frac{Q}{V})^{2.5}$ 项的系数便大致相同。这就表示, 在二种情况下,  $L$ 对 $\frac{Q}{V}$ 的关系是相同的

(3) 显然, 表达式(11)一(13)可做“个别飞石”的距离来看待。众所周知, 直到目前, 爆破的个别飞石距离问题仍是个困难的问题。因为要从实践上解决这个问题, 则需要大量的工程统计, 这是十分困难的。

关系(11)一(13)表示, 对远抛距来说,  $(\frac{Q}{V})^{2.5}$ 项起重要作用, 它和 $W$ 关系是不大的。同时, 上述关系还告诉我们, 地形坡度对 $L$ 是有影响的, 如曲线3, 在同样比药量下, 它比曲线1和2都小。因它是在较不利的条件下抛到 $L$ 的。

#### 四、综合分析

1、堆积的形成 在图7上我们看到: $\frac{W}{H}$ 相同,  $W$ 不同时曲线分开了; 而在图2和图4上, 它们是重合的。这表明: 同样是特征长度, 它们的形成机理是不同的。

我们知道, 堆积体和位置和形状是由三个过程决定的: 即鼓包运动过程, 弹道运动过程和堆积过程。鼓包运动过程对抛距的贡献是由二个因素引起的: 一是鼓包运动中介质运动的距离 $L_0$ , 它一般是几何相似的, 即 $L_0$ 正比于 $W$ 。二是形成弹道运动的初速度 $V_0$ , 而几何相似要求 $V_0$ 和 $W$ 无关。弹道运

动一般也是和 $W$ 无关的。堆积过程则控制堆积体的形状和特征尺寸有资料证明, 它是符合几何相似律的, 即特征长度和 $W$ 成比例。由于 $L_0$ 和堆积体本身的特征长度和 $W$ 同一量级, 故对远抛距来说是弹道运动起主要作用, 这时 $L$ 和 $W$ 关系不大, 故图7的曲线1和2是分开的。

如我们在坐标 $\frac{Q}{V}$ ,  $L$ 中考虑问题, 二曲线也不重合。这表明: 在 $L$ 中,  $L_0$ 和堆积体本身特征长度的贡献是不能忽略的。显然, 抛距越小它们的影响就越大。因而在小抛距时,  $L$ 应大体正比于 $W$ , 这就是关系(11)一(13)中常数项2.7的作用。由图7上我们看到: 当 $L < 5W$ 时, 三个曲线接近, 因而可以认为 $L$ 与 $W$ 有正比关系。由此可见, 在近抛距时, 体积平衡法<sup>[1]</sup>的抛距公式大体正确; 自然, 远抛距时, 弹道理论则是正确的。

对于图2和图4, 由于它们是近抛距的堆积结果, 自然, 其特征长度均和 $W$ 成比例, 因而在坐标 $\frac{Q}{V}$ ,  $\frac{D}{W}$ 和 $\frac{h}{W}$ 下, 相同 $\frac{W}{H}$ 的曲线是重合的。显然, 在同一堆积体的不同位置, 抛距和 $W$ 的关系也是不同的。

2、 $D$ 的变化特征 在图2上, 尽管二曲线特征不同, 但 $\frac{Q}{V}$ 在0.25到0.35之间是增加最快的一段, 则二者相同, 当 $\frac{Q}{V} \rightarrow 0$ 时,  $\frac{D}{W}$ 应趋向于零, 故二曲线在小 $\frac{Q}{V}$ 时的延伸方向应相同, 当 $\frac{Q}{V}$ 较大时, 曲线2表示,  $\frac{D}{W}$ 增加变慢。这是正常的, 曲线1的变化规律也应和它相同。因此, 二曲线的变化特征应大致相同, 这表明: 参数 $\frac{W}{H}$ 对 $\frac{D}{W}$ 是有影响的, 但这影响是渐变的。

3、 $b$ 和 $h$ 引起的问题 由于 $b$ 的变化

不大,而 $h$ 则随 $Q/V$ 增加而减小,甚至可到 $h/W < 0$ 。因此,当比药量取大时,将形成一个深的爆坑。这一现象对有些工程是不利的。因此,为了降低地形,又要求爆后地形较为平整,则比药量不能取大。有时,工程上为了加强岩石的破碎程度, $Q/V$ 取得较大,而爆后形成深坑,这是常见的现象。可见 $b$ 和 $h$ 的变化特征是非常重要的结果

4、双参数问题 如前述,这里是双参数问题,即一切爆后特征都和二个参数, $W/H$ 和 $Q/V$ 有关。因此,图2和图4,应当有一族曲线,不同的曲线对应不同的 $W/H$ 值。当 $W/H = 1$ 时,显然,我们便得到平地爆破的情况;因此,这里有关公式都应变成平地爆破的情况。

显然,本文的工作只是本问题中很小的

一部分;而且由于实验条件的限制,所给曲线和有关的表达式将会有一定的偏差。笔者期望得到对本工作的补充和修正!

爆破组的有关同志参加了实验工作,笔者对他们表示感谢!

### 参 考 文 献

- (1) 冯叔瑜、朱忠节、马乃耀:《大量爆破设计及施工》,人民铁道出版社,1963年版。
- (2) 《露天大爆破》,露天大爆破编写组编,冶金工业出版社,1979年版。
- (3) 王鸿渠:“公路石方综合爆破方法与多边界药量计算公式(简介)”,《土岩爆破文集》(第一辑),冶金工业出版社,1980年版。
- (4) 许连坡:“龙首山大爆破鼓包发展过程的摄影观测”,《爆破与冲击》第3卷,第3期,1983年版。



[1] 地矿部凿岩爆破新技术推广与情报交流会于1984年12月2~6日在武汉召开。地质系统、核工业部和474厂的代表共85人参加了会议。刘清荣、徐天瑞分别就“控制爆破和静态爆破”、“起爆器材的现状与发展”作了专题报告;会议对直线掏槽、光面爆破、非电导爆管和乳胶炸药等技术问题进行了交流;武汉地质学院介绍了PC-1500型电算机在掘进中的应用,并在汉建立数据库。474厂的爆破器材保险箱可单独储存或混装运输,拟在地质系统推广。

(魏伴云)

[2] 中国民爆器材学会2000年展望学术讨论会于1984年12月8~12日在昆明召开,全国十省、市的四十个院、所、学校的62名代表参加了学术会议,学术论文26篇。会议展望:今后16年,我国民爆器材将会有

更大的发展。在产品生产和科研方面,向着高安全、低成本、高质量方向发展;将会出现产品系列化、加工自动化、装药机械化、管理微机化和测试标准化等新局面。

(喻加源)

[3] 中国力学学会工程爆破专业委员会于1984年12月25日~27日在武汉召开首届爆破安全学术讨论会,会上交流了爆破安全方面的学术论文27篇。(本刊通讯员)

[4] 中国铁道学会第二届爆破学术会议于1984年8月26日~9月3日在贵阳开。除铁路系统外,部分高等院校、工厂和科研等单位100余名代表参加了会议。学术论文和技术总结26篇。

会议还专门听取了“静态爆破技术展望”、“我国爆破器材打入国际市场简况”以及高速摄影研究不同地形条件下爆坏过程”的报告。会上还介绍了铁道施工中石方爆破不干扰正常行车的实例,并放映了现场录像。

(欧阳子济)