

# 石砭峪水库定向爆破筑坝 抛掷堆积的初步分析

中国科学院力学研究所 杨人光  
黄河水利委员会 杨保东

石砭峪水库定向爆破工程,是我国近年来最大吨位的一次定向抛掷爆破,并且采用群药包布置的设计方案。爆区抛掷堆积效果超过预期的设计指标,这标志着我国定向抛掷爆破设计技术达到了一个新水平。它不仅为今后定向爆破抛掷堆积丰富了实践经验,同时也有助于揭示群药包爆破药量参数和远距离抛掷之间的内在关系,为抛掷堆积计算方法提供了一定的理论依据。

本文借石砭峪定向爆破抛掷堆积的效果,介绍一种分析抛掷计算方法。此种计算方法综合了我国近年来部份定向爆破实践经验和已有抛掷堆积计算方法。但是由于实践经验所限,加上对这方面的研究分析也刚刚开始,只能作为引玉之砖,主要试想引起爆破研究设计工作者,共同探讨,至臻完善。

## 一、爆区地形地质及爆堆宏观概况

### 1. 爆区地形地质概述:

坝区为峡谷段,河床宽70米,两岸山势高耸,相对高差为250~300米,左岸平均坡度55度,坡面较为顺直;右岸46度,坡面向河床凸起,坝轴线两岸上下游有冲沟割切,对药包布置受到一定限制,当坝高为70米时,坝顶长为200米。

爆区岩石为晚古生代片麻花岗岩,比较坚硬,平均极限抗压试验1570公斤/平方厘米,容重2.63克/立方厘米,未发现断层,裂隙比较发育,对爆破略有影响,但不起控制作用。

### 2. 原设计指标:

该工程采用一期两批爆破,左岸为主,右岸为副,总装药为1502.13吨(其中左岸1325.02吨,右岸177.11吨),爆落实方149.2万立方米,松散系数取1.35,折合松方为201.4万立方米,上坝按55%设计,有效上坝为111万立方米,平均堆高53米,马鞍位于右岸坡脚,最低点高43米,有效上坝单位耗药量为1.37公斤/立方米。当塌散边坡按1:25计算时,其坝高工程量及马鞍填方量如图1所示。

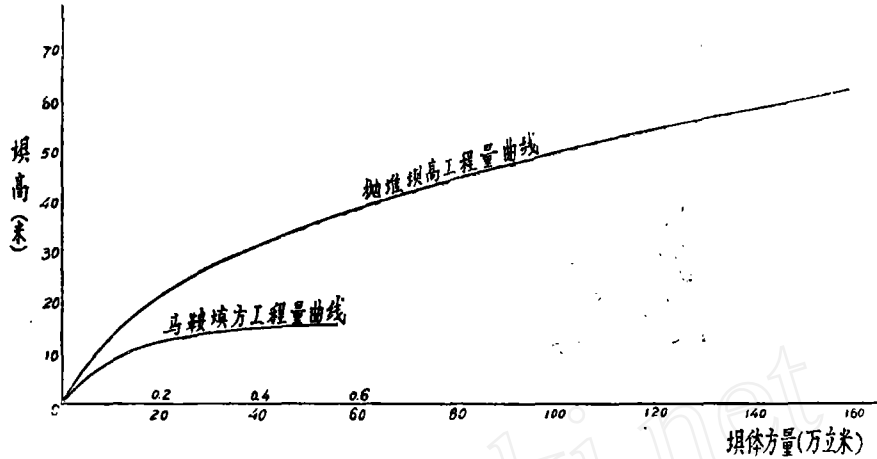


图1 抛堆坝高~工程量曲线及马鞍填方工程量曲线图

注：因河床高低不规则，取河床宽为70米时，其河底平均高程为652米。

### 3. 爆堆宏观概述：

爆后坝体有效初估堆方 136.2 万立方米，坝顶平均宽 85 米，上游坡 1:2.9 下游坡 1:2.6 平均坝高 55.5 米，马鞍点坝高 50.45 米，有效上坝单位用药量为 1.103 公斤/立方米。爆堆密度较大，坝前水头 20 米以下几乎不透水，当水头达 22 米时，坝体渗流量仅 0.1 立方米/秒，

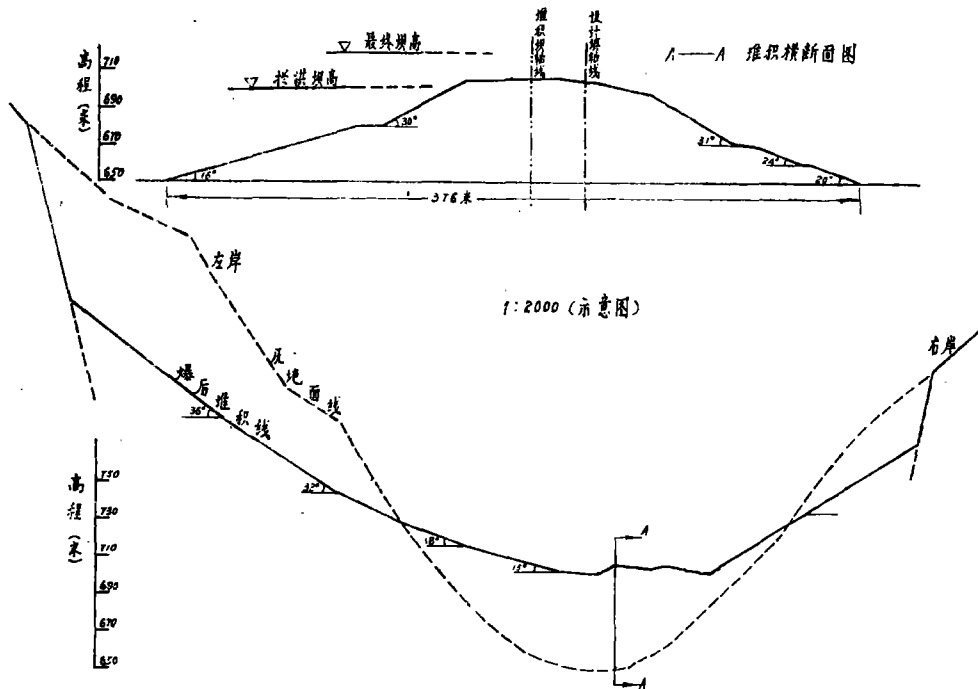


图2 堆积纵、横断面图

堆积坝轴线比设计坝轴线自左岸向上游偏转约10度，河心比原设计轴线向上游偏离约30米，因而爆堆不太集中，左前排偏向上游后排比较居中，右岸前后排都略偏向下游。根据目估和仪器初测，爆堆横断面塌散角下部较缓，上部较陡，上游塌散坡角为16—36度间有平台，下游塌散坡角为20°，24°，31°从爆堆纵断面看，右岸塌散角32°，左岸自马鞍起以15°，18°逐渐变化至36°，为一漫长的凹形塌散面，马鞍居河床的中部，因爆后坍塌、溜滑的填补，马鞍不甚显著，其爆堆纵横断面如图2所示。

## 二、群药包爆破抛掷堆积计算方法：

自南水定向爆破以来，关于抛掷堆积的计算，一般要用二种处理方法：弹道理论和体积平衡法。所谓要用弹道理论分析抛掷爆堆，是以选取爆破漏斗内的微分单元体作为弹道抛掷微团，这样不仅在数值计算上是极其繁重，同时它把握不住爆堆运动的整体规律，不易于工程爆破设计所需用。目前多以采用体积平衡法或面积平衡。诚然，体积平衡法是具有一定的实践性的，因为体积平衡本身即为限制堆积形状的条件之一。但它还必须附加上抛距经验公式（包括质心抛距，最远点抛距以及侧向坍塌散距离。）以及对上坝方量百分比的估算。这些均取决于药包布置以及工程地形条件。因此，只有一些富有实践经验的同志根据以往工程的具体实践，对特定地形地质情况下，选用适当调节系数即经验数据，是可能达到预期效果的。

实际上，弹道理论和体积平衡，不能截然分开的，前者是解决堆积距离，是作为计算工具而引进，后者是限制堆积形状，是同一个问题的两个方面。本文所提出抛掷堆积计算方法就是把两者有机地结合在一起，即抛掷漏斗质心整体系统运动的弹道计算，着重考察爆破抛掷漏斗的整体抛掷初速度，不是考察爆破漏斗内微团单元抛掷运动。这样乍看来似乎是粗糙的，但是它却基本上反映整个运飞的规律。因为微团单元在整个运行过程中，由于彼此发生无规则的撞击，其运动速度处于相互传递，单体抛掷初速度便失去了意义，它不能决定单体抛掷运行的轨迹。但是对抛掷体整个质心运行轨迹，当不考虑空气阻力时，是不因运动系统内部动量交换而改变的，整个运行轨迹只取决于抛掷体质心初始抛掷速度及爆破工点地形条件。

因此，从现有工程爆破实践及对群药包爆破抛掷堆积的分析可归纳为如下几个要点。

- (一) 药包平面的法向与垂直方向的夹角作为抛掷角  $\varphi$ 。
- (二) 鼓包顶点的最大抛掷速度为抛掷体前沿抛掷速度。
- (三) 抛掷体运行过程中，保持动量守恒。堆积形状为线性对称分布如图（3）所示

横断面为梯形分布，上底宽度为  $\sum_i a_i$ ， $a$  是群药包间距，下底长为  $2S_b + \sum_i a_i$ ， $S_b$  是侧向抛散距离。

- (四) 抛掷漏斗的整个运动规律。借用弹道基本方程，质心抛距应为：

$$S_0 = K_n / \sin 2\varphi \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{2h}{K_n \cos^2 \varphi}} \right] \quad (1)$$

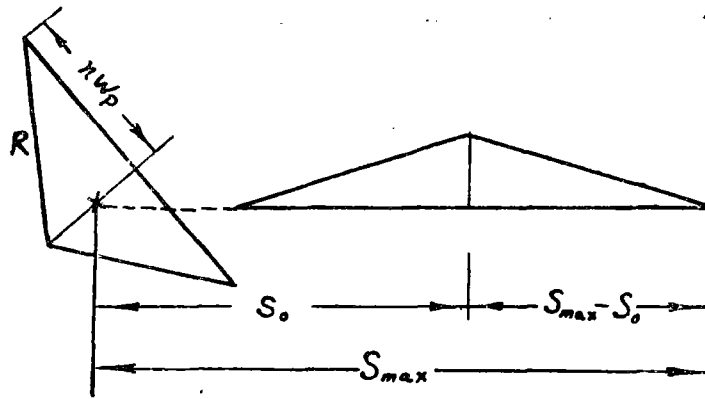


图 (3) 抛掷漏斗抛掷堆积的纵断面分布图

式中:  $S_0$  为抛掷漏斗质心抛距 (米)

$\varphi$  抛掷角度

$h$  爆堆抛落终点与抛掷漏斗的质心高程差 (米)

$K_n$  为水平抛距 (米)

$$K_{nc} = \frac{V_c^2}{g}$$

对于前沿抛距  $S_{max}$  相应的水平抛距取为  $K_{mn} \approx \frac{V_m^2}{g}$  具体计算可查图 4。

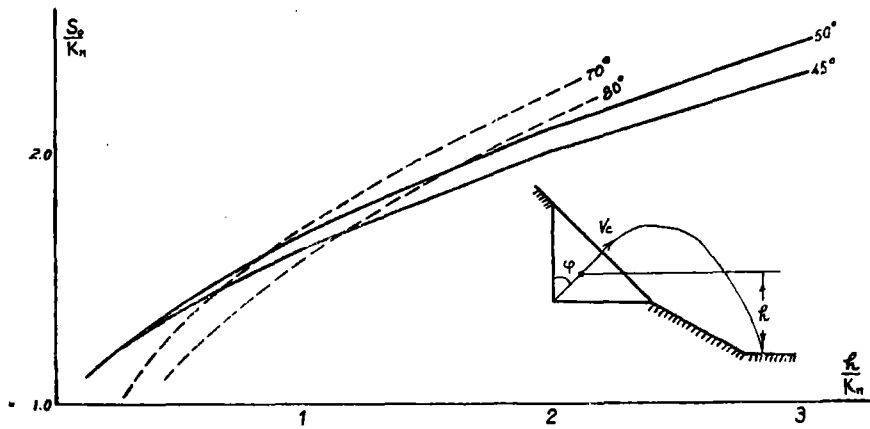


图 4 弹道抛距计算曲线

这里抛掷漏斗的质心速度和前沿速度均可归纳如下形式:

$$V_c = K_c \left( \frac{Q^{1/3}}{W_p} \right)^2$$

$$V_m = K_m \left( \frac{Q^{1/3}}{W_p} \right)^2$$

其中  $K_c$ 、 $K_m$  分别为质心速度系数和前沿速度系数，当药包间距  $a \approx nW_p$  时。它取决于药包相互作用个数如图 5。

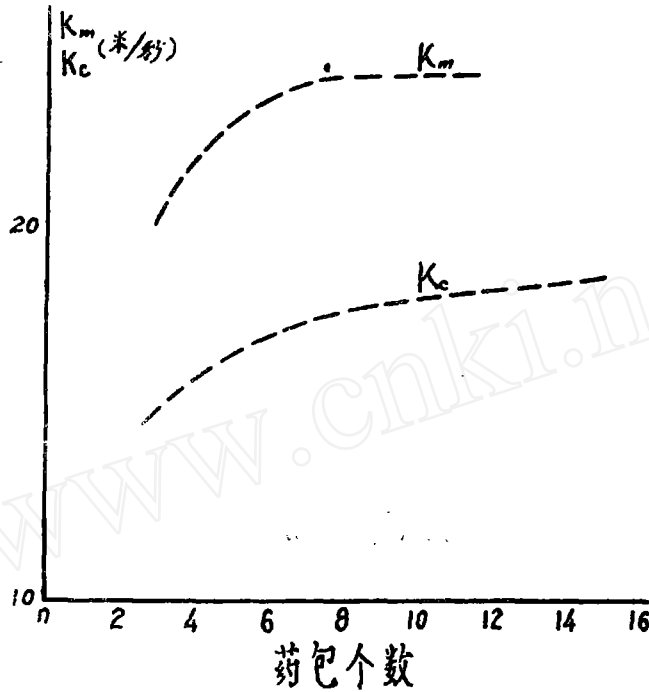


图 5 药包相互作用个数与抛掷速度系数的关系图

对于边缘药包一侧横向抛散速度为纵向抛掷  $V_c$  的  $\frac{1}{\sqrt{3}}$ ，根据弹道公式横向抛散时间为：

$$t_p = \frac{V_c \cos \varphi}{g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2Hg}{V_c^2 \cos^2 \varphi}} \right)$$

则抛散距离：

$$\begin{aligned} S_b &= \frac{V_c^2 \cos \varphi}{\sqrt{3} g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2Hg}{V_c^2 \cos^2 \varphi}} \right) \\ &= \frac{S_0}{\sqrt{3} \sin \varphi} \end{aligned}$$

#### (五) 抛掷体堆积高度的估算：

双药包或双列群药包爆破，当边缘药包一侧抛掷漏斗质心抛散距离  $S_b > nW_p$  时，堆积高度随横向抛散距离的增加而降低。根据通过抛掷体质心的横断面的形状近似梯形分布如图 6 所示

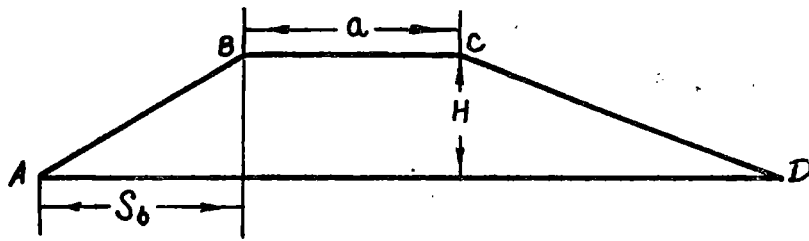


图6 质心横断面示意图

ABCD为底面积，前部堆积体应等于抛掷漏斗体积 $\frac{1}{2}$ ，则体积平衡方程式为：

$$(a + S_b)H(S_{\max} - S_0) = A_c \eta (a + nW_p)$$

$$H = \frac{A_c \eta}{S_m - S_0} \left\{ \frac{1 + \frac{a}{nW_p}}{\frac{S_b}{nW_p} + \frac{a}{nW_p}} \right\}$$

其中：

$$S_b = \frac{S_0}{\sqrt{3} \sin \varphi}$$

$\eta$  为爆破堆积的松散系数

$A_c$  为通过药包中心或群药包质心的抛掷漏斗的面积。

令

$$\xi = \frac{1 + \frac{a}{nW_p}}{\frac{S_b}{nW_p} + \frac{a}{nW_p}}$$

为横向坍塌效应系数。

取斜坡爆破  $a = nW_p$  时，横向坍塌系数随着横向坍塌距离  $S_b$  增加而减少如图 (7)

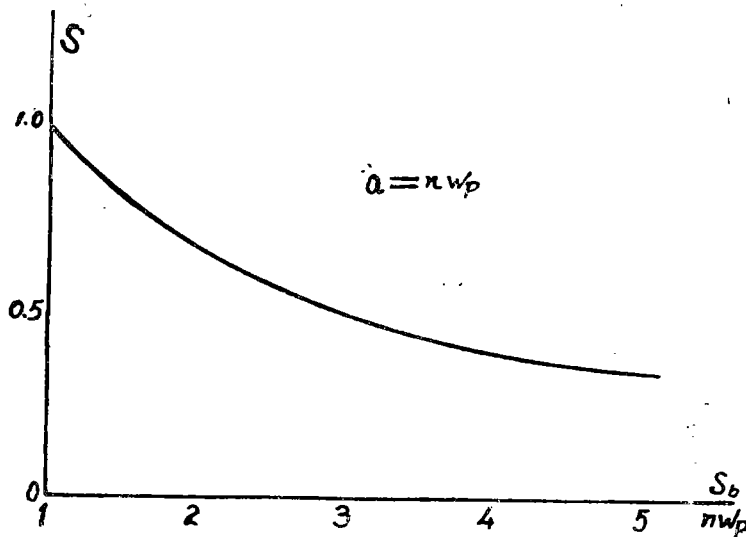


图7 横向坍塌系数和 $\frac{S_b}{nW_p}$ 的关系图

后排药包在挟制情况下堆积高度应做如下的修正。这时坍塌距离取决于前后排的开口比。坍塌距离应正比于质心抛距，即为：

$$S_p = \frac{b_1}{a_1} S_0$$

其中  $b_1$ 、 $a_1$  如图 8 所示。

则体积平衡方程改为下面形式

$$(A_c \eta a + A_c \eta b_1) = (S_b + a) H_2 (S_{nwx} - S_0)$$

$$H_2 = \frac{A_c \eta}{S_{max} - S_0} \left\{ \frac{1 + \frac{a}{b_1}}{\frac{S_b}{b_1} + \frac{a}{b_1}} \right\}$$

这里其他符号均与上述相同。

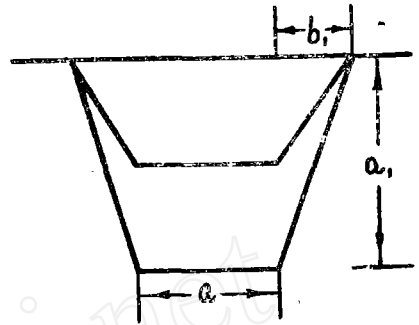


图 8 过后排沿抛掷抵抗线方向剖面图

#### (六) 坍塌方量堆积：

斜坡爆破爆落方量分为抛掷方量 ( $n^2 W_p^3$ ) 和坍塌方量  $\frac{n^2}{2} W_p^3 [\sqrt{\beta} - 1]^2$  为斜坡爆破上坡线破坏系数如图 9 所示。

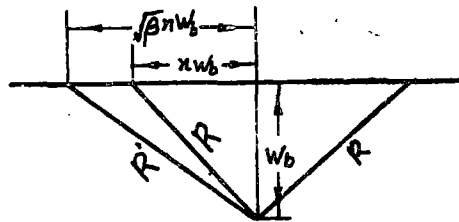


图 9 爆破抛掷漏斗和坍塌漏斗纵断面图

对于陡坡峡谷地形，除了抛掷漏斗方量上坝以外，还必须考虑坍塌方量(或滑坡)上坝。爆破坍塌安息角小于自然堆面的安息角。一般取为  $32^\circ$  (度) 左右。依此采用面积平衡的原理，通过几何做图叠加上坝。

#### (七) 斜坡群药包爆破上坝率计算：

通过坝轴线堆积断面即可计算残留于爆破漏斗方量。则上坝率应为：

$$t = \frac{\text{爆落松方} - \text{残留松方}}{\text{爆落松方}} \%$$

### 三、抛掷堆和具体计算成果：

根据上述几个要点，借石砭峪水库定向爆破筑坝实际药包布置形式及药量参数，具体计算步骤如下：

以左岸主爆区前排药包为算例。前排药包由八个顺斜坡竖向两列布置，药包中心高程差悬殊甚大，故分为二个抛掷漏斗正体系统运动，I-1~I-4 最小抵抗线  $W_p$  均为 32 米，做

为正体抛掷。

药包平面的法向与垂直夹角为抛掷角  $\varphi = 50^\circ$  高程差  $H = 85$  米抛掷体质心速度，仅为相邻的六个药包相互作用结果。查图 4，抛掷体质心抛掷速度系数  $K_c = 17$  米/秒。前沿速度系数  $K_m = 23.4$  米/秒

质心抛距计算：

$$\left(\frac{Q^{1/3}}{W_p}\right)^4 = 3.7 \quad K_{nc} = \frac{17^2}{9.8} \left(\frac{Q^{1/3}}{W_p}\right)^4 = 109 \text{米}$$

$$\frac{H}{K_{nc}} = \frac{85}{109} = 0.78$$

查图 (5)

$$\frac{S_0}{K_n} = 1.55$$

$$S_0 = 1.55 K_n \approx 168$$

前沿抛距

$$K_{mn} = 207$$

$$\frac{H}{K_{nm}} = \frac{60}{207} = 0.29$$

查图 (5)

$$\frac{S_{max}}{K_{nm}} = 1.25 \quad S_{max} = 260$$

$$S_b = \frac{S_0}{\sqrt{3} \sin \varphi} = \frac{168}{1.73 \sin 50} = 127$$

$$\frac{S_b}{n W_p} = 3.17 \quad \text{查图 7} \quad \xi = 0.47$$

计算堆积高度  $H_1$

通过坝轴线的纵断面为准， $A_c = 2550$  米<sup>2</sup>，松散系数  $\eta = 1.3$

$$H_1 = \frac{A_c \eta}{S_{max} - S_0} \xi = \frac{2550 \times 1.3}{92} \times 0.47 = 17 \text{米}$$

但是由于 I-1~I-4 药包平面与坝轴偏上游  $12^\circ$  则堆积体质心偏上游近 35 米，使得在坝轴线上的实际堆高  $H_1 = 15$  米见图 (10)

其余抛掷体抛掷计算见成果表 (1)

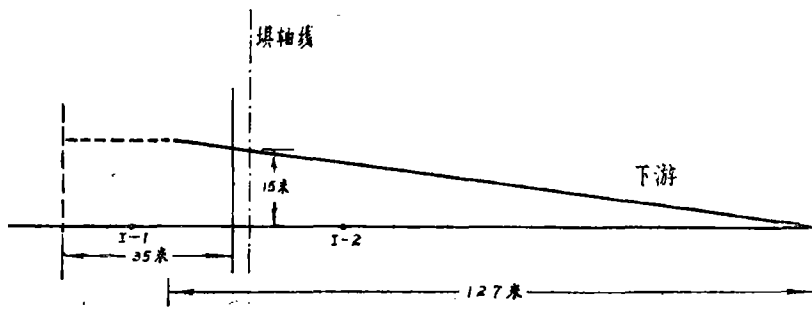


图10 过质心抛距横向断面图



表 (1)

抛掷堆积计算成果表

岸别	药包编号	抛掷高程差 h (米)	抛掷角 $\varphi$ (度)	质心及前沿抛掷系数 $K_c, K_m$	$\frac{1}{3} \left( \frac{Q}{W_p} \right)^4$	$K_{nc}$ $K_{nm}$	H $K_n$	$S_0$ $S_{max}$	$S_{max} - S_0$	$S_b$	$\frac{S_b}{\pi W_p}$	$\xi$	抛掷漏斗的面积 (平方米)	堆积高度 (H)	注
左		85	50	17	3.7	109	0.78	168							
	I-1								92	127	3.17	0.47	2550	17	
	I-4	60	50	23.4	3.7	207	0.29	260							
	I-5	128	50	17	3.7	109	1.17	190							
岸	I-8								96	145	4.2	0.32	2000	8.7	
		100	50	23.4	3.7	207	0.48	286							
	I-1	100	55	15	5.9	132	0.76	204							
	I-3								116	83		0.63	2960	20.9	
右		50	55	22	5.9	290	0.172	320							
	I-1	80	80	16	2.0	52	1.54	98							
	I-4								45	57.5	3.2	0.48	490	6.7	
		80	80	22	2.0	99	0.81	143							
岸	I-1	60	70	16	2.5	57	1.04	97							
	I-3								61	60	2.2	0.65	1560	16.0	
		60	70	22	2.5	102	0.78	158							

主爆区的坍塌方量（包括压缩圈内的松动方）。根据爆破漏斗内爆破安息角取为 $32^\circ$ ，大面积滑坡上坝其倾角小于 $32^\circ$ 一般取为 $18^\circ$ 左右，采用面积平衡计算结果列入表(2)中。

坍塌方量面积平衡计算表

表(2)

爆区位置	坍塌 米 <sup>2</sup>	残留于爆破 漏斗 米 <sup>2</sup>	滑坡上坝 米 <sup>2</sup>	抛掷 米 <sup>2</sup>	总上坝 米 <sup>2</sup>	总爆落 米 <sup>2</sup>	上坝率 %
左岸	6155	4600	1550	7510	9060	13660	66.5
右岸					2080	3460	60.0

**堆积高度及上坝方量计算:**

从抛掷堆积成果表(1)中的各个抛掷漏斗正体上坝高度及塌散距离 $S_b$ 利用作图法叠加。在坝轴线纵断及通过A—A横断面如图(10)(11)所示，堆积马鞍点略偏河谷的左边其高度 $H=49.0$ 米，堆积坝体底宽近350米。

爆落方量近似估算为

$$\nabla = Aca + Ac \frac{1}{2} (R_{上} + R_{下})$$

这里 $Ac$ 为通过坝轴线的断面积， $a$ 为药包间距， $R_{上}$ ， $R_{下}$ 为侧向破裂线上，下游的平均宽度。计算见表(3)

爆落方量与上坝方量计算

表(3)

爆区	爆破坝轴线 断面积 $Ac$ (米 <sup>2</sup> )	药包间距 $a$ (米)	$\frac{1}{2} (R_{下} + R_{上})$ (米)	$\nabla$ 实 (万方)	$\nabla$ 松 (万方)	上坝方量 (万方)
左岸	13660	48	45	127.0	166	110.0
右岸	3460	20	45	22.5	29.3	17.6
总计						127.6

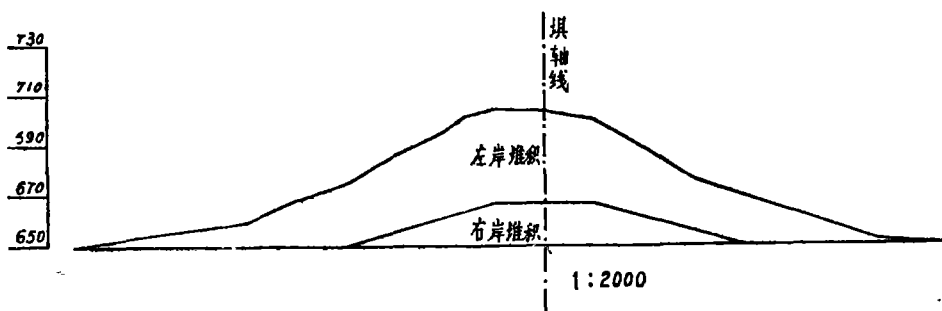


图11 A—A堆积横断面图

上述是就原设计群药包布置及药量参数的选定，验算群药包爆破抛掷堆积。现将验算综合指标与实爆初估堆积指标列入表（4）

计算值与实测值对比表

表（4）

堆 积 指 标	验 算 值	实 测 值	备 注
爆落实方（万立方米）	149.5	149.2	按原设计估算
有效上坝（万立方） （松方）	127.6	136.2	验算值按原设计漏斗宽度估算
马鞍点高度（米）	49.0	50.45	
坝体底宽（米）	350	406.0	
下游坡比	1:2.8	1:2.6	坝高以50米计
上游坡比	1:3.0	1:2.9	
坝顶宽（米）	55	85	

从对比表（4）中，验算的指标均为偏小，其原因是多方面的。例如在验证时没有考虑群药包爆破对爆落的最大漏斗宽度影响，以及本爆破工点特定地形地质特点，即上游鳖盖和下游岸边三角体的大量石方坍塌上坝，这是一方面。

另一方面，就是群药包抛掷堆和计算本身准确性上，还待于进一步完善。

#### 四 几 点 看 法

（1）石砭峪水库定向爆破筑坝抛掷堆积分析初步结果与实际堆积相比是较为接近。见表（4）所示。近而验证，群药包抛掷漏斗正体系统运动弹道计算，简称为群药包抛掷堆积弹道计算，是反映正体系统运动过程的普遍力学规律的：

质量守恒即为体积平衡。

动量守恒即为堆积形状是对称分布。

能量守恒即为弹道方程的抛距计算。

（2）抛掷速度与药量参数之间的关系即为：

$$V_{cm} = K_{cm} \left( \frac{Q^{1/3}}{W_p} \right)^2$$

$$= K_{cm} [Kf(n)]^{2/3}$$

显然它与爆破抵抗线  $W_p$  是无关的。在给定的药包相互作用个数之间，为了保持其抛掷速度的均匀性，务必选定相同的抛掷指数  $n$  值。则抛掷速度仅与爆破用药量  $K$  与抛掷作用指数函数  $f(n)$  的乘积有关。不受特定爆破地形的影响。因此它遵守几何相似律。

(3) 由于群药包之间相互作用加强,使得抛掷速度增大,抛掷有效能量利用率提高。例如左岸前排质心抛掷速度 $V_c = 32$ 米/秒。

抛掷有效能量利用率:

$$\zeta = \frac{\frac{1}{2} P_R n^2 W_p^3 V_c^2}{K f(n) W_p^3 U}$$

这里:  $U$  为 1 公斤炸药的所释放出能量

$U = 4 \times 10^6$  米<sup>2</sup>/秒<sup>2</sup>代入计算得

$\zeta = 19.5\%$

它要比单药包爆破 $\zeta = 5 - 7\%$ ,大了三倍左右。因此群药包爆破设计方案,是提高炸药能量利用率的重要途径,使得远距离定向抛掷堆积从可能性变为现实性。为我国爆破技术向前推进一步。

(4) 但是,群药包仍然是单个药包的组合,为此不可避免保留集中药包爆破所固有特征。即爆花分散,横向抛散距离远,它正比于质心抛距,使得坝体坡比较缓,均在 $1:3$ 左右,这与土石方工程施工所要求合理集中性有较大的差距。可以断言,集中药包爆破内在矛盾必为爆破新技术的发展开辟道路。