

爆炸技术 新进展

钟冬望 马建军 段卫东 熊祖钊 著

B A O Z H A
J I S H U
X I N J I N Z H A N

湖北科学技术出版社
Hubei Science & Technology Press

前 言

随着国民经济的迅猛发展,爆炸技术在我国现代化建设中起着日益重要的作用,爆炸技术的研究工作取得了可喜的进展,广大科技工作者在实践中取得了许多宝贵的经验,新理论、新技术、新方法、新手段、新工艺随之应运而生。本书归纳了作者近年来从事爆炸技术理论及应用研究的成果。包括工程爆破的相似律与模型实验;露天台阶爆破的优化理论与优化设计;水孔预裂爆破机理及应用研究;岩石动态断裂数值模拟及应用研究;爆破振动峰值的模糊神经网络预测技术研究;井下侧向爆破抛掷出矿;城市综合控制爆破技术;爆炸焊接理论及应用;炸药爆轰合成纳米金刚石的理论及应用;基于冲击波效应的爆炸威力评价方法;近地面分散爆炸地震波效应及其威力评价;云雾爆轰压力场的数值模拟等内容。

我国爆炸技术研究已有多年历史,虽已取得了重要进展,但仍有大量问题需要深入研究,现有的一些成果还较“粗糙”,将伴随着学科的发展而不断完善。本书的目的在于使我们对爆炸技术本身系统性、特殊性、科学性的认识更加深化,促使其向科学化、控制化的方向发展。

本书可供从事爆炸理论及其工程应用研究的科研人员、研究生,以及高等院校相关专业的师生参考,也可供冶金、煤炭、铁路、交通、兵器和水利部门的有关专业的师生参考,也可供冶金、煤炭、铁路、交通、兵器和水利部门的有关工程技术人员使用。

本书第3、4、5章由钟冬望撰写,第1、2、6、7章由马建军撰写,第8、9章由段卫东撰写,第10、11、12章由熊祖钊撰写。

由于作者水平有限,在写作过程中由多位作者分工执笔完成,虽然最后经过统一加工修正,但仍不免挂一漏万,书中的错误和不妥在所难免,恳请读者批评指正。

钟冬望

2002年8月 武汉

目 录

1	工程爆破的相似律与模型实验	(1)
1.1	量纲分析与 π 定理	(1)
1.2	爆破模拟相似律	(4)
1.3	水压爆破的相似律	(5)
1.4	井下深孔爆破模拟的模型律	(7)
1.5	爆破模型模拟实验实例	(9)
	参考文献	(15)
2	露天台阶爆破的优化理论与优化设计	(16)
2.1	露天矿台阶爆破块度计算模型	(16)
2.2	基于统计规律的爆破优化实用模型	(24)
2.3	遗传算法在爆破优化中的应用	(29)
	参考文献	(32)
3	水孔预裂爆破机理研究	(33)
3.1	预裂爆破机理研究的发展综述	(33)
3.2	水孔预裂爆破的爆炸载荷与准静态应力场	(35)
3.3	水孔预裂爆破的损伤断裂成缝机理	(42)
3.4	预裂爆破减震效果分析	(46)
3.5	临近高陡边坡水孔预裂爆破工程应用	(50)
	参考文献	(56)
4	岩石动态断裂数值模拟及其应用研究	(58)
4.1	引言	(58)
4.2	数值模拟的基本原理	(59)
4.3	岩石预裂爆破过程的数值模拟	(63)
4.4	小结	(70)
	参考文献	(70)
5	爆破振动峰值的模糊神经网络预测技术研究	(71)
5.1	模糊神经网络拓扑结构	(71)
5.2	神经网络输入参数的优选	(72)
5.3	爆破振动峰值预测模糊神经网络	(74)
5.4	模糊神经网络预测模型的工程应用	(76)
	参考文献	(79)
6	井下侧向爆破抛掷出矿	(80)
6.1	问题的提出	(80)
6.2	侧向爆破抛掷出矿的原理与技术设计	(80)

6.3	矿岩侧向爆破抛掷运动的力学模型	(82)
6.4	工程应用实例	(85)
	参考文献	(87)
7	城市综合控制爆破技术	(88)
7.1	机械与爆破在建筑物控制拆除中的联合作业	(88)
7.2	城市药壶爆破的控制技术	(93)
7.3	导爆管起爆网路设计及其可靠性分析	(99)
	参考文献	(105)
8	爆炸焊接理论及应用	(106)
8.1	概 论	(106)
8.2	爆炸驱动下飞板运动速度的实验研究	(109)
8.3	爆炸驱动下飞板运动速度的理论计算公式	(119)
8.4	滑移爆轰作用下飞板应力和运动的数值模拟	(123)
8.5	爆炸焊接中射流及边界效应问题的理论探讨	(129)
8.6	爆炸焊接的界面形状及金相组织	(139)
	参考文献	(145)
9	炸药爆轰合成纳米金刚石的理论及应用	(148)
9.1	概 论	(148)
9.2	爆轰法合成 UFD 的机理	(149)
9.3	爆轰法合成 UFD 的工艺	(152)
9.4	UFD 的特性	(155)
9.5	UFD 的应用	(159)
	参考文献	(160)
10	基于冲击波效应的爆炸威力评价方法	(162)
10.1	分散性爆炸及其威力评价方法	(162)
10.2	冲击波毁伤准则	(166)
10.3	爆炸荷载的能量解析法	(168)
10.4	爆炸压力场的测试方法	(171)
10.5	分散性爆炸 TNT 当量计算方法	(180)
	参考文献	(182)
11	近地面分散爆炸地震波效应及其威力评价	(184)
11.1	FAE 爆炸地震效应的特征	(184)
11.2	近地面分散爆炸地震波的动力学分析	(188)
11.3	基于爆炸地震效应的 FAE 威力评价方法探讨	(192)
	参考文献	(196)
12	云雾爆轰压力场的数值模拟	(197)
12.1	数值模型	(197)
12.2	爆炸压力场影响因素分析	(198)
	参考文献	(211)

1 工程爆破的相似律与模型实验

在工程爆破中为了验证理论的正确、探索新的技术方法,常常需要做各种模型模拟实验。现场 1:1 的模拟实验往往耗费大,条件受限制,可操作性差,难以实现,因此常常需要进行一些小型模型模拟实验来代替实际的现场爆破。要进行模型模拟实验必须以量纲分析和相似理论为指导,才能正确地提出实验方案和处理实验数据,才能使实验能真实模拟实际的物理现象,使这些小比例的模型试验能真实地反映全尺寸原型的实际爆破情况,并把实验数据能应用到没有直接做过实验的场合。

1.1 量纲分析与 π 定理

量纲分析是解决工程技术问题的重要手段。运用量纲分析往往能在多种因素影响的下,分辨出影响因素的主次,使问题得到合理的简化。同时量纲分析是应用 π 定理,建立相似律的基本方法。相似律既是设计模型试验的理论依据,又是整理试验数据,将试验结果应用于工程实际所必须遵循的原则。

1.1.1 单位和量纲

研究一种物理现象时,必然涉及各种物理量,如面积、速度、长度、压力等。物理量由两部分组成,一是它的数值,二是它的单位。从理论上说,单位是可以任意选取的,一旦单位选定后,物理量的大小就通过与所选的单位作比较,得一倍数而被完全确定。如果改变度量单位。那么物理量的大小也要改变。

各物理量之间往往存在着一定的联系,并不需要对每个物理量都选定一个度量单位,常常是在某些物理量的度量单位选定后,其他物理量的单位就可以用这些选定单位来表示。前者称为基本量,所采用的度量单位称为基本单位或原始单位。后者称为导出量,是根据物理定律或定义来确定的,其度量单位依赖基本单位而得到,称为导出单位或派生单位。如取长度为基本量,面积就是导出量;若取长度和时间为基本量,速度单位可以从长度和时间单位导出。原则上说,基本量的选取是任意的,如果选取面积和速度为基本量,长度和时间就可看成是导出量。

通常确定三个量建立基本度量单位就能满足工程要求。我国目前法定单位制是国际单位制(SI),它取长度(L)、时间(T)、质量(M)三个量为基本量,称作 L-T-M 单位系族。有时基本量也需要多于三个,如研究热效应力学现象时,常常引入温度 Θ ,这时基本量就变成四个,称作 L-T-M- Θ 单位系族。在(SI)单位制中,质量单位为千克(kg),长度单位为米(m),时间单位为秒(s)。

导出量的量度单位对基本量度单位的依赖关系可以表示成公式的形式。用基本量来表示导出量的表达式称为量纲,它是反映导出量物理本质的抽象量。在 L-T-M 单位系族中,长度(L)、时间(T)、质量(M)为基本量,其他物理量可以用 $L^a M^b T^c$ 的形式来表达,称为该物理量的量纲,这种表达式称为量纲公式。量纲,只有在统一单位制中讨论才有意义,因为在不同的单位制中,量纲具有不同的形式。某个物理量 α 的量纲用符号 $[\alpha]$ 来表示。基本量的量纲定义

为: [长度] = L, [时间] = T, [质量] = M。因此任一物理量 a 的量纲可以表示成基本量的量纲积:

$$[a] = L^\alpha M^\beta T^\gamma \quad (1-1)$$

式中, L、M、T 是基本量(长度, 质量, 时间)的量纲, α, β, γ 为量纲指数。

工程爆破中一些常见的物理量的量纲可以在有关书中查到。

1.1.2 量纲独立与量纲量

在所讨论的物理量之间, 如果某些物理量的量纲公式, 能由其他量的量纲公式所表示, 则这些量叫做量纲相关的量, 反之, 则称为量纲独立的量。例如, 长度 L、速度 LT^{-1} 和能量 ML^2T^{-2} , 这三个量的量纲彼此不能相互表达, 因而它们彼此间是量纲独立的。长度 L、速度 LT^{-1} 和加速度 LT^{-2} , 这三个量任意一个量的量纲可由另外两个量的量纲经过适当的组合得到, 因此它们彼此是量纲相关的。独立量纲量与基本量量纲不同, 基本量取决于单位制的选择, 当单位制选定后, 基本量也就确定了。在 SI 制中, 基本量的量纲就是 L、T、M 三个。独立量纲量则不然, 对于不同的具体问题、不同的物理量组合, 可以有不同的结果和选择。

在一个工程问题中, 量纲独立量的数目 k 不超过基本量的数目 m , 即 $k \leq m$ 。因此在 SI 制条件下, 力学问题中具有量纲独立的量一般只有三个, 最多不超过四个(引入温度 Θ 基本量)。

在一个确定的单位制中, 可以用改变单位的倍数来互相转换, 并组成一个单位系族。在 L-T-M 单位系族中, “厘米, 克, 秒”单位组与“米, 千克, 秒”单位组属于同一单位系族。若一个物理量在某一确定的单位系族中, 用任何一个单位组的单位来度量, 其数值大小都不改变, 则称该物理量为无量纲量, 其量纲指数等于零。如果一个物理量的数值随着某一单位系族中单位组的改变而改变, 则称该物理量为有量纲量。因此, 有量纲量和无量纲量是相对的, 是针对某一单位系族而言的。有些量, 对某一单位系族是无量纲的量, 但对另一单位系族可以变为有量纲量, 反之亦然。如角度, 若用弧度来表示它, 则是无量纲量, 如果不用弧度, 而用某一单位角度来度量它, 这时同一角度的数值将随着单位角度选择的大小不同而不同。在这个增加了以角度为度量单位的系族中, 角度变成了有量纲量。

1.1.3 量纲分析法

由于量纲反映了物理量的物理本质, 因此只有量纲相同的物理量才能相加、相减和比较大小。当然也只有量纲相同的物理量才可能相等。对于一个正确的物理关系式, 其中的各项必须属于同一量纲, 在等式或不等式的两边, 量纲应该相同, 这就是量纲一致原理。例如: 描述一物理现象关系式的量纲可表示为:

$$L^{\alpha_1} M^{\beta_1} T^{\gamma_1} = L^{\alpha_2} M^{\beta_2} T^{\gamma_2}$$

若关系式成立, 根据量纲一致原理必有:

$$\alpha_1 = \alpha_2, \quad \beta_1 = \beta_2, \quad \gamma_1 = \gamma_2$$

若量纲指数不能分别对应相等, 则关系式不成立。因此, 这一原理可以用来检验理论公式的正确与否, 还可以用来确定经验公式中系数的量纲。

量纲分析法就是用量纲一致的原理来研究物理量之间关系的一种方法。如在某个问题中, 物理量 a 依赖于另一些独立物理量 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_i$, 可以根据量纲一致的原理定出 a 与诸 a_i 的关系式。

下面用例题来说明量纲分析法及其步骤。

[例] 求石头从一定高度自由落下所需要的时间。

下面用量纲分析的方法来讨论这个问题。与该问题有关的物理量及量纲是:

石头的质量—— m , $[m] = M$;

下落高度—— h , $[h] = L$;

重力加速度—— g , $[g] = LT^{-2}$

下落总时间—— t , $[t] = T$

显然, t 是 m 、 g 、 h 的函数, 其关系式可假定为:

$$t = km^{\alpha}g^{\beta}h^{\gamma} \quad (1-2)$$

式中, k 为待定系数。将各量的量纲代入得:

$$T = (M)^{\alpha}(LT^{-2})^{\beta}(L)^{\gamma}$$

根据最纲一致原则得:

$$\alpha = 0, \quad -2\beta = 1, \quad \beta + \gamma = 0$$

所以

$$\beta = -\frac{1}{2}, \quad \gamma = \frac{1}{2}$$

代入(1-2)式得:

$$t = k\sqrt{\frac{h}{g}} \quad (1-3)$$

可见, 按量纲分析法得到的(1-3)式, 把原来的三个自变量缩减成一个, 同时该式表明, 物体自由落下时间与质量无关, 这使问题得到了大大的简化。显然只需要进行一次实验就能确定 K 值, 使问题得到确切的解。因此采用量纲分析法求解问题, 虽然不能得到物理量之间具体的函数形式, 但可以一开始就能减少变量的数目, 使问题得以简化。问题会简化到何种程度, 这需要了解 π 定理。

1.1.4 π 定理

设在一物理系统中, 物理量 a 是已知独立物理量 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 的函数:

$$a = f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \quad (1-4)$$

式中, $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ 称为主定参量, 它们可以是变量, 也可以是常数, a 是待定参量。假定前 k 个量是具有量纲独立的量, 称之为基本变量。则其他的量 $a, a_{k+1}, \dots, a_n$ 的量纲可以借助于基本变量的量纲表示出来。这时, 上式可以化为用 $(n+1) - k$ 个无量纲组合变量表示的关系式, 即:

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-k}) \quad (1-5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{a}{a_1^{m_1} a_2^{m_2} \dots a_k^{m_k}} \\ \pi_1 &= \frac{a_{(k+1)}}{a_1^{p_1} a_2^{p_2} \dots a_k^{p_k}} \\ &\dots\dots\dots \\ \pi_{n-k} &= \frac{a_n}{a_1^{q_1} a_2^{q_2} \dots a_k^{q_k}} \end{aligned} \quad (1-6)$$

与(1-4)式相比, (1-5)式相当于单位制改变, 即采用了一种相对量制。根据表示物理规律的函数关系与单位制的选择无关的物理性质, 两式中的函数形式 f 应相同, 即两个关系式等效(证明略)。

由此可见, 通过改变基本变量的单位, 可把 $(n+1)$ 个有量纲量之间的关系转化为

$(n+1) - k$ 个无量纲量之间的关系,从而使变量的数目减少了 k 个,而函数形式却保持不变,这一结论就是著名的 π 定理。

1.1.5 复杂问题量纲分析的基本步骤

如果所研究的物理规律,是要求出主定参量(自变量) $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$,与待定参量(因变量) $b_1, b_2, b_3, \dots, b_p$ 之间的关系式:

$$\begin{aligned} b_1 &= f_1(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \\ b_2 &= f_2(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \\ &\dots\dots\dots \\ b_r &= f_r(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n) \end{aligned} \quad (1-7)$$

量纲分析可采取以下步骤:

(1) 选择描述物理现象的主定参量和待定参量,不管主定参量 $a_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 在整个过程中是常量还是变量都一个不漏的写出。

(2) 选定一个与所研究现象相适应的单位制,写出主定参量与待定参量的量纲。

(3) 在主定参量中,选择一组(k 个)量纲独立的量(基本变量)。

(4) 根据 π 定理分别写出主定参量和待定参量的无量纲组合表达式 $\pi_i (i = 1, 2, \dots, n - k)$ 和 $\Pi_j (j = 1, 2, \dots, r)$:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{a_{(k+1)}}{a_1^{p_1} a_2^{p_2} \dots a_k^{p_k}} & \Pi_1 &= \frac{b_1}{a_1^{m_{11}} a_2^{m_{12}} \dots a_k^{m_{1k}}} \\ &\dots\dots\dots & &\dots\dots\dots \\ \pi_{n-k} &= \frac{a_n}{a_1^{q_1} a_2^{q_2} \dots a_k^{q_k}} & \Pi_r &= \frac{b_r}{a_1^{m_{r1}} a_2^{m_{r2}} \dots a_k^{m_{rk}}} \end{aligned} \quad (1-8)$$

(5) 得到与(1-7)式相对应的无量纲关系式:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= f_1(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-k}) \\ \Pi_2 &= f_2(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-k}) \\ &\dots\dots\dots \\ \Pi_r &= f_r(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-k}) \end{aligned} \quad (1-9)$$

(6) 确定函数 $f_j (j = 1, 2, \dots, r)$ 的形式,通常有两条途径:利用无量纲变量 π_i 简化数学方程后解出函数关系;根据实验或物理分析确定。

1.2 爆破模拟相似律

爆破模拟就是通过研究便于实现的物理上相似的小型模型的爆破现象来代替研究实际的爆破现象,就是利用模型爆破代替现场的实际爆破。相似律,就是将模型试验现象变换成原型实际现象的法则,是利用小尺寸比例模型试验提供全尺寸原型实际数据的方法。进行爆破模型模拟试验必须遵从爆破模拟的相似律。

当需要确定一爆破现象的某个参量 Y 时,可通过分析爆破过程,剔除不变量和影响不大的物理量,确定影响 Y 的 n 个自变量为: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 。这些自变量,即爆破影响参数可能是,几何参量:孔深、孔距、排距、装药长度、装药半径等,炸药性能参量:炸药密度、爆速、药量、延期时间、波阻抗等,介质参量:岩石强度、弹性模量、岩石纵波波速、岩石波阻抗等。则在这一爆破现

象中, Y 与各自变量的关系可用数学式描述为:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (1-10)$$

若小型模拟试验的爆破影响参数与原型相同, 但各自对应的取值不同, 即只是自变量的数值不等, 那么描述这一爆破现象的同一物理规律的函数关系 f 应该是相同的, 则应有模型试验的相应关系式:

$$y' = f(x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n) \quad (1-11)$$

根据 π 定理, 式(1-10)、(1-11)可化成如下无量纲形式:

$$\text{实际爆破现象} \quad \pi = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3 \dots \pi_{n-k}) \quad (1-12)$$

$$\text{模型模拟试验} \quad \pi' = f(\pi'_1, \pi'_2, \pi'_3 \dots \pi'_{n-k}) \quad (1-13)$$

式中:

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{Y}{x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_k^{m_k}}; & \pi' &= \frac{Y'}{x'_1{}^{m'_1} x'_2{}^{m'_2} \dots x'_k{}^{m'_k}}; \\ \pi_1 &= \frac{x_{(k+1)}^{p_1}}{x_1^{p_1} x_2^{p_2} \dots x_k^{p_k}}; & \pi'_1 &= \frac{x'_{(k+1)}{}^{p'_1}}{x'_1{}^{p'_1} x'_2{}^{p'_2} \dots x'_k{}^{p'_k}}; \\ &\dots\dots\dots & &\dots\dots\dots \\ \pi_{n-k} &= \frac{x_n^{q_1}}{x_1^{q_1} x_2^{q_2} \dots x_k^{q_k}}; & \pi'_{n-k} &= \frac{x'_n{}^{q'_1}}{x'_1{}^{q'_1} x'_2{}^{q'_2} \dots x'_k{}^{q'_k}}; \end{aligned} \quad (1-14)$$

在模型试验中, 若取自变量 $x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n$ 的值分别满足:

$$\pi'_1 = \pi_1, \quad \pi'_2 = \pi_2, \quad \dots, \quad \pi'_{n-k} = \pi_{n-k} \quad (1-15)$$

显然有: $\pi = \pi'$, 即:

$$\frac{Y}{x_1^{m_1} x_2^{m_2} \dots x_k^{m_k}} = \frac{Y'}{x'_1{}^{m'_1} x'_2{}^{m'_2} \dots x'_k{}^{m'_k}}$$

于是得到用模型试验结果表示的原型实际爆破所对应的数据:

$$Y = Y' \left(\frac{x'_1}{x_1} \right)^{m_1} \left(\frac{x'_2}{x_2} \right)^{m_2} \dots \left(\frac{x'_k}{x_k} \right)^{m_k} \quad (1-16)$$

式中, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ 是已知的实际爆破影响参数, $x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_n$ 是根据(1-16)选取的模型试验爆破影响参数, Y' 是由模型试验测得的结果。所以实际爆破的待求特征量 Y , 可根据模拟试验结果, 通过数学推算后得出。

综上所述, 爆破模型试验与实际爆破相似的必要充分条件是: 对于由同一爆破规律控制的爆破模型和原型, 如果爆破影响参数相同, 只是各自的取值不同, 但由它们构成的 $n-k$ 个独立的无量纲组合 π_i 对应相等, 则爆破模型试验与原型相应的 π 相等, 两爆破过程相似。这也称为爆破模拟的相似律, 其中, π_i 称为相似准数, 使 π_i 对应相等的条件, 称为相似性判据或相似准则。

1.3 水压爆破的相似律

水压爆破往往必须保证一次成功, 其药量设计至关重要。药量太大, 爆破危害大; 太小, 不能满足破碎要求。因此, 对于重要的水压爆破, 可以通过模型模拟试验, 检验设计方案的合理性和可靠性, 确定合适的爆破用药量。

做模型试验, 必须建立模型, 选择合适的模型材料和爆破器材。为了简化问题, 设水压爆破

拆除一素混凝土圆柱形水池。通过分析,影响水压爆破效果的主要因素是炸药性能、药量大小、药包设置方式、混凝土水池的强度、传能介质(水)的性质等,现将本问题中的各参量及其量纲列表如表 1-1 所示。

表 1-1 水压爆破各参量及量纲表

编号	符号	名 称	单 位	量 纲
1	Q	水压爆破的用药量	kg	M
2	v	炸药的爆速	m/s	LT ⁻¹
3	ρ	炸药的密度	kg/m ³	ML ⁻³
4	R_0	装药的半径	m	L
5	h	药包入水深度	m	L
6	ρ_0	水的密度	kg/m ³	ML ⁻³
7	c_0	水中的声波速度	m/s	LT ⁻¹
8	ρ_R	混凝土水池的密度	kg/m ³	ML ⁻³
9	c_R	混凝土水池的声波速度	m/s	LT ⁻¹
10	σ_R	混凝土水池的抗拉强度	N/m ²	ML ⁻¹ T ⁻²
11	δ	水池的壁厚	m	L
12	H	水池的高度	m	L
13	R	水池的半径	m	L
14	D	水池破碎的平均块度	m	L

因此,水压爆破的药量受各因素的影响可用下列方程表示:

$$Q = f(v, \rho, R_0, h, \rho_0, c_0, \rho_R, c_R, \sigma_R, \delta, H, R, D) \quad (1-18)$$

在本问题中药量 Q 为因变量,其余均是自变量,且基本量纲量为三个,可取 v, ρ, R 为独立量纲量,根据 π 定理,求得下列无量纲组合:

$$\begin{aligned} \pi = \frac{Q}{\rho R^3}, \quad \pi_1 = \frac{R_0}{R}, \quad \pi_2 = \frac{h}{R}, \quad \pi_3 = \frac{\rho_0}{\rho}, \quad \pi_4 = \frac{c_0}{v}, \quad \pi_5 = \frac{\rho_R}{\rho}, \\ \pi_6 = \frac{c_R}{v}, \quad \pi_7 = \frac{\sigma_R}{\rho v^2}, \quad \pi_8 = \frac{\delta}{R}, \quad \pi_9 = \frac{H}{R}, \quad \pi_{10} = \frac{D}{R}, \end{aligned}$$

且:

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}) \quad (1-19)$$

等式右边的 10 个相似准数确定了模型试验与实际原型相似的条件,把相似准数对应相等与有关内容联系起来,就构成了水压爆破的相似律:

(1) 根据 $\pi_1, \pi_2, \pi_8, \pi_9, \pi_{10}$, 装药尺寸、模型尺寸、破碎块度应满足几何相似原则,即模型各方面的几何尺寸都与原型有相同的缩小或放大比例(本试验为有一固定的缩小比);

(2) 由 π_3, π_4 , 在采用同样炸药条件下,模型和原型可用同样的水作为传能介质;

(3) 由 π_5, π_6, π_7 , 在采用同样炸药条件下,模型和原型在材质上,应使其密度,声波速度,抗拉强度尽可能相等。

满足了上述条件,则可使模型的 π' 与原型的 π 相等,即 $\frac{Q}{\rho R^3} = \frac{Q'}{\rho' R'^3}$ 。由于模型与原型所用炸药相同,则由:

$$\frac{Q}{Q'} = \left(\frac{R}{R'}\right)^3$$

得:

$$Q = \left(\frac{R}{R'}\right)^3 Q' \quad (1-20)$$

即模型试验的相似条件为:若模型和原型的传能介质(水)、混凝土结构材料及所用炸药都相同,只是模型和原型的几何尺寸按 $\frac{R'}{R}$ 的比例缩小,则模型的爆破过程与原型在对应的 Q 条件下的爆破过程相似,且原型药量为模型药量的 $\left(\frac{R}{R'}\right)^3$ 倍。

因此,可制作一批几何尺寸相同的模型,进行药量 Q' 或其他装药参数不同的爆破试验,根据工程要求的平均破碎块度 D ,选取 $D' = \frac{R'}{R}D$ 所对应的 $Q'(D' \rightarrow D)$ 所对应的模型试验平均破碎块度)和装药参数,再将 Q' 放大 $\left(\frac{R}{R'}\right)^3$ 倍或按几何相似比放大装药参数,即得到原型——实际爆破的用药量和装药参数。

1.4 井下深孔爆破模拟的模型律

在地下矿现场进行爆破试验,爆后矿石的破碎、抛移及分布情况无法直接观察到,而进行筛分、量化测定工作影响正常生产,耗资巨大,可操作性差,难以实现。因此可以通过小型模型爆破试验来模拟生产现场的实际爆破,从而解决爆破结果的直接观察和定量分析。

地下矿生产通常采用垂直上向扇形中深孔爆破落矿,若以矿岩的破碎块度作为衡量爆破效果的主要指标,则影响爆破块度的主要因素是:爆炸动力源,如炸药的比能 $E(\text{J}/\text{m}^3)$ 、爆速 $v(\text{m}/\text{s})$ 、密度 $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ 、装药长度 $h(\text{m})$ 、炸药单耗 $q(\text{kg}/\text{m}^3)$;矿岩性质,如矿岩的抗拉强度 $\sigma_R(\text{N}/\text{m}^2)$ 、矿岩的波阻抗 $\rho_0 c(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$;爆破参数:炮孔深度 $H(\text{m})$ 、炮孔倾角 $\alpha(\text{度})$ 、炮孔直径 $R(\text{m})$ 、最小抵抗线 $w(\text{m})$ 、崩矿步距 $B(\text{m})$ 、孔底距 $a_1(\text{m})$ 、孔口距 $a_2(\text{m})$ 、延期时间 $\tau(\text{ms})$ 。爆破破碎的平均块度 $D(\text{m})$ 是上述各参量的函数:

$$D = f(E, v, \rho, h, q, \sigma_R, \rho_0 c, H, \alpha, R, w, B, a_1, a_2, \tau) \quad (1-21)$$

各参量中独立量纲只有三个,选取 w, ρ, v 为基本参量,根据 π 定理及相似原理得下列方程:

$$\frac{D}{w} = f\left(\frac{E}{\rho v^2}, \frac{h}{w}, \frac{q}{\rho}, \frac{\sigma_R}{\rho v^2}, \frac{\rho_0 c}{\rho v}, \frac{H}{w}, \frac{R}{w}, \frac{B}{w}, \frac{a_1}{w}, \frac{a_2}{w}, \frac{\tau v}{w}, \alpha\right) \quad (1-22)$$

可见,在井下深孔爆破中,影响爆破平均块度的无量纲组合因素有12个。只要模型试验参数的取值与原型实际的这12个无量纲组合分别对应相等,则模型试验的结果与原型实际爆破相似,模型结论能反映原型事实,从而可以用来指导原型设计,这就是井下深孔爆破模拟的模型律。因此,模型试验参数(带上标“'”)的设计应满足与原型(不带上标)间有下列关系:

$$(1) \frac{h'}{h} = \frac{H'}{H} = \frac{R'}{R} = \frac{B'}{B} = \frac{a_1'}{a_1} = \frac{a_2'}{a_2} = \frac{w'}{w} = I(\text{相似比}), \text{反映了装药和布孔尺寸应遵循几}$$

何相似原则,即模型设计各参数对应原型按同比例缩小或放大。由于模型体是有限的,实际爆破环境部分边界却是无限的,因此边界条件无法满足几何相似的原则,但可以采取措施,使由此而产生的模拟失真尽可能减小,所造成的误差能在允许的范围内。其方法:①增大模型尺寸,使装药点距非爆破边界的最小尺寸远大于爆破的最小抵抗线。②增强边界约束,在①条件下,设置无间隔的强力约束,如用钢模板紧固模型周边,以增强边界抵抗破坏的能力等。

$$(2) \frac{E'}{E} = \frac{\rho' v'^2}{\rho v^2} \cdot \frac{q'}{q} = \frac{\rho'}{\rho}, \text{反映了炸药的性能。工业炸药临界直径较大,在几何相似原则的}$$

约束下,模型炮孔孔径往往很小,不能满足工业炸药的爆轰要求,因此普通工程模型试验往往采用高威力炸药作为爆源,此时应满足炸药比能比等于炸药密度和爆速平方乘积的比,炸药单耗比等于炸药密度比。高能炸药比能大、爆速高,因此要满足上述条件,应采用低密度装药,并按比例减小炸药单耗。

$$(3) \frac{\sigma_R'}{\sigma_R} = \frac{\rho' v'^2}{\rho v^2} \cdot \frac{\rho_0' c'}{\rho_0 c} = \frac{\rho' v'}{\rho v}, \text{反映了炸药与岩石的匹配关系。高能炸药爆速大,要满足前者,}$$

除了降低密度装药外,还应选用比矿岩强度更高的脆性材料来制作模型,这往往无法满足。后者表明炸药波阻抗比等于矿岩波阻抗比,目前模型材料多采用水泥砂浆,其密度 ρ_0 和纵波速度 c 均比原岩低,而采用的炸药爆速又大,因此这一条件也难满足。为此应尽可能提高试验模型强度和密度,并采用不耦合装药结构,使上述条件得以近似满足。不耦合装药虽然破坏了装药直径的几何相似条件,但对于爆破过程的物理本质而言,炸药与岩石的匹配关系才是主要因素,应首先得到满足。

(4) α , 是炮孔倾角、无量纲量,即模型和原型的炮孔倾角应相同布置。

$$(5) \text{由 } \frac{\tau' v'}{w'} = \frac{\tau v}{w}, \text{得 } \tau' = \frac{v w}{v' w'} \tau, \text{模型试验炸药爆速高、模型小。可见,模拟试验中的延期起}$$

爆时间应远小于原型,常用的微差雷管无法满足此要求,因此最好采用微差控制起爆仪来实现微差起爆时间的调控。否则,只好尽可能采用小段别连续段号的微差雷管来代替,这当然也会造成一些失真。

模型试验满足了上述爆破模拟相似律,就可根据试验后的爆破平均块度筛分结果 D' 来推导现场生产的实际爆破平均块度 D , 即: $D = \frac{w}{w'} D'$ 。为了获得理想的爆破参数,可制作多组有不同爆破参数、满足相似律的小型模型,进行系列模拟试验,选取满足现场爆破要求的平均块度 D' 所对应的爆破参数,来推导现场实际应用数据,其方法是:

(1) 炸药性能:

$$\text{由} \quad \frac{\sigma_R'}{\sigma_R} = \frac{\rho' v'^2}{\rho v^2} \quad (1-23)$$

$$\frac{\rho_0' c'}{\rho_0 c} = \frac{\rho' v'}{\rho v} \quad (1-24)$$

式(1-23)/(1-24),整理后得:

$$v = \frac{\sigma_R'}{\sigma_R} \cdot \frac{\rho_0' c'}{\rho_0 c} \cdot v' \quad (1-25)$$

将(1-25)代入(1-24)式,整理后可得:

$$\rho = \left(\frac{\rho_0' c'}{\rho_0 c} \right)^2 \frac{\sigma_R'}{\sigma_R} \rho' \quad (1-26)$$

$$\text{由} \quad \frac{E'}{E} = \frac{\rho' v'^2}{\rho v^2}$$

$$\text{得:} \quad E = \frac{\rho v^2}{\rho' v'^2} E' \quad (1-27)$$

因此,在现场实际使用中,根据 v, ρ, E 选取合适的工业炸药品种。

(2) 爆破参数:

模型制作要考虑其难易,结合现场的设备条件、爆破器材以及爆破参数的实际使用情况,确定合理的、切实可行的几何相似比 $I = \text{模型尺寸} / \text{原型尺寸}$,则各爆破参数分别为:

$$\begin{aligned} h &= \frac{h'}{I}, & H &= \frac{H'}{I}, & R &= \frac{R'}{I}, & B &= \frac{B'}{I}, \\ a_1 &= \frac{a_1'}{I}, & a_2 &= \frac{a_2'}{I}, & \alpha &= \alpha', & q &= \frac{q'}{\rho} \end{aligned} \quad (1-28)$$

(3) 延期时间:

$$\begin{aligned} \text{由} \quad \frac{\tau' v'}{w'} &= \frac{\tau v}{w} \\ \text{得:} \quad \tau &= \frac{v}{v'} \tau' \end{aligned} \quad (1-29)$$

(4) 预测现场实际爆破的平均块度:

$$D = \frac{D'}{I} \quad (1-30)$$

露天台阶爆破模型模拟相似律可以同理导出。

进行工程爆破模拟试验,考虑的因素越多,模型和原型的相似性越好,失真越小,但要每一个因素都满足相似律,往往很难,甚至做不到,这时就必须对各影响因素进行分析,确定其对所考虑问题的影响程度,首先满足主要因素的相似,次要因素近似相似,影响较小的因素忽略不计。同时可以采用模型对比试验的方法来消除一些不能满足相似律因素的影响,实现比较目标的定性相似。

爆破模型模拟相似律为模拟试验确定实际应用的爆破各参数提供了理论依据。工程爆破影响因素复杂,在现有条件下爆破试验很难完全满足相似条件,往往只能做到定性相似模拟,因此实际工程问题与实验室模型之间的相似性,仍然没有得到很好的解决。一般工程爆破采用定性 with 定量相似相结合方式进行模拟试验,虽然有失真,但基本能满足工程的要求。

1.5 爆破模型模拟实验实例

某铁矿一采区的挂帮矿倾角缓(平均 30°)、厚度薄(平均8m)采用分段空场法开采,为了提高其回采率,确定采用侧向爆破抛出矿的回采爆破方法。这是一种新的回采爆破工艺,其效果需实验检验。爆破试验,显然只有在现场条件下的结果才最为准确、真实、可靠。但在地下采场进行爆破试验,矿块爆后在采场中的抛移和分布结果,无法观察到;破碎块度的筛分统计、量化测定工作影响生产、耗资巨大、可操作性差,难以实现,因此确定采用小型模型模拟实验来验证。

1.5.1 试验模型设计

根据地下深孔爆破模拟相似律,模型制作可归结为应满足:尺寸的几何相似及边界条件相似、用料的材料相似以及爆炸源的动力相似。在现有条件下矿山爆破试验要严格遵守爆破模拟相似律很难做到,一般都采用定性 with 定量相似相结合方式进行模拟试验。

1.5.1.1 几何相似及边界条件相似

综合各方面的因素确定模型的几何相似比为 $1/20$ 。根据现场矿块分段高12m,矿体平均厚

度8m,顶(底柱)5m,上盘边孔角 55° ,下盘边孔角沿矿岩边界约 30° ,凿岩巷道尺寸 $3.6\text{m} \times 3\text{m}$,按1/20的缩小比例浇注长方体模型,采空区用模具嵌贴在模板上来形成;炮孔参数(最小抵抗线、排间距、孔底距、孔深等)的具体布置根据现场设计使用的数值按几何相似原则,转换为模型设计参数;为了减小边界影响,模型周边距模拟采场和模型炮孔的最小尺寸大于2倍的最小抵抗线。模型外形及尺寸:长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=150\text{cm} \times 50\text{cm} \times 115\text{cm}$,见图1-1所示。

由于实际的炮孔直径为85cm,按几何相似比模型的孔径为4.25mm,用现场矿用起爆器材进行试验爆破,起爆雷管无法放入,因此将炮孔的模拟比改为1:10,即模型的孔径为9mm。

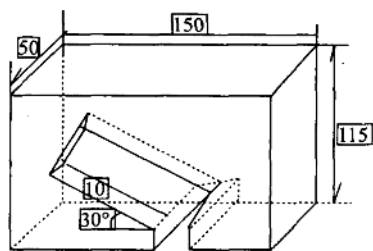


图1-1 试验模型形状及尺寸

1.5.1.2 动力相似

9mm的孔径值远小于生产现场使用粘粒状铵油炸药的临界直径,因此只能采用高威力炸药作为试验爆源,此时模型材料应选用比矿岩更硬的材料,这在目前无法办到,所以动力相似只能近似满足。由于能供选择的现有矿用爆破器材少,本次试验采用导爆索作为试验用药,用8号雷管轴向引爆,其外径均约为6mm,形成不偶合装药结构,能弥补部分动力相似性不能满足的缺憾。

由于采用了高威力炸药,应降低模型试验的炸药单耗。本着“炸药爆炸能量相似”的动力相似原则,使试验所用炸药单耗 $q_{\text{试}}$ 与实际爆破所设计用炸药单耗 $q_{\text{设}}$ 相似,相似比由炸药换算系数 e 确定。导爆索药芯为黑索金,其爆力值 A_1 为490ml,增粘粒状铵油炸药的爆力值 A_2 为280ml,其换算系数 $e = A_2/A_1 = 280/490 = 0.57$,因此模型试验用药: $q_{\text{试}} = 0.57q_{\text{设}}$ 。

1.5.1.3 材料相似

由于采用了高威力炸药,材料相似只能近似满足。目前矿山爆破模型,主要采用水泥砂浆材料,虽然难以做到使其比原矿岩的强度高、密度大,但可以采用高标号的水泥和在材料中加入铁砂的方法来尽可能提高其强度和密度。本次试验采用的材料配比(重量比)为,高标号水泥:砂子和铁精矿粉:石子($<7\text{mm}$):水 $=1:0.9:2:0.4$ 。

从上述分析可见:试验中难免有些因素不能满足相似律,必然造成模拟结果失真,严重的可能失去可比性。对此采用同等条件对比试验方法,即将各比较对象按爆破模拟相似律分别进行模型试验,使失真部分同等失真,用试验方案间的定量对比结果,来反映真实原型方案间的定性关系。

1.5.2 模型制作

(1) 模具 由于模型较大,模具要有足够的强度,采用3cm厚的木板做成活动的组合板式结构,在一侧板上按要求嵌贴采空区凸形模具。

(2) 倒浇灌法 将模型模具倒置,即凿岩巷道在上,扇形炮孔在下,进行浇灌混凝土。此时,由于凿岩巷道底板开口向上,故可以方便地将长钢筋从上往下插入浇灌混凝土,制作模拟的扇形炮孔,从而解决模具正向放置由于炮孔下方的凿岩巷道有底板约束,钢筋无法插入的问题。浇灌过程中边浇灌边振动,以减少模型中的气泡,确保模型的强度。模型的养护时间不少于28天,待需要试验爆破时将模型翻转过来,成正常直立状态,再实施试验爆破。

(3) 扇形炮孔的形成 浇灌前,取 $\Phi 8\text{mm}$ 的钢筋,按设计要求的模拟炮孔长度及留出的

10cm 操作手柄预先截取成所需的钢筋棍,分组编号,去除毛刺及铁锈,并在钢筋棍上标注对应的插入深度。在浇灌时,待混凝土往模具中浇灌完毕,立即将钢筋按设计图要求的倾角及深度,由巷道穿孔中心位置插入混凝土中,为了确保插入角度的正确,特制作了三角形变角定位模型。插完后,每隔 1 ~ 3 小时,将混凝土中的钢筋轻轻转动、拔插,以免钢筋凝固在混凝土中,直到模型硬化、形成所需的炮孔。

(4) 采空区模拟模具 采空区是承接崩落矿石的空间。为了减少模型体积,浇注模型中的采空区长仅为 10cm,显然不能满足爆后自然抛出分布的要求,为此采用 3cm 厚的木板制作了采空区模拟模具,其断面形状与浇注模型中的采空区及凿岩巷道一致,长 60cm。爆破时,将模具套接在试验模型正面,与浇注模型中的采空区连为一体,接受爆后碎块。此外为了客观、真实地反映崩落矿石在矿房底板上的运动和分布规律,在模具内的底板上粘一层厚 1cm 的碎石,使底板材料和凹凸不平现象与现场矿房底板相似,以确保二者的自然溜矿状态基本相同。

1.5.3 试验方案

本次试验设计了三组典型方案

(1) 单排齐发爆破崩矿方案

称“方案一”,是模拟现场回采爆破的实际应用方案,其特点是每次仅爆一排孔,整排同时起爆,主要爆破参数:孔底距 2m,抵抗线 1.6m。目的是作为改进方案的比较参照,具体设计见图 1-2 和表 1-2 所示。

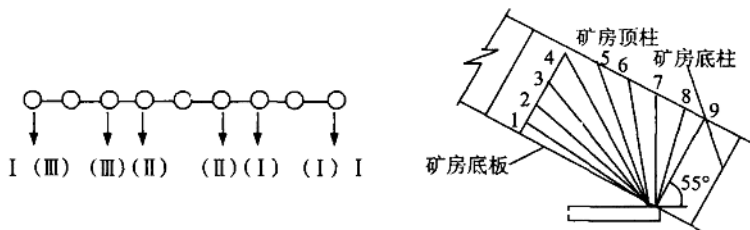


图 1-2 单排齐发和顺序爆破方案(方案一、二)示意图

表 1-2 模型爆破参数(方案一、二)

孔号	炮孔角度	炮孔深度		导爆索长度/cm	装药量/g	雷管段别
		现场尺寸/m	模型尺寸/cm			
1	14	16.2	81	18	3.22	I (III)
2	50	16.4	82	36	5.74	I (III)
3	57	17.6	88	20	3.50	I (III)
4	65	16.2	81	28	4.62	I (II)
5	74	13.0	65	27	4.48	I (II)
6	85	10.8	54	16	2.94	I (II)
7	97	9.4	47	25	4.20	I (I)
8	111	8.6	43	15	2.80	I (I)
9	125	8.2	41	27	4.48	I (I)
实际炸药单耗		$q = 0.03598\text{kg}/0.033\text{m}^3 = 1.09\text{kg}/\text{m}^3$				

(注:RDX 的含量,雷管按 0.7g/发、导爆索按 0.14g/m³ 计算,以后同理;带括号方案二的雷管段别数。)

(2) 单排孔先上盘、后下盘顺序起爆方案

称“方案二”,是在现有方案的基础上,仅改变其起爆顺序,采用“先上盘,后下盘”的孔间微差爆破,检验能否使下盘矿石往上盘抛移,抛移量有多大,其具体设计见图 1-2 及表 1-2 所示。

(3) 双排侧向爆破抛掷出矿方案

称“方案三”,是模拟推荐的改进方案,其特点是:采用两排扇形炮孔,上盘布崩落孔,下盘布抛掷孔,抛掷孔的孔底距小于崩落孔的孔底距和抵抗线、排间距(抛掷孔孔底距 1.6m、崩落孔孔底距 2m、抵抗线和排间距 1.8m),后起爆。目的是检验抛掷孔能否将下盘矿石往上盘方向抛移,从而较大地提高矿石回收率,具体设计见图 1-3 及表 1-3 所示。

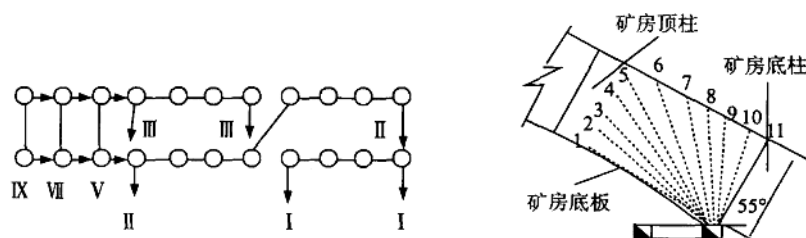


图 1-3 多排扇形孔侧向爆破抛掷出矿方案(方案三)示意图

表 1-3 模型爆破参数(方案三)

孔号	炮孔倾角/角度	炮孔深度		导爆索长度/cm	装药量(g)	雷管段别	
		现场尺寸/m	模型尺寸/cm			前排	后排
1(1')	41	16.4	82	13	2.52	IX	IX
2(2')	46	16.6	83	23	3.92	VII	VII
3(3')	51	17.0	85	35	5.60	V	V
4(4')	56	18.0	90	20	3.50	II	III
5(5')	63	17.4	87	24	4.06	II	III
6(6')	71	14.2	71	21	3.64	II	III
7(7')	80	12.0	60	16	2.94	II	III
8(8')	90	10.4	52	18	3.22	I	II
9(9')	101	9.4	47	14	2.66	I	II
10(10')	113	8.6	43	16	2.94	I	II
11(11')	125	8.2	41	18	3.22	I	II
实际炸药单耗		$q = 0.07644 \text{ kg}/0.074 \text{ m}^3 = 1.03 \text{ kg}/\text{m}^3$					

注:1' ~ 11' 为第二排炮孔的编号;其中:1 ~ 3 和 1' ~ 3' 号孔为抛掷孔,4 ~ 11 和 41' ~ 11' 号孔为崩落孔。

1.5.4 试验结果的数据分析与处理

1.5.4.1 碎块的堆积分布

将矿房容矿断面划分为五个区域,整个底板到积矿巷道中心划分为 I ~ IV 个等分区,其余矿体上盘部分为 V 号区,见图 1-4 所示。爆后按区收集碎块,分别进行称重统计,结果见表

1-4, 并制作各方案的矿块堆积分布图, 见图 1-5 所示。

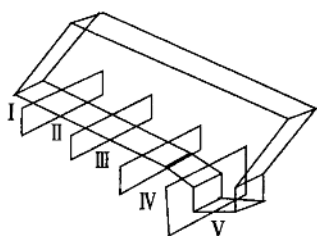


图 1-4 爆堆堆积区域划分示意图

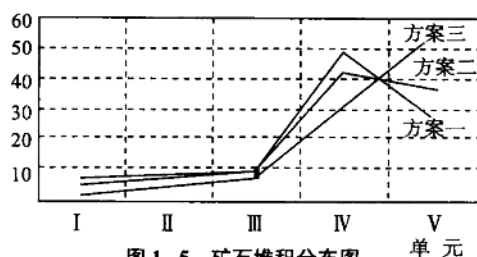


图 1-5 矿石堆积分布图

表 1-4 矿块堆积分布统计表

区域	方 案 一		方 案 二		方 案 三	
	重量 /kg	百分比 /%	重量 /kg	百分比 /%	重量 /kg	百分比 /%
I	4.15	7.02	3.10	5.15	2.80	2.07
II	4.45	7.53	4.05	6.73	5.60	4.14
III	5.05	8.55	5.80	9.65	10.30	7.62
IV	28.95	49.98	25.15	41.81	42.55	31.47
V	16.50	27.92	22.05	36.66	73.95	54.70
合计	59.10	100	60.15	100	135.20	100

从图中可见:

(1) 矿房底板的堆积分布

① 堆积量。图中各分布线与横座标所围的面积, 反映各方案爆后在该区的矿石堆积量。在底板范围内, 方案一面积 > 方案二 > 方案三, 表明: 方案一爆后落在底板上不能放出的矿石量最多, 矿石损失最大; 方案二次之; 方案三损失最少。

② 分布趋势。图中折线反映了底板上矿石的堆积形状。方案一的折线较为平缓, 表明矿石几乎是平直向前抛出, 碎块靠自重溜向积矿巷道; 方案二的折线比方案一有一定的斜度, 呈上部堆积少、下部堆积多的分布情况, 表明该方案有侧向抛掷的趋势, 但效果并不明显; 方案三折线的斜度明显增大, 堆积从上到下由少到多变化明显, 表明该方案侧向抛掷效果最强。

(2) 积矿巷道及上盘的堆积分布

① 碎块量。在 IV、V 单元范围内, 面积: 方案三 > 方案二 > 方案一。表明: 在积矿巷道内, 方案三矿石堆积量最多, 即能够靠自重放出的矿石量最多; 方案二次之; 方案一最少。

② 分布趋势。方案一、二中大部分爆落矿石 (分别占总量的 48.98%、41.81%) 堆积在积矿巷道的左侧, 即矿体的下盘, 呈“左高右低”的堆积形状; 而方案三的大部分堆积 (占总量的 54.70%) 在积矿巷道的右侧, 即矿体的上盘, 呈“左低右高”的堆积形状, 表明: 有相当一部分是从矿体的下盘直接抛掷而来。

1.5.4.2 模拟矿石回收率

根据统计数据及有关计算公式得模拟矿石回收率计算表。