

定向抛掷爆破

[苏] A·A·切尔尼高夫斯基 著

中国建筑工程出版社

31

定向抛掷爆破

[苏] A·A·切尔尼高夫斯基 著

史家增 译 杨人光 校

中国建筑工业出版社

本书叙述了爆破矿岩的破碎机理,介绍了定向爆破在矿业和工程建设中的应用。论证了应用爆能直接从工作面向废石堆场搬运岩石的经济效果及其采用准则。书末附有不同地形条件下爆破抛掷岩块运动抛物线的弹道计算表。与俄文第一版不同之处是比较详细地研究和论证了整体和裂隙矿岩的爆破破碎机理。

本书可供从事爆破工程设计和科研人员参考。

**ПРИМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВА В ГОРНОМ
ДЕЛЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

А.А.ЧЕРНИГОВСКИЙ

(ИЗД.2-Е, ПЕРЕРАБ.И ДОП.)

МОСКВА, "НЕДРА", 1976

*

定向抛掷爆破

史家增 译

杨人光 校

*

中国建筑工程出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市顺义县印刷厂印刷

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 10¹/₂。字数: 271 千字

1983年6月第一版 1983年6月第一次印刷

印数: 1—3,800册 定价: 1.60 元

统一书号: 15040·4465



主 要 符 号

- A ——采掘带宽度, 米;
 a ——排中药包间距, 米;
 B ——平面药包宽度, 米;
 b ——延长药包或集中药包排间距, 米;
 b_c ——空气阻力系数, 米^{-1} ;
 c ——声速, 米/秒;
 D ——水平抛掷距离, 米;
 D_1 ——由平面药包到爆堆远边界距离, 米;
 D_2 ——由平面药包到爆堆近边界距离, 米;
 D_{1p} —— D_1 值的计算值, 米;
 D_e ——压力波传播速度, 米/秒;
 d ——炮孔直径, 毫米;
 E_k ——岩石运动动能, 焦耳;
 e ——岩石冲击破碎形成单位再生面所消耗的能量, 焦耳/
米²;
 e_{oo} ——炸药比能, 焦耳/公斤;
 F_m ——装药平洞断面面积, 米²;
 F_k ——装药峒室表面积, 米²;
 F_a ——空气阻力, 牛顿;
 $f_{\tau p}$ ——摩擦系数;
 G_c ——剪切模数, 牛顿/米²;
 g ——重力加速度, 米/秒;
 H ——台段高度; 有限尺寸药包气体腔高度, 米;
 H_0 ——无限尺寸药包气体腔高度, 米;
 h ——爆堆断面厚度; 下半空间药包作用深度, 米;
 h_{mca} ——抛掷速度最大时药包以上的高度, 米;

j ——空气阻力加速度, 米/秒²;
 $\hat{j}$ ——空气阻力加速度与重力加速度(超载)之比;
 k ——平面药包侧面爆炸产物膨胀系数;
 k_e ——抛掷药包计算的单位炸药消耗量, 公斤/米³;
 k_F ——孔口爆炸产物逸出系数;
 k_D ——爆炸产物从药室冲向平洞的系数;
 k_w ——爆破深度修正系数;
 $k_{r.c}$ ——重力及空气阻力对爆破抛掷岩石的阻滞作用系数;
 k_s ——炮孔装药系数;
 L ——平面药包长度, 米;
 L_p ——爆堆宽度, 米;
 M ——岩块质量, 公斤;
 m ——炮孔密集系数;
 N ——炮孔或裂隙数;
 n_e ——爆破作用指数;
 p ——单位长度延长药包量, 公斤/米;
 p_s, p_e ——侧部或上部围边延长药包单位长度药量, 公斤/米;
 Q ——装药量, 公斤;
 Q_{ϕ} ——集中药包有效装药量, 公斤;
 Q_z ——总装药量, 公斤;
 Q_o ——围边药包装药量, 公斤;
 q ——单位炸药消耗量, 公斤/米³;
 R_o ——药室直径, 米;
 R_1 ——气体腔直径, 米;
 Re ——雷诺数;
 S_k ——岩块中央断面面积, 米²;
 T ——岩块飞行持续时间, 秒;
 t ——发展过程经过的时间, 秒;
 U ——爆破岩石抛掷体积, 米³;
 U_k ——岩块体积; 药室体积, 米³;

U_m ——装药平洞体积, 米³;
 $U_{g.n}$ ——气体腔体积, 米³;
 u_0 ——爆炸产物初始比容, 米³/公斤;
 u ——爆炸产物绝热膨胀到大气压力时的比容, 米³/公斤;
 u_1 ——破碎成平均尺寸为 x_k 岩块的单位岩石破碎能, 焦耳/米³;
 v ——空气中岩块运动速度; 冲击波阵面后的质量速度, 米/秒;
 v_0 ——修正的岩石抛掷初速度, 米/秒;
 v_p ——计算的岩石抛掷初速度, 米/秒;
 v_x, v_y ——沿 x 轴和 y 轴的运动投影速度, 米/秒;
 v_{max} ——最大抛掷速度的摄影值, 米/秒;
 W ——爆破深度, 米;
 x ——水平坐标;
 x_k ——岩块平均尺寸, 米;
 y ——垂直坐标;
 z_d ——冲击恢复系数;
 α ——平面药包与水平面的夹角, 度;
 α_{opt} ——平面药包最佳倾角, 度;
 β ——任意方向与主抛掷方向之间的夹角, 度;
 β_p ——整体岩石动力破碎时岩石韧性、药包方式和爆破对称性系数;
 γ ——亚临界微差爆破抛掷阵面转向角, 度;
 γ_p ——岩石冲击破碎的相对剪切;
 Δ ——相对装药密度 (药包体积与药室体积之比);
 δ_1 ——沿短边距平面药包中心的相对距离, 米;
 δ_2 ——沿长边距平面药包中心的相对距离, 米;
 ε ——介质相对应变;
 ε_1 ——流动平面上最大相对应变;
 ε_p ——岩石破裂瞬间的相对应变;

ζ ——高差系数，即水平抛掷距离与岩石降落抛掷距离之比；
 η ——爆破有效作用系数；
 η_v ——按抛掷初速计算的爆破有效作用系数；
 η_0 ——无限平面药包爆破有效作用系数；
 η_n ——按抛掷鼓包上升高度计算的爆破有效作用系数；
 θ ——抛角，度；
 κ ——绝热指数；
 μ ——泊松比；
 ξ ——药包相对长度；
 Π ——相似判据；
 ρ ——岩石密度，公斤/米³；
 ρ_{ee} ——炸药密度，公斤/米³；
 ρ_a ——空气密度，公斤/米³；
 Σ ——爆炸产物压力；介质变形应力，牛顿/米²；
 Σ_0 ——爆炸产物初始压力，牛顿/米²；
 Σ_a ——大气压力，牛顿/米²；
 Σ_r ——屈服应力，牛顿/米²；
 σ_s ——极限断裂应力，牛顿/米²；
 σ_r, σ_τ ——径向压应力和切向拉应力，牛顿/米²；
 τ ——切向应力，牛顿/米²；
 τ_p ——切向破坏应力，牛顿/米²；
 φ ——平面药包短边方向与爆堆侧面境界方向间的夹角；抛掷初速度水平面投影转向角，度；
 χ ——平面药包相对宽度；
 Ω ——平面药包几何相似判据；
 Π_{np} ——击穿指数，米³/公斤。

译 校 说 明

本书系根据苏联 А·А·切尔尼高夫斯基所著 «ПРИМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ВЗРЫВА В ГОРНОМ ДЕЛЕ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ» 一书译出。作者以大部分篇幅分析与研究了土岩爆破破碎机理与抛掷堆积的力学规律，并据之引出许多新的工程爆破设计技术。

А·А·切尔尼高夫斯基曾是我国爆破工程界所熟知的苏联爆破工作者，他从事工程爆破实践与研究，在六十年代曾先后发表过两篇大规模工程爆破药量计算的专著。此书亦为1976年第二次修改增订版，在修改中综合了苏联七十年代爆破力学研究与实践成果。

全书力图以爆破力学的理论指导实际工程爆破设计，把纯经验性工程爆破提高到爆破工程学理性认识高度。也就是说，把许多实际问题纳入爆破力学理论上加以研究，这种理论研究必将促进工程爆破新技术的发展。我国工程爆破设计技术也早已逐步改变那种以原始的简单的单药包爆破作为设计方案的状况，而代之以群药包整体爆破。这就需要在爆破力学理论上进行研究和探索，我们希望本书译文能有助于此。

此书一开始，就论述平面药包爆破技术，在我国称为群药包或群延长药包爆破技术。它利用药包群爆破时相互作用的力学原理，阐明群药包爆破是提高抛掷能量有效利用率，降低抛方单耗的有效途径，并可据以从根本上改善抛掷定向性与堆积集中性。

但是，作者不限于理想平面药包形式，而是在一般的峒室爆破中改善药室的分布和结构，使之符合平面药包爆破法。为了更有效地控制抛掷定向性与堆积成型，突破地质与地形条件的约束。还提出了诸如楔形药室、围边药室及端部凸起延长药室等新爆破设计技术。

作者还根据抛体加速过程的时间特性，即利用药室壁面膨胀腔内压力变化的时间关系，提出相邻药包微差起爆设计技术，即同一排内药包间的微差爆破技术。

作者从力学观点论述了填塞物运动，及其运动对抛掷的影响，指出了装药爆破中填塞的重要作用。同时在填塞问题上将峒室爆破与深孔爆破统一起来加以研究。

作者还应用数理统计原理研究了矿岩爆破破碎机理，提出局部微分单元破碎岩块尺度分布函数，从而导出群药包爆破合理间距的选择，并用来确定空气阻力系数。

综观全书，旨在表明爆破设计技术的发展有赖于对土岩爆破力学原理的认识，必须使爆破工程设计摆脱无力学意义的单凭经验的臆断，而力求以爆破力学规律指导爆破设计。

但是，限于当前对土岩爆破力学的认识程度，作者对土岩爆破抛掷和堆积上的研究，仍然建立在较粗糙的力学模型上，即不可压缩速度场分布的假定上，在堆积规律上还是基于理想微分单元体（飞散岩块间不相互作用）在空气中的弹道轨迹。因而，正如作者所指出的平面药包爆破的一系列技术，在苏联尚未推广的原因，主要是此技术本身尚未提供一套较精确的设计参数。例如，就余压气体驱动抛体加速运动的问题而言，就把抛体视为不可压缩的封闭介质，而腔内余压气体则是通过导洞渗流效应而耗散。虽然，文中得出抛速随爆破规模增大而提高的结论，但显然它是以药量与导洞横截面之比为依据的。

实际上，抛体介质内渗流效应的能量耗损是影响抛速与爆破规模关系的重要因素。按渗流模型，在得出抛速与爆破规模关系的同时，可以推导出腔内压力下降的时间特性，这对本书第七章中微差爆破的临界延发时间，是可以计算确定的。

同时，在抛体介质后期（鼓包破裂后等速阶段），由于还有残余气体渗漏压的驱动，抛体飞块将产生横向速度分量，影响堆积成型效果。为了克服后期运动渗漏压的不利影响，在药包设计上，应采用本书所提出的围边药包或端部凸起延长药包，以控制

气体渗漏压在抛体内分布。即可达到堆积成型的预计目的。

可见，本书中有许多爆破力学的观点还存在着争论，但是，正如上面所述，许多实际问题均已提到爆破力学的高度加以研究，就此而论，本书对从事爆破力学研究和实际爆破工作人员，是颇有参考价值的。

在译校过程中，对原文的某些错误作了修正，对个别公式加了推导附注于节后。译文谬误之处，祈读者予以指正，当竭诚欢迎。

1982年9月

序 言

爆破工作的理论研究和所积累的实践经验证明,在任何情况下,爆破必须获得最大的抛掷效果。在所有已知的方法当中,最有效的是平面药包法。理想的平面药包一般理解为药包的长度和宽度比厚度要大得多。例如,理想的平面药包应该用炸药构成的薄片体。计算证明,对于搬运岩石所需的爆炸能量来说,在大多数情况下平面药包厚度介于1到几毫米之间。显然,这样厚的平面药包利用一般的技术方法是很难将其放入爆破体中的。所以,理想平面药包实际上是以等效的峒室或者炮孔装药法所代替,这些药包布置在同一平面上的距离不超过某一极限值。爆破时这种平面装药法每个药包的压缩波在一定的距离内叠加成一个波,继而,这个波平行于药包布置平面传播,而且使介质产生与理想平面药包爆破相同的规律而运动。所以,平面峒室或者炮孔装药法以后简称平面装药。

平面装药法效果好的例证为在建设宽路堑和采掘中所应用的多排峒室装药爆破;另一例子是单排平行自由面布置的炮眼装药爆破。在最小抵抗线长度与药包直径和排距成一定比例时,爆破岩石将沿炮眼药包排列的平面崩落,而且垂直于这个平面运动。

平面装药法与其它已知的方法相比较,其主要优点在于平面药包爆破时,岩石将沿着岩体临空面的法线方向运动,而这就显著地提高了抛掷定向性和密集性的爆破特征。只要平面药包的布置与水平面保持一定的角度,就有可能达到向所要求的方向抛掷岩石。

高度的抛掷密集性,通常有利于剥离工作、爆破法筑坝、筑堤、开挖运河和其它水利工程。在这些实例中,爆破时的全部爆炸能量都用于抛掷岩石或者使相当大的一部分岩石降落在地面上所圈定的范围内。例如,在巴依帕钦斯克水电站的抛石坝基盘,

就是用平面药包爆破了其上的早期砾石-粘土混合堆积物而建成的。同时根据设计，向基盘范围内的抛入量必须不小于爆破土石方量的80~90%。实践证明，这样严格的要求只有使用平面装药法才能实现。

在矿业中有用矿物矿床用露天开采时，为了向废石场搬运废石，则对爆破工作提出了较高的要求。在苏联，这种方法开采有用矿物的应用范围逐年在扩大。例如，1950年至1970年应用露天法开采的煤和铁矿石的总开采量相应地增加了1.5和0.5倍^[1]。这就说明露天开采不同于地下开采，露天开采具有使用高效能机械，保证以更高经济效益回采和搬运矿岩的条件。因而，今后10年有用矿物的开采量的增加，将主要依靠发展露天开采。

通常在进行直接回采工作之前，需要应用一定的技术方法进行大规模和大量的矿山基建和剥离工作，包括松碎、挖掘、装载和向废石场运送大量有用矿物的覆盖岩石和围岩^[2,3]。在挖掘和装载矿岩之前，岩石的松碎基本上应用凿岩爆破方法。但是，爆破却不是只用于松碎坚硬岩石。

最近十年以来，在阿尔丹-托波堪斯克、考尔钦斯克、切列姆霍夫斯克等露天矿的剥离和基本建设工程中广泛地使用了定向大爆破。

用两种不同方法完成剥离工程：即挖掘机采掘和应用定向大爆破。在最近的情况中，爆破作用不仅破碎岩体，而且还可以把相当大一部分破碎岩石运送到废石场范围内。应当指出，在应用第一种方法时，同样还要进行爆破工作（在用挖掘机挖掘前对坚硬的覆盖岩层进行破碎），但是爆破在这里是辅助性质，因为，直接剥离工作（由工作面向废石场运送废石）是利用挖掘机和各种运输设备进行的。

有用矿物和坚硬围岩的开拓是由如下工序组成：爆破松碎、挖掘机挖掘、矿岩运输和废石排除。在剥离岩石时应用大爆破与这些过程的目的是相同的。

苏联在过去三十年的国民经济建设期间，使用大爆破所获得

的经验说明了以下优点^[4~6]：

大爆破是能在短期内完成大量繁重土石方工程的特殊的机械化方法；

大爆破本身不需要昂贵的预备工程 and 高度熟练的劳动力，而且能够大大地减少机械、设备和运输工具的数量；

当应用定向大爆破进行剥离工作时，铁路专用线的建设，部分主要工业建筑和大多数民用建筑都可以与大爆破准备工作平行进行，因此，可以大大地缩短露天矿投产期限。至目前为止，已经用峒室药包定向大爆破完成了各种工程。大爆破的实践和理论研究证明，随着峒室装药量的增加，而同时增大药包埋置深度是能够提高大爆破效果的。但是，在矿山基本建设和剥离工作中应用峒室装药爆破具有不少缺点，例如：使所取得的挖掘断面复杂化，爆破岩石不可能全部堆置在堑沟帮上，爆破1米³岩石成本高，炸药消耗量大等等^[1]。除此之外，峒室药包法由于大部分爆破下来的岩石残留在设计挖掘范围之内或者在其附近，其抛掷定向性和密集性是极低的。现在由于设计了新的定向爆破方法，制造了廉价的炸药和高效能的穿孔机械，大多数缺点已然消除。

苏联最近几年进行的实验和理论研究证明，平面药包法除本身固有的优点以外，还能够大大地改善在剥离工程上的重要爆破特性，即抛掷的定向性和密集性^[7~9]。

在苏联应用平面药包法定向抛掷土岩的研究，首先是苏联科学院西伯利亚分院在M·A·拉夫林契也夫院士领导下开始的^[7]。提出的新定向抛掷法是在土岩抛体的四周设置炸药层，在爆破过程中及相继的土岩压缩下，土岩产生硬壳，这个硬壳可以防止土岩向侧面飞散。理论研究证明^[10]。这种围绕土岩抛体形式的平面药包，可以100%达到定向抛掷。

这种方法的试验证实了它的理论上的结论^[11]。但是，使用这种方法与普通方法比较，炸药消耗量提高了，劳动消耗量增大了。

还可以采用其它类型的平面药包法实现单侧定向抛掷。研究

证明，特别是平面法，其中包括楔形药包，在具有最佳爆破条件时就能获得足够有效的定向抛掷^[8、9、12]。同时，更大的意义在于以理想的平面药包效应代替炮孔和峒室装药的布置方法以及爆破顺序。

在计算平面药包时，具有特别实际价值的爆破有效作用系数值，取决于填塞参数^[13]。也就是平面药包法使用的经济合理性取决于此。同时还影响到定向抛掷的效果和最佳爆破条件（装药平面倾角、爆破层厚度、炸药类型等等）的选择。

应用平面药包法把爆破岩石搬运到更大距离的理论和实验研究工作首先是在苏联开始的。但是，在苏联的建设和剥离工程实践中，这种方法还没有获得广泛应用，主要是因为还没有根据平面药包法可以取得最佳经济效果的应用条件制订出足够准确的设计。除此之外，或多或少还不能完全阐明在有用矿物开发和水利工程建设中应用平面药包法的计算原理。

本书期望对不同矿山地质条件下平面药包法计算中现有资料的不足之处，有所补益。

目 录

主要符号

译校说明

序 言

第一章 平面药包法的计算原理	1
第一节 计算方法的特点	1
第二节 弹道学概论	6
第三节 基本计算公式的推导	9
第四节 抛角函数和落差系数	13
第五节 “几何尺寸”的修正	16
第六节 有限尺寸平面药包计算	19
第七节 堆积范围和纵断面的确定	28
第八节 边缘效应及其修正	32
第二章 爆破有效作用系数	37
第一节 有效作用系数的计算	37
第二节 无填塞爆破	46
第三节 自封填塞	59
第四节 试验法确定有效作用系数	67
第三章 实验研究	79
第一节 实施方法和实验结果	79
第二节 模拟	88
第四章 考虑空气阻力的抛掷爆破岩石运动	91
第一节 空气阻力作用	91
第二节 阻力定律	92

第三节	岩块运动微分方程的建立	94
第四节	弹道表	98
第五节	空气阻滞作用的计算判据	99
第六节	空气阻力修正	101
第七节	减小空气阻力的途径	104
第八节	气流对飞行岩块的作用	105
第九节	关于弹道计算的准确度	109
第十节	阻力系数的经验算法	111
第五章	药包爆破时的岩石破碎和外弹道学	113
第一节	外弹道学基本课题的解算方法	113
第二节	爆破破碎矿岩的颗粒组成	116
第三节	爆破岩石破裂机理	119
第四节	整体矿岩的破裂机理	121
第五节	整体岩石破碎的规律	127
第六节	密集炮孔药包爆破整体矿岩的破碎	133
第七节	整体介质对称爆破的分布规律	137
第八节	整体岩石的破碎功	141
第九节	深孔药包爆破法微分分布律和最佳参数	145
第十节	总破裂裂隙的扩展速度	151
第十一节	裂隙岩石破碎规律	153
第十二节	岩块撞击和降落在坚硬地面上的附加破碎	159
第六章	楔形药包计算	163
第一节	岩石抛掷机理	163
第二节	三个药包法	167
第三节	群药包法	172
第七章	平面药包法亚临界微差爆破	175
第一节	定向爆破新方法	175
第二节	微差爆破岩石抛掷机理	176
第三节	临界延时间隔	179

第四节	弹道学的特点	185
第五节	岩石堆积	187
第六节	新定向爆破法的实际应用	189
第七节	实验研究	189
第八章 实用介绍		193
第一节	爆破方式选择	193
第二节	最优爆破参数	197
第三节	炮孔倾角	198
第四节	炮孔装填	200
第五节	爆破顺序和延发时间	202
第六节	药包排间距和排中药包间距	204
第七节	采掘带宽度和单位炸药消耗量	205
第八节	炮孔中炸药分布	207
第九节	用爆破向废石场搬运剥离岩石的经济效果	211
附录 弹道计算表		214
参考文献		301