

凿岩爆破法开采石材

资料汇编

(内部交流)

刘殿中 主编

中国力学学会工程爆破咨询部
北京有色冶金设计研究总院图书馆

北京有色金属
设计研究总院
图书馆
PDG

前 言

我国石材资源丰富，品种繁多，但目前开采、加工技术比较落后，资源破坏严重，工效低，经济效果差。

近年来，在采石界，对爆破技术的应用有不同意见，理由是荒料中形成微裂缝，影响成材率，就开采本身而言又造成石材开裂降低荒料率。这曾经是事实，其原因是由于滥放炮造成的后果。

随着科学技术的进步，现在发展了多种类型的控制爆破技术，用控制爆破方法开采石料，不但可以不出现爆破微裂纹，还可以提高荒料率。从软的砂岩到硬的花岗岩，各种类型的大理石，都有成功的爆破开采方法和实例。法国、挪威等国在锯石机遍及世界各地的强劲潮流中，仍然广泛采用爆破方法采石，并有所发展，保持着很高的工效和利润。

我国有的矿山采用了先进的锯石设备开采荒料，有的矿山采用切割爆破技术、燃烧剂迫裂技术、膨胀剂迫裂技术、取得了良好的效果。但是，还有更多的矿山仍然采用传统的劈裂法或无控制的爆破，劳动效率低、荒料率低、劳动强度高，相形之下，技术水平落后。

生产的发展要依靠科技进步，我国是发展中国家，采石矿山又多是家底薄的企业，不可能普遍采用锯石开采法，而切割爆破、迫裂技术却不需要增加投资、设备，是适合我国国情的先进采石技术。

为了推广采石先进技术，我们编成这个文集，希望它能有助于我国采石工业的发展，为迅速改变开采落后于加工的现状尽绵薄之力。

本文集由刘殿中主编，参加选编工作的有刘振东、徐仲甫、张世英、张步华等同志，由于时间仓促，难免出现差错，请读者指正。

编 辑 组

1988年6月

目 录

第一部分 爆破开采方法综述

一、爆破切断采石法.....	1
二、控制爆破开采方法.....	9
三、花岗石露天开采.....	26

第二部分 爆破切割

一、控制爆破在浙川大理石开采中的应用.....	33
二、大理石光面爆破技术.....	37
三、浅谈石材开采新技术——切槽爆破.....	41
四、经向聚能药包切割岩石爆破的断裂力学模型.....	46
五、模压药柱用于周边爆破和石块切割.....	51
六、用导爆索爆破开采彩色砂岩石料.....	54
七、从化大理石矿控制爆破法简介.....	55
八、可提高生产效率的新型采石法.....	56
九、天然饰面石材矿床凿岩爆破工程设计.....	57
十、花岗岩石材开采爆破.....	60
十一、意大利劈裂法开采.....	63
十二、电钻钻孔——予裂爆破开采法在中硬大理石矿山的应用.....	65
十三、芬兰的料石爆破.....	66
十四、装饰石材的爆破切割法——光面爆破.....	68
十五、法国花岗石开采.....	71

第三部分 高能燃烧剂采石

一、SG型燃烧剂的研制与应用.....	89
二、高能燃烧剂在控制爆破中的应用.....	93

三、近人爆破在白云山大理石开采中的应用.....	96
四、大理石矿开采应用“近人爆破”的详述	105

第四部分 膨胀破碎剂采石

一、膨胀破碎剂在石材开采中应用述评	115
二、缓性破碎剂及其应用	119
三、无声破碎剂在大理石分割工作中的应用	124
四、无声破碎剂（SCA）在石材开采中的应用	129
五、我国石材矿山开采的新技术——无声切割法	134

第五部分 石材矿床的荒料率

一、试论石材矿床的荒料率	143
二、“三剖”图解法统计大理石荒料初探	148
三、大理石矿床裂隙研究及其应用	156
四、浅论石材矿山的试采	162

第六部分 出国考察资料

一、赴意大利石材考察情况汇报	169
二、意大利石材开采技术简介及对加强我国矿山建设的几点建议	176

第七部分 石材价格参考表及名词术语

一、大理石、花岗石国际流行尺寸与售价	183
二、一九八七年第一届石材展览会上我国部分大理石花岗石生产厂的报价	186
三、关于统一石材开采名词术语及设备名称的建议	187

一 爆破切断采石法*

以爆破法作为分离工序切断岩石的方法称之为爆破切断采矿法。实际上,这种方法在石材开采中与劈楔法都是最古老的开采方法,也是在机械法盛行之前最为普遍采用的方法。但由于爆破法对岩石的破损严重,而逐渐被各种机械法所代替,甚至被视为禁止采用的方法。随着爆破技术和爆破器材的发展,新的爆破技术又被应用于石材回采。因而,目前所说的爆破法在本质上已不同于过去被淘汰或被禁止使用的爆破法。本章中所介绍的方法包括:控制爆破、金属燃烧剂近人爆破、膨胀剂静态爆破几种。这几种爆破方法既可作为主要切断分离方法,亦可与其它机械法配合使用。至于利用黑色火药的爆破法,本章未予介绍。

第一节 控制爆破

所谓控制爆破一般是指利用普通工业炸药乃至烈性炸药,通过合理确定炮孔网参数、装药结构及起爆顺序,控制爆破过程中爆炸产物的作用、地震效应及爆破后飞石距离、破坏范围、破坏程度和岩石运动方向的爆破方法的总称。在一般矿山上所用的控制爆破有光面爆破、预裂爆破及定向抛掷爆等各种控制爆破法,但大多是以保护边坡或巷道轮廓并破碎岩石为主要目的。也就是说,既将岩石破碎到一定块度,又起到保护边坡及巷道轮廓不受破坏、减少地震效应、按一定方向抛到预期距离的目的。用于石材开采的控制爆破则是要求既将岩块与岩体分离,又不破坏分离下来的岩块,还不能损伤岩体,以保证间后分离的分离块质量不受影响,有人称这种控制爆破为围边爆破。

围边爆破的特点是爆轰波在自由面上的反射波影响很小,它在岩石表面折射所形成的应力波作用时间比炮眼分布面上爆炸产物压力所引起的拉应力作用时间少1~2个数量级,这就足以保证分离下的岩石不受破坏。围边爆破的主要做法是:为了保护岩体不受爆破波的破坏,加大药包与炮眼(或炮孔)壁之间的径向间隙和药包之间的轴向间隙,同时减少装药量。由于加大了径向间隙,就使得炸药与岩石之间有了一个好的空气隔层,这样在起爆波在药包轴向通过之后,而其周围则是空气冲击波伴随着爆炸产物向炮眼扩散形成气体隔层,使得爆破波前应力降低1~2个数量级。在这种情况下,空气冲击波与爆炸产物就同时对岩石产生应力作用,而这样的应力波只是削弱岩石。又因为在炮眼壁上存在着原始裂隙,应力波则主要使裂隙扩大,使其中的主干裂隙一直扩展使块石从岩体上分离下来,继而在爆炸产物的压力下产生位移(水平向已经过分离掏槽),形成向外推离约0.3~0.5米的分离体。此即所谓围边控制爆破。

围边爆破主要用于具有水平开口裂隙,或层面间连接松散的水平层理,或是在分段底

* 本文选自希禾等编著“天然饰面石材的开采与加工”第八章

部用机械法切断掏槽的情况下。在这种情况下，用围边爆破既可切断一个面，又可向外推移分离体。但在水平方向没有弱结合面，或是未进行水平切断的情况下，则不适宜采用此法。

围边爆破的机理已略如前述，亦可知其主要参数应是炮孔间距和装药结构。在考虑炮孔间距时，可视分离块被推离之前的爆破为削弱岩石的作用，也即将岩石的极限拉伸强度有所降低，可令爆破后与爆破前岩石的极限拉伸强度之比为 Ψ ，这样向外推离岩石的反力可为

$$\Psi[\sigma_p^0](BH - NdL) \quad (1)$$

式中 σ_p^0 ——岩石削弱前的动极限拉伸强度，Pa；

BH——分离面积， m^2 ；

B——分离线长度，m；

H——分段（即分离体的）高度，m；

N——分离线上的炮眼数；

d——炮眼直径，m；

L——炮眼深度，m。

围边爆破是以导爆线为主药包，其目的在于尽量加大药包与炮孔的径向比。在此条件下，动拉伸极限强度与岩石的静极限抗压强度的关系为：

$$\Psi[\sigma_p^0] = (0.02 \sim 0.04)\sigma_0 \quad (2)$$

式中 σ_0 ——岩石静极限抗压强度，Pa；

当炮眼数目大于10时，则分离线的长度可按下式计算

$$B \approx aN \quad (3)$$

式中 a——炮眼中心间的平均距离，m。

可见，如果爆炸产物的压力能克服前述反力，则会将分离块推移出来。爆炸产物的压力可由下式确定：

$$P = \frac{QE(r-1)}{\frac{\pi}{4}d^2L} \quad (4)$$

式中 P——爆炸产物压力，Pa；

E——炸药热容，J/kg；

r——爆炸产物等熵面指数；

$\frac{Q}{L}$ ——线装药量， $kg \cdot m^{-1}$ ，对于导爆线为 $Q/L = 0.012n$ ；

n——炮眼中导爆线条数。

因此，爆炸产物所产生的总推力为

$$PNdL$$

(6)

令

$$PNdL = \Psi[\sigma_p^b](BH - NdL)$$

并将式(2)~(5)之值代入,且查得导爆线的E和r时,则炮孔间距为

$$a = \frac{L}{H} \left[\frac{(4 \sim 9)10^4 n}{\sigma_0 d} + d \right] \quad (7)$$

式中的4~9随岩石的性质及劈裂方向与天然裂隙的关系变化,即当开采韧性岩石或是劈裂方向与天然裂隙垂直时取下限,即炮眼间距小;开采脆性岩石或是沿天然裂隙劈裂时取上限,即炮眼间距要大。

如前所述,形成贯穿裂缝是靠岩石中的应力波,而向外推移岩石则是靠爆炸产物的压力。但应力值过大则会使岩石破碎,而不能形成贯穿裂缝,为此必须控制应力波,使应力值既稍大于岩石的极限拉伸强度或断裂强度,使岩石沿布孔面形成贯穿裂缝,又不致破坏分离块和岩体,所以采用加大药包直径与炮眼直径的比值的办法。而由于装填方式不同,其具体比值也有差异,现分述如下。

(一) 无填塞导爆线药包

爆破分段高1~1.5米,分段底部用锯机掏槽,槽深1米,布孔面距坡顶线的距离为1米,布孔面长度为15~30米,孔深为分段高度的0.9~0.95倍。炮眼中不用炮泥填塞,用导爆线为药包,每孔中的导爆线根数相同,为1~3根。此时,炮孔直径与药包直径的关系为

$$d = (5 \sim 15)d_b \quad (8)$$

若炮孔直径d=45毫米,用1根导爆线时系数为15,用3根时系数为5。在炮孔直径一定的情况下,视布孔面与天然裂隙的关系确定用几根导爆线,在容易形成贯穿裂缝的情况下则用1根,系数取上限;在不易形成贯穿裂缝的情况下,取下限值,即增加导爆线的根数。此时炮孔间距按式(7)计算。各炮眼均用导爆线连接,同时一次起爆。

(二) 水封导爆线药包

在分段布孔情况与上述情况相同时,仍用导爆线做药包,但塑料水袋将炮眼填满,水既是填塞材料又是炸药包与孔壁的间隔材料。此时,药包直径与炮眼直径的关系为:

$$d = (1.5 \sim 3)d_b \quad (9)$$

但此时的炮孔间距则为:

$$a = (10 \sim 15)d_b \quad (10)$$

由式(9)可知,不可能用直径为4.5~9毫米的炮眼,显然需要加大药包直径。当炮孔最小直径为25毫米时,药包直径约为16~8毫米,也即可用3~5根导爆索。虽然药径加大了,但药包的长度可以缩短到100毫米,装药量仍可不增加。

在引爆之后,先是在炮眼周围形成初始裂缝;而后由于受垂直面反射波的作用而使初始裂缝向相邻炮眼发展,一直到相邻炮眼之间相互贯通起来;最后,端部的炮眼从炮眼上部的裂缝一直扩展到自由面,向下则延伸到构造裂隙或预先切出的掏槽缝。整个裂缝一直

推移扩大约30~50厘米，完成切割任务。有关试验资料证明，围边爆切割出的分离块轮廓规则，往往比劈楔法的切断面还要规则。因此，尽管用围边爆破法切断出的分离块，强度和出材率稍有降低，但其降低的幅度不大，据国外的试验资料，只有百分之几。因此，围边爆破法在石材开采中仍是一个可行的方法，只有具体参数的确定需要根据矿山的具体情况试验确定。

第二节 金属燃烧剂爆破

普通工业炸药在炮眼中引爆之后的瞬间产生高温高压爆炸产物，由于压力增加迅猛而产生强大冲击波，使岩石破坏。其爆炸产物是在引爆之后，炸药中各种成分间所发生急剧的化学反应而生成的，其爆速可达每秒6850~7660米，温度可达3425~4300°K。在用炸药开采石材时，就必须控制冲击波的作用，以减少对石材的损伤。而金属燃烧剂则是在低燃速（每秒11.24米）的条件下产生 $2192 \pm 280^{\circ}\text{C}$ 的温度，也就是主要在高温下的氧化还原反应所产生的气体膨胀，使爆破介质在准静态下胀裂。胀裂过程中没有冲击波及其折射和反射，在密封条件被破坏之后，气体逸出，温度降低，压力亦迅速下降。据宜兴大理石公司的测定资料表明，工业炸药爆破的地震强度约为同量金属燃烧剂爆破的地震强度的20余倍，而2号岩石炸药爆破的噪声则比金属燃烧剂爆破的噪声高11分贝。由于金属燃烧剂没有冲击波的作用，无飞石、地震效应低、噪声低，在石材开采中是一种颇为有效的爆破方法。

根据宜兴和贵阳大理石厂的使用经验证明，对于原来用人工开采或常规黑火药爆破开采的矿山，采用金属燃烧剂爆破（以上两厂称之为“近人爆破”）可以大大提高出材率（提高3~3.5倍）和采矿工效（提高3倍）；而对于天然节理裂隙较为发育的矿体来说，金属燃烧剂爆破可能会优于各类锯石机开采。

（一）基本方案

采场的基本布置方案与钻眼打楔法大致相同。一般仍是分层回采，一个工作台段分为2~3个爆破分段，爆破分段高度可为1~3米不等，目前常用的分段高为1~1.5米，个别有达到3米的，3米以上的尚属少见。工作区段或工作线的长度一般为10~50米。在大多数情况下是首先用各种锯切机械或连续钻眼进行水平掏槽切断，用爆破法实际上只是切断最后一个垂直面，在具有弱结合面的天然层理和裂隙的情况下，亦可不必进行掏槽切断，而完全依靠爆破法回采。

（二）爆破参数确定

如前所述，石材开采爆破的基本问题是克服岩石的拉伸强度，使岩石沿布孔面断裂。因此，只要测得所用爆破材料在炮眼中产生的压力和岩石的拉伸强度或断裂韧性值，就可以确定主要爆破参数。由于金属燃烧剂爆破基本上可视为准静态下的胀裂，可以不考虑爆炸动力学问题，使计算大为简化。有关按燃烧剂膨胀压力和岩石断裂韧性计算爆破参数的公式，将在下节膨胀剂静态爆中介绍。本节只介绍宜兴大理石公司的经验公式。该公司的公式是以单位面积的装药系数计算单孔装药量为基础，即

$$q = \frac{CHL}{L/a - 1} \quad (11)$$

式中 q ——单孔装药量, g;

C ——装药系数, 该公司矿山为 $C = 140 \text{ g/m}^2$;

H ——分段高度, m;

L ——工作线长度 (即石堞长度), m;

a ——炮孔间距, m。

从此式可以看出, 这实际上还是以单位体积的药耗进行计算的, 只要在分子上乘以分离块的宽度, 则 C 就应是每立方米的单耗, 而分母则是炮眼数目。可以看出, 式中并未涉及到力的计算, 其中的 C 值也系取自试验数据, 按宜兴大理石厂的试验资料为 140 g/m^2 , 而相应的炮孔间距亦是试验取得的。该厂的其它爆破参数如下:

孔深 l 为爆破分段高度 H 的 $2/3$ 或 $3/4$, 为保证锯切面平整, 或爆破分段前有阻碍物时, 取 $3/4$ 。或者加深到 $(0.8 \sim 0.9)H$ 。

孔距 a , 试验取得, 宜兴厂的装药孔距为 40 厘米。有时在装药孔间还钻有不装药的导向孔, 孔深与装药孔相同。是否设导向孔, 视段高及岩石完整程度而定。但 a 值必须保证小于布孔面至坡顶的距离 B 。

分离块宽度, 即布孔面至坡顶肩线宽度, 或分段宽度 B , 该公司取为 $1.2 \sim 2$ 米。

每孔填塞总长度 l , 一般要大于 $2l/3$ 。

该公司爆破切断面的炮眼布置如图 1—1 所示, 炮眼内的装药结构如图 1—2 所示。

由图 1—1 可见, 其两端炮眼与自由面的距离取为大于 $1.5a$, 但要小于分段宽度 B , 此值不可过小, 否则容易产生两端缺角。

另该公司还将每孔装药量取为定值 (70 克), 而后计算炮眼数, 再根岩石的具体裂隙情况将余量分摊在端部炮眼中。这实际上仍是前述经验式的变形。在有横贯工作面的裂隙时, 则视裂隙的不同情况分别调整钻眼的间距、深度和位置。

使用金属燃烧剂的一个重要问题是填塞问题, 即必须填塞紧密, 孔口保证严密没有漏气现象。只有如此方可保证爆破效果, 发挥金属燃烧剂膨胀力。

第三节 膨胀剂静态爆破

所谓膨胀剂静态爆破, 实际上是用类似膨胀水泥一类的膨胀剂做为爆破材料, 主要是利用膨胀剂遇水后的水化作用过程中的体积膨胀, 将岩胀裂。这种爆破, 既无任何冲击波, 也没有地震效应, 更没有飞石及噪声, 岩石所受的力基本上是静压荷载。因此, 人们称之为静态爆破。

这种膨胀剂起源于日本, 在国外已大量用于建筑物拆除、岩石基槽开挖、巷道 (隧道) 掘进及某些矿山开采。在我国也于 1982 年研制成功了两种型号的膨胀剂, 一种是湖北武汉建筑材料工业学院的 JC—1 系列静态爆破剂, 一种是国家建筑材料工业局建筑材料科学研究所的力士牌 SCA 系列无声破碎剂。这两种膨胀剂均已通过鉴定, 并同时获得奖

励。根据这两种膨胀剂在不同采石场进行的试验表明,膨胀剂静态爆破在石材回采中是大有可为的。

(一) 膨胀剂的基本特性

可以认为目前我国两种型号的膨胀剂都是膨胀剂本身与水拌和后,在水化作用下产生体积膨胀,在此膨胀过程中的膨胀力均施加于炮眼壁上。当膨胀压力大于岩石的抗拉强度时,使岩石产生断裂;压力再行增加至一定限度时,沿布孔面形成贯通裂缝,使岩石劈裂。如SCA系列的膨胀压力约为 $(300\sim500)\times10^5\text{Pa}$,而一般岩石的抗拉强度约为 $(40\sim130)\times10^5\text{Pa}$,可见膨胀压力大大超过岩石抗压强度。

两种膨胀剂的压力都随时间的增加而变化,都是在最初24小时之内压力增加得较快,而后还有所增加但趋于平缓。当然两种膨胀剂的压力增长梯度是有所不同的,如图1—3所示。

膨胀剂与温度有关,其膨胀压随温度升高而增大,图1—4为SCA—II型膨胀剂在不同温度时的膨胀压情况。显然,20°C时的曲线2的膨胀压始终高于13°C时曲线1约 $(100\sim200)\times10^5\text{Pa}$ 。

JC—1系列膨胀剂也观察到类似的现象,在试验室温低于20°C时,达到一定膨胀压所需的时间要长;而当反应温度迅速增长到100°C时,体积迅速膨胀,无疑膨胀压力亦迅速增大,而当膨胀剂放在热传导性好的岩石(炮眼)中时,压力增加的梯度却相应有所降低;当经过一段时间后,外部介质通过试验容器与膨胀剂发生热交换时,膨胀压力迅速下降。

膨胀压随水灰比增大而减小。图1—5所示SCA—II在不同水灰比情况下膨胀压随时间变化的曲线。可见水灰比小时(曲线1)比水灰比大时(曲线2、3)的压力增加快得多,在相同时间内的压力也大得多。JC—1系列的水灰比在0.25~0.3时,膨胀压力达到最大值。

为提高膨胀剂作用于孔壁上的压力,亦可加大孔径。但这并不是膨胀剂自身水化反应的问题,而是因为单位孔长内,若直径加大一倍,其体积将增大4倍,这加大到四倍的体积在膨胀时施加于孔壁上,但孔壁面只增大到2倍,显然单位面积上的压力增大到2倍。

正由于膨胀剂的这些特点,在使用时就可以根据操作的需要而进行调节。如岩石抗拉强度较大,可以适当降低水灰比,反之,可加大水灰比以节省膨胀剂,又如使用膨胀剂的环境温度较高时,可以适当加大水灰比,以降低其体积膨胀速度,防止喷口,或在选用SCA系列时,可用SCA—1型膨胀剂;要求快速劈裂时,可减少水灰比,或用温水拌浆等等。

(二) 膨胀剂的胀裂机理

包括金属燃烧剂在内,膨胀剂的胀裂作用主要是它在孔内膨胀时,孔壁在径向(法向)受压,而在切向则受拉。随着膨胀压力的增大,岩石中的拉应力不断增大。当炮孔以大到相当距离布置于一个平面内时,则在这个面的孔壁上的拉应力首先达到岩石的抗拉强度,出现径向张开裂缝。由于布孔面上为岩石连结的最弱处,因而成为主应力面,这个面上的拉应力最大,由于膨胀压的不断增大,使此面上孔壁径向裂缝贯通,形成劈裂面。

在一定条件下,各种膨胀剂可能产生的最大压力是已知的,而岩石的断裂韧性等力学性质是可以测出的,既然布孔面为主拉应力最大的面,则炮孔的间距大小就是能否胀裂成缝的主要问题了。也就是靠炮孔内膨胀剂的膨胀压力克服岩石的断裂阻力。炮孔距离越大,

其阻力也就越大，反之亦然。当然，如前所述孔径加大，膨胀压也会增大，也是应该选定的参数，但在一般情况下，孔径往往都是已定了的，只是在极特殊的情况下才改变孔径。

基于这个原理，可以进行炮孔间距的计算，以确定膨胀剂静态爆破的参数。尽管基本原理相同，但因试验条件及其它因素的差异，目前孔距计算公式可有两种，一为武汉建筑材料工业学院刘清荣、蒋进军所提出的公式；另一为合肥水泥研究院吴恒金所提出的公式。兹分述如下。

刘清荣等所提出的炮孔间距公式为：

$$a = 2 \left[\sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{P}{3}\right)^3}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2 + \left(\frac{P}{3}\right)^3}} - r \right] \quad (12)$$

式中 $P = \frac{3A_1 C_1 - B_1^2}{3A_1^2};$

$$q = \frac{27A_1^2 D_1 + 2B_1^3 - 9A_1 B_1 C_1}{27A_1^3};$$

$$r = -\frac{B_1}{3A_1};$$

$$A_1 = K_{10} + \frac{32BK_{10}(1-\mu)^2}{\sqrt{2} E\pi^2} + \frac{2BK_{10}(1+\mu)}{E};$$

$$B_1 = -\frac{2AR}{\sqrt{\pi}};$$

$$C_1 = \frac{64BRK_{10}(1-\mu)^2}{3\sqrt{6} E\pi};$$

$$D_1 = -\frac{4A\sqrt{\pi} R^2}{3\sqrt{3}};$$

K_{10} ——岩石介质的断裂韧性， $\text{kg/cm}^{3/2}$ ；

E ——岩石的弹性模量， kg/cm^2 ；

μ ——岩石的泊松比；

R ——炮孔直径；

A ——膨胀剂性能参数， $A = 222$ ；

B ——膨胀剂性能参数， $B = 0.31$ 。

JC-1 系列膨胀剂曾在宜兴大理石公司进行了开采试验。试验台阶高1.2米，最小抵

抗线（即布孔面至坡顶眉线的宽度）为1.1米，选用炮眼直径为40厘米，测得大理石断裂韧性 $K_{I0} = 93.5 \text{ kg/cm}^{1.5}$ ，弹性模量 $E = 85 \text{ kg/cm}^2$ ， $\mu = 0.25$ 。将这些数值代入式（12）及其所属各式可得炮孔间距 $a = 50 \text{ cm}$ 。而试验确定的最优间距为40~45厘米，两者接近。

吴恒金所提出的公式是在分析了膨胀剂静态爆破岩石的断裂力学性质之后得出的，其基本公式为

$$q_0 = \frac{\sqrt{a} K_{I0}}{2\sqrt{2} R} \quad (13)$$

式中 q_0 ——岩石胀裂所必需的膨胀压力；

a ——炮孔间距，cm；

R ——炮孔半径，cm；

K_{I0} ——岩石断裂韧性， $\text{kg/cm}^{3/2}$ 。

在现场条件下，若测得一定时间内的膨胀剂膨胀压力 q ，而且 $q > q_0$ 时，则可将式（13）改写为如下形式，以求得炮眼间距。

$$a = 8(Rq/K_{I0})^2 \quad (14)$$

若使用SCA-Ⅲ型膨胀剂，按图1—3的曲线，在温度为 $13 \pm 2^\circ\text{C}$ 条件下的8小时膨胀压力约为 110 kg/cm^2 ，仍以宜兴大理石公司的岩石为例，其断裂韧性 $K_{I0} = 93.5 \text{ kg/cm}^{3/2}$ ，炮眼半径 $R = 20 \text{ cm}$ ，代入式（14）可得

$$a = 44.29 \text{ cm}$$

与前述结果相近。但应指出，图1—3所示的曲线为在实验室条件下取得的结果，其膨胀压应比导热条件较好的现场岩石中测得的膨胀压要高，如果要用于实践，这个曲线图应根据现场条件重新测定修正，方可据以进行计算。

还应指出的是，用此式计算时，膨胀压与断裂韧性之值相差越大，则炮眼距也越大。这固然可以节省凿岩工作量和膨胀剂数量，但实际上过大的孔距往往导致断裂面不够平整。此时，可以缩短胀裂时间，用较低的膨胀压，以保持断裂面的平整。

无论用哪个公式，均需根据现场条件进行修正，方可付诸实用。

使用SCA型膨胀剂时的参数，按建筑材料科学院所提供的参考数据为：孔径35~40毫米；孔距（ a ）20~40厘米；最小抵抗线（ W ）100~200厘米；孔深等于段高；单位耗量为5~15 kg/m^3 。

（三）膨胀剂的使用

炮眼打好后，即可制备膨胀剂浆。先把洁净水约1.5~1.7公斤放入塑料桶内，然后再倒入一袋5公斤的膨胀剂，用手提式搅拌机搅拌。用手搅拌时，要戴橡胶手套，用力拌和均匀。搅拌后的浆体要在十分钟内用完，最好随拌随用，以免失效。

装填时，必须灌装密实。垂直孔可直接灌入。水平孔可用挤压式灰浆泵压入孔内，然后用塞子堵塞；或用0.25~0.28的水灰比的膨胀剂胶泥搓条塞入孔中捣实。

在春夏秋季节，装好的炮孔可不用覆盖，裂纹出现后，可用水浇缝，加压膨胀压的增

加。在冬季，要用草席覆盖保温，裂缝出现后，可用热水浇缝，或用热电丝插入孔中通电加热，以加速水化反应。

为了安全起见，在装填时最好配戴防护眼镜。装填后5小时内，不要在近距离直视孔口，以防万一发生喷出现象时伤害眼睛。膨胀剂浆体稍有腐蚀性，碰到皮肤时要立即用水冲洗。

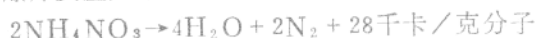
在使用SCA系列膨胀剂时，要根据环境温度选择型号，不能互用。其各型的适用温度分别为SCA-I型，20~35℃；SCA-II型，10~25℃；SCA-III型，5~15℃；SCA-IV，-5~8℃。存放时要保持干燥，不可受潮。

二 控制爆破开采方法*

第一节 概 述

(一) 常规爆破

自然界中存在着各种爆炸现象，根据其产生的原因和特征，可归纳为物理爆炸，化学爆炸，与核爆炸三种基本类型。炸药爆炸属于化学爆炸。例如硝酸铵在密闭条件下加热至300℃以上，产生爆炸反应如下：



凡使用猛性炸药以破碎岩石为目的的爆破，通常称为常规爆破。常规爆破时产生放热反应，反应迅速极快，并生成大量气体。冶金等矿山在常规爆破中所使用猛性炸药威力很大，爆炸热量为600~1300千卡/公斤，爆炸温度高达1000~4500℃，爆炸速度2000~7000秒/米，生成气体量为600~1000升/公斤。炸药爆炸时，巨大能量的释放、传递、和作功，都是在几十毫秒之内完成的，炸药瞬时应力值可高数万乃至数十万公斤/厘米²。可以认为，炸药爆炸实质上就是能量的瞬时转化过程，在这个过程中，炸药的潜能瞬时转化为作用于岩石的机械功，并伴有风和光等效应。

从上述爆炸反应中可以知道，凡炸药都具有放热反应；反应速度快；生成大量气体，炸药的这三种特征称为炸药的三要素。

(二) 控制爆破

所谓控制爆破，即是通过炸药性能的某些方面加以控制，或者采用不同于常规爆破药剂，通过恰当的爆破方法，合理的爆破参数，和相应的爆破工艺，使岩石不受炮伤或明显炮伤而保持原有强度，达到人们要求达到的爆破效果的爆破技术，称为控制爆破或称为“主动防护”的爆破技术。

控制爆破技术，我国是从六十年代起，在吸收国外先进经验的基础上研究和推广起来的。该项技术在煤炭、冶金等矿山，人防工程，以及其他一些土石方工程的施工中，都显著地提高了工程质量，取得了良好的效果，同时也积累了丰富的经验。然而，以控制爆破

* 摘自于永年等编“大理石矿床露天开采”

原理,研究和选用不同药剂,用于大理石开采,则是八十年代初开始的。

大家知道,煤矿和冶金等矿山使用控制爆破,仍以岩石炸药为爆破能源,以改变爆破方法、参数和工艺为手段,目的是在爆破中使用岩不受明显破坏、尽可能保持原有的强度和稳定性,力争不要支护或减轻支护结构需要承受的载荷;但对爆炸的岩石,却要求得到比较好的破碎效果。

如采用岩石炸药,用与其他矿山同样的爆破方法开采大理石,显然不可以的。大理石属于保护性开采矿种——这是人们所共知的,它严于要求整体成型分离,并采出符合荒料规格要求的大块石料。因此,采用控制爆破技术开采大理石,不仅要求原岩不受炮伤,被分离的土块石料同样不能受到炮伤。这是与其他矿种开采的根本区别。

为达到大理石整体成型分离目的,研究大理石的属性与构造,研究爆破方法、爆破工艺和爆破参数无疑是重要的;然而,对爆破能源——药剂的研究同样是重要的。近年来国内比常规爆破得到较大幅度地提高。

第二节 爆破机理浅析

炸药爆破岩石的过程是非常复杂的,制约条件也很多,至今人们对它的爆破破坏岩石机理仍然了解的非常不够。学术界在爆破机理研究中存在着许多假说,可归纳为三种:爆轰气体产物膨胀推力破坏理论;应力波反射破坏理论;气体推力和反射应力波共同作用理论。

尽管大理石控制爆破采用的药剂不同,但其爆破机理与常规爆破却是相似的。本节拟参考常规爆破破坏岩石的有关理论,试对大理石控制爆破机理作一些分析和探讨,供读者在理解大理石控制爆破时的参考。

(一) 药剂性能

大理石控制爆破采用的药剂与常规爆破不同,爆炸参数也不一样,从以下分析中可以知道。

1. 黑火药在有些大理石矿山的开采中使用比较普遍,与岩石炸药相比,具有炸速低、热能少、猛力低、爆力弱以及气体生成量小等特点;其爆炸应力值仅为岩石炸药的 $1/6$ 。黑色火药与岩石炸药性能比较见表1。黑色药爆炸时,不产生强大的冲击波,爆轰气体作用于孔壁周围,不足以造成岩石粉碎,可以认为岩石承受的是一种近似静压荷载。

2. 金属燃烧剂爆炸时反应速度非常缓慢,在密闭状态下只有11.24米/秒,仅为2号岩石炸药的 $1/320$;当加热至760°C,爆炸反应如下:



金属燃烧剂爆炸反应,虽然能产生1000°C左右的高温,但不能生成大量气体,不会从高压气体中得到强大的轰炸膨胀推力,也不会产生强大的冲击波。其爆炸应力值大约只有岩石炸药的 $1/25 \sim 1/150$,甚至更小。一旦岩石被胀破,爆轰气体迅即泄去,压力急骤下降。可以认为,金属燃烧剂爆破是一件静态胀裂。金属燃烧剂与2号岩石炸药的主要性能对比,参见表1。

3. 静态膨胀剂是不需引炸,既不产生炸轰气体,也不产生冲击波和体积膨胀药剂。

膨胀剂一般由氧化钙和无机盐化合物以及有机复合添加剂组成，加水后，其反应式如下 ..



反应过程中，氧化钙的晶体由正方形变为菱形，在自由膨胀下，其体积可增加到三倍。当温度为20℃、火药比为0.3：1时，体积自由膨胀4倍。体积膨胀的反应速度与反应温度有直接关系：随温度上升而加快。当反应温度上升到最高值（炮孔中80℃左右）的开始下降至常温。但这一进程相当缓慢，往往需要十几小时乃至几十个小时才能完成。当图1—6所示即膨胀压力随时间变化而变化的曲线。

金属燃烧剂、黑色火药与2号岩石炸药主要性能对比 表 1

项 目	单 位	金属燃爆剂	2 号岩石炸药	黑色火药
燃速（爆速）	米／秒	密闭状态11.24 非密闭状态0.16	3600—42000	<400
发热量（爆热）	千卡／公斤	947—1057	881	590
燃烧温度（爆温）	℃	2192±280	2514	—
威 力	公斤米／克	3.12±0.41	320	60毫米 ³
火焰感度	毫米	上限—25 下限—35	—	—
猛 度	"	无	12以上	≥ 2
气体发生量	升／公斤	—	383	260
摩擦感度		0	16—18	—
冲击感度		0	20	—
发火温度	℃	760	186—230	—
压 强	公斤／厘米 ²	2000	n万—n+万	—

综上所述，可以看出：大理石控制爆破所采用的药剂尽管不同，但基本是两种类型，即需要引爆和不需要引爆。但，不管那一种类型药剂，它们都具有反应速度缓慢，气体发生量小，没有冲击波，或者虽产生一定冲击波但对岩石的整体成型切割不起破坏作用。然而，任何一种药剂又都同样具有大于岩石抗拉强度、足以把岩石裂开的应力值。大理石的静载抗拉强度一般为50~90厘米²／公斤，仅为其抗压强度的1／18~1／12。大理石的这一特性为整体成型切割提供了依据。

（二）排孔整体成型切割机理试析

在大理石控制爆破开采中，不采用单个药包爆破，而使用排孔药包同步齐发爆破。对排孔贯通的机理目前还缺少专门研究，兹根据常规爆破成组药包破时，岩石破坏特征试作

一些分析。

药剂在炮孔中爆炸，爆破介质（岩石）产生应力波，且以同心球向外传播，如图 1—7（a）。沿应力波阵面的切线方向，存在着拉应力（ $\delta_{拉}$ ），垂直切线方向，则存在着压应力（ $\delta_{压}$ ）。排孔同步齐发，相邻两孔的应力波相遇时由于应力叠加作用，在切线方向形成合成拉应力（ $\delta_{合}$ ），如图 1—7（b）当合成拉应力的值超过岩石的抗拉强度时，则沿炮孔连心线产生径向裂隙，因炮孔间距小于最小抵抗线，是最薄弱的地段，所以，在以静载应力作用下，两炮孔间的径向裂隙首先扩展进而贯通。炮孔在贯通的刹那，爆轰气体遂即泄出，应力得不到补给而消失。从而达到整体成型分离而岩石又不受损伤的目的。

对于静态胀裂剂贯穿炮孔可作这样解释：炮孔所承受的是一种法向静载压应力。和切向拉伸应力，由于药剂反应速度非常缓慢压力在炮孔中可保持相当长的时间。在其作用下，沿炮孔连心线上的各点上产生压应力和拉伸应力的合力，这个合力在两个炮孔愈接近，或孔径愈大时，则愈显著，在炮孔连心线与孔壁相交处最集中（其应力分布如图 1—8 所示），当其大于岩石抗拉强度时，在孔壁上应力最集中的地方出现拉伸裂隙。在静压力不断地、缓慢地补给下，拉伸裂隙即沿炮孔最薄弱的地段——炮孔连心线扩展。当两孔拉伸裂隙径扩展相遇后，岩石即沿炮孔连心线胀裂贯通。此时，药剂的膨胀压力并未达到峰值，也不因裂隙而消失，从而继续把岩石推开，完成整体成型分离。

根据上述原理，适当缩小孔距，相应增加最小抵抗线，把应力作用范围控制在岩石内部，可以提高大理石整体成型切割质量；反之，岩石可能产生破断、甚至破碎。

第三节 影响整体成型切割效果的因素

如前所述，整体成型切割是大理石控制爆破的关键，欲达到高质量切割效果，就必须对影响切割效果的因素作出正确分析。然而，大理石控制爆破技术采用时间还不长，许多问题尚有待进一步研究，本节拟借助有限资料和实践，作一些初步分析。

（一）药剂条件及选用

对于大理石整体成型切割整体和成型固然是首要的，但对其切割（分类）下来的石料和母岩是否存在炮伤——即细微的爆破裂隙，则是鉴别整体成型切割质量的标准。从药剂性能分析和实践表明，适合于大理石整体成型切割而又不受炮伤的药剂条件应具备：

1. 放热反应，但不产生很大的热能；
2. 反应速度缓慢，使反应生成的气体得到充分膨胀时间；
3. 具有大于岩石抗拉强度的应力值；
4. 药剂反应时间不宜过长，以致大大增长爆破作业的一次循环时间。

大理石的抗拉强度见表 2。

在大理石控制爆破开采中，用于不同目的，药剂可以不同。我们认为，在其他工程采用岩石炸药的控制爆破如光面爆破，缓冲爆破、段裂爆破以及采用不偶合装药，可以在大理石的剥离、采准工程和不属于大理石矿段中使用，以加快建设速度，提高爆破效率。关于以岩石炸药为药剂的控制爆破技术，许多文献和书籍都有比较详细的论述，本文不再重述。

大理石抗拉和抗压强度对比

表 2

抗拉强度 (公斤/厘米 ²)		抗压强度 (公斤/厘米 ²)	
静 载	动 载	静 载	动 载
50—90	200—400	900—1100	1200—2000

(二) 导向孔的应用

在排孔分离中, 两装药孔中间不装药的孔称导向孔。如果岩体是均质的, 那么岩体内各点的强度也是相同的, 经开孔后无论以体积或者面积计算, 其强度都会减少。按照这样的解释, 当岩石裂隙发育时, 岩石的强度 (或坚固性) 将有所降低, 在外力作用下, 很容易沿裂隙面 (即薄弱面) 断裂。如阻止两装药孔爆破时应力波相遇后产生叠加或应力波反射作用, 将岩石沿裂隙面冲击或拉断, 应在其间增加导向孔。从而创造一个特殊的自由面 (弱面) 使分离面仍沿炮孔连心线发展而不致中途转向, 影响整体成型效果。当然, 导向孔是保护胶结完整的裂隙不致冲断, 对于事实上经少许打击便会裂开的裂隙是不起作用的。

(三) 爆破参数

除药剂性能外, 对整体成型切割起决定作用的就是爆破参数是否合理。主要的爆破参数如下:

1. 孔位、孔深、孔距:

(1) 孔位: 垂直排孔孔位, 应根据开采台阶设计宽度 (一般为 1~1.5 米), 在工作平台上引一条与台顶的平行线, 这条直线, 即分离排孔的连心线。同样, 根据开采台阶的设计高度 (一般不超过 2.5 米), 在开采面的底端引一条与台顶的平行线, 这条直线, 即是水平分类排孔的连心线。而后, 在连心线上按设计排孔孔距穿孔。

(2) 孔深 (I): 根据经验, 垂直排孔和水平排孔的长度与开采台阶的高和宽的关系, 一般为: 垂直炮孔为开采台阶高度的 0.75~0.9; 水平炮孔为开采台阶宽度的 0.75~0.9。膨胀剂取 0.9, 黑药和燃烧剂取 0.75。

(3) 孔距 (E): 孔距是控制爆破的一个关键参数。开采中所采用的装药孔孔距的经验数据一般为孔径 (d) 的 10 倍左右。

但黑火药控制爆破所采用的孔距则为孔径的 15~25 倍。

2. 最小抵抗线 (w):

药包距工作面的最小距离称为最小抵抗线。为将爆炸应力作用模圈限制在岩石内部, 以提高整体切割效果, 可以孔距与最小抵抗线的关系式表示, 采用:

$$w = (1.5 \sim 2) E \text{ 或 } (2.5 \sim 3) E$$

黑药控制爆破取 (1.5~2) E, 其他控制爆破取 (2.5~3) E。总之, 可以根据工作面的情况, 岩石的性质与构造进行调整。

3. 装药系数及装填结构: