

爆破

BAM

PM

控制爆破专辑



第11卷
(总第46期)

1994

ISSN 1001-487X



9 771001 487008

爆破——控制爆破专辑

1994年10月

第11卷专辑

(总第46期)

目次

●控制爆破理论●

- 控制爆破原理.....刘清荣 等(1)
- 控制爆破机理及装药量计算.....朱忠节(17)

●控制爆破综述●

- 控制爆破技术现状.....关志中 等(23)

●水下爆破●

- 水下爆炸(上).....霍永基(27)
- 水下爆炸(下).....霍永基(34)
- 水下爆夯技术设计与施工.....魏有堂(42)

●控爆药量计算●

- 工程爆破药量计算的基本公式.....金骥良(46)
- 国内控爆拆除中常用经验计算式诺模图.....樊建诚(50)
- 钢筋混凝土爆破中药量的控制.....金昌礼(54)
- 钢筋混凝土拆除爆破药量计算与飞石控制.....黄进(57)

●光面爆破●

- 光面爆破的理论与应用研究.....袁晓冈(61)
- 光面爆破参数设计探讨.....秦明武(65)
- 光面爆破断裂原理探讨.....吴恒金(68)
- 光面爆破技术研究.....刘宏根(74)
- 岩巷中深孔光爆若干技术问题.....陈士海(77)

●预裂爆破●

- 露天块状岩体的深孔预裂控制爆破.....高晓初(80)
- 软弱层状岩体中的预裂爆破.....成光(82)
- 预裂爆破的一种计算方法.....先葵(85)

●控制爆破的应用●

- 黄石上窑立交桥的控爆设计与施工.....何守仁(92)
- 掏槽控制爆破及其参数的研究.....张天锡(94)

石方控制爆破	叶晓华 (97)
楼房切割爆破的探讨	潘国斌 (98)
微差控制爆破在中厚煤层炮采工作面的应用	郭志兴 (102)
爆破对新浇混凝土的影响和控制标准的研究	朱传统 (105)
聚能管串珠控制爆破在花岗石开采中的应用	徐国顺 等 (109)
钢筋混凝土板状基础的控制爆破	程 荣 (111)
新奥法施工中的控制爆破	舒大强 (113)
预裂爆破在清江隔河岩电站厂房高边坡的应用	陆文兴 等 (117)
禹门口提水工程基坑开挖控制爆破	洪维元 (121)
控制爆破抛掷方向的数据分析	高尔新 等 (125)
露天矿邻邦控制爆破研究	王 林 (128)
定向控制大爆破在边坡工程中的应用	欧阳骥 (132)
粘土中的控制爆破	赵 根 等 (136)
沟槽控制爆破技术研究	高文学 (138)

●拆除控爆●

控制爆破拆除100t级水塔	王智慧 等 (142)
拆除控制爆破炮孔装药量的确定	戴 俊 (144)
立窑钢筋混凝土框架基础内控爆拆除	张孝友 (147)
控制爆破拆除无倒塌位置楼房	王宁璋 (150)
烟囱的控制爆破拆除	陈华腾 等 (153)
较高框架结构大楼控爆拆除	谢先启 (157)

●水压控制爆破●

水压爆破的药量计算	徐天瑞 (160)
水压爆破及水压定向爆破	郝庆桃 (161)

●断裂控爆●

断裂控制爆破	谢浩辉 (165)
岩石爆破中的断裂控制	陈益蔚 等 (168)

●控爆堆体块度●

用预破碎药包控制定向爆破堆体块度的研究	姚 尧 (176)
---------------------	-----------

●深孔控制爆破●

在居民区附近进行深孔控制爆破	陈煌华 (180)
----------------	-----------

●控爆飞石●

控制爆破中的飞石问题	张 奇 (183)
------------	-----------

●控爆管理●

试论城市控制爆破中的安全管理	刘建年 (186)
拆除爆破技术设计的论证工作	秦尚文 (188)

控制爆破原理

刘清荣 蒋进军 (武汉工业大学 430070)

普通工程爆破,已有几百年历史了。控制爆破在国内外只是从本世纪五十年代开始、六十年代以来才迅速发展起来的一项新型爆破技术。我国对控制爆破的研究、设计和施工等方面,居世界先进国家之列。早在抗日战争时期,曾运用某些控制爆破技术来炸毁敌寇的工事和进行过控爆拆除工程。五十年代初期,冶金矿山曾采用控制爆破来加深掘进掏槽和控制井下峒室的周边整齐。1956年,武汉长江大桥蛇山桥头开挖工程,曾采用控爆施工方法。1958年,东北工学院曾应用定向控制爆破技术拆除钢筋混凝土烟囱和首次成功地进行了高温($800 \sim 1000^{\circ}\text{C}$)控制爆破。进入六、七十年代,在采掘工程、水利电力工程以及铁路、公路工程中,已推广应用光面爆破、预裂爆破和缓冲爆破等控爆技术。城市控爆拆除工程也相应开展。1973年,北京铁路局采用控爆拆除了旧北京饭店两千余 m^3 的钢筋混凝土结构物。1976年,工程兵工程学院曾用控制爆破安全地拆除了天安门广场附近总面积达万余 m^2 的三座大楼。1979年,铁道部第四勘测设计院成功地采用水压控制爆破拆除高压滤水罐。八十年代,我国将控制爆破创造性地应用到高难度、极精巧的人体疾病治疗(爆除膀胱结石),取得了良好效果。可以预料,随着控爆理论和实践的深入研究,控制爆破在我国经济建设和国防建设中,必将得到进一步推广应用和做出应有的贡献。

本文仅就控制爆破的定义、类型、基本原理与措施进行讨论。

1 控制爆破的定义和要求

迄今为止,国内外对控制爆破的定义尚无统一的认识。一种看法是,该种爆破多用于城市旧建筑物的拆除,故称为城市爆破或拆除爆破;另一种看法是,应将光面、预裂爆破等也称为控制爆破。从爆破学科来说,控制爆破和常规爆破是有区别的。譬如,在拆除楼房时,常规爆破法可不考虑倒塌方向、范围以及地震波、空气冲击波和飞石危害等,而控制爆破法必须考虑上述因素。概括起来说,控制爆破可定义如下:

根据工程要求和爆破环境、规模、对象等具体条件,通过精心设计、施工与防护等技术措施,严格地控制爆炸能释放过程和介质破碎过程,既要达到预期的爆破破碎效果,又要将爆破范围、方向以及爆破地震波、空气冲击波、噪音和破碎物飞散等危害控制在规定限度之内,这种对爆破效果和爆破危害进行双重控制的爆破,称为控制爆破。

控制爆破除满足一般常规爆破的《爆破安全规程》的各项规定以外,还应全部或部分地达到下列几点要求:

1.1 破碎程度

控制爆破对于大多数的被爆体,通常要求爆后“碎而不抛”或“碎而不散”,甚至要求“宁裂勿飞”,即形成龟裂型松动爆破。在拆除建筑物和构筑物时,控制爆破则要求原地坍塌或就近坍落。在开采建筑石材和筛面石材时,则要求切割成缝,成型地与原岩脱离。

1.2 破坏范围

控制爆破的破坏范围必须严格地与设计尺寸相符,其误差不得超过设计规定值,做到准确定位,即爆上留下(或爆下留上)、爆左留右(或爆右留左)、爆前留后(或爆后留前)及爆边留中(或爆中留边)等。换言之,控制爆破应有高水平的爆破设计和施工工艺,做到准确地、整齐地切割预爆部位,同时保持保留部位完整无损。

1.3 坍塌方向

对于高层建筑物和结构物(高层框架结构、烟囱、水塔等),爆破后要求倒向指定的方向,避免在坍塌过程中危及附近建筑群或管、线网设施。在铁路或公路旁边坡进行爆破时,还必须控制爆堆的堆积形状和范围,以免影响车辆正常运行。

1.4 危害作用

通过合理选用控爆参数、起爆工艺与加强防护等技术措施,将爆破地震波、空气冲击波、噪音和飞石等危害作用严格地控制在允许范围之内,确保爆区周围的人和物的安全。

2 控制爆破的主要类型

根据爆破的主控目的和设计要求。在冶金、煤炭、铁路、公路、水利电力、城市建设、地质勘探、建材和化工原料矿山以及国防工程等部门所常见的各种控制爆破,基本上可归纳成以下几种类型:

2.1 三定控制爆破

三定控制爆破主要是指爆破后达到定向、定距和定量的控制爆破。如以控制爆堆抛散方向为主,则可简称为定向爆破。

三定控制爆破常用于水利电力工程中的定向爆破筑坝。此时,不仅对爆破方向应严加控制,而且对爆堆质心的抛掷距离和抛至坝体范围内的爆方量亦需要控制。聚能切割爆破、穿甲爆破以及建筑物、构筑物定向拆除爆破等,均属于定向控制爆破。

2.2 四减控制爆破

四减控制爆破主要是指爆破过程中和爆破后减小爆破地震波、空气冲击波、飞石和噪音的控制爆破。当爆破的主控目的为减小爆破地震波的危害作用时,可简称为减震爆破;同理,当主控目的分别为减小空气冲击波、飞石和噪音的危害作用时,可相应地称为减冲爆破、减飞爆破和减音爆破。

城市建筑物、构筑物、地坪等拆除爆破、路基扩建爆破以及露天矿永久边坡附近爆破等,常用四减控制爆破或减震爆破。

四减控制爆破的最终目标是“四无爆破”,即无震动、无冲击波、无飞石和无噪音。在使用工业炸药和高能燃烧剂爆破条件下,四无爆破难以实现。因而,在爆破器材和爆破方法方面,应另辟蹊径。如武汉建材学院、建材科学研究院水泥所等单位研制成功的静态爆破剂(亦称胀裂剂)可以实现四无爆破。同时,静态爆破剂可以配合工业炸药联合使用,取长补短,充分发挥动、静两态爆破的协同作用。

2.3 成型控制爆破

成型控制爆破是指爆破后被爆介质的分离体或金属材料等加工物具有一定形状和尺寸的控制爆破。建筑石材和饰面石材的成型开采、金属构件的爆炸成型、航天工程特殊型壳体的爆破加工以及光学萤石、冰洲石、水晶、宝石等保护晶体开采时,均可采用成型控制爆破。在城市或厂房内外各类圬工建筑物和构筑物的成型切割爆破,如爆边留中或爆中留边等,亦属于成型控制爆破。

2.4 光稳控制爆破

光面和稳定控制爆破是指爆破后原岩体的切割面具有一定的平整度以及保持原岩体本身稳定性的控制爆破。此类爆破在露天矿永久边坡爆破、铁路和公路的路堑及边坡爆破、井下巷道、峒室及隧道爆破工程中,有着很大的推广价值。国内外所采用的光面爆破、预裂爆破、缓冲爆破等,均属于这一类型的控制爆破。

2.5 联合控制爆破

上述四种类型中,很显然、成型控爆、光面和稳定控爆以及定向、定距、定量控爆,均属于提高和改善爆破质量方面的控制爆破;而减震、减冲、减飞和减音控爆,则属于减小甚至部分地消除爆破危害方面的控制爆破。在实际爆破工作中,经常会遇到既要求控制爆破质量,同时又在安全上有严格要求的爆破,这时,便需要不同控制爆破方法的联合使用,即所谓联合控制爆破。例如,在露天矿二次破碎工程中的定距减飞控制爆破;石材开采工程中的成型减震控制爆破;城市建筑物拆除工程中的定向四减控制爆破。

2.6 特殊控制爆破

在日趋复杂的爆破工程实践中,根据爆破环境、对象、规模等具体条件不同,有时必须满足某一项或几项特殊要求,此类控爆称为特殊控制爆破。例如,对同一被爆体要求一侧抛掷,另一侧松动破碎的抛松控制爆破;水下构筑物一次爆通形成进水口的岩塞控制爆破;高炉、平炉、炼焦炉、高温炽热物和高硫矿床开采的高温控制爆破;爆破排除膀胱结石临床医学方面的医疗控制爆破;应用于紧急情况下的急救、救生和救灾等方面的急救控制爆破;疏通管道、溜井或漏斗口堵塞以及疏松粉体结块物等方面的疏松控制爆破;人工爆炸合成金刚石等方面的合成控制爆破以及用于军事、保卫和国防工程中的特工控制爆破;等等。

控爆类型还不限于上述几种,有许多控制爆破法尚在不断的改进与创新之中。

3 控制爆破基本原理

通过长期的控制爆破实践和理论分析,控制爆破的基本原理可归纳如下:

3.1 等能原理

根据爆破对象、条件和控爆要求,优选控爆参数,即选取最优的孔径、孔数、孔距、排距和炸药单耗等,采用合适的装药结构、

起爆方式及炸药品种,以期达到每个炮孔所产生的爆炸能量与破碎该孔周围介质所需的最低能量相等,即使介质只产生一定宽度的裂缝或原地松动破碎,而无剩余的能量造成爆破地震、空气冲击波、飞石等危害现象。

爆炸能量即炸药爆炸后所放出的全部能量。炸药爆炸对外做功,就象一特殊“热机”工作过程一样,其化学潜在能在爆炸反应中瞬间转化为热能,然后靠爆炸气体的膨胀,热能又转化为对外界作用的机械功。单位炸药爆炸能依下式计算:

$$A = Q \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)$$

式中

A ——单位炸药爆炸能, Cal/kg;

Q ——单位炸药爆热, Cal/kg;

T_1 ——爆炸反应终了瞬间爆炸气体的温度;

T_2 ——爆炸气体膨胀后的温度。

根据等能原理要求,炸药周围被破坏的介质只是原地松动破碎,即只形成一些割裂性的裂缝。因此,岩石介质破坏所需能量就等于介质中新表面形成所需的能量。裂纹表面能用 ϕ 表示,单位: kg/cm。故裂纹扩展单位面积所需能量为 2ϕ 。若炸药周围岩石介质得以破坏所需形成的裂纹表面积为 F ,则需要的能量总和为 $2F\phi$ 。

按等能原理的定义,等能原理可用下面数学表达式来描述:

$$WQI\eta \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = 2\phi F \quad (1)$$

式中:

W ——炮孔装药量, kg;

I ——热功当量, 42.7 kg·cm/Cal;

η ——爆炸能利用系数,该值与孔网参数、装药结构、起爆方式等因素有关,须经实验而定。

3.2 微分原理

控制爆破的微分原理是将爆炸某一目标

所需的总装药量进行分散化与微量化处理的原理,故亦称为分散化与微量化原理。“多打眼、少装药”是控制爆破工作者对分散化、微量化原理的形象而通俗的说明。换言之,即将总装药量“化整为零”,合理地,微量地装在分散的多数炮孔中,通过分批微差多段起爆,既达到爆破质量的要求,又显著地降低爆破地震波、空气冲击波、飞石和噪音的危害作用。

在等能原理中,我们要求炸药周围的介质在破坏时只产生裂缝、原地松动破坏。但事实上,当一次药量较大且药量比较集中时,这一点是很难做到的。距炸药一定距离范围内的岩石介质往往得到过度的破坏,产生了塑性变形,有时还会出现抛掷现象,只有在距药包较远处,岩石介质才只形成裂纹,而没有过多的破坏。另外,炸药过于集中,容易形成地震波,降低了炸药能量利用率。微分原理的应用,就是要消除那些由于炸药量过于集中造成的不良效应,使等能原理趋于理想化。因此,微分原理原则上还是以等能原理为基础,只是将药量微分化,亦即将爆炸能量微分化。

根据(1)式,微分原理可用下式来描述:

$$Q\eta \cdot dw = 2\phi dF \quad (2)$$

这里, dw 、 dF 表示对炸药量和破坏体新表面取微分,其它符号的意义与式(1)相同。另外,由于炸药微量化后,气体膨胀后的温度 T_3 会下降,故近似地取 $T_2 = 0$ 。

微分原理广泛用于市区内的一些建筑物的控爆拆除。天安门广场两侧,总建筑面积达 1.2万m^2 的三座钢筋混凝土大楼的控爆安全拆除,是运用微分原理的一个典范实例。该三座建筑物地处闹市,交通频繁,爆破后不允许出现任何人身事故,也不允许损坏周围建筑群及管线网等设施。工程兵科学地、巧妙地高达 439kg 的总炸药量分散地装在 8909 个炮孔之中,平均每孔装药量为 48.8

克,有效地控制了爆破的危害作用。又如瑞典歌德堡市中一条繁华大街上有座大楼,楼前人流车流不断。爆破拆除该座大楼时,将 200kg 炸药分散地装在 800 个炮孔中,平均每孔装药量为 250g ,分成 18 段微差起爆,爆后大楼原地坍落,周围建筑物安然无恙,交通亦未中断。1981年,铁四院在武汉葛店化工厂控爆安全拆除建筑面积 600m^2 、高 21m 框架大楼时,曾将 5.28kg 总药量分散地装在 209 个炮孔中,每孔平均装药 25.3g ,分四段微差起爆,达到了预期的控爆效果。

3.3 失稳原理

在认真分析和研究建筑物或结构物的受力状态、荷载分布和实际承载能力的基础上,运用控制爆破将承重结构某些关键部位爆破松动,使之失去承载能力,同时破坏结构的刚度,迫使建筑物或结构物在整体失去稳定性,在其本身的自重作用下原地坍塌或定向倾倒,这一原理称为失稳原理。

例如,当采用控制爆破拆除钢筋混凝土框架大楼时,根据上述的失稳原理,设计和施工时应当遵守下述的原则:

(1) 钢筋混凝土整体框架结构的控爆拆除方式可分为原地坍塌、折叠坍塌(倾倒)和定向倒塌(倾倒)等,其共同点是,均需形成相当数量的铰支和倾覆力矩。

铰支靠对结构支撑立柱某一部位进行爆破,破坏其支撑能力来形成。依立柱的结构不同,一般可分为素混凝土结构和钢筋混凝土结构。

对于素混凝土立柱,一般只需对立柱的某一部位进行爆破,使之失去承载能力,促使立柱在自重作用下下移,造成偏心失稳,从而形成倾覆所需铰支。

对于钢筋混凝土立柱,则需要对立柱某一部位的混凝土进行爆破,使钢筋出露。钢筋在结构自重作用下失稳或发生塑性变形,失去承载能力,从而形成铰支。钢筋出露长度要依立柱内钢筋的布置形式来定。立柱内

的钢筋一般分为孤立和整体布置两种形式。对于孤立布置的钢筋,则可依靠其偏心失稳来形成铰支,单根立钢筋受压失稳的条件是:

$$P > \frac{4 \pi^2 EJ}{L^2} \quad (3)$$

式中

P ——钢筋所受的垂直压力, kg/cm^2 ;

E ——弹性模量, kg/cm^2 ;

J ——截面惯矩, cm^4 ;

L ——立筋的暴露长度, cm 。

钢筋所受的垂直压力可根据立柱的承载情况来估算,这样,便可从式(3)中解出立柱的暴露长度 L

$$L > 2 \pi \sqrt{\frac{EJ}{P}} \quad (4)$$

即为偏心失稳的条件。

对于整体式布置的钢筋,即使钢筋暴露较长,也很难造成偏心失稳,而往往只能依靠自重作用,使钢筋内应力达到屈服极限,产生塑性流动以致失稳来形成铰支。因此,在这种情况下,就要特别注意破坏位置的选择。通常情况下,为了形成倾覆力矩,宜选用容易形成铰支的部位作为优先突破点,而使诸如整体式钢筋布置形式之类的立柱部位作为延续的铰支形成点,因为这些部位在自重作用下不一定能形成铰支,但在外力矩和自重的联合作用下却容易形成铰支。

通过控制爆破的实践得知,结构的重力倾覆力矩可以从下述的方法获得:

①控爆破坏倾倒方向各个立柱的不同高度来形成倾覆力矩(图1)。

由图1可见,承重立柱I至IV的破坏高度依次取 $h_4 > h_3 > h_2 > h_1$ 。在各立柱与顶板连接处,均应适当地将混凝土炸松以形成铰支。同时起爆所有立柱,由于各立柱下塌位移量不同,框架将以立柱I根部A点为支点,在重力倾覆力矩作用下顺时针转动倾倒(图1a、b)。

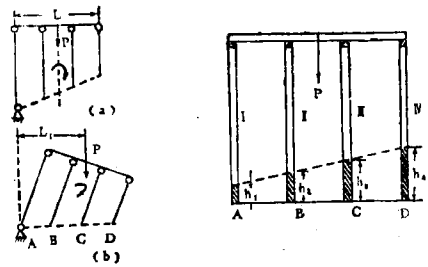


图1 不同破坏高度倾倒示意图

②运用毫秒分段延时起爆技术,使各个立柱按照严格的毫秒延时间隔依序起爆来产生倾覆力矩。

由图2可见,设承重立柱A至D的控爆破坏高度 h 相等,但按图中标出的毫秒延时间隔依序起爆。当柱A和柱B开始向下塌落,框架即失去平衡,形成重力矩;柱C起爆后,框架则以柱D根部为支点,在重力倾覆力矩作用下沿逆时针方向倾倒(图2a)。

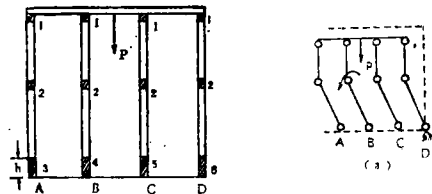


图2 不同延时起爆倾倒示意图(1—6起爆顺序)

③将承重立柱的不同爆高与不同毫秒延时起爆相结合,可以实现建筑物或构筑物整体的原地坍塌、定向倾倒、折叠倾倒等多种拆除形式。图3即为原地中间向下坍塌的控制爆破拆除示意图。西班牙迪茨城中心的医院,须拆除主楼和保留两侧配楼。主楼和配楼之间有一条沉降缝相隔,利用了这一原则,实现了主楼的安全控爆拆除。

(2)必须将整体框架承重立柱一定高度的混凝土加以充分破碎,造成在自重作用

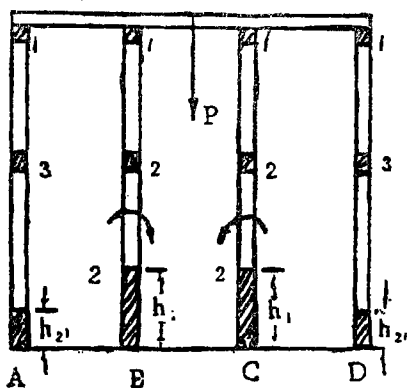


图3 不同爆高与延时原地倾倒示意图

下偏心失稳。被控爆破碎的混凝土将脱离钢筋骨架，当该骨架顶部承受的静压荷载超过其抗压强度极限或达到失稳临界荷载时，立柱便失稳下塌。满足上述条件时的立柱破碎高度称为最小破碎高度 $h_{m.i.n}$ 。此外，承重立柱控爆破碎高度 h 还应满足框架倾倒瞬间有一定的触地冲量，以保证框架断裂和解体。

根据铁科院的经验，钢筋混凝土框架结构承重立柱破坏高度 h ，可按下列式计算：

$$h = K(B + h_{m.i.n}), \text{ m} \quad (5)$$

式中 B ——承重立柱截面的最大边长，
m；

K ——与框架结构坚固程度和爆破条件有关的系数，

$$K = 1.0 \sim 1.5$$

$h_{m.i.n}$ ——承重立柱底部最小破碎高度，m；各不同条件下的 $h_{m.i.n}$ 计算方法可参阅文献(1)

立柱形成铰支部位的控爆破碎高度 hg 可采用下列式计算，即：

$$hg = (1.0 \sim 1.5) B (\text{m}) \quad (6)$$

(3) 在钢筋混凝土框架结构中，为确保失稳，需将框架结构的刚度加以部分或全

部破坏。凡妨碍倾倒的一切梁、柱、板、箍等，必须在主爆之前，预先切除。

3.4 缓冲原理

在优选适合于控爆的爆破能源以及相应改变装药结构等的基础上，缓和爆轰波峰值压力对介质的冲击作用，使爆破能量得到合理地分配与利用，称为缓冲原理。

从爆破理论得知，硝酸铵炸药在固体介质中爆炸时，爆轰波波阵面上的压力可达5~10万个大气压。这一压力首先使紧靠装药的介质受到强烈压缩，特别是在装药半径2~3倍的范围内，由于爆轰波峰值压力极大地超过了介质的动态抗压强度，致使该范围内的介质极度粉碎而形成粉碎区。此区虽然很小，但消耗了相当一部分爆炸能量，微细粉碎极易填充裂缝，不仅阻碍爆炸气体向裂缝中扩张，影响气楔的尖劈作用，缩小了介质的破坏范围和破坏程度，而且还造成爆炸气体的积聚。很显然，积聚的爆炸气体会给飞石、空气冲击波和噪音等危害提供能量。由此可见，粉碎区的形成，既影响控制爆破的效果，又不利于安全。所以，在控制爆破中，应根据缓冲原理，采取相应的技术措施，缩小或避免粉碎区的出现。

缓冲原理的实质，就是通过某些手段，延长炮孔压力的作用时间，从而降低炮孔压力。设爆炸生成物的初始压力为 P_b ，经缓冲后作用于孔壁介质的压力为 P_f ，则称 P_b 与 P_f 之比值为缓冲比，记为 f ，有

$$f = \frac{P_b}{P_f} \quad (7)$$

这里， P_f 可根据对破碎程度的不同要求来确定。

缓冲爆破的方法有很多，可根据缓冲比，亦即不同的缓冲要求来选用。最常用的方法是“不偶合装药”，就是装入的药卷直径小于炮孔直径，药卷周围留有环状空隙。下面就不偶合装药在缓冲爆破中的应用情况进行讨论。

3.4.1 环状间隙充满空气

爆炸生成物的初始压力:

$$P_b = \frac{mDd^2}{8g} \quad (8)$$

式中, m ——药卷内的炸药容重, kg/cm^3 ;

Dd ——炸药爆速, cm/ses ;

g ——重力加速度。

设爆炸生成物的最终压力为 P_0 , 则根据爆炸生成物的压力与体积的关系, 可将爆炸生成物的初始压力、最终压力、炮孔直径及药卷直径写成如下关系式:

$$\frac{D}{d} = \left(\frac{P_b}{P_k} \right)^{\frac{1}{6}} \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中 D ——炮孔直径, cm ;

d ——药卷直径, cm ;

P_k ——爆炸生成物的临界压力, 它等于 $2 \times 10^3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 。

孔壁后岩体内的压力

$$P_f = P_0 \cdot K \quad (10)$$

式中 K ——由空气向岩石传递能量时的折损系数。

由式 (7) 和 (10) 可得:

$$P_0 = \frac{P_b}{fK} \quad (11)$$

将式 (8) 和 (11) 代入 (9), 可得:

$$\frac{D}{d} = \sqrt[3]{\frac{f \cdot k}{Dd}} \sqrt{\frac{8gP_k}{m}} \quad (12)$$

上式的物理意义在于: 在已知炸药的容重、爆速以后, 为达到缓冲比为 f 的缓冲要求, 所需采用的炮孔直径与装药药卷直径的比值, 即不偶合系数。很显然, 不同的缓冲比将要求不同的不偶合系数。在不少情况下, 要求缓冲后的炮孔压力达到使炮孔周围裂纹得以扩展的最小压力。据有关资料, 这个压力值为 18 倍于岩石介质的抗拉强度 σ_b 。

值, 即

$$P_f = 18\sigma_b \quad (13)$$

这时有:

$$f = \frac{P_b}{P_f} = \frac{mDd^2}{144g\sigma_b} \quad (14)$$

代入 (12) 式, 有

$$\frac{D}{d} = \sqrt[3]{\frac{Dd \cdot K}{72\sigma_b}} \sqrt{\frac{2mP_k}{g}} \quad (15)$$

D/d 即为该特定情况下所求的不偶合系数。

3.4.2 环状间隔有充填物

在这种情形下, 爆炸生成物的初始压力仍按式 (8) 计算。

应力波传播通过充填物, 其能量通过从炸药传递到充填物和由充填物向岩石传递的两次损失, 应力值显著下降 (即缓冲作用), 孔壁后岩体内的压力由下式表示:

$$P_f = P_b \cdot K_1 \cdot K_2 \frac{d^2}{D^2} \quad (16)$$

式中, K_1 ——爆炸能从炸药传递到充填物时的折损系数;

K_2 ——爆炸能由充填物向岩石传递时的折损系数。

系数 K_1 , K_2 可按下式计算:

$$K_1 = \frac{2}{1 + \frac{mC}{m_1 C_1}}$$

$$K_2 = \frac{2}{1 + \frac{m_1 C_1}{m_2 C_2}}$$

式中

m , m_1 , m_2 ——分别为炸药、充填物和岩石的容重;

C , C_1 , C_2 ——分别为炸药、充填物和岩石内的纵波传播速度;

引入缓冲比 f , 从式 (16), 可得:

$$\frac{D}{d} = \sqrt{f \cdot K_1 \cdot K_2} \quad (17)$$

D/d 即为在该特定缓冲要求下所求得的不偶合系数。

同样, 考虑取 $P_f = 18\sigma_b$ 时, 代入

$$(16) \text{ 式可得: } \frac{D}{d} = Dd \sqrt{\frac{mk_1 k_2}{144g\sigma_b}} \quad (18)$$

D/d 即为在该特定缓冲要求下而求得的不偶合系数。

3.5 防护原理

在研究与分析控制爆破理论和爆破危害作用的基础上, 通过各种行之有效的技术措施, 对已受到控制的爆破地震、空气冲击波、飞石、噪音等危害加以防护, 称为防护原理。

3.5.1 爆破地震及其防护

爆破地震的能源有限, 发生在地表浅层或地面以上, 而且只有一部分炸药能量转化为爆破地震波。因此, 爆破地震与发生在地表以下较深处以及释放出巨大能量的自然地震比较, 有以下主要区别:

①爆破地震的振动频率较高, 一般为 10~30 赫兹; 自然地震的频率通常为 2~5 赫兹, 与普通建筑物的自振频率接近。

②爆破地震的持续时间短, 约 0.1~2 秒; 自然地震的持续时间长达 10~40 秒。

③爆破地震的振幅较大, 但随远离爆炸中心而迅速衰减, 故对周围影响范围小。自然地震的振幅虽然小些, 但衰减慢, 破坏程度与影响范围却很大。

④爆破地震的震源大小、影响范围及危害程度等, 是可以控制的; 而自然地震则不以人们的意志为转移。

综上所述, 虽然在同一地点的两种地震参数相同, 但是爆破地震对爆源周围建筑物的影响和破坏程度要轻得多。

近几十年来, 关于爆破地震强度的判据引起了国内外爆破工作者的普遍重视。通常, 采用质点在垂直地面方向的振动速度 $V_{\perp}$ 作为爆破地震强度的主要判据, 有时还增加质点振动加速度和振动位移值等判据。振速计算公式往往采用苏联学者萨道夫斯基(M.

A. Садовский) 经验式, 即:

$$V = K \left(\frac{Q}{R} \right)^{\frac{1}{3}} \alpha \quad (19)$$

式中 V ——介质质点的振动速度, cm/sec; 当分别测定速度的垂直向分量 $V_{\perp}$ 、径向分量 $V_{\text{径}}$ 和切向分量 $V_{\text{切}}$ 时, 其合速度 $V_{\text{合}}$ 为 $V_{\text{合}} = \sqrt{V_{\perp}^2 + V_{\text{径}}^2 + V_{\text{切}}^2}$;

Q ——炸药量, kg; 齐发爆破取总药量, 秒差、半秒差爆破取最大一段的药量, 毫秒微差爆破取折算药量 (等于各段药量的平方和的开方);

R ——爆源中心至被保护物的距离, m;

K ——综合系数, 与介质性质、爆破类型和起爆方法等因素有关; 在岩石中通常为 30~180, 土壤中通常为 100~220;

α ——衰减指数, 与传播距离和地质地形等因素有关。近距一般为 1.5~2.3, 远距一般为 1.0~1.5。

我国在地面、地下、水中各种不同类型的工程爆破中, 进行了大量的爆破地震测试和研究工作。装药量由几克到几吨, 距爆源数 10cm 到数 km 的范围内, 分别测定了爆破振速的垂向、切向、径向三个分量以及介质质点振动加速度、位移等。从中得出, 当爆源和被保护物之间的高差较小和比例距离

$$Lb = \frac{R}{Q^{\frac{1}{3}}} \text{ 为 } 1.0 \sim 50 \text{ 范围内, 存在着垂}$$

向综合系数 $K_{\perp}$ 大于径向综合系数 $K_{\text{径}}$ 和垂向衰减指数 $\alpha_{\perp}$ 大于径向衰减指数 $\alpha_{\text{径}}$ 的规律。它表明, 爆源近区的垂向振动速度大, 衰减快, 径向振速小而衰减慢。因此, 爆源近区受垂向振速控制, 远区受径向振速控制, 中区则兼受垂、径向振速的双重控制。

在城镇拆除控制爆破中, 往往需要在建、构筑物底部或基础、高台阶底部进行微量装药爆破, 此时将出现 $K_{\text{径}} > K_{\perp} > K_{\text{切}}$ 和 $\alpha_{\perp} > \alpha_{\text{径}}$ 的规律性。此种情况主要是受径向振速控制: 当比例距离增大到一定值时, 切

向振速亦将造成危害。

关于爆破震动对建、构筑物不产生破坏的允许振速标准,我国尚未统一规定。根据观测数据和观察,表1中所列出的允许垂向振速,可供爆破设计时参考。

表1 建构筑物允许垂向振动速度 V_1

建、构筑物类型	坚固程度	V_1 Cm/sec
砖石建筑物	一般	≤ 5
	坚固	7~8
混凝土结构物	一般	10~12
	坚固	14~15
特殊保护的建、构筑物、重点文物		$\leq 1\sim 2$

对于地下巷道、峒室和构筑物,可参考下列垂向振速 V_1 、质点加速度 a 允许标准:

稳固岩石 $V_1 \leq 40 \text{ cm/sec}$;

中等稳固岩石 $\begin{cases} V_1 \leq 30 \text{ cm/sec}; \\ a \leq (5 \sim 10) \text{ g}; \end{cases}$

岩石不稳固、支护良好

$V_1 \leq 20 \text{ cm/sec}$;

重点保护的地下构筑物

$V_1 \leq 10 \text{ cm/sec}$

对于地表和地下水工结构物,允许垂向振动速度、质点加速度和位移值可定为:

垂向振速 $V_1 \leq 10 \text{ cm/sec}$;

质点加速度 $a \leq (1 \sim 3) \text{ g}$;

位移值 $A \leq 1 \text{ mm}$ 。

必须说明,为使爆破地震判据能适用于各种条件下的爆破工程,建议采取垂向、径向和切向振动速度的最大值,并辅以质点加速度或位移值作为综合判据是合适的。

目前,国内外常见的降震措施主要有:

①开挖防震沟 在被保护物与爆源之间开挖一定深度的防震沟或钻凿密集单排、多排空孔是减震的有效措施。在混泥土坪、路面、楼板等局部拆除爆破时,为防止爆破震坏保留部位,可采用切缝机在预爆区周围切缝。某些有利地形,如河流、沟渠、断层

破碎带、采空区、凹坑、沟谷等,应充分地利用,必要时,亦可采用预裂爆破成缝。

②限制装药量 严格地限制一次起爆的炸药量是减震的重要措施。在允许的爆破振速已确定的条件下,每次起爆的最大药量可通过(19)式求出。同时,还应适当地缩减每次起爆的炮孔数或药室数。

在总药量相等条件下,分散地装在一排或多排孔中比集中于一个药室中的爆破振速要小。

③毫秒微差起爆 据测定,在总装药量及其他爆破条件相同的情况下,采用毫秒微差起爆的爆破振速比齐发爆破平均降低40~60%。实践证明,装药起爆时差超过20ms,每次爆炸形成的地震波基本上可视为独立作用的波。因此,毫秒微差爆破时,总装药量爆炸引起的爆破地震强度可按最大一段起爆药量来计算。在炮孔内、排内和排间均可使用毫秒微差分段顺序起爆,以提高降震效果。

④分析爆破作用的特点 爆破地震的强度随着爆破作用指数 n 值的增大而减弱。从降震目的出发,松动爆破为优,加强松动爆破次之,抛掷爆破最差。在药室、深孔爆破中,最小抵抗线方向爆破地震强度最小、反向最大,侧向居中。沿炮孔连线方向比垂直于该连线的爆破振速小。

⑤分析被保护物的特征 实践证明,低矮厚实的建、构筑物比高大、细长(烟囱、水塔、电视塔等)者的抗震性能好;大跨度空旷建筑及承重结构物的抗震性能差。低于爆源的建、构筑物的抗震性能优于高者,而位于突出山包、陡壁上的建、构筑物比平地上的易被震坏。

3.5.2 爆炸冲击波及其防护

爆破过程中产生的冲击波,不仅无益地消耗了一部分炸药能量,而且危及人身,建筑物和设施等的安全。

①地面爆破空气冲击波 药包在地面爆

炸时, 空气冲击波对人员的最小安全距离 R_k 可按下式确定:

$$R_k = K_k \cdot \sqrt{Q}, \text{ m (20)}$$

式中 Q ——炸药量, kg;

K_k ——系数, 在掩蔽体内 $K_k = 5$;

无掩蔽体 $K_k = 30$ 。

②井下空气冲击波 在井下或地下进行爆破时, 空气冲击波是在巷道内约束条件下传播的, 其能量衰减比地面要慢, 危害性亦比地面为大。在巷道中爆破, 直达波在巷道壁处产生反射, 直达波和反射波汇合形成平面阵面的空气冲击波, 其阵面上的超压为:

$$\Delta P = \left(33.4 \frac{K}{R} + 7.94 \sqrt{\frac{K}{R}} \right) e^{-iR}$$

式中 ΔP ——空气冲击波超压, kg/cm²;

R ——与爆源的距离, m;

K ——空气冲击波的能量密度(22式);

i ——巷道阻力系数(23式)。

$$K = \frac{Q\eta}{\Sigma S} \cdot \delta \quad (22)$$

式中 Q ——一次起爆的炸药量, kg;

ΣS ——与爆源连接的巷道断面积总和, m²;

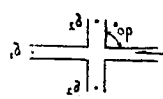
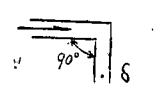
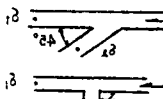
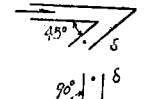
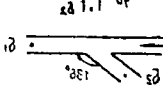
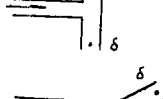
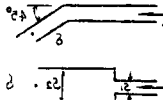
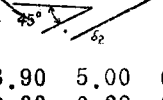
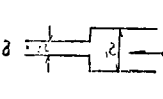
η ——炸药爆炸能转化为空气冲击波能量的系数, 可按表2选取;

表2 η 值表

爆破条件	η 值
裸露爆破	
(1)有炮泥复盖	0.20~0.30
(2)无炮泥复盖	0.30~0.40
浅眼爆破	0.05~0.10
深孔爆破	
(1)全孔装满炸药	0.025~0.030
(2)孔口空1~5米	0.013~0.025
(3)孔口堵塞1~3米	0.005~0.013
药室爆破	
(3)崩落空间小于3万米 ³	0.05~0.10
(2)崩落空间大于3万米 ³	0.02~0.05

δ ——因巷道拐弯、分岔和断面变化造成的 K 值变化系数, 按表3选用。

表3 δ 值表

变化情况	δ	变化情况	δ
	$\delta_1 = 0.42$ $\delta_2 = 0.23$		0.77
	$\delta_1 = 0.55$ $\delta_2 = 0.45$		0.59
	$\delta_1 = 0.64$ $\delta_2 = 0.34$		0.49
	$\delta_1 = 0.73$ $\delta_2 = 0.16$		$\delta_1 = 0.77$ $\delta_2 = 0.14$
	0.87		
	S_2/S_1 1.00 1.80 3.90 5.00 6.25 7.50 10.00 δ 1.00 0.50 0.33 0.29 0.25 0.25 0.17		
	$\Delta P \leq 10 \text{ kg/cm}^2$ 时 $\Delta P > 10 \text{ kg/cm}^2$ 时	$\delta = 1.25 \sim 1.9$ (高超压取小值) $\delta = 1.25$	

$$i = \frac{\alpha_1 L_1 + \alpha_2 L_2 + \dots + \alpha_n L_n}{d_1 L_1 + d_2 L_2 + \dots + d_n L_n} \quad (23)$$

式中 α ——巷道表面粗糙度系数, 按表 4 选取;

d ——巷道折算直径,

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, S \text{—巷道断面积, m}^2;$$

表 4 巷道表面粗糙度系数

巷道表面状况	α
不支护	
沿脉巷道	0.016~0.020
穿脉巷道	0.022~0.040
底板不平有溜口巷道	0.045~0.065
混凝土支护的巷道	0.010~0.016
拱形支护巷道	0.025~0.070
不完全木 { 有溜口	0.030~0.050
支护巷道 { 无溜口	0.025~0.034

L ——空气冲击波经过的沿程巷道长度, m。

当空气冲击波超压 $\Delta P \geq 0.2 \sim 0.3 \text{ kg/cm}^2$ 时, 对人体可造成轻微挫伤; 超压 $0.3 \sim 0.5 \text{ kg/cm}^2$ 时, 引起气管、听觉损伤; 超压 $\Delta P \geq 1.0 \text{ kg/cm}^2$ 时, 将引起死亡。因此, 为确保人身安全, 规定允许的超压值不得大于 0.1 kg/cm^2 。

③水中冲击波在水中或水底进行爆破时, 人员、船舶及其他保护对象的最小安全距离 R 应按下列式计算:

$$R_s = K_s \sqrt[3]{Q}, \text{ m} \quad (24)$$

式中 Q ——炸药量, kg;

K_s ——与保护对象及装药条件有关的系数, 见表 5。

④爆炸冲击波的防护在控制爆破工程中, 采取分散微量装药、炮孔堵塞良好、毫秒微差起爆和精心复盖等, 均可减弱爆炸冲

表 5 水中冲击波安全距离系数

	人 员		机 动 船		注 解
	游 泳	潜 水	停 船	行 船	
水中药包	275	825	33	60	停泊或航行的木船,
水底钻孔、药室	136	408	16	30	按行船取 K_s 值

击波的强度。然而, 对于爆源近区的重点保护或设施, 仍需采取相应的防冲击波措施, 如:

a) 防波堤

防波堤可用沙袋、土袋或水袋构筑。堤宽、高和长应根据被保护的尺寸、重要程度以及冲击波强度等因素而定。有时, 为加强防波能力, 可将沙袋堤修筑在两层铁索网之间, 组成沙袋铁索联合防波堤。

b) 阻波墙

阻波墙可采用直径为 $12 \sim 24 \text{ cm}$ 的园木构筑成密集木排或木垛, 亦可选用混凝土块、砖、料石沙袋、水袋等材料砌筑。当阻

挡强冲击波时, 应相隔一定距离错列地修筑 $2 \sim 3$ 座阻波墙。

c) 防冲屏

防冲屏可采用木、竹、草席等轻型材料构筑, 用以防护地面爆炸的空气冲击波。防冲屏尺寸须视波强及被保护物条件而定。迎向爆源侧的屏面应有 $60 \sim 75^\circ$ 的斜度, 以疏导冲击波。对于重点保护对象, 可修筑 $2 \sim 3$ 道防冲屏。

d) 阻波帷幕

阻波气泡帷幕是防护水中冲击波的有效措施。在爆源和被保护物之间, 在水下安装钻两排密集小孔的钢管, 输入压气, 小孔中

连续放出微气泡,由于浮力作用,气泡群自水下向水面运动,形成阻波气泡帷幕。当冲击波与帷幕相遇时,波的部分能量消耗于杂乱无章的气泡表面反射;另一部分能量则用于声阻突变损耗和气泡压缩损耗,因而削弱了冲击波强度。显然,气泡密度愈大、数量愈多和帷幕愈厚,则阻波效果愈佳。

e) 消波药包

目前,消波药包主要有相向药包和阻截药包两种。前者是在爆区布置两组或两排相向起爆的药包,起爆后两个相向运动的冲击波碰撞而削弱(参数合理,强度可减弱 $1/2 \sim 3/4$),后者是在主药包的空气冲击波传播途中,在适当的距离上,延迟若干毫秒起爆一个适量的裸露阻截药包。阻截药包产生反向冲击波,能使主药包的冲击波强度降低 $1/3 \sim 1/2$ 左右。

f) 疏波通道

对于峡谷或井巷道中的空气爆炸冲击波,宜疏不宜堵,应使冲击波通道畅通,以利泄爆。同理,近爆源的地面建筑物,门窗

应打开,并使其固定。

3.5.3 爆破噪音及其防护

实践证明,地面爆破时,爆源近区形成空气冲击波,远区形成声波,即爆破噪音。通常,当冲击波压力在180分贝以下即可认为是声压。人们正常能够听到的最小声压,即听阈声压为 $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$,而刚刚使人耳感到疼痛的痛噪声压为 20N/m^2 ,两声阈绝对值之比为 $10^6:1$ 。

爆破噪音的声压级 Z 可按下式求出:

$$Z = 20 \cdot \log \frac{P}{P_0}, \text{ 分贝} \quad (25)$$

式中 P_0 —基准声压, $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$

P —测点声压, N/m^2 。

爆破噪音的声压除与炸药量、爆破条件和距离有关而外,尚受地形、风向、风速、气压等因素的影响。当噪音的声压级为100分贝时,连续长期作业,听力会减弱150分贝,使人听力发生障碍。

我国劳动部和卫生部1980年公布的工业噪音卫生标准见表6。

表 6 我国工业噪音卫生标准

噪音暴露时间	h				min						sec
	8	4	2	1	30	15	8	4	2	1	
现有企业 $\leq$ 分贝	90	93	96	99	102	105	108	111	114	117	120
新建企业 $\leq$ 分贝	85	88	91	94	97	100	103	106	109	112	115

目前,美国矿务局公布的爆破噪音标准是:

安全限 128分贝

警戒限 128~136分贝

最大允许值 136分贝

城市控爆 ≤ 90 分贝

爆破噪音属于间歇性的脉冲噪音,在任何情况下,每次爆破产生的噪音应小于140分贝。在城市进行拆除控制爆破时,距爆源10~20m处的每次爆破噪音必须小于90分贝。

防爆破噪音的主要措施是保证炮孔填塞长度,提高填塞质量及加强复盖等。实测表明,裸露在地表的雷管、导爆索,其爆破噪音强度很高,应尽量避免裸露。在相同的爆破条件下,与齐发爆破相比,秒延发爆破可降低爆破噪音强度的 $1/3$;毫秒微差爆破可降 $1/2$ 左右。此外,在爆源与测点之间有树林、遮蔽物时,亦可降低爆破噪音。

3.5.4 爆破飞石及其防护

爆破飞石的产生原因是,炸药爆炸能量

消耗在介质破碎后,尚有多余的能量作用在碎块上,使碎块获得足够的动能,以某一初速度向四周飞散。特别是当抵抗线过小,高压高速的爆炸气体沿原生或爆炸生成裂缝高速喷出,碎块被加速抛射,其初速度接近爆炸气体的喷出速度,即达每秒百米以上,其中个别飞石抛射较远。

爆破飞石参数可计算如下:

$$H = R \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{g}{2} \frac{R^2}{V_0^2 \cos \alpha} \quad (26)$$

$$R = \frac{1}{g} V_0^2 \sin \alpha \quad (27)$$

式中 H —飞高, m;

R —飞距, m;

V_0 —飞石初速度, m/sec;

α —飞石抛射角, 度;

g —重力加速度, 9.81 m/sec^2 。

当最小抵抗线和爆破作用指数已定的情况下,我国常用的个别飞石安全距离 R_f 的经验式为: $R_f = 20K_f \cdot n^2 w$ (28)

式中 n —爆破作用指数,常用 $0.6 \sim 1.75$;

W —最小抵抗线(药室爆破时,取最大值), m

K_f —与地形、风向、风速等因素有关的系数,一般取 $1.1 \sim 1.5$ 。

爆破飞石的控制和防护措施主要有:

①优选爆破参数,特别是炮位和最小抵抗线这两个关键因素。严格避免炮孔位于软夹层、破碎带或混凝土接打面。装药前认真校核最小抵抗线方向与尺寸,切勿超装药量。

②提高炮孔填塞质量,要有足够的填塞长度。填塞物中不得夹杂碎石。

③采用空隙装药和低威力、低爆速的炸药有利于控制爆破飞石。

④加强复盖与遮挡。复盖物要有一定的强度、弹性和重量。通常可用废旧胶管编成的胶管帘。必要时,胶管帘上再盖帆布。根据不同的被爆体及其周围环境情况,对飞石

可采取全面防护、重点防护以及两者联合的防护方法。

4 控制爆破主要措施

控制爆破的主要措施包括:选用适宜的爆破器材,选取合理的爆破参数和正确决定孔位,采用空隙装药结构和微差起爆技术以及采取有效的防护措施等。本文着重探讨塑性、粘性和挠性炸药、高能燃烧剂以及静态爆破剂在控制爆破中的应用。

4.1 塑性和粘性炸药

塑性炸药是在一定的温度范围内,具有可塑性的混合炸药。塑性炸药可压制成型,根据控制爆破的需要,制成不同规格的药柱、药块、药饼、药条等,亦可染色伪装。它的感度低,耐撞击,抗水性强,因而使用方便,能够适用于控爆对象的不同形状而贴附在被爆物表面,提高控爆的灵活性和取得一般工业炸药难以达到的爆破效果。

塑性炸药通常含 $80 \sim 90\%$ 的黑索金或太安;粘合剂可采用聚氨酯、12羟基硬脂酸锌或硅油等,并可加入少量的增塑剂,以改善爆炸性能和贮存性能。

粘性炸药是在塑性炸药基础上研制成功的一种类似面团状的混合炸药。它除具有良好的塑性而外,还具有粘性,一般在 $0.1 \sim 0.5 \text{ m}^2$ 的面积上可产生 $30 \sim 200 \text{ kg}$ 的粘附力。通常,粘性炸药以黑索金、奥克托金、太安、特屈儿等固体炸药成分,加入高分子粘合剂及配入少量增塑剂和油类组合制成。粘性炸药可直接粘附在混凝土结构物、基础、桥梁和金属等被爆对象之上,然后施爆。

在表1中列出我国某些塑性、粘性炸药的性能,以供选用时参考。

4.2 挠性炸药

挠性炸药是一种新型的高分子粘结炸药,它在一定的温度范围内保持有曲挠性、弹性和自持性。通常,挠性炸药的延伸率达 $200 \sim 1000\%$,曲挠性 $50 \sim 120^\circ$,折叠 90° ,可制成箔状、带状、棒状、索状、块状和各种

表 1 国产几种塑、粘性炸药性能表

炸药名称	密 度 (g/cm ³)	爆 速 (m/sec)	威力 (%)	猛度 (%)	撞击感度 (%)	可塑温度范围 (℃)
塑—1号炸药	1.503 1.640	7548 8280	112—123	118—126	10~34	-10~+60
塑—2号炸药	1.501 1.602	7652 7993	120	109	10	-40~+60
塑—4号炸药	1.660	8204	123	119	40	-40~+60
塑—7号炸药	1.670	8329	137	—	30~52	-40~+60
塑—10号炸药	1.707 1.761	8244 8432	128	117	76	-40~+60
弹—4号炸药	1.492	7130	69.3	89.3	16	-50~+60
粘性炸药	1.390	7243	113	102	0	-27~+50

需要的形状。挠性炸药的机械感度低，爆轰感度高，可用普通雷管起爆，抗水性及贮存性能良好。

挠性炸药的主爆剂有黑索金、奥克托金、特屈儿或梯恩梯等，粘合剂含量占10~20%。国产挠性炸药主要用天然橡胶和氟橡胶做粘合剂，其制造工艺与橡胶制品成型工艺相似，即将主体炸药与事先溶胀的胶料在捏合机中充分捏合均匀，挤压成型，再经室温或高温硫化即成挠性炸药。

在控制爆破中，挠性炸药可用于下述几个方面：

(1) 水下切割爆破

将挠性炸药制成药条或直径20~50 mm长0.5~2m的带聚能槽的药棒，平放在金属板上，可控爆切割不同厚度的钢板等。因该药棒具有弹性，能耐海水的冲击，故可在有一定流速的海、河中应用。1973~1979年，我国曾在水深70m的台湾海峡打捞沉船作业中，成功地应用了挠性炸药切割船体（一名潜水员一次只能在水下工作半小时，采用电氧切割最多可切0.3~0.4m甲板；而使用挠性炸药5~10分钟可切割7~8m甲板，即提高工效二十余倍）。

挠性炸药同样可用于地面或高空金属板、杆、管等构件的控爆切割，如用于人造卫星、远程导弹发动机的切割分离和自毁装置之中。

(2) 控爆强化金属

将片状挠性炸药贴于被强化的金属表面，在炸药爆炸瞬间的高温高压作用下，金属表面发生金相变化，从而获得高强度的表面。一般可比淬火强度提高2~3倍。

(3) 爆炸成型与爆炸焊接

通过控爆方法可成型复杂形状的金属构件，如空心螺旋构件等。两块性能完全不同的金属板、棒、管等，在爆炸瞬间的高温高压作用下，熔合为一体。

(4) 控爆合成金刚石

石墨和某些添加剂混在一起在高温高压作用下，晶体发生转化，可制成人造金刚石。目前，采用40:60的黑梯炸药，因其质脆，形状不易改变，致使操作复杂化。改用挠性炸药，可制成所需的各种特殊形状，有利于提高合成金刚石的质量和效率。

4.3 耐热炸药

随着高温控制爆破的应用以及油田、气田和地下资源的勘探开发，需要有耐热和耐