1 绪　论

工程爆破是用炸药炸除岩石、破坏构筑物或建筑物的一种瞬间作业。它是通过科学研究、理论探讨、现场试验及实际应用建立起来的一项专门科学与应用技术。在国民经济的诸多领域,如冶金、铁道、交通、化工、煤炭、建材、石油和水利水电等行业的土石开挖、岩石开采以及建(构)筑物拆除工作中，无一能离开爆破技术。

现代水利水电工程中所涵盖的大坝基础开挖、船闸及高陡边坡开挖、溢洪道及渠道开挖、无压及有压引水洞开挖、大型洞室开挖、各种水下工程开挖、围堰等结构物拆除以及各种石料的开采等，如果不运用爆破技术几乎无法进行施工。在各行业中，水利水电行业要求爆破对基岩的保护和对边坡的控制最严，各种结构部位开挖爆破中相互干扰最大，在施工中要求的各种爆破技术最多，在爆破规模的控制上最严、对各种边界面进行“雕琢”最多。因此说，水利水电行业是对爆破技术要求最为苛刻的一个行业。在水电建设中，工程爆破技术是影响施工质量和进度的一个重要因素。

1.1 水利水电工程爆破发展简史及情况简介

大约在 1400 多年前，我国发明了黑火药。唐代医学家孙思邈在《丹经内伏硫磺法》一书中，记载了火药的配制方法。令人遗憾的是，它一直未能用于民用工程，而更多地用在军事方面。直到 1867 年 A B.诺贝尔发明硝化甘油炸药以后，炸药才逐渐应用到工程中。

中华人民共和国成立后，我国水利水电工程爆破技术得到逐步发展。从人工钢钎凿孔爆破到手风钻钻孔爆破，再过渡到深孔爆破、洞室爆破。其间走过一段无规则、没有精确爆破设计、凭借经验和个人技艺决定爆破方式与规模的发展过程。

20世纪 60年代前后，三门峡工程(1958 年）和刘家峡水电站(1964 年）进行了深孔爆破的设计，采用毫秒电雷管起爆，但规模不大，更没有在全行业推广应用。

20世纪 70年代，葛洲坝水利枢纽工程开工，由于工程开挖量超过 1 亿 m^3,采用手风钻为主的钻孔爆破技术显然难以胜任如此巨大的爆破方量。于是在 1969～ 1970年,孔径为 80～ 150mm 的潜孔钻引入该工地，开始进行深孔台阶爆破。这些施工设备的引入明显提高了爆破施工效率，同时也加重了爆破对基岩的破坏以及爆破振动带来的不良影响。为此，1973 年利用停工时期葛洲坝水利枢纽工地专门开展深孔爆破试验，包括深孔台阶爆破对基岩的破坏范围、爆破应力波及地震波的传播与衰减规律、爆破对坝基软弱夹层的影响、预裂爆破及深孔爆破各种参数等的试验研究工作。通过上述系统的试验研究工作，确定了深孔台阶爆破及预裂爆破各种有关参数的基本规律、爆破作用的影响范围，为以后不同电站、不同地质条件下，采用深孔台阶爆破、预裂爆破奠定了应用基础，也为以后制定《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》（SDJ211—83）提供了可靠依据。自此以后，深孔台阶爆破、预裂爆破在水利水电行业得以推广应用。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

20世纪 80年代中期 SDJ211—83 实施以后，我国水利水电工程爆破技术又有了长足的进步，主要表现在以下方面。

1. 深孔台阶爆破

几乎所有的大、中型水电站开挖普遍采用深孔台阶爆破法，并将其与预裂爆破、光面爆破和缓冲爆破等组合起来形成一套确保边坡质量的优质高效的开挖方法。

2预裂爆破

预裂爆破技术不仅在大、中型水电站的边坡控制开挖中广泛运用，甚至一些小型水电站用手风钻打孔也得到了优质的预裂或光爆壁面。

3. 高边坡开挖爆破

水利水电行业对高边坡开挖尤为重视，通过国家“七五”与“八五”重点攻关课题，围绕三峡工程永久船闸 160m 高边坡开挖进行专题研究，制定了深孔台阶爆破、预裂爆破、光面爆破和缓冲爆破等组合起来的一套确保边坡质量的优质高效的开挖方法。

4. 孔内、孔间微差有序爆破

长江水利委员会的爆破科研与设计工作者，对塑料导爆管毫秒雷管起爆系统进行开发研究，创造了目前世界上最先进的接力起爆网络及孔内、孔间微差有序爆破法。这对确保爆破效果、保证保留岩体质量和减小对建（构）筑物的危害影响起到了关键作用。同时，使过去在建（构）筑物附近不能爆破变为可以爆破或使爆破变得较为容易实现。从而扩大了爆破技术在水利水电工程建设中的应用范围。

5邻近新浇混凝土的爆破

通过在葛洲坝水利枢纽工程和河北岳城水库等地的试验与研究，明确了在一定条件下，可以在新浇混凝土附近进行爆破，这使爆破技术在一个过去禁止的区域里得到运用。SDJ211—83 和《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》（SL47—94 ）以及国家的相关标准对该区域实施爆破的相关条件都做了相应规定。

6. 保护层开挖爆破

SDJ211—83 和 SL47—94 规范对于保护层开挖都没有完全舍弃分层开挖这一严格的规定。因此，保护层开挖就像一道枷锁束缚着爆破工作者，使它成为加快开挖进度的严重障碍。为此，水利水电行业各主要设计、施工与科研单位都在努力寻找新途径：采用小台阶爆破法、孔底加柔性垫层一次爆除保护层法首先在万安水利枢纽取得成功；在东江水电站也首次采用水平预裂爆破进行坝基开挖从而取消了保护层；随后，保护层一次爆除法和水平预裂取消保护层法在其他一些水电站施工中,也获得良好效果。国家‘七五’攻关课题——坝基开挖爆破技术除使用了保护层一次爆除法和水平预裂取消保护层法，同时还采用了孔内、孔间微差有序爆破技术，做到一孔 1响或一孔 2～3响，从而减轻了爆破对保留基岩的破坏影响。20世纪 90年代，三峡工程又普遍用水平光面爆破法一次爆除保护层，取得了大面积的优良建基面。以上多种施工方法令人信服地看到舍弃保护层分层开挖法已为期不远。

7. 坝基优质高效开挖爆破

经过长江水利委员会及全国广大爆破工作者共同努力，通过试验研究总结出一套优质高效的坝基开挖法。将这套方法用于三峡水利枢纽工程爆破，在爆破设计中得到了充分的体现。值得一提的是作为当今世界上难度极大的永久船闸开挖：数千万立方米的开挖方 、160

余米的高边坡、闸室高 60m 垂直边坡、闸室间宽度仅 60m 的闸墩且墩内布设有多条输水洞及排水洞。在如此巨大的开挖量中，如何保证开挖边坡稳定及闸室、闸墩的完整成为检验爆破施工方法的试金石。通过采用深孔台阶爆破—缓冲爆破－预裂爆破(或光面爆破)和由塑料导爆管起爆系统构造的接力式起爆网络技术，以及为便于施工而增设的施工预裂（光面爆破）等组成的开挖爆破体系，既有效地保证了边坡及闸室、闸墩的完整性，又确保了开挖施工进度，从而创造了水电站开挖史上的奇迹。

8爆破量测技术

爆破量测技术和爆破监测工作得到迅速发展。过去，我国爆破量测技术较为落后，拾震器与记录器之间需用长长的导线连接，光线示波器记录的数据无法用计算机进行处理。 20 世纪 80 年代初期,长江科学院与武汉大学水利水电学院等单位相继研制出爆破自记仪。自记仪与拾震器可同放置于一个测点，也可将二者组装于一体。自记仪采用数字式记录并直接与计算机连接，能及时进行爆破数据的采集与分析成果输出，从而大大缩短了我国爆破量测与国际爆破量测技术上的差距。

施工爆破监测体制在大、中型水利水电工程中开始建立并得到迅速发展。长江三峡水利枢纽工程各主体工程部位都建立了爆破开挖施工的监测体系。监测体系及时将监测信息反馈到施工设计部门，促进了爆破设计的优化；同时也使得监理工程师能有理有据的去制止那些违反规范及技术要求的爆破作业。继三峡工程之后，在龙滩、小湾等电站都建立了爆破监测体制，有效地控制了爆破规模和对保留岩体的损坏。

尽管我国水利水电行业开始了爆破监测工作，但推广面还远远不够，与国际差距仍然很大，仍需进一步加大力度促进该项工作的开展。

9. 面板堆石坝级配料开采爆破

用爆破法合理开采面板堆石坝级配料得到较快发展。 20 世纪 80 年代以来，混凝土面板堆石坝得到较快发展，许多中、小型水电站的坝体都采用了这种坝型。坝高列世界第二、坝体方量列世界第一的南盘江天生桥一级水电站已经建成；我国面板堆石坝第一高度的水布垭水电站正在建设中。从西北口水电站建设开始，通过现场试验研究采用爆破法开采主堆石级配料直接上坝填筑的施工方法。在天生桥一级水电站不仅主堆石料采用爆破法开采直接上坝填筑，而且粒径更小的过渡料也用爆破法开采后直接上坝填筑，与此同时还开展了爆破块度分布理论、参数优化和块度预报模型的研究。

采用条形装药洞室爆破获取面板堆石坝主堆石料在一些电站使用过，浙江、福建、安徽、江西、陕西、云南、河南、湖南和湖北等省都有相关记录，其中以河南省鹤壁盘石头水库的爆破规模最大，一次用药量 516t,爆破岩石 70 余万立方米。以上各省 20 余处的堆石料开采爆破结果好坏掺半。条形装药洞室爆破方法开采主堆石级配料尚需进一步研究。

10. 围堰及岩坎拆除爆破

采用爆破技术进行的水利水电工程的施工围堰（混凝土围堰、砌石围堰或混凝土心墙围堰）或岩坎的拆除工程计有数十个。其中以葛洲坝水利枢纽工程大江混凝土心墙围堰的爆破拆除规模最大，总装药量 47.8t，采用塑料导爆管毫秒雷管双复式交叉接力起爆网络，分成 324 响,创造了 20 世纪 80 年代以前我国爆破一次分段的最高记录，拆除爆破总延时 7.8s。

围堰拆除爆破距建（构）筑物最近者：田坝电站 2m、禹门口(提水工程)4m 等。

岩坎爆破拆除工程中的最大方量已达 6万多立方米。

岩滩水电站上、下游碾压混凝土围堰是我国爆破拆除的第一座该种结构型式的围堰。

我国围堰及岩坎爆破拆除形式与方法多种多样，积累了许多成功的经验，逐步形成了较完善的水工围堰与岩坎拆除爆破技术。 2006 年，三峡工程三期碾压混凝土围堰将要拆除，爆除的方量达 20 余万立方米，它将使我国围堰爆破拆除技术上升一个新台阶。

11. 定向爆破筑坝

采用定向爆破技术筑的坝在我国水利水电行业已有 40 余座。建坝高度均在 100m 以内，坝的防渗措施以粘土斜墙为主，采用的爆破方法有松动崩塌和抛掷爆破两大类。松动崩塌爆破多用 于河岸陡峭地段，其经济指标优越，每立方米堆积体炸药消耗量不超过 0.5kg。抛塌上坝率可达 80%～90% 以上。抛掷爆破是定向爆破最广泛使用的一种方法。“七五”期间，定向爆破筑坝被国家列为科研攻关项目，计划以云南省宜良柴石滩电站为试验点开展与定向爆破筑坝有关的课题研究工作，试图解决定向爆破筑坝超过百米高度的难题。攻关取得一批很有意义的成果，但试验坝因某种原因未能进行。 20 世纪 70年代后期，定向爆破形成第二次高潮后，一直没有再进行水电站的定向爆破筑坝。如何使爆破影响与水工设计较有效地融合在一起，仍是必须解决的重要课题。

12.岩塞爆破

我国采取岩塞爆破打通水库放空洞与库内连接段的爆破工程已有 16 个。其中 1979 年丰满水电站岩塞爆破的规模最大，爆破岩塞的直径 9m ,用药量 4.1t。我国岩塞爆破使用洞室和排孔两种爆破方式，直径较大时采用洞室爆破，如丰满水电站、汾河水库等；排孔爆破法使用最多，例如密云水库、香山水库和横锦水库等。爆渣处理采用聚渣与泄渣两种方式，大部分为泄渣方式。1999 年安徽响洪甸抽水蓄能电站岩塞爆破使用了气垫技术。在聚渣坑内冲水，使岩塞爆破时在岩塞底部形成一个有压力的缓冲气垫，它有效地将岩塞与下游水体隔开，缓冲气垫有效地减弱岩塞爆破时的冲击波，有利于爆渣堆积。

13. 修订技术规范

1963 年我国水利水电行业制定并颁布了以手风钻为主的爆破开挖技术规范。1983 年又重新编制了以潜孔钻机为主要钻孔机械，采用深孔台阶爆破和预裂爆破为核心的基岩开挖施工技术规范。1994 年修订后的 SL47—94 开始执行，修订的目的在于：尽量采用先进的爆破技术降低单响药量；确保基岩完整性；减少爆破对建（构）筑物和设施等的影响；体现工程进度不过分受到爆破的限制；强调在不同地质条件下开挖施工前，必须进行爆破试验；在施工过程中，应加强爆破监测等。该技术规范最大的不足是未能取消保护层分层开挖的规定。正如‘6. 保护层开挖爆破”所指出的那样，经过近十年的努力，在保护层开挖问题上，已积累了许多较为先进的施工方法。相信对 SL47—94 进行修订时，保护层问题必将成为广大水利水电工程爆破工作者重点关注的问题。

1.2 水利水电工程爆破的内容及分类

水利水电工程爆破技术，大体分为下列几方面的内容：

(1) 坝基开挖爆破技术。

（2）边坡开挖爆破技术。
（3）隧洞及地下厂房等爆破技术。
（4）围堰及岩坎爆破技术。
（5）水下爆破技术
（6）定向爆破筑坝技术。
水利水电工程爆破，按其控制开挖轮廓的技术方法而言，大体上分为下列几种：
（1）轮廓线密集隔震孔爆破法。
（2）缓冲中孔爆破法。
（3）光面爆破法。
（4）预裂爆破法。
水利水电工程爆破，按其起爆方法分类，可归纳为下列几种：
（1）火雷管起爆法。
（2）电起爆法。
（3）导爆索起爆法。
（4）塑料导爆管雷管起爆法。
（5）以上 4 种组合的起爆法等。
水利水电工程爆破，按其钻孔装药施爆分类而言，大体分为下列几种：
（1）浅孔台阶与掘进爆破。
（2）深孔台阶与掘进爆破。
（3）大直径深孔与小直径浅孔联合钻进爆破。
（4）集中与条形装药洞室爆破等。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2 爆破器材及起爆方法

2.1 炸药的基本概念

2.1.1 炸药爆炸的条件

凡受到外部施加的一定能量后，能发生化学爆炸的物质均可作炸药。

爆炸是指某一物质系统在发生迅速的物理和化学变化时，其内能高速释放而对周围介质做功的过程。按引起爆炸原因的不同，可将各种爆炸现象分为三大类：①物理爆炸，如气球充气过多而引起的爆炸；②核爆炸，如铀 235 的裂变或氚的核聚变；③化学爆炸，如水利水电工程岩石开挖爆破引起的岩石破碎、位移及噪声等，是由于炸药获得一定的起爆能量后，迅速发生化学反应，放出大量的热量，并生成高温、高压气体对岩石做功的结果。化学爆炸不仅使物质的形态（物理特性）发生了变化，而且使其成分和性质（化学性质）也发生了变化。

工程爆破中的炸药爆炸是化学爆炸的一种，本书下文中所提“爆炸”一词均指化学爆炸。

只有同时具备四个条件才能形成化学爆炸，即化学变化过程释放足够热量、化学反应过程迅速、生成大量气体和自动迅速传播。

（1）反应过程释放足够的热量。化学反应产生的热量是对外做功的能量，同时也是维持化学反应自动高速进行的首要条件。如 1kg 硝铵炸药爆炸反应释放的热量为 4228kJ。

（2）反应过程迅速。只有高速化学反应，才能在极短的时间内形成大量高温、高压气体，且使高温、高压气体迅速向四周膨胀做功，便产生了爆炸现象。如 1kg 煤燃烧可产生 8960kJ 热量为 1kg TNT 炸药爆炸产生热量（4953kJ）的近 2 倍，但 1kg 煤燃烧完全需几十分钟，而 1kg TNT 炸药完全爆炸仅需十万分之一秒。TNT 爆炸产生的能量密度极高（约为煤的几十万至上百万倍），由此可见反应过程迅速同样是形成化学爆炸的重要条件。

（3）反应过程生成大量气体。炸药爆炸产生的气体，在爆炸瞬间处于压缩状态，具有很高的势能。该势能在气体膨胀过程中对周围介质做功，迅速转变为机械能，使得周围介质（如岩石）破碎并运动。如果反应产物不是气体而是液体或固体，即使是放热反应，也不能形成炸药，因此产生大量气体也是不可缺少的因素。

（4）反应过程自动进行传播。在外界能量激化下，化学爆炸可放出大量的热，致使炸药中某一局部发生化学反应，其余部分则无需任何其他外因就能自动迅速地、连续不断地传播下去。

2.1.2 炸药化学变化的基本形式

在外界能量作用下，炸药化学变化可能以不同的速度传播，同时在其变化性质上也有很大差别。按化学变化性质和传播速度的不同，可将炸药化学变化分为四种基本形式：热分解、燃烧、爆炸和爆轰。

(1) 热分解。炸药和其他物质一样，在常温下也会进行分解作用，所以每一种炸药均有使用期。但一般炸药分解速度很慢，不会形成爆炸，当温度升高时，分解速度加快，当温度继续升高到某一定值（爆发点）时，热分解就能转化为爆炸。因此炸药运输及贮存时应注意避免高温及阳光直射。炸药仓库应注意通风，保持常温，储量不应高于设计值，堆放不应过密，防止温度升高时热分解的加剧而引起爆炸事故。

(2) 燃烧。在一定条件下，绝大多数炸药都能稳定燃烧而不爆炸。如焚烧法销毁炸药就是利用了炸药的燃烧特性。

炸药的燃烧过程和爆轰过程是不同的，燃烧反应区的能量是通过热传导和热辐射而传入未燃炸药的，燃烧速度远低于爆轰速度，但是随着温度和压力的增加，燃速也会显著增加，当达到某一极限值时，燃烧的稳定性就被破坏，炸药很快地由燃烧变成爆轰。例如，1993 年深圳某化学仓库，数百吨硝酸钱发生燃烧，在救火过程中产生了爆炸，发生了人员伤亡事故。因此采用焚烧法销毁炸药时一定要严格按《爆破安全规程》来操作。

(3) 爆炸。当炸药受到足够大的外能作用，如猛烈撞击、雷管引爆时，就会发生剧烈的化学反应，产生高温、高压气体，传播速度极快，而且可变，通常达每秒数千米，即使裸露在空气中，也能进行高速的爆炸反应。一般来说，爆炸过程是很不稳定的，如深孔中的柱状药包，当药包半径大于炸药稳定传爆半径时，雷管引爆炸药后，爆炸冲击波向两端传播，很快过渡到稳定传播的爆轰；而当药包半径小于炸药稳定传爆的临界半径时，雷管引爆炸药后，爆炸冲击波同样向两端传播，但很快衰减到很小爆速的爆燃状态直至熄灭。所以采用装药车装药或孔径较小的深孔爆破时，为确保全孔稳定爆轰，常加一根导爆索来加强传爆。

(4) 爆轰。爆炸是炸药化学反应过程中的一种过渡状态。炸药以最大而稳定的爆速进行传播的过程叫爆轰。爆轰是炸药化学变化的最高形式，此时，炸药的能量释放得最充分。炸药的爆轰速度与外界压力、温度等条件无关。在给定条件下，炸药的爆轰速度均为常数，所以炸药的爆速可在敞开的容器或地表测试。

炸药化学变化的四种基本形式虽然在性质上有不同之处，但是它们之间有着密切的联系，在一定条件下可以互相转化。在一定条件下，炸药的热分解可以转变为燃烧，而燃烧随着温度和压力的增加又可能转变为爆炸，直至过渡到稳定的爆轰。因此我们应深入了解炸药化学变化的不同形式的性质，既要确保炸药运输和贮存过程中的安全，又要在使用中充分利用炸药能量使其发挥最大作用。

2.1.3 炸药的分类

炸药分类方法很多，一般可依据炸药的组成和用途分类。

1. 按炸药的组成分类

(1) 单质炸药。单质炸药指由碳、氢、氧、氮等元素组成的自身能发生迅速氧化还原反应的化合物。这类炸药有：TNT、黑索金、泰安、硝化甘油、雷汞、二硝基重氮酚等。在民用爆破器材中，单质炸药大多用作混合炸药的组成或雷管、导爆索装药，很少单独直接用来进行爆破作业。

(2) 混合炸药。混合炸药指两种或两种以上的成分按比例所组成的机械混合物。组成混

合炸药的成分即可以含单质炸药，也可以不含单质炸药，但应含氧化剂和可燃剂。混合炸药在受到足够外界能量激发时，能发生爆炸反应，是目前水利水电工程开挖爆破中应用最广、品种最多的一类炸药。

2. 按炸药的用途分类

(1) 起爆药。起爆药主要用于制造雷管和导爆索来引爆其他工业炸药。它是一种对外界作用特别敏感的炸药，其特点是受较小外能作用，如机械、热、火焰等，均易激发爆轰。常用的起爆药有叠氮化铅、雷汞、二硝基重氮酚等。

(2) 猛炸药。猛炸药与起爆药不同，具有较大的稳定性，其机械感度较低，需要足够的能量才能将其引爆。工程爆破中多用雷管、导爆索等起爆器材将其引爆。常用的猛炸药有混合型工业炸药、TNT、黑索金、奥克托金等。

(3) 火药。火药在火花作用下，能引起燃烧或爆炸，产生高温、高压气体对外界做功，它可用于做点火药和延期药。

2.2 常用的工业炸药

中华人民共和国成立 50 年以来，随着国民经济和科学技术的发展，我国的炸药工业有了很大变化。年产炸药量由建国初期的 7200t 增加到 130 余万吨，炸药品种也有了很大变化。我国从 1959 年开始研究，1966 年建成第一座浆状炸药厂，随即便用浆状炸药取代了在水孔及水下爆破中沿用已久的撞击、摩擦感度低，安全及稳定性差且价格昂贵的硝化甘油炸药，到 20 世纪 80 年代中期，新发展起来的乳化炸药又取代了浆状炸药。

2.2.1 工业炸药应满足的基本条件

工业炸药的质量和性能对于工程爆破的效果和安全有着极大的影响。因此，工业炸药应满足如下要求：

(1) 爆炸性能良好，具有良好的爆炸威力。

(2) 有适中的敏感度，即能保证顺利方便地起爆，又能保证制造、运输、加工和使用时的安全。

(3) 符合环境保护和劳动保护法规的要求，炸药组分的配比应达到或接近于零氧平衡，爆后有毒气体生成量少。

(4) 物理化学性能较稳定，保证在一定的贮存期内不会因分解、变质、吸湿结块等因素而失效。

(5) 原料来源丰富，制造加工简单，成本低廉。

2.2.2 粉状铵梯和无梯炸药

粉状铵梯炸药是我国应用时间最长、用量最多的炸药品种。它的优点是比硝化甘油炸药安全性好、原料来源广、组成简单、成本低、使用方便、爆炸威力适中，可用于硬与中硬岩石的露天和地下开挖爆破。缺点是硝酸铵易吸湿结块，降低炸药的爆炸性能；其敏化剂 TNT 对

人体的生理机能有严重影响，在炸药加工过程中，长期接触的人员容易发生慢性中毒。针对这一缺点，世界上许多研究者进行了大量的研究工作，近 20年来我国在这一领域有了新的突破，已研究出少梯和无梯粉状硝铵炸药。

（1）岩石铵梯炸药。岩石铵梯炸药即为粉状铵梯炸药，以粉状硝酸铵为氧化剂， TNT为敏化剂，木粉为可燃剂和疏松剂。抗水型岩石铵梯炸药还以沥青和石蜡为憎水剂和可燃剂。其爆速可达 3000~4000m/s,为中等威力炸药。常用的有 2号和 4号岩石铵梯炸药、2号和 4号岩石抗水钱梯炸药。由于 TNT 对人体有害，近年内将逐步淘汰铵梯炸药。

（2）岩石粉状铵梯油炸药。岩石粉状按梯油炸药常用的有新 2号和新 4号岩石粉状按梯油炸药两种。新 2号岩石粉状钱梯油炸药是将乳化分散技术应用于粉状少铵梯炸药中，在炸药的组分中加入非离子型复合分散添加剂，达到了降低粉尘、防潮、防结块的综合效果。新 2号岩石粉状铵梯油炸药产量 1989年就占我国岩石炸药产量的 1/3。新 4号岩石粉状铵梯油炸药特点是 TNT 含量降到 2%以下，既降低了生产成本又改善了生产环境，采用 1号复合改性剂，解决了硝钱类炸药结块问题，提高了爆炸性能与贮存性能及防潮、防水性能。

（3）高分散型岩石粉状钱油炸药。高分散型岩石粉状铵油炸药性能达到 2号岩石钱梯炸药标准且不含 TNT,彻底消除了 TNT 对环境和人体的危害。

（4）膨化硝钱炸药。长期以来，国内外的许多研究者一直致力于研究解决上述铵梯类炸药存在的问题，先后提出了添加掺粉剂和晶型改变剂、包覆表面活性剂和憎水剂等各种方法来改善硝酸钱和炸药的物理性能，试图采用黑索金和金属粉等物质取代 TNT 。尽管这些方法是有成效的，但仍是片面的和不经济的，并没有从根本上解决问题。南京理厂大学通过对国内外粉状工业炸药的技术分析和多种方案探索后，认为用硝酸铵自身敏化使粉状硝酸钱炸药发生质的突破，才是实现无梯粉状硝酸铵炸药的根本途径，据此他们研究出一种具有自敏化性的膨化硝酸铵炸药。

膨化硝酸钱炸药采用特殊技术途径将“微气泡”引入硝酸铵晶粒中，当起爆能量作用时，这些‘微气泡’瞬间受到绝热压缩形成高温高压的‘热点”同时‘崎形’化颗粒的棱角之间剧烈‘摩擦’和‘碰撞”,也导致‘热点’形成,进而发展成为爆炸,达到自敏化。正是这种晶粒内部的作用取代了敏化剂 TNT 的敏化作用，使硝酸铵及其炸药的起爆感度发生了质的变化。

膨化硝酸铵炸药具有做功能力大，爆轰速度快；物理性能优良，吸湿性低，几乎不结块，安全性能好，使用可靠等优点；且生产成本低，使用方便。膨化硝酸钱炸药与其他工业炸药性能对比见表 2-1。

膨化硝酸铵炸药的缺点是：由于膨化硝酸铵含有许多微气泡，使得炸药密度降低，体积威力受到影响，所以只适用于中硬及中硬以下岩石开挖爆破。

（5）粉状乳化炸药。粉状乳化炸药设计思想是巧妙地把工业胶质乳化炸药和工业粉状炸药的性能优点有机地结合起来，形成一种低成本、高性能的无梯工业炸药。粉状乳化炸药的做功能力明显高于乳化炸药，且无需敏化即可起爆，提高了起爆的可靠性。由于油膜的包覆，其抗水性和贮存稳定性也明显优于其他工业粉状炸药，使用范围更加广泛；同时由于氧化剂和可燃物是均匀混合的，因此大大提高了炸药的爆炸性能（表 2-2）。

表 2-1 常用工业炸药主要性能对比

项　　目	膨化硝铵炸药	粉状铵梯炸药	乳化炸药	多孔粒状铵油炸药
爆速(m/s)	3400～3800	3000～3400	3300～4900	3000～3200
做功能力(mL)	330～380	320～350	270～300	290～310
猛度(mm)	14～17	12～15	12～17	4～5
殉爆距离(cm)	4～9	6～12	5～9	0
临界直径(mm)	12～15	2～22	15～20	50～70
冲击波感度(cm)	21.0	24.3	21.0	0
雷管起爆感度(发)	1	1	1	3～7
撞击感度(%)	0～4	20	8～12	0
摩擦感度(%)	0～4	20～24	8～20	0
装药密度(g/cm³)	0.85～1.00	0.95～1.10	0.90～1.20	0.78～0.88
抗水性	良	中	优	差
结块性	小	大		小
吸湿性	低	高	低	低
贮存期(月)	大于6	大于6	大于4	小于0.5

表 2-2 粉状乳化炸药与其他工业炸药的爆炸性能对比

品　　种	殉爆距离(cm)	爆速(m/s)	猛度(mm)	做功能力(mL)
粉状乳化炸药	10～20	4100～4800	17～19	330～360
岩石一级乳化炸药	＞4	＞4500	＞16	＞320
2号岩石铵梯炸药	＞3	＞3200	＞12	＞320

2.2.3 铵油炸药

钱油炸药在矿山上使用较多，随着大孔径钻机的引入及洞室爆破开采面板堆石坝级配料技术的发展，钱油炸药在水利水电工地使用也越来越多。从20世纪50年代的粉状钱油炸药发展到粒状钱油炸药和重钱油炸药，产品性能与质量均有很大提高。

钱油炸药的优点是价格低、安全性好；其缺点是易结块，要求的起爆能量大。

(1) 粉状钱油炸药铵油炸药的质量受到其成分的配比、含水率、硝酸铵粒度和装药密度等因素的影响。粉状铵油炸药较合理的密度是0.95～1.0g/cm³,成分配比是硝酸钱柴油：木粉一92：4：4，此时其爆速和密度最大。

(2) 多孔粒状铵油炸药。多孔粒状铵油炸药成分配比是：多孔粒状硝酸铵：柴油＝94.5：5.5,由于采用冷混加工，所以可在爆破现场直接配制和机械化装药，其最佳装药密度是0.9～0.95g/cm³。适用于露天洞室爆破。

(3) 重钱油炸药。重铵油炸药是在粒状铵油炸药推广的基础上研制出来的，它具有乳化

炸药抗水性强和铵油炸药成本低的优点，即提高了炸药的爆炸性能又降低了炸药成本。山西长治矿山机械厂已制造出重铵油炸药混装车。

2.2.4 乳化炸药

乳化炸药是指一类用乳化技术制备的油包水乳胶型抗水工业炸药。在国外，20 世纪 60 年代末期研制成功，70 年代得到迅速发展。我国于 20 世纪 80 年代初期研制成功，随即得到迅速推广使用。

EL 系列、RJ 系列及 WR 系列乳化炸药都是采用间断式生产工艺，设备比较简单，大多采用化学敏化方法，原材料来源广，成本低，爆炸性能及储存性都比较好，具有良好的抗水性能。

AE 型乳化炸药采用单一氧化盐（硝酸钱）和新型的乳化剂相匹配，是一种具有雷管感度的高爆速、高稳定性和低温性能的小直径乳化炸药新品种。

M 系列乳化炸药的特点是在采用单一氧化盐的基础上，进一步把配方的组分减少到 3～4 种，产品的爆炸性能与储存稳定性均很好。

表 2-3 列出了几种常用乳化炸药的组分与性能。

表 2-3 几种常用乳化炸药的组分与性能

炸药系列或型号		EL 系列	RJ 系列	WR 系列	AM 系列	岩石型
组分（%）	硝酸铵(钠)	65～75	58～85	78～80	90～94(水溶液)	65～86
	硝酸甲胺		8～10			
	水	8～12	8～15	10～13		8～13
	乳化剂	1～2	1～3	0.8～2	1.5～2.5	0.8～1.2
	油相材料	3～5	2～5	3～5		4～6
	铝粉	2～4				
	添加剂	2.1～2.2	0.5～2	5～6.5	3.5～4.5(复合蜡)	1～3
	密度调整剂	0.3～0.5	0.2～1		0.1～0.2	
性能	爆速(km/s)	4～5.0	4.5～5.4	4.7～5.8	5	3.9
	猛度(mm)	16～19	16～18	18～20	16～20	12～17
	殉爆距离(cm)	8～12	8	5～10	5～6	6～8
	临界直径(mm)	12～16	13	12～18	280(爆力 mL)	20～25
	抗水性	较好	较好	较好	较好	较好
	储存期(月)	6	3	3	大于 6	3～4

2.3 炸药的爆炸性能

本节主要介绍与工程爆破效果密切有关的炸药的爆炸基本性能和指标。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

2.3.1 炸药的敏感度

在外能的作用下，炸药发生爆炸的难易程度称为敏感度某炸药起爆所需要的外能小，则称该炸药的敏感度高；反之，某炸药起爆所需的外能大，则该炸药的敏感度低。能够激发炸药发生爆炸反应的能量有热能、电能、光能、机械能、冲击波能等。炸药对于不同形式的外能作用所表现的敏感度是不一样的因此，不能简单地以炸药对某种起爆能的敏感度等效地衡量它对另一种起爆能的敏感度

(1) 炸药的热感度炸药的热感度是指在热能的作用下，炸药发生爆炸的难易程度，通常用爆发点表示。爆发点是在标准容器（伍德合浴锅）中，0.05g 炸药在 5min 内受热而发生燃烧或爆炸反应时的最低温度显然，爆发点越高，则表示炸药的热感度越低。不同的炸药爆发点是不同的，雷管为 175～180℃，硝铵类炸药为 280～320℃。

(2) 炸药的机械感度炸药的机械感度是指炸药在撞击、摩擦等机械作用下发生爆炸的难易程度。它通常用爆炸概率法来测定表 2-4 列出了几种炸药的撞击感度和摩擦感度。

表 2-4 几种炸药的撞击感度和摩擦感度

炸药名称	EL 系列乳化炸药	2 号岩石铵梯炸药	TNT	黑火药	黑索金
撞击感度(%)	≤8	20	4～8	50	70～75
摩擦感度(%)	0	16～20	0	—	90

(3) 炸药的起爆感度。炸药的起爆感度是指在其他炸药的引爆下，猛炸药发生爆轰的难易程度。猛炸药对起爆药爆轰的感度，一般用最小起爆药量来表示，即在一定的实验条件下，能引起猛炸药完全爆轰所需的最小起爆药量。在上程爆破中，习惯上用雷管感度来区分工业炸药的起爆感度。即凡能用一发 8 号工业雷管可靠起爆的炸药称之为具有雷管感度；凡不能用一发 8 号工业雷管可靠起爆的炸药称其不具有雷管感度

(4) 影响炸药感度的主要因素：

1) 温度的影响。随着外界温度的增高，炸药的各种感度增加，在高温环境下实施爆破应引起充分重视。

2) 炸药颗粒度的影响。炸药的颗粒度主要影响炸药的爆轰感度。一般，颗粒越小，炸药的爆轰感度越大。

3) 炸药密度的影响一般，随着装药密度的增加，炸药的起爆感度会下降。如粉状钱梯炸药的装药密度大于 1.2g/cm³ 时，容易出现拒爆。

4) 炸药物理状态与晶体形态的影响。铵梯炸药受潮结块时，感度明显下降。因此，在雨季和潮湿环境下使用钱梯炸药，应采用有效的防潮措施。硝化甘油炸药冻结时，晶体形态发生变化，其感度明显提高

2.3.2 炸药的爆力

炸药的爆力是表示炸药爆炸做功能力的一个指标，它表示炸药爆炸所产生的冲击波和爆轰气体作用于介质内部，对介质产生压缩、破坏和抛移的做功能力。炸药的爆热、爆温愈高,生成的气体体积愈多,爆力就愈大；炸药的爆力愈大，破坏岩石的能量愈多。爆力取值大

小取决于炸药的爆热、爆温和爆生气体的体积。

炸药生产厂采用铅柱扩孔法测爆力，炸药的爆力，通常用“mL”表示。

工程爆破中采用爆破漏斗法类比来测爆力。如测试现场加工的多孔粒状铵油炸药的爆力，可选取几组等量的标准炸药（已知其爆力）和多孔粒状铵油炸药进行漏斗试验，分别计算其爆破漏斗的容积，由此来推算被测炸药的爆力。

爆破漏斗的容积按式(2-1)计算

$$V = \pi r^3 h / 3 \qquad (2\text{-}1)$$

式中 V —— 爆破漏斗容积，m；

r —— 爆破漏斗平均半径，m；

h —— 爆破漏斗最大可见深度，m。

爆破漏斗形状及特征见图 2-1。

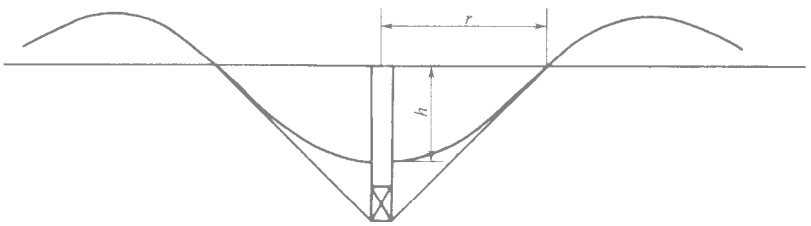

图 2-1 爆破漏斗剖面图

2.3.3 炸药的爆速与猛度

爆轰波在炸药药柱中传播的速度称为爆轰速度，简称为爆速。

炸药的猛度是指炸药爆炸瞬间产生的爆轰波和爆炸气体产物直接对与其接触的固体介质局部产生破碎的能力。爆速的高低决定猛度的大小，爆速愈高，猛度愈大，爆破对岩石直接破碎的作用愈强。

炸药生产厂通常采用铅柱压缩法测炸药的猛度，炸药的猛度，通常用“mm”表示。工程爆破中可用炸药爆速的高低来估计猛度的大小。

2.3.4 炸药的殉爆距离

一个药包(卷)起爆后，引起与它不相接触的邻近药包(卷)发生爆炸的现象叫殉爆。殉爆在一定程度上反映了炸药对冲击波的敏感度。在工程爆破中，炸药的殉爆性能指标对于确定间隔装药的间隔长度，盲炮处理的补孔距离和合理的孔网参数都具有指导意义。

工程中常采用下述方法进行殉爆距离测试：找一沙土地面，先将其捣固，然后用与药卷直径相同的木棒在地面上压出一半圆槽，将两药卷放入槽内，药卷中心在一直线上，将先爆药卷（称作主发药卷）的聚能穴端与后爆药卷（称作被发药卷）的平面端相对，测量两药卷的距离，随后引爆主发药卷，如果被引爆的被发药卷完全爆炸（不留残药和残纸片），则改变两药卷的端部距离，重复试验，直到不殉爆为止。取连续 3 次不发生殉爆的最大距离，为该炸药的殉爆距离

殉爆距离表示了炸药的殉爆能力，是检验产品质量好坏的主要标志之一。在炸药品种、药卷直径、药量、约束条件、爆轰传递方向等条件给定后，殉爆距离既反映了被发药卷的冲击波感度，又反映了主发药卷的引爆能力。

对某一炸药，当先爆药卷的密度增加或药卷的药量、直径增加，都可能使殉爆距离增加。但当两药卷间的介质不是空气，而是水、沙土等密实介质时，殉爆距离将明显下降，所以炮孔中的同段药卷间不得有岩粉、碎石，以免发生传爆中断而产生拒爆。

2.3.5 炸药的管道效应

炸药的管道效应是指当药卷与孔壁间存有月牙形空间时，爆炸药柱出现能量逐渐衰减直至拒爆的现象。对于这一现象，美国 Lex L Udy 等人通过一系列试验认为，炸药的管道效应是由于药柱外部炸药爆轰产生的等离子体造成的。如图 2-2 所示，药柱起爆后在爆轰波阵面的前方有一等离子层，它对前方未反应的药柱表层产生压缩作用，抑制该层炸药的完全反应。等离子光波波阵面与爆轰波波阵面分开得越大，或者等离子波越强烈，等离子体对未反应炸药药柱的压缩范围和作用越大，使得爆轰波能量在药柱传播中衰减得越大。随着等离子波作用的进一步增强，就会引起未反应的药卷爆轰的熄灭。试验结果表明，等离子光波的速度约为 4500m/s。表 2-5 列述了部分炸药的管道效应测试值。

表 2-5 部分炸药的管道效应值

炸药类型	EL 系列乳化炸药	EM 型乳化炸药	2 号岩石硝铵炸药
管道效应(传爆长度)值(m)	>3.0	>7.4	1.9
试验条件	取内径为 42～43mm、长 3m 的聚氯乙烯塑料管(或钢管)，然后将 Φ32mm 的受试药卷一节连着一节地放入其中，用一只 8 号雷管起爆		

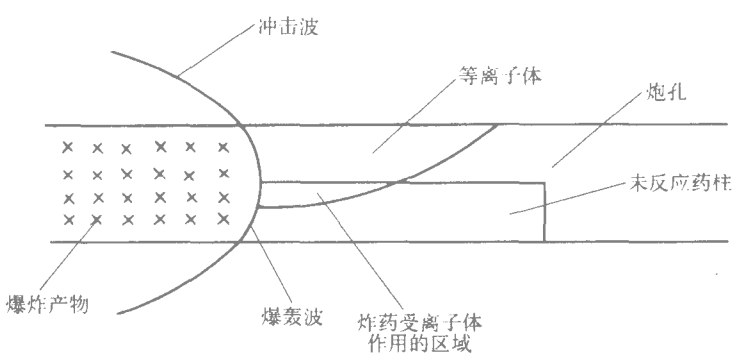

图 2-2 在小直径炮孔中等离子效应对未反应炸药卷影响的简图

在地下工程开挖作用中，采用小直径炮孔不耦合装药爆破时，炸药的管道效应相当普遍地存在着，它是严重影响爆破质量的重要因素之一。研究结果表明，在实际工程中采用如下技术措施可以减少或消除管道效应，改善爆破效果。

(1) 堵塞等离子体的传播：

1) 用水或岩屑充填炮孔与药卷之间的月牙形空隙；

2）每装数个药卷后，装一个能填实炮孔的大直径药卷；

3）给药卷套上硬纸或其他材料做成的隔环，隔环外径稍小于炮孔直径。

（2）沿药柱全长放置导爆索起爆。

（3）采用散装药技术，使炸药全部充满炮孔不留空隙。

关于管道效应产生的理论解释除等离子体作用机理外，还有空气冲击波作用机理等，但目前都还不很成熟，还在进一步研究中。如何防止这种效应的产生是爆破工程中重要的实际问题，还需开展进一步试验研究。

2.3.6 炸药的聚能效应

1.聚能效应的基本现象

炸药爆炸后其爆轰产物运动方向具有与炸药包外表面垂直或大体垂直这一基本规律。利用这一基本规律将药包制成特殊形状（如半球形空穴状、锥形空穴状等），炸药爆炸时，爆轰产物向空穴的轴线方向汇集，并产生增强破坏作用的现象称为聚能效应，又称之为诺尔曼效应。能形成聚能射流的装药称为聚能装药，能形成聚能的装置称为聚能装置。

用同等药量的不同聚能装置，对中碳钢靶板的爆炸侵入深度进行试验（图 2-3）。从试验结果(表 2-6)可以看出，普通药柱爆炸时，在靶面上只形成一个很浅的凹坑；接触端带锥形空穴的炸药柱，其破坏侵入深度就增大很多，其侵入深度达到 6～7mm；在锥形空穴处装上钢制药形罩后，侵入破坏深度达到无罩药柱的 11 倍以上；将装有钢制药形罩的药柱放在距

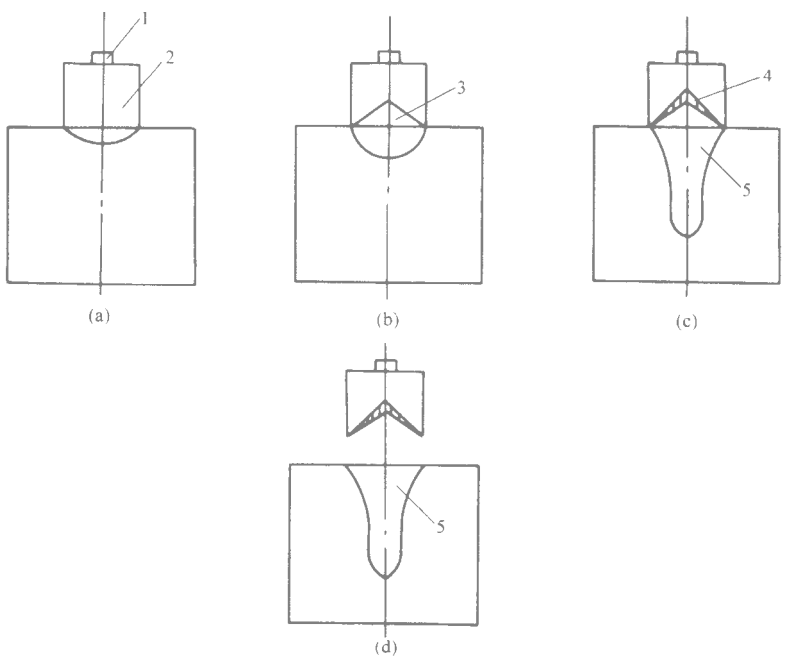

图 2-3 各种不同装药结构药柱对靶板的破坏情况

(a)普通药柱；(b)药性接触端带锥形空穴；(c）药柱锥形空穴处装有钢制药形罩；(d）有钢制药形罩药柱离开靶面一定距离

1—雷管；2—锥形药柱；3—锥形空穴；4—金属药罩；5—靶板上形成的凹坑

靶 70mm 距离处爆炸时，其破坏深度进一步增大，达到无罩药柱的 17 倍以上。

表 2-6 梯黑 50/50 的药柱对靶子的破坏深度

编号	药柱形状	靶子材料	药柱与靶子的相对位置	破坏深度(mm)
(a)	普通药柱	中碳钢	接触	形成凹坑
(b)	接触端带锥形空穴	中碳钢	接触	6～7
(c)	锥形空穴上放钢制药形罩	中碳钢	接触	80
(d)	锥形空穴上放钢制药形罩	中碳钢	距离 70mm	110

注 药柱直径为 30mm，高度为 100mm

2. 产生聚能效应的原因

不同装药结构之所以出现不同的穿甲能力，这是由于它们的爆轰产物飞散过程不同造成的。当普通药柱爆轰后，爆轰产物沿着近似垂直于原药柱表面的方向向四处飞散。此时，作用于中碳钢板部分的仅仅是药柱端部的爆轰产物。而当带有锥形空穴的装药爆炸后，爆轰波传至锥形空穴的顶部后，爆轰产物流基本上沿着锥形空穴壁面的法线方向向装药轴线飞散，此时各股爆轰产物流便相互作用，并在锥形空穴的轴线方向形成了能量集中的一般聚集流体。这股流体在锥形空穴表面一定距离上聚集的密度最大，速度也达到最大值（1200～1500m/s）。能形成聚能流的空穴称为聚能穴。聚能效应只发生在距装药底部一定距离处。随着装药距离的增大，聚能效应迅速减弱，直至最后消失。

影响聚能效应的因素主要有：炸药的密度和爆速、装药尺寸、装药结构、药形罩的尺寸和材料等。

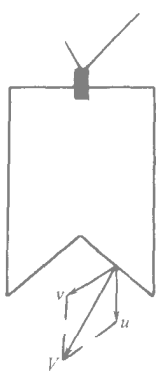

图 2-4 聚能射流原理图

3爆炸的聚能效应在水利水电工地的应用

爆炸的聚能爆破在水利水电工程爆破中应用很广。

(1) 爆破孤石和二次爆破。三峡工程二期围堰防渗墙施工中遇到大块球体，块球体位于槽底 20 多米深处，整个槽内充满泥浆水，进行钻孔爆破非常困难，块球体不远处有新浇筑的柔性混凝土心墙，必须严格控制爆破振动及水击波或动水压力对槽壁及柔性混凝土心墙的影响。最后采用聚能药包爆破技术，在规定的工期内安全地将块球体爆除。

(2) 聚能预裂爆破技术。三峡工程右岸边坡开挖中，采用常规预裂爆破线装药密度一般为 400g/m 而采用聚能预裂爆破技术进行试验，线装药密度降至 120g/m，能达到同样的预裂效果，且有效地降低了爆破对保留壁面的影响。

(3) 环状聚能爆破技术。水利水电工程建基面开挖常采用保护层开挖爆破技术或水平预裂取消保护层爆破技术。如在垂直孔孔底的建基面高程上布置水平环状聚能药包爆破开挖建基面，则将有效地提高工作效率。目前仅开展了理论研究及少量的现场试验。

2.4 常用的起爆器材

工程爆破所用的炸药均是由起爆器材引爆的，只有掌握了各类起爆器材的特性，在爆破

设计时合理选择起爆器材，才能获得满意的爆破效果。随着科学技术的不断进步和按劳动保护方面的要求，将逐步淘汰导火索和火雷管，所以本节只介绍水利水电行业常用的起爆器材：电雷管、塑料导爆管雷管及导爆索。在起爆器材中，雷管是起爆材料，塑料导爆管是传爆材料，导爆索即是起爆材料又是传爆材料。

2.4.1 雷管

雷管的种类很多，按点火方式可分为：电雷管及塑料导爆管雷管；按延时特性可分为：瞬发雷管、毫秒延时雷管及秒延时雷管；按起爆药性质分为：有起爆药雷管和无起爆药雷管。

工业雷管按其每发装药量多少分为 10 个等级，号数越大，其雷管内装药量越多，雷管的起爆能力越强。水利水电工程爆破常采用 8 号雷管，其装药量为 0.8g。

(1) 电雷管。通电发火引爆的雷管叫电雷管，主要介绍以下三种：

1) 瞬发电雷管。一经通电即刻发火引爆的雷管叫瞬发电雷管。引火头式瞬发电雷管结构见图 2-5。瞬发电雷管通电后，使得电雷管内的桥丝灼热，引起涂在桥丝上的引火药燃烧，火焰通过加强帽中心孔，引起正、副起爆药爆炸

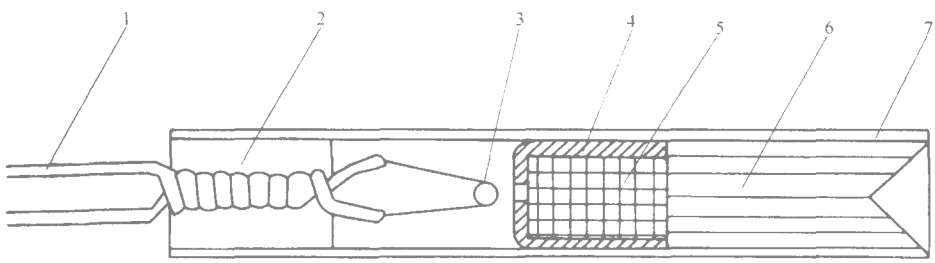

图 2-5 引火头式瞬发电雷管结构示意图

1—脚线；2—密封塞；3—引火头；4—加强帽；5—正起爆药；6—副起爆药；7—管壳

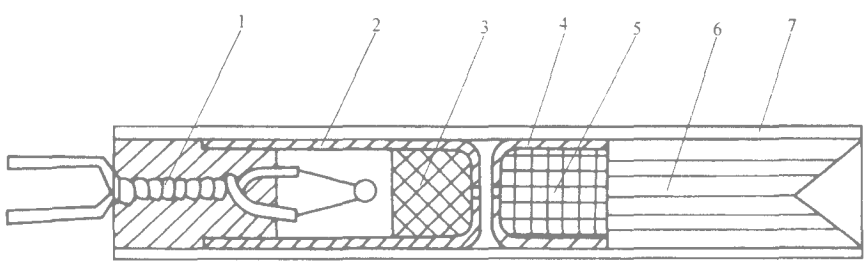

图 2-6 引火头式毫秒延期电雷管结构示意图

1—密封塞；2—延期内管；3—延期药；4—加强帽；5—正起爆药；6—副起爆药；7—管壳

2) 毫秒延期电雷管毫秒延期电雷管与瞬发电雷管结构不同之处是增加了一个延期装置(图 2-6)，内置延期药，毫秒延期药反应时气体生成量很少，反应过程中的压力变化也很小，所以反应速度很稳定，延期时间比较精确。表 2-7 列出了国产毫秒延期电雷管段别及其延期时间，目前国内已能生产高精度的毫秒电雷管，使用时应以说明书标明的延时时间为准。

需要全本请访问 www.ertongbook.com