

讲 座

编辑部 谨 启

在81年12月8日于扬州召开的本刊第二次编委会上,根据读者的要求,决定开设《爆炸与冲击》基础知识讲座一栏。从82年第二期开始陆续刊登,原则上每期一个专题。对象主要是本专业的初、中级科技人员。理论与实验并重。现将初步拟定的专题预告如下:

- 一、炸药起爆技术和火工品;
- 二、高能炸药性能与工艺;
- 三、现代工业炸药概况;
- 四、爆轰波基础;
- 五、冲击波基础;
- 六、工程爆破概论;
- 七、爆炸加工介绍;
- 八、炸药能量利用途径的探讨;
- 九、爆轰测试技术
 - (1) 电学方法;
 - (2) 光学方法;
 - (3) x射线方法(附:回收技术);
- 十、爆炸与冲击研究中的数值模拟;
- 十一、爆炸作业的安全技术概论。

请各位编委和广大读者提出宝贵意见,以便我们在陆续刊登的过程中,根据各方面意见,不断改进、调整、补充和完善。

82年4月25日

炸药起爆技术和火工品 *

张寿齐

炸药具有极高能量密度,每公斤或每升常用炸药储能高达 10^3 kcal。(也即 10^6 J)以上,并且可在很短时间内释放。因此,在工程应用或科学研究中常利用炸药作一次性的大功率能源,有价格低廉,设施简易等优点。

绝大部分猛炸药是含氧的有机化合物,有些敏感的起爆药本身并不含氧。不论起爆药或猛炸药都属于亚稳态系统,易于在外界刺激下发生剧烈反应。引发猛炸药使之完全爆轰所需的外界初始能量比引发起爆药要大得多,有时可差几个量级,视外界能量形式而异。就作功能力来说,则猛炸药比起爆药为大,一般为倍数差。

考虑到安全和效果,工程应用时当然选择各种猛炸药作为主装药,为了节省初始外界能量和简化起爆设施,实用时需设计装药序列(或称爆轰序列)。从Nobel于1860年首先应用

* 本文于1982年2月6日收到。

雷管引发猛炸药开始，传统的设计都是先使用少量外界能量引发起爆药作为序列的第一个环节（这就是原来意义上的起爆用火工品），然后通过不同感度和药量的猛炸药件逐步引发猛炸药主装药。整个爆轰序列的工作过程有点类似于电子学线路中的多级放大器，但每一级炸药“放大器”除了接受来自上一级的爆轰能量外，不再需要其它外界能量。

从50年代后期以来，国内外都很重视利用外界能量直接引发猛炸药的研究，目前，不含起爆药的火工品已经实际应用。用外界能量直接引发高密度、大装量的猛炸药主装药是对传统爆轰序列的根本改革，原则上是可以的，但能源庞大，耗资甚多，从经济角度，也许对大多数实际工程目的来说并非必要。有的应用不但要求主装药提供必需能量，而且要求爆轰传递按照指定的途径与时间进行，要求某一时刻爆轰波阵面具有特定的空间分布和波后状态分布，这对爆轰序列设计和各个环节间的起爆过程提出了较苛刻的条件。有关各类炸药的性态，装药工艺，各种反应的特征和爆轰序列的设计与其可靠性问题将另行专门讨论。

随着炸药应用的日益广泛，对起爆技术和火工品的研究也日益深入。本文只能作扼要介绍，重点在固态非均质炸药的起爆，对于火工品也只能局限于输出爆轰能量以起爆猛炸药的这一类，其主要代表为雷管和导爆束。

炸药的起爆在多数场合可以划分为两个性质不同但互相联系的过程。首先是在外界能量作用下造成炸药反应，然后是靠已反应炸药的放能逐步引起整个装药的高速反应和达到完全爆轰。对于多数猛炸药，除了在强冲击波作用下，第一个过程往往有明显的燃烧特征，其传布机制主要是热传导，实现第二过程的主要标志是出现强间断—冲击波，而且是有化学反应能量不断支持的，以接近恒速运行的冲击波也即爆轰波，其传布机制是冲击压缩。

不论外界初始能量取何种形式（如一般机械作用、冲击波压缩、光、热、电、放射性蜕变粒子等的作用或几种形式的综合作用），通过实验和数值模拟可以证明，在大多数情况下，加热炸药是引发炸药反应的直接原因。当然，可以提出异议，例如强电场中载流子的迁移或者光化学反应等导致的非热致反应过程，由于完全不伴随热效应的引发实验难于实现和判定，加之只要有一部分炸药被引发了，对于其余炸药的继续引发还是加热所致。因此，对热引发机制的研究得到广泛重视。

对许多实现成功地引发的实验的数值计算表明（例如对于机械撞击或摩擦和激光照射等），如把试样当作完全均匀的物质，外界能量转换成热能对试样整体加热所造成的温升常常是远不足以引发的。实现引发的原因是由于试样并非理想均匀物质，外界能量在试样的某些局部中造成极高温度，这些局部可以是试样的各种物理性质的不连续处，例如，空穴、裂隙或不同密度的颗粒边界等，这些局部高温区被称为“热点”，通过对液态炸药或特制的炸药晶体等接近均匀的试样的实验观察和简化模型的数值模拟，证明绝大部分引发（特别是实用非均质炸药）都是从热点开始的。

一、炸药的热引发

热引发首先是外界初始能量直接地或经过转换加热炸药，使之发生温升和反应，随后，如果反应放能大于消耗（包括损失），则反应可自持进行下去，否则，反应可以熄灭。如果不考虑装药条件等因素，初始外界能量越大，反应越剧烈，参与反应和能继续引发的炸药量也越大。外界能量的高度集中是最经济的利用方式。

Семенов最早(1934)提出了炸药从加热到爆发的感应期(延迟时间)和炸药爆发温度之间的关系：

$$\tau = C e^{\frac{E}{RT}} \quad (1)$$

式中， τ —感应期(sec)； R —气体常数，其值为 $8,314(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-1})$ ； T —炸药在爆发时

的温度(不是炸药爆发产物的温度); E —炸药活化能($J \cdot mol^{-1}$); C —与炸药有关的常数(sec)。

Семенов关系在 $T \sim \tau$ 坐标中不能无限引伸, 两端都受实际反应性质的限制, 特别是 E 值有时取为某种炸药的常数, 但实际上 E 是炸药温度和化学反应性质的函数, 在应用(1)式确定爆发特征时, 应取与爆发反应相应的 E 值。因此, Семенов关系的应用必须辅以经验常数。

根据(1)式, 可以通过实验求得炸药的相应活化能值; 可以设计专门的试验装置, 按一定条件, 得出不同炸药在相同感应期情况下的爆发温度, 排出热感度顺序; 并且有利于对不同外界初始能量在热效应上的判定和比较。

炸药反应速度和温度之间的关系可用与(1)式相似的Arrhenius方程描述:

$$K = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (2)$$

式中, K —单位时间内已反应炸药的分额(sec^{-1}), 根据化学动力学的质量作用定律, 由 K 可以计算反应速度; A —速率因子(sec^{-1})。

Frank—Kamenetsky在反应遵照(2)式等假定下, 求解一维带反应放能的热流方程, 估算过起爆炸药的临界温度, 取得较满意结果, 但对高速瞬变过程不合适。对于边界条件比较复杂的热点的计算, 或者高速瞬变的不定常问题, 以及二维方法等近年来都有不少进展, 但需要在更专门些的文章中研讨。总的来说, 反应动力学方面似乎进展较少, 美国LANL的Smith在一篇评述性文章中也谈到过类似看法(1979)。

如果单纯地加热, 一般猛炸药在敞开空间中只是平稳地燃烧, 只有在密闭容器内(或者在大量堆积的炸药内部点火), 这种燃烧才有可能转化为爆轰。猛炸药由燃烧转化为爆轰过程的实际意义, 对于安全技术来说比起爆技术更为重要, 对这一过程的深入理解目前还很不足。

二、各种外界能量的利用

这里只讨论目前已实现或者很有希望得到实际应用的利用方式。

(1) 火焰

这是最古老的引发炸药的方法, 现在也还在用, 例如各种火焰点燃的雷管或者带引火头的电雷管。主要利用来自散装或压实的黑火药, 导火索, 火帽或引火头的火焰来引发炸药。对于起爆药一般都可顺利引发, 氮化铅的火焰感度比雷汞差, 可在氮化铅上复盖一薄层火焰感度较高而输出能力较弱的三硝基间苯二酚铅作为过渡药。密闭在坚实外壳中的猛炸药用火焰或热丝点燃后有可能转变为爆轰, 已有这一类结构的雷管, 实现了不用起爆药的愿望, 但总作用时间长, 相应的时间分散性也就大了, 不适于需要高瞬发度或要求时间精度较高的场合。炸药的火焰感度难于计算, 通常结合实际情况设计专门实验装置进行测定比较, 在实验基础上可以归纳一些经验关系, 但局限性较大。

(2) 压缩空气

迅速压缩一定量的空气, 作绝热假定后, 可以计算压缩到一定体积时的空气温度, 结合炸药的有关参数和边界条件, 原则上可以估算反应效果并制作各种压缩空气的火工品。实际上只有这一类型的火帽, 火帽虽然是弹丸引信爆轰序列中常遇到的第一个火工品, 但主要输出火焰热能而不是爆轰能量。

(3) 摩擦

拉火式火工品就是利用表面粗糙的金属杆埋于炸药中, 使用时拉动, 靠杆与药粒和药粒之间的互相摩擦来引发炸药。为提高感度, 往往在炸药中掺以有尖棱的高硬度高熔点杂质,

这类起爆技术在药剂制作、火工品装配和使用过程都不够安全,因此,只有在旧式兵器中用过。作为安全技术研究,用专门设计的实验装置测定各类炸药摩擦感度的工作一直在进行。

(4) 针刺

利用冲击力或惯性力将尖锐的钢针刺入炸药,使之引发,属于弹头引信火帽或弹底引信雷管的常用方式之一。由于机械加工的针尖尺度比炸药分子要大得多,针刺作用实际上是撞击和摩擦的综合。和摩擦作用一样,对针刺效应难于精确计算。

(5) 电热

电灼热桥丝是目前广泛应用的起爆手段之一。对于一般工程应用的桥丝为直径 10^{-2} mm量级的Ni—Cr丝、Cu—Ni丝或Pt—Ir丝,电阻值为 Ω 或 $10^{-1}\Omega$ 量级,通以 $(10^{-1}\sim 1)$ A量级的电流后,桥丝灼热并点燃包覆其上的引火头,以引火头火焰引发起爆药。起爆药也可做引火药,此时可将桥丝埋于起爆药中。

电热起爆过程的计算已得到较多研究,原则上应该求解带电热和反应过程的二维热流方程。计算中要考虑电阻的温度效应,由于桥丝是焊在脚线上的,边界条件比较复杂,如果电源不是直流,计算中也比较麻烦,与其它起爆过程的计算一样,许多基本参数也还缺乏合适数据。如果采用简化模型,分段进行数值计算,并与分解的专门实验互相较核,在一定范围内估计可取得满意结果。

电灼热桥丝直接引发猛炸药是科研中常用的实验室手段,也可做成无起爆药电热雷管如前述。

用火花放电引发起爆药的雷管在科学研究和弹丸引信中都有应用。为了形成电火花击穿,需要较高电场强度,而一旦击穿后,引发起爆药使之爆轰的能量则极微,用氮化铅为第一装药的火花式电雷管全部引发能量仅 10^{-3} J量级,因此,这类雷管由于对静电极为敏感而有被淘汰趋势。用火花放电直接引发猛炸药的工作也得到了研究,已证明是可以实现的,如输入电能为 $(10^{-1}\sim 10^{-2})$ J量级,可顺利引发细颗粒太安的低密度装药使之实现爆轰。

电火花引发的作用机制可能是空气和炸药颗粒的电击穿兼而有之。

还有电阻介于低阻桥丝和高阻间隙之间电热薄膜桥式或半导体式引发结构,这里从略。

以上基本上都是针对起爆药的引发而言的,从五十年代后期开始,主要为了安全目的,同时也因为电子学器件的进层提供了小型化能源的实际可能,用外界初始能量直接起爆猛炸药的研究进展很快。但由于各种原因,这些成果对于一般工程目的还很难迅速推广,概述如下:

(6) 电爆

用脉冲大电流瞬间通过金属细丝或箔箔,使之温升、熔化、气化并形成电爆金属等离子体以加热和压缩周围的猛炸药,可实现引发,合理的设计可保证足够瞬发度。

对于金属电爆过程的物理学和电工学问题,已经得到较广泛深入的研究,诸如不同金属、几何尺寸、环境条件以及各种初始电参数等因素对电爆效果和特征的影响已有大量实验结果和估算方法。电爆引发炸药的机制通常认为是源于金属爆发等离子体的冲击压缩起爆,也有人持异议,认为应该是炽热等离子体的传导加热为主,双方各有一定依据。只要有合适参数,通过数值模拟和补充实验,这问题是不难解决的。从已有的大量实验结果中的反应特征和时间尺度来看,更大可能还是以冲击起爆为主。

用光学刻蚀金属箔,使其形成多个“桥丝”串并联的形式,称为“电爆金属网格起爆器”,可以大面积地起爆猛炸药装药,在 10^3cm^2 量级的面积上可取得波阵面上时间分散性为亚微秒级的各种特定爆轰波形,以用作各种短脉冲加载源。电爆网格平面波发生器的波后状态分布比传统的双炸药层平面波发生器均匀,有利于保持被炸药驱动的飞片的平面度。原则上,可以用整体金属箔代替网格达到同样目的,但所需能源要比网格起爆器大得多。

电爆网格起爆器的数值计算,在很多方面可以利用电爆桥丝的经验,但电流分布更为复

杂,而且引进了工艺上无法完全避免的多个桥丝之间的差异。

(7) 飞片冲击

冲击起爆的机制研究近年来发展很快,对入射到被发炸药中不同脉宽和幅值的冲击波的作用特征,已分别得出了许多经验关系。对于起爆技术研究来说,主要应用窄脉冲入射,在一维条件下,常用如下形式的起爆判据:

$$P^n \tau = N \quad (3)$$

式中, P —入射冲击波压力 (GPa); τ —入射冲击波脉宽 (μs);

n —指数,与炸药性质有关,对多数固态非均质炸药 $n \approx 2$;

N —起爆判据或临界条件 ($\text{GPa}^n \cdot \mu\text{s}$)。

用电爆金属箔驱动塑料飞片,通过飞行加速,可顺利引发猛炸药。已经有所谓电格尼模型将电爆时电流密度和金属箔及飞片的物理、几何特性唯象地关联起来,可作工程设计参考。已有基于此原理的飞片式雷管。

首先提出 $P^2 \tau$ 判据的 Walker 等人原来只考虑了流体力学和起爆效果,不少人指出非均质炸药的冲击起爆本质上是从热点热爆炸开始。可以相信,深入的研究能把流体力学、热力学和反应动力学问题更有机地紧密联系起来,另外还需要密切注意微观结构特征。

持续时间较长的冲击波起爆机制也得到了很多人关注,和猛炸药从燃烧转为爆轰的问题一样,这对于安全技术工作来说也许更为重要。作为科学研究目的,不同脉冲宽度的入射冲击波的取得,可以利用各种尺寸的电炮、激光作用下金属薄膜的爆发、空气炮或轻气炮推进弹丸以及炸药爆轰驱动飞片等各种工具;入射冲击波压力的调整可用变动飞片材料和速度的办法来实现。不同炸药间的传爆过程和带紧贴隔板的炸药引发过程,原则上都属于冲击起爆过程。此时,压力脉冲有缓慢下降而持续时间很长的后沿,从长时间的作功效果来说,这部分要考虑,从起爆角度也许作用不大,如果与起爆实验关联,可根据具体情况选取一定持续时间作为脉宽(入射初始条件)。不同炸药间的直接传爆过程的实际情况大约比单纯从流体力学出发的冲击压缩要复杂得多。

(8) 光起爆

除了某些已经证实以光化学反应为主的特例外,绝大部分光起爆过程是由炸药吸收辐射热量温升而开始反应的。

用强光束照射直接引发某些起爆药(如氯化铅、硝酸银—乙炔银等)和猛炸药(如太安等),可用作实验室短脉冲加载源,有药层薄、均匀、适合各种复杂形状等优点。光来自脉冲氙灯或其它脉冲强光源。当然,可以用单色光,特别是激光,激光具有其它光源辐射无法比拟的高亮度,但用作大面积起爆器则有困难。

激光引发起爆药和猛炸药的研究均已进入工程应用阶段。

激光引发起爆药过程的特征用带反应放能的和光能项的一维热流方程可以较好估算,定量的准确度与动力学参数选取和微观结构有关。由于起爆药所需的外界引发能量极小,引发后能瞬即达到爆轰,制作激光引发起爆药火工品进程较快,效果较好。

激光引发猛炸药目前已可实现瞬时爆轰的有纯态或掺杂装药,透明或镀膜盖片等途径。其相应机制不同。

大部分猛炸药的吸收光谱表明,吸收峰在紫外段。对于常用固体激光,如 1.06μ 的钕玻璃激光和 YAG 激光或 6943 \AA 的红宝石激光,即可见光与近红外波段,猛炸药的吸收系数都很小,如太安对 1.06μ 激光的吸收系数为 10 cm^{-1} 量级。为防止入射激光在炸药中,穿过多,采用在炸药中掺以吸收系数高达 10^4 cm^{-1} 量级的各种金属杂质,对缩短感应期和降低激光引发阈值能量有显著效果。

透光的起界面封闭作用的盖片是实现激光引发的关键措施之一,也可用部分透光的镀金属薄膜(厚度为 10^3 \AA 量级)的盖片,金属薄膜在激光照射下汽化引发装药,此时显然是冲

击起爆机制为主。

从提高瞬发度和入射光能利用率出发，激光起爆都采用调Q技术；从能量分析，固体激光器较为合适；为提高功率密度，引发猛炸药时，一般需用会聚激光束来降低引发能量和保证瞬发性。

三、起爆用火工品

“火工品”是一个十分庞杂的集合的总称，起爆用火工品只占很少份额，如前述，以雷管和导爆束为主要代表。

对于炸药在外界能量作用下的起爆机制和特征的研究是设计火工品的主要依据之一，但由于火工品的装药直径很小，起爆源的尺寸更小，因此，用一维条件得到的计算和实验结果在火工品设计中应用时要加二维修正，数学处理如果不是不可能也是极为繁复的，通常依靠经验关系。激光起爆和小面积飞片冲击起爆以及小直径装药爆轰能量传递到大面积装药中去，的实验研究工作中都声称发现存在“临界起爆面积”效应，并提出众多经验关系或修正方法就是例证。还没有听到考虑空间三维条件的设计，这大约是数学上难以处理的缘故，而不是实际不需要。

一个雷管，通常直径为(5—7)mm，高度为cm量级，外形不大，但包括了整个爆轰序列的缩影。一般是复式装药，例如起爆药—低密度猛炸药—高密度猛炸药，或者没有起爆药层，但也分为多层密度递增的猛炸药层。

已经实用的雷管，前面讨论外界能量利用时都已谈到。由于起爆药极为敏感，所有起爆药本身及其部分原料都有程度不同的毒性，从制作者角度希望能有无起爆药雷管。从工程应用角度，由于近年来大功率发射机增多，易形成和大量积累静电荷的高分子聚合物的应用广泛等原因，电火工品的射频或静电造成的误爆事故几率越来越大，除了采取防射频抗静电设计外，也迫切希望有无起爆药雷管。

目前，可实用的火工品中，综合安全性能，最好的是激光—猛炸药雷管，激光一起爆药雷管防射频和静电性能也极好，因为它们没有任何可引入电能的脚线。但一次引发大量激光雷管的分光技术比较繁复，要有低损耗光纤，从经济实用方面综合权衡，爆炸丝猛炸药雷管实际具有足够防射频抗静电能力而居于可首先采用的地位，电爆金属箔驱动的飞片式猛炸药雷管安全性能优于爆炸丝的，但能源较大，工艺较复杂。一般工程应用可推广电热或火焰的猛炸药雷管。

导爆束是用纤维织品或金属软管包裹的细长炸药芯的火工品，用来传递爆轰讯息或能量，最初应用在三十年代左右。由于宇航事业发展需要，目前的金属软管导爆束种类很多，外壳可用银、铜、铝等延展性能好的金属，药芯可用太安、黑索金、六硝基芪等猛炸药，直径最小的只有1mm左右，有良好挠曲性能和足够爆轰稳定性，引发能力较小，而这对某些希望降低起爆火工品带来影响的科学研究来说也还是一个优点。

导爆束细长药芯的爆轰过程特性还没有得到很充分的研究。

雷管或导爆束的输出能力常用其引发纯化装药系列或辅以“钢凹”检验的试验结果以及引发带隔板装药系列(也可辅以钢凹检验)结果用数理统计来表征，这样可同时取得可靠性判定，但没有直观的与流体力学过程对应的量。近年来用高速光学摄影和闪光X射线摄影仔细观察其爆轰效果，用压阻传感器直接测量雷管和导爆束的输出压力脉冲形状，均可取得有价值的定量数据，利于数值模拟和改进设计，但这些基本上只能在科研或定型过程中进行，作为大量生产的检验实验，还是以采用各种价廉易行的简化方法为宜(例如雷管输出能力，对已定型的仍可使用铅板穿孔检验)。

限于本人水平和篇幅，对起爆技术和火工品只能讨论到这里，不但粗糙，而且肯定会有谬误之处，作为基础知识讲座的头一讲，也不太了解需要情况。请读者不吝指正，必要时可另行专题讨论。