

讲 座

高级炸药的性能及工艺

董海山

(1982年4月19日收到)

前 言

炸药是产生爆炸与冲击的主要能源。由于它的能量高度集中，释放速度很快，因而具有惊人的输出功率。例如一公斤硝化甘油爆炸时产生的功率约为一亿二千万马力；直径为64毫米的梯恩梯药柱沿轴向爆轰时，能量释放功率达 10^7 瓦，相当于美国发电功率的总和。由于有这样大的功率，并且炸药使用方便、价格便宜，所以不论在军事技术上，还是在国民经济中，炸药都得到了广泛的应用。

本讲的内容是介绍高级炸药的概况、主要性能和工艺。所谓高级炸药，在本文所指的是，具有准确的爆轰性能，可制成具有精密的几何尺寸、优良的成份与密度均匀的装药，以便与一般工业炸药相区别。

各类炸药的特点及工艺

一、单质炸药

单质炸药是指具有爆炸性的化合物，它是各类高级炸药的主要成份。常用的单质炸药有梯恩梯(TNT)、黑索今(RDX)、特屈儿(CE)、太安(PETN)和奥托今(HMX)，其次是三胺基三硝基基本(TATB)、硝基胍(NO)、六硝基芪(HNS)、重(三硝基乙基-N-硝基)乙二胺(ZOX)和重(三硝基乙基)缩甲醛(TEFO)等。在单质炸药的分子中都有可以燃烧的碳、氢原子，也含有作为氧化剂的氧原子。不过分子内的氧原子与碳、氢原子之间通常被氮原子隔开。当作用于炸药的外界能量超过某一限度时，炸药分子内各原子之间迅速发生重排，氧原子与碳、氢原子化合，生成 H_2O 、 CO_2 、 CO 等气体，并放出大量反应热，即发生爆炸反应。

根据分子结构的类型可把单质炸药分为硝基碳氢化合物(如TNT)、硝基胺类化合物(如RDX、HMX)和硝酸酯(如PETN)。自从第二次世界大战以来，又陆续出现了其它类型的炸药，如硝基碳类即无氢炸药(如六硝基苯即HNB)、含氟炸药(如氟代二硝基乙基缩甲醛，简称FEFO)、氯酸酯炸药和含硼炸药等。其中无氢炸药被认为是提高能量的重要途径，而用氟取代炸药分子中的某些硝基或氢原子可以降低感度和提高安定性。不过在这几个新类别中，目前只有极个别的品种(如FEFO)才得到了应用。

我国合成单质炸药的工作是比较好的。早已达到的水平是，比重最大的为2.07，爆热最高的为1700千卡/公斤，爆速最高的为9500米/秒，圆筒试验比动能最高的比HMX高14%。钝感高能炸药的合成及应用研究早已开展。其中在国内外最受重视的是TATB，它的特点是比重大、耐高温、对机械的和热刺激非常安全、对HMX等高能炸药有明显的钝感作用。但是TATB的能量较低(约为HMX的60%)，并且价格昂贵。国外已经报导，我国也早已合成出的二硝基甘脲被认为价格便宜、能量较高(接近RDX)、容

易起爆、机械感度相当于T A T B。但是这类 α -碳基硝胺类炸药都有水解问题,其安全性能也需要进一步论证。

根据当前的发展水平及应用的需要,今后合成单质炸药的主要方向可能是:

1. 合成新的钝感高能炸药,使其感度相当于T A T B,而能量相当于RDX,甚至HMX。
2. 合成新的能量更高的炸药,使其能量显著高于HMX,而其它性能满足使用要求。
3. 合成新的含能粘结剂、含能增塑剂和高能氧化剂,以服务于配方的发展工作。
4. 研究HMX、T A T B等炸药的新合成工艺,以便降低成本、推广应用。

最常用的单质炸药都是用浓硝酸(或与硫酸或醋酐的混合物)与相应的有机化合物之间的硝化反应来合成的。硝化产物经除酸、精制和干燥、操作之后而变为最后产品。其它结构复杂的炸药需要经过多种化学反应才能得到。例如合成T A T B需经过氯化、硝化、胺基化等反应,所以价格较高。

表1中列出了已得到应用的若干单质炸药的化学名称、物理性质和爆轰性能。

表1 一些单质炸药的性质

炸 药	学 名	比 重	熔点 $^{\circ}\text{C}$	颜 色	爆速/密度 (mm/ μs)/(g/cm 3)	主 要 用 途
TNT	三硝基甲苯	1.663	80.9	淡黄	6.928/ 1.634	主装药,混合炸药成份
RDX	环三次甲基三硝胺	1.816	203	白色	8.712/ 1.786	主装药、传爆药、雷管装药
HMX	环四次甲基四硝胺	1.902	278	白色	8.917/ 1.85	主装药、导爆索装药
PETN	季戊四醇四硝酸酯	1.77	141-142	白色	8.60/ 1.77	传爆药、雷管装药
CE	三硝基苯甲硝胺	1.73	127.9	浅黄	7.86/ 1.70	传爆药
TATB	三胺基三硝基苯	1.94	7330	浅黄	7.76/ 1.88	主装药、活性钝感剂
NO	硝基胍	1.715	232	白色	7.65/ 1.55	混合炸药组份
HNS	六硝基芪	1.73	316-317	微黄	7.019/ 1.656	传爆药、柔爆索装药
ZOX	重(三硝基乙基-N-硝基)-乙二胺	1.87	179-180	白色	8.946/ 1.85	主装药、传爆药、雷管装药
TEFO	三硝基乙基缩甲醛	1.78	64.3-65.7	白色	8.158/ 1.694	增塑剂
FEFO	氟二硝基乙基缩甲醛	1.60	12	无色	7.8/ 1.60	增塑剂

二、混合炸药

单质炸药除TNT、特屈儿以外是很少单独使用的,因为绝大多数单质炸药不能满足成型性能、安全性能、力学性能等多方面的要求。例如,HMX和RDX具有优良的爆轰性能和热安定性,但它们熔点高、机械感度大,既不能浇铸成型也不能压装成型,必须把它们做成各种混合炸药才能用作主装药或传爆药使用

1. 混合浇铸炸药

高熔点炸药最早是悬浮在熔融的TNT中,浇铸到模具内,冷却后凝固成一定形状而得到使用的。在TNT-RDX系统中,后者的重量百分数一般为50-75%。为了提高RDX含量和装药的成份均匀性、密度均匀性,可采用综合颗粒和球装技术。为了改善裂纹现象、均匀性和其他性能,可考虑加入合适的添加剂,如硝基甲苯、硝化棉、六硝基芪和各种纤维。TNT/RDX炸药由于其成本低廉、操作安全,至

今仍广泛用于各个领域。与此类似的混合炸药还有TNT-PETN (50/50), TNT-HMX(25/75)。此外有人建议研究钝感的混合浇注炸药系统,如TNT-TATB,三硝基苯(TNB)-TATB等。

混合浇注炸药的优点是价廉、安全、设备可以因陋就简,缺点是能量较低(只相当其中高熔点炸药的80-88%)、尺寸稳定性不佳,另外在浇注过程中由于固相的沉淀而使各部位的成份与密度均匀性不够理想。

2. 石蜡钝感炸药

解决单质炸药的成型和安全问题的另一种方法是用石蜡、地蜡和硬脂酸作粘结钝感剂把单质炸药的颗粒包覆起来,然后用压机压装使用。如钝感黑索今和钝感太安都含5%的蜡类钝感剂,其机械感度大幅度下降,易于成型,爆速分别约为8300和8000米/秒,它们一般用作传爆药。

这类炸药的缺点是:由于加入了5%(体积百分数约9%)的惰性材料,其能量只相当其中单质炸药的85%左右;并且其机械强度太低(抗压强度为50-70公斤/厘米²),又易于蠕变。

石蜡钝感炸药一般冷压成型。由于药柱的孔隙度对冲击波感度影响很大,所以用作传爆药的药柱一般只压到理论密度的95%以下。

3. 塑料粘结炸药

1944年美国洛斯·阿拉莫斯科学实验室首先开始了探索塑料在混合炸药中的应用。1947年研制成了第一个塑料粘结炸药——聚苯乙烯粘结黑索今。从1952年美国开始生产HMX以后,又陆续研制了一系列塑料粘结HMX的配方,如PBX-9404、LX-04、LX-09等,并且已经用于武器。实践证明,塑料粘结炸药具有高的爆轰性能(例如LX-09的能量可达HMX的96%),理想的机械力学性能(抗压强度可达500公斤/厘米²),优良的环境适应性、尺寸稳定性和成型性能(可以像塑料那样在车床上进行机械加工),所以这类炸药得到了很大的发展和广泛的应用。

塑料粘结炸药由单质炸药、粘结剂、增塑剂和钝感剂组成,其主要成份及其含量和作用列于表2。

表2 塑料粘结炸药的主要成份

组 份	种 类	含 量	作 用
主 炸 药	RDX, HMX, PETN, ZOX, TATB, HNS等	85-98%	主 要 能 源
粘 结 剂	硝化棉, 氟橡胶, 聚乙烯醇缩醛或醋酸酯, 尼龙, 有机玻璃, 聚异丁烯等	1.5-15%	解决炸药成型问题, 提高药柱的机械强度、尺寸稳定性和环境适应性
增 塑 剂	TEFO, TNT, FEFO, 三(氯乙基)磷酸酯, 二硝基丙基缩甲醛与缩乙醛的共熔物	0-5%	增加造型粉的可压性, 提高药柱的相对密度, 改善粘结剂的柔韧性和药柱的环境适应性
钝 感 剂	石蜡, 地蜡, 硬脂酸, 石墨, TATB等	0-10%	降低机械感度, 提高安全性, 石墨还起抗静电作用

塑料粘结炸药的制法,一般是先把粉状主炸药与水混合,在强烈搅拌和加热下,逐渐加入粘结剂、增

塑剂和钝感剂的溶液，同时使溶剂蒸发，当粘结剂的溶液滴入一定数量以后即形成颗粒，加完溶液并蒸干溶剂以后，经冷却、抽滤、烘干、筛选即得造型粉。

造型粉的颗粒结构对性能有很大影响。钝感剂包在颗粒外面对降低撞击感度、摩擦感度和静电感度有很好的效果。但石墨包在颗粒外面使成型性能变坏，药柱容易起裂纹。

造型粉用油压机压成药柱，也可用等静液压成型。后一方法可得到相对密度更高、密度均匀性更好的装药。药柱密度决定于压药温度、比压和保压时间等因素，同时与药柱尺寸也有很大关系。大尺寸药柱由于外摩擦损失减小，因而容易压成较高的密度。例如，用1600公斤/厘米²的比压加热压制 $\phi 100$ 毫米药柱的密度可达理论密度的98%以上，而欲获得同样密度的 $\phi 20 \times 20$ 药柱就需要用3000公斤/厘米²的压力。为了提高药柱密度还可以采用复压法。在复压法中每次保压只需几分钟，泄压后再压第二次，一般压制三次即可。用这种方法药柱的相对密度可达99%。

4. 挤注炸药

挤注炸药是用热固性树脂与单质炸药在捏合机内捏合成面团状，再用挤压浇注、吸注或注射等方法把物料装到模具内，然后加热固化成型。主炸药含量一般为75—90%。通过对树脂和增塑剂的种类及配比的选择，既可以做高强度炸药（抗压强度可达800公斤/厘米²，抗拉强度可达130公斤/厘米²），又可做成如橡胶那样可以弯曲的弹性材料。当使用含能粘结剂和含能增塑剂时，配方的能量也可以做到接近塑料粘结炸药的水平，并且可以得到相当低的机械感度。例如美国利弗莫尔研究所的一个试验配方RX-08，其成份为HMX/FEFO/AFNOL（一种硝基聚氨酯）=80.0/16.8/3.2，爆速为8800米/秒，能量与PBX-9404相当，容易起爆（相当于LX-09）。但安全性能比PBX-9404和LX-09好得多，其苏桑撞击感度相当于LX-04—HMX/维通（氟橡胶）=85/15，外包金属壳的球形装药以431英尺/秒的速度（相当于从875米空中的自由落体）撞击混凝土靶时，金属壳被严重撞坏，有一半炸药燃烧，但没有发生爆炸。此外这类炸药容易挤注到任何形状的模具或容器内就地固化而不收缩，因而可以避免昂贵和不安全的机械加工。

由于挤注炸药可以大幅度调节其力学性能，又是把高能量与低感度结合起来的一个重要途径，因此受到美国海军和利弗莫尔研究所的很大重视，并为此进行新的含能粘结剂和含能增塑剂的合成，以便为配方研究提供更好的材料。

挤注炸药的另一变种是膏状炸药，它由固体炸药、液体炸药（或含能液体载体）及无定形SiO₂凝胶剂组成。这种炸药的形态像牙膏，使用时可临时挤注到容器内，挤压压力约需50公斤/厘米²左右。例如美国利弗莫尔研究所研究的RX-08其配方为HMX/DF/SiO₂=72.82/25.90/1.29，装药密度为1.830克/厘米³（此时为理论密度的99.7%）时，爆速为8564米/秒，爆压360千巴。用于挤注炸药和膏状炸药的挤压机共有四个。

5. 液体混合炸药

液体单质炸药如硝化甘油、硝化乙二醇和FEFO等单独使用时都不太安全，因为它们在受到微弱的刺激时，有发生低速爆轰的危险而容易造成事故。液体混合炸药则比较安全，同时还可以获得较高的能量并改善其它性能（如降低感度和熔点等）。这类炸药一般是液体氧化剂和液体负氧炸药或液体燃料的均相溶液。常用的氧化剂有四硝基甲烷和浓硝酸等，常用的液体燃料有硝基甲烷、硝基苯或其它的碳氢化合物。

液体混合炸药可以灌注到任何形状的容器内使用，无需对炸药的形状进行加工。其缺点是能量较低，爆速不大于8000米/秒。

6. 非理想炸药

非理想炸药是指其爆炸反应在C—J点远未达到热力学平衡的那种炸药。这类炸药一般含有硝酸铵、

过氯酸铵 (AP)、过氯酸钾 (KP) 等固体氧化剂和铝粉等固体燃料。非理想炸药在爆轰时, 可爆炸的组份首先发生爆轰, 然后在产物膨胀过程中在各组份的爆轰产物之间, 在产物与氧化剂或固体燃料之间继续发生化学反应而补充放出大量的热。这些热量由于释放速度较慢对 $C-J$ 参数并没有贡献 (在零点几微秒以内释放的热量对爆速和爆压才有贡献), 但对金属加速、水下爆炸和其他作用时间长的爆破工作则能起到显著的作用。这是因为在产物膨胀做功的过程中, 由于继续释放能量而使压力衰减缓慢, 因而 $\int PdV$ 反会增高。因此尽管这类炸药的爆速和爆压不高, 但其能量可以达到相当高的水平。例如, 重三硝基乙基硝酸胺 (HOX, 其氧平衡为 +16.5%) 与 HMX (氧平衡为 -21%) 配成零氧平衡的混合物, 其爆速与爆压低于密度为 1.89 的 HMX, 但爆热比 HOX 和 HMX 都高 300 卡/克以上, 因此其圆筒试验比动能比后者高 12%。

表 3 列出了美国利弗莫尔几种非理想炸药的试验配方及与标准炸药的性能对比。可以看出, RX-11-BA 和 RX-11-BK 的 HMX 含量比 Octol 分别少 22% 和 29.6%, 爆速比后者分别低 360 和 1020 米/秒, 但加速金属的能量都大于 Octol。对比 RX-04-DS 和 Lx-14 也可看到同样的情况。而在某些应用中正是希望使用这种低爆速、高能量的炸药。

表 3 某些非理想炸药及与标准炸药的对比

炸 药	成 份	ρ_0 g/cm ³	D mm/ μ s	加速金属的相对能量
Comp B	RDX/ TNT/ 腊 60.4/ 37.8/ 1.8	1.72	7.99	1.00
Octol	HMX/ TNT 72.4/ 27.6	1.81	8.48	1.15
Lx-14	HMX/ 聚氨酯 93/ 7	1.84	8.83	1.21
Rx-04-DS	HMX/ Al/ 维通 82.8/ 7.2/ 10.0	1.92	8.52	1.23
Rx-11-BA	HMX/ 5 μ AP/ 维通 50.4/ 39.1/ 10.5	1.89	8.12	1.19
Rx-11-BK	HMX/ 2 μ KP/ 5 μ Al/ 聚氨酯 43/ 40/ 5/ 12	2.08	7.46	1.18

非理想炸药还可以获得较低的感度, 从而提高安全性能。同时原料来源丰富、价格便宜, 因此是个重要的发展方向。

非理想炸药的成型方法由其组成而定。阿马托 (TNT/ 硝酸铵) 采用铸装, 高熔点成份含量多的塑料粘结炸药采用压装, 而含有足够液体成份的配方采用挤注成型工艺。

7. 低能炸药

在某些应用中需要低爆速、低爆压的低能炸药。有人提出爆速超过 TNT 的为高能炸药, 低于 TNT 者为低能炸药, 但并无严格的界限。低能炸药一般是用单质炸药加稀释剂来获得。常用的单质炸药有 TNT、RDX、PETN, 常用的稀释剂有硝酸盐或其他氧化剂、塑料或其他填料以及空气等。根据组成情况可以采用浇铸成型, 如 TNT/ Ba(NO₃)₂ 炸药, 也可采用压装, 如 R/B 炸药。

有时需要密度、爆速和爆压更低的炸药。虽然采用松装纤维状硝基胍或其它办法可达此目的, 但若想获得爆轰性能精确的、成份均匀性和尺寸稳定性及机械强度都优良的精密装药则以泡沫炸药为最佳。

制备泡沫炸药有两种方便的方法。其一是把可发性聚苯乙烯珠与黑索今或太安粉末混合均匀, 按需要

的密度称取药量, 装入模具内, 将模具投入水浴内煮沸 (或用蒸汽加热), 此时聚苯乙烯珠胀满整个模具冷却后开模即得聚苯乙烯泡沫炸药。此法简便易行, 但机械强度不算太高, 爆速已做到1700米/秒。另一种方法是把炸药粉末与聚氨酯树脂各组份及发泡剂 (如水或氟利昂) 迅速混合, 然后浇注到模具内, 此时树脂发生化学反应并放出热量, 与水反应生成脲放出 CO_2 , 生成的 CO_2 和气化的氟利昂就起到了发泡的作用。这种聚氨酯泡沫炸药具有很高的机械强度, 密度可在 $0.02-1$ 克/厘米³之间调节。太安泡沫炸药可做到1000米/秒的稳定爆速, 爆压可达5千巴。

高级炸药的性能

一、爆轰性能

1. 爆轰参数

炸药的炸轰参数 (爆速 D 、爆压 P 、爆轰产物多方指数 k 等) 是衡量炸药做功能力的标志, 又是进行爆轰装药设计的依据。因此必须精确测试这些参数。爆速的测试比较简单, 精度较高。爆压的测试问题比较复杂, 一般都采用自由面速度法, 对药量有限的炸药可采用水箱法和板痕试验粗估法。这些方法都属间接测量。直接测量爆压的方法有电磁法和锰铜压力计法, 这些在我国都已建立。

这里值得注意的是, 对于猛炸药, 爆速虽然很快就达到稳定值, 爆压却有一个缓慢的增长过程。当起爆压力低于猛炸药的稳定爆压时 (或叫无限介质有效爆压), 随着爆轰波沿着药柱传播, 有效爆压不断增长, 然后趋于极限值 (即无限介质有效爆压), 当起爆压力超过猛炸药的无限介质有效爆压时, 随着爆轰波的传播, 爆压逐渐衰减, 最后也趋于极限值。此外, 对不同的炸药, 爆压增长的情况不同, 而且有交叉现象发生, 因此在交叉点前后的两种厚度, 两种炸药的能量次序会发生颠倒, 如图所示。

与爆压随药柱厚度而增长相对应的是, 爆轰产物多方指数 k 随药柱厚度的增加而减小, 并且与药柱厚度的倒数呈线性关系。Mader和Craig把这种关系式叫做增长方程。PBX-9404的增长方程为

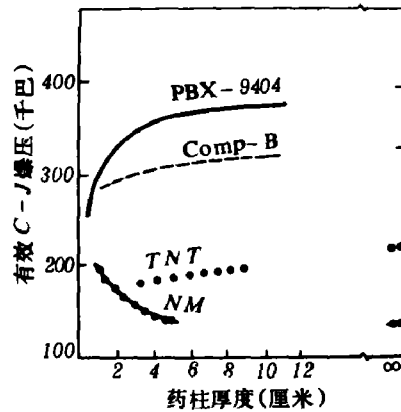
$$k = 2.68 + 1.39/\ell \quad (1)$$

式中 ℓ 为药柱厚度 (cm)。

如果炸药中间有金属隔板, 那么就不能以整个药柱厚度来计算。这是因为金属隔板能中断爆压的增长。在这种情况下, k 值的计算应只取金属隔板下面的厚度。这一结果不仅由Craig的实验所证明, 而且得到了我们实验的证实。

PBX-9404的厚度不同时, 爆速变化小于1%, 而爆压变化25%。这种现象的本质现在尚未搞清楚。Mader提出了碳凝聚机理的假说: 随着药柱厚度增加, 爆轰时生成的气体碳逐渐凝固成固体直至石墨。在爆轰产物中, 石墨碳与气体碳的比值假设为一系数值, 再用BKW和LJD状态方程进行计算, 此时的确可以出现爆速基本不变而爆压变化25%的现象。按照这个机理也可以得出, 氧平衡近于零的炸药 (如太安), 因爆轰产物中生成的碳很少, 爆压应与药柱厚度关系不大, 即爆压应很快地达到稳定值。计算结果确是如此。不过, 至今尚未见到实验数据的证明。而且Craig对Comp·B试验的结果似乎与此相反, 因Comp·B的氧平衡比PBX-9404差, 但前者爆压的增长速度却显著比后者快 (见图)。

总之, 爆压及多方指数 k 不仅决定于炸药的品种和装药密度, 还与药柱厚度等因素有很大的关系。因此在进行装药设计时, 必须使用该装置相对应的爆压与多方指数 k 值。与使用哪一种状态方程来计算更为精确的问题比较起来, 爆轰波的增长问题显得更加重要, 所以需要优先考虑。



几种炸药在Baratol平面波透镜起爆下的爆压增长曲线
(右面纵坐标上标出了相应的无限介质有效爆压值)

2. 炸药能量的评价方法

炸药的使用目的不同,评价其能量的方法也应不同。由于爆轰过程中,物理的和化学的因素极其复杂,因而最可靠的评价方法是做模拟试验。例如用于加速金属时,用园筒试验;用于穿甲和射孔时,测其侵彻深度等等。

园筒试验是评价炸药加速金属能力的比较直观和精确的方法。对理想炸药一般做1英寸的标准园筒试验,用筒壁位移6毫米($V/V_0 = 2$)和19毫米($V/V_0 = 7$)的壁速或比动能来表示。在6毫米处筒壁加速剧烈,数据波动稍大,而19毫米处的数据比较稳定。对于非理想炸药和作用时间长的装置也可取 $V/V_0 = 11$ 等处的比动能进行比较。

非理想炸药由于反应时间长,直径效应显著,有时需要做2吋或更大的大园筒试验。在单质炸药合成研究中,由于药量有限,可以用 $\phi 10$ 毫米的小园筒试验来相对评价其能量。同时还可测出爆速,并在药柱末端贴以钢板而得到板痕值。

根据炸药园筒试验的 $R-r$ 数据,可以得到该炸药JWL方程的六个系数,而JWL状态方程被认为比 γ 方程能更精确地描述炸药对金属的加速过程。

评价炸药加速金属能力的方法还有一维推体试验和球形试验等。我们的一维推体试验是用平面波透镜起爆 $\phi 100 \times 80$ 药柱,推动 $\phi 96 \times 2$ 毫米厚的钢板,测定飞行45毫米处的飞板速度。根据理论计算,此时的速度约为其极限速度的96%左右。在一维推体的试验装置中,炸药的爆轰化学能转化为飞板动能的效率为17-24% (取决于炸药品种),而园筒试验的效率为65-87%。

理想炸药的园筒试验比动能和一维推体试验的飞板比动能与其爆轰参数之间有很好的关系:飞板比动能

$$E_r = \frac{1}{2} u_r^2 = 0.5604 \frac{D^2}{k+1} - 0.7015 \quad (2)$$

相关系数为0.994。式中 E_r 单位为千焦耳/克, u_r 和 D 的单位是毫米/微秒, D 、 k 是用平面波透

镜起爆80毫米药柱测得的数据。

位移19毫米, 相对于TNT的园筒试验比动能可按式计算 (TNT为100):

$$E_{cyl}^{TNT} = 8.922 \frac{D^2}{k+1} - 8.390 \quad (3)$$

理论和实验都证明, 爆轰产物的多方指数 k 是效率因子。 k 值越大, 爆轰的化学能转化为机械功的效率越高。

飞板速度也可用式 (4) 计算, 式 (4) 还可计算 u_r 随药柱密度 ρ_0 的变化。密度增加0.1克/厘米³ 时, 爆速一般增加0.3-0.4毫米/微秒, 而 k 的增加量可取0.06。

$$u_r = (0.675 - 0.054k) D + 0.56 (\rho_0 - 1.855) \quad (4)$$

对于一些简单的装药模型, 可以用格尼方程来计算炸药驱动金属的极限速度。在各方程中, 金属的最终速度都是格尼能 E 和金属与炸药的质量比 M/C 的函数。因此格尼能 E 可用来相对评价炸药加速金属的能量。而格尼能可以用园筒试验的筒壁极限速度 $u_{cyl,m}$ 由式 (5) 计算, 也可以用 $D^2 / (k+1)$ 按式 (6) 计算:

$$E = \frac{u_{cyl,m}^2}{2} \left(\frac{M}{C} + \frac{1}{2} \right) = E_{cyl} \left(\frac{M}{C} + \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

$$E = \frac{1}{2} (0.54 \sqrt{\frac{D^2}{k+1}} + 0.6)^2 \quad (6)$$

现将我国一些炸药的爆轰参数、园筒试验比动能 E_{cyl} 、飞板比动能 E_r 、格尼能 E 的数据列于表4。

表4. 一些炸药的爆轰参数及能量

炸 药	装药密度 ρ_0 (g/cm ³)	爆速 D (mm/ μ s)	爆压 P (GPa)	k	$E_{cyl,m}^{1,2}$ (KJ/g)	E_r (KJ/g)	E (Cal/g)
TNT	1.634	6.928	19.1	3.11	0.974	5.82	715
CE	1.714	7.642	26.8	2.74	—	7.73	891
RDX	1.765	8.661	32.6	3.06	—	9.56	1021
TNT/RDX 40/60	1.686	7.790	27.0	2.78	1.242 ($\rho_0 = 1.691$)	8.34	913
RDX/石蜡 95/5	1.655	8.358	26.2	3.41	—	—	—
PB-NQ-1	1.676	8.159	26.2	3.26	—	6.60	—
PB-HMX-4	1.845	8.866	36.3	3.00	—	10.30	1071
PBX-9404	1.840	8.812	36.3	2.94	1.612 ($\rho_0 = 1.852$)	10.21	1073
PB-ZOX	1.840	8.816	37.7	2.79	1.722 ($\rho_0 = 1.802$)	10.73	1109
PB-PETN	1.757	8.173	30.1	2.90	—	9.16	961
H4PNG	1.771	8.673	33.0	3.04	—	9.76	1028
TNT/B.(NO ₂) ₂	2.660	4.776	10.8	4.624	—	—	—
R/B	0.825	4.35	4.8	—	—	—	—
B 0750 泡沫	0.7	3.20	2.1	—	—	—	—

注：RDX/石蜡的爆轰参数是徐康等同志用水箱法测的结果，其余皆用平面波透镜起爆80毫米厚的药柱测得的，其中PB-NQ-1在透镜和药柱之间加了10毫米的TNT/RDX传爆药片。

二、安全性能

炸药是亚稳态物质。由于外界对它的偶然刺激而发生的意外爆炸事故是屡见不鲜的。因此对炸药必须进行安全性能鉴定，而在生产、运输和使用过程中，要严格遵守技安规则。

1. 撞击感度

测定炸药撞击感度的经典方法是落锤试验。我国通常用10公斤落锤从25厘米高度自由落下，撞击均匀铺在两个 $\phi 10$ 毫米钢击柱之间的50毫克炸药粉末，而以爆炸百分数来表示撞击感度。也可以用“上下法”测定爆炸几率为50%时的落锤高度（即特性落高）来表示。后者的药粉量为35毫克，锤重一般为5公斤。

影响落锤感度的因素是很多的。除炸药品种以外，测试方法、炸药量、颗粒度、击柱的导角、击柱与击套的间隙等都有明显的影响，有时甚至发生炸药感度次序的颠倒。例如，用标准条件下的爆炸百分数来比较，HMX比RDX敏感（分别为100%和80%），而按50%特性落高，RDX比HMX敏感（分别为28和33厘米）。在测定50%特性落高的试验中，药量为35毫克时，TNT和PB-RDX分别为59和11厘米，而药量为50毫克时，分别为81和100厘米，次序又发生了颠倒。这种复杂情况的产生，是由于炸药在遭受撞击时所吸收的能量多少及其分布与炸药的物理性质和实验条件有很大的关系所致。

在落锤试验中受试炸药都是粉状的，而实际使用的绝大多数都是密实的药柱。为了模拟药柱在遭受猛烈撞击时的情况，美国建立了苏桑试验。在这种试验中，将约0.45公斤的药柱装在苏桑弹的头部，用火炮或空气炮以不同的速度射出，垂直撞击到装甲钢靶上，测定周围的空气冲击波超压，换算成释放的相对能量，得出相对能量释放与弹丸速度曲线。苏桑感度用开始有能量释放的弹丸速度阈值以及能量释放与弹丸速度曲线的斜率来表示。显然，速度阈值越小、曲线斜率越大的炸药就越敏感。

苏桑试验需要复杂的试验设施和巨额投资。为了用简单方法鉴定药柱受撞击时的安全情况，可考虑测定药片的落锤撞击感度。60年代中期我们做过一些试验，不久前法国人报告了可喜的结果。他们把炸药压成 $\phi 10 \times 4$ 毫米的药片（或机械加工而成），然后在落锤仪上撞击，数据以声响水平——落高曲线来表示。结果发现，TATB和HMX的这种曲线与苏桑试验中空气中的超压——射弹速度曲线非常相似，因而似乎有对应关系。

2. 摩擦感度

我国测试炸药摩擦感度的方法与苏联相似：将30毫克药粉均匀铺于两个钢滑柱之间，在卡兹洛夫摩擦仪上用40公斤/厘米²表压压紧，然后将1.5公斤摆锤自由落下，撞击上滑柱使之位移1.5—2毫米而发生强烈摩擦。实验结果以爆炸百分数表示。

为了模拟药柱的撞击摩擦感度，英、美建立了滑道试验。试验的炸药块置于一种摆动装置上，从不同的高度摆动落下，以一定的角度（通常为14°和45°）撞击和摩擦铺沙的钢板靶。试验结果以药块发生反应的等级来表示。反应等级从药块保持完整、没有反应的零级到爆轰的六级共分七等。滑道试验不仅能鉴定不同炸药在装药工厂生产操作过程中的跌落感度，而且可用来鉴定车间内不同地面的安全程度。

3. 炸药感度的综合评价

为了对新炸药或配方的安全性能做出可靠的评价，除撞击与摩擦感度以外，还要做热感度（爆发点和

热爆炸试验)、冲击波感度(隔板试验、最小药量试验和楔试验等)、静电感度,有时还需做枪击感和火焰感度等。不同的炸药对上述各种形式的刺激有不同的响应。例如HMX的热感度比特屈儿低得多,而机械感度要高得多;HNS的机械感度中等,而冲击波感度相当大;在机械感度中,HOX与TNT/RDX 40/60的撞击感度皆为44%,但HOX的摩擦感度为100%,而后者者只有4—8%。从外界刺激的能量来看,常用炸药爆发点的差别不超过一倍,而引起不同炸药爆炸所需的撞击能相差约90倍。由此可见,在炸药的各种感度之间和不同试验条件之间没有对应关系,不同刺激形式引起炸药爆炸所需能量之间没有当量关系。这种现象的原因是:

a) 外界刺激的作用时间和引起爆炸的机理相差很大。冲击波感度是微秒级,机械感度是毫秒级热感度以秒、分、或小时来计量。在撞击过程中,不像热感度那样全部炸药均匀加热,而是产生局部高温热点,在热点处首先爆炸,然后再传播到全部炸药。

b) 由于炸药的机械性质(摩擦系数、硬度、流动性等)不同,或试验条件不一样,在撞击、摩擦作用下炸药对能量的吸收程度不同。而热感度与上述机械性质没有甚么关系。

c) 炸药由于熔点、挥发性、潜热、导热系数、比热等不同,所获得的初始刺激的能量把局部或全部炸药的温度提高的程度不一样,即用于活化分子的能量是不同的。

d) 不同形式的初始刺激引起炸药化学反应的形式也不一样。冲击波可直接引起爆轰,热刺激在引起炸药爆轰以前都要经过热分解和燃烧阶段,而热分解、燃烧和爆轰的反应产物、反应热又是不一样的。

由于上述的复杂原因,并且炸药在生产、运输和使用过程中所受刺激的形式和刺激的条件是多种多样的,所以需要各种感度和几种条件下的试验数据来综合评价炸药的安全性能。在这方面,外国还提出一些评分办法:例如Popolato把各种炸药在各种感度试验中排队给分,然后以总分来评价炸药的综合感度。最后在表5中给出一些炸药的各种感度数据。

表5. 一些炸药的各种感度数据

炸 药	撞击感度 %	50%特性落高 cm	摩擦感度 %	爆发点 °C	隔 板 试 验	
					药柱空隙度%	隔板厚mm
TNT	4—8	5.9	0—4	475	1.75	21.86
特屈儿	4.8	26.8	4—12	257	1.85	22.04
太 安	100	16.2(2kg)	100	225	—	—
RDX	80	25.5(2kg)	76±8	260	—	—
HMX	100	—	100	327	—	—
ZOX	92	—	100	229	—	—
TEFO	80	—	43	236	—	—
HNS	40	—	36	350(不爆)	—	—
TATB	0	>130	0—4	340(不爆)	—	—
TNT/RDX 40/60	44	5.3	4—8	—	3.08	20.10

注:特性落高试验的药量为3.5毫克,除太安与RDX为2公斤落锤外,其余皆为5公斤。爆发点为5秒延滞期。隔板试验为φ20药柱铝隔板。