

固态炸药的燃烧转变成爆轰

薛鸿陆

(1984年1月3日收到)

本文对于固态炸药的燃烧转变成爆轰进行了综述。提出由于这是复杂的多阶段不定常过程，因此重点应该放在先分出各个阶段，研究每个阶段以及从一个阶段过渡到另一个阶段的物理实质上。当前尤其要重视研究多孔炸药的稳定燃烧的破坏以及对流燃烧和爆炸的低速状态。

一、引言

凝聚炸药由燃烧转变成爆轰的定常过程的研究，早在十九世纪末就已经开始。但是对于不定常过程的研究，直到本世纪三十年代末才出现第一批论文，至今已有很大的进步和丰硕的成果。不过，整个说来，问题还远没有解决。

在生产、维护和使用当中，意外爆炸的发生是极其危险的。所以对于凝聚炸药(包括火药和固体推进剂)的燃烧转变成爆轰的条件、规律和机理的认识，不仅有科学价值而且在保证安全上也具有重大的实用意义。

凝聚炸药由燃烧转变成爆轰是多阶段的不定常过程。因此科学工作者历来认为，研究的重点不应该只放在确定速度、压强、温度等主要参数上，还应该放在划分各阶段，研究每一个阶段的特殊性以及从一个阶段过渡到另一个阶段的物理实质上。因为从燃烧到爆轰，反应传播速度的变化范围约占七个数量级，即从正常燃烧时的 10^{-1} 厘米/秒到高速爆轰时的 10^6 厘米/秒；相应的产物压强变化范围约占 8 个数量级，即从 10^{-1} 大气压到 10^5 大气压；整个演变过程和图象十分复杂。有时，特别是当强冲击脉冲引发爆轰时，某些阶段极其短暂，甚至可能根本不存在。因此，只有把重点放在分析各阶段及其如何过渡上，才能进行正确的剖析，得到全面的认识。

本文只讨论固态炸药的燃烧转变成爆轰，不涉及液态炸药。

固态炸药的燃烧转变成爆轰，一般说来经历下面几个主要阶段，即：1. 稳定逐层燃烧；2. 对流燃烧；3. 爆炸变化的低速波状态(800~3500米/秒)；4. 定常的正常爆轰。

每个阶段的热量传递机理和反应引发机理都不同。在逐层燃烧时，热量的主要传递方式是分子传热性；在对流燃烧时，则为强迫对流。爆炸的低速状态由压缩波引起，而爆轰则由冲击波引起。在一般情况下，过程的发展是加速的，加速发展的最后结果是冲击波的形成。如果冲击波速度超过了临界值，装药直径又超过了爆轰的临界直径，就能引发爆轰。每一阶

段的是否出现和其空间延续长度, 取决于装药结构、炸药装药的物理和化学性质以及环境条件等。例如: 对流燃烧可能越过第三个阶段而转变成爆轰; 过程的发展也可能以稳定的低速状态结束而不发生爆轰。

二、多孔炸药的稳定燃烧

固态炸药属于多孔性爆炸物系统。它们的物理特性, 除了颗粒尺寸外, 还要用孔隙率、透气率、孔隙沿长度尺度的分布等来表征。孔隙率 m 是孔隙体积与试样总体积之比。透气率 k 是确定气体在试样中流动难易性的参数, 常由达尔西定律确定。达尔西定律描述了层流运动情况下, 过滤过程的线性速度 v 与压强梯度 dp/dx 间的关系:

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

μ 为流体粘性。如果在定常等温状态下测量 v 和 dp/dx 值, 就能得出透气率 k 。透气率的量纲为长度平方, 测量单位用达尔西, 1 达尔西 = 987×10^{-13} 米²。

孔隙率为 $0.03 \sim 0.8$ 时, 透气率的变化范围有 $7 \sim 8$ 个数量级。特别是当孔隙率小于 $0.1 \sim 0.2$ 时, 透气率会有严重的突然下降。实际装药的孔隙率变化很大 ($0.01 \sim 0.7$), 因而, 在透气率和其它特性量上以及在燃烧和燃烧转变成爆轰的规律上, 也必然有很大的不同。

在一定条件下, 多孔炸药的燃烧是稳定的, 均匀的, 按平行层进行的。这时质点速度接近于密实无孔试样中的质点速度。

凝聚炸药的正常燃烧常用 Я.Б.Зельдович⁽¹⁾ 提出的理论来描述。他认为燃烧是在一个狭窄的气相区域内发生的。反应速度随温度按指数规律增长。主要释热量集中在最高燃烧温度 T_m 附近的宽度约为 RT_m^2/E 的窄范围内。 R 为普适气体常数, E 为活化能。热量输送是通过热传导和辐射实现的。这种理论最初只适用于气体的燃烧。以后, А.Ф.Беляев⁽²⁾ 指出挥发性猛炸药也是在气相中燃烧的, 上述理论可以不作任何补充就推广到挥发性猛炸药的燃烧上去。

凝聚相的线燃烧速度 u 指整个燃烧区的可见的移动速度, 它可以用 Зельдович-Беляев 的理论估算, 也可以在实验中相当准确地测定。

固态炸药按燃烧速度可以分成两类。

第一类物质的特点是燃烧速度随着初始密度增大而增大。属于这类的有硝化甘油、火药、黑索金、特屈儿、铝热剂等。它们在燃烧过程中会熔化或液化。在它们燃烧时, 凝聚相中的释热量有重大的意义。其中黑索金的 $u \cong const$, 与初始密度几乎无关。

第二类物质的特点是燃烧速度随初始密度增大而下降。硝化棉、雷汞、过氯酸铵、过氯酸铵与燃料的混合物等都属于此类。它们在燃烧时不熔化。其中, 过氯酸铵在燃烧时会稍微熔化, 但是熔化温度很高, 约达 $850 K$, 形成的熔化层极薄, 而且不是致密的, 因此也可归入此类。这类物质的燃烧表面是透气的, 预计会有多孔系统特有的特殊性出现。最突出的特殊性是在密度减小到某一定值以后, 燃烧速度突然增大。其原因已经证明是发生了燃烧产物侵入孔隙中, 造成了稳定燃烧的破坏。

三、多孔炸药的稳定燃烧的破坏

在一定条件下, 炸药的稳定燃烧会被破坏, 燃烧速度可能增大 10 倍甚至 100 倍。这是发生

爆炸的初始阶段。

燃烧稳定性的破坏是极其复杂的不定常过程，起决定作用的是燃烧产物侵入孔隙中的过程和炸药孔壁的点燃过程。如果试件在稳定燃烧时受到力学载荷的作用，还必须考虑试件的变形和力学破坏作用。因此，问题变成求解气体侵入变形多孔介质中的不定常不等温过程的方程，同时描述炸药中的热传递及点燃过程。

透气多孔系统稳定逐层燃烧被破坏的必要条件是气体燃烧产物必须超越到逐层燃烧阵面之前。换句话说，气体相对于孔隙壁的平均流入速度必须大于装药逐层燃烧的线速度。

逐层燃烧稳定性被破坏的充分条件是超越到逐层燃烧阵面之前的灼热气态产物会引起多孔物质的点燃，而且点燃速度超过了逐层燃烧的传播速度。

迫使气态燃烧产物流入孔隙的原因，现在认为有两种：一种是燃烧表面上的压强超过孔隙中的压强，即动态超压 Δp 。另外一种是因为燃烧试件表面在一般情况下是不光滑的，结果会从表面产生射流系统(图1)。射流系统的来源是炸药各个燃烧颗粒。由于燃烧表面的弯曲，这些射流互成一定的倾角，结果发生了碰撞。射流的碰撞使能量会聚产生了新的射流，其一部分朝向孔隙；碰撞处会发生压强的局部升高。但是更重要的是在孔隙中侵入了温度比表面温度更高的气体，因为流入是从离开表面一定距离处的高温燃烧区开始的，流动带有非等温性质。这种侵入机理称为射流机理，它是对第一种机理的重要补充。

孔隙表面点燃条件的理论研究结果可以综述如下。设有取水力学直径的恒定截面的孔隙，在压强很小和孔隙直径不大时，只发生了稳定的逐层燃烧。虽然也发生了气体侵入孔隙，但是炸药不点燃。流入气体将其热量传给孔壁，按照热平衡方程算出的温度从 T_m 降到 T_0 的时间 τ_0 ，与孔壁的点燃时间 τ_c 之比小于1，即

$$\tau_0/\tau_c < 1 \quad (2)$$

又流入气体从 T_m 降到 T_0 的路程长 l_0 与孔壁加热层的厚度 l_c 之比也小于1，即

$$l_0/l_c < 1 \quad (3)$$

在压强增大时，如果孔太窄，虽然(2)式不再成立，(3)式仍然成立。结果只能造成炸药的加热焦化而不能点燃。只有压强较大，孔隙直径也较大时，才有可能形成气态中间产物的湍流燃烧。在这样的条件下，沿中间气态产物传播的燃烧才有可能点燃孔隙壁。

稳定燃烧的破坏情况的实验研究，一般在升压弹中进行^[1]，得出压强变化记录和多孔装药稳定逐层燃烧时的光学照相记录。压强的急剧上升(记录的拐点)证明达到了临界条件，那时稳定的逐层燃烧开始破坏，气态燃烧产物开始突入孔隙之中。此压强值称为临界中断压强。

实验证明，在所研究的孔隙率和透气率的范围内，梯恩梯、苦味酸、泰安等猛炸药的临界中断压强比以硝化棉和过氯酸铵为基的混合药的为大。大多数猛炸药都能在燃烧前熔化，而在凝聚相中还没有显著的分解。它们有很高的燃烧稳定性，主要是由于在燃烧表面上有致密

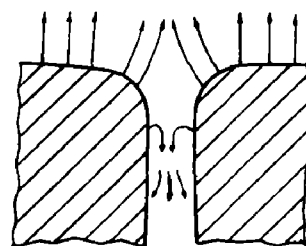


图1

的熔化层,它起了使气体不能透过的障壁作用,排除了气体产物侵入孔隙中的可能性。熔化物连续性的破坏,要在接近于临界值的压强下才发生。例如对于孔隙率 $m = 0.15$ 的梯恩梯,临界中断压强 $P_c = 300$ 大气压,在这一压强下,熔化层厚度为 18 微米,这也大致是孔隙的最大尺寸。

以过氯酸铵为基的混合炸药燃烧时不会熔化,即使熔化也不会形成连续的熔化层。对于这些炸药,凝聚相的释热反应起了重要的作用。因此其燃烧稳定性破坏的主要特性量是表面附近的温度梯度值。

此外,由于不均匀性,在装药直径和质点的初始尺寸增大时,大孔隙的数目即燃烧侵入的中心数也增加,这使燃烧稳定性降低。因此除了孔隙率、透气率外,孔隙的尺寸分布对于逐层燃烧的破坏也有重要的影响。

因此,在〔4〕中认为多孔装药的燃烧稳定性判据,对于可溶性物质要取熔化层厚度表示;对于非溶性物质要取高温气体层的厚度表示。

火药和炸药在制造、保管和使用过程中,常形成许多不通的孔或裂纹。非均质混合火药中含有性质极其不同的成分,例如结晶的氧化剂、弹性的燃料粘合剂和金属附加物等。管道式火药装药一般固定在火箭发动机壳体内。在它燃烧时会产生内应力,这又会造成燃料与氧化剂之间的吸附关系的破坏而形成剥离。这种剥离是形成孔隙和裂纹的主要物理过程之一。

此外,由于火炸药的线膨胀系数超过常用金属约一个数量级,火炸药本身各组分的线膨胀系数也会有极大的不同,结果都可能在低温下形成裂纹。

燃烧产物侵入不通的孔中,一般不容易丧失燃烧稳定性,因为在孔隙封闭端的压缩使产物流动稳定化,并且增加了燃烧产物侵入的困难。另一方面,它也可能引起燃烧阵面的弯曲,而造成燃烧表面的增大和压强的增大。特别在燃烧速度定律 $u = b p^\nu$ 中,指数 ν 较大时,有可能使压强超过发动机的极限允许值而造成危险(公式中的 b 为实验常数)。因此,为了保证火箭发动机的正常工作,降低燃烧速度定律中的 ν 值,改善火药的物理-力学性质,改进发动机的结构以及在装药“生命”的所有阶段上,尽可能消除孔隙和裂纹的形成,有重要的意义。

四、对流燃烧

稳定的逐层燃烧的破坏,是发生爆炸的初始阶段。这里用的爆炸一词,是广义的概念。它包括爆轰发生之前不同的阶段和状态。对流燃烧在稳定燃烧破坏后发生。燃烧侵入炸药的孔中,发生了两种变化:1. 高温燃烧产物使入口段点燃;2. 燃烧阵面从点燃源沿孔隙长度传播。

燃烧产物起先在点燃阵面之前运动,它加热了冷的孔隙表面。在通孔中,燃烧产物主要作平移运动。但是,点燃速度沿孔隙长度会急剧增大而带有雪崩的形成。后来,经常发生点燃阵面超越到燃烧产物之前,这种点燃速度会超过逐层燃烧速度几十倍,甚至几百倍。在闭孔中产物运动更复杂,观察到了环流,即产物向点燃阵面传播的相反方向运动。这种环流对于能量的转移起了重要的作用,它是由点燃阵面不是平的而是有向前突出部分造成的。环流的气体主要是火药的焦化产物。

由于有喷吹火药表面颗粒的气流存在,火药的燃烧速度将增大。燃烧速度的增大通常与气体在表面层的湍流化有关,它造成了进入火药的凝聚相中的热量流增大。这种效应称为侵蚀效应。由于超压强 Δp 和侵蚀效应的存在,使气体从裂缝表面的生成量增加。

高压强下，除了侵蚀效应很重要外，裂缝壁出口部分的力学破坏也很重要。裂缝壁破坏，抛出的火药质点燃尽，造成了压强剧烈升高。因此，必须研究火药抵抗裂缝增长的能力。

以上现象，统称为火药中的对流燃烧。

对流燃烧有两个重要特点。

第一是对流燃烧阵面是弯曲的。这是因为燃烧不是在整个阵面上同时开始的，而是从各个中心开始的。大孔最先点燃，燃烧沿大孔进一步传播，促使其中压强升高，然后燃烧才能侵入更小的孔。因此孔的尺寸分布以及孔之间的相互作用，对对流燃烧的传播有重要意义。

第二是燃烧在孔中的侵入，伴随了火药物质成颗粒状或小块状剧烈地分散。分散是孔隙中存在超压的结果。在力学强度较低的压装装药燃烧时，它会特别明显地表现出来。分散造成了能够起化学反应的悬浮体。它们的加速燃烧伴生了装药表面上压强迅速增大和高温气体更剧烈地侵入孔中，从而燃烧表面和燃烧速度进一步扩大。

多孔装药发生对流燃烧时，过程要作不定常的加速。这时，燃烧区中压强的连续升高使过程速度进一步增大。但是，当燃烧速度接近产物声速时，点燃波阵面之前出现的压缩波的强度也增大。压缩波速度达到某一阈值后，它已能引发化学反应，对流燃烧状态将转变成爆炸波的低速状态。高密度泰安的阈值速度（即对流燃烧最大速度）为700~800米/秒。

五、爆炸变化的低速波状态

粉末状散装炸药以及在外壳中的高密度炸药的对流燃烧都能过渡成爆炸变化的低速波状态，以后再转变成正常爆轰。低速状态的波传播速度仅为正常爆轰速度的 $1/2 \sim 1/10$ 。

以前曾认为低速状态是不稳定过程，它应该熄灭或者过渡成正常爆轰。可是近年来的科学研究证明，在一定条件下，低速状态可以在很大距离上（约40~50倍装药直径）以恒定速度沿装药长度传播。即低速波状态可能是稳定的⁽⁵⁾。

梯恩梯、特屈儿、泰安、黑索金等炸药的大晶粒粉末，在有机玻璃管中的低速爆轰的引发，是由特制的主装药爆炸产生的弱冲击波实现的。炸药质点尺寸和装药直径在一定范围内时，即能观察到稳定传播的低速爆炸波，其传播速度与起爆威力无关。炸药质点尺寸固定，装药直径小于一定值时过程熄灭；大于一定值时过程迅速转变成正常的高速爆轰。稳定的低速爆炸波速度在装药直径增大和质点尺寸减小时都会增大。粉末状装药的低速爆炸波最大速度为2000~2300米/秒，实际上对于不同的炸药都是相同的。粉末状装药的正常爆轰波压强为50千巴。而低速爆炸波压强仅为7.5~15千巴，这时只释出了正常爆轰能量的30~35%。

粉末状炸药装药的低速爆炸波传播图象十分复杂，主要原因是空隙要合拢，比容要发生很大的变化。而高密度炸药的低速爆炸波传播图象比较简单，其比容没有很大的变化，因此对于它研究得较多。

根据大量实验，已经提出了这样的假说，即低速爆炸状态的传播速度等于炸药装药的压缩波速度。由压缩波与化学反应区形成的综合区可以自持地稳定传播。对于这样的传播方式，沿炸药物质运动的压缩波起决定性作用，沿外壳运动的扰动不起重要的作用。亚声速低速爆炸状态的存在，是由塑性波造成的。塑性波的叠加，使波的陡度和幅度增大成为以超声速传播的弱冲击波。故低速状态的爆炸波的传播速度可能大于或小于炸药中的声速。

增大外壳强度，会促使低速爆炸状态迅速过渡成爆轰，因为装药外壳将波中压强维持在

一定水平上。如果化学反应产生的气体与外壳变形而流出的气体之间建立了动平衡，则压缩波的幅度保持不变是可能的。这样，低速爆炸状态的传播速度，在装药的相当大的长度上不变化。低速状态传播时外壳中的压强 p' 如果小于引发爆轰的临界压强 p_{cr} ，则得到稳定传播的低速爆炸状态。如果 $p' > p_{cr}$ ，则将过渡成正常爆轰。由此可知，任何使 p' 增大和使 p_{cr} 降低的因素，都会促进状态的过渡。

低密度炸药装药由燃烧转变成爆轰，有时会在对流燃烧阵面之前直接发生：即过程为逐层稳定燃烧——对流燃烧——正常爆轰，而不经低速爆炸状态。直接发生爆轰的原因是在炸药的许多局部体积内发生热爆炸。已经确知，低密度泰安装药从燃烧转变成爆轰时，局部爆炸不仅会立即在燃烧阵面附近发生，而且会在波阵面后某一距离处高温介质内发生。对流燃烧区中爆炸造成的冲击波以约 2800 米/秒的速度传播。它赶上了燃烧阵面，在不大（1~2 微秒）的延期时间后，引起炸药爆轰。

六、爆轰形成之前的先期段

炸药从燃烧转变成爆轰的定量特性量为爆轰形成之前的先期段 L ，即从点燃到爆轰发生地点的距离。此值可以使我们将不同种类的炸药进行比较，而定出炸药从燃烧转变成爆轰的难易程度。爆轰先期段的长度原则上可用连续的光学记录方法测定。但是使用光学方法并不总是可行的。因此常用燃烧到爆轰试验中得到的未爆裂厚壁金属外壳的变形分析的简单方法。试样如图 2 所示。

图 2 为试验后沿外壳轴向切开的情况。

图上 A 为多孔凝聚炸药的点燃地点， AD 为爆轰先期段， DE 为爆轰段。管道直径先平稳地增大，而在某一距离处开始恒定不变。在管道胀大成有恒定半径的出口段 CE ，观察到了颜色不同的两个区域。两个区域的分界点 D ，对应于爆轰的发生地点。在爆轰先期段为暗区，对应于爆轰段为亮区。

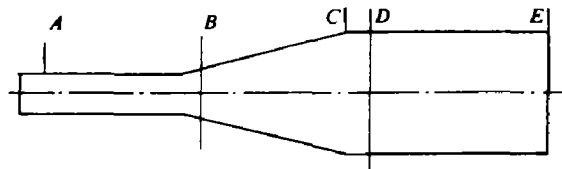


图 2

颜色变化明显地与其外壳变形的不同性质有关，也与两段反应产物有不同的组成有关。在爆轰段上观察到了管道的剧烈破坏和深的纵向裂纹。

泰安的燃烧特别容易过渡成爆轰，爆轰先期段长度 L 明显地随孔隙率 m 而变化。孔隙率取小值时，爆轰先期段长度 L 会急剧增大，这是由于发生稳定的低速爆炸状态而造成的。

一般地说，爆轰先期段长度有较大的散布，细晶粒泰安的表现尤其明显。原因是燃烧转变成爆轰的过程很复杂，爆轰之前各阶段的长度都有很大的散布。

对炸药从燃烧转变成爆轰的问题实际上还遗留很多问题没有研究过。许多假说还没有用实验证实。最突出的困难问题之一是没有压缩波和弱冲击波在密实介质中的传播规律性数据，需要科学工作者今后去认真探索和研究。

参 考 文 献

- (1) Зельдович. Я. Б., *ЖЭТФ*. 10 (1940), 542.
- (2) Беляев, А. Ф., *Горение, Детонация и Работа Взрыва Конденсированных Систем*, Наука, (1968).
- (3) Беляев, А. Ф., Боболев, В. К., и др., *Переход Горения Конденсированных Систем во Взрыв*, Наука (1973).
- (4) Марголин, А. Д., *Докл. АН СССР*, 140 (1961), 4.
- (5) Gipson, R. W., Macek, A., *Int. 8th Symp. Combustion*, Baltimore, The Williams and Wilkins Co. (1962), 847.

BURNING-TO-DETONATION TRANSITION OF SOLID EXPLOSIVES

Xue Honglu

Abstract

The transition from burning to detonation of solid explosives is reviewed in this paper. The author considers that it is a complex, multiple stage, unsteady process. The key point should be the separation of its stage and the physical nature of each stage as well as transitions from one stage to another. The author pointed out that the studies on the destruction of the stable burning of the porous explosives, the convection combustion and the low-velocity state of the explosions are important at present.