文章编号：1000-5773(2006)01-0102-07

非均匀炸药冲击起爆和起爆后的行为*

李银成

(北京应用物理与计算数学研究所，北京 100088)

摘要：介绍并分析了 Campbell 等人及其他作者研究非均匀炸药冲击起爆和起爆后行为所获得的实验结果，但不涉及其冲击起爆条件。足够强的冲击波进入非均匀炸药后，爆轰将瞬时(指不经过感应时间)且直接(指不经过其他过程，如爆燃)被引发；非均匀炸药起爆后，其中传播的自始至终是一个不断增长的爆轰波，直至发展为正常爆轰，整个过程都是爆轰的增长(新定义)过程。不存在由反应冲击波不断增长并转变为爆轰波的所谓向爆轰的增长。所谓向爆轰的增长，实际上是爆轰的增长(按新定义)的初期；Craig 原定义的爆轰的增长，实际上是爆轰的增长(按新定义)的后期；而所谓反应冲击波，实际上是增长中的初期爆轰波。爆轰的增长(按新定义)是所有猛炸药的特性，炸药反应不充分并逐渐趋于充分是爆轰的增长的化学机制。

关键词：炸药；爆轰；起爆

中图分类号：O381；O414 **文献标识码**：A

1 引 言

猛炸药 (Secondary Explosive) 按其物理形态，可分为均匀炸药(Homogeneous Explosive)和非均匀炸药 (Heterogeneous Explosive) 两类。均匀炸药与非均匀炸药的冲击起爆和起爆后的行为有较大不同，故而在研究猛炸药的冲击起爆时要对它进行这样的分类。当然，两者之间也必然存在一些共同点，因此，两方面的研究成果也是可以相互借鉴的。

在文献[1]中，根据 Campbell 等人的大量实验结果[2]，已经讨论过均匀炸药的此类行为。当足够强的冲击波从前端面进入均匀炸药后，初始冲击波将以原速度继续传播；经过若干微秒的感应时间后，爆轰波在前端面处产生，并开始追赶初始冲击波。该爆轰波的表观爆速明显大于正常爆速，而其净爆速的平均值则小于正常爆速。当爆轰波追上初始冲击波时，它在与冲击波相互作用后立即转变为强爆轰，但很快又减弱为正常爆轰。从热起爆理论出发，经较为严格的推导获得了估算感应时间的理论公式。估算得到的硝基甲烷的感应时间的理论值，明显高于实验值。同时可以明确地作出判断，如果有一种更为严格的、同样也是基于热起爆理论的估算感应时间的方法，那么，所得感应时间的理论值必将更加明显地高于实验值。从本质上讲，热起爆理论对均匀炸药的冲击起爆行为的描述，是不符合物质运动的微观图像的。因此，热起爆理论不适于描述均匀炸药的冲击起爆行为。

与此同时，Campbell 等人一共做了约 200 次实验，以研究非均匀炸药的同类行为，并且于 1961 年同时报告了他们所获得的结果[3]。他们所用的炸药大部分为初始装药密度 $\rho_0 = 1.71\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 Cyclotol 炸药(RDX/TNT 65/35)。非均匀炸药是不透明的，常用的研究非均匀炸药此类行为的实验方法是楔形块法[4]。受试炸药被加工成楔形块，并以一定强度的平面冲击波输入楔形块状受试炸药；这样，原本在炸药内部的反应冲击波或爆轰波传播的时空历程，现在可以在楔形块的斜面上观察到。一些学者已经用楔形块法实验对非均匀炸药的此类行为，进行了大量实验研究[5-8]。

* **收稿日期**：2004-06-02；**修回日期**：2005-01-28

作者简介：李银成(1940—)，男，研究员，主要从事爆轰物理学研究. E-mail：ychlaoli@163.com

Stirpe 等人 1970 年的报告,给出了对于甚高密度的非均匀炸药的此类行为的实验研究结果[7]。结果表明,其行为类似于均匀炸药的行为,而与甚高密度以下的行为有较大不同。然而,究竟以哪个绝对密度或相对密度(绝对密度与理论最大密度之比)为界来划分甚高密度与甚高密度以下这两种类型,对于各种非均匀炸药来说,则因炸药而异,不存在统一的标准。Stirpe 等人所用的炸药为 $\rho_0=1.72\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 PETN[7](理论最大密度 $\rho_{\mathrm{TMD}}=1.77\ \mathrm{g/cm^3}$,$\rho_0/\rho_{\mathrm{TMD}}=0.966$)。他们既观察到了作匀速运动的初始冲击波,也观察到了追赶前者的、作加速运动的爆轰波,还观察到了后者追赶上前者后发生强爆轰时的速度超额。由双波结构的存在,通过与均匀炸药行为的比较,不难认定,甚高密度非均匀炸药的冲击起爆也需要经过感应时间。尤为重要的是,Stirpe 等人的实验明确表明,追赶初始冲击波的爆轰波在作加速运动,即爆轰在增长。那么,通过类比不难认定,在均匀炸药中情况也应该如此,即追赶初始冲击波的爆轰波在作加速运动,这一点尽管不能从 Campbell 等人用硝基甲烷做的所有种类的实验中观察到。

文献[3,5-8]的作者发现,甚高密度以下的非均匀炸药受足够强的冲击后,立即产生一个反应冲击波(Reactive Shock),它在传播过程中不断增长,最终转变为爆轰波;这点称为转变点,这个过程称为向爆轰的增长(Buildup to Detonation)。1975 年,Craig 发现了一个出人意料的现象[9]:在反应冲击波转变为爆轰波以后,这时 PBX-9404 的爆速比正常爆速只差 1%,而爆压却还要经历 25%的增长,才能达到正常爆压;这个过程被称为爆轰的增长(Buildup of Detonation)。

因此,不从物理形态上讲,而从行为上讲,甚高密度非均匀炸药与均匀炸药属于同一类,其行为已经在文献[1]中较为详细地讨论过了,本文除上文的少许讨论外就不再多加讨论了。而甚高密度以下非均匀炸药则属于另一类,这是本文要重点加以讨论的。为简便起见,在以下的讨论中,不妨仍然以均匀炸药与非均匀炸药分别简称这两类;要注意的是,现在是按行为在分类,而不是按物理形态在分类。

上述学者的实验工作提供了非均匀炸药的此类行为的大量数据和信息,至今仍为后学所看重。但是囿于历史的局限,他们在实验结果的分析上有所失当,因此,有必要对这部分工作重新加以审视。本文将以 Campbell 等人及其他作者用楔形块法等实验获得的实验结果[3,5-8]来论证,足够强的冲击波进入非均匀炸药后,爆轰将瞬时(指不经过感应时间)且直接(指不经过其他过程,如爆燃)被引发。所谓的反应冲击波与爆轰波之间并没有本质上的区别,它就是爆轰波。不存在由反应冲击波不断增长并转变为爆轰波的所谓向爆轰的增长。

2　对于实验结果的分析

2.1　起爆不需要经过感应时间与其他过程

当足够强的冲击波从前端面进入均匀炸药后,要经过若干微秒的感应时间后,爆轰才在前端面处产生[2]。与此不同,Campbell 等人以电阻系数法实验发现[3],足够强的冲击波进入 $\rho_0=1.71\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 Cyclotol($\rho_{\mathrm{TMD}}=1.753\ \mathrm{g/cm^3}$,$\rho_0/\rho_{\mathrm{TMD}}=0.976$)炸药后,紧邻前端面的物质立即导电,只是其导电能力不如正常爆轰波后那样高。这就是说,足够强的冲击波进入非均匀炸药后,瞬时引发了化学反应,并且其反应产物可以导电,显然,这个化学反应即为燃烧。电阻系数法实验还测得,燃烧波的初期平均传播速度为 4.43 km/s,后期平均速度为 7.90 km/s[3],而该炸药的音速约等于 2.43 km/s(此音速值是 $\rho_0=1.752\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 Cyclotol(RDX/TNT 75/25)的音速[10]),即燃烧波是以超音速在传播,并且其速度在增长。因此,仍然称这个燃烧波为初始冲击波[3],显然是不对的。一些做改进的隔板实验的学者认为,冲击起爆过程为冲击引发爆燃,然后爆燃再转变为爆轰,即所谓 SDDT 过程[11-12]。将冲击所引发的、以超音速传播的燃烧波称为爆燃波,显然也是不对的。因此,依照一些学者的说法,在此暂且将这个燃烧波命名为反应冲击波较为可取。质言之,反应冲击波即为以高于火炸药音速传播的燃烧波。当然目前也可以说,反应冲击波是燃烧支持的冲击波。孰是孰非,留待下文讨论。综上所述,足够强的冲击波进入初始装药密度 $\rho_0=1.71\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 Cyclotol 炸药后,反应冲击波将瞬时(指不经过感应时间)且直接(指不经过其他过程,如爆燃)被引发,并且在随后的传播过程中其速度将持续增长。

文献[2]报告的气泡实验表明,硝基甲烷中人为移入的 0.7 mm 直径的单个气泡,受一定强度的冲击后将使爆轰瞬时发生;0.4 mm 直径的单个气泡也可明显缩短感应时间。在非均匀炸药中,气泡(包

括裂纹和缺陷)是大量存在的,在单位面积、一个气泡直径的厚度内将包含大量气泡。大量气泡在受冲击后发挥的共同作用,将使反应冲击波瞬时或在极短时间内发生。与之不同,对于甚高密度的非均匀炸药来说,虽然气泡的存在缩短了感应时间,但是并没有使之为零或可以忽略,因此,其起爆行为与均匀炸药相类似。

按热起爆理论的观点,非均匀炸药中的气泡(包括裂纹和缺陷)的大量存在所起的作用是,它们与冲击波相互作用后会产生大量的高温点——热点(Hot Spot),使化学反应更加猛烈地进行,从而瞬时引发爆轰。这就是热起爆理论派生的热点起爆理论。文献[1]已经得出结论:热起爆理论不适于描述均匀炸药的冲击起爆行为;因此,其派生的热点起爆理论也就失去了描述非均匀炸药的冲击起爆行为的理论基础。其实,非均匀炸药中的气泡(包括裂纹和缺陷)的大量存在所起的作用是,它们与冲击波相互作用后会在炸药中产生大量的高压点,在这些高压点处炸药的晶格受冲击后会发生更加强烈的振动,通过耦合作用,键能较低的键能够更快地获得更多的能量,使其更快地先行断裂,化学反应就更加猛烈地进行,最终瞬时引发爆轰。不妨将这种高压点仍然称为热点,因为无论是在汉语中还是英语中,热点的含意是很广泛的。这种由压力起爆理论派生的热点起爆理论,符合物质运动的微观图像,因此适合于描述非均匀炸药的冲击起爆行为。

2.2 起爆后不经过向爆轰的增长而直接发生爆轰的增长

2.2.1 从楔形块法实验给出的速度-时间曲线分析

Campbell 等人的楔形块法实验[3],也是用 Cyclotol 炸药做的。他们在转镜相机底片记录的时空曲线上,将空间维等分成 61 份,再把空间值换算成波在楔形块内走过的距离,并读出相应的时间值。用二阶多项式分别拟合前 14 个点和后 45 点的数据,不对速度变化最大的中间几个点进行拟合。前 14 个点的二阶距离-时间拟合式被认为是属于反应冲击波(原文为初始冲击波)的

$$x = 0.1198 + 3.5334t + 0.2452t^2 \tag{1}$$

式中:x 为距离,单位为 mm;t 为时间,单位为 μs。他们指出,此式的二次项表明反应冲击波是匀加速的。后 45 个点的二阶距离-时间拟合式,被认为是属于爆轰波(原文为高级爆轰)的

$$x = -9.152 + 7.521t + 0.0457t^2 \tag{2}$$

他们认为,上式的二次项不表明爆轰波仍然在加速,而是传爆药的爆轰波的非理想性造成的。

显然,由距离-时间关系式不难求得速度-时间关系式,表 1 中给出了用后者计算得到的速度-时间数据。由速度-时间关系式即可绘出速度-时间曲线,但是由于未对中间几点进行拟合,整条曲线是不完整的。由这两条曲线,再参照 Dick 给出的、完整的同类曲线[8],画出的非均匀炸药冲击起爆全过程的速度-时间曲线示意图,如图 1 所示;在图中,v 为反应冲击波或爆轰波的速度,t 为时间。Dick 将速度-时间曲线上加速度最大的点 B 定义为转变点(Transition Point)[8]。图 1 中,$O'B$ 段为反应冲击波段(其中 $O'A$ 段对应(1)式),这时反应冲击波不断增长并转变为爆轰,这个过程被称为向爆轰的增长(Buildup to Detonation)。BC 段为爆轰波段(对应(2)式),在 C 点附近爆轰波达到正常爆轰。对于 Cyclotol 炸药,转变点 B 对应的时间约为 2.8 μs,对应的速度约为 7.78 km/s,而正常爆速为8.00 km/s,两者相差 2.8%。Campbell 等人认为这点差别不必在意,爆轰已经达到。一些学者也用楔形块法实验,对若干非均匀炸药的起爆后的行为进行了大量研究[5-8],获得了一批研究成果。根据 Craig 于 1975 年的报告,他用另外一种实验发现了一个出人意料的现象[9]:在转变点之后,PBX-9404 的爆速比正常爆速虽然只差 1%,而爆压却仍然要经历 25% 的增长,才能达到正常爆压。这种现象被称为爆轰的增长(Buildup of

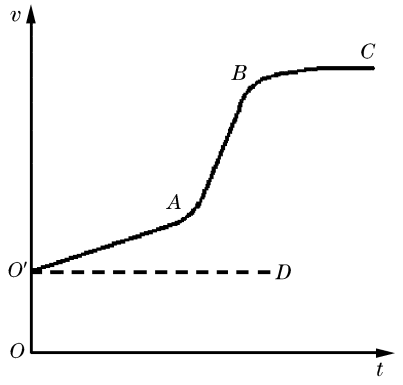


图 1 非均匀炸药冲击起爆和起爆后行为的速度-时间示意图

Fig. 1 Velocity-time representation of behaviors of shock initiation and after-initiation for a heterogeneous explosive

Detonation),这是爆轰的增长的原定义。这就是说,(2)式的二次项是有意义的,它表明爆轰波仍然在加速。

表 1　由 Campbell 以 Cyclotol 做的楔形块法实验结果计算得到的波速

Table 1　Calculated wave velocities from Campbell's wedge technique experiment results of Cyclotol

$t/(\mu s)$	$v/(km/s)$	$t/(\mu s)$	$v/(km/s)$	$t/(\mu s)$	$v/(km/s)$	$t/(\mu s)$	$v/(km/s)$
0.0	3.533	1.5	4.269	3.0	7.795	4.5	7.932
0.5	3.779	2.0	4.514	3.5	7.841	5.0	7.978
1.0	4.024	2.5	4.759	4.0	7.887		

如图 1 所示的、描述非均匀炸药此类行为的、十分清晰的速度-时间实验曲线,是一条连续而光滑的曲线。这意味着,反应冲击波的强度不断增长并且最终达到爆轰的过程,是连续而且没有发生突变的过程。这说明反应冲击波与爆轰两者之间不存在质变,只有连续的量变。因此,反应冲击波与爆轰波在本质上是一致的,反应冲击波——以高于火炸药音速传播的燃烧,其实就是爆轰波。反过来也可以说,爆轰即为以高于火炸药音速传播的燃烧。之所以不将爆轰定义为燃烧支持的冲击波,是因为有一类爆轰——弱爆轰不以冲击波为前导[13]。当然,更加关键的是,爆轰从本质上讲是一种燃烧,而不是一种冲击波。既然平面、定常的爆轰与爆燃可以以同一的 Hugoniot 方程组描述,它们之间就必然存在共同的本质,即它们皆为燃烧,而不可能皆为冲击波。这样,除了 O' 点外,整条 $O'C$ 实曲线段所描述的都是非均匀炸药冲击起爆后的爆轰的增长过程,这是爆轰的增长(Buildup of Detonation)的新定义。这时,在非均匀炸药中传播的一直是增长中的爆轰波,直至增长为正常爆轰。

O' 点是个特殊的点,需专门讨论。如果进入非均匀炸药的初始冲击波的强度不足以起爆,它将以几乎不变的速度在炸药中继续传播。如果初始冲击波的强度足以起爆,将在瞬间产生一个爆轰波,在非均匀炸药中作加速运动,如图 1 中 $O'C$ 实曲线段所示。爆轰波的初速不可能小于初始冲击波的速度,因为实验没有在非均匀炸药中观察到先于爆轰波而行的初始冲击波,因此,它只可能大于或等于后者的速度。文献[2]指出,均匀炸药起爆时,当感应时间为零时,其爆速的初值等于初始冲击波的速度。非均匀炸药起爆时,如上所述,感应时间总是为零的,因此,其爆速的初值等于初始冲击波的速度,并使得后者消失(图 1 中以 $O'D$ 虚线段表示初始冲击波若继续传播时的速度-时间曲线)。这意味着,在 O' 点,非均匀炸药发生爆轰时速度不会发生突跃,只有速度对于时间的导数将发生突跃:初始冲击波的导数等于零,而爆轰波的导数大于零。因此,O' 点是一个转变点,它应该被命名为起爆点。

综上所述,反应冲击波其实就是爆轰波。正如上一小节所述,足够强的冲击将瞬时且直接引发反应冲击波,而现在又已经阐明反应冲击波就是爆轰波,因此,在非均匀炸药中,足够强的冲击将瞬时且直接引发爆轰,并且其爆速的初值等于初始冲击波的速度。这样,也就不存在由反应冲击波不断增长并转变为爆轰的所谓向爆轰的增长。楔形块法实验给出的实验数据(见表 1 与图 1 所示)表明,非均匀炸药起爆后,爆轰将一直不断增长,直至增长为正常爆轰。为了与正常爆轰相区别,可将前者称为增长中的爆轰。所谓向爆轰的增长,实际上是爆轰的增长(按新定义)的初期;Craig 原定义的爆轰的增长,实际上是爆轰的增长(按新定义)的后期;而 B 点(它在整条曲线上的位置仍然可以按 Dick 的方法确定)不再是反应冲击波与爆轰波之间的转变点,而仅为爆轰的增长的初期与后期之间的分界点。尽管如此,此后在转述其他学者的论述时,为方便起见将仍然保留反应冲击波(而误称的初始冲击波或爆燃波,一律以反应冲击波代替)、向爆轰的增长与转变点等术语。

在硝基甲烷中,由于燃烧波的表观速度明显大于正常爆速,Campbell 等人认定它就是爆轰波,并且认为其净爆速等于正常爆速[2]。如果他们发现硝基甲烷的净爆速的平均值低于正常爆速 2%[1],并且净爆速的初值可能更低于正常爆速 5%以上的话,从他们分析非均匀炸药的行为所持的观点看,不知是否仍然会承认它是爆轰波。这个燃烧波在文献[1]中被认定为爆轰波,不是利用了 Campbell 等人的失察,而是参照了本文的研究结果而得出的结论。文献[1-2]给出的信息与数据表明,它是个以高于火炸

药音速传播的燃烧波，这样说的根据是其产物可以使电探针导电[2]，其净爆速的平均值为 5.81～6.22 km/s[1]大于硝基甲烷的音速 1.34 km/s[10]。那么，根据上文已得出的论断，它就是爆轰波。再根据本文引言中的有关推断，这个爆轰波还在不断增长。虽然在硝基甲烷中，增长中的爆轰不是连续地增长为正常爆轰的，是突然转变为强爆轰后再减弱为正常爆轰的，但是这种突变是由于在增长过程中遇到初始冲击波而打断了增长过程的结果。

根据 Craig 的实验[9]，增长中的爆轰波的压力都低于正常爆轰的压力，那么，前者的波阵面压力也必然都低于后者的波阵面压力。因而，前者的冲击终态点与初态点之间的连线——Reyleigh 线，就不可能与完全反应的 Hugoniot 线相切，只能与部分反应的 Hugoniot 线相切。这就是说，在增长中的爆轰波的反应区末端面，炸药并没有完全反应。随着爆轰的增长，反应区末端面的反应度将趋向完全。这就是爆轰的增长的化学机制。这种机制表明，起爆后发生爆轰的增长是所有猛炸药普遍具有的特性，不管其从物理形态上分为均匀的与非均匀的，还是从化学成分上分为负氧平衡的与正氧平衡的，都如此。1985 年，本文作者已提出了这种对于爆轰增长的化学机制的看法，并且作过初步的理论估算，以检验这种看法[14]。

既然在增长中的爆轰波的反应区末端面，炸药并未完全反应，那么在其中再传入一个适当强度的冲击波，则可能再次发生爆轰；这被称为再次爆轰(Retonation)，简称为再爆。Campbell 等人用加了分幅照相的楔形块法实验[3]观察到的、明亮的、反向传播的波，被认为是发光的空气冲击波，但是从它比正向的反应冲击波速度快约一倍看，不能排除它是再爆。Campbell 等人还用专门装置观测了反应冲击波产物中，再传入同向的第二次冲击波所发生的现象[3]。所用炸药为 HMX/塑料 94/6，爆速为 9.20 km/s。观测得到的数据为：反应冲击波的速度为 3.93 km/s，同向的第二次冲击波的速度为 5.62 km/s。他们仅凭第二次冲击波的速度明显低于正常爆速，就断定它不是爆轰波。但是，如上所述，仅凭这点是不能排除它是再爆的。更何况，既然再爆是在已经部分反应的炸药中发生的爆轰，那么其爆速明显低于正常爆速是完全合理的。如果能够以确切的证据证明再爆的存在，那么就能实验证明，非均匀炸药起爆后，增长中的爆轰是未完全反应的爆轰。

2.2.2 *从楔形块法实验给出的 Pop 关系式分析*

从楔形块法实验记录可以读取的实验数据，包括反应冲击波或爆轰波的时空坐标，以及隔板的自由表面速度。由反应冲击波的时空坐标，可以求得反应冲击波的速度，特别是可以得到其初速。如上所述，该初速即为增长中的爆轰波的初速，并且等于刚进入炸药的初始冲击波的速度。再已知隔板材料的冲击 Hugoniot 曲线，运用阻抗匹配法，由隔板的自由表面速度，采用镜像反演近似，不难求得初始冲击波的粒子速度与压力，即未反应炸药的冲击 Hugoniot 数据。Campbell 等人的楔形块法实验的实验结果，给出了反应冲击波的时空坐标，但是没有给出未反应炸药的冲击 Hugoniot 数据。后来，其他学者用楔形块法实验给出的实验数据，给出了后者，不过又将前者进行了坐标变换，变成为以初始冲击波压力为参变量的到爆轰时间与到爆轰距离[7]。所谓到爆轰时间与到爆轰距离，即从反应冲击波所在的坐标点到转变点尚需用的时间与尚需走的距离[7]。实验发现，若将不同的初始冲击波压力下获得的诸时空历程曲线的转变点重合在一起画在同一张图上，那么这些时空历程曲线几乎是重合的[8]。这样就产生了一个假定：在向爆轰的增长中，不同的初始冲击波压力所产生的反应冲击波沿着共同的时空历程增长，称为共同曲线增长假定或单一曲线增长假定[8]。这意味着，从时空历程曲线上的任意一点开始，后续的历程与历史无关[8]。一般地，将初始冲击波压力 p 与相对应的、反应冲击波从界面算起的到爆轰的时间 t^* 和到爆轰的距离 x^*，分别拟合为如下的 Pop 关系式

$$\lg p = a + b \cdot \lg t^* \tag{3}$$

$$\lg p = c + d \cdot \lg x^* \tag{4}$$

式中：a、b、c 和 d 为拟合参数。文献[15]收集了多种非均匀炸药的 Pop 关系式拟合系数的数据。将数据点和拟合曲线画在对数坐标系上称为 Pop 图。按共同曲线增长假定，Pop 关系式(3)式与(4)式，也可以视为反应冲击波增长过程中，反应冲击波的阵面压力 p 与其距转变点的时空距离(t^*，x^*)的关系。

从 Pop 关系式，其实也可以求出反应冲击波在各时空坐标点上的速度。设对应于某个反应冲击波

阵面压力的最小值 $p_{\min}$,分别有从界面算起的到爆轰时间与到爆轰距离的最大值 T^* 与 X^*,并引进新的坐标系

$$t = T^* - t^* \tag{5}$$

$$x = X^* - x^* \tag{6}$$

这是一个以距转变点 B 的时空距离分别为 T^* 与 X^* 的点为原点的坐标系。在这个坐标系中,设增长中的爆轰波所位于的某一点距转变点 B 的时空距离值分别为 t^* 与 x^*,则从新原点到该点的时空和距离分别为 t 与 x。由(3)式～(6)式,视反应冲击波阵面压力 p 为参变量,即可导出其速度关系式 $D = (\mathrm{d}x/\mathrm{d}p)/(\mathrm{d}t/\mathrm{d}p)$。在导出的表达式中,所幸的是不再出现难以获得的数据 T^* 与 X^* 了。对于 $\rho_0 = 1.635\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 TNT、$\rho_0 = 1.72\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 PBX-9404 和 $\rho_0 = 1.896\ \mathrm{g/cm^3}$ 的 PBX-9502 三种炸药,各自取文献[15]给出的 Pop 关系式拟合系数,用上述方法计算得到的、反应冲击波的速度 D 的值列于表 2 中。由表 2 数据可以看出,将楔形块法实验的实验数据拟合成 Pop 关系式后,仍然可以从中看出非均匀炸药起爆后,反应冲击波的速度在增长。如上所述,其实是爆轰波在增长。但是,由于拟合造成的误差,不是所有的炸药的 Pop 关系式拟合参数,都能用来计算得到合理的爆速值。

表 2　由 Pop 关系式计算得到的爆速

Table 2　Calculated detonation velocity from Pop relations

$\rho_{0,\mathrm{TNT}} = 1.635\ \mathrm{g/cm^3}$			$\rho_{0,\mathrm{PBX\text{-}9404}} = 1.72\ \mathrm{g/cm^3}$			$\rho_{0,\mathrm{PBX\text{-}9502}} = 1.896\ \mathrm{g/cm^3}$		
x^*/(mm)	p/(GPa)	D/(km/s)	x^*/(mm)	p/(GPa)	D/(km/s)	x^*/(mm)	p/(GPa)	D/(km/s)
23.31	9.17	5.20	17.61	1.19	2.17	17.83	10.05	4.77
16.92	10.16	5.26	7.63	2.16	2.66	13.44	10.97	4.92
11.04	11.65	5.33	4.53	3.12	3.02	10.37	11.89	5.06
7.58	13.13	5.40	3.10	4.09	3.32	8.16	12.81	5.19
4.89	15.12	5.47	2.11	5.37	3.65	6.52	13.72	5.32
3.33	17.10	5.54	1.67	6.34	3.86	4.95	14.95	5.48

3　结论与讨论

(1) 一个足够强的冲击波传入非均匀炸药后,爆轰将瞬时(指不经过感应时间)且直接(指不经过其它过程,如爆燃)被引发。非均匀炸药起爆后,爆速的初值对于初始冲击波的速度,然后其中传播的一直为不断地增长的爆轰波,直至发展为正常爆轰,整个过程都是爆轰的增长过程。因此,不存在由反应冲击波不断增长而转变为爆轰的所谓向爆轰的增长过程。爆轰的增长是所有猛炸药起爆后的普遍行为。爆轰的增长是由于炸药反应不充分并逐渐趋于充分而造成的。

(2) 文献[1]已经得出结论:热起爆理论不适于描述均匀炸药的冲击起爆行为;因此,热起爆理论派生的热点起爆理论也就失去了描述非均匀炸药的冲击起爆行为的理论基础。由压力起爆理论派生的热点起爆理论,符合物质运动的微观图像,因此适合于描述非均匀炸药的冲击起爆行为。

References:

[1] Li Y Ch. Behaviors of Initiation and after-Initiation for Homogeneous Explosives [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3): 247-256. (in Chinese)
李银成. 均匀炸药冲击起爆和起爆后的行为 [J]. 高压物理学报, 2005, 19(3): 247-256.

[2] Campbell A W, Davis W C, Travis J R. Shock Initiation of Detonation in Liquid Explosives [J]. Physics of Fluids, 1961, 4(4): 498-510.

[3] Campbell A W, Davis W C, Ramsay J B, et al. Shock Initiation of Solid Explosives [J]. Physics of Fluids, 1961, 4(4): 511-521.

[4] Majowicz J M, Jacobs S J. Bull Am Phys Soc, 1958, 5: 293.

[5] Lindstrom I E. Plane Shock Initiation of an RDX Plastic-Bonded Explosive [J]. J Appl Phys, 1966, 37(13): 4873-4880.
[6] Lindstrom I E. Plane Shock Initiation of Porous Tetryl [J]. J Appl Phys, 1970, 41(1): 337-350.
[7] Stirpe D, Johnson J O, Wackerle J. Shock Initiation of XTX-8003 and Pressed PETN [J]. J Appl Phys, 1970, 41(9): 3884-3893.
[8] Dick J J. Buildup to Detonation in Solid High Explosives during Plane Shock Initiation [A]. //18th Symposium (International) on Combustion [C]. 1981: 1623-1629.
[9] Mader C L. Numerical Modeling of Detonation [M]. Berkeley, California: University of California Press, 1979: 106-115; 125-130.
[10] Dobratg B M. Properties of Chemical Explosives and Explosives Simulants [R]. UCRL-52997, 1981.
[11] Kroh M, Thoma K, Arnold W, et al. Shock Sensitivity and Performance of Several High Explosives [A]. //8th Symposium (International) on Detonation [C]. White Oak, Silver Spring, Maryland: Naval Surface Weapons Center, 1985: 1131.
[12] Liu J C, Ding D Y, Jiang X Y. Studies on SDDT Behavior of Pressed TNT [J]. Explosion and Shock Waves, 1991, 11(1): 11-19. (in Chinese)
刘家骢, 丁大玉, 蒋学云. 压装 TNT 的 SDDT 特性研究 [J]. 爆炸与冲击, 1991, 11(1): 11-19.
[13] Zeldovich Ya B, Kompaneets A S. The Theory on Detonation [M]. Translated by Xu Huafang. Beijing: Higher Education Press, 1958: 76. (in Chinese)
泽尔道维奇 Ya B, 康巴涅耶茨 A S. 爆震原理 [M]. 徐华舫译. 北京: 高等教育出版社, 1958: 76
[14] Li Y C. The Chemical Mechanism of Buildup of Detonation [A]. //Proceedings of Chinese Symposium on Buildup and Drive of Detonation [C]. Zhangjiajie, Huna, China, 1985. (in Chinese)
李银成. 爆轰增长的化学机制 [A]. //全国爆轰增长与驱动会议文集 [C]. 张家界, 1985.
[15] Gibbs T R, Popolato A. LASL Explosive Property Data [M]. Berkeley, California: University of California Press, 1980: 293-424.

Behaviors of Shock Initiation and after-Initiation for Heterogeneous Explosives

LI Yin-Cheng

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100088, *China*)

Abstract: Campbell's and other authors' experimental studies of behaviors of initiation and after-initiation for heterogeneous explosives were introduced and analyzed, but initiation conditions were not dealt with. When an intense shock wave enters a heterogeneous explosive charge, detonation is initiated by the shock wave instantaneously (i. e. not to undergo induction time) and directly (i. e. , not to pass through other processes, such as deflagration). Then a building up detonation wave propagates throughout the heterogeneous explosive charge until it develops into a normal detonation. This whole process is called the buildup of detonation with the new definition in this paper. The so-called reactive shock wave is the building up detonation wave in early stage. Buildup of detonation (in terms of new definition) is a characteristic for all secondary explosives. Incomplete reaction and running to complete reaction of explosives are the chemical mechanism of buildup of detonation.

Key words: explosive; detonation; initiation; equation of state