

文章编号: 1006-9941(2015)10-1028-09

含能材料燃烧转爆轰研究进展

张超, 马亮, 赵凤起, 秦能, 袁志锋

(西安近代化学研究所 火炸药燃烧国防科技重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 介绍了国内外在含能材料燃烧转爆轰(DDT)的研究方法、影响因素、机理成因等方面的主要研究成果,目前,DDT的研究方法主要有实验和数值模拟;DDT的影响因素主要有装填密度、约束条件、点火方法和强度、材料自身的物理化学特性等,DDT机理研究主要有“冲击波成长说”和“局部热爆炸说”。今后,应结合新型高能火炸药的安全性研究,开展其DDT规律研究,在DDT数值模拟方面,应建立全面考虑含能材料反应引起的边界问题、含能材料理化特性、几何效应等的三维数学模型。

关键词: 含能材料; 燃烧转爆轰(DDT); 综述**中图分类号:** TJ55; O389**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.021

1 引言

燃烧转爆轰(Deflagration to Detonation Transition, DDT)是含能材料的一个重要特征^[1],也是含能材料危险性的一项重要指标^[2],备受重视。燃烧转爆轰是系统由燃烧发展为稳定爆轰过程中出现的一个复杂的物理、化学反应,它广泛存在于推进剂和发射药的燃烧、爆破器材的起爆以及炸药的生产、贮存和使用过程中^[3]。早在20世纪40年代,苏联科学家 Andreev 首先开始了对此问题的研究^[4],此后,经过科技工作者的不断探索,在DDT试验及理论方面均取得了一定进展^[5]。随着人们对DDT认识的不断加深,从20世纪中叶起,开始了大规模、系统性的研究工作,国外从事DDT研究工作的主要机构有美国的海军水面武器中心、洛斯阿拉莫斯实验室、桑迪亚国家实验室、斯坦福实验室、海克里斯公司和矿物局,前苏联的科学院化学物理所,法-德联合研究所,英国的装备研究和研究机构等^[6],自此国内外学者对炸药、推进剂、发射药、烟火药等含能材料的燃烧转爆轰研究步伐就一直没有停歇^[7-20]。目前,DDT机理已经被用来指导火炸药的配方设计、性能控制以及安全防护措施的制定^[21],此外,科研人员还把燃料-空气炸药(FAE)燃烧转爆轰过

程中产生的高温、高压燃气用作脉冲发动机的动力源^[22-25],用以克服传统发动机能量输出效率低的不足,被认为是最具有发展前景的动力装置之一^[26-29]。

通过已有的研究,人们对含能材料燃烧转爆轰的研究方法、影响因素及过程机理有了较全面的了解,本文综述了其中有代表性的研究成果,以期对火炸药的燃烧转爆轰特性研究、配方设计、安全控制、成果应用等提供参考。

2 燃烧转爆轰研究方法

2.1 实验研究法

实验研究法目前主要包括DDT管法和动态压缩法。DDT管法是含能材料燃烧转爆轰现象研究最常用的方法,压缩法常用作DDT机理研究。研究火炸药等含能材料的DDT管通常有强约束和弱约束两种^[30],强约束一般为厚壁金属管,其优点是强度大、约束力强,容易实现由燃烧到爆轰的转变。弱约束一般为有机玻璃管或塑料管,其优点是具有良好的可视性,有利于观察整个DDT过程燃烧波的传播规律和药床的密度分布,缺点是强度差、易变形,由于侧向稀疏波作用,在有限长的管内较难实现由燃烧到爆轰的转变,因此塑料管或玻璃管仅用于容易发生燃烧转爆轰的材料。普通含能材料DDT装置如图1^[31],新型FAE DDT装置如图2^[32]。

DDT过程是一个强烈的动态压缩过程,为深入研究DDT机理,Sandusky^[33]等人设计了高压气源驱动的压缩实验、活塞撞击压缩实验、用螺旋形装药推动活

收稿日期: 2015-02-06; **修回日期:** 2015-04-10**基金项目:** 国家自然科学基金(21173163); 火炸药燃烧国防科技重点实验室基金项目(9140C350404140C35162)**作者简介:** 张超(1975-)男,硕士,副研究员,主要从事固体推进剂配方与工艺技术研究。e-mail: chzhang204@sina.com

塞的装置和间隙实验装置分别模拟了多种含能材料多孔药床的 DDT 过程, Sandusky 在活塞压缩过程中首次观察到了致密波(The Compaction Wave, 使得药粒床孔隙率发生变化的行进波即为致密波^[34])。燃烧转爆轰的发生与致密波作用相关, Sandusky^[33] 发现当活塞撞击多孔床的速度小于 $300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时: 形成的稳态致密波速低于 $600 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 当活塞速度足够大时, 致密波速度加快, 药粒床孔隙率急剧变化而引发燃烧, 这一过程满足方程: $\tau^2 \Delta t = \text{const}$ 。式中 τ 为测得的被压缩固相中的应力, MPa; Δt 为药床从被撞击到出现火焰的时间间隔, μs 。

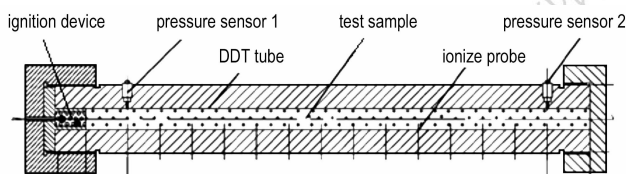


图 1 DDT 管布局图^[31]

Fig. 1 Arrangement of DDT tube^[31]

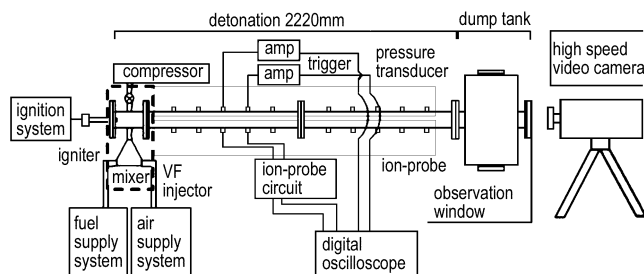


图 2 空气-燃料 DDT 实验装置图^[32]

Fig. 2 Schematic diagram of air-fuel DDT experimental setup^[32]

对 DDT 过程的测试手段主要有测压和测速两个方面。测压技术有: 应变片法^[35]、管内痕迹显示法^[35]、验证板法^[35]、轴向机械探针法^[35]、锰铜压阻计^[36]等。管内痕迹显示法一般用于 DDT 过程分析, 陈晓明^[37] 等人利用管内痕迹法分析了发射药在燃烧转冲击波(DST)和冲击转爆轰(SDT)两个阶段管壁的变化情况。应变片法是将应变片贴在 DDT 管外表面, 通过测量 DDT 管的变形来反映管内压缩波或冲击波的传播规律, 该法的缺点是测量误差偏大, 优点是能够得到强压缩波到达各应变片所处位置的相对时间。

测速技术有: 高速摄影法^[35]、脉冲 X 射线法^[35]、光纤记录法^[35]、电离探针法^[35]、轴向电阻丝法^[35]等, 其中电离探针和光纤法以其经济简单而被广泛应用。电离探针主要依靠火炸药发生化学反应时产生的正负

离子导通, 当火焰波小于 $500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时探针很难测到波速, 光纤探针的工作依靠热和光的辐射, 即使在较低的燃烧速度下也能测到燃烧波速度。因此, 通常采用电离探针和光纤探针相结合的手段测量燃烧波速度, 高速段用电离探针, 低速段用光纤探针。董树南^[31] 等人采用电离探针和光纤探针记录了含 ACP(一种以二价铜胺络离子为阳离子的高氯酸盐)改性双基推进剂的燃烧与爆轰波阵面的位置-时间关系, 发现随着 ACP 含量的增加, 装药燃烧转爆轰有明显增大倾向。

除上述实验技术外, 用于含能材料 DDT 研究的还有微波干涉仪、声像法、反转多幅闪光技术^[38-41]等。

判断燃烧转爆轰与否或其倾向大小的方法一般根据具体条件而定, 从简单、便宜到复杂、昂贵的研究方法目前都在应用^[30]。前者如验证板方法, 即在 DDT 管下方固定一块钢板, 通过观察钢板上留下的痕迹(压痕)来判断是否发生燃烧转爆轰。这种方法的优点是简单、直接、廉价, 缺点是人为主观影响因素较大, 经常存在误判、漏判情况, 因为在试验现场经常存在见证板被抛射无法找到的现象。比较精确的方法是采用高速摄影技术观察燃烧转爆轰过程的发展, 或在 DDT 管中安装传感器测试燃烧波及压力波的传播情况, 从燃烧波阵面和压力波阵面的相对位置来分析燃烧转爆轰过程^[30]。其缺点是复杂、成本昂贵, 存在设备被破坏的危险。目前比较经济、可靠的方法是通过观察见证板、样品管的破坏程度等综合来判断是否发生了燃烧转爆轰^[42]。

2.2 数值模拟法

燃烧转爆轰边界影响因素多, 包含能量转换、相变、压缩、冲击波形成与迭加、稳态爆轰等复杂过程^[43], 这给 DDT 数值模拟带来了一定的难度。目前, 对含能材料 DDT 过程的数值模拟主要采用两相流理论模型。最早采用两相流模型研究燃烧问题的是 Kuo^[44] 和 Gough 等人^[45], 他们未考虑固相的压缩性和颗粒间的相互作用, 因此只进行了低速、低压下的数值模拟。为了克服此不足, Passman^[46] 等人在两相模型中引入体积分数守恒方程进一步完善了两相流模型。经不断完善, 国外学者已用一维两相流的燃烧转爆轰动力学模型及其数值计算方法成功地预示了燃烧转爆轰的全过程^[47-50]。国内秦根成^[51] 等利用一维两相反应流模型, 建立了硝酸酯增塑聚醚(NEPE)高能推进剂燃烧转爆轰数学模型, 用 Mac-Cormack 差分格式进行数值求解 NEPE 推进剂燃烧向爆轰转变的内在原因, 认为存在于药粒床中的压缩波和燃烧波的相互作

用导致了 NEPE 推进剂由燃烧向爆轰的转变。刘德辉^[52]采用一维分离两相流反应模型以及变步长跳步差分计算格式模拟了固体推进剂的燃烧转爆轰过程,建立了确定诱导爆轰距离的方法,由该法所得的诱导爆轰距离值与实验值误差小于 15%;贾祥瑞^[53-55]和杨涛^[56]等人采用一维分离两相流反应模型等对推进剂多孔床中不同速度的致密波进行了计算,得到了致密波区内的参数分布。

在二维模拟方面, Krier 和 Samuelson^[57]采用了 Leapfrog 法求解二维炸药床的燃烧转爆轰问题,发现 Leapfrog 法对非粘性流体控制方程是适用的,但不适合解含有粘性力二阶偏导数的方程组,因为在物理量突变区之前产生严重的数值振荡。为了克服这一缺点, Spalding 等人^[58]提出了 SIMPLE (semi-Implscit Method for pressure-Linked Equations) 和 IPSA (Interphase slsp Algorithm) 数值解法, SIMPLE 型数值计算方法较好地克服了数值解的严重振荡问题, IPSA 法能够较好的解决多相流动过程和燃烧过程的数值分析,姜羲^[43]等人参考应用 IPSA 解法于全粘性方程,结合燃烧转爆轰的具体物理特性和初边条件,对跨音速流动和压力校准方程作了特殊处理,建立了含能材料密实颗粒床的燃烧转爆轰全粘性欧拉二维非常两相反应流的控制方程组,成功地模拟了无起爆药雷管的起爆流场。

对于气液两相燃烧转爆轰过程的数值模拟,大多都采用了 Lax-wendrof 格式^[59]和 Ma Corynack 格式^[60]进行,但其都不能处理激波间断问题,且稳定性条件苛刻。对此不足,美国航空航天局的 Chang^[61]提出了 CE/SE (Conservation Element and Solution Element) 算法,该方法格式简单、精度高,是计算爆轰等强间断问题的有效方法。国内外对于 PDE (Pulse Detonation Engine) 气液两相爆轰的模拟大多未考虑粘性影响,林玲^[62]等在前人研究的基础上,将二维粘性 CE/SE 方法应用到等离子体射流点火的多相爆轰模型中,分别以 N-S (Navier-Stokes) 方程和 Euler 方程为控制方程,比较了等离子射流点火条件下粘性作用对爆轰参数的影响,认为提高初始射流点火的温度和时间,可以显著地缩短诱导爆轰距离(冲击波和爆轰波的交点距装药初始点火端的距离)。

DDT 现象更适合用三维模型进行数值模拟。但由于 DDT 过程中最后阶段(冲击波转变为爆轰阶段),各状态参量瞬变剧烈,这需要开展相当数量的系统实验研究以提供三维数值模拟所需的物理参数,

DDT 实验研究所需的人力、物力、财力花费很大,这给三维数值模拟带来了很大的困难。尽管国内外研究人员在 DDT 三维模拟方面开展了一些研究工作,如 20 世纪 80 年代, Mader 等^[63]在“热点”形成爆轰方面进行了简单的三维数值模拟, Hallquist^[64]主持开发的 1991 年版的 DYDA 程序具有一定处理三维问题的功能。但这些三维模拟仅限于燃烧转爆轰过程某个阶段的简单模拟,还不能预示燃烧转爆轰的全过程。对 DDT 三维数值模拟还需今后进一步研究完善。

3 燃烧转爆轰影响因素

3.1 装填密度的影响

装填密度一般采用理论最大装填密度(TMD)的百分数来表示。董贺飞^[65]以两相流模型为基础,采用 CE/SE 方法模拟了装填密度对 HMX 炸药燃烧转爆轰的影响,气相产物状态方程采用基于统计物理的类 CHEQ (一种基于统计物理的爆轰产物物态方程程序) 的计算结果,数值模拟结果表明,在相同的试验条件下,爆轰成长距离在一定范围内随装填密度呈“U”形变化,如图 4 所示。“U”曲线表明,存在某一含能材料最容易由燃烧转向爆轰的装填密度,在该密度两侧随着装填密度的增加或减小都不易发生 DDT 转变。“U”形曲线的最底部即为含能材料在该装填密度下的最小诱导爆轰距离 L_{\min} , L_{\min} 越小,越易发生 DDT 转变, φ - L 曲线越宽,也越易出现 DDT 转变。赵孝彬^[30]、贾祥瑞^[53]、文尚刚^[66]等人通过试验也得到了此结果。

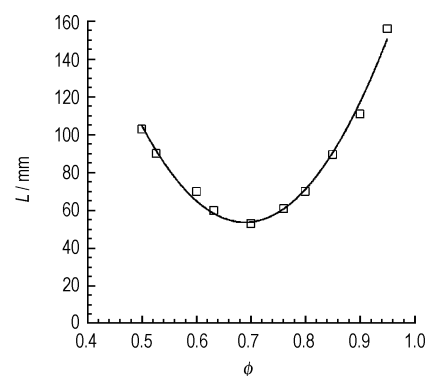


图 3 装填密度与诱导爆轰距离关系^[65]

Fig. 3 Relation curve of the predetonation column length versus loading density^[65]

3.2 约束条件的影响

约束条件包括强约束条件和弱约束条件,强约束

条件如厚壁钢管,弱约束条件如薄壁铝管、铜管及有机玻璃管、塑料管、玻璃管等。

陈朗^[67]等在不同约束条件下(DDT管长420 mm,壁厚分别为5 mm和30 mm),对PBXC03压装炸药燃烧转爆轰过程进行了数值模拟计算。计算结果显示,PBXC03压装炸药只有在强约束下(壁厚30 mm)才能够发生燃烧转爆轰,弱约束下(壁厚5 mm)管体破坏引起气体泄漏和压力降低是限制炸药燃烧转爆轰的主要原因。

秦能^[42]、陈晓明^[37]分别用壳体厚度为4 mm和9 mm的钢管对RDX-CMDB(Composite modified double-base)推进剂和6/7药型双基发射药、叠氮发射药以及三基发射药进行了燃烧转爆轰试验,试验结果与陈朗模拟的结果相同,在弱约束条件下几种火药未发生燃烧转爆轰,而在强约束条件下发生燃烧转爆轰。赵同虎^[68]等人研究了DDT管材料对颗粒状RDX床DDT过程的影响,发现DDT管材料对颗粒状RDX诱导爆轰距离影响不大,但对DDT机理过程有一定影响,DDT管材为钢时,RDX的DDT过程为突变模式,管材为铝时为连续转变模式;F. Leuret^[69]研究了样品管长度对压装高密度炸药(HMX质量分数为96%的塑性炸药)DDT的影响,实验发现随着DDT管长度的增加,装药发生燃烧转爆轰的几率也增大,说明约束条件对试验结果有影响。增强约束条件易于发生燃烧转爆轰,约束越强,破坏DDT管所需的压力越大,有利于药床燃烧产生燃气压力的聚集而形成强大的冲击波,进而诱发药床由燃烧转为爆轰。弱约束容易发生侧向膨胀形变而产生稀疏波,稀疏波能够减小管内的 dp/dt (压力-时间梯度),相对延迟了药床由燃烧向爆轰的转变,DDT管的壁厚与反应激烈程度关联不大^[30]。

3.3 材料的物理与化学性质的影响

影响含能材料DDT过程的主导内在因素是材料本身物化性能,如材料的化学组成、冲击波感度和质量燃耗率等。

减少火药配方中硝化甘油(NG)、叠氮硝胺(DA)和黑索今(RDX)等组分含量可以降低其燃烧转爆轰能力,法国火炸药公司(SNPE)在研究添加了硝胺炸药(RDX或HMX)的改性双基推进剂的爆轰性能时也证实了这一点^[70-71]。刘德辉^[72]等研究了HTPB/AP/HMX(HTPB:端羟基聚丁二烯,AP:高氯酸铵)推进剂的燃烧转爆轰特性,发现在同样的装药密度下,AP/HMX丁羟复合推进剂的诱导爆轰距离比不含HMX

的复合推进剂低42 mm;含能材料的冲击波感度越大越易发生燃烧转爆轰^[73],这是因为冲击波感度越大其吸收冲击波能量转化为热能越容易,在冲击波作用下更易裂解形成热点而引发爆轰。

质量燃耗率是影响含能材料DDT反应的的决定性因素。含能材料的质量燃耗率越大,其发生燃烧转爆轰的进程越快。影响含能材料质量燃耗率的大小的主要因素有:

(1)组成的氧平衡。愈接近零氧平衡的装药,愈易实现DDT。因为零氧平衡的装药燃烧充分,火焰温度高,药粒表面处的温度梯度也大,药粒的线燃速增大,质量燃耗率增大^[66]。

(2)装药的渗透性。渗透性越大,高温燃气渗入装药内部越容易,使对流火焰传播速度提高,从而质量燃耗率增大。在同一孔隙度条件下,颗粒越小、粒形越不规则的药剂渗透性越大,因此,粉状或粒状装药易发生DDT反应^[72]。

(3)火炸药的燃速压强指数。火炸药燃速压强指数越高,其质量燃耗率受管内压力的波动增幅越大,爆轰就越易形成。炸药的压强指数都较高,推进剂、发射药配方中炸药组分含量越高越易发生DDT反应^[73]。

(4)添加剂。炸药、推进剂、发射药配方中添加的钝感剂、降速剂等惰性组分一般都包覆于含能材料的表面,延缓含能材料初始质量燃耗率。这一点王建^[74]等已通过钝感剂包覆HMX试验予以证明。

(5)装药内部缺陷。张泰华^[6]、秦能^[42]等人试验发现受撞击损伤的推进剂和内部存在孔洞的推进剂更易发生燃烧转爆轰现象。这是因为装药内部存在气孔、裂纹等缺陷时,装药初始燃面增大,装药的质量燃耗率增加。

3.4 点火强度与点火方式的影响

点火强度也是影响含能材料燃烧转爆轰的一个重要因素。点火强度越大,点火初期产生的点火峰压越高,形成局部高压区,对药床产生一定压缩作用,有些高能点火药中含有金属粉(铝粉、镁粉等),燃烧时产生大量炽热燃烧粒子,在压力作用下,这些炽热的粒子将会冲击装药的燃面,造成局部燃面增大,未燃药床在压缩和冲击作用下,燃烧加剧,诱导爆轰距离缩短。荣光富、黄寅生等^[75-76]研究了高能点火药对太安燃烧转爆轰的影响,发现改性后的硼系高能点火药 BKF_2 使太安燃烧转爆轰的概率远远大于未改性的硼系高能点火药(BKF_1)。

赵同虎^[77]研究了点火方式对颗粒状装药HMX

燃烧转爆轰的影响,发现颗粒状 HMX 在点火药直接点火时在药床 73.4 mm 处发生爆轰,在活塞驱动点火时,在药床 35 mm 处发生了爆轰,说明两种点火方式下炸药的 DDT 过程不完全相同。活塞改变了 DDT 管的封闭条件,对炸药的 DDT 带来一定的影响。

3.5 温度的影响

国内外研究人员关于温度对含能材料 DDT 的影响也进行了相关研究^[78-80],发现初始温度虽然不能影响含能材料 DDT 响应类型,但对含能材料发生 DDT 后对环境的破坏程度有一定影响。如代晓淦^[80]等人研究了初温对 PBX-2(HMX 基炸药)燃烧转爆轰的影响,发现在其它实验条件均相同条件下,85 °C 下 PBX-2 的反应激烈程度相比于 20 °C 下较弱。分析原因认为这是因为较高温度下,粘结剂发生融化和流动使得体系孔隙率减少,不利于高温燃气渗入装药内部,延缓了 DDT 反应的时间和能量释放速率。

4 DDT 机理研究

由于火炸药等含能材料 DDT 过程的复杂性及 DDT 现象的随机性,对 DDT 机理的阐述至今仍莫衷一是,没有一个满意的解释。国内外科技工作者根据各自的研究情况得出了众多有关 DDT 机理的解释,可以将它们归纳为两类,一类是“冲击波成长说”,一类为“局部热爆炸说”。

“冲击波成长说”的代表是 Bernecker. R. R 和 Sandusky. H. W^[81]。他们将 DDT 过程分为点火前、点火/传导燃烧、对流燃烧、压缩(热点)燃烧、冲击波形成、冲击波作用下的压缩燃烧和爆轰形成 7 个阶段,并非所有的 DDT 过程中都存在这 7 个阶段,随着外界条件的变化,这 7 个阶段在不同的区域分别发挥主导作用。如杨涛等人^[82]将发射药在强约束条件下的 DDT 过程分为低速对流燃烧、快速对流燃烧和稳态爆轰 3 个阶段。“冲击波成长说”可以解释绝大部分含能材料的 DDT 现象。

“局部热爆炸说”的代表是 Price. D^[83],认为在点火初始阶段,药床的燃烧速度与管内压力增加都比较平缓,但药床颗粒间的压实现象依然严重,压力波阵面处孔隙被急剧压缩形成固相应力波,当波阵面处的孔隙完全消失后,应力波继续发展在波阵面处形成了密实区,文献[84]中形象地将该密实区称为“塞子”(Plug),药床燃烧产生的热量不能以对流的形式穿过塞子,而应力波却可以穿过塞子,不断加强的应力波使某处药床在某时刻突然发生热爆炸形成强烈冲击波,

冲击波强度达到某一临界值则诱发爆轰。引起爆轰的最主要五个阶段如图 4 所示。

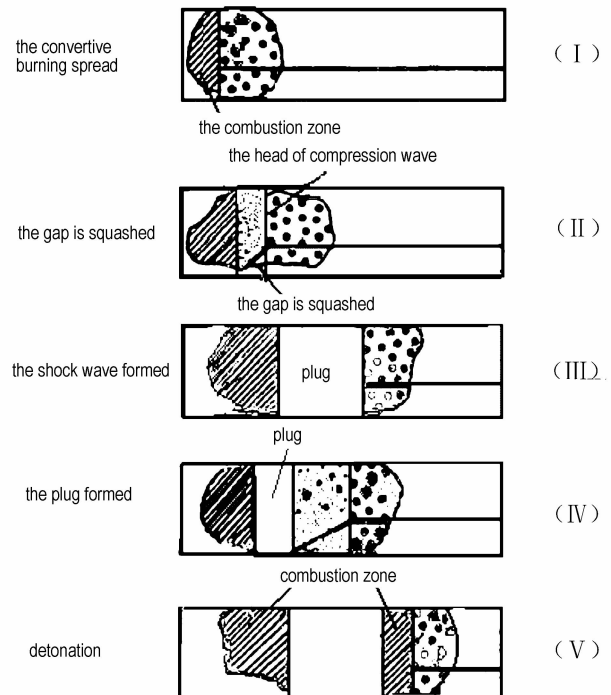


图 4 引起爆轰的五个过程^[84]

Fig. 4 Five-part sequence of event leading to DDT-case^[84]

目前这两类机理可以解释绝大部分含能材料的 DDT 现象。但在冲击波的形成方式、相对位置等方面还存在一些争议,这有待于现代测试技术与燃烧技术的发展以进一步研究,燃烧转爆轰机理要从含能材料燃烧特征和爆炸性能两方面进行分析研究。

5 结束语

燃烧转爆轰是亚稳态含能材料的重要特征之一。研究含能材料的燃烧转爆轰特性,对于弹药安全性、可靠性提高具有重要意义。今后,含能材料 DDT 研究应重点在以下几个方面开展工作:

(1) 加强含能材料燃烧转爆轰研究中试验条件与方法的规范化、标准化研究。

(2) 针对新型高能固体炸药和推进剂,结合安全性研究,对其 DDT 规律进行研究,为其研发与使用过程的安全控制提供指导,同时用得到的 DDT 成果指导新型钝感高能火炸药配方的设计与开发。

(3) 在含能材料 DDT 数值模拟方面,加强火炸药燃烧爆炸学、流体力学理论、光谱学、量子化学、计算机模拟仿真技术及数值方法的交叉融合,建立完善全

面考虑含能材料反应引起的边界问题、含能材料理化特性、几何效应等的三维 DDT 数学模型。

(4) 针对工业安全和爆轰发动机,应重点开展气相爆轰中 DDT 问题,了解气相爆轰中 DDT 的化学本质,为含能材料工业生产中的危险抑制和含能材料在新型动力装置应用提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 黄毅民,冯长根,龙新平,等. JOB-9003 炸药燃烧转爆轰现象研究[J]. 火炸药学报,2002 (51): 54-56.
HUANG Yi-min, FENG Chang-gen, LONG Xin-ping, et al. Deflagration-to-detonation transition behavior of explosive JOB-9003 [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002 (51): 54-56.
- [2] 张端庆. 固体火箭推进剂[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1991: 158-159.
ZHANG Duan-qing. Solid rocket propellant[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1991: 159-160.
- [3] 段宝福, 宋锦泉, 汪旭光. 炸药燃烧转爆轰(DDT)研究现状[J]. 有色金属(矿山部分), 2003, 55(1): 31-35.
DUAN Bao-fu, SONG Jin-quan, WANG Xu-guang. The new progress on the deflagration-to-detonation transition (DDT) for explosives[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2003, 55(1): 31-35.
- [4] Andreev K K. The problem of the mechanism of the transition from burning to detonation in explosives[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1944, 17: 533-537.
- [5] Macek A. Transition from deflagration to detonation in cast explosives[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1959, 31(1): 162-167.
- [6] 张泰华, 白以龙, 王世英, 等. 推进剂的撞击损伤状态对其燃烧转爆轰的影响[J]. 力学学报, 2000, 32(5): 532-539.
ZHANG Tai-hua, BAI Yi-long, WANG Shi-ying, et al. Effect of impact-induced damage on deflagration-to-detonation transition (DDT) of high energy propellants[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2000, 32(5): 532-539.
- [7] Popov V A. On the pre-detonation period of flame propagation [J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1958, 7(1): 799-806.
- [8] Brinkley S R, Lewis B. On the transition from deflagration to detonation[J]. *Symposium (International) on Combustion*, 1958, 7(1): 807-811.
- [9] 彭培根. 固体复合推进剂燃烧转爆轰的临界直径的理论预测[J]. 火炸药, 1980 (5): 1-14.
- [10] 曲作家, 于津平, 高耀林, 等. 粒状硝胺火药燃烧转爆轰的研究[J]. 华东工学院学报, 1989 (2): 14-20.
QU Zuo-jia, YU Jin-ping, GAO Yao-lin, et al. Studies of deflagration-to-detonation transition in granular nitramine propellant [J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 1989 (2): 14-20.
- [11] 金志明, 杨涛, 袁亚雄, 等. 粒状火药床燃烧转爆轰的研究[J]. 爆炸与冲击, 1994, 14(1): 66-72.
JIN Zhi-ming, YANG Tao, YUAN Ya-xiong, et al. Studies of deflagration-to-detonation transition (DDT) in granular propellant beds[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(1): 66-72.
- [12] 夏秋. 新型含能材料的燃烧转爆轰[J]. 含能材料, 1994, 2(1): 21-23.
XIA Qiu. Deflagration-to-detonation transition of new energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1994, 2(1): 21-23.
- [13] 杨涛, 金志明. 发射药颗粒床中对流燃烧的实验研究[J]. 航空动力学报, 1994, 9(4): 383-386.
YANG Tao, JIN Zhi-ming. Experimental investigation on convective burning in a bed of granular propellant[J]. *Journal of Aerospace Power*, 1994, 9(4): 383-386.
- [14] 郝新红, 汪佩兰. 烟火药 DDT 研究[J]. 火工品, 1999 (3): 16-21.
HAO Xin-hong, WANG Pei-lan. Study of the DDT process of pyrotechnic compositions [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1999 (3): 16-21.
- [15] 雷卫国, 武杰灵. 破碎燃烧高能气体压裂装药损伤对 DDT 行为的影响[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 32-34.
LEI Wei-guo, WU Jie-ling. The influence of different damages of CCCF composite propellant charge on the DDT behavior [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(3): 32-34.
- [16] 刘鹏, 张怀智, 郭胜强, 等. 废炸药燃烧转爆轰的原因分析及对安全销毁炸药的启示[J]. 爆破器材, 2009, 38(1): 31-34.
LIU Peng, ZHANG Huai-zhi, GUO Sheng-qiang, et al. Analysis of deflagration to detonation transition of abandoned explosives and enlightenment on the safe destruction of the explosives[J]. *Explosive Materials*, 2009, 38(1): 31-34.
- [17] 秦能, 廖林泉, 范红杰, 几种典型固体推进剂的危险性能实验研究[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 324-329.
QIN Neng, LIAO Lin-quan, FAN Hong-jie, et al. Experimental study on several typical solid propellants hazard classification [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(3): 32-329.
- [18] 张新明, 吴艳青, 黄风雷. 炸药颗粒床中致密波状态方程研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(7): 761-764.
ZHANG Xin-ming, WU Yan-qing, HUANG Feng-lei. Analysis on EOS of steady compaction waves in granular explosive [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(7): 761-764.
- [19] 于津平. 火炸药燃烧转爆轰的机理假说综述[J]. 弹道学报, 1991(1): 71-75.
YU Jin-ping. Deflagration-to-detonation transition mechanisms of propellants and explosives [J]. *Journal of Ballistics*, 1991(1): 71-75.
- [20] 杨涛, 张为华, 方丁酉. 高能固体推进剂燃烧转爆轰(DDT)研究综述[J]. 推进技术, 1996, 17(3): 76-82.
YANG Tao, ZHANG Wei-hua, FANG Ding-qiu. A review on the deflagration-to-detonation transition (DDT) for high energy propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1996, 17(3): 76-82.
- [21] 张泰华, 卞桃华. 高能推进剂燃烧转爆轰的实验和数值研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(3): 58-62.
ZHANG Tai-hua, BIAN Tao-hua. The experiment and numerical study on the deflagration-to-detonation transition of high-energy propellant [J]. *Journal of Ballistics*, 2001, 13(3): 58-62.
- [22] Kessler D A, Gamezo V N, Oran E S. Simulations of flame acceleration and deflagration-to-detonation transitions in methane-air systems [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(11): 2063-2077.
- [23] LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, LI Jin, et al. Deflagration-to-

- detonation transition in nitromethane mist/aluminum dust/air mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(1): 106–117.
- [24] Peterson J R, Wight C A. An Eulerian – Lagrangian computational model for deflagration and detonation of high explosives [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(7): 2491–2499.
- [25] 李小东, 刘庆明, 白春华, 等. 铝粉-空气混合物的燃烧转爆轰过程[J]. 火炸药学报, 2009, 36(6): 58–61.
LI Xiao-dong, LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, et al. Deflagration-to-detonation transition process in aluminum dust-air mixture [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 36(6): 58–61.
- [26] 王宁飞, 刘昶秀, 魏志军. 固体燃料超燃冲压发动机燃速研究进展[J]. 航空动力学报, 2014, 29(3): 727–736.
WANG Ning-fei, LIU Chang-xiu, WEI Zhi-jun. A review of solid fuel scramjet engine burning rate[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29(3): 727–736.
- [27] Dean A J. A review of PDE development for propulsion applications[J]. *AIAA Journal*, 2007, 985: 1–5.
- [28] 严传俊, 何立明, 范玮, 等. 脉冲爆震发动机的研究与发展[J]. 航空动力学报, 2001, 16(3): 212–217.
YAN Chuan-jun, HE Li-ming, FAN Wei, et al. Research and development of pulse detonation engines[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2001, 16(3): 212–217.
- [29] 王杰, 翁春生. 脉冲爆震发动机管外复杂波系的数值计算[J]. 推进技术, 2008, 29(5): 545–551.
WANG Jie, WENG Chun-sheng. Numerical calculation of complex wave system outside pulse detonation engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2008, 29(5): 545–551.
- [30] 赵孝彬, 蒲远远, 陈教国, 等. NEPE 推进剂的燃烧转爆轰特性[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 4–8.
ZHAO Xiao-bin, PU Yuan-yuan, CHEN Jiao-guo, et al. Deflagration to detonation transition characteristics of NEPE propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(1): 4–8.
- [31] 董树南, 王世英, 朱晋生, 等. 含 ACP 改性双基推进剂的燃烧转爆轰实验研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(4): 17–20.
DONG Shu-nan, WANG Shi-ying, ZHU Jin-sheng, et al. The experimental study on deflagration-to-detonation Transition in modified double-base propellant with ACP[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(4): 17–20.
- [32] Asato K, Miyasaka T, Watanabe Y, et al. Combined effects of vortex flow and the Shchelkin spiral dimensions on characteristics of deflagration-to-detonation transition[J]. *Shock Waves*, 2013, 23(4): 325–335.
- [33] Sandusky H W, Bernecker R R, Clairmont A R. Deflagration-to-detonation transition studies of porous explosive charges in plastic tubes[C]//7th Symposium (International) on Detonation, Annapolis, MD. 1981: 119–137.
- [34] Powers J M, Stewart D S, Krier H. Analysis of steady compaction waves in porous materials[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1989, 56(1): 15–24.
- [35] 王建, 文尚刚, 何智, 等. 压装高能炸药的燃烧转爆轰实验研究[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 25–28.
WANG Jian, WEN Shang-gang, HE Zhi, et al. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in pressed high-density explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 25–28.
- [36] McAfee J M, Campbell A W, Asay B W. Deflagration to detonation in HMX under high confinement [C]// DEA Conference. Arlington, 1987: 265–270.
- [37] 陈晓明, 赵瑛, 宋长文, 等. 发射药燃烧转爆轰的试验研究[J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 69–72.
CHEN Xiao-ming, ZHAO Ying, SONG Chang-wen, et al. Experimental study on deflagration to detonation transition of gun propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(4): 69–72.
- [38] Stanton P L, Venturini E L, Dietzel R W. Microwave interferometer techniques for detonation study[R]. Sandia National Labs, Albuquerque, NM (USA), 1985: 814–822.
- [39] Liu C T. Acoustic evaluation of damage characteristics in a composite solid propellant [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1992, 29(5): 709–712.
- [40] Held M, Nikowitsch P. Inverse multi-streak-technique [M]. Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, Schrobenshausen (Germany, FR), 1981: 751–758.
- [41] Krier H, Butler P B, Lembeck M F. Modeling of shock development and transition to detonation initiated by burning in porous propellant beds[J]. *Combustion and Flame*, 1982, 46: 75–93.
- [42] 秦能, 廖林泉, 金朋刚, 等. 典型固体推进剂燃烧转爆轰实验研究[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 86–89.
QIN Neng, LIAO Lin-quan, JIN Peng-gang, et al. Experimental study on deflagration-to-detonation transition of solid propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(4): 86–89.
- [43] 姜羲, 王荪源. 含能材料密实床燃烧转爆轰的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(2): 97–104.
JIANG Xi, WANG Sun-yuan. Numerical simulation of Deflagration-to-Detonation Transition in high-loading energetic material beds [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1992, 12(2): 97–104.
- [44] Kuo K K, Vichnevetsky R, Summerfield M. Theory of flame front propagation in porous propellant charges under confinement[J]. *AIAA Journal*, 1973, 11(4): 444–451.
- [45] Gough P S, Zwartz F J. Modeling heterogeneous two-phase reacting flow[J]. *AIAA Journal*, 1979, 17(1): 17–25.
- [46] Passman S, Nunziato J W, Walsh E K. A theory of multiphase mixtures[M]//Rational Thermodynamics. New York: McGraw-Hill, 1984: 286–325.
- [47] WANG Sun-yuan, GAO Yao-lin, FAN Qin-wen. Theoretical and experimental studies in deflagration-to-detonation transition of explosives at extra-low loading densities [J]. *Shock Tubes and Waves*, 1988: 803–809.
- [48] Baer M R, Gross R J, Nunziato J W, et al. An experimental and theoretical study of deflagration-to-detonation transition (DDT) in the granular explosive, CP [J]. *Combustion and Flame*, 1986, 65(1): 15–30.
- [49] Baer M R, Nunziato J W. A two-phase mixture theory for the deflagration-to-detonation transition (DDT) in reactive granular materials[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1986, 12(6): 861–889.
- [50] Powers J M, Stewart D S, Krier H K. Theory of two-phase detonation[J]. *Combustion and Flame*, 1990, (80): 264–279.
- [51] 秦根成, 侯晓, 陈林泉, 等. 高能固体推进剂燃烧转爆轰的数值模拟[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(3): 186–189.
QIN Gen-cheng, HOU Xiao, CHEN Lin-quan, et al. Numerical simulation of deflagration-to-detonation transition in high energy propellant [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2006, 29(3): 186–189.
- [52] 刘德辉, 彭培根, 杨东民. 固体推进剂燃烧转爆轰模拟计算研究

- [J]. 推进技术, 1993(1): 57-64.
- LIU De-hui, PENG Pei-gen, YANG Dong-min. Simulating calculation of deflagration-to-detonation transition on solid propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1993 (1): 57-64.
- [53] 贾祥瑞, 李冬香, 孙锦山, 等. 高能固体推进剂燃烧转爆轰数值模拟[J]. 兵工学报, 1997, 18(1): 46-51.
- JIA Xiang-rui, LI Dong-xiang, SUN Jin-shan, et al. An analysis of the deflagration-to-detonation transition (DDT) in NEPE propellants [J]. *Acta Armamentarii*, 1997, 18(1): 46-51.
- [54] 贾祥瑞, 孙锦山. 含能材料多孔床中致密波分析[J]. 兵工学报, 2000, 21(3): 212-216.
- JIA Xiang-rui, SUN Jin-shan. An analysis of compaction wave in energetic material [J]. *Acta Armamentarii*, 2000, 21(3): 212-216.
- [55] 贾祥瑞, 孙锦山. 高能推进剂多孔床中致密波研究[J]. 北京理工大学学报, 1997, 17(1): 19-24.
- JIA Xiang-rui, SUN Jin-shan. Compaction waves in a porous bed of high energy propellant [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1997, 17(1): 19-24.
- [56] 杨涛. 多孔推进剂装药的动态压缩过程的数值研究[J]. 推进技术, 1995, 16(1): 68-74.
- YANG Tao. Numerical studies on dynamic compaction of porous propellant charges [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995, 16(1): 68-74.
- [57] Krier H, Dahm M R, Samuelson L S. A fully viscous two-dimensional unsteady flow analysis applied to detonation transition in porous explosives [R]. Illinois Univ at Urbana dept of mechanical and industrial engineering, UIIU-ENG-84-4009, 1985: 117-122.
- [58] Spalding M J, Krier H, Burton R L. Boron suboxides measured during ignition and combustion of boron in shocked Ar/F/O₂ and Ar/N₂/O₂ mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2000, (120): 200-210.
- [59] Butler P B, Lembeck M F, Krier H. Modelling of shock development and transition to detonation initiated by burning in porous propellant beds [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 46: 75-93.
- [60] Hoffman S J, Krier H. Fluid mechanics of deflagration-to-detonation transition in porous explosives and propellants [J]. *AIAA Journal*, 1981, 19(12): 1571-1579.
- [61] Chang S C. The method of space-time conservation element and solution element-a new approach for solving the Navier-Stokes and euler equations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1995, 119(2): 295-324.
- [62] 林玲, 翁春生. 等离子体射流点火对燃烧转爆轰影响的二维数值计算[J]. 兵工学报, 2014, 35(3): 1428-1434.
- LIN Ling, WENG Chun-sheng. TWO-dimensional numerical calculation for the influence of plasma jet ignition on deflagration-to-detonation transition [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(3): 1428-1434.
- [63] Mader C L. Numerical modeling of detonations [M]. Los Alamos Series in Basic and Applied Sciences, Berkeley: University of California Press, 1979.
- [64] Hallquist J O. LS-DYNA3D theoretical manual [M]. Livermore, Livermore software technology corporation, 1991.
- [65] 董贺飞, 赵艳红, 洪滔. HMX 炸药燃烧转爆轰数值模拟[J]. 高压物理学报, 2012, 26(6): 601-606.
- DONG He-fei, ZHAO Yan-hong, HONG Tao. Numerical simulation of the deflagration-to-detonation transition behavior of explosive HMX [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2012, 26(6): 601-606.
- [66] 文尚刚, 王胜强, 黄文斌, 等. 密度对压装 B 炸药燃烧转爆轰性能的影响[J]. 火炸药学报, 2006, 29(5): 5-8.
- WEN Shang-gang, WANG Sheng-qiang, HUANG Wen-bin, et al. The effect of density in composition B deflagration-to-detonation transition behavior [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2006, 29(5): 5-8.
- [67] 陈朗, 王飞, 伍俊英, 等. 高密度压装炸药燃烧转爆轰研究[J]. 含能材料, 2011, 19(6): 697-704.
- CHEN Lang, WANG Fei, WU Jun-ying, et al. Investigation of the deflagration to detonation transition in pressed high density explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 697-704.
- [68] 赵同虎, 张寿齐, 张新彦, 等. DDT 管材料对颗粒状 RDX 床燃烧转爆轰影响的实验研究[J]. 高压物理学报, 2000, 4(2): 99-103.
- ZHAO Tong-hu, ZHANG Shou-Qi, ZHANG Xin-yan, et al. AN experimental study of the effects of DDT tube materials on the deflagration-to-detonation transition granular RDX bed [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2000, 4(2): 99-103.
- [69] Leuret F, Chaisse F, Presles H N. Experimental study of the low velocity detonation regime during the deflagration to detonation transition in a high density explosive [C] // Proc. 11th Symp. (Int.) on Detonation. Colorado, 1998: 693-700.
- [70] Charles E H. An insensitive nitrocellulose base high performance minimum smoke propellant [C] // Proceeding of Insensitive Munitions Technology Symposium, ADPA, Williamsburg, VA. 1994: 221-228.
- [71] Leroy M, Hamaïde S, Salveta B, et al. SNPE methodology for insensitive rocket motors development [C] // Proceeding of Insensitive Munitions Technology Symposium, ADPA, Williamsburg, VA. 1994: 439-448.
- [72] 刘德辉, 彭培根, 王振芳, 等. AP/HMX 丁羟复合推进剂燃烧转爆轰研究[J]. 兵工学报, 1994, 15(1): 32-36.
- LIU De-hui, PENG Pei-gen, WANG Zhen-fang, et al. AN study of deflagration-to-detonation transition in AP/HMX/HTPB propellant [J]. *Acta Armamentarii*, 1994, 15(1): 32-36.
- [73] 刘德辉, 潘孟春, 彭培根, 等. 模型与真实高氯酸铵/硝推进剂燃烧转爆轰的比较[J]. 推进技术, 1992(10): 74-77.
- LIU De-hui, PAN Meng-chun, PENG Pei-gen, et al. The comparison of deflagration-to-detonation transition between model and real ammonium perchlorate/nitramine propellant [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1992(10): 74-77.
- [74] 王建, 文尚刚. 以 HMX 为基的两种压装高密度炸药的燃烧转爆轰实验研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(6): 441-445.
- WANG Jian, WEN Shang-gang. Experimental study on deflagration-to-detonation transition in two pressed high-density explosives [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(6): 441-445.
- [75] 荣光富, 黄寅生, 崔晨晨, 等. 硼系高能点火药对太安燃烧转爆轰的影响[J]. 爆破器材, 2007, 36(2): 13-14.
- RONG Guang-fu, HUANG Yin-sheng, CUI Chen-chen, et al. A study on the combustion of B-based high-energy ignition composition transformed to the detonation of PETN [J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(2): 13-14.
- [76] 荣光富, 黄寅生. 两种高能点火药对炸药燃烧转爆轰的影响[J]. 爆破器材, 2008, 37(5): 20-22.
- RONG Guang-fu, HUANG Yin-sheng. Influence of two high-energy ignition compositions on Transformation of combustion to

- detonation of explosives[J]. *Explosive Materials*, 2008, 37(5): 20–22.
- [77] 赵同虎, 张新彦, 李斌, 等. 颗粒状 RDX、HMX 的燃烧转爆轰实验研究[J]. 含能材料, 2003, 11(4): 187–190.
ZHAO Tong-hu, ZHANG Xin-yan, LI Bin, et al. Experimental study on the deflagration-to-detonation transition for granular HMX, RDX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 187–190.
- [78] Hare D E, Forbes J W, Garcia F, et al. A report on the deflagration-to-detonation transition (DDT) in the high explosive LX-04 [C] // Proceedings of International Symposium on Detonation. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory. 2004, (1): 1–29.
- [79] Sandusky H W, Granholm R H, Bohl D G, et al. Deflagration to detonation transition in LX-04 as a function of loading density, temperature, and confinement [C] // Proc. 13th International Symposium on Detonation, Norfolk, VA, 2006: 1–9.
- [80] DAI Xiao-gan, WEN Yu-shi, HUANG Feng-lei, et al. Effect of temperature, density and confinement on deflagration to detonation transition of an HMX-based explosive [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(4): 563–567.
- [81] Sandusky H W, Bernecker R R. Compressive reaction in porous beds of energetic materials [C] // 8th International Symposium on Detonation. Albuquerque, 1985: 881–891.
- [82] 杨涛, 夏智勋, 雷碧文, 等. 发射药在强约束条件下的 DDT 特性 [J]. 推进技术, 1995 (6): 66–73.
YANG Tao, XIA Zhi-xun, LEI Bi-wen. Delagration to detonation transition characteristics of gun propellants under strong confinement [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 1995 (6): 66–73.
- [83] Bernecker R R, Price D. Burning to detonation transition in porous beds of a high-energy propellant [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 219–231.
- [84] Krier H, Cudak C A, Stewart J R, et al. A model for shock initiation of porous propellants by ramp-induced compression processes [C] // Proceedings of the Eighth Symposium (International) on Detonation. 1985: 962–971.

Review on Deflagration-to-Detonation Transition of Energetic Materials

ZHANG Chao, MA Liang, ZHAO Feng-qi, QIN Neng, YUAN Zhi-feng

(National Key Lab of Science and Technology on Combustion and Explosion, Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: The progress on research methods, influential factors and mechanisms of the deflagration-to-detonation transition (DDT) of energetic materials were summarized. The research methods for DDT mainly include experimental research and numerical simulation method. The influential factors for DDT are loading density, confinement condition, ignition ways and strength, physico-chemical characters of material, etc. The mechanisms of DDT mainly include “the shockwave grown-up theory” and “the locative heat explosive theory”. The research on DDT in the future should be in accompany with the study on the safety of new high energy propellant and explosives. The three-dimension mathematical model of the border issues caused by energetic materials reaction, physicochemical characters and geometry effect of energetic materials should be considered for numerical simulation.

Key words: energetic material; deflagration-to-detonation transition (DDT); summarization

CLC number: TJ55; O389

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.021