

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.01.010

# 国外高能炸药点火机理研究进展\*

田 轩 冯晓军 封雪松 徐洪涛 冯 博 王晓峰

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 高能炸药发生点火反应由 3 个主要的能量转移过程引起:摩擦或剪切热、自加热、冲击压缩。炸药发生反应的剧烈程度由缓慢燃烧到完全爆轰不等,而这主要取决于能量转移率、炸药的理化性能、壳体约束强度等变量。该文重点从撞击点火、热爆炸、弱冲击压缩和强冲击压缩(分为均质炸药和非均质炸药)等方面综述了国外近年来在高能炸药点火方面的研究进展,以炸药在撞击、热、冲击刺激下的试验方法和数学建模方法为主,同时介绍了最新的实验和仿真研究成果。

[关键词] 高能炸药 点火机理 非冲击起爆 点火和反应增长模型 热爆炸

[分类号] TQ564

## 引言

高能炸药的安全性能和能量性能是含能材料研究领域两个重要方向。由于气体、液体和固体高能炸药具有广泛的应用,其安全性能尤为重要。目前,通常将炸药受到的意外刺激分为以下 3 类<sup>[1]</sup>:

最常见的一类是由摩擦和剪切作用引起放热化学反应的撞击点火。这类点火最常见的场景是:药柱跌落、炸药药柱沿粗糙面的相对滑移、物体低速撞击(如子弹撞击)等。受约束条件影响,其响应程度从微弱的气体反应产物形成到剧烈的热爆炸不等。

第二类是当炸药柱加热到一定温度时,即炸药体系的放热化学反应速度超过热点分散速度时,热爆炸反应开始。热爆炸反应程度主要取决于加热速率、炸药理化性能以及约束强度。受炸药理化性能影响,点火反应可能增长为燃烧反应,也可能自增长为爆轰反应,反应程度主要与约束强度有关。在无约束条件下炸药以燃烧反应为主,燃烧反应速度为亚音速且不剧烈。当燃速过快并超过某一临界值时,可能破坏体系内气体产物的生成和扩散平衡,产生的燃气积聚将造成炸药由燃烧向爆轰转变。这两类过程通常被称作 XDT 和 DDT。

第三类是冲击点火,即冲击波以超音速冲击炸药。当冲击波强度和持续时间充足时,炸药发生化学反应并引起压力和温度的迅速增长,将初始

冲击波加速至稳定爆轰速度和压力,这一过程被称作 SDT。临近炸药柱殉爆、高速破片以及射流引起的冲击压缩均属于这类。

目前,热点理论<sup>[2-4]</sup>仍作为经典理论来解释炸药的起爆机理。但在不同的刺激条件下,热点生成的微观过程明显不同,国外近年来在这方面开展大量工作,并提出了多种热点形成机制<sup>[5-10]</sup>,包括摩擦、剪切、空穴坍塌、应变率效应、裂纹、位错机制等。

## 1 非冲击(撞击)点火

当均相固体炸药受到低速撞击时<sup>[11]</sup>,在炸药柱内形成压力为几吉帕的压缩波。它由以声速传播的弹性波和以较低塑性声速传播的塑性波组成。在塑性波流场中,炸药在空穴坍塌、摩擦、剪切、滑移带等机制作用下生成热点<sup>[12-15]</sup>,尽管这些能量不足以激发高能炸药发生整体放热化学反应,但局部热点的形成可能使炸药发生点火并快速增长为剧烈的能量释放反应。即炸药点火增长后形成亚音速的燃烧波,炸药分解的能量在热转移和压力作用下驱动燃烧波传播,并使高温气体反应产物进入下层炸药分子。

为了研究这类撞击问题,国外建立了相关大量试验方法<sup>[11,16-20]</sup>,如落锤撞击试验、滑道试验、Susan 试验等,撞击感度、Steven 试验以及改进型 Steven 试验方法对比见表 1。

大量试验证明:炸药的撞击感度与频率分布规

\* 收稿日期:2013-04-01

基金项目:2013 年度火炸药燃烧国防科技重点实验室基金项目(9140C350406130C35126)

作者简介:田轩(1987~),男,硕士,研究方向为炸药安全及能量性能评估技术。E-mail:aaaxuanyuan@163.com

通信作者:冯晓军(1976~),男,博士,高级工程师,研究方向为炸药安全及能量性能评估技术。E-mail:fengxj\_78@163.com

表 1 非冲击点火的试验方法对比

Tab. 1 Comparison of experimental methods for non-impact ignition

试验名称	研究目的	样品尺寸及状态	试验过程	结果判断	试验结果
撞击感度	低速撞击下发生爆炸反应的难易程度	50 mg 药粉平铺放置在两钢制击柱中间	2 kg, 5 kg 落锤从不同高度落下撞击击柱, 击柱压缩炸药	定性	爆炸百分数特性落高上下限法
Steven 试验	同上	Ø11cm × 1.285 cm 的圆柱形炸药, 被聚四氟乙烯限定	Ø 6.01 cm 不同形状的钢制入射体高速	定量	炸药发生点火的临界速度值
改进 Steven	同上	Ø11cm × 1.285 cm 的圆柱形炸药, 无约束	同上	定量	炸药发生点火的临界速度值

律近似正态分布, 撞击感度试验则利用数理统计方法计算出不同感度值出现的概率, 作为安全指标的参考, 但无法测量炸药反应的剧烈程度。而美国 LLNL 试验室的 Steven 试验和 LANL 试验室的改进型 Steven 试验结果, 分别代表了炸药在强弱约束条件下的响应特点, 其中 Steven 试验可利用多种电测技术表征不同炸药的反应剧烈程度。尽管上述试验均可用于炸药的非冲击点火研究, 但受撞击条件影响, 试样在试验中不同的运动状态和热点形成过程导致试验结果矛盾。例如, 试验发现 HMX 基 PBX 在后两种试验中均表现出明显的反应起始撞击速度, 但试验结果与机械感度试验的特性落高值相矛盾, 却与撞击感度试验结果一致<sup>[15-16]</sup>。

综上, 炸药的安全性设计不仅需要了解炸药的实用工况, 更需要了解炸药的整个热点形成过程, 数值仿真技术在这方面的低成本优势成为机理过程研究的重要手段。国外首先利用 Steven 试验得到入射体压力、持续时间和反应时间以及点火起始速度等数据, 然后通过点火和反应增长模型成功地预测炸药发生 XDT、与压力相关的爆燃 DDT 以及其它意外工况下的撞击点火速度, 即炸药在不同的入射体撞击时反应的下限速度<sup>[21-22]</sup>。目前普遍认为炸药的非冲击点火主要从塑性流动产生剪切带上的局部热点开始<sup>[23]</sup>, 并通过大量试验验证。其中 Frey 通过模拟发现剪切带的厚度约 1 μm, 且剪切带的温度随压力和剪切速率的增加而上升<sup>[24]</sup>, Frey 通过动态剪切装置证明点火起始速度取决于压力和剪切速率, Yehuda 根据 Susan 和 Steven 试验认为 LX-04 炸药的点火与压力和炸药的塑性应变率有关, 并获得了 LX-04 炸药的点火阈值关系<sup>[25]</sup>。

纳米材料(包括纳米铝热剂和纳米铝粉)因其高储能成为近年来的研究热点。Hunt<sup>[26]</sup>通过撞击试验和高速热成像技术研究了铝粉钝化层、纳米铝粉的自组装钝化单分子层对点火动力学的影响。Chowdhury<sup>[27]</sup>使用飞行时间质谱法研究了多种铝热

剂的点火温度, 试验发现点火延迟随氧化层厚度增加而显著增加, 这表明反应材料必须迁移至壳体表面才能反应, 同时发现 Al-CuO 铝热剂可在无氧条件下反应。

2 点火和反应增长模型

当炸药遭受初始冲击波时, 包含摩擦、孔洞坍塌、剪切带和局部塑性生热在内的微观过程形成热点, 热点起始反应后, 热点向周围扩散并开始燃烧, 燃烧速度为亚音速。国外为了描述整个现象, 先后开发了 Forest-fire 模型<sup>[28]</sup>、JFT 模型<sup>[29]</sup>和 HVRB 模型<sup>[30]</sup>, 但由 Lee 和 Tarver 的点火和增长模型被多次证明正确并被广泛使用, 该点火和增长模型体现了多种点火机制(摩擦、剪切、空穴坍塌、应变率效应等)。

所有的反应流动模型至少需要<sup>[31]</sup>: 未反应炸药和反应产物的状态方程、炸药转变为产物的反应速率方程、用于计算炸药和产物部分反应状态的混合方程。点火和反应增长模型通常使用 JWL 方程, 一个是未反应炸药, 另一个是反应产物。

$$p = Ae^{-R_1V} + Be^{-R_2V} + \frac{wC_vT}{V}.$$

(1)

式中:  $p$  为压力;  $V$  为比体积;  $T$  是温度;  $w$  是 Gruneisen 系数;  $C_v$  是平均热容;  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  都是常数。

未反应炸药的状态方程由冲击绝热数据可得, 反应产物状态方程源于圆筒试验和其它金属加速试验。当固体和液体炸药发生冲击点火和爆轰时, 两项压力必须平衡, 由于热气和炸药分子间的相互作用时间在纳秒范围, 高温气体产物到低温炸药的热转移时间远小于压力平衡时间, 因此, 对炸药混合物温度作以下假设: 未反应炸药和反应产物间温度平衡。而在点火和增长模型中, 采用温度平衡的原因是: 在高压和高温下, 当反应热点增长并消耗更多的炸药时, 热转移有效增加。点火增长模型反应速率方程为:

$$\frac{dF}{dt} = I(1-F)^b \left( \frac{\rho}{\rho_0} - 1 - a \right)^x + G_1(1-F)^c F^d p^y + G_2(1-F)^e F^z p^z. \quad (2)$$

式中:  $F$  是破碎反应系数;  $t$  是时间,  $\mu\text{s}$ ;  $\rho$  为当前密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $\rho_0$  为初始密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $p$  为压力,  $\text{MPa}$ ;  $I, G_1, G_2, a, b, c, d, e, g, x, y, z$  都是常数。该 3 项反应速率方程代表了压装炸药在冲击点火和爆轰时反应的 3 个阶段, 见表 2。

为了研究受压力控制的燃烧过程, 国外发展了点火和增长程序 DYNABURN, 即将一个低破碎反应或压力置于炸药药柱发生反应的网格区, 然后利用模型后两项代表亚音速爆燃波的反应。目前该程序已用于研究各种高压爆燃问题的求解, 包括内弹道学、气袋以及其它推进剂和炸药的燃烧问题。国外使用该模型以研究炸药的点火增长问题为主<sup>[32-33]</sup>, 研究涉及爆轰波传播过程中的衍射、炸药的压死、拐角效应<sup>[34-36]</sup>等, Tarver 等<sup>[37-39]</sup>利用该模型可准确预测 B 炸药、低密度 HMX、HNS 的冲击点火试验结果。

### 3 热爆炸

由于炸药在火焰、激光和粒子束加热以及热与冲击在内的复合刺激下可能发生热爆炸, 因此, 测量并预测炸药的放热化学反应起始时间及整个爆炸反应剧烈程度变得非常重要<sup>[40]</sup>。

炸药的热爆炸包含以下过程: 当炸药受热时, 首先发生热膨胀。其次是软化(如果材料是热塑性)或通过交联变硬, 这取决于黏结剂的特性。受炸药和约束形状影响, 含能材料可能因膨胀而填充空隙或从约束中挤出, 在一定温度下, 放热分解反应开始于多孔材料的形成及比表面增加。当放热反应速度超过热扩散引起的热散失速度时, 点火反应开始。随后炸药燃烧引起温度和压力的增加, 如果热驱动更多的表面燃烧, 爆燃可能非常快, 反应剧烈性一直增加到材料完全反应、约束破裂或转变为爆轰反应。

在一定程度上, 热爆炸反应由放热燃烧反应的

热释放与热扩散引起的热散失平衡决定。因此, 建立不同炸药的化学分解反应热转移模型是预测炸药在不同条件下热爆炸反应时间和位置的基础。该模型需要结合以下试验数据: 热爆炸时间、热导率、热容以及分解反应过程有关的化学动力学参数。目前国外通过 3~5 个简单试验即可成功预测炸药在不同温度、加热速率以及约束下的爆炸时间, 近年来的研究重点在于测量和预估热爆炸剧烈程度以及炸药热爆炸反应的动力学影响。

测量和预估炸药热爆炸剧烈程度的困难在于它受加热速率和限定程度影响。当快速加热时, 无机炸药分子的低热导率限制了热转移, 快速放热化学反应发生在外边界。由于仅有炸药药柱外部产生气相反应产物, 爆炸反应不剧烈, 如不敏感炸药 TATB; 当低速加热时, 外部热量通过传导进入药柱, 化学反应发生在药柱中心, 多数炸药反应剧烈主要是由于炸药在壳体破裂前发生反应; 在极慢速加热条件下, 炸药反应变得极不剧烈, 这主要是因为导致壳体破裂的大量气体是通过炸药缓慢的热分解反应形成。尽管热爆炸的以上特征早已是共识, 但通过试验和仿真结合的办法成功评价炸药的热爆炸反应程度是近年来的事。

Chidester 首次报道了测试热爆炸剧烈程度的实验装置<sup>[41-44]</sup>, 将 20 个 HMX 基和 TATB 基圆柱体在强约束条件下被加热至热爆炸, 加热速率从  $2^\circ\text{C}/\text{min}$  到  $3.3^\circ\text{C}/\text{h}$  不等, 其中 14 个炸药药柱为中空, 内部用加热体紧贴金属线贯穿药柱以产生均匀温度。使用热电偶测量温度并确定近似的起始反应区, 使用内置金属探针、X 射线仪、超压传感器和破片采集装置评价反应的剧烈性, 同时起爆相同的炸药柱来对比反应程度。

LLNL 使用另外 4 个实验来获取预测热爆炸反应剧烈程度所需参数, 其中两个实验用于获得高能炸药的高压燃烧速率。第一个试验是使用混合点火器点燃试样, 当内压上升时, 使用探针测试试样燃速

表 2 描述压装炸药冲击点火和爆轰过程模型对比

Tab. 2 Model comparison of shock ignition and detonation of the pressed explosives

	第一项	第二项	第三项
冲击 点火 过程	描述了当初始冲击波或压缩波接触未反应炸药分子时, 热点的形成机制, 通常冲击压缩时固体炸药的破碎加热近似等于初始空穴体积	描述了在爆燃过程中绝热热点相对缓慢的内部和外部增长过程	表明热点在高温高压作用下反应快速完成, 即快速转变为爆轰
爆轰 过程	当炸药被压缩到反应状态时, 部分炸药小于或近似等于空穴体积	模拟固体炸药快速分解形成稳定的反应气相产物( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}$ 等)	描述达到 C-J 平衡时, 在约束条件下低速扩散形成固体 C(无定形、钻石、石墨)



的变化,该探针可测量压力接近 1 GPa 时的燃速。为了获得 DDT 和 SDT 过程中更高压力下的燃速,第二个试验是通过激光脉冲点火装置激发,使用条纹相机测量亚音速的燃速增长。试验发现:高能敏感炸药的燃速如 PETN 在一定压力下从几十米/秒向几千米/秒转变;而 HMX 在近似爆轰压力下,燃速由几十米/秒增长到几百米/秒;而 TATB 炸药在爆轰压力下的燃速增长低于 20 m/s。这些高压燃速数据可直接用于 DYNABURN 和复杂的热点生成模型。另外两个试验主要用于测量热爆炸试验的反应程度。其中多尺度热爆炸试验 STEX<sup>[41]</sup> 规定将直径为 2.54、5.08、10.16 cm 的高能炸药药柱限定在不同厚度和强度的钢管中,缓慢加热这些药柱(通常为 1℃/h)以确保发生热爆炸时炸药内部温度均匀,同时使用热电偶、应变计和测速装置分别测量温度、应变和约束体的速度。试验发现:HMX 基炸药在 STEX 试验中形成了相对不剧烈的燃烧反应,反应后钢壳速度远低于炸药完全爆轰时的加速速度且钢制破片可回收。尽管 STEX 试验周期长,但利用实验数据结合整体热反应模型可准确预测不同炸药的热爆炸时间。

国外采用 STEX 试验研究了不同炸药的热爆炸性能及其剧烈程度<sup>[41-42]</sup>,在爆炸剧烈性测试方面通过控制初始和边界条件得到了大量有效数据,这些数据能验证数值模型的有效性。国外针对 HMX 基炸药 PBX 9501 以及 TATB 基炸药 LX-17 开展了大量试验研究。试验研究发现:PBX 9501 炸药热爆炸反应最剧烈,且外部约束在爆炸开始后大约 120 μs 时加速至最大速度,而 LX-17 炸药形成了不剧烈的热爆炸,试验后发现大量残余 TATB 未反应。

通过撞击作用使临近炸药或裸装药柱发生 XDT 和 SDT 的意外情况被称作殉爆,这与炸药发生热爆炸时的破片加速能量有关。为了研究不同炸药在这种撞击作用下的响应,国外还使用 Jerry 试验量化表征炸药的药柱热爆炸时产生的破片动量。该试验将强约束下的主装药快速加热至热爆炸(1~2 h),同时使用热电偶测量爆炸温度和位置,使用外部探针测量约束体速度。为保证钢体碰撞前达到最大速度,试验对含嵌入式压力计的受体炸药与壳体的相对位置给予明确规定。

在上述试验基础上,国外发展了多个数学模型<sup>[45-54]</sup>以准确预测含能材料的热爆炸性能。早期的数学模型来自慢速烤燃试验,Chidester 计算了 TATB 和 HMX 基炸药在热刺激(加热或激光束)下的爆炸时间。目前新模型对 RDX 及 HMX 基炸药的

预测结果与 STEX 试验结果相符。近年来发展用于模拟小尺度试验的热化学程序 TOPAZ, Tarver 改进了 HMX 基 PBX 炸药的热分解模型并使用该程序预测了炸药的点火时间,目前该模型对 RDX 及 HMX 基炸药的热爆炸反应程度的预测结果与 STEX 试验结果相符。为了提高热爆炸的预测精度,需要了解主导各种可能分解路径基元反应的详细化学动力学数据,Smilowitz 等<sup>[55-56]</sup>采用激光技术、质子相机研究 PBX 9501 炸药发生热爆炸前的质子转移、密度等物理量的变化,为下一代模型的发展提供了试验数据。

目前热爆炸模拟参数如活化能、指前因子等均为宏观条件值而非反应炸药的本质参数,这限制了模型的应用范围。未来针对不同炸药,需要了解主导各种可能分解路径基元反应的详细化学动力学数据,然后改进现有的完全反应模型,发展更复杂的化学动力学模型以准确预测炸药的反应程度。

#### 4 弱冲击压缩

当撞击和热爆炸压力更高时,弹性和塑性波将合并形成弱冲击波。对于均质炸药如液体无气泡和完整的固体炸药,这些冲击压缩对炸药分子的加热较弱,因此很少发生化学反应。对于非均质固体炸药,所有空洞在压力范围内被非均匀压缩,并可能在不发生热点增长时局部反应。

国外以完全反应模型为基础的仿真计算得到了 HMX 和 TATB 维持反应所需的临界热点温度,计算结果显示全密度材料无法被冲击波甚至是爆轰波点火,这一现象叫做“压死”或“冲击密度化”。在多数冲击增强密度研究中,Campbell<sup>[57]</sup>认为弱冲击波(1.0~2.4 GPa)能够使 PBX 9404 和 B-3 炸药中空穴坍塌,形成相对均匀、但无法爆轰的材料。Traver 等人在反射冲击试验中观察了 TATB 基炸药 LX-17 的冲击增强密度现象,同时使用点火和增长模型进行了计算,计算中假设炸药在一定范围内压缩不反应 $[h < (\rho/\rho_0 - 1) < a]$ ,但该计算模型未将炸药在冲击增强密度时的爆轰失效时间考虑在内。

#### 5 均质炸药的冲击点火和爆轰

均质炸药包含气体、无气泡或含悬浮固体的液体、完整的固体炸药晶体。由于没有气泡、黏结剂和固体炸药颗粒,它们在低速撞击时因无法形成热点而难以点火,但它们和其它炸药一样能发生热爆炸。均质炸药中最危险的情况是冲击点火爆轰,即平面冲击波均匀压缩并加热炸药分子,当冲击温度足够高、持续时间足够长时,在装药尾部发生热爆炸。爆炸产生爆轰波,且爆轰波以高于稳态 C-J 爆速的速

度传播,即强爆轰。当强爆轰波变为初始爆轰波时,其速度逐渐降至 C-J 值。由于药柱发生整体爆轰,整个点火反应非常剧烈且发生爆轰后几乎无法回收壳体。

近年来,国外大量研究了单晶炸药的冲击点火特性,提出基于位错作用的点火机制,即位错堆积和位错滑移形成热点,或导致分子缠结构型转变的剪切空间位阻机制<sup>[58-61]</sup>。学者 Armstrong、Coffey 和 Meyers 解释了在金属剪切带上观察到的局部剪切热,并推测晶体分子剪切带上的剪切热是含能材料点火的主要原因。这一推论通过平板撞击试验和粉体落锤试验确定,平板试验表明单晶的爆轰点火的发生在 Hugoniot 弹性极限(简称 HEL)以上,而粉体落锤试验表明含能材料的爆轰发生在塑性屈服后。这些试验在一定程度上区分了因空穴坍塌导致气体的绝热压缩机制和颗粒间摩擦导致的位错机制。剪切空间位阻机制<sup>[62]</sup>认为均质炸药的点火与各晶体的 HEL 有关。平板撞击试验结果显示:空间位阻模型适用于 PETN 和 HMX 晶体,但对 RDX 晶体不适用。

## 6 非均质炸药的冲击点火和爆轰

目前已知非均质固体炸药(压装和注药密度接近理论最大密度)的冲击点火受热点控制<sup>[62]</sup>。对于强冲击波,固体炸药的弹塑性响应已不再重要(1~2GPa 或更高),初始冲击前部快速压缩空洞形成加热区。上文提及几种可能的热点形成机制中,空洞的快速坍塌和未反应炸药的射流是最可能的主机制,而完美晶体和无空洞的固体炸药很难发生冲击点火。Craig 计算了不同直径的 HMX 和 TATB 热点大小和临界球形热点温度。一旦发生点火反应,反应热点或增长进入临近固体炸药颗粒,或因热分散造成热损失而无法增长。这一增长过程可能持续几毫秒并发生在前导冲击波之后,反应区压力和温度迅速增长并形成压力波。在高压和高温作用下,压力波赶上初始冲击波并迅速形成冲击转爆轰。

当初始冲击波强度增加时,初始冲击波转爆轰的距离降低。因此,在非均质固体炸药中,冲击反应的剧烈性取决于冲击强度和脉冲持续时间。若冲击压力很低且持续时间足够长,冲击形成的反应流动可能无法在有限距离内形成爆轰,但反应将产生大量热量和高压气体。如果冲击压力很低且持续时间很短,冲击可能导致炸药发生反应,但无法增长为爆轰且反应程度低。当冲击压力很高时,完全爆轰反应将迅速形成。

国外研究发现均质气体和液体炸药的三维爆轰

波结构非常规则<sup>[63-64]</sup>,而非均质炸药由于存在大量空洞和黏结剂,非均质炸药的爆轰区前端结构变得非常复杂和不规则,为了更好地理解和认识非均质炸药爆轰过程,未来需要更高速度的采样技术来研究其爆轰波结构。在理论研究方面,目前已发展的非平衡 ZND(NEZND)爆轰理论适用于量化所有的非平衡过程以及放热化学反应后的三维波结构,该结构包含压缩爆轰波的反应区。而这些非平衡的物理和化学机制仍需要通过实验证明,并通过建立更高级的多维反应流动模型实现准确预估。

## 7 未来的研究方向

国外针对炸药分子与撞击、热和冲击的相互作用开展了大量研究。为了理解炸药的非冲击点火机制,空穴坍塌、摩擦、剪切、断层堆积、应变率作用机制仍有待实验验证。如果主要的热点形成机制能通过试验证明和模拟,这将为新工艺和新材料(炸药、黏结剂、添加剂)的安全应用提供重要的设计指导。

在热爆炸方面,未来需要深入研究主导多种分解路径基元反应的详细化学动力学数据,然后改进现有的完全反应模型,发展更复杂的化学动力学模型以提高炸药热爆炸反应时间和反应程度的预测精度。

由于化学反应速率由分子区的局部温度控制,在撞击点火和冲击点火方面最重要的研究领域是在撞击和冲击试验中测定炸药的局部温度。为了提高冲击波与炸药分子间相互作用预测精度,需要通过这些数据来修正状态方程、反应速率方程等。

## 参 考 文 献

- [1] Dienes J K. A unified theory of flow, hot spots, and fragmentation, with an application to explosive sensitivity [M]//High Pressure Shock Compression of Solids II. New York: Springer, 1996:366-398.
- [2] Dienes J K. Frictional hot spots and propellant sensitivity [C]//Proceedings of Materials Research Society Symposium. 1984: 373-383.
- [3] Dienes J K, Kershner J D. Multiple-shock initiation via statistical crack mechanics [C]//Proceedings of the 11th Detonation Symposium. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 717-724.
- [4] Dienes J K, Middleditch J, Kershner J D, et al. Progress in statistical crack mechanics: an approach to initiation [C]//Proceedings of the 12th International Detonation Symposium. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 793-799.
- [5] Browning R V. Microstructural model of mechanical initiation of energetic materials [J]. AIP Conference Proceedings, 1996, 370:405-408.

- [6] Field J E. Hot spot ignition mechanisms for explosives [J]. *Accounts of Chemical Research*, 1992, 25 (11): 489-496.
- [7] Field J E, Bourne N K, Palmer S J P. Hot-spot ignition mechanisms for explosives and propellants [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 1992, 339: 269-283.
- [8] Bowden F P, Yoffe A D. Ignition and growth of explosion in liquids and solids [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1952.
- [9] Armstrong R W, Elban W L. Materials science and technology aspects of energetic (explosive) materials [J]. *Materials Science and Technology*, 2006, 22 (4): 381-395.
- [10] Armstrong R W. Dislocation-assisted initiation of energetic materials [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2005, 2(3): 21-37.
- [11] Vandersall K S, Chidester S K, Forbes J W, et al. Experimental and modeling studies of crush, puncture, and perforation scenarios in the Steven impact test [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 131-139.
- [12] Scammon R J, Browning R V, Middleditch J, et al. Low amplitude insult project: structural analysis and prediction of low order reaction [C]//*Proceedings of the 11th International Detonation Symposium*. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 111-118.
- [13] Dey T N, Kamm J R. Numerical modeling of shear band formation in PBX-9501 [C]//*Proceedings of the 11th International Detonation Symposium*. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 725-743.
- [14] Czerski H, Perry W L, Dickson P M. Solid state phase change in HMX during dropweight impact [C]//*Proceedings of the 13th International Detonation Symposium*. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006: 681-688.
- [15] Frey R B. The initiation of explosive charges by rapid shear [C]//*Proceedings of the 7th International Detonation Symposium*. Annapolis, MA: Office of Naval Research, 1981: 36-42.
- [16] Nichols A L, Tarver C M. A statistical hot spot reactive flow model for shock initiation and detonation of solid high explosives [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 489-498.
- [17] Idar D J, Straight J W, Osborn M A, et al. Low amplitude impact of damaged PBX 9501 [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1999, 505: 655-658.
- [18] Idar D J, Lucht R A, Straight J W, et al. Low amplitude insult project: PBX 9501 high explosive violent reaction experiments [C]//*Proceedings of the 11th International Detonation Symposium*. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 101-110.
- [19] Chidester S K, Tarver C M, Depiero A H, et al. Single and multiple impact ignition of new and aged high explosives in the Steven impact test [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1999, 505: 663-666.
- [20] Chidester S K, Traver C M, Garza R. Low amplitude impact testing and analysis of pristine and aged solid high explosives [C]//*Proceedings of the 11th International Detonation Symposium*. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 93-100.
- [21] Field J E, Parry M A, Palmer S J P, et al. Deformation and explosive properties of HMX powders and polymer bonded explosives [C]//*Morat W J. Proceedings of the 9th International Symposium*. Portland, OR: Office of Naval Research, 1989: 886-896.
- [22] Chidester S K, Green L G, Lee C G. A frictional work predictive method for the initiation of solid high explosives from low pressure impacts [C]//*Proceedings of the 10th International Detonation Symposium*. Boston, MA: Office of Naval Research, 1993: 785-792.
- [23] Wortley S, Jones A, Cartwright M, et al. Low speed impact of pristine and aged solid high explosive [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 399-408.
- [24] Browning R V, Scammon R J. Influence of mechanical properties on non-shock ignition [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 149-158.
- [25] Partom Y. A threshold criterion for impact ignition [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 831-835.
- [26] Hunt E M, Malcolm S, Pantoya M L, et al. Impact ignition of nano and micron composite energetic materials [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(6): 842-846.
- [27] Chowdhury S. Probing the ignition mechanism of aluminum nanothermites [D]. Maryland: University of Maryland, 2012: 58-60.
- [28] Mader C L, Forest C A. Two dimensional homogeneous and heterogeneous wave propagation [C]//*Edwards D J. Proceedings of the 6th International Detonation Symposium*. Coronado, CA: Office of Naval Research, 1976: 405-413.



- [29] Johnson J N, Tang P K, Forest C A. Shock wave initiation of heterogeneous reactive solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1985, 57(9): 4323-4334.
- [30] Starkenberg J. Modeling detonation propagation and failure using explosive initiation models in a conventional hydrocode [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 1001-1007.
- [31] Lee E L, Tarver C M. Phenomenological model of shock initiation in heterogeneous explosives [J]. *Physics of Fluids*, 1980, 23(12): 2362-2372.
- [32] Tarver C M. Ignition and growth modeling of LX-17 hockey puck experiments [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2005, 30(2): 109-117.
- [33] Souers P C, Garza R, Vitello P. Ignition and growth and JWL++ detonation models in coarse zones [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, 27(2): 62-71.
- [34] Souers P C, Andreski H G, Cook III C F, et al. LX-17 corner-turning [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2004, 29(6): 359-367.
- [35] Souers P C, Andreski H G, Betteux J, et al. Dead zones in LX-17 and PBX 9502 [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2006, 31(2): 89-97.
- [36] Whitworth N J, Maw J R. Modelling shock desensitization of heterogeneous explosives [J]. *AIP Conference Proceedings*, 1996, 370: 425-428.
- [37] Garcia F, Vandersall K S, Tarver C M. Shock initiation experiments with ignition and growth modeling on low density HMX [C]//*18th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter Held in Conjunction with the 24th Biennial International Conference of the International Association for the Advancement of High Pressure Science and Technology (AIRAPT)*. Washington: American Physical Society, 2013.
- [38] Tarver C, Chidester S. Ignition and growth modeling of short pulse duration shock initiation experiments on HNS IV [C]//*18th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter Held in Conjunction with the 24th Biennial International Conference of the International Association for the Advancement of High Pressure Science and Technology (AIRAPT)*. Washington: American Physical Society, 2013.
- [39] May C, Tarver C. Short shock pulse duration experiments plus ignition and growth modeling on composition B [C]//*18th Biennial International Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Matter Held in Conjunction with the 24th Biennial International Conference of the International Association for the Advancement of High Pressure Science and Technology (AIRAPT)*. Washington: American Physical Society, 2013.
- [40] Wardell J F, Maienschein J L. The scaled thermal explosion experiment [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 384-393.
- [41] Forbes J W, Garcia F, Tarver C M, et al. Pressure wave measurements during thermal explosion of HMX-based high explosives [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 837-845.
- [42] Maienschein J L, DeHaven M R, Sykora G B, et al. Thermal explosion violence for several explosives-measurements and interpretations [C]//*Proceedings of the 13th International Detonation Symposium*. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006: 536-545.
- [43] Maienschein J L, Chandler J B. Burn rates of pristine and degraded explosives at elevated pressures and temperatures [C]//*Proceedings of the 11th International Detonation Symposium*. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 872-882.
- [44] Chidester S K, Tarver C M, Green L G, et al. On the violence of thermal explosion in solid explosives [J]. *Combustion and Flame*, 1997, 110(1-2): 264-280.
- [45] Yoh J J, McClelland M A. Simulating the thermal response of high explosives on time scales of days to microseconds [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 706: 425-428.
- [46] Tarver C M, Tran T D. Thermal decomposition models for HMX-based plastic bonded explosives [J]. *Combustion and Flame*, 2004, 137(1-2): 50-62.
- [47] Nichols III A L, Anderson A, Neely R, et al. A model for high explosives cookoff [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 94-102.
- [48] Tarver C M. Chemical kinetic modeling of HMX and TATB laser ignition tests [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2004, 22(2): 93-107.
- [49] Nichols III A L, Couch R, McCallen R C, et al. Modeling thermally driven energetic response of high explosives [C]//*Proceedings of the 11th International Detonation Symposium*. Snowmass, CO: Office of Naval Research, 1998: 862-871.
- [50] Yoh J J, McClelland M A, Maienschein J L, et al. Simulating thermal explosion of octahydrotrinitrotriazine (HMX)-based explosives: model comparison

- with experiment[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100(7):073515.
- [51] Maienschein J L, Wardell J F, DeHaven M R, et al. Deflagration of HMX-based explosives at high temperatures and pressures[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2004, 29(5):287-295.
- [52] Maienschein J L, Wardell J F, Weese R K, et al. Understanding and predicting the thermal explosion violence of HMX-based and RDX-based explosives-experimental measurements of material properties and reaction violence [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002:846-855.
- [53] Henson B F, Smilowitz L B, Asay B W, et al. An ignition law for PBX 9501 from thermal explosion to detonation [C]//*Proceedings of the 13th International Detonation Symposium*. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006:778-785.
- [54] Nichols III A L. A model for thermal cook-off and detonation of high explosives [C]//*Proceedings of the 13th International Detonation Symposium*. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006:1151-1160.
- [55] Smilowitz L, Henson B F, Romero J J, et al. The evolution of solid density within a thermal explosion. I. Proton radiography of pre-ignition expansion, material motion, and chemical decomposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(10):103515.
- [56] Smilowitz L, Henson B F, Romero J J, et al. The evolution of solid density within a thermal explosion II. Dynamic proton radiography of cracking and solid consumption by burning [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(10):103516.
- [57] Campbell A W, Travis J R. The shock desensitization of PBX 9404 and Composition B-3 [C]//*Proceedings of the 8th International Detonation Symposium*. Albuquerque, NM: Office of Naval Research, 1985: 1057-1068.
- [58] Meyers M A. A mechanism for dislocation generation in shock-wave deformation [J]. *Scripta Metallurgica*, 1978, 12(1): 21-26.
- [59] Dick J J. Anomalous shock initiation of detonation in pentaerythritol tetranitrate crystals [J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 81(2): 601-612.
- [60] Dick J J. Shock-wave behavior in explosive monocrystals [J]. *Journal de Physique IV*, 1995, 5:103-106.
- [61] Dreger Z A, Gruzdkov Y A, Gupta Y M, et al. Shock wave induced decomposition chemistry of pentaerythritol tetranitrate single crystals: time-resolved emission spectroscopy [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2002, 106(2): 247-256.
- [62] Hooks D E, Ramos K J. Initiation mechanisms in single crystal explosives: dislocations, elastic limits, and initiation thresholds [C]//*Proceedings of the 13th International Detonation Symposium*. Norfolk, VA: Office of Naval Research, 2006: 455-464.
- [63] Fedorov A V, Zotov E V, Krasovsky A V, et al. Detonation front in homogenous and heterogeneous high explosives [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, 505: 801-804.
- [64] Fedorov A V. Detonation wave structure in liquid homogeneous, solid heterogeneous and agatized HE [C]//*Proceedings of the 12th International Detonation Symposium*. San Diego, CA: Office of Naval Research, 2002: 229-233.

## Research Progress on the Mechanism of the Ignition for the High Explosives

TIAN Xuan, FENG Xiaojun, FENG Xuesong, XU Hongtao, FENG Bo, WANG Xiaofeng

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Ignition reactions of high explosives can be caused by three general energy transfer processes: impact ignition by frictional or shear heating, thermal heating and shock compression. The degree of violence of reaction varies from benign slow combustion to detonation of entire charge, that depends on many variables, including the rate of energy delivery, the physical and chemical properties of the explosive, and the strength of the confinement surrounding the explosive charge. This article focuses on foreign research progress of homogeneous and non-homogeneous explosives in recent years in terms of impact ignition, thermal explosion, weak shock compression and strong shock compression. Meanwhile, the latest achievements on experimental and mathematical modeling regarding the ignition mechanism of explosives under the impact, thermal and shock stimulus are introduced.

[KEY WORDS] high explosive; ignition mechanism; non-shock ignition; the ignition and reactive growth model; thermal explosion