

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.07.00X

文章编号: 1006-9941(2016)07-0622-03



炸药事故反应烈度转化的主控机制

炸药安全性研究,一方面,是基于炸药生产过程和弹药勤务操作安全需求,关注各类意外刺激条件下引发持续反应点火的下限门槛条件;另一方面,是针对事故最大风险预测及对事故反应烈度增长敏感因素认知、源头控制需求,关注炸药中因摩擦、局域变形温升或火烧引发的低烈度燃烧等级反应点火起始后,受哪些因素主导,经由何种机制和过程,可能转化为高烈度等级反应(High Explosive Violent Reaction, HEVR)乃至爆轰。对事故点火及烈度演化过程物理机制的解读,应重点将事故演化过程中如下因素和环节纳入关注范围:

其一,炸药力学性能及事故载荷作用早期炸药的变形、断裂。固相含量较高的炸药,尤其是压装高聚物粘结炸药(Polymer Bonded Explosive, PBX)的脆性特征突出,应变水平 $<1\%$ 时就可能发生断裂。无论针对材料性能测试的准静态抗压、抗拉强度试验,动态霍普金森杆、泰勒柱试验,还是针对炸药安全性的落锤试验、滑道试验、Susan 试验、Steven 试验,以及烤燃(Cook-off)、燃烧转爆轰(Deflagration to Detonation Transition, DDT)实验,忽略伴随试验加载和事故刺激过程中应力集中、应力波传播瞬间发生的非均匀变形和损伤、断裂,把炸药当作延性连续介质,且假定事故化学反应随加载应力波在炸药基体中传播的模型概念和数值模拟,注定会遗漏对诱发点火反应和烈度增长主导机制的捕捉(图1)(傅华,李克武,李涛,等.私人通讯)。外部作用能量的空间非均匀性沉积、断裂,可使得在加载应力幅度远低于典型冲击起爆下限阈值(数万大气压)条件下形成新表面、局域燃烧点火,并诱发后续高烈度反应。例如,Susan 试验中因试件变形、破碎在数十米每秒、数十兆帕就剧烈反应的炸药,若保护设计得当,在高速侵彻实验中就能够承受高达数百米每秒、数百兆

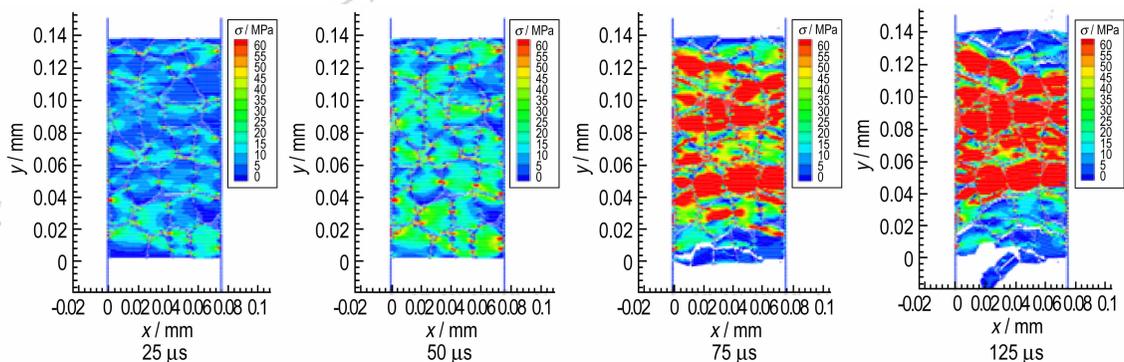


图1 压装PBX在Hopkinson杆实验加载过程中的低应变损伤、断裂非均匀状态演化模拟计算图像

帕的严酷过载条件而保持安定。因此,对炸药事故安全性机理的解读,必须基于对炸药力学行为的正确认知。

其二,炸药燃烧速率特性。若炸药的层流燃烧速率对压力不敏感,则缝隙中炸药表面燃烧引发的压力增长(Crack Pressurization)倾向将不典型,炸药断裂、炸药-壳体间隙中传热燃烧(Conductive Burning)向对流燃烧(Convective Burning)的转化难以形成,通向炸药 HEVR 的基本通道就被阻断。钝感高能炸药(Insensitive High Explosive, IHE),如 TATB 基 PBX 的燃速对炸药配方中粘结剂种类和比例不敏感,其即便被密封在金属壳体中燃烧,到数千大气压下层流燃烧速度仅增加数十倍,达到数毫米每秒的水平,对应的缝隙燃烧也观测不到对流燃烧表现。对于非 IHE 类炸药如奥克托今(HMX)基的 PBX,炸药基体层流燃烧速度在 0.1 MPa 的大气压环境下通常为数毫米每秒,在压力上升到 1.01×10^3 MPa 水平时会提升达数千倍,达到数十米每秒! 粘结剂性能、配比和包覆工艺,孔隙率及温升、相变,都会明显影响炸药燃速(Glascoe E A. *A comparison of deflagration rates at elevated pressures and temperatures with thermal explosions. Shock Compression of Condensed Matter, American Physical Society, 2011*),这也正是配方安全性设计调控的空间。炸药燃速-压力特性是弹药安全性的关键内因,其反映了反应烈度经对流燃烧机制提升的潜在倾向,壳体和炸药基体约束(在燃烧速率足够高时,因惯性力效应,基体自身同样能发挥边界作用)仅是辅助外因。

其三,燃烧产物驱动炸药基体中裂纹的自持传播。若燃烧速率对压力敏感,燃烧阵面一旦进入炸药断裂或炸药-壳体间隙,就会迅速形成对流燃烧,其在宽度约 100 μm 间隙中的典型演化过程是:点火初期以约 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 传播的表观燃烧阵面速度,会因间隙内气体拥塞、压力急剧增长而瞬间跃升到 $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上(Asay B W. *Shock Wave Science and Technology Reference Library Vol. 5, Non-shock Initiation of Explosives. Springer, 2010, ISBN 978-3-540-87952-7*)。其直接后果是间隙中仅数十兆帕的气压,就足以驱动炸药基体中裂纹高速扩展,自持传播、分叉扩展(图 2),燃烧比表面积剧增,使炸药整体反应烈度瞬时飙升! 这种气体动力学机制主控的间隙表面燃烧传播(区别于基体层流燃烧)与断裂行为的耦合所引发的烈度增长的进一步发展,取决于其能否在炸药基体中快速形成万大气压以上压力波及对应的炸药基体内反应,进而演化成爆轰波。否则,极少量炸药在表面燃烧的产物压力,可能使壳体破裂解体,表面反应燃速将因气压陡降而减慢甚至终止,形成碰撞实验及烤燃实验中常见的部分炸药反应爆燃后的块状炸药残留,而其内部并未发生反应。

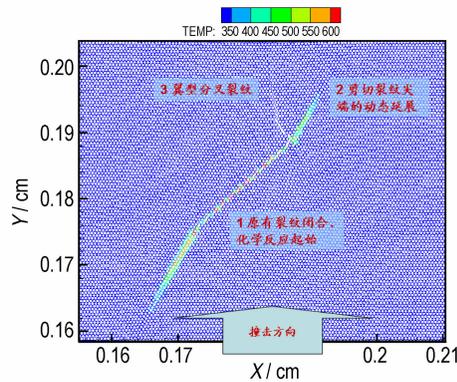


图2 撞击条件下炸药裂隙中点火形成和燃烧产物气体引发炸药基体中裂纹自持传播的数值模拟图像

(王文强,于继东,尚海林,等. 撞击条件下炸药热点形成和燃烧的数值模拟研究. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室基金总结报告,2012)

就目前的研究认识,要通过精密物理建模和数值模拟,量化预测炸药的安全性行为还远不现实(Asay B W. *Shock Wave Science and Technology Reference Library Vol. 5, Non-shock Initiation of Explosives*. Springer, 2010, ISBN 978-3-540-87952-7),但对事故反应烈度主导性影响因素和过程机理的认识,有助于我们正确解读各类纷繁复杂的炸药安全性行为表现。建立相应的实验方法量化测量炸药力学、燃速参数,表征主控炸药事故烈度升级的对流燃烧行为特征,能帮助我们直接从炸药内在属性出发,更有依据地判断不同配方或贮存期限的炸药及其装药系统的相对事故风险,为从配方选择源头控制、间接评估库存性能变化对安全性影响提供有价值的参照信息。

胡海波^{1,2}, 郭应文¹, 傅华¹, 李涛¹, 尚海林¹, 李金河¹, 文尚刚², 喻虹³

1. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 四川 绵阳 621999

2. 中国工程物理研究院化工材料研究所安全弹药中心, 四川 绵阳 621999

3. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100086

e-mail: huhaiibo@caep.cn

中国工程物理研究院科学技术发展基金(2014A0201008)

国家自然科学基金(11272294、11272296)

国防科技重点实验室基金(9140C670402150C6291)

领域规划项目(LYGH201402)