高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS
DOI：10.11858/gywlxb.20251181

DNAN 基含预制裂纹炸药装药点火后反应演化特性*

姚 昕，王 辉，沈 飞，屈可朋
（西安近代化学研究所，陕西 西安 710065）

摘要：为探究裂纹及其间隙对 2,4-二硝基苯甲醚（DNAN）基含铝炸药机械热点形成后反应传播特性的影响规律，制备了含不同初始裂纹的炸药药柱，采用基于发射药燃烧加载方式的炸药点火试验装置，模拟了炸药的反应传播过程，获取了加载过程和炸药反应过程的压力变化曲线以及试验后的炸药形貌特征，结合数值仿真，分析了不同预制裂纹的炸药药柱在相同药量发射药燃烧加载下的应力场分布特征。结果表明：无裂纹或无间隙“一”字裂纹工况下，药柱残骸完整，加载压力峰后迅速下降，未发生反应，热点区域位于底部；含 1 mm 间隙裂纹工况下，药柱发生断裂并出现局部低速反应，压力衰减过程缓慢。其中“一”字裂纹的热点区域转移至侧表面，而“十”字裂纹形成侧表面与底部的双重热点区域，反应程度进一步提升。这表明预制裂纹通过改变应力分布和扩展热点区域，进而显著影响炸药的反应进程。

关键词：DNAN 基含铝炸药；预制裂纹；发射药；反应传播；响应特性
中图分类号：TJ55；O38； O521.9　　文献标志码：A

高速侵彻战斗部是有效毁伤坚固、深层防护目标的重要手段，其在侵彻过程中，需承受剧烈的冲击载荷，该载荷会迅速传递至内部装药，极易诱发装药提前反应，导致战斗部失效。因此，高速侵彻条件下装药的安定性问题长期以来受到国内外研究人员的广泛关注[1-4]。

高速侵彻条件下复杂的动态载荷环境常导致装药内部产生裂纹[5-7]。高金霞等[8]通过单/多层靶板侵彻试验发现，回收装药样品出现明显的装药前冲及尾部碎裂；张萌昭等[9]在多层靶板侵彻试验中亦观察到装药尾部存在深度裂纹。装药内裂纹的存在不仅易引发应力集中，显著提高局部热点形成概率，而且一旦生成热点，其释放的高温高压气体产物将进一步作用于邻近含裂纹区域，促进反应区域扩展并加剧反应烈度。因此，热点形成后反应的传播与发展过程，对战斗部整体装药的反应程度具有很大的影响。

尽管装药热点的形成与反应传播两个阶段在物理机制上存在显著差异，但在实际研究中往往难以有效解耦，多数工作仍集中于对整体反应行为的分析。近年来，这方面的相关研究不断深入，刘睿等[10]探讨了初始微裂纹尺寸与分布对 PBX 炸药冲击点火的影响，发现微裂纹尺寸增大可显著降低点火压力阈值；孙宝平等[11]采用“先冲击损伤、后破片撞击”的加载方式，测定了 JO-8 炸药在损伤状态下点火的临界撞击速度；王一鸣等[12]基于 VISCO-SCRAM 模型研究了 HMX 基 PBX 在损伤累积下的点火行为，揭示了在卵形弹丸二次冲击下，初始撞击速度提升会导致二次冲击时点火临界速度呈非线性下降趋势。尚海林等[13]采用黑火药引燃炸药的实验，并结合气动壅塞理论，研究了炸药预置裂缝中的燃烧演化规律，发现在强约束条件下，裂缝内的对流燃烧产生的压力超过 200 MPa，燃烧传播速度达 600 m/s 以上，且随着裂缝宽度增加，燃烧峰值压力逐渐降低，而火焰传播速度和波阵面速度均呈上升趋势。上述研究虽从不同角度揭示了损伤或缺陷结构对炸药装药反应特性的影响规律，但针对在邻近炸药反应下裂纹构型如何影响热点区域及反应传播路径方面的研究仍显不足。

为模拟装药点火后反应产物对邻近装药的作用过程，本文采用发射药燃烧加载方式，模拟热点区域产生的高温高压气体产物；同时，为降低装药中随机裂纹带来的复杂性，选用安全性高、工艺性好的 2,4-二硝基苯甲醚（DNAN）基含铝炸药，制备具有规则轴向裂纹（“一”字型、“十”字型）的圆柱形药柱。通过对比相同加载条件下药柱残骸形貌与气体压力演化特征，结合守恒元/解元法（Conservation Element and Solution Element, CE/SE）与浸入式边界法（Immersed Boundary Method, IBM）构建的流固耦合数值模型，系统分析了药柱内部应力分布演化规律。本研究旨在揭示裂纹构型及其缝隙对装药反应传播行为的影响机制，为抗高过

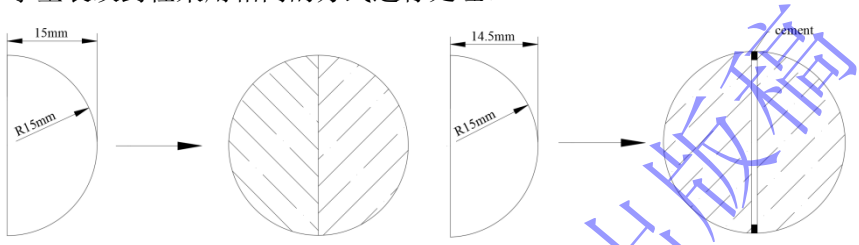
*收稿日期：2025-09-01；修回日期：2025-11-25
作者简介：姚 昕（2000-），男，硕士研究生，主要从事含能材料安全性研究. E-mail：1083606428@qq.com
通信作者：沈 飞（1983-），男，博士，研究员，主要从事炸药爆轰性能及安全性研究. E-mail：shenf02@163.com

载战斗部装药的设计与安全性评估提供参考。

1 样品及试验设计

1.1 试验样品

试验所用样品为采用熔铸工艺制作的 DNAN 基含铝炸药，其组分 DNAN、HMX、Al 以及功能助剂的质量分数分别为 30%、30%、35%、5%。试验样品的密度为 1.85g/cm^3，根据预制裂纹的分布特征，利用不同模具分别制备并组装了无裂纹药柱、“一”字型裂纹药柱以及“十”字型裂纹药柱进行对比研究。其中，“一”字型裂纹药柱的制备方法如图 1 所示：依据间隙宽度设计制作了不同规格的模具，从而获得药柱的 1/2 模型。在无间隙工况下，如图 1（a）所示，将两个半圆柱形药块直接拼接组合后置于装置内部；在有间隙工况下，如图 1(b)所示，将两部分药柱的侧面紧密贴合于装置中，并在间隙两端采用惰性胶泥对样品进行固定，使间隙宽度保持在 1 mm。“十”字型裂纹药柱采用相同的方式进行处理。



(a) single-line crack(0mm)　(b) single-line crack(1mm)

图 1　“一”字裂纹药柱结构示意图

Fig.1　Diagram of thesingle-line crackexplosive column

1.2 试验布局

试验装置主体由底筒及可拆卸端盖组成，两者由高强度螺纹进行连接，材质均为 45 号钢。端盖中部设置引线孔与压力传感器安装孔。底筒内部腔体尺寸为 Φ30mm×55mm，发射药燃烧空间为 Φ30mm×25mm。具体结构如图 2 所示。试验采用叠氮硝铵球扁发射药作为加载能量源，其火药力为 1200kJ/g；所用的传感器为美国 PCB 公司生产的 M109D12 耐高温压电传感器，上升时间小于 1μs，最大量程约 690MPa。

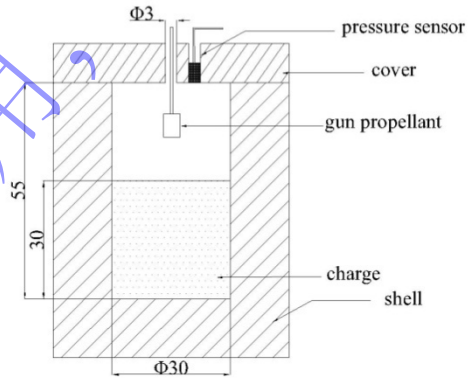


图 2 装置示意图

Fig.2　Schematic diagram of the device

1.3 试验方法

试验采用叠氮硝铵球扁发射药作为加载能量源，其火药力为 1200kJ/g。为了阻隔发射药燃烧产生的高温火焰对炸药表面的热作用，试验前，首先在炸药药柱的表面均匀涂抹真空硅脂，其厚度约为 0.2mm，并将药柱装入底筒内；将发射药和点火头一起包裹在薄棉纱内，安装在底筒内部空腔的上半区域，即 Φ30mm×25mm 空腔区域。激发点火头后，发射药的燃烧产物可对炸药药柱的上端面形成冲击作用，同时也将从引线孔逸出。通过调整初始裂纹，可改变炸药药柱的应力分布，进而获取不同初始裂纹下炸药药柱的反应特性。压力采样速率设置为 200 kS/s。将外部脉冲电流激发点火头的时刻作为压力曲线的零时刻，由于点火头的激发存在延迟，则压力曲线上升时刻约为 10ms。

1.4 药量设计

试验前还需要对发射药的药量进行预估，以便于调控试验时的载荷量值。由内弹道学的燃气状态方程[14]，药量与压力峰值的关系式为：

$$p_{\mathrm{m}}=\frac{\Delta\cdot f}{1-a\cdot\Delta} \qquad (1)$$

式中：Δ表示装填密度，即发射药的药量与燃烧空腔体积之比，g/cm^3；a 为燃气产物的余容，本研究中取值为 1，其为无量纲量；f 表示发射药的火药力，1200kJ/g；p_{m} 为腔内压力峰值，MPa。试验装置的燃烧空腔尺寸为 Φ30mm×25mm。结合文献中抗过载的点火压力阈值[9]，选取发射药量 m_{p}=2g，此时理论压力峰值为 197MPa，引线孔的存在使得实际压力峰值小于理论值。

2 结果与分析

2.1 无裂纹炸药药柱的响应特性

首先对试验过程完整药柱工况下腔内压力变化曲线进行分析，采用 2g 及 3g 发射药进行燃烧加载，如图 3 所示，两种火药加载工况下腔内压力曲线特性存在明显差异：在 m_{p}=2g 时，压力曲线在 10.7ms 左右达到峰值压力 142.25MPa 后衰减，相比之下，m_{p}=3g 下压力演化过程出现差异，初期压力上升并在约 10.7ms 处达到峰值 251.32MPa，但随后的压力下降过程中在 10.90ms 处出现明显的拐点，且拐点之后压力下降速率减缓，高速摄影仪记录到两种工况下燃烧峰后腔外火焰演化（见图 4）显示在 10.7ms 之后 m_{p}=2g 工况下火焰强度呈现持续下降态势，而 m_{p}=3g 工况下火焰强度呈现先下降后上升再下降的现象，但整体出呈现出下降趋势。

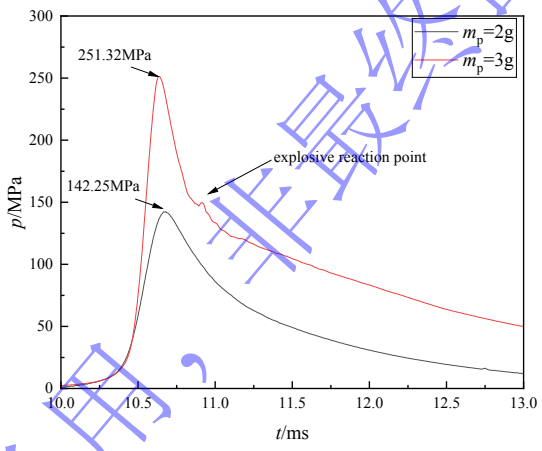
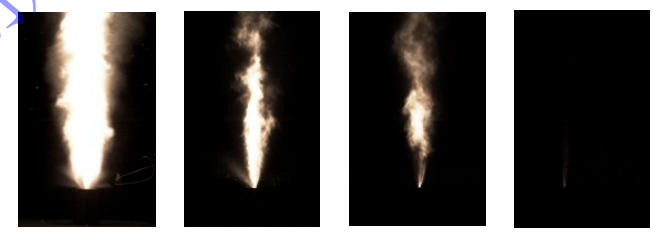


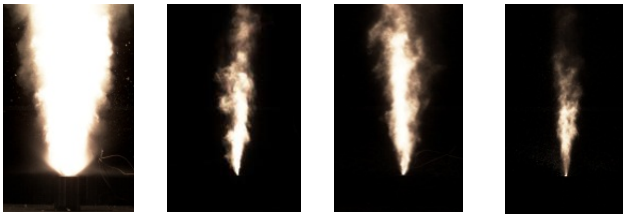
图 3 炸药无裂纹工况下发射药量对压力曲线的影响

Fig.3Influence of propellant charge mass on pressure curve ofcrack-free explosive



t=10.7ms　t=10.75ms　t=10.8ms　t=12ms

(a) m_{p}=2g



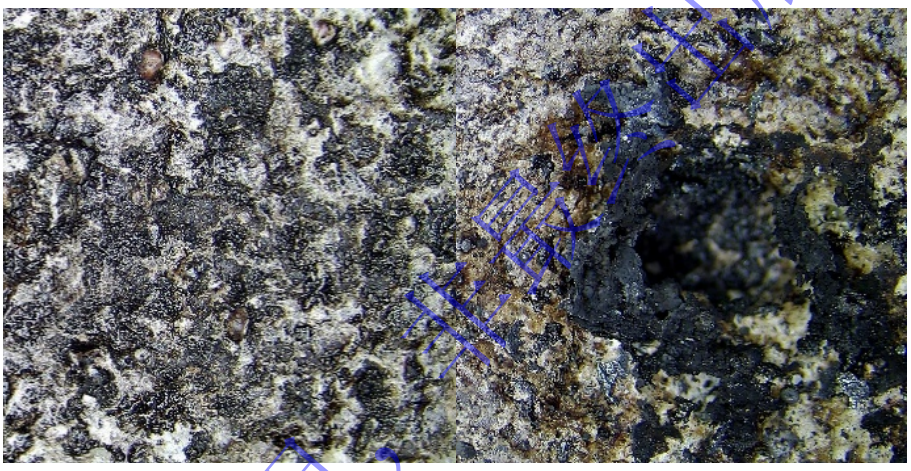
t=10.7ms　　t=10.75ms　　t=10.8ms　　t=12ms

(b) m_p=3g

图 4 引线孔外火焰演变图（10.7ms~13ms）

Fig.4　Evolution images of flame leakage from the lead wire hole(10.7ms~13ms)

从样品表面微观形貌方面进行分析，在 2g 发射药量作用下，炸药表面保持相对完整的基体结构，可观察到细密的沟壑状纹理特征，这些纹理呈现不规则分布状态。表面附着大量黑色颗粒状燃烧残留物，但未发现明显的热损伤特征，表明在此工况下炸药未达到点火阈值，仅发生表面烧蚀现象。在 3g 发射药量条件下，样品表面形貌发生显著变化，可观察到不规则的凹陷结构和孔洞特征，这些损伤区域呈现出典型的局部反应形态。损伤区域周围的基体材料相对完整，边界清晰，表明反应过程为局部低速反应，而非整体反应。从而可说明压力曲线拐点是由炸药局部低速反应所导致。



(a)m_p=2g (b)m_p=3g

图 5 无裂纹炸药药柱的残骸放大图

Fig.5Close-up view of the debris from the crack-free explosive columns

2.2 无间隙药柱工况下炸药药柱响应特性

m_p=2g 时，以完整药柱工况下压力曲线作为对比，如图 6 所示，可以发现完整药柱与无间隙“一”字裂纹药柱工况的压力变化较为相似：在 10ms~10.75ms 时段内发射药充分燃烧，压力呈现迅速上升趋势，两种工况下达到的最大压力分别为 142.25MPa 与 144.6MPa；根据半峰全宽标准测得的脉冲宽度为 0.7ms，而以 10%峰值压力为判定标准的有效脉冲持续时间为 2.6ms。峰值后的压力呈现自然下降趋势，从图中可以看到当腔内压力一致时，压力下降的速率近似相同。

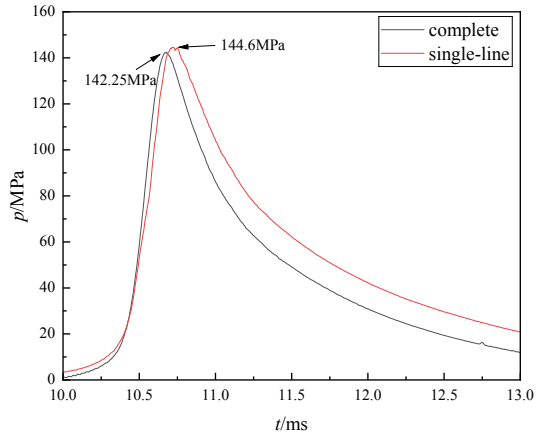
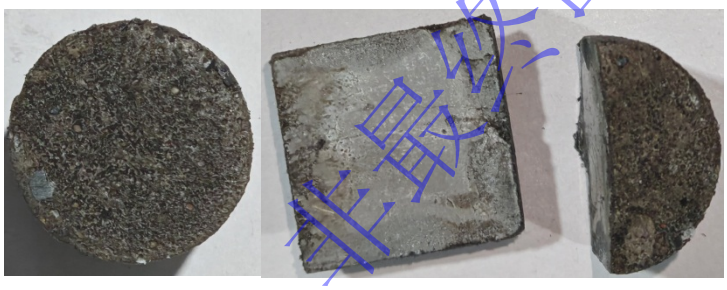


图 6 炸药含无间隙裂纹时的腔内压力曲线

Fig.6Internal pressure curve of theexplosivewith no gap

取出装置内样品残骸进行分析，如图 5 所示：发现在相同载荷作用下，两种药柱的上表面均呈现出暗棕色多孔结构，造成这一现象的原因是药柱表面涂抹的真空硅脂在发射药燃烧产物的作用下发生了熔融，且发射药燃烧的固体产物附着在上表面形成炭黑色沉积物。对图 7 进行分析，可以发现裂纹面顶部位置出现轻微的烧蚀痕迹，证明表面发射药燃烧气体产物曾短暂进入裂纹内部，但上表面硅脂的熔融阻断了这一进程。裂纹面的底部位置发生了轻微的碎裂现象，这是由于应力波在底部发生固壁反射后药柱底部形成应力集中区域。



(a)complete sample (b)single-line crack sample(0mm)

图 7 炸药未反应时的残骸图

Fig.7 Images of the unreacted explosives debris

通过将试验获得的压力曲线作为流体域发射药模型的压力条件输入，利用 LS-DYNA 软件中的 CESE 方法[15]结合 IBM 流固耦合方法[16]进行仿真，模拟发射药燃烧对药柱的力学作用。试验装置构建了三维几何模型，钢壳采用四面体网格（尺寸 0.8mm~1mm），腔内流体及发射药均采用 0.6mm 的六面体网格，炸药采用 0.8mm 的六面体网格。流场基于理想气体状态方程建模，反应物采用 JWL 状态方程描述，具体形式如式（2）所示，其中压力指数 r_1为 4.066×10^6 MPa、r_2为-1.339×10^5 MPa，Grüneisen 指数与定容比热乘积 r_3为 2.0 MPa·K^{-1}，参数 r_5为 7.2、r_6为 3.6[17]。

$$p = r_1 e^{-r_5 V} + r_2 e^{-r_6 V} + r_3 \frac{T}{V} \tag{2}$$

完整药柱与无间隙“一”字裂纹药柱的等效应力分布变化云图基本一致，以无间隙“一”字裂纹药柱等效应力云图为例，具体如图 8 所示，在 10.3ms 时刻火药燃烧压力迅速上升，药柱顶部中心位置受到冲击载荷的作用；在 10.5ms 时刻火药燃烧压力达到 52MPa，此时装药的最大等效应力为 53.1MPa。10.7ms~10.8ms 时段内药柱内部等效应力分布情况趋于稳定，10.8ms 时刻达到 236.5MPa，等效应力分布云图显示底部为应力集中区域，试验中底部首先产生碎裂现象，这与实验吻合。由于应力波的反射增强使得中部单元等效应力超过顶部单元，呈现出自底部向顶部等效应力逐渐降低的分布规律，表明完整药柱与无间隙“一”字裂纹药柱底部为主要损伤区域。压力云图如图 11 所示：10.3ms 时刻发射药加速燃烧，上表面中部首先受到气体的作用；10.5ms 时刻最高压力为 16MPa，此时底部尖端位置发生应力波反射现象；10.7ms~10.8ms 压力分布逐步趋于稳定，压力最大位置处于底部，达 75MPa。可以看到在这种工况下压力与等效应力的分布模式相似，底部压

力最高。

(a) Von Mises　　(b)pressure

图 8 无间隙“一”字裂纹药柱 10.8ms 时刻应力云图（MPa）

Fig.8Stress contour of single-line crack explosive columnwith no gap at 10.8ms(MPa)

以上试验与数值模拟结果表明，无间隙“一”字裂纹对药柱的整体响应特性影响有限，其压力-时间曲线特征参数与完整药柱基本一致，表现出良好的等效性。裂纹的存在但并未显著改变药柱的主要损伤区域和破坏模式，底部应力集中现象在两种工况下均为主导因素。

2.3 有间隙药柱工况下炸药药柱响应特性

m_p=2g 工况下，如图 9 所示，当为含裂纹药柱添加间隙时，压力曲线的特征出现明显变化。在 10ms~10.78ms 时段内发射药迅速燃烧，压力呈现上升态势，发现含间隙工况压力峰值下降 7%，这是由 1mm 的间隙带来燃烧空间的扩大造成。与完整药柱相比，压力脉冲的半峰全宽分别为约 0.7ms 和 1.1ms，表明 1mm 间隙“一”字裂纹工况下腔内压力脉冲持续时间相对较长，压力下降速率更低。在 10.78ms~11ms 时段压力降低，此阶段内炸药未发生反应；在 11ms 时刻曲线出现明显拐点并进入炸药反应阶段，反应时滞为 0.22ms。11ms 之后压力下降速率减缓，此阶段炸药发生局部低速反应，生成了气态产物，1mm 间隙“一”字裂纹工况在后续时间段内维持了相对较高的压力水平，衰减过程更为平缓。相较于完整药柱工况，由于间隙的增加使得燃烧空间扩大，相同发射药量下压力上升速率及燃烧压力峰值均有所下降。

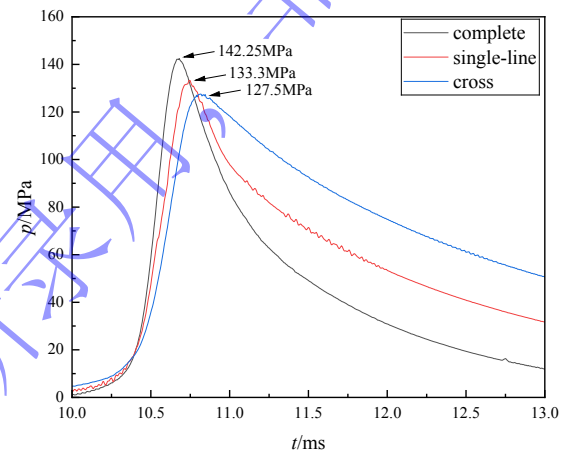


图 9 炸药含有间隙裂纹时的腔内压力曲线

Fig.9Internal pressure curve of cracked explosive with gap

对 1mm 间隙“十”字裂纹药柱的压力数据进行分析，可以看出炸药的反应程度较 1mm 间隙“一”字裂纹工况进一步上升，压力下降速率进一步下降。由于裂纹数量的增加，燃烧空间的体积进一步增大，压力峰值为 127.5MPa，相较于 1mm 间隙“一”字裂纹药柱的 133.3MPa 下降 4.3%。从压力脉冲特征来看，“十”字裂纹工况的半峰全宽为 1.7ms，长于“一”字裂纹工况的 1.1ms，表明腔内压力脉冲持续时间进一步延长。反应发生的时刻进一步提前，与压力峰值时刻相差无几。由于反应时滞的存在，判断此工况下炸药的反应压力阈值应当略低于 127.5MPa。在压力衰减阶段，“十”字裂纹工况表现出更为平缓的下降趋势，在 12ms 之后仍能维持 50~60MPa 的相对较高压力水平，明显高于“一”字裂纹工况的 30~40MPa，这主要是由于“十”字裂纹结构促使炸药反应程度更高，生成了更多的气态产物所致。

炸药发生反应后的损伤形貌如图 10 所示，相较于未反应工况，1mm“一”字裂纹药柱的顶部形貌发生了显著演化，表面颜色明显变深，孔隙深度增加，整体呈现出黑色核桃状纹理特征。发射药燃烧产物通过间隙渗透至裂纹内部，在对流燃烧机制作用下，裂纹表面形成了浅灰色多孔状微观结构。由于应力波反射效应的强化作用，药柱底部中心区域出现明显的断裂破坏现象，侧表面区域颜色显著加深，表明药柱侧表面发生了局部反应。

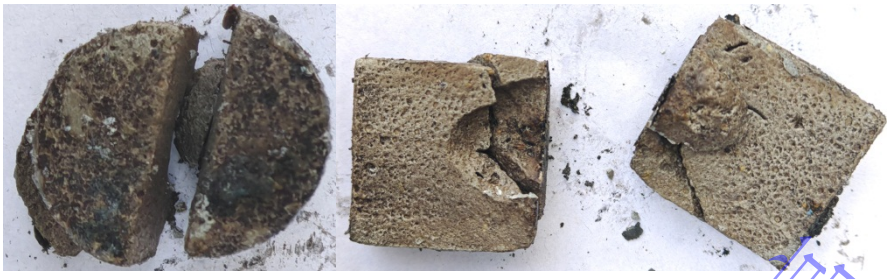
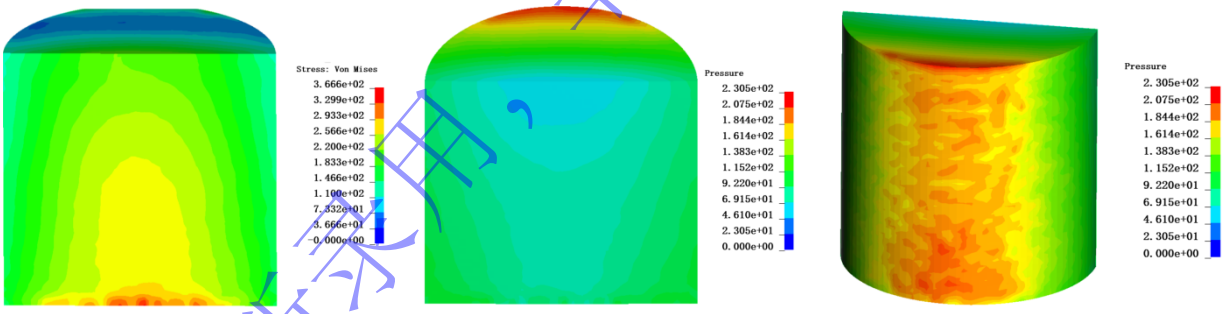


图 10　有间隙“一”字裂纹炸药反应后的残骸图

Fig.10 Debrisimages of the reacted single-line crack explosives with gap

1mm 间隙“一”字裂纹等效应力分布云图如图 11 所示，由于间隙的存在使得火药燃烧气体产物渗入其中，等效应力的分布与之前相比产生了较大变化：炸药在 10.3ms 时刻受到顶部火药燃烧冲击加载的作用，顶部应力呈现辐射状分布；10.5ms 时刻，由于高压气体冲入裂缝，导致裂纹面上端中心区域等效应力明显提高，固壁反射作用使得底部中心位置出现应力集中区域。在 10.7ms~10.8ms 等效应力分布逐渐趋于稳定，应力集中区域出现在底部中心位置且呈现截头圆锥形分布，最大应力达 366MPa，且由底部中心位置向周围逐渐降低，其与试验中断裂区域较为吻合。

压力云图分布如图所示，10.3ms 时刻上表面中心位置受发射药加速燃烧作用，压力呈现辐射状分布。10.3ms~10.5ms 时段内,由于高压气体对药柱裂纹面的加载，使得药柱的侧面与腔体内壁发生碰撞作用，从而改变了整体的反应程度及压力分布情况根据侧表面压力云图可以发现，碰撞区域的压力达到非碰撞区域的 2 倍。说明 1mm 间隙“一”字裂纹使得炸药的机械热点区域发生改变，由底部首先反应发展为侧表面首先反应。



(a) Von Mises stress　　(b) pressure-symmetry plane　　(c) pressure-side surface

图 11 有间隙“一”字裂纹药柱 10.8ms 时刻应力云图（MPa）

Fig.11　Stress contour of single-line crack explosives with gapat 10.8ms(MPa)

1mm 间隙“一”字裂纹药柱相较于无间隙工况表现出显著不同的响应特性。间隙的引入使峰值压力降低 7%，压力脉冲持续时间从 0.7ms 延长至 1.1ms，压力衰减过程更为平缓。高压燃气通过间隙渗透至裂纹内部，改变了应力分布模式，底部中心形成断裂区域。同时，药柱与腔体壁面的碰撞作用使得炸药机械热点区域从底部中心转移至侧表面，碰撞区域压力达到非碰撞区域的 2 倍。

1mm 间隙“十”字裂纹药柱的残骸形貌（见图 12）相较于“一”字裂纹工况，药柱的损伤程度与反应程度进一步提升。裂纹面呈现黑色多孔状形貌特征，底部裂纹区域明显扩大。在应力集中效应作用下，底部中心位置炸药发生断裂，反应产物通过间隙内的扩散传质和对流燃烧机制，在裂纹面形成了典型的炭黑色纹理结构。

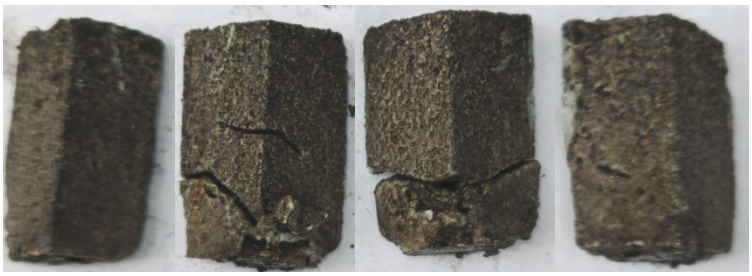
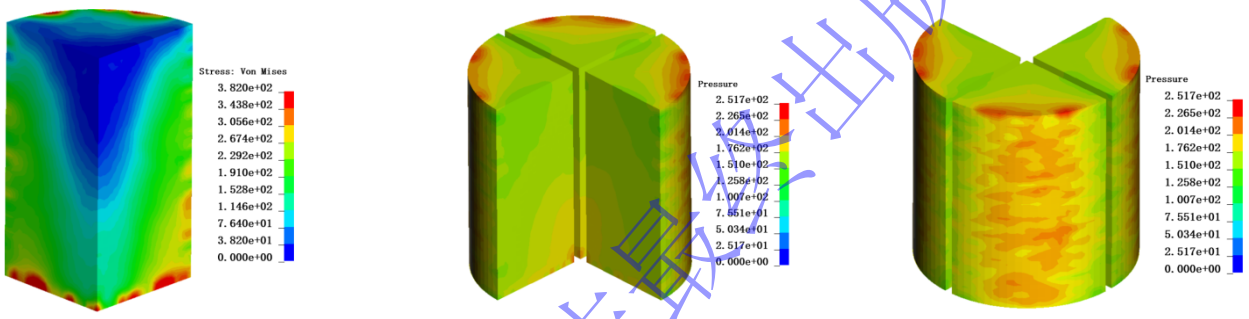


图 12 有间隙“十”字裂纹炸药发生反应后的残骸图

Fig.12Debrisimages of the reacted cross-line crack explosives with gap

1mm 间隙“十”字裂纹药柱的等效应力分布如图 13 所示：在 10.5ms 时刻，顶部中心位置等效应力低于周围，这是由于高压气体冲入裂缝，药柱上部区域在气体载荷形成的围压作用下应力球张量提高而偏张量大幅降低造成；在 10.5ms~10.83ms 时段内药柱等效应力分布呈现出向中心低，周围高，顶部低，底部高的趋势发展。在 10.83ms 时刻最大等效应力出现在底部位置，为 382MPa。发现此种工况下的最大等效应力相较于 1mm“一”字裂纹药柱有小幅上升，底部仍为应力集中区域，同时由于药柱的侧表面区域与腔体内壁的碰撞，使得顶部与侧表面的交界处出现应力集中区域。



(a) Von Mises stress　　(b) pressure-symmetry plane　　(c) pressure-side surface

图 13 有间隙“十”字裂纹药柱 10.83ms 时刻应力云图（MPa）

Fig.13　Stress contour of cross-line crack explosives column with gapat 10.83ms(MPa)

压力云图如图 13 所示，其演化与“一”字裂纹工况大致相同：10.3ms~10.5ms 时段内，药柱与腔体内壁发生碰撞，侧表面出现应力集中；10.7ms~10.83ms 时段内，压力分布趋于稳定，最终应力集中区域出现在侧表面和底部中心位置，最大压力分别为 251MPa 和 220MPa。此工况下药柱的机械热点区域为侧表面和底部中心位置。

1mm 间隙“十”字裂纹药柱相较于 1mm 间隙“一”字裂纹工况表现出更复杂的反应特征。“十”字裂纹结构使压力峰值降至 127.5MPa，压力脉冲半峰全宽延长至 1.7ms，衰减阶段压力维持较高水平，反映出炸药局部低速反应程度提升。应力分布在底部中心达到 382MPa，压力场在侧表面和底部中心分别达到 251MPa 和 220MPa。药柱残骸呈现黑色多孔状形貌，底部断裂区域扩大，炸药发生的局部低速反应并伴随反应产物的充分扩散产生了表面的炭黑色纹理。“十”字裂纹构型通过多方向气体渗透通道，促进了侧表面和底部中心的多点局部低速反应。

3 结 论

（1）通过对比不同发射药量下的完整药柱响应特性，发现压力曲线拐点与炸药局部反应相关。在 2g 发射药加载下，炸药未达点火阈值，仅发生表面烧蚀；而在 3g 发射药加载下，压力曲线出现拐点，炸药表面出现凹陷和孔洞，表明发生局部低速反应。压力曲线拐点可作为判断炸药局部反应的标志。

（2）无间隙裂纹工况对炸药整体响应特性的影响有限，表现出与完整药柱良好的等效性。无间隙“一”字裂纹药柱与完整药柱的压力峰值基本一致，压力下降段基本保持一致。数值仿真显示两种工况的等效应力分布基本一致，底部应力集中现象在两种工况下均为主导因素。

（3）间隙的引入显著改变了炸药的损伤区域和热点分布。1mm 间隙“一”字裂纹使压力峰值降低，脉

冲宽度延长，热点从底部转移至侧表面。1mm 间隙“十”字裂纹进一步降低压力峰值，延长脉冲宽度，形成多个热点区域。间隙通过改变燃气渗透路径，促进了药柱与腔壁碰撞，导致应力分布改变及热点迁移，碰撞区域压力是非碰撞区域的 2 倍，从而影响炸药反应和损伤模式。

参考文献

[1] JIA Z R, LU F X, WANG H Y. Multi-stage attack weapon target allocation method based on defense area analysis[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2020, 31(3): 539-550.

[2] XU S X, ZHANG W W, CAI Y, et al. Study on anti-penetration performance of Kevlar reinforced honeycomb liquid-filled cabin on warship: Experimental verification and numerical analysis[J]. Ocean Engineering, 2023, 283: 114959.

[3] LI H, ZONG S Z, XIONG X Y. The influence of penetration angle on anti-penetration performance and reverse penetration ricochet phenomenon of UHMWPE laminates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 182: 104780.

[4] DAI X G, HUANG Q, HUANG F L, et al. The developmemt of a confined impact test for evaluating the safety of polymer-bonded explosives during warhead penetration[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40: 665-673.

[5] 赵东，屈可朋，胡雪垚，等. DNAN基熔铸炸药的动态力学行为及点火特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(05): 27-37.
ZHAO Dong, QU Ke-peng, HU Xue-yao, et al. Dynamic mechanical behavior and ignition characteristics of DNAN-based melt-cast explosives[J], Chinses Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(05):27-37.

[6] 王昕捷，王心宇，丁凯，等. 低速撞击下PBX炸药黏弹塑性细观损伤点火模型研究[J]. 北京理工大学学报, 2024, 44(02): 123-134.
WANG Xin-jie, WANG Xin-yu, DING Kai, et al. Viscoelastic plastic meso-damage ignition model study of polymer bonded explosive under low velocity impact[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2024, 44(02): 123-134.

[7] 聂少云，薛鹏伊，代晓淦. 模拟多层穿靶过程装药安全性评价方法[J]. 火炸药学报, 2020, 43(05): 537-542.
NIE Shao-yun, XUE Peng-yi, DAI Xiao-gan. Method of evaluating the safety of charging in a multi-layer penetration process[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants(Huozhayao Xuebao), 2020, 43(5): 537-542.

[8] 高金霞，赵卫刚，郑腾. 侵彻战斗部装药抗过载技术研究[J]. 火工品, 2008, 04: 4-7.
GAO Jin-xia, ZHAO Wei-gang, ZHENG Teng. Study on the anti-overloading technique for penetrating warhead charge[J], Initiators & Pyrotechnics, 2008, 04: 4-7.

[9] 张萌昭，周涛，郭洪福，等. 侵彻多层间隔靶板装药损伤特性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(12): 92-97.
ZHANG Meng-zhao, ZHOU Tao, GUO Hong-fu, et al. Experimental study of charge damage in multi-layer target penetration process[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2021, 42(12): 92-97.

[10] 刘睿，韩勇，代晓淦，等. 初始裂纹对高聚物粘结炸药低速撞击点火影响数值模拟研究[J]. 含能材料, 2019, 27(10): 812-818.
LIU Rui, HAN Yong, DAI Xiao-gan, et al. Numerical simulation on the influence of the initial crack on polymer bonded explosive ignition under low velocity impact[J]. Chinses Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2019, 27(10): 812-818.

[11] 孙宝平，段卓平，刘彦，等. 破片撞击损伤装药点火数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(3): 178-183.
SUN Bao-ping, DUAN Zhuo-ping, LIU Yan, et al. Numerical simulation on damaged charge ignition by fragment impact[J]. Chinses Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao), 2019, 27(3): 178-183.

[12] 王一鸣，刘睿，陈鹏万，等. 损伤累积下PBX炸药低速撞击点火行为的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2023, 46(5): 456-464.
WANG Yi-ming, LIU Rui, CHEN Peng-wan, et al. Numerical simulation on low-velocity impact ignition behavior of PBXs with damage accumulation[J]. Chinese Jourunal of Explosives & Propellants(Huozhayao Xuebao), 2023, 46(5): 456-464.

[13] 尚海林，杨洁，胡秋实，等. 炸药裂缝中的对流燃烧现象实验研究[J]. 兵工学报, 2019, 40(01): 99-106.
SHANG Hai-lin, YANG Jie, HU Qiu-shi, et al. Experimental research on convective burning in explosive cracks[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(01): 99-106.

[14] 张小兵. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 97-98.
ZHANG Xiao-bing. Interior ballistics[M]. Beijing: Beijing Institude of Technology Press, 2014: 97-98

[15] XIE R Z, ZHANG A M, LI S M. Fluid compressibility related to migration on bubble dynamics[J]. Physics of Fluids, 2025, 37(1):

013318.

[16] 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.

[17] YANG Y, DUAN Z P, ZHANG L S, et al. Measurements of reaction zone and determination of the equation of stage parameters of DNAN-baesd melt-cast aluminized explosive[J].Journal of Energetic Maaterials, 2022, 38(2): 240-251.

Reaction Evolution Characteristics of Ignited DNAN-Based Explosive Charges with Pre-cracks

YAO XIN, WANG Hui, SHEN Fei, QU Kepeng

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 71065, Shaanxi, China*)

Abstract: To investigate the influence of cracks and gaps on the reaction evolutioncharacteristics of aluminum-containing DNAN-based explosives afterthe formation of mechanical induced hotspots,explosive charge samples with different initial cracks were fabricated.An explosive impact ignition device based on gun propellant combustion loading was designed. The evolutionprocess following the ignitionof explosives was simulated. Pressure changes and post-test morphological features of the explosives were recorded. Numerical simulations were conducted to analyze the stress field and reaction distribution of explosive charges with different initial cracks under the same loading conditions. The results indicate that the crack-free and single-line crackexplosive charge with no gapdebrisremained intact, and pressure dropped rapidly after the peak with no reaction occurred, and the hot spot region was located at the bottom. While for the single-line crackexplosive charge with 1mm gap, the explosive charge fractured and exhibited local low-orderreactions, with a slow pressure decay process. Among these, the hot spot region of the single-line crack explosive shifted to the side surface, while the cross-line crack explosive formed dual hot spot regions on both the side surface and bottom, further enhancing the reaction intensity. This demonstrates that pre-cracks significantly influence the explosive reaction process by altering stress distribution and expanding hot spot regions.

Key words: DNAN-based aluminum-containing explosive; pre-cracks; gun propellant; reaction propagation; response characteristics