研究论文

DOI：10.11949/0438-1157.

含预制裂缝的NEPE推进剂点火燃烧特性实验研究

夏登超，徐韬涵，杨猛，汤成龙，黄佐华

（西安交通大学能源与动力工程学院，陕西 西安，710049）

摘要： 为探明裂缝对硝酸酯增塑聚醚（Nitrate ester plasticized polyether，NEPE）推进剂点火和燃烧特性的影响，为热安全性研究提供支撑，采用快速压缩机（Rapid compression machine，RCM）装置，结合高速成像及动态压力采集技术，开展了含预制裂缝NEPE推进剂的点火燃烧实验，系统探究了裂缝宽度与长度对点火延迟特性及火焰传播行为的影响规律。结果表明：裂缝宽度增加可显著缩短点火延迟时间，但存在明显的尺寸效应：宽度由0.4 mm增至0.8 mm时，点火延迟时间（Ignition delay time，*IDT*）降低20.0%；继续增至1.2 mm时，降幅趋缓至12.5%。机理上，窄缝（0.4 mm）内强流动阻力抑制了热量传递与压力积累，而宽缝中几何约束减弱促进了对流传热及燃烧反应效率；当宽度超过临界值后，气动加热效应趋于饱和，流动阻力与换热效率的改善速率减缓，致使延迟时间缩短趋势减弱。在宽度固定为1.2 mm条件下，长度由12 mm增至20 mm和30 mm时，火焰平均传播速度分别提升至0.6 m/s和2.5 m/s。长度效应同样呈现尺寸效应特征，较长裂缝下，多着火点相向传播可诱发高强度燃烧模式，甚至引发爆燃，表现为燃烧室压力骤升及非稳态振荡。研究揭示了裂缝宽度与长度双重尺寸效应对燃烧动力学的调控机制，为含裂缝推进剂系统的点火优化与安全性设计提供理论支撑。

关键词： 燃料；裂缝；NEPE推进剂；非稳态燃烧；热安全性；点火延迟时间；传热；尺寸效应

中图分类号： TJ 55　　**文献标志码：** A

文章编号： 0438-1157（XXXX）XX-0001-10

Experimental study on ignition and combustion characteristics of NEPE propellant containing pre-fabricated cracks

XIA Dengchao, XU Taohan, YANG Meng, TANG Chenglong, HUANG Zuohua

(*College of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an* 710079, *Shaanxi, China*)

Abstract: To investigate the effects of cracks on the ignition and combustion characteristics of Nitrate ester plasticized polyether(NEPE) propellant and provide support for thermal safety research, ignition and combustion experiments of NEPE propellant with pre-existing cracks were conducted using a rapid compression machine (RCM) combined with high-speed imaging and dynamic pressure acquisition techniques. The effects of crack width and length on ignition delay characteristics and flame propagation behavior were systematically investigated. The results show that increasing crack width significantly shortens the ignition delay time, but a pronounced size effect exists. When the width increases from 0.4 mm to 0.8 mm, the ignition delay time (*IDT*) decreases by 20.0%, further increasing to 1.2 mm, the reductions slow down to 12.5%. Mechanistically, strong flow resistance in narrow cracks (0.4 mm) inhibits heat transfer and pressure accumulation, while geometric constraint weakening in wider cracks promotes convective heat transfer and combustion reaction efficiency. When the width exceeds a critical value, the

收稿日期： 2026-08-18　　**修回日期：** 2026-09-27

通信作者： 杨猛(1992—)，男，博士，助理教授，yangmeng@xjtu.edu.cn

第一作者： 夏登超(2002—)，男，硕士研究生，3125303173@stu.xjtu.edu.cn

基金项目： 挑战专题(TZ2025001)；国家自然科学基金项目(52306161,52236001)

引用本文： 夏登超, 徐韬涵, 杨猛, 汤成龙, 黄佐华. 含预制裂缝的NEPE推进剂点火燃烧特性实验研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-10

Citation: XIA Dengchao, XU Taohan, YANG Meng, TANG Chenglong, HUANG Zuohua. Experimental study on ignition and combustion characteristics of NEPE propellant containing pre-fabricated cracks[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-10

aerodynamic heating effect tends to saturate, and the improvement rates of flow resistance and heat transfer efficiency decrease, resulting in a weakened trend of ignition delay reduction. With the width fixed at 1.2 mm, when the length increases from 12 mm to 20 mm and 30 mm, the average flame propagation speed increases to 0.6 m/s and 2.5 m/s, respectively. The length effect also exhibits a size effect characteristic, where longer cracks enable counter-propagating flames from multiple ignition points to induce high-intensity combustion modes, even triggering deflagration characterized by rapid pressure rise and non-steady oscillations. This study reveals the regulatory mechanism of dual size effects (width and length) of crack geometric parameters on combustion dynamics, providing theoretical support for ignition optimization and safety design of cracked propellant systems.

Keywords: fuel; crack; NEPE propellant; unsteady combustion; thermal safety; ignition delay time; heat transfer; size effect

引 言

NEPE固体推进剂是以混合硝酸酯增塑聚醚为粘合剂的高能复合体系，固相组分主要包含高氯酸铵（Ammonium perchlorate，AP）、环四亚甲基四硝胺（Cyclotetramethylene-tetranitramine，HMX，）、金属铝颗粒等。该推进剂突破了传统固体推进剂能量与力学性能无法兼顾的短板，具备能量密度高、低温力学性能优异等优势[1-4]，是我国航天动力、战略国防装备的核心高能推进材料，在固体火箭发动机、战术武器等装备体系中占据不可替代的战略地位。

为满足大推力、高续航的工作需求，NEPE推进剂持续向高能化发展，但能量密度的大幅提升，也直接导致推进剂热稳定性、结构稳定性下降，安全隐患显著增加。在装药制备、运输存储、服役工作等全生命周期工况中，受机械加工误差、粘合剂老化失效、复杂应力载荷冲击等多重因素影响。NEPE推进剂装药易产生微裂纹、界面脱粘、孔隙塌陷等结构缺陷，其中裂缝是最常见、危害性最高的缺陷形式。固体火箭发动机工作过程处于高温、高压、高速的复杂工况，推进剂基体的预制裂缝及次生裂纹会成为高温燃气侵入、热量集聚的核心通道，易引发非正常点火、剧烈燃烧，甚至造成发动机燃烧失控、壳体烧穿乃至爆炸损毁，带来严重的装备失效风险与安全事故[5-7]，极大限制了高能NEPE推进剂的安全应用。

研究人员针对NEPE推进剂的力学特性与燃烧性能开展了大量基础性研究。在力学性能与损伤机制层面，NEPE推进剂的点火响应具备显著的应变率敏感性与温度相关性。Duan等[8]基于分离式霍普金森压杆（Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB）与高速摄影技术，揭示了冲击加载下NEPE推进剂变形、损伤至点火的四阶段演化规律，明确黏性剪切流动是热点生成的核心机制。Guo等[9]、范颖楠等[10]及Wu等[11]通过宽温域、高应变率动态冲击实验，验证了颗粒摩擦、粘结剂特性、炸药粒径等参数对推进剂力学损伤与点火响应的调控作用。Sun等[12]发现应变速率对推进剂损伤行为存在显著影响。Wang等[13]进一步证实，低温、高应变率工况会改变推进剂裂纹扩展特性，加剧结构损伤，为非正常燃烧提供结构基础。Duan[14]结合落锤实验与宏细观热力学模型模拟，明确了低速冲击下NEPE推进剂的临界点火阈值与主导机理。上述研究充分证明，外力载荷会诱发NEPE推进剂产生裂纹、剪切损伤等结构缺陷，而缺陷结构会大幅降低推进剂点火阈值，使发动机高温高压服役工况下的燃烧安全性难以保障。

在燃烧特性研究方面，现有研究多聚焦于无缺陷完整NEPE推进剂。Tu等[15]探明了压力对NEPE推进剂热分解与燃速特性的影响，建立了四阶段点火理论；后续又围绕六硝基六氮杂异伍兹烷（Hexanitrohexaazaisowurtzitane，CL-20）改性NEPE推进剂，完善了推进剂热分解阶段划分与铝颗粒团聚预测模型[16]。周等[17]、Yu等[18]分别通过热分析表征、自由基动力学建模，揭示了NEPE推进剂的热分解机理与气固相燃烧反应规律。Liu等[19]、Li等[20]针对推进剂内部铝颗粒团聚行为与配方调控规律开展研究，阐明了固相组分对燃烧速率、火焰结构的影响机制。

在固体推进剂缺陷诱导燃烧领域，裂缝内的对流燃烧与火焰传播机制一直是研究重点。早期研究表明，高温燃气进入推进剂裂缝后，通过对流换热快速加热裂缝壁面，使燃烧由表面传导模式转变为高速对流模式，燃烧速率可提升一个数量级以

上[21]。在裂缝几何效应方面，研究者系统考察了裂缝宽度对燃气侵入深度与对流换热强度的影响，发现存在临界宽度使裂缝内压力积累与火焰传播速度达到峰值，且裂缝宽度的变化会显著改变对流燃烧波的传播行为[22]。在侵蚀燃烧方面，高速横向气流冲刷推进剂表面会显著增强质量与热量传递，导致燃速异常升高，该效应在狭窄裂缝通道中尤为突出，是裂缝内火焰加速的核心机制之一[23]。此外，长裂缝中相向传播的火焰前锋碰撞可引发压力波与燃烧的正反馈耦合，在强约束条件下可能导致燃烧强度急剧增加甚至向爆轰转变[21]。

综上所述，当前研究对完整无缺陷NEPE推进剂的点火、热分解及力学损伤特性已有较为清晰的认知，同时明确了结构缺陷是引发推进剂非正常燃烧的关键因素。何国强等[24]也证实裂纹、气孔缺陷会改变推进剂内热质输运方式，使燃烧由低速传导模式转变为高速对流模式[25]，大幅提升燃烧烈度。但目前针对含预制裂缝的NEPE推进剂，其在发动机高温高压工作条件下的裂纹扩展规律、热点形成机制及燃烧演化特性尚未形成系统认知，缺陷诱导的非正常燃烧耦合机制尚不明确，无法为含缺陷NEPE推进剂的安全评估、装药结构优化及故障防控提供完善的理论支撑。因此，本文开展含预制裂缝NEPE推进剂的点火燃烧特性实验研究，通过对实验结果的深入分析，获取裂缝宽度和长度对点火响应及燃烧演化的影响规律，揭示NEPE推进剂裂缝中对流燃烧演化的特性，为高能固体推进剂意外点火及实际应用过程的安全性提供支撑。

1 实验材料和方法

1.1 实验样品

本文实验所用NEPE固体推进剂试样采用溶剂-非溶剂法制备。该推进剂以四氢呋喃共聚醚（Polyether of tetrahydrofuran copolymer，PET）为黏结剂，AP为氧化剂，粒径6~8 μm的铝粉（Al）为金属燃料；以N-丁基-硝基氧基乙基硝胺（N-butyl-nitroxyethylnitramine，Bu-NENA）为含能增塑剂，六亚甲基缩二脲多异氰酸酯（Hexamethylene diisocyanate biuret，N100）与甲苯二异氰酸酯（Toluene diisocyanate，TDI）复配体系为固化剂，HMX与CL-20为高能填充组分，氧化石墨烯（Graphene oxide，GO，含氧量29%，百灵威科技有限公司）兼具表面钝化与催化改性作用。

表1 NEPE推进剂基础配方（质量分数，%）

Table 1 NEPE propellant basic formula (mass fraction, %)

组分	质量分数/%
AP	40~50
HMX	10~15
Al	10~20
Bu-NENA	10~15
GO/CL-20复合改性组分	5
PET	5~10
其他功能助剂	1~2

在传统RCM燃烧测试实验中，无防护的NEPE推进剂试样整体暴露于高温高压来流环境中，易发生全域无规则非受控点火，掩盖预制裂缝区域的专属点火与燃烧响应特征，造成实验干扰，无法精准揭示裂缝结构参数对推进剂燃烧性能的影响规律。为解决上述问题，本文建立了试样表面差异化钝化包覆预处理方法，对推进剂非测试工作面进行密封包覆，隔绝高温高压燃气，约束点火燃烧行为仅发生于预制裂缝待测区域。

本实验选用国药集团聚乙烯醇缩丁醛（Polyvinyl butyral，PVB）作为表面包覆材料。精准称取8 g PVB粉末与92 g无水乙醇进行配比，将粉体缓慢加入无水乙醇溶剂中，置于60 ℃恒温水浴环境中加热溶解1 h。为抵消加热过程中的溶剂蒸发损耗，实验期间分三次补充无水乙醇，维持溶液配比稳定性。待粉体完全溶解后，将混合溶液静置24 h，配制得到质量分数为8%的均匀PVB包覆溶液，密封保存备用。

实验采用尺寸为5×5×12 mm、5×5×20 mm、5×5×30 mm的三类NEPE推进剂标准药条试样。将制备完成的PVB包覆溶液浸没对应试样，浸没时长控制为10~15 s，取出后放置于洁净玻璃器皿中常温风干，单次包覆工序间隔40~50 min，累计完成8次包覆处理。其中，前6次包覆过程中轮换试样放置接触面，保证试样外表面包覆均匀性；最后2次完成精准外观检测，针对局部包覆层偏薄、破损区域进行补涂处理，实现试样非测试面全封闭包覆。同时规定最后一次包覆后试样静置固化时长不低于12 h，确保PVB涂层完全固化成型。

待试样表面包覆层完全固化后，开展预制裂缝精细化制备加工。首先剥离推进剂药条一侧正方

形端面的PVB包覆层，裸露纯净的推进剂基体作为测试工作面；沿药条轴向中心纵向对半切割，将试样均分得到两块结构、尺寸完全一致的单体试件；采用钨针对两组单体试件进行中心贯穿对接，搭配高精度游标卡尺精准校准、调控预制裂缝间距。试样装配于快速压缩机燃烧室时，将裸露的待测端面正对高温燃气来流方向，此时，高温燃气沿试样的轴向方向冲击其裸露的端面，然后直接从裂缝开口处进入裂缝内部，沿着裂缝的长度方向不断扩散。而采用悬空装配方式固定，避免试样与燃烧室腔体接触产生干扰，保证实验过程中点火、燃烧响应仅由预制裂缝结构主导。

1.2　实验方法

RCM装置（如图1所示）在我们前期的工作中已有详细的介绍[26-39]，主要由高压储气罐、驱动段、液压段、压缩段、燃烧室、数据采集处理系统以及相关的气路部分组成。实验过程中，采用钨针将NEPE样品固定在可视化燃烧室内，通过其内部的两杆-三活塞结构（Two-rod three-piston，TRTP，驱动连杆和压缩连杆，驱动活塞、液压活塞和压缩活塞）实现快速热加载环境的建立（升温速率最高可达到2×10^4 K/s）。通过控制N_2/Ar的混合比以及配给量来实现快速压缩机压缩上止点（End of compression，EOC）的温度和压力的精确调控，压力数据由压力传感器（Kistler 6125C）和电荷放大器（Kistler 5018A）记录，燃烧过程由高速相机进行记录，型号为Phantom V611，采样频率为20000 Hz，分辨率为512×512，曝光时间为10 μs。

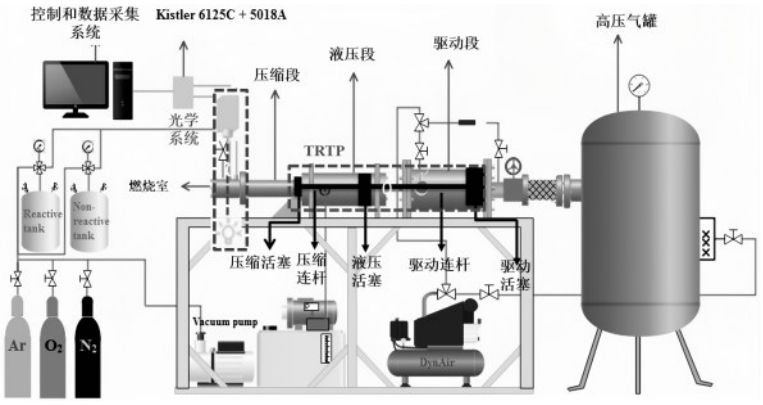


图1　快速压缩机装置原理图[27]

Fig.1　Schematic of the rapid compression machine.[27]

高速相机采用DG 645同步触发器进行外部触发，通过施加5 V的电脉冲启动记录，使高速相机在压缩过程压力到达上止点压力二分之一处开始记录，从而观测到整个燃烧过程。所有信号由数据采集系统(National Instruments USB-6341)采集和处理。通过压力变化与高速图像相结合的方式来分析推进剂的点火燃烧现象。

本实验选取压缩上止点压力4.3~4.7 MPa、温度980~1050 K的工况范围，该范围对应NEPE推进剂在固体火箭发动机点火瞬态及意外热刺激条件下的典型温度压力区间。每个工况重复实验至少三次[29]，*IDT*的相对标准差为12.0%，火焰传播速度的相对标准差为15.0%。RCM通过快速压缩实现升温速率最高达2×10^4 K/s的瞬态热加载，能够模拟推进剂在快速热刺激下的点火响应。RCM燃烧室中的流场为压缩驱动的瞬时非定常流，与真实固体火箭发动机内的稳态侵蚀燃烧环境存在差异：RCM中燃气对裂缝的作用以压缩侵入和瞬时对流为主，而发动机内还存在持续的高速横向气流冲刷与稳态压力环境。因此，本文结论主要反映裂缝几何参数在快速热加载条件下对点火延迟与火焰传播的调控规律，对于发动机稳态工况下的适用性需结合发动机尺度实验进一步验证。

2　实验结果与讨论

2.1　NEPE推进剂样品典型着火行为

在压缩上止点压力和温度为4.3 MPa和983.9 K下裂缝宽度0.4 mm的5×5×5 mm规格NEPE推进剂样品典型着火的高速图像与压力曲线如图2和图3所示。定义活塞到达压缩上止点的时刻为0 ms。-50 ms代表压缩前50 ms样品在燃烧室内的状态。压缩开始后，高速图像显示活塞运动方向右侧出现热气流，压力曲线同步快速上升。样品受高温高压

环境刺激，在13 ms时出现着火点。此时，由于燃烧室散热速率大于样品初期着火释热速率，燃烧室压力下降。随着着火点扩散燃烧，释热速率增加，压力下降趋缓；燃烧持续进行，释热量超过散热后，压力重新上升。点火延迟时间定义为从压缩上止点时刻到高速图像中第一次出现连续着火点信号所对应时刻的时间间隔。其中，压缩上止点由压力曲线确定并记为0 ms，着火信号判据为：同一区域内连续2帧出现亮点，且该亮点在后续帧中持续存在或扩展，同时排除瞬时光斑、壁面反射等非着火发光干扰。

2.2 裂缝宽度对NEPE点火燃烧演化的影响

图4~6分别是压缩上止点压力4.7 MPa、温度1036.0 K工况下，经表面差异化预处理后、裂缝宽度分别为0.4 mm、0.8 mm、1.2 mm的5×5×12 mm规格NEPE推进剂试样，通过高速摄影系统观测到的点火燃烧动态现象。受RCM压缩过程波动性影响，三组实验的实际压缩上止点温度略有差异（分别为1040.0 K、1036.2 K和1031.4 K），但均在目标工况范围内，不影响裂缝宽度效应的对比分析。

其中，当裂缝宽度为0.4 mm时，观测结果显示，实验20.0 ms时，试样预制裂缝区域出现着火点，即*IDT*为20.0 ms。燃烧反应随后从该单一着火点沿裂缝延伸方向逐步扩展，至73.0 ms时，燃烧区域已延展至整个裂缝范围，实现裂缝全域燃烧；裂缝宽度为0.8 mm时，16.0 ms时出现初始着火点（*IDT*=16.0 ms），与裂缝宽度为0.4 mm时不同，在24.5 ms时在

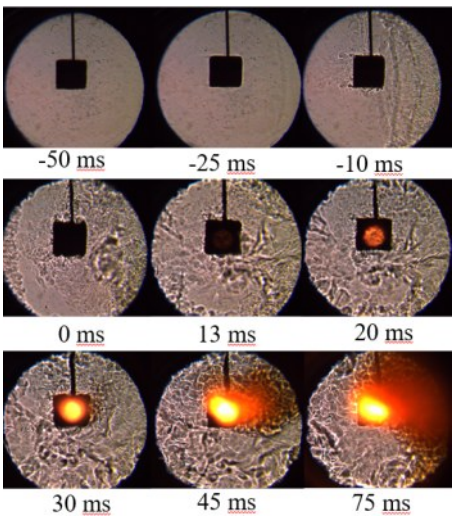


图2 在4.3 MPa和983.9 K下裂缝宽度0.4 mm的5×5×5 mm NEPE推进剂样品的高速图像

Fig.2 High-speed image of 5×5×5 mm NEPE propellant sample with a crack width of 0.4 mm at 4.3 MPa and 983.9 K

裂缝处出现第二个着火点，燃烧从两个着火点开始沿着裂缝扩展，38.0 ms时从两个着火点处发展的燃烧火焰相接触，41.8 ms时充满裂缝；当裂缝宽度为1.2 mm时，14.0 ms时出现第一个着火点（*IDT*=14.0 ms），与0.8 mm裂缝宽度试样的燃烧特征一致，23.0 ms时出现第二个着火点，随后两处火焰沿裂缝方向逐步发展，43.5 ms时火焰完全充满裂缝。通过对高速图像的系统观测与分析，可得出裂缝宽度对NEPE推进剂点火燃烧特性的影响规律：随着裂缝宽度的增大，推进剂的着火时刻提前，且该变化呈

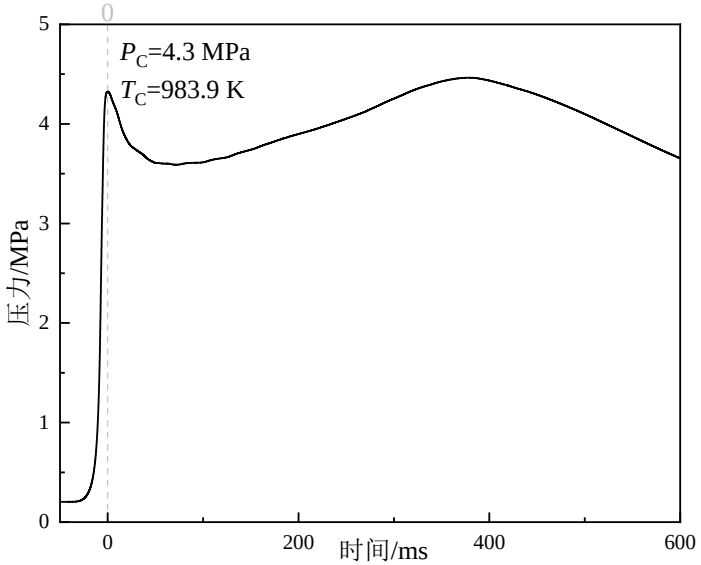


图3 在4.3 MPa和983.9 K下裂缝宽度0.4 mm的5×5×5 mm NEPE推进剂样品的压力变化曲线

Fig.3 Pressure variation curve of 5×5×5 mm NEPE propellant sample with a crack width of 0.4 mm at 4.3 MPa and 983.9 K

现非线性趋势。具体而言，裂缝宽度从0.4 mm增加至0.8 mm时，着火时刻提前约4.0 ms；从0.8 mm增加至1.2 mm（增加第二个0.4 mm）时，着火时刻仅提前约2.0 ms，表明随着裂缝宽度的增大，其对点火延迟时间的影响程度逐渐减弱。同时，燃烧现象观测结果表明，当裂缝宽度增大至0.8 mm及以上时，进入裂缝内部的高温高压燃气量增多，裂缝内换热效率显著提升，进而导致多点着火现象的出现概率明显增大，这与裂缝内高温燃气积聚、热量累积速率加快的规律密切相关。

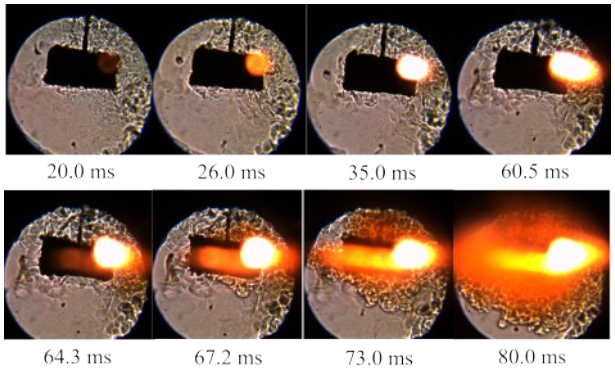


图4　在4.7 MPa和1040.0 K下裂缝宽度0.4 mm的5×5×12 mm NEPE推进剂样品的高速图像

Fig.4　High-speed image of a 5×5×12 mm NEPE propellant sample with a crack width of 0.4 mm at 4.7 MPa and 1040.0 K

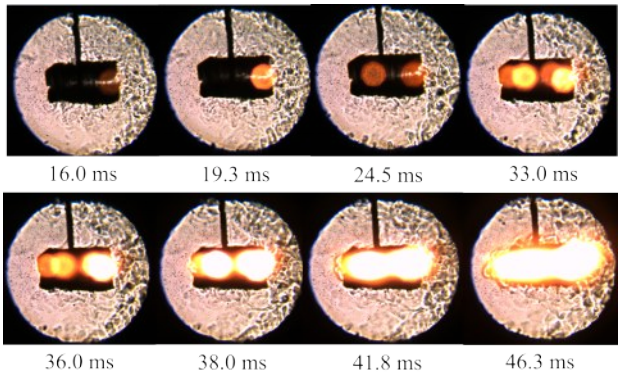


图5　在4.7 MPa和1036.2 K下裂缝宽度0.8 mm的5×5×12 mm NEPE推进剂样品的高速图像

Fig.5　High-speed image of a 5×5×12 mm NEPE propellant sample with a crack width of 0.8 mm at 4.7 MPa and 1036.2 K

图7为不同裂缝宽度下NEPE推进剂燃烧过程的压力变化曲线，结合高速图像得到的*IDT*与压力变化曲线可知，裂缝宽度对点火燃烧特性的影响呈现非线性关系，即0.4~0.8 mm区间内点火延迟时间的变化幅度，明显大于0.8~1.2 mm区间，且从图7压力变化曲线可直观观察到，0.8 mm与1.2 mm裂缝宽度对应的压力曲线基本重合，表明该两种裂缝宽度下推进剂的燃烧放热过程基本一致。该现象本质是裂缝宽度引发的流场特性、传热传质效率及能量集聚效应协同作用的结果，可能的机理如下：当裂缝宽度较小时（≤0.8 mm），RCM装置压缩产生的高温高压燃气进入狭窄裂缝通道后，受通道壁面约束作用，气流流动空间受限、速度急剧提升，形成高速气流；高速气流在狭窄裂缝内部发生流动阻滞与能量汇聚，与推进剂裂缝表面发生剧烈的对流换热与动量传递，形成局部高压与瞬时高温区域，一方面显著强化了高温燃气与推进剂表面的传热效率，加速推进剂表面热分解与活性自由基生成，另一方面高压环境进一步促进活性组分的反应速率，从而缩短点火延迟时间。当裂缝宽度较大时（≥0.8 mm），裂缝通道对高温高压燃气的约束作用显著减弱，燃气进入裂缝后流场扩散效应增强，气流动能更多用于驱动燃烧室全域气流循环，而非在裂缝局部形成能量集聚；同时，较宽的裂缝通道增大了燃气泄漏与压力稀释效应，热量耗散速率加快，局部高温高压区域难以形成，裂缝宽度增大对着火的促进作用被显著削弱，导致点火延迟时间的变化趋于平缓，呈现出明显的尺寸效应，这也正是0.8 mm与1.2 mm裂缝宽度下燃烧放热过程基本一致、压力曲线重合的主要原因。本文所称“尺寸效应”，特指裂缝几何尺寸变化对点火燃烧特性影响的响应特征，是涵盖裂缝宽度与长度影响的概念，包括两个层面：(1)宽度尺寸效应—当裂缝长度固定时，点火延迟时间随裂缝宽度增加而缩短，但达到一定范围后变化趋于平缓，体现了对流效应减弱及独立燃烧现象。窄缝中气流受壁面约束形成高速射流，强化对流换热与

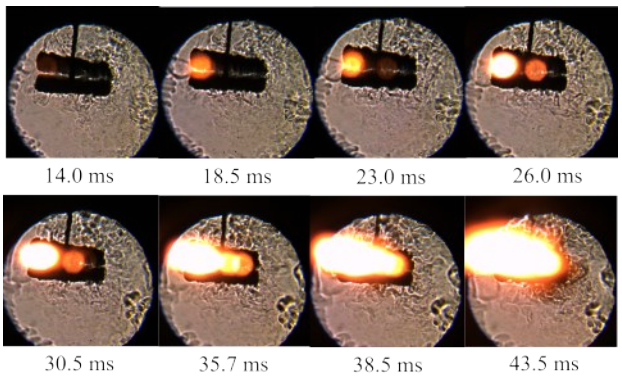


图6　在4.7 MPa和1031.4 K下裂缝宽度1.2 mm的5×5×12 mm NEPE推进剂样品的高速图像

Fig.6　High-speed image of a 5×5×12 mm NEPE propellant sample with a crack width of 1.2 mm at 4.7 MPa and 1031.4 K

动量传递，加速推进剂热分解与自由基生成，从而缩短点火延迟；但当裂缝宽度增大至一定范围后，通道约束作用减弱，燃气扩散与泄压效应增强，对流强化效果趋于饱和，裂缝内燃烧逐渐趋向独立燃烧模式。(2)长度尺寸效应—当裂缝宽度固定时，点火延迟时间随裂缝长度增加同样呈现缩短趋势但存在饱和特征。较长裂缝为进入裂缝的高温燃气提供更长的预加热路径，促进裂缝内早期热积累；同时增加多点着火概率，多着火点相向传播碰撞可进一步加速燃烧发展。

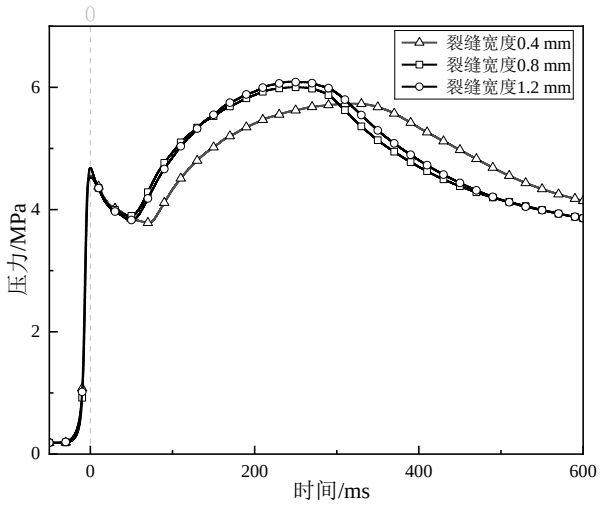


图7 在4.7 MPa和1036.0 K下5×5×12mm NEPE推进剂样品不同裂缝宽度下的压力变化曲线

Fig.7 Pressure variation curves of 5×5×12mm NEPE propellant samples with different crack widths at 4.7 MPa and 1036.0 K

本文在NEPE推进剂的相关研究中也观察到了类似Berghout等人[22]在研究高聚物粘结炸药(PBX，polymer bonded explosive) 9501材料的裂缝火焰传播现象时的现象，即裂缝宽度的增加会促进火焰的传播：裂缝宽度越大，点火和火焰传播越容易发生。在本文研究的宽度范围下，当裂缝宽度达到0.8 mm时，其促进效果最为明显。

2.3 不同裂缝长度下的点火燃烧特性实验

图6和图8、9分别为压缩上止点压力4.7 MPa、温度1030.0 K工况下，经表面差异化预处理后、裂缝宽度固定为1.2 mm，尺寸分别为5×5×12 mm、5×5×20 mm、5×5×30 mm的NEPE推进剂试样，通过高速相机观测到的点火燃烧动态过程。当裂缝宽度固定为1.2 mm、长度分别为12 mm、20 mm、30 mm时，受尺寸效应影响，各工况下的*IDT*分别为14.0 ms、15.6 ms、12.0 ms；但裂缝面的燃烧扩散特性差异明显，火焰完全充满裂缝所需时间分别为29.5 ms、32.4 ms、27.0 ms，平均火焰扩散速度依次为0.4 m/s、0.6 m/s、2.5 m/s。

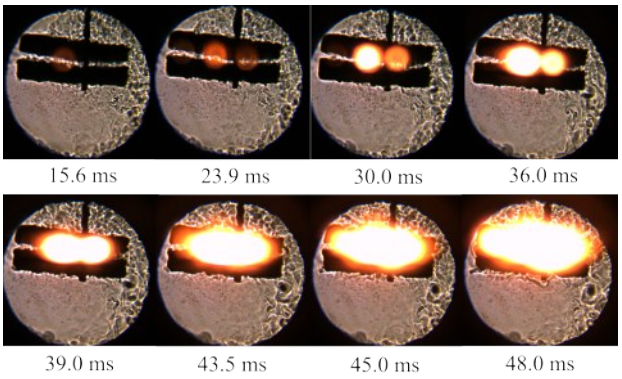


图8 在4.7 MPa和1036.2 K下裂缝宽度1.2 mm的5×5×20 mm NEPE推进剂样品的高速图像

Fig.8 High-speed image of a 5×5×20 mm NEPE propellant sample with a crack width of 1.2 mm at 4.7 MPa and 1036.2 K

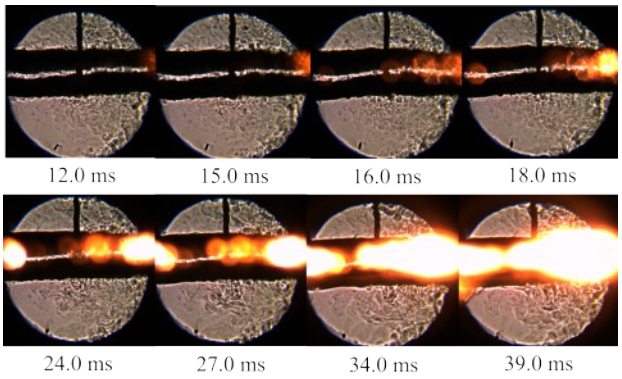


图9 在4.7 MPa和1052.1 K下裂缝宽度1.2 mm的5×5×30 mm NEPE推进剂样品的高速图像

Fig.9 High-speed image of a 5×5×30 mm NEPE propellant sample with a crack width of 1.2 mm at 4.7 MPa and 1052.1 K

上述现象的可能机理如下：当裂缝区域发生点火后，较长的裂缝面为火焰传播提供了更长的空间路径，火焰前锋在传播过程中获得充足的加速时间与空间，同时火焰前锋前方形成更强的气流冲刷效应，进一步强化推进剂的燃烧反应，这种正反馈作用显著提升了火焰传播速度。此外，由图9可观察到，当裂缝长度达到30 mm时，着火点同时出现在试样的两个端面，两端火焰沿裂缝方向相对延展；当两支火焰前锋充分加速后发生碰撞，裂缝内的燃烧模式发生转变，由原本的对流燃烧转化为更为剧烈的高强度燃烧模式，燃烧强度显著提升。

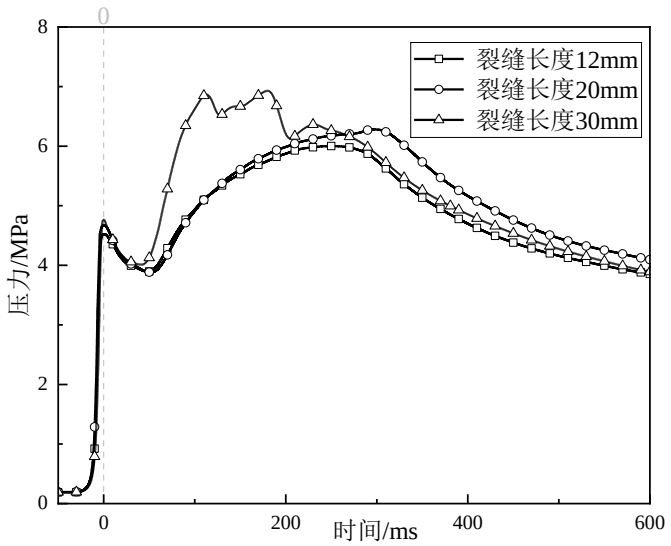


图10　在4.7 MPa和1030.0 K下裂缝宽度为1.2 mm的NEPE推进剂样品不同裂缝长度下(12/20/30 mm)的压力变化曲线

Fig.10　Pressure variation curves of NEPE propellant samples with a crack width of 1.2 mm at 4.7 MPa and 1030.0 K for different crack lengths (12/20/30 mm)

图10所示压力曲线进一步揭示了裂缝长度对燃烧压力特性的影响,其中裂缝长度为30 mm时的压力变化趋势,与12 mm、20 mm裂缝长度对应的压力曲线存在明显差异。具体表现为,在100~200 ms时间区间内,30 mm裂缝长度对应的压力曲线出现剧烈的非稳态压力震荡。其可能的原因为:当30 mm长裂缝两端的火焰前锋充分加速、相向碰撞后,火焰前锋面前形成两股相向的高强度气流,气流碰撞中心处形成新的燃烧核心并发生非稳态剧烈燃烧;非稳态剧烈燃烧过程与压力波形成相互作用的正反馈回路,短时间内快速集聚能量,形成高于燃烧室内平均压力的明显压力尖峰。同时,高强度压力波在狭窄的裂缝腔内发生多次来回反射,无法快速扩散耗散,进而引发持续的压力波动,反映在压力曲线上即表现为大幅度的非稳态震荡现象。

本文在长裂缝工况下观测到的火焰加速现象与文献[23]描述的侵蚀燃烧机制吻合,但本文进一步明确了侵蚀燃烧与压力波正反馈的耦合加速效应,本文长裂缝中火焰加速同样符合侵蚀燃烧与压力波正反馈机制,但RCM快速压缩过程为瞬态非定常环境,30 mm裂缝下平均火焰速度可达2.5 m/s,高于常规稳态侵蚀燃烧条件下的典型值。表明,强约束下压力积累可导致燃烧剧烈化甚至转变。本文在30 mm长裂缝工况下观测到的非稳态压力震荡现象与Dickson等[21]关于约束PBX热烤燃及燃烧转变的研究文献结论一致,但在本文温压范围内未观察到向爆轰转变,表现为非稳态剧烈燃烧和出现两端火焰相向碰撞。上述对比表明,本文工作补充了含预制裂缝NEPE推进剂在RCM瞬态高温高压条件下的点火延迟与火焰传播数据,明确了裂缝宽度尺寸效应和长度正反馈机制。

需要讨论的是,本文采用的全贯穿裂缝构型与实际固体火箭发动机中常见的盲缝(死区)构型存在差异。在全贯穿裂缝中,高温燃气可从裂缝开口端流入、从另一端流出,形成持续对流;而在盲缝构型中,燃气侵入至封闭端后形成滞止区,压力积累与热量集聚行为更为显著。本文选择全贯穿裂缝作为研究对象的考虑在于:其一,全贯穿裂缝是研究裂缝几何参数对对流燃烧调控规律的理想模型,可排除盲缝末端封闭效应的耦合干扰,分离出裂缝宽度与长度对点火延迟和火焰传播的独立影响机制;其二,实际推进剂药柱中径向穿透裂纹、界面脱粘形成的贯通通道等缺陷也属于全贯穿型裂缝,本文结论对此类缺陷的安全评估具有直接参考价值;其三,本文揭示的宽度尺寸效应、长度对火焰加速的正反馈机制、多点着火碰撞诱导高强度燃烧等基本规律,具有普适性,可为后续盲缝构型的研究提供基准对照。未来工作将进一步开展盲缝与全贯穿裂缝的对比实验,明确末端边界条件对裂缝内燃烧动力学的影响。

3 结 论

本文采用快速压缩机形成高温高压实验环境，针对含预制裂缝的NEPE固体推进剂，系统开展不同裂缝宽度与长度条件下的点火燃烧实验。通过对高速图像与压力曲线的分析及机理探究，得出以下主要结论：

（1）在样品长度保持不变时（12 mm），随着裂缝宽度增加，*IDT*与剧烈燃烧建立时间同步缩短；裂缝宽度由0.4 mm增大至0.8 mm时，*IDT*下降20.0%，剧烈燃烧建立时间下降17.0%；宽度进一步增大至1.2 mm后，促进效果趋于饱和，二者降幅分别放缓至12.5%和7.0%。当裂缝宽度超过0.8 mm后，继续增大裂缝宽度对进一步缩短点火延迟的风险增益有限。

（2）当裂缝宽度保持1.2 mm不变时，裂缝长度主要调控点火发生之后的火焰传播演化行为。随着裂缝长度增加，侵蚀燃烧、压力波拍击的正反馈机制充分发展，火焰平均传播速度显著提升；裂缝长度为12 mm、20 mm和30 mm时火焰平均传播速度统计均值分别为0.4 m/s、0.6 m/s、2.5 m/s，裂缝被火焰完全覆盖的时间大幅缩短。在长裂缝工况下，若出现多组相互远离的着火点并发生火焰相向传播，燃烧模式会发生转变，诱发局部非稳态剧烈燃烧，造成燃烧室压力骤升与非稳态压力震荡。装药内部大尺寸贯通裂缝需要作为热安全风险重点关注对象。

（3）在本文研究的参数范围内（裂缝宽度为0.4~1.2 mm、长度为12~30 mm），裂缝宽度与裂缝长度均对点火延迟时间产生影响。裂缝宽度通过调控裂缝内气流约束效应与传热传质效率影响点火延迟：窄缝中气流受壁面约束形成高速射流强化对流换热，宽缝中扩散与泄压效应削弱该作用，呈现尺寸效应；裂缝长度则通过提供燃气预加热路径长度与影响多点着火概率影响着火时刻：较长裂缝使更多进入裂缝的燃气被预加热，同时提升多点着火的发生概率，从而缩短点火延迟。一旦着火发生，裂缝长度成为火焰传播总时长与火焰传播速度的主要影响因素，较长的裂缝为火焰前锋提供了充足的加速空间，使侵蚀燃烧与压力波正反馈机制得以充分发展。

参考文献

[1] Xing R S, Wang L, Zhang F T, et al. Mechanical behavior and constitutive model of NEPE solid propellant in finite deformation [J]. Mechanics of Materials, 2022, **172**: 104383.

[2] Ding L, Zhao F Q, Pan Q, et al. Research on the thermal decomposition behavior of NEPE propellant containing CL-20[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2016, **121**: 121-127.

[3] Li L B, Chen X, Zhou C S, et al. Experimental investigation on laser ignition and combustion characteristics of NEPE propellant [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, **42**(9): 1095-1103.

[4] Wen Z C, Wu Y Y, Li H P, et al. Theoretical study on the pyrolysis mechanism of key components of NEPE propellant[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2023, **84**(5): 60-71.

[5] Zhang J F, Zheng J, Chen X, et al. A thermovisco-hyperelastic constitutive model of NEPE propellant over a large range of strain rates[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2014, **136**(3): 031002.

[6] Yang K, Wu Y Q, Huang F L, et al. Numerical simulations of mechanical and ignition-deflagration responses for PBXs under low-to-medium-level velocity impact loading[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, **337**: 148-162.

[7] 王永杰, 鲁建英, 陈林泉, 等. 固体火箭发动机撞击靶板安全性数值分析[J]. 固体火箭技术, 2009, **32**(3): 274-277, 283.
Wang Y J, Lu J Y, Chen L Q, et al. Numerical analysis for safety of solid rocket motor impacting target[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2009, **32**(3): 274-277, 283.

[8] Duan H Z, Wu Y Q, Yang K, et al. Experimental and numerical investigation on dynamic deformation and ignition response of NEPE-based propellants[J]. Polymer Testing, 2022, **116**: 107814.

[9] Guo Z T, Xu J S, Chen X, et al. Effects of dynamic loading and temperature on NEPE propellant: damage and ignition analysis[J]. Mechanics of Time-Dependent Materials, 2024, **28**(3): 1927-1945.

[10] 范颖楠, 武毅, 文俊杰, 等. GAP/PET/RDX基推进剂的动态冲击及点火响应行为[J]. 火炸药学报, 2023, **46**(4).
Fan Y, Wu Y, Wen J, et al. Study on dynamic impact and ignition response behavior of GAP/PET/RDX based propellant[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023, **46**(4).

[11] Wu Y, Fan Y N, Chen X X, et al. Low/intermediate speed impact-induced ignition and damage of a novel high-energy solid propellant[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2023, **48**(8): e202300056.

[12] Sun Z W, Xu J S, Zhou C S, et al. Damage characteristics and failure mechanism analysis of NEPE propellant at high strain rates [J]. Scientific Reports, 2024, **14**(1): 28452.

[13] Wang Q Z, Qiang H F, Wang Z J, et al. Study on fracture behavior of NEPE propellant under wide temperature and strain rate loading [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2026, **331**: 111711.

[14] Duan H Z, Wu Y Q, Hou X, et al. Ignition response of NEPE-based propellants under drop weight through experiments and numerical simulation[J]. Journal of Energetic Materials, 2025, **43**(2): 247-268.

[15] Tu C Y, Feng Y Y, Ling Z G, et al. Thermal decomposition,

ignition process and combustion behavior of nitrate ester plasticized polyether propellant at 0.1 – 3.0 MPa[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2022, **2022**:6439787.

[16] Tu C Y. Investigation of CL-20/NEPE propellant: thermal decomposition, ignition and combustion characteristics[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, **70**: 106147.

[17] 周水平, 吴芳, 唐根, 等. CL-20含量及其粒度级配对NEPE推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报, 2020, **43**(2): 195-202.
Zhou S P, Wu F, Tang G, et al. Influence of CL-20 content and particle size gradation on combustion performance of NEPE Propellants[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, **43**(2): 195-202.

[18] Yan X T, Xia Z X, Huang L Y, et al. Combustion of nitrate ester plasticized polyether propellants[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2020, **21**(10): 834-847.

[19] Liu H, Yuan J F, Liao X Q, et al. Aluminum particle agglomeration mechanism and microscopic combustion characteristics of NEPE propellants[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2024, **149**(11): 5187-5202.

[20] Li S P, Zhang G C, Wen Z, et al. Role of AP – HMX mass ratio in combustion and agglomeration of NEPE propellant[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, **38**(7): 103470.

[21] Dickson P M, Asay B W , Henson B F ,et al. Thermal cook – off response of confined PBX 9501[J]. Proceedings of the Royal Society A, 2004, **460**(2052):3447-3455.

[22] Berghout H L, Son S F, Hill L G, et al. Flame spread through cracks of PBX 9501 (a composite octahydro-1,3,5,7-tetranitro-1, 3,5,7-tetrazocine-based explosive)[J].Journal of Applied Physics, 2006, **99**(11):114901.

[23] Ma Y J, Bao F T, Sun L, et al. A new erosive burning model of solid propellant based on heat transfer equilibrium at propellant surface[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2020, **2020**: 8889333.

[24] 何国强, 蔡体敏, 李江, 等. 含缺陷固体装药燃烧异常实验分析[J]. 推进技术, 1999, **20**(3): 31-36.
He G Q, Cai T, M Li J, et al. Experimental study of anomalous combustion in propellant grain with defects [J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, **20**(3): 31-36.

[25] Asay B W, Mcafee J M. Temperature effects on failure thickness and the deflagration-to-detonation transition in PBX9502 and TATB[C]. Proceedings of the 10th International Detonation Symposium. Boston,MA,US:Naval Surface Warfare.

[26] Yang M, Liao C Y, Tang C L, et al. The auto-ignition behaviors and risk assessments of double-base propellant containing different 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethene particle sizes under rapid heating[J]. Combustion and Flame, 2021, **234**: 111627.

[27] Yang M, Yang Y, Liao C Y, et al. The auto-ignition boundary of ethylene/nitrous oxide as a promising monopropellant[J]. Combustion and Flame, 2020, **221**:64-73.

[28] 杨猛,余涛,汤成龙,等.改性双基推进剂粉末自着火行为实验研究[J].西安交通大学学报,2023, **57**(4):22-28.
Yang M, Yu T, Tang C L, et al. Auto-ignition behaviors of the composite modified double base propellants[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2023, **57**(4): 22-28.

[29] Yang M, Liao C Y, Tang C L, et al. The auto-ignition behaviors of HMX/NC/NG stimulated by heating in a rapid compression machine[J]. Fuel, 2021, **288**: 119693.