

文章编号: 1003-1480 (2022) 02-0048-06

典型约束环境下HMX基温压炸药内爆释能特性

李凌峰¹, 韩秀凤², 沈飞¹, 贺元吉², 周涛¹

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065; 2. 中国人民解放军96901部队, 北京, 100094)

摘要: 为了探究一种高含铝奥克托今 (HMX) 基温压炸药 HA-1 在典型约束环境下的内爆炸释能特性, 在密闭爆炸罐和半密闭的大型双直角拐弯坑道内进行了内爆炸试验, 测量了冲击波超压和准静态超压的变化过程, 并以同等质量 TNT 的爆炸参量为参照, 分析了该温压炸药各个反应阶段的释能特性。结果表明: 在爆炸罐内, HA-1 爆炸后的准静态超压峰值约为 TNT 的 1.4 倍, 体现出了显著的热效应, 但冲击波效应并不明显; 在坑道中, 爆炸冲击波在壁面约束下不断反射汇聚, 尤其是经过坑道的拐角后, 由于拐角反射增强了局部区域的反射压力, 并提高了铝粉在局部空间内的浓度, 使得同一测点处的 HA-1 最大超压峰值和比冲量分别达到 TNT 的 1.7 倍和 1.2 倍。

关键词: 温压炸药; 爆炸罐; 准静态压力; 坑道; 拐角效应

中图分类号: TQ564 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.02.011

Internal Explosion Energy Release Characteristics of HMX-based Thermo-baric Explosive in Typical Confined Environment

LI Ling-feng¹, HAN Xiu-feng², SHEN Fei¹, HE Yuan-ji², ZHOU Tao¹

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065; 2. The 96901 Unit of the Chinese People's Liberation Army, Beijing, 100094)

Abstract: In order to explore internal explosion energy release characteristics of a high-aluminum HMX-based thermo-baric explosive HA-1 in typical confined environments, internal explosion tests were carried out in a closed explosion vessel and a semi-closed large double right-angle corner tunnel. The shock wave overpressure and quasi-static pressure history curves were measured, and with the explosion parameters of the equivalent mass TNT as a reference, the energy release characteristics in each reaction stage of the thermo-baric explosive were analyzed. The results show that: in the explosion vessel, the peak quasi-static overpressure of HA-1 reaches 1.4 times of TNT after explosion, which shows a significant thermal effect, while the wave effect is unobvious. In the tunnel, the shock wave is continuously reflected and converged under the constraints of the wall, especially after the shock wave passes through the corner of the tunnel, the reflection pressure and the concentration of the aluminum powders in the local space are enhanced due to the corner reflection, so that the maximum overpressure peak and specific impulse of HA-1 at the same measuring point reaches 1.7 times and 1.2 times of that of TNT respectively.

Key words: Thermo-baric explosive; Explosion vessel; Quasi-static pressure; Tunnel; Corner effect

温压炸药反应过程主要分为 3 个阶段^[1]: 主炸药爆轰反应、金属粉与爆轰产物无氧反应、未反应完的可燃产物和金属粉与空气中氧气发生有氧燃烧。一般

前 2 个阶段主要贡献冲击波能, 第 3 阶段贡献热效应^[2], 但在一些特殊环境下有所不同, 当金属粉的燃烧以足够的速度进行, 其释放的能量可以增强冲击波^[3]。

收稿日期: 2021-10-27

作者简介: 李凌峰 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事炸药爆轰性能试验及理论研究。

通讯作者: 周涛 (1979-), 男, 研究员, 主要从事爆炸毁伤及战斗部设计研究。

以含铝温压炸药为例,炸药在有限空间内爆炸时,结构约束会增强冲击波反射,抑制爆轰产物扩散,减少热损耗,导致铝粉浓度、与氧气混合程度以及高温高压环境发生变化,改变有氧燃烧反应程度,从而影响该阶段产生热能向冲击波能的转换。因而温压炸药在有限空间内的爆炸研究受到了国内外广泛关注。

李秀地等^[4-5]结合数值仿真和比例模型试验,研究了温压炸药在L型坑道内的传播规律并就冲击波衰减进行了几种不同坑道布局的优化改进。陈坤等^[6]结合爆炸罐内爆炸试验探究了铝粉粒径对于奥克托今基温压炸药的内爆参数影响。苟兵旺等^[7]在复杂坑道内进行了TNT和温压炸药的内爆试验,探究了冲击波的传播规律和爆炸效应参数的特性。Maiz L等^[8-9]基于半密闭结构内爆试验探究了压装和分层2种结构含铝炸药的内爆特性。Jiang C等^[10]探究了铝粉含量对CL-20基含铝温压炸药的内爆性能的影响。

当前的研究多是基于比例模型试验和仿真计算,试验药量较小,使用的模型结构较为简单,同时涉及到大型密闭和半密闭结构公斤级装药的内爆试验研究不多,且以探究冲击波传播规律和爆炸威力影响因素为主,对于温压炸药的内爆释能特性研究不多。本次研究选用了大型爆炸罐和双直角拐弯坑道2种典型受限工况,采用LS-DYNA软件对冲击波在2种结构内的演变规律进行了仿真计算,选取了一种含铝量高、有氧燃烧阶段占比大的温压炸药HA-1在2种结构内进行了公斤级装药的内爆试验,以等质量TNT试验进行对比,探究了该温压炸药的内爆释能特性。

1 爆炸罐内爆特性研究

1.1 试验环境及爆炸流场分析

试验装置选用大型密闭抗爆爆炸罐,主体为胶囊形,内径为2.6m,圆柱部分长3.2m,体积约为25m³,密封性能好,抗爆当量为5kgTNT,罐体中心壁面均匀分布有4个法兰盘,可用于安装传感器等测量装置。为探究爆炸冲击波在爆炸罐结构内的演变规律,考虑TNT爆炸仿真技术较为成熟,利用LS-DYNA软件对

2kgTNT炸药在爆炸罐内爆炸进行数值仿真。5ms时间内不同时刻罐内压力流场状态如图2所示。



图1 密闭爆炸罐

Fig.1 Confined explosion vessel

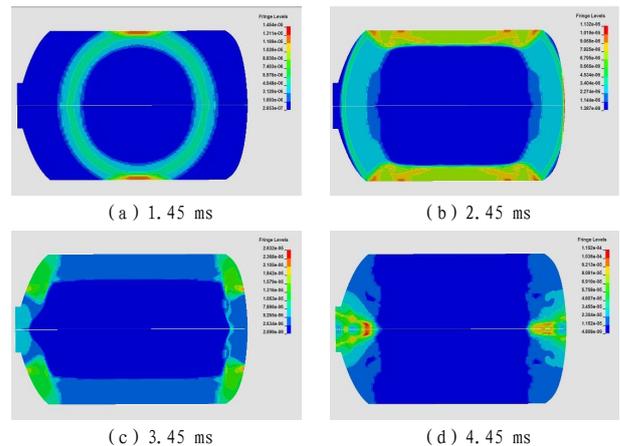


图2 不同时刻爆炸罐内压力云图

Fig.2 Pressure nephogram in explosion vessel at different times

由图2可以看出:初期,冲击波从爆心开始向外以球面波形式扩展,到达罐壁后,在初始接触位置形成正规反射,冲击波汇聚形成高压集中区。一段时间,罐体四周壁面附近形成较均匀的高压场,再经过反射和叠加后汇聚在罐体的前后壁面,继而在罐体轴线前后附近汇聚。在5ms时间内,冲击波在爆炸罐内刚好完成1次爆心-周围壁面-前后壁面-轴线-爆心循环汇聚传播路径,该仿真结果再现了爆炸罐内流场完整演变规律,装药质量设计选用较为合理。

1.2 试验样品及布置

本次试验样品由主药柱、扩爆药柱和雷管组成,主药柱为2kg的HA-1和TNT,其中HA-1组分为53%HMX、35%铝粉和12%黏结剂等其他材料。均采用长径比约为1:1的柱形装药形式。扩爆药柱为Φ25mm×25mm的JH-14药柱,单发装药质量为20g,中心带有雷管孔,粘结在柱形装药的端面,采用军用

8#电雷管引爆。试验装置及布局如图 3 所示,在相对的 2 个法兰盘上各安装 1 个 PCB 压力传感器,1 个压阻式准静态压力传感器,分别用于测量正反射冲击波超压、准静态压力,传感器测量平面距离爆心 1.2 m。为减小爆轰不均匀性带来的测量误差,2 个法兰盘上所装传感参数相同,处理数据时对 2 个测点的测试结果进行平均处理,所有传感器的输出信号均经过信号适调器进行放大。

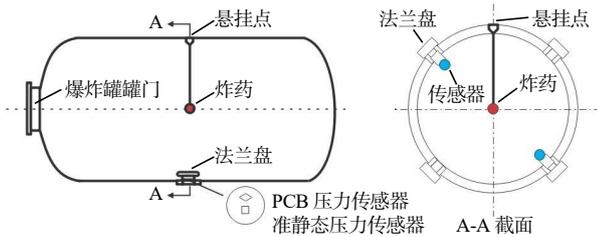


图 3 爆炸罐内爆试验装置及布局

Fig.3 Device and layout for implode test in the explosion vessel

1.3 试验结果分析

试验测得冲击波超压、准静态超压时程曲线,见图 4。其中,图 4(b)中蓝色曲线为仿真结果,表示爆炸罐内同位置测点处的超压时程曲线。处理得到相关参数见表 1。

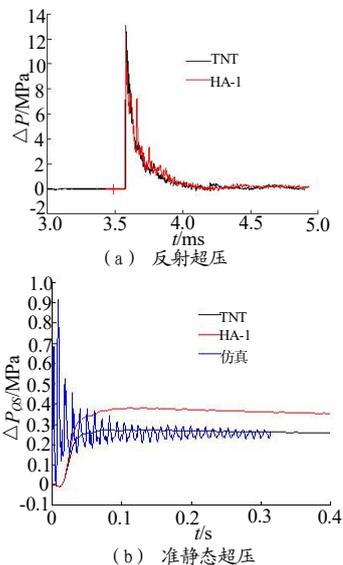


图 4 超压和准静态超压时程曲线

Fig.4 Overpressure and quasi-static overpressure time history curve

表 1 爆炸罐内爆结果参数

Tab.1 Result parameters of the implode in explosion vessel

炸药	冲击波超压 $\Delta P_{\max}/\text{MPa}$	比冲量 $I/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	准静态超压 $\Delta P_{\text{QS,max}}/\text{MPa}$
TNT	13.06	1 100	0.275
HA-1	12.40	1 240	0.381

由图 4(b)可见:仿真所得曲线在经历过初始短

脉冲高压阶段后,逐渐趋于平衡,与试验测得的准静态超压曲线趋势吻合,表明该仿真能够较为准确地描述 TNT 等单质炸药爆炸罐内的冲击波流场演变规律,可为温压炸药内爆释能特性分析提供参考。

由表 1 可见:HA-1 和 TNT 的冲击波超压和比冲量差异较小,分析认为该阶段冲击波效应来源于无氧反应阶段的释能^[1],HA-1 中含有 HMX,能量密度相比 TNT 更高但含量较低,因而两者冲击波参数差异不大。对于准静态超压,HA-1 显著高于 TNT,峰值达到了 TNT 的 1.4 倍。在体积恒定情况下,结合克拉伯龙方程,准静态超压 ΔP_{QS} 可以表达^[12]为:

$$\Delta P_{\text{QS}} = \frac{mR}{\mu V} \cdot \Delta T \quad (1)$$

式(1)中, ΔT 为温度变化量, K; V 为体积, m^3 ; m 为质量, g; μ 为摩尔质量, g/mol; R 为气体常数, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

由式(1)可知:准静态超压的提升不仅由于爆炸后产生了大量气体,同时也和温度升高有关。对于温压炸药爆炸,反应阶段引起气体含量变化不大,故其准静态超压主要由爆炸反应的有氧燃烧阶段产生的热量决定^[1]。密闭罐体中体积固定的前提下,准静态超压能够反映出炸药释放的总能量^[13],因此 HA-1 相比于 TNT 具有更高的能量密度,有氧燃烧阶段能够释放出更多能量。

试验结果显示,冲击波在爆炸罐内发生多次反射汇聚,引起波前、波后压力差的快速衰减,一段时间后压力趋向均匀^[14]。TNT 作为负氧炸药,未反应完的碳、一氧化碳等与氧气反应,而温压炸药中还有大量铝粉参与有氧燃烧,且密闭罐体反射会使铝粉等与氧气充分混合,促进有氧燃烧释放出更多能量,体现出更强的热效应,因而 HA-1 相比于 TNT 具有更高的准静态超压。密闭爆炸罐环境下,温压炸药释能主要以热效应为主,没有体现出显著的冲击波效应。

2 坑道内爆特性研究

2.1 试验环境及爆炸流场分析

试验选在大型双直角拐弯坑道内进行,坑道为钢筋混凝土浇筑结构,内壁面覆有厚钢板,抗爆能力强,

内部结构如图 5 所示。为探究爆炸冲击波在坑道结构内的演变规律,利用 LS-DYNA 软件对 1kg TNT 在坑道内爆炸进行数值仿真。结合坑道尺寸和冲击波传播速度,设置计算时间 40ms,运行得到仿真结果。图 6 为不同时刻坑道内压力流场状态。



图 5 坑道内部结构

Fig.5 Internal structure of the tunnel

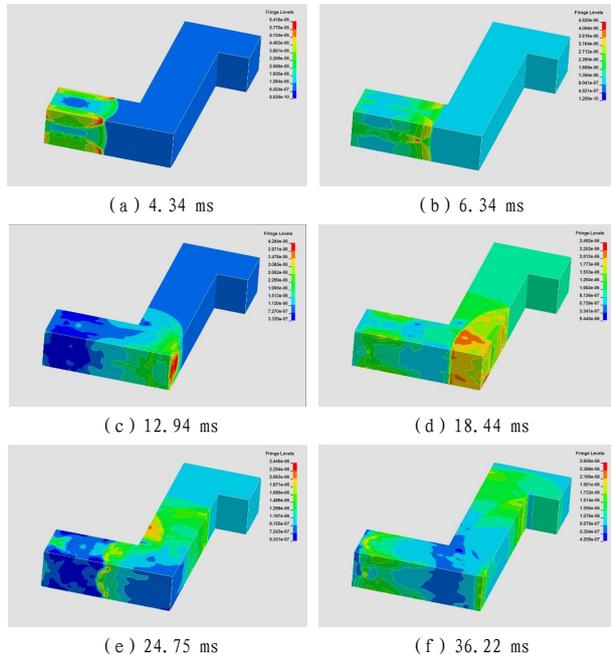


图 6 不同时刻坑道内压力云图
Fig.6 Pressure nephogram in tunnel at different times

由图 6 可见,炸药爆炸后,冲击波以球面波形式向外扩展,在壁面拐角汇聚,叠加向前传播。一段距离后,入射冲击波和地面、壁面反射冲击波在达到一定夹角条件时叠加形成马赫波,逐渐以较为稳定的平面波形式向前传播。到达第 1 个拐角时,在内拐角处冲击波由于绕射形成低压集中区,同时在外拐角处汇聚形成高压集中区,继而经过拐角壁面反射向两侧扩散传播,部分冲击波向主坑道深处传播,部分冲击波折回坑道口传播。随后,一部分冲击波在坑道内拐角前一段距离处汇聚,另外一部分冲击波继续向前传

播,在第 1 个拐角处折回向坑道口传播的冲击波也逐渐形成了稳定的平面波。传播至第 2 个拐角时,同样在内拐角处绕射形成低压集中区。

压力流场表明:坑道内冲击波传播规律复杂,由于壁面约束,冲击波会产生复杂反射叠加,在不同测点处产生多个超压峰值。冲击波经过拐角时产生反射,由于角隅汇聚,压力陡增会形成较大范围的压力集中区。该仿真结果再现了坑道内流场完整演变规律,装药质量设计选用较为合理。

2.2 试验样品及布置

试验样品选用 1 kg 的 HA-1 温压炸药和 TNT 炸药,装药结构与起爆方式等与爆炸罐试验相同。坑道尺寸及试验现场布置如图 7 所示,炸药悬挂在距离坑道口 1.5m, 距离地面 1.2m 高度处,位于坑道中轴线上。在与炸药等高位置的坑道中轴线不同位置处安装 3 个量程精度合适的 PCB 压力传感器,测量坑道内的冲击波入射超压。

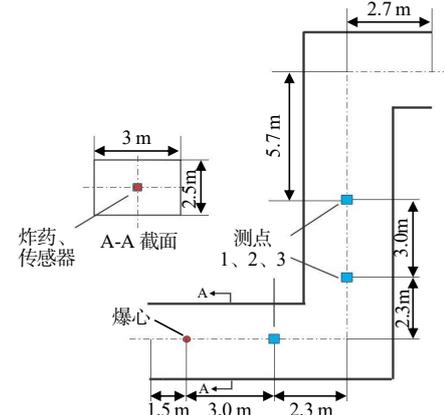


图 7 坑道结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of the tunnel structure

2.3 试验结果分析

试验测量及仿真计算所得 HA-1 和 TNT 内爆炸在不同测点处的冲击波超压时程曲线如图 8 所示,蓝色曲线为仿真计算结果。最大超压峰值和计算得到的比冲量见表 2,其中测量 HA-1 温压炸药时,测点 1 的传感器线被破坏,导致其后半部分曲线丢失,从而无法计算其正超压冲量。

对比 TNT 炸药内爆仿真及试验结果,在测点 2 与测点 3 处,试验测量值与仿真计算结果基本吻合,测点 1 处由于距离爆心较近,传感器近场测量不准,结果略有偏差。同时仿真计算过程没有考虑壁面粘滞

和热损耗等效应，因此计算结果较试验测量值偏高。综合来看，该仿真结果能够较为准确地描述坑道内冲击波流场演变规律。对比 HA-1 与 TNT 试验结果，同一测点处，HA-1 温压炸药与 TNT 炸药冲击波超压时程曲线趋势基本一致，由于坑道内壁和拐角约束冲击波发生多次反射叠加，出现了多个峰值。相比于 TNT，HA-1 的最大超压峰值与比冲量均显著偏高，最高分别达到了 TNT 的 1.7 倍与 1.2 倍。

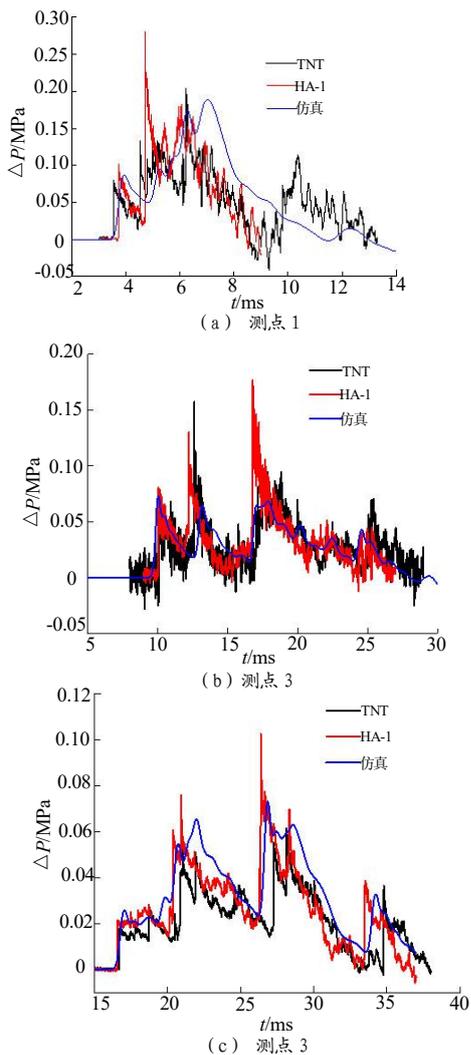


图8 不同测点位置处 HA-1 与 TNT 超压时程曲线

Fig.8 Overpressure time history curve of the thermo-baric explosive HA-1 and TNT explosive at different measuring positions

表2 坑道内爆冲击波超压峰值及比冲量

Tab.2 Peak overpressure and specific impulse of shock wave of the implode in tunnel

测点	TNT		HA-1	
	冲击波超压 $\Delta P_{\text{max}}/\text{MPa}$	比冲量 $I/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	冲击波超压 $\Delta P_{\text{max}}/\text{MPa}$	比冲量 $I/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
1	0.204	513	0.280	-
2	0.158	581	0.177	589
3	0.061	460	0.102	562

结合冲击波演变流场仿真结果及到达时间分析，冲击波经由第 1 个拐角前，HA-1 与 TNT 超压值相差不大，而在经过弯道拐角反射后，不同测点处 HA-1 出现最大超压峰值，且均显著高于 TNT。

直坑道内爆炸冲击波传播超压经验公式^[15]为：

$$\Delta P = 0.194 \cdot \left(\frac{L \cdot S}{Q} \right)^{1/3} + 0.405 \cdot \left(\frac{L \cdot S}{Q} \right)^{2/3} + 1.383 \cdot \left(\frac{L \cdot S}{Q} \right)^{-1} \quad (2)$$

式(2)中： ΔP 为超压，MPa； L 为测点爆心距，m； S 为坑道截面积， m^2 ； Q 为炸药 TNT 当量，kg。

将 HA-1 温压炸药参数和相关结构尺寸数据代入，求得对应 3.0m、7.6m 爆心距处超压为 0.289MPa 和 0.155MPa，对应试验相同爆心距处测点 1、2。对比可见：测点 1 处超压相差不大，测点 2 处试验结果显著高于直坑道超压理论计算值，说明拐角对于冲击波有增强效果。分析认为拐角的反射作用使得铝粉发生聚集、浓度增大，与氧气充分混合，增强了有氧燃烧反应，促进热效应转换为冲击波能，冲击波能量得到补充，从而体现出更高的冲击波超压。半密闭坑道环境中，温压炸药能量释放转换为冲击波能，冲击波得到显著增强。

3 结论

本文选用一种高含铝温压炸药 HA-1，以等量 TNT 炸药作为对比，在大型密闭爆炸罐和双直角拐弯坑道内进行内爆试验，得到下列结论：

(1) 密闭爆炸罐中，冲击波在罐体内经过不断反射叠加，一段时间后达到平衡。试验结果显示，相比于 TNT，HA-1 冲击波超压峰值略低，但由于壁面约束有氧燃烧反应充分进行，其准静态超压达到了 TNT 的 1.4 倍，在密闭环境内体现出显著热效应。

(2) 半密闭坑道中，冲击波传播规律复杂，由于壁面约束反射及角隅汇聚等作用，在各个测点处炸药冲击波超压曲线出现多个峰值，铝粉爆炸后随爆轰产物传播与空气中的氧气充分混合，在经过拐角反射后，局部区域铝粉浓度增大，有氧燃烧反应得到增强，促进热效应转换为冲击波能，从而增强冲击波，同一测点处的 HA-1 最大超压峰值和比冲量分别达到 TNT 的 1.7 倍和 1.2 倍，在半密闭环境内体现出显著的冲

击波效应。

参考文献:

- [1] Hahma A, Palovuori K, Solomon Y. TNT-equivalency of thermo-baric explosives[C]/36th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, Germany:ICT,2005.
- [2] Türker L. Thermo-baric and enhanced blast explosives (TBX and EBX)[J]. Defence Technology, 2016(12): 423-445.
- [3] Trzciniński WA, Maiz L. Thermo-baric and enhanced blast explosives-properties and testing methods[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015(40): 632-644.
- [4] 李秀地,方浩,耿振刚,等.温压炸药冲击波在 L 形坑道内的传播规律与衰减优化研究[J].防护工程, 2017, 39(3): 33-38.
- [5] 李秀地,耿振刚,苗朝阳,等.温压炸药与 TNT 坑道内爆炸冲击波的对比研究[J].防护工程, 2016, 38(5): 30-35.
- [6] 陈坤,肖伟,韩志伟,等. 铝粉粒径对 HMX 基温压炸药在密闭空间爆炸参数的影响[J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 298-302.
- [7] 苟兵旺,李芝绒,闫潇敏,等. 复杂坑道内温压炸药冲击波效应试验研究[J]. 火工品, 2014, 4(2): 41-45.
- [8] Maiz L, Trzciniński WA, Paszula J. Semi-closed investigations of new aluminized thermo-baric and enhanced blast composites[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics., 2017(42): 1-8.
- [9] Maiz L, Trzciniński WA, Paszula J. Optical spectroscopy to study confined and semi-closed explosions of homogeneous and composite charges[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017(88): 111-119.
- [10] Jiang C, Lu G, Mao L, et al. Effects of aluminum content on the energy output characteristics of CL-20-based aluminized explosives in a closed vessel[J]. Shock Waves, 2021(31): 141-151.
- [11] 张广华,屈可朋,沈飞,等.组合装药的撞击安全性与内爆威力试验研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 175-181.
- [12] 王辉,沈飞,李彪彪,等.含金属-氟聚物包覆层装药的内爆性能试验研究[J].火炸药学报, 2019, 42(6): 626-630.
- [13] 胡宏伟,肖川,李丽,等.有限空间炸药装药内爆威力的评估方法综述[J].火炸药学报, 2013, 36(4): 1-6.
- [14] 张舵,姚术健,黄河,等.箱型结构内部爆炸破坏研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 18-32.
- [15] 张玉磊,王胜强,袁建飞,等.方形坑道内爆炸冲击波传播规律[J].含能材料, 2020, 28(1): 46-51.