

文章编号: 1006-9941(XXXX)XX-0001-11

叠层复合装药爆炸过程中铝粉分布及后燃释能特性

沈飞^{1,2}, 王媛婧³, 王奕鑫¹, 王煊军²

(1. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025; 3. 北京理工大学机电学院, 北京 100081)

摘要: 为探究叠层复合装药结构对铝粉后燃烧释能过程的影响规律, 采用爆速差约 $1.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高爆速炸药及温压炸药制备成层厚相同的叠层复合装药, 通过自由空间爆炸实验及密闭空间内爆炸实验分别研究了火球演变过程、不同气体环境下各反应阶段产生的机械能, 并结合数值仿真分析了爆炸过程中的铝粉分布特性。结果表明: 该叠层复合装药中温压炸药受到高爆速炸药的轴向挤压, 加快了爆轰产物及铝粉的径向扩散速率, 将铝粉云团的平均浓度降低约至温压型均匀装药的 60%~80%, 尾部区域仅约为 50%, 致使铝粉的无氧燃烧速率及输出的机械能降低; 温压炸药在爆轰和无氧燃烧阶段产生的机械能之和约为温压型均匀装药的 81%, 但有氧燃烧阶段产生的机械能显著增加, 使其产生的机械能总量未显著改变, 叠层复合装药结构通过调整铝粉的空间分布, 可在不损失装药总能量的前提下, 有效调节温压炸药在不同阶段的后燃反应及释能过程。

关键词: 叠层复合装药; 温压炸药; 铝粉; 浓度; 后燃烧; 能量

中图分类号: TJ55; O389

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024221

0 引言

温压炸药具有爆炸和燃烧 2 种释能方式。高热值铝粉的燃烧过程滞后于炸药组分的爆炸过程, 也称其为后燃烧, 该过程能增加温压炸药释放的总能量, 延长冲击波压力的作用时间, 提升热毁伤的强度及作用范围, 它的燃烧速率及反应完全性易受炸药爆轰强度、铝粉活性及空间分布特性、反应场温度和压力条件等多种因素的显著影响, 是优化或调控温压炸药释能特性的重要关注点之一^[1-3]。

铝粉后燃烧过程包括 2 个阶段, 即铝粉与气体爆轰产物之间发生的无氧燃烧阶段, 铝粉等物质与空气混合后发生的有氧燃烧阶段。这两个阶段的反应速率及能量转换特性差异较大, 无氧燃烧可增强冲击波能, 有氧燃烧可提高爆炸场的温度, 增强温压效应^[1-2]。为了能有效调控后燃烧阶段的释能过程, 国内外研究人

员在温压炸药配方设计方面开展了大量研究, 如加入六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)、3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)等第三代单质炸药提升温压炸药的爆轰猛度, 增强对铝粉反应的激发强度^[3-5]; 通过加入活性铝粉、优化铝粉颗粒级配等措施, 降低铝粉的点火温度阈值, 提升铝粉反应的连续性等^[3,6-7]。这些措施虽已取得较好的效果, 但对于配方已定型的温压炸药, 为了使其更广泛地满足不同种类温压弹药的毁伤性能需求, 还需要通过装药结构的优化进一步调控其释能特性。

由 2 种不同爆速或作功能力的炸药构成复合装药, 是调节炸药装药释能特性较为典型的设计思路之一, 但其结构形式目前主要局限于同轴复合装药结构, 如具有冲击分散效果的同轴复合装药, 其内层为高爆速炸药, 外层为温压炸药或燃料, 该装药爆炸时可扩大铝粉或燃料的分布空间, 并促进其与空气混合, 从而增大火球, 提高铝粉有氧燃烧速率^[5,8-11]。虽然同轴复合装药结构在一些工况中的调节效果显著, 且制备工艺简单, 但该结构中, 高爆速炸药主要通过滑移式侧向激发温压炸药, 难以高效发挥其高猛度、强激发能量的优势, 因此, 研究人员提出采用叠层复合装药结构(即高爆速炸药与温压炸药叠层设置)调节能量释放过

收稿日期: 2024-08-25; 修回日期: 2024-09-19

网络出版日期: 2024-10-25

作者简介: 沈飞(1983-), 男, 博士, 研究员, 主要从事炸药爆轰性能及安全性方面的研究。e-mail: shenf02@163.com

通信联系人: 王煊军(1965-), 男, 博士, 教授, 主要特种能源理论与应用方面的研究。e-mail: wangxj503@sina.com

引用本文: 沈飞, 王媛婧, 王奕鑫, 等. 叠层复合装药爆炸过程中铝粉分布及后燃释能特性[J]. 含能材料, DOI:10.11943/CJEM2024221.

SHEN Fei, WANG Yuan-jing, WANG Yi-xin, et al. Characteristics of Spatial Distribution of Aluminum Powder and Afterburning Energy Release During the Explosion Process of Laminated Composite Charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), DOI:10.11943/CJEM2024221.

程^[12-13]。虽然叠层复合装药中,2种炸药的交界面与爆轰波传播方向、产物初始运动方向近似垂直,温压炸药受到高爆速炸药的正向冲击,激发压力更高,有利于提升铝粉反应的温度和压力环境,但由于这2种炸药的爆轰产物在膨胀过程中存在复杂的相互作用过程^[13],导致铝粉的空间分布特性不明,从而影响铝粉后燃阶段的释能过程,且这方面研究目前鲜见报导,使得叠层复合装药的优化设计缺乏充分的依据。随着含能材料3D打印技术^[14]的迅速发展,叠层复合装药的工艺难度大幅降低,若能深入挖掘其在温压类装药释能调控方面的优势,则会具有非常广泛的应用前景。

鉴于此,本研究采用具有显著爆速差的DNTF基高爆速炸药与温压炸药,制备成叠层复合装药,通过自由空间爆炸实验和不同气体环境的密闭空间内爆炸实验,分析了叠层复合装药爆炸时铝粉动态扩散过程及后燃阶段的能量释放特性,并结合数值仿真,获取了铝粉在不同空间区域的浓度变化规律,为温压型复合装药释能特性调控及装药结构优化设计提供参考。

1 试验部分

1.1 试验样品

选用代号为DH和DHUA两种熔铸炸药,其中,DH炸药为DNTF基高爆速炸药,其组分为DNTF、奥克托今(HMX)和钝感剂,密度为 $1.83\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速为 $8.72\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,爆热为 $5.76\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$;DHUA炸药温压炸药,其组分为DNTF、HMX、高氯酸铵(AP)、铝粉(Al)、钝感剂,铝粉的质量比例为35%,密度为 $1.84\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,爆速为 $6.90\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,爆热为 $8.13\text{ kJ}\cdot\text{g}^{-1}$ 。两种炸药的爆速约相差 $1.8\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,DH作为激发源,制备叠层复合装药时,应尽量减小其质量比例,本研究为了避免DH炸药的厚度太小而影响其爆轰过程,则将两种炸药均制备成 $\Phi 30\times 7.7\text{ mm}$ 的药柱,然后交替叠层制备成质量为40 g的复合装药(Laminated Composite Charge,以下采用LCC为其代号),且起爆端第一层药柱为爆速较高的DH炸药。同时,为了便于对比,还将DH和DHUA两种炸药分别制成尺寸约为 $\Phi 30\times 31\text{ mm}$ 、质量为40g的药柱,下面将其简称为均匀装药。为了能使各类试样均能可靠起爆,在装药上端面粘接 $\Phi 8\times 5\text{ mm}$ 的RDX基扩爆药(质量约为0.4 g)及一个塑料材质的雷管安装座。

1.2 仪器与装置

试验用爆炸罐为自行设计,其内部空间尺寸为

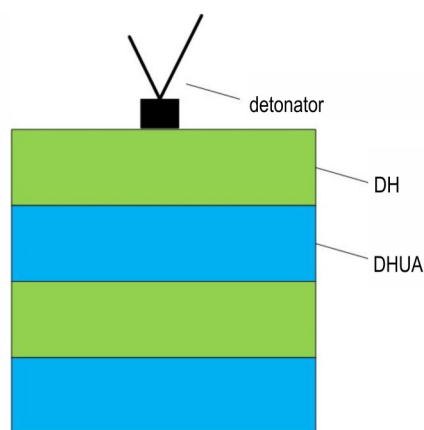


图1 LCC装药示意图

Fig.1 Schematic diagram of laminated composite charge(LCC)

$\Phi 600\times 1000\text{ mm}$,体积约为 0.283 m^3 ,罐体具备抽真空、充气等功能;罐体左右两侧分别设置了多个传感器安装通道,罐体上端中心处设置药柱悬挂装置。

试验中采用的冲击波超压传感器为美国PCB公司生产的113B22型压电式压力传感器,上升时间小于 $1\text{ }\mu\text{s}$,最大量程 34.5 MPa 。准静态压力测试装置由CYG 1402型压阻式压力传感器及其前端的螺旋通道滤波结构组成,该传感器为昆山双桥传感器测控技术有限公司生产,测量精度0.5级,最大量程 4 MPa ,上升时间小于 $1\text{ }\mu\text{s}$;螺旋通道滤波结构内的螺旋杆长度为 30 mm ,其孔隙通道的截面尺寸为 $2\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}$ ^[5]。采用文献[15]中的激波管检测方法发现,该准静态压力测试装置在峰值 1.2 MPa 、持续时间约 2 ms 的平台压力作用下,其压力上升时间为 0.15 ms 。试验采用的超高速摄像机为英国SI公司生产的Kirana 05M超高速摄像机,最大拍摄频率为 $5\times 10^6\text{ fps}$ 。

1.3 试验方法

本研究中涉及2种试验,包括自由空间下的爆炸实验和密闭空间内的爆炸实验。自由空间下的爆炸实验是采用超高速摄像机观测自由空间下装药样品的爆炸过程。试验前,将装药样品竖直悬挂在自由空间,起爆点位于装药上端,装药中心距离地面 1.5 m ,以减弱地面反射的冲击波对爆炸火球的影响;超高速摄像机的摄影频率设置为 10^6 fps 。由于该试验主要是获取铝粉的后燃烧过程,因此,该试验仅选用DHUA均匀装药和LCC装药。

密闭空间内的爆炸实验在爆炸罐内进行,试验前,在罐体左右两侧的壁面上各安装1个冲击波超压传感器及1个准静态压力测试装置,药柱轴线处于竖直方向,并悬挂在罐体中心位置处,起爆点位于药柱

上端面,试验布局如图2所示。内爆炸试验环境分为常压下空气环境及氮气环境两种工况。空气环境下,装药的爆炸过程包括爆轰、铝粉无氧燃烧及有氧燃烧三个反应阶段,而氮气环境下铝粉不会发生有氧燃烧,因此通过对比两种工况的试验结果,可区分出铝粉无氧燃烧和有氧燃烧两个阶段释放的能量。开展氮气环境内爆炸试验时,首先利用真空泵将罐体内的气压降低至10 kPa以下,然后缓慢充入氮气,直至罐体内的气压恢复至常压状态。试验时,冲击波超压信号及准静态压力信号的数据采样率分别设置为 $1\text{ MS}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $100\text{ kS}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

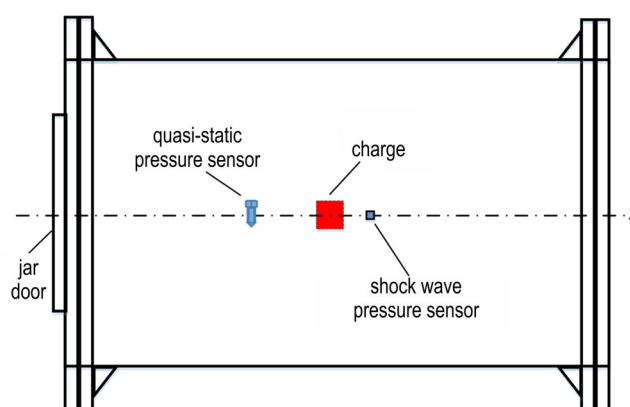


图2 内爆炸试验装置及布局

Fig.2 Test device and layout of internal explosion

2 试验结果及分析

2.1 自由空间下爆炸火球演变过程

图3显示了自由空间下DHUA均匀装药及LCC

装药爆炸火球的演变过程。爆炸火球是气体爆轰产物和铝粉扩散过程最直接的反映,其亮度、持续时间一定程度上能反映出铝粉燃烧的剧烈程度。虽然爆炸初期,气体产物的火光与铝粉燃烧的火光紧密融合,但两者的持续时间差距较大,气体产物的火光持续时间较短,其湮灭后,可定性分析铝粉云团的轮廓特征。

从图3可以看出,LCC装药的爆炸火球在 $60\text{ }\mu\text{s}$ 时已显现出明显的分层迹象,且在 $90\text{ }\mu\text{s}$ 时最为显著。处于第一层和第三层的DH炸药不含铝粉,其产物的火光快速湮灭;处于第二层的DHUA炸药,其铝粉燃烧火焰在 $120\text{ }\mu\text{s}$ 时已基本湮灭,明显早于DHUA均匀装药;处于第四层的DHUA炸药,由于其下方没有约束,导致其火球的扩展过程与DHUA均匀装药非常相似,仅有部分区域的火球受到影响而提前湮灭。因此,处于第二层的DHUA炸药受复合装药结构的影响更为显著。分析第二层炸药的受力过程可以发现,在爆炸初期,由于其上、下层的DH炸药具有较高的爆轰压力,该DHUA炸药受到上下两端的轴向挤压,导致其爆轰产物侧向膨胀加剧,且铝粉侧向扩散加速,进而可能改变铝粉的空间分布浓度,影响铝粉的后燃烧速率;而处于第四层的DHUA炸药仅受到上端DH炸药高压产物的挤压,对产物和铝粉径向扩散速率的影响相对较小。在爆炸中后期,由于DH炸药不含铝粉,其压力下降速率快,则会向DHUA炸药的爆轰产物提前传递稀疏波,如图4所示,从而会降低DHUA炸药附近区域的温度和压力,其中,受稀疏波影响最明显的是处于第二层的DHUA炸药,进一步影响了其

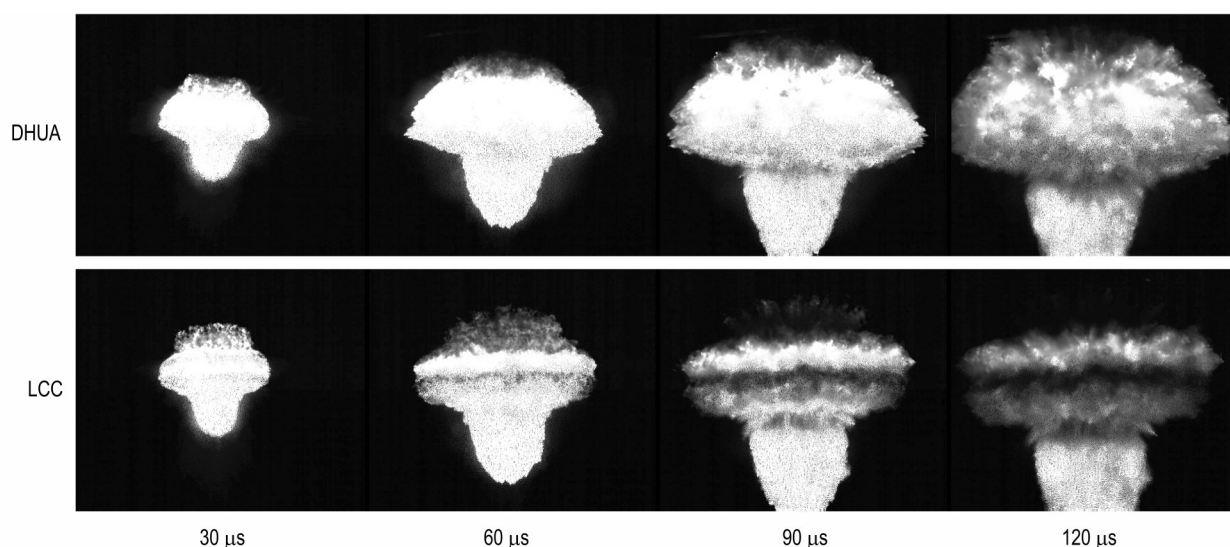


图3 装药爆炸火球的演变过程

Fig.3 Fireball evolution of explosive charges

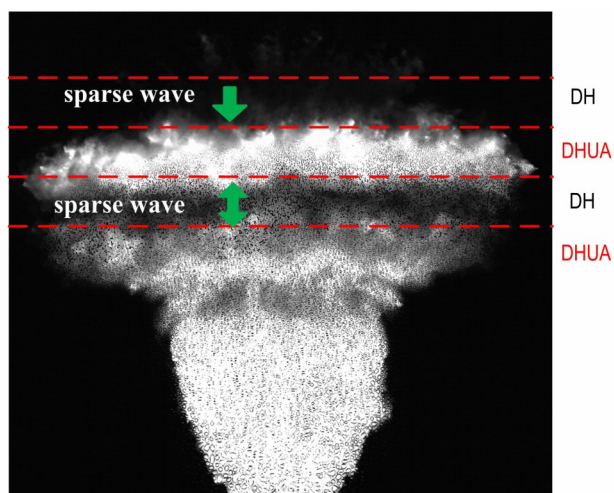


图4 叠层复合装药爆炸火球膨胀 90 μs 时的照片

Fig.4 Photograph of the laminated composite charge fireball at 90 μs post-expansion

铝粉燃烧速率,导致其火球湮灭较早。然而,爆炸火球的演变过程不能量化出铝粉的空间分布规律,尤其是浓度等特征量值,还需要结合数值仿真方法对其进一步分析。

2.3 密闭空间内爆炸试验结果

图5显示了3种装药在空气和氮气环境下的冲击波超压 Δp 随时间变化的曲线,为了便于对比,将每个图片中的三条超压曲线沿时间轴适当平移,使相邻曲线的起跳点约间隔2 ms。由图5可以发现,对于同一种装药,空气和氮气环境下的冲击波超压曲线在首个峰值段的差异较小,主要差异体现在二次甚至三次反射冲击波。由于DH均匀装药中不含铝粉,气体环境对其影响较小,因此,可将其冲击波超压曲线作为基准,对比DHUA均匀装药和LCC装药超压曲线的变化。空气环境下,如图5a所示,DHUA均匀装药和LCC装药的后续反射冲击波的超压明显高于DH均匀装药,且每次反射的间隔时间更短,而氮气环境下,如图5b所示,这2种装药的反射冲击波的超压已与DH均匀装药非常相近,这说明铝粉的有氧燃烧对于后续冲击波的传播有明显影响。

图6显示了空气和氮气环境下3种装药的准静态压力 Δp_{qs} 随时间变化的曲线。滤波结构虽然屏蔽了冲击波的高频扰动,但准静态压力曲线仍存在一定的

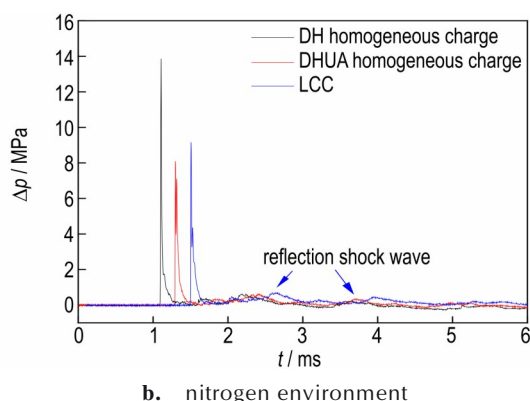
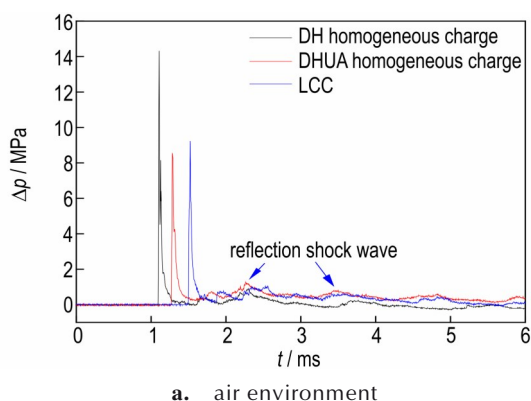


图5 空气和氮气环境下的冲击波超压曲线

Fig.5 Overpressure curves of shock wave in air and nitrogen environments

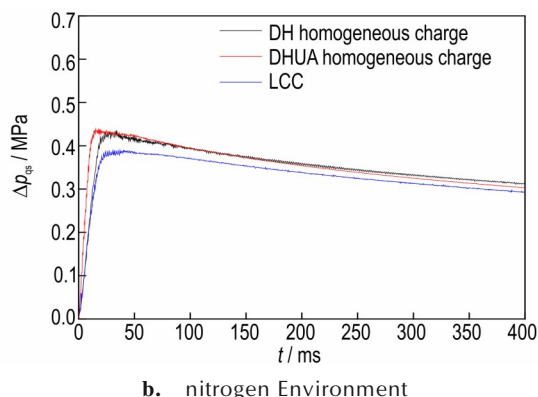
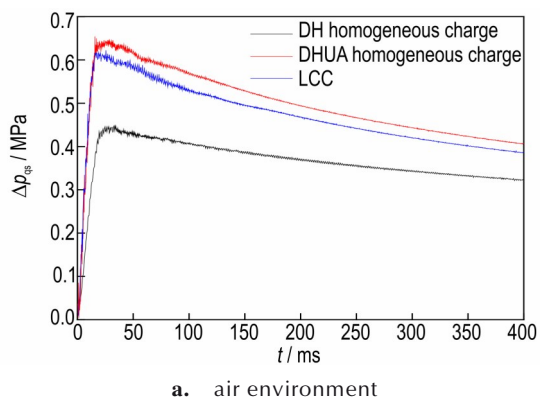


图6 空气和氮气环境下的准静态压力曲线

Fig.6 Quasi-static pressure curves in air and nitrogen environments

噪声干扰,这是螺旋杆内部气体的小幅振荡所致,因此在数据处理时采用了多点平均降噪法^[16],即每个数据点的前后各选择50个相邻数据点进行平均处理。在空气环境下,如图6a所示,3种装药的准静态压力曲线上升速率相近,在20~30 ms时准静态压力已上升至峰值,呈现出含铝量越高,准静态压力峰值越大的趋势;随着作用时间的延长,罐体逐步吸收内部气体的热量,导致准静态压力曲线缓慢下降,其中,2种含铝装药的准静态压力下降速率近乎一致,且明显高于DH均匀装药。在氮气环境下,如图6b所示,DH均匀装药的峰值略低于空气环境,但2种含铝装药的峰值大幅降低,其中,DHUA均匀装药的峰值已与DH均匀装药相近,LCC装药的峰值甚至更低。

由于峰值是不同装药爆炸冲击波超压和准静态压力的主要特征,因此,表1列出了空气和氮气环境下3种装药的冲击波超压峰值 Δp_m 及准静态压力峰值 $(\Delta p_{qs})_m$,所有数值均为两个同类传感器所获结果的平均值。

表1 空气和氮气环境下的各物理量的峰值

Table 1 Peak values for various physical quantities in air and nitrogen environments

charge	$\Delta p_m / \text{MPa}$		$(\Delta p_{qs})_m / \text{MPa}$	
	Air	N ₂	Air	N ₂
DH	14.32	13.86	0.442	0.428
DHUA	8.56	8.06	0.638	0.430
LCC	9.24	9.16	0.538	0.388

Note: DH and DHUA both refer to homogeneous charges with the same mass. Δp_m and $(\Delta p_{qs})_m$ represent the peak of overpressure and quasi-static pressure respectively.

从表1可以看出,空气环境下,3种装药的冲击波超压峰值 Δp_m 均略高于氮气环境,而准静态压力峰值 $(\Delta p_{qs})_m$ 与氮气环境下的差异最为显著。DH均匀装药不含铝粉,能量主要在爆轰阶段释放,受气体环境的影响较小,则不同气体环境下的 $(\Delta p_{qs})_m$ 差异较小;DHUA均匀装药在氮气环境下的 $(\Delta p_{qs})_m$ 仅为空气环境下的67.4%;LCC装药在空气环境下的 $(\Delta p_{qs})_m$ 值处于两种均匀装药之间,但氮气环境下的压力峰值却低于两种均匀装药,这表明叠层复合结构改变了DHUA温压炸药原有的释能规律,下面从爆炸机械能转换的角度对此进一步分析。

2.4 爆炸产生的机械能

准静态压力是冲击波作用后的动能及热作用后的

势能共同累积的一种表征,可反映出爆炸后,密闭空间内气体的能量密度^[1,17],且准静态压力峰值与装药能量存在以下关系^[17],

$$(\Delta p_{qs})_m \approx \frac{m}{V} (\gamma - 1) Q \quad (1)$$

式中, m 为装药的质量,kg; V 为罐体内的空间体积, m^3 ; γ 为爆炸后罐体内气体的绝热指数; Q 为单位质量装药爆炸释放的总能量,即爆热值, $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。结合罐体内的空间体积及装药质量,可由 $(\Delta p_{qs})_m$ 计算出单位质量装药爆炸转换的机械能 E ^[18],即

$$E = (\Delta p_{qs})_m \cdot V / m \approx (\gamma - 1) Q \quad (2)$$

式中, E 也是单位质量装药通过冲击波作用、热膨胀作用共同转换的能量,是可有效做功的能量, $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$;而 $(\gamma - 1)$ 反映出爆炸过程中的机械能转换率,可由爆热和机械能量值计算获得。

为了便于区分各反应阶段产生的机械能,将其表示为

$$E_{\text{tot}} = E_1 + E_2 + E_3 \quad (3)$$

式中, E_{tot} 为单位质量装药在三个反应阶段产生的总机械能, E_1 、 E_2 、 E_3 分别表示爆轰阶段、铝粉无氧燃烧阶段、铝粉等物质有氧燃烧阶段产生的机械能。由于测量过程中,爆轰阶段和铝粉无氧燃烧阶段常难以分开,可将这两阶段的机械能合并,即 $E_1 + E_2$;而氮气环境下,可假定 $E_3 \approx 0$ 。根据式(2)和式(3),可由表2中的 $(\Delta p_{qs})_m$ 值计算出各装药在不同反应阶段产生的机械能,并结合炸药爆热计算出不同环境下的机械能转换率 $(\gamma - 1)$,具体列于表2。此外,表2还列出了各炸药的爆热值 Q ,LCC装药的爆热取DH和DHUA两种炸药的平均值,即 $6.945 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

由于LCC装药中DH和DHUA炸药的质量比例均为50%,因此为便于对比,表2中增列出DH和DHUA均匀装药各物理量的平均值。表2中显示,LCC装药的 E_{tot} 接近两种均匀装药的平均值,但其 $E_1 + E_2$ 值却明显降低,氮气环境下的机械能转换率 $(\gamma - 1)_{\text{N}_2}$ 由0.44降至0.40,这反映出叠层复合装药结构使DH和DHUA炸药的能量释放过程发生了改变。LCC装药中这两种炸药的爆速值均接近各自的CJ爆速^[13],说明其爆轰阶段的能量未出现显著变化,且DH炸药不含铝粉,则LCC装药能量释放过程的改变应主要源于DHUA炸药铝粉后燃烧过程。由表3中LCC装药和DH均匀装药的机械能量值,可计算出LCC装药中单位质量DHUA炸药爆炸产生的机械能,结果显

表 2 爆炸产生的机械能及其转换率

Table 2 Mechanical energy and its conversion ratio in the explosion process

charge	$E_{\text{tot}} / \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	$E_1 + E_2 / \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	$E_3 / \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	$Q / \text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$	$(\gamma - 1)_{\text{air}}$	$(\gamma - 1)_{\text{N}_2}$
DH	3.127	3.028	0.099	5.760	0.54	0.53
DHUA	4.514	3.042	1.472	8.130	0.56	0.37
Mean of DH and DHUA	3.821	3.035	0.785	6.945	0.55	0.44
LCC	3.792	2.745	1.047	6.945	0.55	0.40

Note: E_{tot} is the total mechanical energy produced, E_1 , E_2 , E_3 respectively represent the mechanical energy produced during the detonation stage, the anaerobic combustion stage, and the aerobic combustion stage. Q is the detonation heat. $(\gamma - 1)$ represents the conversion ratio of mechanical energy. ‘Mean of DH and DHUA’ refers to the average value of the quantities of DH and DHUA.

示,其 $E_1 + E_2$ 为 $2.462 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,仅为 DHUA 均匀装药的 81.0%, E_{tot} 为 $4.457 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,约为 DHUA 均匀装药的 98.7%。这表明,叠层复合装药结构降低了 DHUA 炸药的铝粉参与无氧燃烧的比例,但并未显著改变铝粉在整个后燃烧过程的能量,即提高了铝粉参与有氧燃烧的比例,这在特定作用工况下,会增强温压毁伤效应。为了进一步分析 LCC 装药铝粉后燃烧释能特性的形成原因,下面结合爆炸火球演变过程,采用数值仿真方法获取铝粉的扩散过程及分布规律。

3 铝粉扩散过程的数值仿真

3.1 仿真模型

采用数值仿真研究铝粉的扩散过程时,传统有限元方法虽然在描述炸药爆轰产物运动方面较为成熟,但难以构建含铝粉颗粒的爆炸数值模型,而离散元法虽然适用于计算颗粒运动,但是对于爆轰产物运动的计算精度低于有限元。为了能将两者的优势相结合,本研究在 LS-dyna 计算平台中,采用离散元与有限元耦合的建模方法,将铝粉作为惰性微颗粒嵌入到炸药材料内,其运动过程采用离散元进行描述,炸药气体爆轰产物的运动则采用有限元欧拉算法描述。需要说明的是,计算过程中并没有考虑铝粉燃烧反应对扩散过程的影响。

药柱仿真模型的尺寸及铝粉的总质量均与实际装药相同,铝粉均匀分布于 DHUA 炸药的内部,其中,LCC 装药中的 DHUA 炸药分别处于第二层和第四层,如图 7 所示,药柱外部空气域模型的尺寸为 $\Phi 600 \times 800 \text{ mm}$ 。为了减小计算量,单个铝粉颗粒的质量设为 0.57 mg ,直径约为 $74 \text{ }\mu\text{m}$,DHUA 均匀装药和叠层复合装药的铝粉颗粒数量分别为 24560 个和 12280 个。所有装药的起爆点均设在上端面的中心位置,空气外表面设为无反射边界。为了便于后续的数字

据分析,药柱径向设为 r 方向,轴向设为 z 方向。此外,相邻炸药层的网格在交界面上共用节点,由于文献 [13] 中的研究发现,DHUA 与 DH 炸药在叠层复合结构中,其爆速值均能够迅速跳跃至各自的 CJ 值,未出现明显的超压爆轰或爆速增长的现象,因此,在该 LCC 装药模型中,可不采用点火增长项,而直接采用标准 JWL 状态方程对两种炸药的爆轰产物,仿真中需要输入的参数值列于表 3。由于这里仅研究铝粉在爆炸驱动下的扩散过程,则不含铝粉后燃烧释能项的 JWL 状态方程也可满足仿真的精度需求。

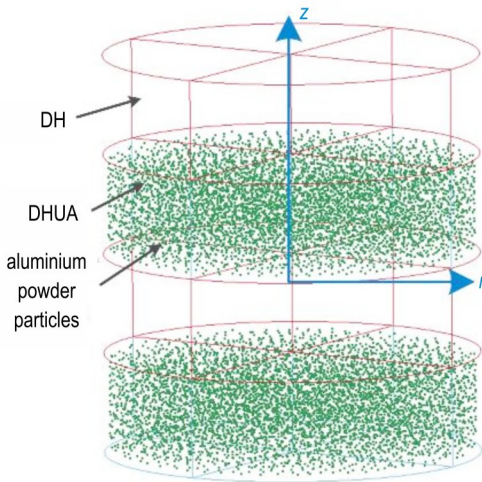


图 7 LCC 装药的有限元模型
Fig. 7 Finite element model of the laminated composite charge (LCC)

表 3 两种炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数
Table 3 Parameters of JWL EOS for the detonation products of two explosives

explosive	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
DH	815.9	19.64	4.8	1.15	0.29	10.6
DHUA	510	6.7	4.76	1.42	0.33	7.8

Note: E_0 is the initial specific internal energy of the detonation products. A , B , R_1 , R_2 and ω are required parameter values for the JWL EOS in LS-DYNA software.

3.2 铝粉空间分布的仿真结果

图8显示了DHUA均匀装药和LCC装药起爆30 μs 后的铝粉分布形貌图,其形貌轮廓与图3所示爆炸火球的轮廓整体上较为相似,但两者在上端位置(即起爆端)的形态略有差异。其中,爆炸火球上端的轮廓略显平坦,这是装药上端的雷管安装座对爆轰产物和铝粉扩散过程的影响所致,但对于其它区域,尤其是铝粉沿径向的空间分布并未产生明显影响。

完成仿真计算后,可通过LS-prepost后处理软件输出所有铝粉颗粒在不同时刻的坐标,再将其转换为 r - z 坐标系,从而可绘制出铝粉在不同时刻的空间分布图,图9显示了30 μs 、60 μs 、90 μs 三个时刻的铝粉空间分布状况。

由图9a可以发现,DHUA均匀装药爆炸后,其铝粉的空间分布较为均匀,铝粉云团边缘处的浓度略高于其它区域,且云团的整体形态与图3中的爆炸火球

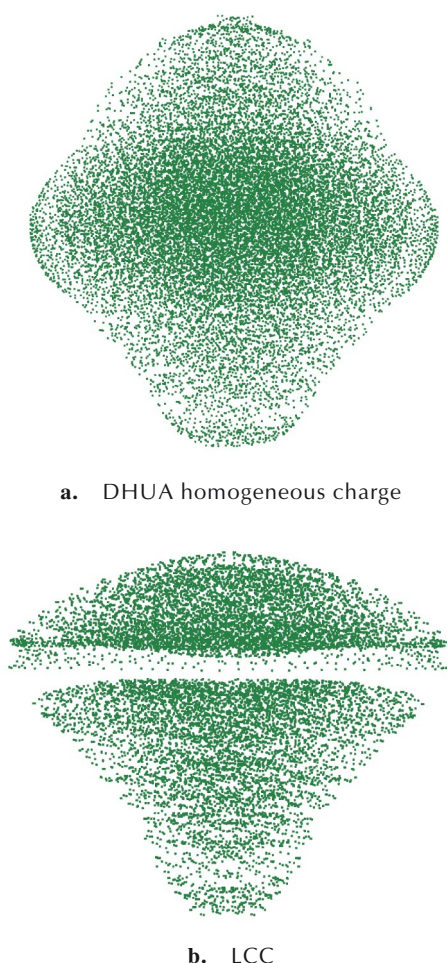


图8 铝粉扩散的形貌图(30 μs)

Fig.8 Aluminum powder dispersion morphology diagram by 30 μs

较为相似。图9b所示复合装药的铝粉云团呈分层状态,其中,上层铝粉云团源于第二层的DHUA炸药,下层铝粉云团源于第四层的DHUA炸药,且上下层铝粉云团的间隙随着时间变化而逐步扩大;上层铝粉云团沿径向的扩散速率明显高于DHUA均匀装药,而轴向的扩散范围并未出现较大增加,在爆炸火球的分析中已指出,这是第二层DHUA炸药受到上下两个方向的轴向挤压所致;下层铝粉云团的轮廓及分布特征与DHUA均匀装药相似,但该区域铝粉的质量仅为DHUA均匀装药的25%,因此下层铝粉云团的浓度可能大幅低于DHUA均匀装药。

考虑到图3中爆炸火球外边缘的亮光主要是该区域的铝粉燃烧所致,因此,图9所示铝粉云团的外轮廓与爆炸火球的外轮廓本质上应是一致的。为了验证该仿真模型及结果的准确性,选择铝粉云团最大半径的计算值和爆炸火球最大半径的试验值进行对比,如图10所示,其中, r_{\max} 表示最大半径。图10a中,在0~100 μs 范围内,DHUA均匀装药仿真和实验曲线的平均偏差约7.8%,在铝粉扩散的中后期,即60~90 μs

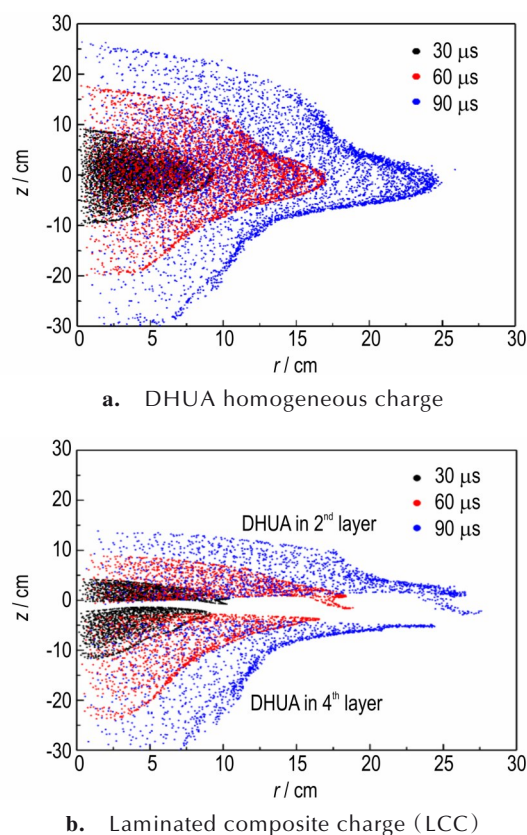
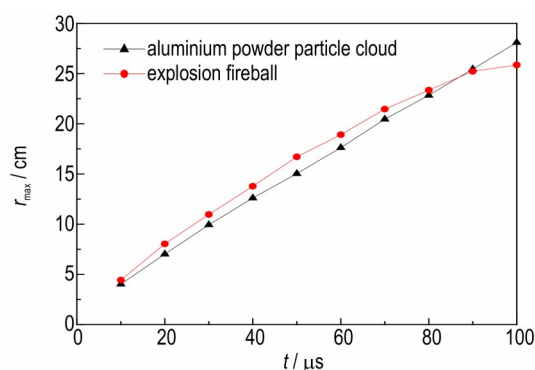
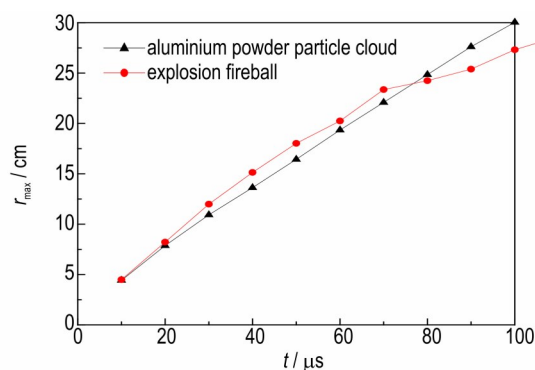


图9 铝粉在不同时刻的空间分布图

Fig.9 Spatial distribution diagram of aluminum powder at different time



a. DHUA homogeneous charge



b. laminated composite charge (LCC)

图 10 爆炸火球与铝粉云团的最大半径对比图

Fig.10 Comparison of maximum radius between fireball and aluminum powder cloud

范围内,该偏差降至 3.8%;图 10b 中,LCC 装药仿真和实验曲线在这两个时间段的平均偏差分别约为 6.6% 和 5.2%。此外,大部分时间中,爆炸火球的最大半径略大于铝粉云团,考虑到爆炸火球外边缘的铝粉燃烧时,其火光的干扰会导致火球半径的测量值略大于铝粉云团的真实半径,因此,铝粉云团半径的计算值与实际值之间的偏差较图 10 所示的偏差将会更低,说明该仿真模型的精度能够满足后续分析的要求,

3.3 铝粉空间浓度计算

铝粉扩散后的空间浓度是影响铝粉燃烧速率和反应完全性的关键因素之一,为了进一步分析各装药爆炸时铝粉云团的浓度变化过程,可根据铝粉空间分布区域的体积及铝粉的总质量,计算出铝粉云团平均浓度 $n(\text{Al})$ 随时间的变化曲线,如图 11 所示。需要说明的是,起爆初期,铝粉空间分布的均匀性较差,则图 11 中仅显示了起爆 20 μs 后的铝粉浓度值;且考虑到 LCC 装药第二层和第四层 DHUA 炸药的铝粉运动过程差异较大,这里将该铝粉云团分为上下两层分别进行统计。

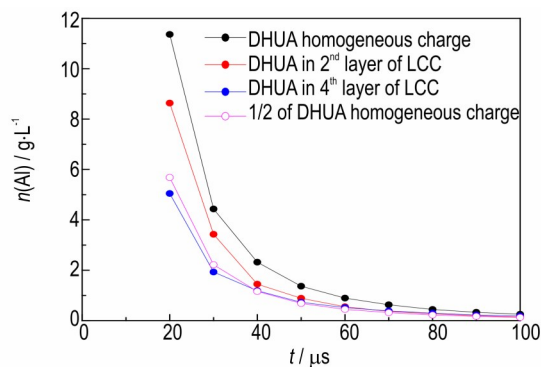


图 11 铝粉空间浓度随时间的变化曲线

Fig.11 Evolution curves of spatial concentration of aluminum powder over time

LCC 装药的整体含铝量为 DHUA 均匀装药的 0.5 倍,从图 11 可以发现,仅下层铝粉云团的浓度与 DHUA 均匀装药的 0.5 倍相近,而上层铝粉云团的浓度显著高于该量值,这说明若与相同含铝量的均匀型装药对比,LCC 装药铝粉云团的浓度是相对更高的。然而,若与 DHUA 均匀装药相比,虽然上层铝粉云团未发生大范围的轴向扩散,但径向扩散加速的因素使得相同时刻下,铝粉的空间浓度仍明显低于 DHUA 均匀装药,其中,在 20~30 μs 时,约为 DHUA 均匀装药的 75%~80%,随后逐步降低至 60% 左右。结合密闭罐体内的爆炸实验结果可以发现,LCC 装药铝粉后燃释能过程的改变应主要是铝粉空间浓度的变化所导致,且由于第四层 DHUA 炸药的铝粉浓度低于第二层 DHUA 炸药,则其后燃烧过程的变化应更大,若在该 LCC 装药的尾部增设一层高爆速炸药,则该区域的铝粉浓度将会与第二层 DHUA 炸药区域相近,从而会使 LCC 装药中 DHUA 炸药的能量释放过程与 DHUA 均匀装药的差异减小。

4 结论

本研究采用爆速约相差 1.8 $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ 的高爆速炸药及温压炸药制备成层厚相同的叠层复合装药,装药的第一、三层为高爆速炸药,第二、四层为温压炸药。通过爆炸实验研究了叠层复合装药结构对爆炸火球演变过程及机械能转换特性的影响规律,并结合数值仿真获取了铝粉的空间分布特性,得出以下结论:

(1) 该叠层复合装药中,第二层温压炸药受到上下两端高爆速炸药的轴向挤压,导致其爆轰产物侧向膨胀加剧,进而使得铝粉轴向扩散受到约束,而径向扩散速率加快,其浓度约从温压型均匀装药的 80% 逐渐

降至60%;第四层温压炸药仅受到一端的轴向压缩,对铝粉径向扩散速率的影响相对较小,且由于该区域的铝粉含量少,导致铝粉云团的浓度值甚至低于温压型均匀装药的50%。

(2)铝粉云团浓度降低,且受到更强的稀疏波干扰,虽然没有降低叠层复合装药在空气环境下爆炸产生的准静态压力及机械能,但造成铝粉无氧燃烧减弱,其中,温压炸药在爆轰阶段和无氧燃烧阶段产生的机械能之和仅约为温压型均匀装药的81%,但有氧燃烧阶段产生的机械能显著增加,使得全部反应阶段产生的机械能总和未出现显著变化。这表明叠层复合装药结构可在不损失装药总能量的前提下,有效调节温压炸药的铝粉在不同阶段的反应及释能过程。

参考文献:

- [1] 胡宏伟,宋浦,邓国强,等.温压炸药的特性及发展现状[J].力学进展,2022,52(1):53-78.
HU Hong-Wei, SONG Pu, DENG Guo-qiang, et al. Characteristics of thermobaric explosives and their advances[J]. *Advances in Mechanics*, 2022, 52(1): 53-78.
- [2] TÜRKER L. Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX)[J]. *Defence Technology*, 2016, 12(6): 423-445.
- [3] 王伯良,李亚宁,韩志伟.温压炸药发展趋势的几点思考[J].火炸药学报,2023,46(11): I-II.
WANG Bo-liang, LI Ya-ning, HAN Zhi-wei. Several considerations on the development trend of thermobaric explosives[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2023, 46(11): I-II.
- [4] 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(6): 141-151.
- [5] 沈飞,李凌霄,王辉,等. DNTF基层状复合温压装药爆炸过程及能量释放特性[J]. 含能材料, 2023, 31(10): 1041-1048.
SHEN Fei, LI Ling-feng, WANG Hui, et al. Explosion process and energy release characteristics of DNTF-based layered composite thermobaric charges [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2023, 31(10): 1041-1048.
- [6] 罗观,李海波,郑保辉,等.高活性金属在炸药中的应用思考[J]. 含能材料, 2021, 29(10): 885-887.
LUO Guan, LI Hai-bo, ZHENG Bao-hui, et al. Application of highly active metals in explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(10): 885-887.
- [7] MA X, CHEN X, LI Y, et al. Aluminized energetic coordination polymers constructed from transition metal centers (Co, Ni, and Cu)[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2021, 46(10): 1598-1610.
- [8] TRZCINSKI W A, BARCZ K, PASZULA J, et al. Investigation of blast performance and solid residues for layered thermobaric charges[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(1): 40-50.
- [9] TRZCINSKI W A, BARCZ K. Investigation of blast wave characteristics for layered thermobaric charges[J]. *Shock Waves*, 2012, 22(2): 119-127.
- [10] MOHAMED, A K, MOSTAFA H E, ELBASUNEY S. Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: Chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 492-503.
- [11] MAIZ L, TRZCINSKI W A, PASZULA J. Semi-closed investigations of new aluminized thermobaric and enhanced blast composites [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(8): 857-863.
- [12] 李梅,蒋建伟,王昕.复合装药空气中爆炸冲击波传播特性[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 367-372.
LI Mei, JIANG Jian-wei, WANG Xin. Shock wave propagation characteristics of double layer charge explosion in the air[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 367-372.
- [13] 沈飞,王辉,王金涛,等.基于圆筒试验的DNTF基叠层复合装药的爆轰驱动释能特性[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11): 112301.
SHEN Fei, WANG Hui, WANG Jin-tao, et al. Detonation driving energy release characteristics of laminated composite charge of DNTF-based aluminized explosives based on cylinder tests [J]. *Explosion and Shock waves*, 2023, 43(11): 112301.
- [14] 黄璿,王军,毛耀峰,等. TATB/CL-20复合装药结构的3D打印成型技术[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 931-935.
HUANG Jin, WANG Jun, MAO Yao-feng, et al. Preparation of CL-20/TATB composite charge structure by 3D printing technology [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2021, 29(10): 885-887.
- [15] 李芝绒,翟红波,闫潇敏,等.一种温压内爆炸准静态压力测量方法研究[J]. 传感器技术, 2016, 29(2): 208-212.
LI Zhi-rong, ZHAI Hong-bo, YAN Xiao-min, et al. Test method research for the quas-static pressure on inside-explosive[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2016, 29(2): 208-212.
- [16] 段晓瑜,郭学永,焦清介,等.铝粉粒度和铝氧比对含铝炸药在密闭空间内爆炸特性的影响[J]. 含能材料, 2017, 25(6): 472-478.
DUAN Xiao-yu, GUO Xue-yong, JIAO Qing-jie, et al. Effect of aluminum size and content on explosion performance of aluminized explosives in confined space [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(6): 472-478.
- [17] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 90(5): 46-60.
- [18] ARNOLD W, ROTTENKOLBER E. Thermobaric charges: modeling and testing[C]//38th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, Germany, V02, 2007.

Characteristics of Spatial Distribution of Aluminum Powder and Afterburning Energy Release During the Explosion Process of Laminated Composite Charge

SHEN Fei^{1,2}, WANG Yuan-jing³, Wang Yi-xin¹, WANG Xuan-jun²

(1. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 71065, China; 2. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 71025, China; 3. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the influence of the structure of a laminated composite charge on its energy release during the afterburning process of aluminum powder, a composite charge with a multiple sandwich structure of uniform layer thickness was prepared by introducing two types of explosives namely high explosive and thermobaric explosive. The high explosive with a higher detonation velocity than that of the thermobaric explosive by $1.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. The evolutionary process of the fire ball and the mechanical energy in different ambient environment during various reaction stages were independently investigated in free-air and confined explosion experiments. Additionally, the distribution characteristics of aluminum powder throughout the explosion were assessed through integrated numerical simulation. The results showed that the thermobaric explosive layer was axially compressed by the high explosive layer, resulting in an increase in the radial diffusion rate of both detonation products and aluminum powder. Furthermore, the average concentration of the aluminum powder cloud was reduced to 60%–80% of that in a homogeneous thermobaric charge, and even to 50% in the tail region, finally resulting in a reduction of anaerobic combustion rate of aluminum powder, as well as the mechanical energy released by aluminum powder. In the laminated composite charge, the total mechanical energy released by thermobaric explosive in detonation and anaerobic combustion process was about 81% of that in a corresponding homogeneous thermobaric charge. However, the mechanical energy produced during the aerobic combustion stage increased significantly, leading to the total mechanical energy remained approximately stable. This study indicated that the laminated composite charge structure could efficiently regulate the afterburning reaction and energy release of thermobaric explosives in different reaction stages by adjusting the spatial distribution of aluminum powder without losing the total energy of the charge.

Key words: laminated composite charge; thermobaric explosive; aluminum powder; concentration; afterburning; energy

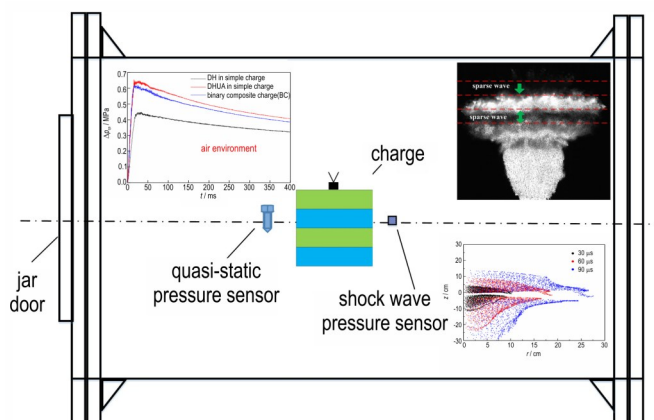
CLC number: TJ55;O389

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024221

(责编:高毅)

图文摘要:



A composite charge was therefore prepared, utilizing two types of explosives with a detonation velocity difference of $1.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. The fireball's evolution and the mechanical energy produced at various reaction stages within different ambient environment were independently investigated in free-air and confined explosion experiments. Additionally, the distribution characteristics of aluminum powder throughout the explosion were assessed through integrated numerical simulation.