

炸药爆炸驱动含能金属粉的试验及抛撒过程仿真

令狐江琦, 袁俊明*, 景甜媛, 李元鑫, 崔锐宁, 温 庆, 苏子璇

(中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘 要: 为探究炸药爆炸驱动含能金属粉抛撒的过程以及流场特性, 设计了一种驱动含能金属粉抛撒的装药结构, 采用高速摄影仪拍摄了炸药爆炸驱动含能金属粉抛撒的过程, 计算了粒子云速度, 并研究了粒子云撞击钢靶后的燃烧效应。基于FLUENT-EDEM流固耦合方法建立了含能金属粉颗粒爆炸抛撒物理模型, 并开展了冲击波作用下粒子云流场特性仿真研究。结果表明: 粒子云在爆炸抛撒试验初期以约400 m/s速度呈锥形扩散, 且以高速撞击钢靶后发生二次爆炸效应, 产生强烈的火光, 表明含能粒子后燃烧效应显著; 仿真模型计算的粒子云初期抛撒形态和速度与高摄观测结果基本吻合, 揭示了粒子云在冲击波超压作用下的“团聚-离散”演化机制, 基于测点数据拟合建立了流场温度及压力分布的预测公式, 获得了爆炸场(0.4~1.5 m范围内)温度与压力的分布特征; 在固定2 000 m/s的速度入口下, 粒子云流场温度随距离的增加呈现快速衰减后趋近稳定值的指数衰减特征, 粒子云流场压力随距离的增加呈现持续衰减的趋势, 仿真初始温度的变化对流场压力分布无显著影响。

关键词: 爆炸抛撒; 含能金属粉; 装药结构; 流固耦合; 流场特性

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

doi: 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2025.11.0003

引用格式: 令狐江琦, 袁俊明, 景甜媛, 等. 炸药爆炸驱动含能金属粉的试验及抛撒过程仿真[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2026, 47(3): 363-373.

LINGHU Jiangqi, YUAN Junming, JING Tianyuan, et al. Test on energetic metal powder driven by explosive detonation and simulation of the dispersion process[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2026, 47(3): 363-373.

Test on Energetic Metal Powder Driven by Explosive Detonation and Simulation of the Dispersion Process

LINGHU Jiangqi, YUAN Junming*, JING Tianyuan, LI Yuanxin, CUI Ruining,
WEN Qing, SU Zixuan

(School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To investigate the dispersion process and flow field characteristics of energetic metal powder driven by explosive detonation, a charge structure for driving the dispersion of the energetic metal powder was designed, and the explosive-driven dispersion process was captured using a high-speed camera. The particle cloud velocity was calculated, and its combustion effect upon impact with the steel target was studied. Based on the FLUENT-EDEM fluid-structure interaction method, a physical model for the explosive dispersion of energetic metal powder particles was established, and a simulation study on the flow field characteristics of the particle cloud under shock wave action was conducted. The results indicate that during the initial stage of

收稿日期: 2025-11-03

作者简介: 令狐江琦(2001—), 男, 硕士生, 主要从事兵器安全技术的研究。

* 通信作者: 袁俊明(1979—), 男, 教授, 博士, 主要从事爆炸毁伤与安全技术的研究。E-mail: junmyuan@163.com。

the explosive dispersion test, the particle cloud diffuses conically at a speed of approximately 400 m/s, and upon high-velocity impact with the steel target, a secondary explosion occurs, producing intense flames which demonstrate a significant afterburning effect of the energetic particles. The dispersion morphology and velocity of the particle cloud in the initial stage, as calculated by the simulation model, are in good agreement with the high-speed photographic observations. The particle cloud's "agglomeration-disaggregation" evolution mechanism under the effect of shock wave overpressure was revealed. Based on measurement point data fitting, prediction formulas for the flow field temperature and pressure distribution were established, and the distribution characteristics of temperature and pressure in the explosion field (ranging from 0.4 m to 1.5 m) were obtained. Under a fixed velocity inlet of 2 000 m/s, the temperature field of the particle cloud exhibits an exponential decay characteristic of rapid attenuation followed by stabilization, while the pressure field shows a continuous decaying trend with increasing distance. Moreover, the variation in the initial simulation temperature has no significant effect on the pressure distribution of the flow field.

Key words: explosive dispersion; energetic metal powder; charge structure; fluid-structure interaction; flow field characteristic

0 引 言

利用微小的活性高密度金属颗粒形成大动能粒子群并伴随化学反应对目标毁伤是一种更为复杂的毁伤模式。在装药及其作用机理研究中,对颗粒运动过程和抛撒范围等重要参数的研究具有重要意义。实际应用中通常以炸药作为驱动源,当炸药爆炸时,爆炸产物不仅会驱动活性颗粒向外抛撒,形成大动能的粒子流,这些活性颗粒还会在高速运动过程中与空气或目标材料发生剧烈化学反应,释放额外能量以增强毁伤效果。为了能对活性颗粒的飞散范围、化学反应程度进行有效调控,同时为装药设计及毁伤效能评估提供依据,有必要对爆炸驱动下活性颗粒的运动过程、近场温度展开研究。

近年来,活性材料因针对目标具备侵彻与燃爆耦合毁伤效应^[1-5],受到了广泛关注。活性材料制成的破片广泛应用于杀伤战斗部,目前直接以金属粉形式参与毁伤的研究尚少。而毫米或亚毫米金属颗粒在炸药爆炸作用下能获得很高的初速,在一定距离内可对目标形成毁伤^[6],因此有必要研究爆炸驱动含能金属颗粒过程。

郑波等^[7]采用高速运动分析系统观察了高能炸药、含铝炸药和温压炸药爆炸产物抛撒的过程,并对比了后燃特点。Zhang等^[8]通过在爆轰压力条件下对液体炸药和含有各种可压缩金属颗粒的RDX进行数值和理论计算,结果表明,在冲击波前沿的后方,铝和镁等颗粒的速度可以达到炸药冲击速度值的60%~94%。李红宾等^[9]通过改变抛撒装药截面

形状控制爆轰能量输出方式,研究发现装药爆炸驱动被抛撒介质的能力由其截面积大小决定,受抛撒装药截面形状的影响很小。冯吉奎等^[10]采用试验与数值模拟相结合的方法,研究了爆炸驱动下亚毫米级WC颗粒群的飞散特性及其影响因素。王仲琦等^[11]通过数值模拟分析炸药驱动直径710 μm球形钨颗粒的运动过程,明确了装药比对颗粒初速的影响及不同颗粒层间运动差异。罗艾民等^[12]利用爆轰产物分段等熵膨胀原理估算了中心装药爆生气体产物的膨胀范围,建立了固体燃料颗粒抛撒的二相流运动模型,获得了抛撒距离的计算方法。朱聪等^[13]通过TrueGrid软件建立了中心装药、柱状装药、底部装药和底部中心装药的灭火弹仿真模型,利用LS-DYNA软件模拟其抛撒过程,并对中心装药和柱状装药的抛撒过程进行取点跟踪分析。杜宁等^[14]基于粉末压制成型工艺,制备了Al/PTFE和Al/Ni两种典型的活性材料及惰性材料Al₂O₃/PTFE、Al₂O₃/PTFE/W。通过爆炸驱动试验,并结合高速摄影、远红外热像仪以及峰值超压测试技术,分析了不同活性材料壳体装药爆炸火球、温度场分布及空气冲击波峰值超压等特性,得出活性材料对炸药爆炸产生的空气冲击波具有强化作用,爆炸加载瞬间材料仅发生了部分化学反应。王海福等^[15]测量了3种不同配方活性破片的能量输出特性,结果表明,活性破片在强碰撞载荷作用下会发生爆炸性反应并释放大化学能,能量释放率与碰撞速度密切相关,当活性破片以约1 500 m/s的速度与目标碰撞时,所释放的化学能约为动能的5倍,大幅提高了毁伤目标的能力。Guadarrama等^[16]采用中心装药法制备了铝

粉、铝镁合金粉和铝镁粉共混的圆柱形反应药型罩。除爆炸引起的准静态压力外,还进行了多次瞬态压力测量,并与惰性衬垫填充氧化铝粉末的情况进行了比较。对于所有反应型药型罩,与惰性药型罩相比,反应型药型罩的准静压和爆轰强度均有所提高。在中心管爆炸抛撒研究中,Peng等^[17]通过测试低爆速炸药的爆速特性、构建物理模型及模拟驱动过程,为子弹药战斗部中心抛撒装药设计提供了参考。Young等^[18]进行了一系列2D模拟,充分解决了颗粒-颗粒和颗粒-气体的相互作用。针对破片飞散特性,Huang等^[19]、Deng等^[20]通过数值模拟和静爆实验展开相关研究。Kudryashova等^[21]在爆炸分散的研究中,通过基于流体动力激波管的爆炸分散器模型,实现液体细分散气溶胶的生成并开展了相关参数测试,为后续研究提供了基础。Chen等^[22]提出了一种能够预测燃料在近场和远场爆炸扩散特性的模型。Zhang等^[23]通过实验与数值模拟,研究了含惰性固体颗粒的异质炸药爆轰后颗粒的快速抛撒过程。Hathaway等^[24]利用155 mm榴弹炮弹药的实验颗粒数据,结合弹道轨迹模型,模拟了高爆和低爆爆炸下的颗粒抛撒过程。Servidio等^[25]通过自洽动力学模拟,探究了二维情况下单质子和质子对的轨迹,发现稳态时粒子长时间呈正常扩散,且高 β 值等离子体扩散性更强,而在中间时间范围内,粒子在惯性区分离时会经历符合合理查森预测的爆炸性抛撒。Hong等^[26]通过实验研究了不同起爆方式对多层复合装药爆炸抛撒过程的影响,对比分析了中心单点、外部三点及同时起爆模式下的冲击波压力与爆炸抛撒特性,得出同时起爆模式下复合装药的爆炸能量释放率最高。Van der Voort等^[27]提出了爆炸产生碎片抛撒的统计描述模型,基于源函数定理得出水平和垂直平面内弹丸面数密度的通用表达式,结合起爆条件的工程模型(包括碎片长度分布、角度分布、发射速度等)及轨迹计算方法,可对碎片抛撒进行预测,且该模型通过了钢筋混凝土结构内部起爆试验验证。

综上所述,在炸药爆炸驱动颗粒抛撒及活性材料应用领域,现有研究已取得诸多进展。研究者们通过数值计算揭示了爆轰压力下含可压缩金属颗粒炸药的颗粒速度特性;部分学者则通过试验与模拟相结合,剖析了亚毫米级颗粒群的飞散规律;针对装药比对抛撒初速的影响、活性材料对冲击波的强化作用,以及活性破片在碰撞载荷下的能量释放规律等方面,学者们均已积累了一定的实验验证与理

论认识。然而,综合现有文献来看,研究仍存在以下细化与深化空间:一方面,多数工作侧重于惰性颗粒或通用活性材料,针对锌铝等新型含能金属粉在爆炸驱动下的抛撒过程研究尚显不足;另一方面,含能金属粉兼具“力学抛撒”与“化学能量释放”的双重特性,其与炸药爆轰波之间的多尺度耦合机制尚未得到深入解析。因此,本文聚焦锌铝含能金属粉,通过设计特定装药结构并结合高速摄影试验,直接观测其爆炸驱动下的抛撒形态、速度演变及撞击靶板后的二次燃烧效应;开展仿真研究,将DSC测得的放热峰值温度作为颗粒初始条件,模拟分析冲击波作用下粒子云流场的温度、压力演化特性,为其在相关工程场景的应用提供理论与数据支撑。

1 抛撒装药结构设计

图1给出了一种典型的装药结构,抛撒药柱为圆柱形,下方为2 mm厚的盖板和壁厚为1 mm的钢壳体,壳体内部致密填充微米级锌铝合金材料的含能金属颗粒,中心药柱为PBX炸药,成分(质量比)为95%的RDX和5%的氟橡胶。药柱上方为雷管,起爆方式为端面中心起爆。当中心药柱起爆后,爆炸产物驱动颗粒群向外高速飞散,形成高能粒子流,能对周围的目标进行毁伤。

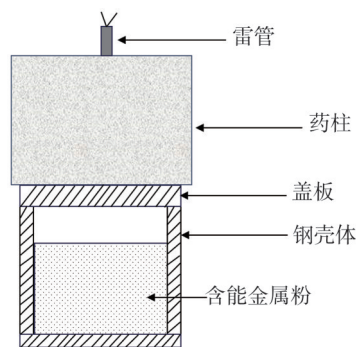


图1 实际装药结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of actual charge structure

由于含能金属颗粒粒径较小,相对于粒径为毫米量级的颗粒,这种小颗粒在空气中的速度衰减要快得多,因此该装药杀伤范围小,易于控制杀伤范围。炸药驱动颗粒所能达到的初速和颗粒飞散的距离,是该装药设计的重要参考依据。

2 试验方案

2.1 试验仪器及样品

采用XP-800C型光学显微镜对锌铝合金粉的微

观形貌进行观测,如图2所示。结果表明,该粉末呈球形颗粒,粒径在 $67\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间。图3为锌锆合金粉在 $10\ \text{K}/\text{min}$ 升温速率下的DSC曲线,可以观察到锌锆合金粉放热峰温在 $1\ 100\ \text{K}$ 左右,为后续模拟考虑含能金属粉释能提供参考依据。试验样品如图4所示,药柱和金属壳体已固定完毕。

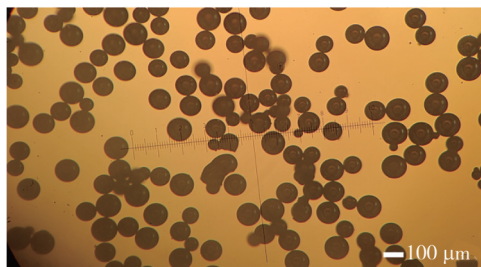


图2 锌锆合金粉的光学显微镜图像

Fig. 2 Optical microscope image of zinc-zirconium alloy powder

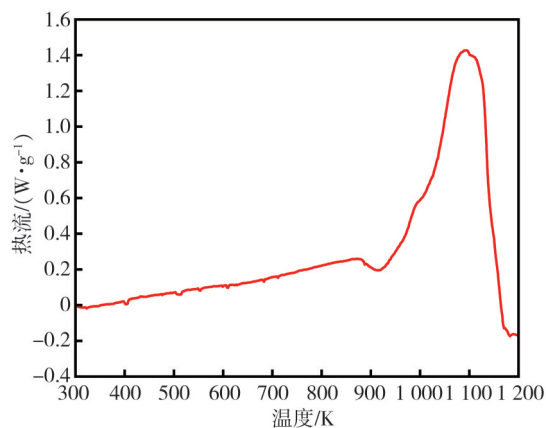


图3 锌锆合金粉的DSC曲线

Fig. 3 DSC curve of zinc-zirconium alloy powder



图4 不含雷管的装药结构图

Fig. 4 Charge structure without detonator

本试验在爆炸洞内开展,并使用两台不同的高速摄影机进行拍摄观察,场地布局如图5所示,试验采用NAC ACS-1型高速摄影机记录含能金属粉的抛撒过程,拍摄速度为 $20\ 000\ \text{帧}/\text{s}$,以观测杆作为参考,估算粒子云抛撒速度。二号相机选用华谷动力工业相机,拍摄速度为 $800\ \text{帧}/\text{s}$,用于观测粒子云撞击靶板后的二次爆炸及后燃烧效应。

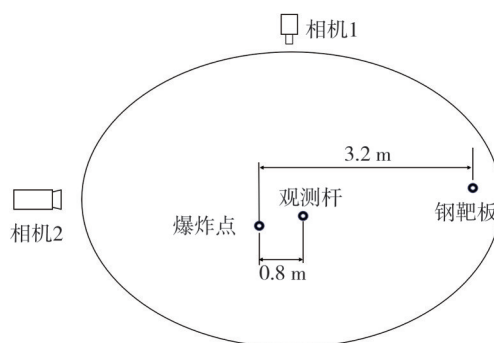


图5 试验布局

Fig. 5 Test layout

2.2 试验布置

2.2.1 爆炸洞试验场景搭建

试验现场如图6所示,将预装雷管的药柱固定于防爆洞中心基座,采用定制药柱支架承载,支架顶部安装了雷管起爆装置,实现起爆时序的精准可控。



图6 试验现场图

Fig. 6 Test site

2.2.2 空间参数

如图5所示,爆心至钢靶架距离 $3.2\ \text{m}$;爆心至防爆洞侧墙距离 $3.3\ \text{m}$ 。

观测杆:距离爆心 $0.8\ \text{m}$,用于同步高速影像分析爆炸时序与反应完全性判定。

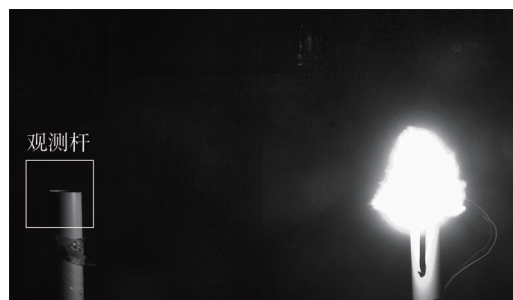
2.2.3 高速摄影机位布置

1) 一号机位位于爆心前方 $3.2\ \text{m}$ 处,与药柱轴线对齐;

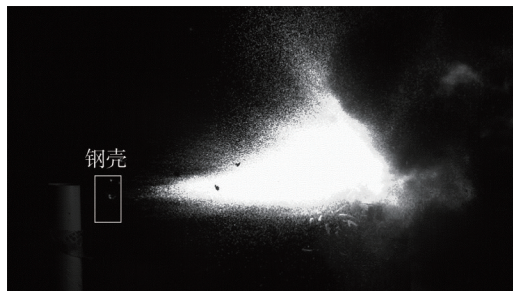
2) 二号机位位于爆心左侧 90° 方位,距离爆心 $2.3\ \text{m}$,水平高度 $1.65\ \text{m}$,与正面机位形成正交视角。

2.3 爆炸驱动含能金属粉试验

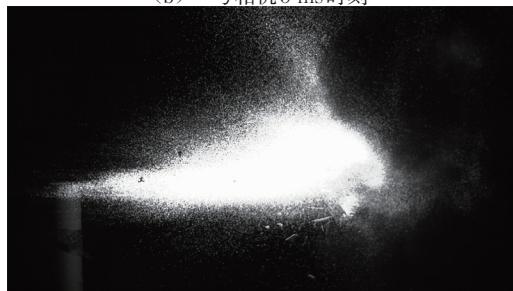
试验通过高速摄影记录了4个阶段的爆炸过程,拍摄结果如图7和图8所示。



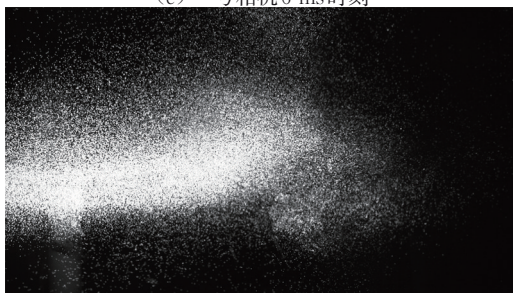
(a) 一号相机 3 ms 时刻



(b) 一号相机 5 ms 时刻



(c) 一号相机 6 ms 时刻



(d) 一号相机 10 ms 时刻

图 7 金属粉抛撒过程

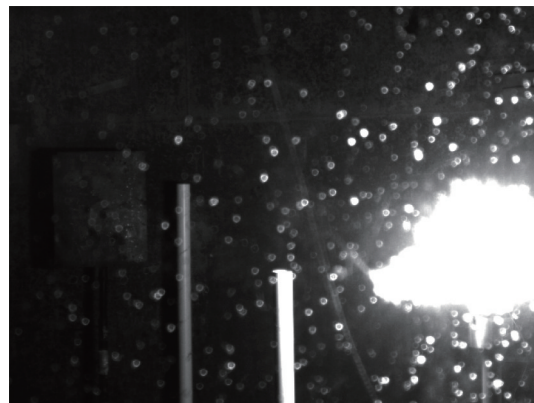
Fig. 7 Dispersion process of metal powder

1) 起爆初始阶段: 雷管起爆药柱, 爆炸冲击波作用于钢壳体;

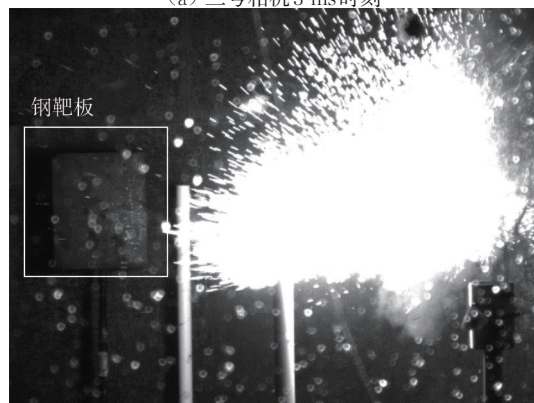
2) 主爆炸阶段: 金属粉层被冲击驱动形成高速粒子云;

3) 溅射峰值阶段: 金属粉高速撞击钢靶板, 金属颗粒二次爆炸产生密集火花, 冲击波扩散至靶架区域产生溅射, 产生后燃烧效应释放大热量并发出强烈的光;

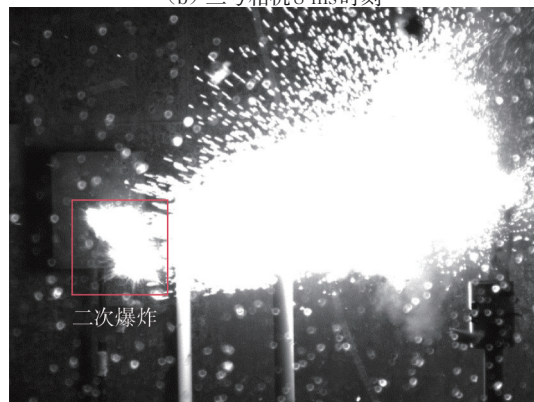
4) 能量衰减阶段: 反应火光强度逐渐衰减, 直至熄灭。



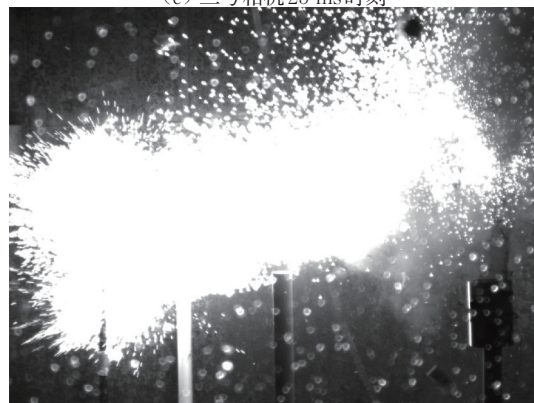
(a) 二号相机 3 ms 时刻



(b) 二号相机 8 ms 时刻



(c) 二号相机 25 ms 时刻



(d) 二号相机 40 ms 时刻

图 8 金属粉二次爆炸情况

Fig. 8 Secondary explosion of metal powder

一号相机高速摄影图观测显示,在爆轰初期,爆心区形成高亮火球,粒子云以爆心为中心呈准球形膨胀,能量集中在核心区;5 ms后火球熄灭,粒子云快速演变为定向射流,沿爆心至钢靶架方向集中延伸,前端呈锥形扩散,尾部拖曳颗粒尾迹,同时观察到钢壳体向外飞出并在粒子云前端,因此当模拟分析粒子云运动过程时,可以将钢壳体忽略不计,只分析粒子的抛撒过程。

基于MATLAB平台,采用手动特征追踪法计算粒子云速度。首先,对高速摄影图像进行预处理,并结合观测杆与爆心间的已知距离完成空间像素的物理标定;随后,标记粒子云特征点,并根据位移时间差计算其运动速度,该过程的手动选点误差被控制在 $\pm 5\%$ 以内。计算结果表明,当粒子云到达标志杆时速度约为400 m/s。

二号相机观测显示,当粒子云以高速度撞击靶板后,出现新的高亮区,其特征与主爆火球显著不同:含能粒子发生二次爆炸效应,爆炸产生的火光更为强烈。

通过试验分析发现,当雷管被激发后,PBX药柱首先发生爆轰,PBX药柱在瞬间释放出极强的冲击波、高温爆轰产物与能量,形成高温高压的极端环境。冲击波沿盖板向钢壳传递,引发钢壳内的含能金属粉末受到动态力学作用,同时,钢壳在爆轰高压下发生变形,推动内部含能金属粉末向外部空间抛撒。部分粒子因直接与高温爆轰产物发生热质交换,或在颗粒间碰撞、与钢壳摩擦过程中获得充足的反应活化能,触发冲击诱导化学反应,释放化学能。未在抛撒初期反应的金属粉末,在空气中以高速飞行,当含能金属粉末撞击靶板时,动能通过碰撞快速转化为热能,使颗粒温度急剧跃升,此时,未反应的含能金属粉末在高温、高压的碰撞环境下,满足了反应触发条件,发生剧烈化学反应,实现能量的二次释放,伴随明显的火光现象。

3 粒子云抛撒过程仿真研究

由于爆炸洞观察窗为多层有机玻璃板,无法直接观测到爆炸时刻的温度,因此根据野外靶场试验中采用TELOPS M200型红外热像仪记录的爆轰瞬时温度数据作为仿真计算的参考依据。图9为爆炸5 ms时刻的高速摄影图,最高温度在2 000 K左右,但因为爆炸初始时刻温度会更高,

并且炸药爆轰产物温度一般不超过4 000 K,因此模拟假设初始温度为2 500 K至4 000 K,每500 K计算一个工况。结合冲击波超压软件在药量为10 g,当量因子为1.25的情况下计算出0.1 m处超压峰值为3.9 MPa,再根据空气中自由场爆炸冲击波波速估算公式确定仿真计算的初始速度为2 005 m/s,因此冲击波速度统一设置为2000 m/s进行模拟计算。

$$D = c_0 \times \sqrt{\frac{6\Delta p_m}{7p_0} + 1} \quad (1)$$

式中: Δp_m 为峰值超压; p_0 为未扰动的空气初始压力; c_0 为未扰动的空气声速,m/s。对于不同温度有 $c_0 = 20.1 \times \sqrt{T_0}$,式中, T_0 为未扰动的空气初始温度($T_0 = 20^\circ\text{C}$)。

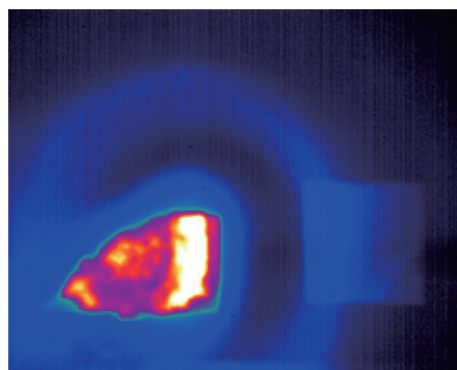


图9 5 ms时刻的高速摄影图

Fig. 9 High-speed photograph at 5 ms

颗粒相与气相的耦合模型主要包括Eulerian-Lagrangian法和Eulerian-Eulerian法。Eulerian-Lagrangian法采用气相欧拉描述与颗粒相拉格朗日跟踪相结合的框架,可精确捕捉单个颗粒的运动细节及与气体的局部相互作用,更适用于需关注离散颗粒动态响应的场景。对于含能金属粉在爆炸驱动下的瞬态飞散过程,颗粒的个体运动特征对整体演化至关重要,因此选用Eulerian-Lagrangian法进行模拟。Eulerian-Lagrangian法耦合控制连续性方程和N-S方程^[28],表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i v_i) = 0, \\ \frac{\partial (\alpha_i v_i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_i v_i v_i) = -\nabla \frac{p}{\rho_i} - R_{pi} + \nabla \cdot (\tau) + a_i g, \end{cases} \quad (2)$$

式中: ∇ 代表哈密顿算子; α_i 为流体的体积分数;最大为1; v_i 与 ρ_i 分别为流体的速度和密度; t 为时间; p 为气体压力; τ 为流体相的应力张量; g 为重

力加速度; R_{pf} 为流体和颗粒之间的动量交换项。

在气固两相流中, 颗粒 i 的运动规律遵循牛顿第二定律

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + (F_d)_i - (V_p)_i \nabla p_i, \quad (3)$$

式中: m_i 、 v_i 、 $(V_p)_i$ 分别表示颗粒 i 的质量、速度和体积; $(F_d)_i$ 、 ∇p_i 表示颗粒 i 的曳力和压力梯度。

3.1 模型建立

为准确模拟爆炸驱动颗粒抛撒这一涉及大范围膨胀的过程, 计算域尺寸必须足够大。依据装药结构及试验观测视场构建计算域几何模型, 计算域由圆柱形驱动段与长方体扩散域组成, 建模

表 1 颗粒属性

Tab. 1 Particle properties

材料	泊松比	固体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/Pa	恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
Zn	0.27	7 140	8×10^{10}	0.3	0.3	0.05
Zr	0.34	6 520	9.5×10^{10}	0.3	0.3	0.05

由于含能金属粉发生化学反应的时间十分短暂, 因此为简化此过程, 并结合试验结果, 将仿真颗粒初始温度设置为 300~2 000 K。考虑到颗粒间的粘附效应及热传递过程, 选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型并耦合颗粒热传导模型, 依据材料属性设定锌锆颗粒的比热容及热导率, 具体参数如表 2 所示。

表 2 颗粒材料的热属性

Tab. 2 Thermal properties of granular materials

材料	比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Zn	380	116
Zr	280	22

设置好参数后, 在特定位置生成锌锆颗粒, 生成结果如图 11 所示。

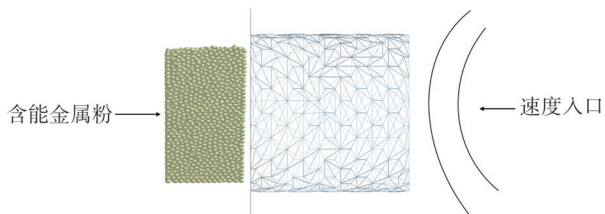


图 11 粒子生成图

Fig. 11 Particle generation diagram

计算域入口边界设定为速度入口并且设置不同的初始温度, 将出口边界条件定义为压力出口, 爆炸飞散区域壁面定义为无滑移的气相速度边界条件, 流场计算选用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 该模型在模拟强旋流及射流扩散方面具有较

完成后再划分网格, 如图 10 所示。

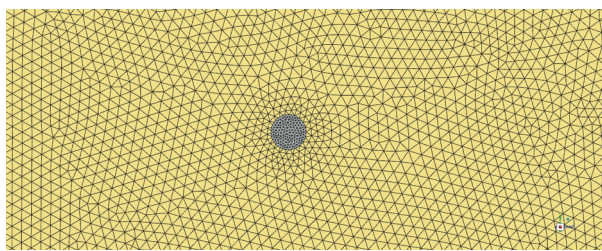


图 10 网格划分及局部放大示意图

Fig. 10 Mesh generation and local enlarged schematic

3.2 参数设置

离散元计算中, 锌锆颗粒的材料物性参数设定如表 1 所示。

高的精度, 结合压力-速度耦合的 SIMPLE 算法进行求解。

3.3 典型温度下粒子云抛撒过程

3.3.1 粒子云抛撒轨迹形态

在 Fluent 软件中改变流体初始温度, 不改变初始速度的情况下, 共计算了 4 种不同的工况。因抛撒轨迹相似, 本文仅展示 2 500 K 工况下粒子云的抛撒过程, 如图 12 所示。

图像呈现了粒子云在腔体内的抛撒动态过程, 初始阶段粒子在腔体右侧聚成紧凑团簇; 随着抛撒推进, 粒子向左侧定向运动扩散; 中期粒子进一步解体分散至腔体中部; 后期粒子弥漫至左侧, 分布稀疏均匀。整体反映抛撒过程中粒子云的形态变化, 清晰展现了粒子从“局部聚集”到“全域扩散”的动态阶段。

分析可知: 在初始时刻, 由于炸药爆轰产生的高压冲击波波速, 气固两相间存在巨大的速度滑移, 气动阻力将粒子迅速推离并形成锥形射流。随着抛撒距离增大, 冲击波超压迅速衰减, 颗粒受到的空气阻力逐渐占据主导地位, 导致外层颗粒的衰减速度快于核心区, 从而使粒子云头部逐渐钝化并向四周弥散。仿真中观测到的“团聚-离散”现象, 实质上反映了颗粒群在强冲击载荷下的动量传递与湍流扩散的竞争机制。

对比仿真结果与试验观测可知, 粒子云初始抛

撒形态与高速摄影的记录高度一致,都呈现出锥形扩散,但由于试验中需要用底座进行固定,因此拍摄画面呈现出模拟抛撒形态的上半部分,抛撒形态对比如图 13 所示,验证了模拟的可行性。

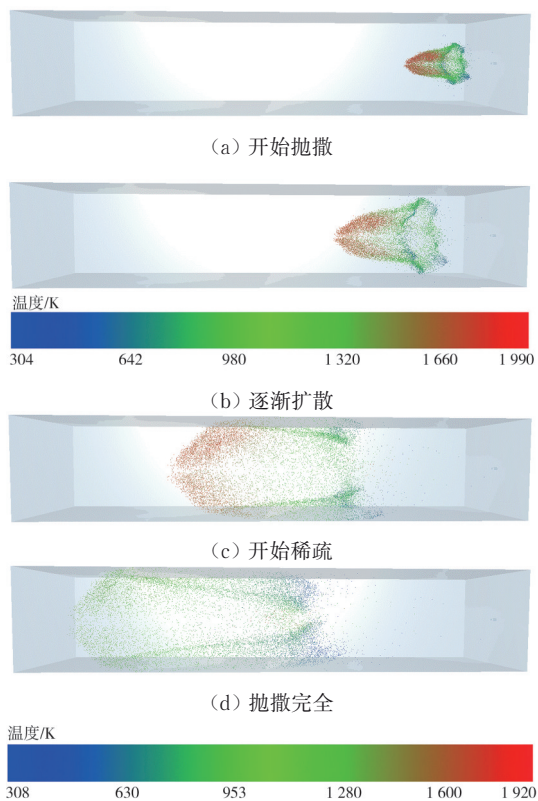
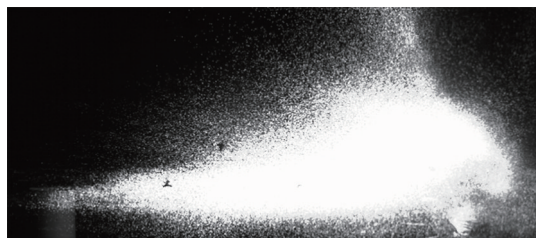


图 12 典型粒子云抛撒过程

Fig. 12 Typical particle cloud dispersion process



(a) 实测粒子云的抛撒轨迹形态



(b) 模拟粒子云的抛撒轨迹形态

图 13 实测与模拟的抛撒轨迹形态对比

Fig. 13 Comparison of measured and simulated dispersion trajectory morphology

分析颗粒运动速度发现,模拟中粒子云尖端的平均速度约为 400 m/s,如图 14 所示,与试验拍摄分析结果较为一致,进一步验证模拟的可行性。

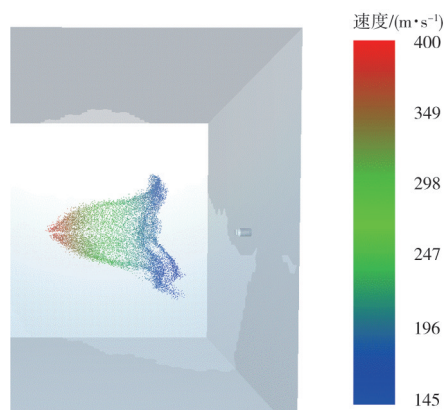


图 14 粒子云速度

Fig. 14 Particle cloud velocity

3.3.2 建立流场温度与压力的拟合

由图 15 可知,最高温度的粒子在经过 5 ms 后达到 1 977 K,与野外靶场红外拍摄到的 2 000 K 近似,误差为 1.2%,验证了模拟结果的准确性。

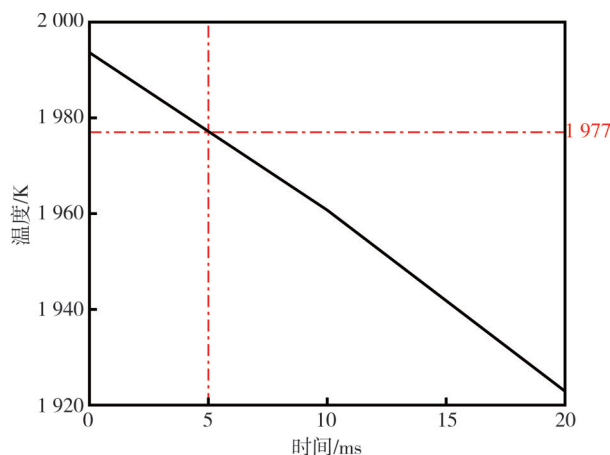
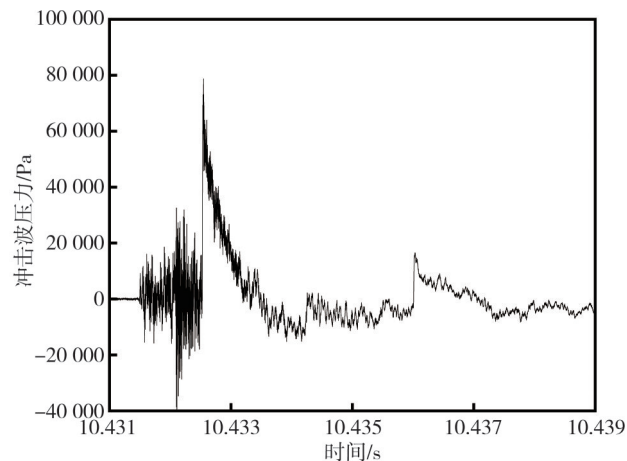


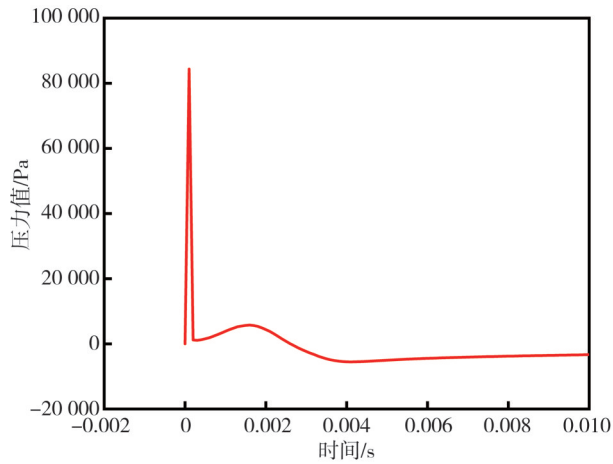
图 15 颗粒温度

Fig. 15 Particle temperature

图 16 对比了以往试验中测试的冲击波超压与模拟结果,显示峰值超压均为 80 000 Pa,验证了模型的可行性。



(a) 实测值

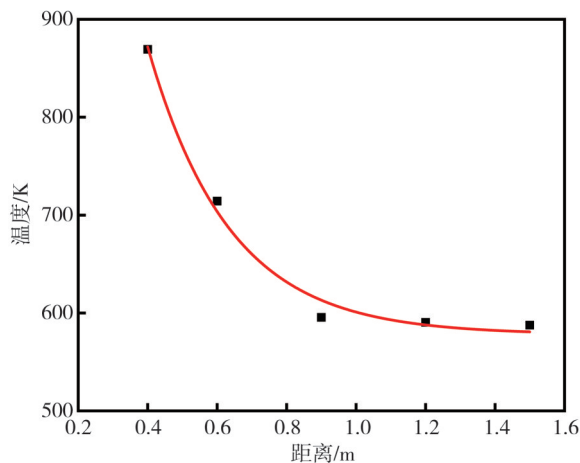


(b) 模拟值

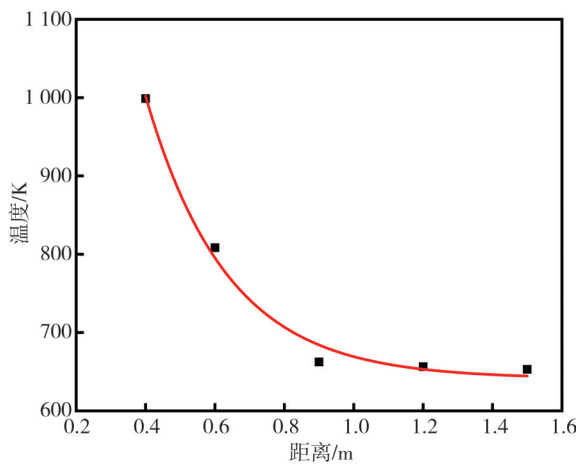
图 16 试验与仿真压力对比

Fig. 16 Comparison of test and simulated pressures

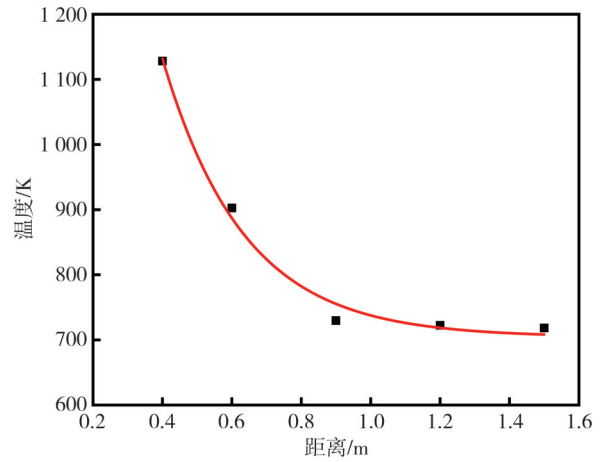
以冲击波速度入口为起点, 分别在距离为 0.4, 0.6, 0.9, 1.2 和 1.5 m 处建立温度和压力监测点。



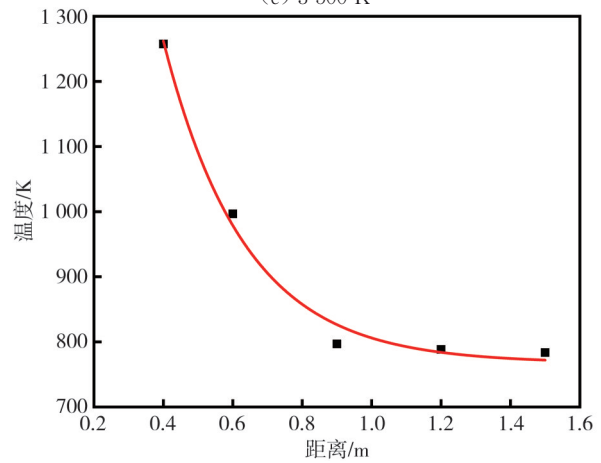
(a) 2 500 K



(b) 3 000 K



(c) 3 500 K



(d) 4 000 K

图 17 不同爆炸场初始温度下测点温度拟合曲线

Fig. 17 Fitting curves of measuring point temperatures under different initial temperatures in the explosive field

不同爆炸场初始温度下的温度-距离曲线如图 17 所示, 其变化趋势高度相似, 均呈现“快速衰减后趋近稳定值”的指数衰减特征。这主要是由于, 高温粒子云与周围冷空气发生强烈的湍流混合与热交换, 导致能量密度随距离急剧下降。尽管初始温度差异导致曲线纵轴的温度跨度不同, 但衰减的数学形态一致, 因此拟合公式相同。

$$T = a \cdot \exp(-br) + c, \quad (4)$$

式中: T 为爆炸场温度, K; r 为爆炸场距离, m。

温度拟合公式中各个参数如表 3 所示。

表 3 不同温度下拟合公式的参数值

Tab. 3 Parameter values in the fitting formula at various temperatures

初始温度/K	参数 a	参数 b	参数 c
2 500	1 609.38	0.24	578.02
3 000	1 975.33	0.24	641.14
3 500	2 341.26	0.24	704.30
4 000	2 706.87	0.24	767.47

在给定入口速度下,初始温度的变化对模拟所得的压力场影响不显著,因此各测点压力拟合曲线如图18所示。

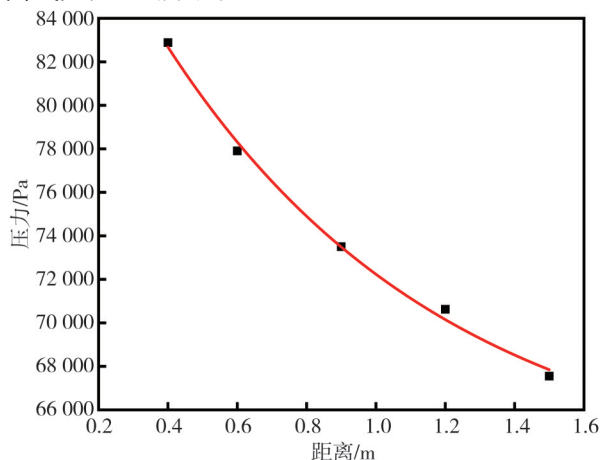


图18 压力测点拟合曲线

Fig. 18 Fitting curve of pressure measuring points

各工况下,压力随距离变化的规律一致,均呈现随距离增加持续衰减的趋势,压力场的衰减则主要受控于波阵面的几何扩张与空气的可压缩性耗散。测点压力拟合公式为

$$p = 62\,692 + 32\,713e^{-1.25r}, \quad (5)$$

式中: p 为爆炸场压力, Pa; r 为爆炸场距离, m。

数值模拟得到的粒子云运动轨迹及动力学特性与试验观测结果基本相符,通过改变流体温度,获得不同工况下流场温度压力拟合公式,可以为金属粉抛撒相关研究提供参考。

4 结 论

1) 试验测得锌铝含能金属粉在中心装药驱动下的抛撒初速约为 400 m/s, 粒子云呈现典型的“锥形射流-弥散云团”演化形态。高速摄影捕捉到的强光现象证实了锌铝合金粉在高速撞击钢靶时发生了显著的冲击诱导化学反应(二次爆炸)。

2) 基于 FULENT-EDEM 流固耦合方法,建立了冲击波作用下含能金属粉爆炸抛撒仿真模型,能够精确复现粒子云的抛撒轨迹与速度,证明了该模型在预测含能金属粉爆炸驱动过程中的适用性。

3) 获得了爆炸场(0.4~1.5 m 范围内)温度与压力的分布特征。研究发现,流场温度与压力随距离的变化均服从指数衰减规律。基于此构建的预测公式表明初始冲击波温度对流场压力的影响可忽略不计。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献:

- [1] 何源. 含能破片作用机制及其毁伤效应实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [2] GE C, YU Q, ZHANG H, et al. On dynamic response and fracture-induced initiation characteristics of aluminum particle filled PTFE reactive material using hat-shaped specimens[J]. Materials & Design, 2020, 188: 108472.
- [3] TU J, QIAO L, SHAN Y, et al. Study on the impact-induced energy release characteristics of $Zr_{68.5}Cu_{12}Ni_{12}Al_{7.5}$ amorphous alloy[J]. Materials, 2021, 14(6): 1447.
- [4] 安德隆, 肖建光, 马俊杨, 等. 聚四氟乙烯基活性材料化学反应分子动力学模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(2): 222-228.
AN Delong, XIAO Jianguang, MA Junyang, et al. Molecular dynamics simulation of chemical reactions of polytetrafluorovinyl active materials [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(2): 222-228. (in Chinese)
- [5] 景甜媛, 王金英, 苏子璇, 等. 氧化剂对 Al/PTFE 热分解性能的影响[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 776-783.
JING Tianyuan, WANG Jinying, SU Zixuan, et al. Influence of oxidants on the thermal decomposition properties of Al/PTFE [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2025, 46(6): 776-783. (in Chinese)
- [6] 谭多望, 曹仁义, 王广军, 等. 爆轰驱动对钨珠终点弹道性能的影响[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 481-487.
TAN Duowang, CAO Renyi, WANG Guangjun, et al. Influence of detonation driving on terminal ballistic effects of tungsten spheres [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 481-487. (in Chinese)
- [7] 郑波, 陈力, 丁雁生, 等. 高能、含铝和温压炸药爆炸抛撒实验研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(3): 118-120.
ZHENG Bo, CHEN Li, DING Yansheng, et al. Experimental study on explosion dispersal of thermobaric explosive [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(3): 118-120. (in Chinese)
- [8] ZHANG F. Momentum transfer during shock interaction with metal particles in condensed explosives [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 620(1): 934-937.
- [9] 李红宾, 何超, 杜海文, 等. 抛撒装药截面形状对爆炸抛撒过程的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2024, 44(3): 29-34.
LI Hongbin, HE Chao, DU Haiwen, et al. Influences of

- charge shapes on the explosive dispersal[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2024, 44(3): 29-34. (in Chinese)
- [10] 冯吉奎, 皮爱国, 刘源, 等. 爆炸驱动亚毫米级金属颗粒群的飞散特性[J]. *高压物理学报*, 2019, 33(6): 173-181.
- FENG Jikui, PI Aiguo, LIU Yuan, et al. Scattering characteristics of sub-millimeter metal particle group driven by explosion[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(6): 173-181. (in Chinese)
- [11] 王仲琦, 陈翰, 刘意, 等. 炸药驱动惰性颗粒运动过程数值模拟研究[J]. *兵工学报*, 2010, 31(S1): 112-117.
- WANG Zhongqi, CHEN Han, LIU Yi, et al. Numerical simulation for movement of inert particles dispersed by explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(S1): 112-117. (in Chinese)
- [12] 罗艾民, 张奇, 李建平, 等. 爆炸驱动作用下固体燃料分散过程的计算分析[J]. *北京理工大学学报*, 2005, 25(2): 103-107.
- LUO Aimin, ZHANG Qi, LI Jianping, et al. Computational analysis of dispersion process of explosively driven solid fuel[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2005, 25(2): 103-107. (in Chinese)
- [13] 朱聪, 梁增友, 邓德志, 等. 装药结构对灭火弹灭火剂抛撒影响研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2020, 40(4): 85-88.
- ZHU Cong, LIANG Zengyou, DENG Dezhi, et al. The influence of charge structure on detonation of fire extinguishing agent [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2020, 40(4): 85-88. (in Chinese)
- [14] 杜宁, 张先锋, 熊玮, 等. 爆炸驱动典型活性材料能量释放特性研究[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(4): 44-53.
- DU Ning, ZHANG Xianfeng, XIONG Wei, et al. Energy-release characteristics of typical reactive materials under explosive loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(4): 44-53. (in Chinese)
- [15] 王海福, 刘宗伟, 俞为民, 等. 活性破片能量输出特性实验研究[J]. *北京理工大学学报*, 2009, 29(8): 663-666.
- WANG Haifu, LIU Zongwei, YU Weimin, et al. Experimental investigation of energy release characteristics of reactive fragments[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(8): 663-666. (in Chinese)
- [16] GUADARRAMA J, DREIZIN E L, GLUMAC N. Reactive liners prepared using powders of aluminum and aluminum-magnesium alloys [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2016, 41(4): 605-611.
- [17] PENG H Z, YUAN J M, HUANG S F, et al. Experiment and instantaneous driving simulation of explosion dispersion process of central tube for submunition[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2478(12): 122053.
- [18] YOUNG C J, PACE H, MEHTA Y, et al. The effect of collisions on the explosive dispersal of particles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2025, 189: 105261.
- [19] HUANG G Y, HUANG X Y, GUO Z W, et al. Fragment dispersion characteristics of uncoupled charge structures with internal explosive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 191: 105011.
- [20] DENG Y, ZHANG X, XIAO C, et al. Experimental study on fragments dispersion characteristics of elliptical cross-section casing under explosive loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 197: 111601.
- [21] KUDRYASHOVA O B, VOROZHTSOV B I, MURAVLEV E V, et al. Physicomathematical modeling of explosive dispersion of liquid and powders [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, 36(6): 524-530.
- [22] CHEN X, WANG Z, LIU Y. A whole explosive dispersion process prediction model for fuel clouds [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(6): 950-965.
- [23] ZHANG F, FROST D L, THIBAUT P A, et al. Explosive dispersal of solid particles[J]. *Shock Waves*, 2001, 10(6): 431-443.
- [24] HATHAWAY J E, RISHEL J P, WALSH M E, et al. Explosive particle soil surface dispersion model for detonated military munitions [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(7): 415.
- [25] SERVIDIO S, HAYNES C T, MATTHAEUS W H, et al. Explosive particle dispersion in plasma turbulence [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(9): 095101.
- [26] HONG X W, LI W B, LI W B, et al. Experimental study on explosion dispersion process of a multi-layer composite charge under different initiation modes [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(4): 883-892.
- [27] VAN DER VOORT M M, WEERHEIJM J. A statistical description of explosion produced debris dispersion [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 59: 29-37.
- [28] 刘明宗. 基于CFD: DEM的包层球床力学性能与粉末流动性研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2024.