

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0121

装置参数对 125 kg 燃料成雾性能的影响*

王 晔¹, 白春华², 刘文杰³

- (1. 华北科技学院研究生部, 河北 燕郊 065201;
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
3. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 云雾的起爆状态决定爆轰威力, 装置结构和比药量是影响云雾形态的主要因素。基于装置结构与云雾形状相似性的原理, 对 125 kg 云雾的成雾性能进行试验研究, 利用高速摄像进行全过程记录, 获取了不同轴向强度装置结构和比药量对云雾特征的影响规律。结果表明: 大体积燃料抛撒试验的成雾稳定性较好; 轴向约束强的复合结构形成的云雾直径具有优势, 相同比药量下, 复合结构的云雾直径可以达到 25.5 m, 较强结构的云雾覆盖面积增加 13%; 比药量为 0.8% 时, 复合结构燃料的成雾性能最佳, 125 kg 燃料的 2 次起爆延迟时间为 240 ms, 此时, 云雾瞬时计算浓度为 64 g/m³, 当量比为 0.54。

关键词: 云雾形成; 爆炸抛撒; 装置结构; 比药量

中图分类号: TJ55; O64 国标学科代码: 62030 文献标志码: A

Influence of structural parameters on formation characteristics of 125 kg FAE clouds

WANG Ye¹, BAI Chunhua², LIU Wenjie³

- (1. Graduate Department, North China Institute of Science and Technology, Yanjiao 065201, Hebei, China;
2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
3. School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: The large-scale explosive dispersal and the unconfined detonation of particle-spray-air ternary mixtures are closely related to industrial accidents and military applications. However, most of the existing research focuses on the small-scale experiment in the laboratory. The large-scale explosive dispersal experiment is rare. According to most of the research findings, the explosive power was determined by the detonation state of aerosol. The charge and specific central explosive were the main factors affecting the shape of the aerosol. To study the damaging effect of aerosol, the large-scale dispersed experiment of 125 kg fuel was carried out. The process of aerosol development was observed by high-speed video recording. Variation characteristics of FAE cloud with different canisters and the specific central explosive were studied. The aerosol diameter and height were used to describing the aerosol shape, then they were analyzed under different initial experiment conditions. There were three types of designing canisters, including basic canister, compound canister and strengthen canister. And the main difference between those types of canisters was the radial restraint. The specific quantities of buster charge was adopted the T-shaped charge. The results show that the aerosol formation is reliable through the replication experiments. Because of its strong radial restraint, the compound canister has the advantage in the aerosol diameters. The aerosol diameters

* 收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(42377200); 中央高校基本科研业务费专项资金(3142019011); 廊坊市科学技术研究与发
展计划自筹经费项目(2018013101)

第一作者: 王 晔(1986—), 女, 博士, 讲师, wangye_0422@126.com

of compound canister can reach 25.5 m, compared to strong canister coverage area increased by 13%. Therefore, the compound canister with the specific quantities of buster charge of 0.8% has the best aerosol performance for 125 kg fuel. On this basis, characteristics of the aerosol were further analyzed. Thus the optimal secondary detonation delay time is 240 ms. The aerosol calculating concentration before burst is 64 g/m^3 and the chemical equivalent ratio of fuel to oxygen in the air is 0.54.

Keywords: FAE cloud formation; explosion dispersed; structural; quantities of buster charge

对自由场条件下大体积燃料抛撒成雾的研究,在民用和军事工业(例如火山喷发、工业粉尘爆炸事故、湍流爆轰等^[1-3])上具有重要的理论和应用价值。在军事工业上,被广泛运用的燃料空气炸药是一种新型爆炸能源,其作用机理是通过爆炸驱动燃料抛撒成雾后,在云雾内用 2 次延迟装置进行直接起爆,实现云雾爆轰,放出巨大的热量和强烈的冲击波,从而实现大面积的毁伤范围。与传统炸药相比,燃料空气炸药的冲击波持续时间更长。

自由场条件下燃料空气的混合形成过程复杂,学者们通过大量实验对其影响因素和形成规律进行了深入研究。19 世纪 80~90 年代,学者们通过缩放实验^[4]、尺寸缩放实验^[5]、圆盘形气云实验^[6]研究了可燃气体在自由场条件下的扩散特征,并分析了障碍物、罐体结构、开口孔径、初始压力对可燃气体尺度的影响规律。对于气-液、气-固两相云雾形成过程的实验研究表明,中心抛撒药质量和种类、爆炸装置材料和结构会影响燃料空气混合物的形成结果^[7-9]。由此可知,燃料抛撒的最终状态与爆炸初始装置相关^[10]。对于多相大体积的云雾形成,刘庆明等^[11]研究了 100 kg 装药量 FAE(fuel-air explosive)的云雾抛撒和爆轰威力;陈明生等^[12-13]利用试验和数值模拟研究了 85 kg 装药壳体形状、燃料抛撒速度对云雾形成的影响;王永旭等^[14]进行了 300 kg 燃料爆炸抛撒成雾过程的实验研究。大体积燃料云雾形成过程更为复杂,影响因素较多,目前针对该过程没有准确的物理模型和计算方法,只能从大量的场外试验中探索燃料浓度随时间的变化关系,从而取得理想的爆轰效果。

本文中,对大体积云雾的成雾性能进行试验研究,获得装置结构和比药量(比药量为中心药质量与燃料质量之比)对云雾成雾特征的影响规律,以期为进一步探索云雾爆轰试验奠定基础。

1 试验方法

1.1 试验方案

将 125 kg 的燃料抛撒装置垂直摆放在试验架上,试验架固定住试验装置,装置下端板距地面 1.5 m。将下端板中心作为爆心(原点),距爆心 15 m 处布置 2 对标志杆,2 对标志杆的夹角为 45° 。高速摄影仪布置在爆心与标志杆的延长线上,距离爆心 100 m 以上,属于安全范围。2 台高速摄影仪的频率为 1000 s^{-1} ,架设高度为 1.5 m。图 1 为试验现场布置示意图。

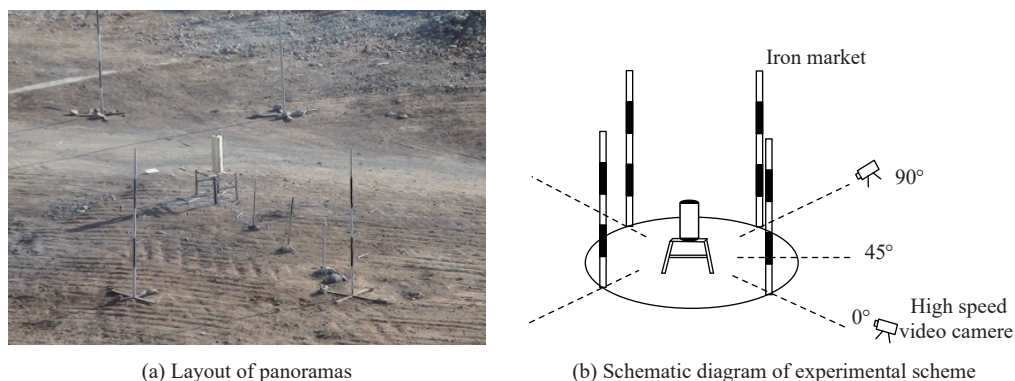


图 1 试验现场布置图

Fig. 1 Experimental set-up for cloud formation

1.2 试验装置结构

装置结构由中心管、上下加强端板以及筒壁组成。装置结构为薄壁圆柱体结构,壳体材料为铝,筒壁厚度为 3 mm,上下端板为圆形截面,直径为 370 mm,其筒壁长度为 1 150 mm,在筒壁上均匀分布深度为 0.6 mm 的 16 道预制刻槽,利于燃料抛撒,不易窜火。未装填燃料的装置重量分别为 30 和 41 kg。内部装填约为 125 kg 液固混合燃料,中心管内部装填 TNT 高能炸药,采用 T 型装药。研究^[15-16]表明,扁平状云雾有利于云雾爆轰且云雾形状与壳体结构相似,加强轴向约束力,能够形成扁平状云雾,因此,设计了 3 种装置结构(图 2),以研究装置结构中轴向连接处强度对云雾形态的影响,区别为:(a) 连接处用 4 个直径为 3.0 mm 的铆钉连接,其装置结构称为弱结构装置,结构强度为 6×10^3 N;(b) 连接处用直径为 4 个 3.5 mm 的铆钉连接,其装置结构称为强结构装置,结构强度为 8×10^3 N;(c) 连接处用直径为 4 个 3.0 mm 铆钉连接,另有 4 根加强杆对称分布,其装置结构称为复合结构装置,结构强度为 70×10^3 N。在相同比药量(0.9%)下对 3 种结构进行云雾成雾试验。

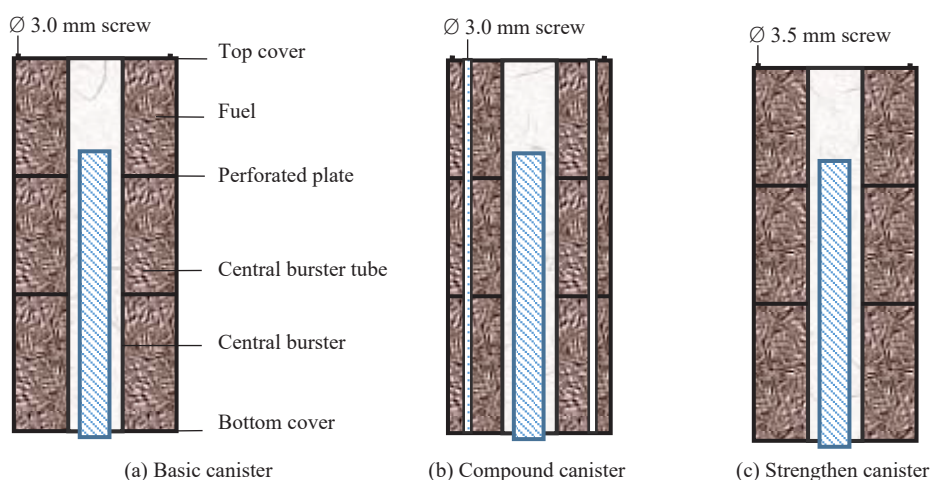


图 2 3 种装置结构的剖面示意图

Fig. 2 Canister with burster charge

1.3 比药量

在燃料分散时,燃料爆炸载荷驱动具有最大距离,且存在不发生“窜火”的最大炸药比例。因此,试验方案中,中心装药采用低爆速炸药,其结构为 T 型装药,并配合充填惰性材料以降低爆炸产物温度等措施,防止燃料在分散过程中“窜火”。T 型装药结构示意图如图 3 所示。

对于复合结构,比药量分别为 0.8%、0.9%、1.0%,对于强结构,比药量分别为 0.9%、1.0%、1.1%,进行 2 种结构的云雾成雾试验,以获得比药量与装置结构的最佳参数。试验方案如表 1 所示。

1.4 云雾直径和云雾高度的数据处理方法

通过在云雾区边界设置标志杆,借助图像处理软件,得到不同时刻的云雾尺度。拍摄照片

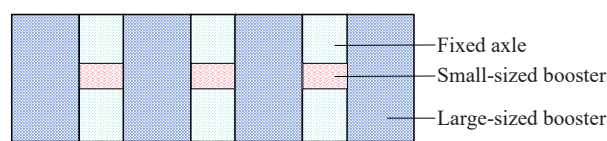


图 3 T 型装药结构的示意图

Fig. 3 Sketch map of T-shaped charge structure

表 1 2 种装置结构的比药量参数

Table 1 Parameters of canister and specific central explosive

序号	装置结构	中心药量/kg	燃料量/kg	比药量
1	复合结构	1.004	125	0.8%
2	复合结构	1.156	125	0.9%
3	复合结构	1.232	125	1.0%
4	强结构	1.156	125	0.9%
5	强结构	1.232	125	1.0%
6	强结构	1.375	125	1.1%

像素为 1280×800 , 由于云雾形态近似为圆柱, 选取云雾直径 D 和云雾高度 $H(H=(H_1+H_2+H_3)/3)$ 观察云雾形成特征(图 4), 其中, H_1 、 H_2 和 H_3 分别为云雾最大高度、中间高度、最小高度。读取时, 去除毛刺和模糊不清的边界。

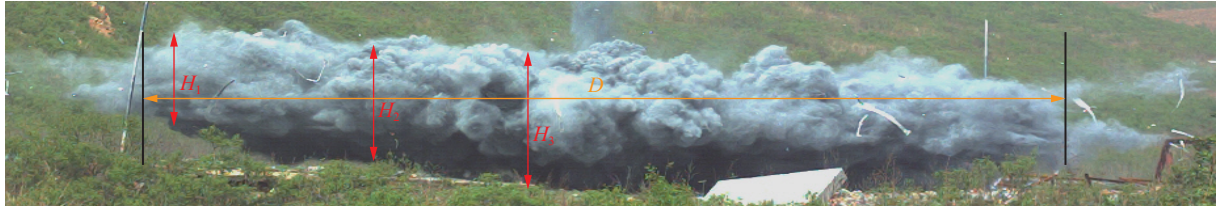


图 4 云雾直径和云雾高度的参数

Fig. 4 Parameter for cloud formation

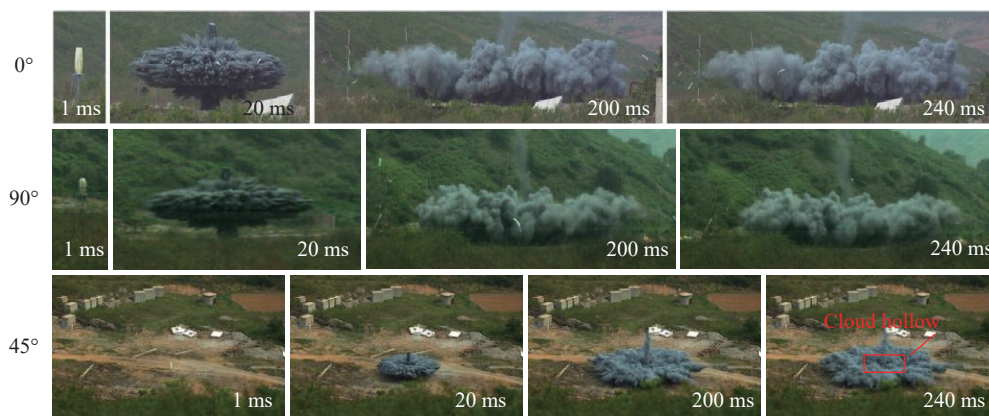
2 试验结果与分析

2.1 装置结构对云雾分散性能的影响

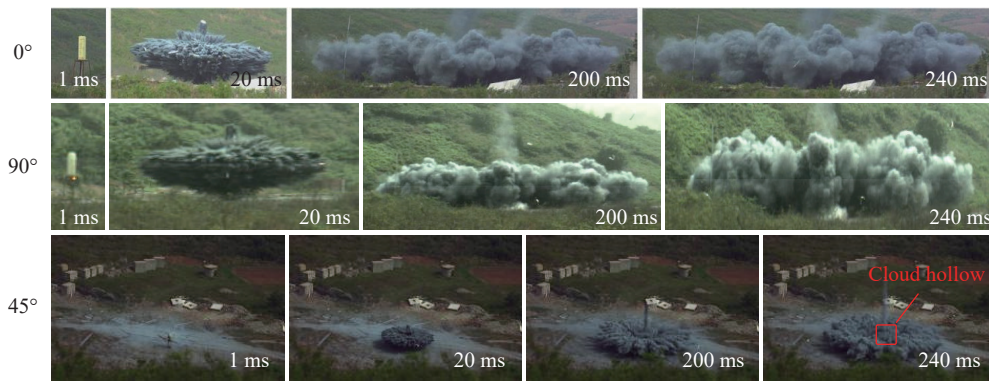
相同比药量(0.9%)下, 对 3 种不同的装置结构进行燃料抛撒试验, 其成雾过程如图 5 所示。由图 5(a) 可知, 弱结构在 48 ms 时出现火花, 184 ms 时完全燃烧。比药量较小时, 弱结构依然窜火, 若继续减小比药量, 则云雾形成状态较差。复合结构和强结构成功形成云雾。窜火机理是中心药能量小于破壳能量, 因此, 增加纵向约束力是防止窜火的有效措施之一。



(a) Basic canister



(b) Compound canister



(c) Strengthen canister

图 5 不同方向的云雾形成过程

Fig. 5 Dispersal process of fuel explosion

2.2 复合结构和强结构的重复性试验

为保证云雾成型的稳定性、可靠性,在相同比药量(0.9%)下进行了强装置结构和复合装置结构的3次重复性试验,试验结果如图6~7所示。可以看出,云雾分散参数的增长趋势相同,部分强结构破片未破裂;相较于强结构,复合结构的破裂效果较好,刻槽处均已开裂,分布均匀完整;弱结构因为窜火现象,破片无法成形。

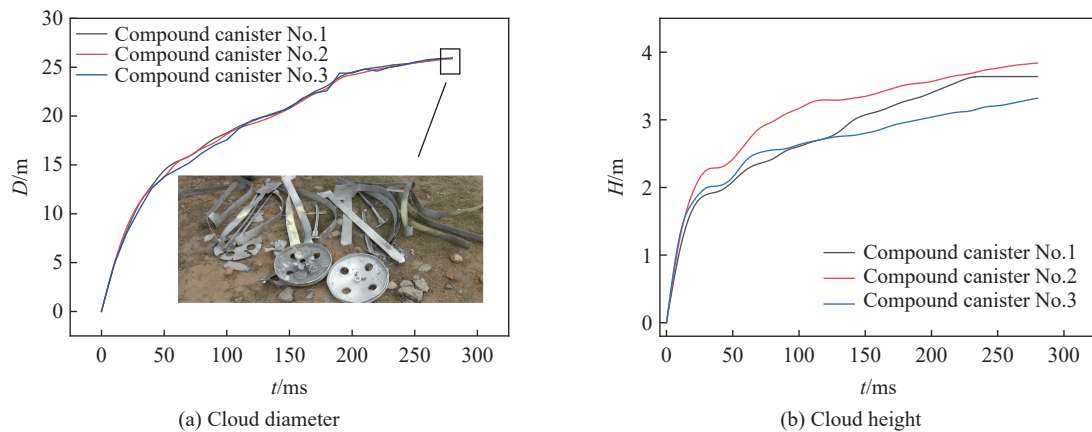


图 6 复合结构重复试验中的云雾直径和云雾高度

Fig. 6 Cloud diameter and height history in parallel experiment of compound canister

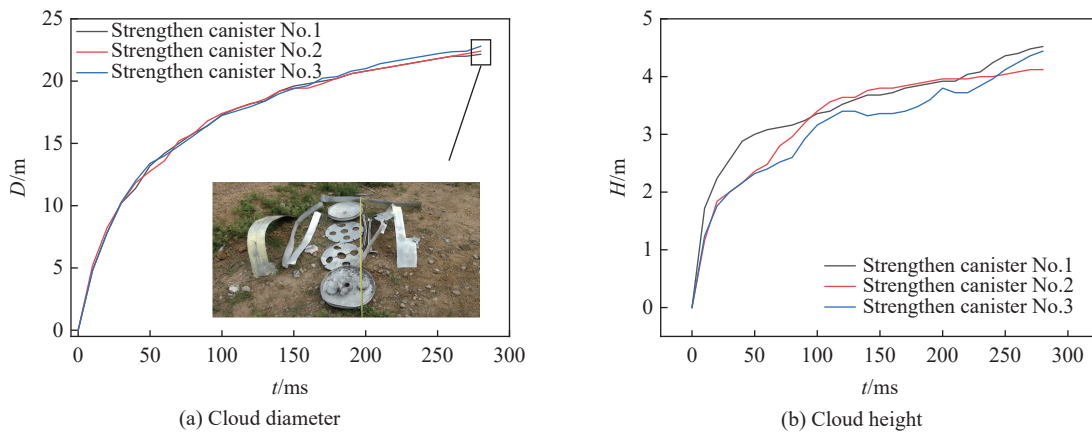


图 7 强结构重复试验中的云雾直径和云雾高度

Fig. 7 Cloud diameter and height history in parallel experiment of strengthen canister

统计学上, 标准差能够反映多次测量数据之间的相差程度, 用来衡量试验结果的稳定性。云雾直径 (σ_d) 和高度 (σ_h) 的标准差可表示为:

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{(d_1 - \bar{d})^2 + (d_2 - \bar{d})^2 + \dots + (d_n - \bar{d})^2}{n}}$$

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{(h_1 - \bar{h})^2 + (h_2 - \bar{h})^2 + \dots + (h_n - \bar{h})^2}{n}} \quad (1)$$

式中: d_n 为第 n 时刻的云雾直径, \bar{d} 为云雾的平均直径, h_n 为第 n 时刻的云雾高度, \bar{h} 为云雾的平均高度, n 为统计数量。

由式 (1) 计算可知, 复合结构的 σ_d 为 0.23 m, σ_h 为 0.27 m; 强结构的 σ_d 为 0.27 m, σ_h 为 0.34 m。 σ_d 和 σ_h 均没超过 0.5 m, 说明 2 个结构的抛撒过程的稳定性较好, 成雾效果较为可靠。对比 2 参数的标准差, 发现云雾直径的稳定性大于云雾高度, 这可能是由于端盖没有均匀刻槽, 导致分散不稳定。

2.3 装置结构对云雾特性的影响

3 种装置的云雾分散试验结果如表 2 和图 5 所示。由图 5 可知, 云雾的形成过程大致均分为 3 个阶段: (1) 加速形成阶段, 加速过程很快, 高速摄像几乎捕捉不到该阶段; (2) 减速阶段; (3) 稳定湍流阶段, 云雾形成。弱结构的纵向约束力较弱, 起爆时能量过于集中, 使得中心药的分散能量大于破裂能量, 引起自燃, 导致窜火现象, 48 ms 时, 出现明显火光, 云雾持续燃烧, 184 ms 时, 完全燃烧。

表 2 不同装置结构的试验结果

Table 2 Result of three models

序号	装置结构	比药量	试验结果
1	弱结构	0.9%	窜火
2	强结构	0.9%	正常
3	复合结构	0.9%	正常

对强结构和复合结构进行相同比药量 (0.9%) 下的燃料抛撒试验, 不同装置结构的云雾直径和云雾高度随时间变化曲线如图 8~9 所示。可以看出, 复合结构的云雾直径最大, 可达 25.5 m, 此时, 云雾高度为 4.0 m; 强结构的云雾高度最大, 可达 4.8 m, 此时, 云雾直径为 24.0 m。由于起爆后, 峰值超压在云雾中最大, 在云雾外呈幂次衰减, 因此, 云雾的直径越大、覆盖面积越广, 成功爆轰后的毁伤范围越大。将云雾形态近似成圆形, 经计算, 复合结构的云雾覆盖面积 $S_c=510 \text{ m}^2$, 强结构的云雾覆盖面积 $S_s=452.16 \text{ m}^2$, 相较于强结构, 复合结构的覆盖面积增长了 13%。因此, 按照实际需要, 选择云雾直径较大的复合结构最为合理。

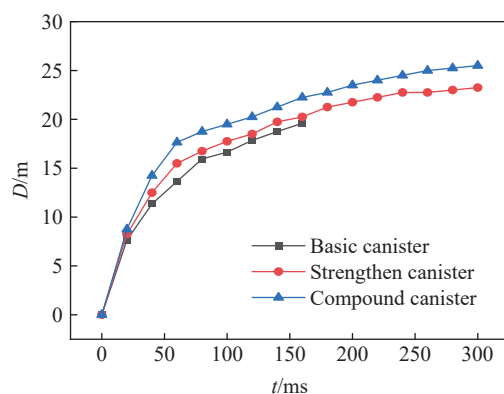


图 8 不同装置结构下的云雾直径随时间变化曲线
Fig. 8 Cloud diameter histories in different canisters

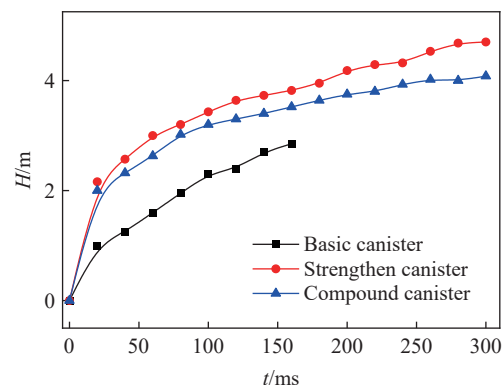


图 9 不同装置结构下的云雾高度随时间变化曲线
Fig. 9 Cloud height histories in different canisters

为了进一步分析影响因素的稳定性, 利用单因素方差分析方法, 研究装置结构对云雾成雾性能影响的显著性。原假设 H_{a0} 为装置结构对云雾直径无影响, 备择假设 H_{a1} 为装置结构对云雾直径有影响。方

差分的基本思想是通过分析不同来源的变异对总变异的贡献, 确定可控因素对研究结果的影响, 构建统计量 F :

$$F = \frac{SS_o/v_o}{SS_i/v_i} \quad (2)$$

式中: SS_o 为组间离均差, v_o 为组间自由度, SS_i 为组内离均差, v_i 为组内自由度。若 $F \geq F_{0.05(v_1, v_2)}$, 则 $P \leq 0.05$, 拒绝 H_{a0} , 接受 H_{a1} , 即装置结构对云雾的成雾性能有影响; 反之, 则不拒绝 H_{a0} , 装置结构对云雾性能无影响。其中, $F_{0.05(v_1, v_2)}$ 为自由度为 v_1 、 v_2 且显著性水平为 0.05 时的统计量, P 为在 H_{a0} 成立的条件下, 计算现有样本统计量以及更极端情况的假设检验概率值。利用 SPSS (Statistical Product and Service Solutions) 软件, 选用单因素 ANOVA 分析方法, 得到 $P=0.002$, 小于 0.05, 说明装置结构对成雾性能有显著影响。但这不能说明 3 种结构均对云雾性能有影响, 利用邦弗伦尼多重比较检验方法进行比较, 利用 P 值判断统计显著性, 分别为 $P_{1-2}=0.002$ (下标 1-2 表示方案 1 弱结构与方案 2 强结构进行显著性分析的概率值), $P_{1-3}=0.009$, $P_{2-3}=0.032$, 均小于 0.05, 说明 3 种结构对云雾性能都有显著影响。

2.4 比药量对云雾特性的影响

比药量是影响云雾形成过程的重要因素之一。比药量越大, 云雾的形成效果反而不符合预期, 甚至有窜火的风险。按表 1 所示的实验方案, 进行复合结构和强结构的云雾成雾试验, 试验结果如图 10~11 所示。可以看出, 增加比药量到 1.1%, 破壳时的初始速度依旧很小, 云雾形成慢, 导致能量积累, 局部温度升高, 达到燃料的燃烧临界点, 比药量为 1.1% 的强结构方案出现窜火现象。

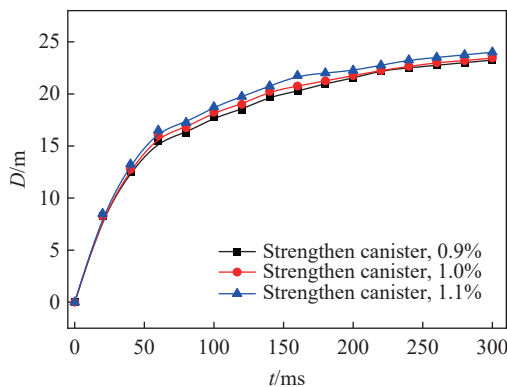


图 10 不同比药量下强结构的云雾直径

Fig. 10 Cloud diameter histories of strengthen canister using different specific central explosives

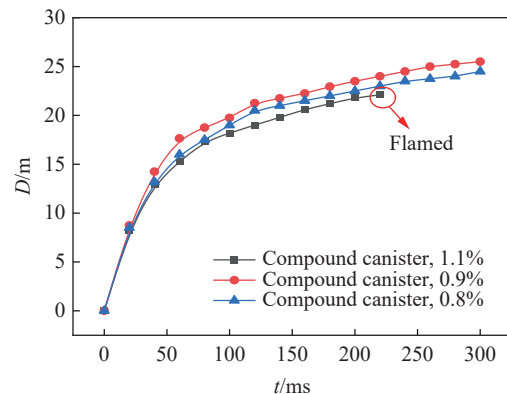


图 11 不同比药量下复合结构的云雾直径

Fig. 11 Cloud diameter histories of compound canister using different specific central explosives

利用 SPSS 软件对强结构实验的云雾直径进行方差分析, 利用 P 值判断统计显著性, 分别为 $P_{0.9-1.0}=0.039$ (下标 0.9-1.0 表示比药量 0.9% 与比药量 1.0% 方案进行显著性分析的概率值), $P_{0.9-1.1}=0.007$, $P_{1.0-1.1}=0.058$, 说明比药量为 0.9% 与 1.0%、0.9% 与 1.1% 之间有差异, 反之, 比药量为 1.0% 与 1.1% 之间没有差异, 比药量到达一定值后, 继续增加比药量不会对云雾性能产生有效影响。利用相同方法对复合结构实验的云雾直径进行方差分析, 概率分别为 $P_{0.8-0.9}=0.907$, $P_{0.9-1.0}=0.015$, $P_{0.8-1.0}=0.025$, 说明比药量为 0.9% 与 1.0%、0.8% 与 1.0% 之间有差异, 反之, 比药量为 0.8% 与 0.9% 之间没有差异, 说明继续增加比药量会对云雾性能产生影响。

综上, 燃料分散时, 存在不发生窜火的最大炸药比例, 继续增加比药量反而导致成雾性能下降。

3 2 次起爆位置和起爆延迟时间

基于第 2 节的分析, 应综合考虑窜火可能性和云雾分散性能, 选用静爆方案。比药量较小的情况下, 弱结构发生窜火现象, 且不利于云雾形成, 因此不选用弱结构。强结构在本实验条件下未发生窜火

现象,但在装置结构比较时不具有优势,也不选用强结构。复合结构在比药量超过 1% 时会发生窜火现象,但是比药量为 0.8% 和 0.9% 时,其云雾形态没有显著差别。因此,选用复合结构且比药量为 0.8% 的装置,不易窜火且云雾性能最优。

从图 11 可以看出,200 ms 之后,云雾形态基本不变。而云雾浓度随着时间推移不断降低,在临近爆炸前,云雾的计算瞬时浓度约为 64 g/m^3 ,此时,燃料的化学当量比为 0.54。试验和理论^[17]表明,当量比为 1.19 时,最小起爆能为 2.79 MJ,则临界起爆能为 2.72 MJ。可见,燃料的化学当量比稍大于 1 时,云雾具有最小的临界起爆能量,因此,需要提高起爆能量才能实现爆轰,宜采用强起爆方式。复合结构在比药量为 0.8% 时,最佳延迟时间为 240 ms。

综上,125 kg 燃料复合结构的 2 次起爆最佳延迟时间为 240 ms。由于云雾有空洞现象(图 4),起爆药的水平位置定在距爆心 1.5 m 处。

4 结 论

为研究装置参数对大体积燃料抛撒成雾状态的影响,改变装置结构和比药量,进行了 125 kg 燃料的燃料抛撒试验,得到以下主要结论。

(1) 强结构和复合结构的抛撒试验结果的重复性良好,标准差不超过 0.5 m,为单次试验的可靠性提供了依据。

(2) 弱结构会发生窜火现象,增加了轴向强度的复合结构和强结构都能正常形成云雾,其中,复合结构的云雾直径最大,可达 25.5 m;强结构的云雾高度最高,可达 4.8 m。

(3) 随着比药量的增加,云雾直径增加,但过大的比药量有窜火的风险,最佳的比药量为 0.8%。在 240 ms 进行 2 次起爆,此时,云雾计算瞬时浓度约为 64 g/m^3 ,燃料的化学当量比为 0.54。

参考文献:

- [1] BAI C H, WANG Y, XUE K, et al. Experimental study of detonation of large-scale powder-droplet-vapor mixtures [J]. *Shock Waves*, 2018, 28(3): 599–611. DOI: 10.1007/s00193-017-0795-8.
- [2] LIU W J, BAI C H, LIU Q M, et al. Effect of low-concentration RDX dust on solid-liquid mixed fuel characteristics [J]. *Combustion and Flame*, 2021, 225: 31–38. DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.10.037.
- [3] CAO Y, LI B, XIE L F, et al. Experimental and numerical study on pressure dynamic and venting characteristic of methane-air explosion in the tube with effect of methane concentration and vent burst pressure [J]. *Fuel*, 2022, 316: 123311. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123311.
- [4] MERCX W P M, VAN DEN BERG A C. The explosion blast prediction model in the revised CPR 14E (Yellow Book) [J]. *Process Safety Progress*, 1997, 16(3): 152–159. DOI: 10.1002/prs.680160308.
- [5] MERCX W P M, JOHNSON D M, PUTTOCK J. Validation of scaling techniques for experimental vapor cloud explosion investigations [J]. *Process Safety Progress*, 1995, 14(2): 120–130. DOI: 10.1002/prs.680140206.
- [6] LEYER J C. An experimental study of pressure fields by exploding cylindrical clouds [J]. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 251–263. DOI: 10.1016/0010-2180(82)90132-8.
- [7] 张奇,覃彬,白春华,等.中心装药对 FAE 燃料成雾特性影响的试验分析 [J]. *含能材料*, 2007, 15(5): 447–450. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2007.05.002. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2007.05.002.
ZHANG Q, QIN B, BAI C H, et al. Effect of total energy of center explosive charge on fuel dispersal characteristic feature [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2007, 15(5): 447–450. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2007.05.002.
- [8] 樊保龙,白春华,王博,等.大尺寸密闭容器内天然气的爆炸超压场 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 404–408. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0191.
FAN B L, BAI C H, WANG B, et al. Explosion overpressure field of natural gas in a large-scaled confined vessel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 404–408. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0191.
- [9] APPARAO A, RAO C R, TEWARI S P. Studies on formation of unconfined detonable vapor cloud using explosive means [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 254-255: 214–220. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2013.02.056.

- [10] 郭学永, 惠君明. 装置参数对 FAE 云雾状态的影响 [J]. *含能材料*, 2002, 10(4): 161–164. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2002.04.005.
GUO X Y, HUI J M. Influence of equipment parameters on FAE cloud status [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2002, 10(4): 161–164. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2002.04.005.
- [11] 刘庆明, 白春华, 李建平. 多相燃料空气炸药爆炸压力场研究 [J]. *实验力学*, 2008, 23(4): 360–370.
LIU Q M, BAI C H, LI J P. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2008, 23(4): 360–370.
- [12] 陈明生, 白春华, 李建平. 燃料抛撒的初始速率与结构动态响应数值模拟 [J]. *含能材料*, 2015, 23(4): 323–329. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.003.
CHEN M S, BAI C H, LI J P. Simulation on initial velocity and structure dynamic response for fuel dispersion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2015, 23(4): 323–329. DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.003.
- [13] 陈明生. 大体积燃料空气混合物爆轰基础问题研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 43–75.
CHEN M S. Research on basic characteristics of large volume fuel air mixtures detonation [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 43–75.
- [14] 王永旭, 解立峰, 贾晓亮, 等. 300 kg 装药 FAE 燃料爆炸抛撒成雾的实验研究 [J]. *爆破器材*, 2020, 49(2): 23–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.004.
WANG Y X, XIE L F, JIA X L, et al. Experimental study on 300 kg charge of FAE clouds by explosion dispersal [J]. *Explosive Materials*, 2020, 49(2): 23–28. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2020.02.004.
- [15] 白春华, 梁慧敏, 李建平, 等. 云雾爆轰 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 137–155.
- [16] RIPLEY R, DONAHUE L, ZHANG F. Jetting instabilities of particles from explosive dispersal [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1426(1): 1615–1618. DOI: 10.1063/1.3686594.
- [17] 宋述忠, 彭金华, 陈网桦, 等. 几种燃料云雾爆轰临界起爆能的研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2002, 22(4): 373–376. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2002.04.016.
SONG S Z, PENG J H, CHEN W H, et al. Study on critical initiation energy of several fuel-air mixture [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2002, 22(4): 373–376. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2002.04.016.

(责任编辑 王 晔)