

文章编号: 1006-9941(2024)12-1270-10

云雾区形貌对云雾爆轰超压毁伤威力的影响

王溪濛, 薛琨

(北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 云爆装置通常形成近似圆柱体形貌的燃料空气混合云雾区, 而与装药结构密切相关的云雾区形貌强烈影响其爆轰超压场的时空演化规律, 进而对爆轰超压毁伤威力产生显著影响。为了探究云雾区的形貌效应, 采用圆柱体云雾区理想爆轰数值计算方法, 分析了其爆轰过程中复杂的波的动力学过程, 研究了爆轰超压场的分布及演化, 建立了中心切面径向远场超压峰值随比例距离的衰减相似律, 得到了爆轰超压毁伤半径与云雾区形貌参数(半径/高度)的依赖关系。结果表明, 受云雾区内部复杂爆轰过程影响, 其径向远场超压场存在明显双峰现象; 双峰追赶导致爆轰超压峰值随比例距离变化曲线存在小幅特征突变现象, 且形貌参数越大, 该突变位置距起爆点越近; 当形貌参数在 2~4.5 范围内时, 其爆轰远场超压峰值随比例距离的衰减规律满足同一多项式相似律, 基于该相似律预测得到的超压毁伤半径最大误差不超过 8%; 而当形貌参数在 0.5~2 范围内时, 其超压毁伤半径随形貌参数的增大而减小。

关键词: 云雾爆轰; 云雾区形貌; 超压场; 毁伤威力

中图分类号: TJ55; TQ560.1

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2024202

0 引言

云雾爆轰是起爆多相含能燃料与空气的混合物形成的体积爆轰现象, 其毁伤性能直接影响实际效果, 因此研究云雾爆轰的毁伤威力至关重要。

目前的云雾爆轰基础研究发现, 单个云雾区爆轰的超压场及其超压毁伤效应与云雾区的状态场参数密切相关, 包括云雾区平均燃料浓度、云雾区覆盖范围以及云雾区形貌等^[1-3]。针对不同燃料配方、燃料浓度等条件, 通过实验研究特定云爆装置抛撒形成的云雾区爆轰^[4-5], 研究者获得了基于特定工况下的云雾爆轰超压峰值随比例距离的衰减规律, 或者通过数值模拟研究^[6], 建立了任意燃料浓度下的球体形貌云雾区爆轰超压峰值随比例距离衰减规律的预测模型。

然而, 由于实际云爆装置一般为薄壁圆柱体装药结构, 抛撒云爆燃料形成的云雾区形貌与球体差别较

大, 研究者们通过处理实验高速摄影记录, 给出了抛撒云雾区形貌、尺寸、扩展速度随时间的演化过程^[7], 发现起爆前云雾区的稳定形态通常为边缘模糊的近似扁圆柱体形貌。大量实验报道了^[7-13]近似圆柱体云雾区的形貌参数(即半径与高度比值)范围约为 2~4.5, 平均燃料浓度范围约为 0.05~0.15 kg·m⁻³。而且从本质上看, 球体形貌和圆柱体形貌云雾区的爆轰过程显然完全不同, 在球体云雾区爆轰过程中, 爆轰球面波呈无阻挡式传播, 在云雾区外呈现为单峰结构; 而在圆柱体云雾区爆轰过程中, 爆轰波会受到云雾区上下面以及侧面边界的约束, 形成复杂的反射波及稀疏波效应, 对爆轰波的传播产生影响, 进而影响整个云雾爆轰超压场的分布及演化。同时, 还有研究发现, 圆柱体云雾区形貌参数的变化也会对云雾爆轰超压场产生一定影响^[2], 但并未对其原因进行分析。

综上所述, 现有研究主要是针对特定工况的实验以及具有一定形貌偏差的球体云雾区爆轰进行研究, 缺乏更逼近真实情况的圆柱体云雾区的形貌参数对云雾爆轰超压场分布演化规律及其超压毁伤威力影响的深入研究。因此, 本研究通过理想状态下 C-J 爆轰近似下的数值模拟, 针对圆柱体云雾区的径向中心切面, 分析爆轰过程中波的复杂传播过程, 探究云雾区形貌

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-08-22

网络出版日期: 2024-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(U2341243、12122203)

作者简介: 王溪濛(1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事云雾爆轰毁伤威力评估研究。e-mail: 2487785401@qq.com

通信联系人: 薛琨(1982-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事多相爆燃流场流态控制研究。e-mail: xuekun@bit.edu.cn

引用本文: 王溪濛, 薛琨. 云雾区形貌对云雾爆轰超压毁伤威力的影响[J]. 含能材料, 2024, 32(12): 1270-1279.

WANG Xi-meng, XUE Kun. Influence of Cloud Morphology on Cloud Detonation Overpressure Damage Power[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2024, 32(12): 1270-1279.

参数对爆轰远场超压场时空演化规律的影响,建立爆轰超压峰值随比例距离的衰减相似律,并结合不同毁伤等级探究圆柱体云雾区爆轰超压毁伤威力与云雾区形貌参数的依赖关系,并与相同工况下的球体形貌云雾爆轰数值结果^[6]进行比较,为云雾爆轰超压毁伤威力的预测提供更准确的参考。

1 云雾爆轰数值计算

1.1 云雾爆轰状态方程及参数

本研究基于动力学分析软件AUTODYN的Euler求解器,云雾爆轰过程近似C-J理想爆轰,采用JWL状态方程^[14]描述云雾区状态:

$$p_s = Ae^{-R_1 \tilde{v}} + Be^{-R_2 \tilde{v}} + C\tilde{v}^{-(\omega+1)} \quad (1)$$

式中, A 、 B 、 C 、 R_1 、 R_2 和 ω 为JWL状态方程参数,其中参数 A 、 B 、 C 单位为kPa; \tilde{v} 为比体积与参考状态比体积的比值,由于云雾爆轰C-J爆压在MPa量级,忽略 $Ae^{-R_1 \tilde{v}}$,取 $A = 10^{-5}$ 、 $R_1 = 10^{-5}$ 。

选取某云爆燃料(乙醚:铝粉质量比为1.47:1),

假设燃料抛撒形成圆柱体云雾区,混合燃料全部转化为均匀分布的混合燃料蒸汽,具有一定的密度和能量。云雾区的燃料浓度 ρ_{fuel} 为

$$\rho_{\text{fuel}} = \frac{M_{\text{fuel}}}{V_{\text{cloud}}} = \frac{M_{\text{fuel}}}{\pi(R_{\text{cloud}})^2 \cdot H_{\text{cloud}}} \quad (2)$$

式中, M_{fuel} 为燃料总质量,kg; V_{cloud} 为圆柱体云雾区的体积,kg·m⁻³; R_{cloud} 为圆柱体云雾区的底面半径,m; H_{cloud} 为圆柱体云雾区的高,m。混合云雾区的密度 ρ_{mix} 是 ρ_{fuel} 的函数^[6],为

$$\rho_{\text{mix}} = \rho_{\text{air}} + \left[1 - \left(\frac{\kappa\omega}{1 + \omega} \right) \left(\frac{MW_{\text{air}}}{MW_{\text{fuel,g}}} \right) \right] \cdot \rho_{\text{fuel}} \quad (3)$$

式中, ρ_{air} 为常温常压下空气密度,kg·m⁻³; κ 为液相燃料蒸发部分的质量分数; ω 为燃料液相与固相组分初始质量比; MW_{air} 、 $MW_{\text{fuel,g}}$ 分别为空气和气相燃料的摩尔质量,g·mol⁻¹。表1为本研究采用的云雾爆轰参数^[6]和状态方程参数^[15],前期研究^[6]对比了该云雾爆轰参数与实验测试获得的云雾爆轰参数,其最大误差不得超过7.2%,证明了该云雾爆轰参数的可靠性。

表1 云雾爆轰参数^[6, 15]

Table 1 Detonation parameter of cloud^[6, 15]

$\rho_{\text{fuel}} / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$\rho_{\text{mix}} / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	B / kPa	R_2	C / kPa	ω	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$E_0 / \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$	$p_{\text{C-J}} / \text{kPa}$
0.05	1.218	419.08	0.62	499.76	0.366	1448	1617	1174
0.07	1.234	173.63	0.53	629.25	0.321	1595	2280	1452
0.09	1.249	198.57	0.50	735.82	0.289	1708	2941	1702
0.11	1.264	203.37	0.46	825.22	0.262	1784	3597	1894
0.13	1.280	178.25	0.42	907.59	0.241	1838	4225	2038
0.15	1.295	189.99	0.44	955.98	0.242	1879	4422	2151

Note: B 、 R_2 、 C 、 ω is parameter of JWL state equation, D is detonation velocity, E_0 is chemical energy, $p_{\text{C-J}}$ is detonation pressure.

1.2 数值仿真建模及参数设置

本研究将表1中的可靠云雾爆轰参数嵌入均匀云雾区中,建立云雾爆轰数值计算模型,对圆柱体形貌的云雾区爆轰超压场进行数值仿真研究。课题组前期研究^[6]对比了该类计算模型得到的云雾爆轰超压场仿真值与外场试验测试值,发现其超压起跳时间及超压峰值高度吻合,平均误差小于5%,验证了该计算模型针对云雾爆轰超压场研究的可靠性。

本研究建立的计算域模型包括圆柱体云雾区以及云雾区外的空气域,根据圆柱体的轴对称结构,建立如图1所示的二维旋转体模型,其中圆柱体轴线为旋转轴,其径向对应计算域的长边。云雾区底面半径为 R_{cloud} ,高为 H_{cloud} ,在相同燃料质量 M_{fuel} 和燃料浓度 ρ_{fuel} 工况条件下,圆柱体云雾区的半径和高度随形貌参数

$R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 的变化而变化,为保证数值计算模型获得完整有效的数据,取计算域的长与 $\sqrt[3]{M_{\text{fuel}}}$ 的比值为14,高与 $\sqrt[3]{M_{\text{fuel}}}$ 的比值为3.5。起爆点位于圆柱体云雾区几何中心,在圆柱体中心切面上设置径向均匀监测点,非旋转轴边界设置自由流出,计算域划分总数约116万的均匀网格,其中长边2150个网格,宽边540个网格。

为了探讨圆柱体云雾区的形貌参数 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 对云雾爆轰超压场的影响,根据现有实验报道的云雾区形貌和燃料浓度等状态参数^[7-13],参考与球体形貌最接近的圆柱体形貌参数,设置本研究的具体工况条件:形貌参数 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}} = 0.5 - 4.5$,每隔0.5取一个值,共9种;燃料浓度0.05~0.15 kg·m⁻³(当量比约为0.35~1.06),每隔0.02取一个值,共6种;选取燃料质

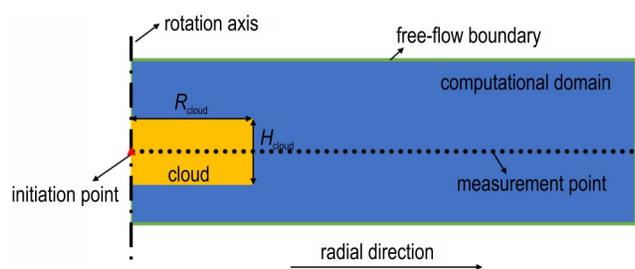


图1 圆柱体云雾区二维旋转体模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of a two-dimensional rotating body model in a cylindrical cloud

量 $M_{\text{fuel}}=10, 100, 250, 500$ kg, 共 4 种。需要注意的是, 由表 1 可知, ρ_{fuel} 在 $0.05\sim 0.15$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内时形成的混合云雾区密度基本上低于空气密度, 爆轰波到达燃料-空气边界处时会向内反射激波。因此, 后续选取该燃料配方下使云雾爆轰超压毁伤半径最大的最优燃料浓度 0.11 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的工况^[6], 对爆轰过程进行分析。

2 云雾爆轰超压场演化分析

2.1 等边圆柱体云雾区爆轰超压场

前期研究^[6]采用简化球体云雾区研究云雾爆轰超压场, 但更接近实际应用的圆柱体云雾区爆轰超压场及其演化规律显然更加复杂。本研究采用与球体形貌最相近的等边圆柱体云雾区爆轰, 分析其复杂的超压场演化。

通过 AUTODYN 软件进行爆轰数值仿真可直接获取典型时刻下圆柱体云雾区轴向切面的爆轰压力分布云图, 如图 2 所示为典型时刻下, $M_{\text{fuel}}=10$ kg、

$\rho_{\text{fuel}}=0.11$ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=0.5$ 的圆柱体云雾区爆轰在轴向界面(正视图)的压力分布云图及其等值线图。通过预设的监测点, 可获取如图 3 所示的对应工况及对应时刻下云雾区中心切面径向压力随位置的变化曲线, 显示了等边圆柱体云雾区爆轰的复杂波系运动。其中, 位置采用距中心起爆点的比例距离表示, 其定义式为:

$$\tilde{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{M_{\text{fuel}}}} \quad (4)$$

式中, R 为该位置距中心起爆点的距离, m。

等边圆柱体云雾区起爆后, 爆轰波开始向外传播, 至约 1.2 ms 时, 爆轰波同时到达云雾区上下边界和侧边界, 随后在云雾边界发生反射, 至约 1.7 ms 时, 爆轰波传播恰好覆盖整个云雾区, 云雾区外的首冲击波沿径向向外传播, 云雾区内的侧边界反射波沿径向向中心传播(2.6 ms); 至约 3.3 ms 时, 边界反射波在云雾区中心处汇聚, 随后向外扩散, 产生一道沿径向向外传播的中心汇聚反射波, 在径向距中心点约 1.67 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 位置处发生叠加, 产生另一道沿径向向外传播的叠加波(4.2 ms), 可以看到首冲击波、叠加波和中心汇聚反射波依次同时沿径向向外传播; 叠加波在云雾区侧边界附近(约 2.37 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 位置处)赶上并增强首冲击波, 增强后的首冲击波和中心汇聚反射波沿径向向外传播(6.0 ms), 云雾区内部的压力迅速衰减, 流场中其他的波系运动很弱, 形成明显的双峰结构; 值得注意的是, 在约 36.3 ms 时, 中心汇聚反射波在爆轰远场(约 8.77 $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 位置处)追赶上增强后的首冲击波, 使其压力出现微弱

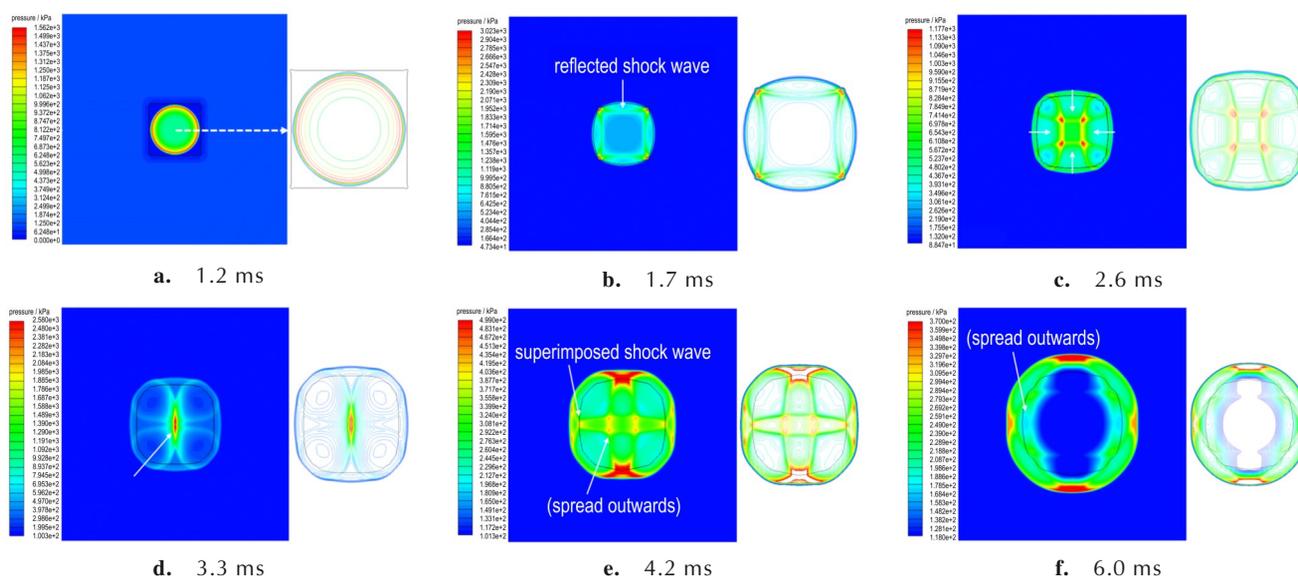


图2 典型时刻下的等边圆柱体云雾区爆轰压力分布云图

Fig.2 The detonation pressure nephogram of equilateral cylinder cloud at typical moments

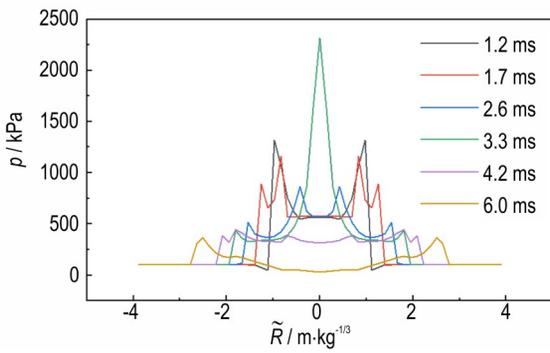


图3 典型时刻下的等边圆柱体云雾区爆轰中心切面径向压力变化

Fig.3 Radial pressure variation on the center section of equilateral cylindrical cloud detonation at typical moments

的二次增强,约从136.49 kPa微升至137.72 kPa,如图4所示,从而进一步演化为类似单主峰结构。

通过深入分析等边圆柱体云雾区爆轰过程可以看出,有别于球形形貌云雾区的爆轰过程^[6],其爆轰过程中爆轰波会受到云雾区上下面以及侧面边界的非球面约束,通过波的追赶、碰撞等,形成更为复杂的反射波及稀疏波效应。因此,进一步研究更接近真实情况的圆柱体形貌云雾爆轰非常重要。

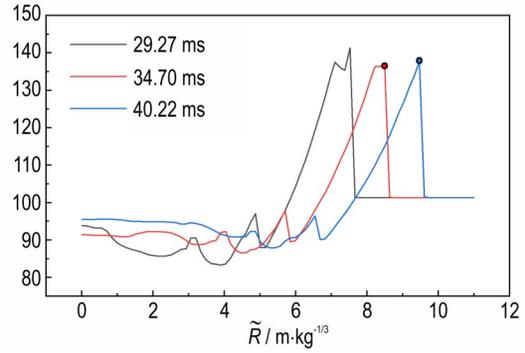


图4 中心扩散的反射波径向分量追赶首冲击波时压力随距离的变化

Fig.4 The variation of pressure with distance when the radial component of the reflected wave with center diffusion caught up with the first shock wave

2.2 扁平圆柱体云雾区爆轰超压场

在实际工程应用中,为实现云雾爆轰径向近场的高超压覆盖范围,抛撒云爆燃料通常追求形成更扁平的近似圆柱体形貌的云雾区,其形貌参数约为 $R_{cloud}/H_{cloud}=2-4.5$ 。因此探究扁平圆柱体云雾区爆轰超压场演化规律是更具价值的。以工况 $M_{fuel}=10\text{ kg}$ 、 $\rho_{fuel}=0.11\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, $R_{cloud}/H_{cloud}=4.5$ 的圆柱体云雾区爆轰为例,图5为在典

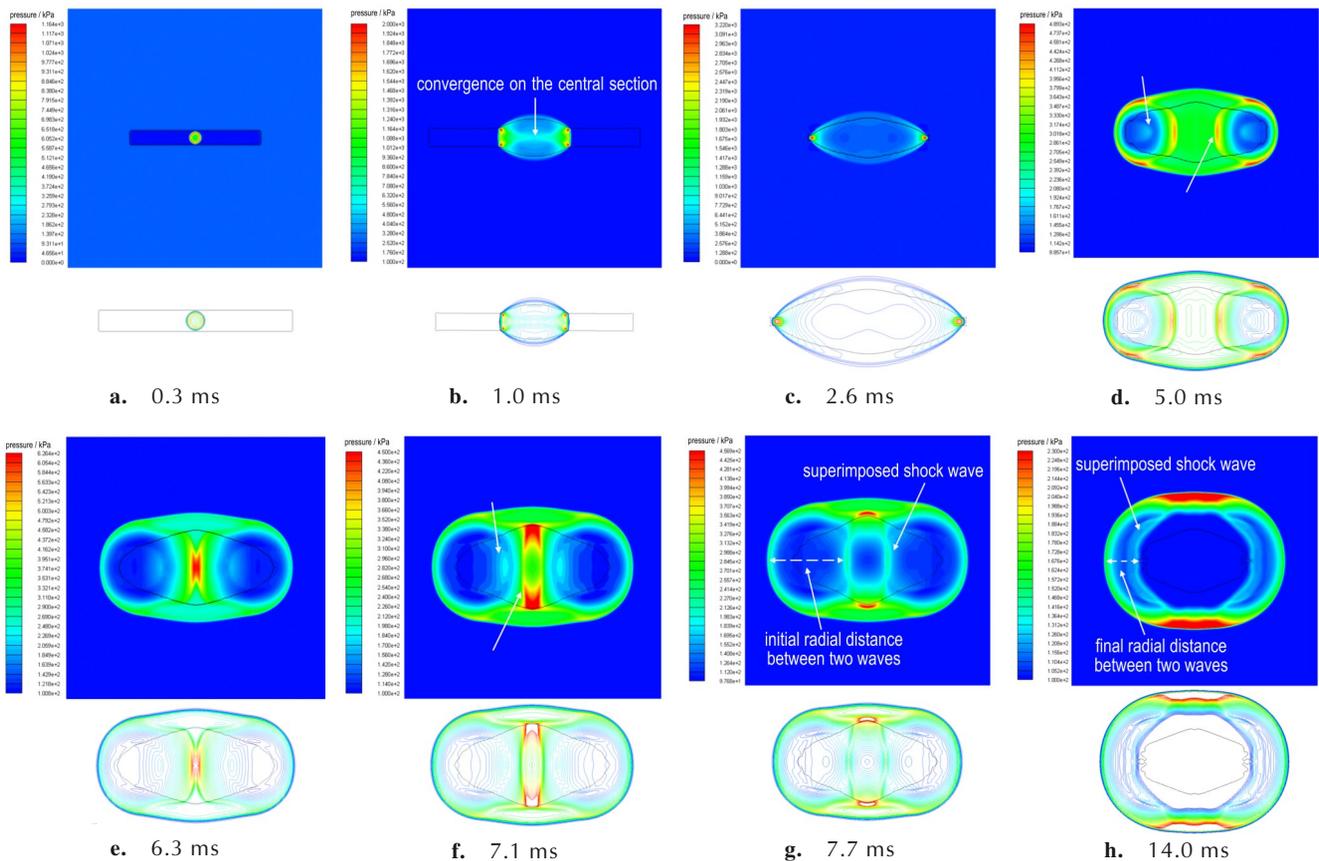
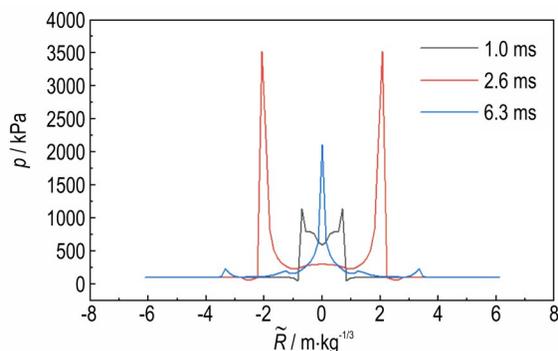


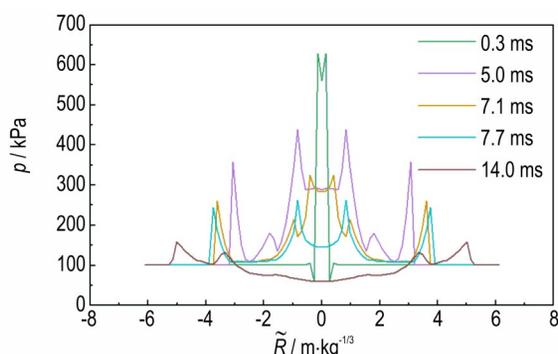
图5 典型时刻下的扁平圆柱体云雾区爆轰压力分布云图

Fig.5 The detonation pressure nephogram of flat cylindrical cloud at typical moments

型时刻下其轴向界面压力分布云图及其等值线图, 图6为对应工况及对应时刻下云雾区中心切面径向压力随位置的变化曲线。



a. corresponding to situations with high pressure



b. corresponding to situations with low pressure

图6 典型时刻下的扁平圆柱体云雾区爆轰中心切面径向压力随距离的变化曲线

Fig.6 Radial pressure variation on the center section of flat cylindrical cloud detonation at typical moments

扁平圆柱体云雾区起爆后,爆轰波开始向外传播,至约0.3 ms时爆轰波首先到达云雾区上下边界处,随后发生反射,形成向中心传播的轴向反射激波,在约1.0 ms时在中心汇聚随后向外扩散,形成沿径向向外传播的反射波,并在云雾区内部追上首冲击波,形成增强的首冲击波;增强的首冲击波沿径向向外传播,至约2.6 ms时到达云雾区侧边界发生反射,形成侧边界反射波,沿径向向内传播(5.0 ms);在约6.3 ms时,侧边界反射波在云雾区中心处汇聚后向外扩散(7.1 ms),形成一道沿径向向外传播的中心汇聚反射波;至约7.7 ms时,中心汇聚反射波与第二个侧边界反射波在约0.84 m·kg^{-1/3}位置处发生撞击叠加,形成沿径向向外传播的叠加波,并追赶着增强的首冲击波;随着时间的推移,叠加波持续追赶但始终未能追上(14.0 ms)。图7所示为叠加波追赶首冲击波过程中的两峰速度,可以看到,从约12.9 ms开始二者传播速度基本一致,即两波

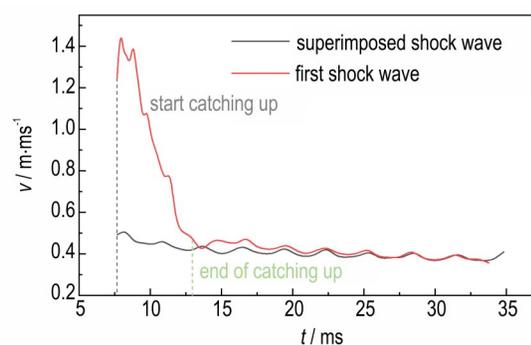


图7 在径向上叠加波追赶首冲击波过程中的两峰速度

Fig.7 The two peak velocities during the process of overlapping wave chasing the first shock wave in the radial direction

开始相对静止,由两波追赶导致的二者中间稀疏区域的径向压缩过程结束。

图8为上述工况在典型时刻下的径向压力随位置变化图,结合上述压力演化规律的分析可以看出,由于“叠加波持续追赶增强的首冲击波,随后二者相对静止”,使扁平圆柱体云雾区爆轰径向压力随距离的变化曲线存在明显的持续双峰结构,体现了扁平圆柱体形貌云雾区爆轰过程中复杂的波系结构,与等边圆柱体云雾区爆轰有所区别,并且显然该复杂波系效应将影响云雾爆轰的远场超压峰值场的演化,进而影响云雾爆轰超压毁伤威力的预测。

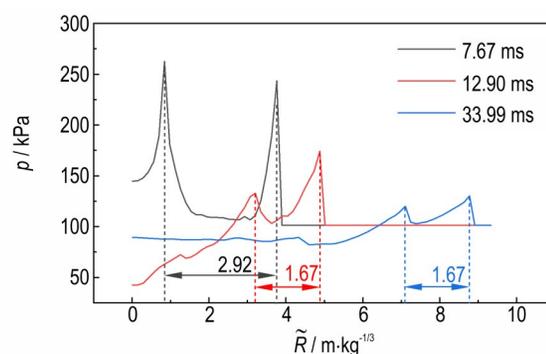


图8 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=4.5$ 的圆柱体云雾区爆轰径向压力随比例距离的变化

Fig.8 The variation of radial pressure of $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=4.5$ cylindrical cloud detonation with scaled distance

3 云雾爆轰超压毁伤威力

3.1 圆柱体云雾区爆轰超压峰值衰减规律

本研究通过不同形貌参数的圆柱体云雾区爆轰数值仿真,获取云雾区中心切面径向监测点处超压随时间的变化,取超压最大值为超压峰值,从而得到其超压峰值随比例距离的衰减规律。图9为 $\rho_{\text{fuel}}=0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

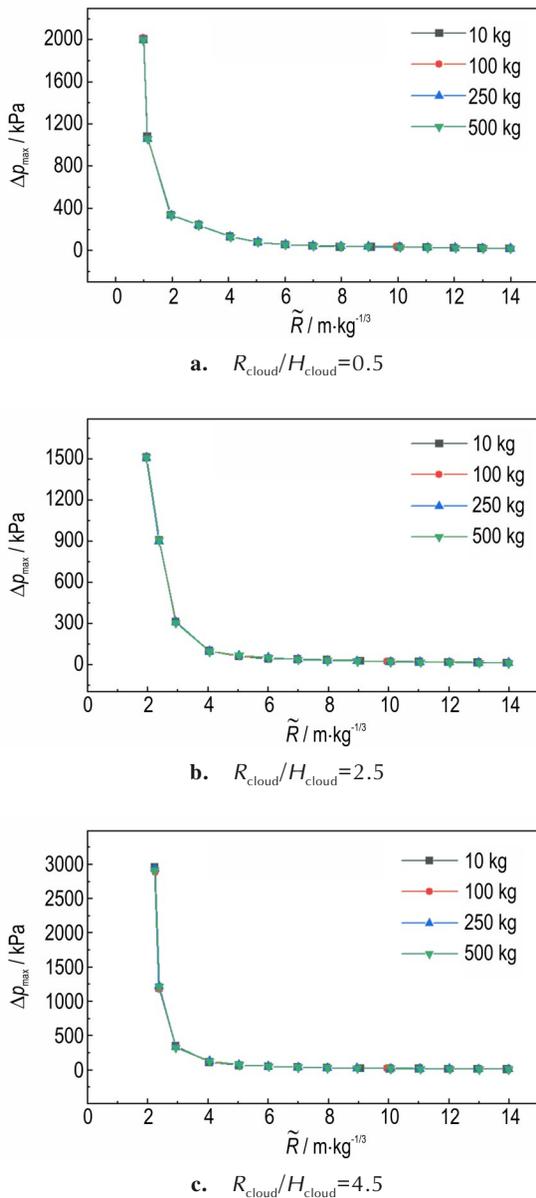


图9 不同燃料质量下圆柱体云雾区超压峰值随比例距离的变化
 Fig.9 The variation of cylindrical cloud detonation peak overpressure with scaled distance under different fuel mass

时,不同 M_{fuel} 的等边圆柱体及扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值随比例距离的衰减情况,可见,当 ρ_{fuel} 一定时,在不同形貌参数下的圆柱体形貌云雾区爆轰超压峰值衰减规律与 M_{fuel} 无关。

图10为 $\rho_{\text{fuel}}=0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=0.5, 2.5, 4.5$ 的圆柱体云雾区爆轰外场超压峰值随比例距离的变化曲线。可以看出,与完全符合多项式(式(5))的球体云雾区爆轰超压峰值衰减规律^[6]相比,圆柱体云雾区爆轰超压峰值随比例距离的变化存在某位置突然衰减甚至轻微反转上升的特征突变现象。

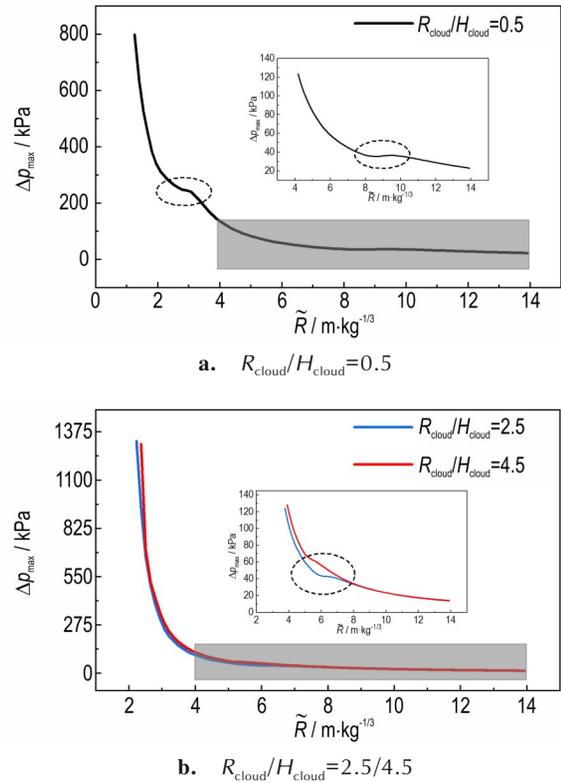


图10 圆柱体云雾区爆轰在云雾区外的超压峰值随比例距离的变化
 Fig.10 The variation of cylindrical cloud detonation peak overpressure outside the cloud with scaled distance

$$\Delta p_{\max} = \frac{A_1}{\tilde{R}} + \frac{A_2}{\tilde{R}^2} + \frac{A_3}{\tilde{R}^3} \quad (5)$$

式中, Δp_{\max} 为超压峰值, kPa; A_1, A_2, A_3 为多项式的拟合参数。

结合前文研究可知,该特征突变现象来源于圆柱体云雾区爆轰中复杂的追赶、叠加等波系运动。图10a中等边圆柱体云雾区爆轰超压峰值变化规律明显存在两个特征突变现象位置,第一个位置对应的是图2e所示的叠加波追赶上首冲击波,使其压力值衰减发生减缓;第二个对应的是图4的中心汇聚反射波在约 $8.77 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ 位置处追赶上增强后的首冲击波,使其压力出现微弱增强。图10b中扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值变化规律只存在一个特征突变现象位置,对应图5g、图5h中叠加波追赶增强后的首冲击波,二者之间稀疏区域在径向上不断压缩,导致首峰压力值衰减发生减缓。

从图10b中还能看出,扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值变化曲线的特征突变现象出现的位置与 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 有关,解释如下。图11所示为 $\rho_{\text{fuel}}=0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

时, $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2.5$ 的扁平圆柱体云雾区爆轰在典型时刻下的径向压力随位置的变化图, 结合图 8 和图 11 分析可知, 在不同 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 下, 其中心汇聚反射波与第二个侧边界反射波撞击形成的叠加波压力值均约为 262 kPa, 到追赶结束时叠加波的压力值均约为 133 kPa, 而 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 越大, 爆轰产物气体膨胀越严重, 在追赶过程中叠加波衰减得越快, 导致追赶的时间越短, 追赶结束时距起爆点越近, 因此 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 较大的云雾区爆轰超压峰值衰减曲线特征突变现象的位置更接近起爆点。

图 12 是 $\rho_{\text{fuel}}=0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2-4.5$ 的扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值衰减规律曲线, 可以看出, 当 ρ_{fuel} 一定时, 除了特征突变现象位置处存在一定偏差外, $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2-4.5$ 时的扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值衰减规律在宏观上基本一致。因此, 根据衰减正常区域的数据对曲线采用式(5)多项式形式进行拟合, 可以建立得到同一个超压峰值衰减

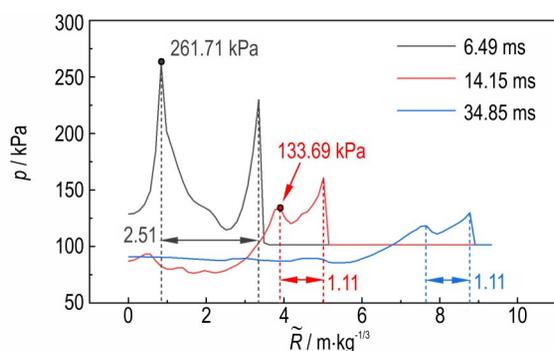


图 11 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2.5$ 的圆柱体云雾区爆轰径向压力随距离的变化

Fig. 11 The variation of radial pressure of $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2.5$ cylindrical cloud detonation with scaled distance

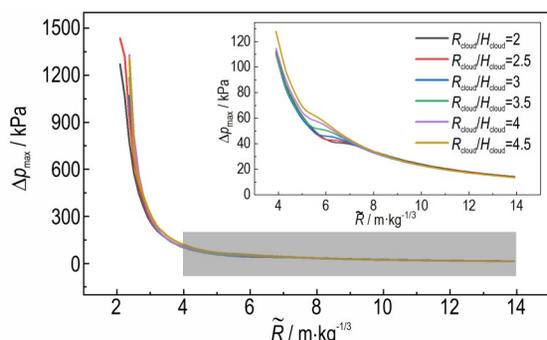


图 12 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2-4.5$ 的圆柱体云雾区爆轰超压峰值随比例距离的变化

Fig. 12 The variation of $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2-4.5$ cylindrical cloud detonation peak overpressure outside the cloud with scaled distance

相似律, 如图 13 所示。同时, 超压峰值衰减相似律与燃料浓度相关, 因此本研究针对不同 ρ_{fuel} 建立了实际扁平云雾区爆轰超压峰值衰减相似律, 拟合系数如表 2 所示。

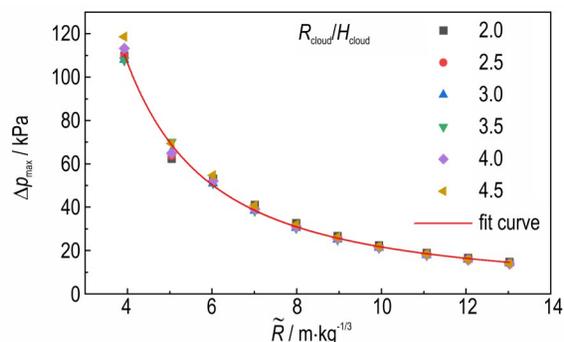


图 13 $\rho_{\text{fuel}}=0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值随比例距离衰减相似律

Fig. 13 The similarity decay law of flat cylindrical cloud detonation peak overpressure with scaled distance when $\rho_{\text{fuel}}=0.11 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$

表 2 不同燃料浓度下扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值衰减相似律拟合系数

Table 2 Fitting coefficient of similarity law for flat cylindrical cloud detonation overpressure peak decay under different fuel concentration

$\rho_{\text{fuel}} / \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	A_1	A_2	A_3	R^2
0.05	146.81	148.37	2805.39	0.997
0.07	133.58	389.44	2677.71	0.994
0.09	139.73	402.89	2683.40	0.996
0.11	110.17	933.73	1320.40	0.995
0.13	80.71	1225.28	376.55	0.998
0.15	79.28	1128.96	462.04	0.999

3.2 圆柱体云雾区爆轰的超压毁伤威力

目前研究广泛采用超压准则对云雾爆轰冲击波效应的毁伤威力进行评价^[16], 将冲击波超压值与毁伤程度相联系。基于超压准则, 取 30, 50, 100 kPa 分别作为轻伤、重伤、死亡三个超压毁伤等级 (X= I、II、III) 的超压阈值, 得到圆柱体云雾区爆轰三个等级下的中心切面径向超压毁伤比例半径 \tilde{R}_X 。当 $\rho_{\text{fuel}}=0.05\sim 0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 基于 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2-4.5$ 的扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值衰减相似律获得的三级超压毁伤比例半径如图 14 蓝线所示, 其中, 衰减相似律对 \tilde{R}_I 和 \tilde{R}_{III} 均预测良好, 而对于特征突变位置对应的 \tilde{R}_{II} 只能给出误差不超过 8% 的近似预测。根据上述建立的衰减相似律, 在目前的实际工程应用中, 已知云爆燃料 M_{fuel} 但

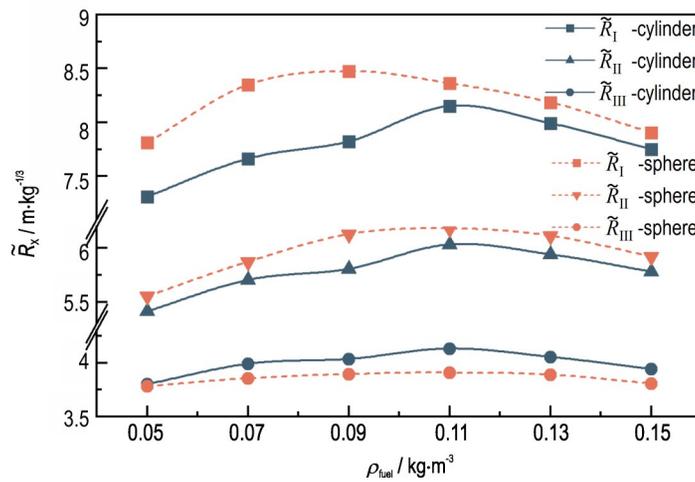


图 14 基于超压峰值衰减相似律得到的三级超压毁伤比例半径随燃料浓度的变化

Fig.14 The variation of the overpressure damage scaled radius with fuel concentration based on the similarity law of peak overpressure decay

未知抛撒后近似扁平圆柱体云雾区的 ρ_{fuel} 和 R_{cloud}/H_{cloud} 时,可预测其爆轰三级超压毁伤比例半径的参考范围分别约为 $7.31\sim 8.15\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (I级)、 $5.41\sim 6.03\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (II级)、 $3.80\sim 4.13\text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (III级)。

在相同 M_{fuel} 和 ρ_{fuel} 工况下,圆柱体形貌云雾区爆轰(图 14 蓝线)和球体形貌云雾区爆轰(图 14 橙线)的三级 \tilde{R}_x 的最大对比差别率为 8.23%。其中,扁平圆柱体云雾区爆轰的 \tilde{R}_I 、 \tilde{R}_{II} 偏小, \tilde{R}_{III} 偏大,这是因为扁平圆柱体云雾区在径向覆盖范围更大,爆轰波传播至云雾区侧边界后开始衰减的位置距起爆点更远,因此 III 级毁伤范围更大。但扁平的云雾区爆轰的产物气体膨胀更严重,在径向远场压力衰减更严重,因此 I、II 级毁伤范围更小。因此,加入云雾区形貌参数这个影响因素,可以使云爆超压毁伤威力的预测更加准确。

根据上述分析,当 ρ_{fuel} 一定时,形貌参数在 $R_{cloud}/H_{cloud}=2\sim 4.5$ 范围内的云爆超压毁伤比例半径为可预测定值,接下来继续讨论 $R_{cloud}/H_{cloud}=0.5\sim 2$ 的云爆超压

毁伤比例半径。图 15 为不同 ρ_{fuel} 下, $R_{cloud}/H_{cloud}=0.5\sim 2$ 的圆柱体云雾区爆轰的三级超压毁伤比例半径,可以看出,当 ρ_{fuel} 一定时,在该形貌参数范围内, R_{cloud}/H_{cloud} 越大,其爆轰三级毁伤比例半径反而越小,且不同 ρ_{fuel} 下毁伤比例半径随 R_{cloud}/H_{cloud} 的变化趋势极为相似,进一步分析发现, $R_{cloud}/H_{cloud}=0.5、1、1.5$ 与 $R_{cloud}/H_{cloud}=2$ 的三级超压毁伤比例半径存在如式(6)所示的固定倍数关系,误差不超过 1%。三级固定倍数如表 3 所示。

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{X, R_{cloud}/H_{cloud}=0.5} &= a_X \cdot \tilde{R}_{X, R_{cloud}/H_{cloud}=2} \\ \tilde{R}_{X, R_{cloud}/H_{cloud}=1.0} &= b_X \cdot \tilde{R}_{X, R_{cloud}/H_{cloud}=2} \\ \tilde{R}_{X, R_{cloud}/H_{cloud}=1.5} &= c_X \cdot \tilde{R}_{X, R_{cloud}/H_{cloud}=2} \end{aligned} \quad (6)$$

综上所述,根据扁平圆柱体云雾区爆轰超压峰值衰减相似律,基于超压准则可以预测不同燃料浓度下 $R_{cloud}/H_{cloud}=2\sim 4.5$ 时的圆柱体云爆三级超压毁伤比例半径,再根据固定倍数公式,可以进一步预测不同燃料浓度下 R_{cloud}/H_{cloud} 为 0.5, 1, 1.5 时的圆柱体云爆三级超压毁伤比例半径。

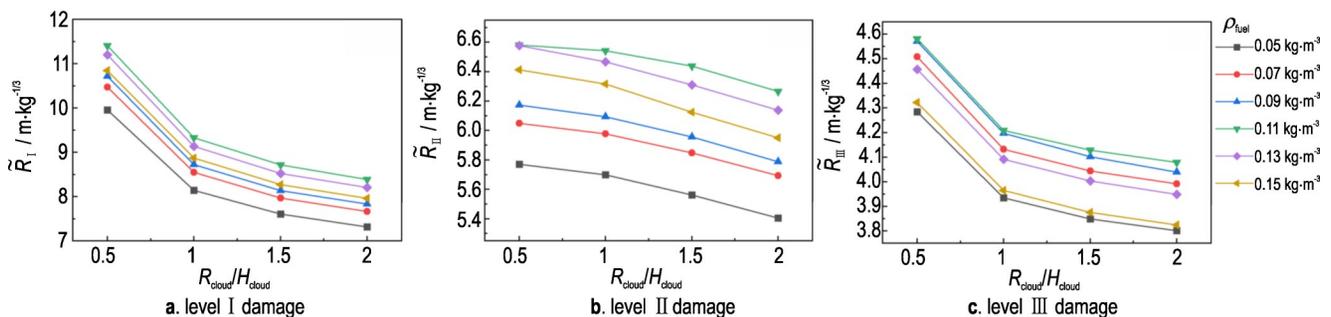


图 15 不同燃料浓度下 $R_{cloud}/H_{cloud}=0.5\sim 2$ 云雾区爆轰的三级毁伤比例半径

Fig.15 The overpressure damage scaled radius of cloud detonation with $R_{cloud}/H_{cloud}=0.5\sim 2$ under different fuel concentration

表3 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}} = 0.5, 1, 1.5$ 与 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2$ 的三级超压毁伤比例半径的固定倍数

Table 3 The fixed multiples of the overpressure damage scaled radius between $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=0.5, 1, 1.5$ and $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}=2$

The fixed multiples	X= I	X= II	X= III
a_x	1.362	1.067	1.127
b_x	1.113	1.053	1.035
c_x	1.039	1.028	1.013

4 结论

本研究分析了圆柱体云雾区形貌参数 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}}$ 对云雾区内部爆轰波及云雾区外部远场波传播的复杂影响,揭示了形貌参数对云雾爆轰超压峰值衰减规律的影响机制,建立了形貌参数与云雾爆轰超压毁伤威力的依赖关系,主要研究结论如下:

(1) 圆柱体形貌的云雾区在爆轰过程中的波系结构相当复杂,在云雾区燃料浓度 $0.05\sim 0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 范围内情况如下。发生爆轰后,等边圆柱体云雾区内爆轰波在上、下、侧面三个边界的反射波在中心碰撞,沿径向发射两道向外传播的反射冲击波,分别在云雾区边缘附近和爆轰远场与首冲击波汇合,并形成一段时间的明显双峰结构,在爆轰远场双峰汇合演化为单主峰结构的超压曲线;扁平圆柱体云雾区内爆轰波在侧边界的反射波碰撞叠加,形成沿径向向外传播的反射冲击波,持续追赶首冲击波但并未追上,形成明显的持续双峰结构超压曲线。

(2) 爆轰远场的双峰追赶导致爆轰超压峰值随比例距离的变化曲线存在衰减突然减缓甚至轻微反转上升的小范围、小幅度特征突变现象,且云雾区形貌参数越大,特征突变位置距起爆点越近。

(3) 当形貌参数在 $2\sim 4.5$ 范围内时,爆轰超压峰值衰减规律基本满足同一衰减相似律,通过建立该衰减相似律,获得了不依赖于形貌参数的扁平圆柱体云雾区爆轰超压毁伤比例半径的预测值,且与同工况下球体形貌云雾爆轰的最大差别率为 8.23% ,提升了云爆超压毁伤威力预测准确度;当形貌参数在 $0.5\sim 2$ 范围内时,形貌参数越大,爆轰超压毁伤比例半径越小,并给出了形貌参数等于 $0.5, 1, 1.5$ 与形貌参数等于 2 的云雾爆轰超压毁伤比例半径的固定倍数关系预测公式。

(4) 针对实际工程应用,可对燃料浓度 $0.05\sim 0.15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、形貌参数 $R_{\text{cloud}}/H_{\text{cloud}} = 2 - 4.5$ 的圆柱

体云雾区爆轰超压毁伤威力进行快速评估,给出了其爆轰三级超压毁伤比例半径参考范围分别为 $7.31\sim 8.15 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (I级轻伤)、 $5.41\sim 6.03 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (II级重伤)、 $3.80\sim 4.13 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (III级死亡)。

参考文献:

- [1] 白春华, 梁慧敏, 李建平, 等. 云雾爆轰[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
BAI Chun-hua, LIANG Hui-min, LI Jian-ping, et al. Cloud and mist detonation[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 廉政. 云雾爆轰超压场及其破坏效应[D]. 北京, 北京理工大学, 2020.
LIAN Zheng. Overpressure field of cloud detonation and their destructive effects[D]. Beijing, Beijing Institute of Technology, 2020.
- [3] 苏震, 高洪泉, 赵宏伟, 等. 高落速云雾爆轰的数值模拟[J]. 含能材料, 2023, 31(5): 431-439.
SU Zhen, GAO Hong-quan, ZHAO Hong-wei, et al. Numerical simulation of cloud detonation at high falling velocity[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(5): 431-439.
- [4] 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, (04): 360-370.
LIU Qing-ming, BAI Chun-hua, LI Jian-ping. Study on blast field characteristics of multiphase fuel air explosive[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, (04): 360-370.
- [5] BAI Chun-hua, WANG Ye, XUE Kun, et al. Experimental study of detonation of large-scale powder-droplet-vapor mixtures[J]. Shock Waves, 2018, 28(3): 599-611.
- [6] 徐永康, 薛琨. 基于人工神经网络算法的多相云雾爆轰毁伤效应预测模型[J]. 兵工学报, 2024, 45(6): 1889-1905.
XU Yong-kang, XUE Kun. Artificial neural network-based prediction model for multiphase cloud detonation damage effect[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(6): 1889-1905.
- [7] 何超, 杜海文, 施长军, 等. 抛撒结构对FAE燃料抛撒影响的试验研究[J]. 火工品, 2021 (05): 10-13.
HE Chao, DU Hai-wen, SHI Chang-jun, et al. Test study on the influence of dispersal structure on FAE fuel dispersal[J]. Initiators Pyrotechnics, 2021 (05): 10-13.
- [8] YE Cong-liang, DU Qing-lei, LIU Li-juan, et al. Flame behavior, shock wave, and instantaneous thermal field generated by unconfined vapor-liquid propylene oxide/air cloud detonation[J]. Defence Technology, 2023, 25(7): 18-32.
- [9] 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.
WANG Yong-xu, XIE Li-feng, JIA Xiao-liang, et al. Experimental study on 300 kg charge of FAE clouds by explosion dispersal[J]. Explosive Materials, 2020, 49(2): 23-28.
- [10] CHEN Jia-chen, MA Xin, MA Qiu-ju. Study on concentration and turbulence of solid-liquid FAE in dispersal process[J]. Defence Technology, 2018, 14(6): 657-660.
- [11] 韩天一, 杜海文, 余建斌, 等. 非对称起爆云雾爆轰威力场分布特性研究[J]. 火箭与制导学报, 2016, 36(5): 57-60.
HAN Tian-yi, DU Hai-wen, YU Jian-bin, et al. Study on blast field of FAE by unsymmetrical detonation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Gui dance, 2016, 36(5): 57-60.
- [12] 贾飞. 云爆剂抛撒对二次起爆型云爆弹威力的影响研究[D]. 南

- 京: 南京理工大学, 2014.
- JIA Fei. Study on the influence of cloud detonation fuel dispersion on the power of re-initiation FAE[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [13] 郭学永. 云爆战斗部基础技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- GUO Xue-yong. Basic technical research on fuel air explosive warhead [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2006.
- [14] 赵星宇, 白春华, 姚箭, 等. 燃料空气炸药爆轰产物JWL状态方程参数计算[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 1921-1929.
- ZHAO Xing-yu, BAI Chun-hua, YAO Jian, et al. Calculation of parameters of JWL equation of state for detonation products of fuel-air explosives[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(10): 1921-1929.
- [15] SUCESKA M, DOBRILOVIC M, BOHANEK V, et al. Estimation of explosive energy output by EXPLO5 thermochemical code[J]. *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 2021, 647(4): 231-238.
- [16] BAI Chun-hua, ZHAO Xing-yu, YAO Jian, et al. Numerical investigation of the shockwave overpressure fields of multi-sources FAE explosions[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(4): 1168-1177.

Influence of Cloud Morphology on Cloud Detonation Overpressure Damage Power

WANG Xi-meng, XUE Kun

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The cloud detonation devices typically form a fuel air mixture cloud with an approximate cylindrical shape. The morphological parameters of the cloud closely related to the charge structure strongly affect the spatiotemporal evolution law of its detonation overpressure field, which in turn has a significant impact on its detonation overpressure damage power. In order to explore the morphological effects of cloud, through the numerical calculation method for ideal detonation in cylindrical cloud, the complex dynamic process of waves during its detonation process was analyzed. The evolution and distribution law of the cloud detonation overpressure field was investigated. A similar decay law of the radial far-field peak overpressure with scaled distance was established. The dependence relationship between the detonation overpressure damage radius and the morphological parameters (ratio of radius to height) of the cloud was provided. The research results indicated that there was a significant bimodal phenomenon in the radial far-field overpressure field, due to the complex detonation process inside the cylindrical cloud. The pursuit of two peaks resulted in a characteristic mutation phenomenon of small amplitude and small range in the variation curve of the peak overpressure of detonation with scaled distance, and the larger the morphological parameter, the closer the certain position was to the detonation point. Furthermore, when the morphological parameters within the range of 2-4.5, the decay law of the detonation far-field peak overpressure with scaled distance satisfied the same similarity law. The maximum error of the overpressure damage radius obtained based on that similarity law was less than 8%. When the morphological parameters within the range of 0.5-2, the detonation overpressure damage radius decreased with the increase of morphological parameters.

Key words: cloud detonation; cloud morphology; overpressure field; damage power

CLC number: TJ55; TQ560.1

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2024202

Grant support: National Natural Science Foundation of China (Nos. U2341243, 12122203)

(责编: 高毅)