

doi: 10.7690/bgzdh.2022.05.017

水滴帷幕对战斗部自动化生产线防殉爆性能仿真

左亚帅¹, 张会锁¹, 姚静晓², 李强³, 焦军虎³

(1. 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2. 山西江阳化工有限公司弹药装药技术创新中心, 太原 030041;
3. 山西中通高技术有限责任公司技术部, 山西 晋中 030600)

摘要: 针对弹药生产线安全生产的需求, 提出一种水滴帷幕的防殉爆装置。利用 APDL 进行编程, 实现水滴在水幕区域的随机投放; 用 Autodyn 仿真软件对水滴帷幕的防殉爆效果进行验证; 通过对 22 种工况的分析, 发现随单位区域内水滴数量的增加, 水滴帷幕的防殉爆效果不断增强, 但当水滴到达一定数量后, 水滴帷幕对冲击波超压及破片速度的衰减率趋于稳定。结果表明: 该水滴帷幕对冲击波超压的衰减率约为 63.2%, 对破片速度的衰减率约为 87.5%, 具有良好的衰减效果, 在保证安全性的同时提高生产效率。

关键词: 爆炸力学; 水滴帷幕; 防殉爆; 数值模拟; 随机分布

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Simulation of Anti-sympathetic Detonation Performance of Water Drop Curtain on Warhead Automatic Production Line

Zuo Yashuai¹, Zhang Huisuo¹, Yao Jingxiao², Li Qiang³, Jiao Junhu³

(1. College of Mechatronics Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Ammunition Charging Technology Innovation Center, Shanxi Jiangyang Chemical Co., Ltd., Taiyuan 030041, China;
3. Technology Department, Shanxi Zhongtong High Technology Co., Ltd., Jinzhong 030600, China)

Abstract: According to the requirement of safety production in ammunition production line, an anti-sympathetic detonation device of water drop curtain was proposed. APDL is used to program to realize the random throwing of water drops in the water curtain area, and Autodyn simulation software is used to verify the anti-sympathetic detonation effect of the water drop curtain; Through the analysis of 22 working conditions, it is found that with the increase of the number of water droplets in the unit area, the anti-sympathetic detonation effect of the water droplet curtain is enhanced, but when the number of water droplets reaches a certain amount, the attenuation rate of the water droplet curtain on the shock wave overpressure and the fragment velocity tends to be stable. The results show that the attenuation rate of the water drop curtain to the shock wave overpressure is about 63.2%, and the attenuation rate to the fragment velocity is about 87.5%. The water drop curtain has a good attenuation effect, which ensures the safety and improves the production efficiency.

Keywords: explosion mechanics; water drop curtain; anti-sympathetic detonation; numerical simulation; random distribution

0 引言

弹药是国防科技工业最基础的产品之一, 弹药的生产能力和水平, 直接反映了一个国家的国防制造能力和军事对抗能力, 通过几十年的不断创新, 我国弹药生产逐步向自动化生产线方式发展^[1]。战斗部是弹药毁伤目标或完成既定终点效应的部分, 典型的战斗部由壳体、装填物和引信组成^[2]。其中, 装填物通常为炸药, 具有易燃易爆的特性, 在生产装配过程中具有高危险性; 因此, 安全生产非常重要, 处理不当会引发一系列重大事故。

从炸药的起爆机理分析^[3], 生产线上存在的引爆因素有设备升温、机械磨损火花、磕碰撞击、机

械故障、静电火花和电火花等。通过加强管理可以减少上述因素的发生概率, 但无法完全消除。战斗部自动化生产线上单个小当量炸药的爆炸极易引发生产线上其他战斗部发生连锁殉爆, 甚至对相邻生产线乃至整个厂区造成难以估量的损失; 因此, 战斗部自动化生产线中的防殉爆极为重要。引起殉爆的主要因素有冲击波超压、正压作用时间、破片速度和爆轰产物等^[4-5]。防护屏障对阻挡屏障内爆炸所产生的冲击波、爆轰产物流和高速破片等能起到显著作用, 是当前各国公认的有效防护设施^[6], 经过长试验和理论研究, 国内外对防护屏障的研究逐渐完善和成熟^[7-11]。

国内主流的防爆墙按防护机理可分为刚性防爆

收稿日期: 2022-01-15; 修回日期: 2022-02-15

作者简介: 左亚帅(1996—), 男, 山东人, 硕士, 从事弹药工程与毁伤技术研究。E-mail: 1602204349@qq.com。

墙、柔性防爆墙和惯性防爆墙^[12]，但生产线上战斗部排列密集，工作空间狭小，现有的防护屏障直接应用于战斗部自动化生产线时，需要与运输装置固连；在战斗部转工位时，防护屏障随运输装置同步运动，对运输装置功率要求更高，且极大地压缩了机械臂的工作空间和时间，无法保证生产效率。

水体防爆墙具有成本低、使用限制条件小、后期清理工序简单、二次毁伤小等优点，同时对飞散的破片也有明显的抑制效果^[13]。但需要定期补充水体，检修复杂；一旦发生损坏，水体飞溅，对周围用电设备造成影响较大。因此，笔者提出应用于战

斗部自动化生产线的水滴帷幕防殉爆装置，水体补充简便，可循环使用，且能提高局部区域空气湿度，减少静电火花的产生概率。

1 防殉爆装置结构及原理

如图 1 所示，战斗部自动化生产线防殉爆装置由水滴生成装置、防溅保护装置和水槽构成。水滴生成装置可形成水滴帷幕，生成频率和液滴直径可控^[14]。防溅保护装置可以保证水滴下落后，基本不引起迸溅，防止溅出的水滴影响到周围的设备。水槽对水滴进行收集，收集后可重复利用。

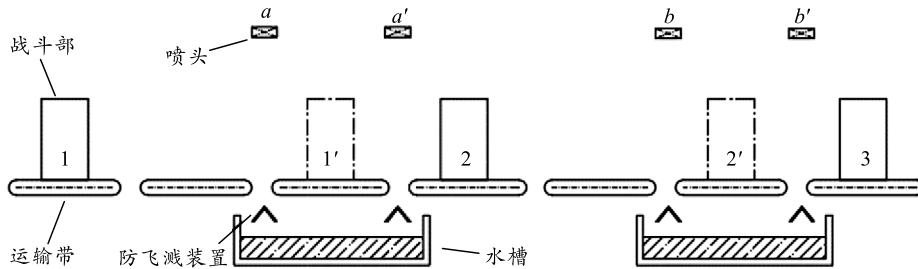


图 1 防殉爆装置结构及原理

生产线处于加工状态时，战斗部处于 1、2、3 号位置，水滴生成装置 a、b 工作，在每 2 个战斗部之间形成一道水滴帷幕。加工完毕后，生产线进入转工位状态，水滴生成装置 a'、b' 开始工作，形成稳定的水滴帷幕后，水滴生成装置 a、b 关闭；战斗部开始向右移动，当战斗部移动到 1'、2' 位置后停止移动；水滴生成装置 a、b 工作，a'、b' 关闭；战斗部继续向右移动，进入加工位置。该装置可保证战斗部处于任一状态时，每 2 个战斗部之间至少有一道水滴帷幕起到防护作用。

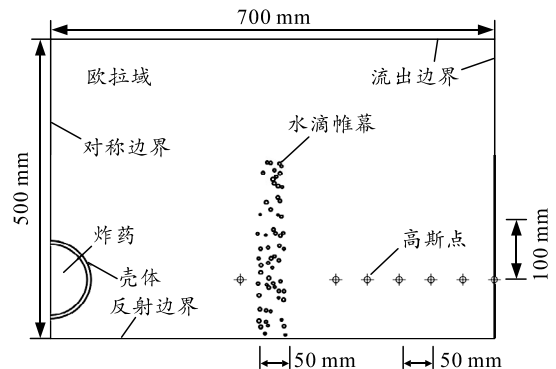


图 2 数值计算模型

2 数值模型

2.1 计算模型及材料参数

水滴帷幕高 300 mm，由于冲击波及高速破片作用具有瞬时性，水滴自帷幕顶部自由落体所需时间约为 250 ms，冲击波和破片从接触到水幕开始计时至作用结束约为 200 μs，二者时间相差较大，可近似将水滴看作静止不动；同时为了简化计算模型，忽略水滴的运动过程，将其看成不同大小标准圆形水滴组合而成的静止帷幕。计算模型如图 2 所示，空气域高 500 mm，宽 700 mm；水滴帷幕高 300 mm，宽 50 mm；模型左侧单元节点施加对称边界条件，上侧和右侧单元节点施加流出边界条件，下侧单元节点不加边界条件，默认为反射边界。网格宽度 1 mm，网格总数约 35 万。

数值模型由炸药、水滴、空气和壳体 4 部分组成，炸药的爆炸及水滴的飞散属于材料大变形问题，均采用欧拉算法，壳体采用拉格朗日算法。考虑到水幕区域界面形状复杂，水幕内水滴具有高度的非连续性，为使数值计算模型与真实水幕更为相似，通过 APDL 自编程序，对水滴帷幕区域进行水滴的随机投放，水滴直径约为 5 mm^[14]，考虑到水滴下落过程中相互碰撞造成飞散和融合，水滴直径取 4~6 mm，图示模型中水滴数量为 60 个。

由于冲击波初始速度高、衰减快，破片初始速度相对较低但衰减慢。2 种毁伤元对目标的作用一般有先后顺序，当战斗部距目标非常近时，冲击波先作用于破片，破片后作用，此时耦合作用不明显^[15]。且仿真结果表明，冲击波对水滴的飞散作用不明显，水滴的飞散主要由爆轰产物和破片撞击引

起，而破片与爆轰产物几乎同时接触到水幕。笔者分别研究水滴帷幕对冲击波及高速破片的削减作用。模型中炸药使用 TNT，装药量为 1.445 kg，壳体使用合金铝，厚度 2 mm，气体使用理想空气，防护帷幕使用水，各部分材料的状态方程和强度模型如表 1 所示，材料均在 Autodyn 材料库中选取。

表 1 部件材料模型

部件	材料	状态方程	本构模型
空气域	空气	理想气体	—
炸药	TNT	JWL	—
水滴帷幕	水	多项式	—
壳体	2024T351 铝	Shock	Johnson Cook

$$P = \begin{cases} 1.40717/Z + 0.55397/Z^2 - 0.003572/Z^3 + 0.000625/Z^4 & 0.05 \leq Z \leq 0.3 \\ 0.61938/Z - 0.03262/Z^2 + 0.21324/Z^3 & 0.3 \leq Z \leq 1 \\ 0.0662/Z + 0.405/Z^2 + 0.3288/Z^3 & 1 \leq Z \leq 10 \end{cases} \quad (1)$$

式中： P 为冲击波超压峰值，MPa； Z 为比例距离， $Z = R/W^{1/3}$ ； R 为测点与爆心的距离，m； W 为 TNT 当量，kg。

当炸药在刚性地面爆炸时，冲击波参数可按 2 倍的装药量确定^[18]。冲击波超压的仿真结果与理论计算值如图 3 所示，两者在数值上虽有所差别，但变化规律基本一致，证明用上述算法、模型材料及网格数量对冲击波进行仿真所得结果是合理的。

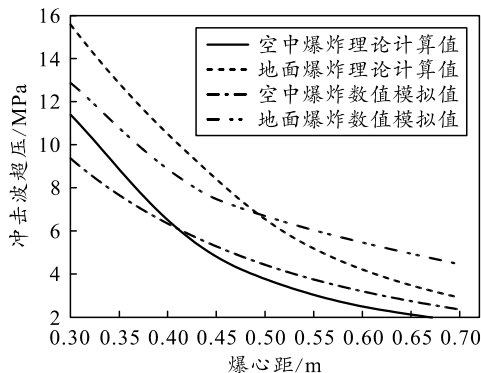


图 3 冲击波超压理论计算与仿真结果

采用球形装药，壳体厚度 2 mm，对破片进行仿真，将模拟结果与理论计算值进行比较。破片初速 v_0 可以通过 Gurney 公式估算^[19]：

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{m_e / (m_s + 0.5m_e)} \quad (2)$$

式中： m_s 为弹体金属质量； m_e 为炸药质量； $\sqrt{2E}$ 为炸药的 Gurney 常数，m/s，其与炸药爆速成正比， $\sqrt{2E} = 520 + 0.28D$ ， D 为炸药爆速，m/s。

根据装药壳体结构尺寸，壳体材料为铝，密度取 2.7 g/cm³，壳体质量为 236.2 g，TNT 在装药密度为 1.64 g/cm³ 时，爆速为 6 950 m/s。可得破片初

2.2 仿真模型验证

为验证数值模拟中所用算法、材料模型和网格数量对仿真结果的准确性影响，采用 1.445 kg 球形装药 TNT 分别在无界空气与刚性地面上爆炸，对冲击波进行模拟，将模拟结果与理论计算值进行比较。由于生产线战斗部摆放密集，比例距离过小，当比例距离 $Z=0.3$ 时，各经验公式计算所得冲击波超压之间相差近 10 倍，存在较大波动，在选取不同经验公式计算时，可能造成结果偏差较大^[16]。Henrych 超压峰值计算公式适用范围比例距离最小为 0.05^[17]，笔者采用 Henrych 公式作为理论计算依据。

速 $v_0=3\ 070$ m/s。从数值模拟结果中，任意选取 5 个破片，对其速度取平均值 $\bar{v}=3\ 352.2$ m/s，与理论计算值进行比较，误差为 8.41%，在可接受范围内，证明用上述算法、模型材料及网格数量对高速破片进行仿真所得结果是合理的。

3 水滴帷幕对冲击波超压的衰减

由冲击波临界起爆能量公式^[3]可知，为避免生产线因冲击波作用引发殉爆，主要考虑削减冲击波超压峰值和正压作用时间。

$$E_c = \lambda p^2 \tau \quad (3)$$

式中： E_c 为冲击波临界起爆能量； λ 为与炸药有关的常数； p 为冲击波压力； τ 为冲击波脉冲宽度。

由上式可知，在冲击波临界起爆公式中，冲击波压力 p 为平方项，起到主导作用，本文中主要考察水滴帷幕对冲击波超压的削减作用。

3.1 数值模拟结果分析

水滴数量 $N=80$ 时冲击波作用过程压力云图如图 4 所示，冲击波作用下水滴帷幕的形状变化如图 5 所示。冲击波在 70 μ s 时接触到水幕左侧边缘，由于地面对冲击波的反射，近地面超压较高(如图 4(a))；90~120 μ s 爆轰产物与水幕接触，水幕下部水滴在冲击波作用下产生形变(如图 5(b))；冲击波在水幕边界发生反射和投射作用，反射波和入射波叠加，能量得到衰减，透射波通过水滴间的间隙绕射出水幕区域(如图 4(c))；150 μ s 后爆轰产物被水滴切割，同时推动水滴飞散，部分水滴融合在一起，部分水滴破碎(如图 5(d))；冲击波最大压力始

终止于水幕左侧边缘底部，穿过水幕的冲击波继续 向右传播(如图 4(d))。

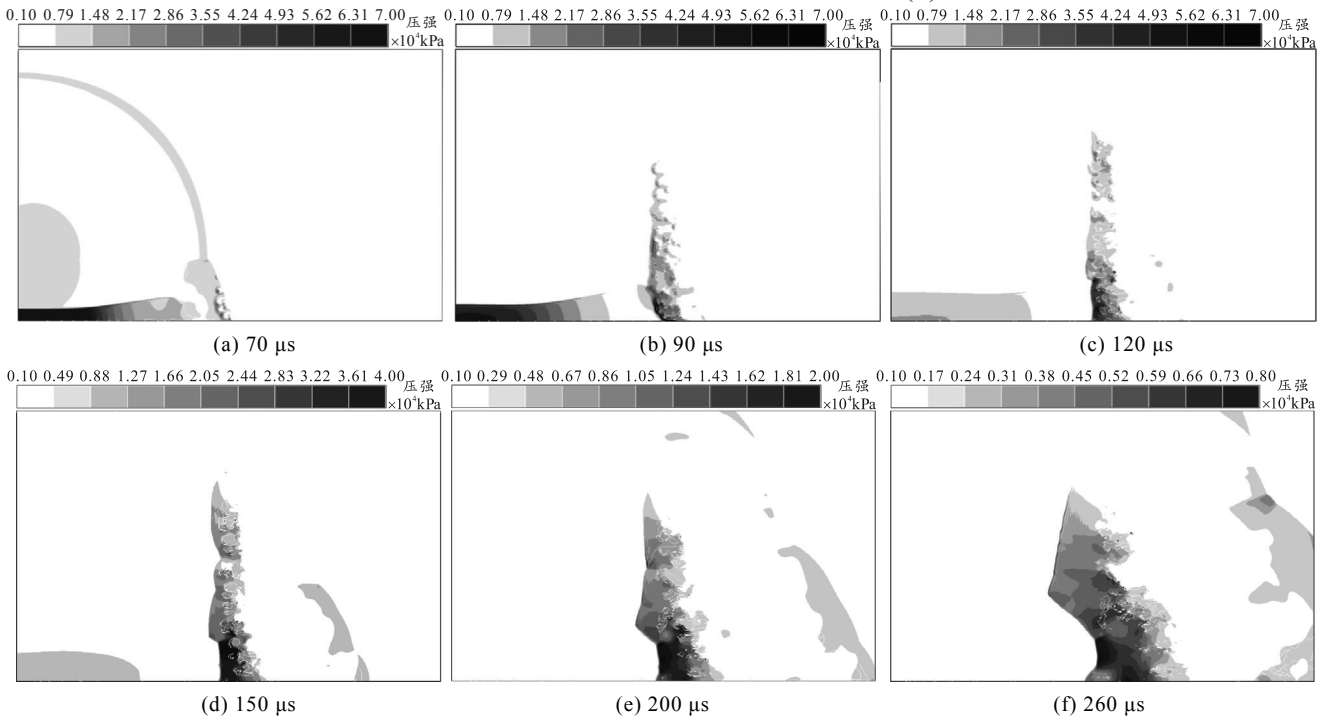


图 4 冲击波作用过程云图

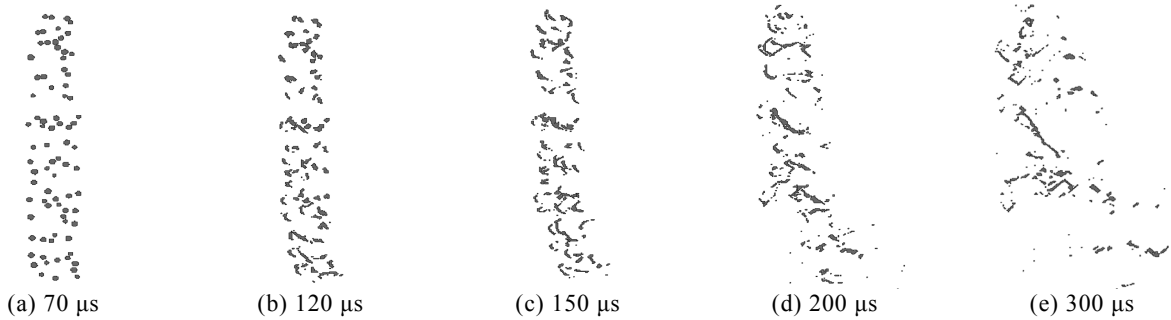


图 5 冲击波作用下水滴变形

水幕防护屏障后的冲击波超压与无防护的冲击波超压对比如图 6 所示，经过水滴帷幕对冲击波的衰减，水幕后冲击波超压有明显的降低，在距爆心 0.7 m，即比例距离 $Z=0.619$ 处，冲击波超压衰减了 18.4%。说明水滴帷幕对于冲击波超压具有良好的削弱作用。

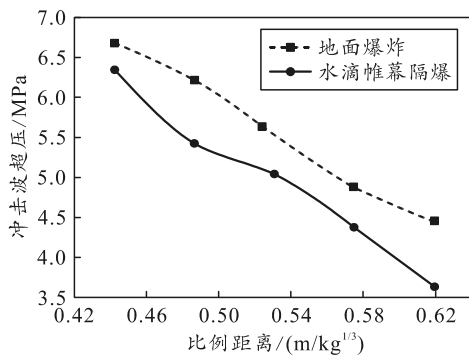


图 6 冲击波超压对比

3.2 水滴数量对冲击波超压削弱效果的影响

当增大水滴生成频率时，水幕的间隙会随之减少且水滴变得密集，整个水幕的连续性会得到改善，为进一步分析水滴数量对冲击波削弱效果的影响，改变水幕区域水滴随机投放数量进行数值模拟。

不同水滴数量的水幕屏障如图 7 所示，当 $N=60$ 时，水幕区域有较大空隙，水幕不连续(如图 7(a))；随着水滴数量的增加，水幕连续性不断增强，当 $N=240$ 时，基本形成连续的水幕(如图 7(d))；随水滴数量进一步增加，水幕区域连续性进一步增强，当 $N=480$ 时，水滴之间相互连接，形成严密的水幕屏障，有向水体防爆墙转化的趋势(如图 7(h))。

水滴数量从 60 开始，每间隔 20 个设置为一种工况，总计 22 种工况，分析不同工况下水滴帷幕对冲击波超压的衰减效果。

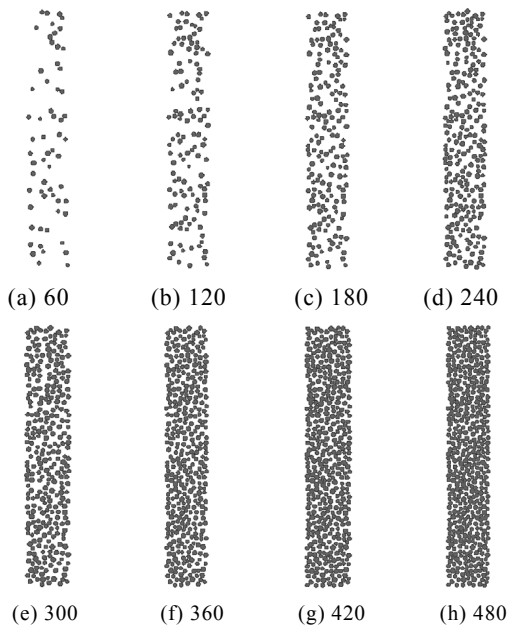


图 7 不同水滴数水幕屏障

200 μs 时不同水滴数水幕屏障在冲击波及爆轰产物作用下的形貌如图 8 所示。水滴数量较少时，水滴对爆轰产物有较强的切割作用，使得爆轰产物穿过水滴帷幕后变为破碎的细长形态，同时冲击波也比较容易穿过水滴帷幕，在冲击波和爆轰产物作用下小部分水滴融合；随着水滴数量的增加，在冲击波和爆轰产物的推动下，大部分水滴融合在一起形成连续水体，水滴的切割作用消失，爆轰产物和冲击波都难以穿过水滴帷幕，由于地面的反射作用，使得近地面超压较高，将水滴帷幕下部冲开，爆轰产物绕过水滴帷幕，从帷幕底部和顶部向右传播。

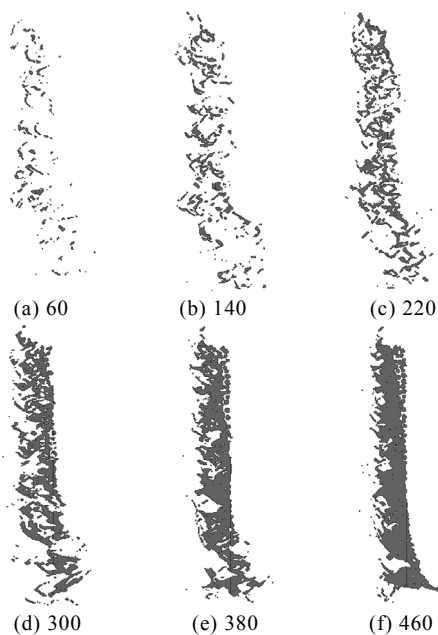


图 8 200 μs 时不同水滴数的水幕屏障形貌

不同水滴数时各观测点超压如图 9 所示。

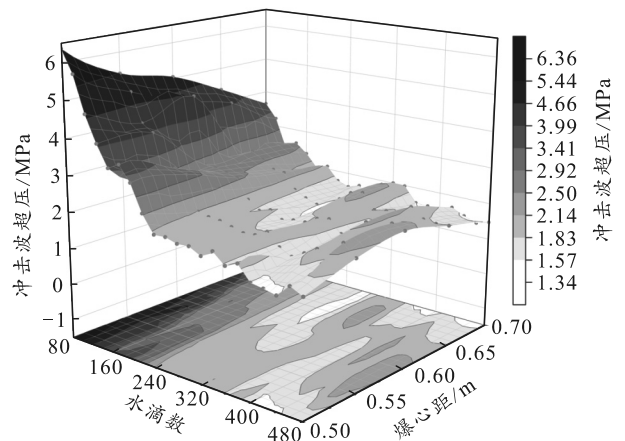


图 9 不同水滴数时各观测点超压

1) 分析爆心距与超压的关系，水滴数较少时，水滴的切割作用明显，冲击波基本不发生绕射，随观测点到爆心距离的增加，冲击波超压逐渐减小；随着水滴数目的增长，水滴的切割作用逐渐减弱，随观测点到爆心距离的增加，冲击波超压减小趋势变缓；当水滴数大于 240 后，水滴的切割作用基本消失，随观测点到爆心距离的增加，冲击波超压呈现先增大后减小的趋势，冲击波绕射作用变得明显。

2) 分析水滴数与超压的关系，随着水幕中水滴数量的增加，水滴帷幕对于冲击超压的衰减效果逐渐增强，以水滴数 $N=240$ 为分界，水滴数小于 240 时，水滴数目的增加对冲击波超压的衰减有明显效果；当水滴数大于 240 后，水滴数目的增加基本不会改变冲击波超压的衰减效果。不同水滴数时距爆心 0.7 m (比例距离 $Z=0.619$) 处，水滴数 240 后，衰减率处于波动状态且波动不大，冲击波超压衰减率基本稳定在 63.2%。

4 水滴帷幕对破片速度的衰减

热点起爆理论认为，炸药在机械能作用下产生的热能来不及均匀分布到全部炸药上，集中在炸药中的局部小点上，导致小点温度高于炸药爆发点^[3]；因此，为避免生产线因高速破片撞击引发殉爆，主要考虑削弱破片动能：

$$E_f = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{2} v_0^2 = \frac{1}{2} M v_0^2 \quad (4)$$

式中： E_f 为破片动能； N 为破片数量； M 为壳体质量^[20]。对于单枚破片来说，破片形成后，破片质量难以改变，本文中主要考虑水滴帷幕对破片速度的削减。

4.1 数值模拟结果分析

水滴数 $N=80$ 时破片撞击作用下水滴帷幕的形状变化如图 10 所示。70 μs 左右时，破片到达水幕左侧边缘(如图 7(a))；77.5 μs 时，小部分破片接触到水幕，水幕开始变形(如图 7(b))；90 μs 时，基本全部破片都处于水幕范围内，大部分水滴在破片撞击下融合，小部分破碎为更小的水滴(如图 7(c))；102.5 μs 时，破片即将穿透帷幕，部分水滴在破片带动下向右飞散(如图 7(d))；115 μs 时，破片基本全部穿过帷幕，水滴的飞散进一步变强(如图 7(e))。

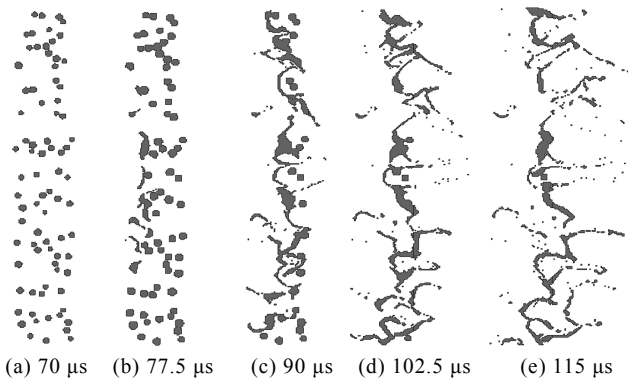


图 10 破片作用下水滴变形

破片初始速度与穿过水滴帷幕后的速度对比如图 11 所示。由于水滴数量较少，水幕连续性较差，小部分破片穿过的水滴数较少，速度衰减不明显。将破片速度取平均值，水滴帷幕对破片速度具有明显的衰减作用，穿过水滴帷幕后的平均速度衰减了 38.5%。说明水滴帷幕对于破片速度具有良好的削弱作用。

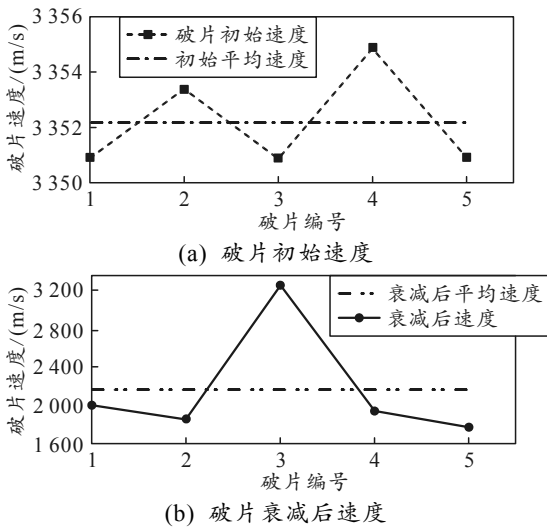


图 11 破片速度对比

4.2 水滴数量对破片速度削弱效果的影响

如上文所述，水滴数量仍然从 60 开始，每间隔

20 个设置为一种工况，总计 22 种工况，分析不同工况下水滴帷幕对破片速度的衰减效果。

不同水滴数水幕屏障在破片完全穿过后形貌如图 12 所示。水滴数量较少时，水幕连续性较差，对破片的阻挡能力较弱，小部分破片穿过的水滴数少，不同破片之间速度衰减波动较大，水滴飞散严重(如图 12(a))；随着水滴数量的增加，在破片的推动下，大部分水滴融合在一起形成连续水体，水幕对破片的阻挡能力得到提高(如图 12(c))；水滴数量进一步增加时，因水幕区域范围固定，破片穿过的水滴数量增加有限，水幕对破片的阻挡能力增幅不大(如图 12(d))。

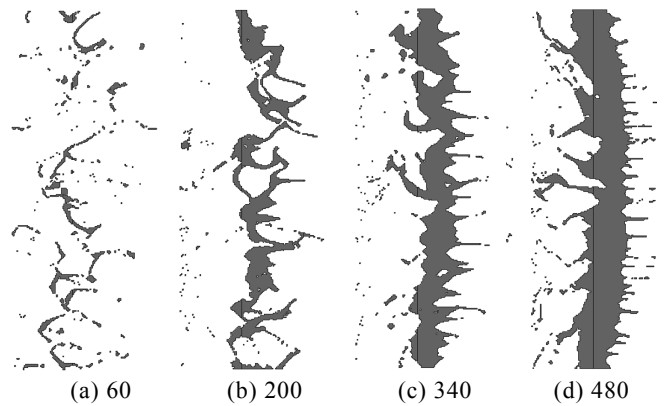


图 12 破片穿过水幕后的水幕形状

破片穿过不同水滴数水幕后的速度如图 13 所示。随着水幕中水滴数量的增加，水滴帷幕对于破片速度的衰减效果逐渐增强，当水滴数小于 200 时，水滴数量的增加对破片速度的衰减有明显的增幅，水滴数处于 200~300 之间时，增幅效果逐渐减弱，水滴数大于 300 后，水滴数量的增加基本不再对破片速度衰减产生影响。

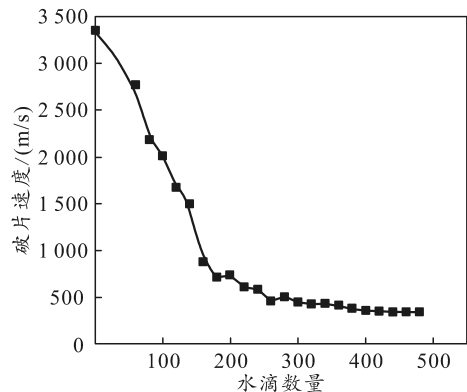


图 13 不同水滴数时破片衰减后速度

不同水滴数时破片速度的衰减率如图 14 所示。水滴数 300 后，衰减率增长缓慢，基本处于稳定状态，破片速度衰减率为 87.5%左右。

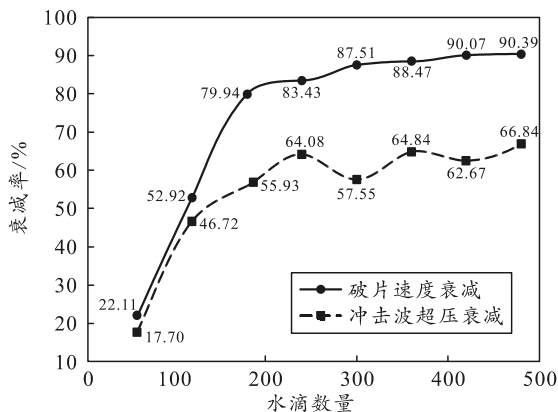


图 14 不同水滴数时冲击波超压及破片速度衰减率

5 结论

1) 笔者提出针对于战斗部自动化生产线的水滴帷幕防殉爆装置, 保证处于生产线上的战斗部在任意状态时, 每 2 个战斗部之间至少存在一道水滴帷幕, 在减轻运输装置压力的同时, 给机械手更大的工作空间。

2) 利用 APDL 语言进行编程, 实现了在设定的水幕区域范围内随机生成一定数量不同直径的水滴, 且水滴直径处于固定区间内, 使得水滴帷幕数值计算模型从形态上与真实水幕更为相似。通过数值模拟对水滴帷幕的防殉爆效果进行验证, 仿真结果表明, 水滴帷幕对冲击波超压和破片速度都有良好的衰减效果。

3) 通过对 22 种不同水滴数量的水滴帷幕进行模拟, 分析水滴数量对水滴帷幕防殉爆效果的影响。结果表明: 随着水滴数量的增加, 水滴帷幕的防殉爆效果得到增强, 但当水幕区域内水滴达到一定数量后, 水滴帷幕对冲击波超压及破片速度的衰减率趋于稳定。该水滴帷幕对冲击波超压的衰减率约为 63.2%, 对破片速度的衰减率约为 87.5%。

参考文献:

[1] 唐寿江. 弹药生产中存在的问题与对策研究[J]. 装备制造技术, 2013(3): 267-269.
 [2] 尹建平, 王志军. 弹药学[M]. 2 版. 北京: 北京理工大学出版社, 2012: 7-8.
 [3] 王海福, 冯顺山. 防爆学原理[M]. 北京: 北京理工大

学出版社, 2004: 44-56.
 [4] 高玉刚. 乳化炸药生产线中殉爆问题初探[J]. 煤矿爆破, 2020, 38(4): 16-19.
 [5] 黄亨建, 陈科全, 陈红霞, 等. 国外钝感弹药危害缓解设计的原理和方法[J]. 含能材料, 2019, 27(11): 974-980.
 [6] 岳纪炜, 陈玉, 侯斯婕, 等. 工业炸药成品装车位的隔爆设计[J]. 爆破器材, 2017, 46(4): 25-29.
 [7] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣, 等. 钢筋混凝土结构内爆炸相似模型试验研究[J]. 南京理工大学学报, 2016, 40(2): 135-141.
 [8] 冯加和, 董奇, 张刘成, 等. 聚脲弹性体在爆炸防护中的研究进展[J]. 含能材料, 2020, 28(4): 277-290.
 [9] SU Q Q, ZHAI X M. Dynamic response of single-layer reticulated shell with explosion-protection wall under blast loading[J]. Thin-Walled Structures, 2018: 127.
 [10] WU G, WANG X, JI C, et al. Anti-blast properties of 6063-T5 aluminum alloy circular tubes coated with polyurea elastomer: Experiments and numerical simulations[J]. Thin-Walled Structures, 2021: 164.
 [11] 段玉龙, 王硕, 贺森, 等. 多孔材料下气体爆炸转扩散燃烧的特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 113-121.
 [12] 孔新立, 金丰年, 蒋芙蓉. 建筑物防爆抗爆技术研究进展[J]. 工程爆破, 2006(4): 77-81.
 [13] 洪武, 徐迎, 金丰年. 水体防爆机理研究进展[J]. 防护工程, 2011, 33(3): 73-78.
 [14] 张艳丽. 水滴生成及其悬浮冻结的理论分析与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007: 9-24.
 [15] 侯俊亮, 蒋建伟, 李应波, 等. 杀爆战斗部破片和冲击波对目标的耦合作用[J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 335-340.
 [16] 吴彦捷, 高轩能. 爆炸冲击波数值模拟及超压计算公式的修正[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 321-326.
 [17] 杨鑫, 石少卿, 程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008(1): 15-18, 31.
 [18] 李秀地. 高等防护工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 35-36.
 [19] 李向东, 杜忠华. 目标易损性[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 57-58.
 [20] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 134-135.