

文章编号: 1006-9941(2014)03-0306-06

活性杆条杀伤增强器抛撒行为数值模拟

孟燕刚, 金学科, 王海福

(北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 针对杀伤增强器爆轰驱动活性杆条问题,在 AUTODYN-3D 平台下采用数值模拟方法研究了杆条排布方式、杆条排布半径和缓冲材料对杀伤增强器爆轰驱动活性杆条行为的影响特性。结果表明,内外层活性杆条径向排布夹角为 11.25° ,内层杆条排布半径不小于 37 mm,外层杆条排布半径不大于 85 mm 时可以避免活性杆条间相互碰撞,有效保护活性杆条结构和提高活性杆条稳定性;随内层杆条排布半径增加,内层杆条承载爆轰压力显著下降;聚苯乙烯、聚乙烯和聚氨酯都具有良好的缓冲作用,与聚苯乙烯和聚乙烯相比,杀伤增强器采用聚氨酯作缓冲材料,其杆条速度振荡幅度小、收敛快,且杆条空间分布较好。

关键词: 弹药工程; 活性杆条; 杀伤增强器; 数值模拟

中图分类号: TJ410.33

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.007

1 引言

杀伤增强器是针对小脱靶量动能拦截器技术发展需要而提出的先进终端毁伤技术,其主要技术特点是通过在末端遭遇弹道附近低速抛撒重金属杆条的方式,达到类似增大拦截器直径,弥补拦截器因制导精度不足而难以直接命中来袭导弹的局限,从而实现命中和毁伤概率的显著提高^[1-5]。

与传统重金属杆条相比,采用复合结构的活性杆条,有望使杀伤增强器发挥更大的终端毁伤效能。活性杆条的结构特点是外部为金属壳体,内部填充活性材料,当这种复合结构杆条高速遭遇来袭导弹时,装填其中的活性材料由于受到强冲击载荷的作用,能自行激活和发生爆炸,释放出大量的化学能,从而在动能和化学能两种毁伤机理的联合作用下,大幅度提高对目标 K 级毁伤效果(立即解体)和能力。活性材料是一种通过在高聚物中填充金属、合金、金属间化合物等含能粉体,再经特殊制备而成的复合式固体含能材料。特别是近十年来,国内外在活性材料制备、机械力学、撞击起爆、毁伤增强性能及武器化应用等方面取得了重要研究进展^[6-8],为其在动能拦截器杀伤增强器上

的应用提供了可能。相对于重金属杆条,在相同尺寸下,活性杆条质量更轻,从而对杀伤增强器抛撒方式和杆条结构设计等提出了新的要求。本研究主要针对活性杆条在小脱靶量反导武器杀伤增强器上的应用问题,采用数值模拟方法,对排布方式、排布半径及缓冲层等因素对其抛撒行为的影响进行分析和讨论。

2 数值方法及模型

以美国爱国者-3(PAC-3)防空导弹 ERINT-1 拦截器^[1]杀伤增强装置为参考平台,相关技术参数列于表 1^[9]。为便于问题分析,忽略导弹蒙皮等影响。活性杆条杀伤增强器几何结构如图 1 所示,采用中心管式装药,杆条长度 100 mm,直径 25 mm,共 24 根,分内外两层排布,内层 8 根,外层 16 根,杆芯为活性材料,外部为 30 铬锰硅合金钢壳体。中心管装药为 B 炸药,长度 100 mm,直径 20 mm。缓冲材料为聚氨酯,长度 100 mm,外径 125 mm。

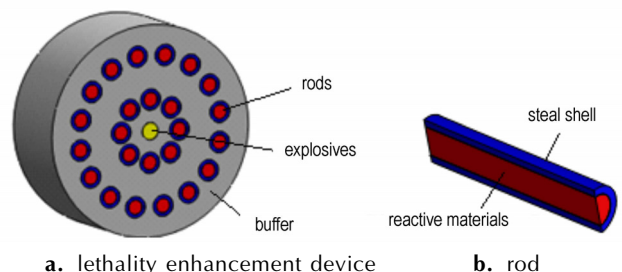


图 1 活性杆条杀伤增强器几何结构

Fig.1 Configuration of reactive rods lethality enhancement device

收稿日期: 2013-06-19; 修回日期: 2013-09-19

基金项目: 国家军口“八六三”计划项目(AA8016028C)

作者简介: 孟燕刚(1983-),男,博士生,主要从事高效毁伤技术研究。
e-mail: 397601969@qq.com

通信联系人: 王海福(1966-),男,教授,主要从事高效毁伤弹药技术研究。
e-mail: wanghf@bit.edu.cn

表 1 ERINT-1 部分参数^[9]

Table 1 Selected parameters of ERINT-1^[9]

parameter	length /mm	diameter /mm	killing block number	killing block mass/g	killing block material
index	127	255	24	214	tungsten alloy

数值模拟中对活性材料作惰性处理,以所承载冲击压力为起爆判据。活性材料采用 Shock 状态方程和 Johnson-Cook 强度模型,相关材料参数列于表 2。其它相关材料参数均取自 AUTODYN 标准材料库^[10]。杆条采用拉格朗日网格划分,并耦合在炸药和缓冲材料组成的欧拉场中,观察点设于杆条中部,1/4 模型网格划分及观察点设置如图 2 所示。

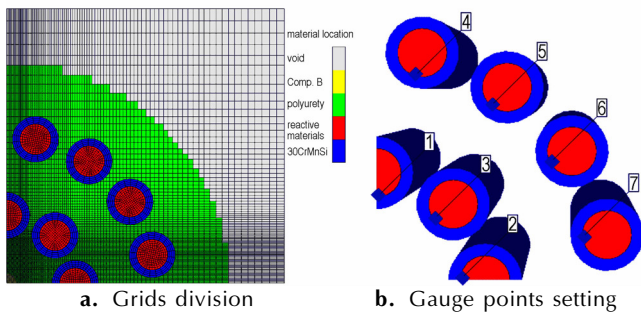


图 2 计算模型及观察点设置

Fig. 2 Computational model and Gauge points

表 2 活性材料参数

Table 2 Reactive material parameters

parameter	Gruneisen parameter	C_1	S_1	specific heat / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	density / $g \cdot cm^{-3}$	shear modulus /GPa	yield stress /MPa
index	0.9	1742	2.44	1160	2.83	0.666	30

Note: C_1 and S_1 are parameters of shock equation of state.

3 结果及分析

3.1 排布方式影响

内外层杆条的数目均为 4 的整数倍,杆条的排布可以在各象限之间实现对称排布。为研究排布方式对杆条抛撒行为的影响,考虑两种排布方式,排布方式 A: 内外两层杆条径向排布夹角为 0° ; 排布方式 B: 内外两层杆条径向排布夹角为 11.25° 。具体排布如图 3 所示。

两种排布方式下不同时刻杆条空间分布数值模拟结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,排布方式 A 下,内层杆条在前驱冲击波及爆轰产物的作用下,获得的速度较外层杆条高。在 0.8741 ms 时刻,内层杆条“追

上”同一径向外层杆条,并与外层杆条发生正中心碰撞,杆条的相互碰撞产生了弹跳效应,速度在杆条间重新分配,外层杆条获得较高速度,内层杆条速度下降,内外层杆条的距离逐渐拉开。排布方式 B 情况下,内层杆条在前驱冲击波和爆轰产物作用下同样获得的速度较外层杆条高。随着外层杆条的飞散,外层杆条间距逐渐拉开,当内层杆条“追上”外层杆条时刻,从外层杆条的间隙中穿过,并以较高速度向外飞散。忽略爆轰产物对杆条稳定性的影响,在杆条发生碰撞时,会对杆条结构产生损伤,同时杆条间的平动速度和转动角速度将会重新分配,杆条随机倾斜的几率会大大增加,这样可能会增大杆条侵彻目标的着角,不利于杆条对目标的毁伤。

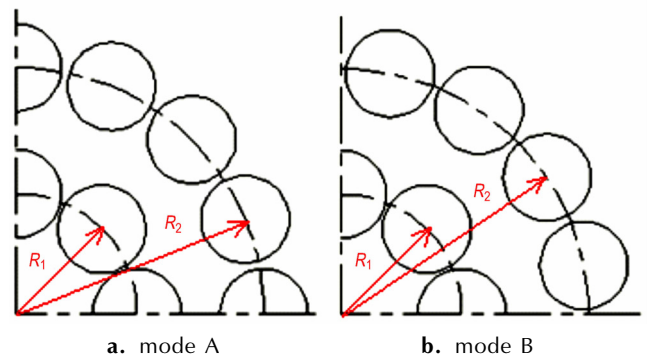


图 3 排布方式

Fig. 3 Arrangement mode

两种排布方式下,杆条的速度变化如图 5 所示 (gauge#3 和 gauge#5 分别代表内层杆条和外层杆条)。从图 5 可看出,排布方式 A 和排布方式 B 在 0 ~ 0.8741 ms 内层杆条速度变化相差不大,而排布方式 A 比排布方式 B 中外层杆条速度振荡幅度大。排布方式 A 在 0.8741 ms 时刻,同一径向上内外两层杆条速度发生跃迁,内层杆条速度降低,外层杆条速度上升,同时外层杆条速度振荡幅度加大,这是由内外层杆条相互碰撞引起的。排布方式 B 中内外层杆条径向排布角度错开 11.25° ,外层杆条间隙足够大时便可避免碰撞,因此排布方式 B 没有上述变化。说明排布方式 B 中杆条稳定性优于排布方式 A。

3.2 排布半径影响

改变排布半径会使杆条间隙随之改变,影响爆轰产物的泄漏,对杆条抛撒行为产生影响。内外层杆条排布半径对杆条抛撒行为的影响存在耦合关系,为便于问题分析,在研究排布半径对杆条抛撒行为影响时,分两种情况设置参量:一是固定外层杆条排布半径为 80 mm,内层杆条排布半径(R_1)依次为 34,35,36,37,

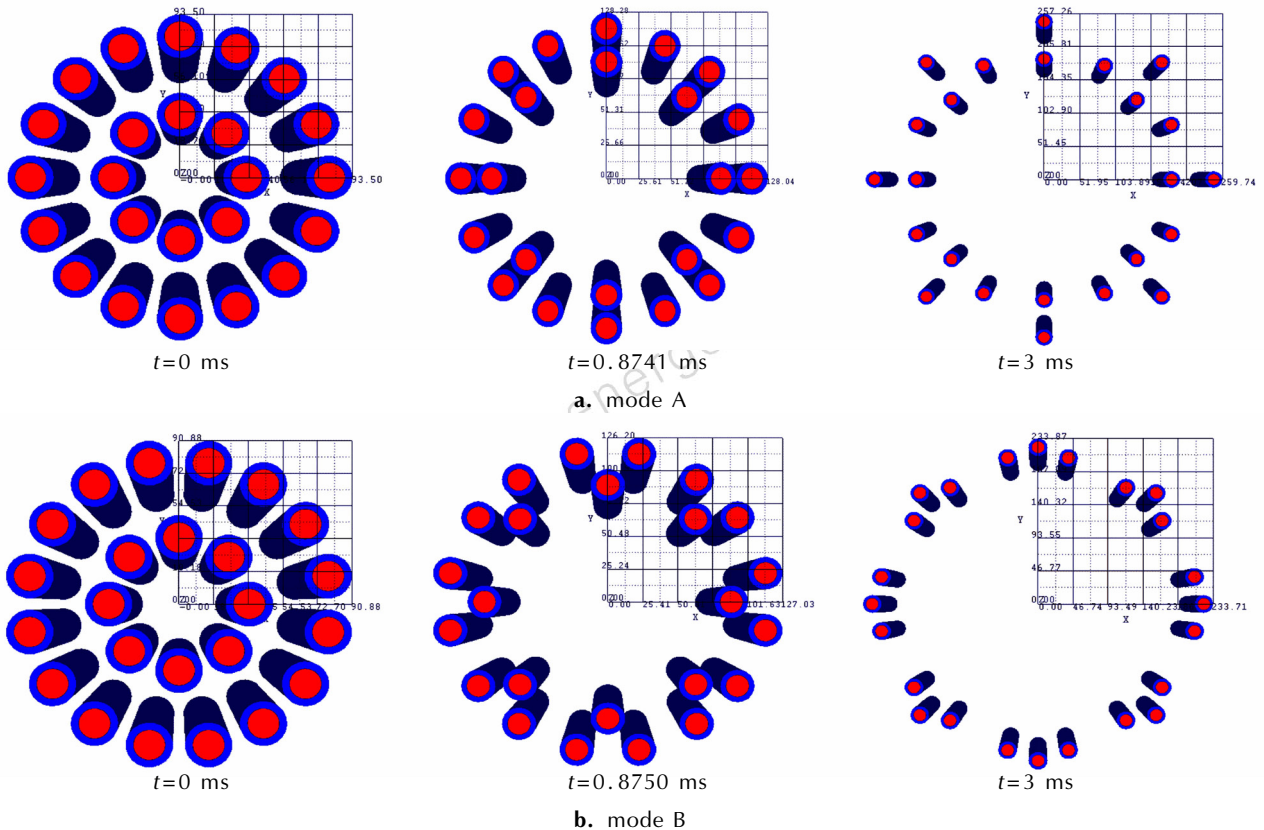


图4 两种排布方式下杆条在典型时刻分布图

Fig.4 Spatial distribution map of rods under two kinds of arrangement mode at typical time

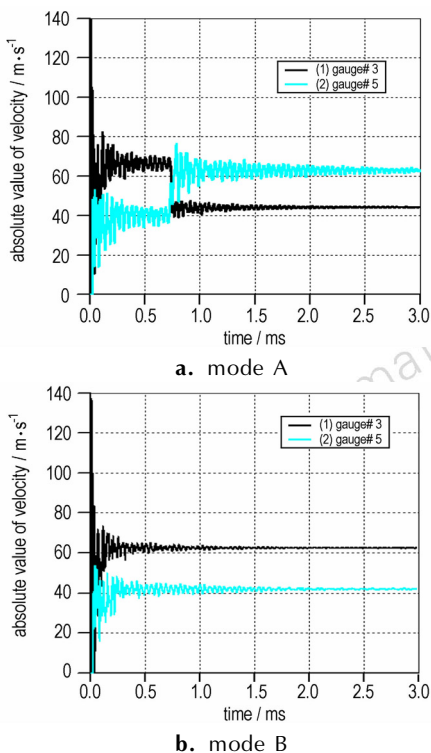


图5 两种排布方式下杆条的速度变化曲线

Fig.5 Speed process of rods under two kinds of arrangement mode

38 mm; 二是固定内层排布半径为 37 mm, 外层杆条排布半径 (R_2) 依次为 70, 75, 80, 85, 90 mm。

对于第一种情况, 不同内层排布半径下杆条速度曲线如图 6 所示。可以看出, 在内层排布半径为 34, 35, 36 mm 情况下, 同一径向上内外层杆条的速度在 1 ms 时刻左右发生跃迁。排布半径为 37, 38 mm 情况下, 杆条速度没有上述变化。这是由于在内层排布半径较小情况下, 爆轰产物释放较晚, 内层杆条获得的速度较高, 在内层杆条追上外层杆条时, 外层杆条没有充分展开, 杆条间隙小于内层杆条直径, 内外层杆条会发生偏心碰撞。

对于第二种情况, 不同外层杆条排布半径的杆条中的速度曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出, 外层杆条速度随着排布半径增加逐步减小, 而内层杆条速度却逐步增大, 内外层杆条速度差越来越大。在外层杆条排布半径为 90 mm 情况下, 内外层杆条在 1.5 ms 左右出现速度跃迁。上述现象是由于随着外层杆条排布半径增加, 前驱冲击波受缓冲材料影响对外层杆条的驱动压力减小, 造成外层杆条速度下降。随着速度差越来越大, 当内层杆条追上外层杆条时, 外层杆条不能充分展开, 会使杆条发生偏心碰撞。

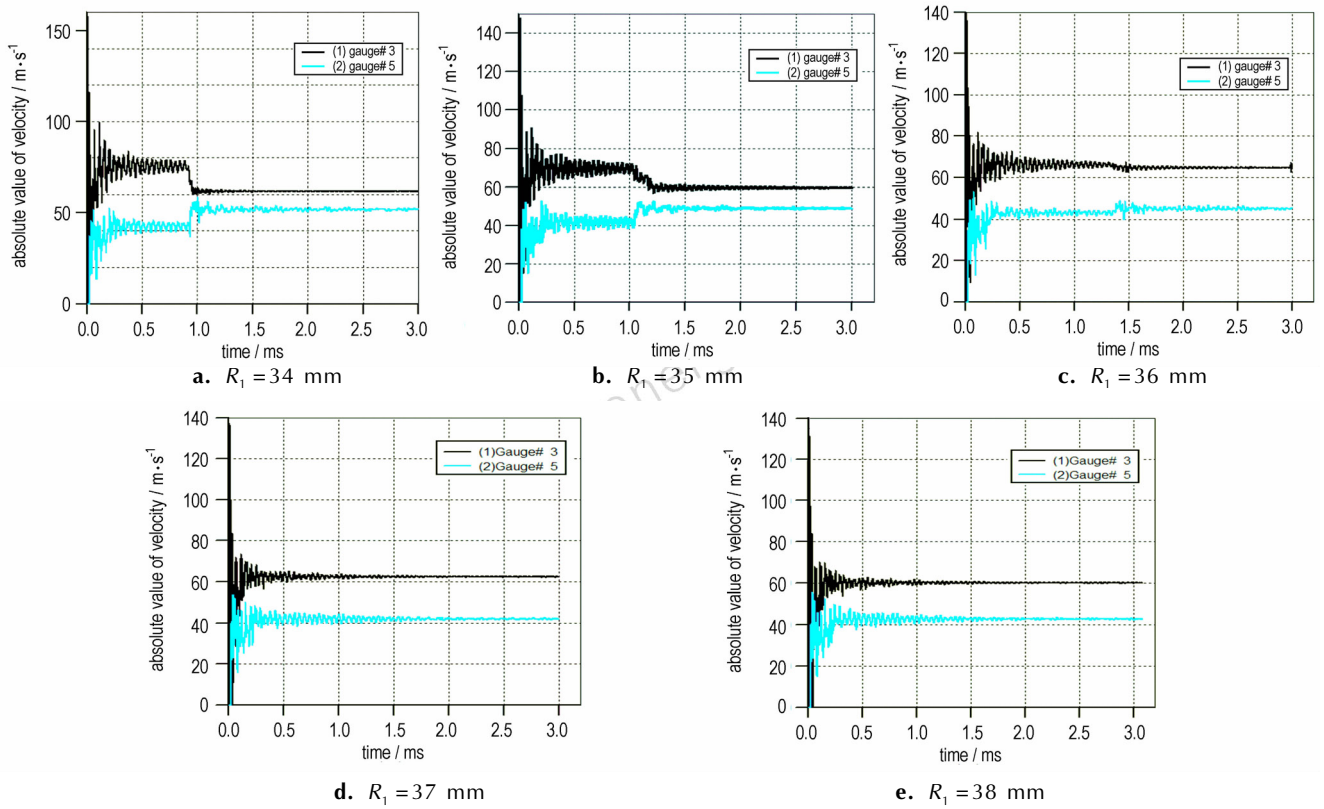


图6 不同内层杆条排布半径下杆条速度曲线

Fig.6 Velocity process of rods in different attachment radius of inner rods

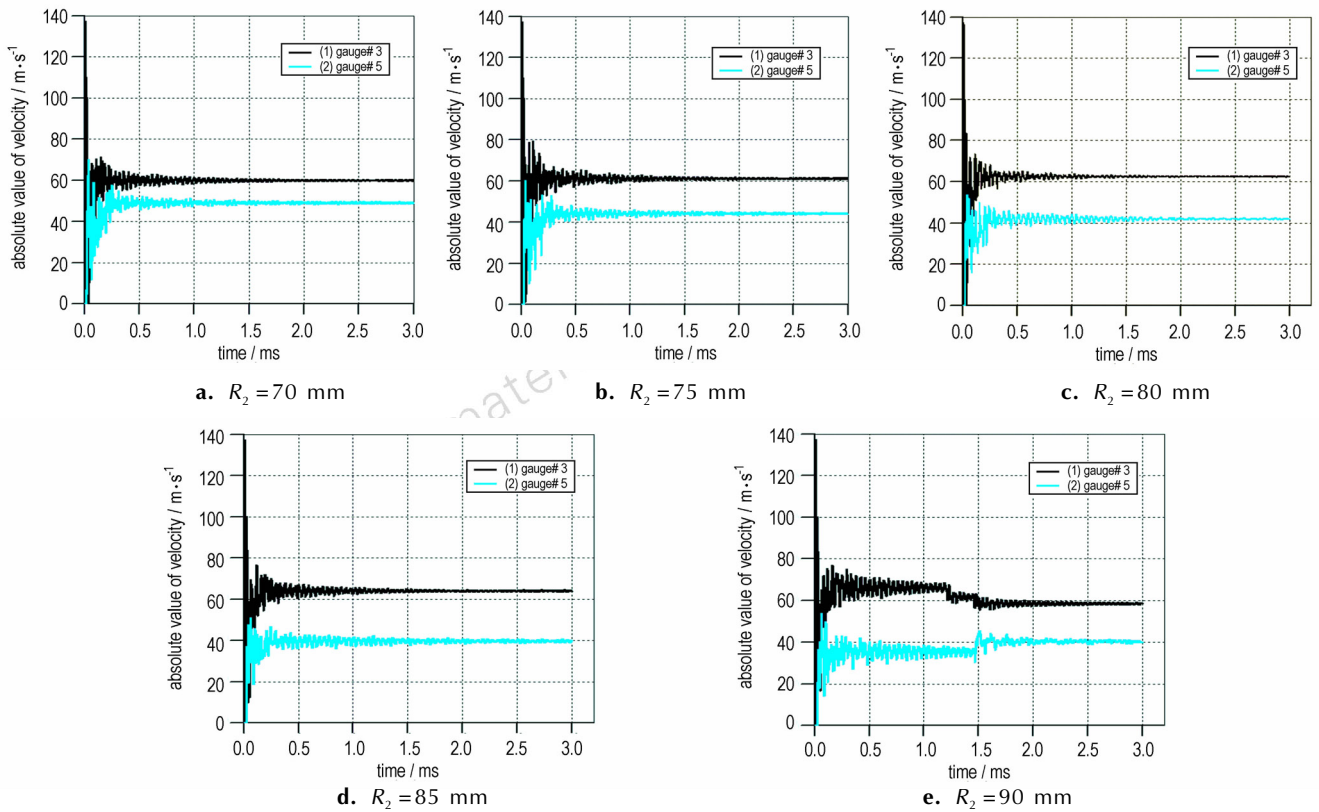


图7 不同的外层杆条排布半径下杆条的速度变化曲线

Fig.7 Velocity process of rods in different attachment radius of outer rods

活性材料是一种爆燃性反应材料。在冲击压力大于活性材料临界反应阈值(3.6 GPa)条件下,会发生爆燃反应。不同杆条排布半径下杆条观察点应力峰值如图8所示,可以看出,在各种排布半径条件下,观察点应力峰值均小于活性材料临界反应阈值,因此活性材料在抛撒过程中是稳定的。同时可以看出,内层杆条的观察点应力峰值远大于外层杆条,约为外层杆条的4~5倍。因此爆轰压力对内层杆条的结构影响远

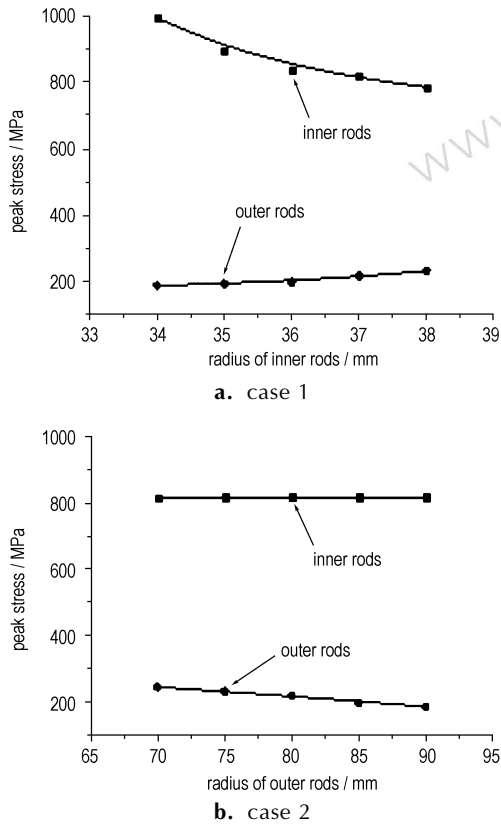


图8 不同排布半径下观察点应力峰值

Fig.8 Peak stress of gauge points in different arrangement radius

大于外层杆条。内层杆条排布半径为34 mm下,内层杆条观察点应力峰值为987 MPa,大于合金钢的屈服点885 MPa,随着内层杆条排布半径增加,内层杆条观察点应力峰值逐步减小,在内层杆条排布半径取36 mm时,内层杆条观察点应力峰值已经下降到832 MPa;随着外层杆条排布半径增加,内层杆条观察点应力峰值没有明显变化。因此增加内层杆条排布半径可以有效降低内层杆条承载应力,保护杆条结构。

3.3 缓冲材料影响

缓冲材料可以吸收爆炸能量,降低杆条承受的爆炸压力,保护杆条,同时起支撑杆条作用。缓冲材料的选取对杆条抛撒行为影响较大。缓冲材料选取原则是:强度、硬度、韧性适中,材料密度低的惰性材料。既要保证活性材料在抛撒过程中不被激发,又要保证杆条的完整性和飞散稳定性。本研究选取了聚苯乙烯、聚乙烯和聚氨酯三种缓冲材料,材料模型均取自AUTODYN材料库。

不同缓冲材料下杆条速度变化曲线如图9所示。从图9中可以看出,杀伤增强器采用聚苯乙烯和聚乙烯作为缓冲材料,内层杆条速度振荡幅度较大,速度收敛较慢,杆条稳定性差,采用聚乙烯作为缓冲材料,内外层杆条速度差很小,不利于杆条分散。杀伤增强器采用聚氨酯作为缓冲材料,内层杆条速度振荡幅度小,收敛较快,同时内外层杆条速度差较大。

不同缓冲材料下内层杆条观察点应力峰值列于表3。从表3可以看出,三种材料均能够较好地实现对冲击波的缓冲作用,在聚氨酯作为缓冲材料条件下,杆条应力峰值最高,为817.52 MPa,小于合金钢的屈服点885 MPa和活性材料临界起爆压力阈值。综上所述,采用聚氨酯作为杀伤增强器的缓冲材料优于其它两种材料。

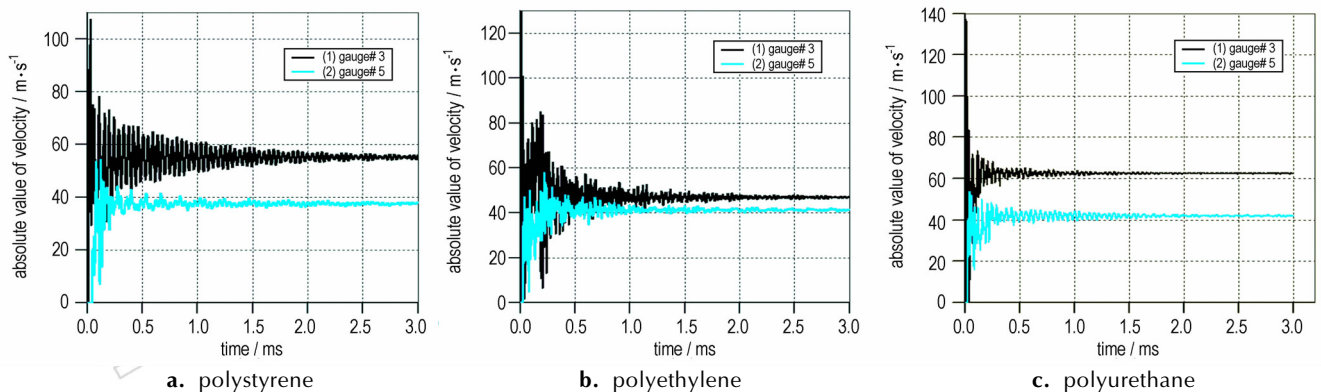


图9 不同缓冲材料下杆条速度变化曲线

Fig.9 Velocity process of rods with different buffer materials

表3 不同缓冲材料下内层杆条观察点应力峰值

Table 3 Peak stress of gauge points of inner rods with different buffer materials

buffer material	polystyrene	polyethylene	polyurethane
peak stress/MPa	729.65	776.95	817.52

4 结 论

(1) 杆条间相互碰撞与杆条排布方式和杆条排布半径有关。在内外层活性杆条排布角度错开 11.25° , 内层杆条排布半径不小于 37 mm, 外层杆条排布半径不大于 85 mm 情况下, 可以避免活性杆条间相互碰撞, 有效保护活性杆条结构, 提高活性杆条稳定性。

(2) 内层活性杆条承载的爆轰压力远大于外层杆条, 约为外层杆条的 4~5 倍。随内层杆条排布半径增加, 内层杆条承载应力显著下降, 当内层杆条排布半径取值不小 36 mm, 内层杆条承载应力峰值小于合金钢屈服点, 可以有效地保护杆条结构。

(3) 杆条在爆轰驱动过程中承受应力峰值均小于活性材料临界反应阈值, 活性材料在抛撒过程中是稳定的。

(4) 聚苯乙烯、聚乙烯和聚氨酯都具有良好的缓冲作用。与聚苯乙烯和聚乙烯相比, 杀伤增强器采用聚氨酯作为缓冲材料, 其内层杆条速度振荡幅度小, 收敛较快, 杆条稳定性较好, 且内外层杆条速度差较大, 杆条空间分布较好。采用聚氨酯作为杀伤增强器缓冲

材料优于其它两种材料。

参考文献:

- [1] Lloyd R. Conventional warhead systems physics and engineering design [M]. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA Book, 1998; 179.
- [2] Lloyd R. Physics of KE-rod warhead against TBM submunition [R], ADA364868/XAB, 1999.
- [3] Lloyd R. Overview of KE-rod warhead technology [C] // Multinational Conference in Theater Missile Defense, Manich, Germany, 1996.
- [4] Lloyd R M. Near miss warhead technology with multiple effects against submunition payloads [C] // 9th Annual AIAA/BMDO Technology Conference, Osaka, July 17-20, 2000.
- [5] Schwalbe L A. Experimental and computational studies of rod-deployment mechanisms [C] // 16th International Symposium on Ballistics. San Fransico CA: American Defence Preparedness Association, 1996; 347-335.
- [6] WANG Hai-fu, ZHENG Yuan-feng YU Qing-bo, et al. Impact-induced initiation and energy release behavior of reactive materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(7): 074904.
- [7] WANG Hai-fu, ZHENG Yuan-feng YU Qing-bo, et al. Initiation behavior of covered explosive subjected to reactive fragment [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2012, 21(2): 143-149.
- [8] 王海福, 郑元枫, 余庆波, 等. 活性破片引燃航空煤油实验研究 [J]. *兵工学报*, 2012, 33(9): 1148-1152.
WANG Hai-fu, ZHENG Yuan-feng, YU Qing-bo, et al. Experimental research on igniting the aviation kerosene by reactive fragment [J]. *Acta Armamentaria*, 2012, 33(9): 1148-1152.
- [9] 张志鸿. 拦截 TBM 特性分析及对策. <http://wencu.baidu.com/view/0d54ad27192e45361066f57c.html>. [2013-04-20]
ZHANG Zhi-hong. Characteristics analysis and Countermeasures of Interception TBM. <http://wencu.baidu.com/view/0d54ad27192e45361066f57c.html>. [2013-04-20]
- [10] Century Dynamics Inc. AUTODYN theory manual [M]. Rev. 4. 3. Houston, USA: Century Dynamics, 2003.

Numerical Simulation of Deployment Behaviors of Reactive Rod Used in Lethality Enhancement Device

MENG Yan-gang, JIN Xue-ke, WANG Hai-fu

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

Abstract: The numerical simulation of lethality enhancement device of explosively drive reactive rods was carried out to investigate the effect caused by the arrangement mode, arrangement radius and buffer materials. Results show that the collision between reactive rods can be effectively avoided and the stability significantly enhanced when the angle between the radial arrangement of two layers is 11.25° and the radiuses of outer and inner layers are <85 mm and >37 mm, respectively. The pressure that inner layer rods bear decreases with the increase of arrangement radius. All of the polystyrene, polyethylene and polyurethane can be used as buffer material in the lethality enhancement device, but the scope of velocity of these rods is smaller, the convergence is faster and the spatial distribution is better when polyurethane is used.

Key words: ammunition engineering; reactive rod; lethality enhancement device; numerical simulation

CLC number: TJ410.33

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.03.007