

doi: 10.7690/bgzd.2016.08.008

某结构反应装甲金属板运动仿真研究

张 乐, 姚文进, 王晓鸣, 李文彬, 侯 辉

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 南京 210094)

摘要: 为研究射流引爆某结构反应装甲后, 各金属板的运动情况, 以及附加盖板或隔板位置变化对平行双层反应装甲金属板运动的影响, 采用三维有限元仿真软件 LSDYNA 进行仿真, 并对 800 μs 时各金属板的速度及相对主装甲距离进行统计分析。仿真结果表明: 当盖板与上层反应装甲距离 $d=6$ mm 时, 下层反应装甲面板的速度最小, 与主装甲的距离最近, 此时下层反应装甲面板的最小运动距离为 162 mm, 时间为 1 260 μs ; 隔板与上层反应装甲背板相贴时, 下层反应装甲面板的速度最小, 与主装甲距离最近, 此时下层反应装甲面板的最小运动距离为 171 mm, 时间为 5 130 μs 。

关键词: 隔板; 盖板; 反应装甲; 面板

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Simulation Study of Metal Plate's Movement of Some Structure's Explosive Reactive Armor

Zhang Le, Yao Wenjing, Wang Xiaoming, Li Wenbin, Hou Hui

(National Key Laboratory of Fundamental Science on Smart Ammunition Technology,
Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For studying the movement result of each metal plate while certain structure explosive reactive armor (ERA) detonated by the jet, and the influence to all metal plates while the location of additional partition or cover changed, then simulated each metal plate's movement at the time 800 μs by 3D software LSDYNA, and the simulation results show that: when the distance between the cover and the upper ERA is 6 mm, the lower front plate's speed is the smallest and the distance is the closest, and the minimum distance is 162 mm while the time is 1 260 μs ; while the partition close to the upper back plate, the lower front plate's speed is the smallest and the distance is the closest, and the minimum distance is 171 mm while the time is 5 130 μs .

Keywords: partition; cover; explosive reactive armor; front plate

0 引言

随着科技不断进步, 毁伤元对坦克等装甲目标的毁伤能力增加。为增加坦克防护能力, 目前通常采用的防护措施为在坦克关键部位附加反应装甲。

1969年, Manfred Held 首先在试验中发现金属板+炸药+金属板的“三明治”结构能有效干扰射流对装甲的侵彻, 并将该结构定义为爆炸反应装甲。截止目前, 所研究爆炸反应装甲主要包括单层爆炸反应装甲和双层爆炸反应装甲 2 种类型, 其中单层爆炸反应装甲 (explosive reactive armor, ERA) 的研究较为广泛。1984年 May-seless 等^[1]首先从理论上解释了 ERA 抗击射流的基本机理, 提出“卵石干扰模型”; Manfred Held 等^[2-4]对不同条件下 ERA 干扰聚能射流的能力进行研究, 结果表明, 夹层炸药厚度、金属板的材料特性和厚度以及斜置角度等对射流干扰显著, 而起爆点位置对射流的干扰则不明显;

吴成等^[5]利用数值仿真对 ERA 飞板运动规律进行研究, 这些研究使得人们对 ERA 的理论研究飞速发展并逐渐完善。近年来, 随着双层爆炸反应装甲的出现, 使得射流的毁伤效率大幅降低, Held^[5]对带有单层或双层 ERA 夹层的前装甲、斜装甲和侧装甲系统抗击聚能射流的能力进行试验研究, 得出 ERA 抗击聚能射流的能力与法向角密切相关, 且双层 ERA 较单层防护效果更好; 沈晓军^[6]、姬龙^[7]等对反应装甲爆炸后飞板速度进行研究, 得到简易工程计算模型; 黄正祥等^[8]通过数值仿真对双层平行反应装甲起爆后各飞板的作用规律进行初步分析; 姬龙等^[9]对双层爆炸反应装甲作用场进行分析和试验研究, 发现装甲板斜置角和双层楔形角对爆炸作用场有较大的影响, 在一定范围内, 使作用场作用时间提高了 1.75 倍; 刘宏伟等^[10]对双层反应装甲干扰射流影响因素进行分析, 研究了双层反应装甲与主靶板间的距离、反应装甲组件间距离、双层反应

收稿日期: 2016-04-03; 修回日期: 2016-05-23

基金项目: 装备预研基金项目 (9140A04030115CB40001)

作者简介: 张 乐(1988—), 男, 河北人, 硕士, 从事毁伤机理与终点效应研究。

装甲两层之间夹角等因素对射流的影响。

实际上，影响反应装甲金属板运动的因素还应包括隔板和盖板。目前，隔板和盖板在研究中的作用仅为降低射流速度，如：Held^[5]对双层 ERA 的研究，A.Koch、F.Haller 等^[11]对射流起爆阈值的研究，而反应装甲起爆后隔板和盖板对各金属板飞散的影响并未考虑。显然，隔板和盖板厚度越大，影响越大，但厚度增加，ERA 整体质量增加，影响坦克运动；因此，笔者通过仿真的方法，研究了附加盖板和隔板的某结构反应装甲被射流引爆后的金属板运动情况，并分别研究了盖板或隔板位置变化对各金属板运动的影响。

1 模型与材料参数

为研究射流引爆反应装甲后各金属板的运动情况，笔者采用 LS-DYNA 软件进行数值仿真计算。仿真用流固耦合算法来计算涉及网格大变形、材料流动的聚能侵彻体形成及射流引爆反应装甲过程，炸药、药型罩、空气、夹层装药选用多物质流欧拉算法，反应装甲结构中的盖板、隔板、面板及背板等金属板选用拉格朗日算法，炸药、药型罩、空气、夹层装药与金属板的相互作用采用流固耦合算法。

1.1 仿真模型

仿真模型如图 1 所示，聚能装药口径为 98 mm，壁厚 1.75 mm，罩高 73.5 mm，装药高度 128.3 mm，射流着角为 45°；单层反应装甲结构为典型 4/7/4 结构，盖板与隔板厚度分别为 15 mm、4 mm。

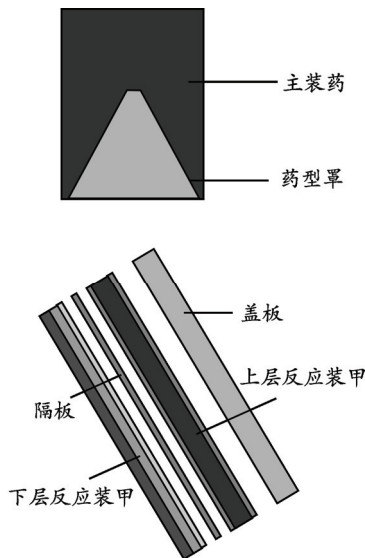


图 1 仿真模型

1.2 材料模型及参数

1) 聚能装药。

聚能装药采用 8701 炸药，选用高能炸药材料模型 (HIGH_EXPLOSIVE_BURN) 和 JWL 状态方程。JWL 状态方程描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积和能量特性。材料参数如表 1。

表 1 聚能装药材料参数

参数	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
数值	1.695	524.2	7.768	4.6	1.35	0.25

2) 药型罩与金属板。

药型罩材料选用紫铜，盖板材料为装甲钢，隔板、反应装甲面板和背板材料为 45#钢，都采用 Johnson-Cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程来描述他们在爆轰波作用下的动力学响应行为。药型罩和金属板材料参数如表 2。

表 2 药型罩和金属板材料参数

材料	参数				
	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	G/GPa	n	C	m
铜	8.96	47.7	0.31	0.02	1.09
45#钢	7.83	77.0	0.26	0.014	1.03
装甲钢	7.83	71.4	0.26	0.014	1.03

3) 夹层装药。

夹层装药为 B 炸药，采用弹塑性模型 (ELASTIC_PLASTIC_HYDRO) 和点火与增长状态方程 (IGNITION_AND_GROWTH_OF_REACTION_IN_HE) 来共同描述。在相对低的初始压力 (2~3 GPa) 条件下，利用弹塑性材料模型计算未反应炸药参数，在较高压力条件下，利用 JWL 状态方程计算未反应炸药状态参数。夹层装药参数如表 3。

表 3 夹层装药参数

参数	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	G/GPa	r_1/GPa	r_2/GPa	XP_1	XP_2
数值	1.712	3.54	778.1	-0.05	4.2	1.1

4) 空气。

空气采用空物质流体模型，状态方程为线性多项式。空气参数如表 4。

表 4 空气参数

参数	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	C_4	C_5	E/J
数值	0.001 25	0.4	0.4	0.25

3 金属板运动分析

对于某结构反应装甲而言，附加金属板会对反应装甲各金属板的运动产生阻碍作用。笔者采用分步仿真的方法，对某结构反应装甲被引爆后各金属板的运动情况进行分析，再分别对附加盖板或隔板结构的平行双层反应装甲的运动情况进行分析，通过改变盖板或隔板的位置，研究盖板或隔板的位置变化对各金属板运动的影响。

3.1 某结构反应装甲金属板运动分析

根据射流引爆某结构反应装甲时反应装甲夹层装药的压力变化情况，得到起爆点位置和上下两层反应装甲起爆间隔时间，重新建立模型如图 2，得到 800 μs 时该结构反应装甲各金属板的运动情况。

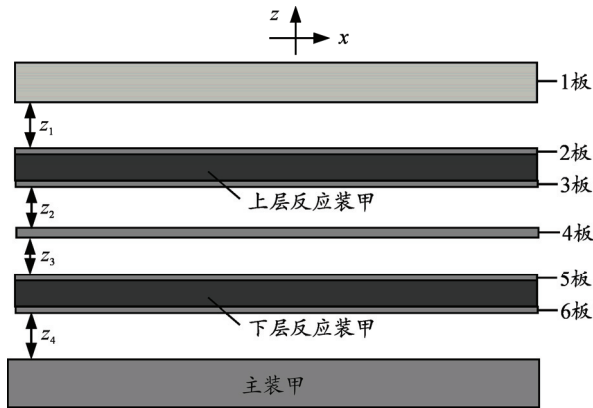


图 2 某结构反应装甲模型

当夹层装药起爆后，爆轰产物驱动金属板运动，并与隔板和盖板发生碰撞。现对碰撞过程中各金属板的运动过程进行分析。

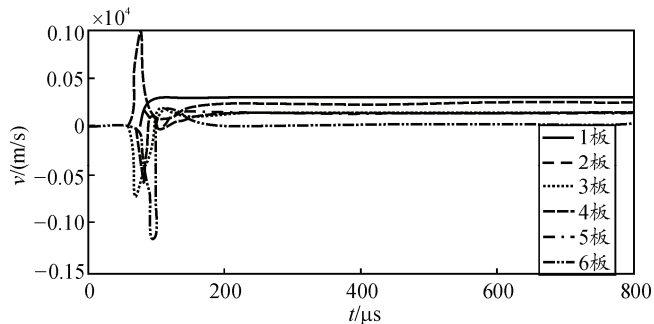


图 3 金属板运动曲线 1

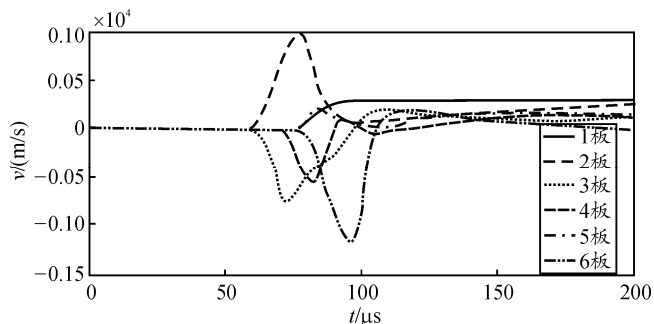


图 4 金属板运动曲线 2

由图 3、图 4 可知：58 μs 时上层反应装甲起爆，经 14 μs 即 72 μs 时上层反应装甲背板 3 板与隔板 4 板发生碰撞，此时 3 板速度反向达到最大，为 -752 m/s；碰撞后，3 板速度下降至零，然后反向加速运动，106 μs 时达到最大速度 193 m/s，305 μs 时达到稳定速度 155 m/s；78 μs 时上层反应装甲面板 2 板

与盖板 1 板发生碰撞，碰撞后，1 板做加速运动，98 μs 时速度达到最大 301 m/s，并以该速度稳定运动；2 板由于 1 板的阻碍作用，先减速至 100 μs 时的 79 m/s 再加速运动至 246 μs 时的 250 m/s，并以该速度稳定运动。下层反应装甲在 76 μs 时起爆，5 板和 6 板在爆轰产物的作用下背向运动；82 μs 时 5 板和 4 板发生碰撞，碰撞后，4 板先减速至零然后反向加速运动；249 μs 时达到稳定速度 145 m/s，而 5 板由于 4 板的碰撞，先减速再加速，最终 305 μs 时达到稳定速度 140 m/s；6 板在下层爆轰产物的作用下加速运动，96 μs 时与主装甲发生碰撞，速度迅速下降至零，并反向先加速后减速，在主装甲和下层爆轰产物的共同作用下在主装甲表面小范围运动。

该结构反应装甲各金属板在上下两层爆轰产物的作用下运动时，各金属板的碰撞过程非常复杂，大约 300 μs 时各金属板的运动基本趋于稳定，由于各金属板的运动过程实际上很短，金属板速度稳定后可看作以该速度一直运动。

由于侵彻附加反应装甲的坦克目标时，主要选用串联破甲战斗部，其中前级战斗部作用为引爆反应装甲，后级战斗部作用为侵彻主装甲；因此，需考虑运动的金属板对后级主射流的干扰作用，即最下层运动的金属板对射流的影响。而最下层板 6 板只在主装甲表面小范围运动，5 板则以一定的速度向上运动；因此，对于反应装甲结构而言，主要考虑下层反应装甲面板 5 板飞离射流轴线时，射流刚好到达 5 板左边缘，此时 5 板与主装甲的距离为主射流不受干扰的最小距离。

下层反应装甲金属板运动如图 5 所示，由图可得下式

$$H = l \cdot \tan \theta + H_0 + D \quad (1)$$

式中： l 为起爆点到反应装甲左边缘距离； H_0 为反应装甲与主装甲间距； D 为反应装甲块厚度； θ 为射流轴线与反应装甲水平夹角。

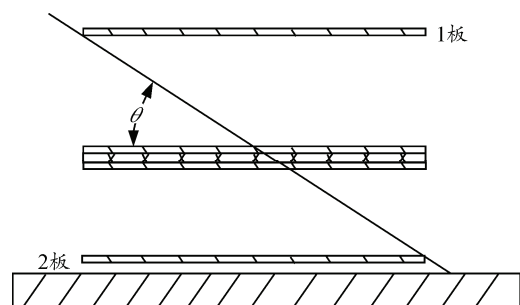


图 5 下层反应装甲金属板运动

因此,对于文中所研究的某结构反应装甲而言,射流着角为 45° 时,下层反应装甲面板 5 板的最小运动距离为 555 mm,运动至该距离的时间为 $480 \mu\text{s}$ 。

3.2 盖板位置影响

附加盖板平行双层反应装甲结构如图 6 所示。

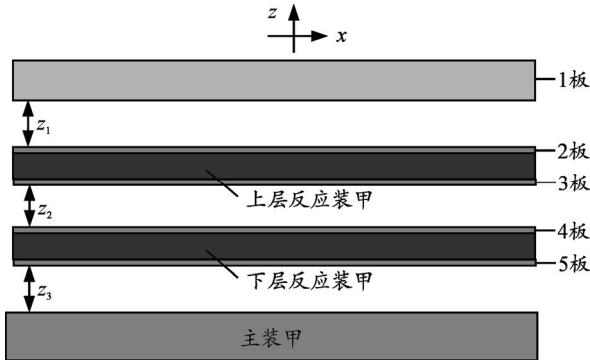


图 6 附加盖板平行双层反应装甲结构

当盖板与上层反应装甲距离不同时,射流引爆两层反应装甲后,金属板的飞散情况各不相同。当盖板与上层反应装甲距离太大时,可能出现反应装甲被引爆后上层面板不会与盖板相碰撞的情况,为避免这种情况,取 $0\sim 30 \text{ mm}$ 这一区间,间隔为 3 mm ,采用 LSDYNA 进行仿真,上下两层反应装甲间隔 20 mm ,下层反应装甲与主装甲距离 20 mm ,研究盖板位置变化对平行双层反应装甲金属板运动的影响。

当反应装甲夹层装药起爆一定时间后,1、2、3、4 板在上下两层夹层装药爆轰产物的作用下,向上飞散,而 5 板则由于与主装甲的碰撞以及下层爆轰产物的作用会停留在主装甲表面;因此,统计分析 $800 \mu\text{s}$ 后除 5 板外的各金属板运动情况,即:各金属板的速度及相对主装甲的位置,如图 7、图 8。

由图 7、图 8 可知:随着盖板 1 板与上层反应装甲距离 d 增加,盖板的的速度先下降然后以该速度大致趋于稳定, $d=0$ 即盖板紧贴上层反应装甲面板时,有最大速度 $v_{\text{max}}=322 \text{ m/s}$, $d=18 \text{ mm}$ 时有最小速度 $v_{\text{min}}=270 \text{ m/s}$;而盖板相对于主装甲表面的位置大小随 d 增加呈先下降后上升然后稳定的趋势,整体变化不大,最大位置与最小位置相差 8% 。上层反应装甲面板 2 板的速度与位置的变化趋势相似,都是随 d 增加,先减小后增加,且增加趋势很小, $d=0$ 时有最大速度 $v_{\text{max}}=291 \text{ m/s}$,最远距离 $S_{\text{max}}=281 \text{ mm}$; $d=24 \text{ mm}$ 时有最小速度 $v_{\text{min}}=190 \text{ m/s}$,最小距离 $S_{\text{min}}=222 \text{ mm}$ 。上层反应装甲背板 3 板的速度与位置的变化趋势相似,呈先下降后上升的趋

势, $d=6 \text{ mm}$ 时有最小值,其中 $v_{\text{min}}=140 \text{ m/s}$, $S_{\text{min}}=134 \text{ mm}$ 。下层反应装甲面板 4 板的变化趋势与 3 板相似, $d=6 \text{ mm}$ 时有最小速度与最小距离,分别为 $v_{\text{min}}=160 \text{ m/s}$, $S_{\text{min}}=113 \text{ mm}$;此时,下层反应装甲面板的最小运动距离为 162 mm ,运动至该距离时的时间为 $1260 \mu\text{s}$ 。

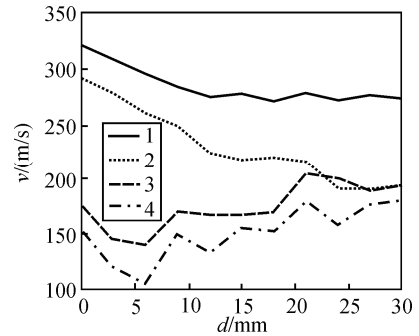


图 7 各金属板速度

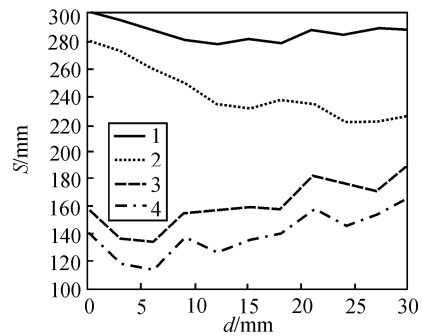


图 8 各金属板位置

3.3 隔板位置影响

附加盖板平行双层反应装甲结构如图 9 所示。当上下两层反应装甲之间存在隔板时,隔板会对上层反应装甲背板和下层反应装甲面板的运动产生阻碍作用,而隔板位置不同,对各金属板一段时间后的运动可能产生影响。为研究隔板的影响,间隔 2 mm 改变隔板与上层反应装甲背板的距离,上下两层反应装甲间隔 24 mm ,下层反应装甲与主装甲距离 20 mm 。

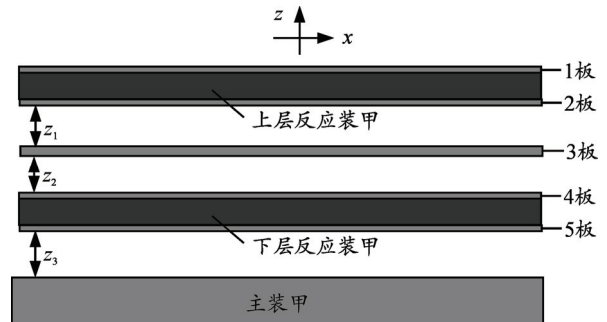


图 9 附加盖板平行双层反应装甲结构

同样,统计分析 $800 \mu\text{s}$ 后除 5 板外的各金属板

运动情况, 即: 各金属板的速度及相对主装甲的位置, 如图 10、图 11 所示。

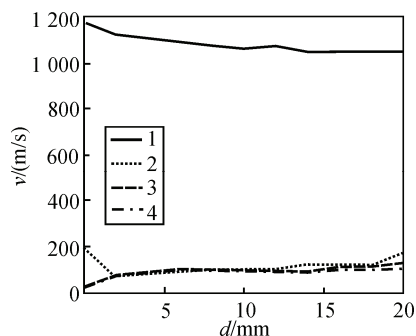


图 10 各金属板速度

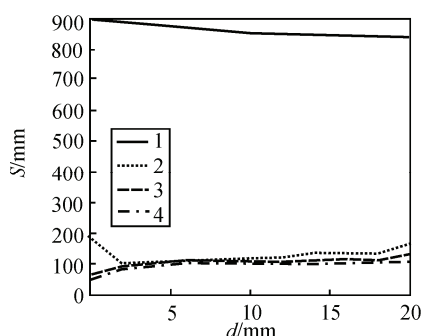


图 11 各金属板位置

由图 10、图 11 可知: 当隔板紧贴反应装甲时, 对平行双层反应装甲各金属板的运动影响最大。当隔板紧贴上层反应装甲背板时, 上层反应装甲面板、背板的速度最大, $v_{1\max}=1\ 170\ \text{m/s}$, $v_{2\max}=189\ \text{m/s}$, 相对主装甲的位置最远, $S_{1\max}=930\ \text{mm}$, $S_{2\max}=187\ \text{mm}$; 而隔板与下层反应装甲面板的速度最小, $v_{3\min}=28\ \text{m/s}$, $v_{4\min}=28\ \text{m/s}$, 与主装甲的距离最近, $S_{3\min}=61\ \text{mm}$, $S_{4\min}=50\ \text{mm}$; 此时, 下层反应装甲面板的最小运动距离为 $171\ \text{mm}$, 运动至该距离时的时间为 $5\ 130\ \mu\text{s}$ 。

当隔板紧贴下层反应装甲面板时, 上层反应装甲面板的速度与主装甲距离最小, 但上层反应装甲背板的速度及距主装甲距离相对隔板处于中间的某个位置来说略微增加; 而隔板和下层反应装甲面板的速度与主装甲的距离最大, 与隔板紧贴上层反应装甲相比, 下层面板速度增加 293%, 距离增加 116%。当隔板不与上下两层反应装甲相贴时(即隔板处于两层反应装甲之间的某个位置), 隔板位置的改变对其他金属板运动的影响很小。

4 结束语

1) 某结构反应装甲被射流引爆后, 各金属板发生相互碰撞, 作用过程十分复杂, $300\ \mu\text{s}$ 时各金属板的运动基本趋于稳定, 并以稳定后速度一直运动,

下层反应装甲面板 5 板的最小运动距离为 $555\ \text{mm}$, 运动至该距离时的时间为 $480\ \mu\text{s}$;

2) 随着盖板与上层反应装甲距离增加, 各金属板的速度、位置均呈现先下降后上升的趋势, 当盖板与上层反应装甲距离 $d=6\ \text{mm}$ 时, 下层反应装甲面板的速度最小, 与主装甲的距离最近, 此时, 下层反应装甲面板的最小运动距离为 $162\ \text{mm}$, 运动至该距离时的时间为 $1\ 260\ \mu\text{s}$;

3) 隔板与上层反应装甲背板相贴时, 对反应装甲各金属板的影响最大, 下层反应装甲面板的速度最小, 与主装甲距离最近, 此时, 下层反应装甲面板的最小运动距离为 $171\ \text{mm}$, 运动至该距离时的时间为 $5\ 130\ \mu\text{s}$;

4) 对比文中所研究的 3 种不同结构反应装甲可知: 单独附加盖板且盖板与上层反应装甲距离 $d=6\ \text{mm}$ 时, 下层反应装甲面板所需运动的距离最小, 但某结构下层反应装甲面板运动至该距离时的时间最短。

参考文献:

- [1] Mayselless M, Erlich Y, Falcovitz Y, et al. Interaction of shaped-charge jet with reactive Armour[C]//8th international symposium on ballistic. Orlando Florida USA: 1984: VIII-15-VIII-20.
- [2] Held M, Mayselless M, Rototaev E. Explosive reactive armor[C]//17th International Symposium on Ballistic. Midrand, South Africa: IBC, 1998: 33-46.
- [3] Held M. Momentum theory of explosive reactive armours[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26: 91-96.
- [4] Held M. Stopping Power of Explosive Reactive Armours Against Different Shaped Charge Diameters or at Different Angles[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2001, 26: 97-104.
- [5] 吴成, 蒋建伟, 冯顺山. 爆炸反应装甲运动规律的数值仿真及研究[J]. 兵工学报, 2002, 23(1): 35-38.
- [6] 沈晓军, 马晓青. 双层反应装甲爆炸后薄板飞散速度工程计算[J]. 北京理工大学学报, 1994, 14(4): 341-346.
- [7] 姬龙. 反爆炸反应装甲理论与关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013: 19-31.
- [8] 黄正祥, 李刚, 陈惠武. 双层反应装甲作用场参数数值模拟与实验研究[J]. 弹道学报, 2005, 17(4): 40-43.
- [9] 姬龙, 黄正祥, 顾晓辉. 双层爆炸反应装甲作用场分析与试验研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(5): 541-546.
- [10] 刘宏伟, 罗军洪, 谢卫红. 双层反应装甲干扰射流影响因素分析[J]. 军械工程学院学报, 2014, 26(6): 22-25.
- [11] Koch A, Haller F. sensitivity of ERA-boxes initiated by shaped charge jets[C]//19th international symposium on ballistic. Interlaken, Switzerland, 2001: 1077-1082.