

doi: 10.7690/bgzdh.2025.12.018

射流侵彻下陶瓷与均质钢的等效关系

蒋磊¹, 程华¹, 孙光辉¹, 张俊坤²

(1. 陆军装甲兵学院士官学校, 长春 130117; 2. 中国人民解放军 32181 部队, 西安 710000)

摘要: 为得到射流侵彻下陶瓷-钢的等效关系, 应用射流准定常侵彻准则, 考虑靶板强度侵彻以及复合靶板侵彻的相关理论, 构建钢靶及钢/陶瓷/钢复合靶板的侵彻模型, 得出陶瓷靶板与均质钢的等效关系, 结合 AUTODYN 有限元仿真, 对所建理论模型得出的陶瓷靶板-均质钢等效关系进行验证分析。结果表明: 在聚能射流侵彻下, 模型计算的理论与仿真值整体切合, 说明该等效关系具有一定的可行性。

关键词: 聚能射流; 陶瓷; 等效关系; 侵彻; 复合装甲

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Equivalent Relationship Between Ceramic and Homogeneous Steel Under Jet Penetration

Jiang Lei¹, Cheng Hua¹, Sun Guanghui¹, Zhang Junkun²

(1. Non-Commissioned Officer School, Army Academy of Armored Forces, Changchun 130117, China;

2. No. 32181 Unit of PLA, Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to obtain the equivalent relationship between ceramic and steel under jet penetration, the penetration models of steel target and steel/ceramic/steel composite target are constructed by applying the quasi-steady penetration criterion of jet and considering the relevant theories of target strength penetration and composite target penetration, and the equivalent relationship between ceramic target and homogeneous steel is obtained by combining AUTODYN finite element simulation. The equivalent relationship between ceramic target and homogeneous steel obtained from the theoretical model was verified and analyzed. The results show that the theoretical value calculated by the model is consistent with the simulation value under the penetration of shaped charge jet, which indicates that the equivalent relationship has certain feasibility.

Keywords: shaped charge jet; ceramic; equivalent relationship; penetration; composite armor

0 引言

随着科技的发展, 反坦克弹药的精度和威力都得到了很大提升, 特别是高性能破甲弹的广泛应用, 使得装甲车辆在战场上遭受较大威胁^[1]。各种新型防护装甲应运而生, 如屏蔽装甲、间隙装甲、复合装甲、爆炸反应装甲等^[2-3]。复合装甲是指利用多种不同性能的材料复合构成的装甲, 具有较好的综合抗弹性能, 在装甲车辆上应用比较广泛^[4]。陶瓷材料作为研究复合装甲常用的重要材料之一, 因其强度高、硬度高、耐磨、耐腐蚀、耐高温等一系列独特而优异的物理性能和力学性能, 在装甲抗冲击和抗侵彻, 提升战场防护性能方面具有不可替代的优势^[3-5]。目前, 各国都非常重视对陶瓷/金属复合装甲和反陶瓷/金属复合装甲的研究, 且已有许多学者对聚能射流侵彻陶瓷复合装甲进行了大量研究^[6]。开展陶瓷复合靶板抗射流侵彻能力研究, 对了解复合装甲防护水平, 构建装甲目标等效靶, 发

展和提高轻量化装甲防护机构的优化设计技术, 具有重要的科学价值和军事意义^[7-8]。

在侵彻与抗侵彻这对“矛”和“盾”的相互竞争中, 等效靶显然是一种经济且可靠的研究方法^[9-10]。国内外学者们通过研究, 尝试建立起在射流侵彻条件下的各类等效模型, 如钢—混凝土^[11]、钢—陶瓷/贫铀、钢—陶瓷/橡胶^[6]、多层靶—爆炸反应装甲^[12]等, 此外, 钢/陶瓷/钢靶板作为复合装甲的常见形式, 其等效关系亦具有重要的研究价值^[13]。故有必要以陶瓷和均质钢等效关系为研究对象, 在理论和仿真研究射流侵彻钢/陶瓷/钢复合靶板及均质钢靶规律的基础上, 以剩余穿深为等效准则, 通过理论和仿真的对比分析, 得出聚能射流侵彻下陶瓷与钢之间的厚度等效关系, 为复合靶板的优化设计提供依据。

1 构建模型

通过分析靶板抗射流侵彻能力的等效准则, 结

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2024-11-25

第一作者: 蒋磊(1986—), 男, 吉林人, 硕士。

合射流准定常侵彻及考虑靶板强度侵彻的相关理论, 构建等效的理论模型, 同时利用有限元软件对射流侵彻钢及钢/陶瓷/钢复合靶板进行仿真。

1.1 等效准则

有关射流侵彻靶板的等效准则主要有极限穿透速度等效准则和剩余穿深等效准则^[8] 2 种。笔者主要研究靶板的抗侵彻能力, 所以选用剩余穿深等效准则构建并分析模型, 如图 1 所示。为保证射流着靶瞬间的状态一致, 更好地分析陶瓷与均质钢的防护能力, 为复合靶板添加一块厚度为 δ_1 的钢质面板, 即复合靶板结构为钢/陶瓷/钢。

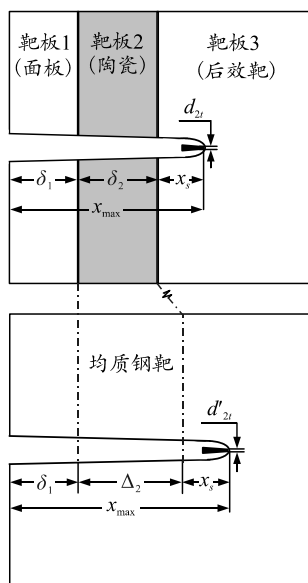


图 1 等效准则

根据剩余穿深等效准则, 可知:

$$\left. \begin{aligned} \delta_2 &\Leftrightarrow \Delta_2 \\ \delta_2 &= x_{\max} - \delta_1 - x_s \\ \Delta_2 &= X_{\max} - \delta_1 - x_s \\ K &= \Delta_2 / \delta_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: δ_1 为靶板 1 厚度, 即面板厚度; δ_2 为靶板 2 厚度, 即陶瓷靶厚度; $x_{\max}$ 为射流侵彻钢-陶瓷-钢复合靶的最大破甲深度; x_s 为射流侵彻钢-陶瓷-钢复合靶时在后效钢靶上的破甲深度, 即剩余穿深; Δ_2 为陶瓷靶等效的均质钢靶厚度; $X_{\max}$ 为射流侵彻均质钢靶的最大破甲深度; K 为等效系数。

1.2 构建理论模型

聚能射流对钢/陶瓷/钢复合靶板的侵彻过程十分复杂, 为简化理论计算, 以准定常侵彻与考虑靶板强度的侵彻理论为基础, 结合射流侵彻多层靶板理论作如下假设^[14-15]:

- 1) 聚能射流速度为线性分布, 运动过程中存在拉伸变形;
- 2) 聚能射流和靶板都是不可压缩理想流体;
- 3) 聚能射流各段在侵彻过程中互不影响;
- 4) 聚能射流近似呈锥台形;
- 5) 不考虑聚能射流的弯曲、偏斜和离散;
- 6) 对于金属靶层, 当聚能射流头部速度降为材料临界破甲速度的 α 倍时, 后继破甲需考虑靶板强度, 对于非金属靶层则始终不考虑靶板强度的影响。

1.2.1 建立虚拟源

设聚能射流在初始时, 长度为 L_0 , 头部速度为 $v_{\text{head}0}$, 尾部速度为 v_{tail} , 尾部直径为 d_{10} , 头部直径为 d_{20} , 聚能射流头部距面板距离为 H_0 , 着靶点为 O , 聚能射流的虚拟源点(即认为所有聚能射流均由该点出发)为 A , 聚能射流侵彻复合靶板几何关系如图 2 所示。

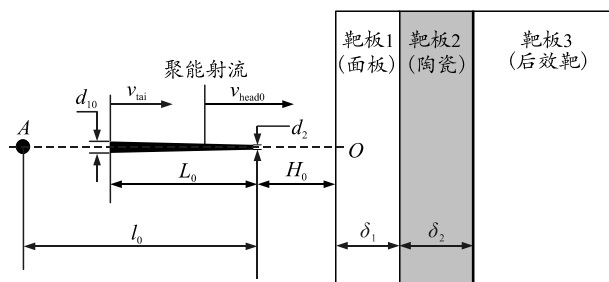


图 2 射流侵彻复合靶板的几何关系

根据聚能射流虚拟源点的定义可得:

$$l_0 = \frac{L_0 v_{\text{head}0}}{v_{\text{head}0} - v_{\text{tail}}} \quad (2)$$

1.2.2 选择侵彻理论

根据射流侵彻靶板过程中头部速度 v_j 与靶板临界侵彻速度 v_{jc} 之间的变化关系, 侵彻理论主要有准定常侵彻和考虑靶板强度侵彻。

- 1) 准定常侵彻, $v_j \geq \alpha v_{jc}$ (α 为系数, 且 $\alpha > 1$)^[14, 16]。

$$x = (H + l) \left[(v_{\text{head}} / v_j)^{\sqrt{\rho_j / \rho_p}} - 1 \right] \quad (3)$$

式中: x 为射流侵彻靶板的深度; H 为着靶前射流头部距靶板距离; l 为着靶前射流长度; v_{head} 为着靶前射流的头部速度; v_j 为侵彻过程中射流的头部速度; ρ_j 为射流的密度; ρ_p 为靶板的密度。

- 2) 考虑靶板强度的侵彻, $v_j < \alpha v_{jc}$ ^[14, 16]。

当射流速度较低时, 靶板强度的影响就会明显表现出来, 这时就必须考虑靶板强度对侵彻的影响。在射流不可压缩流体模型中以静压力项来反映材料

强度，可得：

$$z = \rho_p / \rho_j$$
$$Q = -v_j z + \sqrt{v_j^2 z + (1 - z)v_{jc}^2}$$
$$Q_0 = -v_{head} z + \sqrt{v_{head}^2 z + (1 - z)v_{head}^2}$$
$$x = \frac{H + l}{v_{head}} v_j \frac{Q_0}{Q} \left[\frac{Q_0 + \sqrt{Q_0^2 - (1 - z)^2 v_{jc}^2}}{Q + \sqrt{Q^2 - (1 - z)^2 v_{jc}^2}} \right]^{1/\sqrt{\varepsilon}} - H + l$$

。 (4)

3) 复合靶板侵彻^[16]。

对于不同材料层组合的多层复合靶板，金属靶层当射流头部速度 $v_j < \alpha v_{jc}$ 时，需考虑靶板强度对侵彻的影响，非金属靶层则始终视为流体处理。

对于靶板 1 和 3，当 $v_j \geq \alpha v_{jc1}$ (v_{jc1} 为靶板 1 的临界侵彻速度) 时采用式(3)进行计算；当 $v_j < \alpha v_{jc1}$ 时，则采用式(4)进行计算。对于靶板 2 则采用式(3)进行计算。

根据式(1)–(4)可以求出射流侵彻下陶瓷与钢板的等效厚度关系。

1.3 构建仿真模型

聚能射流从形成到侵彻靶板是一个复杂的过程，若一次性建立计算量很大，且会做很多无用的计算工作，所以为精简计算，提高效率，对模型进行适当的结构简化^[15]，仿真计算步骤如下：

- 1) 根据现有破甲子弹的结构^[17–18]如表 1 所示，构建简化的聚能装药模型，并对射流的形成和拉伸进行仿真；
- 2) 根据射流的拉伸情况，提取一定炸高时的射流，用于下一步侵彻过程的仿真计算；
- 3) 按照需要构建靶板结构，利用步骤 2)所提取的射流进行侵彻仿真。

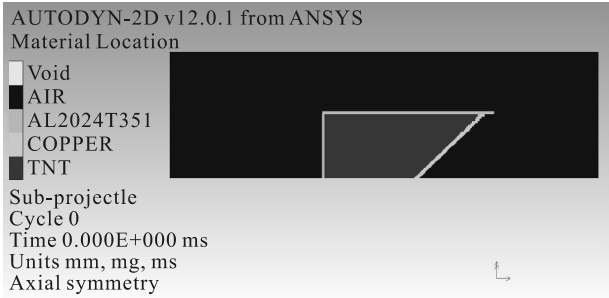
表 1 部分国内外破甲子弹性能参数

型号	直径/mm	装药	静破甲深度/mm
M42/M46(美)	38.9	A5	76.2
M77(美)	38.7	—	77.0
Rh49(德)	43.0	A5	63.5–76.2
P22–24(德)	38.0	A5	—
MED–2(中)	42.2	—	>60.0

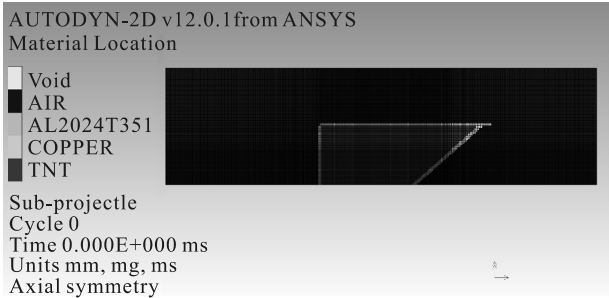
1.3.1 射流形成与拉伸的仿真

表 1 中可以看：出破甲子弹的口径基本在 40 mm 左右，所以聚能装药仿真模型中药柱直径定为 40 mm，又因破甲子弹为轴对称模型，故为简化计算过程采取 1/2 的 2D 模型，如图 3 所示。聚能装药壳体材料为 Al2024T351，厚度为 1 mm，高度为 60 mm，底部外径为 42 mm；药型罩材料为紫铜，

厚度为 1.154 mm，锥顶角为 60°；装药为 TNT；外部是静态空气域，尺寸为 166 mm×40 mm；点火方式为底部线性点火，长度为 10 mm；由于射流形成过程中涉及大变形、高应变率等数值计算，所以采用 Euler 算法进行计算，同时为提高计算精度在射流形成部分及药型罩所占部分进行网格密集化处理；在空气域侧边界添加 Flowout 边界条件，防止反射波发生。



(a) 实体模型



(b) 网格划分

图 3 聚能装药仿真模型

将模型进行对称处理后，射流形成的仿真情况如图 4 所示。

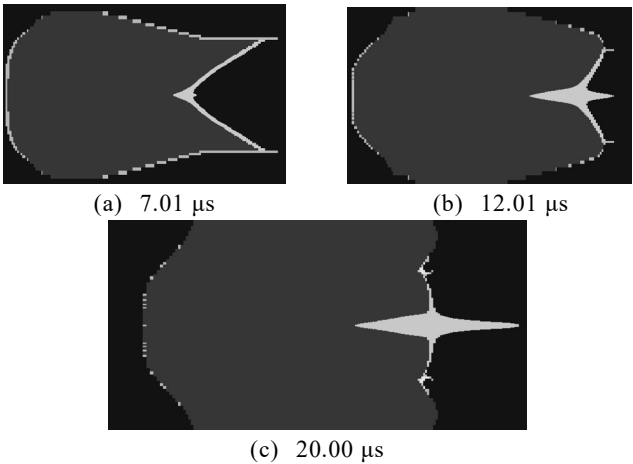


图 4 射流的形成

由于射流的拉伸，所建 Euler 空气域空间已无法满足要求，所以对空气域进行补充，同时将不含射流的侧边界区域进行删除处理，减少计算量，仿真情况如图 5 所示。

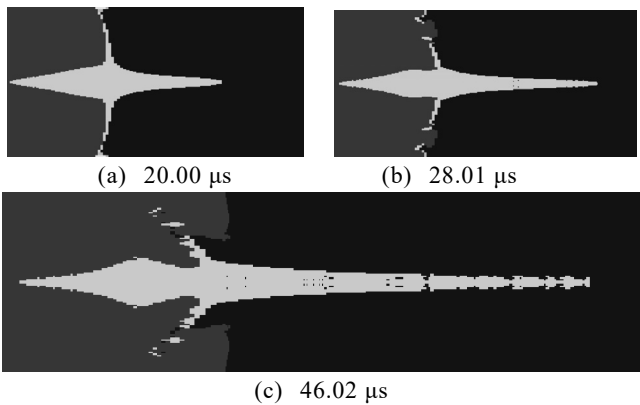


图 5 射流的拉伸

从射流拉伸的仿真过程中得出：在射流达到约 4 倍口径时，发生了颈缩，继而发生断裂，所以射流侵彻靶板的高度选在约 3 倍炸高处。

1.3.2 射流侵彻复合靶板的仿真

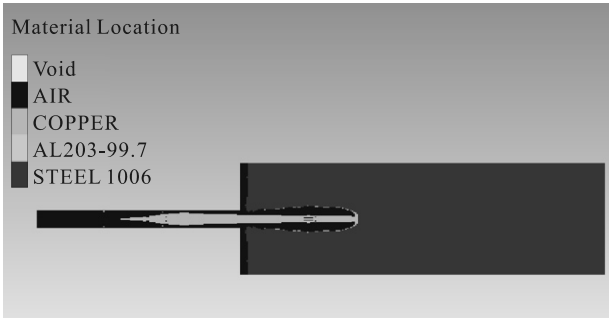
在距药型罩底部 120 mm 处构建不同陶瓷厚度的复合靶板，进行侵彻计算，靶板 1/靶板 3 均为钢-1006， ρ_1 为 7 890 kg/m³，靶板 2 为 Al₂O₃， ρ_2 为 3 900 kg/m³。射流初始参数如表 2 所示，复合靶板结构及侵彻结果如表 3 所示 D 为侵彻终止时射流的头部直径； V 为侵彻终止时射流的头部速度，部分侵彻仿真如图 6 所示。

表 2 射流初始参数

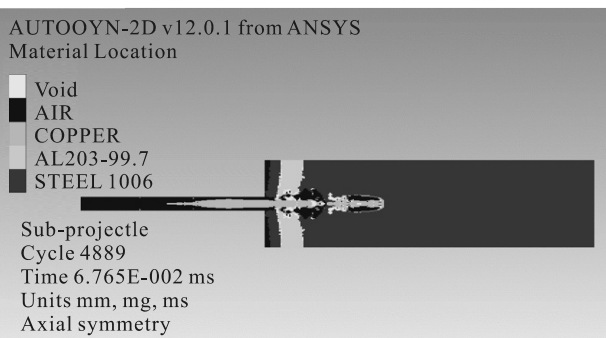
材料	$\rho_j/$ (kg/m ³)	$v_{head0}/$ (m/s)	$v_{tail}/$ (m/s)	$L_0/$ mm	$d_{10}/$ mm	$d_{20}/$ mm	$H_0/$ mm
紫铜	8 930	4 443	2 035	69.9	4	1	4

表 3 复合靶板结构及侵彻结果

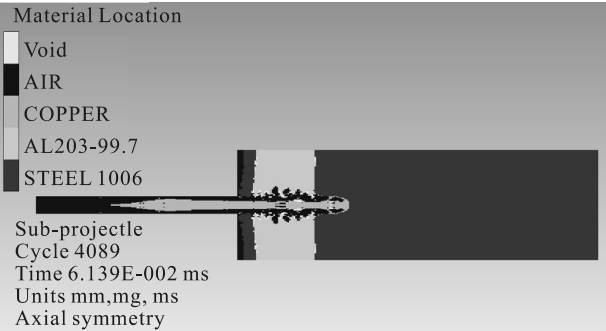
序号	复合靶板结构		侵彻结果			
	δ_1/mm	δ_2/mm	$x_{\max}/\text{mm}$	x_s/mm	D/mm	$V/(\text{m/s})$
1	5	0	89.56	—	1.0	2 537.3
2	5	5	75.99	65.99	1.5	2 665.1
3	5	10	58.40	43.40	2.0	2 672.9
4	5	15	35.95	15.95	2.0	2 629.1
5	5	20	63.77	38.77	1.0	2 607.4
6	5	25	71.24	41.24	2.0	2 622.1
7	5	30	57.66	22.66	2.0	2 610.1
8	5	35	79.38	39.38	0.5	2 623.9
9	5	40	73.95	28.95	2.0	2 630.4
10	5	45	56.99	6.99	2.5	2 704.8
11	5	50	90.92	35.92	1.5	2 465.4



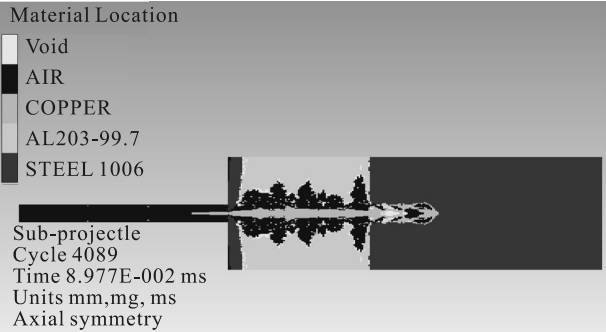
(a) 算例 1



(b) 算例 3



(c) 算例 6



(d) 算例 11

图 6 部分侵彻仿真

2 模型计算结果的对比分析

通过长期试验观察总结所得射流侵彻不同材料靶板速度随射流速度的变化如图 7 所示。

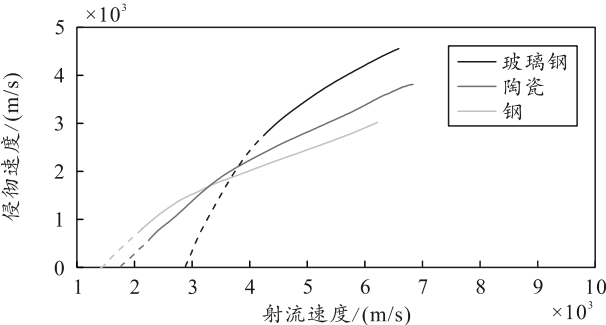


图 7 侵彻速度随射流速度的变化

从图 7 中可以看出：随着射流速度的降低，射流侵彻速度不断减小，且初始时基本呈线性变化，这是准定常侵彻阶段。当射流速度降低到一定值时，

侵彻速度不再是呈线性变化,这时就需考虑靶板强度对侵彻的影响。对于钢板,侵彻速度约为 3 000 m/s,加之仿真终止时射流的头部速度在 2 600 m/s 左右,所以取钢靶的临界侵彻速度为 2 600 m/s,系数 α 为 1.3。

将表 2 和 3 中的射流及模型参数代入理论模型进行计算,所得结果与仿真结果进行对比分析,如图 8—11 所示。各参数的仿真值在理论值上下波动,整体趋势切合,说明所建理论模型及所选的考虑靶板强度的临界侵彻速度参数具有一定的合理性。

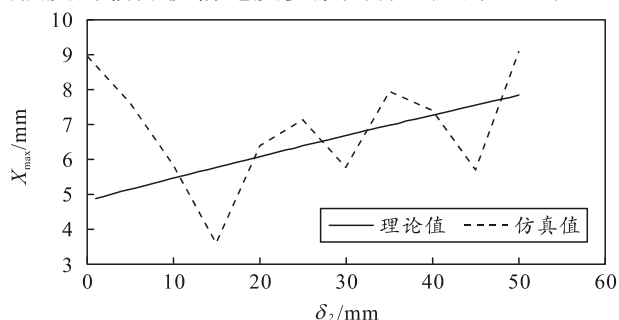


图 8 最大侵彻深度随陶瓷厚度的变化

由图 8 可见:随着陶瓷厚度的增加,射流最大侵彻深不断增加,说明相同厚度的均质装甲在一定程度上优于陶瓷,这是因为在等效靶计算中,各材料仅仅是机械的拼接,不利于复合靶板抗侵彻能力的提高,与相关试验结果相符合^[4]。

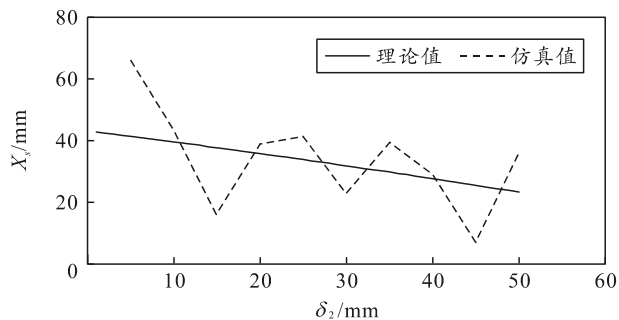


图 9 剩余穿深随陶瓷厚度的变化

从图 9 可以看出:随着陶瓷厚度的增加,剩余穿深不断降低,且理论值与仿真值的差值呈现波动状态,即当陶瓷厚度较小或较大时,剩余穿深理论值与仿真值的差值都较大,当陶瓷厚度在 30 mm 左右时,剩余穿深理论值与仿真值的差值较小。由于陶瓷厚度较小时,陶瓷-钢界面介质流动大,是非定常的;而陶瓷厚度较大时,由于陶瓷对射流的离散作用,以及因射流速度的降低陶瓷强度对侵彻的影响越来越大,使得这 2 种情况下不能以准定常侵彻理论进行计算,从而造成理论值和仿真值之间具有较大的误差。针对第 1 种情况,陶瓷厚度较小

时,可以从消除界面效应来提高等效精度,针对第 2 种情况,陶瓷厚度较大时,可以从改进侵彻模型和应用破甲能力更强的射流来分析等效关系,提高精度。

图 10—11 反映出随着陶瓷厚度的增加,等效钢板厚度不断增加,等效系数不断减小。

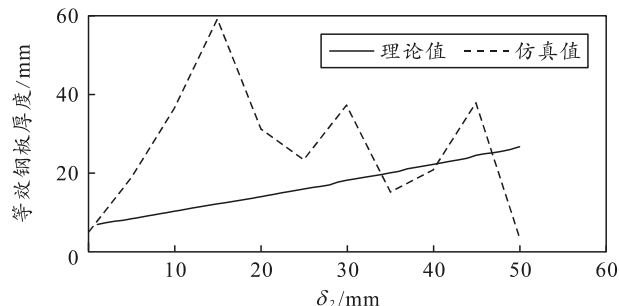


图 10 等效钢板厚度随陶瓷厚度的变化

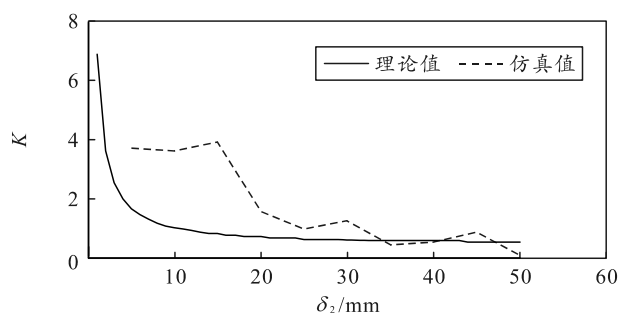


图 11 等效系数随陶瓷厚度的变化

将图 10—11 结合在一起可以看出:随着靶板厚度的增加,等效钢板厚度及等效系数的仿真值在理论值周围波动的范围越来越小,理论值和仿真值的差值越来越小,最终当陶瓷厚度达到 30 mm 后,二者比值即等效系数稳定在 0.5 左右。

3 结束语

1) 通过理论模型和仿真模型结果的对比分析,发现各理论值与仿真值的整体变化趋势相切合,说明所建理论模型具有一定的可行性,可为射流侵彻下等效靶的建立提供理论指导。

2) 复合靶板中各材料简单机械地组合,不仅不利于提高靶板的抗射流侵彻能力,甚至会降低抗侵彻能力。

3) 在研究靶板等效关系时,本文中所建立的等效靶板理论模型,对于不同标准射流,都有与之相对应的最佳陶瓷厚度范围,这是因为模型建立时未考虑钢-陶瓷界面物质非定常流动及陶瓷强度对侵彻的影响造成的,所以该模型还可以进一步深入研究,以扩展适用范围。