

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.04.004

# 基于等质量变壁厚球缺罩聚能杆式射流成型特性研究<sup>\*</sup>

顾文彬 胡亚峰 刘建青 徐浩铭 秦入平 王振雄

中国人民解放军理工大学(江苏南京,210007)

[摘 要] 基于变壁厚球缺罩质量恒定假设,通过改变药型罩内表面曲率半径  $r_x$  和罩顶厚度  $s$ ,调整药型罩的结构,建立了  $\delta_s$  与  $r_x$  设计参数计算模型;采用 LS-DYNA3D 显式非线性动力有限元程序,对不同结构变壁厚球缺罩形成聚能杆式射流的过程进行三维数值模拟;设计出罩顶厚度改变量  $\delta_s$  在  $(-1.2 \sim +1.2)$  mm 范围内的 7 种不同结构变壁厚球缺罩方案,研究其形成聚能杆式射流的形态和各项性能参数的变化规律,并与等壁厚药型罩形成的聚能杆式射流参数进行对比分析。研究表明:变壁厚球缺罩对杆式射流的形状、长度、密实度和断裂时间等性能参数均有较显著影响;当  $\delta_s = -0.4$  mm 时,杆式射流头部速度为 3317 m/s,并且速度梯度分布合理,杆式射流的综合性能较优。

[关键词] 变壁厚球缺罩 杆式射流 数值模拟

[分类号] TP69 O383

## 引言

聚能杆式射流作为一种较为新型的聚能侵彻体,其侵彻性能介于爆炸成型弹丸(EFP)和聚能射流(JEP)之间。与 EFP 相比,杆式射流呈细长杆状,其速度、长径比、断面比动能和侵彻能力都较 EFP 有很大增强。与聚能射流相比,杆式射流具有良好的大炸高性能,以及药型罩材料利用率高和毁伤作用后效大的特点。杆式射流可以有效对混凝土坚固工事和新型防护装甲,也可用来作为串联战斗部的前级装药,其良好的侵彻深度和侵彻孔径可以为随进弹丸的侵彻创造条件。

球缺罩是一种传统的药型罩结构,当它的高度和内表面底直径的比值为  $0.4 > h/d > 0.3$  时,通常可以产生杆式射流,虽然穿透能力比锥形罩所形成的聚能射流差,但是它可以在较长距离的飞行中仍然保持自身的紧凑型 and 密实性,主要用来侵彻混凝土、岩石等相对于钢材较“软”的目标。

目前,对于球缺罩杆式射流成型过程,以及起爆方式对杆式射流成型性能的影响,国内已经进行了一定程度的数值模拟和试验研究<sup>[1-3]</sup>。但是,对于药型罩结构参数对杆式射流成型规律的影响,国内外很少有相关研究报道。本文基于刘建青等<sup>[4]</sup>对球缺形药型罩结构参数对爆炸成型弹丸成型影响的研

究成果,采用 LS-DYNA3D 显式非线性动力有限元程序,研究基于等质量的变壁厚球缺形药型罩结构参数对聚能杆式射流成型的影响规律。

## 1 研究方案和有限元模型

### 1.1 物理模型

等质量变壁厚球缺罩的结构如图 1 所示,如果固定球缺罩口部直径  $D$  和外曲面半径  $R$ ,为确保药型罩的质量不变,可以通过合理调整罩内曲面的半径  $r_x$  和罩顶厚度  $s$ (也即内球缺的高度  $h$ ),使内曲面构成的球缺体积保持常量。对于给定的罩顶厚度  $s$ ,内球缺的高度也一定,此时可通过球缺体积公式

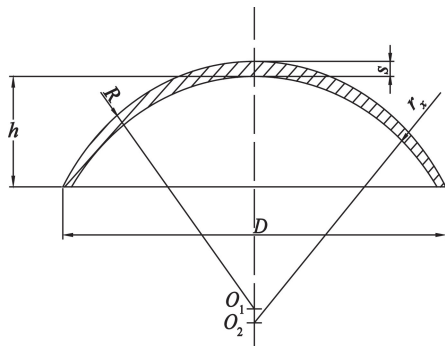


图 1 等质量变壁厚球缺罩示意图

Fig.1 Sketch of variable thickness sphere liner

\* 收稿日期: 2013-03-14

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAK05B01)

作者简介: 顾文彬(1961~),男,教授,博导,主要从事火炮、自动武器与弹药工程的研究。E-mail: guwenbin1@yahoo.com.cn

通信作者: 胡亚峰(1988~),男,硕士,主要从事火炮、自动武器与弹药工程的研究。E-mail: 827734300@qq.com

确定球缺罩内曲面的曲率半径以及球心位置:

$$V=\frac{\pi}{3}h^2(3r-h)$$
(1)

式中: $V$  为内球缺的体积; $h$  为内球缺的高度; $r$  为内球缺的半径。

计算模型以等壁厚球缺罩为基础进行选取,由式(1)可得:

$$\begin{aligned} V_{\text{恒}} &= \frac{\pi}{3}h_0^2(3r_0-h_0) \\ &= \frac{\pi}{3}(h_0-\delta_s)^2[3r_x-(h_0-\delta_s)] \end{aligned}$$
(2)

式中: $V_{\text{恒}}$  为等壁厚球缺罩内球缺的体积,将其作为确定变壁厚球缺罩结构参数的基准,通过保持体积恒定使罩质量保持不变; $h_0$  为等壁厚球缺罩内球缺的高度; $r_0$  为等壁厚球缺罩内曲面的曲率半径; $r_x$  为变壁厚球缺罩内曲面的曲率半径; $\delta_s$  为罩顶厚度  $s$  的变化量,当等壁厚时, $\delta_s=0$ 。

由式(2)可以推导出  $r_x$  由  $\delta_s$  唯一确定的关系式:

$$r_x=\frac{3h_0^2r_0+3h_0(\delta_s)^2-3h_0^2\delta_s-(\delta_s)^2}{3h_0^2+3(\delta_s)^2-6h_0\delta_s}$$
(3)

聚能杆式射流装药结构如图 2 所示,主装药为圆柱形,采用 8701 炸药,直径 140mm,高度 156mm,为节省装药量,尾部采用收敛结构,端部中心起爆,药型罩采用紫铜材料。

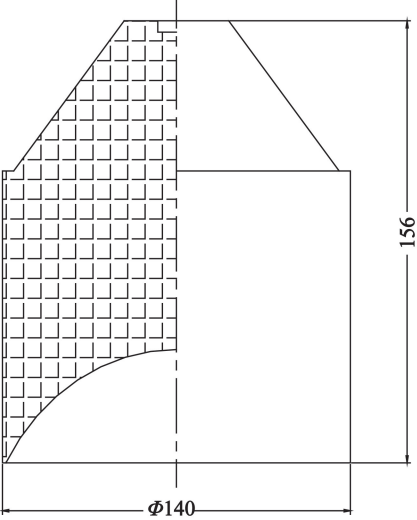


图 2 装药结构示意图(单位:mm)

Fig. 2 Sketch of charge structure(unit:mm)

1.2 研究方案

为了确定研究方案,首先确定作为基准的等壁厚药型罩结构数,等壁厚药型罩内球缺的高度  $h_0=46\text{mm}$ 、曲率半径  $r_0=66.89\text{mm}$ 、球缺的球心坐标为  $(0,0,z_x)$ 、罩顶厚度  $s=4\text{mm}$ ,然后分别取  $\delta_s=-1.2$ 、 $-0.8$ 、 $-0.4$ 、 $0.4$ 、 $0.8$ 、 $1.2\text{mm}$ (负号表示罩

顶厚度减小),由此共可以得到 7 组罩结构设计参数,如表 1 所示。

表 1 内球缺各项参数

Tab. 1 Parameters of inner sphere liner

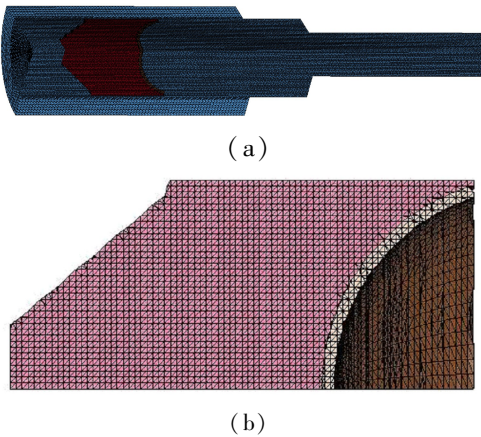
mm		
$\delta_s$	$r_x$	$z_x$
-1.2	64.7712	3.3188
-0.8	65.4564	2.2336
-0.4	66.1625	1.1275
0	66.8900	0
0.4	67.6398	-1.4408
0.8	68.4127	-2.3227
1.2	69.2094	-3.5194

从表 1 中可以看出,变壁厚球缺罩罩顶厚度增加,内曲面的曲率半径增大,内曲面的球心沿装药轴线下移,但是内球缺的体积保持不变,从而保证了药型罩体积和质量恒定。由于这 7 种计算方案仅改变球缺罩内曲面的曲率半径,而外曲面形状保持不变,所以不会影响爆轰波阵面与药型罩外曲面表面相应位置作用的强度和角度。

1.3 有限元模型

1.3.1 计算模型和网格划分

三维有限元模型示意图如图 3 所示。杆式射流侵彻体的形成过程涉及高应变率和高过载,采用拉格朗日(Lagrange)网格会因为网格严重畸变而产生负体积,导致计算无法进行,并且 Lagrange 算法中常忽略空气对射流成型的影响,这与实际不符合,因此难以准确模拟杆式射流成型过程,而欧拉网格在物质边界的捕捉上不能满足精度要求。因此,为了解决网格大变形、材料流动等问题,本文采用 ALE



(a) 填充装药和药型罩的空气网格;

(b) 炸药和药型罩网格

图 3 三维有限元模型示意图

Fig. 3 Sketch of 3D finite element model

(arbitrary lagrangian eulerian)算法来计算杆式射流的形成过程。ALE 算法允许网格间的物质流动,其最大特点是每一步都根据物质区域的边界构造合适的网格,ALE 算法可以看作是进行自动重分区的一种算法。炸药、药型罩和空气均采用 ALE 算法,采用“填充法”<sup>[5]</sup>定义炸药和药型罩材料。根据装药结构的对称性,建立 1/4 模型,在模型的对称面上施加对称约束条件。

1.3.2 材料模型及参数

采用 8701 炸药,其 JWL 状态方程的表达式为:

$$p_1 = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{4}$$

式中: $p_1$  为爆轰波阵面的压力; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  均是材料常数; $E_0$  为比内能。

炸药参数如表 2 所示。

表 2 炸药材料参数

Tab. 2 Parameters of explosive materials				
$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$D / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$p_{CJ} / \text{GPa}$	$A / \text{GPa}$	
1.70	8.4	30	56.4	
$B / \text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$
6.801	4.1	1.3	0.36	10.0

数值模拟中药型罩采用 Johnson-Cook 本构模型,使用 Grüneisen 状态方程进行描述。其材料紫铜的 Johnson-Cook 本构方程参数如表 3 所示。

表 3 Johnson-Cook 本构方程计算参数

Tab. 3 Properties of Johnson-Cook constitutive equation						
$A / \text{GPa}$	$B / \text{GPa}$	$n$	$C$	$m$	$T_m / \text{K}$	$T_r / \text{K}$
0.09	0.292	0.31	0.025	1.09	1356	293

对于多物质 ALE 算法,要建立覆盖整个杆式射流飞行区域的空气网格,空气使用物质材料本构模型,其状态方程为线性多项式,表达式如下:

$$p_2 = (C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3) + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0' \tag{5}$$

式中: $p_2$  为空气压力; $C_1 \sim C_6$  均为常数; $E_0'$  为单位体积的初始能量; $\mu$  为系数, $\mu = 1/(v - 1)$ ,其中  $v$  表示相对体积。

2 计算结果和分析

2.1 杆式射流成型过程

以等壁厚球缺罩形成杆式射流的过程为例,射流成型过程如图 4 所示。主装药起爆后约 12 $\mu\text{s}$ ,药型罩上表面开始受到炸药爆轰波阵面的驱动作用,

药型罩在爆轰波和波后产物的作用下经历了压跨、翻转、闭合和拉伸变形等过程。

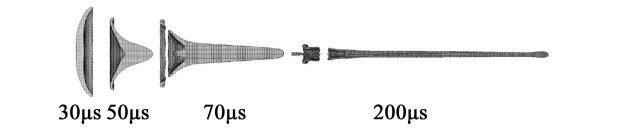


图 4 杆射流成型过程数值仿真结果  
Fig. 4 Numerical simulation results of JPC formation

与传统聚能射流成型规律的不同之处在于:药型罩在轴线处碰撞后,由于压跨角较大,射流的质量和直径相对较大,杆体显得十分短小,射流和杆体的分界不再明显,罩材料的利用率达到 80% 以上。同时,可以看到类似于 EFP 的尾翼出现,随着材料不断向轴线压跨,尾翼边缘由于侧向稀疏波以及罩向中心汇聚变形过程中产生的径向应力,而与罩本体脱离<sup>[6]</sup>。最终形成具有较均匀的质量分布、较大长径比和较小速度梯度的高速杆式侵彻体。如图 4 所示,杆式射流在  $t = 200\mu\text{s}$  时刻仍然保持良好飞行姿态,而聚能射流此时早已断裂。

2.2 杆式射流速度分布规律

爆炸装药采用中心点起爆方式,最大计算时间设定为 240 $\mu\text{s}$ 。表 4 所示为起爆后 160 $\mu\text{s}$  时刻的计算结果,表中  $v_1$  为侵彻体头部速度、 $v_2$  为尾部速度、 $v_3$  为头尾速度差, $T$  为射流断裂时间,表中“-”表示在杆式射流仍未断裂。

表 4 杆式射流速度参数  
Tab. 4 Velocity parameters of JPC

$\delta_s / \text{mm}$	$v_1 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_2 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_3 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$T / \mu\text{s}$
-1.2	3550	903	2647	128
-0.8	3363	911	2452	237
-0.4	3317	937	2380	-
0	3217	959	2258	-
0.4	3171	1055	2116	-
0.8	3220	1154	2066	-
1.2	3195	1213	1982	-

从表 4 的计算结果,结合图 5 和图 6 可以看出,当装药在中心点起爆时,以等壁厚药型罩( $\delta_s = 0$ )为参考基准,随着药型罩顶部厚度的增大,侵彻体头部速度先减小、后增大,但是整体变化幅度很小,当药型罩顶部厚度减小时,侵彻体头部速度显著增大。

可见顶部薄、底部厚的球缺罩能显著提高杆式射流的头部速度。而顶部厚、底部薄的球缺罩对射流头部速度影响不大,却可以显著提高射流尾部速

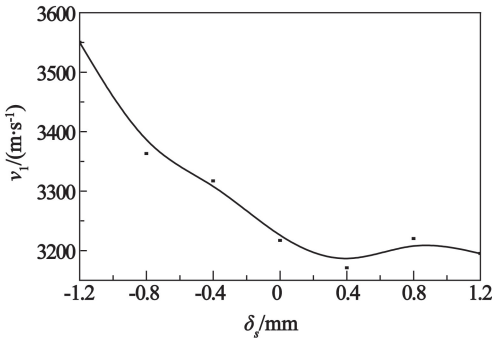


图 5 杆式射流头部速度随  $\delta_s$  变化曲线  
Fig. 5 Change curve of head velocity of JPC with  $\delta_s$

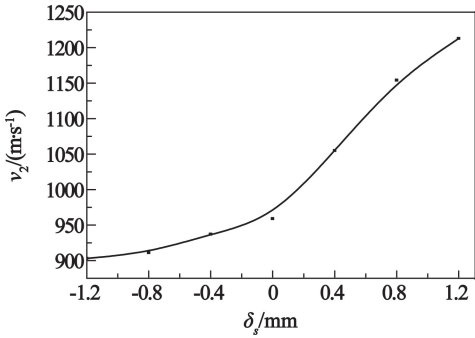


图 6 杆式射流尾部速度随  $\delta_s$  变化曲线  
Fig. 6 Change curve of tail velocity of JPC with  $\delta_s$

度,使射流不至于过早断裂,形成稳定的杆式侵彻体。模型  $\delta_s = -1.2\text{mm}$  和  $\delta_s = -0.8\text{mm}$  所形成的杆式射流速度分别为  $3550\text{m/s}$  和  $3363\text{m/s}$ ,尾部速度较低,速度梯度较大,分别在  $128\mu\text{s}$  和  $237\mu\text{s}$  发生断裂,在大炸高的情况下,其稳定性难以保证。模型  $\delta_s = +0.4\text{mm}$ 、 $\delta_s = +0.8\text{mm}$  和  $\delta_s = +1.2\text{mm}$  所形成的杆式射流速度分别为  $3171\text{m/s}$ 、 $3220\text{m/s}$  和  $3195\text{m/s}$ ,略低于等壁厚的情况,但尾部速度均在  $1000\text{m/s}$  以上,甚至达到  $1213\text{m/s}$ ,即使在大炸高的情况下也不容易发生断裂。

综合考虑,模型  $\delta_s = -0.4\text{mm}$  既可以使射流速度明显提升,达到  $3317\text{m/s}$ ,同时还可以保证其稳定性而不至于断裂。

2.3 射流形态分析

表 5 为中心点起爆后  $160\mu\text{s}$  时刻的杆式射流形态参数,其中  $L$  为射流长度,与本体脱离的少许尾翼也属于杆式射流拉伸翻转的一部分,因此将其纳入长度测量范围, $D$  为射流直径,在射流长度方向上分别选取  $1/4L$ 、 $2/4L$ 、 $3/4L$  为测量点,将所测直径取平均值即为最终的直径  $D$ ,  $L/D$  为长径比,  $L^*$  为实心部分长度,用  $L^*/L$  表征杆式射流的密实性。

由图7可以看出,变壁厚对杆式射流长度的影响近似为线性分布,射流长度随着罩顶厚的增加而逐渐减小。由图8可知,射流直径随着罩顶厚的增

表 5 杆式射流形态参数  
Tab. 5 Morphological parameter of JPC

$\delta_s/\text{mm}$	$L/\text{cm}$	$D/\text{cm}$	$L/D$	$L^*/\text{cm}$	$L^*/L$
-1.2	41.2	2.01	20.54	0.8	0.02
-0.8	38.4	1.81	21.26	1.9	0.05
-0.4	37.2	1.71	21.80	23.6	0.63
0	36.3	1.69	21.52	28.8	0.79
0.4	35.0	1.73	20.27	29.0	0.83
0.8	34.6	1.74	19.96	29.0	0.84
1.2	33.2	1.75	18.94	28.4	0.86

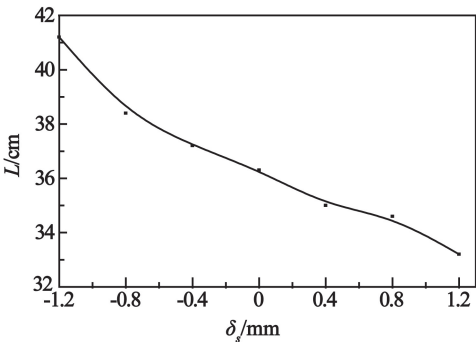


图 7 杆式射流长度随  $\delta_s$  变化曲线  
Fig. 7 Change curve of length of JPC with  $\delta_s$

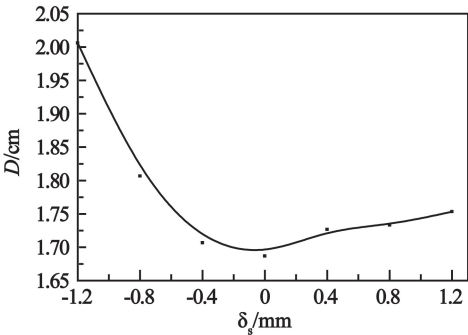


图 8 杆式射流直径随  $\delta_s$  变化曲线  
Fig. 8 Change curve of diameter of JPC with  $\delta_s$

加,先减小、后增大。当  $\delta_s < 0$  时变壁厚对射流直径的影响很大,而  $\delta_s > 0$  时变壁厚对射流直径的影响趋于平缓。在  $\delta_s = 0$  时,射流的平均直径最小。这是因为对于本文研究的药型罩结构,当  $\delta_s < 0$  时,顶部薄、底部厚的球缺罩在爆轰波的作用下来不及向轴线压跨就形成了翻转。由图 8 所示的射流形状可以看出: $\delta_s > 0$  为压跨型射流,有占整体质量很小的杵体生成; $\delta_s < 0$  为翻转型射流,不存在杵体。其中,  $\delta_s = -1.2\text{mm}$  为中空杆式射流,见图 9(a),所以其射流直径最大,虽然速度很高,但是会影响整体侵彻能力。  $\delta_s = -0.8\text{mm}$  为前端少许实心(图 8),后端大部分中空的杆式射流,平均直径也比较大。  $\delta_s = -0.4\text{mm}$  为拥有少量稳定裙(约为  $1/4$  长度)的



无杵杆式射流,见图 9(b),其飞行稳定性、侵彻速度和长径比都有良好的性能。

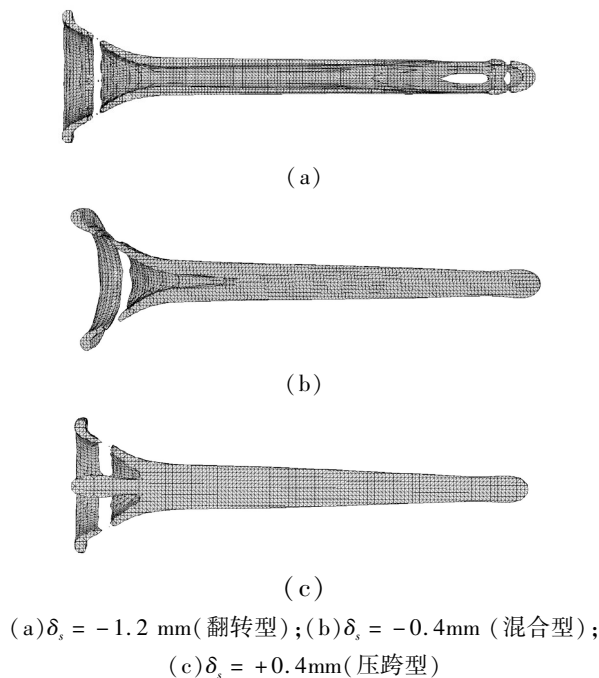


图 9 杆式射流剖视图( $t = 120 \mu\text{s}$ )

Fig. 9 Section view of JPC ( $t = 120 \mu\text{s}$ )

杆式射流的密实性对其侵彻性能影响较大,密实性不足,势必影响持续侵彻能力。在爆轰波作用下,球缺型药型罩形成聚能杆式射流的过程一般可分为 3 种不同的表现形式<sup>[6]</sup>:其一为压跨型,和小锥角罩压合形成聚能射流相似;其二为翻转型,类似于大锥角罩翻转形成爆炸成型弹丸;其三为混合型,罩壁材料向轴线汇聚的过程中,一部分压跨,另一部分翻转。

这 3 种形式下的密实性有很大差异,其主要影响因素有球缺罩的  $H/D$  值( $H$  为罩高度, $D$  为罩直径)<sup>[7]</sup>、爆轰波与罩表面的作用角度等。本文研究发现变壁厚对杆式射流成型的表现形式和密实性有着明显的影响。 $H/D$  值与  $\delta_s$  的关系如图 10 所示。

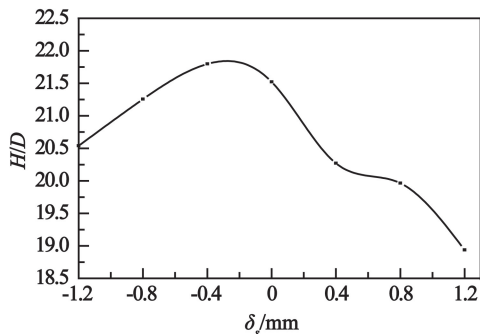


图 10 杆式射流长径比随  $\delta_s$  变化曲线

Fig. 10 Change curve of length-diameter ratio of JPC with  $\delta_s$

为了表征杆式射流的密实性,引入了“密实度”的概念<sup>[8-11]</sup>,定义密实度为杆式射流实心部分长度  $L^*$  与总长度  $L$  的比值,用  $M$  表示,则  $M = L^*/L$ 。

图 11 即为变壁厚对密实度的影响曲线。总体来说,密实度随着  $\delta_s$  的增大而增大。当  $\delta_s < 0$  时,密实度从 0.02 到 0.79 变化剧烈;当  $\delta_s > 0$  时,密实度基本维持在 0.8 以上,变化十分微小。尤其在  $\delta_s < -0.4 \text{ mm}$  时,密实度从 0.63 开始陡然下降,所形成杆式射流的稳定性和持续侵彻能力势必严重下降。所以罩顶厚  $\delta_s$  的变化量最好在  $-0.4 \text{ mm}$  以上。

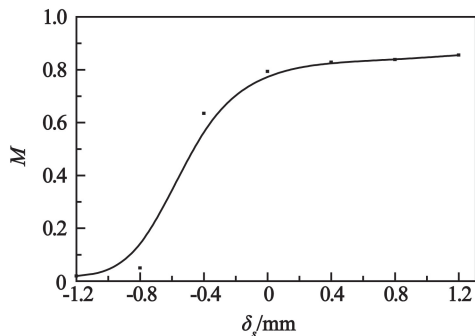


图 11 杆式射流密实度随  $\delta_s$  变化曲线

Fig. 11 Change curve of compactness of JPC with  $\delta_s$

### 3 结论

本文利用非线性动力学程序 LS-DYNA3D 研究了等质量变壁厚球缺罩形成聚能杆式射流的特点,分析了变壁厚对杆式射流速度、长度、长径比、密实度以及速度梯度分布的影响。数值计算采用的网格尺寸、材料参数、状态参数以及 ALE 控制参数都是经过前期优化方案所做的大量实验验证并修正过的。计算结果表明:

1) 在等质量情况下,外球缺保持不变,仅对内球缺进行优化,罩顶厚度变化量  $\delta_s = -0.4 \text{ mm}$  时,其飞行稳定性、侵彻速度和长径比具有良好的综合性能。

2) 通过对射流形态的分析,可知顶部厚、底部薄的球缺罩多形成压跨型射流,实心有杵体。而顶部薄、底部厚的球缺罩容易形成翻转型射流,空心无杵。而介于两者之间的前端大部为实心,后端带有少量稳定裙的杆射流,其飞行性能和长径比较佳。对于本文研究的模型,当  $\delta_s = -0.4 \text{ mm}$  时,其射流形态最佳。

3) 得到了变壁厚对杆式射流头部速度、尾部速度、长径比和密实度等成型参数的影响规律曲线,为今后优化设计聚能战斗部提供参考依据。

### 参考文献

- [1] 李成兵,裴明敬,沈兆武. 高速杆式弹丸三维数值模拟[J]. 高压物理学报, 2007, 21(2): 165-172.

- Li Chengbing, Pei Mingjing, Shen Zhaowu. Three-dimensional numerical simulation of the high velocity rodshaped projectile [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(2):165-172.
- [2] 廖海平, 黄正祥, 张先锋, 等. 亚半球罩聚能装药的杆式射流特性研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2008, 28(6):91-94.
- Liao Haiping, Huang Zhengxiang, Zhang Xianfeng, et al. Rod-like jet properties of semispherical liner shaped charge [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008, 28(6):91-94.
- [3] 吴有龙, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 壳体厚度对聚能杆式侵彻体成型的影响 [J]. 火工品, 2010(2):29-31.
- Wu Youlong, Li Weibing, Wang Xiaoming, et al. The effect of shell thickness on formation of jetting projectile charge [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(2):29-31.
- [4] 顾文彬, 刘建青, 唐勇, 等. 球缺型 EFP 战斗部结构优化设计研究 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2008, 32(2):165-170.
- Gu Wenbin, Liu Jianqing, Tang Yong, et al. Optimizing design of EFP warhead with hemispherical liner [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 32(2):165-170.
- [5] 白金泽, LS-DYNA3D 理论基础与实例分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 吴晗玲, 段卓平, 汪永庆. 杆式射流形成的数值模拟研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(4):328-332.
- Wu Hanling, Duan Zhuoping, Wang Yongqing. Simulation investigation of rod-like jets [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(4):328-332.
- [7] 李成兵, 沈兆武, 裴明敬. 高速杆式弹丸初步研究 [J]. 含能材料, 2007, 15(3):248-252.
- Li Chengbing, Shen Zhaowu, Pei Mingjing. Preliminary study of high velocity rod-shaped projectile [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(3):248-252.
- [8] 刘建青, 顾文彬, 唐勇, 等. 变壁厚球缺罩爆炸成型弹丸成型性能的数值模拟 [J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(2):172-176.
- Liu Jianqing, Gu Wenbin, Tang Yong, et al. Numerical investigation on EFP forming performance with variational-wall-thickness hemispherical liner [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 9(2):172-176.
- [9] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS DYNA 8.1 进行显式动力分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [10] 北京工业学院八系, 爆炸及其作用编写组. 爆炸及其作用, 下册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [11] 黄正祥, 张先锋, 陈惠武. 起爆方式对聚能杆式侵彻体成型的影响 [J]. 兵工学报, 2004, 25(3):289-291.
- Huang Zhengxiang, Zhang Xianfeng, Chen Huiwu. Influence of modes of detonation on the mechanism of jetting projectile charge [J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(3):289-291.

### Characteristic study on jetting projectile charge formation of variable thickness sphere liner based on equi-mass

GU Wenbin, HU Yafeng, LIU Jianqing, XU Haoming, QIN Ruping, WANG Zhenxiong  
PLA University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210007)

[ABSTRACT] Based on the assumption of keeping the mass of variable thickness sphere liner unchanged, calculation model of design parameters  $\delta_s$  and  $r_s$  was established by changing the curvature radius of inner surface  $r_s$  and the liner top thickness  $s$  and adjusting the structure of liner. LS-DYNA explicit non-liner dynamic Finite Element Analysis (FEA) program was used to 3D numerically simulate the full process of jetting projectile charge (JPC) formation of variable thickness sphere liner with different structure. Seven different structures of variable thickness sphere liners, whose top thickness variation  $\delta_s$  was at the range of  $(-1.2 \sim +1.2)$  mm, were designed. Their Jetting projectile charge formation and change laws of performance parameters were studied and compared with even thickness sphere different structure liner. Results show that the variable thickness sphere liner have significant influence on the shape, length, compactness and break-up time of jetting projectile charge. The head velocity of jetting projectile charge is 3317m/s when  $\delta_s = -0.4$  mm. The distribution of velocity gradient is reasonable, and the jetting projectile charge has a better comprehensive performance.

[KEY WORDS] variable thickness sphere liner, jetting projectile charge (JPC), numerical simulation