

不同长径比下圆柱套筒的破片初速轴向分布

毕伟新, 李伟兵¹, 李军宝, 朱炜, 李文彬

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏南京 210094)

摘要: 一端中心起爆装药的圆柱套筒是破片型武器最常用的结构, 其破碎产生的破片初速是评估杀伤威力和防护性能的重要参数。针对精确预测不同长径比 (L/D) 下圆柱套筒的初速分布问题, 首先基于试验验证的数值模型研究了 L/D 对破片初速的影响, 在此基础上, 提出了适用于 $L/D \geq 1$ 圆柱套筒的初速分布计算模型, 该模型中添加了与 L/D 相关的受轴向稀疏波影响的修正项, 最后, 通过试验和数值模拟对所提出的初速计算模型进行了验证。研究结果表明: 不同 L/D 下的破片初速分布均呈现两端初速低, 中间高的变化趋势, 且 L/D 越大, 破片初速越大, 当 L/D 达到 5 时, 最大破片初速与 Gurney 公式计算结果之间的相对误差仅为 1.99%; 公式计算结果与试验结果和数值计算结果的平均误差不超过 6%, 表明了该模型在预测不同 L/D 下的破片初速分布是可靠的。研究工作可为破片毁伤威力评估及反恐工程中防护装置的结构设计提供参考。

关键词: 圆柱套筒; 破片初速; 长径比; 轴向稀疏波; 数值模拟

中图分类号: O381; TJ410

国标学科代码: 1303520

文献标识码: A

Axial Distribution of Fragment Initial Velocities from Cylindrical Casing with Different Length-to-diameter Ratios

BI Weixin, LI Weibing*, LI Junbao, ZHU Wei, LI Wenbin

(ZNDY of Ministerial Key Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

Abstract: Cylindrical casing filled with charge under central point detonation at one end is the frequently-used structure for fragment weapons, whose fragment initial velocity produced by its fracture serves as an important parameter for evaluating the lethal power and the protective structures. To accurately predict the initial velocity distribution of cylindrical casing with different length-to-diameter ratios (L/D), it studied the impact of L/D ratios on the initial velocity of fragments and the applicability of existing empirical models for the initial velocity of fragments founded on the numerical model of experimental verification. On this basis, a correction term related to L/D ratio, which was often influenced by the axial rarefaction waves, was added to the fragment initial velocity index model. By fitting the data obtained from numerical simulations, the function expression of the correction term was derived and the calculation model for the initial velocity distribution of cylindrical casing with L/D ratio ≥ 1 was obtained. Finally, the applicability of the established fragment initial velocity calculation model was validated through experimental data and numerical simulations. The research results indicate that the initial velocity distribution of fragments under different L/D ratios exhibits a trend where the initial velocities are lower at both ends and higher in the middle. Additionally, as the L/D ratio raises, the initial velocity of the fragment also increases. When the L/D ratio reaches 5, the relative error between the maximum initial

¹收稿日期: _____; 修回日期: _____;

基金项目: 内爆载荷下活性材料响应行为; 国家自然科学基金 (12302437);

第一作者: 毕伟新 (1993-), 男, 博士研究生. E-mail: 1400219206@qq.com;

通信作者: 李伟兵 (1982-), 男, 博士, 教授. E-mail: njustlwb@163.com.

velocity of the fragments and the calculated result using the Gurney formula is only 1.99%. However, the existing models for calculating initial velocities of fragment display significant errors when predicting smaller L/D ratios in cylindrical casing. The average error between the formula calculation results and the experimental and numerical simulation results does not exceed 6%, indicating that the proposed model is reliable for predicting the initial velocity distribution of fragments under different L/D ratios. The research work provides valuable insights for assessing the lethal power of fragment weapons and the structural design of protective devices in anti-terrorism projects.

Keywords: cylindrical casing; fragment initial velocity; length-to-diameter ratio; axial rarefaction wave; numerical simulation

1 引言

装满炸药的圆柱套筒是破片型武器最常用的结构。在一端中心起爆后，圆柱套筒会发生膨胀变形并最终破裂成破片，当爆轰产物作用在破片上的压力与破片受到的空气阻力平衡时，破片的速度趋于稳定并达到最大值，此时破片的速度称为破片初速，破片初速是衡量破片杀伤威力及评估防护结构性能的重要指标，因此，大量的研究学者采用理论分析、数值模拟及试验等方式对炸药驱动下的圆柱套筒产生的破片初速进行了相关研究及预测。在预测破片初速诸多公式中，Gurney^[1]基于能量守恒定律提出了最为典型的破片初速计算公式（Gurney 公式），其破片初速与装药质量和套筒质量的比值及炸药类型相关。Gurney 公式可表示为：

$$V_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{1}{1/\beta + 0.5}} \quad (1)$$

式中： $\sqrt{2E}$ 为格尼能， V_0 是破片初速， β 是装药质量与套筒质量比值。虽然 Gurney 公式假定装药瞬间起爆并且炸药的内能全部转换为圆柱套筒与爆轰产物气体的动能、所有的破片沿圆柱套筒轴向分布的初速相同，但一些研究(如[4])表明，在较大长径比 (L/D) 下的圆柱套筒中，Gurney 公式的计算结果与试验得到的最大破片初速吻合良好，相对误差在 10% 之内。然而，真实中圆柱套筒并非无限长，端部的稀疏波会降低两端的破片初速，Gurney 公式只能预测最大破片初速，并不能预测两端的破片初速。因此，许多研究人员研究了两端稀疏波对破片初速的影响，并基于 Gurney 公式提出了计算精度更高的修正公式。

Zulkouski^[2]通过大量实验，在 Gurney 公式前添加了一个指数形式的修正项，以修正起爆端和非起爆端轴向稀疏波对破片初速的影响，修正后的公式可以表示为：

$$V(x) = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{1}{1/\beta + 0.5}} (1 - e^{-2.3617x/D}) (1 - 0.288e^{-4.603(L-x)/D}) \quad (2)$$

式中： x 是圆柱套筒上距离起爆端的轴向距离， D 是装药的直径， L 是装药的长度。修正公式表明了轴向稀疏波对破片初速的影响与装药直径、距起爆点的距离及装药长度有关。Charron 等人^[3]提出了一个破片初速轴向分布的修正公式，假设在圆柱装药的两端分别挖去两个锥体，其中在起爆端锥体的长度等于两倍的装药半径，非起爆端锥体的长度等于一倍装药半径，公式如下所示：

$$V(x) = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{\beta F(x)}{1 + 0.5\beta F(x)}} \quad (3)$$

其中修正系数可以表示为 $F(x) = 1 - \min\{x/2R, 1, (L-x)/R\}$ ， R 是装药半径。

式 (2) 计算出的起爆端的速度为 0，式 (3) 计算出的起爆端和非起爆端的速度为 0，这显然与试验结果不符合，为了解决端部为 0 的问题，黄广炎^[4]利用 X 光试验清楚的拍摄到了不同时刻下破片轴向速度分布情况，并提出新的破片初速修正公式，公式具有很高的计算精度，其公式可表示如下：

$$V(x) = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{1}{1+0.5\beta}} (1-0.361e^{-2.3617x/D})(1-0.192e^{-3.03(L-x)/D}) \quad (4)$$

高月光^[5]基于对有效装药质量的考虑,通过缩减有效装药质量来修正轴向稀疏波对破片初速分布的影响,修正过程中所使用的方法与黄广炎类似,修正后的公式可以表示为:

$$V(x) = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{\beta f(x)}{1+0.5\beta f(x)}} \quad (5)$$

$$f(x) = (1-0.689e^{-0.953x/D})(1-0.385e^{-2.3(L-x)/D})$$

式(4)和式(5)虽然解决了起爆端和非起爆端为0的问题,但都是从 $L/D > 3$ 试样的试验数据推导出来并进行验证的,对小 L/D 的套筒轴向初速分布预测并不准确,公式适用性较窄。因此,刘^[6]等采用正交闪光X射线摄影技术,对不同 L/D 下圆柱套筒的轴向破片初速分布进行了测量和分析,在公式(4)形式上添加了考虑 L/D 影响的修正项,修正后的公式可以表示为:

$$V(x) = \sqrt{2E} \cdot \sqrt{\frac{1}{1+0.5\beta}} (1-0.716e^{-0.454x/D})(1-0.6034e^{-0.7699(L-x)/D})(1+1.813e^{-0.3566x/D-(L-x)/D}) \quad (6)$$

式(6)虽然考虑了 L/D 对破片轴向初速分布的影响,但当试样参数改变时,其破片初速预测误差较大,且 L/D 适用范围较窄。因此,应该提出一个更准确的用于描述不同 L/D 下圆柱套筒破片初速预测公式。因此,本文首先通过试验验证的数值模型研究了 L/D 对破片初速的影响,在此基础上,提出了与 L/D 相关的受轴向稀疏波影响的修正函数,并获得了适用于 $L/D \geq 1$ 圆柱套筒的轴向速度初速分布计算模型,最后,通过试验和数值模拟验证了所提模型的准确性。

2 数值模拟

2.1 数值模拟方法

AUTODYN 是一个用于模拟和分析动态加载和冲击行为的有限元分析软件,常用于模拟各类冲击响应、高速/超高速碰撞、爆炸及其作用问题^[7-8]。AUTODYN 软件拥有 Lagrange、Euler、ALE 和 SPH 等多个数值算法,ALE 算法在计算破片初速方面,其计算结果具有很高的准确性^[9],因此,采用 AUTODYN 软件的 ALE 算法来数值模拟 L/D 对破片初速的影响。AISI1045 钢和 B 炸药广泛用于研究破片初速分布^[4,5,10],相关的数值模拟思路及试验数据可提供参考。网格尺寸直接影响着数值结果的准确性和计算效率,套筒的 Lagrange 网格尺寸设置为 0.3mm^[11]。由于结构和载荷的对称性,为了节省计算时间,建立四分之一的有限元模型。考虑边界对套筒动态响应的影响^[12],在空气域边界设置非反射边界条件,避免压力在边界上的反射。为获得不同轴向位置的破片初速分布,沿轴向不同位置等距设计若干个高斯点。为了研究 L/D 对破片初速分布的影响,设置了 8 个不同 L/D 的数值模拟试样,试样的相关参数见表 1, δ 为圆柱套筒的厚度。计算过程中用到的数值模型见图 1。

表 1 8 个不同 L/D 的数值模拟试样

Table 1 Eight numerical simulation samples with different L/D

NO.	D/mm	L/mm	D/L	δ/mm
1	23.6	23.6	1.0	3.04
2	23.6	29.5	1.25	3.04
3	23.6	35.4	1.5	3.04
4	23.6	47.2	2.0	3.04
5	23.6	59.0	2.5	3.04
6	23.6	70.8	3.0	3.04
7	23.6	94.4	4.0	3.04

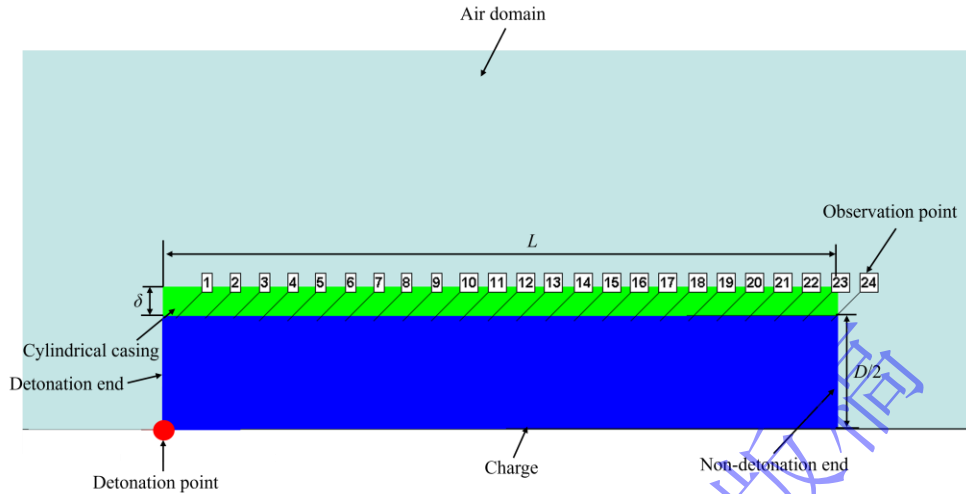


图1 数值计算模型

Fig.1 Numerical calculation model

2.2 材料模型

Johnson-Cook 模型^[13]常用于描述金属材料在高应变、高应力以及高温情况下的弹塑性变形过程，因此，采用 Johnson-Cook 模型来描述 AISI1045 钢的动态变形过程。Johnson-Cook 本构模型表达式为：

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \varepsilon^*) (1 - T^{*m}) \quad (7)$$

式中： σ 表示材料屈服应力， ε_p^n 为等效塑性应变， ε^* 为规范化等效塑性应变， $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 表示约化温度（无量纲）， T_m 和 T_r 分别为材料的融化温度和室温， A 、 B 、 C 、 n 和 m 均为材料相关常数。

Johnson-Cook 失效模型常用于描述金属的失效断裂过程，其失效应变可以表示为：

$$\varepsilon^f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*}) (1 + D_4 \ln \varepsilon^*) (1 - D_5 T^{*m}) \quad (8)$$

其中， ε^f 为失效时刻应变值， σ^* 表示压力与有效应力的比值， $D_1 - D_5$ 则为失效参数，由试验测得。AISI 1045 材料参数见表 2。

采用 JWL 状态方程描述 Comp B 炸药的动态力学性能。JWL 模型能够较好的描述炸药爆轰产物膨胀驱动过程中的压力、体积和能量特性，是目前炸药爆轰过程应用比较广泛和合理的状态方程，其具体表达式形式为^[14]：

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (9)$$

其中， P 为爆轰压力， A 、 B 、 R_1 、 R_2 及 ω 为常数，可通过炸药圆筒试验得到， V 为爆轰产物的相对比容， E 为单位体积内能。Comp B 的材料参数见表 3。

表 2 AISI 1045 的 J-C 本构模型参数^[15-16]

Table 2 J-C constitutive model parameters of AISI 1045^[15-16]

$\rho(\text{g/cm}^3)$	A_0/MPa	B_0/MPa	n	C	m	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
7.83	507	320	0.28	0.064	1.06	0.15	0.72	1.66	0.005	-0.84

表 3 Comp B 的材料参数^[4]

Table 3 The material parameters of Comp B^[4]

装药类型	爆速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{C-J}/GPa	$E_0(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
Comp B	7980	29	8.5×10^6	542	7.68	4.2	1.1	0.24

空气使用 AUTODYN 软件自带的 Ideal Gas 状态方程进行描述：

$$P = (\gamma - 1)\rho e \quad (10)$$

式中， P 为压力， e 为内能， $\rho = 0.001225\text{g/cm}^3$ 为密度， $\gamma = 1.4$ 是与空气相关的绝热指数^[17]。

2.3 准确性验证

数值计算模型的准确性验证是研究开展的前提，本文主要研究不同 L/D 下破片初速的分布，而破片初速的分布主要受轴向稀疏波的影响，因此，只要验证轴向稀疏波对圆柱套筒动态响应的影响，就能验证模型的准确性。黄广炎^[4]利用 X 光试验机清晰地拍摄到破片沿轴向位置的分布情况，试验结果具有很强的准确性，因此，根据黄广炎的试验样本参数建立数值计算模型，验证数值模型的准确性，黄广炎的试验样本参数如下表 4 所示。

表 4 黄广炎的试验样本参数^[4]
Table 4 Parameters of HUANG G Y's test sample^[4]

NO.	套筒材料	装药材料	D/mm	L/mm	δ/mm
1	ASI1045	Comp B	23.6	77.3	3.04
2	ASI1045	Comp B	23.56	77.15	6.69

从图 2 (a) 中可以看出，破片初速随着 Euler 网格尺寸的减小而增加，而网格尺寸为 0.4mm 和 0.5mm 的破片初速差异不大。此外，数值模拟的初速分布 (Euler 网格尺寸为 0.5mm) 与两组试验得到的初速分布具有较好的一致性。在图 2 (b) 中可以看出，由于起爆端和非起爆端轴向稀疏波的影响，起爆端附近的套筒发生较少的轴向断裂，非起爆端附近的套筒发生较多的轴向断裂，而套筒中部未发生轴向断裂，数值模拟 (Euler 网格尺寸为 0.5mm) 的套筒断裂结果与第一组试验结果^[4]吻合性较好。因此，尺寸为 0.5mm 的 Euler 网格足以提供准确的结果。结果表明，该数值模型能够模拟轴向稀疏波对破片初速的影响。

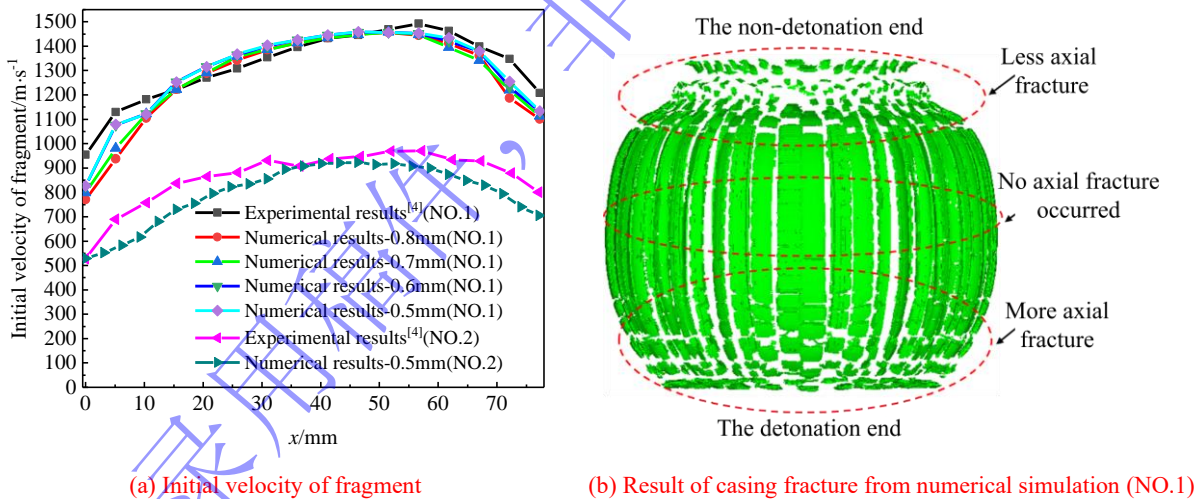


图 2 试验结果与数值模拟结果对比

Fig.2 Comparison of experimental results and numerical results

3 数值计算结果及分析

3.1 长径比对破片初速的影响

为研究 L/D 对圆柱套筒初速的影响，统计了不同 L/D 下不同轴向位置对应的破片初速，破片初速分布如图 3 所示。图 3 (a) 中各个 L/D 下的装药质量与套筒质量比值相同，按照 Gurney 公式进行计算，计算结果应该是相同的，但显然数值模拟结果和 Gurney 公式计算结果不一致，且不同 L/D 下的

同一位置数值模拟结果也不一致, 因此, 不能忽略 L/D 对破片初速沿轴向分布的影响。

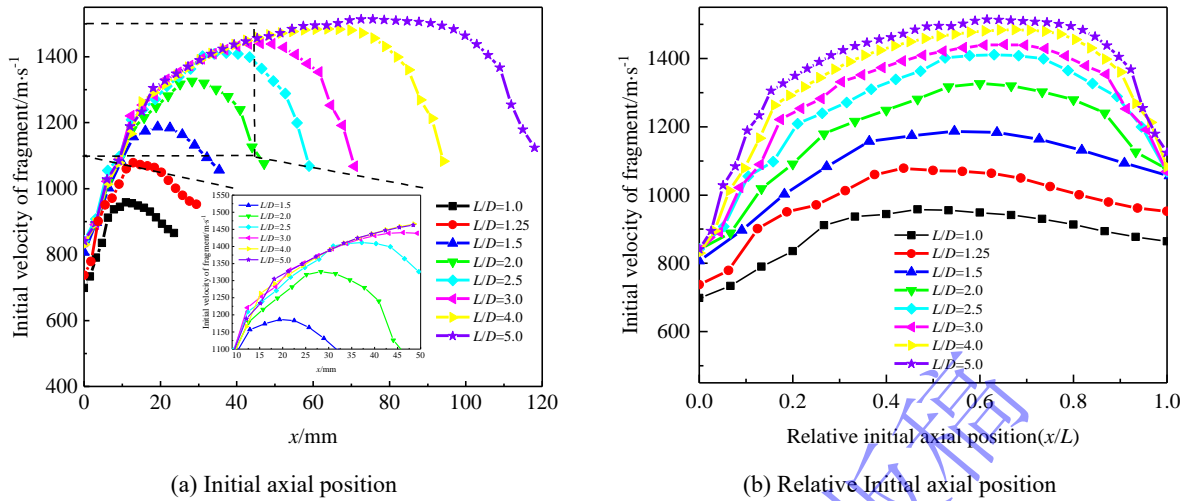


图 3 不同 L/D 下破片初速分布

Fig.3 Fragment initial velocity distribution with different L/D

从图 3 中可以明显看出, 不同 L/D 的套筒初速都受到轴向稀疏波的影响, 破片初速分别均呈现出相似的中间高, 两端低的变化趋势。炸药起爆后, 起爆端轴向稀疏波会立即传播到起爆端, 从而削弱了冲击波与爆轰产物对起爆端套筒的加速作用, 而非起爆端的轴向稀疏波只有在爆轰波传播到非起爆端时才会发生爆轰波传播到非起爆端时冲击波已经加速其他位置套筒一段时间且起爆端轴向稀疏波在爆轰产物中随传播过程迅速减弱, 因此, 非起爆端的套筒初速受轴向稀疏波的影响较小, 导致不同 L/D 下起爆端的破片初速均低于非起爆端。

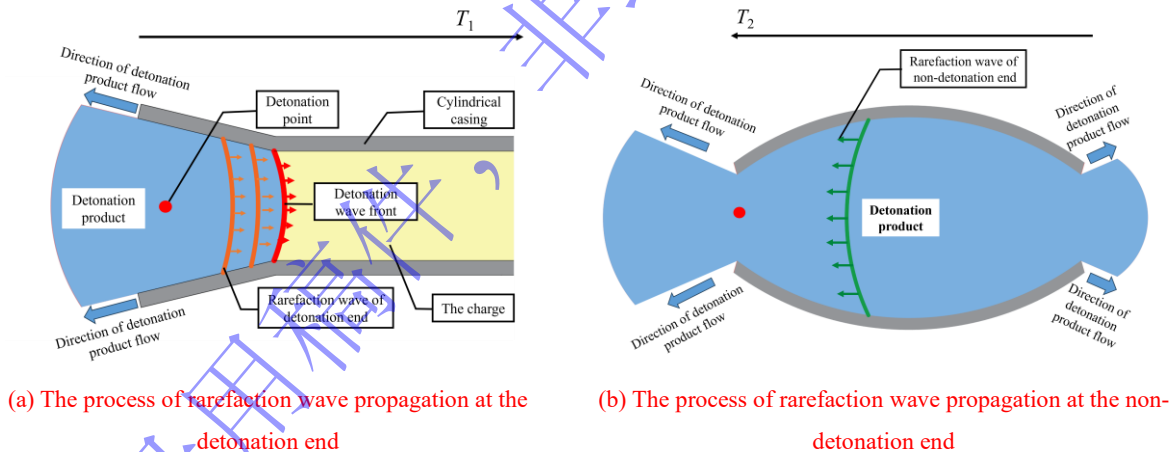


图 4 稀疏波传播过程

Fig.4 Process of rarefaction wave propagation

L/D 越小, 破片初速越低, 如图 3 (b) 所示。为探究 L/D 对破片初速的影响机理, 分析了 L/D 对装药中稀疏波传播过程及套筒加速过程。图 4 为轴向稀疏波的传播过程, T_1 为起爆端轴向稀疏波传播到非起爆端的时间, T_2 为非起爆端轴向稀疏波传播到起爆端的时间, 基于爆轰产物膨胀理论^[18]可知, 起爆端轴向稀疏波和非起爆端轴向稀疏波的传播速度分别为装药爆速的 1 倍和 0.5 倍, 因此, $T_2=2T_1$, 与数值模拟结果一致, 再次证明了数值模拟方法的准确性。

圆柱套筒从速度零加速到破片初速的时间为 T_3 , 当 L/D 较小时, T_1+T_2 较小, 则 $T_3 < T_1+T_2$, 说明非端轴向稀疏波传播到起爆端时, 破片加速未完成, 当 L/D 逐渐增大时, T_1+T_2 逐渐增大, 破片受到的驱动力逐渐增大, 破片初速明显提高。当 L/D 较大时, T_1+T_2 较大, 则 $T_3 > T_1+T_2$, 说明部分破片只受到起爆端轴向稀疏波的影响, 当 L/D 逐渐增大时, T_1+T_2 逐渐增大, 只受到起爆端轴向稀疏波影响的

破片数量增多,破片初速出现增加的趋势。由于起爆端轴向稀疏波在传播过程中是逐渐减弱的^[4],因此,当 L/D 足够大时,起爆端轴向稀疏波和非起爆端轴向稀疏波中间存在基本不受稀疏波影响的区域,稀疏波未影响区域内的破片初速非常接近 Gurney 公式计算结果。

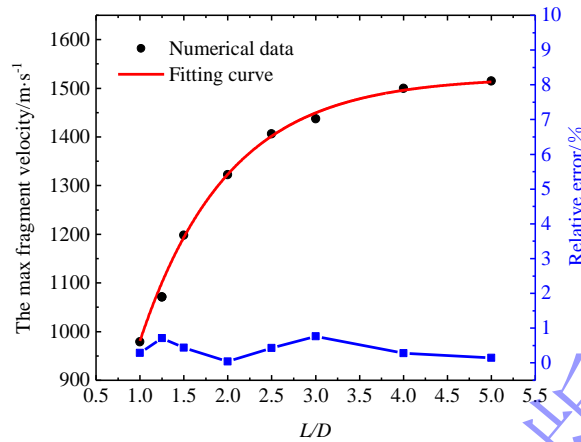


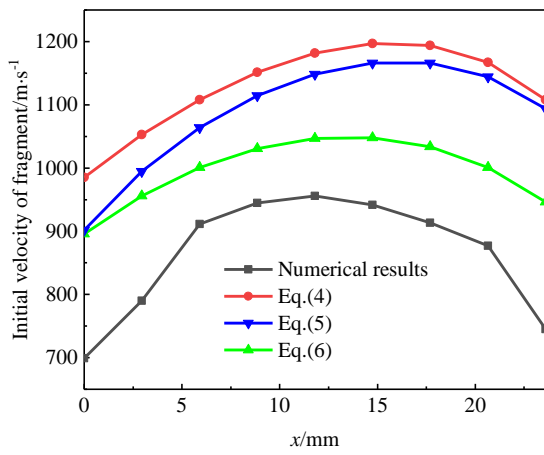
图5 不同 L/D 下破片的最大初速

Fig.5 Maximum initial velocity of fragments for different L/D

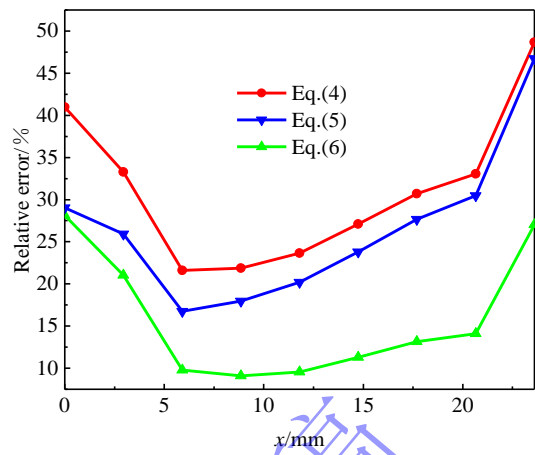
图5为不同 L/D 下破片的最大初速分布,在图5中能明显看到,最大破片初速随着 L/D 的增加呈现指数型增长, L/D 越大,最大破片初速增量越少,最大破片初速越接近 Gurney 公式计算结果,当 L/D 达到5时,两者的相对误差仅为1.99%。

3.2 已有的破片初速计算公式适用性验证

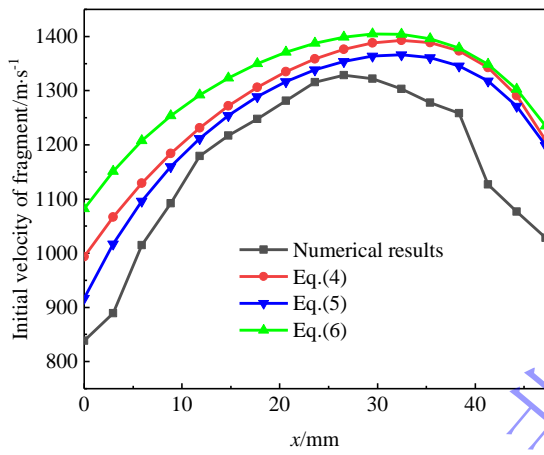
正如上文所述, L/D 通过影响轴向稀疏波传播来影响破片加速历程进而影响破片初速分布,因此,有必要验证已有破片初速计算公式在不同 L/D 下的适用性。式(2)和(3)在端部的速度计算结果为0,与实际不符合,本节不再继续验证其适用性。本节主要通过数值结果来验证式(4)、(5)、(6)的适用性,不同 L/D 下破片初速分布及与数值结果的相对误差分布如图6所示。在图6中能看到,式(4)、(5)能够准确预测 $L/D=3、4、5$ 试样的破片初速分布且 L/D 越大,预测值越接近数值计算值,但不能准确预测 $L/D=1、2$ 试样的轴向初速分布, L/D 越小,预测值越偏离数值计算值,这是因为式(4)、(5)在推导过程中未考虑 L/D 对破片初速的影响,当 $L/D=1$ 时,式(4)和(5)的最大相对误差分别为48.7%、46.7%,平均相对误差分别为31.2%、26.5%。式(6)虽然添加了考虑 L/D 影响的修正项,在预测 $L/D=1$ 的试样时具有较高的准确性,但最大相对误差高达28.1%。文献给出了式(6)适用的 L/D 范围(0.5~3),但当 $L/D=2$ 和3时,式(6)预测值的精度远远不如式(4)和(5),最大相对误差分别为29.4%、39.3%。因此,需要提出一个更准确的用于描述不同 L/D 下圆柱套筒破片初速预测公式。



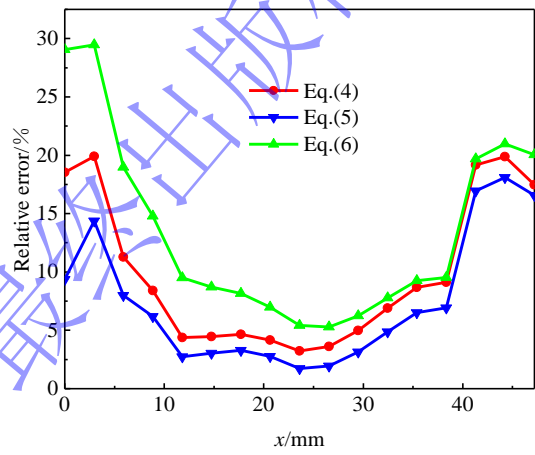
(a) Initial velocity distribution ($L/D=1$)



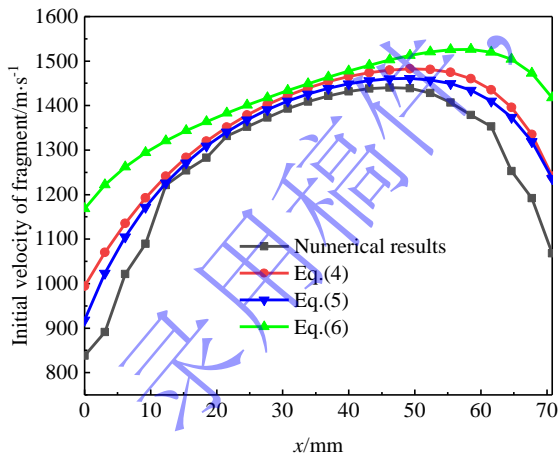
(b) Relative error distribution ($L/D=1$)



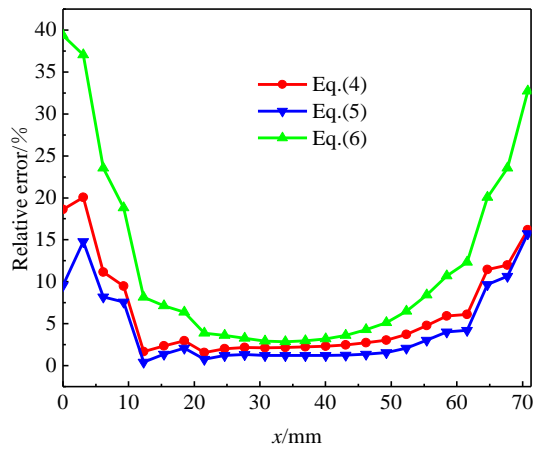
(c) Initial velocity distribution ($L/D=2$)



(d) Relative error distribution ($L/D=2$)



(e) Initial velocity distribution ($L/D=3$)



(f) Relative error distribution ($L/D=3$)

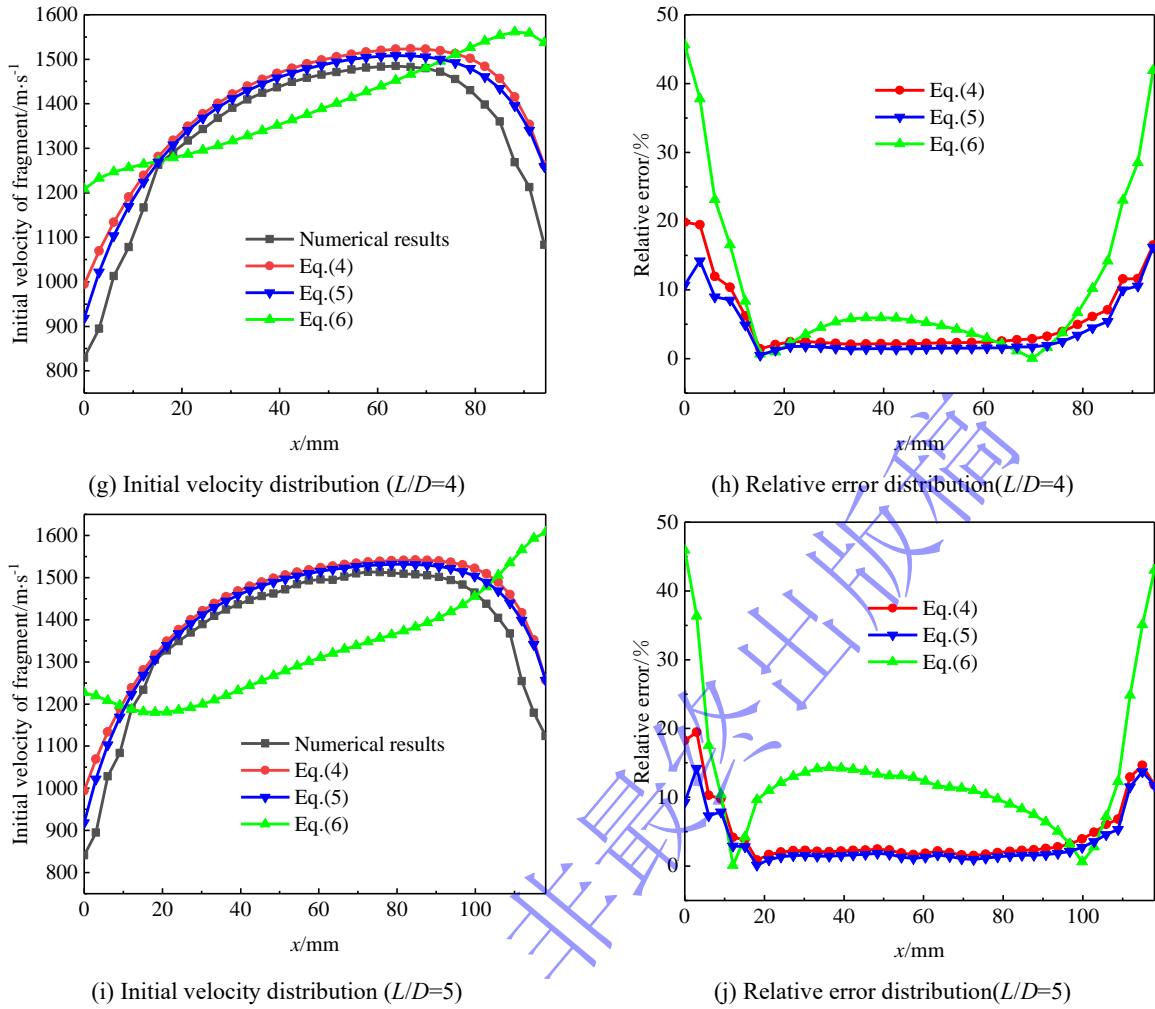


图 6 不同 L/D 下破片速度分布和相对误差分布对比情况

Fig.6 Comparison of fragment velocity distribution and relative error distribution with different L/D

4 轴向初速分布模型

为修正轴向稀疏波对破片初速分布的影响，文献[4]在 Gurney 公式的基础上，添加了指数形式的修正函数，修正后的破片初速表达式为：

$$V(x) = V_0 (1 - A_1 e^{-B_1 \cdot x/D}) \cdot (1 - C_1 e^{-D_1 \cdot (L-x)/D}) \quad (11)$$

式中： V_0 为 Gurney 公式计算的破片初速，为起爆端修正项， $F_2 \cdot ((L-x)/D) = (1 - C_1 e^{-D_1 \cdot (L-x)/D})$ 为非起爆端修正项， A_1 、 B_1 为起爆端的修正系数， C_1 、 D_1 为非起爆端的修正系数。文献[4]根据 $L/D=3.27$ 圆柱套筒的试验数据，在不考虑端部稀疏波相互作用条件下，采用最小二乘法拟合得到系数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 的固定值。通过上文分析可知， L/D 会导致破片速度分布存在差异，造成公式 (4) 出现较大的误差。在图 3 中能看到， L/D 虽然影响破片的初速分布，但初速分布的形式基本不发生变化，因此，继续采用指数函数的修正项修正不同 L/D 下破片初速分布，此时， A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 是随 L/D 变化的变化量，式 (11) 变为：

$$V(x) = V_0 (1 - A_1(L/D) e^{-B_1(L/D) \cdot x/D}) \cdot (1 - C_1(L/D) e^{-D_1(L/D) \cdot (L-x)/D}) \quad (12)$$

式中：考虑 L/D 影响的起爆端修正项 $F_1(x/D) = (1 - A_1(x/D) e^{-B_1(x/D) \cdot x/D})$ ，考虑 L/D 影响的非起爆端修正项 $F_2 \cdot ((L-x)/D) = (1 - C_1(x/D) e^{-D_1(x/D) \cdot (L-x)/D})$ ， A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 为随 L/D 变化的修正系数，其值可以通过最小二

乘法拟合数值结果得到,不同 L/D 条件下的这些系数是不同的,可以先求解其在不同 L/D 条件下的值,再分析其与 L/D 的关系。

为得到 Gurney 公式计算的破片初速,需计算炸药的格尼能 $\sqrt{2E}$ 。为准确计算炸药的格尼能, Hossein 和 Keshavarz^[19]在拟合实验数据的基础上建立了只与炸药化学式 $C_aH_bN_cO_d$ 中原子有关的计算公式 (13),该公式无需对爆轰产物成分及爆炸热量进行假设,更能反映炸药的本质,计算结果具有很高的准确性。因此,采用式 (12) 计算 B 炸药的格尼能。

$$\sqrt{2E} = 0.404 + 1.020\rho_0 - 0.021c + 0.184(b/d) + 0.303(d/a) \quad (13)$$

式中: ρ_0 为炸药的密度, a 、 b 、 c 、 d 分别为碳原子、氢原子、氮原子、氧原子的化学计量数。

当 L/D 较小时,两端轴向稀疏波相互影响,因此,不能通过单独分析起爆端和非起爆端得到系数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 的值^[20],只能通过整体拟合获得各个系数的值。由此得到不同 L/D 下如表 5 所示的系数,系数与 L/D 的关系如图 7 所示,显然,在不同的 L/D 条件下,系数发生了变化。

表 5 7 个数值模型得到的 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 系数

Table 5 Coefficients A_1 , B_1 , C_1 and D_1 obtained from seven numerical models

L/D	A_1	B_1	C_1	D_1
1.0	0.465	2.282	0.425	0.823
1.25	0.465	1.983	0.326	1.121
1.5	0.465	1.607	0.299	1.399
2.0	0.466	1.314	0.291	1.830
2.5	0.465	1.293	0.296	1.970
3.0	0.465	1.267	0.303	2.03
4.0	0.466	1.175	0.301	2.072
5.0	0.466	1.137	0.297	2.086

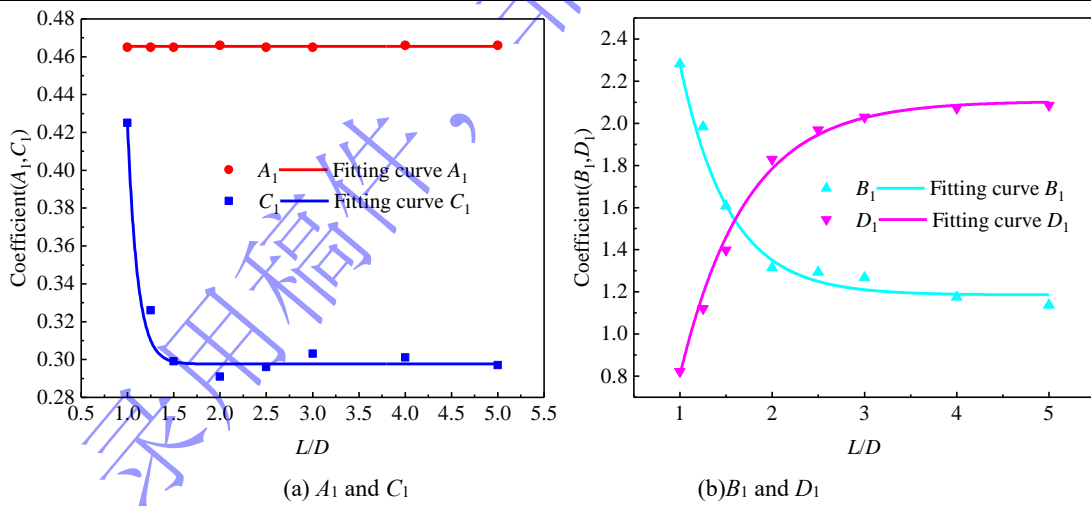


图 7 系数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 与 L/D 的关系

Fig.7 Relationship between coefficients A_1 , B_1 , C_1 , D_1 and L/D

在图 7 中能看到,系数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 与 L/D 之间存在明显的函数关系,系数 A_1 基本不随 L/D 改变,系数 D_1 随着 L/D 的增大而增大,系数 B_1 和 C_1 随着 L/D 的增大而减小。当 L/D 较大时,系数都会趋于平缓,这是因为 L/D 较大时,两端轴向稀疏波相互不影响且破片初速基本不发生变化, L/D 的变化并不引起系数的显著变化,进一步说明修正公式的合理性。系数 A_1 用线性函数表示,系数 B_1 、 C_1 、 D_1 均用指数函数表示,其关系如下:

$$A_i(L/D) = m_i x + n_i \quad (14)$$

$$B_1(L/D) = m_2 e^{-\frac{L}{D}/n_2} + q_2 \quad (15)$$

$$C_1(L/D) = m_3 e^{-\frac{L}{D}/n_3} + q_3 \quad (16)$$

$$D_1(L/D) = m_4 e^{-\frac{L}{D}/n_4} + q_4 \quad (17)$$

式中： m_1 、 n_1 为与系数 A_1 有关的常数， m_2 、 n_2 、 q_2 为与系数 B_1 有关的常数， m_3 、 n_3 、 q_3 为与系数 C_1 有关的常数， m_4 、 n_4 、 q_4 为与系数 D_1 有关的常数，可以通过图 7 中 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 和 L/D 的关系拟合得到。拟合得到的 $m_1=0$ 、 $n_1=0.465$ ($R^2=0.99$)， $m_2=7.241$ 、 $n_2=0.529$ 、 $q_2=1.185$ ($R^2=0.99$)， $m_3=1333.308$ 、 $n_3=0.108$ 、 $q_3=0.298$ ($R^2=0.99$)， $m_4=-5.263$ 、 $n_4=0.715$ 、 $q_4=2.105$ ($R^2=0.99$)。将式(14)~式(17)代入式(12)，即可获得计算不同 L/D 下圆柱套筒的破片轴向初速分布公式：

$$f(x) = V_0 \left(1 - 0.465 e^{-\left(7.241 e^{-\frac{L}{D}/0.529} + 1.185\right) \cdot x/D} \right) \cdot \left(1 - \left(1333.308 e^{-\frac{L}{D}/0.108} + 0.298 \right) e^{-\left(-5.263 e^{-\frac{L}{D}/0.715} + 2.105 \right) (L-x)/D} \right) \quad (18)$$

公式 (18) 虽然是 L/D 在 1~5 范围内推导出来的，但 L/D 越大，轴向稀疏波对公式 (18) 中的系数影响越小，当 L/D 大于 4 时，公式 (18) 中的系数变化量很小，基本可以忽略 L/D 对其的影响，这就意味着公式 (18) 可以适用于更大 L/D 下圆柱套筒的初速分布预测，因此，公式 (18) 适用于 $L/D \geq 1$ 的圆柱套筒。

5 新公式普适性验证

为验证提出的破片初速分布计算模型的准确性，采用文献[4]和文献[21]的试验结果进行验证。文献[4]的两组试样参数见表 4，文献[21]中 $\beta=0.429$ ， $L/D=2$ ， $\sqrt{2E}=2840\text{m/s}$ 。图 8 为试验结果和式 (18) 的计算结果对比情况。在图 8 中能明显看出公式计算结果和试验结果吻合性较好，平均相对误差不超过 6%，表明所提公式具有足够的精度。

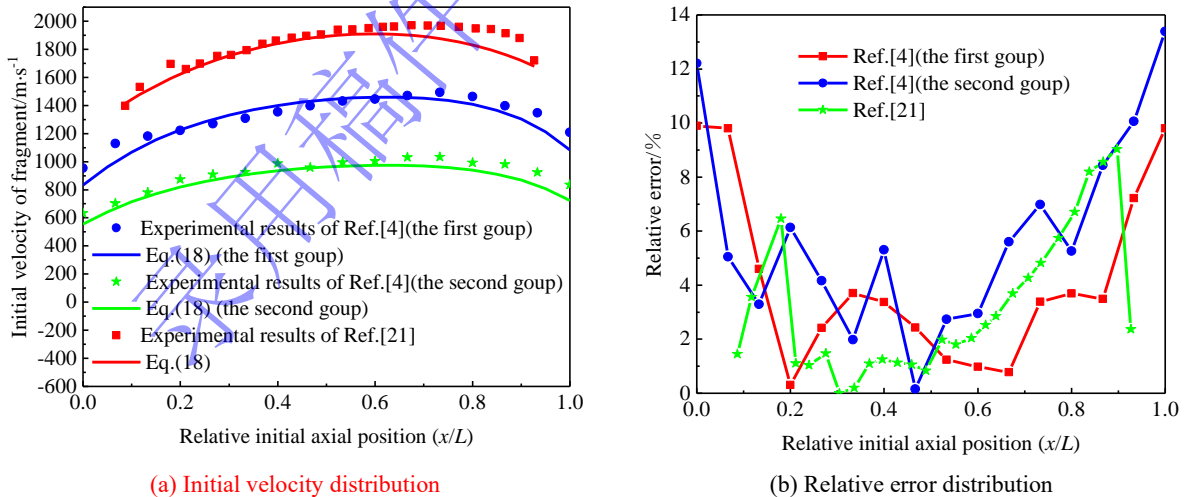


图 8 试验结果和公式 (18) 计算结果对比

Fig.8 Comparison of Experimental results and calculation results of Eq. (18)

为进一步验证式 (18) 的可靠性，对另外 9 个带有不同 L/D 、装药类型和 β 的圆柱套筒进行了数值计算，用于数值计算和公式计算的相关参数见表 6，HMX 炸药的数值计算参数见表 7。第一组、第二组、第三组试样参数下破片初速分布的计算结果和数值结果对比情况分别如图 9、图 10、图 11 所

示。在三组中，式(18)计算结果与数值计算结果吻合性较好，最大相对误差不超过10%，平均相对误差不超过4%。上述研究结果表明，本文提出的公式(18)能够准确预测圆柱套筒在不同 L/D 下的破片初速分布情况。

表6 9个用于验证公式的试样参数

Table 6 Nine sample parameters used to validate the formula

NO.	套筒材料	装药类型	D/mm	L/mm	D/L	δ/mm
V1-1	ASI1045	Comp B	20	20	1.0	3.0
V1-2	ASI1045	Comp B	20	40	1.2	3.0
V1-3	ASI1045	Comp B	20	60	3.0	3.0
V2-1	ASI1045	Comp B	30	30	1.0	4.0
V2-2	ASI1045	Comp B	30	60	1.2	4.0
V2-3	ASI1045	Comp B	30	90	3.0	4.0
V3-1	ASI1045	HMX	20	20	1.0	3.0
V3-2	ASI1045	HMX	20	40	1.2	3.0
V3-3	ASI1045	HMX	20	60	3.0	3.0

表7 HMX的材料参数^[22]

Table 7 The material parameters of HMX^[22]

炸药类型	爆速/($m \cdot s^{-1}$)	P_{C-J}/GPa	$E_0(kJ \cdot m^{-3})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
HMX	9110	42.0	10.5×10^6	778.28	7.07	4.2	1.0	0.30

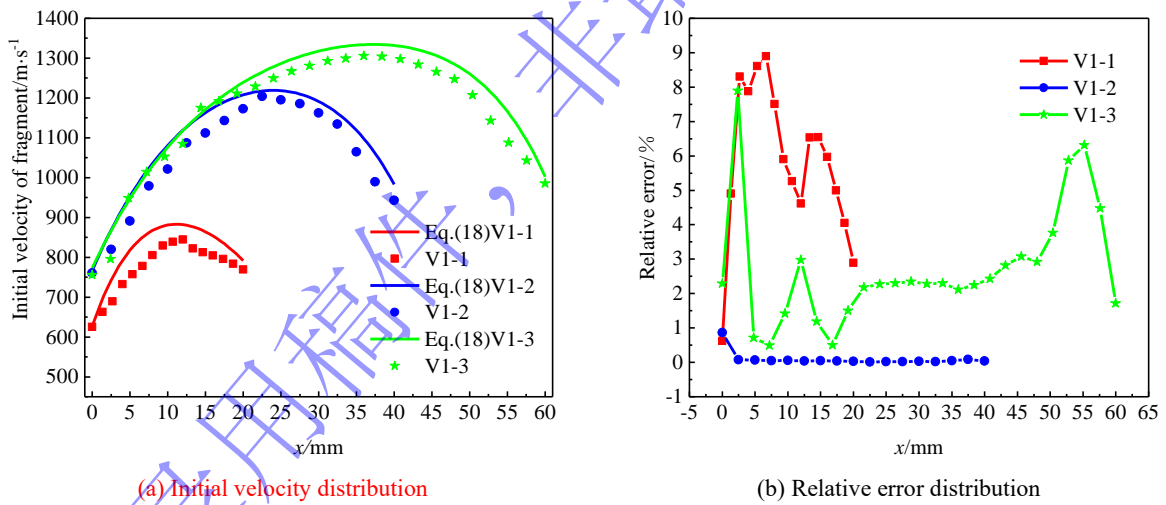


图9 仿真结果与公式(18)计算结果对比(第一组)

Fig.9 Comparison of numerical results and calculation results of Eq. (18) (first group)

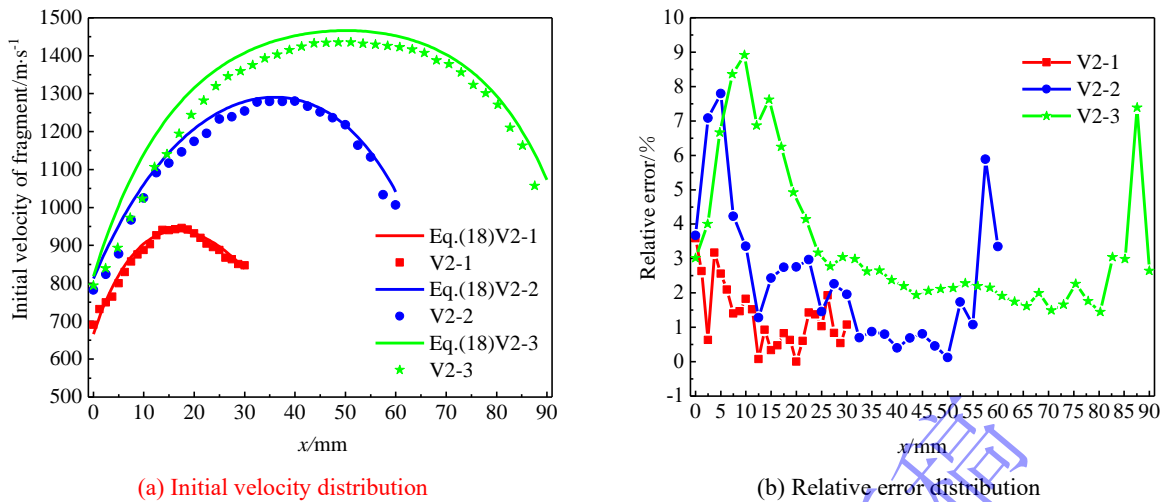


图 10 仿真结果与公式 (18) 计算结果对比 (第二组)

Fig.10 Comparison of numerical results and calculation results of Eq. (18) (second group)

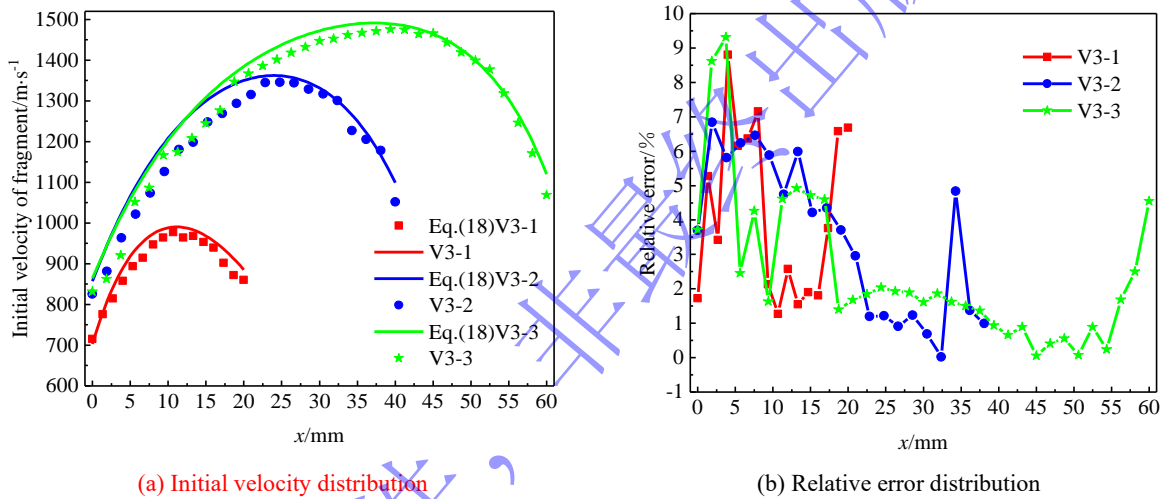


图 11 仿真结果与公式 (18) 计算结果对比 (第三组)

Fig.11 Comparison of numerical results and calculation results of Eq. (18) (third group)

6 结论

本文通过试验验证的数值模拟研究了不同 L/D 下圆柱套筒的破片初速分布, 不同 L/D 下的破片轴向速度分布均呈现出相似的中间高, 两端低的变化趋势, 且起爆端的破片初速均低于非起爆端。 L/D 直接影响着轴向稀疏波传播及破片加速历程, L/D 越小, 破片初速衰减量越大, 导致破片初速分布不能用已有公式进行准确计算。因此, 本文在之前的公式基础上, 提出了与 L/D 相关的受轴向稀疏波影响的修正函数, 通过拟合数值计算结果得到修正函数中的系数。此外, 通过试验和数值模拟对所提出的公式进行了进一步验证, 验证结果表明, 平均误差不超过 6%, 所提公式计算结果和试验结果和数值计算结果吻合较好, 因此, 本文提出的公式能够准确计算不同 L/D 下的破片初速分布。

参考文献

- [1] GURNEY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shell, grenades[M]. Aberdeen Proving Ground, MD: Ballistic Research Laboratories, 1943.

- [2] ZULKOSKI T. Development of optimum theoretical warhead design criteria[J]. Naval Weapons Center China Lake: Kern County, CA, USA, 1976.
- [3] CHARRON Y J, CAPT C A F. Estimation of velocity distribution of fragmenting warheads using a modified Gurney method[D]. Air Force Institute of Technology, 1979.
- [4] HUANG G Y, LI W, FENG S S. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 76: 20-27. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.08.007.
- [5] GAO Y G, ZHANG B, YAN X M, et al. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing with air parts at two ends [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 140: 103535. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103535.
- [6] LIU H, HUANG G Y, GUO Z, et al. Fragments velocity distribution and estimating method of thin-walled cylindrical improvised explosive devices with different length-to-diameter ratios[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 175: 109212. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109212.
- [7] BI W X, LI W B, LUO Y S, et al. Pre-control of shell expansion fracture process by high energy beam[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2478(7): 072002. DOI: 10.1088/1742-6596/2478/7/072002.
- [8] XU H Y, LI W B, LI W B, et al. Fracture mechanism of a cylindrical shell cut by circumferential detonation collision[J]. Defence Technology, 2020. DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.006.
- [9] 李元,李燕华,刘琛,等. 预制破片战斗部爆轰产物泄露数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37 (08): 778-782. DOI: 10.15918/j. tbit1001-0645.2017.08.002.
LI Y, LI Y H, LIU C, et al. Modeling of the gas leakage of premade fragment warhead[J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 2017, 37(8): 778-782. DOI: 10.15918/j. tbit1001-0645.2017.08.002.
- [10] LI W, HUANG G Y, FENG S S. Effect of eccentric edge initiation on the fragment velocity distribution of a cylindrical casing filled with charge[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 80: 107-115. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.01.007.
- [11] XU W L, WANG C, CHEN D P. Formation of a bore-center annular shaped charge and its penetration into steel targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 127(MAY):122-134. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.01.008.
- [12] BHATTACHARYA A, NIX W. Finite element simulation of indentation experiments[J]. International Journal of Solids and Structures, 1988, 24(9):881-891. DOI: 10.1016/0020-7683(88)90039-X.
- [13] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9.
- [14] SOUERS P C, HASELMAN L C. Detonation equation of state at LLNL,1993[R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1994. DOI: 10.2172/10166640.
- [15] 陈刚,陈忠富,陶俊林,等. 45 钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(5):6. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2005.05.010.
CHEN G, CHEN Z F, TAO J L, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005. DOI: 10.3321/j. issn:1001-1455.2005.05.010.
- [16] 陈刚,陈忠富,徐伟芳,等. 45 钢的 J-C 损伤失效参量研究[J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2):5. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2007.02.007.
CHEN G, CHEN Z F, XU W F, et al. Investigation on the J-C ductile fracture parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27(2):5. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1455.2007.02.007.
- [17] Li W B, Wang X M, Li W B. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37: 414-424. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.08.008.
- [18] 张守中. 爆炸与冲击动力学[M]. 爆炸与冲击动力学, 1993.
ZHANG S Z. Explosion and Impact Dynamics[M]. Explosion and Impact Dynamics, 1993.

- [19] DANIEL J F, KAZANDJIAN L. A few remarks about the Gurney energy of condensed explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics: An International Journal Dealing with Scientific and Technological Aspects of Energetic Materials, 2004, 29(5): 314-316. DOI: 10.1002/prop.200400060.
- [20] 高月光,冯顺山,刘云辉,等.不同端盖厚度的圆柱形装药壳体破片初速分布[J].兵工学报, 2022(043-007). DOI: 10.12382/bgxb.2021.0443.
GAO Y G, FENG S S, LIU Y H, et al. Initial velocity distribution of fragments from cylindrical charge shells with different thick end caps[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(7): 1527-1536. DOI: 10.12382/bgxb.2021.0443.
- [21] ANDERSON JR C E, PREDEBON W W, KARPP R R. Computational modeling of explosive-filled cylinders[J]. International Journal of Engineering Science, 1985, 23(12): 1317-1330. DOI: 10.1016/0020-7225(85)90110-7.
- [22] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL Explosives Handbook[R]. UCRL-52997 Rev.2, DOI: January 1985. 10.2172/6530310.