

应用灰色系统理论研究爆炸成型弹丸速度的影响因素*

林加剑^{1,2},任辉启²,沈兆武¹

(1 中国科学技术大学近代力学系,合肥 230026;2 总参工程兵科研三所,河南洛阳 471023)

摘要:利用理论公式和数值模拟方法计算出 12 种不同方案下药型罩为大锥角型的 EFP 速度,应用灰色系统理论对所考虑的因素进行分析,建立了各个因素与 EFP 速度之间的灰关联度矩阵。通过对灰关联度矩阵的分析,得到了影响 EFP 速度的主要因素依次为装药密度、炸药爆轰速度、药型罩锥角、药型罩直径、装药高度和药型罩壁厚,对 EFP 的药型罩设计和装药结构设计具有重要参考价值。

关键词:灰色系统理论;爆炸成型弹丸;速度;药型罩;数值模拟

中图分类号:TJ410.33 **文献标志码:**A

Study on Primary Influence Factors for Application of Grey System Theong to Velocity of Explosive Forming Prjectile

LIN Jiajian^{1,2}, REN Huiqi², SHEN Zhaowu¹

(1 Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2 The Third Research Institute of the Corps of Engineers, Henan Luoyang 471023, China)

Abstract: The theoretical analysis and numerical simulation of the of EFP velocity were conducted which is formed by the big-cone shaped line in this paper, and twelve schemes of the EFP velocity are be considered by the theory formula and numerical simulation. The influence factors of EFP velocity are be analysis by the grey system theory, and the grey correlation matrix has been established between all the kinds of influence factors with the EFP velocity. The primary influence factors on the velocity of EFP is follow by the density of explosive, the angle of line, the velocity of detonate, the diameter of line, the height of explosive and the thickness of explosive though analysis the grey correlation matrix, and offered a referenced evidence on the design of lines and explosive structure.

Keywords: grey system theory; explosive forming projectile; velocity; lines; numerical simulation

0 引言

EFP 速度是评价 EFP 毁伤威力的一个重要指标,因此,分析影响 EFP 速度的主要因素在 EFP 设计中具有重要的意义。EFP 是由于装药起爆后形成的高温高压爆轰产物作用于药型罩上、使之发生变形进而被压垮或翻转^[1],最终“锻成”的一种具有一定飞行稳定形体的弹丸。从其成形过程看,EFP 的速度主要取决于装药结构和药型罩结构,装药结构主要包括装药密度、炸药的爆速及装药的结构形状,药型罩结构主要包括药型罩的几何特征尺寸及药型罩材料。由此可以看出影响 EFP 速度的因素很多,在其设计过

程中有必要了解影响 EFP 速度的主要因素。

灰色理论是由邓聚龙于 20 世纪 80 年代初创立并发展的,它将一般系统论、信息论、控制论的观点和方法延伸到社会、经济、生态等抽象系统,结合运用数学方法,发展了一套解决信息不完备系统及灰色系统的理论和方法^[2]。灰色理论基于灰朦胧集、允许任意分布和小样本不确定问题,对灰色信息进行白化,最后从变化规律中提取出所需要的信息。将灰色理论应用于 EFP 速度影响因素分析,可以解决 EFP 设计过程中少样本量问题,是一种十分有效的分析方法。2003 年,张先锋等将灰色理论应用于 EFP 战斗部性能参数分析中^[3],主要分析了药型罩几何结

* 收稿日期:2008-07-27

作者简介:林加剑(1979-),男,江西广丰人,博士研究生,研究方向:爆炸力学。

构对 EFP 性能的影响,得出装药高度是影响 EFP 性能的主要因素,但没有考虑炸药性能的影响。2006 年,赵慧英等利用灰色理论分析了聚能装药参数对聚能侵彻体成型性的影响^[4],同样在影响因素中也没有考虑炸药性能的影响。文中利用灰关联法分析了装药密度、药型罩锥角、炸药爆轰速度、药型罩直径、装药高度和药型罩壁厚对 EFP 速度的影响,在影响因素中充分考虑了装药的性能。

1 EFP 速度的理论计算和数值模拟

对 12 种不同组合方案形成的 EFP 速度进行了理论计算及数值模拟,其药型罩及装药结构如图 1 所示。12 种不同方案的药型罩几何尺寸及装药性能见表 1,其中 d 、 δ 和 α 分别为大锥角药型罩直径、壁厚和锥角, H 、 ρ_e 和 D 分别为装药高度、装药密度和装药爆轰速度。

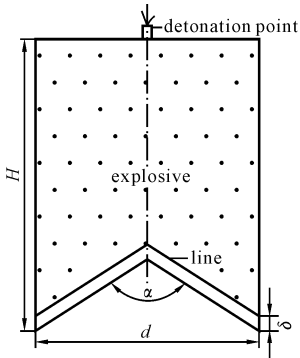


图 1 药型罩及装药结构示意图

1.1 理论计算

根据动量守恒和瞬时爆轰理论,将 EFP 速度计算分为三个阶段^[5],首先由瞬时爆轰理论计算出作用在药型罩微元上的冲量,然后由动量守恒原理计算出微元体的压合速度,最后将速度合成求出 EFP 速度,对于大锥角型结构的药型罩,动量守恒法得到的 EFP 速度表达式为:

$$v_p = \frac{\rho_e D d'}{4\sqrt{2}\rho\delta} \cdot \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{3} \quad (1)$$

式中: ρ_e 为装药密度; D 为装药的爆轰速度; d' 为装药直径; α 为药型罩锥角; δ 为药型罩壁厚; ρ 为药型罩密度。

动量守恒法适合几何形状规则药型罩 EFP

速度的估算^[6],求出的 EFP 速度主要取决于药型罩的密度、炸药的密度、炸药的爆速、装药直径及药型罩的几何形状。在本计算中装药直径与药型罩直径相等,药型罩的材料为紫铜,密度为 8.96 g/cm^3 。通过计算得到了 12 种不同方案的 EFP 速度,详见表 1,表中 v_1 为理论公式计算得到的速度。

表 1 12 种不同方案的理论计算及数值模拟结果

No.	$d/$ mm	$\delta/$ mm	$\alpha/$ (°)	$H/$ mm	$\rho_e/$ (g/cm^3)	$D/$ (m/s)	$v_1/$ (m/s)	$v_2/$ (m/s)
1	50	2.5	130	60	1.63	6930	1366	1568
2	50	3	135	65	1.84	8390	1581	1418
3	50	3.5	140	65	1.63	6930	1175	1314
4	50	4	145	70	1.84	8390	1229	1174
5	60	3	135	70	1.63	6930	1387	1594
6	60	3	140	75	1.84	8390	1938	1650
7	60	3.5	145	80	1.63	6930	1227	1524
8	60	4	150	80	1.84	8390	1494	1375
9	70	3	140	80	1.63	6930	1646	1808
10	70	3.5	145	80	1.84	8390	1967	1647
11	70	4	145	90	1.63	6930	1253	1538
12	70	4	150	90	1.84	8390	1738	1542

1.2 数值模拟

利用显式动力分析软件 ANSYS/LS-DYNA 对上述 12 种不同方案进行数值模拟,在数值模拟中,药型罩的材料为紫铜,炸药为 RDX/TNT 和 8701。金属材料采用 Johnson-cook 材料模型和 Gruneisen 状态方程,Johnson-Cook 材料模型是描述在大变形、高应变率和高温条件下的本构模型,其典型应用包括爆炸成型、弹道侵彻和冲击,Gruneisen 状态方程是个内能型方程,它确立了高压固体中 3 个状态量的解析关系。炸药采用高能燃烧模型和 JWL 状态方程,其具体参数如表 2 和表 3 所示。

表 2 铜的 Johnson-cook 模型参数^[7]

参数	参数值	参数	参数值
$\rho/(\text{g/cm}^3)$	8.96	C	2.50×10^{-2}
G/kPa	4.60×10^7	m	1.09
A/kPa	1.00×10^5	T_m/K	1.36×10^3
B/kPa	3.92×10^5	T_{room}/K	3.00×10^2
n	3.10×10^{-1}		

表 3 炸药材料模型参数^[7]

参数	炸药	
	8701	RDX/TNT
$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.84	1.63
$D/(\text{m}/\text{s})$	8.835×10^3	6.930×10^3
P/kPa	3.37×10^7	2.95×10^7
A/kPa	8.845×10^8	5.242×10^8
B/kPa	7.678×10^6	7.678×10^6
R_1	4.6	4.2
R_2	1.35	1.10
ω	2.5×10^{-1}	3.4×10^{-1}

计算模型采用三维四分之一模型,单元划分采用三维实体 solid 164 单元,网格划分见图 2。其边界条件为在对称面上施加对称约束,单位制采用 $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 。

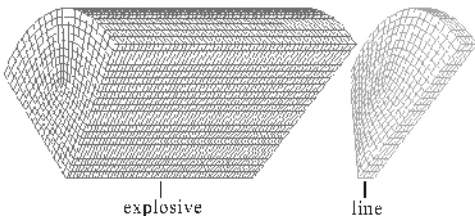


图 2 网格划分示意图

炸药与药型罩之间的接触采用 * CONTACT_SLIDING_ONLY_PENALTY 算法。计算过程中采用小型重新启动分析,由于 $30\mu\text{s}$ 时炸药爆轰已完成,随后的作用对 EFP 的成型影响已经很小,因此在 $30\mu\text{s}$ 时将删除炸药 PART 和接触,计算得到的 EFP 速度见表 1,表中 v_2 为数值计算得到的速度。

根据两种不同的装药密度,作出不同方案得到的速度对比曲线,见图 3 和图 4。由图中可以看出,装药密度较低时,理论计算得到的 EFP 速度

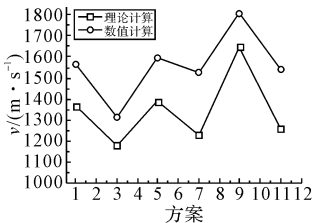


图 3 速度对比曲线 ($\rho_e = 1.63 \text{ g}/\text{cm}^3$)

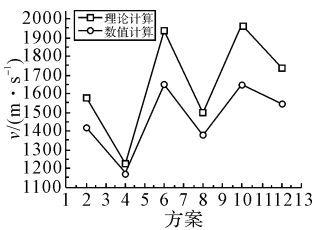


图 4 速度对比曲线 ($\rho_e = 1.84 \text{ g}/\text{cm}^3$)

值小于数值模拟计算得到的 EFP 速度值,见图 3;装药密度较高时,理论计算得到的 EFP 速度值大于数值模拟计算得到的 EFP 速度值,见图 4。由此可以看出,装药密度对 EFP 速度具有一定的影响;同时由式(1)可知,装药密度是影响 EFP 速度的一个主要因素,因此,在考虑影响 EFP 速度因素时,装药密度是一个不可以忽略的参数。

2 灰色理论分析

在系统分析中,常用的定量方法是数理统计法,如回归分析、方差分析、主成分分析等,尽管这些方法解决了许多实际问题,但它们往往要求大样本,且要求只有典型的概率分布,而这在实际中却很难实现。灰色理论提出的灰色关联法则不受这些局限,这种方法可在不完全的信息中对所要分析研究的各因素,通过一定的数据处理,在随机的因素序列间,找到它们的关联性,发现主要矛盾,找到主要的影响因素^[8]。灰关联分析由于可以从众多因素中找到影响目标序列的主要因素,因此实用价值较大,灰关联分析的一般步骤见图 5。

2.1 无量纲化

将理论公式和数值模拟计算得到的速度取为参考数列,记作 $y_j(k), j = 1$ 时表示为理论公式计算得到的速度值, $j = 2$ 时表示为数值模拟计算得到的速度值;药型罩直径、药型罩壁厚、锥角、装药高度、装药密度和炸药爆速取为比较数列,记作 $x_i(k), i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 时,分别表示为药型罩直径、药型罩壁厚、锥角、装药高度、装药密度和炸药爆速。则比较数列 X_i 与参考数列 Y_j 表达式为:

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k))$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (2)$$

$$Y_j = (y_j(1), y_j(2), \dots, y_j(k)) \quad j = 1, 2 \quad (3)$$

上述两式中的 k 为样本数量,在文中表示 12 种不同的方案。由于各个数列中的数据单位不统

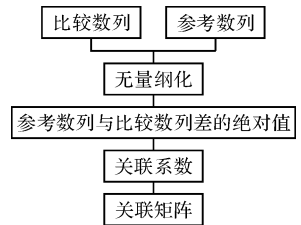


图 5 灰色关联分析方法的一般步骤

一,在数值上有的相差较大,为了保证计算出的灰关联度的准确性,首先需要将这些数据无量纲化,无量纲化后得到的结果如表 4 所示。

表 4 无量纲化后的参考数列与比较数列

No.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	y_1	y_2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1.000	1.200	1.038	1.083	1.135	1.211	1.157	0.904
3	1.000	1.400	1.077	1.083	1.000	1.000	0.860	0.838
4	1.000	1.600	1.115	1.167	1.135	1.211	0.900	0.749
5	1.200	1.200	1.038	1.167	1.000	1.000	1.015	1.017
6	1.200	1.200	1.077	1.250	1.135	1.211	1.419	1.052
7	1.200	1.400	1.115	1.333	1.000	1.000	0.898	0.972
8	1.200	1.600	1.154	1.333	1.135	1.211	1.094	0.877
9	1.400	1.200	1.077	1.333	1.000	1.000	1.205	1.153
10	1.400	1.400	1.115	1.333	1.135	1.211	1.440	1.050
11	1.400	1.600	1.115	1.500	1.000	1.000	0.917	0.981
12	1.400	1.600	1.154	1.500	1.135	1.211	1.272	0.983

2.2 关联系数

表 5 参考数列与比较数列差值的绝对值

No.	Δ_1^1	Δ_2^1	Δ_3^1	Δ_4^1	Δ_5^1	Δ_6^1	Δ_1^2	Δ_2^2	Δ_3^2	Δ_4^2	Δ_5^2	Δ_6^2
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.157	0.043	0.119	0.074	0.022	0.054	0.096	0.296	0.134	0.179	0.231	0.307
3	0.140	0.540	0.217	0.223	0.140	0.140	0.162	0.562	0.239	0.245	0.162	0.162
4	0.100	0.700	0.215	0.267	0.235	0.311	0.251	0.851	0.366	0.418	0.386	0.462
5	0.185	0.185	0.023	0.152	0.015	0.015	0.183	0.183	0.021	0.15	0.017	0.017
6	0.219	0.219	0.342	0.169	0.284	0.208	0.148	0.148	0.025	0.198	0.083	0.159
7	0.302	0.502	0.217	0.435	0.102	0.102	0.228	0.428	0.143	0.361	0.028	0.028
8	0.106	0.506	0.060	0.239	0.041	0.117	0.323	0.723	0.277	0.456	0.258	0.334
9	0.195	0.005	0.128	0.128	0.205	0.205	0.247	0.047	0.076	0.18	0.153	0.153
10	0.040	0.040	0.325	0.107	0.305	0.229	0.35	0.35	0.065	0.283	0.085	0.161
11	0.483	0.683	0.198	0.583	0.083	0.083	0.419	0.619	0.134	0.519	0.019	0.019
12	0.128	0.328	0.118	0.228	0.137	0.061	0.417	0.617	0.171	0.517	0.152	0.228

根据表 5 中的数据,将式(5) ~ 式(8)代入式(4)即可求出参考数列与比较数列的关联系数,见表 6。

表 6 参考数列与比较数列的灰关联系数

	ξ_1^1	ξ_2^1	ξ_3^1	ξ_4^1	ξ_5^1	ξ_6^1	ξ_1^2	ξ_2^2	ξ_3^2	ξ_4^2	ξ_5^2	ξ_6^2
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.690	0.891	0.746	0.825	0.941	0.866	0.816	0.590	0.761	0.704	0.648	0.581
3	0.714	0.393	0.617	0.611	0.714	0.714	0.724	0.431	0.641	0.635	0.724	0.724
4	0.778	0.333	0.619	0.567	0.598	0.530	0.629	0.334	0.538	0.505	0.5251	0.480
5	0.654	0.654	0.938	0.697	0.959	0.959	0.699	0.699	0.953	0.740	0.962	0.962
6	0.615	0.615	0.506	0.674	0.552	0.627	0.742	0.742	0.945	0.683	0.837	0.728
7	0.537	0.411	0.617	0.446	0.774	0.774	0.651	0.499	0.749	0.541	0.938	0.938
8	0.768	0.409	0.854	0.594	0.895	0.749	0.569	0.371	0.606	0.483	0.623	0.561
9	0.642	0.986	0.732	0.732	0.631	0.631	0.633	0.901	0.849	0.703	0.736	0.736
10	0.897	0.897	0.519	0.766	0.535	0.604	0.549	0.549	0.868	0.601	0.834	0.726
11	0.420	0.339	0.639	0.375	0.808	0.808	0.504	0.408	0.761	0.451	0.957	0.957
12	0.732	0.516	0.748	0.606	0.719	0.852	0.505	0.408	0.714	0.452	0.737	0.651

灰关联系数 $\xi_i(k)$ 定义如下:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_k \min_i |y_j(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_k \max_i |y_j(k) - x_i(k)|}{|y_j(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_k \max_i |y_j(k) - x_i(k)|} \quad (4)$$

假设: $\Delta_i^j = |y_j(k) - x_i(k)|, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6; j = 1, 2$ 。

为了求出灰关联系数,先求出参考数列与比较数列差值的绝对值,见表 5。

在表 5 中找出两个参考数列与比较数列差值绝对值的最大值与最小值,如下所示:

$$\Delta_{\min}^1 = \min_i \min_k |y_1(k) - x_i(k)| = 0 \quad (5)$$

$$\Delta_{\max}^1 = \min_i \min_k |y_1(k) - x_i(k)| = 0.700 \quad (6)$$

$$\Delta_{\min}^2 = \min_i \min_k |y_2(k) - x_i(k)| = 0 \quad (7)$$

$$\Delta_{\max}^2 = \min_i \min_k |y_2(k) - x_i(k)| = 0.851 \quad (8)$$

2.3 灰关联度

从关联系数的计算看,得到的是比较数列与参考数列在各点上的关联系数值,数据较多,信息过于分散,不便于比较,因而有必要将每一个比较数列的关联系数集中体现在一个值上。通过关联度可以将分散的数据作集中处理,求关联度的方法有面积法与平均值法。面积法一般作关联系数 $\xi_i(k)$ 的折线,折线与横坐标所夹面积即为关联度的大小,这种方法不常用,因此,在文中使用平均值法求出灰关联度,其定义如下:

$$r_i^j = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i^j(k) \quad k = 1, 2, \dots, 12; i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2 \quad (9)$$

根据式(9)与表 6 中的灰关联系数,即可求出关联度矩阵,见表 7。

表 7 关联度矩阵

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
y_1	0.704	0.620	0.711	0.658	0.761	0.760
y_2	0.668	0.578	0.782	0.625	0.793	0.754

对于比较数列 X_i 与参考数列 Y_j ,其关联度为 r_i^j ,按大小排列,即可得到灰关联序。分析关联矩阵中的数据,可以看出,对于理论计算得到的 EFP 速度值,其关联度由大到小的排序是 $x_5 > x_6 > x_3 > x_1 > x_4 > x_2$,对于数值模拟得到的 EFP 速度值,其关联度由大到小的排序是 $x_5 > x_3 > x_6 > x_1 > x_4 > x_2$ 。从两个比较数列关联度的排序可以看出,影响 EFP 速度的主要因素是装药密度 ρ_e 、爆速 D 和药型罩的锥角 α ,其次是药型罩直径 d 、装药高度 H 和药型罩壁厚 δ 。由于引入了装药结构因素以及各个因素的变化范围不同,得到的影响因素排序与文献[3]和[4]中的结论有一定的差别。由灰色理论分析结果可以看出,在 EFP 战斗部设计中,为了提高 EFP 的速

度,装药结构设计尤为重要。

3 结论

从理论结果和数值计算结果看,装药密度对 EFP 速度的影响很大。通过灰色理论分析表明,无论理论计算还是数值模拟得到的 EFP 速度,对速度影响的主要因素首先是装药结构,其次是药型罩的几何尺寸。将灰色理论应用于 EFP 速度影响因素的分析中,对 EFP 的设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 徐流恩,李永池,高乐南. 爆炸成型弹丸大炸高模拟律分析与应用实验研究[J]. 防护工程,2007,29(4):1-5.
- [2] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [3] 张先锋,陈惠武,赵有守,等. 聚能装药性能参数灰关联分析[J]. 兵工学报,2004,25(5):525-528.
- [4] 赵慧英,沈兆武,王晓海. 应用数值模拟和灰色理论计算分析聚能装药参数对聚能侵彻体成型性的影响[J]. 含能材料,2006,14(3):231-234.
- [5] 李必红,鲁艳红,陈寿如,等. 基于瞬时爆轰 EFP 成型速度的分析及应用研究[J]. 采矿技术,2005,5(3):87-89.
- [6] 林加剑,任辉启,沈兆武,等. 爆炸成型弹丸速度的工程算法对比及其应用研究[J]. 防护工程,2008,30(2):22-26.
- [7] Jun Wu, Jingbo Liu, Yinxin Du. Experimental and numerical study on the flight and penetration properties of explosively-formed projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007(34): 1147-1162.
- [8] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社,1992.

(上接第 111 页)

2) 专家系统、智能化方面,可以通过实验的数据和仿真的数据对结构或功能相近的一系列弹药或目标进行评估,对毁伤效果智能评估,并可提出相应的改进方案。

3) 加入战场环境因素,实现虚拟现实的模拟与仿真,为战场指挥系统提供相应的决策支持。

4) 数字仿真系统与计算机测控系统的结

合,可实时采集实验数据、现场数据处理与仿真、实验设备的控制驱动等。

参考文献:

- [1] 卢永刚,钱立新,杨云斌,等. 目标易损性/战斗部威力评估方法[J]. 弹道学报,2005,17(1):46-52.
- [2] 杨玉林,赵国志,李向东,等. 目标毁伤评估数字仿真平台系统研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(12):2743-2746.