

doi: 10.7690/bgzd.2014.10.011

基于不同方法的战斗部剩余速度评估结果差异规律

杨立强¹, 史云晖¹, 方向东¹, 徐辉辉¹, 袁长宏¹, 姚文攀²

(1. 中国航天科工四院红林公司第一研究室, 湖北 孝感 432000;

2. 中国航天科工四院红林公司计划处, 湖北 孝感 432000)

摘要: 为探索战斗部剩余速度的评估方法, 采用不同方法的战斗部剩余速度评估结果差异规律。分别使用贝尔金公式和数值方法对半穿甲战斗部侵彻钢甲的剩余速度进行计算, 得到初始侵彻速度介于 0.25~3.0 Ma 范围内半穿甲战斗部的多组剩余速度值, 总结出其内在规律, 并通过该战斗部侵彻钢板的实物试验验证该差异规律结论的正确性。同时, 对具有不同弹形的另 2 种战斗部侵彻钢甲的剩余速度进行贝尔金公式和数值仿真计算, 与实物试验结果对比表明, 同样符合该差异规律结论。

关键词: 贝尔金公式; 数值仿真; 初始速度; 剩余速度

中图分类号: TJ02 **文献标志码:** A

Laws of Difference Between Results on Evaluating the Warhead Exit Velocity Using Different Methods

Yang Liqiang¹, Shi Yunhui¹, Fang Xiangdong¹, Xu Huihui¹, Yuan Changhong¹, Yao Wenpan²

(1. No. 1 Lab, Honglin Corporation of No. 4 Academe, China Aerospace Science & Industry Corp, Xiaogan 432000, China;

2. Project Division, Honglin Corporation of No. 4 Academy, China Aerospace Science & Industry Corporation, Xiaogan 432000, China)

Abstract: In order to explore the method to evaluate the exit velocities of the warhead and the laws of the difference between the results on evaluating the warhead exit velocity using different methods. The exit velocities of the semi-armor-piercing warhead piercing the armor are calculated using Beljen expressions and numerical simulation methods respectively. Several groups of the warhead's exit-velocity values are obtained, corresponding to which the initial velocities range from 0.25 Ma to 3 Ma. The differences between the results from the two methods are analyzed and the inherent laws are concluded. Furthermore, the validity of the conclusions is validated via experiments. At the same time, the exit velocities of the other two warheads penetration armor are also calculated using Beljen expressions and numerical simulation methods, according to which the experiments are also performed, which indicate that the difference between the results from the two methods are also accord with the conclusion of the laws.

Keywords: Beljen expressions; numerical simulation; initial velocity; exit velocity

0 引言

战斗部侵彻钢甲后的剩余速度在战斗部及引信设计中都具有很高的实用价值^[1]。目前, 获取战斗部侵彻钢甲后的剩余速度可通过火箭撬试验、炮射试验等手段实现^[2]。对于采用数值仿真法或经验公式计算出的战斗部剩余速度与实物试验结果之间的差别及 2 种方法的评估结果差异规律鲜有报道。战斗部剩余速度受战斗部类型、战斗部初始侵彻速度、战斗部着角等诸多因素的影响, 完全依靠实物试验评估多工况条件下的战斗部剩余速度并不现实^[3]。基于此, 笔者探索战斗部剩余速度的评估方法, 总结其内在的规律, 不仅可以减小实物试验子样数目, 还可为后续同类试验预测和评估战斗部侵彻钢甲剩

余速度提供技术支撑和参考。

1 贝尔金公式^[4]

1.1 战斗部及钢甲特征

战斗部外形特征、质量及钢甲尺寸和强度特征如表 1 所示。

表 1 战斗部及钢甲特征数据

战斗部 质量 m/kg	战斗部 直径 d/m	钝头直 径 ϕ /m	曲率半 径 R/m	钢甲厚 度 b/m	钢甲屈服 强度 σ_s /MPa
16.22	0.105	0.021	0.14	0.0152	685

1.2 初始条件

战斗部侵彻钢甲的初始条件如表 2 所示。

收稿日期: 2014-05-07; 修回日期: 2014-06-06

作者简介: 杨立强(1976—), 男, 河北人, 硕士, 高级工程师, 从事引信及战斗部仿真技术研究。

表 2 战斗部侵彻钢甲初始条件

初始速度 $v_0/(m/s)$	着角 $\alpha/(^\circ)$	攻角 $\beta/(^\circ)$	初始速度 $v_0/(m/s)$	着角 $\alpha/(^\circ)$	攻角 $\beta/(^\circ)$
85.374	0	0	340		
90			400		
100			450		
110			510		
120			600		
130			680		
140			700		
150			724		
155			752		
160			800		
170			845		
200			850		
220			900		
240			950		
270			1 020		

1.3 贝尔金公式计算

1.3.1 贝尔金公式

贝尔金公式中的极限穿透速度 v_u 及剩余速度 v_r 的表达式分别如式 (1) 和式 (2) 所示。

$$v_u = \frac{\sqrt{k_2 \sigma_s (1 + \Phi) d^{0.75} b^{0.7}}}{m^{0.5} \cos(\alpha)} \quad (1)$$

$$v_r = \sqrt{\frac{m}{m_s + m} (v_0^2 - v_u^2)} \quad (2)$$

1.3.2 贝尔金公式计算结果

按战斗部侵彻钢甲初始条件，使用贝尔金公式计算的战斗部剩余速度值如表 3 所示。

表 3 贝尔金公式计算的战斗部剩余速度 m/s

初始速度 v_0	剩余速度 v_r	初始速度 v_0	剩余速度 v_r
85.374	0.126	340	319
90	28	400	379
100	50	450	428
110	67	510	488
120	88	600	576
130	95	680	654
140	108	700	674
150	120	724	697
155	125	752	725
160	131	800	771
170	143	845	815
200	175	850	820
220	197	900	869
240	218	950	918
270	248	1 020	986

2 数值仿真

2.1 数值仿真模型

建立战斗部和钢甲的数值仿真模型如图 1。

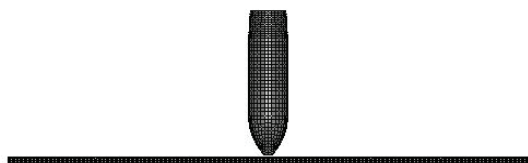


图 1 战斗部及钢甲的数值仿真模型

2.2 材料本构模型及力学性能参数

2.2.1 材料本构模型

战斗部壳体和钢甲所用钢材均属于抗冲击型材料，材料极限强度随着应变率的增大而显著升高^[5]，因此仿真计算中采用 Johnson-Cook 模型描述材料的本构关系，数学模型如下式所示。战斗部壳体和钢甲的材料本构模型如表 4 所示。

$$\sigma_y = (A + B \epsilon_p^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}) \cdot \left\{ 1 - \left[\frac{(T - T_r)}{(T_m - T_r)} \right]^m \right\} \quad (3)$$

表 4 材料本构模型

构件	材料类型	本构模型	状态方程
战斗部壳体	高强度钢	Johnson-cook	Gruneisen
钢甲	船用钢板	Johnson-cook	Gruneisen

2.2.2 材料力学性能参数

战斗部壳体和钢甲的相关力学性能参数如表 5。

表 5 材料力学性能参数

材料名称	A/MPa	B/MPa	n	C	m
高强度钢	1 600	742	0.300	0.030	1.0
船用钢板	685	810	0.782	0.021	0.5

2.2.3 数值仿真结果

按战斗部侵彻钢甲初始条件，使用数值仿真法计算的战斗部剩余速度值如表 6 所示。

表 6 数值仿真的战斗部剩余速度 m/s

初始速度 v_0	剩余速度 v_r	初始速度 v_0	剩余速度 v_r
85.374	-3	340	303
90	-5	400	366
100	-6	450	418
110	-9	510	480
120	-12	600	573
130	-14	680	653
140	-15	700	674
150	-16	724	698
155	25	752	726
160	48	800	775
170	79	845	821
200	134	850	826
220	163	900	876
240	188	950	926
270	225	1 020	996

3 剩余速度差异分析

3.1 $\Delta-v_0$ 曲线

将由贝尔金公式和数值仿真法计算得到的战斗部剩余速度之差定义为战斗部剩余速度差 Δ ，根据表 3 和表 6 的结果， Δ 随战斗部初始侵彻速度 v_0 的变化曲线如图 2 所示。

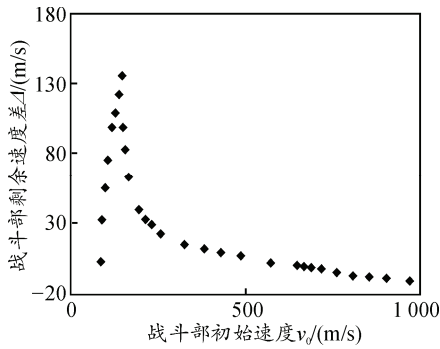


图 2 Δ-v₀ 曲线

3.2 Δ-v₀ 曲线分析

3.2.1 Δ 极大值的形成阶段

贝尔金公式得到的战斗部侵彻钢甲的极限穿透速度为 85.374 m/s，即战斗部以 85.374 m/s 的初始速度侵彻钢甲后剩余速度为零(由于计算的误差，文中相关结果为 0.126 m/s)，并且对钢甲形成穿透；使用数值仿真法模拟战斗部以初始速度 85.374 m/s 侵彻钢甲时未形成穿透，战斗部剩余速度为-3 m/s，即战斗部碰撞钢甲后产生反弹。直到将战斗部初始侵彻速度达到 155 m/s 时，战斗部才可以穿透钢甲，并且具有 25 m/s 的剩余速度。从图 2 所示的 Δ-v₀ 曲线可知，若令 Δ 极大值为 Δ_j，令其对应的战斗部初始速度为 v_{0j}，则 v_{0j} 为使用数值仿真法得到的战斗部极限穿透速度，v_{0j} 值介于 150 m/s < v_{0j} < 155 m/s 范围内，并且战斗部初始侵彻速度 v₀ 在 85.374 < v₀ < v_{0j} 范围内对应的 Δ 值均为正值且单调增长。

综上所述，战斗部初始侵彻速度 85.374 m/s < v₀ < v_{0j} 时，使用贝尔金公式得到的剩余速度总是大于使用数值仿真法得到的剩余速度，并且剩余速度差 Δ 单调增长，直到 v₀=v_{0j} 时 Δ 达到极大值 Δ_j。

3.2.2 Δ 值减小阶段

战斗部初始侵彻速度达到 v_{0j} 后，数值仿真法得到的剩余速度开始出现正值。Δ 值随战斗部初始侵彻速度 v₀ 的增大而从其极大值 Δ_j 开始减小，直到战斗部初始侵彻速度 v₀ 达到 700 m/s 时，Δ 值为零，即由贝尔金公式和数值仿真得到的战斗部剩余速度相等。战斗部初始侵彻速度 v₀ 在 v_{0j} < v₀ < 700 m/s 范围内对应的 Δ 值均为正值且单调减小。

综上所述，战斗部初始侵彻速度 v_{0j} < v₀ < 700 m/s 时，使用贝尔金公式得到的剩余速度总是大于使用数值仿真法得到的剩余速度，并且剩余速度差 Δ 单调减小，直到 v₀=700 m/s 时 Δ 值降为零。

3.2.3 Δ 值反向增长阶段

战斗部初始侵彻速度大于 700 m/s 后，Δ 值开始出现负值。|Δ| 随战斗部初始侵彻速度 v₀ 的增大而从零值开始增大，直到战斗部初始侵彻速度 v₀ 达到 1 020 m/s 时，Δ=-10，即由贝尔金公式和数值仿真计算得到的战斗部剩余速度差为-10。战斗部初始侵彻速度 v₀ 在 700 m/s < v₀ ≤ 1 020 m/s 范围内对应的 Δ 值均为负，且其绝对值单调增长。

综上所述，战斗部初始侵彻速度介于 700 m/s < v₀ ≤ 1 020 m/s 时，使用贝尔金公式得到的剩余速度总是小于使用数值仿真法计算得到的剩余速度，并且剩余速度差 |Δ| 单调增长，直到 v₀=1 020 m/s 时 Δ 值达到-10 m/s。

4 试验验证

4.1 试验条件

采用火炮进行穿甲试验^[6]，试验炮口至着靶点的距离约 20 m，回收堆与钢甲目标之间距离约为 20~25 m，试验现场布局如图 3 所示。

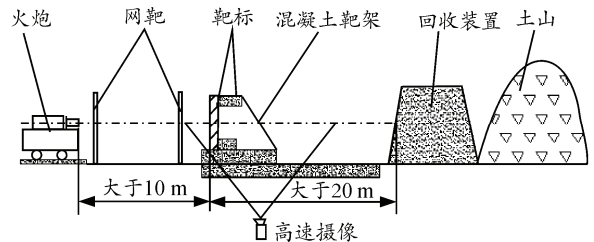


图 3 试验现场布局

4.2 试验及补算结果

4.2.1 表 1 所示战斗部试验及补算结果

受试验条件和试验子样数目的限制，笔者只收集到 2 发试验产品，并成功读取到战斗部的剩余速度。通过对高速摄像捕捉到的影像进行分析，2 发战斗部的初始侵彻速度分别为 606、629 m/s，对应的剩余速度分别为 583、605 m/s。按照战斗部初始速度为 606、629 m/s，笔者分别使用贝尔金公式和数值仿真进行补算，得到的剩余速度结果如表 7。

表 7 炮射试验和计算的战斗部剩余速度汇总 m/s

战斗部初始速度 v ₀	战斗部剩余速度 v _r		
	炮射试验	贝尔金公式	数值仿真
606	583	582	579
629	605	604	602

4.2.2 附加战斗部试验及计算结果

为增加试验子样数目,考核文中3.2节所述结论的适用性,对采用火箭撬试验平台进行的另一型穿甲战斗部侵彻相同类型钢甲的试验结果进行了汇总,并且进行了贝尔金公式和数值仿真计算,该型战斗部及其侵彻钢甲的特征数据如表8。试验结果及贝尔金公式和数值仿真计算结果汇总如表9。

表8 战斗部及钢甲特征数据

战斗部质量 m/kg	战斗部直径 d/m	钝头直径 ϕ /m	曲率半径 R/m	钢甲厚度 b/m	钢甲屈服强度 σ_s /MPa
300	0.25	0.033 5	0.45	0.06	685

表9 火箭撬试验和计算的战斗部剩余速度汇总 m/s

战斗部初始速度 v_0	战斗部剩余速度 v_r		
	火箭撬试验	贝尔金公式	数值仿真
732	696	693	697
825	790	783	792

4.2.3 试验结果与计算结果对比分析

由表7炮射试验数据可知,战斗部侵彻钢甲的初始速度 v_0 为606和629 m/s,介于 $v_{0j} < v_0 < 700$ m/s范围内。由贝尔金公式得到的剩余速度为582和604 m/s,分别大于由数值仿真计算的剩余速度579和602 m/s。与3.2.2节所下结论相符。与炮射试验结果比较, $v_0=606$ m/s时由贝尔金公式和数值仿真计算的战斗部速度降误差分别为4.3%和17.4%; $v_0=629$ m/s时由贝尔金公式和数值仿真计算的战斗部速度降误差分别为4.2%和12.5%。可见,由贝尔金公式和数值仿真得到的战斗部剩余速度与炮射试验结果相比都具有较好的相符性。

由表9火箭撬试验数据可知,战斗部侵彻钢甲的初始速度 v_0 为732和825 m/s,介于 $700 \text{ m/s} < v_0 < 1\,020$ m/s范围内。由贝尔金公式计算的剩余速度为693和783 m/s,分别小于由数值仿真计算的剩余速度697和792 m/s。与3.2.3节内容中所下结论相符。与火箭撬试验结果比较, $v_0=732$ m/s时由贝尔金公式和数值仿真计算的战斗部速度降误差分别为8.3%和2.8%; $v_0=825$ m/s时由贝尔金公式和数值仿真计算的战斗部速度降误差分别为20%和5.7%。可见,由贝尔金公式和数值仿真计算的战斗部剩余速度与火箭撬试验结果相比都具有较好的相符性。

5 结束语

使用贝尔金公式和数值仿真计算战斗部侵彻钢甲的剩余速度时,在战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $85.374 \text{ m/s} < v_0 < v_{0j}$ 范围内时,战斗部剩余速度差 Δ 单调增长,直到 $v_0=v_{0j}$ 时, Δ 达到极大值 Δ_j ;战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $v_{0j} < v_0 < 700$ m/s范围内时,战斗部剩余速度差 Δ 单调减小,直到 $v_0=700$ m/s时 Δ 值降为零。战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $700 \text{ m/s} < v_0 \leq 1\,020$ m/s范围内时,战斗部剩余速度差 $|\Delta|$ 单调增长。

战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $v_{0j} < v_0 < 700$ m/s范围内时,通过炮射试验对计算结果的有效性进行了验证,贝尔金公式和数值仿真结果与试验结果的误差都较小,计算结果的准确性和结论可信度较高;战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $700 \text{ m/s} < v_0 < 1\,020$ m/s范围内时,通过火箭撬试验对计算结果的有效性进行了验证,贝尔金公式和数值仿真结果与试验结果的误差都较小,计算结果的准确性和结论的可信度较高。

由于试验子样数目有限,对于战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $85.374 \text{ m/s} < v_0 < v_{0j}$ 范围内计算结果的准确性有待进一步试验验证。另外,由于战斗部初始侵彻速度 v_0 介于 $700 \text{ m/s} < v_0 < 1\,020$ m/s范围内的两发火箭撬试验的战斗部不同于进行剩余速度差异规律研究的战斗部,虽然该战斗部的两发试验结果均符合文中结论,但不排除不同型战斗部在 v_{0j} 和700 m/s临界值上存在差异的可能。

参考文献:

- [1] 王儒策,赵国志,杨绍卿. 弹药工程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:358-359.
- [2] 陈刚,陈小伟,陈忠富,等. A3钢钝头弹撞击45钢板破坏模式的数值分析[J]. 爆炸与冲击,2007,27(5):391-392.
- [3] 双海军. 我国通用弹药发展的战略思考[J]. 兵工自动化,2012,31(7):15-18.
- [4] 王儒策,赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京:北京理工大学出版社,1993:35-37.
- [5] 王丛曾,刘会亭. 材料性能学[M]. 北京:北京工业大学出版社,2006:16-25.
- [6] 叶渊,潘文彬,杨韬,等. 钢轨铝热焊接接头性能的有限元分析[J]. 机电工程,2013,30(1):26-30.