

doi: 10.7690/bgzd.2025.08.019

分段杆侵彻体形状对侵彻效率的仿真研究

薛建锋, 张 鹏, 刘 涛

(江西洪都航空工业集团有限公司, 南昌 330024)

摘要: 针对分段结构为球体的分段杆, 对不同速度段的侵彻现象进行研究。对理想圆柱分段杆和理想球体分段杆在低速、中速、高速 3 个不同速度下的侵彻深度和侵彻效率进行计算。结果表明: 球体分段杆侵彻深度大于柱形分段杆, 可为分段杆的工程应用提供参考。

关键词: 球体; 分段杆; 侵彻深度; 侵彻效率

中图分类号: TJ410 **文献标志码:** A

Simulation Study on Penetration Efficiency of Segmented Rod Penetrator

Xue Jianfeng, Zhang Peng, Liu Tao

(Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group Co., Ltd., Nanchang 330024, China)

Abstract: In this paper, the penetration of a segmented rod with a spherical structure is studied at different velocities. The penetration depth and penetration efficiency of the ideal cylinder segmented rod and the ideal sphere segmented rod were calculated at three different speeds of low speed, medium speed and high speed. The results show that the penetration depth of sphere segmented rod is greater than that of cylindrical segmented rod, which can provide a reference for the engineering application of segmented rod.

Keywords: sphere; segmented rod; penetration depth; penetration efficiency

0 引言

在对杆体侵彻金属靶板的研究过程中, 在一定速度下, 杆体的长径比越大, 侵彻效能越高^[1-3], 其中弹靶材料性质、长杆弹头部形状、长径比效应与分段杆的设计成为突出问题, 分段杆开始被人研究。最早关于分段杆的实验是在 1982 年, Orphal 等^[4]在总结大量实验数据和数值仿真的基础上, 提出分段杆侵彻机理。Holland 等^[5]基于流体动力学的计算程序, 对分段杆侵彻进行了数值计算。Tate^[6]在同一时刻提出了分段杆工程模型。Franzen 等^[7]对长径比小于 1 的分段杆的侵彻效率进行了总结, 证明在相同速度下, 不同长径比的最佳效率分段间距不同。Littlefield^[8]对分段杆同轴度对侵彻的影响做出初步研究。国内对于分段杆的研究较晚, 王晓鸣等^[9-10]、沈培辉等^[11]、任青君^[12]较早进行了初步的实验、理论研究, 考虑分段弹的侵彻规律和间隔大小、碰靶速度等因素对侵彻的影响, 计算也表明在分段弹的侵彻能力较连续杆有明显提高。蒋建伟等^[13]、邓云飞等^[14-15]、潘琴等^[16]和张浩等^[17]运用有限元软件, 对多种侵彻杆进行了模拟仿真, 仿真结果验证了前人的理论。陈小伟等^[18-19]对分段杆间距、套筒等方面做了数值模拟的工作, 结果表明, 分段体长径比

和分段间隔对侵彻深度的影响均不是单调的增加或减小, 而是存在一个最优值范围。上述一切工作均基于圆柱杆的基础之上, 对于其他形状分段杆的侵彻穿深机理涉及不多。蒋建伟等^[13]认为相同质量和间距下, 尖锥、球形和截锥分段杆体侵彻能力优于圆柱形分段杆体, 但对于其侵彻过程仍然需要进一步研究。相关研究发现: 对于杆式弹而言, 头部形状为半球形的弹丸, 比头部形状为圆柱形的弹丸侵彻更深^[20]; 因此, 对于分段结构为球体的分段杆, 有必要对不同速度段的侵彻现象进行研究。

1 理论分析

张东江等^[21]通过仿真模拟, 得出相同质量下, 柱形弹丸比球形弹丸侵彻能力强的结论。这一点也可以由空穴膨胀的理论验证。如图 1 所示, 对于长径比为 1 的圆柱, 其等径球体的体积仅为圆柱体积的 2/3。为保证动能一样, 在不改变柱体形状的条件下, 需要增加球体半径。其等质量半径为:

$$R_{\text{球}} = \sqrt[3]{3R_{\text{柱}}/2}。 \quad (1)$$

根据有限柱形空腔膨胀理论^[22], 扩孔耗能为:

$$W_e = 2\pi \int_0^{r_{cf}} \sigma_{re} r_c dr_c。 \quad (2)$$

收稿日期: 2024-09-13; 修回日期: 2024-10-21

第一作者: 薛建锋(1987—), 男, 江西人, 博士。

式中 r_c 为侵彻体半径。由于等质量等动能的球体半径大于圆柱体，其径向扩孔耗能所占的能量大于圆柱体；因此，用于轴向侵彻的能量相对较少，等质量圆球体侵彻深度小于杆体。

分段杆的出现，使球体侵彻有了新研究方向。为了防止在侵彻过程中，后杆追上前杆，存在一个分段间隔的问题；而圆球体尾部的横截面积小于圆柱体。侵彻体如图 2 所示。其分段间距可以比圆柱体更短。杜忠华等^[23]研究表明，侵彻钢板时钨球体的破碎较为严重，利用这个特性，减少侵彻体的分段间距，在工程上有助于减少弹托长度、降低膛内运动的振动幅度，确保飞行过程中的稳定性。

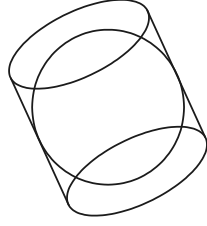


图 1 等长径比柱体和球体

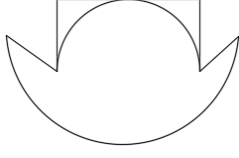


图 2 侵彻体

2 仿真计算

为验证等质量分段球体的侵彻效果，进行多组数值仿真。仿真采用拉格朗日算法，利用 LS-DYNA 软件进行计算。为减少流程，降低人为工作量，笔者采用多计算域同步算法，即将多组计算模型用组

模型替代，如图 3 所示。在 LS-DYNA 求解器中同步计算，不仅减少了前处理的重复步骤，而且后处理简单、直观，可以观察同一时刻不同组模型的仿真过程，特别适合于需多组、多初始条件的重复仿真。

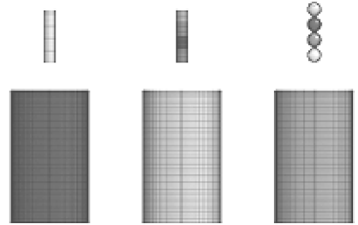


图 3 间隔为 0 时的仿真

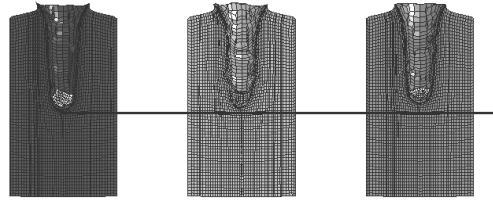
为客观分析圆球体侵彻过程，主要设置了 3 组侵彻模型。以图 3 为例，第 1 组为连续杆侵彻组，侵彻杆体长度为 40 mm，直径为 10 mm。钢靶为 30 mm×30 mm×100 mm 的圆柱体，杆体前端距离靶板 20 mm；第 2 组为分段杆侵彻组，该组侵彻杆体是将第 1 组侵彻杆均 4 等分成 10 mm×10 mm×10 mm 的侵彻体；第 3 组为分段球体侵彻组，该组由 4 个大小相同的球体组成，其中单一球体的质量与第 2 组中的分段杆相同，此外最近的球离靶体 20 mm。在仿真中，赋予 3 组侵彻杆相同的初始速度，以观察在同一时刻的侵彻情况。仿真所采用的侵彻体和钢靶材料的部分参数如表 1 所示^[14]。

表 1 材料模型参数

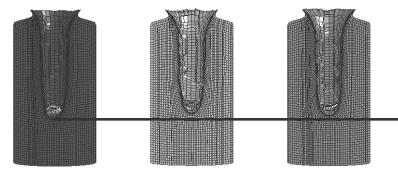
模型	密度/(g/cm ³)	剪切模量/GPa	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/GPa	硬化指数
侵彻体	17.60	1.36	3.50	0.284	0.151E-01	0.177E-02
靶板	7.83	0.77	2.10	0.220	0.350E-02	0.30E-02

2.1 0 间距下的侵彻仿真

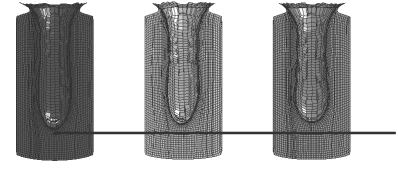
分段杆间距是影响侵彻深度的重要因素。验证若将分段杆做成球体，能否在 0 间距下，实现大于等质量连续杆的侵彻深度。基于工程可实现的目的，在 2 200、1 600 和 1 200 m/s 高中低 3 组初始速度下，进行了仿真。仿真结果如图 4 和表 2 所示，其中 R 为球体半径， L 为杆体长度， N 为球体数量， S 为间距， D 为直径，侵彻深度为 p ，侵彻效率为 $\eta(p=L)$ 。



(a) 初速 1 200 m/s



(b) 初速 1 600 m/s



(c) 初速 2 200 m/s



(d) 中间时刻杆体应力分布

图 4 0 间距下不同速度的侵彻深度

表 2 0 间距下侵彻深度和侵彻效率

杆体类型	质量/g	尺寸/mm	速度/(m/s)					
			1 200		1 600		2 200	
			<i>p</i> /mm	η	<i>p</i> /mm	η	<i>p</i> /mm	η
连续杆	54.98	$R=5; L=40$	51.33	1.28	66.58	1.66	81.83	2.05
分段柱杆	54.98	$R=5; L=10; N=4$	49.63	1.24	63.19	1.58	78.44	1.96
分段球体	54.98	$R=5.72; N=4$	47.94	1.05	64.88	1.42	76.75	1.68

从图 4 及表 2 可以看出：当分段间距为 0 时，连续杆的侵彻效率和侵彻深度在速度段下，始终最高。从图 4(d)中可以看出：当间距为 0 时，侵彻体中间存在应力集中的部分，表明在侵彻过程中分段杆后杆，会与前杆碰撞。其后杆动能相当一部分转化为应变能和热散失，从而导致用于侵彻的有效动能减少。

2.2 S/D=1 的侵彻仿真

从前面的仿真可知，0 间距时分段杆侵彻深度和侵彻效率并不如连续杆。对此，保持其他初始条件不变，增大分段杆间距，观察其在 S/D=1 间距下的侵彻情况，如图 5 和表 3 所示。

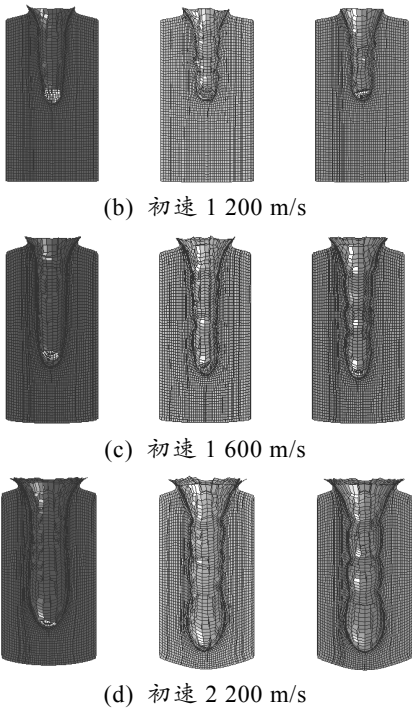
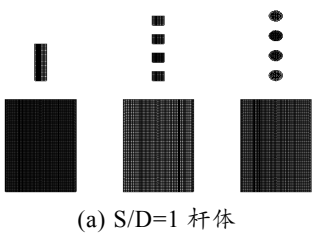


图 5 S/D=1 下不同速度的侵彻深度

表 3 S/D=1 下侵彻深度和侵彻效率

杆体类型	质量/g	尺寸/mm	速度/(m/s)					
			1 200		1 600		2 200	
			<i>p</i> /mm	η	<i>p</i> /mm	η	<i>p</i> /mm	η
连续杆	54.98	$R=5; L=40$	51.33	1.28	66.58	1.66	81.83	2.05
分段柱杆	54.98	$R=5; L=10; N=4$	49.64	1.24	73.36	1.83	97.07	2.43
分段球体	54.98	$R=5.72; N=4$	49.64	1.04	75.05	1.57	98.77	2.06

从图 5 和表 3 可以看出：当 S/D=1 时，在初、中、高 3 个速度下，侵彻深度和侵彻效率呈现不同的结果。其中在初速较低时，连续杆的侵彻深度和侵彻效率仍然大于分段杆。这是因为速度较低时，分段杆间相互作用所消耗的动能仍占总动能相当大的比例。提高初速，可以发现分段杆的侵彻深度和侵彻效率大于连续杆，观察不同速度下稳定侵彻阶段的弹坑形状，可以看出，分段杆形成的弹坑直径小于连续杆，说明用于径向扩孔的能量较少，用于轴向侵彻的能量增加。



图 6 侵彻体蘑菇头变化情况

图 6 清晰地反映出侵彻过程中蘑菇头大小的变化情况。对于连续杆，其稳定侵彻阶段持续时间较长，故蘑菇头较长时间内维持一个较大的直径。分段杆对于单一杆体来说，稳定侵彻时间较短，故蘑菇头平均直径小于连续杆。根据式(2)可知，其扩孔耗能较连续杆少；因此，其弹坑直径小于连续杆，特别是对于间距较大的分段杆而言，其弹坑形状呈现明显的“葫芦串”形状。

2.3 等直径下的侵彻仿真

上节仿真表明球体和分段杆侵彻深度近乎一致。由于上节仿真中球体的半径大于分段杆，球体的扩孔耗能可能多于分段杆。可将分段杆制成等直径的球体，同时保证段数、间距、质量、初始速度一样，计算在等径条件下球体的侵彻情况。仿真情况如图 7 所示。

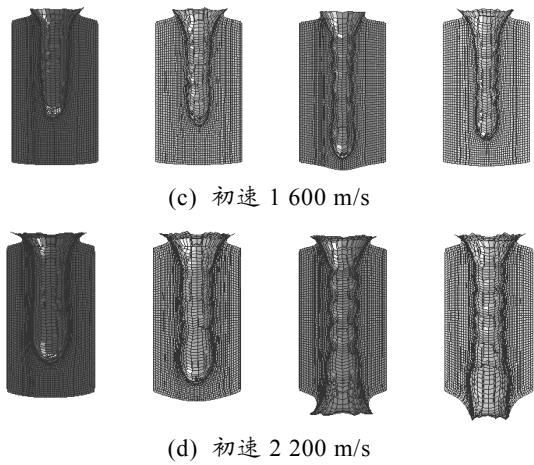
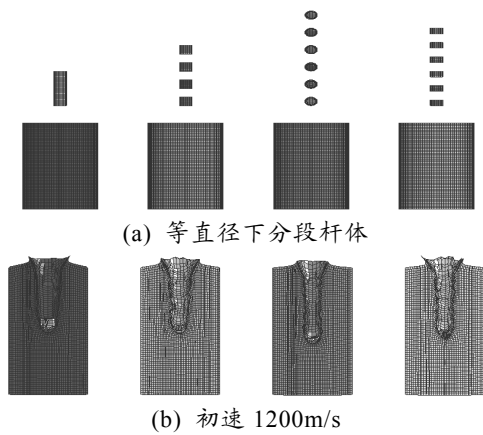


图 7 等直径下不同速度的侵彻深度

从图 7 和表 4 可知：在直径、间距、初始动能、分段数目相同的条件下，分段球体的侵彻深度大于分段柱体，速度越高，现象越明显。在初速 2 200 m/s 的条件下，6 段杆对靶板实现了贯穿，说明初始动能相同的情况下，分段数越多，侵彻效率越高。

表 4 等直径下侵彻深度和侵彻效率

杆体类型	质量/g	尺寸/mm	速度/(m/s)					
			1 200		1 600		2 200	
			<i>p</i> /mm	η	<i>p</i> /mm	η	<i>p</i> /mm	η
连续杆	54.98	$R=5; L=40$	51.33	1.280	66.58	1.66	81.83	2.05
分段柱杆 1	54.98	$R=5; L=10; N=4$	49.64	1.240	73.36	1.83	97.07	2.43
分段球体	54.98	$R=5; N=6$	59.80	0.997	98.78	1.65	贯穿	—
分段柱杆 2	54.98	$R=5; L=6.67; N=6$	55.00	1.380	84.70	2.12	贯穿	—

图 8 为 6 分段球体和杆体侵彻靶板时所留下的弹坑形状示意图。从图 8 可以看出：在稳定侵彻阶段，分段球体侵彻靶板所留下的弹坑平均直径小于同质量、段数、间隔距离的圆柱分段杆。

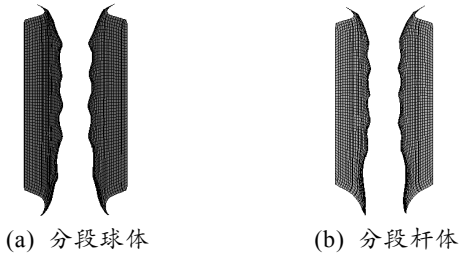


图 8 分段杆体弹坑

选取分段球体和分段杆体的头部和尾部最后侵彻体，输出其速度变化曲线，如图 9 所示。由于每段杆的质量相同，因此该曲线可以看作相对动能变化曲线。可见在侵彻过程中分段球体的动能持续时间比分段杆长。尤其是对于两者的最后一个侵彻体，当柱体侵彻体动能降为 0 时，球体侵彻体依旧保持相当大的动能，证明其存在剩余残体，这对于靶后毁伤有着重要的意义。

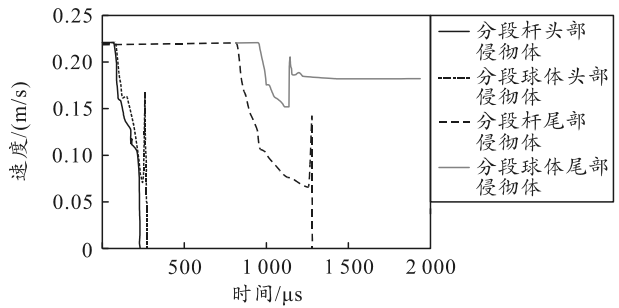


图 9 单个分段体速度变化曲线

比较 3 组仿真，可以发现间距对分段杆侵彻产生极大的影响，为此在设计分段杆时，应充分考虑间距的大小。此外，分段球体在侵彻过程中的扩孔耗能，小于等动能、同直径、间距、数目的圆柱分段杆，这意味着通过合理的间距取舍，在一定速度下，分段球体可能获得比分段杆更大的侵彻效率。

3 结论

根据半球形侵彻杆侵彻深度大于平头侵彻杆这一现象的启发，通过分析和仿真得到以下结论：

- 1) 在分段杆中，球体形状的分段杆可获得比圆

柱杆更大的穿深。

2) 通过多组仿真计算, 证明了分段球体在同直径、同间距、同分段数、同质量、同初速的条件下, 可获得更大的侵彻深度和更优的侵彻效率。

参考文献:

- [1] 焦文俊, 陈小伟. 长杆高速侵彻问题研究进展[J]. 力学进展, 2019, 49(1): 4.
- [2] 郭俊. 活性分段动能杆对混凝土靶的毁伤效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [3] 焦文俊. 长杆高速侵彻的 1D 和 2D 理论模型[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
- [4] ORPHAL D L, FRANZEN R R. Penetration mechanics and performance of segmented rods against metal targets [J]. International Journal of Impact Engineering, 1990(10): 427-439.
- [5] HOLLAND P M, GORDON J T, MENNAT L, et al. Results for the penetration of continuous, segmented and hybrid rods compared with ballistic experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990(10): 241-250.
- [6] TATE A. Engineering modelling of some aspects of segmented rod penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990, 9(3): 327-341.
- [7] FRANZEN R R, WALKER J D, ORPHAL D L, et al. An upper limit for the penetration performance of segmented rods with segment-L/D ≤ 1 [J]. International Journal of Impact Engineering, 1994, 15(5): 661-668.
- [8] LITTLEFIELD D L. Effect of alignment on the penetration of segmented rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001(26): 421-431.
- [9] WANG X M, ZHAO G Z, SHEN P H. High velocity impact of segmented rods with an aluminum carrier tube[J]. International Journal of Impact Engineering, 1995, 17(4): 915-923.
- [10] 王晓鸣, 赵国志, 沈培辉, 等. 高速分段弹的侵彻模型[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(5): 445-448.
- [11] 沈培辉, 王晓鸣, 赵国志. 分段杆侵彻增量分析[J]. 弹道学报, 1999, 11(4): 83-86.
- [12] 任青君. 分段式杆体侵彻机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [13] 蒋建伟, 卢永刚, 门建兵, 等. 理想分段杆侵彻效能的数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2001, 21(3): 23-25.
- [14] 邓云飞, 张伟, 曹宗圣, 等. 分段弹侵彻效率的数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2011, 25(3): 251-260.
- [15] 胡静, 邓云飞, 孟凡柱, 等. 分段杆弹侵彻效率的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2015, 29(6): 410-418.
- [16] 潘琴, 李海杰, 张景伟, 等. 分段杆高速侵彻混凝土数值模拟研究[J]. 兵工自动化, 2015, 34(6): 36-40.
- [17] 张浩, 卢玉斌, 徐一源, 等. 分段弹体低速侵彻铝靶板动态响应特性的数值分析[J]. 西南科技大学学报, 2018, 33(1): 96-102.
- [18] 陈小伟, 郎林. 长径比和分段间隔对理想分段杆侵彻钢靶的影响[J]. 爆炸与冲击, 2013(S1): 1-7.
- [19] 郎林, 陈小伟, 雷劲松. 长杆和分段杆侵彻的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(2): 127-134.
- [20] 徐英, 时家明, 林志丹. 撞击物形状和速度对高速撞击结果的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2010(2): 111-113.
- [21] 张东江, 张庆明, 巨圆圆. 不同形状弹丸超高速碰撞靶板成坑特性研究[J]. 爆破, 2013, 30(4): 36-39.
- [22] 牛振坤, 陈小伟, 邓勇军, 等. 混凝土靶侵彻过程中空腔膨胀响应分区[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(2): 1-9.
- [23] 杜忠华, 杜成鑫, 朱正旺, 等. 分段钨丝/锆基非晶复合材料穿甲试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2359-2365.
- [24] 杨义胜, 郭津津, 陈世杰. 基于模糊神经网络的电液力反馈伺服控制技术的研究[J]. 重型机械, 2019(3): 43-47.
- [25] JANG J S R. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system[J]. Ieee Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(3): 665-685.
- [26] LU Z L, XIN S J. GA-based fuzzy neural network control for ROV[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2258(1): 7.
- [27] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 245.
- [28] 赵志刚, 单晓虹. 一种基于遗传算法的 RBF 神经网络优化方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(6): 211-212.

(上接第 82 页)

- [2] 张泽旭. 神经网络控制与 MATLAB 仿真[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011: 263.
- [3] 沙烨镇, 余世航, 陈机林. 基于 NNCA 的某破障武器模糊自适应动态面控制[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(4): 24-30.
- [4] 宋志安. 基于 MATLAB 的液压伺服控制系统分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 119.
- [5] 何禹锐, 高强, 侯远龙. 某定深电液伺服系统的粒子群优化神经网络 PID 控制[J]. 兵工自动化, 2019, 38(11): 24-28.
- [6] 杨前明, 洪广元, 胡开文, 等. 双马达模糊神经网络速度同步控制实现方法研究[J]. 机电工程, 2017, 34(11): 1229-1234.