

doi: 10.7690/bgzd.2015.06.011

分段杆高速侵彻混凝土数值模拟研究

潘 琴, 李海杰, 张景伟, 郭青松, 王 兴, 黄民荣
(湖南云箭集团有限公司, 长沙 410100)

摘要: 针对撞击速度 2~6 km/s 的理想分段杆的侵彻效应, 采用数值模拟方法对其进行研究。介绍分段杆式弹研究现状及分段杆侵彻效能数值仿真并进行分析, 获得分段杆侵彻效能与分段体数目、间隔和撞击速度的关系。计算结果表明, 分段杆能有效提高侵彻深度和效能。

关键词: 分段杆; 侵彻; 混凝土; 数值模拟
中图分类号: TJ410.6 **文献标志码:** A

Numerical Simulation of Segmented Rods High Speed Penetration into Concrete Target

Pan Qin, Li Haijie, Zhang Jingwei, Guo Qingsong, Wang Xing, Huang Minrong
(Hunan Vanguard Group Co., Ltd., Changsha 410100, China)

Abstract: Aiming at the penetration effect of segmented rods in impact velocity of 2 ~ 6 km/s, use numerical simulation method to carry out research. Introduce segmented rods artillery research situation and analyze segmented rods penetration performance numerical simulation. Acquire relation among segmented rods penetration performance with the number, separation, and impact velocity of segmented rods. The calculation results show that segmented rods can effectively improve penetration depth and effectiveness.

Keywords: segmented rods; penetration; concrete target; numerical simulation

0 引言

近 20 多年以来, 杆式穿甲弹的侵彻研究主要集中在长细比大于 10 以上的长杆式连续穿甲弹方面, 国内外学者对此进行了大量的研究工作。分段杆式弹概念机理研究为穿甲技术的发展提供了一个新领域。分段杆式弹(segmented rod)是数个长细比通常小于 1 的短杆体, 在同一轴线上分别保持一定的撞击间隔配置而成的侵彻体。因此它在本质上来说仍然是一种杆式弹。

笔者采用数值模拟方法, 针对撞击速度 2~6 km/s 的理想分段杆的侵彻效应进行了研究, 获得了分段杆侵彻效能与分段弹数目、间隔、撞击速度的关系, 研究结果对分段杆式穿甲弹的实用化研究具有参考价值。

1 分段杆式弹研究现状

目前, 动能穿甲弹的侵彻研究主要集中在大长径比的连续杆侵彻体的终点效应方面。在长杆体质量一定的情况下, 其侵彻深度随着靶速度与长径比增加而增加。因此, 增大长杆体长径比和提高着靶速度是提高侵彻威力的主要技术途径。但这一规律只能在速度和长径比小于某一临界值时才有效^[1]。

研究一种新型弹芯结构提高弹芯单位长度的侵彻能力是西方国家在侵彻机理领域进行的一项重要研究课题。早在 1956 年, Eichelberger^[2]在聚能金属射流侵彻机理的研究中发现同轴性的间隔金属流侵彻比连续金属流提高 40%以上, 但未能引起业界的普遍重视, 直到 1981 年, Kucher^[3]首次提出分段杆式侵彻体的概念。分段感的侵彻能力之所以能够提高, 其基本理论是当长径比与撞击速度达到一定值时, 长杆式侵彻体在侵彻深度上将会有一个极限值, 而这一极限值不能够限制分段杆侵彻体。1984 年, Hohler^[4]在其研究中发现长杆体侵彻效率, 即侵彻深度与圆杆体长度之比(P/L), 随着长杆体长径比(L/D)的增大而减小。对于长径比 $\lambda=1$ 的圆杆体, 当撞击速度 $v_s=2$ km/s 时, 侵彻效率为 $\eta=1.8$ 。当速度不断增大时, 侵彻效率最高可达到 2.7。而对于大长径比的长杆体, 其侵彻效率的极限值 $\eta=1.5$ 。

进入 80 年代以来, 西方国家开始在分段侵彻机理领域进行研究, 由此演绎出了一种新的分段穿甲弹结构。近年来, 美国、法国、英国和以色列等国对分段弹的侵彻机理进行了大量的实验研究和数值模拟。根据国内外公布的试验数据, 在相同质量, 速度大于 3 000m/s 的条件下, 分段式穿甲弹芯的侵

收稿日期: 2015-01-02; 修回日期: 2015-02-15

作者简介: 潘 琴(1985—), 女, 湖南人, 硕士, 工程师, 从事战斗部设计研究。

彻能力较连续杆提高 20%~25%^[5-11]以上。相对于速度而言，尽管分段侵彻研究是在高速情况下提出的，但分段侵彻具有普遍的意义。

2 分段杆侵彻效能数值仿真

2.1 有限元模型建立

图 1 为研究的典型理想分段杆和等质量、等弹径的连续杆体结构简图。理想分段杆由数个等长径比 ($L_i/D_i=1$) 的分段体 (直径 $D_i=10$ mm)，按等间隔排列组成，分段体数量 $n=1\sim 5$ 。分段体材料为 93 钨合金，侵彻的靶板为半无限厚混凝土靶。

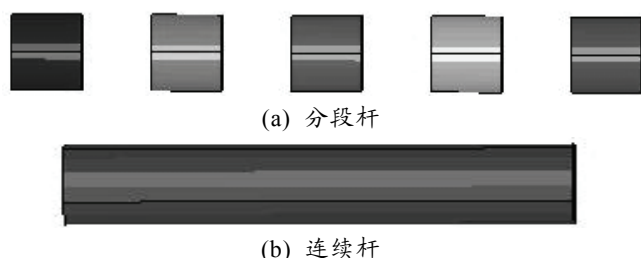


图 1 理想分段杆和连续杆体结构

弹靶系统是一个轴对称问题，弹体和靶板均为密度和材料参量分布处处相同的连续体，弹一靶作用中，弹体和靶板的变形、受力等力学参量的变化也为轴对称，所以为减少计算量，建立 1/4 模型 (见图 2)。对称面上施加对称约束边界条件。同时对靶体除对称面之外的外边面设定为无反射边界。

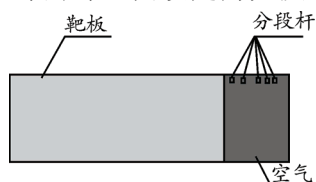
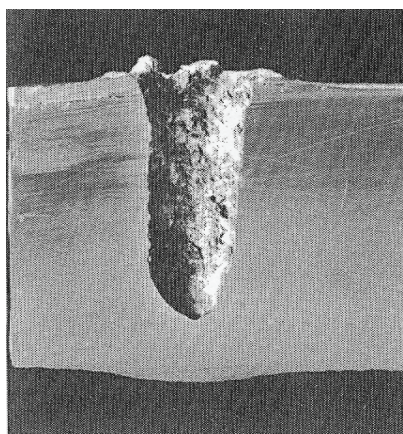


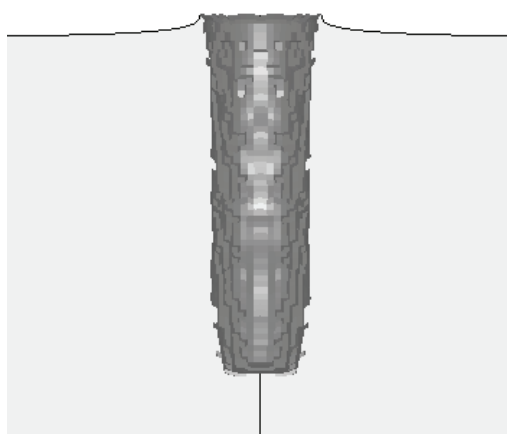
图 2 计算模型

2.2 材料模型的选择

文中研究的是 93 钨合金 (93W-4.9Ni-2.1Fe) 对



(a) 实验所得连续杆弹坑形状



(b) 数值模拟所得连续杆弹坑形状

35 MPa 普通混凝土在 2~6 km/s 速度范围内的侵彻问题。在这个速度范围内，已经不属于结构动力学的范围，而是属于类似于可压缩流体的流体动力学过程。因此，对于弹体采用了 *MAT_JOHNSON_COOK 材料模型，对靶体则采用了 *MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO 材料模型。

表 1、表 2 分别给出了本计算中弹丸、靶板以及空气的材料模型参数。如无特殊说明，文中的数值模拟采用的单位制均为 cm-g- μ s 制。

表 1 弹体的 Johnson-Cook 材料模型参数

材料	密度/ (g/cm ³)	剪切模 量/GPa	强度常数				
			A/MPa	B/MPa	N	C	M
钨合金	17.67	124	1 610	141	0.12	0.016	1.00

表 2 靶板的流体弹塑性材料模型参数

材料参数	参数值	材料参数	参数值
密度/(g/cm ³)	2.44	塑性硬化模量 E_H	0
剪切模量/GPa	14.86	截至压力 PC/MPa	-2.2
压缩强度/MPa	35	失效/FS	0.5

2.3 材料模型及参数的校核

对表 1 中影响深度的强度参数 A 对侵彻深度计算结果的敏感性进行了研究，A 取 1 210 MPa 时为工况 1，A 为 1 414 MPa 时为工况 2，A 为 1 610 MPa 时为工况 3，其他参数同表 1，计算几何模型参数同实验 (实验数据来自文献[12])，实验工况为 5 个分段体 ($L/D=1, D=5.44$ mm, $S/D=1$) 组成的分段杆侵彻钢靶，计算结果列于表 3。由结果可知：强度参数 A 取 1 610 MPa 时，计算结果和实验吻合较好。

表 3 弹丸强度参数对分段杆式弹计算侵彻深度的影响

材料模型	参数	材料模型	参数
弹速/(km/s)	2.55	工况 3 计算侵彻深度/cm	4.61
工况 1 计算侵彻深度/cm	4.71	实验侵彻深度/cm	4.6
工况 2 计算侵彻深度/cm	4.68		

由图 3 可以看出：实验和数值模拟的弹坑形状比较吻合，这说明该模型适用于超高速情况下杆体的侵彻问题。

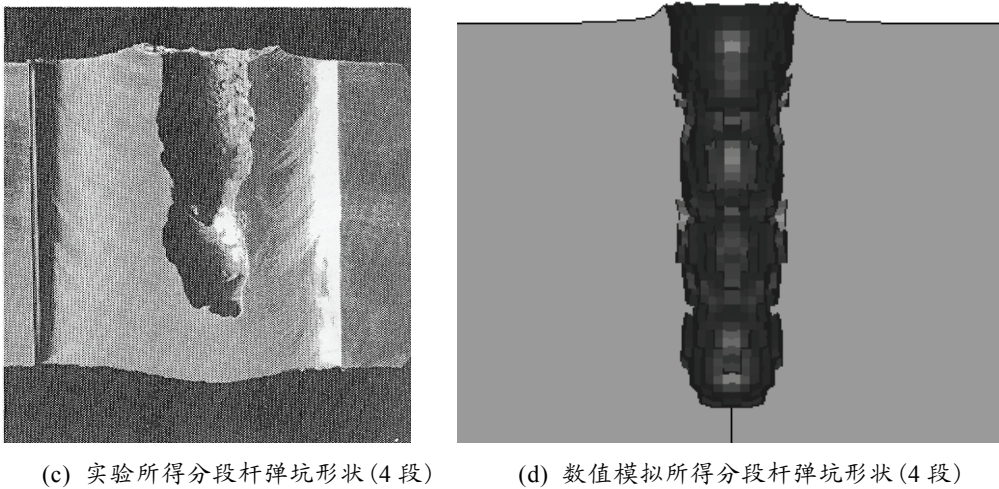


图 3 实验和数值模拟弹坑形状比较

2.4 数值仿真结果

2.4.1 靶板破坏特性

从图 4 可以看出，分段杆的弹坑直径小于连续杆的弹坑直径。这是由于弹坑体积与动能相关。动能一定时，侵彻深度与弹坑直径成正比。分段杆与连续杆的动能是一定的，分段杆的侵深大于连续杆，所以弹坑直径比连续杆要小一些。

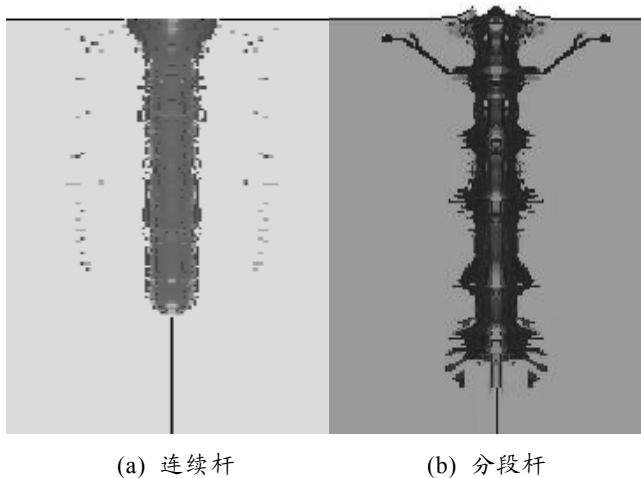


图 4 靶板破坏特征 ($v=4 \text{ km/s}$, $n=5$, $S/D=1.0$, $L/D=1.0$)

分段杆的弹坑形状是葫芦形。分段杆在侵彻过程中，弹坑坑径有 4 个比较明显的变化点，正好与分段体数目相一致，这说明每一个分段体侵彻基本是独立的。在 5 个分段体侵彻之间的过渡处，坑径明显缩小，随后增大。在间隔一定时，随着速度的增大，分段体侵彻之间的过渡段变得更为明显。而在分段体间隔增大时，弹坑直径减小，在弹坑中所形成的过渡段变得更加明显。

在每一个分段体侵彻过程中，弹坑直径都有一个基本不变的阶段，这与长杆体稳定侵彻阶段相一

致。每一个分段体侵彻形成的弹坑均由开坑或扩坑段、稳定(破碎)段和非破碎段 3 部分组成。

2.4.2 侵彻速度对侵彻效能的影响

由图 5、图 6 给出了在间隔 $S/D=1$ 、分段体长径比 $L/D=1$ 条件下，由 $N=5$ 个分段体组成的分段杆及相应连续杆在不同速度下对靶板侵彻效能的比较，由图可以看出，在分段体间隔一定时随着撞击速度的增加，侵入深度也不断增加。同质量、同直径下分段杆的穿深总是大于连续杆，而且随着撞击速度的增加，它们的差值也越来越大，证明分段弹在超高速情况下能极大地提高单位长度弹丸的侵彻效率。比如在 2 km/s 的速度下， $S/D=1$, $L/D=1$ 分段弹的侵彻深度比连续杆增加 12.98%，在 4 km/s 的速度下侵彻深度增加 15.52%，在 5 km/s 的速度下侵彻深度增加 21.77%。

分段杆较高的侵彻能力是因为：1) 当前一个分段体侵蚀完时，后一个分段体尚未到达，未形成残余体。前一个杆段打击靶板形成弹坑，后一个杆段又打在该弹坑上而不受前者的影响。因此，没有变形，没有增塑，也没有减速。2) 当前一个分段体的部分材料会留在弹坑底部，下一个分段体撞击这部分残余材料并穿透它继续向下侵彻。这时残余体获得了增速，使得第一个分段体侵彻更深。由于残余体很薄，因此在高速、高压下，迅速崩碎，对后一节分段体的影响不是很大。3) 由于前一个分段体的打击，在高温高压下，靶板与弹丸接触的地方局部软化，后一节分段体打在软化的靶板上，因此初始阻力比较小。图 5 为分段杆和连续杆在顶端单元的速度和时间曲线图，由图可知：连续杆的单元速度是一开始就下降，而分段杆的单元速度是在分段体

接触残余体或靶板之后才开始下降，所以分段杆对靶板的冲击力要比连续杆的大。

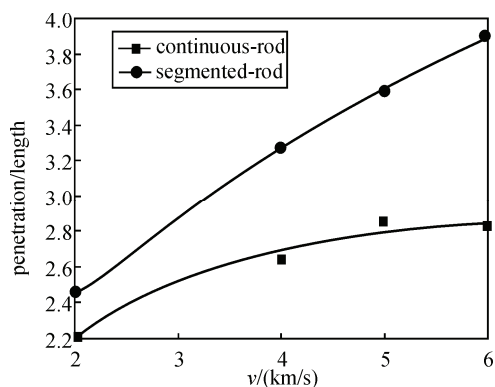


图 5 侵彻速度与侵彻深度的关系

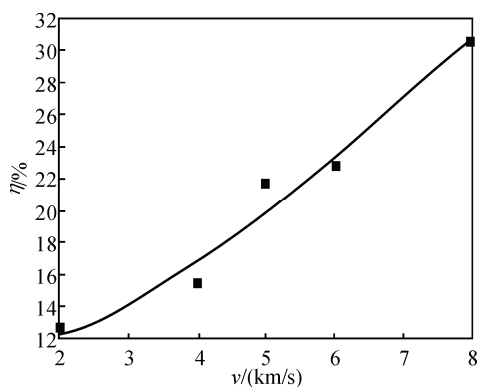


图 6 侵深增量和侵彻速度的关系

2.4.3 分段体间隔的影响

图 7 给出了在分段体长径比 $L/D=1$ 条件下，由 $N=5$ 个分段体组成的分段杆在不同间隔 S/D 条下，以 2 km/s 和 4 km/s 速度侵彻靶板的侵彻深度比较。

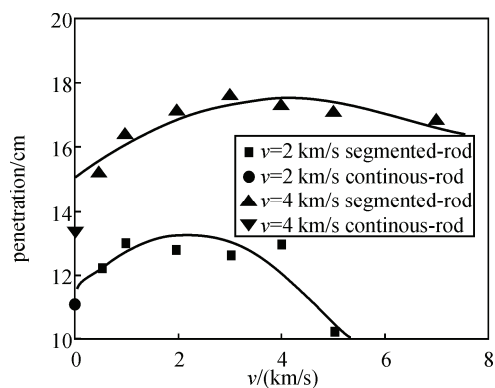


图 7 分段体间隔和侵深关系 ($L/D=1, N=5$)

由图可知：当初始速度一定时，侵彻深度随着间隔增加先是逐渐增大，超过某一间隔值时不再增大，而是随着间隔的增加逐渐下降。在合适的间隔时，分段弹的侵彻深度才大于连续弹的侵彻深度。如速度 2 km/s 时分段间隔 $S/D > 5$ 时，分段弹的侵

彻深度反而小于连续弹的侵深。可见分段弹对应一定撞击速度存在最佳间隔才使分段弹的侵彻效率最大，且最佳间隔随着速度增加而增大。

2.4.4 分段体数目的影响

表 4 列出了在 $v=4 \text{ km/s}$, $L/D=1$, $S/D=1$ 的情况下分段体数目由 1 增加到 5 对靶板侵彻数值仿真结果。

表 4 不同分段体数目的数值模拟结果

分段体数目	总侵彻深度/cm	各分段体侵彻深度/cm	侵彻效率
1	3.65	3.65	3.65
2	7.08	3.43	3.54
3	10.35	3.27	3.45
4	13.49	3.14	3.37
5	16.47	2.98	3.29

由表 4 可知：

1) 随着分段体数目的增加，侵彻深度也随之增加，但分段杆的侵彻效能随分段体数目增加而减少。

2) 在相同分段弹里每个分段体的侵彻能力是不相等的。第一个分段体产生的侵深最大，向后各个分段体逐渐减小。发生这种现象的原因是分段体撞击弹坑底部相对初始撞击速度是互有差异的。每一个分段体在撞击靶板或弹坑底部时，即便是相同的初始撞击速度，分段弹间隔不同，弹坑底部剩余侵彻速度也不一致，因此相对初始撞击速度就存在着较大的差异，这给侵彻深度带来较为明显影响。2 种叠加的物理效应对单段的侵彻能力有影响。一种效应是几何效应，如果弹坑变深，材料的径向流动就受到限制，靶的阻力便相应的增加。另一种效应是塑性变形和弹坑区内硬化所造成残余强度增强的综合结果。由于靶本身的硬度提高，后继分段体的侵彻能力便降低。

3 结论

利用数值模拟方法研究分段杆在 $2 \sim 6 \text{ km/s}$ 的速度范围内侵彻半无限厚混凝土靶的侵彻机理，获得分段体数目、间隔和撞击速度对侵彻效能的影响规律，结果表明， $2 \sim 6 \text{ km/s}$ 的速度范围内分段杆能明显的提高侵彻效能。研究结果对后续分段杆侵彻机理的研究具有借鉴意义。

理想分段弹对火炮发射条件、弹道条件要求非常苛刻，要想保持分段弹良好的同轴性，每个分段体都打在同一个靶坑内，并且每个分段体的攻角为零，这几乎是不可能实现。因此理想分段弹的研究主要靠数值计算模拟，同时还带来了分段弹的连接安装技术问题。下一步将继续开展弹体连接方式和分段体同轴性等相关问题的研究。

参考文献:

[1] 赵国志. 穿甲工程力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992: 106-107.

[2] Eichelberger R J. Experimental test of the theory of penetration by metallic jets[J]. Journal of Applied Physics, 1956, 27(1): 63-68.

[3] Kucher V. Multiple impacts on monolithic steel[R]//USA: U.S. Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, 1982: 1-43.

[4] Hohler V, Stilp A. Influence of the Length-to-Diameter Ratio in the range from 1 to 32 on the Penetration Performance of Rod Projectiles[C]//Proceedings of the 8th International Symposium on Ballistics. Orlando, Florida, USA: 1984: 23-25.

[5] BJerke T W, Zukas J A, Kinnsy K D. Penetration performance of disk shaped penetrators[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(2): 263-280.

[6] Frank K, Zook J. Chunky metal penetrators act like

constant mass penetrators[C]//Proceedings of the 12th International Symposium on Ballistics. San Antonio, Texas: 1990: 441-449.

[7] Darnel R. Scheffler. 2-D computer simulations of segmented penetrators impacting semi-infinite steel targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989, 9(1): 35-43.

[9] 沈培辉, 王晓鸣, 赵国志. 分段杆侵彻增量分析[J]. 弹道学报, 1999, 12(4): 82-86.

[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, 1997, 21(5): 445-448.

[11] 蒋建伟, 李禄荫, 万丽珍, 等. 分段杆式弹侵彻效率数值模拟研究[J]. 弹箭与制导学报, 2001, 21(2): 23-26.

[12] David L. Littlefield, Richard M. Garcia, Stephan J. Bless. The effect of offset on the performance of segmented penetrators[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23(1): 547-560.

(上接第 26 页)

$$\tan \beta = \frac{y}{x} (\beta \text{ 取为定值}) \tag{8}$$

$$\tan \alpha = \frac{dy_1}{dx} \tag{9}$$

式中: y 是弹簧的位移; y_1 是浮动机位移与弹簧位移之差。

所以
$$dy_1 = \frac{k \tan^2 \beta}{F_0} x dx \tag{10}$$

由初始条件 $y_1 = x = 0$, 对上式积分可得 B 槽的曲线为一段抛物线, 方程如下:

$$y_1 = \frac{k \tan^2 \beta}{2F_0} x^2 \tag{11}$$

4 机构仿真和结果分析

笔者给出浮动自动机弹簧机构的改良设计的总体方案, 并在此方案上建立了实体三维模型。为了进一步验证改良设计能够实现后坐力大小方向恒定, 通过将机构的三维模型导入到 ADAMS 中, 建立改良机构的虚拟样机, 对改良机构进行仿真分析。

仿真计算参照某型自动机后坐质量为 28 kg, 后坐长度为 62 mm, 采用改良机构可明显降低炮箱受力的最大峰值, 且受力大小近似恒定, 方向保持不变。自动机受力仿真结果如图 4 所示。可以看出在 0~0.002 5 s 时间段内, 炮箱受力为关于时间 t 的正比函数, 符合该机构启动阶段只受弹簧反力实际情况(压缩弹簧阶段); 0.002 5~0.038 0 s 为改良机构工作阶段, 受力恒定、方向保持不变; 0.038~0.040 s 为弹簧卸载阶段, 受力大小变为 0, 自动机开始下一发射击循环。

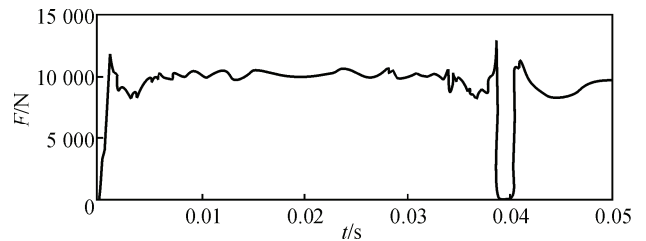


图 4 仿真结果

5 结束语

凸轮槽式缓冲机构以一种比较简单的结构实现了后坐力的最优化, 具有一定的应用前景, 为改良浮动自动机缓冲机构提供了一条新思路, 具有一定的参考意义。但笔者只是作了初步介绍和仿真分析, 在一些机构设计方面还需进一步优化, 例如可以在突笋上安装转动机构以减小磨损以及改良机构与火炮自动机的匹配问题等。

参考文献:

[1] 张相炎. 火炮设计理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 239-240.

[2] 王文记, 赵国豪, 赵勇, 等. 国内外高炮浮动技术的现状与发展趋势[J]. 火炮发射与控制学报, 2007(3): 69-72.

[3] 张相炎. 火炮自动机设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2010: 133-135.

[4] 张相炎, 高永锋, 刘宁. 一种火炮自动机浮动弹簧机构: 中国, CN101776417B[P]. 2013-8-14.

[5] 王华坤, 范元勋. 机械设计基础[M]. 南京: 南京理工大学出版社, 2000: 84-100.

[6] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 89-90.

[7] 沈韶华. 工程力学基础[M]. 北京: 经济科学出版社, 2010: 27-29.