第 25 卷 第 3 期
2011 年 6 月

高 压 物 理 学 报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

Vol. 25, No. 3
June, 2011

文章编号:1000-5773(2011)03-0251-10

分段弹侵彻效率的数值模拟研究*

邓云飞,张 伟,曹宗胜,陈 勇

(哈尔滨工业大学空间碎片高速撞击研究中心,黑龙江哈尔滨 150080)

摘要:采用 ANSYS-AUTODYN 数值模拟软件针对撞击速度在 1 500～3 500 m/s 内的平头分段杆侵彻效应进行研究,分析分段杆的侵彻效率和弹坑形状与分段杆的连接结构、间隔和撞击速度等参数的关系。结果表明,在一定的条件下,分段杆的侵彻效率比连续杆更优越。通过对公开报道的实验工况进行数值模拟,验证了数值模拟结果的有效性,对分段杆的侵彻机理研究及工程结构设计具有指导意义。

关键词:分段杆;弹体;侵彻;ANSYS-AUTODYN;数值模拟

中图分类号:O385 **文献标识码**:A

1 引 言

在工业和军事领域内,主要使用单一长杆作为侵彻体。在长杆体质量一定的情况下,其侵彻深度随着撞击速度和长径比的增加而增加。因此,增大长杆体的长径比和提高撞击速度是提高侵彻威力的主要技术途径。根据流体力学理论,对于大长径比的长杆体,其侵彻效率的极限值近似为 $P/L=(\rho_p/\rho_t)^{1/2}$,它将不再随撞击速度的提高而提高。因此,长杆体侵彻效率的提高受到了极大的限制。

早在 1956 年,Eichelberger 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。1984 年,Hohler 在其工作中发现,分段体的侵彻结果超过了流体力学的理论极限值。针对实验出现的现象,人们悟到了分段体侵彻的总效率比连续杆或许要大很多,这意味着分段杆可能具有更高的侵彻能力。此后,国内外研究人员对分段杆进行了一系列的研究[1]。

Holland、Charters 等[2-3]通过少量的实验,分析了连续杆弹和分段杆弹侵彻半无限厚钢靶的效率,发现分段杆弹的侵彻效率比相同质量和直径的连续杆弹提高了 50%～60%。Tate[4]讨论了分段杆的优势和劣势,并且提出了一个简单的模型,用于计算各分弹体的最小间隔和最大间隔,以免发生碰撞和最大化分段杆弹撞击效应。Scheffier[5]通过一系列的数值模拟,在比较狭窄的速度范围内,分析了分弹体间隔和弹体长径比等设计参数对侵彻效率的影响。Scheffier[6]通过数值模拟,探讨了分段杆弹的优势和劣势。Orphal[7]通过实验和数值模拟,表明非理想分段杆弹的侵彻效率较连续杆弹具有很大的提高,同时指出分段杆弹侵彻效率的提高取决于弹速、分弹体间隔和弹体长径比。Wang[8]通过实验和分析模型,在相对狭小的速度范围内,对带铝管外套结构和玻璃钢填充物的分段杆弹的侵彻效率进行了研究,表明存在一个转变速度,大于此速度,分段杆弹的侵彻效率高于连续杆弹。Aly[9]通过数值模拟,研究了带铝管外套结构和玻璃钢填充物分段杆弹的结构设计参数对侵彻效率的影响,并且分析了弹速对侵彻效率的影响,同时研究了弹坑形状和弹坑直径随设计参数的变化。

相对于数量有限的分段杆研究,包括实验、数值模拟和分析模型,主要集中在理想分段杆弹上,并且弹速和分段弹体间隔的范围比较窄,在公开的文献中对于比较系统的非理想杆弹的研究报道特别有限。

实验研究存在数据点有限和难以进行全面系统分析等不足;理论分析的精度及分析模型参数也存

* **收稿日期**:2010-03-03;**修回日期**:2010-04-18

作者简介:邓云飞(1982—),男,博士研究生,主要从事穿甲力学及冲击动力学研究. E-mail:dengyunfei6@eyou.com

在不足。而采用数值模拟分析能够弥补以上两者的不足，从而开展系统深入的研究。

本工作针对大速度范围内的钨合金分段杆侵彻半无限厚钢靶(Steel 4340)问题，使用显式动力学软件 ANSYS AUTODYN6.1 的 SPH 求解器，选取不同的材料模型，对公开报道的 Charters 的实验工况[2-3]进行模拟，通过选取文献中的实验数据，验证计算结果的有效性，对计算模型进行标定校核；在此基础上，研究分段杆弹的连接结构、间隔和撞击速度等参数对侵彻效率和弹坑形状的影响。

2 数值计算模型

2.1 基本假设

整个贯穿过程为绝热过程，不计及空气影响，不考虑重力作用，弹丸和靶板的初始应力为零。

2.2 弹靶结构模型

所要研究的弹体结构包括 4 种：连续杆(CLD)、理想分段杆(ISG)、带尼龙连接杆的非理想分段杆(ISNG)和带钨合金连接杆的非理想分段杆(TARSG)，如图 1 所示。各分弹体的直径为 5.54 mm，长径比(L/D)为 1；分弹体的间隔与直径比(S/D)分别为 1、2、3、4 和 5；ISNG 尼龙连接杆的直径为5.54 mm；TARSG 连接杆的直径为 1.7 mm；所有圆柱体靶体的直径和长度均为 200 mm，相关参数如表 1 所示。质量无量纲常数 C_m 为分段杆质量与连续杆质量之比，C_m 为

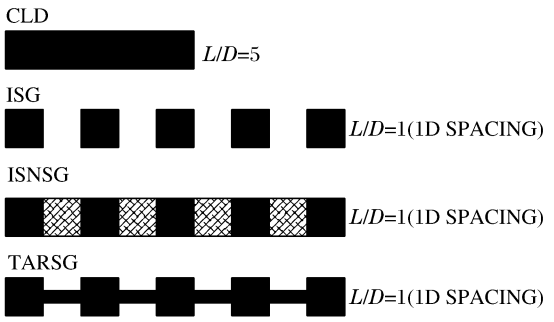


图 1 弹的结构形式

Fig. 1 Several schematic configurations of penetrators involved

$$C_m = m_T/m_C \tag{1}$$

式中：m_T 为分段杆的质量，m_C 为连续杆(CLD)的质量。例如，TARSG，$S/D=3$ 时，TARSG 的质量为 $m_T=13.91$ g，CLD 的质量为 $m_C=11.35$ g，故 $C_m=13.91/11.35=1.23$。

由于弹靶系统具有轴对称的性质，则可建立 2D 轴对称模型。数值计算结果表明，弹体和靶体材料单元尺寸选取为 0.5 mm×0.5 mm 时，数值计算结果和参考文献中的实验结果非常接近。

表 1 弹体结构参数

Table 1 The parameters of penetrators

Penetrator type	S/D	Rod length/(mm)	Mass/(g)	C_m
CLD	0	27.70	11.35	1
ISG	1	49.86	11.35	1
	2	72.02	11.35	1
	3	94.18	11.35	1
	4	116.34	11.35	1
	5	138.50	11.35	1
ISNG	1	49.86	11.96	1.05
	2	72.02	12.57	1.11
	3	94.18	13.18	1.16
	4	116.34	13.78	1.21
	5	138.50	14.39	1.27
TARSG	1	49.86	12.20	1.08
	2	72.02	13.06	1.15
	3	94.18	13.91	1.23
	4	116.34	14.77	1.30
	5	138.50	15.62	1.38

2.3　弹靶结构的数值模型

弹体、靶体和钨合金连接杆采用线性状态方程,Nylon 连接杆采用冲击状态方程,所有材料都采用 von Mises 强度模型。弹靶材料的相关参数[2,10]如表 2 所示。

表 2　弹靶的材料参数以及 AUTODYN 的相关输入参数

Table 2　Material constants of the target and projectile

Material	Density /(g/cm³)	Tensile limit /(GPa)	Shear modulus /(GPa)	Yield stress /(GPa)	Bulk modulus /(GPa)	Grüneisen coefficient	C_1 /(km/s)	S_1
W-10 Tungsten	17.0	−2.0	160.514	0.6467	311.3			
4340 Steel	7.84	−2.5	75.864	1.00	183			
Nylon	1.14	−1.0	3.68	0.05		0.87	2.29	1.63

2.4　数值模拟结果有效性的验证

由于相关实验的复杂性和费用比较高,故可用作数值模拟结果的验证数据非常有限。在本研究中选取文献[2-3]中 ISG、CLD 和 TARSG 的实验数据作为有效性验证工况:TARSG,$S/D=1$,$v=2\,520$ m/s;$S/D=2$,$v=2\,530$ m/s;ISG,$S/D=1$,$v=2\,550$ m/s;CLD,$v=2\,580$ m/s。图 2 给出了模拟结果与实验结果的对比。由图 2 可看出,数值模拟结果与实验结果非常接近,从而验证了计算结果的可靠性,由此表明,本研究中建立的数值模型,能够较好地模拟钨合金分段杆侵彻半无限厚钢靶的问题。

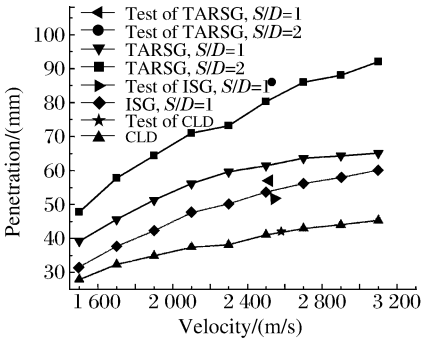


图 2　数值模拟结果和实验结果对比

Fig. 2　Comparison of the results from calculations and test by Charters[2-3]

3　计算结果和分析

3.1　理想分段杆

数值模拟过程表明,如果 S/D 太小,尤其在高速时,可能前一个分弹体还没侵彻完,后一个分弹体和前一个分弹体发生碰撞,一方面,可能造成后一个分弹体速度降低和弹体破碎,降低后一个分弹体的侵彻效率;另一方面,前一个分弹体还没侵彻耗尽而造成弹体破碎,即使分弹体侵彻耗尽,还存在侵彻续流效应,弹坑会继续加深,而且速度越高,续流效应越显著,但是如果 S/D 太小,侵彻的大部分续流效应不能发挥,这些都会造成 ISG 侵彻效率的降低。如图 3(a)和图 3(b)所示,当第一个分弹体还没有完全侵彻耗尽,第二个分弹体已经接触到第一个分弹体的尾部,这必然会造成第一个和第二个分弹体侵彻效率的降低,在其它分弹体之间也发生了同样的现象。Tate[7]进行了相关的研究和分析,并提出了解析模型,可求解出避免分弹体发生碰撞的最小 S/D。

随着 S/D 增大,当弹速相同时,分弹体和靶体反溅的小碎片对后续分弹体的损坏增大。当 S/D 不超过某一极限值时,随着 S/D 增大,各分弹体的续流效应也增大,而且速度越高,续流效应增大越明显,但是 S/D 超过极限值后,S/D 的增大并不能使续流效应继续增大。当 S/D 比较大时,反溅的弹体和靶体碎片比较多,当前一个分弹体侵彻耗尽,后一个分弹体没有及时跟进侵彻靶体,靶体和弹体碎料可能造成弹坑的堵塞,影响后一个分弹体的侵彻效率。当 S/D 很大时,随着 S/D 增大,续流效应增大较小甚至不会增大,相反小碎片破坏作用以及碎料堵塞效应增大,故侵彻性能可能降低。

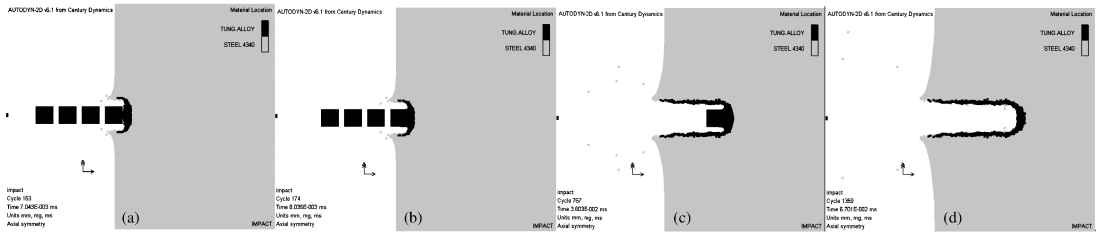


图 3 理想分段杆弹的侵彻过程

Fig. 3 Penetration process of ISG

表 3 给出了 ISG 和 CLD 的模拟结果，可看出速度和 S/D 对侵彻效率 P/L（P 是侵彻深度；L 对于 CLD 为弹体长度，对于 ISG 为分弹体长度之和）的影响，也可看出 ISG 和 CLD 相比的优劣势。

从表 3 可看出，速度越高，ISG 和 CLD 的侵彻效率越好，而且速度越高，ISG 的侵彻效率比 CLD 提高越大。当 $S/D=1,2,3$，$v\geqslant 1\,500$ m/s 时，ISG 的侵彻效率高于 CLD；当 $S/D=4,5$，$v\geqslant 1\,900$ m/s 时，ISG 的侵彻效率高于 CLD。

表 3 ISG 和 CLD 的数值模拟侵彻效率对比

Table 3 The comparison of predicted results between ISG and CLD

v/(m/s)	CLD	ISG				
	$S/D=0$	$S/D=1$	$S/D=2$	$S/D=3$	$S/D=4$	$S/D=5$
1 500	1.01	1.14	1.15	1.01	0.96	0.89
1 700	1.17	1.36	1.27	1.21	1.07	1.06
1 900	1.26	1.53	1.55	1.47	1.37	1.40
2 100	1.35	1.72	1.73	1.65	1.67	1.70
2 300	1.38	1.81	1.95	1.86	1.95	1.82
2 500	1.48	1.94	2.04	2.08	2.10	1.88
2 700	1.55	2.03	2.18	2.18	2.17	1.82
2 900	1.59	2.09	2.29	2.31	2.45	2.41
3 100	1.64	2.17	2.38	2.42	2.49	2.48
3 300	1.68	2.20	2.45	2.50	2.66	2.64
3 500	1.70	2.30	2.54	2.60	2.76	2.68

ISG 存在转换速度 v_m，表 3 中 $v_m=1\,900$ m/s。随着 S/D 增大，侵彻效率有两种变化趋势：当 $v<v_m$ 时，侵彻效率随 S/D 的增大而降低；当 $v\geqslant v_m$ 时，侵彻效率随 S/D 的增大先上升后下降，S/D 存在最佳值，S/D 小于该最佳值时，侵彻效率随 S/D 的增大而提高，当 S/D 大于该最佳值时，侵彻效率随 S/D 的增大而降低。S/D 最佳值随速度的增大而增大，1 900 m/s$\leqslant v\leqslant$2 300 m/s 时，S/D 最佳值是 2；2 500 m/s$\leqslant v\leqslant$2 700 m/s 时，S/D 最佳值是 3；$v\geqslant$2 900 m/s 时，S/D 最佳值是 4。因此，最佳 S/D 取决于速度。

（1）当速度小时，续流效应不明显，随着 S/D 增大，续流效应小于弹坑堵塞效应和小碎片损坏作用之和，故侵彻效率降低。例如 $v=1\,500$ m/s 和 $v=1\,700$ m/s 时，随着 S/D 增大，侵彻效率降低。

（2）当速度不大时，随着 S/D 增大，续流效应可能和弹坑堵塞效应及小碎片损坏作用之和比较接近，故侵彻效率变化不大。例如 $v=2\,100$ m/s 和 $v=2\,300$ m/s 时，随着 S/D 增大，侵彻效率变化不大，甚至上下波动。

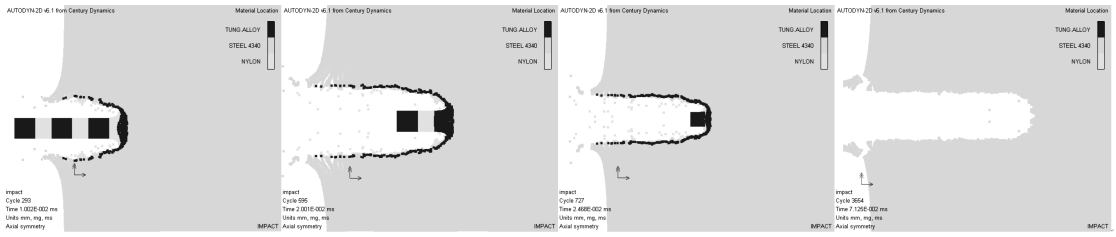
(3) 当速度较大时,续流效应较明显,当 S/D 不超过最佳值时,随着 S/D 增大,续流效应大于小碎片损坏作用和弹坑堵塞效应之和,故侵彻效率提高;S/D 超过最佳值时,续流效应小于小碎片损坏作用和弹坑堵塞效应之和,故侵彻效率降低。例如,当 $v=2\,900$ m/s 时,随着 S/D 增大,侵彻效率先增大后减小。

从上面的分析可知道,多种因素综合影响 ISG 的侵彻效率,这些影响因素的大小取决于 ISG 的 S/D和速度。总体来说,ISG 侵彻效率随着 S/D 的增大有两种变化趋势,一是低速时,侵彻效率下降;二是高速时,侵彻效率先上升后下降。由此可见,ISG 的侵彻效率取决于速度和 S/D。

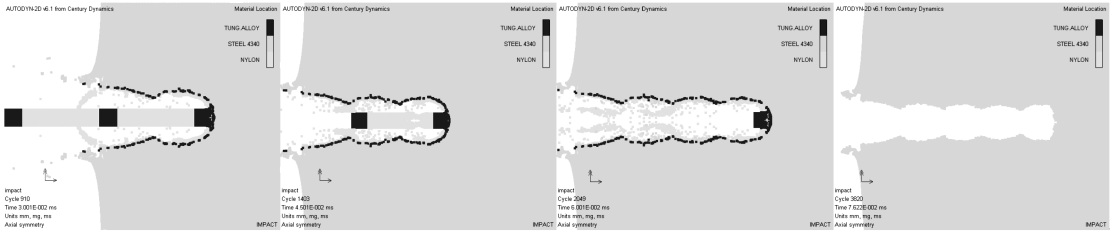
3.2　带尼龙连接杆的非理想分段杆

由上面的分析可知,随着 S/D 增大,弹体和靶体反溅的小碎片对后续弹体的损坏和弹坑堵塞效应也增大,为了避免小碎片对后续弹体的损坏和弹坑堵塞效应,分弹体利用密度和屈服强度较低的尼龙杆连接。ISNG 的典型侵彻过程如图 4 所示,其中图 4(a)和图 4(b)中的最后一幅图为最终弹坑形状图。从图 4 可看出,即使是在高速和大 S/D 时,最后一个分弹体也只是发生轻微的损坏,说明尼龙连接杆在很大程度上阻止了碎片对后续弹体的损坏。

尼龙连接杆对 ISNG 侵彻深度的提高有着显著影响,低速和小 S/D 时,尼龙连接杆可有效地抑制弹坑被弹体和靶体残渣堵塞;高速和大 S/D 时,可避免小碎片对后续弹体的损坏,如图 4 所示。同时,尼龙连接杆也侵彻靶体,只不过侵彻深度很小。但是,尼龙连接杆也会降低后续弹体的速度和增大弹坑直径,对 ISNG 侵彻深度产生消极影响。



(a) S/D=1, v=3 500 m/s



(b) S/D=5, v=3 500 m/s

图 4　ISNG 的侵彻过程

Fig. 4　Penetration process of ISNG

ISNG 的侵彻效率 P/L 见表 4,需要注意的是,此时 L 为各分弹体长度之和,即等于连续杆长度,不考虑尼龙杆连接杆长度。从表 3 和表 4 可看出,ISNG 的侵彻效率明显大于 ISG 和 CLD,而且 S/D 越大和速度越高,侵彻效率提高越大。

ISNG 有两个转变速度 v_{m1} 和 v_{m2},其中 $v_{m1}=1\,700$ m/s、$v_{m2}=2\,900$ m/s。随着 S/D 增大,侵彻效率有 3 种变化趋势:当 $v<v_{m1}$ 时,侵彻效率随 S/D 的增大而降低;当 $v_{m1}\leqslant v<v_{m2}$ 时,侵彻效率随 S/D 的增大先上升后降低,S/D 存在最佳值,当 S/D 小于该最佳值时,侵彻效率随 S/D 的增大而提高,当 S/D 大于该最佳值时,侵彻效率随 S/D 的增大而降低,而且最佳 S/D 值随速度的增大而增大;当 $v\geqslant v_{m2}$ 时,侵彻效率随 S/D 的增大而提高。

表 4 ISNG 侵彻效率 P/L 和侵彻效率 E_m 比较

Table 4 Difference of the predicted results between penetration depth and penetration efficiency

v/(m/s)	CLD	P/L (ISNG)					E_m (ISNG)				
	$S/D=0$	$S/D=1$	$S/D=2$	$S/D=3$	$S/D=4$	$S/D=5$	$S/D=1$	$S/D=2$	$S/D=3$	$S/D=4$	$S/D=5$
1 500	1.01	1.27	1.24	1.13	1.01	0.97	1.21	1.12	0.97	0.83	0.77
1 700	1.17	1.49	1.54	1.52	1.30	1.32	1.42	1.39	1.31	1.07	1.04
1 900	1.26	1.67	1.75	1.75	1.72	1.56	1.59	1.58	1.51	1.41	1.23
2 100	1.35	1.81	1.98	2.02	1.87	1.92	1.72	1.79	1.74	1.54	1.51
2 300	1.38	1.95	2.12	2.26	2.28	2.22	1.85	1.92	1.95	1.88	1.75
2 500	1.48	2.05	2.28	2.42	2.50	2.49	1.95	2.06	2.08	2.06	1.97
2 700	1.55	2.18	2.39	2.58	2.50	2.72	2.06	2.15	2.22	2.06	2.14
2 900	1.59	2.30	2.45	2.70	2.74	2.86	2.19	2.21	2.32	2.29	2.26
3 100	1.64	2.18	2.55	2.78	2.95	2.98	2.07	2.30	2.34	2.43	2.35
3 300	1.68	2.29	2.62	2.91	3.09	3.14	2.17	2.36	2.51	2.54	2.47
3 500	1.70	2.36	2.71	3.04	3.19	3.32	2.24	2.44	2.62	2.63	2.62

动能弹侵彻靶体，动能是影响其侵彻效率的一大因素，因此，在比较动能弹侵彻效率的时候必须考虑弹体动能的变化。在上面的分析中，用侵彻深度与弹体总长度的比 P/L 作为分段杆的侵彻效率，没有考虑由于尼龙连接杆的存在而导致总动能的增加，不能提供一个准确的比较标准。可利用 P/L 与质量无量纲常数 C_m 的比(E_m)作为侵彻效率，以提供一个准确的比较标准，E_m 为

$$E_m = (P/L)/C_m \tag{2}$$

式中：L 为分段杆分单体长度之和，C_m 值如表 1 所示。值得注意的是，理想分段杆和连续杆的所有 C_m 为 1，故其两种侵彻效率 P/L 与 E_m 是相等的。E_m 不为 1 时，P/L 与 E_m 的差别如表 5 所示，表中给出的是 $v=2\,500$ m/s 时，不同 S/D 的 ISNG 侵彻效率，如果用 P/L 为侵彻效率，S/D 为 5 的 ISNG 侵彻效率高于 S/D 为 3 和 4 的 ISNG 侵彻效率，但是如果用 E_m 作为侵彻效率，则 S/D 为 5 的 ISNG 侵彻效率低于 S/D 为 3 和 4 的 ISNG 侵彻效率。

表 5 P/L 和 E_m 两种侵彻效率标准的区别

Table 5 Difference between P/L and E_m

S/D	Length of segments/(mm)	Length of spacers/(mm)	Penetration depth/(mm)	Penetration efficiency (P/L)	Dimensionless constant (C_m)	Penetration efficiency (E_m)
1	27.7	22.16	56.79	2.05	1.05	1.95
2	27.7	44.32	63.24	2.28	1.11	2.06
3	27.7	66.48	66.93	2.41	1.16	2.08
4	27.7	88.56	69.28	2.50	1.21	2.07
5	27.7	110.80	69.06	2.49	1.27	1.96

ISNG 的 E_m 值见表 4。从表 3 和表 4 可看出，ISNG 的侵彻效率(E_m)和 ISG 的侵彻效率对比发生了变化，ISNG 不再具有优势，在大多数情况下，ISNG 的侵彻效率甚至不如 ISG 的侵彻效率，只是在低速且 S/D 较小时，ISNG 的侵彻效率略高于 ISG。此时，ISNG 只有一个转变速度为 2 100 m/s。侵彻效率随 S/D 的增大有两种变化趋势：$v<2\,100$ m/s 时，侵彻效率随 S/D 增大而降低；$v\geqslant 2\,100$ m/s 时，侵彻效率随 S/D 增大先上升后降低。S/D 仍然存在最佳值，最佳值随速度的增加而增大，例如 $v=2\,100$ m/s

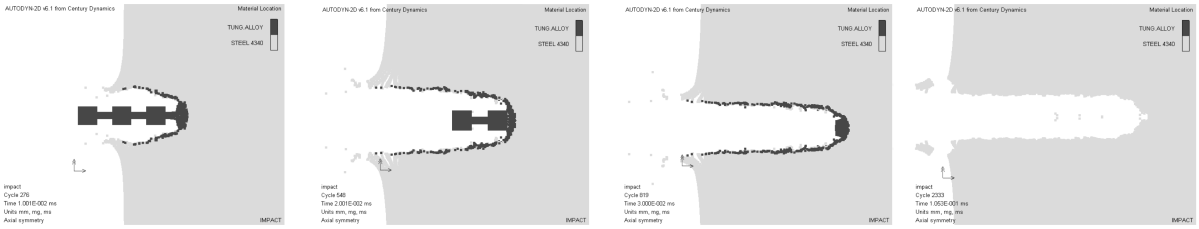
时,S/D的最佳值为 2;2 300 m/s≤v≤2 900 m/s,S/D 的最佳值为 3;v≥3 100 m/s 时,S/D 的最佳值为 4。

研究结果表明,即使考虑尼龙连接杆增加的动能,ISNG 的侵彻效率在大多数情况下也高于 CLD,而且速度越高,ISNG 的侵彻效率提高越显著。当 S/D=1,2,v≥1 500 m/s 时,ISNG 的侵彻效率高于 CLD;当 S/D=3、v≥1 700 m/s 时,ISNG 的侵彻效率高于 CLD;当 S/D=4、v≥1 900 m/s 时,ISNG 的侵彻效率高于 CLD;当 S/D=5,v≥2 100 m/s 时,ISNG 的侵彻效率高于 CLD。

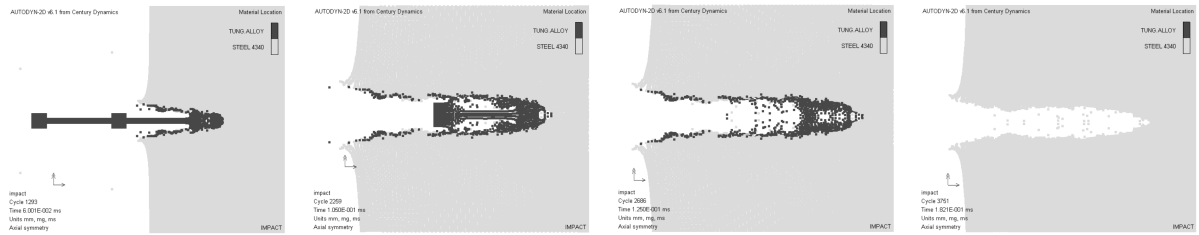
3.3　带钨合金连接杆的非理想分段杆

上述研究结果表明,由于尼龙连接杆的侵彻效率低,所以考虑连接杆质量时,ISNG 的侵彻效率在大多数情况下不如 ISG。因此,在这里,TARSG 采用同轴的钨合金杆作为连接件,具体结构形式如图 1 所示。

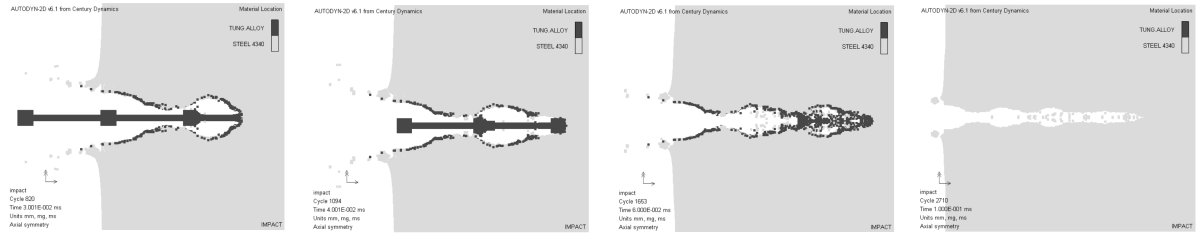
ISNG 的典型侵彻过程如图 5 所示,其中图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)中的最后一幅图为最终弹坑形状图。从图 5 可看出,同一速度下,S/D 越大,弹坑直径越小,侵彻深度越大,因为动能与弹坑体积成正比,当动能一定时,弹坑直径与弹坑深度成反比。同时,S/D 越大和速度越高,连接杆和分弹体越容易碎裂。例如,在图 5(a)中,即使速度较高,但由于 S/D 较小,连接杆和分弹体也没有发生损坏;在图 5(b)中,虽然速度较低,但是由于 S/D 较大,连接杆和弹体所受的轴向力很容易超过材料的拉伸强度,连接杆和分弹体发生碎裂,从图中可以看出,TARSG 后面的连接杆和弹体碎裂现象比较明显;在图 5(c)中,由于速度和 S/D 都较大,故 TARSG 后面的连接杆和分弹体的碎裂特别严重。虽然连接杆和分弹体碎裂比较严重,但是由于速度高,并且钨合金的密度特别高,侵彻能力较强,故 TARSG 的侵彻效率依然特别高。



(a) S/D=1, v=3 500 m/s



(b) S/D=5, v=1 500 m/s



(c) S/D=5, v=3 500 m/s

图 5　TARSG 的侵彻过程

Fig. 5　Penetration process of TARSG

利用 AUTODYN 的 SPH 求解器计算的 TARSG 侵彻效率如表 6 所示，表中的结果考虑了连接杆导致的动能增加，具体方法如同“3.2 节”中所述。从表 3、表 4 和表 6 可看出，与 CLD、ISG 和 ISNG 相比，TARSG 的侵彻效率有很大的提高，而且，速度越高，侵彻效率提高越大。例如，TARSG 和 CLD 相比，当 $v=1\,500$ m/s、$S/D=1$ 时，侵彻深度增加 54.2%，如果考虑连接杆质量的增加，虽然质量增加了 7.6%，但是侵彻效率提高 42.6%；当 $v=3\,500$ m/s、$S/D=1$ 时，侵彻深度增加 66.9%，如果考虑连接杆质量的增加，虽然质量增加 7.6%，但是侵彻效率提高 55.3%；当 $v=1\,500$ m/s、$S/D=5$ 时，侵彻深度增加 102.2%，如果考虑连接杆质量的增加，虽然质量增加 37.7%，但是侵彻效率提高 46.5%；当 $v=3\,500$ m/s、$S/D=5$ 时，侵彻深度增加 237.1%，如果考虑连接杆质量的增加，虽然质量增加 37.7%，但是侵彻效率提高 144.7%。

数值计算结果表明，TARSG 侵彻效率转变速度为 2 900 m/s，侵彻效率随 S/D 增大有两种变化趋势：$v<2\,900$ m/s 时，侵彻效率先上升后下降，S/D 有一个最佳值，S/D 最佳值为 4；$v\geqslant 2\,900$ m/s 时，侵彻效率呈上升趋势。值得注意的是，当 $S/D=5$、$2\,300\ \text{m/s}\leqslant v\leqslant 2\,500$ m/s 时，TARSG 的侵彻效率不稳定，因为这时影响侵彻效率的消极因素和积极因素比较接近。

表 6 由 AUTODYN 计算的侵彻效率 E_m

Table 6 Predicted results of penetration efficiency obtained by AUTODYN

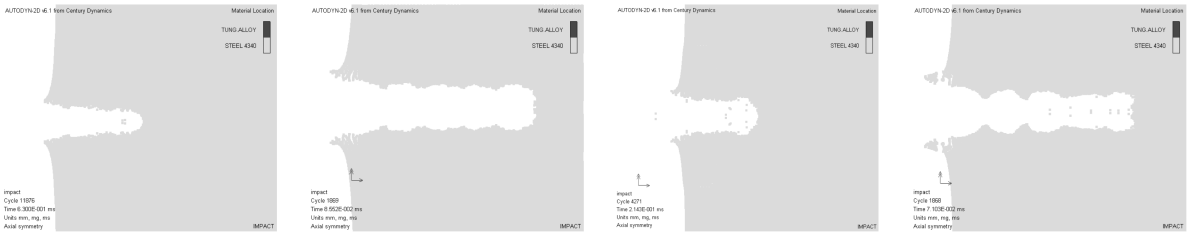
v/(m/s)	CLD	TARSG				
	$S/D=0$	$S/D=1$	$S/D=2$	$S/D=3$	$S/D=4$	$S/D=5$
1 500	1.01	1.44	1.57	1.50	1.56	1.48
1 700	1.17	1.64	1.90	1.94	1.98	1.90
1 900	1.26	1.84	2.17	2.35	2.38	2.31
2 100	1.35	2.04	2.42	2.62	2.75	2.80
2 300	1.38	2.16	2.61	3.04	3.20	3.10
2 500	1.48	2.26	2.73	3.22	3.45	3.57
2 700	1.55	2.36	2.81	3.31	3.61	3.49
2 900	1.59	2.45	2.91	3.49	3.82	3.99
3 100	1.64	2.51	2.99	3.47	3.66	4.19
3 300	1.68	2.56	3.05	3.67	4.13	4.16
3 500	1.70	2.64	3.14	3.70	4.02	4.16

3.4 弹坑形状影响参数的研究

分段杆弹的弹坑形状影响因素主要有弹速、连接形式和 S/D。如图 4、图 5 和图 6 所示，在小 S/D 和低速时，弹坑形状是比较平滑的，在大 S/D 和高速时，弹坑形状呈糖葫芦状，而且速度越高和 S/D 越大，弹坑糖葫芦形状越明显。例如 $S/D=1$ 时，弹坑形状呈平滑状；当 $S/D=2\sim5$、$v\leqslant 2\,300$ m/s 时，弹坑形状呈平滑状；当 $S/D=2\sim5$、$v\geqslant 2\,500$ m/s 时，弹坑形状呈糖葫芦状。

弹坑形状之所以呈现糖葫芦状，是因为分弹体之间的连接件侵彻效率和分弹体侵彻效率不相同，如 ISG，分弹体之间没有连接件，当一个分弹体侵彻耗尽后，后一个分弹体需要一定时间才能开始侵彻，这就导致两个分弹体侵彻时间之间存在一个侵彻空档时区，在这个空档时区，主要靠前一个分弹体的续流作用侵彻靶体，必然会导致弹坑直径减小。如果 S/D 很小，这个侵彻空档时区很小，故弹坑几乎看不到糖葫芦状。对于 ISNG 和 TARSG 的连接杆，ISNG 分弹体之间的尼龙侵彻效率远不如钨合金的侵彻效率，TARSG 连接杆的直径是弹体直径的 31.5%，故连接杆的侵彻效率不如弹体，由此可见，ISNG 和

TARSG 在侵彻过程中会出现侵彻减弱时区,减弱时区的出现会导致弹坑直径减小,从而使弹坑呈糖葫芦状。糖葫芦形状弹坑的出现,会导致弹坑平均直径的减小,当动能一定时,弹坑直径与弹坑深度成反比,因此,弹坑平均直径的减小会使弹坑深度增大,分段杆弹侵彻靶体出现糖葫芦状弹坑时,侵彻效率大于连续杆弹。



(a) S/D=2, v=1 500 m/s　(b) S/D=2, v=2 500 m/s　(c) S/D=5, v=1 500 m/s　(d) S/D=5, v=3 500 m/s

图 6　ISG 最终弹坑形状图

Fig. 6　Penetration profiles of ISG

4　结　论

采用 ANSYS-AUTODYN 数值模拟软件,针对撞击速度在 1 500～3 500 m/s 内的平头分段杆正撞击靶体的侵彻效应进行了研究,获得了分弹体的连接结构、间隔、撞击速度等参数对侵彻效率和弹坑形状的影响规律,分析得出了分段杆在研究速度范围内的最佳分段间隔。

采用质量无量纲常数 C_m,用以考虑连接杆引起的动能增加,提供一个准确的侵彻效率 E_m。数值计算结果表明,在大多数情况下,尤其是高速和大 S/D 时,TARSG 的侵彻效率最好,然后依次是 ISG、ISNG、CLD。研究发现,速度越高,分段杆的侵彻效率较连续杆侵彻效率提高越大。此外,分段杆侵彻效率随 S/D 的增大有几种变化趋势:当低速时,呈现降低或先上升后降低趋势;中高速时,呈现先上升后降低或上升趋势,这取决于分段杆弹的连接形式和速度,如 ISG 和 ISNG 在低速时是降低趋势,在高速时是先上升后降低趋势;而 TARSG 在中低速时是先上升后降低趋势,在高速时是上升趋势。因此,分段杆存在侵彻效率转变速度和最佳 S/D,最佳 S/D 取决于弹速和连接形式,侵彻效率取决于 S/D 和弹速。

同时,研究了分段杆设计参数和速度对弹坑形状的影响,研究结果表明,在小 S/D 和低速时,弹坑是平滑形状;在大 S/D 和高速时,弹坑是糖葫芦形状。以上是在理想条件下研究分段杆弹获得的结论,可指导实际工程中分段杆弹的设计和应用。

References:

[1] Shen P H, Wang X M, Zhao G Z. An Analysis on the Penetration Increment of the Segmented Rods [J]. Journal of Ballistics, 1999, 11(4): 82-86. (in Chinese)
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):82-86.

[2] Holland P M, Gordon J T, Menna T L, et al. Hydrocode Results for the Penetration of Continuous, Segmented and Hybrid Rods Compared with Experiments [J]. Int J Impact Eng, 1990, 10: 241-250.

[3] Charters A C, Menna T L, Piekutowski A J. Penetration Dynamics of Rods from Direct Ballistic Tests of Advance Armor Components at 2-3 km/s [J]. Int J Impact Eng, 1990, 10: 93-106.

[4] Tate A. Engineering Modelling of Some Aspects of Segmented Rod Penetration [J]. Int J Impact Eng, 1990, 9: 327-341.

[5] Scheffier D R, Zukas J A. Numerical Simulation of Segmented Penetrator Impact [J]. Int J Impact Eng, 1990, 10: 487-497.

[6] Scheffier D R. Numerical Simulation of Segmented Penetrator Impact [J]. Int J Impact Eng,1990,10:487-497.
[7] Orphal D L,Franzen R R. Penetration Mechanics and Performance of Segmented Rods against Metal Targets [J]. Int J Impact Eng,1990,10:427-438.
[8] Wang X M,Zhao G Z,Shen P H,et al. High Velocity Impact of Segmented Rods with an Aluminum Carrier Tube [J]. Int J Impact Eng,1995,17:915-923.
[9] Aly S Y,Li Q M. Numerical Investigation of Penetration Performance of Non-Ideal Segmented-Rod Projectiles [J]. Trans Tianjin Univ,2008,14(6):391-395.
[10] AUTODYN Theory Manual Revision 4.3 [Z]. Pittsburgh:Century Dynamics Inc,2005:366-368.

Numerical Investigation of Penetration Performance of Segmented Rods Penetration into Steel Target

DENG Yun-Fei,ZHANG Wei,CAO Zong-Sheng,CHEN Yong

(*Hypervelocity Impact Research Center,Harbin Institute of Technology,Harbin* 150080,*China*)

Abstract: The penetration performance of blunt segmented rods was studied with numerical simulations by using hydro code ANASYS-AUTODYN systematically,and the dependence of penetration performance on the connect configuration,shape,spacing distance,impact velocity of segmented rods was also investigated. The numerical results indicated that penetration performance of the segmented rods is significantly greater than the parent continuous rods under some conditions. Simulations on the tests from open literature validate the present work,which can be used to guide the optimal design of weaponry segmented-rod projectiles.

Key words: segmented rods; projectile; penetration; ANSYS-AUTODY; numerical simulation