

文章编号: 1001-1455(2008)04-0378-06

# 可控旋转离散杆空间运动分析\*

孙传杰, 路中华, 卢永刚, 温宇, 孙益

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 基于理想爆轰假设和刚体运动学原理, 建立了可控旋转离散杆空间运动模型。对不同尺寸、斜角的杆条进行空间运动状态分析, 并与试验结果进行比较, 结果表明该模型能较好地描述可控旋转离散杆空间运动状态, 为可控旋转离散杆战斗部的设计提供参考。

**关键词:** 飞行力学; 运动模型; 瞬时爆轰; 可控旋转离散杆

**中图分类号:** O313; TJ410.3

**国标学科代码:** 130·1080

**文献标志码:** A

## 1 引言

可控旋转离散杆战斗部作为目前防空战斗部的重要类型之一, 由于兼顾了连续杆战斗部(连续切割)和离散杆战斗部(初速高)的优点而备受国内外关注, 已应用于部分新型防空战斗部上, 目前形成型号并已装备部队的有俄罗斯 P-73E、改进型 P-77 和美国的 AIM-9L 等<sup>[1]</sup>。

可控旋转离散杆战斗部的作用原理是, 通过杆条与战斗部轴线斜置一小的初始角度(即斜角), 在爆轰驱动过程中, 杆条两端形成不同的速度矢量, 使得杆条在径向飞散的同时, 伴随侧向旋转运动。随着杆条不断旋转调整姿态, 杆束将在特定杀伤半径处形成一个准连续的“杀伤环”, 产生类似于连续杆的切割作用<sup>[2-3]</sup>, 如图 1 所示。

可控旋转离散杆战斗部研究的关键在于如何精确控制杆条的运动姿态, 以实现目标的最佳毁伤。因此对杆条的空间运动状态开展研究十分必要。一方面可作为斜角设计的基础; 另一方面可进一步对杆条在空间不同距离上的杀伤性能进行分析, 为优化设计指标提供参考。

目前国内有关单位已经开始对可控旋转离散杆战斗部开展部分探索性研究<sup>[1-2]</sup>, 但其工作主要侧重于对特定条件下的斜角设计研究, 而对杆条的空间运动状态没有明确的描述和分析, 对影响杆条空间运动的因素也未开展研究, 因此难以进一步指导可控离散杆条的优化设计。

本文中, 结合文献[1-2]的工作, 采用理想爆轰条件和刚体运动学理论, 将杆条的空间运动分解为质心的平动和绕质心的转动, 并分别考虑气动阻力引起的平动衰减和旋转衰减, 建立杆条空间运动模型。最后开展静爆试验, 对比理论分析结果和试验数据, 分析影响杆条空间运动的相关因素。

## 2 模型推导

### 2.1 假设条件

基本假设如下:

(1) 忽略炸药起爆和爆轰波传播过程, 即炸药瞬时完成爆轰过程, 且杆条瞬时达到初速状态;

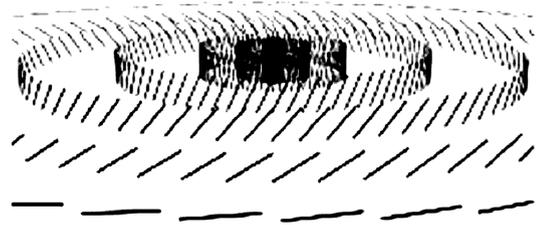


图 1 可控旋转离散杆的工作原理

Fig. 1 Work principle of the warhead with a controllable rotation discrete rod

\* 收稿日期: 2007-02-05; 修回日期: 2007-04-06

作者简介: 孙传杰(1976—), 男, 硕士, 工程师。

- (2) 采用爆轰波调整措施,爆轰波瞬时调整为理想柱形爆轰波,杆条各处受力同时、等值;
- (3) 杆条为圆柱刚体,忽略爆轰作用引起的杆条变形;
- (4) 杆条对称排布,且杆条密度均匀,质心位置与几何中心重合。

### 2.2 坐标系的建立

以战斗部质心为坐标原点  $O$ ,战斗部纵轴为  $x$  轴,战斗部纵轴与某一根杆条质心组成的平面为  $Oxy$  平面。过坐标原点  $O$  垂直于战斗部纵轴的直线为  $y$  轴,向外为正,根据右手准则建立  $z$  轴,如图 2 所示。

### 2.3 杆条初始运动参数的确定

#### 2.3.1 杆条初速

根据修正的 Gurney 公式,预估杆条的初始速度

$$v_0 = \epsilon \sqrt{2E} \sqrt{\frac{\beta}{1 + 0.5\beta}} \quad (1)$$

式中: $\epsilon$  为杆条速度修正系数; $\sqrt{2E}$  为主装药的 Gurney 速度; $\beta$  为装药质量与所驱动的金属质量的比值。

#### 2.3.2 杆条初始旋转角速率

根据假设条件,杆条在炸药爆轰完成瞬时的初始运动状态如图 2 所示,对杆条一端的微元进行分析,其径向速度即杆条初速  $v_0$ ,飞散速度为  $v_y$ ,绕  $y$  轴旋转的线速度为  $v_r$ 。

假设杆条斜角为  $\alpha$ ,杆条长度为  $L_{rod}$ ,杆条绕质心旋转的初始旋转速率为  $\omega_0$ ,杆条的分布半径为  $r_e$ 。经简单推导得到斜角与旋转速度的关系

$$v_r = v_0 \sin\theta \cos\alpha \quad (2)$$

式中: $\theta$  的表达式为

$$\theta = \arctan\left(\frac{L_{rod} \sin\alpha}{2r_e}\right) \quad (3)$$

则初始旋转速率

$$\omega_0 = \frac{2v_0 \cos\alpha \sin\left[\arctan\left(\frac{L_{rod} \sin\alpha}{2r_e}\right)\right]}{L_{rod}} \quad (4)$$

### 2.4 杆条的空间运动模型

#### 2.4.1 杆条的质心运动

假设杆条质心运动遵循指数衰减规律,则杆条的飞散速度与距离的关系为

$$v_y = v_0 e^{-C_a x} \quad (5)$$

杆条的飞行时间与距离的关系为

$$t = \frac{e^{-C_a x} - 1}{v_0 C_a} \quad (6)$$

式中: $x$  为杆条飞行距离; $C_a$  为速度衰减系数,  $m^{-1}$ ;  $C_a = C_x \rho_{air} S / (2m)$ ,  $C_x$  为杆条的阻力系数,  $m$  为杆条质量,  $S$  为杆条迎风面积。

#### 2.4.2 杆条绕质心的转动

图 3、4 分别为杆条理想飞行姿态和其旋转角变化示意图。不考虑平动与转动之间的耦合关系,且杆条两端的旋转线速度相等,方向相反。忽略杆条周围复杂的流场,仅考虑与迎风面和速度有关的阻力,计算杆条的受力和旋转力矩,建立杆条绕质心转动的方程组,进而得到杆条旋转角速率和旋转角的变化规律。

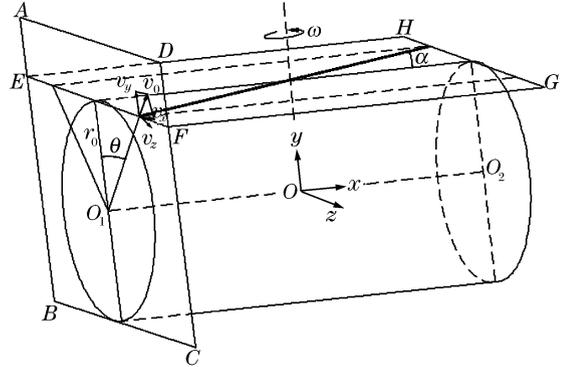


图 2 杆条初始运动状态示意图

Fig. 2 Initial motion state map of a rod

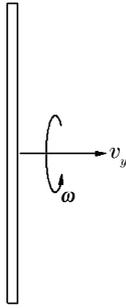


图3 杆条理想飞行姿态

Fig. 3 Ideal flying state of a rod

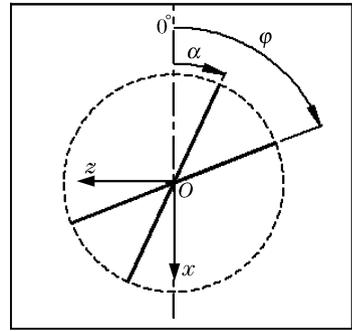


图4 杆条旋转角变化示意图

Fig. 4 Change of the rotation angle of a rod

经推导得到旋转角速率  $\omega$  和旋转角  $\varphi$  随时间的变化关系为

$$\frac{1}{\omega} = \frac{1}{\omega_0} + \frac{N}{I_y} t \quad (7)$$

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{I_y}{N} \ln \frac{\omega}{\omega_0} \quad (8)$$

联立式(6)、(7)和(8)得到杆条旋转角  $\varphi$  随距离变化的表达式为

$$\varphi = \varphi_0 - \frac{I_y}{N} \ln \left( \frac{1}{1 + \frac{N \omega_0}{I_y} \frac{e^{C_x x} - 1}{v_0 C_x}} \right) \quad (9)$$

式中:  $I_y$  为杆条绕速度矢量的转动惯量;  $\varphi_0$  为  $t=0$  时刻(初始时刻)的杆条旋转角, 其值等于斜角  $\alpha$ ;  $\omega_0$  为  $t=0$  时刻(初始时刻)的杆条旋转角速率;  $N$  为常数, 且

$$\frac{N}{I_y} = \frac{L_{rod}^3 C_x \rho_{air}}{4 \left( \frac{D^2}{4} + \frac{L_{rod}^2}{3} \right) \pi D \rho_{rod}}$$

其中:  $C_x$  为杆条的阻力系数;  $D$  为杆条直径。

至此, 对于某一斜角值和一定尺寸的可控旋转离散杆而言, 由式(5)和(9)即可得到杆条的空间运动状态。

### 3 静爆试验验证

#### 3.1 试验件状态

由上述推导可见, 影响杆条空间运动的因素主要包括杆条尺寸(直径、长度)、斜角等方面, 因此为了较全面地考察杆条空间运动规律, 设计了具有相同装药直径、不同斜角状态和不同杆条尺寸的四种试验件, 开展静爆试验, 试验件状态如表1所示。

#### 3.2 试验结果

试验布局如图5所示, 在距离试验件2.0、2.5、3.0、3.5和4.0 m处顺次阶梯式布置靶板, 用于测量不同距离处杆条的飞行姿态。同时采用多路数字测速系统测量杆条飞散速度, 其测时信号由靶后的铜箔片产生。

##### 3.2.1 杆条的质心平动

由式(5)可知, 描述杆条质心平动的参数包括杆条初速和速度衰减系数。理论计算时杆条初速由式(1)确定, 速度衰减系数由经验公式估算。而试验时通过铜箔片记录不同距离处杆条的着靶时刻, 再经数据处理得到杆条初速和速度衰减系数的试验测试值。

表1 试验件主要结构参数

Table 1 Structural parameters of the models

| 试验件编号 | 杆条尺寸                               | $\theta/(\circ)$ |
|-------|------------------------------------|------------------|
|       | /(mm×mm)                           |                  |
| I     | 一段杆条, $\varnothing 5.0 \times 182$ | 2                |
| II    | 一段杆条, $\varnothing 5.0 \times 182$ | 4                |
| III   | 一段杆条, $\varnothing 4.5 \times 200$ | 2                |
| IV    | 两段杆条, $\varnothing 4.5 \times 100$ | 1.5(上段)          |
|       |                                    | 2(下段)            |

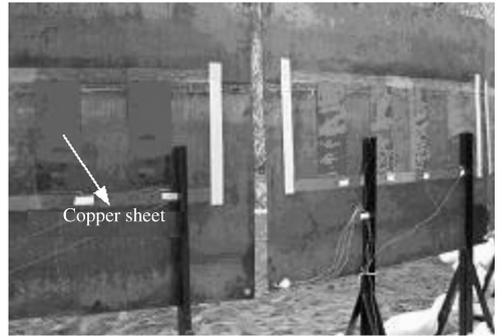
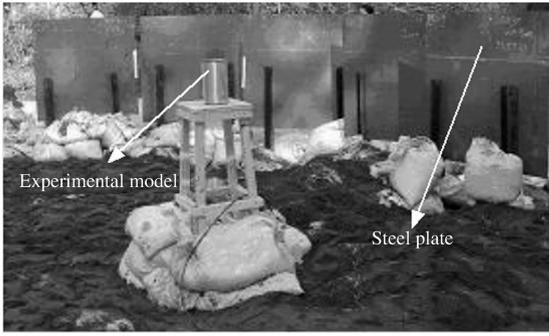


图 5 试验布局

Fig. 5 Experiment layout

由于测速系统不能区分试验件 IV 上、下段杆条的着靶信号,因此试验结果为两者的平均值。表 2 为杆条初速、衰减系数的试验值和理论预估值的对比。

由表 2 可见,预估的杆条初速与试验结果较接近,最大误差约 14% 左右(试验件 III),可满足工程设计要求。

表 2 杆条初速和衰减系数

Table 2 Initial velocities and velocity attenuation coefficients of rods

| 试验件编号 | $v_0/(m/s)$ |       | $C_a/m^{-1}$ |       |
|-------|-------------|-------|--------------|-------|
|       | 计算          | 试验    | 计算           | 试验    |
| I     | 1 800       | 1 853 | 0.030        | 0.083 |
| II    | 1 800       | 1 776 | 0.030        | 0.068 |
| III   | 1 800       | 2 114 | 0.034        | 0.085 |
| IV    | 1 800       | 1 981 | 0.034        | 0.081 |

假设杆条为理想飞行状态(即平稳横向飞行)时,理论计算得到衰减系数与杆长无关,仅与杆条直径有关,且衰减系数随杆条直径增大而减小。由表 2 可见,排除试验误差因素影响,试验结果也基本反映此规律。

理论计算得到的杆条衰减系数小于试验值,约为试验值的二分之一。分析原因主要包括两方面,其一计算时忽略了杆条旋转形成的复杂流场对速度衰减的影响,其二忽略了由于爆轰驱动过强造成的部分杆条变形对杆条迎风面积和杆条阻力系数产生的影响。根据以往对非旋转离散杆战斗部的研究结果表明,杆条变形对速度衰减的影响较小,因此衰减系数的计算误差主要是杆条高速旋转引起的。

### 3.2.2 杆条的旋转运动

联合式(4)和(9)推导得到杆条的旋转运动受杆条斜角、杆条尺寸、速度衰减系数等因素的影响。

另外,经误差分析可知,虽然速度衰减系数的预估值与试验测试值存在一定差异,但在短距离内速度衰减系数误差引起的杆条旋转角误差较小。因此,在对杆条旋转运动进行分析时,仍可沿用由经验公式预估的速度衰减系数。

下面着重分析杆条斜角、杆条尺寸对杆条的旋转运动的影响。

#### (1) 杆条旋转角的试验结果与理论计算值的对比分析

对试验数据进行统计处理后得到不同距离处杆条的旋转角,由式(9)得到杆条旋转角随距离变化的理论计算结果。图 6 为试验件 I 的杆条旋转角随距离变化的试验结果与理论计算值的对比。由图可见,试验数据在理论计算数据附近略有小幅度起伏,两者随距离的变化趋势符合良好。

同样,对其他试验件进行分析时也可得到类似结论。由此说明,建立的杆条旋转运动模型能较好地描述杆条的姿态变化。

#### (2) 斜角对杆条旋转角的影响

图7为不同斜角(2°和4°)对杆条旋转角的影响情况,理论计算结果和试验结果均表明,虽然两种试验件的杆条尺寸相同,但由于斜角不同,使得杆条旋转角随距离的变化差别较大,且杆条斜角大的,杆条旋转角速率也大(斜率越大)。

此外,理论计算时近似将试验件主装药外径作为杆条的分布半径,忽略了壳体的膨胀过程。由式(4)进行误差分析可知,在相同分布半径误差时,斜角增大引起杆条初始旋转角速率误差增大,进而使得理论计算的杆条旋转角的误差增大。

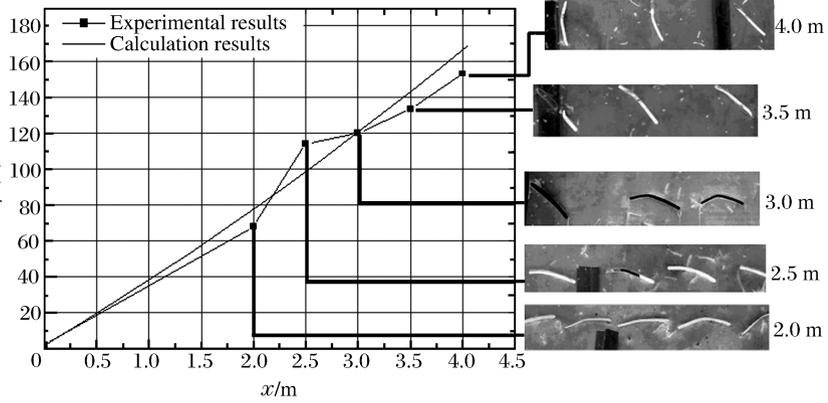


图6 试验件 I 杆条旋转角随距离的变化

Fig. 6 Variational of rotation angle of the model I with distance

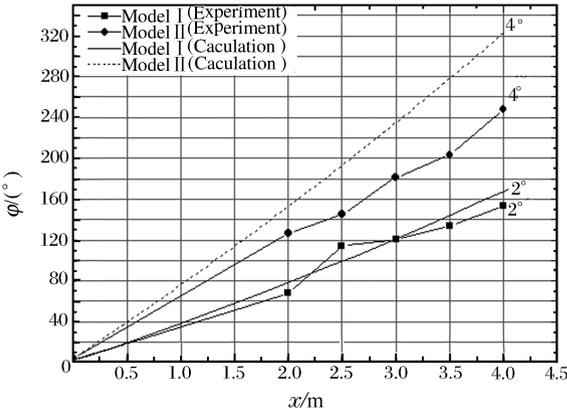


图7 斜角对杆条旋转角的影响

Fig. 7 Influence of leaning angles on rotation angles

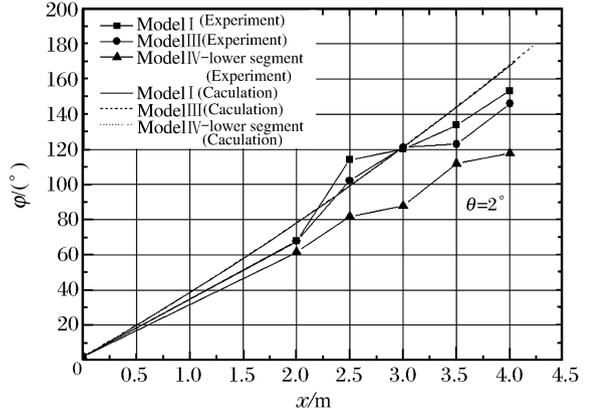


图8 杆条尺寸对杆条旋转角的影响

Fig. 8 Influence of dimensions of rods on rotation angles

(3) 杆条尺寸对杆条旋转角的影响

图8为相同斜角,不同杆条尺寸(杆条直径、杆条长度)条件下杆条旋转角的变化情况,由图可见,虽然三种试验件杆条尺寸存在较大差异(特别是试验件IV下段杆条长度与试验件III杆条长度相差一倍),但在短距离内杆条旋转角随距离的变化相差不大,理论计算结果和试验结果均反映了这一规律。

3.3 结论

综合上述分析,可以初步得到以下结论:

- (1) 采用修正 Gurney 公式预估的杆条初速与试验值较接近,可满足工程设计要求;
- (2) 由于旋转运动造成杆条平动衰减加剧,因此可控旋转离散杆条的飞散速度比非旋转离散杆条的飞散速度衰减更快;
- (3) 杆条旋转角随距离变化的理论分析结果与试验结果符合良好,验证了杆条旋转运动模型的正确性;
- (4) 由杆条尺寸和斜角对杆条旋转角的影响可见,杆条尺寸对杆条的旋转运动影响不大,而斜角是

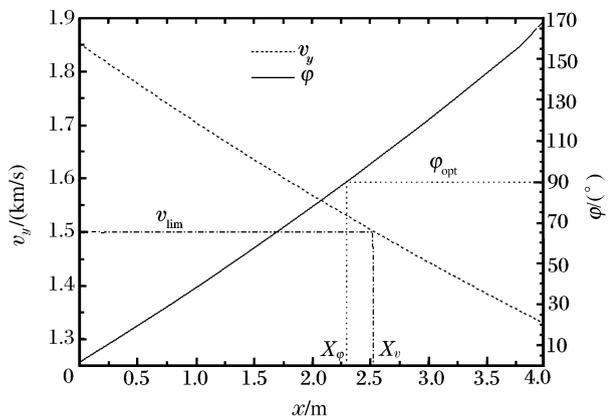


图9 杆条飞散速度和旋转角随距离的变化

Fig. 9 Variations of translation velocity and rotation angle of a rod with distance

影响杆条旋转变化的主导因素,并且杆条旋转速率随斜角的增大而增大;

(5) 此外,由于飞散速度和旋转角描述了可控离散杆的空间运动状态,因此可进一步结合目标特性(等效极限穿透速度  $v_{lim}$ )以及杆环连续性要求(等效杆条姿态  $\phi_{opt}$ ),开展杆条空间杀伤性能分析,以合理匹配杆条平动和转动的有效杀伤距离( $X_v$  和  $X_\phi$ ),为优化杀伤指标提供依据,如图9所示。

## 4 结束语

采用理想爆轰假设和刚体运动学理论,分析了可控旋转离散杆战斗部杆条初始运动状态,建立了杆条空间运动模型。在理论分析的基础上,设计了多种状态的试验件,开展验证试验。试验结果表明,本文建立的理论模型和试验结果符合良好,具有较好的工程应用价值。另外,对影响杆条空间运动的主要因素进行了分析,所得结论可作为可控旋转离散杆战斗部相关设计参考。

中国工程物理研究院总体工程研究所环境中心王齐鲁、黎启胜等负责了试验的实施,为可控旋转离散杆战斗部的研究提供了良好的技术支持,特此表示感谢!

## 参考文献:

- [1] 刘志建,肖川,王亲会.可控旋转式离散杆战斗部设计分析[J].火炸药学报,2000,23(4):48-50.  
LIU Zhi-jian, XIAO Chuan, WANG Qin-hui. The design analysis on the controllable rotation discrete rod[J]. Journal of Explosive, 2000,23(4):48-50.
- [2] 张新伟,吕红超.飞散姿态可控离散杆战斗部算法研究[C]//中国宇航无人飞行器学会战斗部与毁伤效应专业委员会第八次学术年会论文集.中国兵器工业系统总体部,2003:146-150.
- [3] Kempton M L. Rod-fragment controlled-motion warhead (U)[R]. USP 4216720, 1980.
- [4] 孙传杰,路中华,卢永刚.防空导弹新型离散杆战斗部技术研究[R].GF-A0092201M,2006.
- [5] 路中华.HQ-10导弹离散杆战斗部方案论证报告[R].绵阳:中国工程物理研究院内部报告,2005.

## Motion analysis of a controllable rotation discrete rod

SUN Chuan-jie<sup>\*</sup>, LU Zhong-hua, LU Yong-gang, WEN Yu, SUN Yi  
(Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics,  
Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on ideal detonation and rigid body kinematics, a new model was proposed to explore the movement law of a controllable rotation discrete rod. Movement states of the rods with different dimensions and different leaning angles were analyzed and compared with the experimental results. Comparisons show that the proposed model can describe the motion states of the controllable rotation discrete rods and provide a refer for the design of the warhead with a controllable rotation discrete rod.

**Key words:** flying dynamics; motion model; simultaneous detonation; controllable rotation discrete rod

\* Corresponding author: SUN Chuan-jie  
E-mail address: ballistic2000@sina.com  
Telephone: 86-816-2485423