文章编号：1003-1480（2026）01-0049-05

火工切割器仿真分析与结构优化设计

许 猛，任法璞，蔡文健，张丽梅，刘新伟，常 哲，刘晓刚，魏海洋

（中国空间技术研究院 北京空间机电研究所，北京，100094）

摘 要：采用非线性有限元软件 ABAQUS 建立了火工切割器切割过程的仿真模型，研究了钛杆在切割器工作过程中的切割和断裂行为，以及不同钛杆直径和切刀刃口角度对切割效果的影响，为切割器的结构设计提供了理论依据。此外，研究发现，当切刀转动角度小于 20° 时，切割所需能量稳定，超过 20° 后则随着角度增加而增加。基于仿真分析结果，提出了结构优化方案，设计了支撑环以限制切刀的转动范围，并通过尺寸调整避免活动刀与固定刀刀刃碰撞，减少碎刀风险。优化后的切割器经试验验证，能有效切断钛杆并显著降低了碎刃产生多余物的风险。

关键词：火工切割器；仿真；切割能量；优化设计

中图分类号：TJ450.2 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.008

Simulation Analysis of Pyrotechnic Cutter and Structural Optimization Design

XU Meng，REN Fa-pu，CAI Wen-jian，ZHANG Li-mei，LIU Xin-wei，CHANG Zhe，LIU Xiao-gang，WEI Hai-yang

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, China Academy of Space Technology, Beijing, 100094)

Abstract： A simulation model of the cutting process of a pyrotechnic cutter was established using the nonlinear finite element software ABAQUS. The cutting and fracture behavior of titanium rod during the operation of the pyrotechnic cutter, as well as the impact of different titanium rod diameters and blade angles on the cutting effect were studied, providing a theoretical basis for the structural design of the cutter. It was also found that the cutting energy requirement is stable when the blade rotation angle is less than 20°, but increases with the angle beyond 20°. Based on the simulation results, an optimized design was proposed. A support ring was designed to limit the rotation range of the blade, and the size was adjusted to avoid collision between the moving and fixed blade edges, reducing the risk of blade breakage. The optimized cutter, verified by test, can effectively cut the titanium rod and significantly reduce the risk of debris from blade breakage.

Key words：Pyrotechnic cutter；Simulation；Cutting energy；Optimization design

切割器作为一种火工装置，在航天领域中扮演着重要角色，其主要功能为切割金属杆、绳索、电缆及管路等，具备结构简单、可靠性高的特点。金属杆切割器在各类卫星、探测器的天线、太阳翼等结构的展开与释放机构中得到广泛应用。其主要工作原理为：切割器接收到启动信号后，切断用于锁定待释放机构的钛杆，从而实现解锁与释放功能。

当前，典型的金属杆切割器主要由壳体、活动刀、固定刀和剪切销组成，同时包含装药和发火元件[1-2]。活动刀刀体通常设计为回转体结构，在切割过程中理论上存在转动的可能性，这可能导致切割过程失控，影响切割的可靠性。此外，活动刀在完成切割后与固定刀相撞，刀刃对刀刃的碰撞极易导致刀刃破碎，尤其是当活动刀发生转动后，碎刃产生多余物的风险显著增加。鉴于航天领域对产品工作可靠性和多余物控制的严格要求，开展相关研究以降低上述风险显得尤

收稿日期：2025-04-18

作者简介：许猛（1989-），男，工程师，主要从事航天火工装置设计技术研究。

引用本文：许猛, 任法璞, 蔡文健, 等. 火工切割器仿真分析与结构优化设计[J]. 火工品, 2026(1):49-53.

为重要。

本文以钛杆切割器为研究对象，建立了切割过程仿真模型，研究了转刀角度对切割过程的影响规律以及金属杆在切割和断裂过程中的尺寸分布。基于仿真分析结果，对某钛杆切割器进行了结构优化设计，通过引入防转刀和活动刀支撑结构，有效避免了活动刀在运动过程中的转刀风险以及切割完成后与固定刀的碰撞，从而减少了碎刃产生多余物的可能性。经过试验验证，改进后的产品满足了预期效果。

1 建立仿真模型

基于 Abaqus/Dynamic Explicit 显式动力学模块对切割过程进行建模与仿真分析。在建模过程中，省略与研究主题无关的部件，仅保留了活动刀、固定刀以及待切割的钛杆，其有限元模型如图 1 所示。

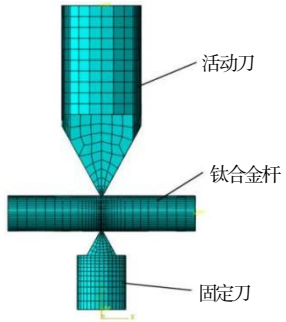


图 1 钛杆切割器有限元模型

Fig.1 Finite element model of titanium rod cutter

此外，根据以往研制经验，钛杆的固定方式对于切割过程具有一定影响。然而，现有的典型切割器设计要求钛杆在固定后，两端应留有至少 0.5 倍直径的轴向移动空间。在本研究中，一端采用可沿径向浮动的安装方式，另一端则采用球形结构以实现转动，从而确保钛杆具有足够的自由度。因此，为了简化模型，本研究不对钛杆施加约束。在研究过程中，通过切刀动能来表征切割器的输入能量。在保证各工况仿真模型活动刀质量恒定(7.3 g)的前提下，以活动刀的初始速度作为调整参数。当初始速度设定为 v m·s^{-1} 时，钛杆能够被完全切断；而当速度降至（v–0.1）m·s^{-1} 时，钛杆则无法被完全切断。因此认为速度 v m·s^{-1} 对应的切刀动能为当前工况下切割所需的最小输入能量。

钛杆材料的力学行为模拟采用了 Johnson-Cook 模型，该模型能够有效地模拟材料的硬化效应、应变率强化以及温度软化效应。该模型在钛杆切割过程中的应用，能够精确地反映材料的力学性能，其数学表达式如式（1）所示。

$$\sigma=(A+B\varepsilon_p^n)(1+C\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})[1-(\frac{T-T_0}{T_{\text{melt}}-T_0})^m] \quad (1)$$

式（1）中：σ为等效应力；A 为准静态条件下的屈服强度；B 为应变硬化参数；ε_p 为等效塑性应变，n 为硬化指数；C 为应变率强化参数；$\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率；$\dot{\varepsilon}_0$ 为材料的参考应变率；T_0 为常温系数，通常取 25℃；T_{melt} 为材料熔点；m 为热软化参数。

TC4 材料的 Johnson-Cook 本构模型具体参数值见表 1[1,3-4]。

表 1 TC4 材料 Johnson-Cook 本构模型参数

Tab.1 Parameters of Johnson-Cook constitutive model for TC4 material

A/MPa	B/MPa	n	C	m
831.355	857.932	0.302	0.015	0.724

活动刀和固定刀均采用 T8A 高强度工具钢材质，经过热处理后，其硬度 HRC 达到 59 至 62[5]。为便于计算，本研究忽略了塑性变形的影响。此外，活动刀与固定刀的密度为 7 900 kg·m^{-3}，弹性模量为 2.1×10^5 MPa，泊松比为 0.3。

2 仿真结果与分析

采用 55° 刃口的切刀对直径为 ϕ4 mm 的钛合金杆进行切割，切割过程如图 2 所示。

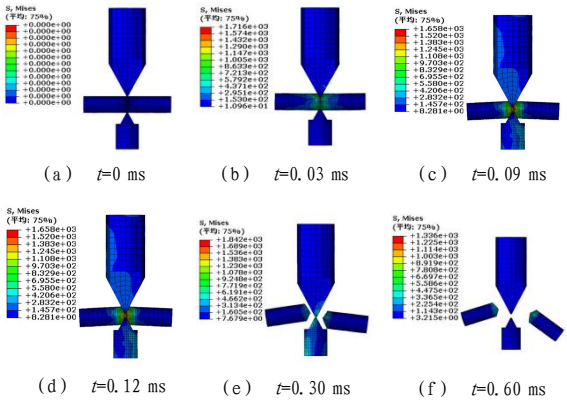


图 2 切割过程仿真结果

Fig.2 Simulation results of cutting process

在此过程中，钛杆在活动刀与固定刀的协同作用下经历塑性变形，其上下两侧同时被切割。随着切刀

切入深度的增加，刃口对钛杆施加的沿其轴线向两侧的推力逐渐增大。当该推力超过钛合金杆的抗拉强度时，钛杆发生断裂并分离。切刀继续运动直至相互碰撞后反弹，从而完成整个切割过程。在实际的切割过程中，由于燃气压力的作用，切刀可能不会出现反弹现象。此外，为了简化仿真模型的网格划分，模型中对刀尖进行了 *R*0.2 mm 的圆角处理，而实际的切刀刀刃更加锋利，因此在碰撞过程中可能会出现碎刃现象。

经优化调整后，当切刀的刃口角度为 55°时，切割直径 ϕ4 mm 钛杆所需的最小速度为 47.9 m・s^{-1}。通过测量钛杆断裂时刻活动刀与固定刀刀尖之间的距离，可得钛杆的断裂深度为 0.77 mm，占总直径的 19.2%。活动刀刀尖至钛杆上表面的距离，即活动刀的切割深度为 1.58 mm，占总直径的 39.6%。最后，钛杆直径减去断裂深度与活动刀切割深度之和，即可得到固定刀的切割深度为 1.65 mm，占总直径的 41.3%。采用具有 55°刃口角度的切刀对不同直径的钛杆进行切割，钛杆的断裂尺寸以及活动刀与固定刀的切割深度及其比例关系详见表 2 和图 3。

表 2　切割不同直径钛杆的仿真结果

Tab.2　Simulation results of cutting titanium rod with different diameters

钛杆直径 /mm	断裂深度 /mm	占比 /%	活动刀切深 /mm	占比 /%	固定刀切深 /mm	占比 /%
3.0	0.51	16.9	1.36	45.4	1.13	37.7
3.5	0.72	20.7	1.44	41.0	1.34	38.3
4.0	0.77	19.2	1.58	39.6	1.65	41.3
4.5	0.83	18.5	1.87	41.5	1.80	40.0
5.0	1.04	20.7	1.87	37.3	2.10	41.9

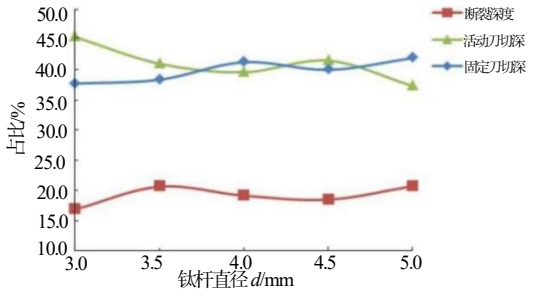


图 3　钛杆直径对切割断裂形式的影响趋势

Fig.3　Influence trend of titanium rod diameter on cutting fracture form

仿真分析结果表明：钛杆的直径对其断裂或切断形式的分布比例无显著影响。钛杆断裂深度所占比例介于 16.9%至 20.7%之间，活动刀切割深度占比介于 37.3%至 45.4%，固定刀切割深度占比介于 37.7%至 41.9%。随着钛杆直径的变化，各部分占比的波动幅度均未超过 10%。

通过使用不同刃口角度的切刀对直径为 ϕ4 mm 的钛杆进行切割，钛杆断裂尺寸以及活动刀和固定刀的切割深度及其占比情况详见表 3 和图 4。

表 3　不同刃口角度的切刀切割钛杆的仿真结果

Tab.3　Simulation results of cutting titanium rod with different cutting edge angles

刃口角度 /°	断裂深度 /mm	占比 /%	活动刀切深 /mm	占比 /%	固定刀切深 /mm	占比 /%
30	0.38	9.4	1.45	36.3	2.17	54.3
35	0.49	12.3	1.37	34.1	2.15	53.6
40	0.50	12.4	1.61	40.2	1.90	47.4
45	0.70	17.4	1.53	38.4	1.77	44.2
50	0.73	18.2	1.61	40.3	1.66	41.5
55	0.77	19.2	1.58	39.6	1.65	41.3
60	0.74	18.6	1.74	43.5	1.52	37.9

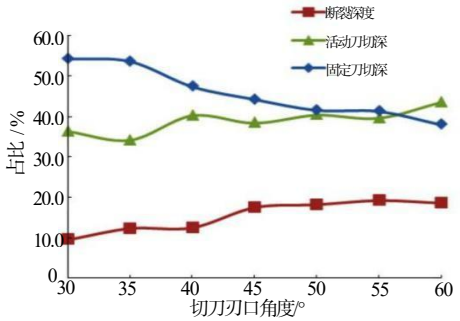


图 4　切刀刃口角度对切割断裂形式的影响趋势

Fig.4　Influence trend of cutting edge angle on cutting fracture form

仿真分析结果表明：随着切刀刃口角度的增加，钛合金杆件断裂深度的比例呈现上升趋势，而被切割部分的总体比例则相应减少。具体而言，活动刀的切割深度比例随着刃口角度的增大而增加，而固定刀的切割深度比例则相应降低。在研究中，通过调整活动刀绕其轴线旋转的不同角度，计算出实现最小切割速度所需的参数，相关仿真结果详见表 4，其影响趋势如图 5 所示。

表 4　不同转刀角度切割过程的仿真结果

Tab.4　Simulation results of cutting process with different blade rotation angles

转刀角度/°	切割速度 *v*/（m・s^{-1}）	切割能量 *E*/J
0	47.9	8.37
5	47.3	8.17
10	47.2	8.13
15	47.3	8.17
20	47.3	8.17
25	48.4	8.55
30	48.9	8.73
35	49.8	9.05
40	50.0	9.13
45	51.1	9.53
50	51.9	9.83

依据仿真分析结果，活动刀片在发生小于或等于 20°的小角度旋转时，切割所需的能量（初始动能）并未表现出增加趋势。然而，当旋转角度超过 20°后，

随着旋转角度的增加，切割所需能量呈现显著的增长趋势。对于小角度旋转下切割能量未增加的现象，推测可能的原因在于：活动刀与固定刀的刀刃在形成一定角度后，共同作用于钛杆上的轴向力达到最大值，从而更有效地促进钛杆的断裂；或者该作用力的角度可能与钛杆材料内部的塑性滑移面角度相接近，导致切割和断裂所需的能量最小化。尽管具体机制尚未明确，需要进一步深入研究，但小角度旋转下切割能量不增加的结论，可为后续防转结构设计提供理论依据。

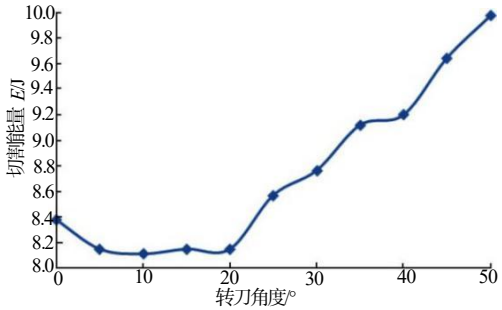


图 5　转刀角度对切割能量的影响趋势

Fig.5　Influence trend of blade rotation angle on cutting energy

3　结构优化设计

针对当前典型火工切割器中切刀无转动约束、工作过程中切刀姿态无法控制的问题，以及切割器装药能量存在裕度导致切割完成后活动刀与固定刀刀刃直接碰撞、崩刃产生多余物的风险，本研究提出了基于现有切割器结构的优化设计方案。设计中，在固定刀与活动刀之间引入了支撑环，并对切刀组件结构进行了适应性改进。支撑环结构如图 6 所示，切割器切刀组件结构如图 7 所示。

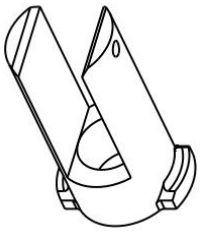


图 6　支撑环结构示意图

Fig.6　Schematic diagram of support ring structure

支撑环与活动刀的平面配合设计能够确保切刀在轴向切割运动过程中保持稳定，避免转动。此外，通过精确的尺寸设计，确保活动刀在完成对钛杆的切割后，切刀肩部首先与支撑环的上端面接触，从而有效避免了活动刀与固定刀刀刃的直接碰撞，减少了崩刃现象的发生。

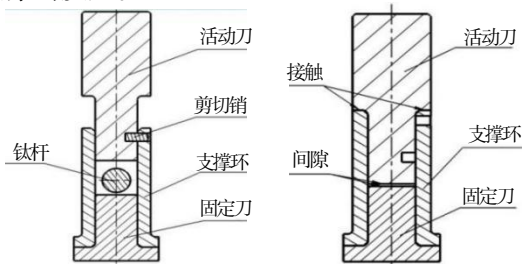


图 7　切割器切刀组件结构示意图

Fig.7　Schematic diagram of cutter blade assembly structure

本研究将所提出的结构设计应用于直径为 ϕ3.5 mm 的钛杆切割器。在该切割器中，固定刀与活动刀的刃口角度设定为 55°。依据仿真分析结果，当刃口角度为 55°时，切刀对直径 ϕ3.5 mm 钛杆的切割导致的断裂深度为 0.72 mm。基于此，切割器工作后的设计间隙应小于 0.72 mm，以确保有效切割。同时，为防止切割过程中活动刀与固定刀发生直接碰撞，设计间隙需足够大。通过精细调整相关零件尺寸，本结构设计在不考虑结构变形的前提下，确保切刀刀肩与支撑环上端面接触后，活动刀与固定刀刃之间的间隙为 0.4 mm，以实现钛杆的有效切断并最大限度地减少活动刀与固定刀刃的直接碰撞风险。此外，为确保支撑结构不妨碍活动刀的运动，两零件的配合面采用间隙配合设计。计算结果显示，在最大理论间隙条件下，活动刀与固定刀的最大角度不超过 2°，此值远小于仿真分析中切割能量开始显著增加的 20°。

建立经过结构优化的切割模型之后，进行了切割过程仿真计算，结果如图 8 所示。

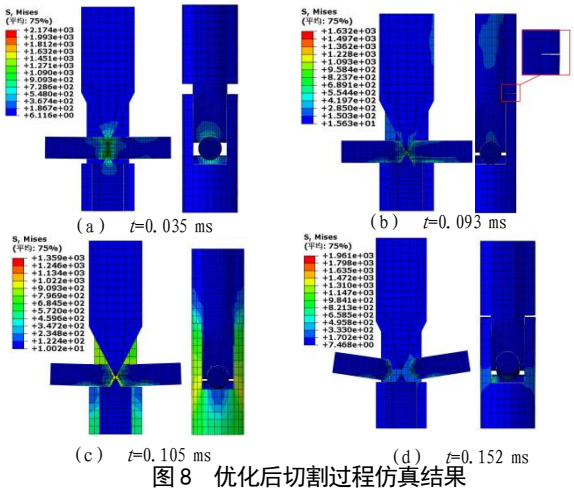


图 8　优化后切割过程仿真结果

Fig.8　Simulation results of cutting process after optimization

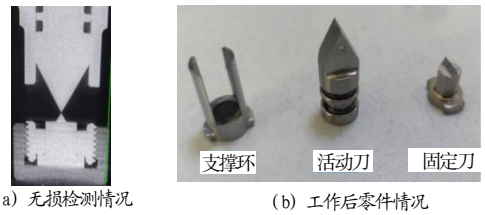
由仿真结果可知，随着活动刀向下运动，钛杆首先被切断，然后活动刀刀肩与支撑环上端面接触，且活动刀刀刃与固定刀刀刃未发生碰撞。证明该结构设计能够保证在有效切断钛杆的前提下，避免了产品工作过程中活动刀与固定刀刀尖发生直接接触、碰撞从而产生碎刃多余物的风险。

4　试验验证

针对经过结构优化的切割器，本研究进行了设计验证试验。试验中使用了装填 0.8 倍标准药量、配备单点火器的小药量试验件进行钛杆切割。点火后，钛杆被成功切断，其断裂情况如图 9 所示。该结果验证了在采用防转和支撑结构后，产品在切割过程中的性能未受到不利影响，并且性能裕度满足了预定的使用要求[6]。

图 9　钛杆切割情况
Fig.9　Cutting situation of titanium rod

采用 1.2 倍药量及双点火器配置的大型试验件进行钛杆切割或空打试验，结果显示钛杆被顺利切断，且产品结构保持完好，无任何意外损坏现象。对产品进行无损检测后发现，活动刀与固定刀的刀刃均保持完整，且维持了设计间隙状态，活动刀未出现转动现象。进一步拆解检查确认，活动刀和固定刀均未出现碎刃等损伤情况，如图 10 所示。



（a）无损检测情况　　（b）工作后零件情况

图 10　无损检测及工作后零件情况
Fig.10　The situation of non-destructive testing and main parts of the cutter

试验结果证明了优化方案在防转和支撑方面的有效性，同时表明产品结构强度具有足够的裕度，满足设计要求。因此，该结构优化方案使用效果良好，达到了改进预期。

5　结论

本文通过建立火工切割器的仿真模型，研究了钛杆切割过程中的断裂行为和参数对切割效果的影响，并提出了结构优化方案。主要结论包括：（1）通过建立仿真模型分析了钛杆的塑性变形和断裂行为，揭示了钛杆直径和切刀刃口角度对切割效果的影响，为结构设计提供了理论依据。（2）切割所需能量与转刀角度的关系研究表明，切刀转动角度小于 20°时，切割所需能量稳定；超过 20°后，能量需求显著上升，为防转结构设计提供参考。（3）针对现有问题，提出了引入支撑环和切刀组件适应性改进的结构优化方案，确保活动刀在切割过程中保持稳定，减少碎刃产生多余物的风险。试验验证表明优化后的切割器能有效切断钛杆，刀刃保持完整，结构强度满足设计要求。

本文结合仿真分析和试验验证，成功优化了火工切割器结构设计，提高了工作可靠性和安全性，为航天火工装置设计提供参考。未来研究可拓展到不同材料和工况下的切割性能。

参考文献：

[1]　王通, 杨安民, 吴瑞德,等.火工切割装置的爆炸分离数值模拟[J].火工品,2015(6):17-20.

[2]　刘永刚,杨旗,孙士超,等.一种推销切割多功能一体化结构的电切割器[J].火工品,2022(3):6-9.

[3]　柯志宏. ABAQUS 二次开发在钛合金本构模型中的应用及切削仿真[D] .天津:天津大学,2015.

[4]　陈广鹏,江京亮,马长城,等.基于 ABAQUS 的 TC4 合金切削变形区有限元仿真[J].工具技术,2019,53(2): 51-55.

[5]　GB/T 1172-1999 黑色金属硬度及强度换算值[S].国家质量技术监督局, 1999.

[6]　GJB 1307A-2004 航天火工装置通用规范[S].国家军用标准-总装备部, 2004.