

空间连接与分离用胀断器建模与有限元分析

王志强

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年3月9日; 录用日期: 2025年4月2日; 发布日期: 2025年4月14日

摘要

使用切槽螺栓和NiTi合金作为关键部件的胀断器逐步被应用到航天器各种部件的连接与分离中。切槽螺栓的破断力受到多种因素的影响, 进而影响胀断器的承载能力。以切槽螺栓为研究对象, 基于ANSYS Workbench平台进行有限元分析计算。首先, 利用SolidWorks软件建立切槽螺栓的三维几何模型。然后, 建立网格模型并进行有限元计算。通过设计正交实验, 考虑切槽深度, 切槽宽度和预紧力矩对胀断器承载性能的影响, 探究不同组合下切槽螺栓的承载能力。最后结合NiTi合金管的回复力优选出最大承载能力为42.34 Kg的切槽螺栓参数组合, 其中切槽深度为0.9 mm, 切槽宽度为3 mm, 预紧力矩为6 Nm。

关键词

胀断器, 切槽螺栓, 正交实验, NiTi合金

Modeling and Finite Element Analysis of Expansion Fracture Devices for Spacecraft Joining and Separating

Zhiqiang Wang

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 9th, 2025; accepted: Apr. 2nd, 2025; published: Apr. 14th, 2025

Abstract

Expansion Fracture Devices, which utilize grooved bolts and NiTi alloy as key components, are increasingly being employed for the connection and separation of various spacecraft components. The fracture force of grooved bolts is influenced by multiple factors, thereby affecting the load-bearing capacity of the expandable separation device. With grooved bolts as the research object, finite element analysis (FEA) was performed using the ANSYS Workbench platform. Initially, a three-

dimensional geometric model of the grooved bolt was developed using SolidWorks software. An orthogonal experiment was designed to evaluate the effects of groove depth, groove width, and preload torque on the load-bearing performance of the expandable separation device, and to investigate the load-bearing capacity of the grooved bolt under various combinations. Finally, by leveraging the restoring force of the NiTi alloy tube, the optimal grooved bolt parameter combination was identified, achieving a maximum load-bearing capacity of 42.34 kg with a groove depth of 0.9 mm, a groove width of 3 mm, and a preload torque of 6 Nm.

Keywords

Expansion Fracture Device, Grooved Bolt, Orthogonal Experiment, NiTi Alloy

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来航天领域迎来了前所未有的发展机遇,2020~2023年间年均航天器发射量增幅达21.7%,中国航天更是实现了空间站组网、深空探测等里程碑突破。连接与分离装置[1]在航天器上应用非常广泛,例如航天器上卫星,遮阳罩以及各类保护盖装置等都需要在太空中实现分离。按分离方式分类有火工品分离装置[2]-[4]和非火工品分离装置。目前采用较多的分离方式是火工品分离,例如爆炸螺栓和包带分离装置都采用炸药进行爆炸分离,爆炸冲击较大,易导致星载设备共振失效,且无法实现精确分离;非火工品分离主要是机械、电磁以及形状记忆合金分离装置[5],其中机械、电磁分离装置主要依靠复杂机械结构实现部件的分离或释放,这些装置复杂性高,维护成本高,通常较重。为克服上述的局限性,近年来利用形状记忆合金在温度变化下的形变特性进行连接与分离的方式逐渐得到应用[6]-[8]。NiTi形状记忆合金胀断器相较于其他形状记忆合金分离装置[9][10]结构简单,零件数量少故障率低且在分离过程中几乎不产生冲击和振动,对周围结构影响小,可以精确控制分离过程,适用于需要精细操作的场景,易于制造与维护。

螺栓连接结构是胀断器的主要组成结构,螺栓连接的设计和分析需要考虑载荷,预紧力以及强度校核等关键因素,以确保连接的强度、刚度和可靠性。杨华等[11]为增强螺纹连接的防松能力详细介绍了螺纹拧紧力矩的4种选择标准,验证了拧紧力矩与轴向预紧力的关系对螺纹连接质量的影响,为螺栓拧紧力矩的选择提供了依据。王伟豪[12]等对螺栓施加不同预紧力造成的螺栓失效进行了模拟,并得到螺栓在不同转速状态下的等效应力值。徐同强[13]等基于ANSYS与Solidworks Simulation研究轴承通用支撑结构的合理性。前人对螺栓连接已有了较为系统的研究但对于切槽螺栓连接的分析还不深入。切槽螺栓作为胀断器的核心器件,其结构参数对胀断器的分离性能具有重要影响。本文通过有限元分析方法,深入探究切槽深度,切槽宽度以及预紧力矩对切槽螺栓承载性能的影响,为合理设计不同负载的胀断器提供依据。

2. 建模与有限元分析

2.1. 三维模型建立

胀断器主要包括五个部件,切槽螺栓、螺母、NiTi合金管、加热元件以及保温层,图1中还展示了被分离件A、B和垫片。胀断器的分离过程如下,首先通过加热元件对NiTi合金管进行加热。当温度升

高到 NiTi 材料马氏体逆相变开始的温度时, NiTi 合金管开始沿轴向伸长, 并对 NiTi 合金管两侧的部位螺栓头和分离件 A 施加压力, 并最终将切槽螺栓胀断。使用 SolidWorks 建立三维模型并导入到 ANSYS Workbench 中, 保留了切槽螺栓、螺母、NiTi 合金管和被分离件 A、B, 可便于分析压力的传导如图 2 所示。NiTi 合金管对分离件 A 施加的压力继续向远离 NiTi 合金管一侧传导经过分离件 B 最终传导到螺母上; 螺栓杆两端受力, 发生了轴向拉伸。为了方便进行仿真分析对模型进行简化, 选用切槽螺栓、螺母作为仿真研究的对象。

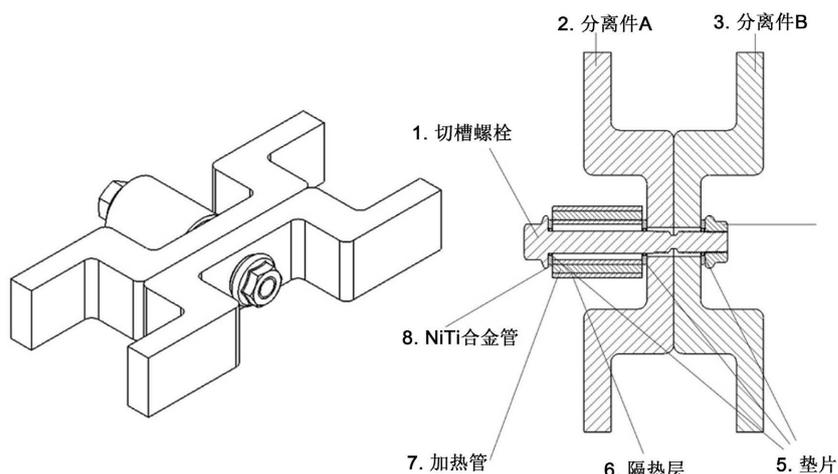


Figure 1. 3D schematic diagram of the expansion fracture device and full sectional view of the expansion fracture device

图 1. 胀断器三维示意图和胀断器全剖视图

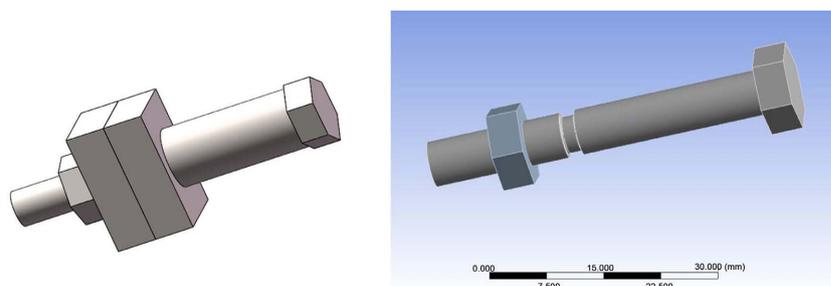


Figure 2. Simplified diagram of the expansion fracture device and simplified diagram of the slotted bolt

图 2. 胀断器简化图和切槽螺栓简化图

2.2. 定义材料属性

切槽螺栓连接结构中零部件采用的材料及材料特性[14]见表 1。

Table 1. Material and physical property parameters of components (at 20°C)

表 1. 零部件所用材料及材料物理性能参数(20°C)

部件	材料牌号	密度(g/cm ³)	弹性模量(Gpa)	泊松比
切槽螺栓	TC4	4.43	110	0.34
螺母	TC4	4.43	110	0.34

2.3. Workbench 有限元分析

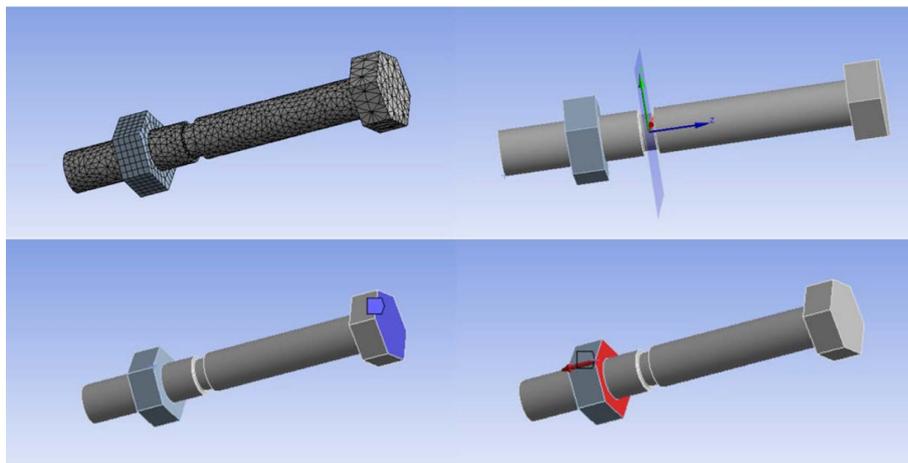


Figure 3. Preprocessing for finite element analysis
图 3. 有限元分析前处理

对切槽螺栓和螺母进行网格划分，网格为四面体网格，网格的单位尺寸为 1 mm。应变能密度反映了材料在变形过程中单位体积内储存的能量，是评估断裂行为的重要指标。切槽部位的直径较小是应力集中的区域，而高应变能密度区域通常出现在应力集中区域，这些区域是潜在的裂纹起始点。因此拉伸断裂的危险区域为切槽部位，选择切槽螺栓上切槽部位中间的径向截面为危险截面。而后对模型进行约束和加载，螺栓头的一面施加固定约束。而螺栓的预紧力[15]以及 NiTi 合金管提供的胀断力都作用在螺栓螺母上，因此可通过对螺母的一侧施加载荷代表两种力的作用效果。如图 3 所示，设置好约束和边界条件之后进行仿真计算，计算结果如图 4 所示。在预紧力[16]以及胀断力施加之后，最大的等效应力值出现在危险截面半径最大的一圈边线上，则边线上的部位易成为裂纹起始点。根据金属材料断裂理论，切槽螺栓的切槽处会产生应力集中，从而显著提高局部的应力水平，促进裂纹的起始。在断裂过程中，裂纹会随着高应变能密度区域进行扩展。当钛合金螺栓的抗拉强度为 895 MPa 时，应变能密度约为 3.64×10^6 J/m³，虽然此时的应变能密度较小但从应力条件来看，螺栓承受的应力已经达到抗拉强度 895 MPa，在实际工程中，通常以应力条件为准，即当应力达到抗拉强度时，认为材料会发生断裂。因此在钛合金螺栓在危险截面上最大的等效应力为 895 MPa 时切槽螺栓发生断裂。

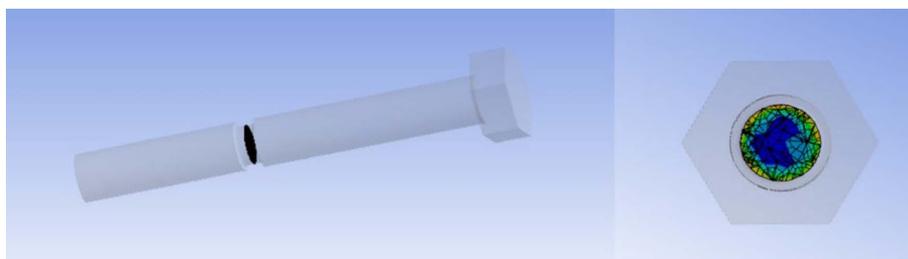


Figure 4. Post-processing for finite element analysis
图 4. 有限元分析后处理

3. 正交实验设计

为了探究各个因素的影响情况，确定各因素影响的主次关系，采用正交实验法[17]进行分析。选用正

交表时, 可以根据水平数和因素数, 选择能够满足因素和水平的最小正交表。在切槽螺栓中, 切槽深度和切槽宽度对螺栓的抗拉性能有明显的影响。螺栓的预紧力同样影响螺栓连接结构的强度。于是选择切槽深度, 切槽宽度和预紧力矩为实验的三个因素。根据实际切槽螺栓的数据以及前期仿真范围额界定, 选择 0.3、0.6、0.9、1.2 mm 为切槽深度这一因素的四个水平值, 选择 1、2、3、4 mm 为切槽宽度这一因素的四个水平值。螺栓的预紧力矩[17]是一个范围而不是定值, 是充分考虑到尺寸误差和不同批次材料之间的差异, 且需足够防止松动, 又不能过大导致损坏。M6 钛合金螺栓的预紧力矩在润滑条件下为(6~10) Nm, 在干摩擦的条件下为(8~12) Nm。本文中选择润滑条件良好的工况, 且为提升切槽螺栓的承载能力, 预紧力矩上边界为 9 Nm, 所以预紧力矩这一因素的四个水平值为 6、7、8、9 Nm。综上, 本实验有三个因素, 每个因素取四个水平, 选取正交表 L16(4³)进行实验安排, 总共 16 组实验。正交实验因素和水平如表 2 所示。

Table 2. Orthogonal experimental factor level design for slotted bolts
表 2. 切槽螺栓正交实验因素水平设计

水平	因素		
	切槽深度(mm)	切槽宽度(mm)	预紧力矩(Nm)
1	0.3	1	0.3
2	0.6	2	0.6
3	0.9	3	0.9
4	1.2	4	1.2

使用 spssau 进行正交试验方案的设计, 16 组实验方案如下表 3 所示。

Table 3. Orthogonal experimental design for slotted bolts
表 3. 切槽螺栓正交实验方案

编号	切槽深度/mm	切槽宽度/mm	预紧力矩/Nm
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4

续表

14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

4. 结果与分析

通过螺栓预紧力矩可计算出螺栓的预紧力，其中破断力减去螺栓的预紧力就是螺栓在此预紧力下的承载能力。螺栓预紧力矩的公式 1 如下：

$$M = K \times F \times D \tag{1}$$

M 为螺栓力矩， K 为预紧系数， F 为预紧力， D 为螺纹直径。

经过仿真直接优化分析方法得到破断力，通过螺栓的承载能力和发射过程中压紧力的公式，可计算出负载值。

为确保发射阶段的安全，需要计算负载所需的压紧力，压紧力的作用是在发射过程中固定负载，防止其因为加速度产生的惯性力而移动或损坏。在发射阶段的准静态加速度载荷一般在 6 g 至 12 g 之间。为确保结构安全按照 12 g 的准静态加速度载荷进行计算(g 取 9.8 N/kg)。SF 安全系数取 1.25 是为了增加设计的余量，确保即使在极端情况下，压紧力仍然能保证负载牢固。根据压紧力公式进而得到负载值。

负载在发射过程中的压紧力计算公式 2 如下：

$$F = M \times a \times SF \tag{2}$$

F 为压紧力， M 为质量， a 为准静态加速度载荷， SF 为安全系数。

最终 16 组正交实验的计算结果如下表 4 所示：

Table 4. Orthogonal experimental design and results for slotted bolts

表 4. 切槽螺栓正交实验方案及结果

编号	切槽深度 (mm)	切槽宽度 (mm)	预紧力矩 (Nm)	破断力 (N)	承载能力 (N)	负载 (kg)
1	0.3	1	6	14154.34	9154.34	62.27
2	0.3	2	7	16271.13	10437.80	71.01
3	0.3	3	8	18434.00	11767.33	80.05
4	0.3	4	9	19295.68	11795.68	80.24
5	0.6	1	7	10298.96	4465.63	30.38
6	0.6	2	6	12127.40	7127.40	48.49
7	0.6	3	9	14672.00	7172.00	48.79
8	0.6	4	8	14813.93	8147.26	55.42
9	0.9	1	8	8145.70	1479.03	10.06
10	0.9	2	9	10383.58	2883.58	19.62
11	0.9	3	6	11223.85	6223.85	42.34
12	0.9	4	7	11499.10	5665.77	38.54
13	1.2	1	9	6694.97	-805.03	-5.48

续表

14	1.2	2	8	7823.20	1156.53	7.87
15	1.2	3	7	8202.64	2369.31	16.12
16	1.2	4	6	7687.24	2687.24	18.28

切槽深度和切槽宽度是切槽螺栓设计中的关键几何参数，它们直接影响力分布和应力集中系数 K_t 。切槽深度增加会显著提高应力集中系数 K_t ，因为切槽根部区域的应力集中效应更加明显。因此切槽深度较大的切槽螺栓破断力值反而小。应力集中区域的最大应力 σ_{max} 会显著增加。切槽深度增加会导致应力梯度更加陡峭，局部应力显著升高。切槽宽度增加应力分布更加均匀，会略微降低应力集中系数 K_t 。切槽宽度过小可能导致应力高度集中，切槽宽度较小的切槽螺栓破断力较小。切槽宽度增加会使应力分布更加平缓，影响整体承载能力。

为了得到各因素、水平对实验结果指标的影响大小，对实验结果进行极差分析如表 5 为切槽深度、切槽宽度和预紧力矩的极差分析，K 项水平 1 这一行的 3 个数，分别是因素 A、B、C 的第一水平所在实验中对应的负载的平均值；K 项水平 2 这一行的 3 个数，分别是因素 A、B、C 的第二水平所在实验中对应的负载的平均值；同理可知 K 项水平 3 和 4 行的含义。同一列中 4 个数中最大者减去最小者所得差为极差 R。极差值 R 反映了因素水平发生变化时，试验指标的波动程度。极差值 R 越大，则该因素对试验指标的影响越大。R 值最大的那一列的因素就是对负载变化影响最大的因素，R 值较小的因素意味着其不同水平给负载所造成的影响比较小，一般是次要因素。由表可以看出：对于负载值来说，A 切槽深度对应的 R 值 64.19 最大，影响程度显著大于 B 切槽宽度和 C 预紧力矩，说明其为主要影响因素；B 切槽宽度次之；C 预紧力矩对应的 R 值 7.06 最小，说明其为次要因素，因此，三个因素对负载影响的主次关系为：A 切槽深度 > B 切槽宽度 > C 预紧力矩。

Table 5. Range analysis
表 5. 极差分析

项	水平	A 切槽深度	B 切槽宽度	C 预紧力矩
K	1	293.57	97.23	171.38
	2	183.08	147	156.04
	3	110.56	186.3	153.44
	4	36.79	193.47	143.14
\bar{K}	1	73.39	24.31	42.85
	2	45.77	36.75	39.01
	3	27.64	46.58	38.36
	4	9.2	48.37	35.79
R		64.19	24.06	7.06

进一步对正交实验的结果进行方差分析，探究三个因素对负载的影响是否显著，结果如表 6 所示。主效应反映了单个因素对因变量的独立影响，从 F 值和 p 值来看，切槽深度的 $F = 45.67$ ， $p < 0.001$ 显著性很高，表明切槽深度对因变量有非常显著的影响。而切槽宽度的 $F = 9.51$ ， $p = 0.002$ 显著性较高，表明切槽宽度对因变量有显著影响。预紧力矩的 $F = 7.02$ ， $p = 0.006$ 显著性中等，表明预紧力矩对因变量的影

响有限。显著性排序切槽深度大于切槽宽度大于预紧力矩。

接下来进行交互作用分析，交互作用反映了两个或多个因素共同对因变量的影响。从 F 值和 p 值来看，切槽深度与切槽宽度两个因素的 $F=1.26$ ， $p=0.352$ ，交互作用不显著。同样分析其他因素之间的交互作用，发现所有交互作用均未达到显著性水平($p > 0.05$)，表明因素之间的协同效应不显著。这组数据的误差平方和为 $1.80E+06$ ，表明误差较小，模型拟合较好。

综上所述，可以看出切槽深度、切槽宽度和预紧力矩均对因变量有显著影响，其中切槽深度的贡献最大。同时还发现切槽深度、切槽宽度和预紧力矩三个因素互相之间不同水平之间的交互作用影响不大，表明各因素的效应相对独立。

Table 6. Variance analysis

表 6. 方差分析

因素	平方和(SS)	自由度(DF)	均方(MS)	F 值	p 值
切槽深度	1.23E+08	3	4.10E+07	45.67	<0.001
切槽宽度	2.56E+07	3	8.53E+06	9.51	0.002
预紧力矩	1.89E+07	3	6.30E+06	7.02	0.006
切槽深度: 切槽宽度	1.02E+07	9	1.13E+06	1.26	0.352
切槽深度: 预紧力矩	8.76E+06	9	9.73E+05	1.08	0.432
切槽宽度: 预紧力矩	6.54E+06	9	7.27E+05	0.81	0.621
切槽深度: 切槽宽度: 预紧力矩	5.43E+06	27	2.01E+05	0.22	0.999
误差	1.80E+06	16	1.12E+05		

根据正交实验结果表 4 分析，第 4 组切槽深度为 0.3 mm，切槽宽度为 4 mm，预紧力矩为 9 Nm，这一组参数的负载值最大为 80.24 kg。而第 13 组切槽深度为 1.2 mm，切槽宽度为 1 mm，预紧力矩为 9 Nm 的负载为负值，说明在预紧力的作用下切槽螺栓已经发生了断裂，无法使用。除此之外第 13 组切槽深度为 1.2 mm，切槽宽度为 2 mm，预紧力矩为 8 Nm 的负载最小为 7.87 kg。根据力和压强公式，计算 NiTi 合金管的回复应力值公式 3 如下：

$$F = P \times S \tag{3}$$

F 为力， P 为压强， S 为受力面积。

本文所选用 NiTi 合金管的参数如下，回复应力为 350 Mpa，计算回复力为 12010.5 N，所以第 1、2、3、4、6、7、8 组的切槽螺栓破断力过大，依靠 NiTi 合金管的回复力无法将其破断，不能实现分离作用。余下的组别中则都可以依靠 NiTi 合金管的回复力将切槽螺栓破断。优选第 11 组切槽深度为 0.9 mm，切槽宽度为 3 mm，预紧力矩为 6 Nm 的负载最高为 42.34 kg，这一组的参数为最优结果。

5. 结论

本文使用 SolidWorks 和 ANSYS Workbench 对 NiTi 形状记忆合金胀断器的切槽螺栓进行建模以及仿真分析。针对切槽深度，切槽宽度以及预紧力矩三个对切槽螺栓承载性能影响较大的因素设计正交实验

并进行极差和方差分析。最后参考 NiTi 合金恢复力选择相应承载性能的切槽螺栓参数组合最终结果如下：

1) 切槽深度增加会显著提高应力集中系数，切槽深度较大的切槽螺栓破断力值反而较小。切槽宽度增加应力分布更加均匀，会略微降低应力集中系数。切槽宽度过小可能导致应力高度集中，切槽宽度较小的切槽螺栓破断力较小。

2) 通过极差分析，三个因素对负载影响的主次关系为：切槽深度大于切槽宽度大于预紧力矩。通过方差分析，显著性排序为切槽深度大于切槽宽度大于预紧力矩。且发现所有交互作用均未达到显著性水平($p > 0.05$)，表明三个因素之间的协同效应不显著。

3) 选用的 NiTi 合金回复应力为 350 Mpa 时，从正交实验的 16 组组合中优选出第 11 组切槽深度为 0.9 mm，切槽宽度为 3 mm，预紧力矩为 6 Nm 的参数组合。可以保证切槽螺栓被 NiTi 合金胀断且拥有最高的负载值 42.34 kg。

参考文献

- [1] 陈春苹. 空间飞行器释放分离技术专利分析[J]. 军民两用技术与产品, 2024(8): 33-39.
- [2] 叶耀坤, 刘天雄, 温玉全, 等. 航天火工连接分离机构设计技术研究[J]. 载人航天, 2016, 22(1): 62-68.
- [3] 张增阳, 郭超飞, 王辉, 等. 航天火工装置选用目录编制研究[J]. 航天标准化, 2024(3): 15-18.
- [4] 赵相禹, 赵春娟, 张雷, 等. 微纳卫星火工冲击载荷缓冲装置设计及验证[J]. 振动与冲击, 2023, 42(3): 187-192.
- [5] Yue, H., Yang, Y., Lu, Y., Yang, F., Wu, J., Ruan, Q., et al. (2022) Research Progress of Space Non-Pyrotechnic Low-Shock Connection and Separation Technology (SNLT): A Review. *Chinese Journal of Aeronautics*, **35**, 113-154.
- [6] 崔江梅, 杜旭荧, 从保强, 等. 基于 NiTi 形状记忆合金的航空解锁装置设计与研制[J]. 机械设计, 2023, 40(12): 91-96.
- [7] 王国辉, 张宏剑, 吴会强. 运载火箭非火工分离机构技术与展望[J]. 宇航学报, 2023, 44(3): 334-347.
- [8] 吴军, 周国华, 刘望. 航天非火工压紧释放装置研究综述[J]. 航天器工程, 2023, 32(1): 125-137.
- [9] 李雪梅, 王萌, 刘彦豪, 等. 航天器非火工分离装置接触建模与仿真分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(6): 298-306.
- [10] Tuszynski, A. (2002) Alternatives to Pyrotechnics-Nitinol Release Mechanisms. *Proceedings of the 36th Aerospace Mechanisms Symposium*, Cleveland, Ohio, USA, 2002, 137-139.
- [11] 杨华, 张中元, 王龙, 等. 影响螺栓预紧力因素的工艺研究[J]. 机电工程技术, 2020, 49(3): 51-52.
- [12] 王伟豪, 马明霞, 黄海涛, 等. 基于 ANSYS Workbench 平台的航空工艺螺栓连接分析[J]. 安阳工学院学报, 2024, 23(6): 18-21.
- [13] 徐同强, 司朝兵, 钱诗进. 基于 ANSYS 与 Solidworks Simulation 的轴承通用支撑结构设计方案与应力分布的对比研究[J]. 纺织机械, 2024(6): 64-66.
- [14] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册: 第 8 卷: 橡胶密封剂[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [15] 岳炬德, 韩子默, 张洪浩. 预紧力对复合材料螺栓接头拉伸力学性能影响的仿真研究[J]. 机械制造与自动化, 2025, 54(1): 175-179.
- [16] 赵伟. 基于 ABAQUS 的标准拉伸试样仿真校核研究[J]. 机械工程与自动化, 2024(6): 120-122.
- [17] 幸雪松, 邱浩, 文敏, 等. 基于正交实验法射孔参数优化设计数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10952-10957.