

基于螺栓预紧力的导弹滑块连接 结构冲击响应分析

郇光周¹, 何志杰¹, 朱瑞², 白晶¹, 许晓强¹, 杨娇娇²

(1. 陕西中天火箭技术股份有限公司, 西安 710025;
2. 西安航天三沃机电设备有限责任公司, 西安 710100)

摘要: 目的 针对特定型号导弹舱段与前滑块之间的螺栓连接结构在预紧力作用下可能遇到的冲击响应问题, 对螺栓连接结构的耐冲击环境适应性进行研究。方法 首先, 基于螺栓连接理论, 计算出推荐的预紧力以及保证结构不发生破坏所需的最小预紧力值。然后, 为了验证螺栓连接结构计算模型的准确性, 采用有限元分析方法, 并参照相关标准对模型进行校核。随后, 对 3 种不同的前滑块与舱段螺栓连接结构施加预紧力的情况进行有限元模拟, 找出最优的连接结构配置。最后, 研究重点转向整个导弹与发射装置的结构系统。结果 螺栓连接的预紧力模型与试验值表现出了良好的一致性, 证明了所选参数和模型的准确性。同时, 螺栓配合螺母的连接方式在预紧力的作用下能够达到最小的应力水平, 故选择其为滑块与舱段间的连接。另外, 性能等级为 12.9 的螺栓可以满足垂向的冲击载荷。结论 通过对系统在预紧力的作用下施加垂向冲击进行响应分析, 可以评估弹架组合下滑块螺栓连接结构在实际应用中的耐冲击环境适应性。该研究为该型号导弹的设计提供了科学依据, 确保其在极端冲击环境下的可靠性和安全性, 进而提升整体作战效能。

关键词: 螺栓; 滑块; 螺栓连接; 预紧力; 导弹; 冲击响应; 有限元模型

中图分类号: TH12 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)11-0055-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.11.008

Impact Response Analysis of Missile Sliding Blocks Connection Structure Based on Preload for Bolt

HUAN Guangzhou¹, HE Zhijie¹, ZHU Rui², BAI Jing¹, XU Xiaoliang¹, YANG Jiaojiao²

(1. Shaanxi Zhongtian Rocket Technology Co., Ltd., Xi'an 710025, China;
2. Xi'an Space Three Walter Mechanical and Electrical Equipment Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

ABSTRACT: The work aims to study the adaptability of the bolt connection structure to the impact environment, so as to solve the possible impact response issues between the specific model of the missile cabin section and the front slider under pre-tension. Firstly, based on the theory of bolted connections, the recommended preload and the minimum preload required ensuring the structure intactness was calculated. Next, in order to verify the accuracy of the calculation model for bolted connection structures, the finite element analysis method was used, and the model was verified according to relevant standards. Subsequently, finite element simulations were conducted on the application of finite to three different front sliding blocks and cabin

收稿日期: 2024-04-26; 修订日期: 2024-07-16

Received: 2024-04-26; Revised: 2024-07-16

引文格式: 郇光周, 何志杰, 朱瑞, 等. 基于螺栓预紧力的导弹滑块连接结构冲击响应分析[J]. 装备环境工程, 2024, 21(11): 55-64.

HUAN Guangzhou, HE Zhijie, ZHU Rui, et al. Impact Response Analysis of Missile Sliding Blocks Connection Structure Based on Preload for Bolt[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(11): 55-64.

bolt connection structures, and the optimal connection structure configuration was found. Ultimately, the research focus shifted to the structural system of the entire missile and launch device. The results showed good consistency between the preload model of bolt and the experimental values, proving the accuracy of the selected parameters and model above mentioned. At the same time, the connection method of bolts and nuts could achieve the minimum stress level under the action of preload, so it was selected as the connection between the sliding blocks and the cabin section. In addition, bolts with a performance level of 12.9 could stand vertical impact loads. By analyzing the response of the system to vertical impact under preload, the adaptability of the sliding blocks connection structure under the combination of the spring frame to the impact environment in practical applications could be evaluated. This study provides a scientific basis for the design of this type of missiles, ensuring its reliability and safety in extreme impact environments, thereby improving overall combat effectiveness.

KEY WORDS: bolt; sliding blocks; bolt connection; preload; missiles; impact response; finite element model

随着轻量化设计的推进和几何结构尺寸限制的增加,滑块的非标准化设计变得日益普及。在这种情况下,螺栓连接方式因其良好的紧固效果而成为不同材料滑块与舱段之间常用的连接方式。通常采用小直径螺栓进行连接,以满足质量和空间的要求。在对小直径螺栓施加扭矩时,扭矩过大可能使螺栓断裂或连接结构受压损而发生破坏,扭矩过小则可能引起螺栓松动,特别是在瞬态冲击载荷下,这些问题轻则影响导弹性能,重则可引发载机平台安全等重大事故,因此滑块螺栓连接结构的力学环境适应性在工程中引起了广泛的关注。

螺栓连接结构装拆方便,可传递较大载荷,因而成为了导弹滑块连接结构中一种常用的形式。有的学者通过理论研究计算出了出螺纹的预紧力。比如文献[1-2]在阐述了螺纹连接预紧力的重要性后,通过受力分析给出了螺纹连接的最大预紧力、最小预紧力和适当预紧力的理论计算方法,但并未考虑环境所带来的干扰。文献[3]从理论方面分析了各个等级的螺栓连接所对应预紧力的参考值,然而仍未将特殊的恶劣环境因素所引起的计算误差考虑在内。有限元软件在预紧力螺栓连接结构的分析研究上发挥了重要的作用,并取得了一定的成果。文献[4]采用3种简化的近似方法计算了螺栓变形时的形变和力,具有一定的精度。文献[5-9]对螺栓连接进行了有限元分析,将接触面间的摩擦因数考虑在内,主要分析了螺栓连接结构在特定预紧力下的应力分布情况,但并没有对螺栓在工作载荷作用下预紧力的范围进行讨论。文献[10-11]采用节点耦合模拟了螺纹副的连接作用,并使用有限元对单个螺栓进行了分析。文献[12]通过有限元对摩擦型高强螺栓的抗剪连接性能进行了分析,探讨了摩擦因数、螺栓的预拉力等对连接的影响。文献[13-14]对爆炸螺栓解锁过程中的冲击载荷及其产生机制进行了有限元分析,指出了螺栓爆炸过程中爆炸和撞击2种冲击响应所占的比例。目前,针对冲击载荷作用下螺栓连接结构的动力学行为研究,也有一些成果呈现^[15-19]。文献[20]对螺栓冲击载荷作用下的预紧螺栓进行了强刚度分析,指出纯刚性结构件在承受冲击载荷作用方

面风险较大,存在断裂的可能。文献[21]对冲击载荷作用下的预紧力螺栓进行了强度分析,对比分析了螺栓连接结构在横向冲击和纵向冲击以及不同预紧力和不同冲击载荷工况下的螺栓强度和结构响应。文献[22]指出了爆炸螺栓拧紧力矩与加速度响应峰值的线性关系,并强调拧紧力矩在1倍范围内变化对爆炸分离冲击中远场响应的影响较小。上述研究成果对于螺栓的受力分析,尤其是基于有限元的仿真分析已经较为详细,然而对弹架组合结构在冲击载荷下的螺栓组特性分析研究较少。另外,由于导弹滑块所处环境恶劣,需要建立全模型进行分析,以匹配质量及转动惯量,得到滑块螺栓连接结构在预紧力作用下的冲击响应特性,保证滑块螺栓连接结构的安全性与可靠性。

本研究首先应用螺栓理论对连接螺栓的扭矩和预紧力之间的转换关系进行了理论推导,并计算得到了推荐预紧力和最小破坏预紧力的值。接下来,依照相关规范,采用有限元模拟软件对滑块螺栓连接结构施加最小破坏预紧力,以此检验螺栓连接结构的计算模型是否符合实际情况。随后,针对3种不同设计的前滑块与舱段之间的螺栓连接结构进行了预紧力的有限元分析,从而筛选出最佳设计方案。最终,对整个导弹与发射装置的结构,在施加预紧力的条件下,对其在垂向冲击载荷下的响应进行了分析,得到螺栓性能等级选型及各零部件的受力状态,以此来验证弹架组合下滑块连接结构对于冲击环境的适应能力。

1 几何模型及材料属性

对发射装置及导弹结构进行全模型建模。着重对非承力部件进行简化,在不影响计算结果的前提下,以提高网格划分质量及计算效率,具体如下:

- 1) 对导弹滑块、舱段壁厚、核心承力部件、发射装置滑轨、滑轨壁厚、滑轨挡块均进行全模型建立。
- 2) 对导弹各舱段单机设备质量、发射装置各零部件机构使用质量点进行模拟,保证质心、转动惯量保持一致。
- 3) 对非承力零部件的小直径螺纹孔、通孔、键

槽及部分倒角进行简化处理, 提高网格划分质量。

根据第 1 点, 对几何模型进行了简化处理, 如图 1 所示。导弹采用同时离轨的发射方式, 并通过 U-T 滑块与发射装置相连接。前滑块为 U 形, 通过 4 个 M4 螺钉/螺栓与舱段牢固地连接在一起, 如图 1a 所示。与舱段连接的 3 种螺栓结构方案如图 2 所示。后滑块为 T 形, 通过焊接方式与舱段紧密相连, 如图 1b 所示。本文将着重对前滑块螺栓连接结构进行研究。发射装置和导弹主要零部件的材料属性见表 1。

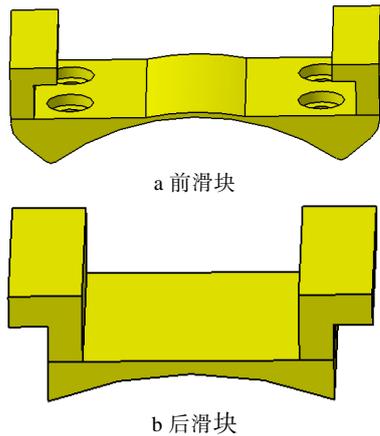


图 1 滑块

Fig.1 Sliding block: a) front sliding block; b) rear sliding block

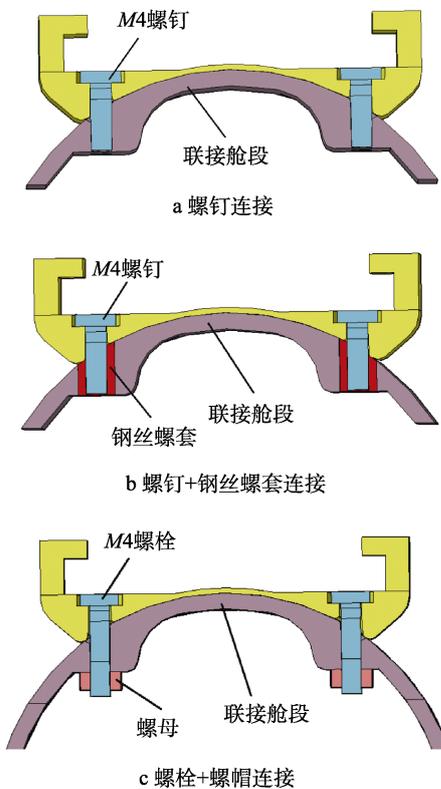


图 2 滑块螺栓连接结构

Fig.2 Sliding blocks and bolt connection structure: a) screw connection; b) screw+wire thread connection; c) bolt+nut connection

表 1 结构主要部件材料属性

Tab.1 Material properties of main structural components

零件名称	材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
滑块	30CrMnSiA	206	0.3	7 850
发动机壳体				
螺栓/螺钉	0Cr17Ni4CuN6	213	0.27	7 780
螺母				
飞控舱	7A06	70	0.3	2 750
滑轨	7075	71	0.3	2 810

2 螺栓扭矩与预紧力之间的转换关系

在工程实践中, 螺栓连接结构的扭矩值是直接施加的, 而仿真和理论计算中更多使用的是预紧力值。因此, 扭矩与预紧力之间的转换关系至关重要。通常情况下, 对于公称直径 M10 以上的螺纹连接结构, 会使用公式 $T=0.2dF_0$ 进行安装扭矩和预紧力之间的近似转换。该公式在使用式 (1) 的过程中, 对摩擦角等参数进行近似处理, 由于 M10 以上螺栓扭矩范围大, 该相对误差不影响工程实际使用。然而当涉及到公称直径 M8 及以下的小直径螺栓或螺钉连接结构时, 由于该区域螺栓扭矩量级偏小, 该公式可能会产生较大的相对误差。在这种情况下, 需依据式 (1) 进行更为精确的计算, 以确保预紧力的准确性和结构的安全性。

$$T = \frac{1}{2} F_0 \left[d_2 \tan(\rho^* + \beta) + \frac{2}{3} \mu_w \frac{B^3 - D_t^3}{B^2 - D_t^2} \right] \quad (1)$$

其中: F_0 为预紧力; T 为扭矩; d_2 为螺栓标准尺寸; ρ^* 为螺纹面摩擦角; β 为螺纹升角; μ_w 为支撑面摩擦因数; B 为螺母对边距离; D_t 为螺纹孔直径。

对于公称直径为 4mm 的细牙螺纹/螺钉, 摩擦因数均取 0.25 时, 通过计算^[23-24]可得预紧力与扭矩之间的转换关系, 见式 (2)。

$$T = 0.225dF_0 \quad (2)$$

初步选取强度等级为 10.9 级的 M4 螺栓/螺钉, 其工程施加推介扭矩值为 3.2 N·m, 对应推介预紧力值为 3 555 N。根据 GB/T 3098.13 《紧固件机械性能螺栓与螺钉的扭矩试验和破坏扭矩公称直径 1~10 mm》, 对于性能等级为 9.8 级的 M4 螺栓/螺钉, 其最小破坏扭矩为 4.4 N·m, 对应推介预紧力值为 5 888 N。

根据 GB/T 3098.13 试验装置建立等效仿真模型, 如图 3a 所示。首先使用绑定接触模拟螺纹配合, 其余接触使用摩擦接触模拟, 摩擦因数为 0.2。之后, 在模型上施加 5 888 N 的最小破坏预紧力进行计算 (如图 3b 所示), 以验证相关参数及模型适用性。

分析结果显示, 螺栓螺帽连接的根部承受的应力最大, 达到 1 118 MPa。在该位置取径向平均应力值, 得出的结果为 1 043 MPa (如图 4 所示), 与材料抗

拉强度 1 040 MPa 吻合。此外,观察螺纹部位的应力分布发现,最大应力出现在第一圈螺纹处,其值为 848 MPa,如图 5 所示,与螺栓在实际工作条件下的

应力分布相符^[25]。综合分析结果,螺栓连接模型中扭矩与预紧力的转换系数 K 值以及相应的计算模型是有效的。

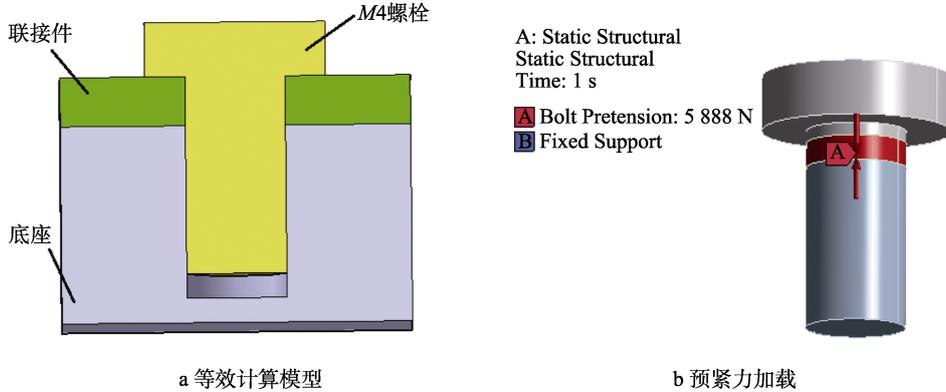


图 3 等效计算模型 (a) 及预紧力 (b)
Fig.3 Equivalent calculation model (a) and preload (b)

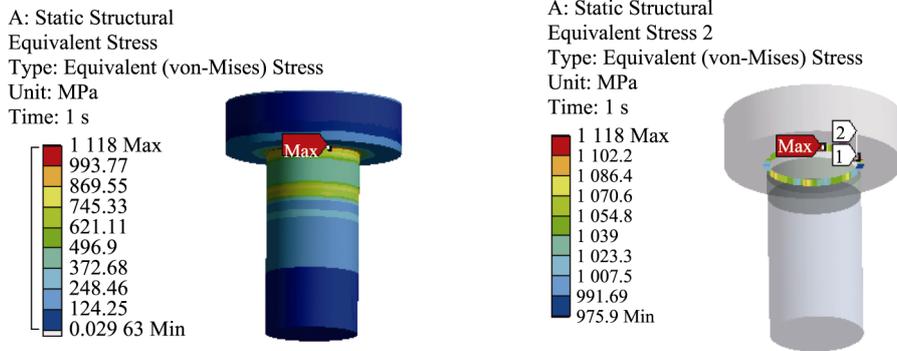


图 4 螺帽根部的等效应力
Fig.4 Equivalent stress pattern at nut root

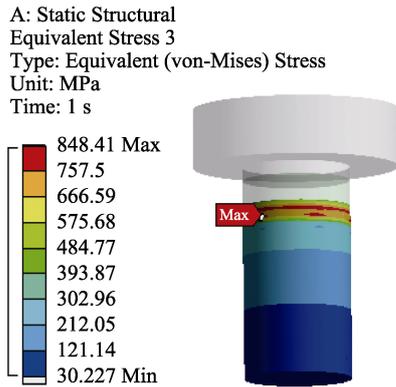


图 5 螺纹应力云图
Fig.5 Stress pattern of screw thread

3 有限元模型的建立

为减少计算量,将滑块、舱段等均切分后组体,从而提高网格划分质量,并减少网格数量。对于像滑块和导轨这类关键区域,网格进行了细化处理,确保在厚度方向至少有 2 层网格。对于非关键区域,则采

用了较粗的网格,以控制整体的计算规模。最终,整个结构的单元数达到了 32 万个,节点数则为 72 万个,如图 6 所示。

1) 接触设置。螺栓螺帽与前滑块、舱段与前滑块设置接触摩擦,摩擦因数为 0.2。螺纹咬合配合部分设置为绑定接触,模拟螺纹连接。后滑块与对应舱段设置绑定接触模拟焊接连接。



图 6 导弹结构整体有限元模型
Fig.6 Finite element model of missile structure

2) 滑块与发射装置导轨连接面及闭锁挡块设置不分离接触,模拟与发射装置的连接状态。

3) 发射装置与载机连接孔进行固定约束。

4 静力分析

根据滑块螺栓连接结构的 3 种方案, 施加推介预紧力值进行静力学分析。

4.1 螺钉连接方式

设置螺钉与舱段之间为绑定接触, 从而模拟了螺纹连接, 其余设置同小节 3 所述。由结果可得, 螺钉根部平均应力为 1 009 MPa, 最大应力为 1 367 MPa。分析原因可得, 由于螺纹配合处存在斜面配合, 导致螺钉根部局部发生应力集中现象。滑块的最大应力为 286 MPa, 舱段的最大应力为 329 MPa。

4.2 螺钉+钢丝螺套方式

设置螺套与舱段共节点, 螺纹与螺套通过绑定接触模拟螺纹连接, 其余设置同小节 3。由结果可得, 螺钉根部的平均应力为 890 MPa, 最大应力为 1 211 MPa, 钢丝螺套最大应力高达 1 677 MPa。分析原因可得, 钢丝螺套与螺纹之间存在斜面配合, 导致配合面处出现较大的应力集中现象。滑块最大应力为 472 MPa, 发生在钢丝螺套接触的部位, 舱段连接位置最大应力为 329 MPa。

4.3 螺栓+螺母方式

螺母与舱段设置为接触摩擦, 摩擦因数为 0.2, 螺纹与螺母通过绑定接触模拟螺纹连接, 其余设置同小节 3。由结果可得, 螺钉根部的应力分布较为均匀, 平均应力为 771 MPa, 但存在一定的应力波动, 其中最大应力为 965 MPa, 最小应力为 607 MPa; 螺纹处最大应力为 352 MPa, 发生在第 1 圈螺纹处; 螺母的最大应力为 290 MPa; 滑块的最大应力为 170 MPa, 发生在与螺帽连接处; 舱段连接位置的最大应力最低, 为 118 MPa。3 种方案的结果应力云图见图 7~13, 具体应力值见表 2。

4.4 结果分析

由 3 种方案的等效力分布可得, 最大应力均发生在螺帽与螺杆连接处, 其中螺钉连接方式应力最大, 在该处径向位置应力差最大, 螺栓+螺母连接方式应力最小, 满足强度要求。螺钉连接方式、螺钉+螺套连接方式由于存在斜面配合, 螺纹配合处应力不均匀, 存在较大应力集中。由螺钉+钢丝螺套连接方式可得, 钢丝螺套与舱段连接面及滑块接触面处发生较大应力集中, 超过材料抗拉强度, 该应力集中在长时间振动过程中易发生疲劳损伤。

由表 2 及上述分析结果可得, 在推介预紧力作用下, 螺栓+螺母连接方式各部件等效力最小, 分布均匀, 且满足材料抗拉强度要求。该方案可作为最终前滑块螺栓连接结构, 后续将以该方案进行冲击响应分析。

5 冲击响应分析

5.1 载荷谱加载

使用冲击响应模块进行动力学分析, 其中第 1 载荷步设置预紧力, 为 3 555 N。第 2 载荷步进行冲击载荷施加, 按照 GJB 150.18A—2009《军用装备实验室环境试验方法第 18 部分: 冲击试验》的有关规定, 冲击载荷要求如下: 满载带弹状态下, 冲击脉冲波形选择后峰锯齿脉冲, 其中较为严酷的为垂向下加速度进行加载, 其加速度量级为 20g, 持续时间为 11 ms。冲击载荷谱如图 14 所示。

5.2 结果分析

1) 螺帽根部平均应力为 783 MPa, 最大应力达到 1 089 MPa (超过了材料的抗拉强度), 螺纹处最大应力为 494 MPa, 位于与舱段连接的内侧, 如图 15 所示。与仅施加预紧力的情况相比较, 此处应力增幅

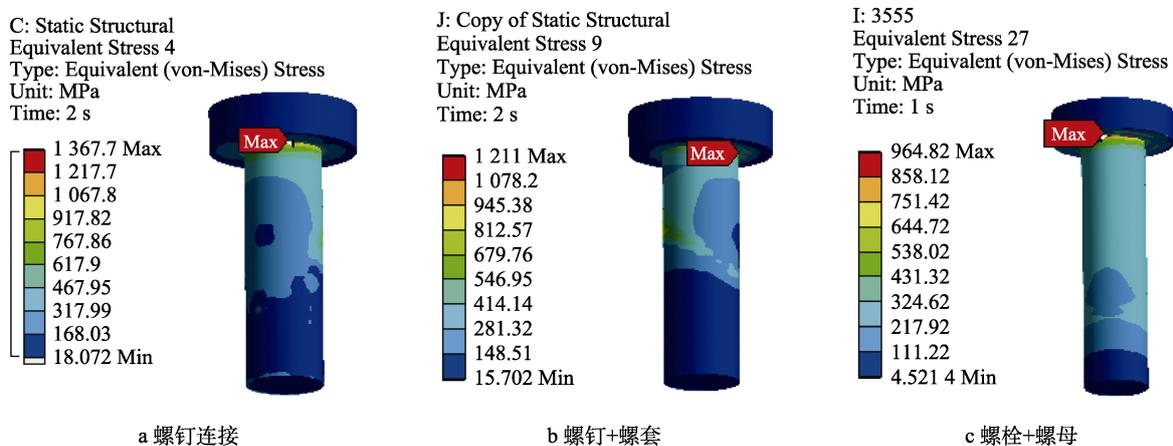


图 7 螺帽根部等效力云图

Fig.7 Equivalent stress pattern at nut root: a) screw connection; b) screw+screw sleeve; c) bolt+nut

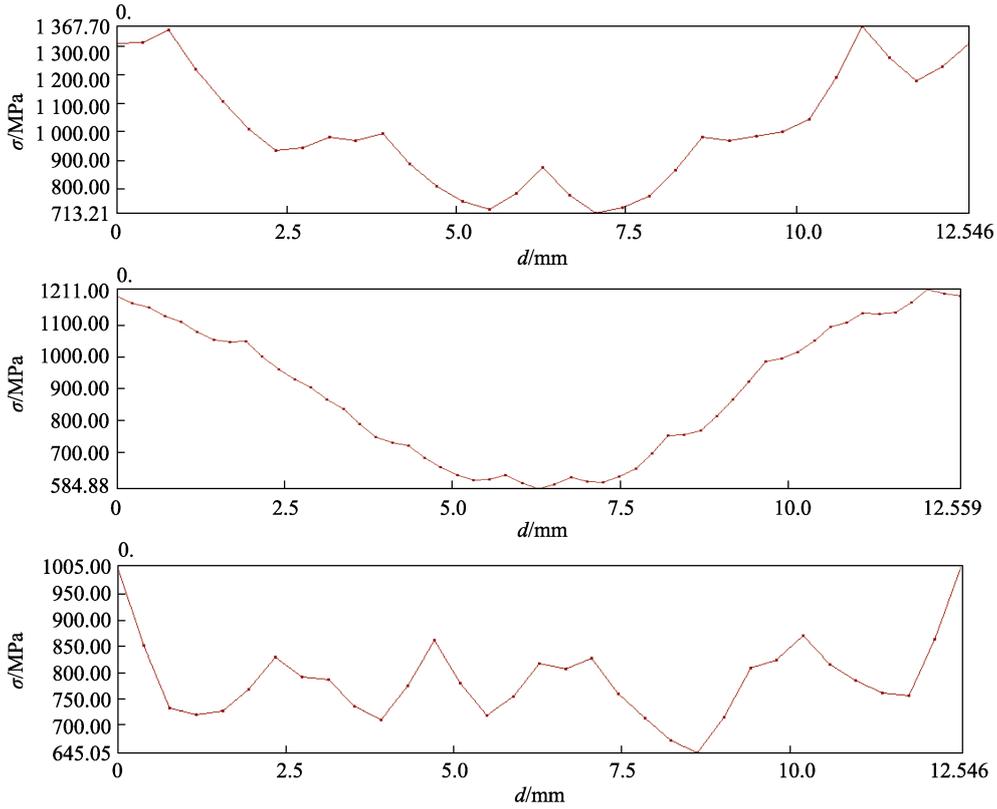


图8 螺帽根部径向平均应力曲线

Fig.8 Radial average stress curve at nut root: a) screw connection; b) screw+screw sleeve; c) bolt+nut

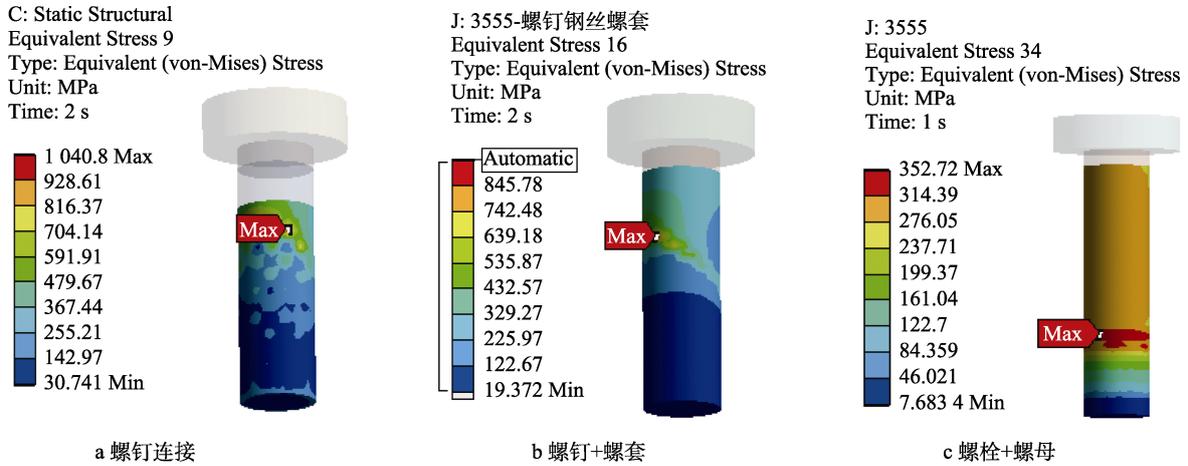


图9 螺纹处等效应力云图

Fig.9 Equivalent force pattern at screw thread: a) screw connection; b) screw+screw sleeve; c) bolt+nut

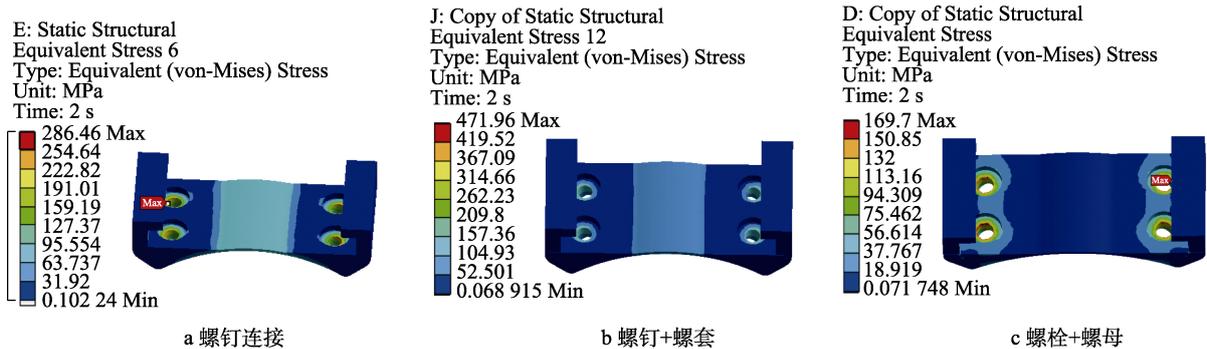


图10 滑块等效应力云图

Fig.10 Equivalent stress pattern of sliding block: a) screw connection; b) screw+screw sleeve; c) bolt+nut

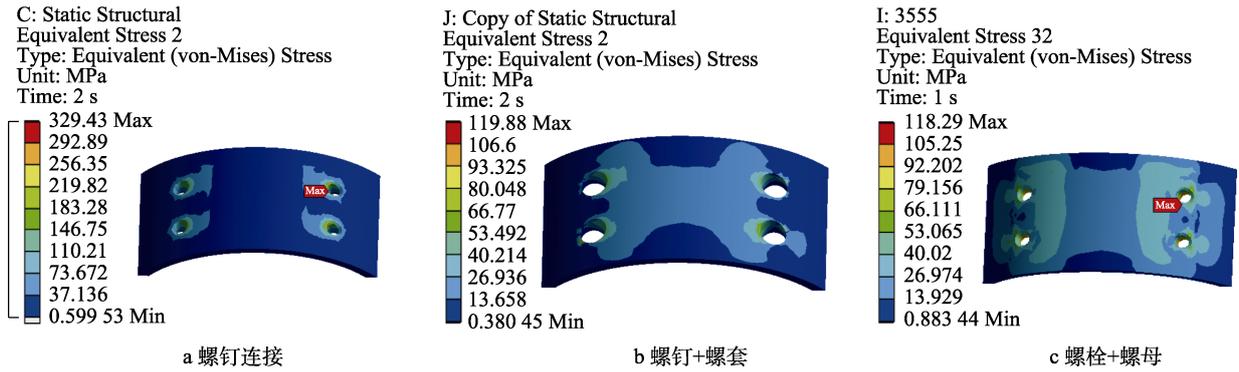


图 11 连接舱段等效应力云图

Fig.11 Equivalent stress pattern of connecting cabin section: a) screw connection; b) screw+screw sleeve; c) bolt+nut

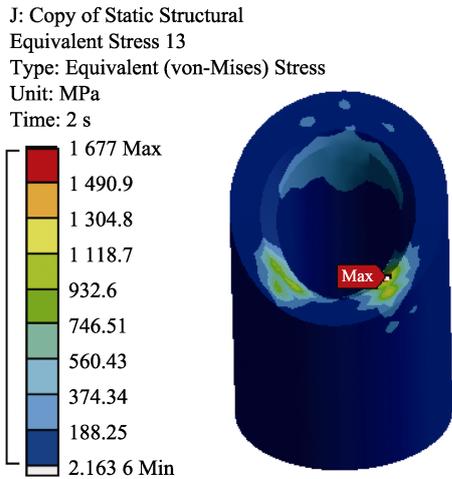


图 12 螺套应力云图

Fig.12 Equivalent stress pattern of screw sleeve

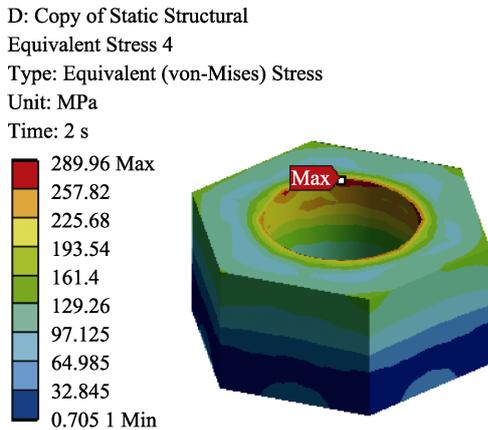


图 13 螺母应力云图

Fig.13 Equivalent stress pattern of nut

表 2 3 种滑块螺栓连接结构方案预紧力下的等效应力
Tab.2 Equivalent stress of three types of sliding blocks and bolts connection structure schemes under preload

零部件名称	零部件应力/MPa		
	螺钉	螺钉+螺套	螺栓+螺母
螺栓/螺钉	平均应力	1 009	890
	最大应力	1 367	1 211
	最小应力	713	585
	应力差	654	626
螺纹	最大应力	1 041	949
滑块	最大应力	286	472
舱段	最大应力	329	120
螺母	最大应力	—	290
螺套	最大应力	—	1 677

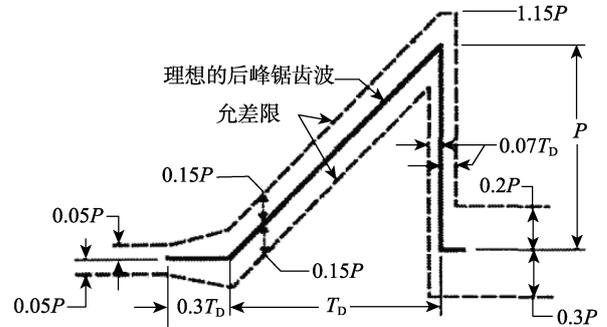


图 14 后峰锯齿波形参数

Fig.14 Parameters of rear peak saw tooth wave

3) 由于螺栓最大应力不满足强度要求, 选取性能等级为 12.9 的螺栓, 其屈服极限 $\sigma_s=1\ 080\text{ MPa}$, 其抗拉强度 $\sigma_b=1\ 220\text{ MPa}$ 。

综上所述, 根据 $35\% \sigma_s \leq \sigma \leq 80\% \sigma_s$ 的设计要求, 螺栓等效应力应满足 $378\text{ MPa} \leq \sigma_v \leq 864\text{ MPa}$ 。由以上结果可得, 螺栓螺帽根部等效平均应力为 771 MPa, 满足要求; 螺帽根部最大应力 1 089 MPa, 小于抗拉强度要求, 其螺纹处等效应力为 494 MPa, 满足不小于 35% 的应力要求 (378 MPa)。因此, 弹架组合在垂向冲击载荷下满足强度设计要求。

较大。分析原因可得, 弹体在冲击载荷下的弯曲变形导致舱段局部压缩, 进而使螺纹内侧受挤压。后续可对舱段结构进行强化, 增加刚度。

2) 螺母最大应力为 376 MPa, 舱段连接位置为 124 MPa, 滑块最大应力为 177 MPa, 如图 16 所示。滑块最大变形量为 0.114 mm, 如图 17 所示, 不影响其装配特性, 满足刚度要求。

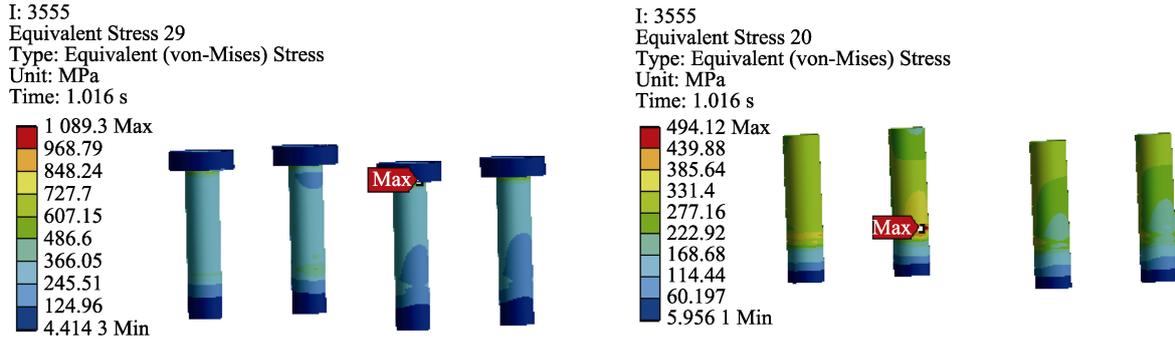


图 15 螺栓等效应力云图
Fig.15 Equivalent stress pattern of bolts

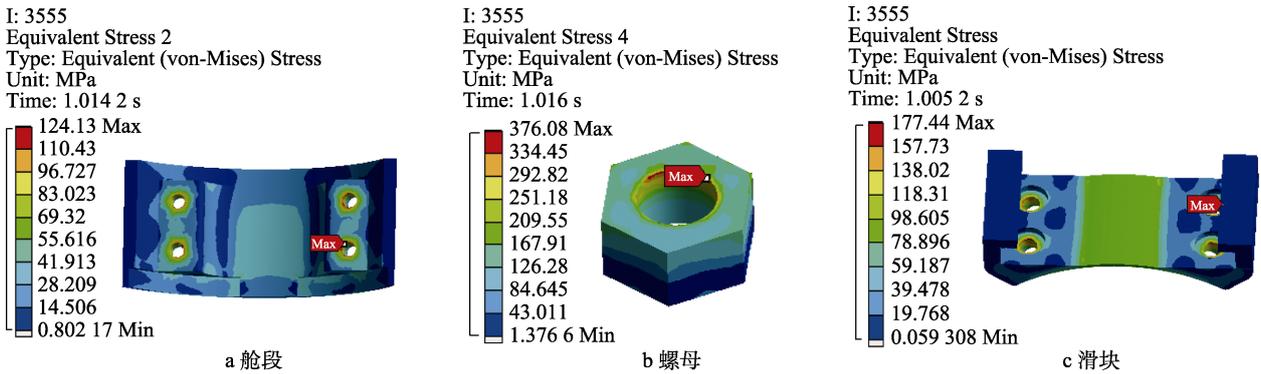


图 16 各零部件的等效应力云图
Fig.16 Equivalent stress pattern of each component: a) cabin section; b) nut; c) sliding block

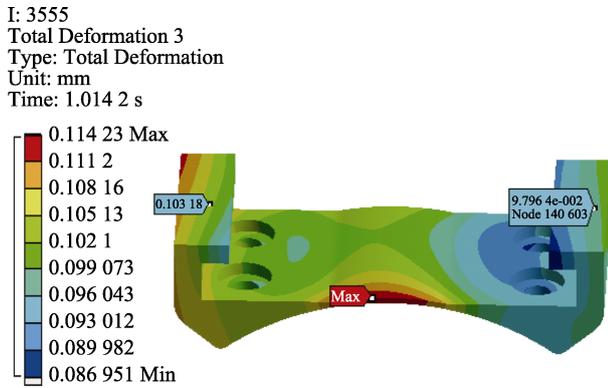


图 17 滑块变形云图
Fig.17 Deformation pattern of sliding block



图 18 螺栓+螺母连接结构
Fig.18 Connection structure of bolt+nut

6 试验验证

对螺栓联结结构进行加工, 适配于全弹结构, 选取 12.9 级内六角螺栓, 对滑块联结结构 (螺栓+螺母联结方式) 设置 3.2 N·m 推介预紧力, 其联结舱段如图 18 所示。根据全弹环境试验, 使用专用挂机振动工装对导弹进行挂装, 对弹架组合 3 个方向进行冲击试验, 波形为后峰锯齿, 每个方向 3 次, 共 18 次, 载荷量级为垂向 20g, 侧向及航向 15g, 如图 19 所示。冲击试验后, 螺栓及螺母无松动, 滑块及舱段等结构无损伤, 试验结果满足要求, 螺栓+螺母联结方式联结可靠且推介扭矩值合理, 可指导工程实际。

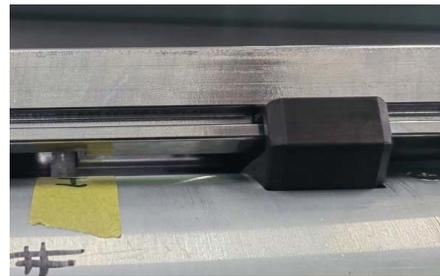


图 19 挂机冲击试验
Fig.19 Hanging machine vibration impact test

7 结论

1) 由理论分析可得, 扭矩与预紧力之间的转换关系, 通过标准要求的试验装置进行等效仿真计算, 螺栓连接预紧力模型可有效吻合试验结果, 参数及模型有效。

2) 由仿真分析可得, 在推介预紧力作用下, 螺栓+螺母连接方案应力最小, 且分布较均匀, 选取其作为滑块与舱段间的连接方式。

3) 选用螺栓+螺母联结方式进行导弹结构装配, 施加推介扭矩值并进行弹架组合挂机冲击试验验证, 该结构及推介扭矩值经过试验考核, 可指导工程实际使用。

参考文献:

- [1] 应书勇. 螺纹连接预紧力在机载发射装置中的应用[J]. 航空兵器, 2007, 14(6): 59-62.
YING S Y. Application of Preloading of Screw Thread Connection for Aircraft Launcher[J]. Aero Weaponry, 2007, 14(6): 59-62.
- [2] 卜炎. 螺纹联接设计与计算[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
BU Y. Design and Calculation of Threaded Connection[M]. Beijing: Higher Education Press, 1995.
- [3] 陈燕. 联接用螺栓预紧力矩计算和参考使用值[J]. 电机技术, 2009(1): 53-55.
CHEN Y. Pre-Tightening Torque Calculation of Screw Bolts Hitch and Its Applicable Reference Value[J]. Electrical Machinery Technology, 2009(1): 53-55.
- [4] 杨光. 冲击载荷作用下螺栓连接的计算[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2007, 15(5): 1-3.
YANG G. The Calculation of Bolt Joint under the Impact Stress[J]. Journal of Henan Mechanical and Electrical Engineering College, 2007, 15(5): 1-3.
- [5] 陆秉权, 王海龙, 周小飞, 等. 应用有限元技术计算螺栓联接的方法研究[J]. 黑龙江电力, 2004, 26(2): 100-102.
LU B Q, WANG H L, ZHOU X F, et al. Stress Calculations for Bolt Joint Structures by Applying FEM[J]. Heilongjiang Electric Power, 2004, 26(2): 100-102.
- [6] 李军, 杨洁明, 高俊云. 大型风力机组塔架螺栓连接应力分析[J]. 钢结构, 2011, 26(7): 22-25.
LI J, YANG J M, GAO J Y. Stress Analysis on Tower Bolt Connection in Large Wind Turbine Set[J]. Steel Construction, 2011, 26(7): 22-25.
- [7] 曹占飞. 法兰、螺栓连接系统的三维有限元分析[J]. 石油化工设备技术, 2004, 25(6): 17-19.
CAO Z F. Three Dimension Finite Element Analysis of Flang Bolt Connection System[J]. Petro-chemical Equipment Technology, 2004, 25(6): 17-19.
- [8] 蒋丽. 拉力作用下高强螺栓连接的有限元模拟[J]. 山西建筑, 2006, 32(21): 56-57.
JIANG L. Finite Element Simulation of the High Strength Bote Connection[J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(21): 56-57.
- [9] 石慧敏, 焦圣德, 张茂锋, 等. SG21 型平地机工作装置高强度连接螺栓有限元分析[J]. 工程机械, 2010, 41(6): 34-36.
SHI H M, JIAO S D, ZHANG M F, et al. Finite Element Analysis for High Strength Connection Bolts in Work Attachment of Model SG21 Grader[J]. Construction Machinery and Equipment, 2010, 41(6): 34-36.
- [10] 夏卫明, 郑翔, 杨晓俊. 基于 ANSYS 的盲孔螺栓联接的有限元仿真[J]. 机械设计与制造, 2009(7): 42-44.
XIA W M, ZHENG X, YANG X J. FEM Simulation of Blind Bolt Connection Based on ANSYS[J]. Machinery Design & Manufacture, 2009(7): 42-44.
- [11] 郑志军, 王平. 基于 ANSYS 鼓形齿联轴器螺栓联接有限元分析[J]. 天津科技大学学报, 2011, 26(5): 52-56.
ZHENG Z J, WANG P. Finite Element Analysis on Bolt Connection of Crown Gear Coupling Based on ANSYS [J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2011, 26(5): 52-56.
- [12] 柳长江. 高强度螺栓连接的有限元分析[J]. 潍坊学院学报, 2007, 7(4): 123-125.
LIU C J. Finite Element Analysis of High-Strength Friction Bolt Connection[J]. Journal of Weifang University, 2007, 7(4): 123-125.
- [13] 王军评, 毛勇建, 黄含军. 点式火工分离装置冲击载荷作用机制的数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(2): 9-13.
WANG J P, MAO Y J, HUANG H J. Numerical Simulation for Impulsively Loading Mechanism of a Point Pyrotechnic Separation Device[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(2): 9-13.
- [14] 汤林, 杨树涛, 林鑫, 等. 中小型航天器爆炸螺栓解锁冲击响应特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(S1): 40-45.
TANG L, YANG S T, LIN X, et al. Impact Response Characteristics Due to Unlocking of Explosive Bolts in Small and Medium-Sized Spacecrafts[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(S1): 40-45.
- [15] 杨雪春, 卢怀亮, 黄树槐, 等. 螺栓的冲击载荷分析[J]. 机械强度, 2003, 25(6): 628-631.
YANG X C, LU H L, HUANG S H, et al. Analysis of Impact Load on Bolts[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(6): 628-631.
- [16] 杨璞, 谢若泽, 陈刚, 等. 冲击载荷下螺栓预紧力对应力波影响分析[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 113-120.
YANG P, XIE R Z, CHEN G, et al. Influence of Preload in Bolt on Stress Wave under Impact-Load[J]. Equipment Environmental Engineering, 2021, 18(5): 113-120.
- [17] 潘进梅, 殷晨波. 冲击载荷下螺栓预紧力对塔机动力特性影响[J]. 建筑机械化, 2016, 37(6): 39-41.
PAN J M, YIN C B. Under the Impact Load Bolt Pre-Tightening Force on the Dynamic Characteristics of Tower Crane[J]. Construction Mechanization, 2016, 37

- (6): 39-41.
- [18] 刘璐璐, 李志鹏, 韩佳奇, 等. 冲击载荷下单螺栓连接结构力学行为试验与仿真研究[J]. 推进技术, 2022, 43(2): 55-66.
LIU L L, LI Z P, HAN J Q, et al. Experimental and Numerical Simulation of Mechanical Behavior of Single Bolt Connection Structure under Impact Load[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(2): 55-66.
- [19] 丁振东. 航空发动机螺栓连接结构冲击载荷传递特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2021.
DING Z D. Study on Impact Load Transfer Characteristics of Aero-Engine Bolted Connection Structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021.
- [20] 卞亚东, 宋磊, 刘轩秀, 等. 爆炸螺栓冲击载荷作用下的捕获系统力学性能研究[J]. 强度与环境, 2021, 48(4): 26-29.
BIAN Y D, SONG L, LIU X X, et al. Study on Mechanical Properties of Capture System under Impact Load of Explosion Bolt[J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(4): 26-29.
- [21] 卞亚东, 宋磊, 刘轩秀, 等. 爆炸螺栓冲击载荷作用下的捕获系统力学性能研究[J]. 强度与环境, 2021, 48(4): 26-29.
BIAN Y D, SONG L, LIU X X, et al. Study on Mechanical Properties of Capture System under Impact Load of Explosion Bolt[J]. Structure & Environment Engineering, 2021, 48(4): 26-29.
- [22] 史冬岩, 张亮, 张成, 等. 冲击载荷作用下预紧力螺栓强度特性研究[J]. 船海工程, 2012, 41(2): 166-169.
SHI D Y, ZHANG L, ZHANG C, et al. Research of Strength Character of the Preloaded Bolt under Impact Load[J]. Ship & Ocean Engineering, 2012, 41(2): 166-169.
- [23] 黄含军, 王军评, 毛勇建, 等. 爆炸螺栓预紧力对冲击响应影响分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(16): 166-169.
HUANG H J, WANG J P, MAO Y J, et al. Influence of Pretightening Force of Explosive Bolts on Impulse Response[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16): 166-169.
- [24] 濮良贵, 纪名刚, 陈国定, 等. 机械设计[M]. 8版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 86-87.
PU L G, JI M G, CHEN G D, et al. Design of Machinery[M]. 8th ed. Beijing: Higher Education Press, 2006: 86-87.
- [25] (日)山本晃. 螺纹连接的理论与计算[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984.
(Japanese) YAMAMOTO A. Theory and Calculation of Threaded Connections[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Publishing House, 1984.