

文章编号 1004-924X(2014)12-3318-06

## 空间相机用爆炸螺栓防护装置

王书新\*, 李景林, 齐光, 李丽富, 陈长征

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**根据爆炸螺栓防护装置对结构尺寸的需求,设计了一种并联式联接结构的防护装置。结合爆炸螺栓阶梯状外形,采用防护挡板吸能变形的的方法实现了星上爆炸螺栓的防护。研究了材料应力应变曲线在屈服阶段的特点,建立了以强度极限为衡量防护是否失效的阈值,以破坏应变与塑性应变的比值为评价防护装置安全性能的标准。然后,采用 Abaqus/Explicit 对防护装置的防护性能进行了碰撞仿真分析。最后,通过爆炸螺栓解锁试验验证了防护装置的防护性能。碰撞仿真分析表明:防护螺栓最大应力为 897 MPa,小于该批次 TC4 材料的强度极限;最大塑性应变为 2.2%,小于材料许用塑性应变 2.6%;说明该防护装置在爆炸螺栓撞击下未发生破坏,具有足够的安全系数。爆炸螺栓解锁试验表明:防护挡板有轻微残余塑性变形,防护装置各零件结构完整、无破裂现象发生。这些结果说明:该防护装置结构紧凑,且能够安全有效地实现爆炸螺栓防护。

**关键词:**空间相机;爆炸螺栓;防护装置;强度极限

**中图分类号:**V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142212.3318

## Protecting device for explosive bolt in space camera

WANG Shu-xin\*, LI Jing-lin, QI Guang, LI Li-fu, CHEN Chang-zheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: surrey@139.com

**Abstract:** According to the demand of a protecting device of an explosive bolt for structure sizes, a shunt-would protecting device was designed to unlock the redundant connection between a space camera and a satellite. On the basis of the ladder-like profile of the explosive bolt, the protection of explosive bolt on the space camera was implemented by introducing the flexure plate absorb the kinetic energy of bolts to deform. According to the feature of true  $\sigma-\epsilon$  curve in the yield stage, the strength limit was used as a threshold to determine the structures to be fail or not, and the ratio of plastic strain to fail strain was adopted to estimate the safety performance of the device. Then, Abaqus/Explicit was used to analyze the protecting effect of device suffering from the collision. Finally, a physical experiment was carried out to validate further the design. The simulation results show that protecting bolts made of TC4 suffer the maximum stress about 897 MPa, less than strength limit; and the maximum strain is about 2.2%, less than allowable plastic strain (about 2.6%). These results indicate that the device endures the impact from explosive bolts with sufficient safety. The experiment

收稿日期:2014-02-25;修订日期:2014-03-19.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 86325113B)

shows that protecting plate presents light plastic deformation, and each part of the device has complete structure without a fracture or splinter. The proposed design is characterized by a compact size and effective protecting performance.

**Key words:** space camera; explosive bolt; protecting device; strength limit

## 1 引言

随着遥感技术对分辨率需求的不断提高,大口径、长焦距光学系统的应用更为广泛,从而进一步增大了空间相机的尺寸<sup>[1,2]</sup>。对于大中型空间光学遥感器,相机在发射段是通过联接座与卫星平台多点联接,这有利于降低相机动态响应、保障相机无损到达预定轨道;入轨后,相机与卫星平台三点联接,其余联接点则进行解锁,以消除多点联接因空间温度变化对相机成像质量造成影响<sup>[3]</sup>。实现解锁可采用火工品或非火工品完成<sup>[4,5]</sup>。不过,目前这一过程使用的产品还有待改进。这是因为满足使用的低冲量爆炸螺栓分离后的冲量会导致爆炸螺栓自由端弹出、撞击甚至损坏星上其它仪器;同时,弹出的自由端也会形成多余物对卫星及其载荷正常工作带来威胁。另外,由于解锁机构位于相机与卫星平台之间,防护装置安装操作空间狭小;而常规防护装置采用在捕捉筒内设置簧片进行缓冲的方法进行防护<sup>[6-8]</sup>,其串联的结构形式导致外形轮廓尺寸较大无法满足星上使用、安装操作要求。目前针对火工品防护问题的仿真分析主要围绕线性火工品开展<sup>[9,10]</sup>,对于爆炸螺栓等点式火工品的防护仿真分析未见公开文献报道。

本文根据某型号空间相机任务需求,设计了一种满足星上使用的小结构尺寸、不产生多余物、安全有效的爆炸螺栓防护装置。碰撞仿真与实验结果验证均表明该结构能够有效实现爆炸螺栓地防护。

## 2 爆炸螺栓

某型号空间相机所采用的低冲量、无污染爆炸螺栓,其外形结构如图 1 所示。其中,螺栓联接部分将两待联接件联接在一起。

发火时,导爆输入端传递爆轰能量,然后储药仓内的火药发火推动储药仓内的活塞运动,将螺纹部分与储药仓在分离面处分离。根据爆炸螺栓固定方式不同,螺纹部分或储药仓部分将在分离冲量作用下飞出。为防止分离件飞出碰撞损坏其它星上设备,需对分离件进行解锁防护。

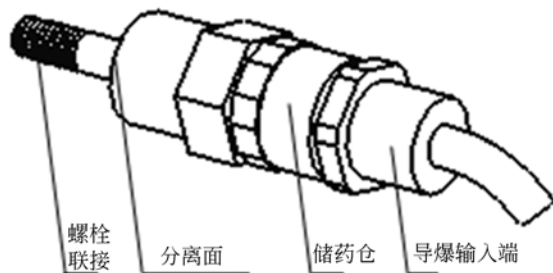


图 1 爆炸螺栓示意图

Fig. 1 Structural diagram of explosive bolt

## 3 防护装置设计

根据某型号爆炸螺栓阶梯状外形的特点,利用储药仓的外六方端面作为限位面限制爆炸螺栓分离后的位移,形成一种新的设计方案。该方案充分利用了爆炸螺栓周边区域,具有并联式联接结构的特点。

具体设计方案如图 2、图 3 所示。

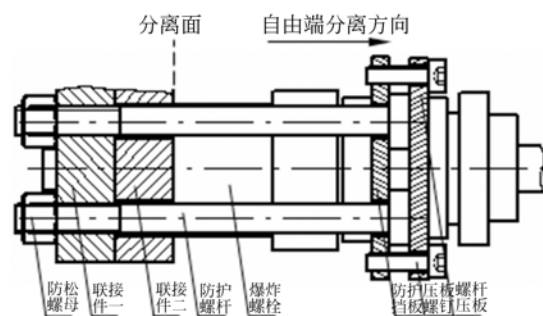


图 2 爆炸螺栓及防护装置示意图 1

Fig. 2 Structural diagram (1) of assembly of explosive bolts and protecting devices

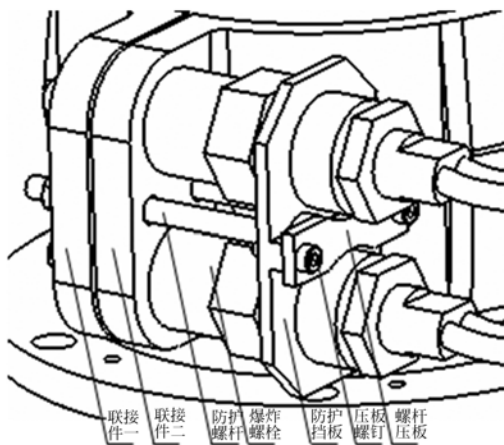


图 3 爆炸螺栓及防护装置示意图 2

Fig. 3 Structural diagram (2) of assembly of explosive bolts and protecting devices

防护挡板套在爆炸螺栓上,且距爆炸螺栓撞击面有一定距离(大于爆炸螺栓解锁行程,不小于 6 mm);防护螺栓穿过防护挡板安装在联接件一上,利用防护螺栓端面限制防护挡板沿分离方向运动,实现解锁防护。

各部件的连接关系为爆炸螺栓螺纹联接在联接件一上,实现联接件一与联接件二的紧固;利用爆炸螺栓阶梯状外形轮廓设计的防护挡板套在爆炸螺栓圆柱状外形上;防护螺栓通过防护挡板及联接件二联接在联接件一上;调整防护螺栓使挡板与爆炸螺栓撞击面保持 $(6 \pm 0.1)$  mm 间距;用防松螺母将防护螺栓紧固防止其松脱;用螺杆压板和压板螺钉将防护挡板固定在防护螺栓头部。

解锁时爆炸螺栓在内部驱动力的作用下,于分离面处分解为完整的两部分。储药仓及导爆输入端在分离冲量的作用下向分离方向移动 6 mm,外六方端面撞击在防护挡板上,防护挡板变形吸收自由端动能,实现解锁防护。

爆炸螺栓储药仓及导爆输入端受导爆索的牵引和防护挡板的阻隔,使爆炸螺栓被约束在防护装置附近,实现解锁后无多余物产生。

#### 4 TC4 材料应力应变关系测试

在爆炸螺栓的冲击下,防护装置在防护过程中产生了塑性变形;因此,首先研究 TC4 材料在

单向拉力下应力与应变的关系。

采用与防护螺栓同批次的 TC4 材料加工标准试验试棒若干进行轴向拉伸实验。试验在 SANS 公司 20 t 拉伸试验机上进行,利用引伸计实时测量变形得到拉力、变形的实测数据。图 4 所示为该批次 TC4 材料某试棒轴向拉伸试验真实应力与真实应变曲线。

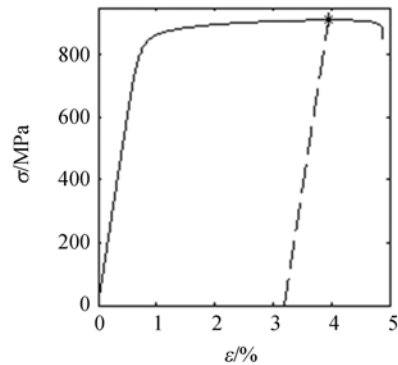


图 4 真实应力-应变曲线

Fig. 4 True  $\sigma$ - $\epsilon$  curve of TC4

如图 4 所示,试棒在星点处开始发生颈缩,该处所对应的应力值为该批次 TC4 材料强度极限  $\sigma_b$ ,数值为 911 MPa。图中虚线为辅助线,该线平行于应力应变曲线的线性段,且与横坐标相交。交点处所对应的应变值为去除弹性应变后获得的颈缩前塑性应变最大值(破坏应变),数值为 3.2%。

材料处于屈服阶段时应力变化范围较小,而塑性应变变化范围较大,将强度极限  $\sigma_b$  作为判别防护装置是否失效的阈值,将破坏应变与塑性应变的比值作为用于评价防护装置安全性能的安全系数。安全系数越大说明防护装置的安全性能越高;安全系数为 1 说明防护装置濒临失效;安全系数小于 1 说明防护装置已经失效。对于设计合理的防护装置,安全系数的取值为 $(1, +\infty)$ 。为了增强防护装置的安全性能;考虑到防护装置应具有一定的柔性,选取安全系数为 1.2,即防护装置各零件最大塑性应变应小于许用塑性应变(2.6%)。

#### 5 仿真分析

为了验证爆炸螺栓防护装置的防护性能,进

行了碰撞仿真分析。

防护过程涉及到非线性问题,采用 Abaqus/Explicit 进行仿真分析。根据真实应力与真实应变数据获得材料弹性模量,Abaqus 前处理时将弹性模量、真实应力应变数据作为材料参数输入。爆炸螺栓采用解析刚体近似。

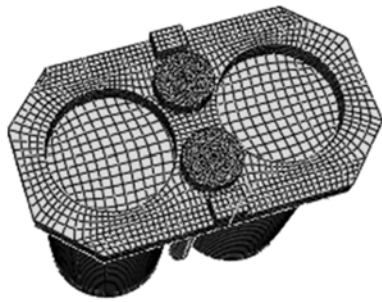


图 5 有限元模型

Fig. 5 Stress contour of tensile screw

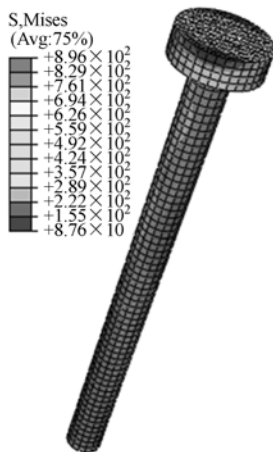


图 6 防护螺杆应力云

Fig. 6 Stress contour of tensile screw

仿真结果如图 6~8 所示。如图 6 所示,防护装置最大应力发生在防护螺杆处,最大应力为 897 MPa,小于该批次 TC4 材料的强度极限  $\sigma_b$ ;如图 7 所示,防护螺杆最大等效塑性应变发生在螺杆上端,最大塑性应变为 2.2% 小于许用塑性应变 2.6%,说明该防护装置在爆炸螺栓撞击下未发生破坏能够满足解锁防护的作用,并且具有足够的安全系数。如图 8 所示,防护装置最大变形位于防护挡板的边缘处,变形最大值约为 2.86 mm,该值包含了弹性变形和塑性变形。

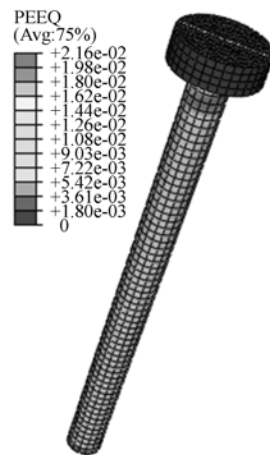


图 7 防护挡板等效塑性应变云图

Fig. 7 Equivalent plastic strain contour of tensile screw

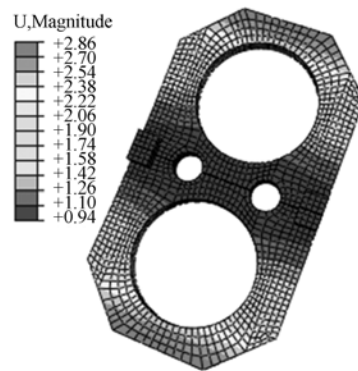
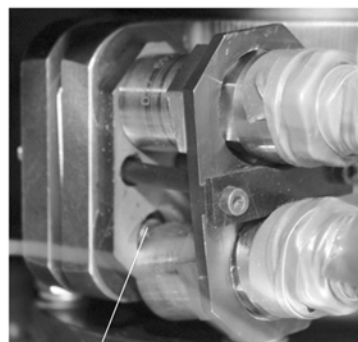


图 8 防护挡板变形云图

Fig. 8 Deformation contour of flexure plate

### 6 解锁试验验证

为了验证防护装置的防护性能,采用解锁试验进一步验证。解锁试验爆炸螺栓分离后的照片如图 9 所示。



分离后的断面

图 9 解锁试验照片

Fig. 9 Picture of experiment

解锁后,防护装置有效地将分离后的爆炸螺栓及螺栓头限位,且防护装置各零件结构完整、无破裂现象发生。防护挡板有轻微残余塑性变形,解锁后防护挡板变形情况如图 10 所示。

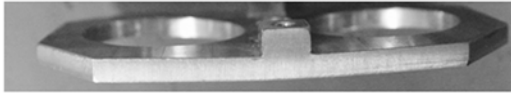


图 10 防护挡板变形

Fig. 10 Residual deformation of flexure plate

## 7 结 论

本文根据爆炸螺栓防护装置小结构尺寸需

### 参考文献:

- [1] 徐宏,关英俊. 空间相机 1 m 口径反射镜组件结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(6):1488-1495.  
XU H, GUAN Y J. Structural design of 1m diameter space mirror component of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1488-1495. (in Chinese)
- [2] 辛宏伟,关英俊,柴方茂. 离轴空间遥感器主支撑结构设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(6):1257-1264.  
XIN H W, GUAN Y J, CHAI F M. Design of main support of off-axis space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1257-1264. (in Chinese)
- [3] 刘巨,董得义,辛宏伟,等. 大口径反射镜组件的温度适应性[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(12):3169-3175.  
LIU J, DONG D Y, XIN H W, *et al.*. Temperature adaptation of large aperture mirror assembly [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(12): 3169-3175. (in Chinese)
- [4] LUCY M H, BUEHRLE R D, WOOLLEY J P. Comparison of separation shock for explosive and nonexplosive release actuators on a small spacecraft panel [R]. *National Aeronautics and Space Administration Hampton Va Langley Research Center*, 1996.
- [5] LEE M S, JO J U, TAK W J, *et al.*. Shape memo-

ry alloy (SMA) based non-explosive separation actuator (NEA) with a redundant function [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, 12(3): 569-572.

[6] 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, 32.  
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, 32. (in Chinese)

[7] 吴艳红,王晓晖,马斌捷,等. 爆炸螺栓盒的爆炸模拟与冲击强度计算[J]. 强度与环境, 2007, 34(6): 10-15.  
WU Y H, WANG X H, MA B J, *et al.*. The simulation of explosion and the calculation of the impact strength of the explosive bolt box [J]. *Structure & Environment Engineering*, 2007, 34(6):10-15. (in Chinese)

[8] 高滨. 航天火工技术的现状和发展[J]. 航天返回与遥感, 1999, 20(3):63-67, 62.  
GAO B. The status and development of space pyrotechnics technique [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 1999, 20(3):63-67, 62. (in Chinese)

[9] 初文华,张阿漫,明付仁,等. SPH-FEM 耦合算法在爆炸螺栓解锁分离过程中的应用[J]. 振动与冲击, 2012, 31(23):197-202.

CHU W H, ZHANG A M, MING F R, *et al.*.  
Application of three-dimensional sph-fem coupling  
method in unlocking process of an explosion bolt  
[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31  
(23):197-202. (in Chinese)

[10] 王瑞峰,卢芳云,吕钢,等.两种不同结构的保护罩

破坏机理的比较[J]. *弹箭与制导学报*, 2008, 28  
(2):107-110.

WANG R F, LU F Y, LV G, *et al.*. Comparison  
of destruction mechanism between two retainers  
[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles  
and Guidance*, 2008, 28(2):107-110. (in Chinese)

#### 作者简介:



王书新(1981—),男,吉林白城人,博士,助理研究员,2013年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间相机机械结构研究。E-mail:surrey@139.com



李景林(1963—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事空间相机光机结构研究。E-mail: aq0183@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)