

一种无污染分离螺栓的设计优化

薛园园, 程涛, 张国兴, 杜龙飞

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘要: 针对某型分离螺栓在作用后高速摄影下出现少量燃气及污染物泄漏的问题, 通过仿真及试验确定可能泄漏部位, 采用优化密封结构的方法进行了无污染优化设计, 并运用高速摄影的测试方法对优化设计后的分离螺栓进行无污染验证试验, 试验表明, 优化设计后达到控制污染量的目的。

关键词: 爆炸螺栓; 密封; 无污染; 设计

中图分类号: TJ45⁺9 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.004

The Optimal Design of Some Non-Pollution Explosive Bolt

XUE Yuan-yuan, CHENG Tao, ZHANG Guo-xing, DU Long-fei

(Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: In order to solve the problem that small quantities of gas and contaminant appeared after the explosive bolts action by the high-speed photography, the possible leakage positions were determined by test and simulation, and optimum design for non-pollution was proposed by improving the sealing structure of the explosive bolt. Meanwhile, the optimized design was validated by test using high-speed photography. Test results indicate that after the optimization, the explosive bolts can meet the requirement of controlling the amount of pollution.

Key words: Explosive bolt; Seal; Non-pollution; Design

分离螺栓由于小体积、高密度能量等优点, 常用于导弹、运载火箭等级间的连接与解锁。近年来随着各种高精度光学仪器在导弹、运载火箭上的应用日益广泛, 对其使用的分离螺栓也提出了更高的要求, 包括要求分离螺栓在工作后没有污染物泄出或泄漏量小于规定的指标^[1-4]。分离螺栓是利用火炸药能量驱动做功的装置, 在作用过程中会产生高压燃气及污染物, 如果密封结构不牢靠, 高压燃气及污染物的泄漏不仅会造成高精度仪器的损坏, 还有可能造成分离任务的失败。本文针对某型分离螺栓作用后经高速摄影出现少量燃气及污染物的泄漏问题, 进行了密封结构的设计优化, 使高压燃气及污染物密封在螺栓本体的

腔体内, 以达到控制污染的目的。

1 问题概述

某型分离螺栓为典型的剪切式分离螺栓, 结构如图1所示。

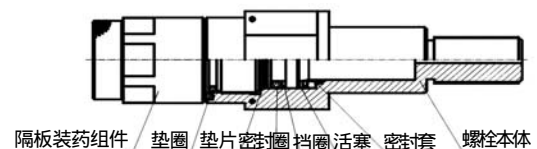


图1 分离螺栓结构示意图

Fig.1 Diagram of separation bolt structure

图1所示分离螺栓主要由螺栓本体、做功组件(包

括活塞、密封套及密封圈等)及含能组件等(包括隔板装药组件及垫圈等)组成,装配时,先将做功组件通过压机推进螺栓本体内,然后将含能组件与螺栓本体通过螺纹连接。分离螺栓的工作原理为:分离时,含能组件被引爆,产生的高温高压燃气推动做功组件做功,将螺栓本体在其设计的预断面处剪断,完成分离动作。某型分离螺栓在进行高温(82±2)℃大药量(125%)输出功能试验时,在高速摄影(V311型 Phantom 高速摄影仪),拍摄时设置参数为10 000 帧/s)下出现少量燃气及污染物泄漏的问题。对试验后产品进行外观观察,除预断面外,外观结构完好,无断裂破损现象;黑色污染物位置为含能组件与螺栓本体连接处及螺栓本体预断面处,见图2。

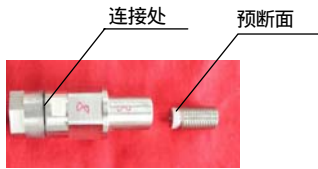


图2 分离螺栓污染物泄漏位置

Fig.2 The leakage position of contaminant in explosive bolt

2 理论分析

针对此分离螺栓,利用有限元分析软件 ANSYS-DYNA 对分析螺栓断裂过程进行了数值模拟分析。为了减少计算时间,将多级装药按当量等效简化为由主装药组成的圆柱形装药,同时将产品外形简化成圆柱体。壳体材料性能采用随动塑性(MAT-PLASTIC-KINEMATIC)本构关系来描述,分离螺栓壳体和做功组件材料选用1Cr18Ni9,参数详见表1。

表1 材料基本参数

Tab.1 The parameters of stainless steel

材料	密度 (g·cm ⁻³)	弹性模量 ×10 ² /GPa	泊松比	屈服应力 ×10 ² /GPa	切线模量 ×10 ² /GPa	硬化参数
1Cr18Ni9	7.9	2.1	0.284	0.01	0.001	1

药剂发生作用时,会对螺栓本体和做功组件产生一定的动态效应,螺栓本体和做功组件在冲击压力下会发生运动、变形或一定程度的破坏,因此,本次采用流固耦合方法计算炸药对结构的作用,本模型中,药剂及空气采用欧拉网格建模,单元使用多物质 ALE 算法,做功组件及螺栓本体采用拉格朗日网络建模,药剂和空气采用耦合算法,为简化计算,选取分离螺

栓的 1/4 进行计算,计算模型如图 3 所示。



图3 计算模型

Fig.3 The calculation model

根据螺栓结构特点,在含能组件的起始发火位置设置点起爆,起爆点设在含能组件左端面的中心位置,利用对称性对称面的变形进行约束,计算模型的空气外表面施加无反射边界条件,做功组件与本件定义为自动接触。图 4 为螺栓作用过程的受力云图。

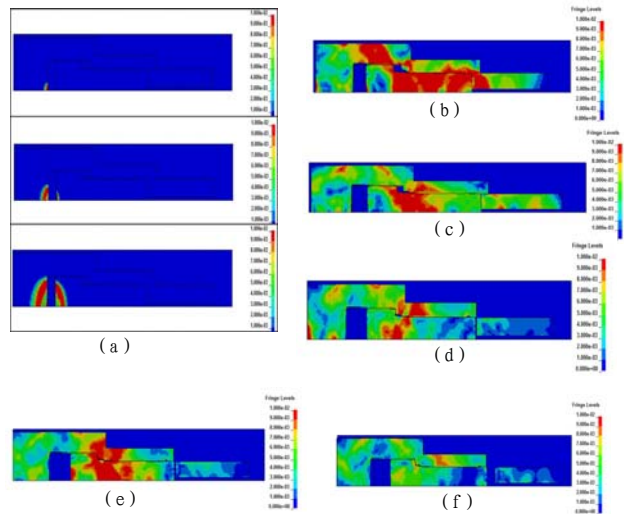


图4 螺栓作用过程受力云图

Fig.4 Stress nephogram of explosive bolt action

图 4(a) 为含能组件作用后产生爆轰的瞬态,能量呈球形传播,力瞬间最大值位于含能组件作用最前端。图 4(b) 为含能组件作用后产生气体,气体做功后,做功组件开始移动,做功组件前端接触螺栓本体后,螺栓预断面受力急速升高,力瞬间最大点出现在该部位。图 4(c) 所示为当螺栓本体预断面受力超过螺栓本体材料剪切应力极限后,螺栓本体在预断面处被剪断,此时,螺栓预断面处受力急剧下降。图 4(d) 中,螺栓完成分离,做功组件继续运动,此时力瞬间最大值位于活塞杆后端部分。图 4(e) 中,做功组件在气体压力作用下继续运动,直至做功组件后端撞击螺栓本体台阶部分,该处因撞击而产生力的瞬间最大值。图 4(f) 中,做功组件后端和螺栓本体撞击完成,整个分离过程完成,结构中力分布趋于平均。爆炸螺栓腔内压力曲线如图 5 所示,在含能组件起爆后压力迅速增加达到第 1 个峰值,做功组件接触到预断面后

在预断面断裂之前达到第 2 个峰值, 略低于第 1 个峰值。随后螺栓杆完成分离后, 作用组件在气体压力的推动下继续运动, 压力逐步减小。

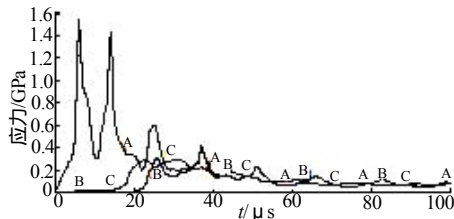


图 5 螺栓内腔压力曲线

Fig.5 Pressure curve of explosive bolt cavity

分析其原因: 由于高压气体推动做功组件做功, 随着做功组件动能的增加以及螺栓腔内空间的增大, 气体压力迅速下降并趋于稳定。结合理论仿真分析, 某型分离螺栓可能存在燃气及污染物泄漏的阶段有 2 个: (1) 含能组件作用后产生爆轰的瞬态, 此时螺栓内腔压力达到第 1 个峰值, 整个分离螺栓可能存在的泄漏点为做功组件与螺栓本体的连接部位, 如图 6 所示的可能漏气部位; (2) 预断面断裂瞬间, 此时螺栓内腔的压力达到 1.4GPa, 若做功组件与螺栓本体间密封存在缺陷, 可能出现如图 6 所示的漏气部位。

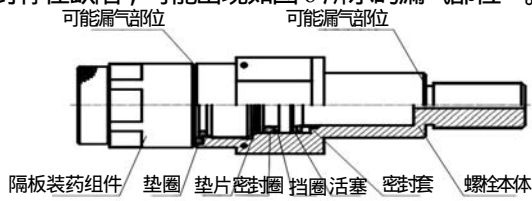


图 6 可能存在泄漏位置示意图

Fig.6 Diagram of the point that gas can be leaked

分析所得的可能漏气部位与产品在高温大药量输出功能试验后存在黑色污染物位置一致, 要达到控制其污染量的目的, 就需要进行密封结构的设计优化。

3 优化设计

本文在不改变某型分离螺栓含能组件装药量、螺栓本体初容及承载力的前提下, 针对可能存在泄漏的 2 个部位的零件进行了结构及尺寸优化, 以达到控制污染量的目的。

3.1 漏气部位 I

3.1.1 漏气部位 I 原始结构

含能组件与螺栓本体通过螺纹连接。如图 7 所

示, 含能组件与螺栓本体在 I 处均有一“V”型槽设计, 隔板装药组件与螺栓本体装配时, 通过施加拧紧力矩, 将垫圈(易变形铝合金材质的金属环状结构)在“V”处挤压变形, 含能组件及螺栓本体与垫圈的接触面为 A、B 两面, 如图 8 所示。

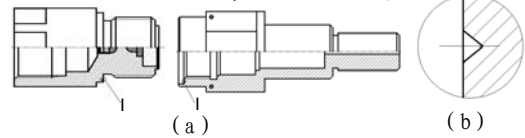


图 7 做功组件与螺栓本体连接部位结构示意图

Fig.7 Schematic diagram of the connection between the work component and the bolt body

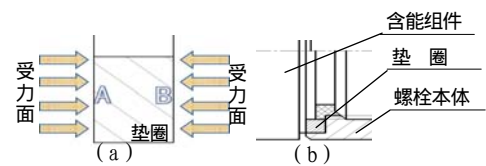


图 8 原结构含能组件及螺栓本体与垫圈接触结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of original contact structure

3.1.2 漏气部位 I 结构优化

针对此分离螺栓含能组件与螺栓本体间存在的泄漏问题, 本文提出了更改含能组件与螺栓本体间垫圈形状的优化思路, 以增加含能组件及螺栓本体与垫圈接触面的方法达到控制污染量的目的。结构优化后, 含能组件及螺栓本体与垫圈的接触面增加到 A、B、C 3 面, A 面与 B 面夹角 α 值设计为: $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, 新结构垫圈(楔形垫圈)结构、新结构含能组件及螺栓本体与垫圈(楔形垫圈)接触结构如图 9 所示。

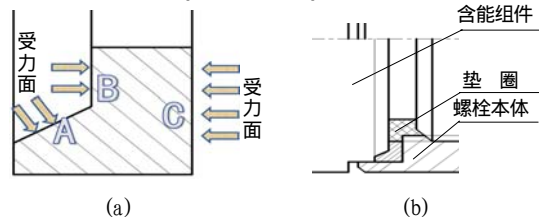


图 9 新结构含能组件及螺栓本体与垫圈(楔形垫圈)接触结构示意图

Fig.9 Schematic diagram of new contact structure

3.1.3 α 值验证

针对漏气部位 I 的结构优化, 设计 α 值为 $105^\circ \sim 145^\circ$ 的多个楔形垫圈, 采用 125% 输出装药, 分别经高温 ($82 \pm 2^\circ\text{C}/48\text{h}$) 及低温 ($-45 \sim -40^\circ\text{C}$) /24h 后进行输出功能试验, 通过试验对 α 最优值进行验证, 采用缠胶带的方法检测是否泄漏, 试验结果如图 10 所示。由图 10 可看出, α 值为 105° 时, 经高温试验后爆炸螺栓正常工作, 但存在泄漏, 并且泄漏未被胶

带约束,超出胶带约束范围。值为115°时,经高温低温试验后爆炸螺栓功能正常,仍然存在泄漏,胶带上出现黑色污染物,但未超出胶带约束范围。当值为125~135°时,试验后未出现泄漏现象,但为145°时,试验后存在微量泄漏,因此最优值在125~135°。

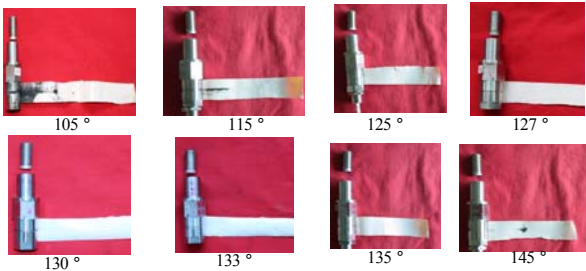


图10 不同角度的楔形垫圈对泄漏的影响

Fig.10 Effect of wedge shape ring angle on the leakage

3.2 漏气部位II

3.2.1 漏气部位II原始结构

做功组件与螺栓本体内腔采用间隙配合的设计;密封圈(材料为橡胶5080)装配时被挤压变形于活塞头部及螺栓本体内壁之间,可达到一定的密封作用;密封套安装于活塞杆,分离时,密封套作用于活塞杆与螺栓本体预断面之间,既有一定的缓冲作用,又有一定的密封作用。原结构活塞组件零件及装配图如图11所示。

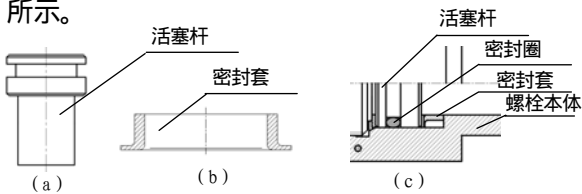


图11 原结构活塞组件零件及装配图

Fig.11 Parts and assembly drawing of original piston component

3.2.2 漏气部位II结构优化

针对此分离螺栓做功组件与螺栓本体间存在的泄漏问题,本文提出密封套、活塞杆及螺栓本体结构优化设计的方法,使密封套与螺栓本体及活塞在装配中挤紧,防泄漏。

在密封套口部及端部、螺栓本体及活塞杆根部倒10~30°角,使密封套口部强度降低,更容易变形挤紧;在密封套与活塞接合面上涂GD-611单组分室温硫化硅橡胶,硫化后密封间隙存在一定的弹性,短位移时起密封及缓冲作用。优化结构活塞组件零件及装配图如图12所示。

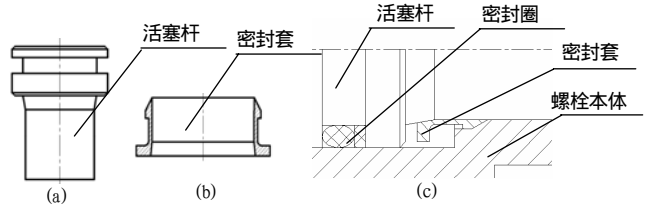


图12 优化结构活塞组件零件及装配图

Fig.12 Parts and assembly drawing of new piston component

3.2.3 倒角值验证

针对漏气部位的结构优化,通过试验对优化结构进行验证,采用高速摄影(10000帧/s)的方法检测是否泄漏,采用125%输出装药11发试验产品分别经(82±2)/48h及(-45~40)/24h环境温度试验后进行输出功能试验,试验后,功能正常,未泄漏。试验后产品照片如图13所示。



图13 活塞组件优化产品试验后照片

Fig.13 The tested sample with improved piston component

4 验证试验

针对改进后的某型分离螺栓,采用高速摄影(高速摄影设置1×10⁴帧/s)的测试方法对其进行无污染试验验证,目视高速摄影下分离螺栓作用时燃气及污染物有无泄漏。根据GJB1307A-2004航天火工装置通用规范要求进行某型分离螺栓性能裕度试验,试验分为4组,具体试验情况如表2所示,螺栓作用时高速摄影截图如图14所示。

表2 试验验证

Tab.2 Test result of verification

序号	装药量%	试验条件	试验结果
001-003	125	振动→震动→湿热→温度循环 →(82±2)°C/16h→输出性能试验	功能正常,未泄漏
004-006	125	振动→震动→湿热→温度循环 →(-45~40)°C/16h→输出性能试验	功能正常,未泄漏
007-009	75	振动→震动→湿热→温度循环 →(82±2)°C/16h→输出性能试验	功能正常,未泄漏
010-012	75	振动→震动→湿热→温度循环 →(-45~40)°C/16h→输出性能试验	功能正常,未泄漏



图14 优化设计后螺栓作用时高速摄影截图

Fig.14 High-speed photography screenshot of bolt action after improved design

5 结论

通过对某型分离螺栓密封结构进行设计优化,得到了以下结论:

(1) 利用应力云图、腔内压力曲线对螺栓仿真计算结果进行了理论分析,查找可能的泄漏部位,理论计算分析与实验结果具有较好的吻合性,说明理论分析在分离螺栓密封结构优化设计的方案中具有较好的指导作用;

(2) 采用优化垫圈形状以及部件倒角的方法来提高可能漏气部位的密封性,通过试验对楔形垫圈 α 值及倒角值进行验证,得出了 α 最优值在 $125 \sim 135^\circ$,倒角值为 $10 \sim 30^\circ$;

(3) 经高低温环境试验后的输出功能试验,证明某型分离螺栓无污染优化设计合理有效,能够达到控制污染量的目的。

参考文献:

- [1] 何春全,严楠,叶耀坤. 导弹级间火工分离装置综述[J]. 航天返回与遥感,2009,30(3):70-77.
- [2] 高滨. 火工驱动分离装置的应用[J]. 航天返回与遥感,2004,25(1):55-59.
- [3] 王凯民,张学舜. 火工品工程设计与试验[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [4] QJ2138A-2004 爆炸螺栓通用规范[S]. 国防科学技术工业委员会,2004.

第六届“纳米结构含能材料及应用技术” 学术研讨会征文通知

为促进纳米结构含能材料(Nano-structure Energetic Materials, nEMs)及MEMS含能器件的基础研究和技术应用,为国内相关研究团队提供交流和合作的平台,由陕西应用物理化学研究所(应用物理化学重点实验室)、南京理工大学和中国工程物理研究院化工材料研究所联合主办,陕西应用物理化学研究所(应用物理化学重点实验室)、西安交通大学、北京理工大学、中北大学联合承办的第六届“纳米结构含能材料及应用技术”学术研讨会将于2020年11月上旬在陕西西安召开。欢迎从事纳米结构含能材料及其应用技术的研究团队和专家学者参会交流并踊跃投稿。

征文内容: (1) 纳米结构含能材料的设计、制备及表征; (2) MEMs含能器件的设计、制作及性能; (3) 基于纳米结构含能材料及MEMs含能器件的测试技术; (4) 基于纳米结构含能材料及MEMs含能器件的数值计算及模拟仿真; (5) 基于纳米结构含能材料及MEMs含能器件的安全性及可靠性评价技术; (6) 基于MEMs含能器件及微起爆序列等应用技术。

征文要求: (1) 提交的论文为非密,须通过所在单位的保密审查; (2) 提交论文应符合征文范围,并未曾公开发表; (3) 论文研究成果具有较高的理论水平或应用价值; (4) 论文格式按照科技论文标准规范。

征文截止时间: 2020年8月30日

投稿邮箱: nEMs2020@163.com

联系地址: 西安市朱雀大街213号213所, 邮编: 710061

联系人: 薛艳 029-85333475, 13319245281

张方 029-85333444, 13991348522