

桥丝式爆炸螺栓防静电设计与性能验证

杨三斌

(海军装备部重庆军代局, 重庆 400042)

摘要: 目的 设计一种防静电结构的桥丝式爆炸螺栓。方法 采用“泄放”与“堵”相结合的方法,设计针-壳空气静电结构的桥丝式爆炸螺栓,并进行各种性能验证。结果 设计的桥丝式爆炸螺栓通过了总体结构原理性试验、静放电试验、分离速度验证试验、功能裕度试验、结构强度裕度试验、系统试验,以及鉴定考核试验的验证。结论 桥丝式爆炸螺栓可解决防静电不安全因素,并且分离功能可靠,在实践中具有较好的应用前景。

关键词: 桥丝式; 防静电技术; 爆炸螺栓

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.06.025

中图分类号: TJ85; V37 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)06-0142-05

Anti-static Design and Performance Verification of the Bridge Wire Explosive Bolts

YANG San-bin

(Chongqing Military Representative Bureau of Navy Arming, Chongqing, 400042, China)

ABSTRACT: Objective To design a kind of bridge wire explosive bolts with anti-static structure. **Methods** Using the combined method of "discharge" and "wall", bridge wire explosive bolts with structure of needle-shell of electrostatic air was designed, and various performance verification was conducted. **Results** The bridge wire explosive bolts designed passed the original rational test of the overall structure, static discharge test, the separation speed verification experiment, functional margin test, structure strength margin test, system test, and the validation of identification test. **Conclusion** Bridge wire explosive bolts could not only solve the unsafe factors of anti-static, but also realize reliable separation function, and had good application prospect in practice.

KEY WORDS: bridge wire; electrostatic protection technology; explosive bolt

某抛放装置由释放器、舱盖与爆炸螺栓组成,释放器在抛放装置舱与舱盖间空腔中,一端与抛放装置舱底部连接,一端与舱盖连接。爆炸螺栓作为主要功能件,主要用于抛放装置舱与舱盖的连接^[1-2]。

当爆炸螺栓工作时,产生的推力将舱盖以一定速度释放抛放装置舱,从而解除释放器,完成释放器的分离与抛放^[3-4]。

由于爆炸螺栓任务剖面环境(含贮存、安装、运

收稿日期: 2015-07-15; 修订日期: 2015-08-09

Received: 2015-07-15; Revised: 2015-08-09

作者简介: 杨三斌(1968—),男,湖北人,硕士,高级工程师,主要从事火工品质量检验监督工作。

Biography: YANG San-bin(1968—), Male, from Hubei, Master, Senior engineer, Research focus: quality supervision and inspection for pyrotechnic device.

输、温湿度冲击、发火等过程)严酷和防静电环境要求高,因而要求该爆炸螺栓具有足够的强度和较高的防静电性能^[9],而且受使用环境及总体装配结构的限制,爆炸螺栓发火元件不宜采用桥带式、半导体桥式等结构,所以优选了桥丝式结构。桥丝式结构虽然具有作用可靠性高的特点,但也存在静电敏感的特性,因而需要采取相应的防静电结构设计,以解决其在静电条件下的敏感问题^[6-7]。文中将着重对桥丝式爆炸螺栓防静电设计展开研究,统筹考虑相关性设计,并进行性能可靠性验证。

1 主要设计要求

爆炸螺栓主要设计要求有以下内容:外径要求尽可能小,长度满足装置要求;桥路电阻为0.9~1.5 Ω,绝缘电阻>100 MΩ;安全电流应满足GJB 1307A要求,产品不应发火或失效;能经历温度冲击、湿热、加速度、震动、振动、冲击设计、跌落等环境考核;单发发火电流为3 A/50 ms,发火时间≤10 ms,工作时间不同步性≤1 ms,要求冲量尽量大,且使舱盖抛放速度≥8 m/s。

归纳起来,该型爆炸螺栓设计应包含以下三个方面内容。

- 1) 总体方案设计:分析并满足主要技术要求,确定结构设计方案。
- 2) 防静电设计:通过设计针-壳空气放电的静放电结构,达到桥丝式爆炸螺栓具有防静电功能的目的。
- 3) 可靠性设计验证:具体包括提高爆炸螺栓发火时间及分离可靠性;对各个传爆、作动环节进行裕度设计;环境适应性应满足设计要求。

2 爆炸螺栓设计

2.1 总体方案设计

实现连接和抛放作用功能的机构有作动筒、推销器、爆炸螺栓等,实际中如何选择,可结合使用情况、空间位置、对外形的尺寸要求等^[8]。作动筒、推销器的结构方式虽然能实现对释放装置的抛放功能,但其对外径尺寸要求较大,无法满足技术要求。只有爆炸螺栓才能满足要求,又因其应具有防静电功能,所以选定桥丝式爆炸螺栓结构作为基本结构进行设计,且防静电设计采用针-壳空气泄放技术。可靠性设计主要进行功能裕度、结构强度裕度、环境试验、静放电、发

火功能、抛放功能考核等。基于以上要求,爆炸螺栓总体结构设计主要由堵塞、极针、电爆管、壳体、密封碟、密封环、活塞等组成,结构如图1所示。

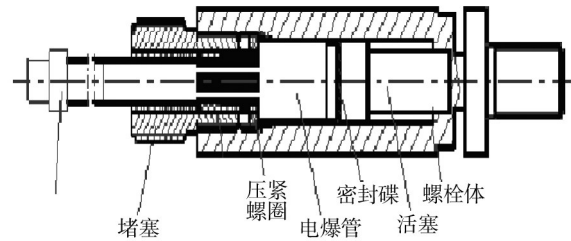


图1 爆炸螺栓结构

Fig.1 Diagram of explosive bolt structure

2.2 发火元件设计

2.2.1 桥丝式结构的选取

爆炸螺栓发火方式由电爆管来实现,目前主要有桥带类和桥丝类两种方式。桥带类电爆管较为钝感,但安全性好;桥丝类电爆管较为敏感,但安全性较差,适用于小电流发火^[9]。究竟采用哪种方式主要取决于是否满足最基本的性能指标,即在给定电流条件下能否可靠发火。

桥带类产品的发火电流通常为5 A,双桥带的全发火电流为2.93 A,桥带的电阻范围为0.9~1.2 Ω,可控制其差值≤0.2 Ω。产品实际发火状态为两发爆炸螺栓并联6 A电流发火,在保证电阻差≤0.2 Ω,爆炸螺栓电阻为极大和极小(一发为0.9 Ω,另一发为1.0 Ω)的情况下,电阻较大的一发电流为2.84 A,小于其全发火电流2.93 A,不能保证可靠发火工作,因此桥带方案不可取。

桥丝类发火元件较敏感,可以满足发火电流的要求,但桥丝类产品电阻较大。为了减小电阻,将双桥丝设计成并联的单桥丝,电阻范围为1.15~1.5 Ω。全发火电流为^[10]:

$$I=(\rho cVT/0.24Rt+Kt/0.24R)^{0.5}$$

全不发火电流为:

$$I=(Kt/0.24R)^{0.5}$$

式中: ρ 为桥丝密度; c 为桥丝比热容; R 为电阻; T 为桥丝温度; t 为作用时间; K 为发火冲能。计算得全发火电流为449 mA,全不发火电流为249 mA,电性能均满足要求。

综上所述,电爆管结构选取桥丝式,桥丝式电火工品的发火过程分三个阶段:电能经桥丝发热,加热桥丝周围的药剂至发火点;药剂经一定延滞期后发

火;火焰引燃(爆)主装药。其具体结构如图2所示。

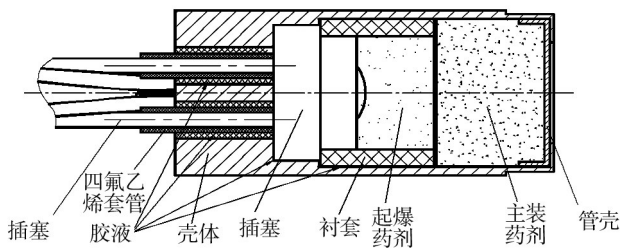


图2 电爆管结构

Fig.2 Structure diagram of electric explosion tube

2.2.2 静电泄放结构设计

桥丝式结构对静电较为敏感,须进行静电放电设计,以解决其对静电敏感的问题。通常解决电火工品静电干扰最好的方式是具有防静电功能,主要有两种设计途径,“堵”的方式,在针壳间增大绝缘电阻;“泄放”的方式,设计空气泄放通道进行保护^[1]。由于单一“堵”的方式与“泄放”的方式在该结构中均不适用,因此采用第三种设计途径,即采取“堵”与“泄放”二者结合的方式进行设计。

静电“泄放”方式原理^[2]为:设计一条保护通道,使静电电压通过保护通道优先排放,起到保护危险通道的作用,通常将静电泄放保护通道设置在针脚处。危险通道主要指与药剂部位接触的通道,保护通道距危险通道应保持合适的距离,防止静电火花接触药剂。电爆管危险通道的释放电压应尽量偏大,为了增加危险通道的击穿电压,在药剂与壳体之间设计了击穿电压较好的非金属套管,即“堵”的方式,以增强桥丝与壳间的绝缘强度,提高耐击穿性能,增强防静电能力。通常认为,危险通道与保护通道的击穿电压之比应大于4^[3],且保护通道的击穿电压应不大于3 kV,这样才能保证静电电压通过保护通道泄放。由于空气具有电压击穿重复性,所以保护通道采用空气作为击穿介质。静电泄放结构如图3所示。

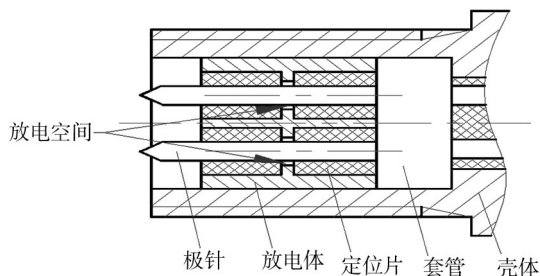


图3 静电泄放结构

Fig.3 Structure of electrostatic discharge

为测试电爆管危险通道击穿电压,将放电体组件短路后放置在防爆箱内进行击穿电压测试试验。试验前测试产品绝缘电阻无异常,将电压施加在产品极针与壳体之间,电压从1000 V开始,以100 V为阶梯增加电压,直至放电体组件释放电压。测得放电体组件的释放电压为1000~1800 V。

为验证电爆管的击穿电压是否能够满足要求,测试了电爆管起爆电压,将电爆管短路后放置在防爆箱进行静电起爆电压测试试验。试验时产品壳体接地,将电压施加在产品桥路与壳体之间,电压从3000 V开始,以500 V为阶梯增加电压,直至电爆管起爆。测得电爆管的静电起爆电压为7500~9000 V。试验结果表明,危险通道与保护通道击穿电压之比满足4倍设计裕度要求。

2.3 爆炸螺栓相关设计

爆炸螺栓相关设计包括药量设计和活塞设计,是确定活塞强度、实现抛放功能的基础。

2.3.1 药量设计

设计药量的选择应满足强度要求,尤其是舱盖抛放速度的要求,而冲量是确定其功能实现的重要基础。一般爆炸螺栓在使用时仅起连接与释放作用,要求冲量尽量小,避免冲击。抛放装置对爆炸螺栓有特殊的功能要求,即抛放舱盖,要求冲量尽量大,且使舱盖抛放速度不小于8 m/s。根据要求计算得出,设计药量确定为110 mg烟火药。

2.3.2 活塞设计

根据工作原理,活塞长度设计是实现爆炸螺栓抛放功能关键环节,因为螺栓头的推力持续时间越长,产生的冲量越大,越有利于舱盖的抛放,提高其出舱速度^[4]。另一方面应尽可能减小同轴度公差,以确保活塞能顺利伸出。活塞杆越长,活塞与螺栓体内孔之间的同轴度公差累计越大,活塞越容易卡滞螺栓体内,导致其伸出螺栓体时不顺畅或无法伸出,从而减弱推力。因此,将活塞杆设计成杆中部削弱、两端稍大的结构,既保证推力行程,又利于其顺利伸出螺栓体。按照设计药量装配4发爆炸螺栓试验,结果表明,4发爆炸螺栓均正常发火,且能正常伸出。

3 试验研究

为验证爆炸螺栓最终设计的正确性、合理性,以及设计裕度、设计功能是否满足要求,根据研制任务要求和GJB 1307A相关要求进行了研制试验。为检验

设计正确性,对规定环境条件的适应性进行了设计鉴定试验。通过研制试验和设计鉴定试验,验证爆炸螺栓各项性能是否满足使用要求。

3.1 总体结构原理性试验

主要验证在设计药量条件下,爆炸螺栓能否正常分离,结构是否完整,以确定设计原理及结构方案是否可行。爆炸螺栓原理性试验情况见表1,根据试验结果,确定产品设计原理正确、可行。

表1 原理性试验

Table 1 Principle test

序号	装药量/mg	试验状态	试验数量/发	试验结果
1	110	常温,单发,空载,3 A发火	2	正常分离、结构完整
2	110	高温、单发,空载,3 A发火	2	正常分离、结构完整

3.3 分离速度验证试验

为验证爆炸螺栓分离速度能否满足要求,进行了设计状态分离速度验证试验,试验的具体情况见表2。结果表明,3发产品均正常工作,抛放速度满足要求,除分离面外其余结构完整。由此可知,爆炸螺栓分离速度满足使用要求。

表2 分离速度验证试验

Table 2 Verification test of separation speed

序号	试验项目	产品状态	试验状态	发火时间/ms		分离速度/(m·s ⁻¹)	
				要求值	实测值	要求值	实测值
1	设计药量 验证试验	装药量 110 mg	产品常温 下发火	≤10	1.67	≥8	19.43
2					1.57		22.42
3					2.4		22.06

表3 功能裕度试验

Table 3 Functional margin test

序号	试验项目	产品状态	试验状态	发火时间/ms		分离速度/(m·s ⁻¹)	
				要求值	实测值	要求值	实测值
1	分离裕度 试验	设计药量为 110 mg,实际装 药量为 88 mg	65 °C保温 1 h发火 -40 °C保温 1 h发火 常温下发火	≤10	1.90, 1.53, 1.62	≥8	27.78, 21.11, 20.27
2					1.53, 1.60, 1.48		20.53, 20, 22.22
3					1.65, 1.61, 1.73		20.63, 20, 18.75

求,除分离面外其余结构完整。由此可知,爆炸螺栓功能裕度满足要求。

3.5 结构强度裕度试验

为验证爆炸螺栓在初样阶段设计状态的结构强

3.2 静放电试验

为验证爆炸螺栓静放电性能是否满足要求,进行了静放电试验,将产品(设计状态)桥路短路后放置在防爆箱进行静放电试验。试验将电压施加在产品桥路与壳体之间,施加电压分别为1 800, 25 000 V^[15]。

21发产品在1 800 V低压静放电试验和25 000 V高压静放电试验均顺利释放电压,通过验证,由此可知爆炸螺栓静放电性能满足要求。

3.4 功能裕度试验

为验证爆炸螺栓在初样阶段设计状态的分离裕度是否满足要求,进行了80%设计药量^[15]分离裕度试验。试验中电爆管装药量为80%设计药量,其余状态不变,测试了发火时间与速度,试验的具体情况见表3。结果表明,9发产品均正常工作,抛放速度满足要

度是否满足要求,进行了120%设计药量结构强度裕度试验^[15]。试验中电爆管装药量为120%设计药量,其余状态不变,测试了发火时间与速度,具体情况见表4。试验结果表明,9发产品均正常工作,抛放速度满足要求,除分离面外其余结构完整。由此可知,爆炸

表4 结构强度裕度试验
Table 4 Structural strength margin test

序号	试验项目	产品状态	试验状态	发火时间/ms		分离速度/(m·s ⁻¹)	
				要求值	实测值	要求值	实测值
1	结构强度裕度试验	设计药量为	65℃保温1h发火		1.45, 1.40, 1.95		20.27, 22.73, 20.27
2		110 mg, 实际装	-40℃保温1h发火	≤10	1.48, 1.50, 1.51	≥8	22.38, 28.84, 22.22
3		药量为132 mg	常温下发火		1.55, 1.64, 1.59		22.12, 19.35, 21.04

螺栓结构强度裕度满足要求。

3.6 系统试验

为验证产品设计状态能否满足实际抛放使用要求,先后进行了3次与抛放装置组件的联合地面试验,

具体情况见表5。结果表明,110 mg主装药的设计状态能够满足使用性能要求。之后将5批爆炸螺栓产品交付总体,参加大型地面试验及实装功能试验,试验均取得圆满成功。

表5 联合试验情况及结果
Table 5 Cases and results of united test

序号	产品状态	试验状态	试验数量	试验结果	备注
1	主装药为50 mg	常温,2发 并联6A 电流发火, 装置组件 水平放置	2	抛放正常,抛放速度为7.5 m/s,产品结构完整	第一轮试验
2	主装药为70 mg,		4	抛放正常,抛放速度为9.7 m/s,产品结构完整	
3	主装药为90 mg,		6	抛放正常,产品结构完整	第二轮试验
4	主装药为110 mg,		4	抛放正常,未进行速度测试,产品结构完整	
5	主装药为110 mg,		8	抛放正常,抛放速度为11.1~12.5 m/s,产品结构完整	
6	主装药为110 mg,		2	抛放正常,抛放速度为14.3 m/s,产品结构完整	

3.7 鉴定考核试验

为验证爆炸螺栓环境适应性要求,进行了鉴定考核试验。试验按研制任务书要求进行了外观检测、电性能检测、低气压、高温贮存、低温贮存、温度冲击、湿热试验、加速度结构、震动、振动、冲击、霉菌、盐雾、2 m跌落、12 m跌落后,再进行发火试验,发火性能满足要求。

4 结论

通过以上设计分析与试验验证,可以得到如下结论。

1) 试验证明,采用静电泄放和增大绝缘电阻相结合的设计方法,可有效解决静电安全问题。

2) 以桥丝式设计为基础,通过针-壳空气静电结构设计的桥丝式爆炸螺栓,可解决敏感火工品中防静电不安全因素,并能经受给定的各种环境条件考核,完成可靠的分离功能,在实践中具有较好的应用前景。

参考文献:

[1] 侯传涛,尹伟,唐陶. 典型爆炸螺栓承载能力研究[J]. 强度与环境,2011,38(4):32—37.
HOU Chuan-tao, YIN Wei, TANG Tao. Strength Study on a Typical Explosive Bolt[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(4): 32—37.

[2] 丁华. 爆炸螺栓重复安装使用性能研究[D]. 南京:南京理工大学,2005.
DING Hua. Research on the Performance of Use for Explosive Bolt with Repeat Installation[J]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.

[3] 何春全,严楠,叶耀坤. 导弹级间火工分离装置综述[J]. 航天返回及遥感,2011,30(3):70—77.
HE Chun-quan, YAN Nan, YE Yao-kun. Study of Stage Separation Device for Missile[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2011, 30(3): 71—75.

[4] 高元科,作和平,赵文虎. 小型抗拉力和扭矩爆炸螺栓的结构设计[J]. 火工品,2012(5):13—16.
GAO Yuan-ke, WU He-ping, ZHAO Wen-hu. Design on Small Size Explosive Bolt with Pulling Force Resistance and Anti-torque Properties[J]. Eed, 2012(5): 13—16.

(下转第157页)

- 色膜的耐蚀性能[J]. 材料保护, 2011, 44(5): 40—42.
- CAO Xiao-min, ZHOU Yuan-kang, CHEN Su, et al. Anodizing Research of Aluminum Alloy Revits and Performance of Oxidizing Film[J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(5): 40—42.
- [14] 张蕾, 陈群志, 王逾涯, 等. 某型飞机腐蚀关键结构含涂层模拟件腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 45—49.
- ZHANG Lei, CHEN Qun-zhi, WANG Yu-ya, et al. Research on the Corrosion Behavior of Simulated Samples with Coating for the Corrosion Critical Component on a Certain Type of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 45—49.
- [15] 赵芯, 谢飞, 张帆, 等. 浅析现代民用航空飞机蒙皮防腐蚀体系[J]. 全面腐蚀控制, 2014(1): 22—24.
- ZHAO Xin, XIE Fei, ZHANG Fan, et al. ANTI-corrosion system of Modern Civil Aviation Aircraft Skin[J]. General Corrosion Control, 2014(1): 22—24.
- [16] 张丹峰, 谭晓明, 马力, 等. 服役环境条件下飞机结构铝合金材料孔蚀规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 93—96.
- ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, MA Li, et al. Aluminium Pitting Corrosion Damage Rule under Service Environment[J]. Journal of Chinese society for Corrosion and Protection, 2010, 30(2): 93—96.
- [17] 刘文珽, 李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai. Precision Measurement Methods for the Calendar Life of Aircraft Structure System[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [18] 刘文珽, 李玉海, 陈群志, 等. 飞机结构腐蚀部位涂层加速试验环境谱研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(1): 109—112.
- LIU Wen-ting, LI Yu-hai, CHEN Qun-zhi, et al. Accelerated Corrosion Environmental Spectrums for Testing Surface Coatings of Critical Areas of Flight Aircraft Structures[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(1): 109—112.
- [19] GB/T 1766—2008, 色漆和清漆 涂层老化的评级方法[S]. GB/T 1766—2008, Paints and Varnishes Rating Schemes of Degradation of Coats[S].
- [20] GB/T 11186, 漆膜颜色的测量方法[S]. GB/T 11186, Paint Color Measurement Method[S].
-
- (上接第 146 页)
- [5] 吴艳红, 王晓晖, 马斌捷. 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): 11—15.
- WU Yan-hong, WANG Xiao-hui, MA Bin-jie. The Simulation of Explosion and the Calculation of the Impact Strength of the Explosive Bolt Box[J]. Structure & Environment Engineering, 2007, 34(6): 11—15.
- [6] 马宏宣. 国外抗静电抗射频电火工品[J]. 火工品, 2010(3): 21—24.
- MA Hong-xuan. Eed Anti-static and Anti-RF in Foreign[J]. Eed, 2010(3): 21—24.
- [7] 陈加兴. 工业防静电危害[M]. 北京: 兵器工程师进修大学, 1994.
- CHEN Jia-xing. Industrial Anti-static Hazard[M]. Beijing: Weapon Engineer Training University, 1994.
- [8] 张枫, 杨树彬. 一种低冲击分离螺栓的设计[J]. 火工品, 2011(3): 14—22.
- ZHANG Feng, YANG Shu-bin. Design Bolt with a Low Impact Separation[J]. Eed, 2011(3): 14—22.
- [9] 孙勇. 某型无污染爆炸螺栓的研制[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- SUN Yong. Development of a Certain Type of Explosive Bolts Without Pollution[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
- [10] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- WANG Kai-min. Explosive Engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015.
- [11] 王凯民. 军用火工品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- WANG Kai-min. Military Pyrotechnics Design Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [12] 赵文虎. 某导弹用电点火防静电技术研究[J]. 火工品, 2001(3): 24.
- ZHAO Wen-hu. A Study on Anti-electrostatic Technology of Missile with Electric Ignition[J]. Eed, 2001(3): 24.
- [13] 蔡瑞娇. 火工品设计原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- CAI Rui-jiao. The Design Principle of Pyrotechnics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [14] 杜龙飞, 马玉环, 陈慧能, 等. 爆炸螺栓作用过程的仿真研究[J]. 火工品, 2015(3): 29—32.
- DU Long-fei, MA Yu-huan, CHEN Hui-neng, et al. The Simulation of Action Procedure of Explosive Bolt[J]. Eed, 2015(3): 29—32.
- [15] GJB 1307A—2003, 航天火工装置通用规范[S]. GJB 1307A—2003, General Specification for Aerospace Pyrotechnics[S].