

高能推进系统试验操作风险及处置措施

尹怀志*, 徐松林, 王军延

中国人民解放军91550部队, 大连 116023

摘要 高能推进系统的高能量特性使得飞行器射程更远,但同时也增大了推进系统及其飞行器的操作使用风险。通过综述目前被国内外导弹、火箭广泛使用的硝酸酯增塑聚醚推进剂及其高能推进系统特性,梳理了近年来与推进系统相关的安全事故及原因,基于某型高能推进系统火箭在试验场的试验操作内容,采用使用和保障危险分析方法对其试验过程进行了风险分析,并提出了改进措施建议。

关键词 高能推进系统;技术准备;风险分析;处置措施

固体火箭发动机作为一种典型的含能装置,对导弹武器系统作战效能影响重大,但也是导弹上除战斗部之外最大的火工品和危险源。为了提高固体推进系统能量,黑索金(RDX)、奥克托今(HMX)等高能炸药在推进剂中广泛使用。美国三叉戟II导弹和陶氏反坦克导弹等推进系统采用的硝酸酯增塑聚醚(nitrate ester poly-ether propellant, NEPE)推进剂就是一种新型高能量推进剂,其能量为117%~156%的TNT爆炸当量(传统的端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂为20%~40%)^[1-2]。大量炸药的加入使得NEPE推进剂具有高能炸药的起爆和爆轰特性,危险等级由1.3级上升为1.1级,装配测试厂房危险等级也从C2级升高至A2级,并进一步增加了推进系统操作使用危险^[3]。本文就采用高能推进系统的某型火箭技术准备进行风险分析,以便降低试验过程中的潜在风险。

1 NEPE类高能推进系统

NEPE推进剂是当今世界上已获应用的比冲最高的固体推进剂,标准理论比冲达2646 N·s/kg,密度达

1.86 g/cm³。研究表明,固体推进剂比冲每增加9.8 N·s/kg(1.0 s),对洲际导弹的射程可提高约100 km。目前,NEPE类高能推进系统已在大量国外弹道导弹和小型战术导弹中得到广泛应用,如美国和平卫士导弹的第III级发动机,三叉戟IID-5和侏儒导弹的第I、II、III级,陶-2反坦克导弹和小榭树防空导弹,以及法国新型战略导弹M-51的第I、II、III级^[4-5]。事实上,与能量和燃速相近的HTPB推进剂相比,NEPE推进剂在慢速烤燃方面更好,且撞击和冲击波感度较低,静电火花感度相当,但摩擦感度高(表1),一旦被引发后其造成的破坏性比HPTB推进系统严重得多。

2 推进系统安全事故分析

近几十年来,随着固体推进剂能量的不断提高及推进系统尺寸的不断增大,由意外情况、人为操作失误导致的推进系统/固体火箭/导弹安全事故也越来越多。表2为搜集的公开文献报道的一些典型安全事故,可以看出,绝大部分事故是由技术准备过程中的操作不当导致的。

收稿日期:2019-01-22;修回日期:2019-03-28

作者简介:尹怀志,助理工程师,研究方向为武器装备试验鉴定,电子信箱:xsL1217@163.com

引用格式:尹怀志,徐松林,王军延.高能推进系统试验操作风险及处置措施[J].科技导报,2019,37(13):104-108;doi:10.3981/j.issn.1000-

7857.2019.13.016

表1 典型NEPE推进剂与HTPB推进剂性能对比

Table 1 Performance comparison of typical NEPE and HTPB propellants

推进剂类型	密度/(g·cm ⁻³)	理论比冲/s	火焰感度/s	撞击感度/J	摩擦感度/%	冲击波感度/mm	静电感度/mJ
NEPE	1.80~1.82	2628.2~2641.2	1.97	32.5	100	18.29	240.3
HTPB	1.85~1.89	2647.8~2667.4	1.95~3.17	8.6	16	21.8	113.3~238.3

表2 推进系统典型安全事故实例

Table 2 Typical safety accidents of propelled system

年份	国家	对象	事故原因	事故后果
2005	韩国	“爱国者”导弹运输车	意外着火	导弹发动机燃烧
1992	美国	陆军“民兵-II”导弹II级发动机	搬运跌落	起火, 伤亡1人
1990	美国	空军“大力神-IV”导弹	吊装坠落	燃烧、爆炸, 损失900万美元
2003	巴西	“VLS-3”火箭, II级发动机	静电	爆炸, 23人死亡, 2颗卫星被毁
1994	美国	6枚“大力神”、10枚“诚实者”发动机	雷电击中	爆炸、起火, 损失4000万美元
1985	美国	“潘兴-II”导弹I级发动机	静电	爆炸, 伤亡19人
1972	瑞典	“Ariane”火箭	检查电流过大	发动机意外点火, 伤亡4人
1964	美国	“雷神-德尔它”火箭III级发动机	操作、摩擦	发动机引爆, 死亡3人
1963	美国	“北极星A-3”导弹	操作失误	II级发动机爆炸、起火, 伤亡33人
1960	苏联	“SS-7”战略导弹	操作失误	I级发动机引爆, 死亡73人
1993	美国	“大力神-IV”火箭	绝热层剥落	起飞后101 s爆炸, 损伤20亿美元
1973	美国	“三叉戟-I”导弹	推进剂损伤	发动机燃烧转爆轰

3 高能推进系统试验内容

火箭的推进系统(或动力装置)是产生推力推动火箭运动的整套装置,是火箭的重要组成部分,通常由发动机、发动机架、推进剂以及保证其正常工作所必需的导管、附件、固定装置等组成^[6-8]。

由高能推进系统组成的某型多级火箭,在试验场的全试验过程主要包括:各级推进系统吊装出包装箱、推进系统对接、技术阵地技术准备、火箭水平装填、运输至发射地点、火箭垂直装填、火箭测试、火箭发射等。其中技术阵地技术准备过程主要有:推进系统外观检查、点火安全机构单位测试、喷管检测、发动机压力监测、发动机气密检测、发动机充放气等(图1)。

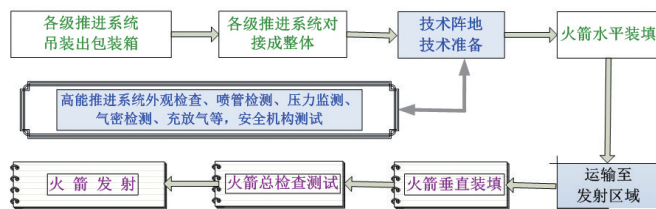


图1 某高能推进系统火箭的试验流程

Fig. 1 Test process of high energy propelled system

4 高能推进系统试验操作风险分析

采用使用 and 保障危险分析方法对高能推进系统/火箭的试验过程进行风险分析,是针对产品使用、维修过程实施的安全性分析活动。为保证安全、降低和控制使用风险,使用 and 保障危险分析从系统的角度针对上述全试验过程提出安全性控制要求和改进措施建议^[9-11]。

首先,对照高能推进系统/火箭任务要求、内容要求、配套表和技术方案,填写完成初步危险(源)检查表,识别系统可能存在的固有危险因素。初步危险(源)检查表如表3所示。

其次,进行初步风险项目检查,即对高能推进系统专业技术准备中的人员、环境、产品检查以及配套装设备、工具、所需技术文件开展的风险项目检查(表4)。

5 试验改进措施建议

为降低高能推进系统/火箭试验过程的潜在风险,针对高能推进系统测试操作过程中的上述操作项目开展风险分析,提出安全性改进措施,并评估改进措施有效性及效果,典型试验操作的安全性改进措施如表5所示。从表5可以看出,采取安全性改进措施后,被试品

表3 高能推进系统初步危险源检查

Table 3 Preliminary hazard checklist of high energy propelled system

分析对象名称	危险源类别	分析对象名称	危险源类别
超声探伤仪	辐射	厂房电源	供电品质
数字单元测试仪	220 V 直流供电	绝缘电阻表	计量检验合格
测试、转接电缆	导通绝缘	吊车	高空坠物
地面监控计算机	220 V AC 供电、病毒防护	吊具	吊具完好情况
人员	上岗资质	气源	高压
人员服装	防静电、无多余物	气体品质	检验合格
操作文书	漏项、错误	配气台	自检合格

表4 高能推进系统技术准备风险项目检查

Table 4 Risk Project Checklist of high energy propelled system technical preparation

风险分析项目	风险描述	预防措施	风险评估	
			严重性	可能性
人员要求	人员未按规定着装、有多余物;人员出现指挥错误,操作失误	人员进入操作区出具证件,着装符合规定,消除静电,不得携带危险物品;所需工具齐全、完好,操作文书携带齐全、签署完整	I	D
环境要求	厂房电压不合格;气源品质不合格;无警示标志或警示标	厂房电压满足指标要求,插头、吊车防爆功能完好;检查气源品质及气源气体品质检测报告;检查高压软管有电缆防护罩并放有警示牌	I	C
产品检查	发动机未接地;燃烧室压力;产品外观缺陷	检查发动机有接地线;燃烧室压力满足技术指标;燃烧室、喷管等可见部位无划痕、掉漆等现象,各铅封是否完好	I	C
工具配套	工具配套是否齐全	按操作规程工具配套表查齐;重点检查属计量验证范畴的工具、仪表在有效期内,仪表用电池电量充足	IV	D
技术文件	技术文件是否齐套	按操作规程检查文件齐套;明确文件版本及适用范围	IV	D

表5 高能推进系统技术准备危险项目分析

Table 5 Hazard item analysis table of high energy propelled system technical preparation

序号	技术准备项目	危险事件描述或说明	危险严重性	危险可能性	风险指数	安全性改进措施	措施有效验证	安全性改进措施效果		
								危险严重性	危险可能性	风险指数
1	吊装出包装箱	发动机坠落;发动机磕碰;静电火花造成发动机误点火,造成人员伤亡	I	C	4	检查吊车、吊具无损坏,工作正常;吊装指挥、操作准确无误,严谨磕碰;吊装过程中消除静电	有效	IV	D	19
2	外观质量检查	发动机及其组件外表有碰伤、划伤;壳体外表有分层、松丝和断丝	II	D	10	发动机搬运时要求周围无多余物,不得用尖锐物体接触发动机任何部位;定期进行外观检查并记录结果	有效	IV	E	20
3	气密检查	燃烧室压力超标;发动机气密检测过程中,发动机误点火,造成人员伤亡	I	C	4	充气稳压 0.5 h 后,开始监测发动机内压强,24 h 无压降,气密合格;气密检测中喷管出口方向禁止站人	有效	IV	D	19

表5 高能推进系统技术准备危险项目分析(续)

Table 5 Hazard item analysis table of high energy propelled system technical preparation (continued)

序号	技术准备项目	危险事件描述或说明	危险严重性	危险可能性	风险指数	安全性改进措施	措施有效验证	安全性改进措施效果		
								危险严重性	危险可能性	风险指数
4	安全机构测试	测试仪未接地;测试仪工作时误断开电缆;带电插拔;测试仪开关机顺序错误	II	C	6	测试仪和测试电缆屏蔽接地端可靠接地;正在进行安全机构测试或转换时,禁止断开测试电缆或安全机构;测试仪开机方式正确	有效	IV	E	20

吊装出包装箱、外观质量检查、气密检查、安全机构测试等技术准备操作风险等级明显降低,措施验证有效。后续将针对该型火箭高能推进系统技术准备的全流程以及人员、工具、环境等危险源开展全面的改进措施研究。

6 结论

高能炸药在运载火箭、航天飞机、导弹武器、卫星和飞船等现代飞行器固体推进剂中的大量应用,一方面大幅提高了推进系统能量性能,但另一方面也降低了其操作使用安全性。采用高能推进系统的武器装备试验不久后将在试验场不断开展,通过对其试验技术准备风险进行预先性深入分析,并针对性地提出安全性改进措施,可较大程度地降低和控制试验过程中人员、环境及工具等带来的潜在危险,有效保障试验场试验安全、顺利进行。

参考文献(References)

- [1] 周晓杨, 石俊涛, 庞爱民, 等. 含CL-20固体推进剂研究现状[J]. 固体火箭技术, 2017, 40(4): 443-447.
Zhou Xiaoyang, Shi Juntao, Pang Aimin, et al. Research status of solid propellant containing CL-20[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2017, 40(4): 443-447.
- [2] 赵孝彬, 李军, 程立国, 等. NEPE推进剂组成与安全特性的相关性研究[C]//第二届固体推进剂安全技术研讨会. 襄樊: 航天科技集团42所, 2009: 71-75.
Zhao Xiaobin, Li Jun, Cheng Ligu, et al. The relation research of composition and safety characteristic for NEPE propellant [C]//The 2nd Solid Propellant Safety Technology Conference. Xiangfan: 42 Aerospace Science and Technology Group, 2009: 71-75.
- [3] 周光巍, 王丽丽. 预先危险分析在空空导弹固体火箭发动机中的应用[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(4): 30-33.
Zhou Guangwei, Wang Lili. The application of preliminary hazard analysis in air-to-air missile solid rocket motor[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(4): 30-33.
- [4] Chassagne F, Bordachar S. Large Solid Rocket Motor safety analyses: Thermal effects issues[C]//34th Department of Defense Explosives Safety Board Seminar. Portland: Oregon, 2010: ADM002313.
- [5] Milner G. Trident D-5 missile explosive propellant hazards [R/OL]. [2019-01-31]. www.gzcenter.org/D5rockethazards.pdf.
- [6] 徐松林, 刘文一. 某型高能固体火箭发动机热烤燃性能研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2017(6): 27-27.
Xu Songlin, Liu Wenyi. Research on the cook-off performance of high energy solid rocket motor[J]. Missiles and Space Vehicles, 2017(6): 27-27.
- [7] 吴勋, 任宁莉, 冯翔, 等. 固体发动机典型环境载荷分析[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 103-105.
Wu Xun, Ren Ningli, Feng Xiang, et al. Analysis of typical environmental load of solid rocket motor[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 103-105.
- [8] 杨永忠, 陈国宏. 固体导弹靶场安全距离计算研究[J]. 导弹试验技术, 2004(3): 19-21.
Yang Yongzhong, Chen Guohong. The research of range safety distance calculation for solid missile[J]. Missile Test Technology, 2004(3): 19-21.
- [9] 胡保朝. 提高固体发动机设计质量和可靠性的措施[J]. 质量与可靠性, 1997(5): 41-43.
Hu Baochao. The measure to improve the design quality and reliability for solid motor[J]. Quality and Reliability, 1997(5): 41-43.
- [10] 陈广南, 张为华. 固体火箭发动机撞击与热击安全性分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Chen Guangnan, Zhang Weihua. Safety analysis for solid rock-

et motor under impact and heat[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008.

[11] 方学谦, 王建灵, 杨建, 等. 固体推进剂安全性评价试验研究[J]. 火工品, 2017(3): 49-52.

Fang Xueqian, Wang Janling, Yang Jian, et al. The experimental study of hazard assessment on solid propellant[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(3): 49-52.

Risk analysis and disposal measures for high energy propelled system test

YIN Huaizhi*, XU Songlin, WANG Junyan

91550 Unit of People's Liberation Army of China, Dalian 116023, China

Abstract The high energy characteristic of high energy propelled system makes the fighting efficiency of missile weapons stronger but also more dangerous to use and sustain. The nitrate ester poly-ether propellant and propelled systems of missiles and rockets using NEPE are generalized. Safety accidents of missiles and rockets in recent years are reviewed briefly. Technique preparation of certain rocket with high energy propelled system is introduced. Hazard source identification on technical preparation of high energy propelled vehicle is studied by PHA method, and the disposal measures are suggested a. The research can provide a technical support for the test of high energy propelled vehicle test in test range.

Keywords high energy propelled; technique preparation; risk analysis; disposal measure ●



(责任编辑 刘志远)