

文章编号: 1003-1480 (2020) 02-0033-04

某燃气发生器用双基推进剂包覆设计及工艺研究

杨勇, 陈静, 杨敏鹏, 屠小昌, 王锐, 杨文, 吴昊, 常英珂

(陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

摘要: 针对某型燃气发生器内弹道性能试验中, 出现实测曲线偏离设计基准的问题, 通过分析试验数据, 并结合包覆材料性能及阻燃机理, 确定原因为原包覆材料硝基油漆布在包覆粘接后使推进剂出现了硝化甘油迁移现象, 从而影响了推进剂能量与燃速, 使产品内弹道性能发生变化。改进设计采用一种聚氨酯材料及浇注包覆工艺对推进剂进行包覆, 并进行产品内弹道性能测试, 结果表明包覆材料及工艺更改后内弹道曲线更接近设计曲线, 产品可靠性更高。

关键词: 燃气发生器; 内弹道; 聚氨酯; 浇注包覆

中图分类号: TJ450.4 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.009

Study on the Design and Process of Coating for Double-base Propellant Used in Some Gas Generator

YANG Yong, CHEN Jing, YANG Min-peng, TU Xiao-chang, WANG Rui, YANG Wen, WU Hao, CHANG Ying-ke

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

Abstract: In the ballistic performance test of some gas generator, the problem that the measured curve deviates from the design basis was appeared. By analyzing the test data, combining with the properties of the coating material and the flame retardant mechanism, the reason is determined that the nitroglycerin migration phenomenon occurred in the propellant after the coating and bonding, thus the energy and burning rate was changed, as well as the internal ballistic performance of the product. Then, by using a polyurethane material and cast coating process to coat the propellant, and carrying out the internal ballistic performance test, the internal ballistic curve of improved coating is closer to the design curve, the product reliability is higher than before.

Key words: Gas generator; Internal ballistics; Polyurethane; Cast coating

双基推进剂具有燃温燃速较低、产气量较大、燃气清洁及强度高的特点, 在各种类型中小口径的火箭、炮射增程发动机、火药启动器和导弹燃气发生器上广泛应用^[1]。在现代的导弹和火箭动力部分设计时, 对发动机往往要求按照特定压(推)力—时间曲线变化, 单靠装药药型设计往往达不到要求, 而需要一种能抑制燃烧的材料, 将装药的部分表面进行包覆阻燃, 这种材料称为包覆剂或者抑制剂^[2]。由于推进剂包覆层有着控制燃面的重要作用^[3], 它的可靠工作对整个发动机至关重要, 不仅需要满足力学性能、机械

性能、与药柱粘接性能、与药柱相容性能以及长期贮存性能等常规要求, 还需要满足抗小分子迁移、耐烧蚀、易加工、无烟少烟的要求, 因此研究包覆层材料与包覆工艺十分有必要。

某导弹弹射用燃气发生器研制前期性能摸底时, 发现燃烧室内部压强曲线与设计曲线存在较大偏差, 通过分析最终将问题定位为原有包覆材料及包覆工艺不能满足产品装药的燃烧要求。针对该问题, 本文提出了一种聚氨酯类包覆材料及浇注包覆工艺, 以提高包覆层阻燃效果及装药可靠性, 并进行试验验证。

收稿日期: 2019-12-05

作者简介: 杨勇(1990-), 男, 工程师, 主要从事燃气发生器、小火箭等燃气做功类产品研发。

1 存在问题及分析

1.1 燃气发生器结构及包覆工艺

某燃气发生器主要由燃烧室壳体、推进剂装药、电起爆器、装药支架以及挡药板等组成,总体结构如图1所示。

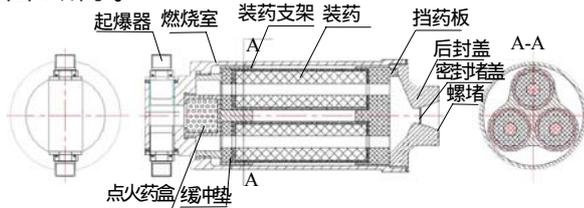


图1 某燃气发生器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of a gas generator structure

该燃气发生器采用3根药柱自由装填,单根药柱外壁与端面包覆阻燃,以增燃面方式燃烧。燃烧室壳体及后封头采用结构钢30CrMnSiA加工。喷管内型面设计成圆滑收敛型,防止金属尖棱烧蚀融化,喷管堵盖采用天然橡胶,用以平常密封防潮及点火时快速建压,并能有效防止装药遭受外界潮气侵害,便于快速点火建压,提高点火响应周期。

包覆材料为硝基油漆布/丙酮的饱和溶液,所采用的硝基油漆布材料的主要成分如表1所示。

表1 硝基油漆布主要的成分材料配比 (%)

Tab.1 The main component materials ratio of nitro paint cloth

组分	3号硝化棉	石棉	硼酸	磷酸三甲酚脂	苯二甲酸二丁脂	二号中定剂	铁红	凡士林
配比	29±2	14.5±2	29±2	13±2	13±2	1.5±2	1.5±2	0.5±2

制作包覆材料涂刷液的过程:首先,将硝基油漆布片状材料泡进纯的丙酮(纯度约为99.7%,工业用)溶液中,将混合溶液密封摇晃约5min后,可观察混合溶液变成糊状均匀液体,然后将该混合溶液密封放置约15d后方可使用。

包覆时将制作好的包覆涂刷液均匀刷涂在包覆装药的表面,一般刷涂3~5遍,附着厚度约为0.5mm。每次刷涂前需保证上一次刷涂液凝固成型。刷涂完成后将推进剂药柱放置在安全区域,做好标签,晾干约48h。待包覆层内部丙酮挥发完后,将包覆好的药柱保存在干燥器内,以备燃气发生器总装时使用。

1.2 存在问题与分析

1.2.1 存在问题

采用HM150-2恒流脉冲电源、DPO7154示波器、

宇航ZQ-Y1系列压强传感器(最大量程为30MPa)对燃气发生器进行常温点火试验,对燃烧室内压强进行实时监测。每发产品配套单发电发火管(另一个发火管接口安装堵头),发火管为单桥钝感发火管(桥路电阻0.90~1.20,点火电流5A,加电时间50ms),示波器采样时间5s,频率2000Hz。

对试验数据进行整理,并采用MATLAB软件对试验数据与理论仿真数据进行对比,如图2所示。

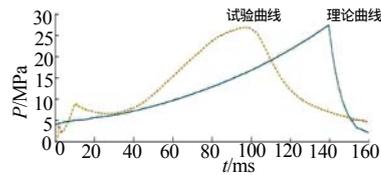


图2 燃烧室内压理论曲线与试验曲线对比

Fig.2 Comparison of the theoretical curve with the test curve of the internal pressure of the combustion chamber

由图2分析可知:理论设计装药最高压强峰时间约为140ms,最高压强约为27MPa,而实测最高压强峰出现约为100ms,最高压强约26MPa,最高压强峰出现时间变短,最大压强值相差不大,判定燃气发生器性能严重偏离设计基准。

1.2.2 分析与讨论

根据上述试验数据分析,推进剂燃烧值最大压强点由140ms提前至100ms,最大压强相差不大,试验压强曲线爬升速率明显高于理论曲线,从压强最高点下降过程中,试验压强下降速率却明显慢于理论曲线。出现该情况的可能性有两种:(1)包覆层脱粘,引起推进剂燃面增长速率变化,最终导致曲线偏离设计值;(2)包覆层材料原因引起了推进剂内部硝化甘油迁移,导致推进剂能量与燃速发生改变,从而导致燃烧室压强曲线偏离设计曲线。

硝基油漆布包覆材料是一种纤维素类包覆剂,主要成分包含硝化纤维素(3号硝化棉),该材料抗硝化甘油迁移性较差,容易吸收双基推进剂中的增塑剂硝化甘油,经过包覆后的药柱不宜长时间贮存^[4]。硝化甘油迁移,首先可导致固体推进剂能量减少,推进剂燃速、热量能量指标下降,不能保证产品原来的内弹道性能;其次,硝化甘油大量迁移进入包覆层后,使包覆层的耐烧蚀性能大大降低,严重时包覆层无法起到阻燃的作用,且影响包覆层的力学性能。同时当包覆层中硝化甘油迁移量较大时,包覆层与药柱的界面

粘接强度将大大降低,严重时会使产品包覆装药点火后,包覆层无法承受高速高温高压气流冲刷,使界面脱粘,药柱燃面急速增大,燃烧室内部压强剧增,甚至发生爆炸事故。再者,硝化甘油增塑剂持续从药柱中迁出,将直接导致装药收缩、包覆层溶胀等问题,使其可靠性大大降低^[4]。

2 改进措施及效果验证

2.1 包覆材料及工艺改进

2.1.1 包覆材料改进

通过研究最新包覆材料,发现乙烯-苯乙烯类、聚酯类树脂和聚丙烯酸酯类等热固型树脂材料,如环氧树脂、聚氨酯和不饱和聚酯等均可用于双基推进剂包覆^[5]。聚氨酯弹性体性能优异,具有优良的低温力学性能,同时可在室温固化而且固化的过程中没有小分子产物生成。推进剂包覆固化后,材料具有很高的透明性^[6],可通过肉眼直接检测粘接情况,无需无损检测,而且包覆层具有很高的耐烧蚀性,氧含量指数可达 35,同时该材料分子主链上含有大量异氰酸酯基(-NCO-),可与硝化棉中未被硝化的羟基(-OH)形成强的化学键,使包覆材料与推进剂之间粘接力大幅度提高。该材料具有较强抗硝化甘油迁移能力,抗老化性能较好,原材料丰富,并且价格低廉^[7]。聚氨酯是分子主链上含有重复的氨基甲酸酯(-NHCOO-)基团的强极性聚合物,由有机多异氰酸酯与聚醚型或聚酯型多元醇反应制得。本文通过配方调整与剥离测试,初步确定聚氨酯材料配方表 2 所示。根据上述配方,采用特定工艺方式将包覆层 A/B 组分分别配好,然后采用相关仪器设备对聚氨酯材料主要性能进行测试,测试结果如表 3 所示。

表 2 聚氨酯(A/B 组分)主要各成分材料配比

芳香族 组分	聚醚二 元醇 (M_n =1 000)	聚醚二元 醇(M_w =2 000)	聚醚三 元醇 (M_n =5 000)	二元 聚醚胺 (M_n =2 000)	二元 胺扩 链剂	有机 金属 催化剂
w/%	15	11.54	46.53	15.38	3.65	7.69

表 3 聚氨酯主要性能参数

性能 指标	η_A / ($mPa \cdot s$)	η_B / ($mPa \cdot s$)	w_A	w_B (邵尔 A)	硬度	拉伸 强度 /MPa	扯断伸 长率/%
实测值	1 700	800~1 000	1.6:1	75	8~9	600	

2.1.2 包覆工艺改进

将原先刷涂工艺更改为浇注工艺,首先给包覆模具与包覆层接触面上预先涂抹一层脱模剂,然后将配置好的聚氨酯 AB 组分混合均匀,去除混合液中气泡(抽真空方式),将配置好的聚氨酯胶液浇注进装入推进剂的模具中,进行常温固化 72h。

2.2 试验验证

采用新的包覆材料与工艺,进行 1 发产品试制,以及性能摸底,检测产品内弹道性能($P-t$ 曲线),将理论内弹道曲线与原/新包覆后内弹道曲线进行对比,如图 3 所示,内弹道曲线参数对比见表 4。

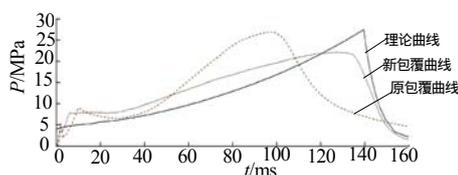


图 3 不同包覆方式的内弹道曲线对比
Fig.3 Comparison of interior ballistic curves of different coating way

表 4 不同包覆方式的内弹道曲线参数对比

类别	最高 压强 P_{max}/MPa	最高压 强时间 t_{max}/ms	升压速 率 $\Delta P/\Delta t$ ($MPa \cdot ms^{-1}$)	燃烧 时间 t_b/ms	压强冲量 $I_{pb} \times 10^6$ ($Pa \cdot s$)
理论设计	27.43	139.5	0.196 6	139.5	1.968 0
原包覆设计	26.84	97.5	0.275 2	89.5	1.662 1
新包覆设计	22.02	131.5	0.211 7	128.6	1.869 1

根据表 4 可知,原包覆设计最大压强 26.84 MPa,接近设计值 27.43MPa,但其最高压强出现时间 97.5 ms 与燃烧时间 89.5ms 严重偏离设计值 139.5ms,燃烧时间内的升压速率 $0.275 2 MPa \cdot ms^{-1}$ 偏离理论升压速率 $0.196 6 MPa \cdot ms^{-1}$ 。新包覆设计最高压强为 22.02 MPa,低于设计值 27.43MPa,最高压强出现时间(131.5ms)与燃烧时间(128.6ms)接近设计值(139.5ms),燃烧时间内升压速率 $0.211 7 MPa \cdot ms^{-1}$ 接近设计值 $0.196 6 MPa \cdot ms^{-1}$,且燃烧时间内新包覆设计的压强冲量 ($1.869 1 \times 10^6 Pa \cdot s$) 接近理论设计值 ($1.968 0 \times 10^6 Pa \cdot s$)。上述数据分析表明,采用新的包覆设计后推进剂燃烧时间与压强冲量(可视为推进剂做功能力)更接近理论设计值,相比原包覆设计新包覆设计能够起到良好的阻燃效果,推进剂燃面基本能按设计燃面增长速率进行燃烧。

在新包覆设计下,燃烧室最高压强峰低于设计值约 5.41MPa,分析该现象的原因是:燃气发生器内装

推进剂的外侧面及端面包覆,仅内孔为增燃面燃烧方式,在燃气发生器点火时,初始设计燃面未被全部点燃,燃烧室内部压力升高规律因燃面燃烧规律变化而变化,因此,推进剂燃烧中期时因燃面扩大导致燃烧室压强高于设计值,燃烧后期因部分弧厚已经燃完,导致最高压强低于设计值。由此可知,新包覆设计下的试验曲线中最高压强低于设计值不会影响对包覆层可靠性的判定。

3 结论

本文针对某燃气发生器研制前期性能试验中出现试验曲线偏离设计曲线的问题,对燃气发生器用推进剂的包覆材料与工艺进行分析及改进,得到以下结论:

(1) 原包覆设计采用硝基油漆布刷涂,其最大缺陷是抗硝化甘油迁移性较差,容易吸收双基推进剂中的增塑剂硝化甘油,从而影响了推进剂总体能量及燃烧规律,最终导致该产品设计压强曲线偏离设计值。

(2) 为改善燃气发生器输出性能,本文采用聚氨酯包覆层材料浇注工艺对推进剂装药进行包覆,通过聚氨酯材料的分子主链上大量的异氰酸酯基(-NCO-)与硝化棉中未被硝化的羟基(-OH)形成强的化学键,使包覆材料与推进剂之间粘结力大幅度提高,同时聚氨酯材料抗硝化甘油迁移效果较佳,可使硝化甘油迁移风险大大降低。

(3) 通过工艺操作与试验验证,发现聚氨酯材

料作为包覆层材料具有环保无污染、包覆工艺操作简单、材料透明易于检测以及包覆效果更优的特点。新包覆设计下的产品试验曲线更接近理论设计曲线,产品可靠性更高。

参考文献:

- [1] 陈汝训.固体火箭发动机的研究[M].北京:中国宇航出版社,2009.
- [2] 达维纳.固体火箭推进剂技术[M].北京:宇航出版社,1997.
- [3] 刘竹生.航天火工装置[M].北京:宇航出版社,2012.
- [4] Agrawal J P, Singh H. Qualitative assessment of nitroglycerin migration from double-base and composite modified double-base rocket propellants: concepts and methods of prevention [J].Propellants Explosives Pyrotechnics,2004, 18(18):106-110.
- [5] 李吉祯,范学忠,钟雷,等.NC/NG/AP/AL 复合双基推进剂力学性能研究[J].含能材料,2007, 15(4): 345-348.
- [6] 曹继平,李东林,王吉贵.不饱和聚酯含 DNT 双基推进剂研究[J].火炸药学报,2006(4): 41-43.
- [7] Mesmer R E,Carroll R L.The kinetics and mechanism of the hydrolysis of pyrophosphite[J].Journal of the American Chemical Society,1966,88(6):1 381-1 387.
- [8] 朱开金,萧忠良.推进剂包覆层用聚氨酯弹性体的合成及应用[J].火炸药学报,2005, 28(4): 158-160.
- [9] 史爱娟,李冬,曹继平,等.异氰酸酯指数对聚氨酯包覆层性能的影响[J].化工新型材料,2015, 8(1): 198-200.