

固体火箭发动机贮存期预测 方法的发展和讨论

李辉只 孙 瑜 唐小真

摘 要

本文总结了最近时期固体火箭发动机贮存期预测方法的研究情况与发展趋势,分析讨论这一研究工作的历程,认为LRSLA法是基本的方法、成功的方法。经过这一步,取得经验,然后才能向前发展。同时,模型法也是有意义的,可使这一研究工作在耗资少、时间快的条件下来完成,并为发动机的设计提供有用的参考数据,使发动机的制造更为可靠。LRSLA法和模型法之间是有联系的,是基础和发展的关系问题。在我国目前的条件下,借鉴国外的经验,既要进行LRSLA法的研究,同时开展模型法的探索,建立数据和气象资料的准备,使这一研究工作尽快向前发展。

一、引 言

随着固体火箭发动机工作范围的扩大、使用要求的提高和经济问题的重视,它们的使用期限和贮存性能越来越成为重要的问题,并开展了深入的研究。我们国家也不例外地进行了大量的工作。这一研究工作不仅遍及与之有关的研究部门和制造单位,以寻找更好的性能和更低的成本;同时也在使用部门广泛地开展着,以期安全准确地完成预期的任务。后者带有对前者工作复审的意义,但又是独立的和更深入的研究。目前可以说,如果没有贮存性能和使用可靠性的数据,一台发动机实际上是无意义的。因此,最近十年来在各种类型、各种型号的发动机方面都开展了相当广泛深入的研究。在实验方面,根据发动机的具体任务要求和使用环境进行了大量试验工作;在基础理论的研究方面,也花了很大功夫,并从大量的实际试验数据上不断总结规律、总结理论,使发动机贮存性能的研究能在设计阶段作更可靠的预测。总之,最近这一时期,发动机贮存性能的预测方法有着相当大的发展。

这些发展为我国进一步开展这一研究工作提供了良好的经验和借鉴。就我国的具体情况来说,对于发动机贮存性能的研究起步较晚,应有步骤地开展这一工作。取得数据、取得经验,并深入总结有关规律形成理论,然后向高一级阶段发展。

二、近十来年的发展情况与趋势

就所见的国内外资料报道,这一研究工作可归纳为以下几个方面:

1. LRSLA法的继续沿用

对全尺寸发动机做过载试验,然后解剖观察试验获得其关键损坏形式和参数,最后进行有关的数据处理并计算其贮存期。这一方法仍有继续沿用,并在某些技术细节上有所改进。例如:在解剖前进行一定时间的加速老化^[2];有的把它作为机理研究的第一步^[3];有的则

仅使用模拟发动机^[3]等。应力分析的计算机程序目前还继续沿用着Texas大学Beaker教授小组于1973年提出的Texgap程序^[2]。

2. 统计模型的发展

利用基础理论研究的成果,如材料性能温度关系的位移函数和损坏的线性积累效应等^[4],借用已获得的主要损坏形式和参数值,以统计方法来计算发动机在各种环境条件下的损坏概率;如热环境、运输振动、日照环境和静态飞行状态等^{[5][6][7][8]},计算在这些环境条件下发动机的应力和应变。当它们超过材料的允许强度和应变能力时,则认为该发动机损坏;当其损坏概率大于某一数值时,则为该发动机的可能贮存期。此法理论上较完善的是既综合了在各种环境下损坏概率,又顾及了在各种环境变化中损坏的积累效应和材料的老化效应等因素。已有资料报道了若干个采用此法的计算结果与实际使用情况良好符合的例子^[7]。

3. 深入考虑实际使用需要与环境

由于发动机使用要求和环境不一致,因而不同情况下其贮存稳定性可能相差悬殊,还须逐一加以研究。例如:考虑到在实际使用情况下,发动机将长时间地被维持在太空,因而研究了在空间真空情况下固体推进剂的老化情况^[9];以不同的飞行速度,经过某一时间或距离的静态飞行后,发动机的性能将遭受相当大的损坏,以及经过各种运输过程,性能也发生一定的变化等^[7]。有趣的是,在太阳辐射损坏的统计模型计算中,得出了夏天引起的损坏比冬天大的与一般结论相反的情况;从大气影响的研究中又得出了保护性贮存(室内贮存)不一定有利的说法^[8]。

4. 进一步摸索研究了影响贮存性能的各种因子。

包覆层与推进剂的脱粘是损坏的关键形式之一,这是LRSLA法早已肯定的问题。但近几年来对于推进剂/包覆层/绝热层结构的重要性又有了进一步的认识,认为包覆层的重要性可与推进剂相比拟^[10]。1982年美国出版了包覆层手册^[11],并在前言中说明有关问题的处理还是经验式的,可见对这一问题的研究还相当不成熟。因此,在贮存期研究中,有的专门对这一结构作了特殊的试验解剖来考核^[12];有的则专门对这一结构的变化情况作了深入的研究,并结合LRSLA法获得的给定值来预测贮存性能^[13]。此外,近期的研究表明,影响贮存性能的因素还有:发动机的尺寸因素,推进剂的体积厚度比^[14]、推进剂的表面情况^[15]和永久变形等^[16]。

5. 基础理论研究

引入粘弹性理论,如WLF方程(即位移函数);

$\log a = \frac{C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)}$ 和“Mullins效应”(即损坏积累效应)来计算有关推进剂的损坏过

程^[4]。进一步研究了固体推进剂这一多相体系中存在热流变的复杂性。经研究得到其性能的变化并不是连续的。因而位移函数 a_T 不一定适用^[17]。同时,实验计算得到的积累损坏标准也并不是线性等。还研究了粘弹性理论在固体推进剂中应用的修正问题^[18],并提出了推进剂的新的物理表征,认为任何有限的变形,由于分子链的裂变和面间脱湿,都会引起微观结构损坏(产生微观裂缝),这个过程是不可逆的,伴随着有能量消耗,粗略地可用循环能量来表示,微观裂缝的产生必然伴随着体积膨胀。由实验得到:这个膨胀和临界应力——应变以及脱湿是相对应的,从而为研究固体推进剂的损坏性能提供了新的方法^[19]。此外,也深入研究了永久变形、畸变(主要是内星孔的径向尺寸变化)^[20]、实际发动机破坏时的变形速率和

动态粘弹性裂缝传播等问题^[21,22], 为研究发动机的损坏问题提供了新的理论基础和方法。

6. 检测方法与工具的发展

在某些常用仪器方面, 值得提出的有:

(1) 红外光谱^[13] (带富利哀变换的FTIS或FTIR) 的应用受到更大的重视, 它在推进剂/包覆层/绝热层系统中各种变化或老化光谱与推进剂的强度等有着很好的相应关系, 经实际研究认为可以用于预测寿命。

(2) 气相色谱、液相色谱和质谱的联合应用^[23] 在化学反应研究中分离反应产物、鉴别反应类型和来源等方面, 都十分有效, 使用甚多。

(3) 交联度的压缩模具分析仪和热机械分析仪测定法^[24]。

(4) 推进剂新的特性表征——膨胀的测定法, 破坏能量和循环能量的测定法^[19]。

(5) 高拉伸速率测定仪^[21]。

(6) 简便的粘弹硬度测定仪^[25]。

(7) 多种形式的应力传感器^[26]。

7. 完善监测组织系统和建立气象资料

在工业发达的国家如美国等, 近年来进一步完善了监测组织系统, 做到定期观察试验和记录有关的数据并加以整理, 建立了严格的技术资料档案。对于各系统资料中存在的也不统一也有人予以进一步的研究, 以得到正确的使用^[27]。与此同时, 又着手建立一整套可靠的气象资料, 从气温、风速到太阳辐射强度等, 其记录单位是每小时的, 非常细^[8]。这些都为发动机贮存性能的研究提供了进一步的实验依据和理论基础。

三、讨 论

1. 近十年来是一个发展

从以上的研究工作情况来看, 在LRSLA法之后, 发动机贮存性能的研究有一个不小的发展。随着发动机性能、使用、原材料、结构和其它有关技术如检测手段等的发展, 随着推进剂老化理论研究的深入, 逐步表现出细化、深化和理论化的特点。如对于“寿命”已被分为几种: 有功能寿命、使用寿命和安全寿命。这些寿命对于各类发动机都各不相同, 因而都必须一一予以研究, 务必达到可以安全使用, 完成其设计目的和使用任务, 这可以说是细化; 在过去研究和实践的基础上, 逐步总结了影响稳定性的因素, 如原材料、结构和表面、贮存、运输以及环境等因素, 从而加强了有关的预研和资料积累, 使关键损坏因素的确定与改进措施更带自觉性, 这可认为是深化; 有关基础理论如粘弹理论在固体推进剂中的应用等的研究, 模型的建立和使用, 以使贮存性能的预测能为设计提供依据, 而不是简单地对已经生产出来的产品来作稳定性能评定, 发挥理论工作的指导意义, 理论的成熟可使贮存性能的预示变为相当的简单和快速, 这可以说是理论化。

2. 关于LRSLA法

LRSLA法虽说是以试验为主, 但它在贮存性能方面的逻辑思想方法是比较合理的, 结果可靠, 能够解决实际预测问题。JANNAF (美国三军和国家航空、航天管理局) 的使用可靠性工作小组, 由于其工作已经有了结果, 也就在那时解散, 并转为推进系统成本工作小组^[28]。

LRSLA法是符合实验科学规律的。目前, 贮存性能研究工作基本上还是以实验为基础

的。考虑到影响因素较多,因此必须确定其中的关键因素,总结其损坏规律。这里所指的实验包括从自然存放到人工加速实验并建立这二者之间的关系。只要经过这一步,即通过试验才能总结出规律并提出理论。LRSLA法在这个研究中的地位是很显然的,是必经的,也是一个基本的方法。

LRSLA法存在的问题主要有:由于它是专门针对某一型号、甚至某一批量所作的实验,某一材料(包括配方)、结构形式、尺寸、使用要求和使用寿命都是特定的,偏离这些具体条件时,结果便不相同。即不同型号之间不能通用。它的最后比较标准是全尺寸发动机自然存放的性能数据。由此就带来了一系列问题:如贮存性能的最终研究必须在实际发动机设计好甚至制造好了以后才能进行。同时其花费时间长、试验工作量大、消耗费用多,其过载试验解剖和应力分析皆比较复杂。

3. 关于模型法

由于贮存性能研究的复杂性,在LRSLA法开展的同时,在较早的时候,另一个预测发动机贮存期的方法——模型法被提出来。模型法是针对影响发动机贮存性能的主要因素,建立相适应的模型来进行研究计算,如Monte Carlo模型^[29]、机械力化学模型和环境模型(包括热、运输、飞行、太阳辐射以及风的影响)等^{[30][5][6][7][8]}。这些方法一方面借助于LRSLA法获得的试验数据,如损坏形式参数,另一方面由于它们具有省时、省钱的优点而被重视和逐步发展,在不少类型与应用场合下使用着,有不少报道认为其结果与实际相符合。但是,模型法如过于简化,不考虑材料的老化和损坏积累效应,则会显得不合理;而如果全面地考虑了有关的因素,则计算工作会变得十分复杂。对于环境模型来说,在这一研究中除了材料和结构外,关键的原始数据是环境数据资料,这一资料获得及其正确利用是不简单的,要有相当的工业和技术水平。目前有这一资料的也只是少数几个工业技术水平高的国家,如美国等。

由于模型法存在的不足之处,提出了理论预示方法的另一个更为简化的做法:即抓住一些发动机损坏过程中具有决定性作用的反应,建立它和老化性能的相关性来预示贮存性能,并可以在同类结构中类推其它性能,如双基药中的增塑剂迁移,当推进剂表面增塑剂的量达到某一定数量后,该发动机便不能使用。此外,在推进剂/包覆层/绝热层的组合结构中,界面和隔离层中的反应达到某一程度后,该发动机也寿终(用红外光谱检测)。这种研究方法也是值得重视的。

总之,对于理论方法,由于要有条件(如环境数据和正确抓住关键环节),理论也有待于发展,所以目前配合LRSLA法来应用还是恰当的,有意义的。而其进一步发展,意义就更大了,可用于指导设计。

四、我国固体火箭发动机贮存期预测

可采取的方法与步骤

在国防现代化中,导弹工业占有举足轻重的地位,外层空间的探索和利用也已迫在眉睫,这就给固体发动机制造的数量和质量提出了高的要求和严峻的问题。其中,尤为感到比较困难,也是最需要的则是它的贮存性能(包括功能、使用和安全寿命在内)的研究。

由于军事工业的保密性很强,因此,国外贮存性能方面的经验即使能借鉴也是有限的。

况且地理气候条件等的差异更不允许我们照搬国外的有关数据、经验。无论从哪一方面说都应有我们自己的经验、自己的试验、自己的基地和技术队伍。

由于发动机贮存期预测的问题很复杂,从何着手需要慎重研究。分析国外在固体火箭发动机贮存性能研究方面所经过的历程,从实用出发,还得从LRSLA法开始。虽然近几年来LRSLA法使用有些改进,但为将来发展作准备,还是要全部包括发动机的过载试验、药柱结构的应力分析、发动机试样的老化规律和数据获取等全部过程。近几年来的技术发展,尤其是我国工业水平的迅速提高和有关经验的积累,又提供了解决这三大难题的更有利的条件。我国也已研制了高质量的传感器,计算机应用水平近年来更有着大幅度的提高。利用近几年来对发动机贮存稳定性因素的进一步探索,对于发动机贮存的稳定性规律和数据获得方面的问题,又提供了更多的可能利用小试样的数据来建立它与自然存放的相关性,达到省钱、省时的目的。所见的有关资料报道有:

1. 对于小型发动机代替全尺寸发动机的问题,如:

(1) 发动机的贮存性能与尺寸、推进剂体积/厚度有关;

(2) 发动机的贮存性能与永久变形和畸变(星孔内径向尺寸变化)有关。

这就提供了寻找大、小发动机性能之间影响性能数据相关性因素的可能,同时也可利用影响贮存性能的主要因素对发动机作人工加速老化。这已有先例^{〔2〕},也是值得研究应用的。

2. 对于方皮药与发动机性能相关性问题。近几年来有关研究中提到的因素还有:表面情况,老化时沿着药柱厚度的性能梯度、重力、应力等力学问题,风速气流和太阳辐射等问题,这也为寻找方皮药与发动机性能相关性提供了一些线索。

3. 推进剂/包覆层/绝热层组合体界面结构情况的变化对推进剂性能的变化,在富利衰红外光谱上是很敏感的,可以作为性能预测的方法,且其已相当成熟地被应用。

总之,首先从LRSLA法开始是成功而可靠的。LRSLA法的工作可以解决当前迫切的问题又可以取得自己的经验为以后向更高阶段发展、向理论法发展作准备。

对于贮存性能研究这样复杂的工作,必然在相当长的时间里基本上是属于实验科学。因此,自然老化数据的收集、整理与研究是一个重要的基础工作,必须立即着手进行,并尽快地建立有联系的、统一的组织来进行全面的研究。另一项基础工作是地理气象资料,也应着手开始准备。前者可提供经验数据,后者则为理论研究作准备。

以上是就最近资料的简单回顾分析,提出了固体火箭发动机贮存性能研究的方法设想。

参 考 文 献

- 〔1〕 徐释铭、高璇:固体火箭发动机贮存期预测方法评述。《固体推进剂老化科研论文集》,上海交通大学应化系。1982。
- 〔2〕 Thrasher D.I. and Hildreth J.H., AIAA-81-1544, 1981.
- 〔3〕 Napier I.M. and Odgers A.L., AIAA P75-1330, 1975.
- 〔4〕 Kishore K. and Prasad G., N78-25232, 1978.
- 〔5〕 Heller R.A., Kamat M.P. and Singh M.P., J. Spacecraft, Vol. 16, No. 3, 1979.
- 〔6〕 Heller R.A. and Singh M.P., AIAA-81-1188, 1981.
- 〔7〕 George Derbalian, Jerrell M. Thomas, Paul Johnston, Gregg Brooks, AD-A117651, 1982.
- 〔8〕 Heller R.A., Singh M.P. and Zibdeh, AIAA-83-1120, 1983.
- 〔9〕 Udlock D.E., JANNAF, Structures and mechanical behavior working group, 14th Meeti-

- ng, Vol. 1, I-13, 1977.
- (10) David O. Depree, Arthus Katzakian, James A. Klier, Roger B. (Steele), AD-A115978, 1982.
 - (11) Campbell J. A., Smith R. M. and Veit P. W., AIAA-81-1647, 1981.
 - (12) Schwarz W. W., et al., AD-A 124728, 1983.
 - (13) Colakovic M., AD-A126219, 1983.
 - (14) Schmitt D., AD-A076012, 1980.
 - (15) Anderson G. P., Bennett S. J. and Jensen L. E., JANNAF, Structures and mechanical behavior working group, 14th Meeting, Vol. 1, I-63, 1977.
 - (16) Bills K. L., Bischel K. H., Ibid., I-69.
 - (17) Mellette R. V., Ibid., I-23.
 - (18) Lepie A. H. and Adicoff A., Ibid., I-51.
 - (19) Liu C. T., Ibid., I-117.
 - (20) Lepie A. H., Ibid., I-41.
 - (21) Swanson S. R., Ibid., I-141.
 - (22) Volk F., AD-A033497, 1976.
 - (23) Kishore K. 等, 《固体推进剂技术》, 四十六所, P13, 1984年3月.
 - (24) Ron Roggess and James Noel, JANNAF, Structures and mechanical behavior working group, 14th Meeting, Vol. 1, I-1, 1977.
 - (25) Susanne J. Bernhardt, AD-A061435, 1978.
 - (26) Trapp R. D., Farmer W. D., Graber R. R., Luhks R. A., AD-A107519, 1981.
 - (27) Ronald D. Broron, JANNAF, Structures and mechanical behavior working group, 14th Meeting, Vol. 1, Piii, 1977.
 - (28) Chappell R. N., Jensen F. R. and Burton R. W., 统计预测民兵导弹第三级推进剂装药的使用寿命, 《专题技术译丛》上海7013厂, 3-4, 1980.
 - (29) Vanderhyde N. and Baumgartner W. E., 固体火箭推进剂适用期的分析和预报, 《国外火炸药参考资料》, 204所, №6, 1980.