

发射药贮存寿命预测技术研究进展

刘杰^{1,2}, 罗天元^{1,2}, 黄文明^{1,2}, 王晓辉^{1,2}, 赵方超^{1,2}

(1. 中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039;
2. 重庆市环境腐蚀与防护工程技术研究中心, 重庆 400039)

摘要: 简述了发射药贮存寿命试验所用的自然环境长期贮存试验监测法和加速寿命试验方法的现状, 对发射药寿命评价与预测所用的人工神经网络技术和计算机模拟技术进行了分析, 阐明了现有技术的优缺点, 论述了发射药贮存寿命试验与评价技术的发展趋势。

关键词: 发射药; 贮存寿命; 预测; 人工神经网络; 计算机模拟

中图分类号: TJ410.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)06-0038-05

Research Progress in Prediction Techniques of Propellant Storage Life

LIU Jie^{1,2}, LUO Tian-yuan^{1,2}, HUANG Wen-ming^{1,2}, WANG Xiao-hui^{1,2}, ZHAO Fang-chao^{1,2}

(1. No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China;
2. Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

Abstract: The current state of long-term storage test and accelerated life test used in propellants storage life test were introduced. Artificial neural networks and computer simulation applied in propellants storage life evaluation and prediction were analyzed. The advantages and limitations of these techniques were clarified. The developing trend of propellants storage life test and evaluation techniques was discussed.

Key words: Propellants; storage life; prediction; artificial neural network; computer simulation

发射药是一种自身含氧化成分和可燃成分,并具有一定形状的固体含能材料,在足够的激发冲量作用下,能够有规律地燃烧,并释放大量的热和气体^[1-2]。发射药在贮存过程中,由于物理和化学因素的作用会导致老化,随贮存时间不断延长,安定剂含量降低,发射药会加速分解,甚至会出现自燃或自爆的可能,给弹药系统的安全贮存带来重大隐患。同

时,发射药在贮存过程中老化,使其在武器装备中的应用性能也发生相应的变化,当应用性能变化超过武器使用的允许范围后,发射药就不能再使用,即存在一个使用寿命的问题^[3]。深入开展发射药贮存老化性能的研究,不但能够为准确预测发射药的贮存寿命和制定相应的防老化措施提供依据,而且能够避免因过早销毁弹药所带来的巨大浪费和因过迟更

收稿日期: 2011-09-18

作者简介: 刘杰(1983—),男,山东莱州人,博士,工程师,主要研究方向为弹药贮存寿命试验与评价技术。

换所造成的严重后果。

目前,国内外大多采用热老化加速试验法来预测发射药的安全贮存寿命,但研究内容和失效判据有较大差异。一些研究以热加速老化前后的射击弹道性能变化率作为判据^[4];一些研究则通过监测发射药内部与贮存紧密相关的成分变化来预估寿命,如研究分析发射药中安定剂含量(质量分数,后同)的变化,从而判断其贮存安全寿命^[5-9]。另外,神经网络法^[10-11]也是一种新型的考虑多因素变化的弹药使用寿命的预测方法,运用该法对发射药进行预测可得到较为理想的结果。

1 发射药贮存寿命终点判据

发射药贮存主要包括未装弹贮存和装弹贮存,不同的贮存方式贮存寿命的预测方法也不尽相同。通常将安定剂含量作为未装弹贮存发射药的寿命终点的判据,装弹贮存发射药的寿命终点的判据还应考虑装药元件的损坏等因素。目前,我国发射药的安全贮存临界点^[7]一般以安定剂含量低于0.3%或其含量下降50%为判定指标,美国则在安定剂含量降至0.2%时认为继续贮存不安全^[12]。根据军方的统计数据,34批单基药贮存13 a后,其安定剂含量平均仅下降了0.062%^[12];双基药贮存20 a后,其安定剂含量的变化同样很小。显然,常温下未装弹发射药的贮存寿命是很长的。发射药的装弹贮存寿命要远小于未装弹贮存寿命,其原因除了安定剂的含量变化外,物理因素对装弹发射药贮存寿命也会产生显著的影响^[13],如装药元件的损坏、外观颜色的改变以及弧厚的变化等。综合考虑各种环境影响因素,对装配于弹箭系统发射药的贮存寿命进行预测的技术仍然鲜见报道。

有了判断未装弹发射药是否达到寿命终点的判据后,仍需要自然环境试验与加速寿命试验方法具有良好的相关性,才能对发射药的贮存寿命进行预测。

2 发射药贮存寿命试验方法

目前,发射药贮存寿命试验方法主要包括自然环境贮存试验监测法和加速寿命试验评估法^[14-15],最近又兴起了人工神经网络技术和计算机模拟技术。

2.1 自然环境贮存试验监测法

自然环境贮存试验监测法最早用于军工是在第二次世界大战期间,它是在典型和(或)极端自然环境下将发射药长期贮存,对其环境适应性进行研究,再按照相关的评价标准和方法来预测和评估发射药的安全贮存寿命。自然环境贮存试验需要很长的试验周期,有的甚至可以达到十几年或几十年,但是其试验结果更接近材料和产品的使用环境,数据真实可靠。由于它对提高产品质量、保证产品的环境适应性和可靠性起着非常重要的作用,因此自然环境贮存试验已成为用于预测发射药贮存寿命的不可或缺的试验方法。

为了科学评估库存发射药的安全贮存寿命,国内一些学者对库存发射药进行了长期贮存试验研究,测得了处于贮存状态的部分发射药的DPA含量的原始试验数据,建立了相应的数学模型和安全贮存寿命预测方法,并根据试验结果和该数据处理方法,准确预测了该发射药的贮存寿命^[9],结果表明,提出的估算库存发射药安全寿命的方法是可靠的。还有些学者通过对不同地区库存单基发射药贮存寿命与温、湿度关系的曲线进行拟合,发现拟合曲线符合二次模型,并利用环境特征相对典型地区的温、湿度数据,得到了贮存寿命与温、湿度的回归方程^[16];回归方程的剩余标准差和残差极小,表明拟合效果非常好,能够较准确地预测不同温、湿度条件下单基发射药的安全贮存寿命。

国外发射药贮存寿命试验与评价技术实现了自然环境贮存试验与加速寿命试验的有机结合。老化和监测计划是评估弹箭贮存寿命的有效方法。老化监测法所预测的弹箭产品剩余贮存寿命比实际贮存条件下要短得多。为了弥补这一不足,美国空军于20世纪70年代专门推出了包含加速老化试验、失效模型分析、超载试验和失效概率分布4方面内容的长期寿命分析计划。这一计划的顺利进行,使他们能够准确预测一系列弹箭产品的安全贮存寿命。美国自然环境贮存试验监测法得到了很多国家的认可。

虽然自然环境贮存试验得到的数据真实可靠,但是发射药自身的物化性质非常稳定,自然老化所需要的时间往往达到几十年,期间的人为因素会引起较大的试验误差;另外,不断提高的发射药研发技

术加快了发射药更新换代的速度,这种耗时长、花费大的寿命预测技术已不能满足现代发射药贮存寿命预测的要求^[17]。因此,加速寿命试验方法已成为近年来人们对库存发射药贮存寿命预测方法研究的重点方向之一。

2.2 加速寿命试验评估法

加速寿命试验是指在不改变产品的失效机理的前提下,用加大环境应力的方法,强化环境因子、增大试验件负荷、加速产品失效过程,以期在较短的时间内达到长时间自然贮存的效果^[14]。20世纪60年代,国外就开展了发射药的加速寿命试验研究^[18],我国在20世纪80年代才开始用加速老化法来预测发射药的安全贮存寿命^[19]。

按照环境应力的加载方式不同,可以将加速寿命试验分为恒定应力加速试验、步进应力加速试验和序进应力加速试验等。恒定应力加速试验中应力施加方法简单,数据处理方法和预测模型较为成熟,在加速试验中被广泛应用;步进应力加速试验具有对实验数据要求低的优点,并且具有很好的加速效率;序进应力加速试验的加速效率最高,但其数学统计方法也最为复杂^[17]。

在研究推进剂的过程中,人们提出了5种目前应用较为广泛的加速寿命试验方法,分别是高温加速老化法、动态粘弹分析法、活化能法、凝聚含量法和傅里叶红外光谱分析法^[20]。其中高温加速老化试验方法应用最为广泛,它是通过加强试验环境的温度,运用高温环境下所测得的试验数据去外推常温环境下的发射药和固体推进剂等贮存寿命的一种预测方法。进行寿命预测的过程中,需要使用Arrhenius方程或Berthelot方程等模型^[21-24],其中GJB 770A—1997使用的就是Berthelot方程^[25]。

在国内,李海昌等运用Spearman的秩相关检验法和相关系数法定量地分析了某种发射药温度单应力加速寿命试验与现场贮存试验之间的相关性^[7]。结果表明,两者相关性显著,并得出了相关寿命预测模型及两者间的加速系数。为了更准确地预测发射药的有效使用期,廖昕等以发射药力学性能变化的数据作为老化失效判据,采用热加速老化试验的方法,研究了含黑索今双基药(RB型硝胺发射药)的抗冲、抗压强度和压缩率随老化时间和温度变化的规

律^[26]。结果表明,该发射药在安全贮存期内,高分子材料老化降解造成的力学性能下降,不会影响其安全使用;RB型硝胺发射药的使用寿命远大于安全贮存寿命。衡淑云等较准确地预测了硝酸酯火药在一定温度下的贮存寿命,其主要方法是将线性最小二乘法与步进应力加速试验结合,按照贝瑟洛特方程进行线性回归处理^[5]。

国外对于发射药老化方面的研究较早,Rose A等通过对发射药进行加速寿命试验,发现老化后剩余溶剂对发射药性能有重要影响^[27]。Deborah Davis等发现老化是发射药组分氧化淬火及水解综合作用的结果^[28]。Chang等将发射药的加速寿命试验数据用随机抽样数据统计方法进行了处理,较为准确地对相似发射药的贮存寿命进行了预测,且结果可靠性较高^[29]。另外,一些学者提出了一种“混合加速寿命试验法”,这种试验方法可以有效地解决在进行序进应力加速寿命试验时,随着试验时间的延长,应力水平可能超出合理范围的问题^[30]。

通过加速寿命试验方法所预测的发射药的贮存寿命,必须经过自然环境贮存试验加以验证,但由于自然环境贮存试验的试验周期过长,很多加速寿命试验所预测的结果并未得到及时验证;加速老化的环境条件也有别于发射药的贮存条件,所以用这种方法预测的结果一直受到怀疑。另外,这种预测方法是建立在许多假设基础上的,因此应理性看待以这种方法预测得到的贮存寿命。

2.3 人工神经网络技术

人工神经网络(Artificial Neural Network,以下简称ANN)是20世纪80年代以来发展起来的一门综合学科,它将非线性大规模并行处理作为基础,同时拥有强大的计算能力和信息存贮能力。通过网络学习实现的非线性函数映射,是一种非经典的数值方法^[31]。影响发射药贮存寿命的各种因素之间形成了一种无法利用数学方法来精确表征的复杂函数关系,人工神经网络技术能够对这些影响因素进行模糊处理,提高了发射药贮存寿命预测的精确度。因其并行性、自组织、自适应、非线性和容错性等特征,ANN已成为人工智能领域的前沿技术。在体现知识的复杂性和微观认识不完备性的火炸药科学领域,ANN方法也已显示出广阔的应用前景^[32]。

刘沃野等较早地利用神经网络模型对库存弹药进行寿命预测,他们通过对某型单基发射药库存枪弹的理化性能、内弹道性能变化规律和贮存寿命进行研究,分析了库存枪弹贮存寿命的影响因素,建立了库存枪弹贮存寿命和影响因素变化规律的神经网络模型,并用此模型预测了库存枪弹的贮存寿命^[33]。曹营军分析了影响发射药贮存安定性的因素和贮存寿命终点判据,运用人工神经网络技术分别建立了单基药和双基药的预测模型,然后通过 Matlab 仿真系统,编制成了一套应用程序,进行了较准确的寿命预测^[34]。吕延龙等构成一个 3-4-1 型 BP 神经网络模型,对发射药的安全贮存寿命进行了预测,测试误差保持在 1% 以内,基本满足发射药贮存寿命预测要求^[35]。随着人工神经网络技术的不断发展,人们运用该技术对发射药安全贮存寿命的影响因子和最佳的神经网络结构等问题的研究将更加深入。

2.4 计算机模拟技术^[36—38]

近年来,随着理论和计算化学以及计算机技术的飞速发展,计算机模拟方法首先开始应用于推进剂的宏观老化行为的研究,为老化研究提供了预测和技术指导。计算机模拟既不是纯粹的实验方法,也不是纯粹的理论方法,它是在实验基础上运用基本原理,以计算机为工具,搭建的一系列模型与算法,用来模拟材料的结构与行为,进而模拟材料体系的各种物理化学性质。计算机模拟根据模拟对象的尺度范围可分为微观层次和介观层次。由于将这种在计算机上进行的模拟研究与传统的仪器实验监测检测相结合,可以解释一些在目前实验手段下无法验证、难以说明的老化力学性能,揭示发射药老化过程中化学反应分子机制,判断发射药的老化程度,演示发射药老化的动态过程。因此,计算机模拟方法必将成为研究发射药老化的重要技术手段之一,为发射药使用寿命预估提供有用的信息。

3 发射药贮存寿命预测的趋势和展望

3.1 自然环境贮存试验监测法不断完善

自然环境贮存试验监测法在发射药贮存寿命预

测方面也发挥了很大作用,随着科学技术的发展,自然环境贮存试验监测法将得到更加快速的发展和不断完善。大量先进检测分析仪器的发明和应用对自然环境贮存监测试验的发展起到了巨大的推动作用,使获得的试验数据和分析结果更加准确可靠,为检测分析方法的形成和相关标准的制定提供了基础数据支持,并为加速老化试验法的试验设计和方法建立提供了理论依据。

3.2 加速老化试验法得到快速发展

随着新型高能发射药的大量发明和应用,其贮存寿命也受到更多关注。为了能快速精确预测发射药的贮存寿命,较全面地掌握其对典型贮存环境的适应能力,运用加速寿命试验的方法能很好地解决这一问题。因此,用加速老化试验法预测发射药贮存寿命已受到越来越多的重视。近期,随着大量先进分析仪器的发明和先进预测方法、模型的建立,人们力求用少量的样品快速准确地预测发射药的贮存寿命,为预测发射药的使用寿命提供依据。

3.3 环境谱和载荷谱的编制受到重视

为了预估弹箭的贮存寿命,应当了解其贮存环境(如温度、湿度)谱和载荷(运输中的振动载荷、勤务处理时的撞击载荷等)谱^[39]。我国在这一领域工作不太到位,因而预估的使用寿命也欠准确。载荷谱对于弹箭系统的设计部门是无法预估的,但其贮存环境谱可以根据气象资料编制。对于用户而言,从弹箭购入就开始编制弹箭系统的环境谱和载荷谱可以很好地解决这一问题。环境谱与载荷谱的建立有助于人们掌握贮存环境下弹箭系统及其材料(包括发射药、推进剂等)和构件的性能变化规律,揭示贮存环境的慢作用机理,建立贮存寿命分析评估模型。

3.4 分析模型更加完善,计算精度日益提高

随着寿命预估模型的大量建立,不同学科理论(断裂力学、非线性粘弹理论和有限元法等)的快速发展和先进测试手段的广泛应用,分析模型所涵盖的因素将更加全面。另外,由于测试技术的发展,所采用的模型日益准确,计算精度可用实验来验证,弹箭及其材料的贮存和使用寿命可用概率统计法进行准确预估。

4 结语

由于新型发射药的不断发明和应用,其安全贮存寿命预测技术也应随之不断地向前发展和完善,这样才能满足各方面的需求。在进行发射药的安全贮存寿命预测和评估时,应根据对预测寿命准确性的要求选择适当的试验方法和分析手段。由于现有的试验测试技术和数据分析技术均存在一定的缺点,而这些缺点可能给试验结果造成一定的误差,但随着计算机技术、无损检测技术和测试技术的大力发展,试验方法和预测技术也将更加简便实用,所得到的预测模型和预测结果将更加准确。

参考文献:

- [1] 王泽山. 含能材料概论[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.
- [2] 萧忠良,王泽山. 发射药科学技术总体认识与理解[J]. 火炸药学报,2004,27(3):1—6.
- [3] 肖倩. 高能高强度发射药长贮稳定性研究[D]. 南京:南京理工大学,2010.
- [4] 刘子如,潘统学,衡淑云. 单基发射药弹道可靠度和可靠贮存寿命[J]. 弹道学报,1994,21(3):31—38.
- [5] 衡淑云,韩芳,周继华,等. 高能发射药有效安定剂消耗反应动力学研究[J]. 含能材料,2008,16(5):494—497.
- [6] 杜仕国. 发射药的分解机理及其安定性研究[J]. 军械工程学院学报,1994,6(1):30—34.
- [7] 李海昌,郭芳筠. 发射药加速寿命试验的相关性研究[J]. 火炸药,1996(3):25—27.
- [8] 衡淑云,韩芳,张林军,等. 硝酸酯火药安全贮存寿命的预估方法和结果[J]. 火炸药学报,2006,29(4):71—76.
- [9] 郑波,宋新民,姜志保,等. 一种评估库存发射药安全贮存寿命的方法[J]. 火炸药学报,2005,28(2):29—31.
- [10] 刘沃野,蒙古海. 基于神经网络的库存枪弹贮存寿命预测研究[J]. 军械工程学院学报,2001,13(3):12—15.
- [11] 杨根,赵永俊,张炜,等. HTPB推进剂贮存期预测模型研究[J]. 固体火箭技术,2006,29(4):283—285.
- [12] 王泽山,潘仁明,朱立明. 贮存发射药性能评述[J]. 兵工学报,1994(1):26—28.
- [13] 周堃,罗天元,张伦武. 弹箭贮存寿命预测预报技术综述[J]. 装备环境工程,2005,2(3):6—11.
- [14] 罗天元,周堃,余淑华,等. 国外弹药贮存寿命试验与评价技术概述[J]. 装备环境工程,2005,2(4):17—22.
- [15] 张伦武,汪学华,杨晓然. 军用装备长贮寿命预报方法[J]. 装备环境工程,2004,1(4):46—49.
- [16] 苟勇强,罗兴柏,秦翔宇,等. 基于纯二次模型的单机发射药贮存寿命预测[J]. 火炸药学报,2009,32(2):72—74,83.
- [17] 苟勇强,罗兴柏,张建礼. 发射药安全贮存预测技术[J]. 四川兵工学报,2009,30(4):105—107.
- [18] HOLL G. Former and Modern Method for the Determination of the Service Life of Rocket Propellant [R]. (余不详)
- [19] 刘得辉. 复合推进剂贮存寿命及其可靠性研究[J]. 推进技术,1993(6):63—67.
- [20] 王春华,彭网大,翁武军,等. 固体推进剂贮存寿命预估方法[J]. 火炸药,1997(3):34—37.
- [21] 吕文平,李旭昌,林培基. 神经网络在复合固体推进剂力学性能研究中的应用[J]. 飞航导弹,2009(4):54—56.
- [22] ZHAO Feng-qi, HENG Shu-yun, HU Rong-zu, et al. A Study of Kinetic Behaviours of the Effective Centralite/Stabilizer Consumption Reaction of Propellants using a Multi-temperature Artificial Accelerated Ageing Test[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 145(1-2):45—50.
- [23] AHMED Mekki, KAMEL Khimeche, ABDALLAH Dahmani. Measurement and Prediction of (solid + liquid) Equilibria of Gun Powder's and Propellant's Stabilizers Mixtures[J]. J Chem Thermodynamics, 2010, 42: 1050—1055.
- [24] GUO Song, WANG Qingsong, SUN Jinhua, et al. Study on the Influence of Moisture Content on Thermal Stability of Propellant[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168: 536—541.
- [25] GJB 770A—1997, 火药试验方法, 方法 506.1: 预估安全贮存寿命热加速老化法[S].
- [26] 廖昕,堵平,王泽山. RB型硝胺发射药使用寿命实验研究[J]. 含能材料,2010,18(1):188—191.
- [27] ROSE A. LOVA Propellant Aging: Effect of Residual Solvent [R]. Maryland: Army Research Laboratory, 1994.
- [28] DEBORAH Davis. Use of Dilatation in Understanding Composite Propellant Aging[C]. 37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.
- [29] CHANG, Wei-te. The Analysis of Random Effects Regression Model for Predicting the Shelf-Life of Gun Propellant[R]. AD-A295246, 1995.
- [30] 王炳兴. 混合加速寿命试验模型及其统计分析[J]. 高校应用数学学报(A辑中文版), 2001, 16(1): 101—106.
- [31] HU S, HORE H. Progressing in Supervised Neural Networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1993(1): 8—39.

(下转第90页)

图2为运动轨迹的俯视图,坐标原点为飞弹的发射位置, x, y 分别表示与原点的横向距离和纵向距离。图2中带圈的直线为目标(坦克)的运动轨迹,而飞弹的运动轨迹可通过解算方程(8)~(12)得到,如图2中的实线所示。

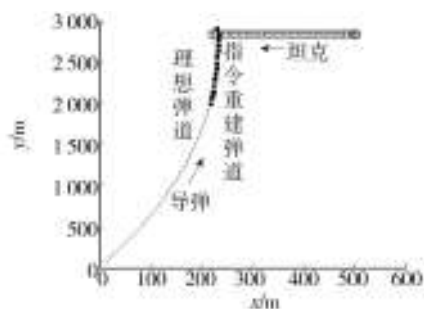


图2 理想弹道与重建控制指令形成的弹道比较

Fig. 2 Comparison of ideal trajectory and formed trajectory by restored instruction

通过计算,飞弹将在23.9 s时击中目标。如果飞弹在飞行18 s以后受到强电磁脉冲的干扰,根据先前指令,通过模型重建的控制指令起作用控制飞弹飞行,那么18 s以后运动轨迹如图2中的点线所示,此时如果将飞弹和目标看成质点的话,两者就不会在同一时刻相交,但目标如果是较大的物体,且目标速度较慢的情况下,飞弹仍能击中目标。通过计算,击中目标的条件是:目标长度大于4 m,行进速度小于12 m/s。

4 结论

基于ARMA滤波的飞行装备的电磁防护方法,

改变了传统的电磁防护方法只从硬件层面解决的方式,使得飞行装备在硬件防护失效的情况下,能够从软件层面进行抗干扰,并具有“修复自救”的功能。从仿真计算及模拟实验的结果来看,证明了这种防护措施的有效性,从而为飞行装备的电磁防护方法以及“智能化”的发展开辟了一个新途径。

参考文献:

- [1] 刘尚合,孙国至. 复杂电磁环境内涵及效应分析[J]. 装备指挥技术学院学报,2008,19(1):1—5.
- [2] 周壁华,陈彬,石立华. 电磁脉冲及其工程防护[M]. 北京:国防工业出版社,2003.
- [3] WERNER Graf, EDWARD F. Shielding Effectiveness and Electromagnetic Protection[J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30(3). (余不详)
- [4] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [5] 张勇强. 有线制导装备快沿电磁脉冲效应及防护方法研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2010.
- [6] 张勇强,刘崇刚. 一种基于ARMA模型的能见度预报方法[J]. 航空气象,2002,181(4):25—26.
- [7] 钱杏芳,林瑞雄,赵亚男. 导弹飞行力学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.

(上接第42页)

- [32] 马贵春,张树生,张景林. 人工神经网络方法在火炸药科学领域应用进展[J]. 火工品,2005(1):42—44.
- [33] 刘沃野,蒙古海. 基于神经网络的库存枪弹储存寿命预测研究[J]. 军械工程学院学报,2001,13(3):12—15.
- [34] 曹营军. 基于人工神经网络的库存发射药安全贮存寿命预测研究[D]. 石家庄:军械工程学院,2002.
- [35] 吕延龙,曹营军,田春雷. 用神经网络技术预测库存发射药安全寿命的可行性[J]. 火炸药学报,2003,26(1):68—

73.

- [36] 杨小震. 分子模拟与高分子材料[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [37] FRENKEL Smit. 分子模拟——从算法到应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
- [38] ANDREW Rleach. Molecular Modeling Principles and Applications [M]. Second Edition. Prentice Hall, 2001.
- [39] 邢耀国,董可海. 固体火箭发动机寿命预估研究的发展和展望[J]. 固体火箭技术,2001,24(3):30—33,41.