

无损检测及其在身管损伤评估中的应用

刘帮俊, 陈荣刚

(中国人民解放军陆军军官学院, 安徽 合肥 230031)

摘要:无损检测技术能够在不破坏产品的情况下对损伤和缺陷进行有效检测,是确保产品生产质量和使用可靠性的重要环节,在整个工业领域具有重要的意义。对当前主要的无损检测技术原理与应用进行了分析。针对身管实时健康监测方法研究中的问题,提出运用工业CT进行相应的身管磨损量和裂纹扩展量的定量研究思路。

关键词:无损检测;工业CT;身管损伤

本文引用格式:刘帮俊,陈荣刚.无损检测及其在身管损伤评估中的应用[J].兵器装备工程学报,2018(1):71-75,83.

Citation format:LIU Bangjun, CHEN Ronggang. Non-Destructive Testing and Its Application in the Evaluation of Gun Barrel's Damage[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2018(1):71-75, 83.

中图分类号:TJ450.6

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2018)01-0071-05

Non-Destructive Testing and Its Application in the Evaluation of Gun Barrel's Damage

LIU Bangjun, CHEN Ronggang

(Army Officer Academy of PLA, Hefei 230031, China)

Abstract: Non-destructive testing is the technology which detects the damage and defects without destroying the products to ensure the quality and reliability, and it is of great significance in the whole field of industry. In this paper, the main principles and applications of nondestructive testing technology are briefly summarized. A method for quantitative study of gun barrel's wear and crack propagation by using industrial computed tomography is proposed to reach the real-time health monitoring of gun barrel.

Key words: non-destructive testing; industrial Computed Tomography; gun barrel's damage

无损检测是在不损伤材料或构件的可靠性和有效性的前提下对构件表面和内部各种损伤缺陷进行探测的技术,是一门交叉性极强的涉及材料、电磁、计算机、激光等多学科的检测技术,其水平能反映相应行业甚至国家的工业技术水平。经过一个多世纪的发展,无损检测在机械、化工、航空航天、军事装备等各个领域有着广泛的应用并发挥重要作用;随着科技的发展,无损检测还会向着自动无损评价、定量无损评价技术方向发展,使得无损检测技术在工业领域发挥更加重要的作用。身管作为枪炮武器系统中的重要零部件,在使用中会产生大量的损伤,如何对这些损伤进行有效的检测是确保武器系统发挥作战效能及使用者安全的重要保障。本文对当前主要的无损检测技术的发展进行了简要综述,提

出在基于身管外表面应变特征的健康监测方法的探究过程中,运用工业CT对身管内膛磨损量和裂纹扩展量进行辅助性定量研究的思路。

1 无损检测技术

无损检测是利用材料在射线辐射、弹性波等作用下呈现的性质以及电化学、磁学、热学等物理性质,通过对这些物理性质及其变化情况进行测量,以实现检测各种缺陷与损伤的一门技术。根据不同物理性质发展得到的主要无损检测方法有:射线检测(Radiographic Testing, RT)、超声检测(Ultrasonic Testing, UT)、磁粉检测(Magnetic particle Testing, MT)、

收稿日期:2017-06-14;修回日期:2017-09-02

作者简介:刘帮俊(1992—),男,硕士研究生,主要从事机械电子工程研究,E-mail:rogy07@163.com;陈荣刚(1960—),男,教授,博士,主要从事机械电子工程研究。

渗透检测(Penetrant Testing, PT)、涡流检测(Eddy current Testing, ET)、声发射技术(Acoustic Emission Technology, AE)和工业CT(Industrial Computed Tomography)等。

1.1 射线检测

射线检测的是将射线能量注入到被检测对象中^[1],使能量与被检测对象的物质发生交互作用,并利用胶片和传感器收集该交互作用的结果,通过图像将该结果信息(能量的强度、相位等)显示出来,根据已知的射线能量与物质作用的关系,对得到的图像进行分析判断进而对被检测对象的组织结构、缺陷和不连续性进行评估,原理如图1所示。大体将其分为射线照相技术(Radiography)、射线实时成像技术(Radioscopy)、射线层析成像技术(Tomography)和其他射线检测技术4类。

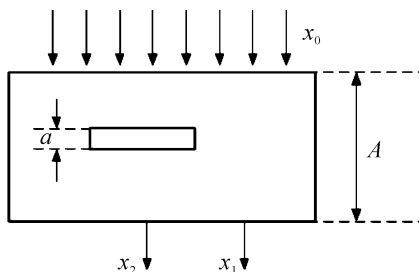


图1 射线检测原理

射线检测能对构件的表面和内部损伤进行有效的检测,得到了大量的应用。文献[2]中利用X射线显微成像技术分析航空工业机械接头的疲劳微裂纹的成核与扩展机制。文献[3]中通过X射线对硬质合金/不锈钢之间的焊缝裂纹与气孔缺陷进行检测。文献[4]中利用X射线对注射成形的MIM418涡轮进行检测,分析其缺陷状况,提高成型质量。

1.2 超声检测

超声检测是根据超声波在被检测构件或材料中传播时,材料的声学特性和内部的组织变化对超声波的传播产生影响,通过对超声波受影响程度和状况进行探测进而了解材料性能和结构变化,其原理如图2所示^[5]。超声波具有遇到界面反射、指向性好、传播能量大、穿透力强等特性,其声速、衰减、散射等特性提供了丰富的检测信息,使得其在无损检测领域被广泛应用。根据原理将其分为:反射法、共振法和穿透法3种超声检测方法。

超声检测始于20世纪30年代,是无损检测领域使用频率最高、发展最快的一种无损检测技术,被广泛应用于几乎所有的工业探伤领域,对构件内部缺陷有较好的检测能力。文献[6]中利用基于兰姆波透射的超声检测技术对航空领域应用较多的LY12铝合金的缺陷进行检测,确保其使用安全。文献[7]中对纤维增强复合材料缺陷进行超声检测,并对检测信号进行张量分析,提高其缺陷识别能力。文献[8]中通过超声检测方法对合金弹体的缺陷进行识别,并采用支持向量机等方法将缺陷识别率提高97.5%。

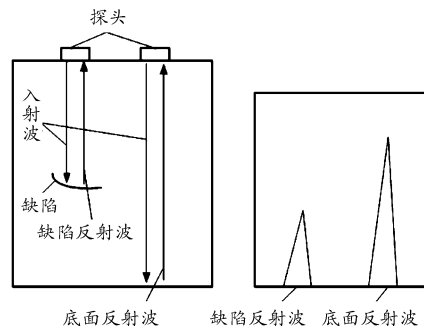


图2 超声检测原理

1.3 磁粉检测

磁粉探伤是利用铁磁材料被磁化后,由于不连续的存在或截面变化,在强磁场中或通以大电流磁化后,会使构件表面和近表面的磁力线发生局部畸变而产生漏磁场(即磁感应线离开和进入表面时形成的磁场),将导磁性良好的磁粉施加在构件上,缺陷附近的漏磁场吸住磁粉,进而在构件表面形成在合适光照下目视可见的磁痕,从而显示缺陷的位置、形状和大小,原理如图3所示。

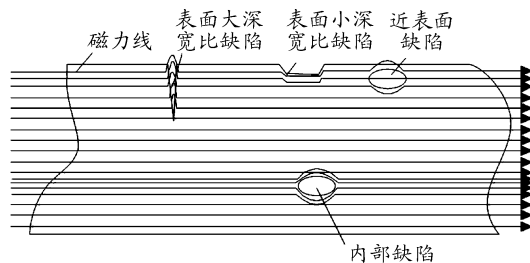


图3 磁粉检测原理

磁粉检测具有显示直观、操作简单、检测灵敏度高、检测效率高、费用低等优点。但其也存在相应的局限性:如只适用于铁磁性材料和表面探伤、受构件涂层影响、缺陷方向性要求高、容易产生非相关显示以及必要时需要做退磁处理等。

磁粉探伤主要对结构表面和近表面的损伤进行探测,被认为是众多表面缺陷检测中最灵敏的方法之一。文献[9]对航空航天领域应用较多的17-4PH不锈钢进行磁粉检测,并对伪缺陷进行了区分,检测可靠性高。

1.4 渗透检测

渗透检测主要应用了毛细现象的原理,如图4所示,即在构件表面施加渗透剂,利用构件毛细作用渗透到表面狭窄的开口缺陷内;去除表面多余的渗透剂后,在构件表面施加显像剂;显像剂具有吸引渗透液的作用,缺陷处的渗透液在毛细作用下被吸出;用特定的光源(白光/紫外线光)对试件进行照射,显示出缺陷部位渗透液的痕迹,从而能够直观地判断出缺陷的形貌以及分布情况。

渗透检测只能用于构件的表面开口缺陷检测。文献[10]中对渗透检测方法在飞机配件的制造、使用等各阶段损伤检测的有效性进行了研究分析。文献[11]针对焊接接头

中不同类型、大小和数量的缺陷,利用渗透检测方法进行无损检测,并在 X5CrNi8-10 高合金钢、S235 碳素钢以及 AlMg5 铝合金的焊接质量进行试验研究。文献[12]利用 ZL-27A 与 ZL67 渗透液对 GH4169 涡轮盘表面径轴向裂纹进行荧光渗透检测的检测质量进行了分析研究。

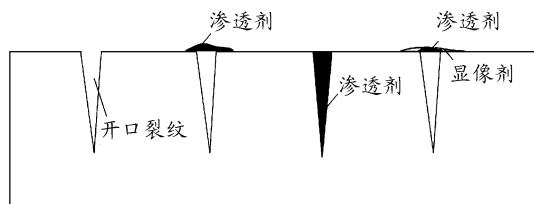


图4 渗透检测原理

1.5 涡流检测

涡流检测是建立在电磁感应基础上,利用在交变磁场作用下不同材料产生不同振幅和相位的涡流来检测铁磁性和非铁磁性金属材料的物理性能、缺陷和结构的异常。其原理^[13]:将构件放在交流电线圈中(如图5(a))或接近线圈(如图5(b)),通电时线圈产生交变磁场 H_a ;在 H_a 作用下,金属构件感应出涡流并产生相应的磁场 H_s 。磁场 H_s 与交变磁场 H_a 相互作用,导致原磁场发生变化,使线圈内的磁通发生变化,从而改变线圈的阻抗。构件的任何变化(如尺寸、内部组织结构等)都会改变涡流的密度和分布,从而改变线圈的阻抗。从阻抗的变化过程中,可以测定构件的电导率、磁导率和尺寸特征以及裂纹的大小和方向。

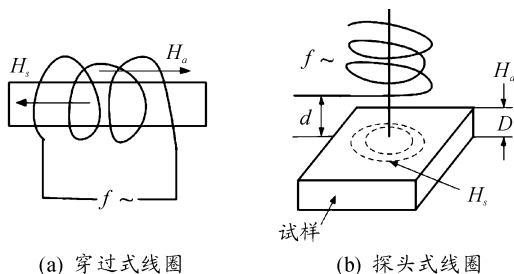


图5 涡流检测原理

涡流检测能对金属构件表面和近表面的缺陷进行检测,检测速度快、精度高,并能对具有包覆层的管道进行检测等。文献[14]针对压力管道中的磨损等损伤,提出利用脉冲涡流检测方法进行无损探伤,并在实验室中进行了模拟试验。文献[15]利用涡流检测方法对奥氏体不锈钢的表面疲劳裂纹进行了试验研究,着重分析了热对涡流信号的影响。涡流检测在碳纤维增强复合材料的无损检测方面也得到了研究应用^[16]。

1.6 声发射检测

声发射检测技术(acoustic emission technology, AE)也称应力波发射,是指当材料在受到外力或内力作用而产生塑性变形、裂纹和相变时,以弹性波的形式释放出应变能的现象,称为声发射。借助声发射检测系统进行采集、记录、分析信

号并对声发射源的性质进行评定的技术称为声发射技术。声发射信号包括突发型和连续性两种,声发射信号的分析方法主要包括参数分析法和波形分析法。其检测原理如图6所示。

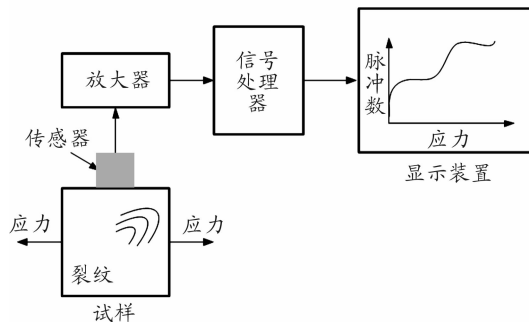


图6 声发射检测原理

声发射具有动态检测能力,其声源能量来自被监测构件的活性缺陷;对线性缺陷敏感以及对构件几何形状无要求等优点。因此,作为一种整体性检测技术,在轴承、压力容器等领域得到了广泛应用。

2 工业 CT

2.1 工业 CT 的概况

工业 CT (Industrial Computed Tomography), 亦称计算机层析成像技术、断层成像技术,是射线检测技术中一种崭新的无损检测技术,是一门融合计算机科学、放射学、传感器、图像处理等多门学科为一体的新型检测技术。基本原理为:由射线源提供 X 或 γ 等射线束对某一特定厚度的物体层面进行透射;由于不同密度的结构对射线具有不同的吸收率、透过率以及使射线产生衰减,在探测器的感光材料上出现与构件内部结构或缺陷相对应的电信号,根据相应的转换形成图像信号;最后根据图像处理技术,分析构件的结构、组成等特性,如内部是否有缺陷及缺陷的种类、位置、体积大小等。

工业 CT 技术于 1917 年由 Randon, J 提出,1970 年左右开始在不损检测领域大量应用。因其具有不受目标周围细节特征遮挡,可直接获得目标的空间位置、形状、尺寸大小等信息,以及突出的密度分辨能力和数字化的结果显示等特点;被称为材料内部微观结构状况的最佳无损检测手段,得到国内外大量研究与应用。随着科技的发展,CT 扫描的能量越来越大、分辨率越来越高、像素尺寸达微米甚至纳米数量级、扫描速率越来越快,使其在航空航天^[17]、工业管道^[18]、岩土工程^[19]等领域得到了广泛应用。

2.2 工业 CT 的应用

工业 CT 具有独特的“透视”结构件的能力,得到的数据可以提取构件三维轮廓^[20],用于对一些复杂结构件的尺寸测量,检测其加工精度等。文献[21]利用工业 CT 对大型复杂机匣进行扫描分析,解决了关键尺寸复合性分析和局部壁

厚测量等问题;文献[22]通过工业 CT 扫描飞机发动机叶片并进行成型与尺寸测量等,指导叶片的设计生产。

结合工业 CT 的三维成像能力、图像处理技术与算法,可以实现构件裂纹、缺陷等的重构及定性定量分析^[23]。文献[24]通过工业 CT 对高铁齿轮箱的材料缺陷进行扫描得到三维立体结构数据,结合相应的图像处理技术实现 4 种内部裂纹的自动识别,其最小分辨率达到 $5\mu\text{m}$ 。文献[25]通过工业 CT 的扫描成像实现材料内部裂纹的定性表征以及定量分析等。

工业 CT 其不破坏结构件进行内部损伤检测的能力,在军事方面亦具有较大的应用价值和前景。文献[26]利用工业 CT 对导弹战斗部进行无损检查,确保其发射安全;文献[27]利用工业 CT 对固体火箭发动机衬层与药柱脱落情况进行检测。文献[28]检测弹壁厚度与装药均匀性等。

3 工业 CT 在身管损伤检测中的应用探究

身管作为枪炮系统的重要零部件,其损伤决定着枪炮系统的作战效能及使用者的安全。因此对身管进行无损检测与损伤评估具有重要意义。目前,超声检测在身管内部裂纹检测方面得到研究^[29],利用机器视觉等新技术对身管内表面的磨损等表面缺陷进行检测^[30];但研究均还处于初级阶段,还需更加深入才能在身管领域得到较好应用。

3.1 无损检测方法在身管领域应用的可行性

身管的损伤形式主要为内膛的烧蚀磨损和沿径向的裂纹扩展,从无损检测的深度可知其损伤形式包含表面损伤和内部损伤。上述总结归纳的 6 种主要无损检测方法中:渗透检测只能用于表面损伤;磁粉检测与涡流检测主要用于表面和近表面的损伤检测;因此该 3 种方法不适于身管损伤检测中。超声检测主要用于内部检测,可以对身管的裂纹扩展情况进行检测,文献[29]进行了初步探索,但不同方向的裂纹对超声检测的扫描具有不用要求,因此超声检测存在操作复杂、检测裂纹不全面、不能实时检测等不足。

射线与声发射均能用于表面和内部缺陷的损伤检测。声发射检测主要用于裂纹的扩展情况监测,对身管内膛的烧蚀磨损情况还需要结合其他检测手段。且声发射检测结果还需结合其他方法进行局部分析。综上,结合射线检测中发展的工业 CT 技术能够全面反映身管烧蚀磨损和疲劳裂纹扩展量的优点,可采用工业 CT 进行相应的损伤检测。

3.2 工业 CT 在应变法中的应用思想

基于应变特征的身管健康监测是根据身管的烧蚀磨损和疲劳裂纹损伤导致的相同作用力下应变不同的物理性质,利用工业 CT 无损检测技术对构件的三维结构参数进行扫描、重建和测量以及探测结构内部的裂纹并对其扩展深度进行定量分析。通过对完好身管与不同损伤状况身管进行扫描,得到不同状况下的身管内径磨损量和最大裂纹扩展量。再将其与测得的身管外表面应变特征值建立联系,进行身管寿命预测模型的探索研究。使建立的模型与方法更加精确

完善,更准确地实时预测身管健康状况。

3.3 身管应变法试验

该实验中,试样为内径 32.00 mm 、壁厚 2.80 mm ,以线切割方式预制深 0.30 mm 、长 20 mm 裂纹的 45#钢制薄壁管,如图 7 所示。利用 MTS 实验平台,通过底座、试样、压杆形成一个密闭环境,在其中添加液压油进行疲劳试验。通过 MTS 循环加载使液压对预制裂纹与构件产生疲劳作用并使裂纹逐渐扩展至试样破裂。

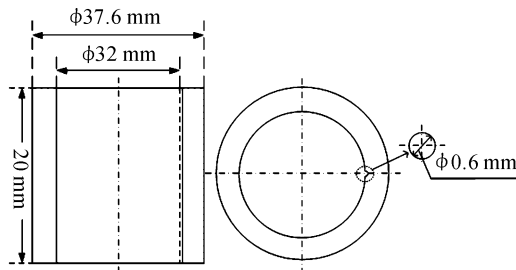


图 7 试样

3.4 试样的工业 CT 扫描

图 8 为利用工业 CT 对在循环应力幅为 -30.25 kN (即循环压力范围 $-55 \sim -5.5\text{ kN}$) 的加载情况下进行疲劳试验,疲劳次数为 8 000 次时的试样裂纹扩展状况扫描图。由图可知裂纹的扩展深度为 $366.1\ \mu\text{m}$ 。此时通过应变测量得到的试样裂纹外表面周向应变值为 $2\ 278\ \mu\text{e}$ 。因此,通过工业 CT 扫描可以很好地建立裂纹深度与对应外表面应变值的关系,更好地实现身管健康状况监测。

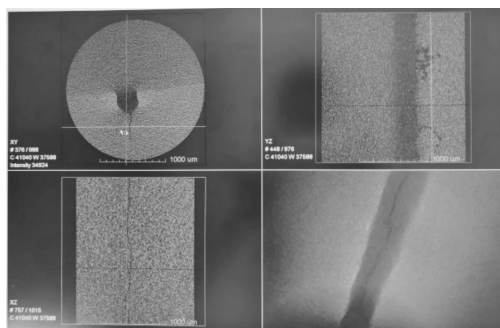


图 8 试样扫描图

4 结论

本文对当前无损检测的发展以及主要无损检测技术的基本原理、优缺点等进行了简要的总结归纳。针对身管在使用过程中各种损伤状况等,提出基于身管外表面应变特征的方法进行身管健康监测。为了更好地建立该方法的模型,提出利用工业 CT 对不同阶段的身管进行扫描与分析,得到相应的磨损量和裂纹扩展信息,进而更好地建立应变与结构损伤的关系,实现身管的实时健康监测。

参考文献:

- [1] 邬冠华,熊鸿建. 中国射线检测技术现状及研究进展[J]. 仪器仪表学报,2016,37(8):1683-1695.
- [2] PROUDHON H,BUFFIÈRE J Y,FOUVRY S. Characterisation of fretting fatigue damage using synchrotron X-ray micro-tomography[J]. Tribology International,2006,39(10):1106-1113.
- [3] 王悦悦,殷国涛,胡小小,等. 硬质合金/不锈钢激光焊焊接性分析[J]. 热加工工艺,2017(5):200-203.
- [4] 景艳红,杨福宝,李大全,等. MIM418 涡轮的射线检测及其缺陷分析(英文)[J]. 稀有金属材料与工程,2017,46(2):317-321.
- [5] 美国无损检测学会. 美国无损检测手册:2卷[M]. 世界图书出版公司,1996.
- [6] CHEN Xinya,CHEN Zhen. Research on the ultrasonic testing of defect for LY12 aluminum alloy based on transmission wave in lamb wave [J]. Journal of vibroengineering, 2017,19(3):1392-8716.
- [7] YOU R,YAO Y,SHI J. Tensor-based ultrasonic data analysis for defect detection in fiber reinforced polymer (FRP) composites[J]. Chemometrics & Intelligent Laboratory Systems,2017,163:24-30.
- [8] 陈友兴,刘藺慧,肖兆骞,等. 合金弹体内部缺陷超声检测的类型识别方法[J]. 固体火箭技术,2017(1):105-109.
- [9] 刘靖波. 17-4PH 不锈钢磁粉检测中出现的分析问题[J]. 无损检测,2012,34(5):20-24.
- [10] XU G,GUAN X,QIAO Y,et al. Analysis and Innovation for Penetrant Testing for Airplane Parts[C]//2014 asia-pacific international symposium on aerospace technology. [S. l.]: [s. n.],2014.
- [11] CZUCHRYJ J,IREK P. Evaluation of pore sizes in welded joints made in various constructional materials on the basis of penetrant testing by colour method[J]. Archives of Metallurgy & Materials,2017,62(1):19-25.
- [12] 乔海燕,任学冬,史亦韦,等. GH4169 高温合金涡轮盘表面径轴向裂纹的渗透检测可行性[J]. 航空材料学报,2016,36(6):92-96.
- [13] 张勇. 漏磁检测若干关键技术的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
- [14] ZHANG Qing, WU Xinjun, LI Jian. An analytical method for pulsed eddy current testing of the steel plate with a flat-bottom hole[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2016,52:339-345.
- [15] TETSUYA UCHIMOTOA,TOSHIYUKI TAKAGIA,WU Xiaoyang,et al. Changes in eddy current testing signals of fatigue cracks by heat processing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 52: 677-684.
- [16] CHENG Jun,QIU Jinhao,XU Xiaojuan,et al. Research advances in eddy current testing for maintenance of carbon fiber reinforced plastic composites[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016, 51: 261-284.
- [17] REDDY M V,LUKOSE S N,SUBRAMANIAN M P,et al. Industrial computed tomography system for aerospace applications:development and characterisation[J]. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2011, 53(53):307-311.
- [18] GUO J,ZENG L,LIU B. High-quality image reconstruction from exterior helical cone-beam CT data for NDE of industrial pipelines[J]. Insight:Non-Destructive Testing & Condition Monitoring,2011,53(10):534-541.
- [19] GHORBANI Y,BECKER M,PETERSEN J,et al. Use of X-ray computed tomography to investigate crack distribution and mineral dissemination in sphalerite ore particles[J]. Minerals Engineering,2011,24(12):1249-1257.
- [20] JIANG H,ZENG L,BI B,et al. An improved method of 3D contours extraction from industrial computed tomography volume data[J]. Optics & Laser Technology,2013,49(7):166-172.
- [21] 蒋绍青,栾传彬,满月娥,等. 工业 CT 在大型复杂机匣检测中的应用[J]. 无损检测,2017,39(2):18-21.
- [22] 王倩妮,苏宇航,郭广平. 基于工业 CT 图像的空心涡轮叶片壁厚测量法[J]. 无损检测,2015,37(6):29-32.
- [23] LI Z,ZENG L,ZOU X,et al. Crack surface extraction of industrial CT volume data using FPIT and planelet. [J]. Journal of X-ray science and technology,2011,19(1):1-12.
- [24] 艾铁博,王楠,阙红波,等. 工业 CT 的高铁齿轮箱体材料缺陷识别[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(10):45-49.
- [25] 杨少丹,宋克兴,张彦敏,等. 基于工业 CT 扫描的材料内部裂纹表征与分析[J]. 金属热处理,2017,42(2):211-215.
- [26] 常双君,董国庆. 无损检测在提高导弹战斗部发射安全性中的应用[J]. 四川兵工学报,2010,31(6):4-5.

6 结论

利用可靠性建模技术,建立了智能地雷可靠性模型。智能地雷可靠性建模是一个逐步完善的过程,随着对系统认识的不断加深,可靠性模型也应逐步细化改进。可靠性模型的建立为进一步的智能地雷可靠性设计、分析建立了基础。

参考文献:

[1] 张相炎. 兵器系统可靠性与维修性[M]. 北京:国防工业出版社,2016.

- [2] 郝玉生,梁宝生,武云鹏,等. 装甲火控可靠性建模[J]. 火力与指挥控制,2016,41(9):177-181.
- [3] 苗昊春,杨栓虎. 智能化弹药[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [4] 杨绍卿. 灵巧弹药工程[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [5] 孙传杰,钱立新,胡艳辉,等. 灵巧弹药发展概述[J]. 含能材料,2012,20(6):661-668.
- [6] 潘勇,黄进永,胡宁. 可靠性概论[M]. 北京:电子工业出版社,2015.

(责任编辑 周江川)

(上接第 52 页)

- [3] ROSSITER J E. Wind tunnel experiments of the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds[R]. Aeronautical Research Council, R&M3438,1964.
- [4] BILANINA J, COVERTE E. Estimation of possible excitation frequencies for shallow rectangular cavities [J]. AIAA Journal,1973,11(3):347-399.
- [5] 张楠,沈泓萃,姚惠之,等. 孔穴流激噪声的计算与验证研究[J]. 船舶力学,2008,12(5):799-805.
- [6] 张楠,沈泓萃,朱锡清,等. 三维孔腔流激噪声的大涡模拟与声学类比预报与验证研究[J]. 船舶力学,2010,14(1):181-190.

- [7] 何祚镛. 水流引起突出流线型柱腔共振的实验研究[J]. 哈尔滨船舶工程学院学报,1993,14(1):48-58.
- [8] 何祚镛. 结构振动与声辐射[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2001.
- [9] 朱习剑. 突出腔的激励振荡激励源[J]. 哈尔滨船舶工程学院学报,1994,15(1):26-36.
- [10] ROCKWELL D, NAUDASCHER E. Review: Self sustaining oscillations of flow past cavities [J]. Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME, 1978, 100 (2): 152-165.

(责任编辑 周江川)

(上接第 75 页)

- [27] 郑伟,邓安华,刘云峰,等. 固体火箭发动机衬层与药柱脱粘高能 X 射线检测技术[J]. 海军航空工程学院学报,2014,29(4):355-359.
- [28] GAO Yu-ling, CHEN Xing-quan, LIU Yan-ping, et al. Effect of warhead wall thickness on charge uniformity in industrial CT detection [J]. Journal of Measurement Science & Instrumentation, 2017.

- [29] 高望,张金,叶丽娜,等. 基于 L(0,2) 模态的身管损伤无损检测方法研究[J]. 声学技术,2015,34(5):407-412.
- [30] SHANMUGAMANI R, SADIQUE M, RAMAMOORTHY B. Detection and classification of surface defects of gun barrels using computer vision and machine learning [J]. Measurement, 2015, 60: 222-230.

(责任编辑 周江川)