

炸药部件无损检测综述

温茂萍 田勇 游开兴

(中国工程物理研究院化工材料研究所)

摘要 本文分析了无损检测在炸药部件质量及安全的可靠性保证中的重要作用,讨论了炸药部件无损检测的特殊性,综述了当前实用的炸药部件无损检测技术,同时探讨了国内外炸药部件无损检测技术的现状及其发展特征。

关键词 炸药部件 无损检测 可靠性

1 炸药部件无损检测的重要作用

炸药部件不论作为武器的主装药,还是用于其它爆炸装置,都是一次性作用的。各种缺陷(包括夹杂、气孔、疏松等)和密度分布不均匀性都不同程度地影响着炸药部件的使用性能(爆轰性能、安全性能、力学性能、贮存性能等等),显然,得知这些缺陷和密度的分布情况就成为必须。破坏性方法可以获知一些大缺陷和密度分布的信息,但这种方法只能是抽样统计的,无法保证产品质量100%可靠,而且必然带来巨大浪费,尤其是那些批量不大、结构复杂、价格昂贵的炸药部件,不可能用大量试件作破坏性检测和试验。因此,无损检测成为炸药部件安全和质量保证体系中十分重要的环节。

无损检测以不损害被检验对象的使用性能为前提,应用多种物理、化学现象,对各种炸药部件进行有效的检验、测试,从而获知材料或部件中缺陷的性质、形状、大小、位置、取向、分布等信息以及炸药部件的局部密度分布情况,进而对炸药部件的使用性能作出评价^[1,2]。它的作用首先表现为非破坏所带来的巨大的经济效益;其次是可根据需要作全样品的初始检验、各种后处理检验、最终产品检验和在役期质量监督,更好地保证产品的使用性能和可靠性,同时可避免不合格产品进入下一道工序所带来的浪费;其三是可通过检验产品质量,反映其生产工艺的合理性,为生产工艺的改进和完善提供依据;第四是可提高产品机械加工及其它后处理工序的安全性;另外还可有效利用带疵病材料,进一步提高材料利用率。正是因为无损检测技术的这些独特优越之处,使其在炸药部件的生产和安全、质量保证中不能缺少、不可替代。

美国核武器研究所 LLNL 和 LANL 均拥有先进而完整的包括炸药部件在内的专门无损检测手段。例如作为 LANL 重要设施之一的 TA-8 技术区 GT 场地即专门负责该所的非破坏检测任务,其主要的检测手段除了 X 射线照相(包括高能 X 射线和 γ 射线)、超声波探伤以外,还建有中子照相、放射性同位素技术、渗透检测和电磁脉冲方法等^[3]。这些技术在保证炸药部件的使用性能方面发挥着重大作用。

长期以来,炸药部件无损检测的研究工作一直以提高测量精确度和可靠性为中心任务,并为此不断研究开发和采用新的检测技术。早在七十年代末,为了更好地满足新的生产工艺需求,美国的 LLNL 和 LANL 就开始密切注视医用 CT 的发展,并在八十年代初即开始探讨工业 CT 用于炸药部件无损检测的可行性^[4]。以后的事实证明,炸药部件的无损检测成为目前工业 CT 的重要应用之一。近几年来,Martz^[5],Morris^[6]和 Perkins^[7]等人的研究表明,应用工业 CT 不仅可测出 $\varnothing 150\text{mm} \sim 200\text{mm}$ PBX-9502 和 LX-10-2 平面药柱中 $\varnothing 2\text{mm}$ 的夹杂物和 $\varnothing 3.5\text{mm}$ 的气孔,还可以测量药柱局部密度分布小于 0.1% 的变化,并且他们的研究工作正向不规则形状药柱(半球形和不等厚曲面药柱等)迅速推进。卓越性能、高昂价格工业 CT(约 150 万美元/台)的使用从另一个侧面充分说明了炸药部件无损检测的重要性。

2 炸药部件无损检测的特殊性

无损检测作为一门技术或学科的工业应用大约是从本世纪四、五十年代开始的,它最早乃至今日最主要的应用仍然是一般金属材料及其部件。但随着现代材料科学技术的突飞猛进,陶瓷材料、微电子集成电路、复合材料、含能材料与含能构件、核材料、特殊功能塑料等的无损检测已占有了相当重要的位置。但不管怎样,它们的发展沿革却都有着共同的断裂力学基础,而这一基础已可以用以评定材料或部件中缺陷的危险性,以及预测缺陷存在时材料或部件的安全使用性能^[8]。

尽管早期的炸药部件无损检测基本上沿袭了一般材料无损检测中的 X 射线照相和超声波探伤技术,但炸药部件的无损检测从一开始,其目的就不仅仅是为了研究一般构件中缺陷对其力学性能和寿命的影响并检验、指导和保证其生产过程中各工艺的合理性和安全;更重要的是:各种缺陷和局部密度分布对炸药部件起爆、传爆和爆轰性能的影响,而这种影响直接严重地关系着炸药部件使用的安全和性能。

显然无论从材料组成、材质结构、安全性,还是从使用性质、检测目标来比较,炸药这种特殊的非金属材料与一般的材料都是很不一样的^[9~11],这就决定了炸药部件的无损检测不能简单沿用一般材料无损检测的方法和标准,而必须充分考虑到炸药部件及其无损检测的特殊性:

2.1 炸药主要由碳、氢、氧、氮等低原子序数元素组成;炸药部件具有低的密度、小的导热率、强的声衰减、弱的 γ 和 X 射线衰减,是绝缘体。这些性质都与金属材料完全不同。因此电、磁等无损检测方法通常都不能应用,即使是 X 射线照相、超声波探伤方法在工艺和技术上也都必须加以改进。比如在 X 射线照相中使用的 X 射线能量相对比较低,超声波探伤则需有较低的频率和较强的发射功率等。

2.2 由于炸药部件的最终使用的是其传爆和爆轰性能,因此除了一般的无损检测判据(如缺陷和密度不均匀性对力学性能的影响)之外,缺陷(如缺陷影响炸药部件使用的安全性)和局部密度分布(直接影响使用的爆轰性能)对爆速等参量影响的判据更为重要。这决定了炸药部件的无损检测方法和检测标准与一般材料均有较大不同。

2.3 炸药部件的生产批量大小不等,且通常结构复杂、尺寸不一,加之某些特殊部件对检测精度具有很高的要求,因此要求检测技术和设备具有更高的先进性、较强的灵活性、较

大的检测范围和良好的分辨能力,实现的难度大。例如炸药部件局部密度的无损检测要求具有与破坏取样干湿密度方法相当的精度,而这是一般检测方法、仪器和装置所难以满足的。

2.4 炸药部件是一次性瞬间作用的,其使用性能需在很短的时间内安全准确地实现。它不同于一般材料作用的连续性、间断性、多次性以及作用周期长等特点,因此炸药部件检测要求有更高的可靠性。如要求对炸药部件尽可能实施100%的X射线照相和超声波探伤。

2.5 炸药是易燃、易爆、有毒的危险品,在检测方法和检测条件上必须排除任何不安全因素。因此除了对诸如射线照相采取常规的射线屏蔽之外,一般还要尽可能采用远距离操作并采取防爆措施。

3 炸药部件的无损检测技术

从国内目前各种炸药部件无损检测技术总的应用和研究情况来看,可将其分为常规和非常规两大类。常规的有X射线照相、超声波探伤等,非常规的包括 γ 射线局部密度检测、中子照相、微波检测、工业CT、声发射等;其它无损检测技术还有热成像技术、同位素示踪技术、快热中子活化与分析、 γ 射线共振吸收技术、核磁共振与核四极矩共振等^[2,11~13]。

X射线照相、超声波探伤两种常规无损检测技术的原理、适用范围、主要局限等在表1中作了概述^[1,2,14~16]。在美国,着色(表面探伤)、阴影成像(外形尺寸检验)等也作为炸药部件的常规无损检测手段^[7]。

γ 射线局部密度检测、中子照相、微波检测、工业CT、声发射等非常规无损检测技术综述于表2^[5,7,12~15,17~26]。

4 炸药部件无损检测技术的现状和发展特征

从世界范围来看,无损检测技术的发展大体经历了三个阶段。早期为无损探伤(NDI),第二阶段称为无损检测(NDT),第三阶段称为无损评价(NDE);其进一步的发展趋势是从一般无损评价发展到自动无损评价^[8]。

在国外一些发达国家,尤其是美国、前苏联和英、法等武器研制生产单位,其无损检测手段和仪器设备的先进性,一般都保持着领先的水平;炸药无损检测的发展已基本进入了以应用工业CT进行自动无损评价为代表的时期。目前的应用研究正逐渐深入地赋予向军备控制监查(武器装药是主要监查对象之一)和隐藏炸药探测方向发展的特征^[11,12,27,28]。

我国无损检测总的说来尚属于无损检测的前期阶段,我国火炸药行业的无损检测的状况也基本如此,有的地方仍然停留于无损探伤阶段。

相应于无损检测技术发展的几个阶段而言,炸药部件无损检测技术发展的主要推动力也经历了几次演变。在美、前苏联等国,现阶段的推动力主要来源于三方面:武器更加小型化、更高可靠性、军备控制、以及隐藏炸药的探测(向民用转移)。

炸药部件无损检测技术的现状和发展特征具体体现在如下几个方面:

(1) 现有方法进一步发展和成熟。X 射线照相最主要的发展特征是微焦点技术和实时成像技术; 超声波探伤则以检测智能化和可靠性为其主要特色; 同位素 γ 射线检测技术已用于炸药部件和火工品的无损检测多年, 该技术应用灵活、精度也较高; 中子照相目前已开始逐渐地使用同位素中子源铜-252^[25], 而中子管的研制也已在法、德等国取得重大进展^[21]。

表 1 炸药部件的常规无损检测技术及其发展

Table 1 The conventional techniques and their developments of explosive parts

方法	原 理	适用范围	主要局限	相关新方法和技术	发展趋势与特点	检测水平
超声波探伤(包括脉冲反射、透射法)	主要是通过测量信号往返于缺陷的渡越时间来确定缺陷和表面间的距离; 测量回波信号幅度和发射换能器的位置来确定缺陷的大小和方位。	分层、疏松、裂纹等。	要求缺陷取向与声束垂直; 要求工件形状比较简单; 检测粗晶炸药部件时, 信噪比很低。	横波法、表面波法、频谱分析、超声全息成像技术、超声显微镜技术、多通道技术、超声 C 等。	图象识别和频谱分析技术, 自动化与智能化, 宽频窄脉冲技术, 缺陷定性定量可靠性技术等。	一般可检出缺陷的最小尺寸为波长的一半, 特殊情况可达十六分之一波长。
X 射线照相	根据工件完好部位和缺陷部位对 X 射线吸收衰减程度的不同, 来检测出工件内缺陷的有无、种类、大小和分布情况。	气孔、夹杂、裂纹; 尤其适合于检测金属夹杂。	缺陷取向要求与射束平行; 不适合分层等缺陷; 要求工件形状比较简单, 成本较高。	微焦点 X 射线照相、X 射线实时成像技术、X 射线层析照相、X 射线背散射成像等。	计算机实时成像及处理、微缺陷检测技术、设备轻小型化、缺陷三维定位技术等。	密度对比度最好可达 1%; 空间分辨率达 50 线对/cm 以上。

表 2 炸药部件的非常规无损检测技术及其发展

Table 2 The unconventional techniques and their developments of explosive parts

方法	分 类	原理简介	用 途	目前国内水平	国外发展状况
γ 射线检测	γ 射线透射法(主要方法), γ 射线散射法	透射法: 依据 γ 射线被检测物体衰减前后光子数的变化规律; 散射法: 散射光子强度与样品密度、厚度的关系。	精确测定炸药部件的局部密度等。	透射法技术及应用可行性已充分证明, 实际应用尚受设备和实验室条件的限制, 散射法研究起步。	应用于药柱、火工品、炮弹检测多年。例如前苏联在线检测炸药部件密度的精度为 0.004g/cm ^[3] 。

续表 2

方法	分 类	原理简介	用 途	目前国内水平	国外发展状况
中子射线照相	同位素中子源, 加速器中子源, 反应堆中子源, 中子管源。	依据高低原子序数材料对中子射线的慢化能力和散射截面的显著差异。	主要用于火工品、子弹、炮弹等装药质量的无损探伤。	在火工品装药内部质量的检验上有少量研究, 但很少应用。原因是中子源太昂贵、中子射线防护比较困难。	在发达国家热中子照相较广泛应用, 主要用于火工品和炸药的无损探伤, 现逐渐多地使用铀-252中子源。
工业 CT	包括 X、 γ 、n 射线、工业 CT 等, 主要是透射式 X、 γ 射线工业 CT。	被测物相对射线源检测器旋转, 在 $0 \sim 180^\circ$ 范围足够多角度采集射线穿透物体某层面后的衰减信号, 并求解出方程组中相应的面元衰减系数, 重建出该层面衰减系数即密度分布图象。	优良的空间和对比度分辨率, 对检测物体内部质量进行综合评价。基本上不受检测物体形状限制。	第三代 ICT 新近研制成功, 使用了 γ 源, 密度、空间分辨率分别接近 1% 和毫米级, 性能尚需提高。八十年代开始利用医用 CT 作炸药及其部件的检测应用研究。	美国八十年代开始安装不同档次 ICT 开展炸药部件无损检测应用研究并已在 0.001 g/cm^3 密度分辨率的水平上生产应用。前苏联主要应用 CT 作炸药部件质量的精密检测研究。
微波检测	多采用毫米波	炸药材料对微波比较“透明”, 密度与微波在材料中的复介电常数直接相关。	对缺陷有较对密度变化更高的灵敏度。	有用于非金属材料无损评价的报道, 微波 CT 研制成功。有检测炸药密度的研究, 但精度待提高。	用于探测隐藏炸药(如地雷)以及较多其它应用。
声发射	声发射, 致声发射	当物体受外力或内应力作用时, 缺陷处或结构异常部位因应力集中而产生塑性变形释放弹性应力波。	缺陷的动态监视	正在研究推广中的新技术, 发展迅速。炸药的声发射检测几乎是空白。	美、日、欧洲一些国家已达工业应用阶段, 美已将其列入常规技术。前苏联也已用于研究炸药缺陷。

在我国 X 射线照相、超声波探伤等已开始缓慢向上述特征过渡, 如西南自动化研究所自行研制的 X 射线实时照相装置已具有国际较先进的水平。应用同位素 γ 射线技术检测炸药部件局部密度的研究工作在我所已开展多年, 目前这一工作的可行性已在与破坏

取样方法密度检测精度相当的水平上得到进一步论证,正向实际应用转化,在可行性实验中使用能量较低的 γ 射线源和固体探测器。中子照相仍依赖于反应堆,到目前为止,主要是开展了少量的利用中子照相检测火工品内部装药质量的研究工作;我院的一些研究表明^[12],在对雷管、导爆索、延时器和弹头装药的检查中,对炸药密度变化的相对灵敏度为 3~5%,而对通常的炸药间断缺陷的空间分辨可达 20 μm 甚至更小。

(2) 新方法、新技术不断出现和应用。但对炸药部件真正有着重大意义的新的检测方法无疑是工业 CT,它已经经过了十几年的飞速发展和完善,现已成长到第五代。其主要技术指标空间、密度分辨率最高已分别可达 2.5 μm 和 0.03%;不仅可用以检出很小的缺陷(性质、大小、位置等)和微小的局部密度变化,还能对物体的内外尺寸进行精确的检测,从而实现对物体的快速自动综合无损评价。LLNL 和 LANL 八十年代初已安装了数台不同档次的工业 CT,用于武器关键部件(包括炸药部件)的无损评价。从最新的文献来看^[17],LLNL 可能已和另外两家单位一起共同实施完成了一项分为三阶段的高能炸药(如 PBX-9502 等)工业 CT 综合评价计划(1990~1992 年),这三阶段分别是:第一阶段采用双能 CT 评价了小的 PBX-9502 药柱($\varnothing 1.27\text{cm}$),并研究提出了一种新的评价技术,即有效原子序数成象;第二阶段仍然是着重于工业 CT 评价炸药部件的一般性能,主要是通过检测 $\varnothing 15\text{cm}$ 药柱中的气孔和夹杂物等以检验 CT 的空间分辨能力以及通过检测含不同粘结剂组分的药柱来进一步检验工业 CT 的密度分辨能力和有效原子序数图象,并在这一阶段对一个外径 25cm 的半球形药柱作了初步扫描试验;第三阶段则是第二阶段半球形药柱试验的完成,并把半球形药柱尺寸扩展到 40cm 外径,其重点放在提高空间分辨率和密度分辨率上。美国 LANL 则在 1990 年左右就以水为检测对象,应用一台第四代工业 CT(美国 BIR 公司生产,该工业 CT 使用了 2304 个固体探测器阵列,其层扫描时间为 4s,象元尺寸为 0.234mm $\times$ 0.234mm $\times$ 10mm)在密度分辨率 $\leq 0.05\%$ 的水平上论证了工业 CT 应用于炸药无损评价的可行性^[6]。前苏联的情况与此类似,他们已在其一次成型炸药部件的研究性精密无损质量评价中应用工业 CT,比美国稍晚几年。同时美国、前苏联等国家也已在炮弹、固体火箭以及常规和非常规弹头的综合检测评价中广泛采用工业 CT 技术。

隐藏炸药探测技术和装置的研制开发可谓是近年来的热点,遗憾的是在已研究或正在研究的数十种方法中,似乎还不能对某种或某几种方法的联合作完全肯定的预测。但可以完全肯定的是,一旦取得突破性进展,其意义将是划时代的。目前看来,在众多的方法中,侧重研究的是共振方法、中子检测方法和空间分辨技术^[11,12]。

我国八十年代才有个别单位开始借用引进的医用 CT 作炸药部件及导弹装药的无损检测可行性研究和实验^[19]。在隐藏炸药探测技术的跟踪和应用开发上,我国有几家单位近年来也作了一些有益的探索,例如西安近代化学研究所侧重于核四极矩共振(NQR)技术方面,而我院则以快热中子分析(FTNA)技术为重点。另外,在炸药无损检测方面值得重视的新检测技术还有声发射方法、微波检测技术等。尤其是声发射技术,它无疑是研究炸药部件缺陷产生机理及其动力学行为的最有效手段。

(3) 提高无损检测可靠性的技术日益发展和重要^[14]。一方面是随着武器向小型化、更高可靠性方面的发展,对装药设计、成型工艺和产品质量的要求更加严格,从而要求作为

重要质量保证的无损检测具有更高的可靠性;另一方面,微电子技术、计算机及图象处理技术、检测自动化和智能化、微缺陷检测技术、综合分析评价技术等纷纷发展和应用提供了改善无损检测可靠性的基础。最典型的例子是,由于微电子学和计算机技术的发展以及信号处理和成象技术的普遍采用,超声检测的可靠性越来越高,已成为最普遍的无损检测技术^[8]。

我国在炸药部件的无损检测方面只是近几年才开始逐渐意识到各种无损检测方法之间的相互补充和联系以充分分析利用检测信息,从而实现对产品的综合无损检测。如已开始注意计算机技术的引入以期对检测结果作一些联机处理。但常规检测方法,仍然倾向于采用成本较高的X射线照相方法。值得强调的是,作为炸药部件无损检测可靠性评价基础的标准问题,在我国炸药行业应引起重视。

(4) 在各种缺陷对炸药部件的安全和传爆爆轰性能的危害程度方面的认识有所加深。热点起爆也可看作是理论上微缺陷对炸药传爆爆轰性能影响机制的揭示;在传爆中,裂纹的危害具有比较明显的“临界性”,比如 Menz^[29] 等人认为多点起爆器上的药线当出现 0.076mm 的断裂时仍能传爆,这一间隙的测定是采用中子照相方法获得的满意的检测结果;裂纹和微裂纹较之气孔、夹杂等立体形缺陷,有相对差的“自稳定性”,加之裂纹和微裂纹在成型、加工、存放过程中出现的几率大,检测时不容易发现等因素,因此一般认为“裂纹类”缺陷是最危险的。另外,在国内,由于新的装药设计和新的成型工艺的出现,对炸药部件密度分布的无损检测作用有了进一步的认识。

(5) 为适应不断出现的新的复杂结构炸药部件的无损检测,在仪器和工装设计上更加倾向于多用或通用型,在检测方式上则更多地采用了自动扫描方法;同时为适应一定规模生产的需要,许多国家实现了生产过程中的检验,尤其在美、俄等国家得到越来越多的应用。

参 考 文 献

- 1 石井勇五郎著,吴义等译. 无损检测学. 北京:机械工业出版社,1986.
- 2 张俊哲等. 无损检测技术及其应用. 北京:科学出版社,1993.
- 3 [美]托马斯·B·柯克兰等编著,黎源等译.《核武器手册》第三卷《美国核弹头生产设施概况》. 北京:原子能出版社,1991.
- 4 Kruger R P, et al. LA-UR-80-1277/GAR
- 5 Martz H E, et al. UCRL-ID-103318/GAR
- 6 Morris R A, et al. LA-UR-90-2988/GAR
- 7 Perkins H E, et al. DE-92013517/GAR
- 8 张家骏. 无损检测技术的发展及其对国民经济发展的影响. 无损检测, 1993(2).
- 9 董海山,周芬芬主编. 高能炸药及相关物性. 北京:科学出版社,1989.
- 10 Bulusu S N. Chemistry and Physics of Energetic Materials. Kluwer Academic Publishers, 1990.
- 11 Vomnopoulos G. International Conference Proceedings: Applications of Nuclear Techniques. Greece, June 1990.

- 12 Mcfee J E, Das Y. AD-A233 665/9/GAR, 1991.
- 13 Kaye S M, et al. Encyclopedia of Explosives and Related Items. Dover, New Jersey, 1980.
- 14 Hallai C, et al. Proc. 13th World Conference on NDT. Sao Paulo, 1992.
- 15 Zirnhelt J H. Proc. 12th World Conference on NDT. Amsterdam, 1989.
- 16 Halmshaw R, et al. A Review of Digital Radiological Methods. British Journal of NDT, 1990, 32 (1).
- 17 Drotning W D. DE88008633/GAR.
- 18 田勇等. 无损检测, 1993 (5), 129~130
- 19 王建民, 詹彩琴. CT 技术用于导弹发动机装药的无损检测. 无损检测, 1992 (6).
- 20 陈金根. CT 技术与无损检测. 无损检测, 1991, 13 (4).
- 21 袁振明. 我国声发射技术近期研究和应用的进展. 无损检测, 1991, 13 (10).
- 22 周在杞. 微波检测. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- 23 Yong T, et al. Proc. 7th Asia-Pacific Conference on NDT. Shanghai, China, 1993. 591~596
- 24 Mo Dawei, et al. Neutron Radiography Study in Tsinghua University, Neutron Radiography Proceedings of 1th World Conference, Paris, 6, 1986.
- 25 Whittemore W L. Neutron Radiography. Neutron News, 1990, 1 (3).
- 26 Zhao C D. A Study of Plane Wave Diffracted CT System and Measurement. IS-RANT, Beijing, 1989.
- 27 Rhodes E, et al. APSTING: Neutron Interrogation for Detection of Nuclear and CW Weapons, Explosives, and Drugs. DE92015183/GAR.
- 28 Caffrey A D, et al. IEEE Transaction on Nuclear Science, 1991, 39 (5): 1422~1426
- 29 Menz F L, et al. The Navy Injection-Molded Explosive (PBXC-303-1). Proc. 8th Symp. on Explosives and Pyrotechnics. 1974.

A REVIEW FOR NON-DESTRUCTIVE TESTING OF EXPLOSIVE PARTS

Wen Maoping Tian Yong You Kaixing
(Institute of Chemical Materials, CAEP)

ABSTRACT The important roles of non-destructive testing (NDT) in the quality and safety reliability for explosive parts as well as the speciality of NDT to explosive charges are discussed. The present status and future of NDT techniques utilization and development in the field of explosives inland and broad are reviewed.

KEY WORDS explosive parts, non-destructive test, reliability.