

机动式高能 X 射线照相系统在固体火箭发动机无损检测中的应用

贾庆龙,路廷镇,辛 健,王 冬

(中国人民解放军 96630 部队,北京 102206)

摘 要:机动式高能 X 射线照相系统通过对 9 MeV 电子直线加速器进行小型化设计,能够机动至贮存场所,实现了固体火箭发动机的靠前检测。开放工房防护条件较差,但可以利用地势或专门构筑屏蔽墙有效减小射线强度,同时采取距离防护,确保人员与环境的辐射安全。为保证变换场地后检测结果的质量与一致性,制定了配套的检测规范与质量控制措施。经过几年的使用,机动系统检测出了大量药柱气孔、界面脱粘、夹杂等缺陷,为分析贮存和使用过程的发动机质量,指导发动机设计、生产起到了重要作用。

关键词:机动式高能 X 射线照相系统;固体火箭发动机;开放工房;辐射防护;无损检测

中图分类号: TG115. 28, TB302. 5, V228

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)04-0068-04

Application of Mobile High Energy X-ray Radiography System in Solid Rocket Motor Nondestructive Testing

JIA Qing-long, LU Ting-zhen, XIN Jian, WANG Dong

(Chinese People's Liberation Army 96630 Unit, Beijing 102206, China)

Abstract: Mobile high-energy X-ray radiography system(MRG), which is a truck-carried miniaturized 9MeV electron linear accelerator, can move to solid rocket motors' storeroom. This makes it possible to do on the spot nondestructive testing for these large objects. The storerooms have almost no any radiation protection measures, so large distance from the source, geometric advantages or man-made protection walls are used to attenuate the high energy X-ray. Process and quality control principles have been made to ensure the coherence and quality of NDT in different places. A large number of grain voids, interfacial debonding, inclusions and other defects have been detected by this system after running several years. The NDT results have played important roles in judging the quality of SRM and guiding the SRM design and production.

Keywords: Mobile high energy X-ray radiography system; solid rocket motor (SRM); Common factory; Radioprotection; Nondestructive testing

在固体火箭发动机使用过程中,对发动机装药燃烧室定期进行性能检测,对于掌握发动机性能并视情维修具有重要意义。高能 X 射线照相是发动机性能检测与评价的有效手段之一,尤其机动式高能 X 射线照相系统,能够方便地运输至发动机贮存场所展开检测,避免了长途运输对发动机的不利影响,大大提升了多样环境下的固体发动机保障能力。

高能 X 射线能量高、危害大,通常须依托于专用工房检测。对于分散、少量贮存的固体发动机,建设固定式专用工房和高能检测设备,耗资巨大、利用率低;或将发动机长途运输至集中地点检测,安全性以及长途运输对发动机的影响不确定,也不可取。

所以,集射线源、控制系统、胶片处理于一体的机动式高能 X 射线照相系统(简称机动系统),能够机动到固体发动机贮存工房对发动机进行无损检测,较好的解决了这一难题。从机动系统的特点出发,因地制宜采取辐射防护措施,规范检测流程与质量控制措施,保证了机动系统的辐射安全与检测

收稿日期:2013-06-06

作者简介:贾庆龙(1980—),男,工程师,主要从事无损检测与质量评判工作。

质量。

1 机动系统概述

机动系统为厢式货车结构,集成了 9 MeV 驻波电子直线加速器、X 射线机头运动机构及控制设备、胶片处理设备和辐射防护设备等。系统可机动至固体火箭发动机或其它大型工件的贮存厂房进行现场检测,解决了大型工件运输不方便的问题。其主要性能指标如下。

1.1 照相检测灵敏度

钢厚度 70~350 mm,达到 ASTM E142 标准中的 1-2T;钢厚度 80~350 mm,达到 ASTM E142 标准中的 1-1T。

1.2 加速器指标

(1) 电子能量:9 MeV。

(2) 辐射束的剂量率:在射线中心束方向上,距靶点 1 m 处 1 min 内累计剂量 30 Gy。

(3) 靶点直径:不大于 2 mm。

(4) 剂量稳定时间:从开机开始计时,剂量率达到设备标称值的 90%所用时间不大于 5 s。

(5) 照射野:可调矩形,水平及垂直方向角度调整范围 $0^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 。

(6) 加速器机头运动性能:X 射线机头平行于工件轴线方向运动范围大于 10 m,垂直运动范围为距地面 1~2.4 m,X 射线机头上下俯仰 $\pm 15^{\circ}$,水平旋转 $\pm 30^{\circ}$ 。

2 机动性设计

要使高能 X 射线检测系统具备良好的机动性,须在加速器小型化、性能稳定性、结构适应性等方面进行技术改进。

2.1 加速器小型化

机动系统通过采用全密封磁轴耦合驻波加速管和四端环流器结构实现了 X 射线照射头的小型化,并将高压脉冲调制器、电气控制柜、稳压电源等集成优化设计,大大缩小了体积。同时,采用分布式总线控制技术,将 X 射线装置及控制系统分别集成在通装货车底盘上,实现了高能加速器的车载机动。

2.2 加速器性能稳定性

为保证系统核心部件,如加速管、磁控管、波导系统等经过长途运输后的稳定性,对 X 射线机头采用了均衡全浮式减振技术,在 X 射线机头与托架之间非均布安装鼓形双向减振器。通过试验测试,X

射线机头设备的振动加速度明显小于无减振措施的振动加速度,起到了较好的减振效果,保证了长距离机动运输后加速器系统的性能稳定。

2.3 多样工件的适用性

为适用于不同型号固体火箭发动机的切向和径向照相,机动系统能够调节 X 射线机头位置和方向,完成 X 射线机头伸缩、垂直升降、水平旋转、俯仰以及整车移动等五个自由度的运动,满足各种工件和工况的射线检测要求。

3 辐射防护设计

3.1 开放工房高能 X 射线照相检测辐射危害分析

开放工房是指修建时没有考虑射线防护的一般性厂房,其承重墙体通常为 300~400 mm 厚混凝土墙,非承重墙为 200 mm 至 250 mm 厚砖墙,有大面积采光玻璃窗和通风设施。以加速器剂量率 30 Gy/min 计算(距靶 1 m 处),开放厂房周围 100 m 范围作为控制区域,控制区边界主束方向和非主束方向剂量率分别为 1.8×10^5 , 180 $\mu\text{Gy/h}$,是 GB Z117—2006《工业 X 射线探伤放射卫生防护标准》规定控制区边界值的 12 000 倍和 12 倍,因此开放工房的辐射防护条件远不能满足辐射防护要求,必须采取防护手段,减小工房外的射线剂量率。

3.2 辐射防护方法

要在开放工房进行高能 X 射线照相,可采取屏蔽防护与距离防护相结合的方法,主要表现在:

(1) 借助地理环境,尽量让射线主束正对厚度很大的天然屏蔽体(如山体、土堆等),如果没有可采用移动防护器材或修建防护墙进行防护;

(2) 根据计算与实际测量结果,科学划分辐射控制区与监督区,采取必要的警戒措施,防止无关人员进入监督区;同时运用加速器远程控制功能,工作人员尽量远离射线源进行操作。

根据周围环境和厂房结构特点,开放工房可以分成两类,一是完全开放型,二是半开放型。

完全开放型场工房是指厂房周围均为开阔地,没有可利用的山体、建筑、低洼地。对于这种工房,射线主束方向应修建混凝土防护墙,非主束方向则以移动防护屏风为主,控制区边界尽量依托实体墙进行隔离,根据测量结果划定辐射监督区,加强人员警戒,工作期间不允许非工作人员进入监督区。如果加速器远程控制端距离加速器靶点小于 50 m,还应当采取混凝土防护顶棚或铅板屏蔽天空散射。图

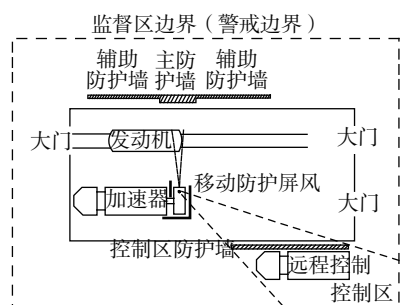


图1 完全开放型厂房辐射防护方案

1 为某开放型厂房的辐射防护方案。

半开放型厂房是指厂房周围一个或几个方向存在山体或可以大幅衰减射线的构筑物,它们几乎能够完全吸收来自主束的射线,因此无需修筑主防护墙与辅助防护墙。加速器远程控制端可利用建筑、地势等进行防护。半开放厂房示例如图2所示,主束方向和加速器西侧为山体;东侧和南侧地势开阔,采用移动屏风防护以减小监督区范围,远程控制端位于地平面下,坑深度为5 m,为减小天空散射,距离加速器靶点约80 m。

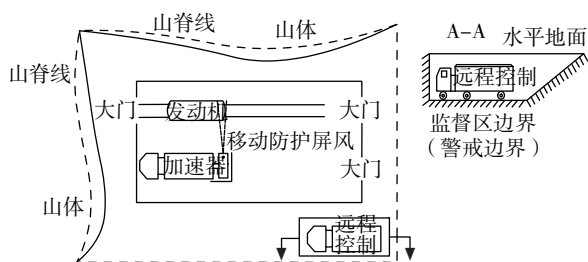


图2 半开放型辐射防护方案

4 检测流程与应用

4.1 检测流程

固体火箭发动机野外条件下的射线检测基本流程与固定厂房内的射线检测流程基本相似,只是前者的质量和安全控制因素复杂多变,要求更严格,如图3所示。机动检测系统到达开放厂房后,首先展开设备并对工件、设备、防护器材等进行布置和检查,划定辐射监督区和控制区,随后进行胶片准备和

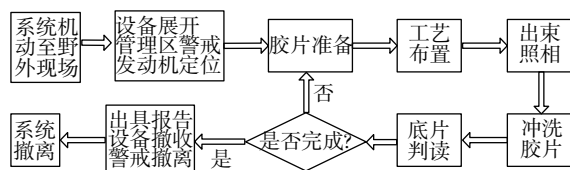


图3 固体火箭发动机机动式高能 X 射线照相检测流程

工艺布置,并对发动机各部位进行射线照相,最后评定底片,出具报告,撤收设备。

4.2 质量控制

机动系统成功解决了大型固体发动机靠前保障问题,但其质量控制要素相比固定式检测有很大变化,表1是固定式检测与机动式检测质量控制对比

表1 固定式检测与机动式检测质量控制对比

阶段	控制内容	固定式	机动式
检测准备	设备性能	性能基本稳定	设备长途机动,故障率较高
	耗材入厂检验	批次性验收	小批量验收,验收条件变化
	环境控制	温湿度变化有规律	检测地点气候差异大,环境一致性较差
检测操作	照相工艺参数	几何参数、剂量参数固定	几何参数、剂量参数、暗室环境变化
	辐射安全	专用射线检测工房,安全可靠	开放性工房,辐射安全控制因环境、人员变化
	评片环境	评片环境稳定	评片环境变化
后处理	评片人员	评片人员固定,结果一致性好	评片人员变化,结果一致性差

情况,可以看出机动式检测过程质量控制难度大,对检测人员、装备技术保障和工艺过程控制等都提出了较高要求^[1]。根据固定式与机动式射线照相检测的质量控制变化,总结既往经验,针对性提出以下质量控制方法:

(1) 制定质量控制规范,严格落实检测操作过程的自互检制度。

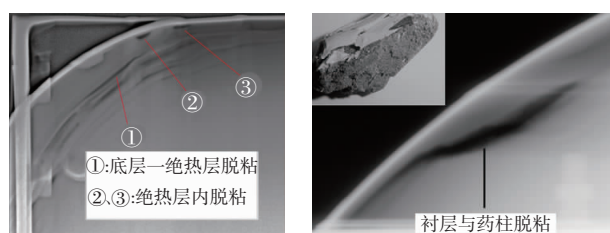
(2) 以控制显影液温度为重点,确保胶片处理条件的一致性。

(3) 建立装备照相性能验证制度,定期校验射线照相灵敏度。

(4) 严格执行辐射防护方案,确保检测过程辐射安全。

4.3 固体火箭发动机检测应用实例

机动系统应用于火箭发动机射线检测,发现了发动机内部大量的缺陷,包括药柱气孔、绝热层内分层、夹杂、药柱与衬层脱粘等,对判断发动机质量,指导发动机设计、生产都起到了很大作用。图4是由机动系统拍摄的发动机射线照相缺陷底片影像,及实物挖药情况^[2]。



(a) 绝热层脱粘 (b) 衬层与药柱脱粘

图 4 固体火箭发动机射线照相缺陷

经对大量发动机检测数据的统计分析,发现:

(1) 随着推进剂原料制作、预混、浇注工艺逐渐成熟,推进剂内部缺陷越来越少,以界面缺陷为主。

(2) 发动机贮存期间(15 年左右),内部缺陷基本没有变化,已有缺陷基本为生产过程产生的。

(3) 燃烧室人工脱粘层根部的位置对发动机的结构完整性影响很大,尤其对衬层与药柱的粘接界面。

(4) 发动机缺陷绝大多数为工艺性缺陷,极少为设计性缺陷。因此,通过无损检测手段改善生产工艺,优化结构设计是十分必要的。

发动机射线照相对于发现设计、生产问题,指导工艺改进都有重要作用。例如,检测发现某型号发动机靠近燃烧室后机口药柱截面普遍存在密集气孔,如图 5 所示。经分析认为,当推进剂立式浇注至最后阶段,在虚线 1 以上区域形成封闭区域,气体不易排除,而形成扁平密集气孔群。建议采用变速率浇注,浇注的最后阶段,确保燃烧室内真空度要求;另外,改进后机口绝热层设计,绝热层型面沿虚线 2 比较合理。再如,检测发现某型发动机前封头药柱内出现大面积的低密度影像,形状非常不规则,经挖药确认,发现是大量的片状衬层薄片。经分析,认为是喷涂发动机衬层料浆时,局部混入微小气孔群,当衬层处于半固化状态,燃烧室抽真空,发动机浇注,此时,混入气体的衬层膨胀鼓泡,以致气泡破裂落入

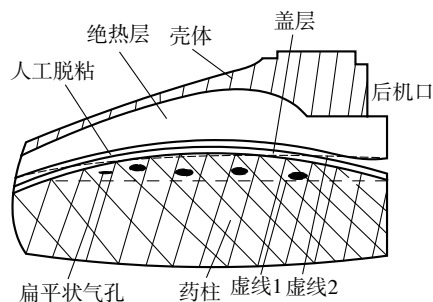


图 5 某型发动机后封头药柱密集气孔群

前封头。针对这一问题,需要完善衬层料浆混匀工艺并保证喷涂的真空度,同时加强对衬层半固化状态的量化控制研究^[3]。

5 结语

机动系统通过小型化设计实现了高能 X 射线照相设备的机动化,能够机动至发动机贮存场所对固体发动机进行射线照相检测。为确保辐射安全,检测中采取了地势防护、修建防护墙、搭建移动防护屏风和人员区域警戒等方法,打破了传统的高能 X 射线检测必须要修建专用检测工房的概念。对于机动检测而言,检测条件变化多样,必须严格落实质量的过程控制和关键环节的重点监管,才可以保证检测质量的一致性。总之,机动式固体发动机高能 X 射线照相为准确掌握贮存和使用中的发动机质量,为反馈发动机生产过程,指导发动机设计都起到了重要作用。

参考文献:

- [1] 刘富刚,尚玉沛,王丽,等. 固体火箭发动机高能 X 射线照相检测技术研究[J]. 无损探伤,2005,29(5):10-12.
- [2] CRISCUOLO E L, HOLLOWAY J A, POLANSKY D, et al. Radiography of large solid rocket propellant motors[C]// Symposium on Nondestructive Testing in the Missile Industry,1968.
- [3] 张玉娟,王召巴,杨亚军. 基于红外光谱的固体火箭推进剂包覆层半固化状态判定[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(6):103-108.



(上接第 22 页)

6 结论

发动机原位检测受检测对象、检测区域、检测空间及检测方法的综合影响,常因处理问题的不同而呈现出特殊性,针对某发动机高压涡轮叶片故障设计的涡流阵列探头、探头传送工装及分度定位摇转装置用于该发动机原位检测完全可行,相应制定的原位涡流检测流程可类似用于各种发动机叶片类的原位检测。

参考文献:

- [1] Paul McIntire. 美国无损检测手册[M]. 上海:世界图书出版公司,1996.