

固体发动机老化过程中材料缺陷无损检测方式

陈曼华 任宁莉

(第二炮兵装备研究院第三研究所,北京 100085)

文 摘 综述了无损检测固体发动机的研究现状及应用前景,并对现有的无损检测固体发动机方法,提出了技术改进的措施。

关键词 固体发动机,无损检测,材料缺陷,贮存环境

Manners of Non-Destructive Detecting Defects of Materials in Solid Rocket Motors Aging

Chen Manhua Ren Ningli

(The Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery, Beijing 100085)

Abstract The current situation and future prospect of non-destructive detecting defects of materials for solid rocket motors are discussed synthetically. Technical measures are proposed to improve current methods of non-destructive detecting defects of materials for solid rocket motors.

Key words Solid rocket motors, Non-Destructive detecting, Defects of materials, Storage condition

1 引言

固体导弹属于“长期贮存,一次使用”的武器,近几十年来,世界各地相继在固体导弹发射中发生过爆炸等由发动机装药老化引起的事故。我国在固体发动机研制和使用检修中也多次发现装药老化故障,在贮存中因老化而造成的性能衰变给导弹发射安全带来了巨大威胁。因此,固体发动机在贮存中材料缺陷检测倍受国内外固体发动机领域普遍关注,也是该领域研究的热点^[1~8]。本文针对固体发动机在贮存中材料缺陷检测问题,对目前的无损检测技术进行了对比和探讨。

2 固体发动机老化问题

固体发动机在长期贮存中要多次经历装卸、运输、存放、分解、再装、检修及维修等过程,受到各种振动、高低温变、湿度等环境因素作用,这些因素将加速固体发动机的老化,使其性能退化或失效。

固体发动机老化产生的裂纹和脱粘是导致固体火箭发射灾难性事故的主要原因。自20世纪80年代以来,美国大型固体火箭发射发生的5次事故中,其中4次为固体发动机装药老化所致。例如,美国大力神-34、大力神-4(K-11)于1986年4月18日及1993年8月2日发射军用卫星时,分别在点火后8.7和101s发动机壳体被烧穿,在244m、33.5km高空处爆炸,其主要原因为固体发动机绝热层脱粘。

在我国固体导弹装备时间较短,尚未发生严重事故,但发动机老化脱粘等问题已是不能回避的问题,越来越受到重视。

固体发动机燃烧室壳体与绝热层界面脱粘现象之一为发动机头尾部出现鼓包。通过对鼓包内抽取气体的气相色谱分析可知,其成分主要是发动机研制过程中残留的气体 and 推进剂老化生成的气体。另一方面,界面残留的微量气体在固化成型时膨胀,与

收稿日期:2005-12-17;修回日期:2006-03-30

作者简介:陈曼华,1964年出生,工程师,主要从事固体发动机的应用研究工作

较高硬度的壳体产生间隙。可以应用超声波或 X 射线等无损检测技术确定间隙缺陷的大小。

还有一种由界面污染形成的脱粘,界面缺陷非常细微,以至于仪器无法检测。在贮存中,各种应力作用可以使细微的缺陷扩大,在宏观上产生明显的界面脱粘。

3 国外研究现状

近年来,美国及英国等国在固体发动机应用方面相继开展了以无损检测为常用方法的材料缺陷跟踪与检测技术研究。对于固体发动机材料缺陷的无损检测,国外研究者的研究思路逐步从“间断不连续”检测走向了“实时连续”检测。

美国自 1959 年起就研究 X 射线切线照相法^[9],检测固体火箭发动机多界面粘接质量。20 世纪 60 年代,日本的丹羽登等人^[10]采用的超声波多次反射法为当时检验壳体—包复层脱粘的最有效方法。20 世纪 80 年代后,国外又发展了高能射线实时成像检测技术,并将其作为大型固体发动机整体检测的重要手段,部分取代经典的底片照相法。美国 L. J. Busse 等人^[9]采用超声成像技术检测 279 mm 的固体发动机壳体—衬层、衬层—推进剂脱粘以及内孔药柱的裂纹,但结果不够理想。之后, M. Shimizu 等人^[10]研究了扫描频率型超声探伤技术并应用于固体发动机界面脱粘检测。D. W. Wilson 等人^[11]用液晶热图法对复合材料中粘结层和层间缺陷进行检查研究,并成功地用于三种复合材料中的缺陷检测。

进入 20 世纪 90 年代以后,美国 J. L. ROSE 等人^[12]对超声探伤作了大量研究,从斜超声波或定向波比直波获得的信息,可以有效地判断复合材料中不同形式的缺陷。美国 Drexel 大学^[12]采用超声特征图像显示技术检测复合材料,经过扫描和计算机处理,可鉴别每个部位的缺陷。美国 TUFTS 大学材料实验室首次研制出荧光光纤传感器。弗吉尼亚电子工程部^[13]研制出光纤应变传感器,将光导纤维埋入复合构件中构成光纤网络系统,利用光时域反射技术检测复合构件应力和应变分布。

目前, Douglas W. Akers, Curtis A. Rideout 和 Scott J. Ritchie 等人^[14]研制成功了光子和中子射线检测技术,如图 1 所示。通过质子的生成和湮灭过程,可透过壳体,检测发动机燃烧室壳体内部结构缺

陷,可测材料的厚度分别为:铁为 50.8 mm,钛为 88.9 mm,铝为 101.6 mm。这种检测设备体积小,为便携式,适合于流动式检测,满足野外操作的需求。伦敦的 Jim Buswell 公司^[15]经过近 20 年的研究,以光纤为材料,成功地研制出了可植入发动机内的应变传感器,如图 2 所示。这种传感器体积小,灵敏度高,可实时定量地监测发动机内材料应力,进一步评估贮存可靠性及寿命。

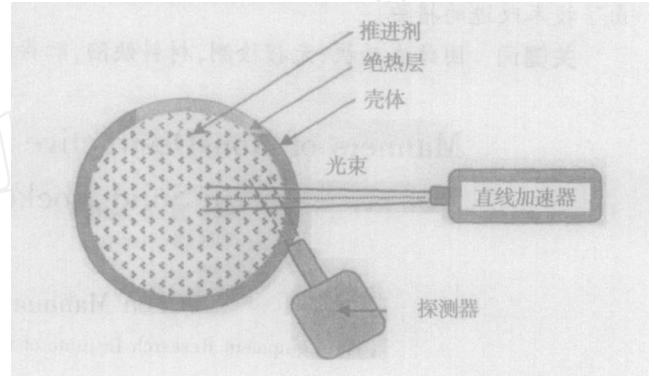


图 1 透过外层壳体检测缺陷

Fig 1 Defect detection through outer casing shell

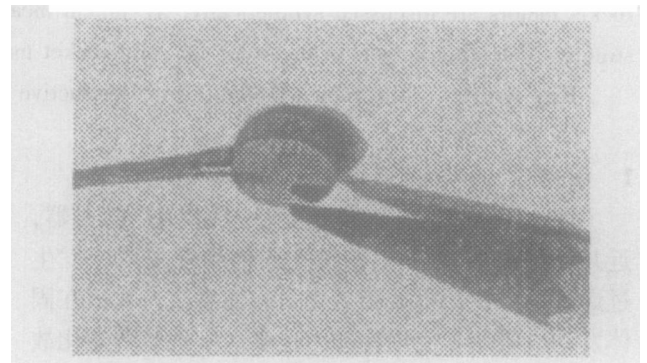


图 2 应变传感器

Fig 2 Strain sensor

4 国内研究现状

对于固体发动机贮存中由于老化而引起的材料缺陷问题,我国的无损检测研究起步较晚,主要为 20 世纪 90 年代以后的研究成果,且数量有限。

赵克熙^[16]利用一维 1/4 波长谐振原理改进的扫描频率超声探伤方法成功地对固体发动机衬层和推进剂之间界面脱粘进行了检验。刘富刚^[17-18]在研究固体发动机推进剂性能时采用了高能 X 射线技术,又对加速器切线照相技术进行了研究,探讨了检测中的黑度分布、射线散射等问题。石振铎^[19]研究了固体发动机射线检验工艺,并提出了提高检测

灵敏度的措施。阳建红^[20]采用声发射技术和 CT 识别技术研究了固体推进剂老化损伤特性。赵慧蓉^[21]采用超声纵波多次反射法对喷管金属壳体与非金属粘结界面的粘结质量进行检测,现已成功地用于产品的批量探伤。

这些研究工作在固体发动机材料缺陷检测方面起到了一定的作用,但在固体发动机检测应用范围、检测灵敏度和可操作性方面均有欠缺,所采用的装置和实验手段都仅仅是从一个角度分析了固体发动机老化中材料缺陷的有关参数,所以与实际材料老化情况存在差异。

5 固体发动机材料缺陷检测的展望

根据国内射线技术在固体发动机检测领域应用情况,固体发动机检测的过程应包括定性检测和定量检测。定性检测为固体发动机贮存中的整体“普查”,超声波和 X 射线检测为应用最广泛的方法。X 射线能量在 6 ~ 15 MeV,可穿透发动机多界面,特别是机动式检测系统的出现,使固体发动机现场检测、野外检测成为可能。为了更好地满足固体发动机机动和野外检测的需求,“普查”式射线检测装置在小型化、便携式方面还有很大的发展潜力。

定量检测主要针对超过贮存期或整体“普查”有问题发动机的检测,此时,提高固体发动机无损检测的灵敏度有利于固体发动机内的材料缺陷分析和研究。可应用 CT 技术,将材料任一界面的横截面信息以高分辨率的数字图像准确显示出来,判断材料缺陷的具体位置和大小。如果需要进一步提高检测灵敏度,还可以采用具有层析功能康普顿散射成像技术,检测固体发动机近表面区 0 ~ 15 mm 分层间隙的老化情况。中子射线技术对含氢物质(如水分)检测灵敏度高,易于检测固体发动机在长期贮存中受湿度影响的老化情况。声发射检测技术可以对发动机进行连续、动态、实时的检测,模拟固体发动机老化过程的细微变化,进一步研究固体发动机老化理论。

以光纤为材料,开发和研制可植入发动机内的应变传感器,代表着固体发动机检测的发展趋势,这种传感器体积小,灵敏度高,自动化程度高,通过对发动机内材料应力定量的监测,可实现固体发动机老化及寿命的实时检测。

参考文献

1 丘哲明. 固体火箭发动机材料与工艺. 北京: 宇航出版社, 2006年 第 6期

出版社, 1995: 239 ~ 262

- 2 侯林法. 复合固体推进剂. 北京: 宇航出版社, 1994
- 3 Williams M, L Jacobs H R. The study of crack criticality in solid rocket motors AD - 881994/8SL. 1971
- 4 San Miguel, Anthony, Duran E N. Temperature gradients and stress measurement in solid propellants, AD888017/1SL. 1971
- 5 Leighton, Russell A. Quick-look structural analysis techniques for solid rocket propellant grains AD - A119841/5, 1982
- 6 Malik, Dennis F. Storage reliability of missile materiel program, igniters and safe and arm device analysis AD - A026938/1sl
- 7 Andrews R J, Fröck B G et al Research on advanced NDE methods for aerospace structure AD - A182199
- 8 Smith, Harold B. Jr Krulac, Jr Irvin L. Storage reliability analysis summary report AD - A122054/0
- 9 戴祖明. 国外复合材料及其检测技术的发展. 推进技术, 1990; (6): 74 ~ 77
- 10 陈金根. 固体发动机无损检测新技术评述. 推进技术, 1992; (4): 76 ~ 81
- 11 Wilson D W. 用热图法检查复合材料中粘结层和层间缺陷. 固体火箭技术, 1991; (12): 96 ~ 101
- 12 赵克熙. 衬层—推进剂界面脱粘的超声谐振检验技术综述. 固体火箭技术, 1990; (4): 59 ~ 63
- 13 余宏发. 光纤传感器在固体发动机测试中的应用. 固体火箭技术, 1991; (4): 68 ~ 74
- 14 Akers D W, Rideout C A, Ritchie S J. Nondestructive aging and Cross-link density damage detection in solid rocket fuel propellant AIAA2005 - 4363
- 15 Herb Chelner, Jim Buswell, Dan Evans Embedded sensors for monitoring solid propellant grain AIAA2005 - 4362
- 16 赵克熙. 衬层. 推进剂界面脱粘的超声谐振检验技术综述. 固体火箭技术, 1990; (12): 59 ~ 62
- 17 刘富刚. 高能 X 射线对固体推进剂性能的影响. 固体火箭技术, 1990; (4): 100 ~ 106
- 18 刘富刚. 加速器切线照相技术研究. 固体火箭技术, 1992; (2): 94 ~ 99
- 19 石振铎. 固体发动机射线检验工艺探讨. 无损检测, 1996; 2(18): 47 ~ 49
- 20 阳建红. HTPB 复合固体推进剂损伤的实验和理论研究. 二炮工程学院博士论文, 1999
- 21 赵慧蓉. 固体火箭发动机喷管金属粘结界面的超声检测. 固体火箭技术, 2000; 2(23): 74 ~ 78

(编辑 吴坚)