

DOI: 10.11973/wsdc202001018

# 固体火箭发动机黏接壳体超声 C 扫描 检测系统研制与应用

王 飞<sup>1</sup>, 盛 涛<sup>2</sup>, 涂 俊<sup>1</sup>, 吴振成<sup>1</sup>

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 上海复合材料科技有限公司, 上海 201112)

**摘要:** 针对某固体火箭发动机燃烧室壳体与绝热层黏接质量批量化检测需求, 研制了自动化超声 C 扫描检测系统, 来代替传统的人工 A 扫描检测, 经对比试块工艺试验及实际产品的检测应用验证, 结果表明, 所研制系统的检测灵敏度和稳定性能够满足该类产品的批量化检测需求, 具有广泛的工程推广应用价值。

**关键词:** 黏接质量; 超声检测; C 扫描

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2020)01-0078-03

## Development and application of ultrasonic C-scan system for defect detection of the bonding interface between case and insulation of solid rocket motor

WANG Fei<sup>1</sup>, SHENG Tao<sup>2</sup>, TU Jun<sup>1</sup>, WU Zhencheng<sup>1</sup>

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Research Institute, Shanghai 201600, China;

2. Shanghai Composite Technology Co., Ltd., Shanghai 201112, China)

**Abstract:** In order to meet the batch detection requirements for interface defects between case and insulation of solid rocket motor (SRM), an automated ultrasonic C-scan system was developed to replace the traditional manual A-scan testing. The process test and practical application show that the sensitivity and stability of the developed system can meet the batch detection requirements of this kind of products, and it has extensive engineering application value.

**Key words:** bonding quality; ultrasonic testing; C-scan

某固体火箭发动机燃烧室采用壳体/绝热层/包覆层/推进剂的多界面结构形式, 其中绝热层采用玻璃纤维缠绕成型后与钢质旋压壳体胶接而成, 在胶接过程中, 若存在壳体内部多余物清理不干净、绝热层与壳体配合不严、胶层内部气体未排净等情况, 黏接层易产生脱黏缺陷, 尤其间隙型大面积脱黏缺陷对产品可靠性的危害极大, 该类缺陷的存在往往会引起推进剂的碎裂、燃面的急剧增加, 进而导致燃烧室压力失控、发动机壳体烧穿等情况, 严重时甚至会引起发动机爆炸等灾难性后果<sup>[1-2]</sup>。因此, 对发动机

燃烧室黏接界面进行质量控制和检测显得尤为重要。

## 1 试验对象及检测需求

文章所涉及的发动机燃烧室壳体为一个带有锥形过渡段的小直径柱体结构, 壳体小端直径约为 44 mm, 大端直径约为 72 mm, 大小直径端通过锥形段过渡, 固体火箭发动机燃烧室壳体与绝热层黏接结构示意如图 1 所示。

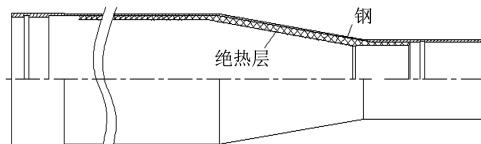


图 1 固体火箭发动机燃烧室壳体与绝热层黏接结构示意

上述产品在制造过程中, 在壳体与绝热层胶接

收稿日期: 2019-02-28

作者简介: 王 飞(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事无损检测技术研究与应用工作

通信作者: 王 飞, wf0420@163.com

结束后,需要对其胶接质量进行超声检测。目前,采用的检测方法为超声纵波多次反射法,其检测原理是当超声纵波垂直穿过钢壳体与绝热层黏接面时,由于两者的声阻抗不同,声波在界面处会产生反射和透射,若不考虑超声波在耦合剂及钢壳体中的声衰减,则在钢壳体与绝热层界面处产生的一次反射回波的声压  $P_1$  可简化为式(1)。

$$P_1 = P_0 T_{12} T_{21} R_{23} \quad (1)$$

$$R_{23} = \left| \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} \right| \quad (2)$$

式中:  $P_0$  为入射声波声压;  $T_{12}$ ,  $T_{21}$  为耦合剂与钢壳体界面的透射系数;  $R_{23}$  为钢壳体与黏接层界面的反射系数;  $Z_2$  为钢的声阻抗;  $Z_3$  为黏接层的声阻抗。

由式(1)可知,第  $n$  次反射回波声压只与反射系数  $R_{23}$  有关,即  $P_n \propto R_{23}^n$ 。当界面脱黏时,  $|R_{23}| \approx 1$ , 超声反射回波声压(对应回波信号幅值)随反射次数的增加下降缓慢;当界面黏接良好时,  $|R_{23}| < 1$ , 超声反射回波声压随反射次数的增加迅速下降<sup>[3]</sup>。这种差异在多次反射后可以明显区分,进而可实现壳体与绝热层界面黏接质量的检测。

## 2 检测系统设计及关键技术解决方案

### 2.1 超声 C 扫描系统的组成及主要工作流程

壳体/绝热层胶接质量的超声 C 扫描检测系统由  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴和  $r$  轴组成的 4 轴卧式系统。其中,硬件部分主要包括超声仪和探头、多轴运动控制和驱动模块、机械扫查模块(其中: $y$  轴和  $z$  轴用于检测前探头相对位置的调整,分别采用手动和气动控制调节方式; $x$  轴和  $r$  轴用于检测过程中探头与工件相对位置的运动控制,采用电机驱动调节方式)、探头夹持装置、工件夹持装置、工控机、机架主体、气源等;软件部分主要包括超声信号采集控制、机械运动控制、检测图像处理评估等程序。系统的主要检测流程为:① 通过软件界面设置超声检测及扫查参数;② 将壳体横向卧式放置于工件夹持装置上;③ 手动调节  $y$  轴、探头夹持装置气动驱动  $z$  轴,使探头下压于壳体正上方;④ 由多轴运动控制和驱动模块驱动工件夹持装置,带动壳体沿  $r$  轴  $360^\circ$  旋转,驱动  $y$  轴、 $z$  轴、探头夹持装置及探头所形成的组合体沿  $x$  轴(壳体轴向)移动,完成壳体的自动扫查检测。

### 2.2 系统关键技术解决方案

#### 2.2.1 探头耦合及密封设计

涉及的发动机燃烧室外部壳体材料为钢,为了

避免超声检测过程中耦合剂对钢壳体表面的腐蚀影响,超声 C 扫描检测系统设计时采用机油作为耦合剂。同时,为了确保探头与壳体表面耦合良好,在耦合方式上仍然采用直接接触法耦合,将探头耦合楔块加工成与壳体检测面贴合较好的弧形结构,并在楔块上加工多个注油孔,采用局部喷油浸润的耦合方式,从而保证探头与壳体有效接触和良好耦合。

与此同时,考虑到壳体与绝热层黏接界面的检测为过程工序检测,检测结束后绝热层内部还要进行包覆层及推进剂的装填,因此检测时不允许有机油渗漏到壳体内部。而该检测状态下,壳体为中空结构,且两端分别有约 50 mm 长的纯金属端,金属端周向分布有少量通孔或槽。针对上述问题,除机械扫查参数行程设置上有效避开两侧金属端检测区域外,同时在硬件上进行了以下优化设计:① 工件夹持装置采用顶针结构,顶针端采用非金属材料加工成圆锥状,在实现快速夹持、端部内撑密封的情况下不会对工件表面造成机械损伤;② 对金属端通孔或槽部位采用具有一定宽度的弹性橡胶密封圈包裹,可以有效防止部分剩余的耦合机油从开口的孔、槽部位渗入。

#### 2.2.2 不同直径端探头的自适应扫查设计

采用超声纵波多次反射法进行检测的过程中,要确保入射声束始终与待检黏接面垂直,对于文中涉及的燃烧室壳体检测,其机械扫查过程中需兼顾直径为 44,72 mm 的不同直径端以及中间锥形过渡段的探头声束入射方向的自适应调整问题。在对  $\phi 44\text{ mm}$ ,  $\phi 72\text{ mm}$  直径端检测时,探头始终位于壳体正上方,直径变化对声束垂直入射的影响较小,但考虑到工艺要求的最小可检脱黏缺陷直径为 5 mm,且在保证检测效果的同时又要降低大尺寸探头接触耦合及声束扩散带来的影响,最终选择直径为 3 mm 的小晶片探头进行检测。对于锥形过渡段的探头自适应问题,系统设计过程中,将探头夹持端设计成可上下运动以及楔块可以转动调节,检测过渡段时通过探头夹持装置的气动下压力确保探头与检测面始终贴合,同时利用探头夹持端的楔块自由转动以确保直筒和锥形段的有效过渡。

## 3 黏接壳体超声 C 扫描检测试验验证

### 3.1 对比试块的设计制作

为了进一步验证超声 C 扫描检测系统的检测灵敏度、机械扫查装置的稳定性,设计制作了对比试

块,并开展了检测工艺验证试验。其中,试块制作选用发动机燃烧室壳体与绝热层黏接工件实物,采用机械切割方式将壳体中间半个柱体切除后,再通过钻孔加工方式从绝热层加工不同孔径的平底孔,对比试块中平底孔的孔径及分布位置如表1所示,孔深为相应部位绝热层的厚度,从而确保所加工的平底孔的孔底部即为壳体与绝热层的黏接面。

表1 对比试块中平底孔的孔径及分布位置

位置	直筒段						锥形段			
孔径/mm	20	17	14	12.5	9.5	7	5	10	7	5

### 3.2 试验与应用验证

采用研制的超声C扫描检测系统对上述发动机燃烧室壳体/绝热层对比试块中人工缺陷进行检测,检测方法为纵波多次反射法,探头频率为10 MHz,扫查方式为切片扫查,切片扫查路径示意如图2所示,扫查间距和采样间距均为2 mm,C扫描成像方式为波幅高度成像。得到的检测结果如图3~5所示,其中图3为探头位于对比试块中人工缺陷部位时的A扫描信号波形,图4为探头位于黏接完好部位时的A扫描信号波形,图5为整体扫查结束后所得到的C扫描检测图像。

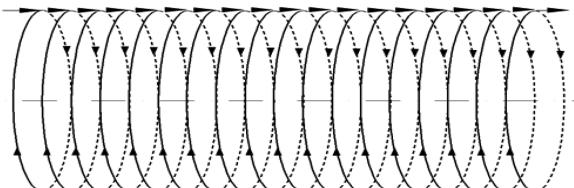


图2 切片扫查路径示意

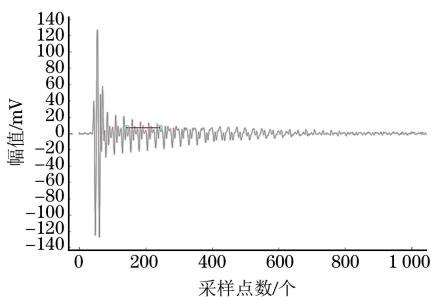


图3 对比试块中人工缺陷部位的A扫描信号波形

由图5可以看出,在上述检测工艺参数下,对比试块中位于直筒段和锥形过渡段的 $\phi 5\text{ mm}$ 及以上的人工缺陷均能够有效检出,检测灵敏度满足产品

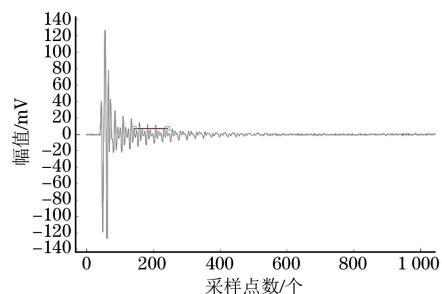


图4 对比试块中黏接完好部位的A扫描信号波形

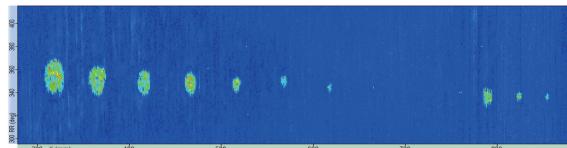


图5 对比试块的整体C扫描检测图像

验收技术条件的需求。利用检测软件中的图像处理评估功能,可实现缺陷面积测量,在降低人为因素影响的同时能够有效提高检测效率。此外,通过对不同批次的上百件产品的检测应用,验证了检测系统所采用的接触式喷油耦合、过渡段自适应扫查及端部密封设计合理,系统工作状态稳定,能满足实际产品的批量自动检测应用需求。

### 4 结语

针对某固体火箭发动机燃烧室壳体与绝热层黏接结构批量化的检测需求,研制了自动化超声C扫描检测系统,通过方案优化设计有效兼顾了壳体检测过程中的表面锈蚀与内腔渗油防护、壳体不同直径端及锥形过渡段的自适应检测问题,经对比试块工艺试验及工程应用验证,表明该系统检测灵敏度、稳定性均能够满足实际应用需求,对于类似发动机燃烧室壳体或管件产品结构的自动化超声检测具有极大的推广应用价值。

### 参考文献:

- [1] 艾春安,刘瑜,赵文才,等.固体火箭发动机结构粘接质量的声-超声检测[J].无损检测,2009,31(12):974-976.
- [2] 郭洪涛,曹付齐.固体火箭发动机装药界面胶接质量超声波检测[J].航空兵器,2006(6):49-52.
- [3] 赵慧蓉.固体火箭发动机喷管粘接界面的超声检测[J].固体火箭技术,2000,23(2):74-78.