

# 喷管台阶形壳体粘接面脱粘超声探伤研究

赵慧蓉

( 陕西非金属材料工艺研究所 西安 710025 )

赵克熙

( 中国航天科技集团四院 47 所 西安 710025 )

**文 摘** 研制了一种小角度超声纵波特种斜探头,用于台阶形金属/非金属异形复合构件粘接界面的检测,选择了探头材质,计算了入射倾角,建立了探伤方法及判伤标准,并在对比试块及实际产品上进行了检测,证明该探头及方法适用于该特定形状产品的探伤,并对类似异形产品的探伤有参考意义。

**关键词** 超声检测,无损探伤,探头,火箭发动机喷管,脱粘

## Study on Ultrasonic Detection of Adhesive Debonding for Nozzle Stepped Case

Zhao Huirong

( Shannxi Research Institute of Nonmetal Materials Technology Xi'an 710025 )

Zhao Kexi

( The 47th Institute of the Fourth Academy CASC Xi'an 710025 )

**Abstract** A special small-angle ultrasonic longitudinal wave probe was developed to detect the adhesive interface of profiled metal/ nonmetal composites components, and materials and incident angle of the probe are presented as well as the defect detection method and criteria. Practical detections were carried out on comparative blocks and products. Test results show that the probe and method are applicable to defect of the products with stepped cases and can be used as reference for other similar product detection.

**Key words** Ultrasonic detection, Nondestructive testing, Probe, Rocket nozzle, Debond

### 1 前言

固体火箭发动机喷管一般由多个零部件、多层结构组成。发动机工作时的高温高压使喷管温度变化剧烈,气流冲刷严重。因此喷管各部件各层之间粘接必须非常可靠。火箭发动机设计部门通常对喷管粘接界面的无损检测提出严格要求。

某固体火箭发动机其扩张段大口端,有一段是由金属件(加台阶形加固环)与非金属材料粘接的叠层结构,其外表面不规则,内外表面不平行,呈  $15.5^\circ$

夹角(见图 1)。这种特异复合形面给无损检测带来困难。如果用 X 光透射检验,光电吸收系数低,且产生强烈的康普顿散射,反映在底片上的影像衬度差;如采用常规的超声波检测,由于喷管非金属内表面不允许涂耦合剂,超声波必须从金属一侧入射。该区域的复杂形状导致入射波散射并产生杂乱回波,因此无法有效检出脱粘损伤。在金属与非金属粘接面检测的报道中,类似于此台阶形且内外不平行粘接面超声检测的报道未曾查到<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2001-08-26

赵慧蓉,1970 年出生,工程师,主要从事复合材料无损检测方法研究工作  
宇航材料工艺 2001 年 第 6 期

本研究研制了适用的探头,成功地将多次反射超声检测技术用于这种异形结构,并已在产品检测中得到应用。

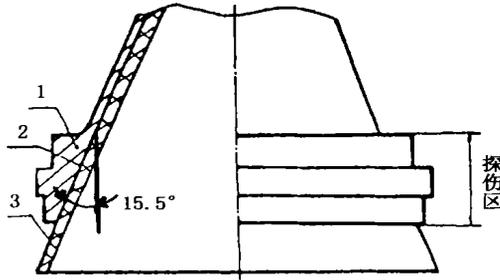


图1 喷管台阶壳体粘接面探伤部位

Fig.1 Detected section of a stepped nozzle case

1—台阶壳体;2—粘接面;3—绝热层。

## 2 探头材质的优选及入射角的确定

超声波是频率高于  $2 \times 10^4$  Hz 的弹性振动波,它的产生和传播的必要条件是有振源和传声介质。探头即作为振源向被探产品发射及接收超声波。

检测喷管台阶粘接面时,研制了特种探头,将超声波入射方向改变,这里采用了一个楔块垫入超声探头与被检材料之间,改变入射波路径,经过特定角度折射,减小散射,加强入射的主声束能量,使回波能够被仪器有规律的接收,这一角度可通过计算得出。同时应优选探头及楔块的材料,以期得到最佳检测结果。

入射角及探头、楔块材料选择的原则是:

(1) 探头晶片的直径和频率应适当,以减小声束扩散角,加强声束指向性,减小近场长度,加大有效声能,得到良好的综合检出性能;

(2) 超声波通过楔块以  $\theta$  角进入产品,在楔块与金属界面产生折射,为了保证产生规则回波,折射角  $\theta$  应为  $15.5^\circ$ ;

(3) 由于本检测技术以超声纵波为主,因此入射角的确定及楔块材料的选择应保证折射后的纵波能量远高于横波能量,以减少不必要的干扰,提高检测分辨率。

### 2.1 探头材质及频率的选择

探头核心元件是压电晶片,其性能的好坏,直接关系到探头质量。受产品复杂形状所限,只能采用

单探头收发工作状态,需保证探头在脉冲系统中容易触发且激励后要很快地恢复静止状态,对于低的电平信号要有高的灵敏度响应;喷管台阶壳体粘接区属复合构件,探伤采用多次回波法,探头要求有高的发射灵敏度和接收灵敏度,因此探头的压电晶片要求有高的压电接收系数,适当数值的压电发射系数和适当的机电耦合系数;特种探头有一定的入射角,在辐射面与压电晶片之间需添加一斜楔。楔块应选择声性能适宜、易加工的材料;探头频率的高低及晶片尺寸的大小对探伤也有较大的影响,波束的半扩散角为

$$\theta = \arcsin 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

式中:  $\lambda$ —波长;  $D$ —晶片直径。

表1 计算出了不同晶片直径及频率时波束半扩散角的值(钢中纵波)。

表1 晶片直径及频率与波束半扩散角的值

Tab.1 Diameter and frequency of piezoelectric crystal plate and spread half-angle of beam

晶片直径 /mm	频率 /MHz	$\theta$ / (°)
20	1	21
20	2.5	8
14	2.5	12
12	2.5	14
20	5	4
14	5	5.5
12	5	6.5
10	10	4

由表1 可看出,当采用较高的频率及较大的晶片直径时,声束扩散角减小,声束指向性加强、分辨率高,这些试验是在钢材料中进行的,高频率有助于发现金属件内部小缺陷,针对台阶壳体粘接区,不是检测金属内部缺陷,探伤的目的是为了检测金属与非金属粘接情况,频率太高,近场区长度大、衰减大,但如果频率太低,则波束半扩散角增大,降低了声束指向性,通过理论分析和实验,确定的探头材料及其主要性能参数见表2、表3。

表2 探头材料

Tab.2 Materials of the probe

压电晶片材料	楔块材料	吸声材料	探头外壳材料	粘接剂	晶片直径尺寸/mm	晶片数目	探头频率/MHz
锆钛酸铅	有机玻璃	环氧树脂	不锈钢	环氧树脂	12	单晶	2.5
酸铅	玻璃	脂+钨粉	钢	树脂	14		

表3 压电晶片性能参数

Tab.3 Characteristics of the piezoelectric crystal plate

压电应变常数 $d_{33}$	压电电压常数 $g_{33}$	机电耦合系数 $K_t$	机械品质因素 $Q_m$	频率常数 /MHz mm	居里温度 /
374 $\times 10^{-12}$	2.50 $\times 10^{-2}$	0.5	75	1.90	350

## 2.2 入射角的计算

根据反射折射定律,推导出特种探头入射角的计算式:  $\sin \alpha / C_{L1} = \sin \beta / C_{L2}$ 。式中  $C_{L1}$  和  $C_{L2}$  分别为有机玻璃斜楔和钢中超声纵波传播的速度。  $C_{L1} = 2730 \text{ m/s}$ ,  $C_{L2} = 5900 \text{ m/s}$ , 带入上式, 当  $\alpha = 15.5^\circ$  时, 得出  $\beta = 7^\circ$ , 即探头入射角为  $7^\circ$ 。

入射波穿过有机玻璃/钢界面后, 文献[2]给出了入射角与超声纵波与横波能量的定量关系曲线(见图2)。图中L表示纵波, S表示横波。从图中可见:

(1) 存在一个临界角度, 约为  $27.1^\circ$ , 超过此角度, 折射波以横波为主, 在  $0 \sim 27.1^\circ$  之内, 以纵波为主。临界角也可通过计算得出:  $\alpha_c = \arcsin(C_{L1}/C_{L2}) = 27.1^\circ$ 。

(2) 当  $\alpha < 10^\circ$  时, 纵波能量  $\gg$  横波能量, 因此当楔块材料为有机玻璃, 入射角为  $7^\circ$  时, 能获得以纵波为主的较灵敏的检出结果。

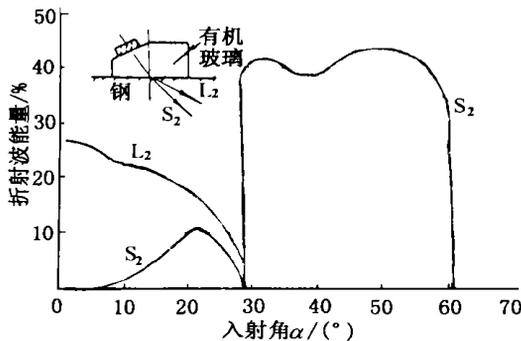


图2 有机玻璃/钢界面入射角与折射波能量的关系

Fig.2 Relation between energy of refracted wave and incidence at organicglass/ steel interface

依据所确定的探头材料、频率、晶片直径、入射角度, 将该超声波探头定名为小角度纵波特种斜探头, 现已成功地用于喷管台阶壳体粘接区的产品检测。

## 2.3 小角度纵波斜探头多次反射法检测信号幅度预估

超声波纵波穿过不同材料界面时, 声压反射率  $R$  计算式如下:

$$R = \left| \frac{P_r}{P_0} \right| = \left| \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0} \right|$$

式中,  $P_0$  和  $P_r$  分别为入射波声压和界面反射波声压。  $Z_0$  和  $Z_1$  分别为超声波通过界面前后介质的声阻抗。  $Z = C_L \rho$ , 即声阻抗取决于材料(介质)的密度及超声波在其中传播的速度。对钢材,  $Z(Z_0) = 46.6 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ; 对本文所用的非金属材料,  $Z(Z_1) = 3.63 \times 10^6 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ; 粘接界面脱粘形成的空间, 视为空气层, 对空气,  $Z(Z_1) = 447 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

界面良好粘接时

$$R_{\text{良}} = \left| \frac{(3.63 - 46.6) \times 10^6}{(3.63 + 46.6) \times 10^6} \right| = 0.86$$

此时的反射波声压占入射波声压的 86%, 透射波声压占 14%。

界面存在脱粘时

$$R_{\text{脱}} = \left| \frac{447 - 46.6 \times 10^6}{447 + 46.6 \times 10^6} \right| \approx 1$$

即超声波在脱粘界面几乎全部反射, 透射率为 0。

喷管的非金属材料与钢相比, 具有结构松散、密度低、组织不均匀的特点, 超声波在其中衰减比在钢中快的多, 在 2.5 MHz 频率下, 通过计算, 钢中的衰减系数小于 0.002 dB/mm, 而非金属达到 4 dB/mm。这样使得进入非金属中的透射波很快被衰减, 经过几次反射—透射的累积衰减, 则在良好粘接情况下, 最初的超声波能量将被吸收殆尽。而在脱粘情况下, 波在钢中能经过长时间传播, 还可接收到回波。

对于放大线性良好的超声波探伤仪, 仪器示波屏上波高与声压成正比, 即任意两波高之比等于相应的声压之比, 二者的分贝差为

$$= 20 \lg \frac{P_0 R_{\text{脱}}}{P_0 R_{\text{良}}} = 20 \lg \frac{R_{\text{脱}}}{R_{\text{良}}}$$

代入  $R_{\text{良}} = 0.86$ ,  $R_{\text{脱}} = 1$  得到

$$= 20 \lg \frac{1}{0.86} = 1 \text{ dB}$$

通过  $n$  次反射后,脱粘区与良好粘接区的分贝差为

$$n = 20 \lg \left( \frac{R_{\text{脱}}}{R_{\text{良}}} \right)^n$$

例如,当  $n = 10$  时,  $10 = 13 \text{ dB}$ ,即超声纵波经过 10 次反射后,脱粘区与良好粘接区的反射波幅相差 13 dB 以上。考虑到波在钢中传播也会造成能量损失,加之少量横波及散射等的能量损耗,在脱粘情况下  $R_{\text{脱}}$  会略小于 1,因此,以上估算值可能在 10 dB 左右。反映在仪器荧屏上,脱粘区比良好粘接区波幅增高,波次增多,据此可很容易地将脱粘区与良好粘接区分辨开来,进而评价粘接质量。

### 3 探伤工艺

探伤仪器采用 A 型脉冲反射式超声波探伤仪,其扫描速度的调节采用 BH—50 标准深度试块;探伤灵敏度的调节用对比试块。为保证探伤时的入射方向,分别设计了 14 mm × 14 mm 及 16 mm × 16 mm 定位块。除已有仪器及标准深度试块外,还必须模拟被检产品研制对比试块。

#### 3.1 对比试块的研制

实际产品中出现的自然缺陷形状各异,声学关系复杂,难以定量的研究,探伤只能借助于特定形状的人工反射体来调节灵敏度,作为尺度评价缺陷,并保证检验结果的再现,运用试块作为参考依据进行比较是超声波探伤的一个特点,因而试块研制也是超声波探伤发展的重要技术领域<sup>[3]</sup>。

为模拟喷管台阶壳体粘接区,对比试块研制如下:(1)金属件采用钢锻件,厚度与被检件相同,其上下表面呈 15.5° 夹角;(2)金属下表面粘贴与被检产品相似的非金属模压复合材料;(3)考虑到产品直径达 1 m 以上,被探区域相对于探头接触面可当作平面耦合处理;(4)试块粘接面预埋不同形状及面积的脱粘损伤;(5)含有系列脱粘伤的对比试块,根据设计的尺寸和形状,先在非金属件上加工到位,粘接前,金属件按产品粘接工艺流程进行喷砂处理,粘接用胶及工艺均按产品粘接要求进行。试块脱粘尺寸、形状及检测结果见表 4。从表 4 可见,试块中脱粘的最小检出率为 14 mm,则探伤灵敏度的调节以试块中 14 mm 脱粘为基准,其反射波在仪器荧屏上“6”格处波高达 20%。

表 4 对比试块预埋脱粘伤形状、尺寸及检测结果

Tab. 4 Shape, size of comparative blocks and their detection results

部位	仪器显示情况	备注
良好粘接区	反射波在示波屏“6”格以内	-
14 mm 单个 圆形脱粘区	反射波在示波屏“6”格处 波高达 20%	可发现
17 mm × 25 mm 单个 矩形脱粘区	反射波在示波屏“6”格处波 高达 30%,在“8”格处波 高达 10%	较易 发现
7 mm × 25 mm 对一个 台阶区为单块矩形脱粘, 但整体为贯通性脱粘区	反射波在示波屏“8”格处 波高达 20%,在“10”格处 波高达 5%以上	易发现
17 mm × 25 mm 对一个台阶 区为单块矩形脱粘,但整体 为上下贯通性脱粘区	反射波在示波屏“8”格处波 高达 30%以上,在“10”处 波高达 20%以上	易发现
25 mm × 25 mm 对一个台阶 区为单块矩形脱粘,但整体 为上下贯通性脱粘区	反射波在示波屏“8”格处 波高达 30%以上,在“10” 格处波高达 20%以上	易发现
10 mm 单个 圆形脱粘区	反射波在示波屏 “6”格处出现波	不能 发现

#### 3.2 脱粘损伤模式及判伤标准

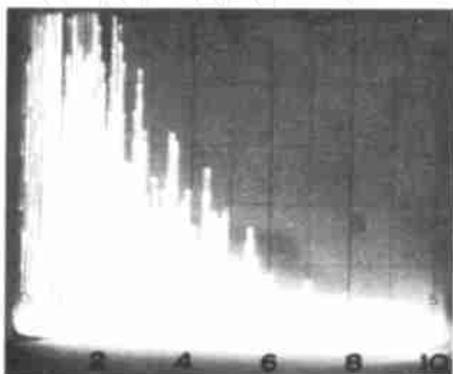
产品中存在的大面积贯通性脱粘多是由于工件清理不净、内衬与外壳配合不严及工件变形等原因造成,此类脱粘对产品的粘接强度影响较大,应极力避免。孔隙形小块脱粘多是由于固化不当、胶层内部气体未排净和脱粘剂失效等原因所致,此时其粘接强度也低于良好粘接强度<sup>[4]</sup>,喷管扩张段台阶壳体粘接区靠近扩张段大口端,气流冲刷严重,此处出现大面积贯通脱粘,将严重影响产品性能及可靠性,对产品粘接面进行检测,可使产品质量受控,有效保证产品工作的可靠性。因此,检测中重点放在对产品质量危害较大的贯通性脱粘,也应注意孔隙形小块脱粘。经理论分析,通过对比试块与实际产品的对照检测,确定出良好粘接、贯通性脱粘、孔隙形小块脱粘三种损伤模式对应的波形,如表 5 所示。本产品实际探伤中测得几处累计面积为 45.40 cm<sup>2</sup> 的脱粘伤,其波形均符合表 5 中第 4 种情况,与对比试块相应模拟脱粘波形一致,其中一处面积为 4 cm<sup>2</sup> 脱粘伤的示波屏显示见图 3(a)。检测出的良好粘接区反射波在示波屏“6”格以内,见图 3(b),为验证大面积贯通性脱粘,运用了空金属台阶壳体(未粘非金属,相当于整体贯通性脱粘),其波形符合表 5 中

第2种情况,见图3(c)。以上实际探伤,均在台阶区进行。

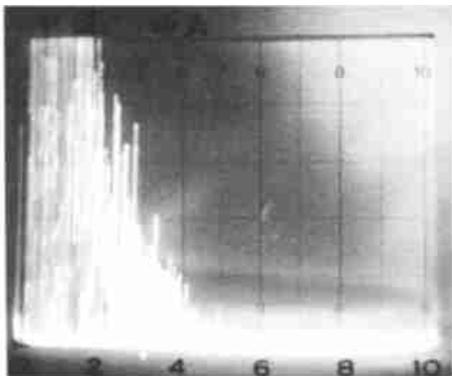
表5 判伤标准

Tab.5 Defect detection criteria

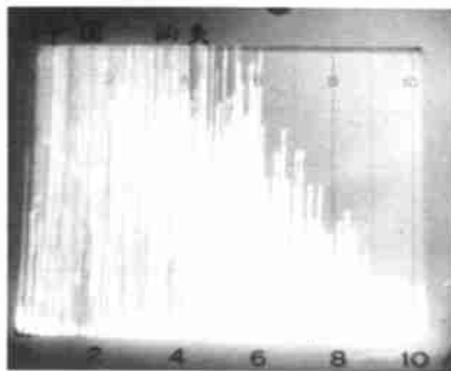
序号	模式	仪器对应波形
1	良好粘接区	反射波在示波屏“6”格以内
2	大面积整体贯通性脱粘	反射波在示波屏“8”格处波高达30%以上,在“10”格处波高达20%以上
3	小面积贯通性脱粘	反射波在示波屏“8”格处波高达20%,在“10”格处波高达5%以上
4	孔隙形小块脱粘	反射波在示波屏“6”格处波高达20%以上,在“8”格处出现波



(a) 产品脱粘区



(b) 产品良好粘接区



(c) 空金属壳体贯通性脱粘  
图3 产品检测的示波屏显示

Fig.3 Screen display of product detecting

#### 4 结论

利用常规仪器,通过深入的理论分析,研制运用特种探头的技术手段,将多次反射法用于异形金属/非金属复合粘接面的检测,解决了超声波喷管扩张段台阶壳体复合粘接区探伤的难题,可有效对台阶壳体粘接区进行检测,建立了探伤方法及判伤标准,可计算出脱粘面积,给出脱粘占总探伤面积的百分比,为喷管的检测及验收提供了依据,满足了设计要求,现已成功的用于产品检测。

本方法操作简便,良好粘接与脱粘示波屏显示差别明显,仪器设备便携,尤其适用于生产线上的现场检测及阵地的探伤。

#### 参考文献

- 1 周在杞. 固体火箭发动机无损检测技术进展述评. 国外固体火箭技术, 1985;(4):8
- 2 超声波探伤编写组. 超声波探伤技术及探伤仪. 北京:国防工业出版社,1983:201
- 3 克劳特克洛默J 著,李靖等译. 超声检测技术. 广东:广东科技出版社,1984:223
- 4 陈金根. 固体火箭发动机喷管复合结构胶接质量的声振检测. 见:全国无损检测新技术学术会议论文集,南京,1990:163