

发生器头部电子束焊缝熔深相控阵超声检测

赵 灿, 王建超, 张 健, 张 楠, 王永红
(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要:为了解决液体火箭发动机燃气发生器头部关键电子束焊缝熔深无法测量问题开展相控阵超声检测技术研究。基于发生器头部焊接结构特点阐述了熔深测量原理;建立了超声仿真模型,对带有矩形槽人工缺陷的模拟件进行检测试验,验证了模型建立的合理性和计算结果的有效性;通过仿真分析获得了不同频率相控阵探头在工件内部的横波声场信息,对探头频率进行了优选;根据不同焊接熔深下未焊透界面回波幅值随聚焦深度的变化规律及熔深测量结果,得到了聚焦深度的最佳取值范围;利用发生器头部模拟样件进行检测试验并与金相测量值对比,结果表明,对于焊接厚度约 11 mm 的焊缝,使用 10 MHz 线阵探头,聚焦深度设置为 8 mm 时,熔深测量误差小于 1 mm,满足工程定量需求。

关键词:相控阵超声;熔深测量;电子束焊缝;燃气发生器

中图分类号:TG115.28 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2022)05-0084-09

Phased array ultrasonic testing of electron beam weld penetration at generator head

ZHAO Can, WANG Jianchao, ZHANG Jian, ZHANG Nan, WANG Yonghong
(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to solve the problem of weld penetration measurement at the head of gas generator in liquid rocket engine, the phased array ultrasonic testing technology was studied. The principle of penetration measurement was described according to the welding structure characteristics of generator head. Through the inspection tests on the simulated parts with rectangular groove artificial defects, the rationality of the ultrasonic simulation model and the validity of the calculation results were verified. Transverse wave sound field information of phased array probes with different frequencies was obtained through simulation analysis, and the probe frequency was optimized. According to the variation of echo amplitude of incomplete penetration with the focus depth under different welding penetration depths and the measurement results, the optimal value range of the focus depth was obtained. The simulation specimen of the generator head was used for testing and compared with the metallographic measurements. The results show that for the weld thickness of about 11 mm, the measurement error of penetration is less than 1 mm compared with the metallographic value, when using 10 MHz linear phased array probe and focal depth is 8 mm, which meets the quantitative requirements of engineering.

Keywords: phased array ultrasonic; penetration measurement; electron beam welding; gas generator

0 引言

燃气发生器是液氧煤油火箭发动机产生燃气涡轮工质的组件,具有室压高、流量密度大、富氧燃烧等特点^[1-5]。其中发生器头部由外底部件与底部组件构成,二者通过电子束焊接方法连接,焊接厚度约11 mm,如图1所示。根据产品结构及实际工况分析可知,熔深不小于8 mm时,焊缝连接强度能够满足发动机工作要求。焊接过程中由于工艺参数控制不当、接头装配偏差等原因易产生未焊透缺陷或熔深不合格问题,使焊缝承载截面面积减少,降低焊接接头力学性能,可能造成煤油外泄漏影响发生器做功能力,严重时导致发动机工况无法满足额定工况要求。实际生产中曾发生过外底部件与底部组件在液压强度试验时沿电子束焊缝发生撕裂的质量问题。因此对焊缝熔深进行高精度测量,及时发现熔深不足问题,对保障发生器产品质量、保证发动机正常工作具有重要意义。

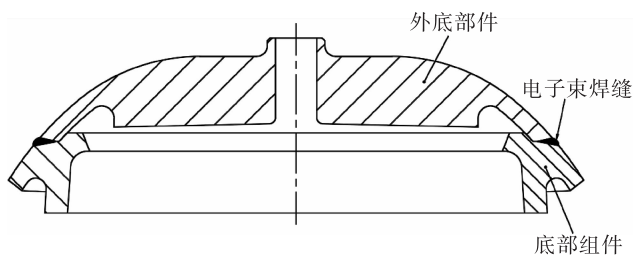


图1 发生器头部结构示意图

Fig.1 Structure diagram of generator head

根据发生器头部结构特点可以看出,此焊缝熔深测量为面积型缺陷检测问题,不宜使用X射线检测。利用工业CT检测时,焊缝中心位置切层的射线穿透厚度太大,检测灵敏度低、信噪比差,难以准确测量熔深;另外,CT检测效率低,成本昂贵。一些

学者采用超声检测技术实现了特定结构电子束焊缝熔深检测,如谢宝奎等用常规超声横波接触法对组合齿轮的轮盘与齿圈电子束焊缝熔深进行检测^[6],由于常规超声无法进行特定角度的声场聚焦,不适用于本文高精度定量需求。唐盛明等采用水浸超声C扫描技术实现了车辆发动机传动齿轮中电子束焊缝熔深的有效测量,超声检测值与缺陷实际尺寸误差不超过0.2 mm,考虑到发生器头部内腔结构复杂且封堵困难,不宜进行水浸检测^[7]。任俊波等利用超声扫描显微技术对核电站燃料元件中熔深800~1 000 μm 的钎合金电子束焊缝进行检测,测量精度达到 $\pm 30 \mu\text{m}$,由于检测频率较高,该方法仅适用于浅焊缝熔深(小于1 mm)的检测^[8]。相控阵超声技术能够在不移动或少移动探头的前提下实现大范围内高灵敏度的动态聚焦扫描,可有效解决某些空间限制和声束可达性问题^[9],因此本文采用相控阵超声方法开展发生器头部电子束焊缝熔深测量研究,为解决此类问题提供新途径。

1 熔深检测原理

相控阵超声技术是借鉴相控阵雷达技术的原理发展起来的^[10]。相控阵超声探头基于惠更斯原理设计,由多个相互独立的压电晶片组成阵列,按一定的规则和时序激发各个阵元,因各列波频率相同、相位差恒定,从而形成干涉。对各阵元的激发延时进行精确设定可实现波束聚焦、偏转等相控效果;在反射波接收过程中,采用同样的方法控制波束并进行信号合成,最后将合成结果以适当形式显示^[11-12]。

焊缝熔深相控阵超声检测主要基于脉冲反射原理,如图2所示。

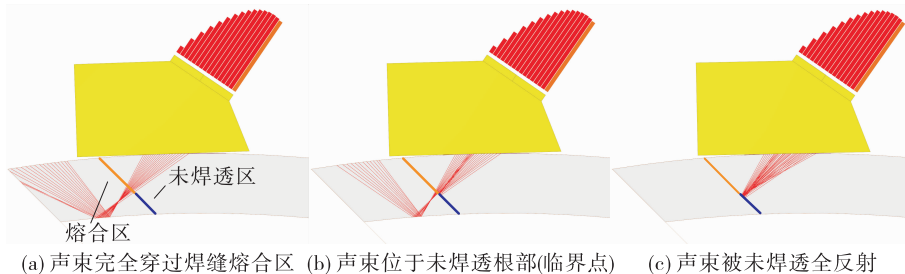


图2 不同探头位置的声线示意图

Fig.2 Schematic diagram of ultrasonic beam at different positions

通过设置合适的聚焦法则使声波入射至焊缝处,若外底部件与底部组件对接界面已熔合良好,则声波穿过焊缝继续传播,无回波信号;若界面未熔合,则声波被界面反射并被探头接收,因此熔深测量的关键是能否找到熔合与未熔合的交界处,即准确获得未焊透的边缘位置,其实质是缺陷测长问题。

根据外底部件的几何尺寸计算可知,熔深4.5~11 mm 范围内45°聚焦法则形成的一次横波声束与焊缝对接面法线夹角小于2°,即45°声束近似垂直于对接平面。因此可以通过测量45°声束位于焊缝根部熔合与未熔合交界处时的声程计算熔深。此外,考虑到外底部件曲率影响,需对测量值进行修正。具体方法为:垂直于焊缝方向移动探头找到45°声束的界面反射最高波,调节增益使波高达到80%,然后移动探头至界面波幅值降低至40%(-6 dB法),如图3所示。图3中蓝色区域为相控阵扇扫声场覆盖区,此时大于45°的声束可穿过熔合区,小于45°的声束在未焊透区发生反射,45°声束恰好位于临界点。读取回波声程SA值(式中简记 A_s),则焊缝实际熔深为 $h = (A_s - 0.8) \text{ mm}$ (0.8是修正系数)。

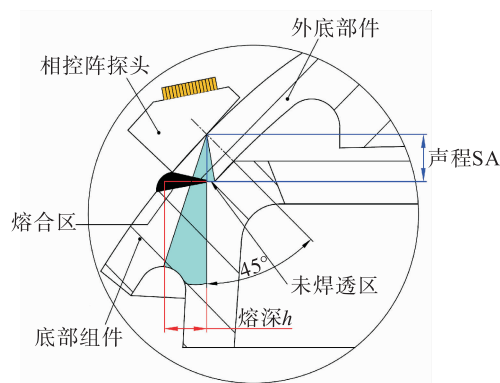


图3 熔深测量原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of weld penetration measurement

2 模型建立及验证

为了优化检测工艺和辅助超声信号分析采用CIVA软件进行仿真。CIVA是由法国原子能委员会研发的一款专业无损检测仿真软件,其主要由声场分析和缺陷响应2个模块组成,前者的计算模型是基于Pencil法修正的瑞利积分,后者主要采用基

于基尔霍夫(Kirchhoff)近似和伯恩(Born)近似等理论的半解析法^[13-14]。

2.1 模型参数

按照发生器头部实际几何尺寸建立仿真模型(见图4),材料属性为各向同性的单一介质,密度为 $7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,横波声速3 230 m/s。在外底部件焊缝对接面处设置一个1 mm×1 mm(宽×高)的矩形槽缺陷,缺陷中心位于熔深8 mm处。

超声设置方面,由于外底部件表面为球面,接触法检测时使用的平面楔块长度应尽可能小,以减少耦合不良造成的声能损失。同时为了匹配小尺寸楔块,探头阵元数量不宜太多。鉴于检测声程较小,本文选用16阵元线阵列探头,阵元间距0.6 mm,激发孔径9.52 mm,阵元宽度10 mm,脉冲激励为10 MHz高斯脉冲,-6 dB带宽60%。为保证一次波最大限度地扫查到焊缝根部,应选择短前沿楔块,使用55°横波楔块,前沿长度9.6 mm。聚焦类型为角度加深度聚焦,偏转角度45°,聚焦深度5 mm。

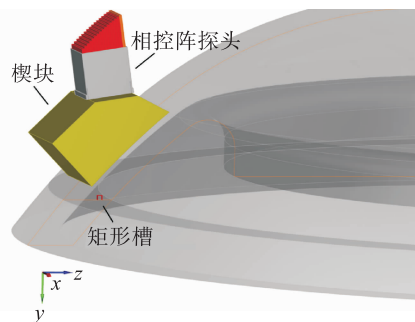


图4 发生器头部仿真模型

Fig.4 Simulation model of generator head

2.2 模型验证

试验所用仪器为Olympus MX2相控阵超声检测仪,探头为10 MHz的16阵元线阵探头,法则配置为角度扇形,角度范围30°~70°,步距0.5°,聚焦深度5 mm。制作了外底部件模拟件,并在与仿真模型相同位置加工了1 mm×1 mm(宽×高)的矩形槽。

仿真与试验结果如图5所示,可以看到矩形槽缺陷均能被有效检出。测量45°声束在缺陷回波最高位置的声程,仿真结果为7.1 mm,试验结果为6.9 mm。对比结果表明,仿真图像及测量结果与试验符合较好,证明了模型建立的合理性和计算结果的有效性。

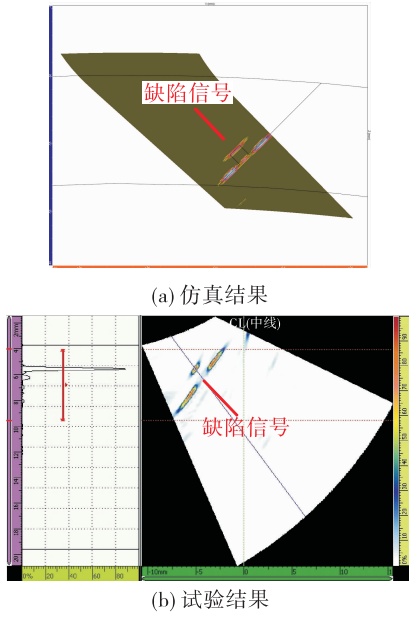


图5 仿真与试验结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation and testing results

3 仿真分析

为了提高测量精度,应将声束聚焦于焊缝对接面,并尽可能提高系统的横向分辨力。横向分辨力与超声波声束宽度成反比,声压降落值为 -6 dB 时的声束宽度 Φ 可按式(1)近似计算^[15-16]。

$$\Phi = \frac{1.03cF}{fD} \quad (1)$$

式中: c 为材料声速, m/s ; F 为聚焦深度, mm ; f 为探头频率, MHz ; D 为探头孔径, mm 。本文在材料声速 c 和探头孔径 D 一定的条件下,分析探头频率 f 和聚焦深度 F 对声场及检测结果的影响。

3.1 探头频率对声场的影响

选择常用的 5 MHz 和 10 MHz 探头进行仿真,探头阵元参数见 2.1 节。图 6 是聚焦深度 $F = 8$ mm 时 45° 横波的声场仿真图像,其中图 6(a) 和图 6(c) 是焦点位置 45° 声束轴线法线方向与从动轴方向的截面图;图 6(b) 和图 6(d) 是声束轴线方向与从动轴方向的截面图。可以看出一维线阵列的声束在主动轴偏转面聚焦明显,但其从动轴上不具备聚焦能力,因此线阵列相控阵探头声束在三维空间中呈蝶形^[17]。针对本文熔深测量需求,只需关注 45° 声束轴线法线方向的焦点宽度 L_w 的大小,对比可见 10 MHz 的焦点宽度更小,具有更好的聚焦效果。

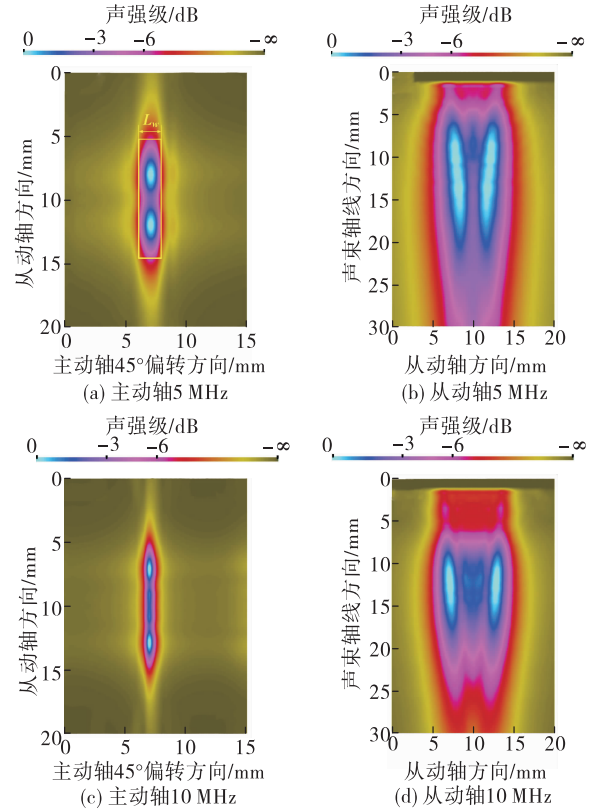
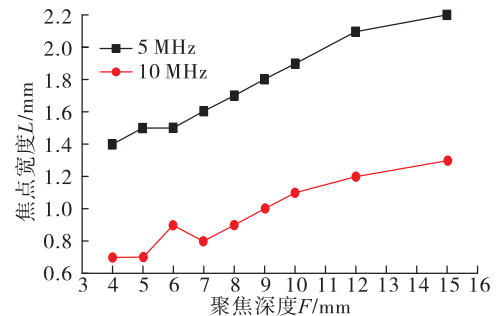
图6 不同频率下 45° 横波声场仿真图像Fig. 6 Simulation images of 45° S-wave sound field at different frequencies

图 7 给出了不同聚焦深度下 45° 声束的焦点宽度,可以看出随着焦距增加,焦点宽度逐渐增大。在聚焦深度 $4 \sim 15$ mm 范围内, 5 MHz 和 10 MHz 探头焦点宽度范围分别为 $1.4 \sim 2.2$ mm 和 $0.7 \sim 1.3$ mm。由上文分析可知,宜选用焦点更小的 10 MHz 探头进行熔深测量。

图7 不同频率探头在不同聚焦深度下的 45° 声束焦点宽度Fig. 7 Focal width of 45° sound beam at different focal depths of 5 MHz and 10 MHz probes

3.2 聚焦深度对熔深测量的影响

图 8 所示为 10 MHz 探头对熔深分别为 9.7 mm、7.7 mm 和 5.7 mm 焊缝在不同聚焦深度下的 B 扫描图像。可以看到聚焦深度影响根部未焊透的界面回波幅值,并且在 $F = 4$ mm 和 $F = 15$ mm 时 B 扫图像出现了明显的“拖尾”现象。这是由于聚焦深度影响焊接界面处的声场情况,当焦点落在焊接界面附近(如 $F = 6 \sim 10$ mm)时,声束能量集

中,回波能量高,具有较高的灵敏度和分辨力;当聚焦深度较小(如 $F = 4$ mm)时,声波在焊接界面前已经聚焦,到达焊接界面时会有一定程度的发散;当聚焦深度较大(如 $F = 15$ mm)时,焦点位于焊接界面下方,在焊接界面处还未形成聚焦声束。后两者声束在焊接界面呈散焦状态,造成检测灵敏度和分辨力均下降。

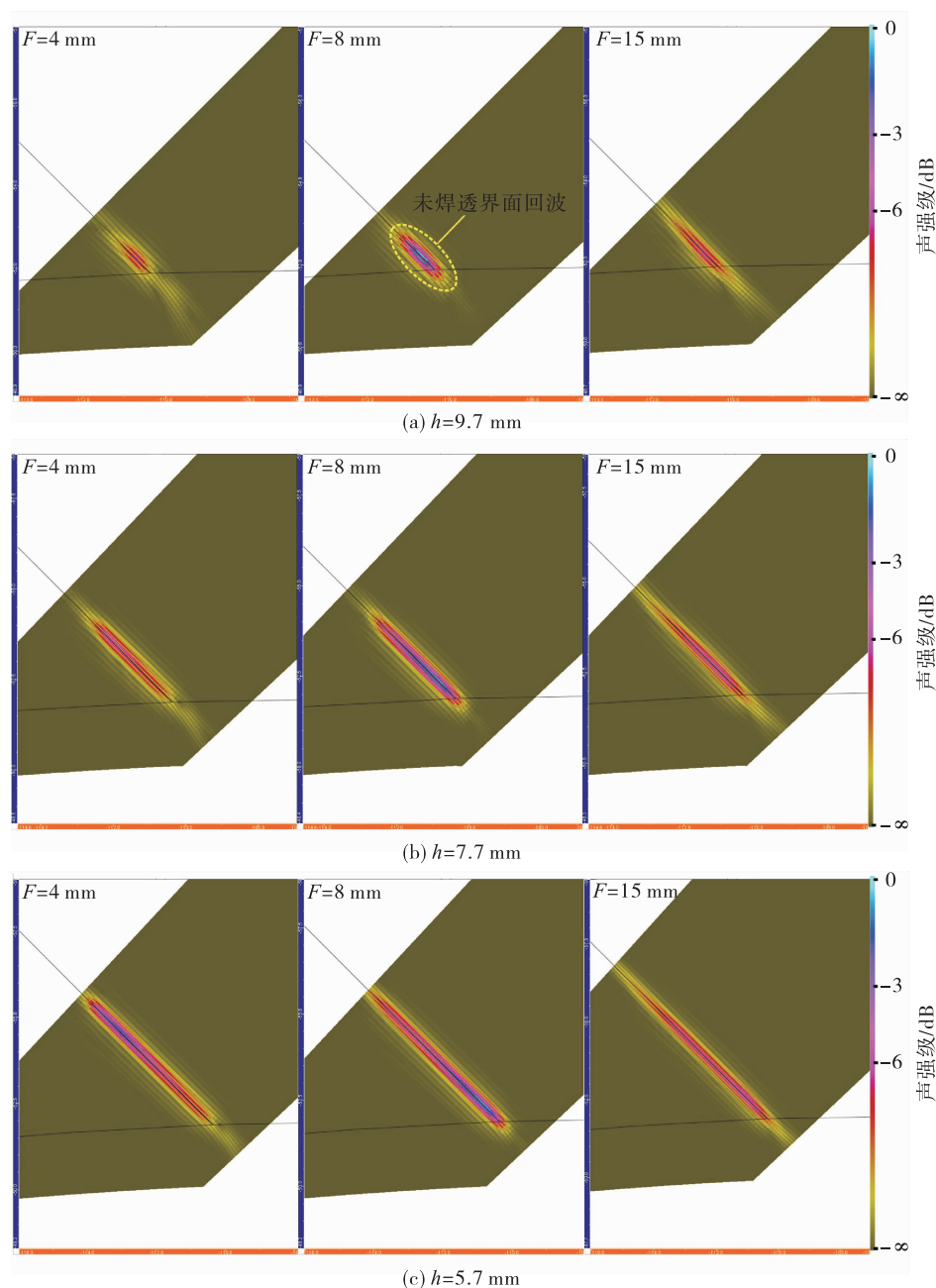


图 8 不同焊接熔深在不同聚焦深度下的 B 扫图像

Fig. 8 B-scan images of different weld penetration at different focal depths

图 9 给出了不同焊接熔深下未焊透界面回波幅值随聚焦深度的变化规律,在 $F=5 \sim 12$ mm 范围内回波归一化幅值波动小于 3 dB,可以较好地保证不同熔深检测灵敏度的一致性。

对不同焊接熔深进行仿真计算,统计在不同聚焦深度下超声测量值与模型预设值之间的测量误差,结果如表 1 所示。可以看到在 $F=4 \sim 15$ mm 范围内超声测量绝对误差小于 1 mm;当 $F>10$ mm 时,由于检测声程减小,对于较小熔深的测量误差较大。结合回波幅值变化规律,初步得出聚焦深度宜设置在 5 ~ 10 mm 范围内。

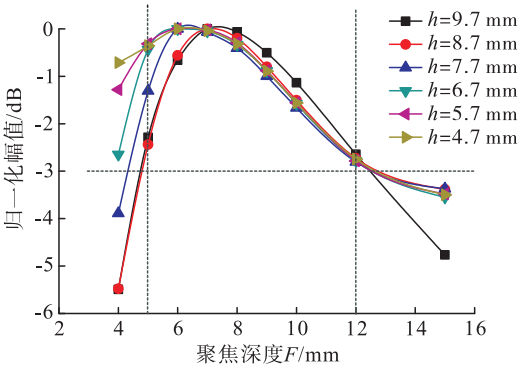


图 9 不同焊接熔深检测的归一化幅值
Fig.9 Normalized amplitude of different weld penetration detection

表 1 不同焊接熔深在不同聚焦深度下的仿真测量结果

Tab.1 Simulation measurement results of different weld penetrations under different focal depths 单位:mm												
聚焦深度	h=9.7		h=8.7		h=7.7		h=6.7		h=5.7		h=4.7	
	测量值	绝对误差	测量值	绝对误差	测量值	绝对误差	测量值	绝对误差	测量值	绝对误差	测量值	绝对误差
4	9.8	0.1	8.6	-0.1	7.5	-0.2	6.3	-0.4	5.4	-0.3	4.4	-0.3
5	9.7	0.0	8.5	-0.2	7.5	-0.2	6.5	-0.2	5.4	-0.3	4.4	-0.3
6	9.7	0.0	8.7	0.0	7.6	-0.1	6.5	-0.2	5.5	-0.2	4.5	-0.2
7	9.7	0.0	8.7	0.0	7.6	-0.1	6.6	-0.1	5.5	-0.2	4.5	-0.2
8	9.7	0.0	8.7	0.0	7.6	-0.1	6.6	-0.1	5.6	-0.1	4.5	-0.2
9	9.7	0.0	8.7	0.0	7.6	-0.1	6.6	-0.1	5.6	-0.1	4.5	-0.2
10	9.7	0.0	8.7	0.1	7.6	-0.1	6.6	-0.1	5.5	-0.2	4.8	0.1
12	9.5	-0.2	8.7	0.0	7.6	-0.1	6.5	-0.2	5.2	-0.5	4.1	-0.6
15	9.3	-0.5	8.8	0.1	7.5	-0.2	6.2	-0.5	5.0	-0.7	3.8	-0.9

4 焊缝熔深相控阵超声检测试验

设计制作了发生器头部 1:1 模拟样件(见图 10),通过控制电子束焊接电流得到 4 个不同的焊接熔深区域(1 ~ 4 区),利用模拟样件开展试验研究。

试验所用探头为 10 MHz 和 5 MHz 的 16 阵元线阵探头,探头阵元参数及楔块参数与 2.1 节设置相同。由于楔块前沿仍有一定长度,检测时探头垂直于焊缝方向移动的极限位置为楔块前沿紧贴焊缝余高边缘,结合工件结构可知,聚焦深度为 5 ~ 15 mm 时可以保证覆盖熔深 4.5 ~ 11 mm 的检测区域。

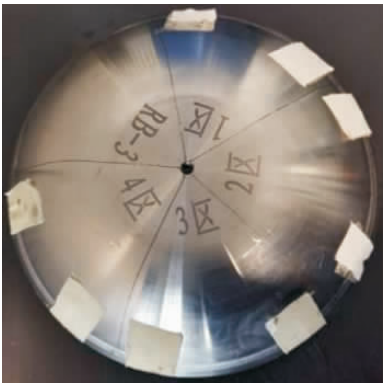


图 10 发生器头部模拟样件
Fig.10 Simulation specimen of generator head

图 11 和图 12 分别为 5 MHz 和 10 MHz 探头在

不同聚焦深度下对模拟样件 1 区的检测图像。从图 11(a) 扇扫图中可以看到焊缝根部未焊透的界面反射波和 45° 声束的 A 波图像, 界面波在探头偏转角度方向的宽度代表了未焊透界面的长度, 宽度越大, 未焊透界面越长, 则熔深越小。对比图 11(a) 和图 12(a) 可以看出, 10 MHz 得到的界面回波比 5 MHz 边缘更加清晰锐利, 更有利于提高熔深测量

精度。

对比图 11(a) ~ 图 11(d)、图 12(a) ~ 图 12(d) 可见, 5 MHz 和 10 MHz 探头在不同聚焦深度设置下均能检出根部未焊透, 随着聚焦深度增加, 界面波在探头偏转角度方向的宽度逐渐减小, 在 $F = 15$ mm 时界面波幅值明显降低并出现“拖尾”现象, 与仿真结果一致。

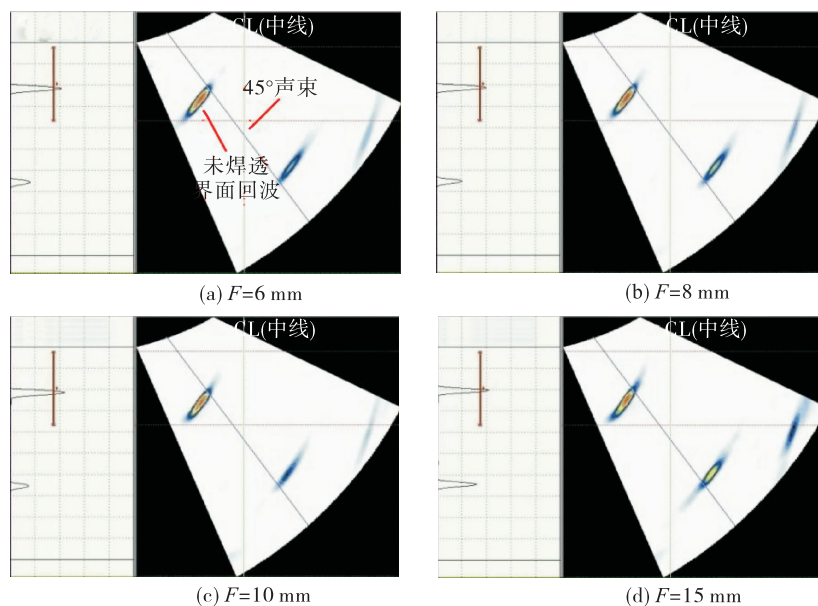


图 11 5 MHz 探头不同聚焦深度检测图像

Fig. 11 Detection images with different focal depths of 5 MHz probe

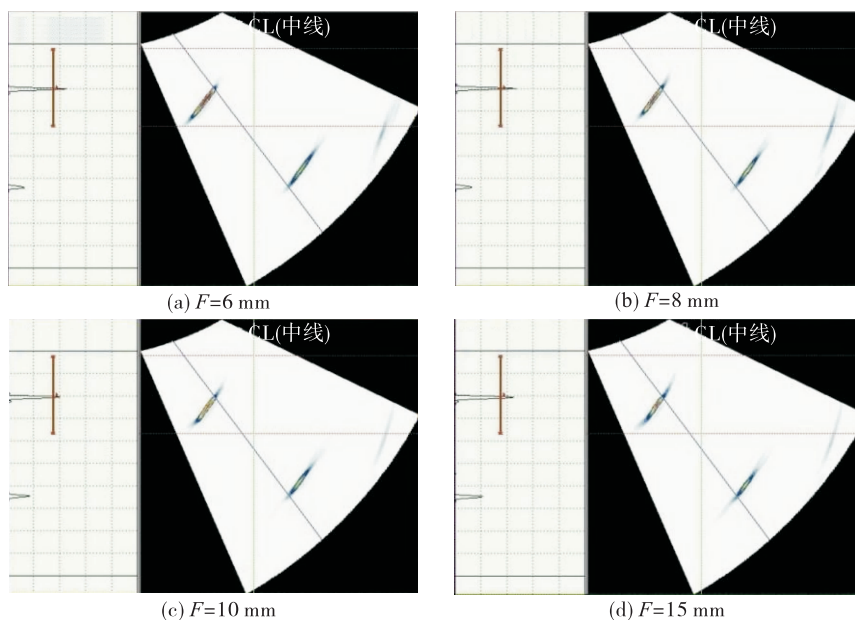


图 12 10 MHz 探头不同聚焦深度检测图像

Fig. 12 Detection images with different focal depths of 10 MHz probe

用 10 MHz 探头在不同聚焦深度下对模拟样件 1~4 区依次进行熔深测量。从模拟样件每个分区取样两处用金相法测量熔深,将两处熔深平均值作为该区熔深,焊缝不同熔深区宏观金相见图 13。1~4 区熔深金相测量值分别为 9.6 mm、8.8 mm、7.8 mm 和 6.9 mm,超声测量值与绝对误差依次如表 2 所示。对比可以看到,聚焦深度在 5~14 mm 范围时,超声测量绝对误差小于 1 mm,特别地,当 $6\text{ mm}\leq F\leq 9\text{ mm}$ 时,超声测量结果稳定且误差较小;随着聚焦深度增加,测量误差呈增大趋势;当 $F=15\text{ mm}$ 时,熔深 7.8 mm 和 6.9 mm 区域的测量误差大于 1 mm。结合扇扫波形和测量结果最终选择 $F=8\text{ mm}$ 作为实际检测时的聚焦深度。

采用试验确定的工艺参数累计完成了 120 余件发生器头部的熔深测量工作,并对部分不合格产品进行剖切,剖切样品金相测量结果与相控阵超声检测结果符合较好,从而验证了本文方法的可行性和准确性。

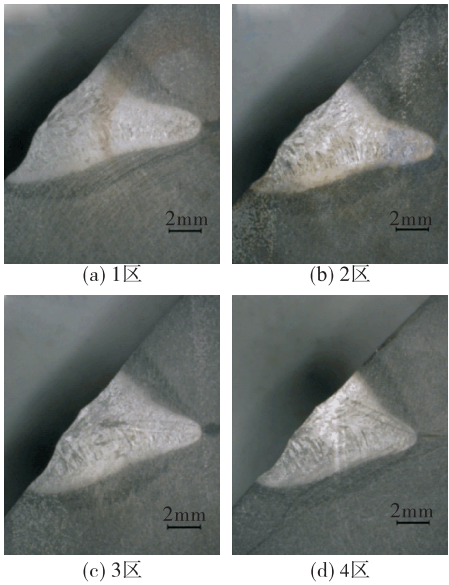


图 13 模拟样件不同熔深区金相图

Fig. 13 Metallographic images of simulation specimen with different penetrations

表 2 焊缝熔深超声测量与金相测量结果

Tab. 2 Ultrasonic testing results and metallographic results of weld penetration								单位:mm
聚焦深度	h=9.6		h=8.8		h=7.8		h=6.9	
	超声测量值	绝对误差	超声测量值	绝对误差	超声测量值	绝对误差	超声测量值	绝对误差
5	9.3	-0.3	9.1	0.3	8.0	0.2	6.7	-0.2
6	9.8	0.2	9.0	0.2	7.6	-0.2	7.1	0.2
7	9.9	0.3	8.6	-0.2	7.6	-0.2	6.9	0
8	9.8	0.2	8.6	-0.2	7.6	-0.2	6.7	-0.2
9	10.0	0.4	8.6	-0.2	7.6	-0.2	7.1	0.2
10	10.1	0.5	9.0	0.2	7.6	-0.2	7.1	0.2
11	9.8	0.2	8.7	-0.1	7.9	0.1	6.6	-0.3
12	10.0	0.4	9.2	0.4	8.2	0.4	7.2	0.3
13	9.8	0.2	9.2	0.4	8.0	0.2	6.3	-0.6
14	9.8	0.2	9.4	0.6	8.4	0.6	7.5	0.6
15	10.1	0.5	9.6	0.8	9.0	1.2	8.0	1.1

5 结论

1)通过仿真分析获得了不同频率相控阵探头在工件内部的横波声场信息,并对探头频率进行了优选。根据不同焊接熔深下未焊透界面回波幅值随聚焦深度的变化规律以及熔深测量结果,得到了

- 聚焦深度的最佳取值范围。
- 2)对于焊接厚度约 11 mm 的焊缝,采用10 MHz 线阵相控阵超声探头,聚焦深度设置为 8 mm 时,焊缝熔深测量误差小于 1 mm,能够满足工程定量需求。
- 3)本文所采用的方法可实现液体火箭发动机

燃气发生器头部焊缝熔深测量,且此法操作便捷,显示直观,检测效率高。可为优化焊接工艺、提高产品电子束焊接质量提供有力保障,也为类似结构产品的检测提供借鉴,后期可通过设计专用扫查工装进一步提高测量精度。

参考文献:

- [1] 张贵田. 高压补燃液氧煤油发动机[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- [2] 赵芳,任泽斌. 燃气发生器应用综述[J]. 火箭推进,2019,45(3):1-8.
ZHAO F,REN Z B. Overview of application of combustion-gas generator[J]. Journal of Rocket Propulsion,2019,45(3):1-8.
- [3] 张锋,严宇,杨伟东,等. 气氧/煤油富燃燃气发生器积碳特性试验研究[J]. 火箭推进,2017,43(6):76-81.
ZHANG F,YAN Y,YANG W D,et al. Experimental investigation on soot deposition in a fuel-rich GOX/kerosene gas generator[J]. Journal of Rocket Propulsion,2017,43(6):76-81.
- [4] 秦新华,叶力华,周塞塞,等. 燃气发生器固定连接结构可靠性改进设计[J]. 火箭推进,2014,40(6):31-36.
QIN X H,YE L H,ZHOU S S,et al. Reliability improvement of fixed connection structure of gas generator[J]. Journal of Rocket Propulsion,2014,40(6):31-36.
- [5] 刘上,刘红军,王海燕. 富氧燃气发生器液氧供应系统频率特性分析[J]. 火箭推进,2013,39(2):12-18.
LIU S,LIU H J,WANG H Y. Frequency characteristic analysis for LOX feed system of oxidizer-rich preburner[J]. Journal of Rocket Propulsion,2013,39(2):12-18.
- [6] 谢宝奎,闫世春,刘晓斌,等. 组合齿轮焊缝熔深超声波检测[J]. 无损探伤,2012,36(6):28-29.
- [7] 唐盛明,齐子诚,刘子瑜,等. 电子束焊缝超声波 C 扫描与工业 CT 检测方法测试结果比较[J]. 无损检测,2014,36(10):49-52.
- [8] 任俊波,唐月明,王学权,等. 铝合金浅焊缝熔深超声显微检测技术研究[J]. 材料导报,2015,29(S1):80-82.
- [9] 余亮,陈玉华,黄春平,等. 搅拌摩擦焊焊缝缺陷的超声相控阵检测技术[J]. 焊接学报,2014,35(1):21-24.
- [10] 史亦韦. 超声检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [11] 李斯特·W,斯克姆尔·Jr. 超声相控阵原理[M]. 徐春广,李卫彬,译. 北京:国防工业出版社,2017.
- [12] 李衍. 超声相控阵技术(第一部分):基本概念[J]. 无损探伤,2007,31(4):24-28.
- [13] 程高飞. 基于 CIVA 平台的材料中超声检测声场分布和小缺陷响应建模仿真及实验研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [14] 张小龙,张子健,吴家喜,等. 奥氏体不锈钢厚壁对接焊缝的超声相控阵 CIVA 仿真与试验[J]. 无损检测,2018,40(9):30-34.
- [15] 戈浩. 相控阵超声检测横向分辨力的影响因素[J]. 无损检测,2018,40(7):27-30.
- [16] 杨平华,林莉,刘春伟,等. 相控阵超声检测横向分辨力实验测试及分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(6):1384-1389.
- [17] 王锐. 未来聚变堆真空室复杂焊缝相控阵超声检测关键技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.