

# 超高压水晶釜超声波检测试验

寇 威, 郑朋刚, 净晓春

(陕西省锅炉压力容器检验所, 西安 710048)

**摘要:**介绍了超高压水晶釜的超声波横波检测技术。通过试验得出声程-深度-水平距离的关系, 分析了超声波横波检测检出缺陷位置的方法; 该方法具有较高的可靠性, 可为超高压容器的超声波检测工作提供参考。

**关键词:**超声波检测; 超高压水晶釜; 缺陷位置

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2016)01-0010-03

## Experiment on the Ultrasonic Detection of Defects of Ultra High Pressure Crystal Kettle

KOU Wei, ZHENG Peng-gang, JING Xiao-chun

(Shaanxi Boiler and Pressure Vessel Inspection Institute, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The ultrasonic wave detection technology of ultra high pressure crystal vessel is introduced in this paper. And through field test data, the relationship among acoustic path, depth and horizon range is found, the localization method of ultrasonic detection of defects is researched. The method has high reliability and provides a new way of defect detection for the ultra high pressure crystal kettle, and it can also provide a reference for the ultrasonic inspection of the ultra high pressure vessel.

**Key words:** Ultrasonic inspecting; Super-high pressure crystal kettle; Localization of defect

超高压水晶釜是在高温、高压环境下进行人工合成水晶的一种超高压容器。通常超高压水晶釜主体材料为 PCrNi3MoVA 镍钢(注: 内外壁经机械加工, 底部用堵底螺丝封堵, 上端用卡箍和堵塞进行密封)。其设计压力为 151 MPa, 设计温度为 400 °C。

超高压水晶釜容器特点为:

(1) 内径小、壁厚大、应力复杂(三向应力), 且应力分布不均匀。内外壁承受周向应力, 内壁最大, 外壁最小; 内外壁承受轴向应力相等, 而承受的径向应力, 内壁最大, 外壁最小。例如: 内蒙二机厂生产的超高压水晶釜, 内外壁周向应力相差达 98%, 如图 1 所示。

(2) 外部电加热时, 温度达到 380 °C 左右, 使内壁受到更大的拉应力。

(3) 超高压水晶釜运行时, 进出物料及水晶种植架、铲料等工序易使内壁产生缺陷, 特别是纵向裂

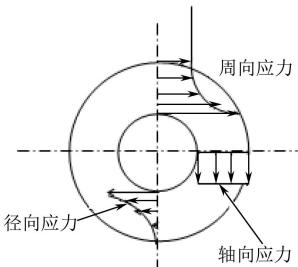


图 1 超高压水晶釜的受力示意

纹、划伤等。

## 1 裂纹类缺陷的超声检测

结合超高压水晶釜的特点可知, 超高压水晶釜的内壁表面及其近表面容易出现缺陷。这是超高压容器制造和检验验收时, 内壁比外壁严格的主要原因, 也是定期检验的重点。

由于超高压水晶釜的内径小、长径比大, 内表面检测非常困难, 所以首选超声波检测。国家质监总局 TSG R0002—2005《超高压容器安全监察规程》第 58 条(四)款规定: 定期检验中超声波检测及验收

收稿日期: 2015-06-26

作者简介: 寇 威(1982—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事承压特种设备的检验检测工作。

标准仍然按照该规程第34条制造要求规定。

超高压水晶釜制造及定期检验的各阶段超声波检测部位应各有侧重。制造期间,超高压水晶釜的超声波检测,以检测原材料及制造过程中产生的缺陷为主;而在役超高压水晶釜的超声波检测,应以检测是否存在应力腐蚀裂纹、疲劳裂纹等裂纹类缺陷为主。检测该裂纹类缺陷最有效的方法是超声波横波检测。

## 2 超声检测缺陷定位试验

超高压水晶釜的超声检测中,JB/T 4740.3—2005已不再适用<sup>[1]</sup>,因此需要重新制作检测工艺。

### 2.1 超声波检测工艺条件

#### 2.1.1 探头选择

根据文献[2],探讨了超高压水晶釜可选用探头:厚度 $T_m$ 为93 mm,外径 $D$ 为436 mm,折射角 $\sin\beta=1-2T_m/D$ ,有机玻璃中 $C_{L1}$ 为 $2730 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,钢中 $C_{S2}$ 为 $3230 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;所以,入射角 $\alpha$ 不大于 $\sin^{-1}(\sin\beta \times C_{L1} / C_{S2})$ ,即探头入射角 $\alpha$ 应小于 $28.988^\circ$ ,横波才能扫查到水晶釜体内壁。有机玻璃/钢界面第一临界角 $\alpha_1=27.6^\circ$ ,第二临界角 $\alpha_2=57.6^\circ$ ;当入射角在 $27.6^\circ \sim 57.6^\circ$ 范围时,工件内只存在折射横波,不存在折射纵波。为了保证釜体中纯横波探伤,故选择入射角 $\alpha=28.5^\circ$ 的探头;此时,能够用横波一次声程扫查到水晶釜体内壁。探头耦合面与水晶釜外径相同,有利于入射点与釜体周向耦合。

#### 2.1.2 对比试块

材料及尺寸应与超高压水晶釜釜体相同。制作与超高压水晶釜釜体相同的试块,材料为锻钢,主体材料PCrNi3MoVA,内径250 mm,釜体厚度93 mm。

#### 2.1.3 检验方法

用2.5P 13×13 K0.68(入射角 $\alpha=28.5^\circ$ )的斜探头沿着釜体做周向扫查,用2.5P 13×13 K1探头沿着釜体做轴向扫查(见图2,3),检查径向缺陷及周向缺陷。以下就2.5P 13×13 K0.68(入射角

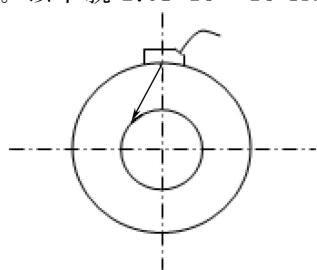


图2 2.5P13×13K0.68探头周向扫查示意

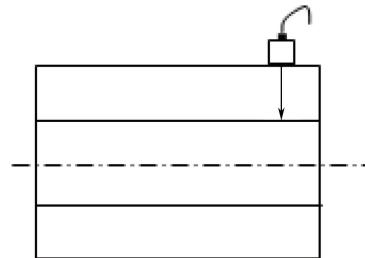


图3 2.5P 13×13 K1探头轴向扫查示意

$\alpha=28.5^\circ$ )的斜探头沿着釜体做周向扫查进一步探讨。

#### 2.1.4 灵敏度调节

将探头曲面楔块置于专用试块上。前后移动探头,找到棱角反射波最高时的试块棱角与探头曲面楔块的接触点即为探头的入射点,在探头相应位置作出标记,如图4所示。

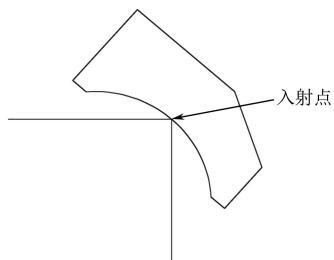


图4 2.5P 13×13 K0.68探头入射点测定示意

仪器横波扫描速度调节:采用声程调节法,调节方法见图5。

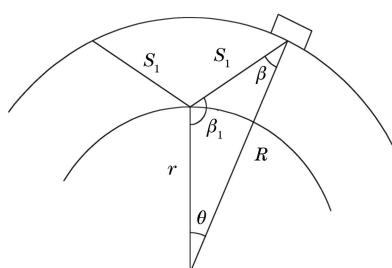


图5 扫描速度即声程调节法示意

一次声程: $S_1 / \sin\theta = r / \sin\beta$ ;  $S_1 = r \cdot \sin\theta / \sin\beta = 150 \text{ mm}$ 。二次声程: $S_2 = 2S_1 = 300 \text{ mm}$ 。

#### 2.1.5 距离-波幅曲线制作方法

将探头移动至一次声程位置,使超声波检测仪上波幅曲线达到最高波,记录为第1点。再将探头继续移动至二次声程位置,使曲线达到最高波,记录为第2点,即完成距离-波幅曲线,如图6所示。

#### 2.2 缺陷定位

超高压水晶釜因其结构的特殊性,使用2.5P13×13K0.68(入射角 $\alpha=28.5^\circ$ )的斜探头沿着釜体做周向扫查,检查与轴线平行缺陷。此类缺陷无法

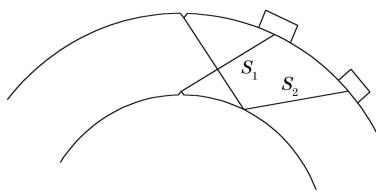


图 6 距离-波幅曲线制作探头位置示意

用常规方法定位,数字超声波探伤仪无法读出缺陷的数据。因此对超高压水晶釜超声波检测的检出缺陷定位作进一步试验研究。对于发现的缺陷波,应确定其埋藏深度和外圆弧面上的位置,如图 7 所示。

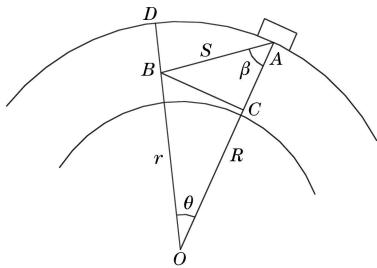


图 7 水晶釜缺陷位置示意

图中:缺陷深度  $H$  为  $DB$ ;  $R$  为水晶釜外半径;  $r$  为内半径;  $\beta$  为探头折射角;  $S$  为缺陷一次波声程; 缺陷距离探头入射点弧长  $L$  为  $AD$ ;  $\theta$  为中心夹角。

### 2.2.1 缺陷深度的确定

$$OB = \sqrt{R^2 + S^2 - 2RS \cos\beta} \quad (1)$$

$OD = OA = R$ ,  $R$  即为水晶釜的外半径,那么深度为:

$$H = OD - OB = R - OB \quad (2)$$

### 2.2.2 缺陷到探头入射点的表面距离的确定

$$\tan\theta = \frac{BC}{OC} = \frac{S \sin\beta}{R - S \cos\beta} = \frac{0.56S}{R - 0.83S} \quad (3)$$

$$L = AD = \frac{R \pi \theta}{180} \\ = 218\pi \times \frac{\arctan[0.56S/(218 - 0.83S)]}{180} \quad (4)$$

利用公式推导可计算出不同深度的声程及水平距离,计算结果如下:

深度  $H$  为 10 mm 时,代入式(2),声程  $S = 12.0$  mm;水平距离  $L = R \pi \theta / 180 = 7$  mm。

深度  $H$  为 20 mm 时,声程  $S = 24.5$  mm;水平距离  $L = R \pi \theta / 180 = 15$  mm。

深度  $H = 90$  mm 时,声程  $S = 150.0$  mm;水平距离  $L = R \pi \theta / 180 = 159$  mm。

将不同深度的声程及水平距离汇总计算后,可得缺陷深度-声程-水平距离的相互关系,见表 1。

表 1 缺陷深度-声程-水平距离的

深度	声程	水平距离
10	12.0	7.0
20	24.5	15.0
30	37.4	24.2
40	50.8	34.8
50	64.8	47.3
60	79.9	62.4
70	96.4	81.2
80	115.5	106.0
90	150.0	159.0

## 2.3 试验验证

### 2.3.1 试块

在试验前制作了一个超高压水晶釜专用试块,用于超高压水晶釜超声检测。内径为 250 mm,壁厚为 93 mm,沿深度方向每隔 10 mm 加工 1 个长 20 mm 的  $\phi 1$  mm 横孔(共 8 个),在内外壁各加工 1 个深度 1 mm 的 V 型槽,V 型槽角度为 60°,见图 8。

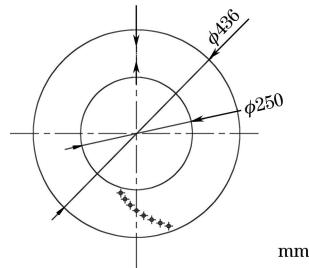


图 8 水晶釜专用试块尺寸示意

### 2.3.2 超声波检测仪的调节

选取 2 台 HS-610e 超声波检测仪,编号为 SXGJ-Y0157, SXGJ-Y0160, 用入射角  $\alpha$  为 28.5° 的 2.5P 13×13 斜探头,仪器横波扫描速度采用声程 1:1 调节,按横波斜探头方法制作距离-波幅曲线。

### 2.3.3 曲线定位试验

使用 2 台超声波探伤仪分别对 10~80 mm 的  $\phi 1$  mm 横孔及内壁 1 mm V 型槽进行探伤,记录 3 次数据,数据结果见表 2,3。

从验证试验的结果可以看出,实际结果与测量及推导值误差很小,这是由探伤过程中各种因素造成的,例如耦合、探头角度等,实际结果比推导值略大一些,深度越大,误差也就越大。尽管如此,在最大深度处的误差也小于 1 mm,可以满足超声波对缺陷定位的精度要求,可见以声程值来测算缺陷的水平距离及深度是可行的。

(下转第 37 页)

曲线,将检测信号相位或幅度值与标准曲线进行对比,以此来确定缺陷的深度和大小。而实际缺陷的形状、大小与人工缺陷的形状、大小有所不同,有的甚至相差很大,因而检测的准确性就存在质疑<sup>[8]</sup>。

在通常情况下,实际缺陷与标定管上人工缺陷形状和尺寸相近时进行判定会较准确;反之,实际缺陷与标定管上人工缺陷形状和尺寸差别越大,缺陷深度测量误差就越大,误差是由检测方法引起的。此外,检测探头的直径大小(填充系数)对检测结果也有影响,检测探头的直径越大,缺陷信号幅值越大,缺陷信号相位值反而越小。

## 5 结论

(1) 相同深度的缺陷,缺陷的大小不同,会导致深度检测误差不同。

(2) 在一定范围内,缺陷的深度相同,缺陷越大,则幅值越大;其相位角越小,深度检测误差越小;缺陷越小,则幅值越小;其相位角越大,深度检测误差越大。

(3) 缺陷的深度相同,大小不同时,则在一定的大小范围内缺陷大小与检测的相位角成线性关系。

(4) 缺陷的深度相同,形状不同时,即使测量幅值相同,测量深度误差也不同,如通孔与裂纹。

(上接第 12 页)

表 2 编号 SXGJ-Y0157 超声波探伤仪

检测结果 mm		
深度	声程	水平距离
10	11.8/11.8/11.9	7.1/7.1/7.1
20	24.2/24.5/24.3	14.8/14.9/14.8
30	37.0/37.0/37.2	24.0/24.0/24.1
40	49.1/49.6/49.7	33.5/33.8/33.8
50	64.5/64.5/64.6	47.6/47.6/47.6
60	79.5/79.7/79.5	62.9/63.1/62.9
70	96.3/96.1/96.0	81.8/81.6/81.6
80	115.5/115.6/115.6	106.5/106.6/106.6
93	157.3/157.1/157.0	165.9/165.7/165.6

## 3 结语

对超高压水晶釜等厚壁的超高压容器,当壁厚不适用于纯横波检测时,采取小角度 2.5P13×13K0.68(入射角  $\alpha$  为 28.5°)的斜探头沿着釜体做周向扫查是可行的。

通过制作声程-深度-水平距离关系的图表,检

(5) 检测探头的直径不同,检测的幅值和相位也不同。

(6) 就相同大小和形状的缺陷而言,检测探头的直径变大,则检测幅值变大,且相位角变小。

## 参考文献:

- [1] 姚运萍,韩捷.核电站管道缺陷涡流定量检测的可靠性分析[J].核动力工程,2009,30(4):17-20.
- [2] 韩捷,廖述圣.蒸汽发生器传热管涡流检验中多缺陷信号判别的可靠性[J].无损检测,2010,32(12):935-939.
- [3] 丁训慎.核电站蒸汽发生器传热管的点腐蚀及其防护[J].腐蚀与防护,2007,21(1):15-18.
- [4] 徐可北,周俊华.涡流检测[M].北京:机械工业出版社,2006:21-39.
- [5] JACKSON J D. Classical Electrodynamics [M]. 北京:高等教育出版社,2004:241-242.
- [6] DAI X W R. Numerical simulation of pulsed eddy-current nondestructive testing phenomena [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990,26(6):3089-3096.
- [7] MARK W C. Theory for coil impedance of a conducting half space: analytic results for eddy current analysis[J]. Journal of Applied Physics, 2001,89(4):2473-2481.
- [8] 王东升,徐可北,陈星,等.金属薄壁管材涡流检测中异常信号的产生原因[J].无损检测,2014,36(7):52-55.

表 3 编号 SXGJ-Y0160 超声波探伤仪

检测结果 mm		
深度	声程	水平距离
10	12.1/12.1/12.1	7.2/7.2/7.2
20	24.5/24.3/24.2	15.0/14.9/14.8
30	37.3/37.3/37.5	24.4/24.4/24.5
40	50.7/50.5/50.4	35.0/34.9/34.8
50	65.5/65.5/65.6	48.6/48.6/48.7
60	80.4/80.7/79.7	63.4/63.6/62.8
70	96.9/96.9/97.3	82.1/82.1/81.6
80	115.5/115.6/115.6	106/106.1/106.1
93	158.0/157.7/157.9	166.3/165.0/165.2

测人员可以用超声波探伤仪显示的声程直观地得出缺陷的深度及水平位置,以准确地定位缺陷。

## 参考文献:

- [1] JB/T 4740.3—2005 承压设备无损检测 第 3 部分:超声检测[S].
- [2] 辛义山,高少峰,寇威.厚壁超高压釜超声波检测初探[C].西安:西北大学出版社,2009:278-282.