

核用锆合金管材的超声波检测

李恒羽, 袁改焕, 王德华

(西北锆管有限责任公司, 宝鸡 721014)

Ultrasonic Testing for Zirconium Alloy Tube Applied in Reactor

LI Heng-Yu, YUAN Gai-Huan, WANG De-Hua

(Northwest Zircoccladding Co. Ltd, Baoji 721014, China)

中图分类号: TG115.28

文献标识码: B

文章编号: 1000-6656(2008)04-0255-03

核用锆合金包壳管作为核燃料的包覆材料,起着防止核产物外逸的重要作用,而包壳管的壁厚却不足 1 mm,因此对其内在质量和几何尺寸要求格外严格,一般要求管材中不能存在超过壁厚 5%~10% 深度当量的缺陷,尺寸控制公差为 30~40 μm。目前在包壳管材的生产过程中,超声波检测是保证产品质量、减少组件破损率的重要手段。随着超声波检测技术的发展,不仅可检测管材缺陷,还可测量管材的尺寸。文章以 φ10 mm×0.7 mm 核用锆合金管材为例,介绍采用超声波技术检测核用锆合金管材的方法。

1 检测原理

1.1 管材缺陷检测

φ10 mm×0.7 mm 核用锆合金管材属于小径薄壁管。由于外径小,曲率大,探头难以与管材表面直接耦合,为防止声束在管壁产生发散,通常采用超声波水浸聚焦检测技术^[1]。

在管材中产生纯横波,且横波能达到管材的内壁,超声波的入射角 α 必须满足:

$$\frac{C_{\text{水}}}{C_{L\text{管}}} < \sin\alpha < \frac{C_{\text{水}}}{C_{S\text{管}}} \cdot \frac{D_i}{D_o} \quad (1)$$

式中 $C_{\text{水}}$ ——水中的纵波声速;

$C_{L\text{管}}$ ——管材中的纵波声速;

$C_{S\text{管}}$ ——管材中的横波声速;

D_i ——管材的内径;

D_o ——管材的外径。

为使声波对管材的内壁和外壁具有相近的检测灵敏度,通常将管材中的横波折射角调整为 45°。对 φ10 mm×0.7 mm 锆合金管材来说,入射角约为 27°时,可在管材中产生折射角为 45°的纯横波。

1.2 管材尺寸测量^[2]

测试装置如图 1 所示,两个性能尽可能一致的点聚焦探头分别置于管材两侧,并且位于管材的中心轴线上。采用水作耦合剂。测量时,探头围绕管材高速旋转,管材直线前进。两个探头同时发出超声波到管材表面,一部分声波被管表面反射,另一部分声波进入到管壁中,并在管壁中形成多次反射回波。由被管表面直接反射回去的那部分声波,可计算得到实际的水距值,而由管壁中所形成的多次反射回波,就可计算得到管材的实际壁厚值。

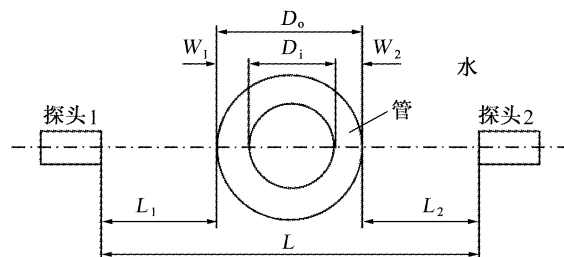


图1 两探头组合的管材尺寸测量原理图

由图1可得,管材的内外直径可表示为:

$$D_o = L - L_1 - L_2 \quad (2)$$

$$D_i = L - L_1 - L_2 - W_1 - W_2 \quad (3)$$

实际应用时需解决的问题有:

收稿日期: 2007-01-08

作者简介: 李恒羽(1971—),男,工程硕士,高级工程师,从事无损检测技术工作。

(1) 水中声速的温度补偿问题。水中超声波速度受水温影响较大,它会影响管材内外径的计算。采用一个到探头距离固定的反射体,探头发出的声波到反射体之间的传播时间为 T_c 。如果声速受水温的影响而发生变化,那么 T_c 也发生变化。因此可通过监控该组件实时地修正水中声速。

(2) 影响材料中声速的因素很多,可采用同一工艺条件生产的同规格管材加工制作成为对比样管,经精确计量后来校准仪器,以消除各个因素对声速的影响。

(3) 检测时,探头将围绕管材高速旋转,在离心力作用下,两个检测探头间的距离会发生变化,从而影响到尺寸的测量值。故需用一支已知外径尺寸的参考样管来校准仪器,修正两检测探头间的距离。通常可将壁厚样管与外径样管加工成同一支管。

2 检测准备

2.1 对比试样的制作

2.1.1 参考人工缺陷

对比试样为在管材的内外壁用电火花刻制了纵横向的 U 型人工槽,尺寸为 0.035 mm(深)×0.1 mm(宽)×2.5 mm(长)。

2.1.2 尺寸校准试样

采用同一规格、同一加工工艺且几何尺寸均匀的成品管材,经计量后作为尺寸校准试样。试验选用的校准样管的尺寸为:外径 10.005~10.011 mm,内径 8.597~8.603 mm。设备校准值为:外径 10.008±0.003 mm,内径 8.600±0.003 mm,壁厚 0.704±0.003 mm。

2.2 检测设备

选用德国制造的 Rota25 多通道数字化超声波检测系统。

3 检测工艺

3.1 检测探头

为了改善声束的指向性,提高检测灵敏度,对小径薄壁管的检测采用水浸聚焦检测方式。在聚焦声束的焦点处会形成一个焦柱,焦柱的直径 Φ 、长度 L 、波长 λ 、焦距 F 和晶片直径 D 的关系度可用下式近似表示^[3]:

$$\Phi \approx \frac{\lambda F}{D} \quad (4)$$

$$L \approx 4\lambda \left(\frac{F}{D} \right)^2 \quad (5)$$

为了利用焦柱来进行检测,水程距离应等于探头的焦距^[4]。为避免声波在管壁内来回反射时造成干扰,影响检测效果,要求焦柱的宽度小于管材壁厚的一半,同时焦柱长度要适当。为此对小径薄壁管进行检测时,一般选 $F/D=2\sim4$ ^[5],探头的焦距为 20 mm,晶片尺寸为 $\phi 6$ mm,线聚焦,对管材 100% 检验。

而对尺寸测量来说,应进一步减小焦柱宽度,增强声束能量,提高检测分辨力和测量精度,因此探头焦距选为 30 mm,晶片尺寸为 $\phi 10$ mm,聚焦方式为点聚焦。

薄壁管材的检测频率为 5~20 MHz。由式(4)和(5)可知,提高检测频率,可减小焦柱宽度,改善聚焦效果,提高对小缺陷的检测能力。确定 $\phi 10$ mm×0.7 mm 核用锆合金管材的缺陷检测时探头频率为 15 MHz,尺寸检测时探头频率为 17 MHz。

3.2 检测工艺参数

检测工艺参数有:探头的旋转速度、管材的前进速度和仪器的重复频率。为保证检验的可靠性,实现对管材的 100% 检验,扫查区域必须有 >10% 的覆盖。为此探头的旋转速度定为 4 000 转/min,管材的前进速度为 6 m/min,即检验螺距为 1.5,覆盖率为 62.5%。仪器的重复频率 f 为^[6]:

$$f = N \cdot D_0 \cdot \frac{1-k}{19} \cdot b \quad (6)$$

式中 N ——探头的旋转速度;

k ——周向的覆盖率;

b ——探头焦柱的有效宽度。

k 值取 30%~50% 时效果比较理想。在此 k 值取 40%,以满足高速自动化检测的要求。由此确定缺陷检测的重复频率为 12 kHz。

对于管材的尺寸检测,当重复频率确定为 3 kHz 时,在上述检测速度下,系统将在管材的每个螺距截面上测取 45 组数据。

4 检测状态的评价

4.1 管材缺陷检测状态的评价

对管材进行缺陷检测时,要求系统对样管内外壁刻制的 U 型人工缺陷的回波信号幅度应接近,最大相差不超过 20%,同时要求系统对人工缺陷样管连续检测 20 次,每个通道的人工缺陷回波信号幅度的标准偏差应 <1 dB。

在对管材检测前和检测完毕后、以及检测中每 2 h,均连续测 5 次人工缺陷标准管,要求仪器每次

都应对人工缺陷报警或显示。否则,应重新调试仪器,并对自前次测试人工缺陷样管以后所有检测的管材重新检测。

4.2 管材尺寸检测状态的评价

在采用尺寸校准试样对仪器完成校准后,要求仪器的显示值必须在校准值 $\pm 3 \mu\text{m}$,并用一支带有尺寸极值(极值接近管材的尺寸控制偏差)的管材(下称极值尺寸管)连续测 20 次,每个检测通道的标准偏差应 $< 2 \mu\text{m}$ 。

同样,在对管材检测前和检测完毕后、以及检测中每 2 h,应连续测 5 次极值尺寸管,要求仪器每次对极值的测量值偏差应 $< \pm 4 \mu\text{m}$ 。否则,应重新调试仪器,并对自前次测试极值尺寸管以后所有检测的管材重新检测。

5 应用效果

按照上述的检测方法和检测工艺参数,已完成了上万支 $\phi 10 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ 核用锆合金管材的超声波检测。现场应用结果表明,采用现行的高速自动化检测方法,结果可靠,效果良好。

图 2 为一支锆管的检测波形图,由上到下检测通道有 8 个。由图可见,系统采用前 4 个通道进行管材缺陷检测,通道 1,2 为纵向缺陷检测通道,通道 3,4 为横向缺陷检测通道,其纵坐标均为缺陷幅值单位为“%”,可适应管材中自然缺陷的不同取向,保证检测效果。尺寸测量通道包括了管材的壁厚和内外径,其中通道 5,6 测量壁厚值,通道 7 测量内径值,通道 8 测量外径值。系统从每个旋转截面的所有测量数据中,选出最大和最小值,并将最大和最小

值分别连成曲线,从而形成管材从头至尾的检测曲线,可直观地了解管材的尺寸变化情况。

同时,在应用中,可通过对管材的超声波检测,实现对生产过程的监控,如通过观察纵向缺陷通道和尺寸通道,监控管材轧制工艺及轧机状态是否合理;通过观察横向缺陷通道,监控管材成品抛光的质量状况;通过观察尺寸通道,监控管材成品酸洗时的去除量等。

6 结语

应用结果表明,采用现行的检测方法对 $\phi 10 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ 核用锆合金管材进行超声波检测是可行的。利用超声波检测技术在对核用锆合金管材进行缺陷检测的同时进行管材的尺寸测量,不仅保证了产品质量,提高了检验效率,还可促进管材加工工艺的不断改进。

参考文献:

- [1] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考核委员会编写. 超声波探伤[M]. 北京:中国锅炉压力容器安全杂志社,1995.
- [2] Rumbold J G. Ultrasonic dimensional tube testing techniques[C]. Presented at the National Fall Conference of the American Society for Nondestructive Testing. Detroit MI; 1974.
- [3] 《国防科技工业无损检测人员资格鉴定与认证培训教材》编审委员会编. 超声检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005,36
- [4] 彭应秋,朱 惠,郑开胜. 薄壁管材探伤中水声程公式分析[J]. 无损检测,1998,20(3):65—68.
- [5] 马小怀,陈百锁,汶锁明. 小径薄壁有色管材超声探伤[J]. 无损检测,2005,27(1):44—46.
- [6] ASTM B811—1990 Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for nuclear Reactor Fuel Cladding[S].



(上接第 249 页)

今后学校将与全国无损检测高等教育的同仁们一起,进一步深入研究新世纪要求的无损检测专业人才的培养途径,大力开展教学改革,实行宽口径、厚基础、重实践的培养模式,加强工程实践和计算机能力的训练,着力培养基础扎实、工程实践能力强、适应面广、后劲足的高素质新型高等工程技术人才。

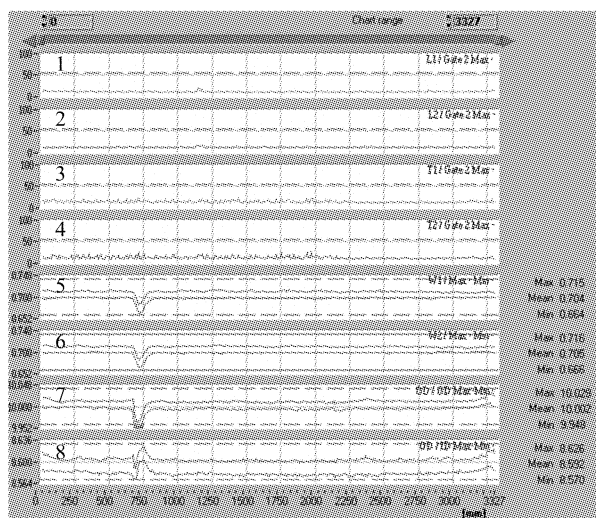


图 2 锆合金管材的检测波形图