

# 换热器管板声发射在线检测及评价方法

张 颖<sup>1</sup>, 张盛瑀<sup>1</sup>, 戴 光<sup>1</sup>, 候晓峰<sup>2</sup>, 朱旭光<sup>2</sup>

(1. 东北石油大学, 大庆 163318; 2. 中国石油 大庆石化公司, 大庆 163000)

**摘要:**换热器管板属于多孔结构, 制造工艺复杂, 容易产生缺陷, 且管板与换热管连接处连接质量不易检查。针对上述问题, 采用声发射检测技术, 将传感器通过专用波导杆与换热管连接, 根据衰减测量结果确定管板上传感器的布置阵列。通过壳程水压试验二次加载方式对其进行声发射检测。采取区域定位方法, 通过对不同阶段保压信号的分析, 综合考虑声发射信号的活性和强度, 制定了换热器管板声发射检测及评价方法, 实现了对换热器管板质量的分级评价。

**关键词:**换热器管板; 声发射; 专用波导杆; 区域定位; 质量评价

中图分类号: TG115.28 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2013)12-0028-04

## Acoustic Emission Detection On-Line and Evaluation for Heat Exchanger Tube Sheet

ZHANG Ying<sup>1</sup>, ZHANG Sheng-Yu<sup>1</sup>, DAI Guang<sup>1</sup>, HOU Xiao-Feng<sup>2</sup>, ZHU Xu-Guang<sup>2</sup>

(1. Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China; 2. Daqing Petrochemical Company, Daqing 163000, China)

**Abstract:** The tube sheet of the heat exchanger is a pore plate. The complex manufacturing process causes the plate to easily contain many kinds of defects. In addition, the joints between tube sheet and tubes are difficult to detect. To overcome the problem mentioned above, acoustic emission(AE) testing technology is used for its ability on structure testing. The sensors are connected with heat exchange tubes with special wave guide rods, and the array arrangement is referred to the results of attenuation measurement. Acoustic emission testing is carried out in two cycle hydrostatic test of shell side. After the analysis of different pressure maintaining stages signals with zone location method, taking AE signal activity and intensity into account, the AE testing and evaluation method of tube sheet is established. With this method, the grade of tube sheet can be identified.

**Keywords:** Heat exchanger tube sheet; Acoustic emission; Special wave guide rod; Zone location; Quality evaluation

换热器是石油化工生产的关键设备, 其完整性对安全生产影响很大。由于换热器的管板属于多孔结构, 制造工艺(锻造、钻孔等)复杂, 容易产生缺陷, 且管板与换热管连接通常采用焊接、胀接、胀焊并用等方式, 连接质量不易保证。同时由于其开口数量大, 强度削弱, 在使用过程中容易产生裂纹, 诱发严重事故。因此, 如何在出厂前发现换热器管板制造过程中产生的先天性缺陷, 并做针对性的处理, 对提高换热器管板质量及使用寿命具有很大的意义和价

值<sup>[1-2]</sup>。目前, 常规检测方法无法保证检测元件与管板具有良好的接触耦合, 无法保证检测效果。声发射检测作为一种动态无损检测技术, 以其动态特性、整体性、实时性和经济性等特点, 在压力容器的制造质量验证、在役检验和在线监测中被广泛应用<sup>[3-4]</sup>。针对换热器管板的检测问题, 笔者确定使用声发射检测技术, 使用专用波导杆, 保证传感器与换热管的良好接触耦合。通过对不同类型换热器管板进行的声发射检测试验及分析, 制定了管壳式换热器管板的声发射检测及评价方法。以下结合 6 台新制换热器管板的声发射检测与评价过程, 对这一方法进行介绍。

收稿日期: 2013-01-08

作者简介: 张 颖(1972—), 男, 副教授, 博士, 主要从事过程设备安全检测及完整性评价的研究工作。

## 1 换热器管板声发射检测方法

### 1.1 换热器管板声发射检测原理

声发射检测是指材料在应力作用下产生变形与裂纹扩展形成声发射源发出弹性波,经介质传播到达被检物体表面,引起表面的机械振动。经过声发射传感器将表面的瞬态位移转换成电信号。声发射信号再经放大、处理后,形成其特性参数,并被记录与显示。最后,经数据的解释评定出声发射源的特性。图1表示了声发射检测的原理。

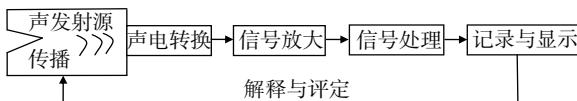


图1 声发射技术基本原理

针对换热器管板的特殊结构和特殊检测条件,决定在壳程水压试验条件下,对换热器管板及管板与换热管连接处进行声发射检测。如果管板或管板与换热管连接处存在缺陷,在压力作用下缺陷会发生变形或开裂,产生弹性波并发出声发射信号。借助插入换热管中的波导杆,传感器可以接收声发射信号,经过声发射检测仪分析处理,即可确定缺陷的位置和严重程度,确定管板的质量。

### 1.2 换热器管板声发射检测的关键技术

在利用声发射技术对换热器管板进行检测时,需要注意如下关键问题:

(1) 由于管板多孔结构对声发射波传播的影响,为保证弹性波的传播,避免局部几何不连续带来的影响,需使用专用的波导杆插入到换热管中。用磁座将传感器固定在波导杆上,各接触面使用耦合剂,通过这种连接方式保证弹性波的传播,提高传感器的接收效果。

(2) 由于换热器管板的结构特殊,其开孔数量大,声发射信号传播衰减明显,需预先进行衰减测量。结合管板上换热管分布情况,确定传感器最大间距,同时制定传感器布置方案。传感器布置方案需满足采用区域定位方法时,可保证对整个换热器管板全部覆盖。

(3) 检测需在壳程水压试验加载状态下进行,最高试验压力为换热器壳程的水压试验压力,要求采用二次加载保载方式,升压过程尽量平稳,升压速度不应大于0.5 MPa/min,且每次保载时间不少于10 min。

(4) 其它检测步骤参照NB/T 47013.9—2012《承压设备无损检测 第9部分 声发射检测》标准

进行。

## 2 换热器管板质量的声发射评价方法

通过对多台不同类型的换热器管板进行声发射检测试验,并根据NB/T 47013.9—2012与JB/T 10764—2007《常压金属储罐声发射检测及评价方法》标准,建立换热器管板质量声发射评价方法。该评价方法根据声发射检测区域定位结果及参量分析方法,综合考虑声发射信号的活性和强度指标,对换热器管板质量进行分级评价。

### 2.1 声发射信号活性分级

声发射信号特征参数中的撞击计数是系统对撞击的累计计数,它反映声发射活动的总量和频度,常用于声发射活性评价。如表1所示,在对换热器管板进行评价时,需综合考虑一次、二次加载最高压力保载阶段的撞击数,确定声发射信号的活性等级。 $Hi$ 表示保压阶段每一通道的声发射撞击数; $HH$ 表示保压阶段所有通道声发射撞击总数; $CHH$ 表示本次检测所用的声发射通道总数; $m, n$ 值由试验确定,根据目前试验数据,确定 $m=5, n=10$ 。

表1 声发射信号活性划分

声发射信号活性等级	第一次加载最高压力保压阶段	第二次加载最高压力保压阶段
弱活性	$Hi \leq 2m$ and $HH < 4CHH$	$Hi \leq m$ and $HH < 2CHH$
中活性	$2m < Hi \leq 2n$	$2m < Hi \leq n$
强活性	$Hi > 2n$	$Hi > n$

### 2.2 声发射信号强度分级

声发射信号的强度可用能量、幅值或计数参数来表示,如表2所示。幅值是指事件波形的最大幅值,不受门槛的影响,直接决定事件的可测性。在对换热器管板进行评价时,采取声发射信号幅值参数表示强度,并根据区域定位所得信号的平均幅值确定声发射信号的强度等级。表中,声发射信号强度Q可用幅值、能量或计数参数表示,本方法暂定为用幅值表示。 $a, b$ 值由试验确定,并需通过具体结构衰减测量曲线修正。根据试验数据,暂定 $a =$

表2 声发射信号强度划分

强度等级	声发射信号强度
低强度	$Q < a$
中强度	$a < Q \leq b$
高强度	$Q > b$

50 dB;  $b=60$  dB。

### 2.3 声发射信号综合等级评定及管板质量划分

综合考虑声发射信号的活性和强度指标,确定声发射信号的综合等级共分4级。根据检测评价专家经验,在确定换热器管板声发射信号综合等级时,需优先考虑声发射信号的活性指标,如表3所示。

表3 声发射信号的综合等级划分

强度等级	活性等级		
	强活性	中活性	弱活性
高强度	IV	III	II
中强度	III	II	II
低强度	III	II	I

根据表3划分的声发射信号综合等级,确定换热器管板质量划分标准,如表4所示。管板质量主要包括管板本身的制造质量(对于复合板尤为重要)和管子与管板间的胀(焊)接质量。

表4 管板质量划分

管板声发射信号等级	管板质量
I	管板质量好,无活性缺陷
II	管板质量较好,无活性缺陷
III	管板质量较差或存在活性缺陷
IV	管板质量差或存在活性缺陷或存在泄(渗)漏

## 3 换热器管板声发射在线检测及评价实例

利用建立的换热器管板声发射检测与评价方法,对某厂6台新制换热器管板进行水压试验下的声发射在线检测及评价。现以换热器(E-335C)为例,说明检测及评价过程。

### 3.1 换热器(E-335C)声发射检测及评价

#### 3.1.1 换热器E-335C及管板基本资料

设计压力2.68 MPa;试验压力4.51 MPa;管板规格尺寸BES1200-4.0-400-6/25-2I;材质16Mn+06Cr13AL+堆焊(固定管板)。

#### 3.1.2 E-335C换热器管板声发射检测过程

(1)采用美国PAC公司制造的SAMOS-32通道声发射检测仪,传感器型号为R15,共振频率为150 kHz,设置门槛值为40 dB,增益为30 dB。

(2)根据E-335C换热器管板尺寸、换热管数量及分布情况(BES1200-4.0-400-6/25-2I),通过预先进行的衰减测试试验数据,采用区域定位方法,制定传感器布点图。在换热器管板各布点位置安装插入

换热管中的专用波导杆,在波导杆端部安装面打磨出见金属光泽的区域,利用磁座将传感器固定在波导杆上,传感器通过波导杆与换热器管板连接。传感器布置示意图如图2所示。

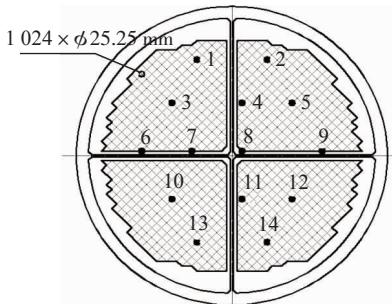


图2 传感器布置

(3)各通道连接完成后,设置采集程序,对各通道进行灵敏度标定,使各通道灵敏度与平均灵敏度之差小于3 dB。

(4)按水压试验加载曲线加载并同时开始声发射系统采集。E-335C换热器管板声发射检测加载曲线图见图3。

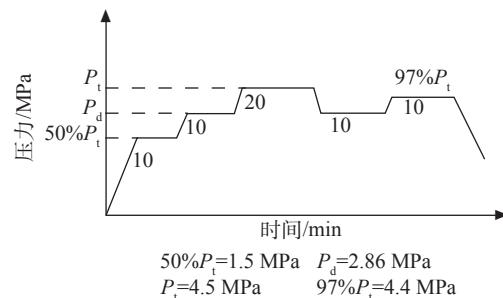


图3 E-335C换热器管板声发射检测加载曲线

(5)加载过程中与加载人员保持联系,若发现持续增加的幅值较大的信号,应及时停止加载或卸载,采用其他常规方法对该部位复验,根据复验结果决定是否继续试验。若确认为密封面泄漏或其它干扰信号造成,则排除后可继续加压监测。加载结束后,再次标定各通道,以确认各通道在加载期间均正常。

#### 3.1.3 E-335C换热器管板声发射检测结果分析与评定

对E-335C换热器管板各加载阶段保压过程的检测数据进行了事后处理和分析,包括特征参数分析、相关性分析和区域定位分析。图4~5为主要一次、二次加载最高压力保载阶段的区域定位图及部分特征参数相关分析图。表5为E-335C换热器声发射检测一次、二次加载最高压力保载数据分析结果。

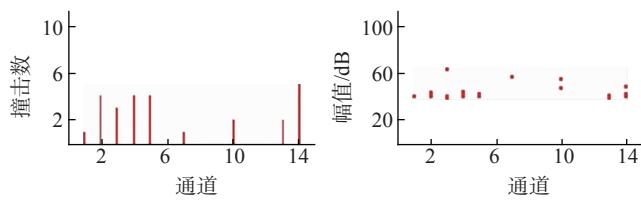


图 4 第一次加载 4.51 MPa 保压阶段声发射参量相关图

表 5 E-335C 换热器声发射检测数据分析结果

通道号	第一次加载		第二次加载	
	4.51 MPa 保压阶段		4.4 MPa 保压阶段	
	声信号数 /个	平均强度 /dB	声信号数 /个	平均强度 /dB
1	1	41	0	0
2	4	42	1	45
3	3	48	1	42
4	4	44	1	44
5	4	42	5	42
6	0	0	0	0
7	1	57	1	49
8	0	0	1	46
9	0	0	0	0
10	2	52	1	47
11	0	0	0	0
12	0	0	1	45
13	2	41	1	50
14	5	43	3	48
声信号总数	26		16	

利用前述的换热器管板声发射评价方法,对换热器(E-335C)固定管板声发射检测分析结果进行评价,由表5和图5的分析结果,可得到如下结论:

(1) 第一次加载 4.51 MPa 保压阶段声发射信

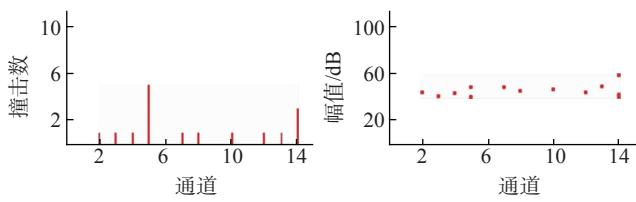


图 5 第二次加载 4.4 MPa 保压阶段声发射参量相关图

号强度为低强度,声发射信号活性为弱活性,管板质量等级为I级。

(2) 第二次加载 4.4 MPa 保压阶段声发射信号强度为低强度,声发射信号活性为弱活性,管板质量等级为I级。

(3) 综合考虑第一次加载最高试验压力4.51 MPa保压和第二次加载4.4 MPa保压阶段声发射信号强度和活性等级,确定该换热器管板声发射评价等级为I级,管板质量好。

### 3.2 6台换热器管板声发射检测评价结果

利用上述方法对某石化机械厂生产的其余5台换热器管板进行了出厂前的声发射检测,换热器管板检测评价结果汇总于表6。检测的6台换热器管板,I级共4台,II级共2台,管板质量均满足使用要求。

### 4 结语

(1) 针对多孔形换热器管板及管板与换热管连接的质量问题,提出声发射检测技术方案。借助专用波导杆,采用区域定位方法,通过壳程水压试验二次加载方式,实现对换热器管板的检测。

(2) 根据多台换热器管板声发射检测试验,并参照相关标准,制定换热器管板质量的声发射评价方法。该方法综合考虑一次和二次加载最高压力保载阶段声发射信号的活性和强度两个指标,确定声

表 6 6台换热器管板声发射检测评价结果

序号	设备编号	规格	声发射检测数据				质量等级
			第一次保压阶段	第二次保压阶段	活性	强度	
1	E-319B	BES1300-4.0-445-6/25-6I	弱活性	中强度	弱活性	低强度	I
2	E-331C	BES1300-4.0-500-6/25-2I	中活性	低强度	弱活性	低强度	II
3	E-331D	BES1300-4.0-500-6/25-2I	弱活性	中强度	弱活性	低强度	I
4	E-335A	BES1200-4.0-400-6/25-2I	中活性	低强度	低活性	低强度	II
5	E-335B	BES1200-4.0-400-6/25-2I	弱活性	低强度	弱活性	低强度	I

(下转第 57 页)

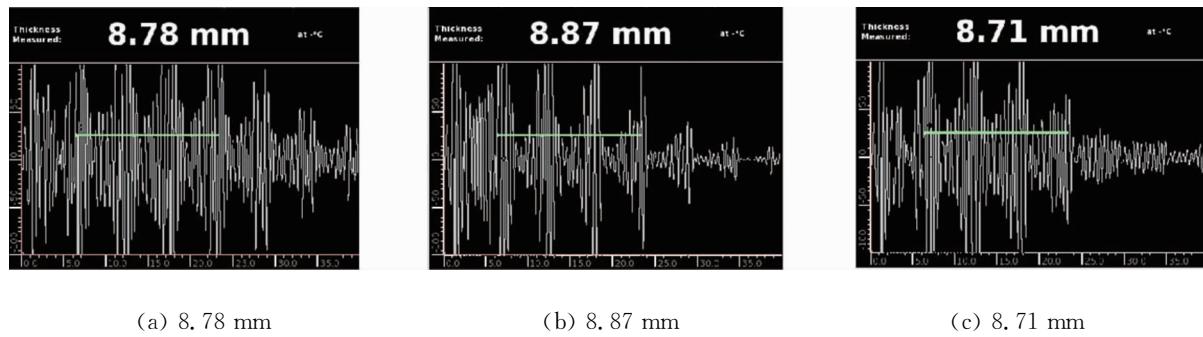


图 10 管径 400 mm 的管壁测厚 A 扫描显示

5 结语

EMAT作为一种超声检测新技术,具备超声检测的全部优势,如安全、单面检测、检测效率高等。并且 EMAT 可以便捷地激发用于超声检测的全部声波模式,是一种完备的检测方式。同时,EMAT 作为一种非接触检测的重要技术,具备在恶劣环境下实施检测的优势,如高/低温环境检测、透过油漆层/氧化层检测等。然而,由于 EMAT 为一种新型的无损检测技术,并且存在一定的技术壁垒,以及用户对该技术缺乏了解和认知,限制了 EMAT 技术在国内无损检测行业的应用。随着 EMAT 技术的不断发展和完善,EMAT 技术将会更多地得到应用,解决一系列目前检测界无法解决的难题。

#### 参考文献：

- [1] Kawashima K. Theory and numerical calculations of the acoustic field produced in metal by an electromagnetic ultrasonic transducer[J]. J Soc Am, 1976 (60): 1089-1099.
  - [2] Maxfield B W, Fortunko C M. The design and use of

[2] Maxfield B W, Fortunko C M. The design and use of

(上接第 31 页)

发射信号的综合等级，并据此对换热器管板进行质量分级与评价。

(3) 利用建立的换热器管板声发射检测与评价方法,对某石化机械厂 6 台换热器进行检测与评价,其中 4 台管板等级为 I 级,2 台为 II 级,管板质量均满足使用要求。

### 参考文献：

- [1] 朱日良.管壳式换热器管板与换热管焊接常见质量问题

electro-magnetic-acoustic wave transducers (EMATs) [J]. Mater Eval, 1983, 41(12): 1399-1408.

- [3] Thompson R B. Generation of horizontally polarized shear waves in ferromagnetic materials using magnetostrictively coupled meander-coil electromagnetic acoustic transducers[J]. *Appl Phys Lett*, 1979 (34): 175-177.
  - [4] 高会栋. 电磁超声技术在焊缝检测中的应用[J]. 无损检测, 2010, 32(11): 850-856.
  - [5] Gao H, Lopez B. Development of single channel and phased array EMATs for austenitic weld inspection [J]. *Materials Evaluation*, 2010, 68(7): 821-827.
  - [6] 张广纯, 陆原, 李希英, 等. 电磁超声自动探伤技术: 中国, CN102220X[P]. 1993.
  - [7] 苏劲, 张广纯, 梁杰宁, 等. 电磁超声探伤装置: 中国, CN2090061[P]. 1991.
  - [8] 王浩, 王黎, 等. 车轮电磁超声探伤技术的研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(2): 66-70.
  - [9] 冯剑钊, 米武军, 王淑娟. 基于电磁超声的火车车轮裂纹检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2005(11): 27-29.
  - [10] Thompson R B. Physical principles of measurement with EMAT transducers[J]. *Physical Acoustics*, 1990 (19): 157-200.

题的防止[J].化工设备与管道,2005,42(1):62-63.

- [2] 李小芹,申晓明.换热器管板与换热管连接质量控制[J].化学工程与装备,2009(5):89-90.
  - [3] 戴光,李伟,王娅莉,等.常压立式储罐腐蚀状态检测与评价技术的研究与应用[J].无损检测,2011,33(12):58-61.
  - [4] 张颖,王子兴,王学增,等.新制加氢反应器水压试验过程的声发射检测[J].无损检测,2012,34(7):36-39.