

# 基于磁记忆机理的焊缝疲劳累积损伤特征

邢海燕<sup>1,2</sup>, 杨文光<sup>1</sup>, 黄保富<sup>1</sup>, 秦萍<sup>1</sup>

(1. 东北石油大学 机械科学与工程学院, 大庆 163318; 2. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:**通过20号钢焊接平板试件的拉-拉疲劳试验,研究了在单周期和多周期循环载荷下焊缝疲劳累积损伤的磁记忆信号特征。结果表明,由于试件内部初始状态下各处应力分布不均匀,焊缝原始磁信号表现为起伏较大;随着循环周次的增加,试件内部应力集中重新分布,信号趋于稳定;在周期累积循环试验中,磁记忆信号随着循环周次的增加出现螺旋上升的趋势,呈现出磁弹性效应变化特征;通过建立磁记忆信号与损伤度函数的模型,可根据磁记忆信号的变化准确判断裂纹扩展趋势,用于焊缝剩余寿命的预测。

**关键词:**焊缝; 疲劳损伤; 磁记忆检测; 应力集中

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2012)03-0025-05

## Welded Joints Fatigue Cumulative Damage Behavior Based on Magnetic Memory Mechanism

XING Hai-Yan<sup>1,2</sup>, YANG Wen-Guang<sup>1</sup>, HUANG Bao-Fu<sup>1</sup>, QIN Ping<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Science and Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In order to get metal magnetic memory (MMM) signal characteristics under single cycle tension loading and multi-cyclic fatigue loading, 20 steel welded plate specimens were tested by experiments. In single cycle tension experiments, the loading is increased from 20 kN to 60kN at 10kN interval space. In multi-cyclic tension fatigue experiments, the static loading is 35kN and the stress ratio is 1/6. The results showed that MMM signals had fluctuations throughout the specimens under the initial state because of the residual stress distributed uniformly on welded joints. With the increment of tension loading, internal stress was redistributed again and MMM signal tended to be stable. In the cycle cumulative experiments, MMM signals show a loop-arising trend along with the increase of cycle numbers, reflecting the magnetic elastic variation effect. By establishing the relational model between the damage degree and the magnetic memory signal, the fatigue residual life of welded joints can be forecasted.

**Keywords:** Welded joints; Fatigue cumulative damage; Metal magnetic memory testing; Stress concentration

焊缝结构广泛应用于压力容器、锅炉管道等设备中。由于焊缝在焊接过程中受焊接技术、温度及母材与焊条材料的热力学性能等因素影响,易产生

收稿日期: 2011-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11072056); 黑龙江省自然科学基金资助项目(A200907); 黑龙江省教育厅普通高等学校青年学术骨干支持计划资助项目(1155G02); 国家大学生创新试验计划资助项目(101022019)

作者简介: 邢海燕(1971—), 女, 副教授, 博士后, 研究方向为材料疲劳损伤及断裂评价、设备监测及故障诊断。

咬边、夹杂、未焊透等缺陷并导致较大的残余应力。服役后的设备若长期在高温高压的条件下工作, 处在交变载荷下的工作表面, 特别是焊缝处易发生疲劳断裂, 可能造成巨大的经济损失和灾难性的后果。因此, 研究焊缝在交变应力下的力学特征、焊缝疲劳损伤过程的无损监测及寿命评估, 对保障设备的安全运行具有十分重要的意义。

目前针对焊缝疲劳损伤的研究大多集中在从宏观角度利用焊缝在工作及试验中表现出来的性能, 或者从显微微观角度观察材料组织变化上。而被誉为

为 21 世纪最具潜力无损检测技术的磁记忆检测技术能够从宏观、微观两个角度出发,运用铁磁学机理对焊缝进行探伤、在线监测及剩余寿命预测。

处于地磁环境下的铁磁性工件受到工作载荷的作用时,在其内部会发生具有逆磁致伸缩性质的磁畴组织定向和不可逆的重新取向并在应力与变形集中区形成漏磁场,当外部应力去除后,铁磁性工件的这种漏磁场状态会继续保留下<sup>[1-2]</sup>来。综合考虑漏磁场法向分量  $H_p(y)$  过零点、极值点、峰-峰值和梯度等特征,可以准确地推断工件的应力集中及损伤缺陷<sup>[3]</sup>。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

试验材料为 20 号钢,主要用于制造汽轮机和锅炉的管子、法兰、联箱及各种紧固件。利用线切割机加工尺寸为  $300 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  板状试件,并制作试件长度方向中线为标准的 V 形坡口对接焊缝,焊条型号为 GB/E4303,抗拉强度不低于 420 MPa。试验前在试件正面测试范围内画好  $5 \times 5$  条测试线,其中测试线 1~5 检测方向为焊缝横向,测试线 6~10 检测方向为焊缝纵向,如图 1 中箭头所示。

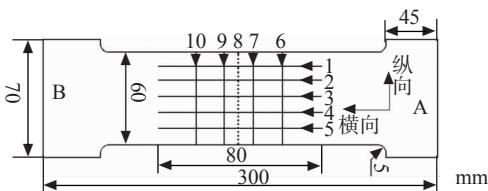


图 1 试件形状及测试线位置

### 1.2 试验方法

根据 GB 3075—1982《金属轴向疲劳试验方法》标准,试验在 QBG-300 型高频疲劳试验机上进行,磁记忆信号测试设备选用俄罗斯动力诊断公司生产的 TSC-1M-4 型金属磁记忆检测仪,检测步长为

1 mm。试验过程采用先进行静载模拟疲劳应力的单周期试验,后进行拉-拉疲劳试验。试件 A 端装夹在上夹头,B 端装夹在下夹头。静载模拟单周期试验的载荷级别由最小载荷 10 kN 开始,每级增加 10 kN,直至 60 kN,再以同样间隔从 60 kN 减载至 10 kN 作为一个周期。每级载荷保载 10 min 后沿图 1 所示测试线扫描磁记忆信号,重复上述周期三次。多周期拉-拉疲劳试验的静载荷 35 kN,动载荷 25 kN,应力比  $R=1/6$ ,间隔 100 千周测量一次,直至试件断裂。

## 2 试验结果

### 2.1 单周期磁记忆信号特征

图 2 给出测试线 7 在不同周期载荷上升阶段焊缝纵向磁记忆信号对比情况。

由图 2(a)可知,在初始阶段,磁记忆信号的跨度较大,局部梯度大,表明试件内部在焊接加工过程中热影响区具有较大的残余应力。当试件受不同载荷作用时,磁记忆信号发生较大的改变。试件内部磁畴会在应力的作用下被迫改变当前方向以减小应变能,这就导致在每次加载之后,磁信号改变很大。随着载荷的继续反复施加,磁记忆信号的无规律跳变消失,趋势逐渐变得一致,见图 2(b)。最后信号基本保持相同的趋势,随载荷的增大,磁记忆曲线不断向上移动,见图 2(c)。拉伸载荷会使材料产生应变,由于材料内部的不均匀性,使得局部应力陡增,从而使构件内部结构不断发生位错等微观缺陷。此时,为了使铁磁构件内的总的自由能趋于最小,在磁机械效应的作用下必将引起构件内部的磁畴在地球磁场中作畴壁的位移,甚至不可逆的重新取向排列,主要以增加磁弹性能的形式来抵消应变能,从而在铁磁构件内部产生大大高于地球磁场强度的磁信号<sup>[4]</sup>。由于金属内部位错等内耗效应的保留,势必造成载荷消除后应力集中区的保留,在磁机械效应的作用下引发的磁畴组织的重新取向排列也会保留

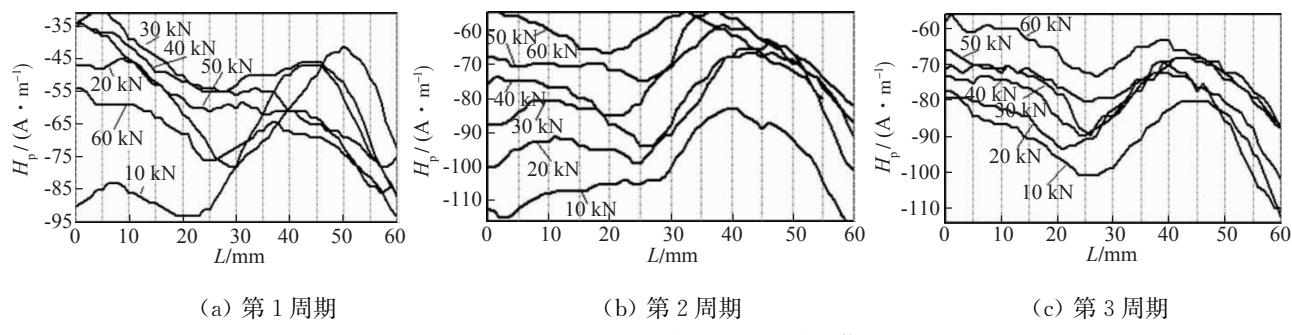


图 2 测试线 7 在三个周期上升阶段检测信号

下来,并在应力集中区形成类似缺陷的漏磁场分布。载荷反复施加之后,试件内部的磁饱和程度不断增加,磁记忆信号分布趋于稳定<sup>[5]</sup>。

## 2.2 多周期磁记忆信号特征

图3给出试件在动载试验加载前、断裂前及断裂后的焊缝横向磁记忆信号。由图3(a)可知,在多个循环周期结束后,横向检测信号基本趋于一致,可见1~5检测线均在35~45 mm处有过零点、极值

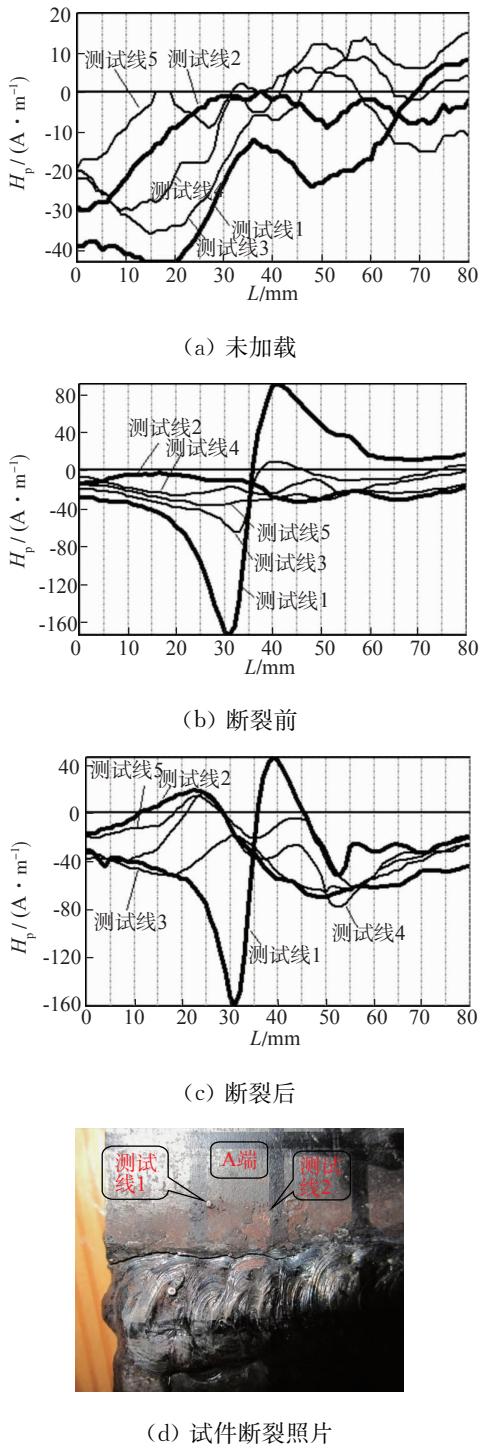


图3 焊缝横向磁记忆检测信号

等特征点,可判断此时在焊缝处存在较大的应力集中。在图3(b)试件断裂前即循环1 100千周时的测试信号中,测试线1发生了巨大的跳变,该信号在35 mm处过零点并完全分为正负两极,峰-峰值很大且梯度是其他测试线的5倍以上,此时测试线2未出现较大过零点波动,说明裂纹在测试线1处在萌生形成,未扩展到测试线2位置。随着疲劳损伤的不断累积,裂纹不断扩展,在图3(c)试件断裂后检测信号中,测试线2发生了明显的变化,在25~45 mm内出现过零点、极值点等特征,判断此时裂纹已经迅速扩展到测试线2位置,该结论被图3(d)焊缝裂纹照片验证。如此可见,磁记忆特征信号的变化准确预测了裂纹位置及扩展断裂的程度<sup>[6]</sup>。

## 3 分析与讨论

为进一步研究焊缝在周期载荷下磁记忆信号随加载次数与材料内部微观结构变化的关系,现提取试件中不同测试点信号进行分析,并寻求磁记忆信号与损伤度关系模型。

### 3.1 循环应力使自磁化增强

测试线7中点(焊缝中点)在三个周期中检测信号的变化如图4所示。由图4可知,在三个循环周期应力的波峰及波谷处,磁记忆信号随着循环周次的增加呈现上升的趋势,在载荷上升过程中的磁记忆检测信号的梯度较载荷下降过程中大,很好地反映了磁弹性效应原理(图5)。这表明在多周期循环应力和外磁场的作用下,残余磁感应强度和自磁化不断增强,在逆磁致伸缩效应的作用下,引起磁畴壁

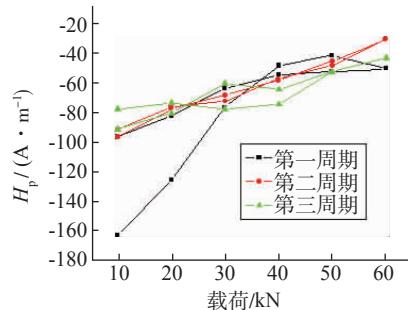


图4 焊缝中点三个周期检测信号变化

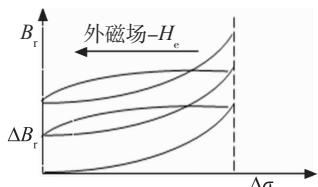


图5 磁弹性效应原理

位移,并改变自发磁化方向。由于巴克豪森效应,磁畴壁的这种迁移是不可逆的,导致了残余磁感应强度  $\Delta B_r$  和自磁化不断增强<sup>[7]</sup>。

### 3.2 疲劳累积损伤程度的磁记忆表征及模型

为寻求磁记忆信号与疲劳累积损伤程度的关系,将焊缝测试线 8 上距试件左端分别为 2, 8, 20, 30, 50 mm 处的磁记忆信号与循环周次的变化关系绘成图 6。可以看出,5 条曲线的前半段体现出很强的一致性,后半段稍有不同。前半段均表现为在初始阶段信号有一定的起伏,随着加载次数的增加,信号进入一个平稳的阶段,在疲劳循环进行 500 千次时,信号出现突然跳变。再次经过一个平稳期后,1 100 千次成为裂纹产生的临界点,磁记忆信号陡增随后出现急剧下跳的情况。分析以上曲线变化的原因,初始阶段信号强度较高是由于焊缝处存在加热不均匀和缺陷等因素导致的较大的应力集中,随着加载次数的增加,试件内部的应力集中重新分布趋于稳定<sup>[8]</sup>。伴随着载荷次数的增加,材料晶格中开始出现位错和滑移,滑移带高度集中到一定程度导致微裂纹萌生,磁记忆信号出现突然地跳变。随着微裂纹互相汇合并扩展到一定程度,试件的剩余截面积不能承受载荷而产生突然断裂,磁记忆信号在临界断裂时出现巨大跳变<sup>[9-10]</sup>。由于磁记忆信号能够反映疲劳累积损伤不断加剧的过程,因此可以在试验数据的基础上建立磁记忆信号与疲劳累积损伤度的关系模型。

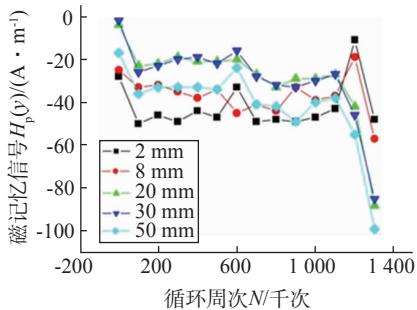


图 6 焊缝上各点磁信号

依据线性累计损伤 Miner 理论,可依据式(1)的疲劳破坏判据,确定在不同循环周次下的损伤度:

$$D = \sum_k D_k = \sum_k \frac{N_k}{N_{f_k}} \leqslant 1 \quad (1)$$

式中  $D$  为损伤度;  $N_k$  为在应力幅  $\sigma_k$  下的疲劳循环次数;  $N_{f_k}$  为应力幅  $\sigma_k$  下疲劳寿命。

为了建立磁记忆信号与疲劳损伤度的关系模型,定义  $\Delta H_p(y)_i$  为不同循环周次下的磁记忆信号值与初始信号的差值,  $\Delta H_p(y)$  为磁记忆信号最大值与最小值之差,即  $\Delta H_p(y) = H_p(y)_{\max} - H_p(y)_{\min}$ 。将磁记忆信号进行归一化处理,则磁记忆

信号变化率  $\delta H_p(y)$  为:

$$\delta H_p(y) = \left| \frac{\Delta H_p(y)_i}{\Delta H_p(y)} \right| \quad (2)$$

由此绘出各点磁记忆信号归一化变化率与循环周次关系如图 7 所示,进一步依据式(1),将不同循环周次换算为损伤度  $D$ ,并对图 7 中 5 条磁记忆信号归一化曲线求平均值,得损伤度  $D$  与磁记忆信号归一化变化率  $\delta H_p(y)$  平均值对应关系,见表 1。

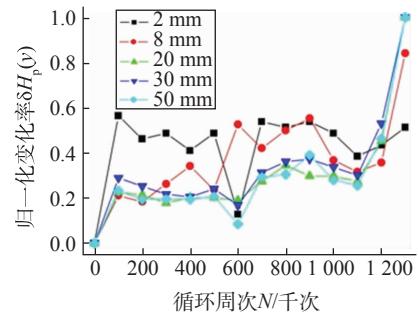


图 7 磁记忆信号变化率

表 1 损伤度与信号变化率对应关系

$D$	$\delta H_p(y)$ 平均值	$D$	$\delta H_p(y)$ 平均值	$D$	$\delta H_p(y)$ 平均值
0	0	0.38	0.275	0.77	0.354
0.08	0.304	0.46	0.220	0.85	0.306
0.15	0.262	0.54	0.368	0.92	0.408
0.23	0.268	0.62	0.405	1	0.871
0.31	0.271	0.69	0.430		

对表 1 的数据进行拟合,得到指数函数模型见图 8。

$$\delta H_p(y) = 0.000\,12 \times \exp\left(\frac{D}{0.117\,49}\right) + 0.268\,62 \quad (3)$$

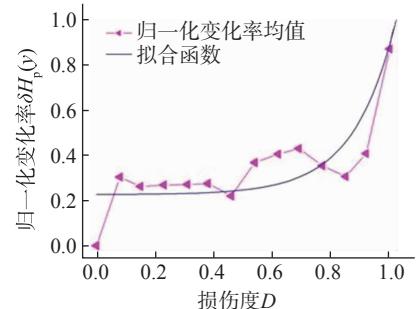


图 8 损伤度与信号归一化变化率关系及拟合函数

由于疲劳损伤是一个累积的过程,而构件的磁场强度也是一个累积的过程,在反复的加载过程中,伴随着构件内部位错的发生,磁畴壁的位移也在继续增加,磁场强度随着位错的数量增多呈现一定

的正相关性。当位错的数量足够大,位错相互连通继而形成裂纹时,畴壁的移动更加剧烈,导致磁场强度的变化率加大。当构件断裂时,磁场强度达到顶峰。由表1和图8可以看出,当磁记忆归一化变化率 $\delta H_p(y)$ 在0.21~0.27之间变化时,疲劳损伤度最高为0.46,平均疲劳寿命已近30%,应该引起警示;当 $\delta H_p(y)$ 在0.3~0.5之间变化时,疲劳损伤度最高达0.85;当 $\delta H_p(y)$ 为0.5时,疲劳寿命近90%,处于临界断裂状态。由此可见,磁记忆信号的归一化变化率可以很好地表征疲劳累积损伤程度,反映构件疲劳损伤演化过程并能够预测焊缝的剩余寿命,为防止焊缝断裂等安全生产提供保障。

## 4 结论

(1) 在单周期加载过程中,焊缝初始残余应力较大,磁记忆信号无规律跳变。随着拉伸载荷的不断增加,试件内部的磁饱和程度不断增加,焊缝纵向磁记忆曲线整体不断向上移动,分布趋于稳定。

(2) 在多周期循环加载过程中,焊缝的磁记忆信号随着循环周次的增加,呈现螺旋上升的趋势,很好地验证了磁弹性效应理论。

(3) 焊缝横向磁记忆信号在应力集中区有局部极值、拐点或过零点等信号特征,并在裂纹形成的临界点出现巨大的过零点跳变峰-峰值,而裂纹未扩展处无此特征信号,磁记忆特征信号的变化能准确反映裂纹位置及扩展断裂的程度。

(4) 通过观察磁信号的变化趋势,综合分析采集到的信号特征点,建立损伤度与磁记忆信号函数

(上接第3页)

频涡流检测无法完成的任务。可以预期,随着电磁涡流检测理论的深入研究,电子技术与计算机技术的迅速发展,多频涡流和脉冲涡流检测技术必将成为电磁检测技术领域的重要组成部分。

## 参考文献:

- [1] 任吉林,林俊明.电磁无损检测[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 杨宾峰,罗飞路.脉冲涡流无损检测技术应用研究[J].仪表技术与传感器,2004(8):45—46.
- [3] 张斌强,田贵云.脉冲涡流检测技术的研究[J].无损检测,2008,30(10):750—753.
- [4] 雷银照.电磁场[M].北京:高等教育出版社,2008.
- [5] 林俊明.多频涡流检测原理及应用[J].无损检测,模型,判断试件内部损伤状态预测焊缝剩余寿命,对保障安全生产有重要意义。
- [6] Doubov A A. Diagnostics of metal and equipment by means of metal magnetic memory[C]. Proceeding of Seventh Conference on NDT and International Research Symposium. Shantou, China, 1999: 181—187.
- [7] Doubov A A. Technical diagnostics of equipment and constructions with residual life assessment using the method of metal magnetic memory[C]. 17th World Conference on Nondestructive testing, Shanghai, China, 2008: 25—28.
- [8] 林俊明,林春景,林发柄.基于磁记忆效应的一种无损检测新技术[J].无损检测,2000,22(7):297—299.
- [9] 李国栋.当代磁学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999.
- [10] 邸新杰.焊接裂纹的金属磁记忆信号定量化特征研究[D].天津:天津大学,2007.
- [11] 邢海燕,陈鑫彧,黄保富,等.拉压载荷下焊缝的磁记忆表征及热处理评价[J].大庆石油学院学报,2011,35(1):100—104.
- [12] 邸新杰,李午申,白世武.焊接裂纹金属磁记忆信号的特征提取与应用[J].焊接学报,2006,27(2):19—22.
- [13] 邢海燕,樊久铭,王日新,等.早期损伤临界应力状态磁记忆检测技术[J].哈尔滨工业大学学报,2009,41(5):26—30.
- [14] 刘红光,张卫民,王朝霞.基于磁记忆法的焊接缺陷检测技术研究[J].北京理工大学学报,2007,27(9):811.
- [15] 王文江,戴光.疲劳断裂试件磁记忆检测结果及分析[J].大庆石油学院学报,2005,29(4):83—85.
- [16] Sophian A, Tian G Y, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT[J]. NDT&E International, 2003, 36(1): 37—41.
- [17] Smith R A, Hugo G R. Transient eddy current NDE for aging aircraft—capabilities and limitations[J]. Insight, 2001, 43(1): 14—25.
- [18] 杨宾峰.脉冲涡流无损检测若干关键技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [19] 林俊明,陈开慧.多频多通道数字涡流检测仪的研制与应用[J].火力发电,1996(2):35—38.
- [20] 高亮,刘自强.凝汽器钢管多频涡流检测[J].湖北电力,2000,24(1):22—23.
- [21] 张姚.频涡流检测合成塔换热列管[J].无损探伤,2006(6):36—42.