

# 焊缝的超声波检测与有限元仿真

陈汉新,余刚,杨诗琪,刘岑,孙魁

武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

**摘要:**为了避免超声波在检测焊缝的过程中因噪声信号干扰而导致结果的错估,首先采用 MUTLI 软件中的超声波衍射时差法(TOFD)来检测人为的焊缝缺陷试块,得到准确的 A 扫图与 TOFD 图像;然后利用 ANSYS 软件模拟仿真超声波的检测过程,根据惠更斯原理建立超声波检测的有限元数值模型.将超声波的传播过程看做对试块的加载过程,从不同的节点上施加具有时间延迟的载荷,得到声压幅值图像.对比分析实验幅值图像与仿真幅值图像,两种图像的相似度很高,证实有限元仿真方法有助于超声波对焊缝的检测.从仿真的幅值图像中可以判定实验图像中的干扰信号,对检测结果的误差分析具有很大的帮助.

**关键词:**超声波衍射时差法;焊缝;有限元

**中图分类号:** TB553

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1674-2869.2014.05.012

## 0 引言

焊接技术现在在各种领域应用十分广泛,特别是锅炉、压力容器、压力管道和各种钢结构都是采用焊接方法制造的,通过焊接加工的钢材几乎占世界钢材产量的 50% 以上.超声检测是提供焊接接头质量评价数据和焊缝缺陷定位的重要无损检测手段之一. TOFD 技术最早是在 20 世纪 70 年代提出来的,原理是超声波在检测时会出现衍射现象, M J Silk 发现了这个重要的现象并将其用到超声检测当中<sup>[1]</sup>. TOFD 将探头对称分布于焊缝两侧,一个发出信号,另一个接收信号.检测到缺陷时,接收探头可以接收到直通波与反射波之间的衍射波.用 Mutli 软件不仅可以自由设置超声波检测过程的各种参数,还可以轻易得出 A 扫描信号和 TOFD 图像, TOFD 图像是将每个 A 扫描的信号显示成的一维图像线条沿探头的运动方向拼接成的二维视图<sup>[2]</sup>.

用有限元 ANSYS 软件对超声波在固体中的传播过程进行仿真建模是将要检测的试件看做是向同性均匀的<sup>[3]</sup>. 超声波的传播是对物体具有声压的,所以本研究主要是将波的传播过程看做是对物件的加载过程,从而得出的仿真结果与实验室检测的结果进行对比.期望在这方面能够对超声波的检测有更多的实际帮助<sup>[4]</sup>.

## 1 实验部分

### 1.1 焊缝自然缺陷的分类

焊缝缺陷根据其性质、特征主要分为以下 6 个大类:(1)裂纹:纵向与横向裂纹,弧坑裂纹与支状裂纹等.(2)孔穴:气孔,结晶缩孔,弧形坑孔等.(3)固体夹杂:夹渣,焊剂与溶剂夹渣,氧化物和金属夹杂等.(4)未焊透及未熔合.(5)形状和尺寸不良:咬边,缩沟,下榻,焊瘤,错边,烧穿,未焊满等.(6)其它缺陷:电弧擦伤,飞溅等<sup>[5]</sup>.

在上述 6 种常见的缺陷中,肉眼可看见表面缺陷,不用检测;未熔合和未焊接在检测中很难区分开,所以不适合使用 TOFD 法检测,这里不作过多表述.内部缺陷包括气孔与夹杂,非内部缺陷则包括根部、边缘、焊缝表面起的纵深裂纹等.焊缝中的横向裂纹以及横向排列的气孔夹杂等通过射线检测后能得到相当精确的成像,但对于纵向排列的缺陷来说,射线检测具有很大的局限性,焊缝最上方的缺陷或者最大的缺陷会将射线底片中所有的纵向缺陷的成像掩盖<sup>[6]</sup>.因此焊缝内部缺陷的检测是本文的主要研究对象<sup>[7]</sup>.

### 1.2 模型的建立

图 1 是 TOFD 检测中 5 种常见的纵向自然缺陷.图 1(a)纵向裂纹;图 1(b)气孔与夹杂;图 1(c)侧壁未熔合;图 1(d)根部未焊透;图 1(e)内凹与根部未融合.建模过程中首先根据要检测的试

件的尺寸建立二维模型,然后根据检测的结果在试件中勾画出缺陷模型.对于简单的裂纹气孔缺陷可以直接在 ANSYS 直接建模;对于侧壁、根部未熔合等不规则的缺陷可以在 CAD 软件上建模然后导入到 ANSYS 中.

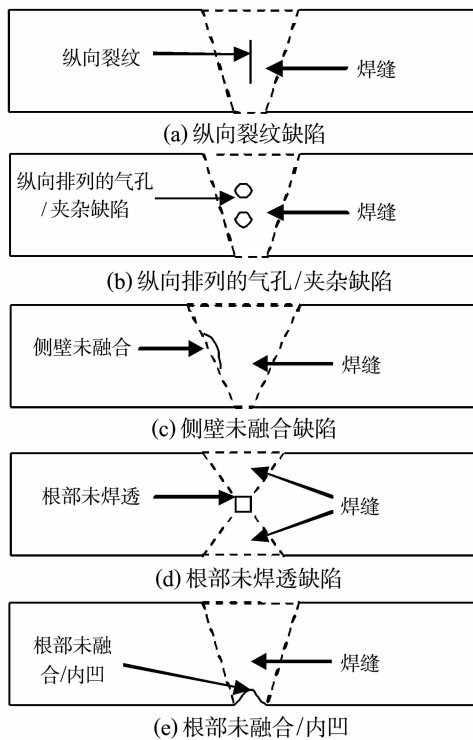


图 1 焊缝中 5 种常见的纵向自然缺陷示意图

Fig. 1 Five kinds of common vertical natural defects in weld

### 1.3 实验对象

焊缝缺陷的 TOFD 法检测.检测的对象是实验室中定制的人为制作的纵向排列气孔类型的自

然缺陷试件,如图 2 所示.实验的时候将探头沿着焊缝方向上下移动,观察其 A 扫图与 B 扫图. A 扫图是将超声信号的幅度与传播的关系以直角坐标的形式显示出来,横坐标代表波的传播时间,纵坐标代表信号幅度. B 扫图显示的是与声束传播方向平行且与工件的测量表面垂直的剖面.



图 2 缺陷试块

Fig. 2 Natural welding defects test block

### 1.4 实验方法与结果

将相控阵探头沿着焊缝一侧移动,在没有缺陷的时候将会在图 3 左边 A 扫图中显示探头表面、探头与楔块之间、楔块与被检测物体之间的反射波,没有缺陷回波的出现.右边的 B 扫图中也没有缺陷出现.

当探头移动至有缺陷的位置时,此时的 A 扫图中不仅出现以上 3 种反射波,还会出现缺陷回波, B 扫图中也会出现缺陷的位置,如图 4 所示.

沿着两个缺陷范围拖动坐标指针,记录指针的几何位置与缺陷位置幅值的变化,可以预判缺陷的大小位置,将其几何示意图的形式表示出来,如图 5 所示.

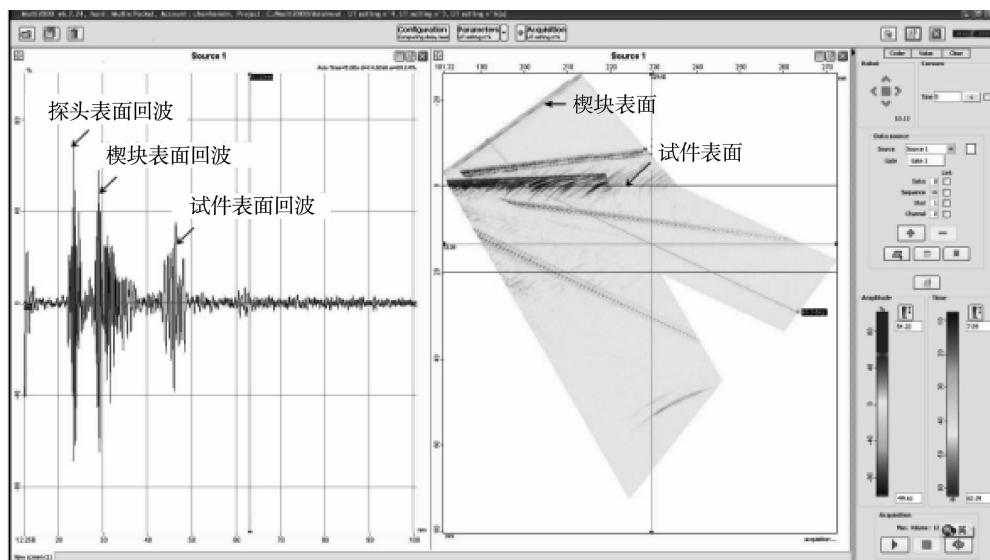


图 3 无缺陷的情况

Fig. 3 The condition without any kind of defects

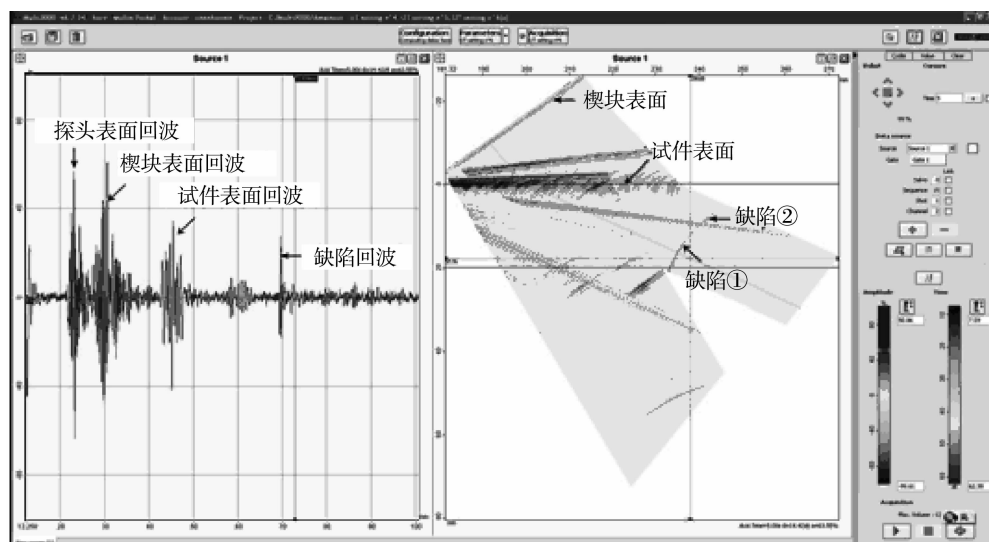


图4 有缺陷的情况

Fig. 4 The condition with defects

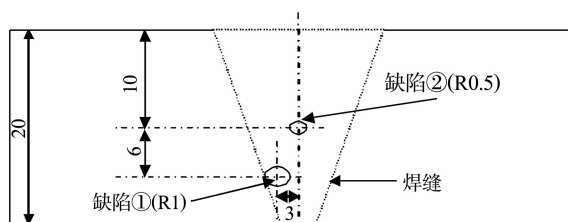


图5 自然缺陷的几何示意图

Fig. 5 Natural defects of weld geometry diagram

在检测出实际的焊缝位置出来后,用 TOFD 法检测该处缺陷.在试验的时候将两个探头固定在缺陷两端,如图 6 所示.在 A 扫图中已经观测出来 4 种波,所以用不同的灰度就可以将其表现出

来,如图 7 所示.这样有利于方便波形的辨认与检测判定,强调的是此灰度图只是缺陷局部,而不是整体焊缝的情况.

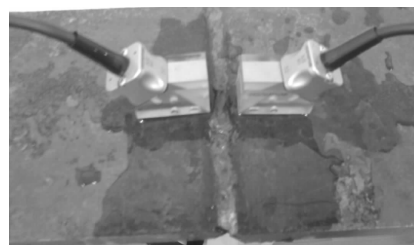


图6 TOFD 检测探头分布

Fig. 6 TOFD detection probe distribution

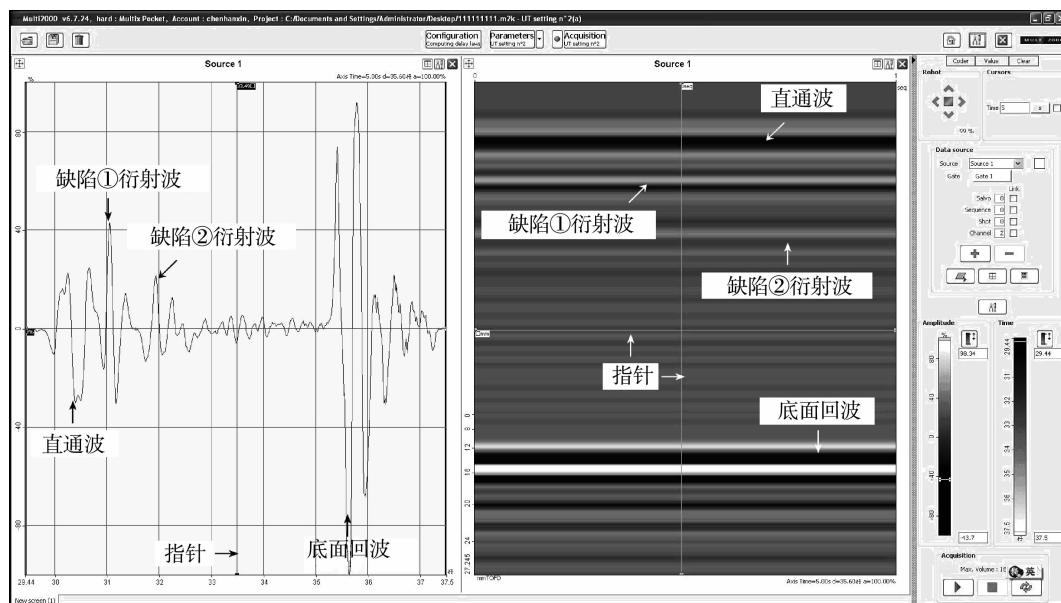


图7 TOFD 法检测焊缝的结果图

Fig. 7 The results of the weld detection with the TOFD method

## 2 仿真部分

### 2.1 仿真原理

TOFD 技术是基于焊缝中裂纹的上下尖端所产生的衍射波传播的时间差值来确定裂纹尺寸的大小. 在试验部分中, 所选的探头具有 32 个晶片, 可以选择其中的一系列晶片来施加特定规则的时间脉冲来控制超声波的发射角度. 所以仿真的过程就是模拟超声波探头在检测试件表面上一系列特定节点上施加不同的脉冲信号[8].

仿真的重点就是在不同的节点处施加具有时间延迟的载荷, 这是根据惠更斯原理[9]中, 声束的角度( $\vartheta$ )、速度( $V$ )、相邻晶片的时间延迟( $\Delta t$ )、相邻晶片之间的距离( $d$ )的数学关系方程(1)决定的:

$$\sin \vartheta = \frac{V \Delta t}{d} \quad (1)$$

而脉冲激发的延时方程则通过分段函数来实现. 第一个节点施加的方程是方程(2):

$$Y_{(t)} = \begin{cases} \cos(2\pi f t) \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi f t}{3}\right) \right] & 0 \leq t \leq 0.6 \mu\text{s} \\ 0 & 0.6 \mu\text{s} < t < 50 \mu\text{s} \end{cases} \quad (2)$$

第  $N$  个节点施加的载荷方程是方程(3):

$$Y_{(t)} = \begin{cases} 0, 0 < t < (N-1) * 0.106 \mu\text{s} \\ \cos(2\pi f t) \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi f t}{3}\right) \right] & (N-1) * 0.106 \mu\text{s} \leq t \leq [0.6 + (N-1) * 0.106] \mu\text{s} \\ 0, [0.6 + (N-1) * 0.106] \mu\text{s} < t < 50 \mu\text{s} \end{cases} \quad (3)$$

在特定节点施加延迟方程可以得到具有非常好指向性的波阵面, 其中图 8 是在 13 个节点施加脉冲的效果.

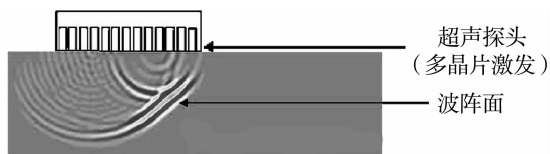


图 8 具有良好指向性的波阵面图

Fig. 8 The good directivity of wavefront

### 2.2 仿真结果

按照焊缝自然缺陷建立的检测模型如图 9 所示. 其中图 9(a)、图 9(b)、图 9(c) 分别表示波在  $1.5 \mu\text{s}$ 、 $2.5 \mu\text{s}$ 、 $3.5 \mu\text{s}$  这 3 个不同的时刻的传播过程图.

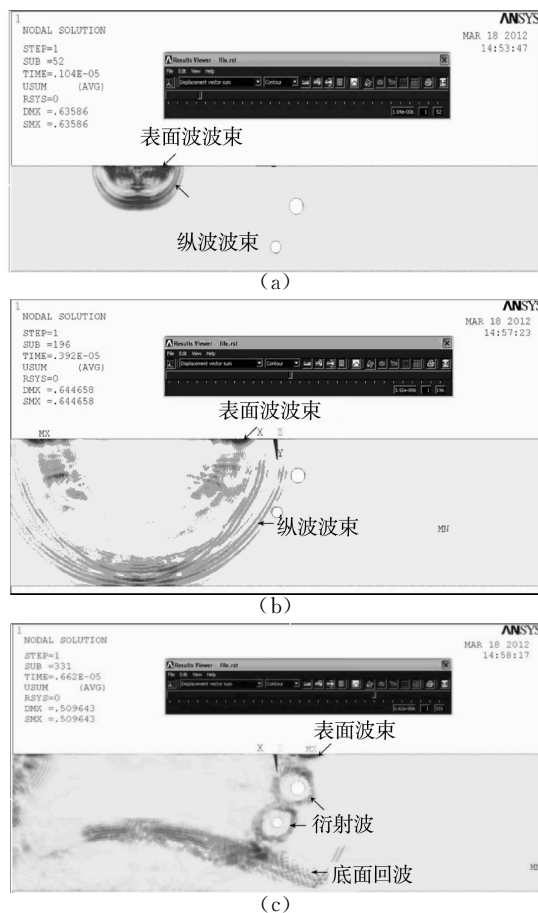


图 9 不同时刻提取的传播过程图

Fig. 9 The spread process of different time extraction

## 3 对比结果以及结论分析

规定满屏信号的幅值为 10%. 以缺陷回波所占的百分比作为纵坐标, 超声波传播的时间为横坐标. 将 TOFD 法检测自然缺陷的实验结果与仿真结果对比, 如图 10 所示.

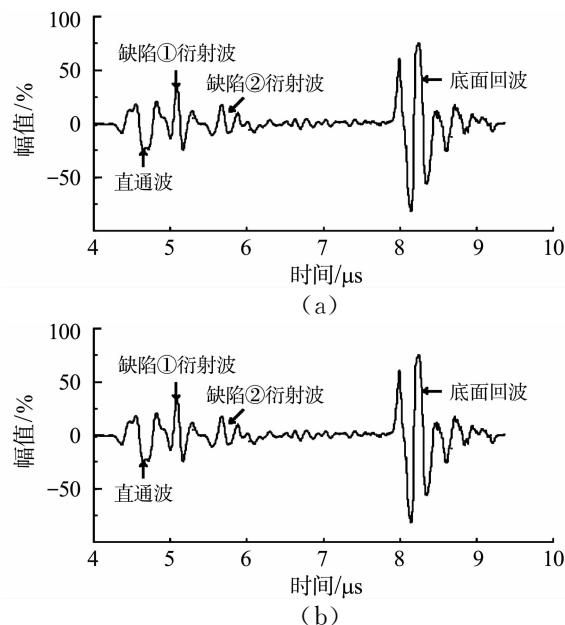


图 10 两种方法的幅值对比图

Fig. 10 Two methods of amplitude comparison

从表面波、衍射波及底面反射波三个方面来值作为标准,计算误差如表 1 所示。  
就理论计算值、实验值、仿真值进行归纳,以理论

表 1 三种方法的计算结果对比  
Table 1 Result comparison of three methods

	直通波 / $\mu\text{s}$	误差/ $\%$	缺陷① 衍射波/ $\mu\text{s}$	误差/ $\%$	缺陷② 衍射波/ $\mu\text{s}$	误差/ $\%$	底面回波 / $\mu\text{s}$	误差/ $\%$
理论值	4.8	/	5.0	/	5.8	/	8.1	/
实验值	4.7	-2.1	5.1	2	5.8	0	8.2	1.2
仿真值	4.4	-8.3	5.1	2	5.9	1.7	8.2	1.2

从表 1 中可以清晰的看到,直通波实验值误差为-2.1%,仿真值为-8.3%,均为负误差,试验中出现这种误差的原因很可能是因为两个探头之间的排距不够精确造成的;衍射波的实验值误差为 2.0%,仿真误差几乎为 0,由此可见对衍射波进行仿真的准确性,应该是 TOFD 法仿真的准确性;底面回波的两个误差均为 1.2%,可见仿真的手段在实际检查缺陷的时候是有发挥的空间的.当然数值仿真也有其失真的一面.在试验部分,如果没有灰度图的辅助判断,直通波的幅值和衍射波的相差不大,而且容易与噪音混合.在仿真部分,直通波与衍射波的区分度很高,很容易被观察到.

对超声波检测的有限元数值仿真,是本文最中心的部分,以超声波检测的过程作为载荷加载的过程来仿真是非常有效的,也是比较精确的.希望以后仿真能够在超声波检测这一行业中发挥更大的作用.

致 谢

感谢北京矩阵科技公司的技术工程师对本研究的支持和帮助,感谢蔡洪涛老师的帮助.

参考文献:

[1] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:137-141.  
ZHENG Hui,LIN Shu-qing. Ultrasonic testing[M]. Beijing:China Labor and Social Security Publishing House,2008:137-141. (in Chinese)  
[2] 魏东,周正干. 固体中脉冲超声波传播的有限差分模拟[J]. 航空学报,2010(2):387-388.  
WEI Dong,ZHOU Zheng-gan. Finite difference simulation of pulsed ultrasonic wave propagation in sol-

ids[J]. Aeronautics,2010(2):387-388. (in Chinese)  
[3] 孙魁. 基于超声波信号的焊缝评估研究[D]. 武汉:武汉工程大学,2013.  
SUN Kui. The base of ultrasonic signal weld evaluation research[D]. Wuhan:Wuhan University of Engineering,2013. (in Chinese)  
[4] 龚曙光. ANSYS 软件在应力分析设计中的应用[J]. 计算机辅助设计与制造,2001(7):21-23.  
GONG Shu-guang. The application of ANSYS software in the stress analysis and design[J]. Digital Manufacturing Indus-try, 2001(7): 21-23. (in Chinese)  
[5] 迟大钊,刚铁,高双胜. 超声 TOFD 法检测信号相位识别技术[J]. 焊接学报,2011(9):17-20.  
CHI Da-zhao, GANG Tie, GAO Shuang-sheng. Ultrasonic TOFD method to detect the signal phase recognition technology[J]. Welding Journal, 2011(9): 17-20. (in Chinese)  
[6] 王文先,王东坡,齐芳娟. 焊接结构[M]. 北京:化学工业出版社,2012.  
WANG Wen-xian, WANG Dong-po, QI Fang-juan. Welding structure[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2012. (in Chinese)  
[7] 史亦伟. 超声检测[M]. 北京:机械工业出版社,2000.  
SHI Yi-wei. Ultrasonic testing[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2000. (in Chinese)  
[8] GINZEL E. Materials research institute etc,time-of-flight diffraction and pulse echo line scanning[J]. NDT,2000(6):64-68.  
[9] 赵维涛,陈孝珍. 有限元法基础[M]. 北京:科学技术出版社,2009.  
ZHAO Wei-tao,CHEN Xiao-zhen. The base of finite element method[M]. Beijing:Science and Technology Press,2009. (in Chinese)

## Ultrasonic detection in weld with finite element analysis

CHEN Han-xin, YU Gang, YANG Shi-qi, LIU Cen, SUN Kui

School of Mechanical and Electric Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430025, China

**Abstract:** To avoid the misestimate of detection results that caused by the noise signal in the process of weld ultrasonic testing during practical detection, Firstly, the weld defects in artificial sample were detected by the ultrasonic time of flight diffraction method (TOFD) of Mutli software in the experiment, and A scan and TOFD images were obtained; secondly, the propagation of ultrasound in artificial defect test block was simulated by ANSYS software, and the numerical model of ultrasonic testing was established according to the Huygens principle. The diagram of sound pressure amplitude was obtained by imposing the different time delay nodes on load, in which the ultrasonic propagation process was seen as the process of exerting load. Simulation results are compared with the experimental results, showing the high similarity, which demonstrates that the finite element simulation method is useful to assist ultrasonic testing of welds. The interference signals determined from the simulation of the ultrasonic propagation is helpful to error analysis of the test results.

**Key words:** time of flight diffraction method; weld; finite element

本文编辑:陈小平



(上接第 52 页)

## Creep behavior of 25Cr2MoVA steel and 15CrMo steel

YU Jiu-yang<sup>1</sup>, WANG Ming-wu<sup>1</sup>, ZHANG Hong-cai<sup>2</sup>, ZHENG Xiao-tao<sup>1</sup>, SANG Cong<sup>1</sup>

1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Hubei Chemical Fertilizer Branch Co., SINOPEC, Zhijiang 443200, China

**Abstract:** High temperature tensile test and creep test were randomly conducted on several standard samples at 500 °C using RPL50 testing machine of high temperature creep fatigue, then the force-displacement curves and the creep curves of 25Cr2MoVA steel and 15CrMo steel were drawn. The results show that the yield stress of 25Cr2MoVA is 310 MPa and the yield stress of 15CrMo is 292 MPa at 500 °C; the strain of 25Cr2MoVA increases quickly, then strain velocity decreases rapidly to a constant quantity at 300 MPa and 500 °C, which satisfies the creep law; the creep behavior of 15CrMo is found in accordance with creep law at 250 MPa and 500 °C; the evolution equations of 25Cr2MoVA steel and 15CrMo steel are obtained by fitting the creep data, in which the average relative error between linear regression results and the experimental values of 25Cr2MoVA steel is 2.01%, and the average relative error between linear regression results and the experimental values of 15CrMo steel is 2.01%.

**Key words:** flange connection system; tension; creep

本文编辑:陈小平