

# 管道多缺陷对涡流检测影响的仿真

宋 盼

(上海市特种设备监督检验技术研究院,上海 200333)

**摘要:**由于金属构件缺陷各异,损伤部位可能存在多个缺陷,为了实现涡流检测的可靠性评价,建立了含两个矩形槽缺陷的管道二维轴对称有限元模型,计算了信号的相位和幅值。仿真结果表明,多缺陷对涡流信号的影响不同于单一缺陷,且随激励频率不同,阻抗信号偏差不同;而在进行缺陷定量表征时,缺陷的几何状态(深度、宽度、内外壁状况)会对深度较小缺陷的定量表征有影响,引起损伤评价不当,可参考幅值细致分析此影响。

**关键词:**多缺陷;相位;有限元分析;涡流检测

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2013)01-0042-04

## Stimulation on Eddy Current Testing Signal Under Multiple Defects of Pipeline

SONG Pan

(Shanghai Institute of Special Equipment Inspection and Technical Research, Shanghai 200333, China)

**Abstract:** The defects of metal components change greatly for various reasons and there may be multiple defects in damage location. A 2D model of an axisymmetric probe coil is developed to achieve the reliability of eddy current testing(ECT). The model of ECT is applied to the simulation of two defects in the presence of a pipe line. The variations of the amplitude and phase of ECT signal with the change of geometric state of two defects are computed in this paper. The stimulation results show multiple defects on the eddy current signal are different from the single defect. There are different deviations of composite signal with the exciting frequency change. The different geometric state of defects near damages location will also have impacts on composite signal of those defects which have less depth. This can cause inappropriate damage evaluation, but it can get a careful analysis through the difference of the amplitude for composite signal.

**Keywords:** Multiple defect; Phase; Finite element analysis; Eddy current testing(ECT)

涡流检测具有检测灵敏度高、速度快、易于自动化等优点,广泛应用于各种金属材料的检测,如核电厂蒸汽发生器管道等<sup>[1]</sup>。在对非铁磁性管道实施检测时,导体中的缺陷影响了涡流的强度和分布,进而导致检测线圈的阻抗发生变化。研究结果表明,缺陷的深度与检测信号的相位呈现一定的规律,可以定量表征缺陷<sup>[2-4]</sup>。然而实际工件损伤情况各异,很多管道可能存在多个缺陷,它们聚集在一起是否

会干扰人们对缺陷严重程度的判别,目前并不是很清楚,因此,对此方面的研究有着重要的意义。

涡流检测缺陷深度的定量分析已有很多研究,如韩捷等<sup>[5]</sup>用 CEddy-Sim 软件对多缺陷传热管道进行了仿真,并对缺陷深度定量可靠性分析作了归纳,但没有对比内外壁缺陷以及不同频率下的阻抗信息差异。况旭冉等<sup>[6]</sup>发现深度为 0.15 mm 附近相差 0.05 mm 的裂纹信号相位难以分辨,提出可以利用幅值区分开;John 等<sup>[7]</sup>采用脉冲涡流热成像检测铁轨多缺陷信号,但区别于传统的涡流检测。Joubert 等<sup>[8]</sup>采用多探头并结合信号处理的方法改善了磁场扰度对区分管道缺陷深度产生的影响,但对多缺陷存在的情况分析不多。

收稿日期:2011-12-01

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(11ZR1433400);上海市启明星基金资助项目(11QB1405300)

作者简介:宋 盼(1984—)男,硕士,从事承压类特种设备无损检测技术研究及应用工作。

笔者建立了内插式涡流探头检测管道的有限元模型,以矩形槽表征裂纹类缺陷,计算了探伤时检测线圈的阻抗变化,分析了内外壁阻抗信号相位和幅值随矩形槽深度的变化规律,研究了双缺陷几何状态变化以及检测频率对阻抗信号的影响,以期对涡流检测的工程实践具有指导作用。

## 1 仿真模型及阻抗计算

### 1.1 管道涡流检测的有限元模型

图1是内插式涡流探头检测不锈钢管(Inconel 690)的涡流检测模型,考虑模型的对称性,使用2D轴对称模型替代三维实体模型。被检管道内径 $D=24\text{ mm}$ ,壁厚 $H=2\text{ mm}$ ,长度 $L=70\text{ mm}$ 。涡流检测线圈内径 $d_1=16\text{ mm}$ ,外径 $d_2=19\text{ mm}$ ,线圈宽度 $l=1.5\text{ mm}$ ,间距 $d=1.5\text{ mm}$ 。管内除了线圈皆充满空气,为了灵活运用网格划分、减少计算量,同时确保仿真精度,在管外自由区建模时设置了圆柱环形空气,空气层厚度为13 mm。管壁的缺陷均为矩形槽缺陷。如图1所示,矩形槽宽度 $c_1$ 和 $c_2$ ,深度 $h_1$ 和 $h_2$ ,两矩形槽间距为 $w$ 。缺陷在管壁上的位置如图1所示,I区表示外壁缺陷、II区表示内壁缺陷、III区表示内外壁缺陷。检测管道的相对磁导率为1,电导率为 $1.03 \times 10^6\text{ S/m}$ ;检测线圈的相对磁导率为1,电导率为 $0.58 \times 10^8\text{ S/m}$ ;线圈匝数 $N=200$ 。

模型网格划分如图2所示,对模型划分网格时,

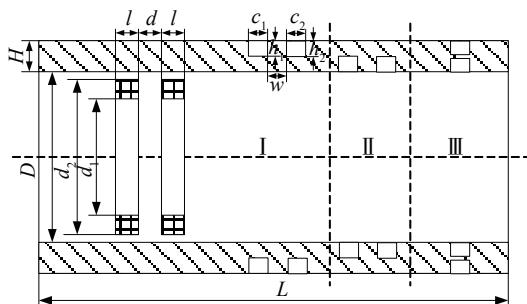


图1 管道检测有限元模型

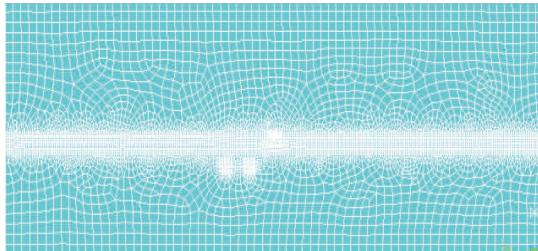


图2 有限元模型网格划分

考虑到集肤效应,在导体表面附近必须要划分足够细的有限元网格,通常在集肤深度内至少要划分2层到3层单元。集肤深度按式(1)计算:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1)$$

式中: $\delta$ 为被测导体表面的集肤深度,m; $f$ 为线圈的激励频率,Hz; $\mu$ 为被测导体的磁导率,H/m; $\sigma$ 为被测导体的电导率,S/m。

网格划分完后,对模型加载边界条件和载荷,外边界施加平行边界条件,对称轴上自动满足条件。线圈加载电压有效值为12 V,两线圈相位相差180°,线圈耦合电流自由度CURR。模型计算求解后可获得其磁通密度、磁力线图及线圈阻抗等结果。

### 1.2 阻抗计算

线圈的阻抗计算,可由线圈模型上某一点的电压和电流进行求得。时谐分析的计算结果分为实部与虚部,分别在ANSYS后处理中读入,可得线圈上的实部电流为 $I_R$ ,虚部电流为 $I_I$ ,然后可根据式(2)得出线圈的阻抗 $Z$ :

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{V_0}{I_R + jI_I} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}$ 为端口激励电压,V; $\dot{I}$ 为端口电流,A; $V_0$ 为标量电压值。

为保证曲线光滑连续,移动差动探头步进距离为0.2 mm,以阻抗实部 $Z_R$ 为横坐标,阻抗虚部 $Z_I$ 为纵坐标构成阻抗平面图,也即“8字”图形。

## 2 结果分析及讨论

### 2.1 不同频率对单缺陷和双缺陷检测信号的影响

涡流线圈的激励系统参数如前所述,槽宽和槽深都为1 mm,槽与槽之间间隔为0.2 mm。由图3可见,当激励频率从50 kHz增加到500 kHz时,无论是内壁还是外壁,单一缺陷和双缺陷的阻抗幅值都存在一定的差异,且在这个频率范围内,内壁缺陷

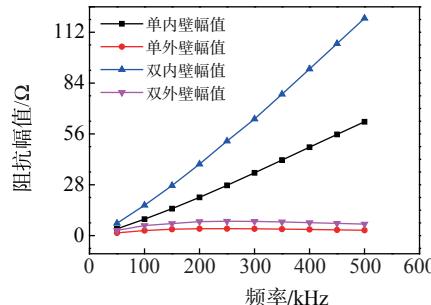


图3 频率对缺陷信号幅值的影响

阻抗幅值最大差值为  $57.010 \Omega$ , 频率为  $500 \text{ kHz}$  时, 最小为  $3.060 \Omega$ ,  $50 \text{ kHz}$  时; 外壁缺陷阻抗幅值最大差值为  $4.081 \Omega$ , 频率为  $250 \text{ kHz}$  时, 最小为  $1.385 \Omega$ ,  $50 \text{ kHz}$  时。可见, 随频率增大, 内壁缺陷阻抗幅值变化明显大于外壁缺陷, 但在低频时, 两者都会呈现较小的差异。图 4 结果表明, 激励频率由  $50 \text{ kHz}$  增至  $500 \text{ kHz}$  时, 无论是内壁还是外壁, 单一缺陷和双缺陷相位角都相差不大, 其中, 内壁最大相位差为  $2.29^\circ$ , 外壁为  $6.31^\circ$ 。由此可知, 当管壁存在多个缺陷时, 激励频率对检测信号的幅值影响比较大, 而对相位影响较小, 其中频率增大对内壁缺陷阻抗幅值的影响明显大于对外壁的影响。

## 2.2 双缺陷间距对检测信号的影响

当槽宽和槽深都为  $1 \text{ mm}$ , 槽与槽之间间隔  $w = 0.2 \sim 4 \text{ mm}$ , 激励频率为  $200 \text{ kHz}$  时, 单一内壁缺陷的阻抗幅值和相位分别为:  $21.058 \Omega$  和  $69.36^\circ$ , 外壁分别为:  $3.795 \Omega$  和  $1.41^\circ$ 。图 5 和图 6 分别显示了内外壁双缺陷阻抗信号特征(幅值和相位)与单一缺陷阻抗信号特征的差值。由图 5 可以看出当两缺陷相距很小时, 双缺陷和单一缺陷的阻抗差值很大, 如图 7(a)所示, 当两缺陷间距  $w = 0.2 \text{ mm}$  时, 双缺陷阻抗信号与单缺陷阻抗信号类似, 有未变形(即未出现图 7(b)和图 7(c)中分叉)的“8字”, 但幅

值大小不同; 而当间距  $w$  逐渐增大时, 内外壁双缺陷阻抗幅值逐渐减小并趋近于单缺陷阻抗的幅值, 其中当间距为  $2.4 \text{ mm}$  时, 内壁缺陷的幅值差为  $0.725 \Omega$ , 外壁为  $0.157 \Omega$ , 由此可以看出双缺陷已经分开得足够分辨出单一缺陷幅值, 如图 7(b)所示, 双缺陷阻抗信号“8字”已经开始变形, 并逐渐开始有两“8字”叠加在一起时的雏形; 而从图 6 中可以看出, 当缺陷间距较小时, 内外壁双缺陷的相位与单缺陷的相位相差很小, 容易将此缺陷误认为单一缺陷。随着间距的增大, 相位差会出现一个最大值, 即大致在  $1.6 \text{ mm}$  左右相位差开始减小与阻抗幅值差值一样都将趋近于单一缺陷的相位。

由以上可见, 当间距为  $2.4 \text{ mm}$  时, 双缺陷的阻抗幅值与单缺陷的相差很小, 但此时相位差: 内壁为  $3.14^\circ$ , 外壁为  $6.67^\circ$ , 还是存在一些差异, 而当间距为  $4 \text{ mm}$  时, 无论是双缺陷的幅值和相位都与单一缺陷的幅值和相位相近, 如图 7(c), 双缺陷阻抗信号已经出现两个“8字”叠加, 此时, 基本上认为双缺陷中两个缺陷对彼此的阻抗信息(幅值和相位)影响较小。

## 2.3 双缺陷宽深对检测信号的影响

当在管内壁双缺陷模型中, 其中一槽的宽深为  $1 \text{ mm}$ , 另一槽深为  $1 \text{ mm}$ , 宽度为  $0.2 \sim 2 \text{ mm}$ , 其槽

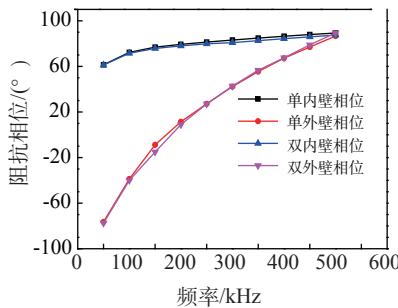


图 4 频率对缺陷信号相位的影响

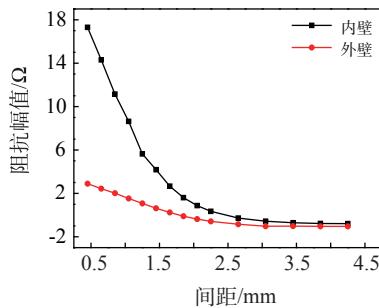


图 5 间距与两种缺陷信号幅差的关系

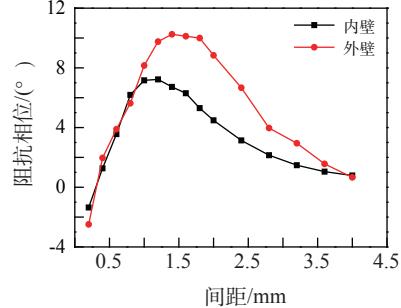
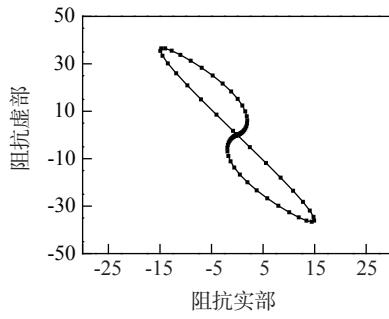
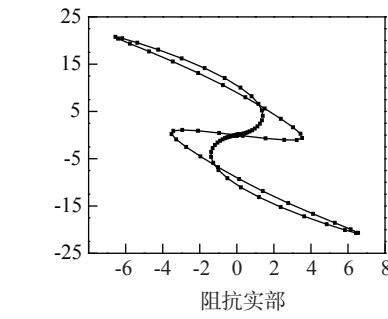


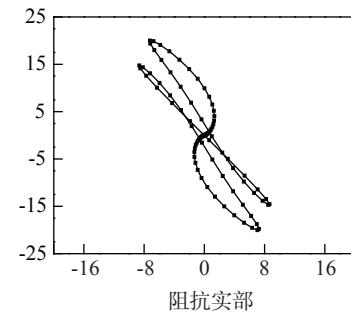
图 6 间距与两种信号相位差的关系



(a) 缺陷间距  $0.2 \text{ mm}$



(b) 缺陷间距  $2.4 \text{ mm}$



(c) 缺陷间距  $4 \text{ mm}$

图 7 双缺陷间距对涡流阻抗的影响

之间间隔  $w=0.2\text{mm}$ , 激励频率为  $200\text{ kHz}$ 。如2.2中所述, 宽深为  $1\text{ mm}$  的内壁缺陷, 激励频率在  $200\text{ kHz}$  时, 幅值和相位都是一定的, 以此为基准, 而图 8 和图 9 显示了双缺陷阻抗信号与基准值的差值, 可知, 在双缺陷模型中, 其中一缺陷的宽度较小时, 对另一缺陷的阻抗信号的幅值和相位影响很小, 随着宽度的增加, 影响逐渐增大, 可见, 若在一缺陷的附近出现另一缺陷时, 此缺陷的几何状态对另一缺陷的阻抗信息是有影响的, 尤其是幅值, 这就使得对缺陷阻抗信息判断不准, 对缺陷的评价产生误差。对于一内壁外壁都有缺陷模型(图 1 中Ⅲ区), 内壁槽宽为  $1\text{ mm}$ 、深为  $0.5\text{ mm}$ , 与此对应的外壁槽宽为  $1\text{ mm}$ 、深  $0.1\sim1.4\text{ mm}$ (即与内壁槽间隔  $0.1\sim1.4\text{ mm}$ )。若单独存在内壁缺陷时, 其阻抗幅值和相位分别为  $15.575\text{ }59\Omega$  和  $60.82^\circ$ , 图 10 和图 11 显示了双缺陷阻抗信息与内壁单缺陷阻抗信息的差值, 可见无论是幅值和相位, 外壁上的缺陷深度变化(即内外壁缺陷的间隔变化)对内壁缺陷阻抗影响较大, 这就有可能使得对所要关注的缺陷信息表征不准确。

#### 2.4 双缺陷对缺陷深度表征的影响

双缺陷模型中, 其中一槽宽为  $0.2\text{ mm}$ 、深为

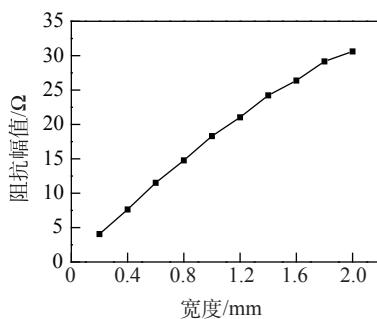


图 8 内壁双缺陷宽度对信号阻抗幅值的影响

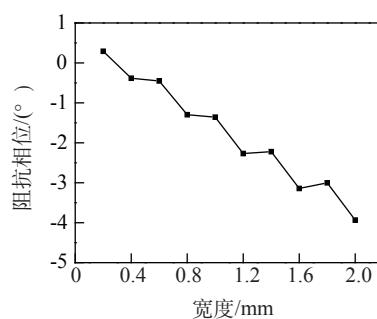


图 9 内壁双缺陷宽度对信号阻抗相位的影响

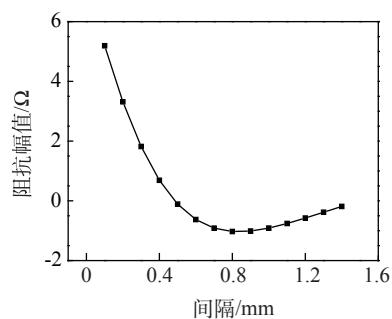


图 10 内外壁双缺陷间隔对信号阻抗幅值的影响

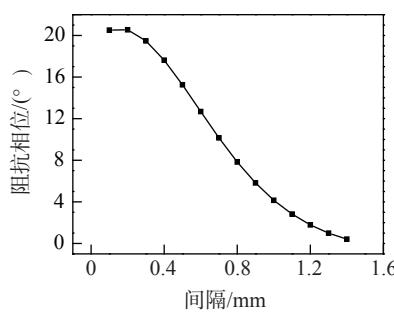


图 11 内外壁双缺陷间隔对信号阻抗相位的影响

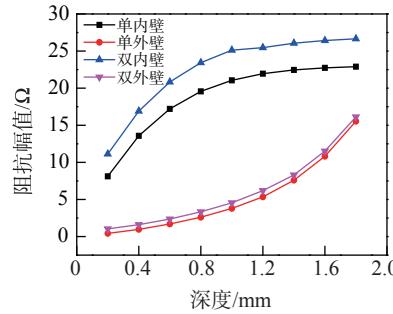


图 12 双缺陷深度对信号阻抗幅值的影响

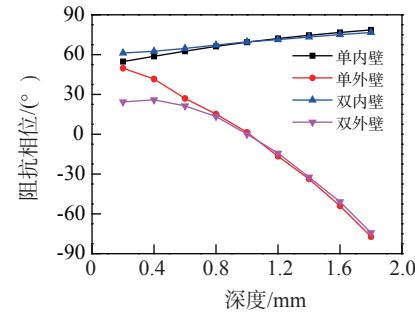


图 13 双缺陷深度对信号阻抗相位的影响

1 mm, 间距  $w=0.2\text{ mm}$  的另一槽宽为  $1\text{ mm}$ , 深度为  $0.2\sim1.8\text{ mm}$ ; 单缺陷模型中, 缺陷宽为  $1\text{ mm}$ , 深度改变  $0.2\sim1.8\text{ mm}$ 。由图 12 可以看出内外壁缺陷信号幅值在两种模型中存在一定的偏差, 其中外壁最大偏差为  $0.846\Omega$ , 而内壁为  $4.063\Omega$ 。可见幅值上, 若内壁缺陷附近存在一缺陷, 其对检测信号幅值的影响大于外壁。而从相位上看, 如图 13 所示, 两种模型中相位相差很小, 这尤其体现在缺陷内外深度较大的时候, 而当缺陷深度较小时, 两种模型中内壁缺陷相位最大偏差为  $6.43^\circ$ , 外壁为  $25.38^\circ$ , 可见双缺陷在相位上产生的偏差在外壁上较明显。由此可以看出, 在对热交换管进行涡流检测时, 若是用相位来表征缺陷, 当两缺陷临近出现时, 对其中一缺陷深度的表征偏差不大, 但同时也容易忽略周围缺陷的影响, 而这一区域内密集缺陷其实对管道无损评价更重要, 因此可以参考阻抗幅值对整个缺陷区作更细致的评价。

### 3 结论

(1) 采用内插式涡流探头对管道实施涡流检测时, 管壁可能存在多个缺陷, 相比于单一缺陷而言, 多缺陷会使单缺陷阻抗幅值增大, 且随激励频率变

## 第十届无损检测学会年会论文投稿格式

### 1 全文请按下列格式修撰编排

(1) 正文写作字体为宋体五号,前文,正文章节及其序号编写和后文的参考文献等请参照本刊的方式。

#### (2) 前文

- 中文题目一般在 20 个汉字以内为宜
- 作者署名 作者单位完整名称(高等院校署至院系,勿用简称),省、市地名+邮政编码;多个作者单位在同一括号内用 1.、2.、3 ……分列)
- 中文摘要(目的、方法、过程、结论;第三人称、过去式写法;一般 200 字左右)
  - 3~8 个关键词
  - 中图分类号和文献标识码
  - 英文题目(一般 10 个实词以内为宜)
  - 作者署名汉语拼音(姓全部大写,名首字母大写,余小写,双名之间用连字符;作者单位英文名称,市地名+邮政编码,China)
  - 英文 Abstract(一般 250 个实词以内,为了便于被国外刊物收录应较详细和突出文章的重点)
    - 3~8 个英文关键词 Key words

#### (3) 正文

#### (4) 后文

- 参考文献
- 致谢(需要时)

### 2 其他注意事项为

(1) 保密单位应署公开的名称,不用代号。  
(2) 全文(包括图、表、参考文献、电脑空格等)请控制在 6 000 字以内。

(3) 图片尺寸一般 50 mm×70 mm;坐标图应标明中文物理量的名称、符号和单位。

(4) 表格请用三线表(必要时可添加辅线)。  
(5) [参考文献]著录格式为(参考文献请多引用本刊文章,以便检索发表):

化,阻抗幅值偏差不同,而内壁缺陷表现尤为明显,但对阻抗相位影响较小。

(2) 在进一步仿真中发现,当检测区域存在两个且有一定距离的缺陷时,另一缺陷的几何状态(深度、宽度、内外壁)对原缺陷阻抗信息有影响,而当间隔很远时,这种影响就变得很弱,基本上对原缺陷信号的相位和幅值不产生影响。

• 期刊:[序号]主要责任者. 文献题名[J]. 刊名,年,卷(期):起止页码. (其中主要作者写至第三人)

• 专著[M]、论文集[C]、学位论文[D]、报告[R]:

[序号]主要责任者. 文题题名[ ]. 出版地:出版者,出版年,起止页(任选).

• 论文集中的析出文献:

[序号]析出文献主要责任者. 析出文献题名[A]. 原文献主要责任者(任选). 原文献题名[C]. 出版地:出版者,出版年,析出文献起止页码.

• 国际、国家标准:[序号]标准编号,标准名称[S].

• 专利:[序号]专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

• 电子文献:[序号]主要责任者. 电子文献题名[电子文献/载体类型标识]. 电子文献的出处或可获得地址,发表或更新日期/引用日期(任选).

电子文献:数据库-DB;计算机程序-CP;电子公告-EB。DB/OL 联机网上数据库、M/CD 光盘图书、J/OL 网上期刊

载体类型:光盘-CD;联机网络-OL;磁盘-DK。载 DB/MT 磁带数据库、CP/DK 磁盘软件、EB/OL 网上电子公告

(6) 请在稿件首页左下方用横线隔开标注:  
① 收稿日期、修订日期(亦可由编者加)。② 基金项目:名称(编号)。③ 第一作者简介:姓名(出生年—)、性别、(民族)籍贯、工作单位、职称、学位。

(7) 作者发稿前请先行全面仔细校对(特别是英文),尽力做到:论点严谨、数据可靠,言简意明、图表清晰,标点准确、符号明显,书写规整、格式一致;尤以 A4 纸打印为佳。

(3) 此外,缺陷深度定量表征中,附近缺陷对深度较小的缺陷相位影响略大,但整体上对缺陷深度用相位表征影响较小,而此时可能会使得损伤区的损伤程度评价不准确,可以通过阻抗幅值进行更细致的评价,因此对管道多缺陷聚集的情况也应予以重点关注。

(下转第 55 页)

## 4 轮缘探伤的定量标准探讨

轮缘探伤的定量标准主要参考了铁道部运输局、运装技检[1998]64号文件:“轮箍和整体碾钢车轮轮网超声波探伤不得存在大于 ISO 5948—1994《铁路车辆材料超声波探伤验收试验》标准中规定的 $\phi 2$  mm 平底孔当量缺陷”的规定。在 LY-1 和 LY-2 试块的设计中,对轮缘上的缺陷定量,采用了 $\phi 2$  mm 平底孔作为当量标准。

同时,为发现轮缘上的轴向缺陷,设计的两个尺寸为 $\phi 2$  mm×10 mm×18 mm, $\phi 2$  mm×15 mm×18 mm 的横通盲孔,及在轮缘侧下方距轮箍内径10 mm 处设计的尺寸为 $\phi 2$  mm×12 mm 的横通盲孔,与[2000]335 号文件的尺寸为 $\phi 3$  mm×30 mm×30 mm 的横通盲孔的当量相比,提高了检测灵敏度。

## 5 应用实例

### 5.1 WM2R 型探头的探伤方法

使用 9002 数字式探伤仪,对 LY-1 试块,在制作好 DAC 距离-波高-当量曲线的基础上,将探头置于轮缘的外侧面,对轮缘的整个高度范围逐步进行扫查。

WM2R 型探头的探伤,主要用于发现材质内部的原始缺陷和疲劳缺陷。

### 5.2 双向斜探头对轮缘的检测方法

用双向斜探头的大角度探头朝着轮缘方向,探头与轮箍外侧面约成 30°~40°的夹角,前后移动探头,扫查轮缘上的轴向缺陷。

(上接第 46 页)

### 参考文献:

- [1] NAM J H, LEE H B. A novel feature extraction for eddy current testing of steam generator tubes [J]. NDT & E International, 2009, 42(7): 658—663.
- [2] CHEN Zhen-Mao, YUSAB N, MIYA K. Enhancements of eddy current testing techniques for quantitative nondestructive testing of key structural components of nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(7): 1651—1656.
- [3] MAOUCHE B, ALKAMA R, FELIACH M. Semi-analytical calculation of the impedance of a differential sensor for eddy current non-destructive testing [J]. NDT & E International, 2009, 42(7): 573—580.

### 5.3 发现的典型轮缘内部缺陷

应用 WM2R 型双晶片探头制作好的 DAC 距离-波高-当量曲线工艺,发现了一例较大的轮缘内部缺陷,该缺陷沿周向长 230 mm,深 19~23 mm 不等。缺陷当量超过Ⅲ线 3.9 dB,属于材质缺陷。缺陷位置及反射当量如图 6 所示。

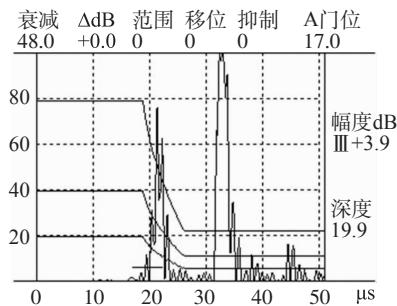


图 6 轮缘缺陷反射当量波形图

## 6 结论

通过对机车车轮轮缘处的探伤方法及定量标准的技术研讨,逐步完善了对轮箍轮缘的探伤方法,解决了机车车轮轮缘处的漏探问题,为提高机车走行部件质量,提高机车的安全行驶,起到了积极的作用。

### 参考文献:

- [1] 全国锅炉压力容器无损检测人员资格考委会. 超声波探伤[M]. 北京: 劳动人事出版社, 1989.
- [2] 黎连修. 轮箍超声横波探伤研究[J]. 无损检测, 2000, 22(4): 162—164.
- [4] 叶波, 蔡晋辉, 黄平捷, 等. 多层导电结构电涡流扫描检测缺陷自动识别和分类技术研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(10): 2253—2258.
- [5] 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.
- [6] 况旭冉, 刘福顺. 不锈钢管件裂纹深度的涡流阻抗分析[J]. 无损检测, 2010, 32(5): 349—352.
- [7] JOHN W, TIAN Gui-Yun, ILHAM M. PEC thermography for imaging multiple cracks from rolling contact fatigue[J]. NDT & E International, 2011, 44(6): 505—512.
- [8] JOUBERT P Y, LE BIHAN. Multi sensor probe and defect classification in eddy current tubing inspection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 129(1): 10—14.