

文章编号: 0253-3782(2006)01-0105-04

## 研究简报

# 超声多波检测新方法模型试验研究<sup>\*</sup>

王兵团<sup>1)</sup> 冯永革<sup>2)</sup> 庞 坤<sup>3)</sup> 崔建英<sup>1)</sup> 卓 琳<sup>1)</sup> 陈立成<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100044 交通大学理学院

2) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院地球物理系

3) 中国河北廊坊 065000 中国人民武装警察部队学院

**关键词** 相似性 多波 多震相 多波三维成像

**中图分类号:** P315.3<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A

传统金属回波(反射波)探伤法,我们称之为“单波检测法”,用的是单分量探头.此方法不能直接检测伤的大小和形状,只能采用相对比较的方法,即用未知量(伤)与已知量(规则的人工伤)的回波振幅相比较的方法,来确定伤的当量大小和形状.此方法可以基本确定伤的位置,但不是实际伤的大小、形状和位置,不能满足实际部门的需要.下面引入新方法,即“多波检测法”.这一新方法能直接检测伤的大小、形状和位置.

近年来,以全波震相分析为基础,超声地震模型试验为手段,开展多波多分量工程地震探测技术研究,取得了可喜的进展(赵鸿儒等, 1986, 1991, 1996),相应的多波多分量数字式声波仪及其相应的前置放大、A/D 转换等仪器设备,以及 DB4 多功能声波仪的研制成功,促进了工程多波地震勘探的广泛应用.

根据全波震相分析的基本理论,借鉴工程多波地震勘探的技术思路,以超声地震模型试验手段,开展超声金属探伤的多波检测技术方法研究.在对列车车轴作模型试验之前,先对“有机玻璃圆柱体模型”(模拟列车车轴)作模型试验,经过多次试验探索出新方法即“超声多波定量检测法”,为金属无损探伤检测中伤的位置、几何形状及尺度等领域提供了新的方法.

## 1 有裂纹实物车轴模型

列车车轴轴颈的疲劳裂纹,主要出现在轴颈的环带面(卸荷槽,称此环带面为伤带面)上,且伤一般与车轴轴向垂直.为进行车轴裂纹探测试验,采用线切割工艺预制裂纹,裂纹延伸方向与车轴轴线相垂直,裂纹至车轴外端面的距离为 200 mm.依据上述理论及相似性原则,车轴轴颈和有机玻璃圆柱体皆为圆柱状物体.为模拟列车车轴,我们建造了如图 1 所示的有机玻璃圆柱体模型(直径 64 mm,长 600 mm),锯伤的尺度是:深 10 mm(最深处),长 52 mm,宽 2 mm,伤距离端面 70 mm.用 DB4 型多波参数分析仪(低频)在有机玻璃圆柱体模型上作模型试验,以探索数据采集方

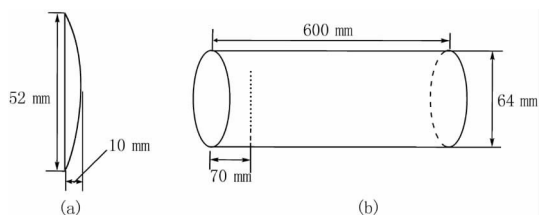


图 1 (a) 裂隙截面模型示意图; (b) 有机玻璃圆柱体模型示意图

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(60172061)资助.

2004-08-23 收到初稿, 2005-02-23 收到修改稿, 2005-03-29 决定采用.

式以及换能器的合适频率，依据相似性原则研制 DC4 型多波参数分析仪（高频），在有裂纹实物车轴模型上作模型试验。

2 超声多波定量检测法简介

为方便起见，将超声多波定量检测法简称为检测法。其原理如下：

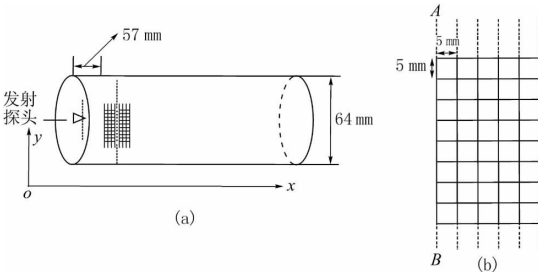


图 2 网节点采集数据示意图

图中，整个网格是绕有机玻璃圆柱体一周的。布阵网上网节点即为接收换能器的最左端点，小黑圆点线表示伤

(a) 圆柱体模型网节点示意图；(b) 200 mm×25 mm 平面区域网格

网格节点处采集数据(图 2)。

由换能器在左端面上附近发射(图 2)，接收换能器最左端在发射换能器沿  $x$  方向的第 3 个节点上，所采集的一组图形数据见图 3。可以看出，依据图 3 所示观测方式，我们记录到了清晰的波形及数据。从波形中可清晰看到 P、S、PS、SP、SS 等波形，实现了全波列记录的研究思想(未用面波，图 3 未标明它)。

2.2 伤位置、长度、深和宽的确定

利用所采集的数据和波形识别 P、S、PP、PS、SS 等多个震相(即采用多波方法)，建立计算和确定伤的位置、尺度、形状(例如用反射波确定伤的位置)等有关数学模型，研制计算机自动识别震相和确定裂隙(位置、大小及形状)三维成像软件系统，并用此软件系统对上述采集的数据进行处理，计算机自动确定伤的位置、尺度和形状。

3 数学模型的建立

伤的数量、位置和形状的变化会影响震相的运动学和动力学特征。根据震相运动学和动力学特征的变化规律，进行震相的自动识别，建立有关材料损伤数量、位置和形状的震相分析数学模型。

有的震相用几种识别方法，有的不同震相用不同识别方法：

1) 利用时距曲线法的数学模型作震相识别等。

2) 利用反射系数和透射系数确定波前位移方向的改变。已知应力的反射系数与透射系数的公式是：

2.1 布网数据采集方法

在有机玻璃圆柱体(长 600 mm，直径为 64 mm)环带面上，假设伤带面：宽为 15 mm(伤带面宽沿  $x$  轴方向)，长约 200 mm(见图 2a)，将伤带面展开为平面(图 2b)。其中图 2b 左边 AB 线的位置距有机玻璃圆柱体端面沿  $x$  轴方向 57 mm。不妨在 200 mm×25 mm 平面区域上划分网格采集数据：① 网格为 5 mm×5 mm；② 节点上布置换能器接收；③ 换能器放置在端面边上附近沿  $x$  轴方向对准一排节点发射，换能器在此排节点接收(多点接收，图 2b)。发射换能器和接收换能器在  $y$  轴方向等步长 5 mm 同步移动，采集此第二排节点数据，依此类推。用 DB4 型多波参数分析仪和三分量换能器、单分量换能器，在

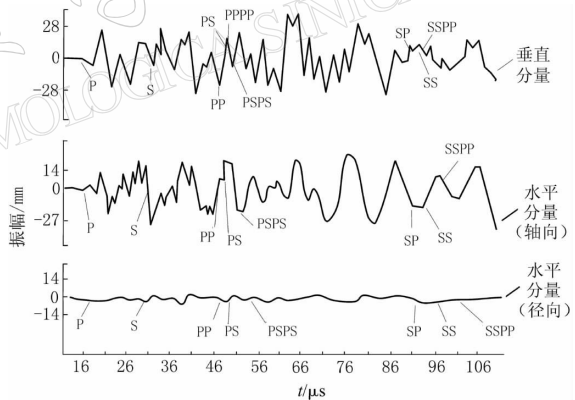


图 3 三分量记录波形图

图中所示波形中 P、PP、PS、S、PPPP、PSPP、SS 等表示不同路径与伤有关的震相。P 为纵波、S 为横波、PP 为纵波反射波、PS 为纵波转换横波，依此类推

当 P 波入射时，正应力的反射系数  $R$  和透射系数  $T$  分别为

$$R = \frac{A_1}{A_2} \quad T = \frac{\rho' \cos(2\beta'_3)}{\rho \cos(2\beta_3)} \left( \frac{A'}{A_1} \right)$$

其中， $A_1$ 、 $A_2$  和  $A'$  分别为入射、反射和透射 P 波的振幅； $\beta_3$  为 SV 波的入射角， $\beta'_3$  为 SV 波的折射角； $\rho$ 、 $\rho'$  为介质密度。详细公式见黎丹和王兵团(2003)。

3) 有的震相利用小波变换的信号分析来识别(秦前清，杨宗凯，1994)。

4) 利用快速查找算法数学模型，用于震相的识别(王兵团，2001)。例如，震相直达 P 波人识别简单，但计算机自动识别时，有必要给出数学模型。我们通过分析震相的特征，需要快速确定波形的拐点分布。由于波形是由平面离散点集经过分段线性插值的方法画出的，离散点集的拐点可以由相邻 4 个点的分布来分辨，它的 4 种情况如图 4 所示。

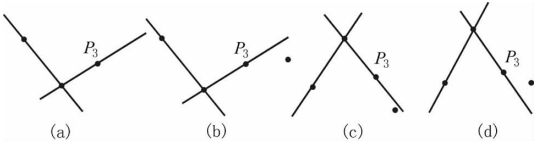


图 4  $P_3$  是否为拐点的几种情况

(a, c)  $P_3$  不是拐点；(b, d)  $P_3$  是拐点

我们建立了快速查找拐点的数学模型，定义了内点、外点概念并证明了确定内点、外点的定理：

关于平面上两点  $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_2(x_2, y_2)$  的正向直线方程  $L$  的左端表达式为函数

$$S_{12}(x, y) = (x_2 - x_1)(y - y_1) + (y_1 - y_2)(x - x_1)$$

对于不在直线  $L$  上的任何一点  $P_0(x_0, y_0)$ ，有：① 如果  $S_{12}(x_0, y_0) < 0$ ，则  $P_0(x_0, y_0)$  是正向直线  $L$  的内点；② 如果  $S_{12}(x_0, y_0) > 0$ ，则  $P_0(x_0, y_0)$  是正向直线  $L$  的外点。

在该定理的基础上给出了快速查找拐点的算法，结果表明方法非常有效(王兵团，2001)。用此数学方法可识别直达波。

5) 计算伤的位置、长度、深度和宽度。如：伤的位置可由所识别的震相得到反射 PP 波的“到时”，再由路径确定。识别有关震相，不难求得伤的长度、深度和宽度。

4 软件系统

1) 由前述采集数据建立伤的震相运动学、动力学特征数据库。

2) 编写伤震相计算机自动识别的综合软件。

3) 研制伤的位置、尺度和形状软件以及三维成像基础软件(绘图成像系统设计原理，见另文“列车车轴多波检测中的三维图形显示”)。

4) 建立计算机自动确定伤(位置、尺度及形状)三维成像软件系统。

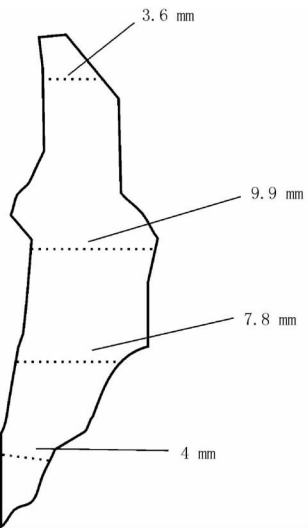


图 5 伤截面结果示意图

5 数据处理及结果

用上述计算机自动确定伤三维成像软件系统，对上述所采集的数据，沿伤带面网格进行自动扫描处理：① 计算机自动处理沿  $x$  方向第一排数据，计算伤宽度、深度、长度；② 类似①，计算机继续处理第二排数据，直至网格数据处理完毕，计算机就可以自动输出结果(图 5)。

由处理数字结果可知伤的位置：距端面 70.2 mm，长 50 mm，宽 1.4 mm，深 9.9 mm，与上述已知伤模型基本相符，相对误差分别为：位置 2.8%，长 3.8%，宽 30%，深 1%(图 1, 5)。

## 6 结论

本文重点介绍了借用工程多波地震勘探思想、理论、方法和技术,使用 DB4 多波检测仪和单分量、三分量换能器,在有机玻璃圆柱体模型上进行多波观测模型试验,采集数据;用上述超声多波定量检测法,应用我们研制的多波检测计算机自动识别伤三维成像软件系统进行计算成像,处理数据.计算成像结果与已知模型基本相符.

多波检测计算机自动识别伤三维成像软件系统进行计算成像的 4 个步骤为:① 采集数据;② 伤震相计算机自动识别;③ 伤参数和位置的数值计算;④ 模型与伤三维图形显示.

本文是工程多波地震勘探的一种应用,为今后实现多波检测列车车轴数据自动采集,计算机自动识别有无裂隙及裂隙的位置、几何形状和尺度开辟了新的方法.同时对于多波检测大地裂隙、溶洞等特殊地质构造提供了一种新的方法,弥补了过去单一震相检测方式的不足.多波的新思想、多震相、多通道的应用,使检测时间变短,其分辨率高、灵敏度高、精度高,结论准确可靠.此超声多波定量检测法亦可用于不规则伤和非表面伤.

本文对探索金属部件探伤方法有着重要的理论和技术应用参考价值,有着广阔的应用前景.

北京大学地球与空间科学学院地球物理系赵鸿儒教授对本工作给予热情的关心和指导,我们在此表示感谢!

## 参 考 文 献

- 黎丹,王兵团. 2003. 应力的反射系数和透射系数[J]. 北方交通大学学报, 27(3): 27~31  
秦前清,杨宗凯. 1994. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 80~92  
王兵团. 2001. 平面曲线离散点集拐点的快速查找算法[J]. 北方交通大学学报, 25(6): 85~87  
赵鸿儒,郭铁栓,徐子君,等. 1996. 工程多波地震勘探[M]. 北京:地震出版社, 13~192  
赵鸿儒,孙进忠,唐文榜,等. 1991. 全波震相分析[M]. 北京:地震出版社, 18~220  
赵鸿儒,唐文榜,郭铁栓. 1986. 超声地震模型试验技术及应用[M]. 北京:石油工业出版社, 126~234

## RESEARCH ON A NEW METHOD OF ULTRASONIC MULTI-WAVE DETECTING MODEL TESTING

Wang Bingtuan<sup>1)</sup> Feng Yongge<sup>2)</sup> Pang Kun<sup>3)</sup>  
Cui Jianying<sup>1)</sup> Zhuo Lin<sup>1)</sup> Chen Licheng<sup>1)</sup>

1) School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2) School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

3) The Chinese People's Armed Police Force Academy, Langfang 065000, China

**Key words:** comparability; multi-wave; multiple phases; multi-wave three-dimensional imaging