

# 用于管道焊缝检测的激光超声系统

杨依光<sup>1</sup>, 周君玮<sup>2</sup>, 徐立伟<sup>3</sup>, 熊吉川<sup>3\*</sup>

(1. 中国石油天然气管道通信电力工程总公司, 山东 廊坊 065099; 2. 南京理工大学 理学院, 江苏 南京 210094;  
3. 南京探瑞机电科技有限公司, 江苏 南京 210009)

**摘要:**针对石油管道焊缝检测中被测样品粗糙, 作业环境恶劣等问题, 基于光折变晶体内双波混合干涉原理, 研制了高频激光超声测振仪, 结合激光超声的激励技术, 设计了一种可用于检测石油管道表面及内部焊缝缺陷的激光超声检测系统. 利用该系统分别对缺陷在表面和内部的管道焊缝试块进行了超声激励和检测实验. 实验结果表明, 该系统能有效地分析出被测样品表面以及内部缺陷的位置以及相应深度, 检测分辨率达到 0.01 mm, 缺陷位置检测误差控制在 2% 以内. 该检测系统结构紧凑可靠, 操作简便, 开发的高频激光超声测振仪能工作在管道焊缝检测的常见作业环境(70~75 dB 低频环境噪声), 具有一定的适用性.

**关键词:**管道; 焊缝缺陷; 激光; 超声; 检测; 双波混合

中图分类号: TN247

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2014)04-0017-05

## Laser Ultrasonic Testing System for Weld Flaw Inspection of Pipelines

YANG Yiguang<sup>1</sup>, ZHOU Junwei<sup>2</sup>, XU Liwei<sup>3</sup>, XIONG Jichuan<sup>3\*</sup>

(1. China Petrol & Gas Pipeline Telecommunication & Electricity Engineering Corporation, Langfang 065099, China;  
2. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
3. Wavetech System Co. Ltd., Nanjing 210009, China)

**Abstract:** In order to tackle the problems caused by rough test samples and harsh operation environment in weld flaw inspection of gas and petroleum pipelines, a laser ultrasonic inspection scheme for detecting surface crack and internal defects of welds was proposed. A high frequency laser ultrasonic receiver based on two-wave mixing in photorefractive crystals was developed, which can effectively detect high frequency ultrasonic signals on rough surfaces. This system was utilized to inspect weld flaws of pipeline specimen and the location of surface cracks and the depth of the internal defects can be effectively determined with the experimental data. The detection spatial resolution is 0.01mm and the detection error of defect location is under 2%. Experiments indicated that this system has a compact and reliable structure, user-friendly control, and the high frequency laser ultrasonic receiver can work in typical environment for weld flaw inspection of pipelines, i.e. 70~75 dB environment noise. These features make it suitable for industrial applications.

**Key words:** pipelines; weld flaw; laser; ultrasonic; inspection; two-wave mixing

收稿日期: 2014-09-11

基金项目: 中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目(2011B-3301)

作者简介: 杨依光(1981—), 男, 工程师, 硕士.

\* 通信联系人: 熊吉川(1983—), 男, 博士, 主要研究方向为激光超声检测技术、光声与光热现象、光学非接触测量技术. E-mail: xiong.jichuan@wavetechsys.com

随着石油和天然气工业的快速发展,管道安全事故也越来越频发.管道安全事故的起因很多,其中管道焊缝缺陷是引起管道安全事故的主要因素之一<sup>[1-2]</sup>.焊缝质量直接影响管道焊接结构的可靠性和寿命.目前主要通过管道焊接过程中的焊缝质量控制和焊接后的焊缝缺陷无损检测2种途径来保证管道安全运行<sup>[3-4]</sup>.在常规无损检测方法中,超声检测、射线检测方法是管道焊缝缺陷检测的主要方法<sup>[4-6]</sup>,其中超声检测以其安全、可靠的特点被广泛应用在管道焊缝缺陷检测中<sup>[4]</sup>.传统的检测方法往往采用接触式超声换能器做探头,以水为耦合剂.然而当被测管道表面粗糙时,会导致探头与被测表面耦合效果不佳,从而造成误判,甚至漏检.

近年来,激光超声检测技术以其光路可变、激发与检测方式的非接触性以及高分辨率而倍受关注<sup>[7-9]</sup>.激光超声波的接收方法主要有换能器探测和光学探测2类.换能器探测的方法是利用压电换能器直接与试样耦合,或利用电磁声换能器、静电传感器等宽带换能器.但换能器必须与试样接触,或放置在试样表面很近的区域,具有一定的局限性<sup>[10]</sup>.光学探测方法是目前真正意义上的非接触式宽带检测技术,全光学探测技术主要分为非干涉法和干涉法2类<sup>[9]</sup>.非干涉法主要采用光偏转技术<sup>[11]</sup>,干涉法的测量是基于声波在样品表面的传播引起检测光束的相位或频率调制来实现的<sup>[9]</sup>.目前开发成功的光学探测仪器主要有零拍干涉仪,外差干涉仪,时延干涉仪,共焦法布里波罗干涉仪(F-P干涉仪),双波混合干涉仪以及光感生电动势干涉仪等.然而,以上干涉仪大多需要光滑的检测表面,对工作环境要求较高,因而限制了其实际应用<sup>[12]</sup>.使用法布里珀罗干涉仪加上透镜组收集散射光信号,多光束干涉以获得细锐明亮且暗纹较宽的明条纹,可大大提高检测信号的信噪比.F-P干涉仪对中频超声波信号具有较好的敏感性,但对低频信号却不敏感,高频响应是非线性的,而且造价昂贵,体积大,不适用于工业检测<sup>[13]</sup>.

近年来,人们提出了使用非线性光学技术主动校正由散斑引起的相位畸变<sup>[14]</sup>或者产生一个参考光波使得它的相位分布和待测表面散射的光相匹配

的技术即:双波混合技术,以提高干涉信号的信噪比.本文针对管道焊缝检测的应用要求,利用光折变晶体的特性,采用独特的光路设计,研制了具有高抗干扰性的双波混合干涉仪,并结合激光超声的激励技术,设计了适用于管道焊缝检测的激光超声检测装置,并应用于管道焊缝试块的缺陷检测实验.

## 1 基于双波混合原理的激光干涉仪

图1为所构建的双波混合干涉仪的原理图.一束激光被分光镜分为2束激光:信号光和参考光.将信号光照射到被测样品表面,经样品表面反射后入射到光折变晶体,与参考光在光折变晶体内相叠加,此时信号光和参考光在光折变晶体内相干而形成动态全息光栅,2束光形成的全息光栅将2束光的一小部分分别衍射到对方的光路上,在这个过程中2束光的强度和相位发生“交换”,即双波混合<sup>[15-16]</sup>.当参考光被全息光栅衍射后,它的波前将自动匹配由全息光栅记录下来的样品粗糙表面形貌;当再与从样品表面反射回来的信号光束干涉时,这2束光的波前将完全匹配,即“畸变”的信号波前与“畸变”的参考光波前产生高效干涉,从而测量粗糙表面超声位移.此外,由于样品的运动或者传播路径的微小扰动(低频)引起的信号光束相位变化比较缓慢,可以被光折变晶体内的动态全息光栅来补偿<sup>[17]</sup>,因而该干涉仪具有较高的抗环境干扰能力.

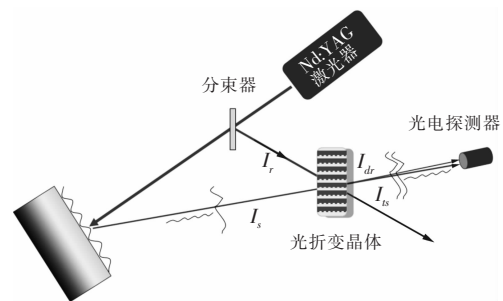


图1 光折变晶体中的双波混合干涉仪原理图

依据图1所示的工作原理图,本文制备了高频激光测振仪TWM-532,在该装置中选用波长为532 nm的连续激光器探测激光,变焦距光学透镜组用于改进探测点的光斑特性.

由于信号光和参考光是由同一个激光器发出

的相干光, 其中信号光经样品表面反射, 假设被反射信号光相位受到样品表面超声位移  $\delta(t) = U\cos(2\pi f_u t)$  的调制, 则在光折变晶体后的信号光传播方向上, 被动态光栅衍射的一部分参考光和透射的信号光的电场可表示为

$$E_r = E_{r0} \exp[j(2\pi\nu t + \phi_{r0})] \quad (1)$$

$$E_s = E_{s0} \exp[j(2\pi\nu t + \phi_{s0} - \Delta\phi(t))] \quad (2)$$

其中,  $\Delta\phi(t) = \frac{4\pi}{\lambda}\delta(t)$  表示超声位移  $\delta(t)$  引起的信号光束相位调制,  $E_{r0}$  和  $E_{s0}$  分别是  $E_r$  和  $E_s$  的幅度,  $\nu$  表示激光的频率,  $\lambda$  是激光的波长,  $\phi_{r0}$  和  $\phi_{s0}$  是无超声信号时各自经过的光程产生的初始相位, 则光电探测器探测到的光强为

$$I_D = (E_r + E_s)(E_r + E_s)^* = E_{s0}^2 + E_{r0}^2 + 2E_{s0}E_{r0} \cos(\frac{4\pi}{\lambda}\delta(t) + \phi_0) \quad (3)$$

其中  $\phi_0 = \phi_{r0} - \phi_{s0}$ . 为了使光电探测器探测到的信号最强并对微小信号  $\delta(t)$  有最佳灵敏度, 调节参考光与信号光强度使  $E_{r0} = E_{s0}$ , 同时调节干涉仪的臂长使  $\phi_0 = \pm\frac{\pi}{2} + 2n\pi$ . 式(3)可简化为

$$I_D = E_{s0}^2 + E_{r0}^2 + 2E_{s0}E_{r0} \sin(\frac{4\pi}{\lambda}\delta(t)) \quad (4)$$

当  $\delta(t) < \lambda/8$ , 即在微弱信号条件下时

$$\sin(\frac{4\pi}{\lambda}\delta(t)) \approx \frac{4\pi}{\lambda}\delta(t) \quad (5)$$

滤去直流分量, 得

$$I_D = 2E_{s0}E_{r0} \frac{4\pi}{\lambda}\delta(t) \quad (6)$$

即在微弱信号调制下, 光电探测器的输出与表面超声微位移信号成正比.

以 532 nm 的光源为检测光, 使用泡克尔斯盒做标定<sup>[18]</sup>, 当被测表面微位移在 200 nm 以内时, 光电探测器的输出电压与表面位移近似成正比, 如图 2 所示, 此时探测器的输出电压可直接表征表面超声位移绝对幅值.

## 2 基于双波混合干涉仪的激光超声检测

实验系统框图如图 3 所示, 超声激励采用波长为 1 064 nm 的 Nd:YAG 激光器, 脉宽为 8 ns, 重

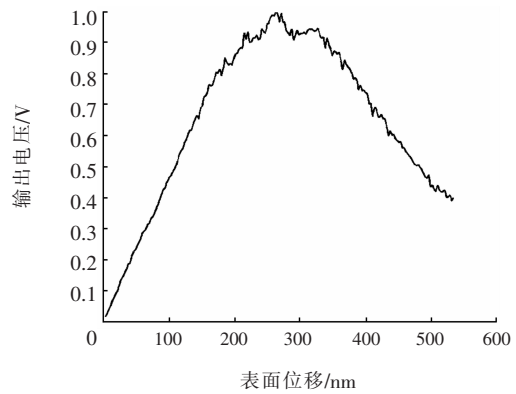


图 2 标定实验结果图

复频率 10 Hz. 脉冲激光被分光镜分成 2 束, 其中一束能量约 1% 的激光经过衰减后由光电探测器接收转换为信号采集卡的触发信号; 另一束脉冲激光经透镜聚焦到钢管试块表面, 用于激发超声信号; 使用前文所开发的双波混合干涉仪检测管道试块上的超声信号, 并输出到信号采集与处理系统, 结合计算机进行实时的分析与处理.

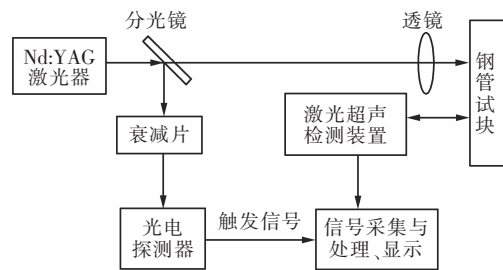


图 3 激光超声检测实验装置框图

本文中分别制备了缺陷在表面和内部的管道试块做测试样品. 其中试块 1 是具有表面缺陷的管道, 其表面凹槽尺寸为: 宽 2 mm, 深 2 mm. 检测示意图如图 4 所示, 激发点与检测点在凹槽同侧, 激发点距凹槽边缘约 18 mm, 检测点距凹槽边缘约 6.5 mm.

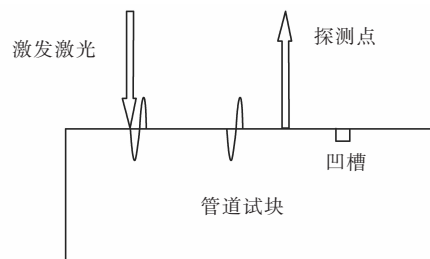


图 4 具有表面缺陷的管道试块检测示意图

图 5 为检测到的被激发声表面波在缺陷样品上的声传播信号. 其第 1 个信号峰为激发点产生的表面波传播到检测点所产生, 相对激发脉冲延时为  $3.85 \mu\text{s}$ , 取表面波声速为  $2990 \text{ m/s}$ <sup>[9]</sup>, 则可计算出激发点距检测点距离为  $2990 \text{ m/s} \times 3.85 \mu\text{s} = 11.5 \text{ mm}$ , 与实际检测点和激发点之间的间隔相符. 第 2 个峰为表面波从凹槽近边缘反射到检测点, 其延时为  $8.28 \mu\text{s}$ , 由此可计算检测点距凹槽边缘为  $2990 \text{ m/s} \times (8.28 - 3.85) \mu\text{s}/2 = 6.6 \text{ mm}$ . 第 3 个峰为表面波从凹槽远边缘反射回检测点, 其延时为  $9.77 \mu\text{s}$ , 由此可计算凹槽宽度为  $2990 \text{ m/s} \times (9.77 - 8.28) \mu\text{s}/2 = 2.2 \text{ mm}$ . 该计算值与实测值约有 10% 误差, 该误差主要由样品表面的粗糙度以及缺陷不均匀性而导致的.

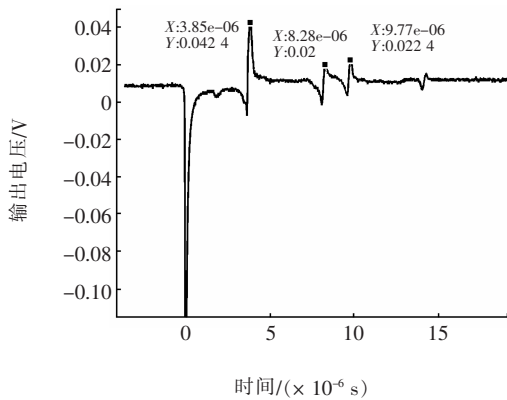


图 5 表面缺陷检测信号波形图

试样 2 是在钢管焊缝试块内制作一个直径大约为  $1 \text{ mm}$  的空洞缺陷, 深度为  $12 \text{ mm}$ , 实验装置如图 4 所示. 此时激发激光与探测激光在试样表面的焦点重合并扫描, 当扫描的激励点和接收点到缺陷正上方时, 检测到的超声信号波形如图 6 所示. 此时缺陷回波相对激发脉冲的时间延迟为  $4.02 \mu\text{s}$ , 钢管中纵波声速为  $5990 \text{ m/s}$ <sup>[9]</sup>, 缺陷深度为  $5990 \text{ m/s} \times 4.02 \mu\text{s}/2 = 12.04 \text{ mm}$ , 检测误差为  $0.04 \text{ mm}$ . 底面回波相对激发脉冲的时间延迟约为  $12.12 \mu\text{s}$ , 由此可计算试样厚度为  $5990 \text{ m/s} \times 12.12 \mu\text{s}/2 = 36.3 \text{ mm}$ , 与实测值  $36.1 \text{ mm}$  基本相符. 由于材料内部的材料参数比较均匀且采用的是激励点与检测点相重合的方法检测内部缺陷, 因而受表面粗糙度的影响较小, 其检测精度明显高于表

面缺陷的检测精度; 同样, 由于在实际测量中, 无法将激励点和接收点调节到完全重合, 也导致了一定的检测偏差, 而此类系统误差会由于缺陷深度越小, 造成检测的相对误差越大, 因此在实际检测中, 可通过采用标准试样标定的方法以有效降低检测的系统误差.

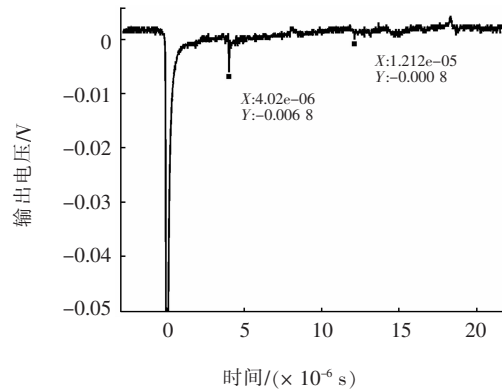


图 6 内部缺陷检测信号波形图

在本文制备的双波混合干涉仪光路中, 采用了独特设计的检测光聚焦和回光收集镜头组, 可将检测光斑聚焦到  $10 \mu\text{m}$  以下, 并大幅提高回光收集能力. 现有的双波混合干涉仪检测光斑大小往往在几十到几百  $\mu\text{m}$  之间, 较大的检测光斑导致其所能探测的超声波频率范围受到限制(大多数小于  $100 \text{ MHz}$ )<sup>[13]</sup>, 从而限制了其检测缺陷的精度. 本文制备的干涉仪通过获得较小的检测光斑, 将系统检测精度提高到  $0.01 \text{ mm}$ , 高于现有检测系统精度(约  $0.1 \text{ mm}$ )一个数量级<sup>[12]</sup>.

此外, 本文制备的双波混合干涉仪通过在参考光路中加入主动相位调制, 大大提高了信号稳定性和抗环境干扰能力. 传统的双波混合干涉实现主要通过利用光折变晶体内动态光栅自适应功能来实时补偿由于样品粗糙表面所引起的相位畸变, 从而实现高效率的干涉. 本文制备的干涉仪在参考光路中加入泡克尔斯盒相位调制器, 施加一个事先标定的相位调制, 在实现信号绝对值标定的同时, 在信号中引入一个载波频率, 在获取光电信号后进行电路解调, 可大大提高信号的稳定性和系统的抗干扰能力. 在较恶劣环境下(环境噪声  $70\sim 75 \text{ dB}$ , 小于  $1 \text{ kHz}$ ), 该系统均能稳定工作并实现表 1 中所列的检测性能.

表1 系统缺陷检测性能

超声类型	缺陷类型	缺陷位置/mm		分辨率/ mm	误差/%
		实测值	检测值		
表面声波	表面缺陷 (裂缝)	6.50	6.60	0.01	1.54
纵波	内部缺陷 (空洞)	12.00	12.04	0.01	0.30

### 3 结论

针对管道焊缝缺陷检测需求,本文研制了基于光折变晶体双波混合干涉技术的激光超声测振仪,将分离器件进行了集成化设计,大大缩小了检测装置的体积,提高了检测系统的操作灵活性.结合激光超声激发系统,针对钢管焊缝表面及内部缺陷开展了检测试验,结果表明,本文研制的检测装置可有效检测出钢管底面和内部缺陷的超声回波信号,根据回波信号时延和超声波速可推算出钢管壁厚和缺陷深度;同时,该检测系统还可检测出焊缝表面缺陷,并推算缺陷位置及尺寸.由此表明该检测与激发系统已能初步适用于管道壁厚和焊缝表面及内部缺陷的非接触式检测.由于采用了独特的光路设计,使该检测系统能有效工作在典型管道焊缝检测作业环境下,具有良好的抗环境干扰能力,在无损检测领域具有潜在的广阔应用前景.

#### 参考文献:

- [1] 黄志潜.管道完整性及其管理[J]. 焊管, 2004, 27(3):1-8.
- [2] 陈学东,王冰,关卫和,等.我国石化企业在用压力容器与管道使用现状和缺陷状况分析及失效预防对策[J]. 压力容器, 2001, 18(5):43-53.
- [3] Wassink C, Dijkstra F. Approaches for developing solutions for specific NDT problems[C]//The 2nd International Conference on Technical Inspection and NDT, October, 2008, Tehran, Iran, 2008:1-6.
- [4] 刘松平,刘菲菲,张丙法,等.管道焊缝超声多维成像检测技术[J]. 无损检测, 2008, 30(2):77-80.
- [5] 刘松平,刘菲菲,李乐刚,等.自动化无损检测技术及其应用[J]. 航空制造技术, 2009(4):26-31.
- [6] Barkhatov V A. Development of methods of ultrasonic non-destructive testing of welded joints[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2003, 39(1):23-47.

- [7] Clorennec D, Royer D, Walaszek H. Nondestructive evaluation of cylindrical parts using laser ultrasonics[J]. Ultrasonics, 2002, 40:783-789.
- [8] 熊伟.光偏转差分式激光超声探测系统设计及在缺陷检测中的应用研究[D].南京:南京理工大学, 2006:12-15.
- [9] 沈中华,石一飞,严刚,等.激光声表面波的若干应用研究进展[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1):239-244.
- [10] 严刚.激光声表面波用于金属表面缺陷无损检测的研究[D]南京.南京理工大学, 2007:16-44.
- [11] 徐晓东,张淑仪,张飞飞,等.利用光差分技术检测激光激发声表面波定征薄膜材料[J]. 声学学报, 2003, 28(3):201-206.
- [12] Dewhurst R J, Shan Q. Optical remote measurement of ultrasound[J]. Measurement Science and Technology, 1999, 10(11):139-168.
- [13] Drake T E, Dubois M. Apparatus and method for two wave mixing based ultrasonic laser testing;US, 7684047 B2[P]. 2010-03-23.
- [14] Pouet B F, Ing R K, Krishnaswamy S, et al. Heterodyne interferometer with two-wave mixing in photorefractive crystals for ultrasound detection on rough surfaces[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(25):3782-3784.
- [15] Chi Mingjun, Huignard J P, Petersen P M. A general theory of two-wave mixing in nonlinear media[J]. Journal of the Optical Society of America B:Optical Physics, 2009, 26(8):1578-1584.
- [16] Blouin A, Delaye P, Drolet D, et al. Sensitive and fast response optical detection of transient motion from a scattering surface by two-wave mixing;US, 5680212A [P]. 1997-10-21.
- [17] Blouin A, Monchalin J P. Detection of ultrasonic motion of a scattering surface by two-wave mixing in a photorefractive GaAs crystal[J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(8):932-934.
- [18] Santos J C, Taplamacioglu M C, Hidaka K. Optical high voltage measurement using Pockels microsingle crystal[J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(8):3271-3276.
- [19] Clorennec D, Royer D, Catheline S. SAW propagation on cylindrical parts using laser-ultrasonics: application to crack detection[C]//Proceedings of 2002 IEEE Ultrasonics Symposium, October 8-11, 2002. New York:IEEE Xplore, 2002:207-210.

(责任编辑:仇慧)