

文章编号: 1001-3806(2010)01-0030-04

载波对分布式光纤泄漏检测系统的影响研究

赵红^{1,2}, 杭利军², 李港^{1*}

(1. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100124; 2. 北京玻璃研究院, 北京 100111)

摘要: 为了实时进行管道泄漏检测与定位, 采用了能够长距离、动态检测泄漏信号的干涉式分布式光纤传感技术。分析了该干涉仪的泄漏检测原理、泄漏源定位方法, 并通过实验研究了载波对传感器性能的影响。由实验结果可知, 当1阶贝塞尔函数达到极值时, 传感器性能最佳; 而贝塞尔函数远离极值点时, 无法实现信号检测。结果表明, 选取最佳的载波参量, 该传感器能够准确地确定泄漏源位置, 且定位误差为0.99%。

关键词: 光纤光学; Sagnac干涉仪; 泄漏检测; 载波

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.009

Influence of carrier on distributed optical fiber leak detection systems

ZHAO Hong^{1,2}, HANG Li-jun², LI Gang¹

(1. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Glass Research Institute, Beijing 100111, China)

Abstract: To detect pipeline leakage and locate leakage point in real-time, a long distance distributed optical fiber sensor based on interferometer principle was introduced to detect leak signals dynamically. The measuring principle and the leaking source locating method for the detection system were analyzed, and an experiment was designed to study the influence of the carrier on the performance of the system. It is observed from the experiment results that the sensor can obtain optimal performance when the absolute value of one order Bessel is max; the leak signal can not be detected when the absolute value of one order Bessel is far less than the max. The results verify that the sensor can locate the leaking source accurately when the optimal carrier parameters are selected, and the positioning error is 0.99%.

Key words: fiber optics; Sagnac interferometer; leak detection; carrier

引言

管道作为生产系统、输送和制造设备的重要组成部分, 在机械、石油、化工、食品和城市供水等行业发挥着不可替代的作用。然而, 管道经长期服役, 受冲刷和腐蚀导致管壁减薄, 常常发生泄漏事故。这不仅带来极大的经济损失, 也会造成环境污染。因此, 实现长距离管道泄漏检测和定位有着极其重要的意义。管网漏检技术的研究在国内外有了较大的发展^[1-2]。但由于管道泄漏检测的复杂性, 以及泄漏形式的多样性, 使得目前还没有一种简单可靠的方法, 能够很好地解决管道泄漏检测问题^[3], 特别是对长距离、小泄漏管道检测更显得无能为力。

分布式光纤传感技术是近年来发展起来的新技

术^[4], 具有抗干扰能力强、灵敏度高、成本低、长距离连续监测的特点, 因此可适合长距离管道泄漏检测。瑞士的 NIKLES^[5] 等人在德国的柏林东北地区, 利用 GESO 公司开发的基于受激布里渊散射的分布式光纤温度传感系统, 对饱和盐水管进行泄漏监测, 但此传感系统对小泄漏不敏感; 英国 York Sensors Limited^[6] 是国际上首家开发光纤分布式测温系统并使之商品化的公司, 通过检测管道周围所产生的温度变化对管道进行泄漏检测, 但只能检测静态损耗和变化缓慢扰动, 而不能实现管道泄漏的实时监测。MENDOZA^[7]、WANG 等人^[8] 开发了基于光时域反射技术的分布式光纤传感器, 将光纤附着在聚合体上, 根据聚合体吸收某种液体而膨胀, 导致附着在其上的光纤产生弯曲损耗来检测液体管道泄漏, 但一种聚合体只适合某些特定的流体, 不具普遍性; 澳大利亚的 FFT 公司^[9-10] 以及国内天津大学^[11] 研制了干涉型分布式光纤微振动传感器, 该传感器可以检测管道泄漏以及所发生的管道第3方破坏事件, 但这种传感器易受外界噪音的干扰, 误报警率较高。本文中研制了一种基于 Sagnac 干涉

基金资助: 国家自然科学基金资助项目(10572009)

作者简介: 赵红(1966-), 女, 博士研究生, 主要从事光纤材料、光纤传感等方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: lig@bjut.edu.cn

收稿日期: 2008-11-26; 收到修改稿日期: 2009-03-16

仪原理的分布式光纤管道泄漏检测系统,利用干涉信号频谱确定泄漏位置,具有较好的抗干扰能力,且由于Sagnac干涉仪为零光程差,对光源要求低,可使用高功率的宽带光源,更适合长距离管道检测。

在干涉型光纤传感系统中,弱信号检测是一项关键技术。而实现弱信号检测除了有较好的检测方法外,设计较佳的系统参量对于提高整个系统的信噪比,增强弱信号的辨识能力也具有重要意义。作者从理论和实验上分别研究了载波幅值对分布式光纤管道泄漏检测系统性能的影响,实验结果与理论比较吻合。

1 检测原理

图1所示的Sagnac光纤干涉仪应用于管道泄漏检测系统,整个系统由光源、光环行器、光纤环、光电转换器、耦合器、相位调制器、锁相放大器和信号处理几部分组成。

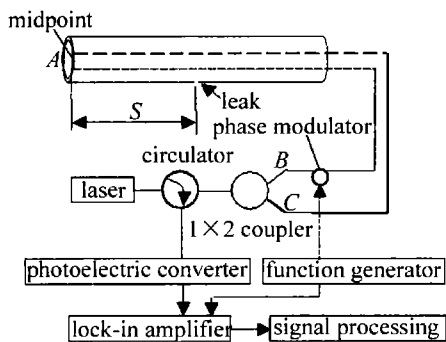


Fig. 1 Pipeline leak detection system

换器、耦合器、相位调制器、锁相放大器和信号处理几部分组成。光源发出的光经光环行器进入1×2耦合器,输入光在1×2耦合器中分成两束,分别沿Sagnac干涉仪光纤环的顺时针和逆时针方向传播,并经过图1所示的泄漏点。管道中流体泄漏后与管壁摩擦,产生的声发射信号作用到光纤上,使光纤的长度和折射率都发生变化,导致光纤中传播的导光相位被调制,调制后的顺逆两束光经过相同的传播路径后又在1×2耦合器汇合并干涉,干涉光经光环行器进入光电转换器。根据Sagnac效应,两束光在光电转换器处输出的光强^[12]为:

$$I = I_0 + I_0 \cos\theta(t) \quad (1)$$

式中, I 为干涉仪输出的总光功率, I_0 正比于输入功率,为直流项, $\theta(t)$ 是由于管道中流体泄漏导致干涉仪中的两束光相位被调制而产生的相位差,是一时变信号。其中干涉项可表达为:

$$I_{12} = I_0 \cos\theta(t) \quad (2)$$

式中, I_{12} 为两束光干涉后输出的光功率。

从图1可知,干涉仪的环状结构中,光纤AB段和AC段并排沿管道布放,同时为了防止干涉系统发生互易效应,将光纤AC段与声场隔离,只使AB段作为传感光纤。当泄漏发生时,光纤AB段在泄漏孔附近受

到泄漏信号的作用,顺逆两束光在光路被调制后返回到耦合器。泄漏信号是一宽频信号^[13],其表达式为: $\phi_s \sin\omega_s t$,其中, ϕ_s 为泄漏信号的幅值, ω_s 为泄漏信号的频率, t 为时间变量。

顺时针传播光经泄漏信号调制后的相位变化为:

$$\theta_1(t) = \phi_s \sin\omega_s(t - \tau_1) \quad (3)$$

式中, $\theta_1(t)$ 为顺时针传播光经泄漏信号调制后的相位变化量, τ_1 为光沿顺时针方向从B点传播到泄漏点所用时间。

逆时针传播光经泄漏信号调制后的相位变化为:

$$\theta_2(t) = \phi_s \sin\omega_s(t - \tau_2) \quad (4)$$

式中, $\theta_2(t)$ 为逆时针传播光经泄漏信号调制后的相位变化量, τ_2 为光沿逆时针方向从C点经过干涉仪中点A后,传播到泄漏点所用时间。

由泄漏信号引起的两束相干光相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\theta(t) &= \theta_1(t) - \theta_2(t) = \\ &= \phi_s \sin\omega_s(t - \tau_1) - \phi_s \sin\omega_s(t - \tau_2) = \\ &= 2\phi_s \cos\omega_s\left(t - \frac{\tau_2 + \tau_1}{2}\right) \sin\omega_s\left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\Delta\theta(t)$ 为泄漏信号引起的两束相干光相位差,令 $\tau_s = \frac{\tau_2 - \tau_1}{2} = \frac{nS}{c}$ (c 为光在空气中的传播速度, n 为光纤的折射率, S 为泄漏点距干涉仪中点距离)为光从泄漏点传播到干涉仪中点所需时间。

为了将泄漏信号引起的两束相干光相位差 $\Delta\theta(t)$ 从干涉信号中解调出来,在图1所示的传感系统中,通过使用相位调制器产生高频载波,利用锁相检测方法解调 $\Delta\theta(t)$,因此,相位调制器产生的载波参量是影响泄漏检测系统性能的关键因素之一。由于顺逆两束光均经过相位调制器,因此,顺时针传播光经相位调制器调制后的相位变化为:

$$\theta_{m1}(t) = \phi_m \sin\omega_m(t - \tau_{m1}) \quad (6)$$

式中, $\theta_{m1}(t)$ 是顺时针传播光经相位调制器调制后的相位变化量, ϕ_m 是载波信号振幅, ω_m 是载波频率, τ_{m1} 是顺时针光传播到相位调制器的时间。

逆时针传播光经相位调制器调制后的相位变化为:

$$\theta_{m2}(t) = \phi_m \sin\omega_m(t - \tau_{m2}) \quad (7)$$

式中, $\theta_{m2}(t)$ 是逆时针传播光经相位调制器调制后的相位变化量, $\tau_{m2}(t)$ 是逆时针光传播到相位调制器的时间。

由相位调制器引起的顺逆两束相干光相位差为:

$$\begin{aligned} \Delta\theta_m(t) &= \theta_{m1}(t) - \theta_{m2}(t) = \\ &= \phi_m \sin\omega_m(t - \tau_{m1}) - \phi_m \sin\omega_m(t - \tau_{m2}) = \\ &= 2\phi_m \sin\omega_m\left(\frac{\tau_{m2} - \tau_{m1}}{2}\right) \cos\omega_m\left(t - \frac{\tau_{m2} + \tau_{m1}}{2}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $\Delta\theta_m(t)$ 为相位调制器引起的顺逆两束相干光的相

位差,令 $\tau_1 = \tau_1 + \tau_2 = \tau_{m1} + \tau_{m2} \approx \tau_{m2} - \tau_{m1} = Ln/c$ (L 为传感器中光纤总长) 为光传播经过光纤环所用的总时间,因此传感器中光纤总长度确定后,此值为定值。

最终干涉信号可表达为:

$$I_{12} = I_0 \cos[\Delta\theta(t) + \Delta\theta_m(t) + \pi] = -I_0 \times \cos\left[2\phi_s \cos\omega_s\left(t - \frac{\tau_1}{2}\right) \sin(\omega_s \tau_s) + 2\phi_m \sin\omega_m\left(\frac{\tau_1}{2}\right) \cos\omega_m\left(t - \frac{\tau_1}{2}\right)\right] \quad (9)$$

利用锁相检测可以解调 Sagnac 光纤干涉仪输出的干涉信号相位,其中锁相放大器的输入信号是 Sagnac 光纤干涉仪输出的干涉信号,而锁相放大器的参考信号频率与干涉仪中高频载波的频率相同,可表示为 $A \times \cos\omega_m t'$,其中 A 为参考信号幅值。

利用贝塞尔函数展开式(9)式,并令 $\phi_m' = 2\phi_m \sin\omega_m(\tau_1/2)$, $t' = t - \tau_1/2$,则有:

$$I_{12} = I_0 \{J_0(\phi_m') \cos[\Delta\theta(t)] - 2J_1(\phi_m') \sin[\Delta\theta(t)] \cos\omega_m t' - 2J_2(\phi_m') \cos[\Delta\theta(t)] \cos 2\omega_m t' + \dots\} \quad (10)$$

式中, $J_0(\phi_m')$, $J_1(\phi_m')$, $J_2(\phi_m')$... 分别为不同阶数的贝塞尔函数。

再将参考信号 $A \cos\omega_m t'$ 与(10)式相乘,并经截止频率小于 ω_m 的低通滤波器后,所得信号为:

$$I_{12} = A \cdot I_0 \cdot J_1(\phi_m') \sin[\Delta\theta(t)] \quad (11)$$

若干涉信号相位 $\Delta\theta(t) < 0.1 \text{ rad}$, 则有:

$$\sin[\Delta\theta(t)] \approx \Delta\theta(t) \quad (12)$$

即从干涉信号中将相位 $\Delta\theta(t)$ 解调出来:

$$I_{12} = A \cdot I_0 \cdot J_1(\phi_m') \Delta\theta(t) = A \cdot I_0 \cdot J_1(\phi_m') \cdot 2\phi_s \sin(\omega_s \tau_s) \cos\omega_s t' \quad (13)$$

经信号解调可以将相位差 $\Delta\theta(t)$ 从干涉信号中解调出来。此值为一时变信号,通过实时检测此相位变化即可判断管道是否发生泄漏。

2 定位方法

泄漏点定位是管道泄漏检测的主要目的,因此,实现泄漏点定位是分布式光纤传感技术的关键所在。(13)式中 $\cos\omega_s t'$ 是时域信号, A 是常量, I_0 是与光功率有关的常量, $J_1(\phi_m')$ 与载波有关(载波确定后,其为常量),而与泄漏位置无关,但其值的选取对系统的检测结果影响较大,因此,研制传感器时需选取合适的载波,以提高系统的性能,而 $2\phi_s \sin(\omega_s \tau_s)$ 是与时间无关的项(泄漏发生后,瞬逆两束光传播到泄漏点的时间差也相应确定,即 τ_s 为定值),因此 $A \cdot I_0 \cdot J_1(\phi_m') \cdot 2\phi_s \sin(\omega_s \tau_s)$ 相当于余弦信号 $\cos\omega_s t'$ 的幅值。对(13)式做快速傅里叶变换,由于泄漏信号的频率 ω_s 是宽频

信号^[13],介于 0kHz ~ 50kHz,其频谱输出结果为各频率信号的输出组合,宽频信号各分量在动态范围内均可被解调出来。因此,当泄漏发生后,在泄漏信号的宽频范围内会出现某些频率使 $\sin(\omega_s \tau_s) = 0$ (称为零点频率),即: $\omega_s \tau_s = 2\pi f_s \tau_s = N\pi$ (14) 式中, N 为奇数, f_s 为信号频率。

可以注意到,对于确定的 τ_s 将有一个或多个 ω_s 使 $2\pi f_s \tau_s = N\pi$,取 $N=1$ 。

由(14)式求得 τ_s 后,根据公式:

$$S = \frac{c\tau_s}{n} = \frac{c}{2nf_s} \quad (15)$$

计算出泄漏位置到干涉仪中点的距离 S ,即确定泄漏位置。

3 载波幅值对检测系统的影响

(13)式中 1 阶贝塞尔函数项与载波有关,因此,在研制检测系统时,如果载波参量设计合理,则能够有效提高系统的检测能力。又因 1 阶贝塞尔函数的变量包含有载波幅值和载波频率两个信息,而传感光纤长度确定后, τ_s 即可确定,因此设计载波频率,可使 $\sin(\omega_m \tau_s/2)$ 的值接近 1。保持此频率不变,研究载波幅值变化对系统检测性能的影响。

当 $|J_1(\phi_m')|$ 取极大值时,输出的干涉信号也较大,则系统将有较好的检测效果,而 $|J_1(\phi_m')|$ 取极小值时,输出干涉信号较弱,信号可能会淹没于噪音中,因此检测效果较差甚至无法定位。从图 2 的 1 阶贝塞尔函数可知,当 $\phi_m' = 1.8 \text{ rad}$ 时,1 阶贝塞尔函数值取

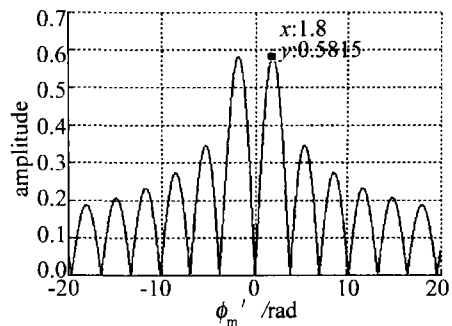


Fig. 2 The absolute value of Bessel function

得较大值,因此,当 $\sin(\omega_m \tau_s/2)$ 的值接近 1 时,设计载波幅值为 $2\phi_m = \phi_m' = 1.8 \text{ rad}$,系统将有较佳检测性能。

为了验证理论分析的正确性,设(13)式中系数 $A \cdot I_0 \cdot 2\phi_s = 1$,设计光纤总长 $L = 14.390 \text{ km}$,泄漏点距干涉仪中点的距离为 7195m,载波频率 118kHz,并分别选取载波幅值 $2\phi_m$ 为 0.03rad, 0.15rad, 0.8rad, 1.4rad, 1.8rad, 2.5rad, 3.0rad 和 3.5rad 等 8 种情况进行了数值模拟,结果如图 3 所示。从图中可以发现,载波幅值为 1.8rad 时检测效果最好,随着载波幅值远离

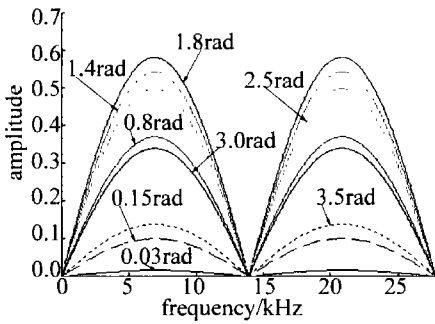


Fig. 3 Null spectrum of leaking signals on different carrier amplitude $2\phi_m$. 1.8rad, 检测效果越来越差, 且当载波幅值为 0.03rad (此幅值下 ϕ_m' 接近 0) 时已无法实现检测, 这与理论分析较吻合。

4 实验研究

在实验室条件下进行了管道泄漏检测实验, 实验装置如图4所示。管道长700mm, 外径74mm, 壁厚

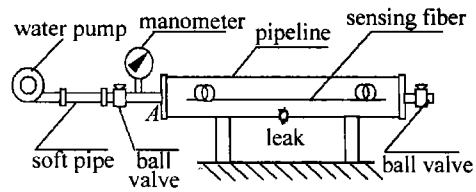


Fig. 4 The diagram of pipeline leak detection equipment

6mm, 距管道左端 A 150mm 处开有一直径为 2.5mm 的泄漏孔, 通过水泵给管道加入压力为 0.28MPa 的水, 使用康宁单模光纤作为传感光纤, 纤芯折射率 $n = 1.5$, 光纤总长 $L = 14.390\text{km}$, 泄漏点距干涉仪中点的距离为 7195m, 相位调制器产生的载波频率为 118kHz (当载波频率为 118kHz 时, $\sin(\omega_m \tau_i / 2)$ 的值接近 1)。检测系统的宽带光源中心波长 1550nm, 带宽 30nm, 功率 20mW。

图5是在载波幅值 $2\phi_m$ 分别为 0.03rad, 0.15rad, 0.8rad, 1.4rad, 1.8rad, 2.5rad 时测得的零点频率。从

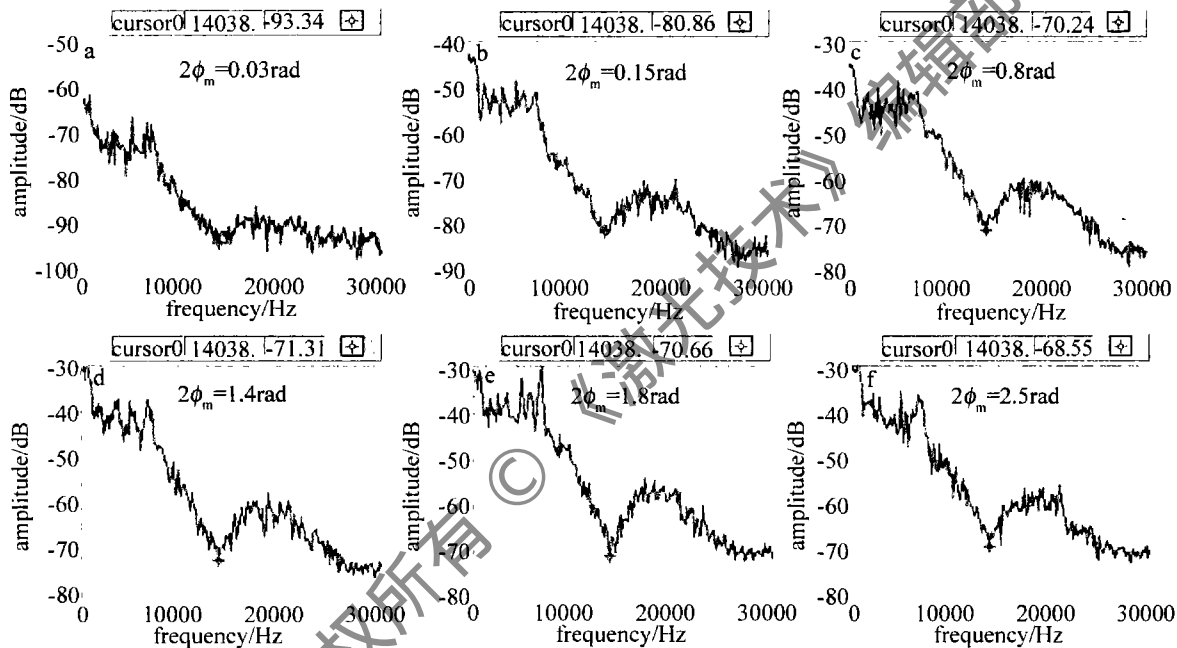


Fig. 5 Null spectrum of leaking signals on different carrier amplitude

图5e中可以发现, 载波幅值在 1.8rad 附近时检测效果最佳, 其它载波幅值下的检测结果均劣于 1.8rad 时的检测结果, 随着载波幅值远离 1.8rad, 检测效果越来越差, 且当载波幅值为 0.03rad 时已无法确定零点频率, 这与图3中的数值模拟结果较吻合。

实验中, 不同载波下测得的零点频率均为 14038Hz, 通过(15)式, 可计算出泄漏位置为 7123.5m, 与实际泄漏位置 7195m 相比, 绝对误差为 -71.5m, 相对误差为 0.99%。

5 结论

研制了一种用于管道泄漏检测与定位的分布式光纤传感系统, 并从理论和实验上分别研究了载波对其传

感性能的影响。此分布式光纤传感技术能够有效地实现管道泄漏检测和定位, 且在确定的频率下, 设计载波幅值 $\phi_m' = 1.8\text{rad}$ 时, 系统性能达到最佳, 随着载波幅值 ϕ_m' 远离 1.8rad, 零点频率变得越来越模糊, 最终零点频率完全淹没于噪声中, 此时传感系统不能实现泄漏检测及定位。故在研制分布式光纤管道泄漏检测系统时, 需选择合适的载波幅值, 以使系统工作在较佳状态。

参考文献

- [1] FUCHS H V, RIEHLE R. Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis [J]. Applied Acoustic, 1999, 33(1): 1-19.
- [2] YU D K, QIAO X G, JIA Zh A, et al. The fiber Bragg grating temperature and pressure sensing system applied in oil pipeline [J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 12-14 (in Chinese).

(下转第 98 页)

成形性能。(3)不同激光能量密度下板料在中心处厚度减薄最快,最容易发生破裂,且该点等效应变值最大。

参 考 文 献

- [1] GAO L,ZHANG Y K. FEM studies on deformation of TA2 sheet metal by laser shock [J]. Applied Laser,2006,26(3):154-156 (in Chinese).
- [2] ZHOU J Z,ZHANG Y K,ZHOU M, *et al.* Study on technique of laser shock forming of metal sheet [J]. Laser Technology,2002,26(6):478 (in Chinese).
- [3] CHEN Y B,ZHOU J Zh,HUANG Sh, *et al.* Study on the numerical simulation of laser forming of sheet metal based on ABAQUS code [J]. Applied Laser,2007,27(3):175-180 (in Chinese).
- [4] JOSEF R U,TAYLOR W L,PHILLIP R S, *et al.* Short-pulse high-peak laser shock peening; U S,252620 [P]. 1999-02-16.
- [5] THORSLUND T,KAHLEN F J,KAR A. Temperature, pressure and stress during laser shock processing [J]. Optics and Lasers in Engineering,2003,39(1):51-71.
- [6] ARIF A F M. Numerical prediction of plastic deformation and residual stress induced by laser shock processing [J]. Journal of Materials Processing Technology,2003,136(1):120-138.
- [7] NARASIMHAN K. A novel criterion for predicting forming limit strains [C]//Materials Processing and Design; Modeling, Simulation and Applications. 2004 Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Columbus, Ohio: American Institute Physics,2004:850-855.
- [8] CHEN W, GUO W G, HOU B, *et al.* Prediction of forming limit diagram in sheet metal forming based on thickness gradient criterion [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18 (18): 2246-2248 (in Chinese).
- [9] CHEN W, FENG H Y, YANG J C, *et al.* Application of thickness gradient criterion in establishing forming limit diagram [J]. Journal of Jiangsu University, 2008, 29 (1): 13-16 (in Chinese).
- [10] JOHNSON G, COOK W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures [C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague; Netherlands International Ballistics Committee, 1983: 541-547.
- [9] TAPANES E. Dual-purpose fibre optic system providing simultaneous, real-time communication and distributed vibration sensing for pipeline applications [C]//International Pipeline Conference. Calgary: American Society of Mechanical Engineers, 1998:103-110.
- [10] LAFFREY D, LUBBERS J, KING B, *et al.* An effective and proven technique for continuous detection and location of third party interference along pipeline [C]// Proceedings of the 4th International Pipeline Conference. Core, Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2002:947-952.
- [11] ZHOU Y, JIN Sh J, ZHANG Y Ch, *et al.* Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline leakage detection [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2005, 16 (8): 935-938 (in Chinese).
- [12] KURMER J P, KINGSLEY S A, LAUDO J S, *et al.* Distributed fiber optic acoustic sensor for leak detection [J]. SPIE, 1991, 1586:117-128.
- [13] WASSEF W A, BASSIM M N, HOUSSNY-EMAM M. Acoustic emission spectra due to leaks from circular holes and rectangular slits [J]. J Acoust Soc Amer, 1985, 77 (3): 916-923.

(上接第33页)

- [3] CHEN H B, TU Y Q. Summary of leak detection methods for oil pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2000, 22 (1): 38-41.
- [4] BUCARO J A, HICKMAN T R. Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection [J]. Appl Opt, 1979, 18 (6): 938-940.
- [5] NIKLES M, VOGEL B, BRIFFOD F, *et al.* Leakage detection using fiber optics distributed temperature monitoring [J]. SPIE, 2004, 5384: 18-25.
- [6] CAI D S, DAI H Ch, CAI Sh D, *et al.* Monitoring the temperature in concrete structure of three gorges dam by using distributed optical fiber sensor [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34 (5): 88-91 (in Chinese).
- [7] MENDOZA M, CARRILLO A, MÁRQUEZ A. New distributed optical sensor for detection and localization of liquid hydrocarbons part II: optimization of the elastomer performance [J]. Sensors and Actuators, 2004, A111 (2/3): 154-165.
- [8] WANG Y N, ZHAO Y L, JIANG Zh D, *et al.* Study on the distributed optical fiber sensor for long-distance natural gas pipeline leakage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37 (9): 933-936 (in Chinese).