

文章编号: 1000 0747(2006) 02-0233-04

利用声发射原理进行套管损坏实时监测 实验研究初探

李军, 陈勉, 柳贡慧

(中国石油大学(北京))

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目(90510005); 石油中青年创新基金(03E7019);
教育部“长江学者和创新团队发展计划”项目(IRT0411)

摘要: 为了探讨利用声发射原理对套管损坏状态进行实时监测的可行性, 在利用模拟套管进行先导性实验的基础上, 建立并完善了利用声发射技术进行套管损坏实时监测研究的整套装置。对现场常用套管进行了损坏变形全过程声发射实时监测实验, 结果表明, 套管变形过程中的声发射信号与其相应的变形应变信号之间有明确的对应关系。套管挤压变形过程中声发射信号的变化大致可以分为 3 个阶段。在套管初始变形期, 声发射信号频繁, 但强度不大, 主要为原生裂纹闭合所致; 在套管稳态变形期, 声发射信号较弱, 原生裂纹已经闭合, 新的裂纹产生很少, 套管变形稳定增加; 在套管加速变形期, 声发射信号频繁, 且强度很大, 说明有大量新的裂纹产生, 套管迅速损坏。利用声发射信号变化的趋势和阶段性可间接判断套管的损坏程度, 从而为套管损坏实时监测技术提供了新的思路。图 5 参 11

关键词: 套管损坏; 声发射; 实时监测; 实验

中图分类号: TE931.2 文献标识码: A

Real time monitoring test of casing damage with acoustic emission technology

LI Jun, CHEN Mian, LIU Gonghui

(College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract Based on the pilot test with simulative casing, the complete set of real time monitoring test equipment used to study the casing damage problem was established and improved. Experimental results with several typical casings show that the relationship between acoustic emission signals and the corresponding deformation ones is clear during the casing distorting process. The casing acoustic signals can be divided into three phases. In the first phase, the acoustic signals are frequent but not strong, which is mainly caused by the closure of the intrinsic cracks. In the second phase, the acoustic signals are less. The new cracks appear sparse and the casing deforms smoothly. In the third phase, the acoustic signals are frequent and strong. Lots of new cracks appear and the casing collapses rapidly. With the clear three phase features of the acoustic signals, the degree of casing damage can be estimated indirectly. The achievement provides a new idea for the casing damage real time monitoring technology.

Key words casing damage; acoustic emission; real time monitoring test

0 引言

油田开发中后期, 套管损坏问题非常突出, 成为制约油气生产的重要瓶颈^[1]。关于套管损坏的检测与预测技术已经进行了大量卓有成效的研究^[2-8], 其成果已经广泛应用于油田生产。然而套损检测与预测技术均有其先天缺陷: 套损检测往往在套管损坏后才进行, 是一种被动行为; 套损预测则相反, 是基于历史数据等综合因素进行的事先判断, 其精度难以保证。由于套损造成的损失十分巨大, 因此更迫切需要实时动态掌握套管的变形情况, 变被动为主动, 及早采取措施, 尽可能延长套管的寿命。但目前套损的实时监测技术在国内外均为空白。基于此, 笔者提出了利用声发射原理

对套管损坏状态进行实时监测的新思路。

声发射技术是一种高灵敏度的动态无损检测诊断技术, 它能够长期、连续监测构件活动性和安全性^[9-10]。由于可以在线监测而无需停产, 大大减少了停产造成的损失, 因此得到了广泛的应用。声发射技术同样用来实时监测套管状态。而且, 石油生产所用套管具有以下优点:

①结构稳定性好。在固井后, 套管将和水泥环及地层固结为组合体。此时的套管不存在弯曲失稳问题, 基本没有冲击载荷和振动影响, 套管的变形也相对比较单纯, 主要为挤毁、错断等形式。

②噪声影响小。由于深埋地下, 除了抽油机等生产工具有规律的噪声外, 基本没有其他杂波的影响, 这

就为噪声的剔除和有效信号的提取提供了可能。与应用声发射技术来诊断滚动轴承、发动机磨损等旋转机械故障相比,石油套管所受的噪声影响是非常弱的。

③金属的声发射信号比较稳定。石油生产所用套管均采用优质高强度钢加工而成,同钢级、同尺寸、同壁厚套管的性能及其声发射信号的可靠性、重复性应该比一般金属管材要好的多。这些都为声发射技术的应用创造了有利条件。

本文在利用模拟套管完成了套管损坏实时监测先导性实验的基础上,建立并完善了用于实际套管变形过程监测研究的整套实验装置。利用实际套管进行了损坏变形全过程声发射实时监测实验,证实了套管变形过程中的声发射信号与其相应的变形应变信号之间有明确的对应关系,发现了声发射信号的阶段性规律,从而为利用声发射原理进行套管损坏实时监测研究奠定了理论基础。

1 模拟套管损坏声发射实时监测先导性实验

将声发射技术用于套管损坏实时监测研究在国内外尚属首次。初期的考虑难免有不周之处,许多技术难点和关键问题也必须通过实验来发现、解决和完善。因此,首先进行先导性实验是非常必要的。研究中充分利用和完善了现有条件,并购置了相应的新仪器,完成了实验装置的设计与组装,涉及到载荷施加、声发射信号采集、套管应变测量等多方面内容。实验装置包括:MTS 816材料实验系统、MTS-286伺服加载系统、YEG-60A 液压式压力实验机、LOG-AT 声发射仪、BZ2204多通道动态电阻应变仪、应变测量系统等。模拟套管采用普通 25 钢加工而成。

实验中得到了模拟套管的变形量及相应声发射信号随时间的变化关系(见图 1)。为对比直观起见,将套管断面变形量(椭圆短轴方向变形距离)与声发射累积能量绘于同一图中。可以看出,套管变形过程与其声发射信号有着一定的对应关系,二者的变化趋势基本一致。声发射信号的突变点比较明显,而变形量曲线的反映主要是斜率的变化。这主要是因为声发射信号比套管变形信号敏感性更强所致。这一点也恰恰突出了声发射技术的优点:构件的微小变形能及时直观地显现出来。

由于模拟套管与实际套管的几何形状、加载条件、变形过程基本相同,因此,其声发射信号的规律也有一定的相似性。但是,由于模拟套管存在明显焊缝,加上其材料性能(普通 25 钢)与采用优质高强度钢的石油

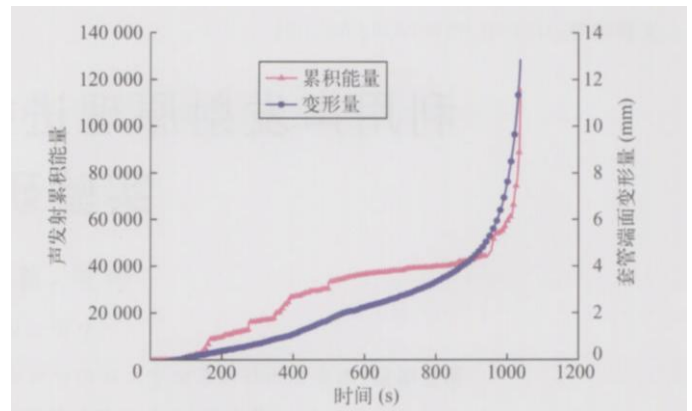


图 1 模拟套管变形及其声发射信号随时间变化图

专用套管存在较大差异,因此,模拟套管也只能是在一定程度上近似反映实际套管的规律。有必要在采用模拟套管完成先导性实验、完善实验方案后,采用实际生产用套管进一步深入研究。

2 实际套管损坏声发射实时监测实验

实际套管的强度很大,必须有足够的外载才能将其挤压变形。因此采用 600kN 的液压式压力机作为载荷源。图 2 为实验装置图。为了使实验结果具有代表性,选择管径为 244.5mm (9 $\frac{5}{8}$ in)、177.8mm (7 in)和 127mm (5 in)的 3 种常用套管作为实验对象。限于篇幅,这里仅以管径为 244.5mm 的套管为例对实验结果进行分析。

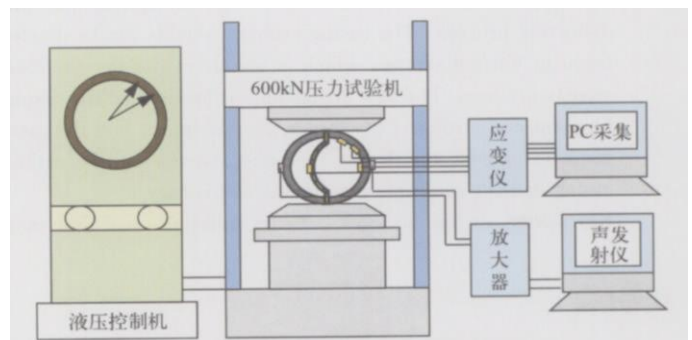


图 2 声发射法监测套管损坏实验装置图

图 3 为 244.5mm 套管变形损坏过程中声发射累积计数、累积能量随时间的变化关系。由图可见,声发射信号在套管变形过程中的阶段性非常明显,图中曲线的斜率在对应的突变点处发生明显变化(箭头所指处)。与上述模拟套管的实验曲线对比可以发现,实际套管变形过程中声发射信号的阶段性规律更加明显。原因可能在于模拟套管加工中的缺陷较多,因而其声发射信号的变化有一定的随机性。而实际石油用生产套管采用优质钢材经过严格的生产工艺加工而成,材料的稳定性更好,相应的声发射信号的规律性更强。

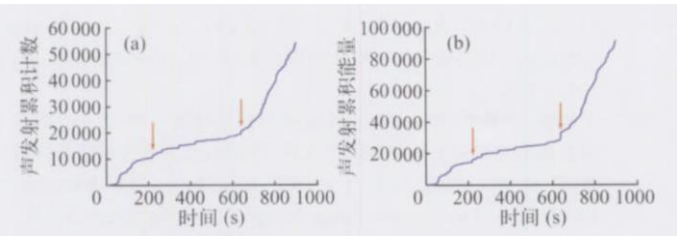


图 3 声发射信号随时间变化的关系曲线

套管变形是一个缓慢的连续变化的过程。因此,肉眼无法识别套管变形过程中的微小突变,需要采用自动连续测量系统才能达到目的。为准确测得套管的变形情况,设置 4 个测点同步测量,监测装置见图 2 实验中得到的套管随时间的变形结果见图 4

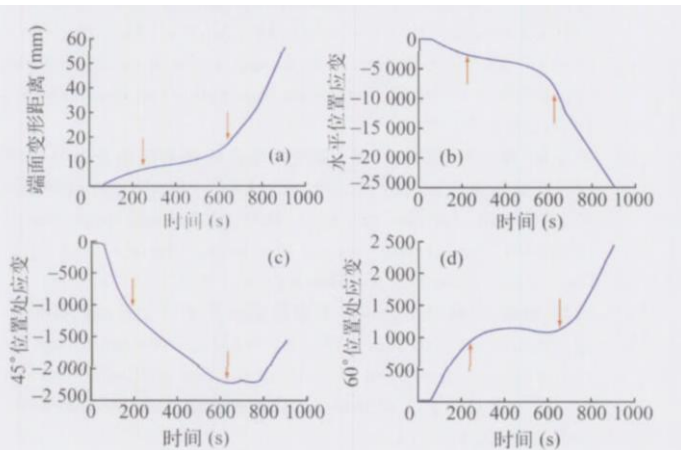


图 4 套管变形随时间变化的关系曲线

图 4a、4b 反映的变形过程十分吻合。套管端面水平位置处在变形过程中始终处于压缩状态,故其应变始终为负。在套管变形初期,原生的微裂隙闭合,变形速率相对较快。而在套管变形中期,原生裂纹已经闭合,产生的新裂纹较少,因此变形曲线比较平缓,变形速率相对较低。由于石油生产用套管的材料质量好,原生裂纹较之模拟套管要少得多,因此前两个阶段的突变点并不十分明显。在套管变形后期,由于大量裂纹的产生,套管已发生明显变形,曲线斜率较大,变形速率很快,套管进入加速变形阶段。

图 4c 反映了套管断面 45° 位置处的应变情况。在套管变形初期,测点处受压。到了变形后期,套管已由圆形变成了椭圆形,此时测点处由受压变成了受拉,因此在变形曲线上出现了应变由增大变为减小的情况。利用有限元软件模拟套管变形过程也证明了这一点,这也从侧面反映了测量结果是真实可靠的。

同样,在 60° 位置测点处 (见图 4d),套管的应变也呈现出了拉压交变的状态。在套管变形初期和后期,该测点均为拉伸变形。而在套管变形中期,该测点变形很小,处于拉压临界状态。

由图 4 可见,套管的变形表现出较明显的阶段性。尽管与声发射信号相比,曲线的突变点并不十分明显。但是通过曲线斜率的变化,仍可以比较清晰的反映出套管变形的阶段性,这一点说明了利用声发射技术监测套管变形的优势,即声发射信号比变形信号更为敏感,套管的微小变化可由其声发射信号的变化准确地反映出来。究其原因,就在于声发射信号的产生实际上源于套管本体材料在外力作用下产生的微裂纹。当产生的微裂纹很少时,套管外观并未产生变形。当外载继续加大,微裂纹数量越来越多时,相应的套管外形才产生可测量到的变形信号。由于套管壁较厚,且材料的强度很高,因此一般不会产生脆裂性的破坏,而是一个逐渐变化的过程,变化的快慢体现在变形曲线的斜率即变形速率上。

为对比直观,将 244.5mm 套管的变形信号与其声发射信号随时间的变化结果绘于同一图中,如图 5 所示。显然,套管的变形与其相应的声发射信号有着明确的对应关系,二者的曲线形态,突变点位置等均吻合较好。综合分析套管的变形与声发射信号特征,认为套管挤压变形过程中的声发射信号大致可以分为 3 个阶段,即初始变形期,稳态变形期和加速变形期。在初始变形期,声发射信号频繁,但强度不大,主要为原生裂纹闭合所致;在稳态变形期,声发射信号较弱,累积能量曲线比较平缓,说明原生裂纹已经闭合,新的裂纹产生较少,套管变形稳定增加;在加速变形期,声发射信号频繁,且强度很大,说明有大量新的裂纹产生,套管迅速损坏。套管变形声发射信号的阶段性为套管损坏过程的实时监测提供了有利条件。

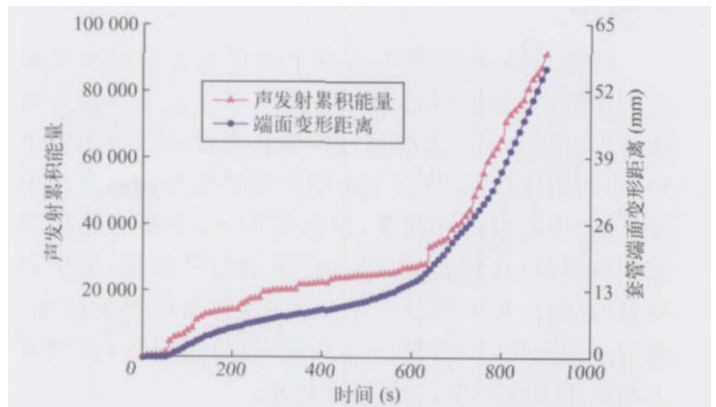


图 5 244.5mm 套管的变形与其声发射信号之间的关系图

3 讨论

套管变形及其声发射信号的阶段性以及声发射时域参数曲线上的突变点或曲线斜率变化比较明显,这些都为根据套管的声发射信号来判断其变形程度创造了有利条件。尽管套管损坏声发射实时监测得出了令

人鼓舞的结论,但仍有大量的研究有待进行,才能真正将声发射技术应用于生产实际。比如:①水泥环的影响。本次实验中没有考虑水泥环,而现场实际发生套管损坏的位置很多都位于已固井段。水泥环的破坏会对套管声发射信号分析产生影响,开展具有水泥环条件下的相关研究是非常必要的。②载荷类型的影响。石油生产套管所承受的外挤载荷比较复杂,包括均匀载荷、非均匀载荷、点载荷等多种情形。本文考虑的单向载荷只是其中一种,应加强多种载荷形式下套管损坏的研究工作。③噪声信号剔除。室内条件可以人为控制,基本可排除噪声的影响。而作业现场情况复杂,噪声源多,因此需要根据套管声发射信号的频域特征参数加以区分^[11]。④信号传输问题。生产套管深埋地下,因此声发射信号的传输与采集是一项关键技术。从目前的情况看,声发射信号的传输可能是该项技术发展的另一大难点。由于套管具有结构稳定性好、变形形式单纯、材料性质稳定、地下噪声信号弱等优点,相信随着科学技术的进一步发展,套管声发射信号传输问题可以得到解决,声发射技术最终将能够为石油生产用套管损坏的实时监测所采用。

总之,利用声发射原理进行套管损坏实时监测是一项有着巨大市场前景和应用价值的研究,其难度也比较大,许多技术难点有待解决。在通过室内实验确定套管变形量与其声发射信号间的对应定量关系模型、打下初步理论基础后,应进一步加强研究,逐步解决相关技术难点。

4 结论

研究表明,套管变形过程中的声发射信号与其相应的变形应变信号之间有明确的对应关系。套管挤压变形过程中的声发射信号的变化大致可以分为3个阶段:初始变形期、稳态变形期和加速变形期。在初始变形期,声发射信号频繁,但强度不大,主要为原生裂纹闭合所致;在稳态变形期,声发射信号较弱,原生裂纹已经闭合,新的裂纹产生很少,套管变形稳定增加;在加速变形期,声发射信号频繁,且强度很大,说明有大量新的裂纹产生,套管迅速损坏。

为了使声发射技术早日在石油生产用套管损坏实时监测中投入应用,必须进一步加强水泥环条件、载荷类型对套管损坏声发射信号的影响以及噪声剔除、信号传输等方面的研究。

参考文献:

[1] 张先普,陈继明,张效羽,等.我国油田套管损坏的原因探讨[J].石油钻采工艺,1996,18(5):7-12 (ZHANG Xian pu, CHEN Ji

ming, ZHANG Xiao yu et al. Discussion on causes of casing failure in oilfields[J]. Oil Drilling & Production Technology 1996 18 (5): 7-12.)

- [2] 王同良,李万平.国外套管损坏监测与防治情况介绍[A].首届全国套损治理研讨会论文集[C].北京:中国石油天然气集团公司信息研究所,2002.1-7 (WANG Tong liang LI Wan ping Introduction of the overseas casing damage monitoring technology[A]. Symposium of the 1st meeting about casing damage problem in China [C]. Beijing Information Research Center CNPC, 2002.1-7.)
- [3] 张广清,陈勉,耿宇迪,等.松软地层套管损坏的影响因素研究[J].石油勘探与开发,2005,32(1):112-115. (ZHANG Guang qing CHEN Mian GENG Yu di et al. Casing damage mechanism in sand producing formations[J]. Petroleum Exploration and Development 2005 32(1): 112-115.)
- [4] 赵平溪,李春荣,陆建辉.一类非线性系统的建模及其在套管损坏趋势预测中的应用[J].石油勘探与开发,1997,24(6):86-89. (ZHAO Ping xi LI Chun rong LU Jian hui Modeling for a class of nonlinear system and its application in predicting the casing failure trend[J]. Petroleum Exploration and Development 1997 24(6): 86-89.)
- [5] 王永东,徐国民,贺贵欣,等.套损井综合管理系统的开发与应用[J].石油勘探与开发,2002,29(3):81-84 (WANG Yong dong XU Guo min HE Gui xia et al. Development and application of integrated management system for casing damage well[J]. Petroleum Exploration and Development 2002 29(3): 81-84.)
- [6] 余雷,薄岷.辽河油田热采井套损防治新技术[J].石油勘探与开发,2005,32(1):116-118. (YU Lei BO Min New technology for casing damage prevention and cure of thermal production wells in Liaohe Oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development 2005 32(1): 116-118.)
- [7] 崔孝秉,岳伯谦,罗维东,等.注水油田套管损坏区套管损坏预测法[J].石油大学学报(自然科学版),1994,18(1):50-55 (CUI Xiao bing YUE Bo qian LUO Wei dong et al. A predictive method for casing damage wells of oilfield with water injection[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1994 18(1): 50-55.)
- [8] 张效羽,张先普,赵国珍,等.预测套管寿命的一种新方法[J].石油机械,1996,24(8):28-31. (ZHANG Xiao yu ZHANG Xian pu ZHAO Guo zhen et al. New method for predicting service life of casing[J]. China Petroleum Machinery 1996 24(8): 28-31.)
- [9] 刘国光,程青蟠.声发射技术及其在金属材料领域的应用[J].上海金属,2001,23(6):35-41 (LIU Guo guang CHENG Qing pan. Acoustic emission technology and its application to metal materials [J]. Shanghai Metals 2001 23(6): 35-41.)
- [10] Savits M ibs Cockram et al Active acoustic monitoring of laboratory scale hydraulic fracturing experiments[A]. SPE 26263 1993.
- [11] 沈功田,耿荣生,刘时风.声发射信号的参数分析方法[J].无损检测,2002,24(2):72-77 (SHEN Gong tian GENG Rong sheng LIU Shi feng Parameter analysis of acoustic emission signals[J]. Nondestructive Testing 2002 24(2): 72-77.)

第一作者简介:李军(1971)男,河北海兴人,博士,中国石油大学(北京)石油天然气工程学院讲师,从事石油工程岩石力学研究。地址:北京市昌平区,中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,邮政编码:102249;电话:(010)89733149;E-mail:lijun446@vip.163.com

收稿日期:2005-11-24 修回日期:2006-01-19

(编辑 唐金华 绘图 李秀贤)