

基于管道应变监测的滑坡灾害预警与防治

贺剑君¹ 冯伟¹ 刘畅²

1. 中国石油天然气股份有限公司西气东输管道分公司 2. 北京科力华安地质灾害监测技术有限公司

贺剑君等. 基于管道应变监测的滑坡灾害预警与防治. 天然气工业, 2011, 31(1): 100-103.

摘 要 因其复杂性、多发性和较强的危害性, 滑坡地质灾害是长输油气管道难以回避的重大安全风险之一。作为管道完整性管理的核心技术, 管道应变监测和应变分析能够直观、定量地获得地埋工况条件下管体本身的即时应力应变数据, 在及时发布承灾体(管道)变形预警的同时, 还可以对致灾体(滑坡灾害)的治理过程进行指导和评价灾害治理的实际效果, 从而给运营商带来明显的减灾效益。为此, 以某天然气管道的受灾管段为例, 进一步阐明了管道应变监测的应用方法和在治理中的实际效果, 论证了管道应变监测及其分析技术的适用性和可靠性, 为长输油气管道地质灾害防御提供了一个新的、有效的技术思路。

关键词 长输油气管道 完整性管理 管道应变监测 滑坡灾害监测 滑坡灾害预警 滑坡灾害治理

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.01.024

在以滑坡等地质灾害为致灾体、以长输油气管道为承灾体的耦合关系中, 由滑坡导致的管线事故经常发生, 特别是在我国油气资源丰富的西部地区^[1]。轻者可使管线架空悬垂, 重者可使管线断裂。管线泄漏或破裂不仅会立即导致火灾和爆炸, 而且还会对环境产生长期的影响^[2]。为避免由此产生的社会和经济损失, 削减管道的地质灾害风险, 对滑坡灾害威胁下的长输油气管道进行实时监测具有重大现实意义。

管道应变监测及分析技术是管道完整性管理的核心技术之一, 它能直观、定量地获得地埋工况条件下管体本身的即时应力应变数据, 不但能够及时发布变形预警, 还可以指导滑坡灾害的治理过程, 评价灾害治理的实际效果, 从而给运营商带来明显的减灾效益。下面以某天然气管道的受灾管段为例进行分析。

1 某受灾管段基本情况

某管道的受灾管段 D 管段输送介质为天然气, 管径为 $\varnothing 1\,016\text{ mm}$, 壁厚为 26.2 mm (地埋管段) 和 14.6 mm (跨越管段), 钢级为 X70, 设计压力为 10 MPa , 运行压力为 8.3 MPa 。该管段自北以 20° 缓坡至溪谷, 30 m 跨越后平铺 100 m (跨越两端有管支墩), 再沿 15° 缓

坡向南直线铺设; 管段位于自西向东 23° 不稳定坡体的中部。该坡体属于山间河谷地貌, 斜坡和山顶广泛覆盖 Q3 马兰黄土, 质地疏松, 河床内出露三叠系灰绿色薄片状砂岩、灰黄色薄—中厚层状砂岩, 岩层产状平缓。

管线自 2003 年投入运行, 至 2008 年初 D 管段陆续出现以下异常^[3]: 跨越北侧护坡、排水沟开裂; 跨越管段向上起拱变形; 跨越南侧管支墩锚固螺栓弯曲, 基座钢板变形翘起, 砌石防护墙严重变形、塌陷, 因管道偏移在防护墙上产生的裂缝达 14 cm 。经现场勘查, 未发现地表裂缝及坡体失稳迹象, 但出露部分的管体位移却非常明显且不断加剧。显然, 依靠传统的地表位移监测已无法解释这一现象的成因, 更难以判断管体本身的受损情况。

2 应变监测方案

多年的管道地质灾害防治经验表明, 管体的变形、受损程度往往与地表的变形特征缺乏一一对应关系, 尤其当管道处于地埋工况。在这种情况下要查明管体变形的原因和趋势, 并对可能发生的突发灾害进行预警, 管道应力应变监测是最为便捷、有效的技术手段。

作者简介 贺剑君, 1963 年生, 工程师; 1982 年毕业于原大庆石油学校; 现在中国石油西气东输管道公司宁陕管理处从事长输油气管道管理工作。地址: (200122) 上海市浦东新区福山路 458 号同盛大厦 1903 室。电话: 13909592658。E-mail: xqds_hsk@sohu.com

2.1 方案选取

针对 D 管段的实际情况,采取了管道应力应变监测和地表位移监测并用的“复合监测法”。前者采用振弦式传感设备,后者采用便携式 GPS 技术设备。该监测工法已经在西气东输管道沿线地质灾害前期监测网上广泛应用,具有投资少、工期短、取数方便的特点,尤其适用于在役管线。

2.2 监测布局

根据现场勘察资料和专家会诊意见,利用 ABAQUS 软件对管道应力场进行有限元模拟分析,大致确定管道在此管段的应力集中点;将这些坐标点及参照点定为实施管道应力应变监测的监测截面(图 1)。6 个监测截面依次为 X1、X2、X3、X4、X5、X6,每个监测截面布设 1 组振弦式应变传感器(该传感器还可同步监测管表温度)。通过这些应变传感设备,不仅能够掌握各个监测截面的最大应力应变,还可以判断应变发生的方向。

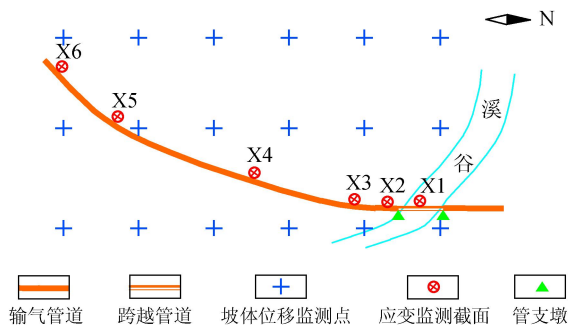


图 1 监测截面布置图

为掌握管段附近的坡体变形程度和发育速度,使用 GPS 测量仪器均匀等距布设 18 个坡体位移监测点(图 1);同时与 6 个监测截面一一对应,取得截面坐标以测算管体的初始变形。

2.3 数据输出与处理

将上述数据代入相关规范中的应变校核准则,可对监测管段的力学状态作出定量评价,同时也可以利用管线的应力—应变特性关系来求解管线应力数据。

管线屈服之前,采用如下关系式:

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

在管线屈服以后,可以采用 Ramberg-Osgood^[4]建议的关系式:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \left[1 + \frac{n}{1+r} \left(\frac{\sigma}{SMYS} \right)^r \right] \quad (2)$$

式中 ϵ 是工程应变; σ 是轴向应力; E 是弹性模量; n 和

r 是 Ramberg-Qsgood 参数; $SMYS$ 是屈服应力。

表 1 列出了常用等级管线钢的 $SMYS$ 、 n 和 r 值。

表 1 常用管道钢的 Ramberg-Osgood 参数表

	Grade-B	X-42	X-52	X-60	X-70
$SMYS/MPa$	227	310	358	413	517
n	10	15	9	10	5.5
r	100	32	10	12	16.6

3 监测数据分析与应用

在 D 管段的 6 个管道应力应变监测截面中, X3 截面的应变变化最大, 是应力最为集中的监测截面, 以下即以 X3 截面为重点讨论对象, 来说明管道应变监测技术的预报、预警和治理指导作用。

3.1 预报预警阶段

现场布设工作结束后不久, 春融期的到来使 D 管段地表出现了严重汇水。从监测数据看, 该管段管道没有出现过大的应变变化, GPS 地表位移监测也没有发现地表位移的异常情况。与现场布设期相比, 2008 年 4 月 25 日的 X3 截面的弯曲应变仅为 379.0 个微应变(图 2), D 管段管道应变变化处于可接受变化范围(以下弯曲应变均以 2008 年 1 月 26 日监测数据为比较初始值)。

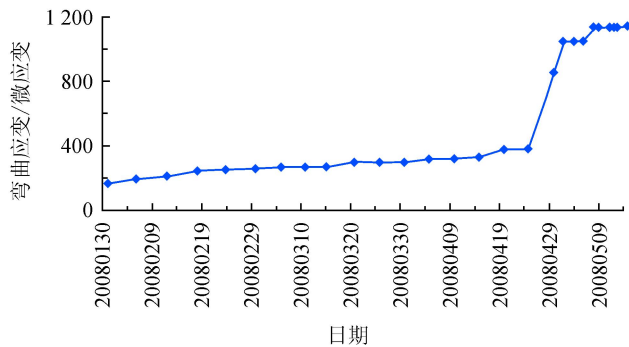


图 2 预报预警阶段 X3 截面应变监测数据图

2008 年 4 月 29 日该管段地区出现一次强降雨, 4 月 30 日管道应变监测数据即出现异常变化(图 2); X3 截面的弯曲应变跃升为 856.7 个微应变, 即短短 5 d 时间, X3 截面的弯曲应变增加了 477.7 个微应变。很明显, 管道在短期内弯曲变形加大, 已呈突变态势。即便如此, GPS 地表位移监测仍未显示出地表异常, 地表位移变化仍在毫米级。

2008 年 5 月 2 日, 该管段地区再次出现强降雨。与上次的强降雨一样, 管道应变再次出现了较大变化,

弯曲变形进一步加大,X3截面的弯曲应变再次跃升为1 042.9个微应变,较4月30日又增加了186.2个微应变(图2)。

至此,虽然坡体地表尚未出现失稳迹象,但管体应变监测数据的异常已确凿无疑,监测单位遂于5月4日发出了预警通报。

3.2 勘查会诊阶段

至2008年5月15日X3截面弯曲应变达到1 139.2个微应变时,GPS地表位移监测数据也侦测到了该管段地表位移的异常。为慎重起见,业主方一边提高监测频率,一边组织专家进行了现场勘查会诊。

经现场踏勘发现,在该管段坡体上方出现宽度约20 cm的新裂缝,坡体下部形成多条拉张裂缝,证明D管段穿越的坡体已发生了蠕滑。该滑坡形态呈“圈椅”形,上部和下部较陡,中部较缓(局部地段呈洼地);滑坡体长100 m,最大宽度100 m,主滑方向343°,平均坡度在15°~25°之间。管道在滑坡的中上部斜向贯穿滑坡,与滑坡主滑方向的夹角约为60°;管道距滑坡体前缘约60 m,距滑坡后缘约40 m。

2008年4月29日及2008年5月2日的两次强降雨,使该管段附近滑坡体蠕滑加剧,在雨中和雨后尤其明显。由于管道与滑坡体之间摩擦力相互作用,随着该滑坡体的蠕滑加剧,坡体内的管道也发生相应的急剧应变变化。随着两次强降雨的逐渐远去,滑坡体的蠕滑逐渐减缓并趋于稳定,管道的应变变化也趋于稳定;2008年6月9日X3截面的弯曲应变为1 154.3个微应变,较之于2008年5月8日,仅增加了21.2个微应变。

D管段管道应力应变监测发现应变变化异常的时间为2008年4月30日,而GPS地表位移监测发现地表异常的时间为2008年5月15日,即应变监测的灾害预警较地表位移监测要早15 d。

滑坡运动的一般特征是内部蠕变先于地表。显然在这种情况下管道应变监测能够更早侦测到滑坡灾害发生的前兆,进而为管线的灾害治理提供宝贵的缓冲时间。另外,6月中旬的应变监测数据持续稳定在1 100个微应变左右也很不正常,这说明由于D管段两端存在较为刚性的约束点(如管支墩),致灾体(滑坡)施加在承灾体(管道)上的应变无法自行释放,管道的承灾力学性能已大大削弱。

3.3 灾害治理阶段

专家论证后认为,D管段属于典型的“降雨失稳”管道灾害,其灾害链可简单描述为:强降雨—坡体失稳—管道弯曲。依据长输油气管线相关规范^[5-6]和有

关管理条例,基于上述监测数据,决定开挖管沟释放部分管体新增应力,同时采取反压坡脚并疏导汇水的水工保护治理措施。在实施治理的同时,提高应变及地表监测频率以及时指导现场施工。

首先,管体应力释放要控制在合理范围内。一定长度内的管体应变既然已发生,就很难再回复到初始状态;过度的释放有可能会加剧该管段的力学损伤,甚至影响相邻管段的稳定和安全。换言之,管体的应力释放是以减缓并消弱灾害风险为目标的,而不是像改线那样去根除风险。治理阶段的应变动态监测可以控制应力释放的程度。其次,管体应力的释放要从低应变区逐段向高应变区逼近,而不是直接开挖管道变形最为剧烈的管段,否则有可能导致管体在卸载后大幅度振荡,加剧管体损伤。随着管沟的逐段开挖,该管段应力分布也会发生即时变化,此时的应变监测数据可指导开挖进度和开挖位置调整。最后,采用管道应变监测还可以获得管线各监测截面实时应变极值的角度(如图3),即角位移分析。角位移分析图能够清晰地表明最大应力的方向、管道弯曲的方向,以及整个管段弯曲扭转的状态及趋势,进而指导对管体进行细微的挪移。

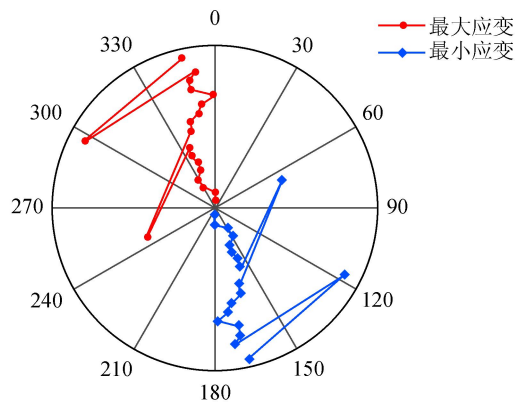


图3 灾害治理阶段X3截面角位移分析图

3.4 灾害治理效果及评价

管沟开挖作业于2008年6月10日开始,开挖后当日X3截面的弯曲应变为925.7个微应变,较6月9日减少了228.6个微应变,D管段管道弯曲变形明显恢复,初步表明采取开挖管沟释放应力的治理措施是可行的,趋势见图4。6月11日X3截面的弯曲应变为833.1个微应变,较6月9日减少了321.2个微应变,D管段管道弯曲变形进一步得到恢复。上述监测数据表明,在不扩大管沟开挖长度的情况下,D管段在无荷载条件下的弯曲应变为833.1个微应变;若考虑

开挖前的最大弯曲应变(1 154.3 个微应变),则此次可释放的应变为 321.2 个微应变。

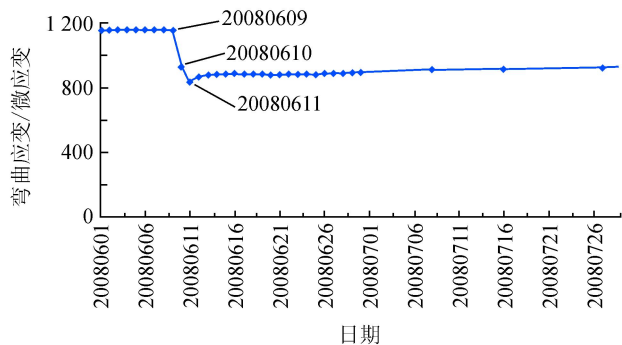


图4 灾害治理期间及治理后 X3 截面应变监测数据图

管沟回填于2008年6月12日开始。随着回填土体的逐渐压实,至7月31日X3截面管道弯曲应变逐渐稳定在900个微应变左右,即释放了250个微应变,为可释放应变范围的78%。据此可以基本判断:开挖管沟释放应力的治理措施有效缓解了滑坡所造成的管体力学损伤,回填措施基本得当,D管段管道应力应变重新回到相对稳定的状态。

4 结论

1)对管道滑坡灾害,与传统的地表位移监测相比,管道应变监测能够更及时、更准确地侦测并预警管体附近滑坡灾害前兆,为管道灾害治理提供宝贵的缓冲时间。

2)由于管道应变监测及分析技术能够实时定量掌握受灾管段应力应变情况,因此在以管道自身安全为重点的滑坡灾害治理中具有极强的指导作用,同时也能用于灾害治理效果评价。

3)在致灾体复杂多变、管土作用模型仍处于研究阶段的条件下,管道应变监测及分析技术能够长期有效地监测运营方最为关注的管道本体安全,具有较强的实用性和可靠性,是针对地质灾害有效的一种预报预警手段和治理辅助手段。

参 考 文 献

- [1] 由小川,庄茁,张效羽,等.高压天然气管线在地质灾害下的失效分析[J].天然气工业,1999,19(4):77-81.
- [2] 蒋仕章,蒲家宁.滑坡地区埋地钢质管线的风险因素和管理[J].管道技术与设备,2000(3):6-7.
- [3] 北京科力华安地质灾害监测技术有限公司.D管段管道应力应变监测方案[R].北京:北京科力华安地质灾害监测技术有限公司,2008.
- [4] 刘学杰,孙绍平.地下管道穿越断层的应变设计方法[J].特种结构,2005,22(2):82.
- [5] Canadian Standards Association.Z662-03:Oil and Gas Pipeline Systems[S].Ontario, Canada:CSA,2003.
- [6] GB 50251—2003 输气管道工程设计规范:附录B[S].中华人民共和国建设部,2003.

(收稿日期 2010-09-02 编辑 赵 勤)