

文章编号: 1000-8241(2016)12-1342-05

油气管道横坡敷设边坡稳定性计算

郭存杰^{1,2} 张来斌¹ 梁伟¹ 郭晓燕¹

1. 中国石油大学(北京); 2. 中石油北京天然气管道有限公司

摘要: 受地形起伏较大、地质条件复杂等因素的制约,部分山区段管道采取横坡敷设,该敷设方式存在安全隐患,有必要对管道横坡敷设条件下的边坡稳定性进行定量分析,制定有针对性的治理措施,确保管道施工和运行安全。基于此,研究了管道横坡敷设诱发的地质灾害特点,采用基于极限平衡理论的条分法进行定量计算,取得原始边坡、扫线边坡及管沟开挖边坡3种工况条件下的稳定系数,并对计算结果进行了分析。结果表明,原始边坡表现得最为稳定,随着扫线和管沟开挖工作的展开,边坡稳定性越来越差。提出避让、治理、防护、限制4种建议措施,并应用于陕京输气管道穿越山间沟谷地段,保障了管道在山区地质灾害条件下的安全运营。(图4,表3,参16)

关键词: 油气管道; 横坡敷设; 边坡; 稳定性分析; 防治措施

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2016.12.016

Calculation on slope stability of oil and gas pipelines in the mode of slope crossing laying

GUO Cunjie^{1,2}, ZHANG Laibin¹, LIANG Wei¹, GUO Xiaoyan¹

1. China University of Petroleum (Beijing); 2. PetroChina Beijing Gas Pipeline Co. Ltd.

Abstract: In some mountain areas, the pipelines are laid in the pattern of slope crossing to deal with the undulating landforms and complex geological conditions. However, there are some potential safety hazards in this laying mode. Therefore, it is necessary to conduct a quantitative analysis on the slope stability of this laying mode and develop targeted measures to guarantee the safe construction and operation of pipelines. In this paper, characteristics of geological disasters induced by slope crossing pipeline laying were investigated. Then, stability coefficient under three working conditions (original slope, line cleaning slope and trench excavation slope) was quantitatively calculated by using the method of slices based on limit equilibrium theory, and the calculation results were analyzed. It is shown that the original slope is the most stable. And with the progress of line cleaning and trench digging, the slope stability gets worse and worse. And finally, four measures were proposed, including avoidance, governance, protection and restriction. This mode is actually applied to the Shaanxi-Beijing Gas Pipeline for crossing mountain valleys, and it guarantees the safe operation of pipelines in mountain areas under the conditions of geological disasters. (4 Figures, 3 Tables, 16 References)

Key words: oil and gas pipelines, slope crossing laying, slope, stability analysis, control measures

随着国内油气管道建设的不断发展,管道穿越复杂地质条件的地段越来越多。我国山区地质环境复杂、雨量充沛、岩体破碎,为地质灾害的发生提供了良好的基础条件。油气管道施工过程中,不可避免地会对地质环境产生扰动,其扰动作用可以归纳为工程荷载、爆破振动、岩土开挖堆填、水文条件改变、工程热力作用等。其中,岩土开挖堆填和水文条件改变是工程活动影响地质环境最重要的两大作用方式,其使原地

质条件发生变化,诱发地质灾害^[1-2]。

在山区管道的建设中,由于地形起伏较大、河谷纵横、交通不便、地质条件复杂等因素的制约,横坡敷设是较为常见、又不可避免的一种管道敷设方式。横坡敷设条件下管道施工过程中的扫线和管沟开挖作业,会改变原始稳定边坡的断面几何形状,导致临空面的形成,从而影响边坡的稳定性,严重时甚至会诱发滑坡、崩塌等地质灾害,影响管道的正常施工。因此,有

必要对管道横坡敷设条件下的边坡稳定性进行定量分析研究,制定有针对性的治理措施,确保管道施工和运行安全。

1 管道横坡敷设诱发的地质灾害

横坡敷设是指油气长输管道以基本平行于等高线的敷设方式通过坡面。横坡敷设容易诱发滑坡、崩塌等地质灾害,原则上应避免采用^[3]。管道施工过程中要开辟作业带和开挖管沟,均会对原始稳定坡面产生扰动,形成新的高陡路堑边坡。山区管道施工中因开辟作业带和管沟开挖,形成高临空面,最终导致上侧边坡形成不稳定体,其中相当一部分会突发滑坡、塌方灾害,虽然一般规模不大,基本表现为牵引式的浅表层地质灾害,但对施工危害较大,人和机具易受到威胁,且滑塌体常堵塞施工便道和管沟,造成管道施工无法继续进行。在这种情况下,如果进一步清理滑塌体或继续开挖管沟,会导致发生更大规模、后果更严重的地质灾害(图1、图2)。

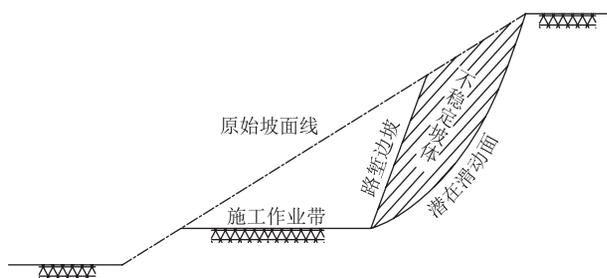


图1 扫线形成的不稳定坡面示意图

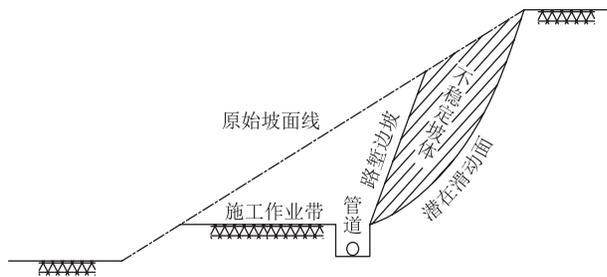
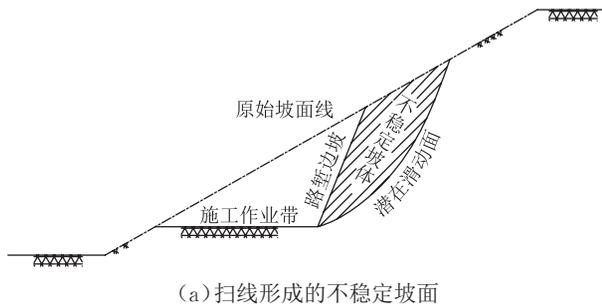


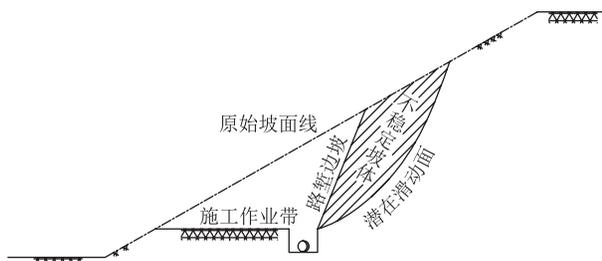
图2 管沟开挖形成的不稳定坡面示意图

2 管道横坡敷设边坡稳定性评价

油气管道横坡敷设时,扫线(清理作业带、开辟施工便道)和管沟开挖会对原始稳定坡面产生一定程度的扰动,形成新的高陡路堑边坡,降低原始坡面的稳定系数(图3)。



(a) 扫线形成的不稳定坡面



(b) 管沟开挖形成的不稳定坡面

图3 横坡敷设条件下管道施工对边坡扰动示意图

目前,国内山区管道建设实践表明,由于扫线和管沟开挖形成的削方路堑边坡,会产生新的潜在滑动面,形成不稳定坡体。因此实际建设中经常就地采取坡脚防护措施,虽然在一定程度上降低了进一步发生滑塌的可能性,但由于管道是以浅挖深埋的方式通过,因此管道本体处于相对不稳定状态。以下对管道横坡敷设条件下各类工况的边坡稳定性进行定量分析。

2.1 稳定系数计算

基于极限平衡理论的条分法广泛应用于边坡稳定性的定量分析计算^[4-5],其稳定系数 K 的计算式:

$$K = \frac{\gamma \tan \varphi \sum b_i h_i \cos \alpha_i + cL}{\gamma \sum b_i h_i \cos \alpha_i} \quad (1)$$

式中: γ 为土体的湿容重, kN/m^3 ; c 为滑弧面处土体的内聚力, kPa ; φ 为滑弧面处土体的内摩擦角; L 为滑动圆弧全长, m ; b_i 为第 i 计算土条宽度, m ; h_i 为第 i 计算土条高度, m ; α_i 为第 i 计算土条底面倾角, ($^\circ$)。

条分法略去了各土条间侧向力的作用,计算得出的稳定系数 K 偏于保守,这对边坡治理设计的安全性相对有利。相关资料表明, K 的偏低值随内摩擦角 φ 的增大而增加,一般情况下,偏低10%~15%;当 φ 较大时,可偏低20%^[6-8]。

影响边坡稳定性的主要因素有土体的物理力学指标和边坡断面几何参数。其中土体的物理力学指标主要指边坡土体内聚力、内摩擦角、土壤的容重以及地下水位等;边坡断面的几何条件主要指边坡高度 H 、边坡

坡面线与水平线的夹角 α 、路堑边坡的坡角 β 以及管沟开挖深度 h' 等^[9]。

对于某一边坡而言,其土体物理力学指标为定值,且管沟开挖深度一般也不超过2 m,扫线作业带宽度一般不超过12 m。因此为计算方便,特设定相关参数如下:内聚力 $c=5$ kPa、内摩擦角 $\varphi=35^\circ$ 、土壤的容重 $\gamma=18$ kN/m³,不考虑地下水的影响,扫线作业带宽度 $W=12$ m,管沟深度 $h'=2$ m。

依据式(1)及上述参数设定条件,分别计算坡角 α 为 15° 、 30° 、 45° ,以及坡高 H 为20 m、50 m、100 m下,原始边坡、扫线边坡及管沟开挖边坡3种工况条件下的稳定系数(图4、表1~表3)。

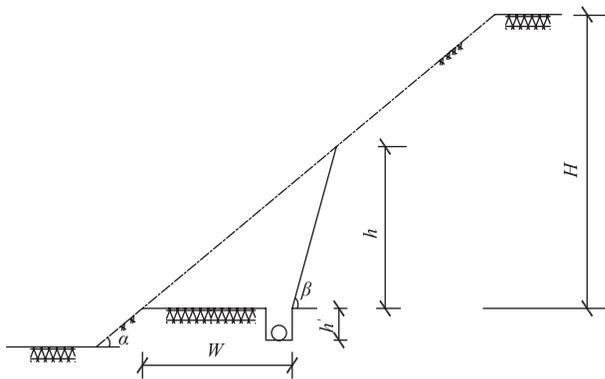


图4 边坡稳定性计算示意图

表1 原始边坡稳定系数 K_1 的计算结果

边坡坡角 ($^\circ$)	稳定系数 K_1		
	$H=20$ m	$H=50$ m	$H=100$ m
15	2.923	2.778	2.716
30	1.473	1.350	1.299
45	0.946	0.830	0.781

表2 扫线边坡稳定系数 K_2 的计算结果

边坡坡角 ($^\circ$)	路堑坡角 ($^\circ$)	稳定系数 K_2		
		$H=20$ m	$H=50$ m	$H=100$ m
15	30	1.831	1.822	1.818
	45	1.409	1.412	1.412
	60	1.172	1.170	1.166
	90	0.777	0.777	0.777
30	45	1.098	0.975	0.975
	60	0.824	0.812	0.811
45 $^\circ$	60	0.829	0.627	0.598

表3 管沟开挖深2 m的边坡稳定系数 K_3 的计算结果

边坡坡角 ($^\circ$)	路堑坡角 ($^\circ$)	稳定系数 K_3		
		$H=20$ m	$H=50$ m	$H=100$ m
15	30	1.036	1.036	1.038
	45	1.007	1.006	1.005
	60	0.799	0.800	0.799
	90	0.587	0.587	0.586
30	45	0.998	0.966	0.971
	60	0.705	0.712	0.725
45	60	0.685	0.586	0.588

注:当边坡稳定系数 $K \geq 1.3$ 时,属稳定边坡,可不采取加固措施;当 $1.0 \leq K < 1.3$ 时,属欠稳定边坡,应采取边坡治理措施;当 $K < 1.0$ 时,边坡实际已经破坏。

2.2 计算结果分析

(1)在边坡土体物理力学指标(c 、 φ 及 γ)、边坡坡角 α 以及坡高 H 一定的条件下,当 $\beta > \alpha$ 时,同类边坡的 $K_1 > K_2 > K_3$,即原始边坡表现得最为稳定,随着扫线和管沟开挖工作的展开,边坡稳定性越来越差。造成这种情况的原因主要在于,土体底面倾角 α_i 在扫线和管沟开挖工况条件下,其值呈逐渐增大的趋势,稳定系数逐渐减小。

(2)对原始边坡而言,在边坡土体物理力学指标一定的条件下,对边坡稳定性影响最大的几何参数是坡角 α , α 越大 K_1 越小。当 α 相同时,随着坡高 H 的增大, K_1 略有减小。随着 α 的增加,相应各土条底面倾角 α_i 也相应增加,因此使得稳定系数 K 减小。

(3)对扫线边坡而言,当 $\beta > \alpha$ 时,随着扫线形成的路堑边坡角 β 的增大,与 K_1 相比, K_2 呈明显下降趋势。但潜在危险滑动面仍然通过扫线形成的路堑边坡的坡脚处。当 β 、 α 取值一定时,坡高 H 的增加虽然会使得 K_2 减小,但减小幅度不大。扫线形成的路堑边坡坡角 β 的大小是决定边坡稳定性的最为关键的因素之一,当 $\beta > \alpha$ 时,使得路堑坡的坡体形成新的危险滑动面,该滑动面内各土条底面倾角 α_i 大于原始边坡条件下的倾角,且 β 越大(即路堑坡越陡),其对应的 α_i 也越大,路堑边坡也越不稳定。

(4)对管沟开挖形成的边坡而言,与扫线工况下的 K_2 相比, K_3 的降低幅度较大。在 $\beta > \alpha$ 时,潜在危险滑动面从管沟沟底处通过,同时最危险滑动面的半径较大,滑塌体较薄,说明浅表层滑塌迹象很明显。

3 防治措施

应在查清线路区域工程地质条件的基础上进行油气管道选线。对于已探明的地质灾害发育区,应尽量避免将管道敷设在滑坡、崩塌、陡坡(坎)等地质灾害易发地带;管道线路应减少大量的切割山坡与填筑。把握地质条件对路线选择的影响,在安全、经济的基础上,尽量避免地质灾害的影响,同时应尽量减少人类工程活动诱发的地质灾害问题^[10-16]。

(1)避让:若管道敷设地段的场地条件许可,应首选避让策略,远离地质灾害易发地带敷设管道。

(2)治理:对于无法避让或避让成本高于治理成本的,或避让意义不大的地质灾害隐患点(段),可酌情结合管道工程采取实时监测、水工保护、抗滑桩、草袋管堤等治理措施^[9]。

(3)防护:对于无法避让的边坡,应尽可能选在枯水季节施工,同时在管道线位上方地形适宜地段设置临时拦挡墙和导流槽,防止突然暴雨形成的崩塌和坡面泥石流造成施工人员伤害和机械毁坏。崩塌段禁用震动强烈的动态爆破手段,以防风化危岩的震落。

(4)限制:为保证边坡稳定和管道安全,在管道施工过程中,应按照实际需要划定保护范围,预留安全作业带。在作业带内,若其他工程活动会影响山体稳定,则应严格限制。保护范围的宽度要依据现场地质环境条件,经过科学论证后确定。

4 实例应用

某输气管道敷设地貌为山间沟谷,该段地层岩性为中等风化灰岩,块状构造,风化裂隙发育,岩块呈碎裂状。在降雨作用和爆破震动等扰动下,此段管道左侧山体加速了坡体的坍塌,崩塌体最终堆积于下部管沟内。该段崩塌影响范围约40 m,崩塌块石一般粒径为0.5~1.5 m,最大粒径约为2.5 m。

由于崩塌块石较多,清理难度较大,若清除管道敷设范围内的崩塌体,在崩塌体后侧将形成更大的临空,从而造成后部坡体持续崩塌,最终影响整个山体的稳定性。因此,建议采取如下处理措施:①管道向右侧微调1~2 m,避免再次开挖坡脚,微调后管沟仍需爆破开挖,开挖后将爆破产生的碎石及崩塌至管沟内的块石一并清除。②采取“二并一”管道施工方法,将预

制管道埋置管沟内,及时回填。③若开挖后,管道左侧坡体仍存在较大安全隐患,可在保证上部覆土厚度的前提下,于管道上部布置盖板,或在左侧坡脚位置处布置拦石墙。

5 结论

(1)管道扫线、管沟开挖作业均会造成边坡稳定系数下降,对边坡稳定系数产生影响的参数按照影响程度大小依次是:路堑边坡角 β 、管沟开挖的深度 h' 、原始边坡的坡角 α 以及边坡高度 H ,因此在 α 和 H 一定的条件下,扫线作业应尽可能降低 β 。同时管沟不能超深开挖,以保证边坡的稳定性。当扫线过程中已出现路堑边坡滑塌迹象时,应立即停止管沟开挖,采取浅挖深埋的方式保证管道通过。因为随着管沟开挖工作的进行,只能加剧路堑边坡发生滑塌的趋势。

(2)对于 $\alpha > 30^\circ$ 的土质边坡,无论边坡高度大小,均不宜采用横切坡的敷设方式。

(3)管道实际扫线作业时,一般路堑边坡的坡角 β 远大于原始边坡的坡角 α ,主要原因在于可以节约削方工程量。计算结果表明,在扫线作业带宽度 $W=12$ m、坡高 $H=50$ m、 $\alpha=15^\circ$ 的条件下,当 $\beta=15^\circ$ 时,每延米削方量约 150 m³;当 $\beta=30^\circ$ 时,每延米削方量约 36 m³;当 $\beta=45^\circ$ 时,每延米削方量约 26 m³。可见,加大路堑边坡坡角可以大大节约土方工程量,但同时也增大了诱发滑塌等次生灾害的可能性,因此实际扫线作业时不能单纯从节约投资的角度考虑,而忽视了管道本体及施工过程中的安全隐患。

参考文献:

- [1] 薛辉,杨学青.中缅管道途经典型地质灾害影响区域的设计与建设[J].油气储运,2013,32(12):1320-1324.
XUE H, YANG X Q. Design and construction of Sino-Burma Oil-Gas Pipeline in typical geological hazard areas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(12): 1320-1324.
- [2] 吕惠明.泥石流对油气管道的危害特征、机理及对策[J].产业与科技论坛,2009(5):113-115.
LYU H M. Damage symptoms, mechanism and countermeasures of debris flow of oil and gas pipelines[J]. Industrial & Science Tribute 2009(5): 113-115.
- [3] 郝明盛.物性参数对黄土边坡地震响应影响的敏感性分析[D].

- 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 32-33.
- HAO M S. Sensitivity analysis of the physical parameters to the seismic response of loess slopes[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2014: 32-33.
- [4] 李亮, 迟世春, 林皋, 等. 局部安全系数法中约束对土坡稳定分析的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009(6): 155-159.
- LI L, CHI S C, LIN G, et al. Effect of constraints on slope stability analysis in local factor of safety method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009(6): 155-159.
- [5] 孙哈南. 浅谈圆弧滑动面的验算法[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(8): 54-56.
- SUN H N. Introduction of the calculation method for circular sliding surface[J]. Heilongjiang Jiao Tong Ke Ji, 2010, 33(8): 54-56.
- [6] 张维明. 软土地基路堤稳定性分析与计算研究[J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38(2): 87-88.
- ZHANG W M. Research on stability analysis and calculation of soft ground embankment[J]. Heilongjiang Jiao Tong Ke Ji, 2015, 38(2): 87-88.
- [7] 崖岗, 李晓军, 谢寿华. 基于简化 Bishop 法的路基边坡稳定性图解法[J]. 广西交通科技, 2000, 25(1): 28-30.
- YA G, LI X J, XIE S H. Stability graphical method of subgrade slope based on the simplified Bishop[J]. Guangxi Communication Science & Technology, 2000, 25(1): 28-30.
- [8] 宣道光. 考虑孔隙压力的条分法的计算[J]. 华东公路, 1991(4): 73-74.
- XUAN D G. Calculation of slices method considering pore pressure[J]. East China Highway, 1991(4): 73-74.
- [9] 甘勇, 胡东. 边坡稳定性影响因素的灰色关联分析[J]. 大众科技, 2010(7): 87-88.
- GAN Y, HU D. Gray correlation analysis of influence factors for slope stability[J]. Popular Science and Technology, 2010(7): 87-88.
- [10] 刘云彪. 川气管道工程湖北段地质灾害与防治研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 42-49.
- LIU Y B. Geological hazards and countermeasures along the Hubei Section of the natural gas pipeline from Sichuan to Shandong[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 42-49.
- [11] 姚建平. 油气集输管线隧道穿越不良地质构造及其治理[J]. 石油天然气学报, 2012(9): 339-341.
- YAO J P. Oil and gas gathering line tunnel through the adverse geological structure and its governance[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012(9): 339-341.
- [12] 施晓文, 邓清禄, 董国梁. 崩塌落石对管道的危害性[J]. 油气储运, 2013, 32(3): 295-299.
- SHI X W, DENG Q L, DONG G L. The hazards of landslides and rockslides to pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(3): 295-299.
- [13] 王小俊, 邓梓玲, 侯来夫. 油气输送管道敷设的滑坡防治措施与应用[J]. 长江大学学报 A(自然科学版), 2006, 3(4): 116-118.
- WANG X J, DENG Z L, HOU L F. Landslide prevention measures and application of oil and gas transportation pipeline laying[J]. Journal of Yangtze University(Natural Science Edition), 2006, 3(4): 116-118.
- [14] 白路遥, 谭东杰, 李亮亮, 等. 黄土地区穿河管道失效风险[J]. 油气储运, 2015, 34(6): 599-603.
- BAI L Y, TAN D J, LI L L, et al. Failure risk analysis of river-crossing pipeline in loess area[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34(6): 599-603.
- [15] 张海林, 向敏, 杨毅, 等. 山体隧道油气管道安全稳定性规律研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 66-69.
- ZHANG H L, XIANG M, YANG Y, et al. Study on the stability of oil gas pipeline in the tunnel based on finite element method[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(1): 66-69.
- [16] 杜衍庆, 白明洲, 王新岐, 等. 浅埋油气管道隧道施工对潜在滑体稳定性影响分析[J]. 北京交通大学学报, 2016(3): 75-81.
- DU Y Q, BAI M Z, WANG X Q, et al. Landslide stability analysis of potential slope caused by the construction of shallow oil and gas pipeline tunnel[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016(3): 75-81.

(收稿日期: 2016-06-16; 修回日期: 2016-10-12; 编辑: 潘红丽)

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目“基于风险的油气管道事故预防关键技术研究子任务”, 11BAK06B01-11-03。

作者简介: 郭存杰, 男, 高级工程师, 1978年生, 2005年硕士毕业于中国石油大学(北京)机械电子工程专业, 现主要从事长输天然气管道地质灾害风险评估及防治措施的研究工作。地址: 北京市房山区良乡金光路8号北京输气管理处, 102488。电话: 13910134771, Email: 1051212786@qq.com