



油气管道地质灾害风险评估理论与应用丛书

地质灾害下油气管道 安全可靠

张鹏 冼国栋 伍颖 马剑林 等著
王庆 贾永海 张林 胡泽铭



科学出版社

油气管道地质灾害风险评估理论与实践应用丛书

地质灾害下油气管道安全可靠

张 鹏 洗国栋 伍 颖 马剑林 等 著
王 庆 贾永海 张 林 胡泽铭



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本以研究油气管道在遭受滑坡、水毁、崩塌、泥石流等地质灾害下的力学行为为主的专著。本书的研究工作为确保我国油气长输管道安全运行提供了理论依据和科学手段，是保障埋地管线可以安全运营的前提和基础，并可为工程人员提供一种可直接参考的指标。利用该指标与地质灾害实际工况进行对比，可较为准确地评估管道的安全可靠性的。

本书可供油气储运工程、城市燃气工程等专业及其相关领域的技术人员、研究人员、大专院校的教师、研究生和高年级大学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

地质灾害下油气管道安全性 / 张鹏等著. —北京: 科学出版社, 2019.3
ISBN 978-7-03-059961-2

I. ①地… II. ①张… III. ①地质灾害-影响-油气运输-管道工程-安全性 IV. ①TE973 ②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 279239 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 彭 映
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2019 年 3 月第一次印刷 印张: 23 1/4

字数: 550 000

定价: 248.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

“油气管道地质灾害风险评价理论与实践应用丛书”

编著委员会

主任：邹永胜 安世泽

副主任：刘奎荣 冼国栋 张 鹏
时建辰 钱江澎 刘宗祥

委员：苏灵波 王向东 周 广 潘国耀
余东亮 张 林 王成锋 谭 超
伍 颖 陈渠波 唐 侨 吴 森
辜寄蓉 袁 伟 张 恒 陈国辉
邓 晶 刘文涛

《地质灾害下油气管道安全可靠》作者名单

张 鹏 冼国栋 伍 颖 马剑林

王 庆 贾永海 张 林 吴 森

王 潘 张 敏 胡泽铭 邹金赤

序

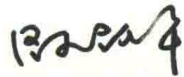
管道作为油气的主要运输手段，承载着我国 70%的原油和 90%的天然气运输的重任，助力我国经济的发展。长输油气管道分布范围广，不可避免要穿越山高谷深、地形陡峻、地震及活动断裂发育的地带，面临滑坡、崩塌、泥石流、山洪等灾害风险。

位于我国的兰（州）—成（都）—渝（重庆）成品油、兰（州）—郑（州）—长（沙）成品油、兰（州）—成（都）原油、中（卫）—贵（阳）天然气、中缅原油及天然气等重要能源管道建成运营以来，为了加大管道沿线风险预控，中石油西南管道公司协同四川省地质工程勘察院、西南石油大学先后完成了地质灾害风险评级体系与评价模型研究、地质灾害风险性图形库建设、地质灾害监测预警系统开发等相关课题，形成了国内首批针对油气管道地质灾害方面的系统性研究成果。以《地质灾害危险性评估规范》（DZ/T 0286—2015）、《滑坡崩塌泥石流灾害调查规范（1：50000）》（DZ/T0261—2014）等技术规范为基础，结合《油气田及管道岩土工程勘察规范》（GB 50568—2010）、《油气管道地质灾害风险管理技术规范》（SY/T 6828—2017）等技术规范，首次系统地构建了管道沿线地质灾害风险评级体系与评价模型，建立了地质环境风险性图形库，为管道沿线地质灾害风险防控规范评价体系的确立提供了参考；结合管道地质灾害特点，研发针对管道地质灾害的监测预警方法，填补了油气管道地质灾害防治领域的诸多空白。

为了总结油气管道地质灾害防治系统性研究成果，为科研、设计、运营管理、领导决策提供参考依据，中石油西南管道公司组织专家学者和科研人员共计 100 余人，历时两年编撰了“油气管道地质灾害风险评价理论与实践应用”丛书，该系列共有 4 个专题分册，分别为：《地质灾害下油气管道安全可靠》《油气管道地质灾害风险性评价原理与方法》《油气管道沿线地质灾害风险管控平台建设与应用》《油气管道地质灾害防治与监测技术》。其中：《地质灾害下油气管道安全可靠》系统研究油气管道在遭受滑坡、水毁、崩塌、泥石流等地质灾害下的力学行为；《油气管道地质灾害风险性评价原理与方法》系统总结油气管道地质灾害风险性评价原理与方法；《油气管道沿线地质灾害风险管控平台建设与应用》系统介绍管道沿线地质环境风险管控平台建设

与应用；《油气管道地质灾害防治与监测技术》系统阐述油气管道地质灾害防治与监测技术。

这套技术丛书，既是对油气管道地质灾害系统性研究成果的提炼总结，也是对未来油气管道地质灾害防治工作的展望。希冀此套丛书成为地灾风险防控工作的新起点，为管道安全运行提供支撑和保障。



殷跃平研究员

国际滑坡协会主席

自然资源部地质灾害防治技术指导中心首席科学家

前 言

石油、天然气一直以来都是国家最重要的能源之一。近年，在国家的大力扶持下，中国油气管线建设有了长足的发展。当今所面临的问题不仅是油气的开发问题，更需要关注油气运输的问题。管道是石油、天然气的主要运输方式，据调查，超过一半以上的石油、天然气是由管道运输。中国油气需求量越来越大，中国油气管道运输呈现出大口径运输、长距离运输、多功能运输的发展趋势。中国的管道运输面临着大口径、高压大型管道的建设问题。再者，由于管道长距离运输和运输水平低下的原因，使得当今中国管道运输行业面临着管道沿线安全问题。因此，研究管道运输沿线中的各种安全问题显得尤为重要。

我国幅员辽阔，地形多样，地貌复杂，地质灾害频发。而油气管道埋于地下，可以避免地表小规模地质灾害，却无法避免诸如滑坡、水毁、塌陷、崩塌、泥石流等大规模的地质灾害。众所周知，油气管道会穿越各类复杂地质地形环境，长输管线面临着沿线地质灾害的威胁，同时管道网络布置广泛却又布局不均，导致很难预测管道发生破坏、泄漏的可能性。因此，研究地质灾害作用下的管道安全可靠性的显得尤为重要。

本书是一本以研究油气管道在遭受滑坡、水毁、崩塌、泥石流等地质灾害下的力学行为为主的专著。基于现有的科研资料，对油气管道在地质灾害作用下的力学行为与失效形式进行分析；基于有限元模拟，计算不同管道在不同工况下的极限承载能力，建立在各类地质灾害下的可靠性极限状态方程；总结各项因素对受灾管道的影响规律以及薄弱环节，并在此基础上提出治理自然灾害和加固油气管道的措施。同时，基于管道事故特点及原因，对管道失效概率进行计算，分析管道失效影响因素，对管道进行易损性分析，得出易损性曲线和易损性矩阵，预测、预防事故的发生，将失效概率降低在管理者容许的范围之内；针对管道失效因素的不确定性，分析管道的可靠性发展规律，确定管道初期的可靠性以及管道的设计可靠性，对管道耐久性进行综合评价。同时，可将管道易损性和耐久性分析方法推广到地质灾害作用下的油气管道研究中。

本书的研究工作为确保我国油气长输管道安全运行提供了理论依据和科学手段，是保障埋地管线可以安全运营的前提和基础，并可为工程人员提供一种可直接参考的指标。利用该指标与地质灾害实际工况进行对比，可较为准确地评估管道的安全性。

值此书出版之际，感谢本专著参与者做出的贡献。书中内容若有疏漏或不妥之处，诚恳地欢迎读者批评指正！

张 鹏

2018年6月20日

目 录

1 管道地质灾害研究概况	1
1.1 滑坡	1
1.1.1 管道滑坡分类及力学分析	2
1.1.2 监测与防治	4
1.1.3 油气管道腐蚀	5
1.2 水毁	6
1.2.1 管道悬空	7
1.2.2 管道水毁	9
1.2.3 黄土湿陷	10
1.2.4 管道治理加固	12
1.3 崩塌	12
1.3.1 力学行为	13
1.3.2 可靠性	15
1.3.3 防治减灾	16
1.4 泥石流	17
1.4.1 冲击作用	17
1.4.2 数值模拟	18
参考文献	19
2 滑坡	26
2.1 滑坡管道力学分析	26
2.1.1 滑坡	26
2.1.2 管道	28
2.1.3 管道作用力分析	33
2.1.4 管-土作用模型	37
2.2 横向滑坡作用下管道数值计算模型	40
2.2.1 非缺陷管道	40
2.2.2 带腐蚀管道	43
2.3 非缺陷管道承受滑坡作用长度分析	44
2.3.1 兰成渝成品油管道 X52 横穿滑坡	44
2.3.2 中贵天然气管道 X80 横穿滑坡	51
2.4 径厚比和管材对管道承受滑坡长度影响	57
2.4.1 不同径厚比与不同管材	57

2.4.2	不同径厚比与相同管材	57
2.4.3	相同径厚比与不同管材	59
2.5	带腐蚀缺陷管道承受横穿滑坡作用长度分析	59
2.5.1	输油管道	59
2.5.2	输气管道	62
2.5.3	数值拟合	62
2.6	管道可靠性极限状态方程	63
2.6.1	结构可靠性及功能函数	63
2.6.2	变量随机性	64
2.6.3	非缺陷管承受横穿滑坡作用长度公式	65
2.6.4	缺陷管道承受横穿滑坡作用长度公式	66
2.6.5	管道安全评价极限状态方程	67
2.6.6	横穿滑坡作用下可靠度	68
	参考文献	69
3	水毁	71
3.1	悬空管道力学建模	71
3.1.1	黄土湿陷	71
3.1.2	水毁	72
3.2	非缺陷悬空管道有限元分析	73
3.2.1	数值计算模型	73
3.2.2	局部完全悬空管道	75
3.3	带腐蚀缺陷悬空管道极限长度分析	80
3.3.1	数值计算模型	80
3.3.2	腐蚀坑位于悬空管道跨中	81
3.3.3	腐蚀坑位于悬空管道管端	108
3.4	黄土湿陷管道力学行为	121
3.4.1	管道模型	121
3.4.2	黄土湿陷作用	123
3.5	悬空管道可靠性极限状态方程	128
3.5.1	非缺陷管道	129
3.5.2	腐蚀管道	132
3.6	悬空管道加固	137
3.6.1	管道水毁常用防治方法	137
3.6.2	碳纤维材料加固	138
3.6.3	两类桥梁型加固	140
	参考文献	142
4	崩塌	144
4.1	管道力学分析	145

4.1.1	管道下方	145
4.1.2	管道上方	145
4.1.3	管道侧方	146
4.2	正常工况下埋地管道应力分析	148
4.2.1	覆土应力	148
4.2.2	温差应力、残余应力、振动应力	150
4.2.3	管内油气作用	151
4.3	崩塌作用下埋地管道应力分析	153
4.3.1	管道内力	153
4.3.2	管道强度	155
4.4	准静态模拟	157
4.4.1	数值计算模型	157
4.4.2	兰成渝成品管道失效规律	158
4.4.3	失效数学模型	161
4.5	动态模拟	165
4.5.1	数值计算模型	165
4.5.2	响应分析	165
4.6	可靠性极限状态方程	172
4.6.1	结构可靠性	172
4.6.2	随机变量确定及其分布形态	173
4.6.3	中贵天然气管道不同埋深管段极限状态方程	175
4.7	灾害防治	175
4.7.1	概述	175
4.7.2	危岩加固	176
4.7.3	危岩清除	178
4.7.4	边坡排水	179
4.8	管道加固措施	179
4.8.1	危岩监测预警	179
4.8.2	危岩拦截	180
4.8.3	管线绕避	184
4.9	柔性防护系统仿真模拟	184
4.9.1	材料选择及数值计算模型	184
4.9.2	数值计算结果对比及分析	185
	参考文献	188
5	泥石流	189
5.1	管道力学分析	189
5.1.1	在内压和侧压下屈曲	190
5.1.2	在浆体静载作用下	190

5.1.3	在块石冲击下	191
5.2	对管道冲击作用数值计算模型	192
5.2.1	模型参数	192
5.2.2	边界条件	192
5.2.3	流体物理性质	192
5.3	冲击宽度和冲击角度对管道影响	193
5.3.1	裸露管道	193
5.3.2	埋地管道	194
5.4	流速和块石粒径对管道影响	195
5.4.1	裸露管道	195
5.4.2	埋地管道	200
5.5	管道埋深影响	208
5.6	管道安全可靠性	210
5.6.1	随机变量确定	210
5.6.2	极限状态方程	212
5.7	管道加固	212
5.7.1	隔离加固	213
5.7.2	支撑加固	213
5.7.3	土体加固	216
5.7.4	维护加固	218
5.7.5	其他方法	218
	参考文献	218
6	管道易损性	219
6.1	基于性能的地震工程概率决策方法与地震易损性分析	223
6.2	基于自然灾害的管网易损性	226
6.2.1	曲线建立	226
6.2.2	管网的自然灾害易损性	228
6.2.3	管网概率自然灾害风险	229
6.2.4	管道受灾力学行为	232
6.3	管道的概率需求分析方法	240
6.3.1	需求模型	241
6.3.2	需求分析过程	242
6.3.3	结构非线性地震反应	243
6.3.4	分析结果	245
6.4	管道的概率抗震能力分析法	246
6.4.1	管道抗震能力分析准备	247
6.4.2	能力模型	263
6.4.3	分析过程	264

6.4.4	分析结果	264
6.4.5	抗震能力与地震需求离散程度相对关系对易损性分析影响	266
6.5	地震易损性分析实际应用	268
6.5.1	基本情况	268
6.5.2	管道模型和地震动随机性	268
6.5.3	需求分析	274
6.5.4	能力分析	279
6.5.5	易损性	281
	参考文献	285
7	管道耐久性	288
7.1	管道耐久性分析	289
7.1.1	耐久性	289
7.1.2	应力载荷-时间历程	292
7.2	寿命预测方法	317
7.2.1	腐蚀缺陷寿命预测	317
7.2.2	疲劳开裂寿命预测	321
7.2.3	损伤度评估与经济寿命预测	331
7.3	经济寿命评估	332
7.3.1	影响因素	333
7.3.2	计算原理	336
7.3.3	经济寿命计算	337
7.4	未确知模型理论与指标体系分析	341
7.4.1	未确知数学	341
7.4.2	管道耐久性评估中的不确定性	345
7.4.3	管道耐久性评估指标体系	345
7.5	未确知评估模型	350
7.5.1	基本思想	350
7.5.2	未确知测度评估模型	351
7.5.3	管道未确知评估模型	353
	参考文献	354

1 管道地质灾害研究概况

地质灾害是指由自然因素或人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体滑坡、水毁、崩塌、地面塌陷、泥石流、地裂缝、地面沉降等与地质作用有关的灾害。这些灾害对油气管道施工与安全运营已构成严重威胁。国内外对地质灾害的研究历史久远,但将地质灾害危险性评估作为灾害研究领域中的一项新的内容,仅是近几十年来随着灾害损失的日益严重和相关学科理论与技术的迅速发展而兴起的。20世纪70年代以前,地质灾害研究主要局限于对地质灾害分布规律、形成机理、趋势预测等方面分析,基本依赖于水文地质、工程地质的勘察和研究;70年代以后,地质灾害研究开始突破传统的研究模式,研究理论不断提高、研究内容日益丰富,迅速向新的独立学科发展,伴随这种趋势,评估工作开始起步。

目前,地质灾害评估尚未形成完整的理论与方法,但不可否认,地质灾害危险性评估已取得了重要进展,不但在抗灾减灾防灾中发挥了重要作用,而且为地质灾害危险性评估逐步走向成熟奠定了基础,具有为政府决策提供依据和指导工程建设单位防治地质灾害提供依据的现实意义,并逐步成为国内外灾害科学研究的热点之一。

1.1 滑 坡

滑坡灾害在所有地质灾害中发生频率较高,几乎在全国各地均有发生,其中以西南与西北地区最为频繁。长输管道滑坡发生的条件主要与管线周边的地形、土质岩性、降雨、河流冲刷以及人为破坏斜坡稳定条件等因素有关,而我国西部山区和黄土地区受地势起伏、沟壑纵横的地貌特征以及土质特性的影响,滑坡灾害十分常见。然而,新建管道与在役长输管道大部分都穿越了这类地质条件复杂的区域,其中相当部分在役原油长输管道运行时间达20年以上,这些管道因超期服役而严重老化^[1]。因此,长输管道遭受滑坡灾害不可避免。同时,研究表明管道的运营安全已受到滑坡灾害的严重威胁^[2,3]。如今,现代化工业及日常生活都离不开油气能源的支持,而长距离输送埋地管道承担着主要的油气输送任务,可见避免滑坡灾害或采取防护措施的重要性。众多滑坡灾害引发的长输管道事故表明,滑坡一旦发生,管道通常都会遭到不同程度的损坏。轻则管道外露、悬空或局部变形,增加管道不安全风险或影响管道后期检测;重则发生输送介质泄漏、爆炸及环境污染等,后果十分严重;更有甚者,长输管道运营过程中油气输送遭受滑坡灾害而中断,后果极其严重。为确保长输管道的运营安全,必须加强管道运营管理和灾害防治力度。

为应对滑坡灾害造成管道损害这一严峻的现实问题,近年来,国内外有关滑坡作用管道的研究得到不断发展,且已在管-土相互作用、管道受力理论计算、可靠性评价、预测

预报及防治方面取得一定成效。目前，管道的相关研究可分为三种类型：管道滑坡分类及力学分析；监测与防治；油气管道腐蚀。

1.1.1 管道滑坡分类及力学分析

根据滑坡特征与油气管道敷设特点，林冬等对油气管道滑坡进行了细致的分类，建立起管道与滑坡的相应分类体系^[4]。管道滑坡被细分为 19 种类型，其中按滑坡特征分为 11 种，按管道敷设特点分为 8 种，如图 1-1 所示。

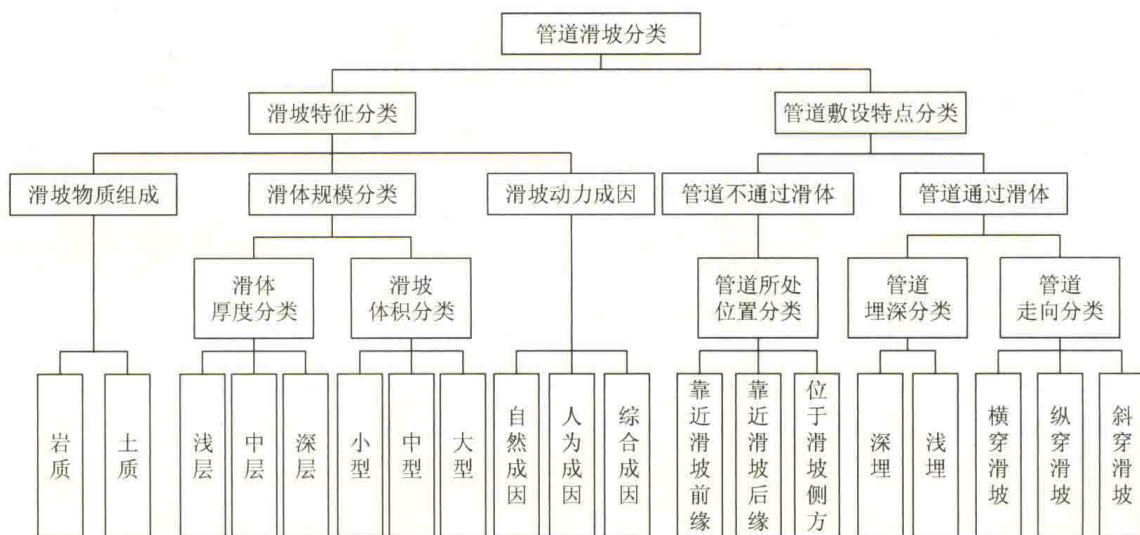


图 1-1 管道滑坡分类体系框图^[4]

由于滑坡过程中管道与周围土体之间的相互作用十分复杂，现阶段大部分研究都进行了一定的简化。其中，对管道横向受力作用、轴向受力作用以及环向受力作用的研究依次呈递减关系。随着相关研究的不断深入，对于滑坡作用管道的研究将更加完善，贴近工程应用的研究将日趋增多。

1.1.1.1 解析解法

由于具有容易计算和运用等优点，解析法一直受到工程人员和科研工作者的喜爱。20 世纪 60 年代，Newmark 等^[5]已开始对纵向荷载作用下的埋地管道进行力学特性和振动特性的相关研究。Parmelee 等^[6]对其进一步完善，发展为半弹性空间模型分析法。70 年代初，日本学者对管-土相互作用进行理论分析研究，并发展出弹性地基梁模型分析法。1991 年，我国学者梁政^[7]采用纵横弯曲弹性地基梁理论对横穿滑坡作用下埋地管线的受力情况进行理论推导，得出较为简化的理论公式。1995 年，国外学者 Rajani 等^[8]对横穿滑坡作用管道的力学响应进行分析，但未考虑管道与土体的相互作用，对管道也只进行了线弹性假设。同年，O'Rourke 等^[9]对山体滑坡作用下管道的力学响应进行研究。该研究对钢质管道

采用 Ramberg-Osgood 硬化模型, 涉及横穿滑坡与纵穿滑坡两种类型, 较 Rajani 等的预测精度更加准确, 但该模型未考虑到管道与土体的相对滑动。关于横穿滑坡作用下的管道变形及内力研究, 邓道明等^[10]将管道视为半无限长梁, 同时考虑滑坡体内管道内力以及变形的连续性, 得出管线内力与位移的计算公式, 并且提出两种情况下的判别式。2001 年, 张东臣等^[11]在邓道明等研究基础上, 对滑坡作用力与管轴线成某种角度情况下管线的受力情况进行理论分析, 确定受力管段应力最大点位置。2008 年, 刘慧^[12]基于地基梁原理, 在未考虑管道屈服后的强化条件下, 用土弹簧模型代替管-土接触非线性, 推导出滑坡作用下管线变形方程的广义解, 预测结果较为保守。2012 年, 郝建斌等^[13]假定滑坡作用下管道后部会形成刚性楔体, 利用挡土墙受力平衡原理推导出管道受横向滑坡作用的推力计算公式, 其合理性也通过有限元模拟验证。同年, 谢强等^[14]对牵引与推移两类滑坡作用埋地排水管的纵向受力进行了分析。

1.1.1.2 数值解法

随着计算机技术的进步, 数值解法因高效、经济等优点受到越来越多研究者的青睐。1999 年, Chan^[15]在 O'Rourke 等研究的基础上, 采用土弹簧模拟管道与土体之间的接触, 并假定管道上的力是管道和滑坡体之间相对位移的函数, 得出横穿与纵穿滑坡作用下管道应变分布。2003 年, 王沪毅^[16]在 Ranken 土压力理论的基础上, 采用有限元分析技术对黄土地区横穿滑坡作用下管道的力学反应进行分析, 讨论斜坡角度与滑坡长度对管道最大 Von Mises 应力的影响, 并建议管道灾害防治可采取的措施。同年, Challamel 等^[17]对管道与三维土之间的相互作用进行简化分析。2004 年, Yatabe 等^[18]采用 ABAQUS 软件对遭受地面大变形作用的弯管线进行受力反应分析。同年 Evans^[19]通过有限元管道模型分析, 提出采用三维有限元模型分析管-土相互作用, 可以更好地观察管线变形区域及变形程度。然而, 在王沪毅、Yatabe、Evans 等的研究中, 管-土之间均采用共用节点技术来传递作用力, 不能很好地描述管道与土体之间的相对滑动。2010 年, Liu 等^[20]在参考断层相关研究的基础上, 提出位移荷载沿管轴线方向抛物线分布作用的有限元计算方法, 该研究中建立的模型对材料及管道几何非线性皆有考虑, 对山体滑坡区域的管道极限抗偏移能力能较准确地预测。2012 年, Kunert 等^[21]同样运用位移荷载, 并采用管道线弹性力学模型对滑坡作用管道进行力学响应分析。同年, 学者李华等^[22]采用有限元分析方法, 建立管道横穿滑坡作用下的土弹簧分析模型, 推导出可便于工程应用的管道强度失效拟合公式。2013 年, 张伯君^[23]采用位移荷载控制方法, 对山体滑坡区域长输管道强度进行有限元模拟研究, 分析不同偏移程度下管道的应力反应状态。2014 年, 练章富等^[24]对滑坡沿管道纵向作用时的力学强度进行相关分析, 得出纵穿滑坡作用下斜坡坡脚与管道安全长度的建议值。2015 年, 张铄等^[25]利用深层圆弧滑坡理论及有限元方法, 建立深层圆弧滑坡作用管道的数值模型, 研究各相关参数对管道应力的影响, 分析各相关参数对应力的影响程度; 并提出在滑坡灾害多发区域, 应增加管道壁厚和降低管压至 10MPa 以下。该研究结果能够为山区油气管道的建设与设计提供一定的参考, 具有一定的现实意义。

1.1.1.3 实验研究

科学技术的进步与社会经济的发展,为实验研究提供了必要的技术支撑和经济支持,从而使实验研究得到快速的发展。2004年,Calvetti等^[26]忽略土壤对管道的轴向摩擦作用,采用下沉土箱法模拟山体滑坡偏移过程,该研究通过利用滑轮系统向管道施加缓慢的横向作用力类模拟管道轴力。对于遭受横向地面变形的埋地管道的力学性状,Karimian^[27]在2006年采用一种新的物理模拟装置进行研究,通过实验模拟分析对管道产生影响的重要因素。2009年,Wijewickreme等^[28]采用数值模拟与实验手段对土体相对于埋地管道轴向运动,管线侧向土压力系数进行分析。2011年,林冬等^[29]建立管道全尺寸滑坡实验模型,对管道梁式弯曲破坏下管道应力最大值的位置进行了分析。2012年,Magura等^[30]通过实验研究与数值模拟方法,对横穿滑坡和纵穿滑坡作用下的埋地管道进行研究分析,提出两类滑坡灾害下管道应力的计算方法。同年,刘金涛^[31]建立研究管道横穿滑坡相互作用的大尺度模型,对滑坡体、管道铺设以及土体填筑等的实施过程进行了系统阐述,获得实验不同阶段时滑坡的变形破坏特点,管道应力特征,并将实际大尺寸模型建立FLAC3D三维模型计算后与试验结果对比,得出具有一致性的规律。2015年,牛文庆等^[32]采用模型试验研究管道横穿滑坡前部、中部以及后部时的受力反应情况,分析出管道应力在滑坡整个阶段的变化特点:滑坡前期和后期,埋设于不同位置的管道受力不同,即前期滑坡体后部管道受力最大,中部次之,前部最小,后期顺序恰好相反。当实验研究条件日趋成熟后,更多实验研究成果会大量涌现。

1.1.2 监测与防治

目前,为了有效应对滑坡灾害对管道损害,往往需要把滑坡监测与管道监测的方法和结论结合起来。20世纪80年代,美国曾对该国西北部山区滑坡地段采用测斜仪和变形仪监测,对管道轴向采用振动钢弦式应变仪监测,从而对管道进行开挖维护,此次联合监测相当成功。如今,对于滑坡地表变形可以通过卫星定位服务系统,进行实时监测即通过GPS数据采集端与计算机的联合运用,借助计算机对数据的准确高效处理,从而达到对滑坡体或管道位移的监测和预警目的。相对于国外,我国在滑坡灾害作用管道的监测与防治研究方面则起步较晚。

在监测研究方面,我国学者荆宏远等^[33]于2009年提出滑坡灾害作用下应对滑坡体和管道进行联合监测,且推导出管道监测截面上任意点应力的计算方法,并在兰成渝成品油管线羊木山滑坡中成功应用。同年,马云宾^[34]将光纤光栅传感器运用于二郎庙管道滑坡监测中,取得良好的效果。2010年,陈朋超等^[35]在管道滑坡监测中运用光纤光栅传感器时,发现管体光纤光栅应变传感器容易损坏。同年,陈珍等^[36]根据忠武输气管道受灾特点对该管线遭受地质灾害时的监测运用多种监测方法,制定了综合方案来监测长输油气管线地质灾害。2011年,陈珍等^[37]在该研究的基础上专门研究GPS对滑坡的监测,指出GPS能有效监测地质状况复杂的区域。