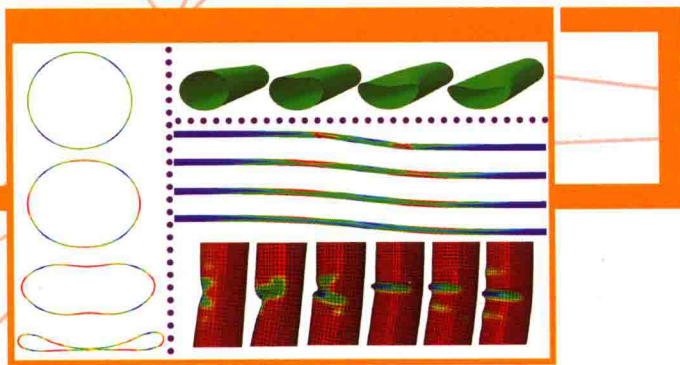


地质灾害下 油气管道力学



梁 政 张 杰 韩传军 著

M

mechanics Of Oil And Gas Pipelines
Under Geological Hazards



科学出版社

地质灾害下油气管道力学

梁 政 张 杰 韩传军 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书为第一部考虑地质灾害作用下油气管道力学的系统研究专著,为石油、天然气管道的设计、制造、敷设、安全评价、修复及防护工程等提供理论基础。本书在系统分析地质灾害下石油、天然气输送管道失效形式及失效原因基础上,基于有限元原理,建立地震断层、山体滑坡、危岩崩塌、地层沉降、地面超载等地质灾害下油气管道力学计算模型,对不同工况下的管道力学行为进行研究。同时,研究定向穿越油气管道在运营过程中的凹陷行为和挤毁行为。最后,设计一种油气管道防护装置,并对其可行性和可靠性进行分析。

本书可供油气管道设计、制造、安全评价领域的技术人员及研究院所、高等院校师生参考使用。本书研究的各类地质灾害下油气管道力学现象及规律可以直接应用于管道的设计计算与安全评价。本书的研究方法可供其他涉及管道力学行为研究的人员借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

地质灾害下油气管道力学/梁政,张杰,韩传军著. —北京:科学出版社, 2016.2

ISBN 978-7-03-047294-6

I. ①地… II. ①梁… ②张… ③韩… III. ①石油管道-工程力学-研究 ②天然气管道-工程力学-研究 IV. ①TE973.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 021093 号

责任编辑:张展 罗莉/责任校对:陈靖 刘勇

责任印制:余少力/封面设计:墨创文化

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

*

2016 年 2 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016 年 2 月第一次印刷 印张:13

字数:260 560

定价:119.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 管道沿线地质灾害类型及危害	3
1.2.1 地震断层	5
1.2.2 滑坡	6
1.2.3 崩塌	7
1.2.4 地面塌陷	7
1.2.5 地面超载	7
1.3 地质灾害下管道力学研究现状	8
1.3.1 地震断层	9
1.3.2 滑坡	10
1.3.3 崩塌	10
1.3.4 地面塌陷	11
1.3.5 地面超载	11
1.4 主要研究内容	12
第2章 跨断层埋地管道力学行为研究	14
2.1 跨断层埋地管道分析方法	14
2.1.1 跨断层埋地管道解析法	14
2.1.2 跨断层埋地管道试验研究	15
2.1.3 跨断层埋地管道数值仿真	15
2.1.4 跨断层埋地管道数值计算模型	15
2.2 走滑断层作用下软土地层管道力学研究	16
2.2.1 无压管道力学分析	16
2.2.2 压力管道力学分析	20
2.3 走滑断层作用下硬岩地层管道力学研究	25
2.3.1 无压管道力学分析	25
2.3.2 压力管道力学分析	27
2.4 逆断层作用下埋地管道力学研究	33
2.4.1 软土地层无压管道力学分析	33
2.4.2 软土地层压力管道力学分析	37

2.4.3 硬岩地层埋地管道力学分析	44
第3章 滑坡段埋地管道力学行为研究	46
3.1 滑坡地区管道应力和位移分析	46
3.1.1 泥土横向下塌时管道的理论分析	46
3.1.2 算例与分析	52
3.2 滑坡段埋地管道力学分析	54
3.2.1 滑坡段管道数值计算模型	54
3.2.2 滑坡床性质对管道力学性能的影响	54
3.2.3 滑坡体规模对管道力学性能的影响	56
3.2.4 土体性质对管道力学性能的影响	59
3.2.5 管道结构参数对其力学性能影响	62
第4章 崩塌作用下管道力学行为研究	65
4.1 落石形成条件	65
4.2 落石冲击架设管道力学研究	66
4.2.1 材料模型及失效准则	67
4.2.2 模型验证及结果分析	67
4.2.3 落石冲击有限元模型	68
4.2.4 径向冲击结果分析	68
4.2.5 纵向倾斜冲击结果分析	71
4.2.6 横向倾斜冲击结果分析	73
4.2.7 侧向偏心冲击结果分析	74
4.3 埋地管道所受落石冲击力研究	76
4.3.1 落石对地面的冲击力	76
4.3.2 埋地管道所受冲击力模型	78
4.3.3 对比分析	81
4.3.4 模型参数分析	83
4.4 球形落石冲击软土区埋地管道力学研究	84
4.4.1 数值计算模型	84
4.4.2 管道屈曲过程分析	85
4.4.3 管道参数影响研究	86
4.4.4 落石参数影响研究	90
4.4.5 落石倾斜冲击研究	93
4.5 立方体落石冲击硬岩区埋地管道力学研究	97
4.5.1 数值计算模型	97

4.5.2	仿真结果分析	97
4.5.3	管道参数影响研究	102
4.5.4	回填土参数影响研究	105
4.5.5	落石偏心冲击研究	109
4.5.6	二次冲击分析	110
第5章	地层沉降区埋地管道力学行为研究	112
5.1	塌陷沉降区管道基本特征及力学模型	112
5.1.1	塌陷沉降区管道基本特征	112
5.1.2	塌陷沉降区管道简化力学模型	113
5.2	塌陷区埋地管道力学研究	114
5.2.1	数值计算模型	114
5.2.2	模型验证	115
5.2.3	管道参数影响研究	116
5.2.4	围土参数影响研究	121
5.3	地表沉降区埋地管道力学研究	124
5.3.1	地表沉降区埋地管道失效分析	124
5.3.2	数值计算模型	124
5.3.3	计算结果分析	124
5.3.4	管道参数影响研究	127
5.3.5	围土参数影响研究	131
第6章	地表超载区埋地管道力学行为研究	136
6.1	超载区管道数值计算模型	136
6.1.1	数值计算模型	136
6.1.2	计算结果分析	136
6.2	软土地层超载对管道力学影响研究	137
6.2.1	载荷参数影响研究	137
6.2.2	管道参数影响研究	140
6.2.3	围土参数影响研究	143
6.3	硬岩地层超载对管道力学影响研究	146
6.3.1	超载参数影响研究	146
6.3.2	管道参数影响研究	148
6.3.3	回填土刚度影响研究	150
第7章	定向穿越管道力学分析	152
7.1	定向穿越管道失效分析	152

7.1.1 定向穿越铺管技术	152
7.1.2 运营过程中穿越管道失效分析	153
7.2 孤石作用下管道凹陷行为研究	156
7.2.1 数值计算模型	156
7.2.2 数值计算模型验证	156
7.2.3 无压管道凹陷行为研究	158
7.2.4 压力管道凹陷行为研究	163
7.3 穿越管道挤毁行为研究	166
7.3.1 临界屈服压力	166
7.3.2 无缺陷管道挤毁行为研究	167
7.3.3 凹陷管道挤毁行为研究	173
第 8 章 管道防护装置设计及力学行为研究	178
8.1 油气管道防护装置结构设计	178
8.1.1 定向穿越管道防护结构设计	178
8.1.2 埋地管道防护结构设计	179
8.2 带防护装置管道力学行为研究	180
8.2.1 跨断层管道力学行为研究	180
8.2.2 落石冲击管道力学行为研究	182
8.2.3 不均匀沉降区管道力学研究	185
8.2.4 穿越管道凹陷行为研究	188
8.2.5 穿越管道挤毁行为研究	190
参考文献	193

第1章 绪 论

1.1 研究背景及意义

随着国民经济发展及工业化水平提高，我国对石油、天然气的需求量逐步增大，而国内油气资源的勘探与开发无法满足需要，很大比重依靠进口。我国从 1993 年开始成为原油净进口国，2009 年的进口原油依存度首次超过国际警戒线的 50%；2014 年，我国石油对外依存度升至 59.5%，较 2013 年上升 1.1 个百分点，2015 年的石油对外依存度将超过 60%^[1]。因而，石油、天然气既是重要的能源，又是重要的战略物资，它们直接影响着国民经济的可持续发展，也关系到国家安全。

管道作为石油、天然气最快捷、经济、可靠的运输方式，被称为油气田生命线工程，其结构安全性和可靠性日益突出并受到广泛关注^[2]。

截至 2014 年，全球油气管道总里程约达 $196\times10^4\text{km}$ ，其中原油管道约为 $38.1\times10^4\text{km}$ ，成品油管道约 $26.7\times10^4\text{km}$ ，天然气管道约 $129.9\times10^4\text{km}$ ，天然气管道已占全世界管道总里程的 66.3%^[3]。表 1-1 为全世界各地区油气管道里程统计，表中可见，北美洲拥有全世界最发达的管网系统^[4]。截至 2014 年，中国油气管道总里程已经达到 $10.7\times10^4\text{km}$ ，其中原油管道 $2.56\times10^4\text{km}$ ；成品油管道 $2.1\times10^4\text{km}$ ；天然气管道 $6\times10^4\text{km}$ ，占油气管道总长的 52%^[5, 6]。如表 1-2 所示，2009 年以来建成及在建的 4 条原油进口管道和 6 条天然气进口管道，为我国提供了较强的石油和天然气进口能力。

表 1-1 世界各地区油气管道里程统计^[4]

区域划分	管道里程/km			
	原油管道	成品油管道	天然气管道	总里程
亚太地区	40200	48891	176770	265881
北美洲	126600	122700	503200	752500
欧洲	18300	21900	172300	212500
西亚地区	25000	16000	44000	85000
苏联地区	90000	20000	270000	380000
中美洲	10254	10800	19950	41004
南美洲	32400	19400	71600	123400
非洲	37800	20400	41300	99500

表 1-2 中国油气资源进口管道概况^[4]

管道名称	长度/km	设计输量	建设年份
中哈原油管道	1300	$1200 \times 10^4 \text{t}$	2009
中俄原油管道	926	$1500 \times 10^4 \text{t}$	2011
中缅原油管道	1361	$2200 \times 10^4 \text{t}$	2015
漠大管道	926	$2000 \times 10^4 \text{t}$	2014
中亚天然气管道	A 线	$300 \times 10^8 \text{m}^3$	2009
	B 线	$300 \times 10^8 \text{m}^3$	2010
	C 线	$250 \times 10^8 \text{m}^3$	2014
	D 线	$300 \times 10^8 \text{m}^3$	2014
中缅天然气管道	1727	$120 \times 10^8 \text{m}^3$	2013
中俄天然气管道东线	3450	$380 \times 10^8 \text{m}^3$	2015

我国 20 世纪 60 年代建设第一条输气管道(巴渝线)后,经过 50 余年的发展,至 2012 年年底,我国天然气主干管道总里程约 $5.5 \times 10^4 \text{km}$,初步形成了以西气东输一线、西气东输二线、川气东送、陕京线一线、陕京二线、陕京三线等天然气管道为主干线,以兰银线、淮武线、冀宁线为联络线的国家基干管网;同时川渝、华北、长江三角洲等地区已经形成相对完善的区域管网,“西气东输、海气登陆、就近供应”的供气格局基本形成^[7]。

长输油气管道的敷设方式可分为地上敷设和地下敷设。

地上敷设又称为架空敷设,根据支架高度,可将其分为低支架敷设、中支架敷设和高支架敷设。当管道跨越山谷、河流、沼泽、沙漠及永久冻土带时宜采用地上敷设。

对于干线(长输)油气管道,98%采用地下敷设,按其敷设形式可分为地沟敷设和埋地敷设。地下敷设管道具有施工简单、占地面积小、节省投资、不影响交通和农耕作等优点。

近年来,水平定向钻技术以其精确导向、施工周期短、综合效率高等优势,在石油天然气管道施工中得到了广泛应用^[8]。

但是,由于埋地管道与岩土直接接触,因而其受地层影响较大,特别是长输管线跨越范围广阔,管道沿线地质环境复杂,极易受到各种地质灾害的威胁,易造成管道大变形、断裂等失效形式,从而导致油气泄漏,造成管线停输、污染环境,不仅带来巨大经济损失,甚至导致火灾、爆炸等事故,给国家和人民的财产、生命安全带来威胁。因而,研究地质灾害下的油气管道力学对管道设计、敷设施工、安全评价、维修和防护等具有重要理论意义和工程应用价值。

1.2 管道沿线地质灾害类型及危害

我国地域辽阔,地质条件复杂,而长输油气管道需要穿越多个地区,管道沿线地质灾害频发且较为复杂。根据地质灾害产生的原因,可将其分为三大类^[9]:

(1) 地壳内部构造引起的地质灾害,包括地震、地面塌陷(沉降)、地表裂缝等。

(2) 地壳外部构造引起的地质灾害,包括滑坡、泥石流、洪水、沙埋、风蚀等。

(3) 特殊土体导致的地质灾害,包括湿陷性黄土、膨胀土、盐渍土、冻土等引起的灾害等。

根据统计资料,我国主要管道地质灾害分布情况如表 1-3 所示。

表 1-3 我国主要管道地质灾害分布情况^[10]

地区	主要管道	沿线主要地质形态	主要地质灾害隐患
西部	西气东输(二线)、鄯乌线、格拉线、涩宁兰	塔里木盆地、天山、戈壁沙漠、青藏高原	滑坡、泥石流、风蚀沙埋、盐渍土、地震断层、冲沟
中部	西气东输、陕京(二线)、马惠宁、兰郑长	鄂尔多斯高原、黄土高原、山西山地、临汾盆地	滑坡、泥石流、洪水、采空塌陷、断层、黄土湿陷
西南	川气出川、忠武、兰成渝	川东、渝中和鄂西为主的低山区	崩塌、滑坡、泥石流、塌陷、断层
东部	西气东输、甬沪宁、仪长	黄淮海平原、长江三角洲、低地丘陵	地面沉降、地裂缝、采空塌陷、洪水

忠武输气管道和川气东送管道分别于 2004 年和 2009 年竣工并投产运营,它们穿越川东至鄂西山区,该地段为典型的地质灾害多发区。据 2010 年对这两条管线的统计结果,发现管道沿线地质灾害发育量较大,主要为滑坡(含潜在不稳定斜坡)、崩塌(危岩、高边坡)和水毁(坡面水毁、河沟道水毁、台田地水毁)^[11],如表 1-4 所示。

李效萌等对中缅管道安顺—贵阳段沿线进行地质调查,发现灾害点 34 处,主要为滑坡、崩塌、不稳定斜坡、地面沉降等(表 1-5)^[12],该地区管道沿线地质灾害发育相对集中、分布密度大。

2002 年 7 月西气东输管道工程开始兴建,主要任务是将新疆塔里木盆地的天然气送往豫皖江浙沪地区,主干管道全长 4000km。沿线经过新疆、甘肃、宁夏、山西、河南、安徽、江苏、上海、浙江 10 个省市,跨越了青藏高原、黄土高原、山西山地、皖苏丘陵平原、长江三角洲等地区,沿线主要地质灾害类型及数量如表 1-6^[13]所示。

表 1-4 忠武/川气东输管道山区主要地质灾害 (2010 年) ^[11]

类型	滑坡/处	崩塌/处	水毁/处	其他
忠武管道	23	22	1351	1
川气东送管道	48	42	341	0

表 1-5 中缅管道安顺—贵阳段地质灾害统计结果 ^[12]

灾害类型	数量/个	百分比/%	面积/($\times 10^4 \text{m}^2$)	体积/($\times 10^4 \text{m}^3$)
滑坡	3	8.8	0.7	5.2
崩塌	17	50.0	2.7	10.3
不稳定斜坡	4	11.8	0.6	4.1
地面沉陷	10	29.4	0.4	-
总计	34	100	4.4	19.6

表 1-6 西气东输地质灾害统计 ^[13]

灾害	新疆	山西	陕西	河南	甘肃	宁夏	安徽	苏浙沪	总计
滑坡/处	-	34	84	1	-	34	1	2	155
崩塌/处	3	45	6	1	-	-	5	-	60
泥石流/条	2	15	84	1	83	24	-	-	209
盐渍土/km	501.2	-	20.4	-	15.0	47.8	-	-	584.4
采空塌陷/处	-	19	5	63	-	9	3	-	99
地裂缝/处	-	32	-	11	-	-	-	-	43
地面沉降/km	-	15.0	-	176.5	-	-	182.9	-	374.4
砂土液化/km	-	14	-	-	85	38.3	20.9	-	158.2
黄土湿陷/km	-	107.2	185.0	51	-	-	-	-	343.2
瓦斯爆炸/处	-	2	2	-	-	2	-	-	6
黄土潜蚀/处	-	-	268	-	-	-	-	-	268
膨胀土/处	-	-	-	-	-	2	9	-	11

地质灾害对管道工程的危害表现为两个方面：一是管道建设施工期间，地质灾害容易导致施工人员受伤、施工机具损坏；二是管道运营期间，地质灾害对管道本体及对伴行路、阀室、站场和其他地面设施造成破坏^[14]。其中，地质灾害对管道的危害形式多，危害机理较为复杂。地质灾害作用也会引起地层运动和围土变形，管土相互作用及复杂力学行为使得管道发生变形、断裂、弯曲、压缩、扭曲、局部屈曲等失效形式^[10]，特别是近年来大口径管道的大范围应用，使围土作用下管道的失效现象更加突出。

1.2.1 地震断层

地震对埋地管道产生破坏的原因有两种：一是永久地面变形，主要有断层错动、滑坡地质构造性上升或沉陷等，永久地面变形的影响范围虽然有限，但它能在较小范围内造成较大的相对位移，导致管道破裂或断裂失效，危害性极大；二是地震波动效应，它虽然影响范围较大，但对管道造成的破坏相对较小^[2, 15]。

地壳岩层因受力达到一定强度而破裂，并在破裂面出现明显相对位移的构造现象称为断层，断层可分为正断层、逆断层和走滑断层三类。

地震作用下埋地钢管的破坏形式可分为三类：

(1) 管道破坏失效，主要有拉伸失效、局部屈曲失效和梁式弯曲失效三种失效模式^[16]。

(2) 管道接口破坏失效，破坏形式与连接方式有关。

(3) 三通、弯头、闸阀和管道与其他构筑物连接处，由于应变集中的运动相位不一致而造成破坏^[17]。

表 1-7 所示为地震断层作用下的管道破坏事故。

表 1-7 地震断层作用下的管道破坏事故^[2, 10]

地震灾害	年份	管道破坏形式
美国洛杉矶长岛 6.3 级地震	1933	500 多根水管、煤气管和石油管道破裂
美国圣费尔南多 6.4 级地震	1971	输气和排水管道断裂、屈曲
尼加拉瓜马那瓜地震	1972	输水管道几乎全部破坏
中国海城地震	1975	辽河油田 14 条输油管线 29 处破坏
苏联加兹拉地震	1976	管道折断、断裂、管体裂缝、接头脱落
唐山地震	1976	断裂、漏油、褶皱裂缝、弯曲
墨西哥 8.1 级地震	1985	煤气干管断裂引起爆炸、火灾
澳大利亚滕南特里克地震	1988	煤气田管道被轴向压缩
美国兰德斯地震	1992	超过 360 根管道发生破坏
美国北岭 6.8 级地震	1994	大量油气管道破裂，引发数百起火灾
日本兵库县南部 7.2 级地震	1995	输气管道漏气引起火灾
云南丽江 7.0 级地震	1996	多处供水管道破裂、爆管
土耳其伊兹米特 7.8 级地震	1999	管道破裂发生原油泄漏引发火灾
昆仑山南麓 8.1 级地震	2001	输油管道出现破坏
阿拉斯加 7.9 级地震	2002	输油管道支持系统十多处破坏

1.2.2 滑坡

滑坡是指斜坡上的土体或者岩体,受河流冲刷、地下水活动、雨水浸泡、地震及人工切坡等因素影响,在重力作用下,沿着一定的软弱面或者软弱带,整体或者分散地顺坡向下滑动的自然现象。运动的岩(土)体称为变位体或滑移体,未移动的下伏岩(土)体称为滑床。

滑坡对线路管道的危害主要表现为^[14]:当管道在滑坡下部通过时,滑坡体对管道进行加载;当管道在滑坡中部通过时,管道因承受滑坡体巨大拖拽力而发生弯曲变形、拉裂甚至整体断裂等失效;当管道在滑坡上部通过时,滑坡体作用下管道出现悬空或被拉断。

表 1-8 为滑坡灾害下部分地区管道破坏事故统计,引发管道滑坡灾害的主要原因可归纳为暴雨导致土体松动、山体地貌和构造失稳、人类建设活动等。由于滑坡灾害处理费时,整治费用高,因而在选定管道线路时,对其应尽量采取绕避方案。对于一般易滑坡段的治理,可以采取适当措施稳定坡体,或者在滑坡体后缘修筑截、排、导水系统,以防地表水汇入滑坡体,在滑坡体前缘运用浆砌片石护坡,防止水流的侧向侵蚀造成抗滑力减小,从而使坡体稳定保证管道安全^[9]。

表 1-8 滑坡灾害下管道破坏事故

管道	年份	灾害特性	破坏情况
格拉输油管道	1996	暴雨引发横向滑坡	管道砸伤、拉断、漏油,全线停输
巴西成品油管道	2001	暴雨引发土体滑动	管体产生裂纹、断裂,成品油外泄
绵阳中青线管道	2002	地产开发引发滑坡	管道撕裂
重庆开县气管道	2005	滑坡产生泥石流	管道被泥石流压断
重庆沙坪坝气管道	2005	施工、堆土引发滑坡	管道断裂,天然气泄漏爆炸
江油广元输气管道	2005	山体滑坡	弯头被拉断导致天然气泄漏
厄瓜多尔输油管道	2008	降水引发的滑坡	管道被切断,停止石油出口
浙江天然气管道	2008	堆土引发滑坡	管道断裂爆炸
西充县供气管道	2009	暴雨引发山体滑坡	供气主管破裂
巴中—南江输气管道	2011	暴雨引发地质滑坡	输气管道被压破裂,全城停气
泸州输气管道	2012	暴雨冲击山体滑坡	泥石砸断管道,天然气泄漏
广元天然气管道	2013	强降雨引发滑坡	输气管道移位断裂
安塞至永炼输油管道	2013	强降雨引发滑坡	管道破裂,原油泄漏

1.2.3 崩塌

崩塌是我国山区常发生的一种自然灾害,特别是西部山区油气管道沿线,具有分布范围极广、发生突然、发生频率高、难以预防等特点。

崩塌对油气管道的危害主要表现为两个方面:

(1) 崩塌落石对管道产生冲击载荷,特别是在高程差较大的区域,落石冲击管道上方覆土产生巨大的瞬时冲击载荷,引起管道变形失稳甚至破裂泄漏;

(2) 崩塌落石破坏伴行路,中断交通,影响管道正常维修防护等^[18]。

忠武输气管线自 2004 年投入运营以来,落石灾害已成为影响管道安全的最严重地质灾害之一,已发生数起落石冲击管道事件,其中重庆忠县段曾发生落石冲破地表 15cm 厚钢筋混凝土防护板,将管道砸出直径约 30cm 的凹陷^[19]。

经调查发现,兰成渝管道阳坝段沿线主要地质灾害类型为崩塌、滑坡、泥石流和不稳定斜坡等,其中崩塌灾害占总数的 50%;主要由于管道和交通干线施工时进行了人工削坡,改变了天然斜坡的平衡条件,侧壁较陡容易产生崩塌。受 2008 年汶川地震的影响,康县段阳坝发生体积近 1000m^3 的崩塌,其中最大块石直径 4m,近 50t 的巨石将兰成渝管道接头处砸开,造成柴油泄漏^[20]。

根据中缅管道云南段地质灾害评估资料,中缅管道沿线滑坡及不稳定斜坡 186 处、崩塌 15 处、泥石流 16 处^[21],使得中缅管道成为我国乃至世界上建设难度最大的管道工程之一。

1.2.4 地面塌陷

人为和自然地质作用下,地表岩土向下陷落,并在地面形成塌陷坑(洞)的地质现象称为地面塌陷,其主要原因有地下水抽取致塌、渗水致塌、振动致塌、超载致塌、采空致塌等。一旦地表发生塌陷或沉降,会造成埋地管道弯曲变形、悬空或断裂,从而带来安全隐患。

如由于采煤挖空,导致平顶山油气管道发生扭曲变形;2005 年雨水冲击造成广东佛山地面塌陷,导致煤气管道压裂,煤气泄漏;2007 年渗水致南京路面塌陷,导致天然气管道发生断裂爆炸;2007 年 10 月美国圣迭戈出现严重塌方,地面多处下陷,导致地下管道扭曲破裂^[10];2010 年 12 月温州西山南路小区人行道沉降严重导致燃气管道接头焊接口出现应力集中突然发生断裂,造成大量燃气泄漏继而引发爆炸事故。

1.2.5 地面超载

在我国城市建设和基础工业施工作业中,经常出现地面堆载甚至超载情况,

如在厂房、堆料场、路边、桥头路基等地方堆积大量原材料、垃圾等,甚至出现许多违章建筑物,从而导致软土地基产生变形挤压地下管道,使其发生不均匀沉降、变形等,最后引发安全事故。

特别是我国的长江三角洲、广东、福建沿海地区都广泛分布有海相或湖相沉积软土,其承载能力低、孔隙比大、压缩性高、灵敏度高、易扰动^[22]。因而,当地面出现超载情况时,地表局部沉降量大,持续时间长,将对埋地管道造成极大危害。

地面超载对管道的主要破坏形式为^[23]:

- (1) 出现管道“盲段”,常规的检测和维护较为困难。
- (2) 管道截面变形,降低了清管器的通过性,易造成管道堵塞。
- (3) 管道出现沉降变形,导致管道破裂,油气泄漏。
- (4) 易破坏管道防腐层,加速管道腐蚀。
- (5) 在一些违规建筑物中进行盗油、盗气等非法活动。

据中国石油天然气股份有限公司初步调查,截至2004年4月30日,油气管道共有23045处违章建筑物,其中直接占压近1.2万处,管道两侧5m以内违章建筑物超过1.1万处^[23]。四川油气田管线占压隐患多达4000多处;西气东输甘肃段全长982.5km,与道路、桥梁交叉点多达几十处,严重影响管道安全运行;中原油田天然气产销总厂管线,违章占压440处;大庆油区内违章建筑50640户占压油气管线,面积达 $233 \times 10^4 \text{m}^2$;湛茂原油长输管线全长115km,多处管段在车辆作用下发生变形,并加快了管道腐蚀^[23]。

1.3 地质灾害下管道力学研究现状

由于埋地管道与围土直接接触,其对围土变形较为敏感,管道的变形和破坏等大多都是围土作用导致的。因而,研究埋地管道力学行为必须先了解管土耦合作用。

由于回填土和软土地基属于多相松散体,具有高压缩性、黏弹塑性、低抗剪切性等特点,及管土耦合作用、围土变形存在不确定性,使得管道力学研究较为困难,工程中通常采用简化模型来分析管土相互作用。

目前,常用的管土模型主要有三种:弹性地基梁模型、土弹簧模型和非线性接触模型。

弹性地基梁模型是一种静力分析模型,主要考虑土体最终位移对管道的作用,其假设管道为梁模型,管道周围土体均匀分布,因而该模型简单易算,被工程界广泛采用^[10]。

土弹簧模型是将管道围土简化为一系列等效弹塑性弹簧,弹簧刚度和自由度

由土性质和变形形式决定,该模型可模拟围土与管道的三维作用,却不能模拟二者间的接触非线性及摩擦。

对于非线性接触模型,目前仍处于研究和探索之中,而管土耦合作用属于典型的非线性接触问题,随着接触理论的发展,利用理论分析和数值手段相结合建立管土耦合非线性模型成为一种更合理的解决方案^[24]。

随着油气管道业的发展,穿越复杂地质区域的管道越来越多,各种不良地质灾害作用下的油气管道事故屡见不鲜,地质灾害下的管道力学分析和安全评价日益受到关注。

1.3.1 地震断层

Newmark 和 Hall 于 1975 年首次提出应用静态土压力和静态摩擦力的小位移模型分析断层错动对地下管道影响的理论方法^[25]。随后, Kennedy 等对 Newmark-Hall 方法进行了改进,考虑横向管土相互作用,应用大位移理论计算管道弯曲应变^[26]。Wang 和 Yeh 把变形管道简化为单一曲率大变形梁和弹性地基梁,考虑管道抗弯刚度和管土相互作用,采用管道钢三折线模型,得到管道应力应变分布^[27]。Chiou 和 Chi 将管道模拟成一局大挠度梁,并将穿越走滑断层区的大挠度管道模拟成一弹性体,对小挠度部分管道仍采用半无限梁模型^[28]。Karamitros 等采用弹性梁模型模拟断层两侧大变形段,考虑了弹性梁和弹性地基梁连接点处剪力连续条件和管道横截面实际应力分布^[29]。陈冠卿用管材本构弹塑性区和完全塑性区交点所对应的最大应变对埋地管道的抗震要求进行判断^[30]。陈勇寅等以 B 样条基函数组合作为管道位移试函数,求解管道位移及内力、应变^[31]。刘爱文等把管道简化为均布载荷弹性梁,提出基于管土大变形段整体分析计算方法,得到管道内力与变形解析式^[32]。

计算机仿真技术逐渐成为埋地管道研究主要趋势。侯忠良等应用有限元方法将管道简化为弹性地基梁,根据虚功原理建立管道平衡方程并进行求解^[33]。张进国等根据最小势能原理推导断层错动下管道有限元方程,计算管道位移和应力^[34]。郭恩栋、Tohidi、Gu 等将管道模拟为梁单元,将管土相互作用模拟成弹簧单元,研究断层错动对埋地管道的影响^[35-37]。刘爱文等利用等效边界元有限元模型模拟土耳其地震供水钢管在断层错动作用下的实际震害^[38]。Kuwata 等使用离散单元法对断层错动作用下延性铸铁管进行分析,提出评估容许断层错动量方法^[39]。Li 等对比了基于壳模型有限元方法和索模型解析方法,讨论了二者对管道轴向拉伸应变的影响^[40]。赵海晏、朱春生、Takada、Jiao、Vazouras、Zhang 等采用接触模型模拟管土相互作用,基于壳单元有限元模型研究断层对埋地管道的影响^[41-46]。王滨基于管道钢三折线和 Ramberg-Osgood 模型,建立钢管等效边界管壳单元非线性有限元模型^[2]。

国内外学者对断层下的管道物理模型也进行了试验研究, Konuk、Yoshizaki 等通过全尺寸物理模型试验研究水平横向管土作用^[47, 48], Yasuda、Ha 等对埋地管道在断层作用下进行了土箱试验和离心实验模拟^[49, 50]。国内冯启民等首次对跨断层埋地钢管进行了振动台静力模拟实验^[51]。

1.3.2 滑坡

根据滑坡对管道的作用方向, 可将滑坡分为横向滑坡和纵向滑坡两种。横向滑坡的坡体垂直于管道, 管道因受到坡体横向作用易发生弯曲变形; 纵向滑坡的坡体沿管道轴向方向运动, 管道易发生纵向失稳。目前关于横向滑坡的研究相对较多, 而研究纵向滑坡对管道影响的相对较少。

关于滑坡灾害下管道力学问题的研究起步较晚, 直到 1991 年, 梁政讨论了横向滑坡下的管道受力, 采用纵横弯曲弹性地基梁对滑坡下的管道强度进行了分析^[52]。1995 年, Rajani 等采用简化解析方法对横向滑坡下的管道力学响应进行了分析, 但未考虑管土相互作用^[53]。同年, O'Rourke 等运用 Ramberg-Osgood 幂指数硬化模型对山体滑坡区的管道进行了研究, 认为横向滑坡作用下的管道比纵向滑坡更危险^[54]。Chan 考虑管土相对位移对管道应力的影响, 得出三种典型滑坡下管道应变数学模型^[55]。张东臣针对具体滑坡事故, 分析了不同滑坡方向条件下的管道应力应变分布^[56]。刘慧给出了管道遭受轴向滑坡、横向滑坡、深沉圆弧滑坡作用下的解析预测方法^[57]。谢强等讨论了牵引式滑坡和推移式滑坡下埋地管道的纵向受力和变形, 推导了管道的弯矩、剪力、位移及最大应力公式^[58]。王磊、焦中良等在有限元软件中建立了滑坡作用下埋地管道的数值计算模型, 对其应力进行了分析^[59, 60]。郝建斌等对横向滑坡坡体作用于管道推力进行了计算, 并通过软件行了仿真^[61]。钱浩、林冬等采用人工堆积构建了全尺寸土质滑坡实验模型, 对管道应力和变形进行了监测^[62, 63]。Yuan 等推导了海底滑坡和泥石流作用下管道应力变形的解析方法^[64, 65]。Zheng 等对滑坡作用下的埋地管道失效原因进行了分析, 并基于最大主应变对管道安全性进行了评价^[66]。

1.3.3 崩塌

目前, 关于危岩崩塌的研究主要着眼于危岩体本身, 包括危岩失稳模式、危岩稳定性计算、危岩加固治理方法等, 而关于危岩失稳后造成的危害研究相对较少, 特别是危岩崩塌后对埋地管道的冲击问题研究更少, 但该问题已逐步得到学者们的关注。

如王洪波、李渊博、王鸿等建立了落石冲击作用下埋地管道简化计算模型,