

# 穿越活动断层地段的现役输油气管道抗震韧性评价\*

王 龙<sup>1</sup>, 刘爱文<sup>1♣</sup>, 贾晓辉<sup>1,2</sup>, 李祥秀<sup>1</sup>, 王晓辉<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 河北地质大学 勘查技术与工程学院, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 在总结不同时期输油气管道抗震规范特点的基础上, 分析了现役输油气管道抗震韧性评价影响因素, 确定抗震设计、钢管腐蚀、地质灾害防治、应急处置 4 项抗震韧性评价指标, 采用改进的 KENT 危险指数分析法, 提出适用于现役输油气管道穿越活动断层地段的抗震韧性评价流程和方法, 并应用于典型案例分析。初步验证了所提方法的科学性, 为输油管道地震风险治理提供参考。

**关键词:** 输油气管道; 活动断层; 钢管腐蚀; 抗震韧性; KENT 危险指数分析法; 抗震设计规范

**中图分类号:** TU352      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2020)03-0539-07

## 0 引言

抗震韧性是指工程、建筑等在遭受破坏性地震之后能够维持住一定功能、避免造成次生灾害, 并在尽可能短的时间内恢复社会服务的能力(翟长海, 2018; 杨静等, 2019)。2003 年, 美国地震工程研究学会(EERI)发布《确保社会抵御地震损失——地震工程研究和推广计划》报告, 首次提出了抗震韧性概念(宁晓晴, 2018)。随着社会经济快速发展和风险意识的不断提高, 抗震韧性理念越来越多地得到地震工程界的广泛重视。近年来, 国际防灾理念有了进一步发展, 提高城市和社会的韧性能力已经成为防震减灾研究的前沿领域(Bruneau *et al.*, 2003)。

作为关系国计民生的重要生命线工程, 输油气管道的抗震韧性也受到了广泛关注。输油气管道是一项复杂的系统性工程, 例如长输天然气管道系统通常由集输管网、燃气净化设备、输气干线、压气站、分输阀室、分输站(调压计量站)、管理维修站、通讯与遥控设备、阴极保护站(或其他电保护装置)以及管路附件等组成。输油气管道的抗震韧性是指在遭受破坏性地震之后能够保持基本完好, 或者发生一定的变形但是不发生泄漏, 避免造成次生灾害, 并在尽可能短的时间

内恢复运输能力。震害经验表明地震活动断层的位错作用是造成管道破坏的主要原因。我国活动断裂发育, 强震频发, 输油气管道经常穿越地震活跃地区, 一旦发生地震, 会造成严重的灾害损失, 例如我国西气东输工程, 管线全长 4 000 km, 跨越 9 个省(市、自治区), 东西向横跨多个地震活动地区, 通过 100 多个断层, 存在着被地震破坏的高风险隐患。

输油气管道作为线性工程, 其抗震韧性评价主要是要评估管道工程对可能要发生的地震灾害风险的应对能力和措施。通过抗震韧性评价, 可以识别地震风险, 消除解决安全隐患, 提升管道抗震韧性水平。当地震灾害发生时, 管道工程可以通过保护或者快速恢复重要的基本结构和功能等方法, 及时有效地抗御灾害影响和保持灾后快速恢复能力。国内关于城市抗震韧性的研究较少, 主要集中于单体结构可恢复性新体系的研发上, 对于工程结构、生命线系统以及城市等的抗震韧性的研究较少, 对于输油气管道抗震韧性研究更是处于起步阶段, 并且大多处于概念阶段, 很少进行量化研究。目前输油气管道的抗震设计已经从弹性设计发展到了应变设计, 其抗震规范至今也已经发布了 5 个版本, 从早期的石油行业规范上升为国家强制性标准。由于不同服役年龄管道遵循的抗震规范要求不尽相同, 加之钢管腐蚀以及

\* 收稿日期: 2020-03-31.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51778588)和国家重点研发项目(2018YFC1504602)联合资助.

♣ 通讯作者: 刘爱文(1973-), 研究员, 博士. 主要从事生命线地震工程研究. E-mail: law73@163.com.

环境变化等因素影响，现役输油气管道的抗震韧性差异较大。本文通过总结输油气管道震害经验教训，辨识不同服役年龄的输油气管道的抗震韧性特征，探讨抗震设计、钢管腐蚀、地质灾害防治、应急处置等因素对管道抗震韧性的影响，提出现役输油气管道工程的抗震韧性指标及评价方法。

1 我国输油气管道抗震设计规范

人们对埋地管道的地震安全问题的重视始于1971年美国圣费尔南多地震。国内外管道的震害调查结果表明：地震对管道的影

响从轻到重依次是地震动、砂土液化和活动断层，其中地震断层的位错作用造成的输气管道破坏最为严重（侯忠良，1990）。笔者汇总了国内外地震对输油气管道的破坏实例，见表1，从表中可以看出地震断层的地表位错是造成输油气管道破坏的主要因素。

目前，国内外输油气管道抗震设计从初期的弹性设计、应力设计已经发展到了应变设计。1991年至今，我国输油气管道抗震设计规范已经颁布了5个版本，见表2。最早的行业规范（1991版、1997版）就已经采用变形控制理论，以充分利用钢材的延性。初期抗震设计规范使用地震烈度，将管道分为重要区段和一般区段，并采取不同的

表 1 地震灾害造成的油气管道事故

Tab. 1 Oil and gas pipeline accidents caused by earthquake disaster

参考地点	日期	<i>M</i>	破坏原因	管道事故描述
美国圣费尔南多地震	1971-02-09	6.6	断错	共发生450处埋地输气管道和给排水管道的断裂
河北唐山地震	1976-07-28	7.8	断错、地震引发桥梁坍塌	秦京管道遭受4处地震损坏，其中3处管道损坏是由活动断层直接引起的，另外1处悬挂有管道的京榆公路滦河大桥倒塌，管道被拉断
墨西哥地震	1985-09-19	8.1	地震波效应	直径1 067 mm的钢管道压缩屈曲破坏
厄瓜多尔地震	1987-03-05	6.9	地震引发滑坡	横贯厄瓜多尔原油管道（直径为660 mm）损害管道长度达40 km，用时6 h恢复管道运行，经济损失8.5亿美元
美国加州北岭地震	1994-01-17	6.6	断错	直径为560 mm的输气管道破坏，管道拉伸破坏，泄露起火后，距拉伸破坏150 m处管道发生了压缩破坏
澳大利亚北部滕南特克里3次连续地震	1988-01-22	6.3/6.4/6.7	断错	地表断裂造成了煤气田的管道被轴向压缩了近1 m
中国台湾集集地震	1999-09-21	7.6	断错	4条穿越断层的管道被错动切断，断层水平错距为12 m，垂直错距为4 m
昆仑山口西地震	2001-11-14	8.1	断错	10.5 m主管道扭曲，3.2 m主管道被拉断
美国阿拉斯加地震	2002-11-03	7.9	断错	管道在穿越断层处地面敷设，地震中管道主体完好，辅助支架破坏
四川汶川地震	2008-05-12	8.0	地震波效应	兰成渝成品油管道主体完好，附属设施受影响。承受的最大烈度为Ⅷ度

表 2 输油气管道抗震规范

Tab. 2 Evolution of seismic code for oil and Gas Pipeline

标准名称	标准编号	实施日期
输油（气）钢质管道抗震设计规范	SYJ 0450—1991	1991年12月
输油（气）钢质管道抗震设计规范	SY/T 0450—1997	1998年6月
输油（气）钢质管道抗震设计规范	SY/T 0450—2004	2004年11月
油气输送管道线路工程抗震技术规范	GB 50470—2008	2009年7月
油气输送管道线路工程抗震设计规范	GB 50470—2017	2018年1月

抗震设防水准; 2004 版行业规范采用地震动参数代替地震烈度, 对位于设计地震动峰值加速度  $\geq 0.2 \text{ g}$  地区的管道, 规定必须进行抗拉伸和抗压缩校核; 2008 版管道抗震规范由行业标准提升为国家标准, 增加了抗震施工和抗震验收 2 个章节; 2017 版抗震规范细化了管道与活动断层并行敷设间距的具体要求, 补充、完善了管道抗震校核的规定, 修订了断层位移作用下的管道容许应变的确定方法。

穿越活动断层的管道抗震校核标准是在设防的断层位错作用下管道变形反应小于管道的允许拉伸应变和压缩应变。1991—2007 年建设的输油气管道工程遵循石油行业标准, 1991, 1997 和 2004 版行业标准, 对于走滑断层可以采用 Newmark 理论方法计算管道的最大轴向应变, 与管道的容许应变进行抗震校核。Newmark 理论方法简单、方便, 但忽略了管道抗弯刚度引起的应变, 因此在行业标准实施阶段, 采用 Newmark 方法分析得到的管道应变偏小, 校核结果偏于不安全, 高估了管道抗震能力, 存在一定的风险隐患, 2008 和 2017 版的国家标准规范对 Newmark 理论解的方法进行修正 (刘爱文, 2002)。如图 1 所示, 一条钢材为 X60 管道 ( $\Phi 529 \times 6$ ) 以  $30^\circ$  交角穿越走滑断层, 如果按照早期的行业标准, 该管道可以抵抗 1.7 m 的断层错动量, 但按照现行的国家标准, 该管道只可以抵御 0.8 m 的断层错动量。由此可见, 在行业标准实施期间, 存在一部分高估了抗震能力的管道, 考虑到较长时间腐蚀的影响, 存在地震风险隐患较大的问题。

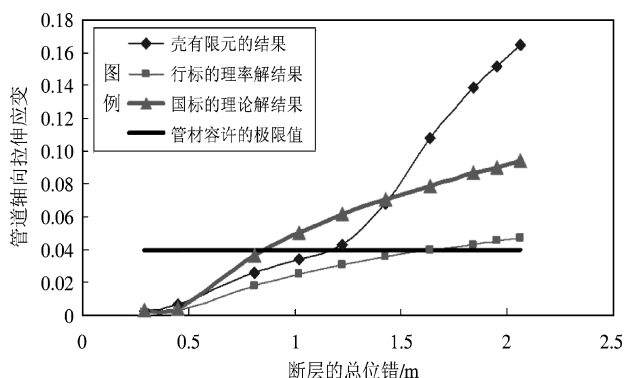


图 1 不同方法得到的管道应变反应

Fig. 1 Pipeline strain response obtained by different methods

## 2 抗震韧性评价影响指标

我国陆上输油气管线节点多、线路长, 管道铺设所经过地区地理自然条件复杂, 提高输油气管道的抗震韧性十分必要。影响输油气管道抗震韧性的主要因素是管道的材料、管径的大小和管道壁厚。现有技术的限制及经济因素的影响, 客观上制约了管道的抗震水平, 尤其是对于通过地震活动断层的输油气管道, 其断层位错量往往超过管道抗震极限应变。例如, 汶川地震的发震断层——龙门山断裂, 最大竖直位错量达到近 10 m, 远远超出兰成渝成品油管道的抗震极限应变, 因此不得不采取避让措施。

科学合理的抗震设计直接影响管道的抗震设防水平, 是降低地震灾害风险最直接有效的途径。因此, 影响管道抗震韧性的首要影响因素是抗震设计, 具体包括抗震设防标准的确定、壁厚的选择、埋深、与断层的交角等。在管道工程的设计和建设阶段就已经基本决定了管道初始的抗震能力。但是对于现役管道, 随着其运行时间不断增加, 除设计施工阶段确定的初始抗震能力外, 其它破坏性因素会对管道抗震能力产生越来越大的影响, 包括管道腐蚀导致管材性能下降、地质灾害、第三方破坏、操作失误、地震应急处置不当等。本文将从抗震设计、管道腐蚀、地质灾害防治和应急处置 4 个方面来评价抗震韧性, 在缺少相应的可靠数据前提下, 暂不考虑第三方破坏和操作失误因素对抗震韧性评价的影响。

### 2.1 抗震设计

输油气管道作为重要的生命线工程, 需要严格按照建造时期对应的抗震设计规范进行抗震设计和施工。不同时期建造的现役管道, 采取的抗震设防标准不同, 抗震设计水平也有差异。对于同一条管道, 通过不同区段时的设防要求也不同, 对于重要区段按照罕遇地震进行抗震设防, 一般区段则按照地震安全性评价结果确定的抗震设防要求进行设防。依据输油气管道相关抗震设计规范, 抗震设计指标包括抗震设防要求、抗震设计验算结果、抗震措施、抗震施工、钢管材料 5 项子评价指标, 根据其重要性设置分值权重各占 20%, 各项满分均为 20 分, 总分 100 分, 见表 3。

表 3 抗震设计影响评价指标各项分值分布

Tab. 3 Distribution of various scores of evaluation indexes of seismic design impact

抗震设防要求	抗震设计验算结果	抗震措施	抗震施工	钢管材料
断层的抗震设防要求设置合理,按照罕遇地震动设防(20分)	通过2017版抗震规范模型验算(20分)	符合2017版抗震规范采取了宽管沟设计、并回填砂土等抗震措施(20分)	符合2017版抗震规范,施工后采取了双百焊缝检测(20分)	符合相关设计文件,采用了具有大变形能力的钢管(20分)
未完全达到设防要求,但达到《中国地震动参数区划图》(GB 18306—2015)设定的基本设防水平(10分)	不能通过2017版抗震规范模型验算,但符合原抗震规范标准(10分)	不符合2017版抗震规范要求,但符合原规范标准(10分)	不符合2017版抗震规范要求,但符合原规范标准(10分)	没有采用大变形能力的钢管,但符合设计要求(10分)
完全未设防(0分)	未达到原规范标准(0分)	未达到原规范标准(0分)	未达到原规范标准(0分)	未达到标准(0分)

2.2 管道腐蚀

输油管道一般是钢质材料,钢管腐蚀是导致输油管道抗震能力下降的主要因素之一(帅健,许葵,2003)。导致管道腐蚀的因素包括介质腐蚀、管内保护层及其它措施、阴极保护、管道外涂层、土壤腐蚀性、使用年限、其它金属埋设物、电流干扰、应力腐蚀等。

在不同土壤环境下,钢质管道退化本构关系也具有差异性(刘威,2007)。考虑酸性土壤环境,以某跨断层长输气主干管线为例,其相关管道参数为:X60 钢管( $\Phi 400 \times 16$ ),管道埋深为2.5 m;断层运动形式为正断层,管线与断层的夹角 $\beta = 70^\circ$ ,断层滑动量 $\Delta = 1$  m。采用钢管的线性腐蚀模型,管径和管壁的参数随服役年限变化。通过壳有限元模型得到不同服役年限钢管在该断层位错作用下的最大应变,如图2所示,在服役年限超过40年后,钢管的变形已进入塑性变形阶段,管体将严重变形处于不安全状态。

管道腐蚀指标包括介质腐蚀性、内防腐措施、阴保设计、防腐层材料、防腐层质量、土壤腐蚀性、管道使用年限、缺陷修补等10项子评价指标,各项满分均为10分,总分100分,见表4。

2.3 地质灾害防治

地震活跃地区一般也是地质灾害易发地区。发震断层的周围属于极震区,近场强震动容易导致地质灾害。例如,在汶川地震中兰成渝管道虽然避开了断层错动的威胁,但是山体崩塌的巨石砸损了随管道敷设的光缆。地质灾害防治主要包

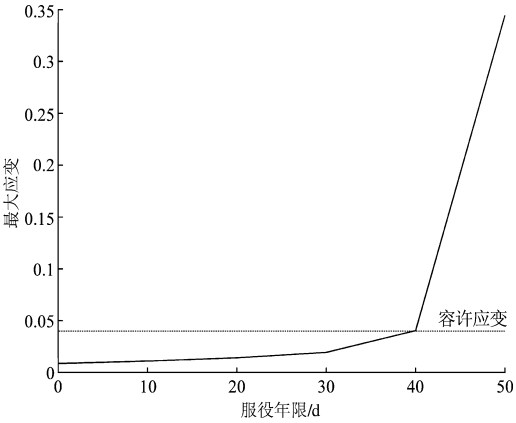


图 2 断层作用下管线最大应变随服役年限的变化  
Fig. 2 Change of maximum strain with the service life of pipeline under fault movement

括对滑坡崩塌、场地液化等地质灾害的防治。地质灾害防治指标分为地质灾害防灾预案、危险性评估、治理方案、治理施工、验收审批等5项子评价指标,评分权重各占20%,各项满分均为20分,总分100分,见表5。

2.4 地震应急处置

当地震灾害发生后,应急处置得当可以有效减轻灾害损失。在灾害发生前也可采取有效的处置措施避免或降低灾害损失,包括在断层两侧设置截断阀、布设地震监测报警系统等。根据《防震减灾法》《破坏性地震应急条例》等,地震应急处置指标包括断层两侧布设截断阀、布设地震监测系统、应急处置预案、应急装备、应急人员培训及演练、应急值守6项子评价指标,根据重要性设置各自权重,总分100分,见表6。

表 4  腐蚀影响评价指标各项分值分布

Tab. 4  Distribution of various scores of corrosion impact assessment index

介质 腐蚀性	内防腐措施 (各项分数求和)	阴保 设计	阴保电位 检测	防腐层 材料	防腐层 质量	防腐层 检测	土壤 腐蚀性	管道使用 年限	缺陷 修补
净化气 (10 分)	内涂层 (0~4 分)	符合 2017 版 抗震规范 (10 分)	检测时间间隔 1 个月 (10 分)	3PE (10 分)	优 (10 分)	3 年内 (10 分)	腐蚀性弱 (10 分)	0~5 年 (10 分)	3 年内进行 检测并修补 (10 分)
非含硫气、 含硫干气 (5 分)	缓蚀剂 (0~4 分)	不符合 设计要求 (5 分)	检测时间间隔 1~6 个月 (5 分)	2PE (7 分)	良 (8 分)	曾经检测 (5 分)	腐蚀性普通 (5 分)	5~10 年 (7 分)	3 年内检测缺 陷但未修补 (5 分)
含硫湿气 (0 分)	清管 (0~2 分)	未实施 (0 分)	检测时间间隔 6 个月以上 (0 分)	石油沥青 (5 分)	中 (4 分)	不检测 (0 分)	腐蚀性强或附 件有化工排污 (0 分)	10~20 年 (5 分)	未检测 (0 分)
				冷缠胶带 (3 分)	差 (0 分)			20 年以上 (0 分)	

表 5  地质灾害防治影响评价指标各项分值分布

Tab. 5  Distribution of various scores of evaluation indexes for prevention and control of geological disasters

地质灾害防灾预案	地质灾害危险性评估	地质灾害危险治理方案	地质灾害危险治理施工	地质灾害危险治理验收审批
科学合理(20 分)	科学合理(20 分)	开展日常应急人员培训及 演练,且频次较高(20 分)	专人应急值守(20 分)	验收审批通过(20 分)
不完全科学合理(10 分)	不完全科学合理(10 分)	培训演练频次较低(10 分)	兼职应急值守(10 分)	设计、施工、运行、维护不 完全符合标准(10 分)
不合理或未制定(0 分)	不合理或未评估(0 分)	未开展培训或演练(0 分)	无应急值守(0 分)	不符合标准或未布设(0 分)

表 6  应急处置影响评价指标各项分值分布

Tab. 6 Distribution of various scores of indicators for impact assessment of emergency response

断层两侧布设截断阀	布设地震监测系统	应急处置预案	应急装备	应急人员培训及演练	应急值守
断层两侧布设截断阀,且符合 相关标准要求(40 分)	设计、施工、运行、维护 符合标准(20 分)	科学合理 (10 分)	装备齐全且符合 相关规范(10 分)	开展日常应急人员培训及 演练,且频次较高(10 分)	专人应急值守 (10 分)
断层两侧布设截断阀,不完全 符合相关标准要求(20 分)	设计、施工、运行、维护不 完全符合标准(10 分)	不完全科学 合理(5 分)	不完全符合相 关规范(5 分)	培训演练频次较低 (5 分)	兼职应急值守 (5 分)
不符合标准或未布设 (0 分)	不符合标准或未布设 (0 分)	不合理或未 制定(0 分)	不符合规范或无 应急装备(0 分)	未开展培训或演练 (0 分)	无应急值守 (0 分)

上述管道抗震韧性影响因素可大致分为可变因素和非可变因素。可变因素是指通过人的努力可以改变的因素，可通过制定风险缓解措施加以改善，例如抗腐蚀处理、地质灾害防治等；非可变因素指通过人的努力不可能改变或只能有很少改变的因素，例如地震地质环境、活动断层位错量、场地条件等。有些因素属于中间状态，如管

道通过地区的等级、管道埋深等（马欣，2010）。对可变因素，可指定针对该因素的缓解措施，对非可变因素只有采取间接缓解措施。

3  抗震韧性评价

风险评价是抗震韧性评价的基础。通常可借

鉴的风险评价包括：因果分析法、失效模式分析法、故障树分析（FTA）、事件树分析（ETA）、道化学（DOW）危险指数法、肯特（KENT）危险指数分析法等。其中，基于美国运输部的实际运行经验及其它部门的相关研究成果提出的 KENT 危险指数分析法，是长输油气管道安全分析评价的主要方法（陈雪峰，于倩秀，2006）。本文采用改进的 KENT 评价方法进行抗震韧性评价。

现役输油气管道通过活动断层地段的抗震韧性评价包括管道的抗震设计（*D*）、管道腐蚀状况（*C*）、断层附近的地质灾害隐患防治情况（*G*）以及地震应急处置（*E*）等指标因素。不同指标因素对评价结果的影响大小各异，其中，*D* 影响最大，其次是 *C*，*E*，*G*。依据《输气管道工程设计规范》（GB 50251—2003）、《油气输送管道应变设计规范》（SY/T 7403—2008）、《天然气管道运行规范》（SY/T 5922—2003）、《埋地钢质管道沥青防腐层大修技术规范》（SY/T 5918—94）、《石油建设工程质量检验评定标准油田集输管道工程》（SY/T 0453—98）、《输油气管道安全隐患分类导则》（GB/T 34346—2017）等，对上述 4 项影响指标进行了权重分配，见表 7。

表 7 韧性评价指标权重

Tab. 7 Index weight of toughness evaluation

评价影响指标	权重占比
抗震设计影响指标（ <i>D</i> ）	40%
腐蚀影响评价指标（ <i>C</i> ）	30%
地质灾害防治评价指标（ <i>G</i> ）	10%
应急处置影响指标（ <i>E</i> ）	20%

采取不同权重对比对上述 4 个指标（*D*，*C*，*G*，*E*）进行求和，得到抗震韧性评价分数 *R*：

$$R = D \times 40\% + C \times 30\% + G \times 10\% + E \times 20\% \quad (1)$$

通过式（1）可以得到抗震韧性评价分值 *R*，按照表 8 对应 3 个评价等级，可以得到抗震韧性评级结果。*R* 越大，管道抗震韧性等级越高，管道越安全。

以格尔木至拉萨的输油管道（简称“格拉管道”）为例进行抗震韧性评分，该管道建造于 20 世纪 70 年代中期，通过昆仑山断裂带，工程重点

考虑冻土地带管道影响，未考虑抗震设防，也未采取宽管沟敷设、回填疏松砂土等抗震措施。该管道的抗震韧性评价分值为 45 分，属于低等级抗震韧性。该结论与格拉管道在 2001 年昆仑山 8.1 级地震中发生严重变形、管体破裂等震害现象相符（姚志祥，2003）。

表 8 输油气管道穿越危险地段抗震韧性评价等级

Tab. 8 Evaluation grade of seismic toughness of oil and gas pipeline crossing dangerous area

抗震韧性评价等级	韧性评价分值
高	85 ~ 100
中	60 ~ 85
低	0 ~ 60

## 4 结论

本文通过对比分析我国不同版本的输油气管道抗震规范发现，遵循行业标准建设的管道工程可能高估了管道的抗震能力。数值分析结果表明较长时间的腐蚀会使得管道抵御断层位错能力进一步降低。对于现役输油气管道，本文通过建立抗震设计、钢管腐蚀、地质灾害防治、应急处置 4 项抗震韧性评价指标，采用 KENT 危险指数分析法，提出现役输油气管道穿越活动断层地段的抗震韧性评价流程和方法，为输油气管道的地震风险治理提供参考。

目前，本文工作尚局限于研究通过活动断层的部分管段的抗震韧性评价，后续需要与整条输油气管道的地震风险评价进行有机结合，提出综合的评价方法，同时拟在以下方面进行优化：一是强化评价指标的客观性，尽量减少评价人员主观因素，并进一步量化评价指标；二是考虑管道修复经济因素及修复难易程度；三是增强评价方法的实用性和可操作性。

## 参考文献：

- 陈雪峰，于倩秀，2006. 油气长输管道安全评价方法——肯特法简介 [J]. 安全、健康和环境，6(3): 27 - 29.
- 侯忠良，1990. 地下管线抗震 [M]. 北京：学术书刊出版社.
- 刘爱文，2002. 基于壳模型的埋地管线抗震分析 [D]. 北京：中国地

- 震局地球物理研究所.
- 刘威. 2007. 大型管网系统考虑腐蚀影响的抗震可靠性分析与优化 [D]. 上海: 同济大学.
- 马欣. 2010. 管道风险分析指数评分法中分值调整初探 [J]. 管道技术与设备, (5): 14–16.
- 宁晓晴. 2018. 重要建筑地震安全性及韧性评价方法研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 帅健, 许葵. 2003. 腐蚀管线失效概率的评定方法 [J]. 石油学报, 24 (3): 86–89.
- 杨静, 李大鹏, 翟长海, 等. 2019. 城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题 [J]. 中国科学基金, (5): 525–532.
- 姚志祥. 2003. 格拉管道一次地震断裂分析及防范措施 [J]. 管道技术与设备, (6): 23–23.
- 翟长海, 刘文, 谢礼立. 2018. 城市抗震韧性评估研究进展 [J]. 建筑结构学报, 39 (9): 1–6.
- 汶川特大地震抗震救灾志编纂委员会. 2015. 汶川特大地震抗震救灾志: 卷4, 地震灾害志 [M]. 北京: 方志出版社.
- Bruneau M, Chang S E, Eguchi R Y, *et al.* 2003. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities [J]. *Earthquake Spectra*, 19 (4): 733–752.
- GB 18306—2015, 中国地震动参数区划图 [S].
- GB 50251—2003, 输气管道工程设计规范 [S].
- GB 50470—2008, 油气输送管道线路工程抗震技术规范 [S].
- GBT 34346—2017, 输油气管道安全隐患分类导则 [S].
- GBT 50470—2017, 油气输送管道线路工程抗震设计规范 [S].
- SYJ 0450—1991, 输油 (气) 钢质管道抗震设计规范 [S].
- SY/T 0450—1997, 输油 (气) 钢质管道抗震设计规范 [S].
- SY/T 0450—2004, 输油 (气) 钢质管道抗震设计规范 [S].
- SY/T 0453—98, 石油建设工程质量检验评定标准油田集输管道工程 [S].
- SY/T 5918—94, 埋地钢质管道沥青防腐层大修技术规定 [S].
- SY/T 5922—2003, 天然气管道运行规范 [S].
- SY/T 7403—2008, 油气输送管道应变设计规范 [S].

## Evaluation of Seismic Resilience of Oil and Gas Pipelines in Service Crossing Active Faults

WANG Long<sup>1</sup>, LIU Aiwen<sup>1</sup>, JIA Xiaohui<sup>1,2</sup>, LI Xiangxiu<sup>1</sup>, WANG Xiaohui<sup>1</sup>

(1. *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

(2. *Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China*)

### Abstract

On the basis of summarizing the characteristics of seismic design specifications for pipelines in different periods, this paper analyzes the influencing factors of earthquake resilience evaluation for oil and gas pipelines in service. Four evaluation indexes of earthquake resilience, such as seismic design, corrosion of steel pipe, prevention and treatment of geological disaster and emergency treatment are determined through improving the Kent Hazard Index analysis method, the flow and method of seismic resilience evaluation for oil and gas pipelines in service crossing active fault are proposed, and the typical case analysis is carried out. It preliminarily verifies the scientific rationality of the proposed method, it provides a reference for seismic risk management of oil and gas pipeline.

**Keywords:** oil and gas pipeline; active fault; steel pipe corrosion; seismic resilience; KENT Hazard Index Analysis; Seismic design specification