

城市燃气管网的震害分析及减灾对策

周伟国, 张中秀, 孔令令

(同济大学 机械工程学院, 上海 201804)

摘要:通过分析地震对城市燃气管网的破坏作用及其引发的次生灾害,给出了燃气管网的震害特征和主要影响因素,包括地震动强度、场地条件、管道特性等。有针对性地提出了相应的抗震减灾对策,包括加强燃气工程设施的抗震设计,对燃气管网实施腐蚀监测和剔旧更新,设置燃气紧急自动切断系统与分区域供气,开展受损管网故障排查与恢复供气,建立地震实时监测和震害快速分析系统,制定能反映震后真实情景模式的应急响应预案,建立城市燃气管网震害风险评价和模拟仿真系统等。

关键词:燃气管网;燃气供应;震害;减灾对策;抗震;防灾

中图分类号:TU996.6 文献标志码:A 文章编号:1674-4764(2009)04-0070-06

Seismic Damage Analysis and Disaster Mitigation Approaches for Urban Gas Piping Systems

ZHOU Wei-guo, ZHANG Zhong-xiu, KONG Ling-ling

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, P. R. China)

Abstract: Based on the analysis of seismic damage effect and induced secondary disasters on urban gas piping systems, the seismic damage characteristics and influencing factors were discussed, such as seismic intensity, geologic conditions and piping system characteristics. Moreover a series of earthquake disaster mitigation approaches were proposed for urban gas piping system, including: (a) aseismic design of urban gas facilities; (b) erosion monitoring and replacement of old pipelines; (c) automatic gas shut-off system and district gas supply; (d) gas supply recovery after fault finding and treatment of damage pipelines; (e) establishment of real-time seismic data acquisition and rapid pipeline damage estimation system; (f) establishment of emergency response management system; (g) establishment of urban gas network seismic disaster risk assessment and simulation system.

Key words: gas piping systems; gas supply; earthquake effects; earthquake resistance; disaster prevention; disaster mitigation measures

中国是地震灾害多发国家之一,22 个省会城市和百万以上人口城市中的 2/3 均位于地震高风险区^[1]。燃气供应系统是现代城市生命线工程的重要组成部分。近年来,随着我国城市建设规模和人口密度的不断增大,燃气输配管网的布置日趋密集、复杂,一旦遭遇破坏性地震,管道破损导致的燃气泄露

可能引发火灾、爆炸等次生灾害,将对人们的生命和财产造成严重威胁,而国内对燃气管网的震害影响、风险评价和震后应急处置情景模式分析方面的研究相对不足。2008 年汶川“512”地震发生后,震害对燃气系统安全的影响问题得到了行业内专家和学者的一致重视。加强对震害规律的研究,有针对性地

收稿日期:2009-04-20

基金项目:国家教育部高等院校博士学科点专项基金项目(20050247010)

作者简介:周伟国(1961-),男,教授,博士生导师,主要从事城市燃气输配方面的研究,(E-mail)tjweigu@ sina.com。

采取一定的抗震减灾措施,对于保障城市安全具有重要意义。

1971年美国圣费尔南多(San Fernando)地震后,以日本和美国为代表的世界各国开始重视城市燃气管网震害方面的研究^[2]。日本东京煤气公司于1986年开始研究燃气管网的地震实时防灾系统,并于1994年投入使用,后推广到中国台湾地区,取得了较好的应用效果^[3-4]。Michael K L等介绍了美国地震导致的化学品、油品及天然气等危险品泄露引发的事故,并提出了完善危险品信息上报和风险评估制度、加强相关工程的抗震设计和制定合理的应急处置预案等减灾对策^[5]。Walter W C、Dharma H、郭恩栋、金康锡等人分别对燃气管道的震害特点,以及震害率与管材、管径、地震动强度、场地条件等因素的关系进行了研究^[4,6-8]。刘爱文对世界各国市政管道的抗震设计规范进行了综述,提出了管道应变设计和性能设计的抗震设计理念^[2]。姚保华等人研究了地震情况下城市生命线系统相互作用的机理,并提出了基于WebGIS的多生命线系统震后恢复辅助决策方法^[9]。Nakane H等人则对城市燃气管网的震害风险评价方法进行了研究,并对抗震措施实施的优先顺序给出了建议^[10]。

总的来看,目前城市燃气管网震害方面的研究主要集中在震害损失的事后统计描述和燃气系统的抗震设计方面,震害情景模式分析和应急处置策略方面的研究较少,对燃气系统震时灾情控制和震后功能恢复的指导作用有限。同时,城市燃气系统抗震减灾对策方面的现有研究过于零散,不利于形成全面、系统的解决方案和相应的课题研究体系。

文中在总结以往地震中燃气管网震害特征和现场处置经验的基础上,结合美国、日本等国和中国台湾地区在抗震减灾方面提出的一些技术方案和实践经验,分析了燃气输配管网的震害特征及其主要影响因素,从系统设计、管网维护、震时燃气系统响应与监控、灾情速报、故障排查、恢复供气、预案制定、震害风险评价与仿真等多个方面有针对性地提出了相应的抗震减灾对策和措施建议。

1 地震对燃气管网的破坏及其次生灾害

较大规模的地震一般都会造成城市燃气管网的破坏和失效,不仅正常的燃气供应难以维持,更重要的是燃气泄漏易引发火灾、爆炸等次生灾害。1994年美国北岭(Northridge)6.8级地震中,共有35处高中压管线破坏,717处低压管线破坏和15 021处用户端破坏,燃气泄漏直接导致大型火灾5起^[5]。

1995年日本阪神(Han-Shin)7.2级地震中,神户市(Kobe)高中压管线破坏106处,低压管线破坏26 459处,燃气泄漏直接引起的火灾有8起,供气系统的灾后重建历时85 d^[3]。1999年台湾集集(Ji-Ji)7.6级地震中,台中市燃气管网系统被破坏近千处,停供用户超过10万^[4]。2008年中国汶川8.0级地震中,崇州、绵阳等城市燃气供应一度中断,多处燃气管道遭到破坏,成都市、宝鸡市也有部分用户燃气供应中断。都江堰市地下燃气管网破裂10余处,需重建的城市地下燃气管道约50 km、庭院燃气管道约100 km,燃气系统经济损失近67 00万元。江油市燃气公司管网设施、办公设备等损失达1.2亿元。

2 燃气管网的震害特征与影响因素

2.1 燃气管网的震害破坏形式

地震对燃气管道破坏的机理可分为3类,即:构造性地运动引发的永久性地面变形,如地面上的上升与下陷、断层错动等;地震动引起的砂土液化、滑坡、不均匀沉降等场地破坏;地震波传播引发的土层波动变形。大量调查表明,对埋地管线破坏最严重的是断层引起的地表断裂,其次是砂土液化和不均匀沉降,强地面运动对管道的破坏则最为常见。

震后燃气管网的破坏形式主要包括接口破坏、管体破坏、管道附件以及管道与其它地下结构连接处破坏^[6-7]。其中接口破坏最为普遍,主要包括3通、弯头或承接口压扁、开裂、拉脱,法兰漏气、折断等;管体破坏包括管身弯曲、破裂、折断等。

2.2 燃气管网震害破坏的主要影响因素

通过相关理论研究、数据统计和灾后损失情况调查的结果来看,地震对燃气埋地管道的破坏作用受诸多因素的影响,主要包括:

1)管道的接口形式。同样条件下,橡胶圈柔性接头管道的抗震性能比刚性接头好得多。与焊接和机械接头相比,螺纹接口更易遭到破坏。

2)管道材质。延性、强度性能好的管材抗震性能好。钢质管道抗震性能明显好于铸铁管。采用热熔连接的聚乙烯管道和室内铜管也表现出了良好的抗震性能。

3)管道口径和壁厚。管道的刚度可抑制管道和周围土壤的变形,大口径管道由于强度较高,破坏率显著小于小口径管道。与场站设备和高、中压管线相比,低压管网破坏相对严重。

4)管道服役年限及腐蚀情况。管道服役年限越长,抗震性能越差。管道腐蚀严重时,由于壁厚减小引起的应力破坏易导致管体发生折断。

5) 场地条件。破坏易发生在不同地质、地形单元交界处或岩土条件变化较大、覆盖层厚、土软的地段,管道的破坏一般与管周土变形有关。建在基岩上的管道很少破坏,建在粗颗粒土壤中的管道破坏一般,而建在细颗粒土壤(如黏土、淤泥等)中的管道破坏较为严重。

6) 地震动强度。离震中越近或震级越大,地震动强度越高,管道破坏越严重。

在以上因素中,引起埋地管道破坏的主要影响因素是场地条件和地震动强度。在实际震害分析与评估工作中,应充分考虑各种因素的影响。

此外,地上燃气设施的破坏受附属建筑物的影响较大,如调压室垮塌、基础沉降造成阀门及管道等设施拉裂、损坏,居民建筑倒塌、变形造成立管和户内管变形、断裂,表具损坏等。

2.3 燃气管网的震害率

城市燃气管网的震害率一般用每 km 内的破坏处个数(处/km)表示。震害率与管道状况、场地条件、地震动强度等因素有关。

由于震后用气量减少和泄漏增加,使得依靠管网压力和流量判断管网受损情况难度较大。在管道状况、场地条件一定的条件下,可根据地震动强度初步判断各个区域内燃气管网的破坏情况,常用的分析参数包括地震动峰值速度、地震动峰值加速度、永久地面变形和波谱强度等^[8]。

3 城市燃气管网的抗震减灾对策

3.1 燃气系统工程的抗震设计

城市燃气系统工程的抗震设计是预防震害的首选措施。其中,被动抗震设计是指定性地降低地震对埋地管道的破坏,主动抗震设计是指确定能承受预期地震载荷(设计载荷)的物理参数,如抗震储备应力(应变)等。抗震设计包括采用必要的延性管道材料和柔性接头、桩基、回填土,确定适当的壁厚、管沟宽度、埋深等,同时应考虑增强场站建筑物、控制室及自控设备的抗震性能。为使重要管段与地面运动隔离,可考虑将管线套入大的通道中或对管道进行润滑处理。有条件的地区,可尝试采用共同沟的埋设方式。

中国现有的燃气管道抗震设计规范包括《GB 50032—2003 室外给水排水和燃气热力工程抗震设计规范》和《SY/T 0450—2004 输油(气)埋地钢质管道抗震设计规范》。抗震设防烈度 6 度以上地区的燃气工程必须进行抗震设计。当遭遇设防烈度的地震时,管道应能满足允许的最大极限变形状态,不致

泄漏;当遭遇高于设防烈度的罕遇地震时,构筑物不致严重损坏,管网震害不致引发严重次生灾害,便于抢修和迅速恢复使用。

为了使整个管网系统在震后维持必要的基本服务功能,需要使系统中的各条管道具备相应其重要性级别的性能可靠度。一条管道在整个系统中的作用越重要,则要求其性能可靠度越高^[2]。抗震设计规范只有在很好实施的前提下,才能发挥抗震减灾的作用,必须加强对规范实施的监控。

3.2 燃气管网的剔旧更新和腐蚀监测

很多城市燃气管道的服役年限已长达数十年,一些老管网没有经过抗震设计且老化严重,削弱了系统的抗震能力。对于地震多发区的燃气中低压管网,应制定可行的剔旧更新计划,采用耐腐蚀、抗震性能好的聚乙烯管道逐步替换超过服役年限甚至已有泄漏迹象的铸铁管道。

管道腐蚀程度的提高会大大降低其刚性和延性,地震中由于管道腐蚀导致的破坏较为普遍。应对钢管或铸铁管应经过严格的防腐处理,并加强对管道腐蚀程度的检测,有效壁厚达不到设计要求的,必须及时修补或更换。

3.3 燃气紧急自动切断系统与分区域供气

震后应及时切断震害严重区域的燃气供应,以免产生重大次生灾害。由于燃气管网覆盖面积较广,震时人群情绪恐慌,震后又常常面临交通瘫痪、通讯中断、人员短缺等问题,因此建立震时燃气自动切断系统是最合理的解决方案。用户端或楼栋前管道的自动切断可通过安装具有感震功能的智能燃气表实现(这部分由于量大,故成本高,但效果好);对具有高、中、低压级制的管网系统,一般在中压与低压管线间设置区域调压站,在区域调压站内安装地震强度传感器可控制低压管网紧急切断阀的自动关闭(区域调压站相对量少,一旦切断可确保一个区域的安全,可操作性强);对于主干管道和相应燃气设施的切断则由远程控制系统根据震害情况实施。此外,各燃气场站、居民小区、大型公建以及学校、医院等重要部门也应装设自动或遥控切断系统,防止燃气大规模泄漏。

在紧急情况下,可通过远程控制系统开启放散管排空管道内气体。同时,主干管网应能检测到燃气的大量泄漏,在管道破裂或断裂时能自动关闭切断阀,减少燃气泄漏。对不能实现自动或遥控切断的受损管段应由巡查人员手动切断。值得注意的是,停止供气的决策应在充分考虑地震规模、抗震条件、管网受损状况和抢修能力,对险情判断准确的基

础上进行,否则由于恢复供气的流程复杂,耗时较长,可能造成一定的被动局面。

在大量用户关停的情况下,要注意监视燃气管网的压力变化,防止长输管线及市内输配干网的超压爆管。如汶川地震后2 h,包括川化、攀成钢、成都煤气公司等30家用户由于管线、设备出现故障,或者因安全考虑紧急减、停产,每日减少用气量达400万 m^3 ,北干线、威青线、青彭线等5条输气干线压力持续上升,以青白江站为例,到12日22:00,压力已升至2.42 MPa,比正常运行压力高0.5 MPa,逼近最高节点控制压力2.5 MPa,爆管随时可能发生^[11]。

地震对城市功能的影响往往是区域性的,震后部分城区需要及时恢复供气,部分城区需要停气检修。依据不同压力管线间的连接点——调压站的布局,可以将整个供气区域划分为若干个子区域,使各子区域供气情况不受其他区域的影响。子区域的划分应考虑到燃气管网的分布状况、场地条件和燃气公司的应急抢修能力等因素,在区域边界处装设手动或自动切断阀。子区域的大小可依据实际情况确定,以保证因地震导致的局部影响最小为原则,即地震发生时根据管网受损情况适时切断相应子区域的供气,能在防止二次灾害发生的前提下尽量减小停气范围。同时,燃气管网应尽可能连成环状,以减小局部管道失效的影响。停气区域内居民对燃气的需求可通过临时提供LPG或二甲醚混合气瓶组、灶具、便携式LPG发电(热电联供)机组的方式解决,LPG可通过槽车运输。尽可能对集中居民安置点提供临时管道供气,特别是保障医院、学校、抗震抢险部门等重要公共服务部门的供气。

3.4 受损管网故障排查与恢复供气

震后应加强对城市燃气管网、设施的监控和巡查,密切注视主干管网的压力变化,及时、全面地掌握供气系统的失效、受损和泄漏情况。对于可能存在安全隐患的供气区域,应采取降低压力、增投加臭剂等措施,最大程度的保证供气安全。对有明显压降的管道,安排专业的抢修人员和必要的探测、抢修设备,根据各管段、用户的重要性及恢复重建的速度和成本确定的优先次序,对受损管段进行排查和修复。特别是地表发生永久变形的区域和有群众报险的区域,应重点巡查。

停止供气后的恢复供气工作是分区域进行的,一般应在查明管网受损、道路房屋损坏、设备材料调拨等状况的基础上,从受害较轻、修复时间较短、重要性较高的区域开始修复。供气恢复应遵循从高压

管线、中压管线、低压管线到用户端的顺序,逐一排查、检修和试压,在确定整个供气区域内无异常情况和安全隐患后,方可恢复供气。

3.5 实时地震监测与震害信息分析

地震发生后,应急指挥人员必须在最短时间内了解震害的地理分布和严重程度,有效地组织抗震减灾工作,确定能否继续正常供气或恢复供气。由于燃气管网的覆盖区域较大,震后各种情况复杂,条件恶劣,震害情况很难第一时间获得。因此应建立震时灾情速报、震害评估预测和辅助决策系统。

以日本东京煤气公司为例^[3,12],其开发的超密集实时地震监测系统SUPREME(SUPER-dense REal-time Monitoring of Earthquake)就是一个典型的实时地震监测与震害信息分析系统。该系统包括3800个波谱强度传感器,5台基岩地震仪和20台场地液化传感器,能在震后迅速将各区域的地震强度、管段流量、压力、切断阀动作情况等信息通过公用数据专线和无线电系统向指挥中心传递。GIS系统中存储了各子区域的土壤类型、场地特性、管网参数和用户分布等数据,SUPREME系统通过与GIS系统复合,可迅速估算出各供气区域管网的受损状况,为抗震决策提供依据。在1995年阪神地震和2004年新潟(Niigata)6.8级地震中,此类系统的应用起到了明显的减灾作用,引起了世界各国专家的重视。

在没有地震灾情速报系统的情况下,现场巡查和抢险人员可通过便携式通讯设备、影像设备和GPS定位设备,以无线传输的方式将管网受损信息返回应急指挥中心,并导入GIS系统和数据库系统,为及时决策提供有效信息。震后低压管道和用户端燃气设施的破坏概率相对较高且分布区域较广,仅靠专业人员巡查是不可能的,此时群众报告就成为震害信息获取的一个重要来源,因此应保障燃气抢险热线的畅通和及时处理。同时应通过传单、告示、电视、广播、宣传车、手机短信等媒体平台,向用户宣传燃气安全处置方式。

3.6 震后情景模式分析与应急预案制定

震后城市各生命线系统相互影响,对燃气管网抢险工作的开展有一定阻碍作用^[9]。如供电系统失效引起燃气控制系统断电失效、照明中断;供水系统失效导致消防用水紧张,水压不足,发电机组缺少冷却水,泄漏的水灌入失效燃气管道;交通系统瘫痪导致人员机械无法高效输送,燃气公司通往各站点的通勤中断,通往火灾现场的道路中断;通讯系统失效导致信息传递和通讯不便,燃气公司与用户之间的

联系被切断^[9,13];余震也给抢修工作带来麻烦。震后多处险情并发,指挥中心往往负荷较重,人员设备紧缺,影响到抗震减灾工作的正常进行。震后情景模式的预测若仅仅考虑燃气供应系统本身,结果会将震后情况简单化,不利于震后救灾工作的安排与实施。

地震灾害的不确定性较强,即使是最好的抗震措施也有可能面对罕见烈度地震的威胁,因此,做好应急预案显得尤为重要。燃气企业应加强抗震防灾的意识,结合企业建设和发展的实际情况,根据震害预估的结果制定合理可行的多级抗震防灾应急预案。同时应考虑重大灾难紧急处置的法制化,保证燃气事故的应急处理能够在震时获得较高的优先权,适当简化抢险中的各种行政审批手续,以免延误抗震减灾工作的及时进行。

3.7 震害风险评价系统和震害模拟仿真系统

地震灾害的特点是发生频率低,破坏性大,不确定性高,灾后情况复杂,开展震害风险评价和震害模拟仿真工作很有必要^[10,14-16]。

灾害的风险可表示为“风险=危险性×易损性/防灾减灾能力”。城市燃气管网震害风险评价的典型流程如图 1 所示。风险评价的主要目的是在保障震后城市燃气系统基本安全性能的基础上,使投资的成本收益达到最大化。通过对采取不同抗震防灾措施安全性和经济性的定量评价,有针对性地做出决策。保证在资源有限时,将主要资金和精力投入到最薄弱环节,防止短板效应的出现。风险评价的实践表明,采取预防性措施(如更换旧管等)不如制定合理的震后应急反应预案的成本效益更好。燃气公司可根据实际情况进行决策,既要保证系统的安全性,也要避免过量的投资浪费。

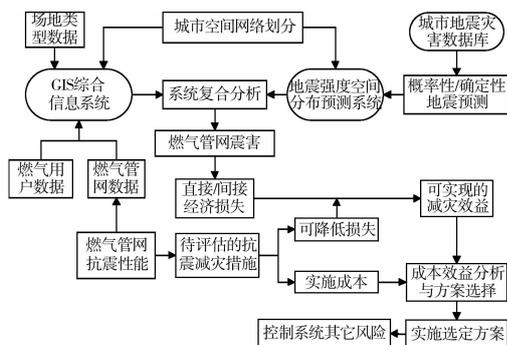


图 1 城市燃气管网震害风险评价流程

城市燃气管网震害模拟仿真系统通过对未来地震大小和空间地理分布的概率性预测和确定性预测,确定相应的地震动参数,结合 GIS 系统中的场地性质、管段参数等数据,分区域计算管网破坏情况及

由此导致的震害损失,找出易受震害区域和最危险区域,为制定工程计划和应急处置预案提供科学依据。

4 结 语

文中在总结以往地震震害特征和现场处置经验的基础上,分析了城市燃气管网的震害特点,并提出了全面、系统的城市燃气供应系统抗震减灾对策,得到以下结论:

1)城市燃气管网的地震破坏主要由地面永久变形、场地破坏和土层波动变形引起,管段接头处是易损环节,震害特征受地震动强度、场地土性质、管道特性等多种因素的影响。

2)加强燃气工程设施的抗震设计和实施,对老管网和腐蚀管段进行重点检查和及时更新是避免和减轻震害的重要手段。

3)通过自动控制和远程控制实现及时切断危险区域的燃气供应至关重要。合理划分供气区域和确定停气区域能最大程度地减少震害对燃气供应的影响。地震实时监测与震害分析系统可为燃气管网的抗震抢修工作提供基本信息参考。

4)正确分析震后的情景模式,制定合理的应急处置预案,建立城市燃气管网的震害风险评价和模拟仿真系统,可为防震工程和灾后应急管理的有效决策提供理论支持。

参考文献:

- [1] 陈颢,陈运泰,张国民,等. 十一五期间中国重大地震灾害预测预警和防治对策 [J]. 灾害学, 2005, 20(1): 1-13.
CHEN YONG, CHEN YUN-TAI, ZHANG GUO-MIN, et al. Forecast and early-warning and preparedness measures for great earthquake disasters in China during the period of the 11th five-year plan [J]. Journal of Catastrophology, 2005, 20(1): 1-13.
- [2] 刘爱文. 管道抗震设计规范有关地震作用的综述 [J]. 国际地震动态, 2007, 37(9): 29-35.
LIU AI-WEN. Discussion on the seismic input proposed by the different countries seismic codes of pipeline [J]. Recent Developments in World Seismology, 2007, 37(9): 29-35.
- [3] SHIMIZU Y, YAMAZAKI F, YASUDA S, et al. Development of real-time safety control system for urban gas supply network [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 5(2): 237-249.
- [4] WALTER W C, SHIH B J, CHEN Y C, et al. Seismic response of natural gas and water pipelines in the Ji-Ji

- earthquake [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(3): 1209-1214.
- [5] MICHAEL K L, RONALD W P. Identifying and managing conjoint threats: Earthquake-induced hazardous materials release in the US[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1996, 50(1): 31-46.
- [6] DHARMA W, DOUGLAS H, ALLEN M, et al. Seismic vulnerability assessment and retrofit of a major natural gas pipeline system: A case history [J]. *Earthquake Spectra*, 2005, 21(2):539-567.
- [7] 郭恩栋,刘如山,孙柏涛. 地下管线工程地震破坏等级划分标准[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(4): 86-90.
GUO EN-DONG, LIU RU-SHAN, SUN BAI-TAO. Gradation criterion of earthquake damage to buried pipeline engineering[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(4): 86-90.
- [8] 金康锡,任爱珠. 煤气管道的震害率分析[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(3):148-153.
KIM K S, REN AI-ZHU. Analysis of earthquake damage ratio of buried gas pipe [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2007, 16(3):148-153.
- [9] 姚保华,谢礼立,火恩杰. 研究地震情况下生命线系统相互作用的综合方法[J]. *地震学报*, 2004, 26(2):193-201.
YAO BAO-HUA, XIE LI-LI, HUO EN-JIE. A comprehensive study method for lifeline system interaction under seismic conditions [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2004, 26(2):193-201.
- [10] NAKANE H, NAKAYAMA W, NABANA K. Seismic risk analysis for city gas network in southern Kanto area[C]// *Proceedings of the 8th U. S. National Conference on Earthquake Engineering*, April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA: Paper No. 1228.
- [11] 何焱,钱浩. 汶川大地震后天然气调度应急思考[J]. *天然气工业*, 2008, 28(7):126-128.
HE YAN, QIAN HAO. Some ideas on how to take effective measures in natural gas distribution management after the serious earthquake occurred in Wenchuan[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 126-128.
- [12] YAMAZAKI F, MARUYAMA Y, YAMAUCHI A, et al. Seismic shutoff characteristics of intelligent gas meters for individual customers in Japan [C]// *Proceedings of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, August 3-5, 2006, Bangkok, Thailand, EASEC, c2006: 261-266.
- [13] TAKKAO A, BRUCE R E. Serviceability of earthquake-damaged water systems; Effects of electrical power availability and power backup systems on system vulnerability [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2008, 93(1):78-81.
- [14] 金江军,潘懋,徐岳仁. 城市地震灾害风险评估方法研究[J]. *西北地震学报*, 2007, 29(2):109-113.
JIN JIANG-JUN, PAN MAO, XU YUE-REN. Research on method of urban earthquake disaster risk assessment [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2007, 29(2):109-113.
- [15] FRENCH S P, MUTHUKUMAR S. Advanced technologies for earthquake risk inventories[J]. *Journal of Earthquake Engineering*. 2006, 10(2):207-236.
- [16] ANTONIONIA G, SPADONIA G, COZZANI V. A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147(1): 48-59.

(编辑 陈蓉)