杨立功,夏伟,纪文栋,等.燃气泄漏爆炸作用下基坑动力响应分析[J].地震工程学报,2020,42(4):989-995.doi:10.3969/j.issn. 1000-0844.2020.04.989

YANG Ligong, XIA Wei, JI Wendong, et al. Dynamic Response of Foundation Pits Subjected to Explosion Induced by Gas Leakage[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(4):989-995. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.989

燃气泄漏爆炸作用下基坑动力响应分析

杨立功1,夏 伟2,纪文栋1,曲树盛1,左殿军1

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究院,天津 300456; 2. 安徽省交通勘察设计院有限公司,安徽 合肥 230011)

摘要:为研究燃气泄漏爆炸对基坑的影响,采用 TNO 多能法对燃气泄漏爆炸荷载进行计算,然后 将爆炸冲击荷载作用于基坑周边一定范围内。首先假定不同开挖阶段燃气突然发生爆炸,然后通 过 ABAQUS 有限元软件对不同开挖阶段下的爆炸进行数值模拟,研究不同开挖阶段燃气泄漏爆 炸对基坑变形的影响。研究结果表明,每步开挖完后,爆炸荷载对基坑水平位移影响显著,而对坑 内土体回弹量影响不明显。另外,每步开挖完最后一道支撑尚未安装的情况下,爆炸荷载对基坑支 护结构的影响更为显著。

关键词:基坑开挖;燃气泄漏;爆炸
 中图分类号:U25
 文献标志码:A
 文章编号:1000-0844(2020)04-0989-08
 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.04.989

Dynamic Response of Foundation Pits Subjected to Explosion Induced by Gas Leakage

YANG Ligong¹, XIA Wei², JI Wendong¹, QU Shusheng¹, ZUO Dianjun¹

(1.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
 2. Anhui Traffic Survey and Design Institute Co. Ltd, Hefei 230011, Anhui, China)

Abstract: To study the explosive effect induced by gas leakage on the foundation pit, the TNO multi-energy method is used to calculate the explosive load of gas leakage. The explosive impact load was then applied on a certain range around the foundation pit. First, assuming that a sudden explosion of fuel gas occurred at different excavation stages, the numerical model was then established to simulate the explosion at different excavation stages with the finite element software ABAQUS. The effect of the explosive load on the deformation of the foundation pit at different excavation stages was studied. Results showed that the effect of explosive load on the horizontal displacement of the foundation pit is significant, while the effect on the rebound of the soil in the pit is not clear. In addition, if the last prop is not installed after the excavation, the effect of explosive load on the supporting structure of the pit will be more significant.

Keywords: excavation of foundation pit; gas leakage; explosion

收稿日期:2018-09-09

基金项目:交通运输部天津水运工程科学研究院科研创新基金(TKS180304)

第一作者简介:杨立功(1982-),男,河南信阳人,博士,主要从事结构与土的相互作用研究。E-mail:65481875@qq.com。

0 引言

城市地下管线密集,基坑开挖过程中一般需要 考虑对周边管线的影响,而一些天然气管线一旦出 现泄漏后果更为严重。因此,在基坑开挖过程中,不 仅需要分析并采取措施将开挖对管线影响降到最 低,在基坑周边有燃气管线的情况下,还需要对燃气 泄漏爆炸对基坑影响做进一步评估。

城市中一些燃气管线使用时间较长,管线局部 比较脆弱,一旦受到外部条件影响(如基坑开挖导致 管线发生较大变形),管线很可能发生开裂进而导致 燃气大量泄漏,当燃气在空气中的浓度达到一定极 限范围内且一旦条件合适就能产生燃烧爆炸^[1]。因 此,研究爆炸对基坑的影响具有一定的安全意义。

燃气泄漏对地面建筑的影响研究较多^[2-4],而对 地下结构影响方面的研究较少。燃气爆炸属于瞬时 冲击荷载,爆炸对基坑影响也属于基坑动力研究范 畴。目前,基坑动力方面的研究主要有基坑周边地 面车辆荷载对基坑影响的研究^[5-7]、基坑附近地铁运 行对基坑影响的研究^[8-9]及地震荷载作用下基坑动 力响应的研究^[10-12]等。因此,燃气泄漏爆炸对基坑 开挖影响的研究,将对基坑的安全评估和安全防护 都有一定的借鉴意义。

1 气体爆炸荷载的确定

1.1 泄漏量的确定

根据热力学、气体动力学等基础理论,确定气体 泄漏速率计算模型^[13]。计算泄漏前,首先需判断泄 漏气体的流动性质:

$$\frac{p_{0}}{p} \leqslant \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{1a}$$

$$\frac{p_{0}}{p} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{1b}$$

式中: p_0 为环境压强, P_{a} ;p为管道中的绝对压强, Pa; γ 为泄漏气体的绝热指数,即等压热容与等容热 容的比值,故: $\gamma = C_p/C_v$ 。通常,空气、氢气、氧气和 氮气的 γ 为1.4;水蒸气和油燃气的 γ 为1.33;甲烷、 过热蒸汽的 γ 为1.3。

公式(1a)成立时,属于声速流动;当公式(1b) 成立时,属于亚声速流动。对于声速流速,气体泄漏 量可以下式计算表示:

$$Q_{0} = C_{d}Ap \sqrt{\frac{M\gamma}{RT} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}$$
(2)

式中:Q。为泄漏速度,kg/s;M 为气体分子质量, kg/mol;R 为普适气体常数为 8.314 J/(mol K);C_d 为裂口形状系数,圆形取值 1.00,三角形取值 0.95; 长方形取值 0.90;A 为小孔面积,m²;T 为气体温 度,K。

对于亚声速流速,气体的泄漏量可以如下式计 算表示:

$$Q_{0} = YC_{d}Ap_{\sqrt{\frac{M\gamma}{RT}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}} (3)$$
$$Y = \left(\frac{p_{0}}{p}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_{0}}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{2}{\gamma-1}\right)\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\right]^{\frac{1}{2}}$$

(4)

1.2 爆炸荷载的计算

可燃气云爆炸荷载计算方法可按 TNO 多能法 进行^[14],TNO 多能法属典型的比例缩放爆炸预测 模型,该方法假设蒸汽云为半球形,中心点火,在基 于大量实验验证和数值模拟数据的基础上,获得一 组爆炸强度曲线^[15]。

应用多能法的过程中,首先需要选取适当的爆 炸强度等级,爆源强度为1~10之间的任一整数,代 表不同的爆炸强度,取值可参考文献[14]。在确定 爆炸强度等级后,根据比例距离 r'从爆炸波特征曲 线图中获取无量纲峰值超压 p_s'、无量纲正压持续时 间 t_p',从而计算爆炸波超压和持时。爆炸波动波形 根据爆炸强度等级,从爆炸波形图中进行确定。各 爆炸参数的计算方法如下。

$$r' = r \left(\frac{E}{p_{a}}\right)^{-\frac{1}{3}}, p_{s} = p'_{s} p_{a}, t_{p} = t'_{ps} \left(\frac{E}{p_{a}}\right)^{\frac{1}{3}} a_{a}^{-1} \qquad (5)$$

式中:r为目标点与爆源中心的实际距离,单位 m; E为可燃气云的爆炸能量,单位 J,可根据泄漏气体 的量和热值计算;a。为大气中的声速,取值为 340 m/s。

可燃性云团中的可燃物质量可以根据可燃物质 泄漏模式和扩散形式的不同,应用不同的模型计算 蒸气云可燃气体浓度及可燃物质的量。

天然气的爆炸极限约为5%~15%,其中最剧 烈的爆炸浓度约为9.5%,因此按照9.5%的浓度计 算泄漏天然气和空气的混合云团的体积,爆炸源半 径的计算可以按照将爆炸源等效于体积相等的半 球形。

2 数值模型的建立

利用 ABAQUS 有限元软件对基坑开挖过程

991

中燃气泄漏爆炸基坑变形影响进行分析。不考虑 地下水影响,建立二维土体与基坑模型,基坑支护 结构为地连墙,内部四道支撑,基坑宽 20.7 m,地 连墙深 34.2 m,基坑深 18 m,地连墙厚 0.8 m。第 一、二道混凝土支撑,梁高 1.2 m,第三、四道为钢 管支撑,管径 0.8 m。各道支撑距离坑顶高度分别 为1.39 m、5.51 m、9.31 m、14.06 m。考虑到爆炸 荷载为一次性的冲击荷载,土体振动为一次,因此 不考虑土体强度弱化的问题,采用静力本构模型进 行分析。模型中土体采用修正剑桥模型,模型参数 如表1所列。地连墙采用弹性本构模型,弹性模量 为 20 GPa, 内 支 撑 采 用 桁 架 单 元, 弹 性 模 量 为 2 GPa(支撑纵向间距 10 m,二维模型中对其刚度 进行弱化)。

Table 1 Madified cambridge model parament				es of soil	
	λ	M	κ	<i>e</i> ₀	ν
	0 102 6	0.680.8	0 011 4	0.811	0.3

表 1 十体修正剑桥模型参数

土体重度 19 kN/m³,静止侧压力系数 0.8,采 用隐式分析法,对土体施加 Rayleigh 阻尼,与质量 相关的阻尼系数取 0.4、与刚度相关的阻尼系数取 $0.01^{[8]}$

由于是对爆炸过程的动力模拟,为减少边界反 射,另外坑外土体表面需施加较大范围的爆炸荷载, 模型中土体模型的宽为基坑的21倍,高度为基坑的 10倍。模型中土体与地连墙采用硬接触,摩擦系数 为 0.2, 地连墙与第一、第二内支撑之间采用绑定连 接,与第三、第四道内支撑之间采用铰接。

考虑到爆炸时间的不确定性,模拟中分为8种 工况,前4种工况对应于每层土体开挖完、相应每道 支撑安装完成后:后4种工况对应于每层土体开挖 完、相应最后一道支撑尚未安装完成的情况。

数值模型如图1(开挖完成后的网格模型)、图2 所示(开挖完成后的加载模型)。燃气泄漏到空气中 才会产生爆炸,因此爆炸荷载施加在基坑边、土体表 面。爆炸荷载按照第2节中的方法,计算得爆炸强 度第7级的影响半径101 m,爆炸荷载100 kPa,对 应的时程如图 3 所示[15]。按照文献[15]方法,计算 爆炸荷载作用时间 0.06 s,为研究爆炸荷载作用之 后的基坑动力响应,计算时长取6s。在初始时刻, 爆炸荷载强度为峰值强度的 0.5 倍,0.02 s 达到 峰值。



基坑整体模型 图 1 The overall model of the foundation pit Fig 1



基坑局部模型 图 2





Fig.3 The time-histories of the explosion load

3 模拟结果与分析

对每一工况中基坑底部、地连墙顶部、支撑点的 动位移进行分析,如图4所示。



基坑开挖到第四步,有无支撑的坑底回弹量、第 四道支撑点的水平位移如图 5、图 6 所示。两种情 况下, 坑底回弹量基本相同, 约6.5 cm, 而第四道支



Fig.5 Resilience value at the bottom of foundation pit during the excavation

撑点的水平位移不同,无支撑时支撑点的水平位移约 2.5 cm,有支撑时,其位移约 1.7 cm(位移负值表示位移指向坑内,下同)。

爆炸峰值荷载作用下,有、无第四道支撑情况下 基坑变形如图7所示(云图中变形放大50倍)。爆 炸冲击荷载作用下,基坑整体有少量的水平位移



(a) 有第四道支撑



(图中右侧水平位移绝对值大于左侧),基坑主要水 平变形为两侧地连墙在冲击荷载作用下产生的对折 变形。右侧基坑顶部作用有爆炸冲击荷载,爆炸冲 击荷载作用瞬间,右侧地地连墙产生变形,并通过内 支撑传递至左侧地连墙,在左侧土体约束下,左侧地 连墙产生与右侧地连墙相反的变形。



(b) 无第四道支撑

图 7 峰值爆炸荷载作用下基坑水平变形

Fig.7 The horizontal displacement of the foundation pit under peak explosive load

有第四道支撑情况下,地连墙最大变形发生在 第四道支撑点附近,无第四道支撑情况下,地连墙最 大变形发生在基坑底部附近。有支撑时,地连墙变 形及弯折度均小于无支撑情况。

有、无第四道支撑时,爆炸峰值荷载作用下,基 坑及支护结构竖向变形相差较小,主要差别在基坑 底部土体。无支撑情况下,坑底土体回弹量略大于 有支撑情况。

第一至第四步开挖完,在燃气爆炸荷载作用下, 第一道支撑点的水平位移、坑底回弹位移如图 9~ 16 所示。图中动位移为工况结束后爆炸荷载作用 下的动位移减去相应初始位移。

图 9~16 中可以看出,各步开挖完后,有无支撑 的情况下,坑底回弹量基坑相同,无支撑的情况下, 坑底回弹量略大于有支撑的情况。坑底回弹量的振 动幅值在±5 mm 范围内变化,其中向下的动位移 幅值略大于向上的动位移幅值。爆炸荷载作用瞬 间,坑外土体产生竖向及水平向冲量,竖向冲量作用 下,坑内外土体、地连墙及支撑体系整体产生竖向位 移,坑外土体水平冲量挤压基坑、地连墙及坑内支撑 体系,整个基坑产生瞬时旋转。整体上,基坑结构及 坑内外土体以竖向冲量为主,坑底土体回弹量的振











图 10 第一步开挖爆炸荷载作用下 A 点竖向位移 Fig.10 The vertical displacement of the piont A under explosive load after the first excavation

动幅值几乎在工况结束后的位置对称振动。爆炸荷载作用结束后,由于土体有阻尼,振动能量不断耗散,整体振动逐渐衰减,最后趋近于零。



图 11 第二步开挖爆炸荷载作用下 C 点水平位移 Fig.11 The horizontal displacement of the piont C under explosive load after the second excavation



图 12 第二步开挖爆炸荷载作用下 A 点竖向位移 Fig.12 The vertical displacement of the piont A under explosive load after the second excavation

无支撑的情况下,各步开挖完后,最后一道支撑点的 水平振动位移大于有支撑的情况。尤其是在爆炸荷 载作用瞬间,无支撑时最后一道支撑点的水平位移



图 13 第三步开挖爆炸荷载作用下 D 点水平位移 Fig.13 The horizontal displacement of the piont D under explosive load after the third excavation







图 15 第四步开挖爆炸荷载作用下E点水平位移 Fig.15 The horizontal displacement of the piont E under explosive load after the fourth excavation



图 16 第四步开挖爆炸荷载作用下 A 点竖向位移 Fig.16 The vertical displacement of the piont A under explosive load after the fourth excavation

远大于有支撑情况。随着爆炸荷载作用结束,有无 支撑的最后一道支撑点水平位移迅速趋于一致。另 外,随开挖深度增加,每步开挖最后一道支撑点的水 平振动位移在减小。有支撑情况下,向基坑方向的 最大振动位移最后稳定在 4.5 mm 左右;无最后一 道支撑情况下,向基坑方向最后一道支撑点水平振 动位移最大值约 6 mm。

随着开挖加深,爆炸荷载对基坑深层的影响逐 渐减弱。水平方向上,随着开挖加深,爆炸冲击荷载 在土体深处的瞬时冲量逐渐减小,由竖向冲量造成 的瞬时附加应力也在减小,从而产生的水平侧压力 减小,地连墙振动位移减小。竖向上,基坑底部的回 弹振动位移主要受地基土层、基坑结构整体刚度影 响,因此回弹振动位移变化较小。

无支撑时的坑底回弹量、相应工况下最后一道 支撑点的水平峰值位移量与有支撑情况的比值如图 17 所示。图中可以看出,每一工况的最后一道支撑 点水平峰值位移量比值随开挖深度增加迅速降低, 最后趋于 1.3 左右。而坑底回弹量比值变化很小, 基本上为 1.0。随着开挖加深,爆炸荷载在土体中产 生的瞬时附加应力也逐渐减小,将地连墙看作弹性 地基梁,支撑体系与坑内土体对地连墙的支撑作用 随开挖深度增加,有无最后一道支撑情况下的整体 弹性地基梁的刚度差别逐渐减小。而坑内土体回弹 振动位移受整体竖向冲量作用,有无最后一道支撑, 基坑结构及坑内外土体整体刚度相差较小,坑底回 弹振动位移相差也较小。

4 结论

通过对基坑分步开挖及开挖完后坑外土体受燃

气爆炸荷载作用下每步开挖有无最后一道支撑情况 下基坑位移的数值模拟,得出以下结论:



Fig.17 The ratio of the peak displacement

(1)爆炸荷载等级及基坑结构形式、地基土层 一定的情况下,爆炸荷载对基坑水平冲击作用随深 度增加逐渐减弱。坑内土体回弹振动位移与基坑结 构、地基土层的整体刚度有关,而与开挖深度关系较 小,随开挖加深,坑内土体振动位移变化不大。

(2)每步开挖完,相对有支撑的情况,没有相应 最后一道支撑的情况下,爆炸荷载作用对基坑水平 位移影响较为显著,而对基坑回弹量的影响不明显。

(3)虽然在爆炸荷载作用下,基坑支护结构的 位移在每一工况结束后的基础上对称振动,但考虑 工况结束后的静位移,支护结构的位移量会有大幅 增加,尤其是在每步开挖完最后一道支撑尚未安装 完成的情况。

参考文献(References)

- [1] 田贯三,李兴泉.城镇燃气爆炸极限影响因素与计算误差的分析[J].中国安全科学学报,2002,12(6):48-51.
 TIAN Guansan,LI Xingquan.Analysis and Estimate of the Explosive Limit of Town Gas[J].China Safety Science Journal, 2002,12(6):48-51.
- [2] 张秀华,张春巍,段忠东.爆炸荷载作用下钢框架柱冲击响应与 破坏模式的数值模拟[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009,25(4):656-662.

ZHANG Xiuhua, ZHANG Chunwei, DUAN Zhongdong. Numerical Simulation on Impact Responses and Failure Modes of Steel Frame Structural Columns Subject to Blast Loads [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University Natural Science, 2009, 25(4):656-662.

[3] CHEN H, LIEW J Y. Explosion and Fire Analysis of Steel Frames Using Mixed Element Approach[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(6):606-616.

- [4] LIEW J Y R, CHEN H. Explosion and Fire Analysis of Steel Frames Using Fiber Element Approach [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(7):991-1000.
- [5] 刘素锦,郭明伟,李兆源,等.浅析车辆荷载对深基坑支护结构 的影响[J].地下空间与工程学报,2009,5(1):105-107,157. LIU Sujin, GUO Mingwei, LI Zhaoyuan, et al. Discussion on the Influences of Vehicle Loads on Supporting Structure of Deep Foundation Pit[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2009,5(1):105-107,157.
- [6] 陈梅,郑坚昭,莫玮宏,等.车辆超载作用下软弱基坑变形特性研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):539-546,565. CHEN Mei,ZHENG Jianzhao,MO Weihong, et al.Research on Deformation of Foundation Pit in Soft Clay under Vehicle Overloads[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2014,10(3):539-546,565.
- [7] 张向东,张晨光,刘家顺.交通荷载作用下深基坑支护结构稳定 性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2011,22(2):125-129.
 ZHANG Xiangdong,ZHANG Chenguang,LIU Jiashun. Analysis on Stability of Deep Foundation Pit Supporting Structure under Traffic Loads [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2011,22(2):125-129.
- [8] 毕湘利,周顺华.列车振动荷载对邻近深基坑的既有站变形影响[J].同济大学学报(自然科学版),2004,32(12):1599-1602.
 BI Xiangli, ZHOU Shunhua. Analysis on Deformation of Old Metro Station Close to Deep Excavation by Vehicle Dynamic Load[J].Journal of Tongji University (Natural Science),2004, 32(12):1599-1602.
- [9] 高伟君,姚燕明,蔚俊霞.列车荷载对平行换乘地铁车站深基坑 变形影响[J].岩土力学,2004,25(z2):375-378,382.
 GAO Weijun,YAO Yanming,WEI Junxia.Study on Deep Deformation of Parallel Transfer Metro Stationcaused by Vehicle Load[J].Rock and Soil Mechanics.2004.25(z2):375-378,382.
- [10] GREEN R A, OLGUN C G, CAMERON W I.Response and Modeling of Cantilever Retaining Walls Subjected to Seismic Motions[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2008, 23(4): 309-322.
- [11] 王颖轶,顾利军,黄醒春.地震荷载作用下基坑支护体系稳定 性分析[J].上海交通大学学报,2011,45(S1):21-26.
 WANG Yingyi,GU Lijun,HUANG Xingchun.Stability Analysis of Foundation Pit Support System on Earthquake Action
 [J].Journal of Shanghai Jiao Tong University,2011,45(S1): 21-26.
- [12] 刘鹏飞,徐明.基坑对场地地震响应影响的数值分析[J].地震 工程学报,2016,38(1):116-119,128.
 LIU Pengfei,XU Ming.Numerical Analysis of the Influence of Deep Excavation on the Seismic Response of a Site[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(1):116-119,128.
- [13] 王新月,杨清真.热力学与气体动力学基础[M].西安:西北工 业大学出版社,2004.

WANG Xinyue, YANG Qingzhen. The Basis of the Thermodynamics and Pneumodynamics[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2004. (下转第 1006 页) Section with the Consideration of Tunneling Elevation on the Slope[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2018, 38(3): 152-161.

- [20] 陶连金,侯森,赵旭,等.不同仰坡度数的山岭隧道洞口段动力 响应振动台试验研究[J].岩土力学,2014,35(增刊1):91-98. TAO Lianjin,HOU Sen,ZHAO Xu,et al.Large-scale Shaking Table Test for Dynamic Response in Portal Section of Mountain Tunnel with Different Gradients of Upward Slope[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(Supp1):91-98.
- [21] 吴冬,高波,申玉生,等.隧道仰坡地震动力响应特性振动台模型试验研究[J].岩土力学,2014,35(7):1921-1928.
 WU Dong, GAO Bo, SHEN Yusheng, et al. Shaking Table Test Study of Seismic Dynamic Response of Tunnel Entrance Slope[J].Rock and Soil Mechanics,2014,35(7):1921-1928.
- [22] 高峰,石玉成,严松宏,等.隧道洞口段的抗震设防长度[J].中 国公路学报,2006,19(3):65-69.

GAO Feng, SHI Yucheng, YAN Songhong, et al. Anti-seismic Fortified Length in Tunnel Outlet[J].China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3):65-69.

- 【23】 张晋东,梁庆国,蒲建军,等.不同进洞高程黄土隧道洞口段振动台模型试验研究[J].公路交通科技,2018,35(7):77-85.
 ZHANG Jindong, LIANG Qingguo, PU Jianjun, et al. Experimental Study on Shaking Table Model of Portal Section of Loess Tunnel with Different Tunneling Elevations[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018,35(7):77-85.
- [24] 梁庆国,边磊,张钦鹏,等.大断面黄土隧道洞口段地震动力特 性研究[J].公路交通科技,2018,35(7):65-76.
 LIANG Qingguo,BIAN Lei,ZHANG Qinpeng, et al.Study on Seismic Dynamic Characteristics of Large Section Loess Tunnel Portal[J].Journal of Highway and Transportation Research and Development,2018,35(7):65-76.

(上接第 995 页)

[14] 赵文芳.TNO多能法在蒸气云爆炸后果预测中的应用研究 [J].安全、健康和环境,2014,14(10):15-18.

> ZHAO Wenfang.Study on the Application of TNO Multienergy Method[J].Safety Health & Environment,2014,14(10):

15-18.

[15] C.J.H. van den Bosch, R.A.P. MWeterings. Methods for the calculation of physical effects-'Yellow Book', CPR 14E.Environmental Toxicology & Chemistry, 1997, 4(5):587-593.