

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.024

城市管廊燃气爆炸动态响应的数值模拟研究^{*}

邓成云¹,崔海龙¹,钟冬望²,李腾飞²,王燕红¹,何理²,司剑峰²

(1. 中冶京诚工程技术有限公司,北京 100176;

2. 武汉科技大学 冶金工业过程系统科学湖北省重点实验室,武汉 430065)

摘 要: 为更好的进行城市管廊结构抗爆优化设计,深入研究管廊燃气爆炸动态响应特性极为必要。利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,建立管廊结构的有限元计算模型,采用等效内能法模拟燃气爆炸荷载,研究燃气爆炸激发冲击波传播衰减规律及其对管廊结构的动态响应规律,分析管廊结构破坏和反应特征。结果表明:燃气爆炸冲击波随传播距离的增加,峰值压力逐渐降低,同时超压持续时间逐渐变短。冲击波在受限空间壁面的反射叠加造成其峰值压力在传播后期呈现略微增加趋势,但整体上以多项式形式衰减。爆炸损伤部位主要集中在燃气仓墙角或结构突变位置,燃气仓顶部设置泄压口,可有效避免上部通行仓混凝土的损伤破坏效应。管廊结构墙角处刚度较大导致其振动响应程度较弱,而墙面中部区域节点振动合速度可达到 0.4 m/s。满仓燃气爆炸工况下,管廊结构局部混凝土产生贯穿裂纹,但并未出现整体结构性损坏。

关键词: 城市管廊;燃气爆炸;数值模拟;动态响应;爆炸损伤

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0159-07

Numerical Simulation of Dynamic Response for Gas Explosion in Urban Pipe Gallery

DENG Cheng-yun¹, CUI Hai-long¹, ZHONG Dong-wang², LI Teng-fei²,
WANG Yan-hong¹, HE Li², SI Jian-feng²

(1. Capital Engineering & Research Incorporation Limited, Beijing 100176, China;

2. Hubei Province Key Laboratory of Systems Science in Metallurgical Process,
Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: In order to better optimize the anti-explosion design of urban pipe gallery structure, it is very necessary to study the dynamic response characteristics of gas explosion of pipe gallery. Using the finite element software ANSYS/LS-DYNA, the finite element calculation model of the pipe gallery structure was established, and the equivalent internal energy method was used to simulate the gas explosion loading. Based on this model, the failure and response characteristics of the pipe gallery structure were analyzed by studying the propagation attenuation law of shock wave excited by gas explosion and its dynamic influence on the pipe gallery structure. The results show that the peak pressure of gas explosion shock wave decreases gradually with the increase of propagation distance, and the duration of overpressure becomes shorter at the same time. The reflection and superposition of the shock wave on the wall of confined space cause the peak pressure to increase slightly in the later stage of propagation, but the whole attenuation is in a polynomial form. The explosion damage is mainly concentrated in the corner of the gas warehouse or the position where the structure changes suddenly. The pressure relief port is set on the top of the gas warehouse, which can effectively avoid the damage effect of the concrete in the upper passage warehouse. The higher stiffness of the corner of the pipe gallery leads to a weaker vibration response, while the resultant vibration velocity in the middle of the wall can reach 0.4 m/s. Under the condition of full warehouse gas explosion, the local concrete of pipe gallery structure has through-wall cracks, but there is no overall structural damage.

Key words: urban pipe gallery; gas explosion; numerical simulation; dynamic response; explosion damage

城市地下综合管廊内部存在天然气、电气、热力等多种管线,一旦发生火灾和爆炸事故,会直接造成人员伤亡、交通阻塞、电力信息中断等危机事故,极大威胁人们生命财产安全,同时也会对社会秩序的稳定和经济的发展造成巨大影响。因此,针对城市综合管廊燃气仓在燃气爆炸或意外爆炸荷载作用下的结构动力响应特性、损伤破坏机理及其抗爆防振研究极为必要。现阶段,很多学者从不同角度开展了系列数值与试验研究,邓小娇等人通过 ICEM 分析软件建立二维天然气扩散物理模型^[1],研究得出天然气的扩散速度与初始喷射速度有关,天然气的爆炸移动速度与管廊内压力成正比。刘中究等人基于地下管廊结构的防爆、抗爆性能,建立燃气爆炸载荷下管廊三维计算模型^[2],研究综合管廊燃气爆炸的动力响应,分析了超压峰值在 0.2~0.7 MPa 时管廊结构的破坏程度。周心权等研究了在密闭管廊空间条件下混合燃气发生爆炸后影响火焰传播的主要原因^[3],并且建立了燃气与空气混合气体发生爆炸时的数值模型,阐明了影响混合气体爆炸特性的主要因素。芦建兵利用 Hypermesh 建立几何模型^[4],研究得出了燃气舱内冲击波的传播规律,并通过超压时程曲线与位移时程曲线,分析了爆炸后的变化规律,观察了管廊结构的破坏特点。陈泂针对燃气爆炸事故实例^[5],运用 SAP2000 通过模拟计算,得到了燃气爆炸的峰值压力及其对结构的形变位移和破坏程度的影响规律。张娥通过试验研究,得到了氢气浓度对甲烷最大爆炸压力的影响规律^[6],测定了不同初始条件下 CH₄ 的爆炸温度和爆炸压力。吴燕燕通过数值模拟研究了燃气爆炸地下综合管廊燃气动力响应规律^[7],验证了流固耦合方法模拟管廊燃气爆炸动态响应的可靠性。张扬分析测试了 6 种不同混合燃气的爆炸效果^[8],并且建立了整体式管廊爆炸模型,确定了 CH₄ 爆炸压力的最佳理论浓度。刘慧慧模拟了混合气体在不同爆炸环境种的爆炸过程^[9],得到了火焰传播速度以及冲击波的传播规律,指出了混有 H₂ 的 CH₄ 气体爆炸威力更大。汤晓瑜等人采用 CFD 分析软件模拟燃气泄漏过程^[10],得出了在不同时刻燃气泄漏的浓度值。孙加

超等人借助有限元分析软件^[11],模拟了不同炸药量对燃气舱的破坏规律,探讨了舱内超压与质点位移的变化规律。刘希亮等人对管廊内燃气爆炸作用下不同抗爆结构性能进行了研究^[12],建议通过敷设泡沫铝夹芯结构降低廊体结构的损伤。可见,通过对管廊燃气爆炸动力响应特性进行深入系统分析研究,可为更好的进行城市管廊结构抗爆优化设计提供重要理论支撑。

以管廊燃气爆炸相似模型试验为原型,应用动力有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立管廊结构三维数值计算模型,采用等效内能法将气体爆炸荷载直接作用于管廊燃气仓内壁上,研究燃气爆炸激发冲击波传播衰减规律及其对管廊结构动态响应的影响规律,分析管廊在爆炸荷载作用下的破坏和反应特征,以期在城市综合管廊和附属结构重点部位的抗爆结构进行优化设计提供理论依据。

1 有限元模型建立

1.1 模型尺寸

该典型管廊模型长 4 m,分上下两层,下部包含 1 m 宽燃气仓和 0.5 m 宽电力仓,高均为 1.4 m,上部通行仓宽 1.5 m,高 0.5 m,除燃气仓与电力仓间隔墙壁厚为 0.15 m 外,其余壁厚均为 0.2 m。在通行仓顶部预制 0.4 m×0.4 m×0.05 m 的混凝土顶盖,在燃气仓顶部预留 0.4 m×0.4 m×0.2 m 的泄压口(人行通道),并在燃气仓顶部按设计要求预制 2 个直径为 3~5 cm 的圆孔,模型示意如图 1、图 2 所示。

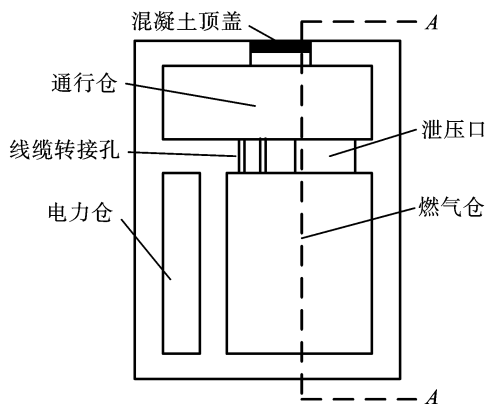


图 1 管廊模型横断面示意图

Fig. 1 Cross section of the pipe gallery model

管廊结构材料采用 C40 混凝土,下部燃气仓标准断面配筋见图 3 所示。

收稿日期:2021-04-23

作者简介:邓成云(1980-),男,高级工程师,主要从事燃气及管廊工程相关研究,(E-mail)1696321532@qq.com。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题《城市地下综合管廊规划建设与安全运维》(2016YFC0802405)

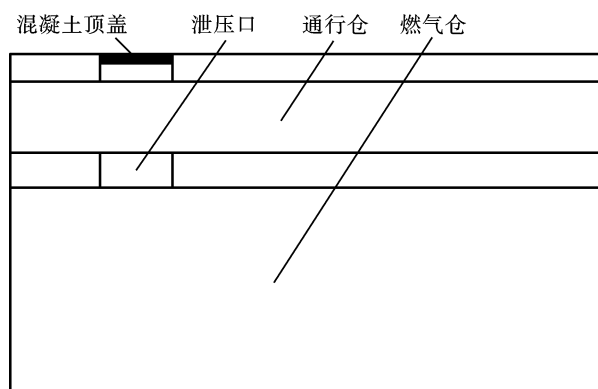


图2 管廊模型 A-A 剖面示意图

Fig. 2 Section A-A of the pipe gallery model

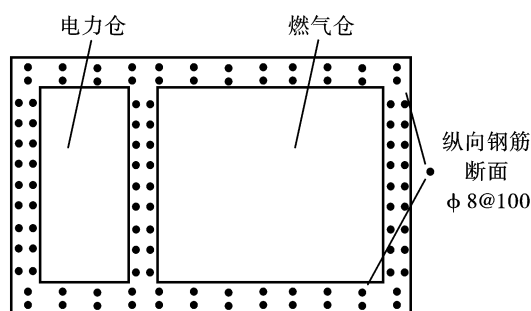


图3 燃气仓断面配筋图

Fig. 3 Cross section reinforcement drawing of the Gas storage warehouse

1.2 数值模型构建

采用 ANSYS 建立数值计算模型,模型分为如下几个部分:外层土体、管廊混凝土模型、钢筋模型、基于 SALE 法构建的甲烷及空气模型。绿色部分为外层土体,红色部分为管廊混凝土。依据现场满仓燃气爆炸试验条件构件模型(由于现场试验中燃气仓两端的木板仅是为充满燃气提供密封环境,模拟燃气爆炸效应时其密封强度可忽略不计,因此在建模时未考虑燃气仓两端密封情况),管廊混凝土、钢筋及外层土体计算模型如图4所示。

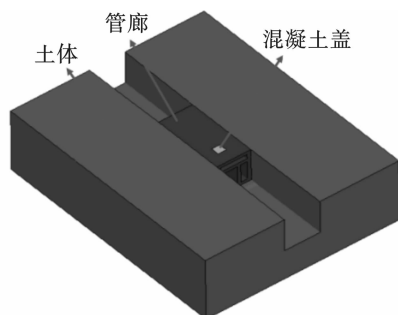


图4 管廊混凝土、钢筋及土体计算模型

Fig. 4 Calculation model of concrete, reinforcement and soil

基于 LS-DYNA 构建的甲烷及空气模型如图5

所示。其中,蓝色部分为满仓的甲烷及空气混合物,红色部分为空气。

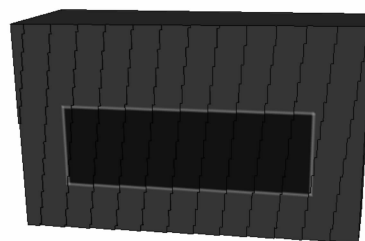


图5 甲烷及空气计算模型

Fig. 5 Calculation model of methane gas and air

对模型进行网格划分,共计得到 1388261 个有限元单元。见图6。

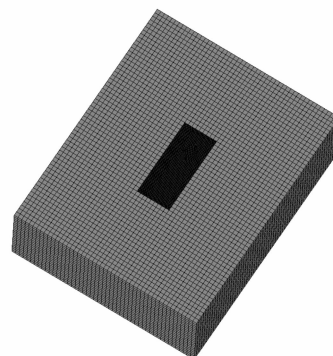


图6 有限元计算模型

Fig. 6 Finite element calculation model

1.3 材料本构模型及参数

可燃气体为甲烷-空气混合气体,其本构模型采用 LS-DYNA 中的 * MAT_NULL, 状态方程为 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL^[13]。空气的本构模型与状态方程和可燃气体相同,状态方程见式(1),状态方程参数见表1。

$$p = (C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3) + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (1)$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 均为常数; E_0 为单位体积初始内能; $\mu = 1/(V-1)$, 其中 V 表示相对体积。

混凝土结构采用 LS-DYNA 中 RHT 模型,能较好地模拟混凝土材料在爆炸冲击荷载作用下的动力特性^[14,15],RHT 模型可以进行参数自动生成,只需要定义密度,剪切模量,抗压强度以及单位制,混凝土材料参数如表2所示。

钢筋采用随动强化 * Mat-Plastic-Kinematic 材料模型和 Von-Mises 屈服准则,该模型适用于模拟各向同性和动力塑性硬化材料。由于整个爆炸冲击过程瞬间完成,按 Cowper-Symonds 方式考虑应变率

效应对屈服强度的影响^[16]。钢筋材料参数取值见表 3。

表 1 状态方程参数

Table 1 Parameters of state equation

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_0/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	V
空气	1.234×10^{-3}	-1×10^5	0	0	0	0.4	0	0	250	1.0
甲烷-空气	1.293×10^{-3}	0	0	0	0	0.274	0.274	0	1.8×10^6	1.0

表 2 混凝土材料参数

Table 2 Material parameter of concrete

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E_{PSF}	B_1	A	F_c/MPa	f_t'	B	e_0^c	e_c
2314	2	1.22	1.6	35	0.1	0.0105	$3\text{E}-11$	$3\text{E}22$
β_c	P_{TF}	g_t	D_1	$E_f^{\min}$	N_f	A_2/GPa	P_{el}/GPa	N_p
$3.2\text{E}-2$	0.001	0.7	0.04	0.001	0.61	39.58	0.023	3.0
G/GPa	B_0	T_1/GPa	N	f_c	Q_0	T_2	e_0^t	e_t
16.7	1.22	35.27	0.61	0.18	0.6805	0	$3\text{E}-12$	$3\text{E}22$
β_t	g_c	X_t	D_2	A_f	A_1/GPa	A_3/GPa	P_{comp}/GPa	α_0
$3.6\text{E}-2$	0.53	0.5	1.0	1.6	35.27	9.04	6	1.188

表 3 钢筋材料参数

Table 3 Material parameter of reinforcement

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/GPa	μ	f_y/MPa	β	n	m	G/MPa	ε
7800	200	0.3	235	1.6	40	5	1000	0.12

本模型采用耦合的罚函数法选项 * CON-STRAINED_BEAM_IN_SOLID_PENALTY 设置钢筋与混凝土的接触,以解决应变梯度大而产生动能丢失的问题,钢筋使用 Beam 单元,混凝土使用 Solid 单元,在梁和固体间构造弹簧,它们之间的相对运动造成弹簧拉伸,动能转化为弹性能储存在弹簧中并最终释放,达到既保持能量平衡,又达成运动一致的目的。

2 计算结果与分析

2.1 冲击波衰减规律分析

在满仓工况下,下部燃气仓充满了甲烷-空气混合气体,数值计算时采用的是等效内能法,故下部燃气仓燃气爆炸冲击波传播过程不明显,因此主要考察上部通行仓空气冲击波传播规律。在上部通行仓等间距均匀布设 6 个压力曲线记录点(从泄压口正上方由近及远,记录点间隔 0.5 m),如图 7 所示。

计算得到上部通行仓各记录点压力时程曲线如图 8 所示。

从图 8 各记录点的超压时程曲线及超压峰值可以看出,管廊压力传播存在一个爆炸冲击波逐层依次向外传播的过程,测点距下部燃气仓泄压出口由近到

远冲击波最大峰值存下降趋势。距泄压出口由近及远各测点超压持续时间逐渐变短,后续的脉动波峰为混合气体的爆炸产物继续膨胀做功所产生。

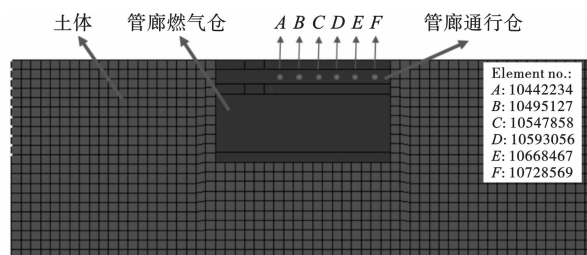


图 7 管廊内各压力曲线记录点的位置

Fig. 7 Location of recording points in pipe gallery

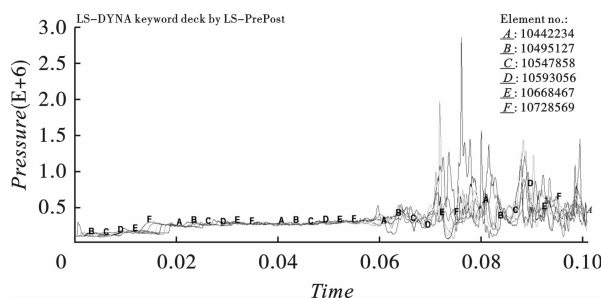


图 8 各记录点压力时程曲线

Fig. 8 Pressure time history curve of each recording point

上部通行仓内燃气爆炸冲击波超压值随传播距离的变化关系如图9所示。

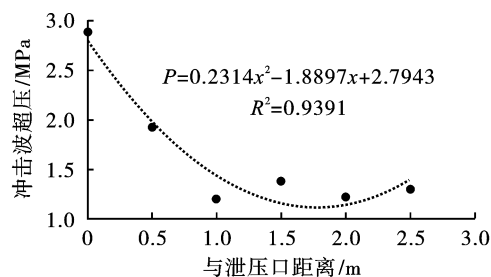


图9 冲击波超压值随传播距离的变化关系

Fig. 9 The relationship between the overpressure value of shock wave and the distance of propagation

由图9可以看出,上部通行仓冲击波最大峰值压力为2.88 MPa,位于泄压口正上方,随传播距离的增加,冲击波超压值逐渐降低,并且其衰减速度逐渐变缓。当冲击波传播到距离泄压口2.5 m处,其超压值大于距离泄压口2 m处的超压值,分析其原因主要是由于冲击波在受限空间壁面反射叠加造成的。燃气爆炸冲击波峰值压力在通行仓内近似以多项式形式衰减,得到冲击波超压值与传播距离的拟合方程为

$$p = 0.5314x^2 - 1.8897x + 2.7943 \quad (2)$$

2.2 管廊混凝土损伤情况分析

图10为不同时刻管廊混凝土损伤演化云图。

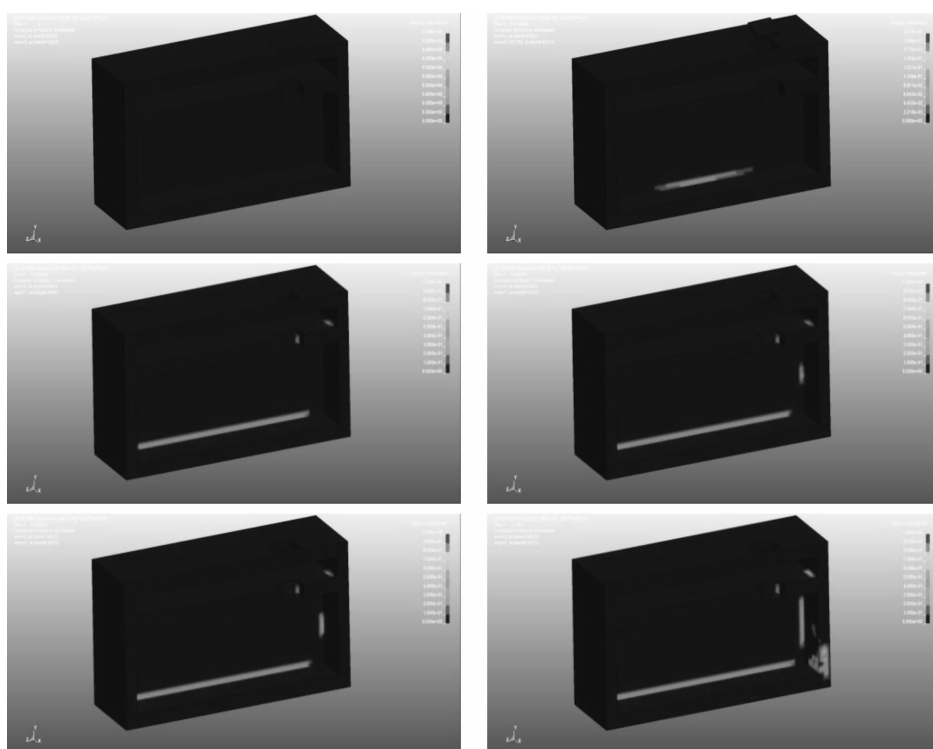


图10 管廊混凝土损伤演化云图

Fig. 10 Evolution nephogram of concrete damage of pipe gallery

由图10可以看出满仓燃气爆炸工况下,随着燃气爆炸化学反应过程逐步完成,管廊混凝土结构损伤区域范围逐渐增大,且损伤部位主要集中在墙角或结构出现形状突变等位置。由于上部通行仓与下部燃气仓通过泄压口贯通,燃气爆炸激发能量从泄压口输出时其压力水平及破坏效应均显著降低,因此上部通行仓几乎未出现明显混凝土损伤破坏区域。

选取管廊墙角处典型混凝土损伤单元,如图11所示。

得到该典型混凝土单元损伤变化曲线如图12所示,压力时程曲线如图13所示。



图11 管廊混凝土典型损伤单元

Fig. 11 Typical damage element of pipe gallery

结合图12和图13可以看出,当燃气爆炸至0.1 s时,该混凝土单元损伤达到1,混凝土完全丧失抵抗破坏能力,此处混凝土单元发生破坏。同时由图

13 可以看出,此时压缩应力波在墙角自由面处反射产生拉伸波,单元最大拉应力值达到 -5×10^6 Pa,超过 C40 混凝土抗拉强度,导致此处混凝土被破坏。由于管廊为钢筋混凝土结构,在图 13 中 0.1 s 时混凝土损伤达到最大而此刻远没有达到钢筋的强度极限,即使管廊混凝土局部损伤发生贯穿型裂纹,并不会对整个结构的刚度、强度造成太大影响。

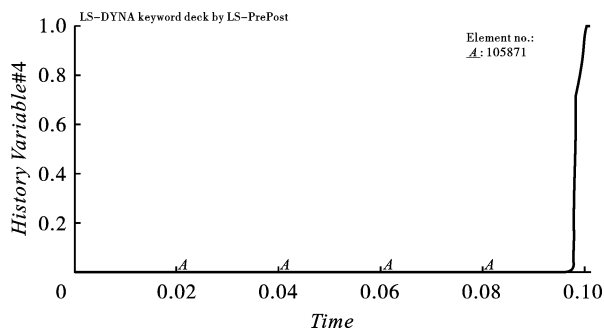


图 12 单元损伤时程变化曲线

Fig. 12 Time history curve of damage of element

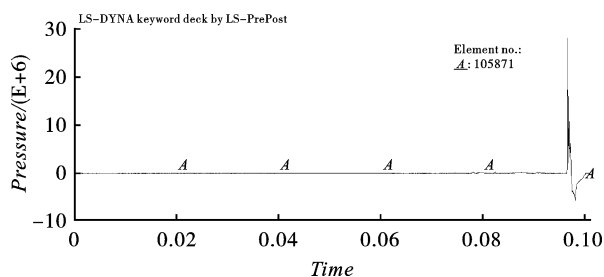


图 13 混凝土单元压力时程变化曲线

Fig. 13 Time history curve of pressure for concrete element

2.3 管廊结构速度响应分析

在管廊燃气仓内壁等间隔依次选取四个速度监测点,节点位置分布见图 14 所示。

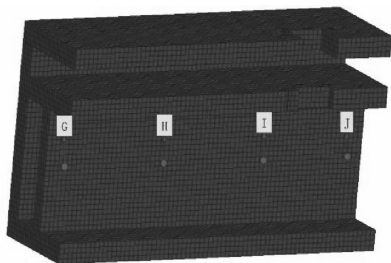


图 14 管廊结构速度监测点分布

Fig. 14 Distribution of velocity monitoring points in pipe gallery structure

计算得到各节点振动合速度时程曲线如图 15 所示。

根据图 15 可以看出,与墙体边缘靠近的节点速度较小,位于墙体中间的节点速度较大,究其原因

墙体边缘的竖向墙体与横向墙体的相互约束,使得墙角处刚度较大所致。满仓工况下管廊结构振动合速度最大约为 0.4 m/s。

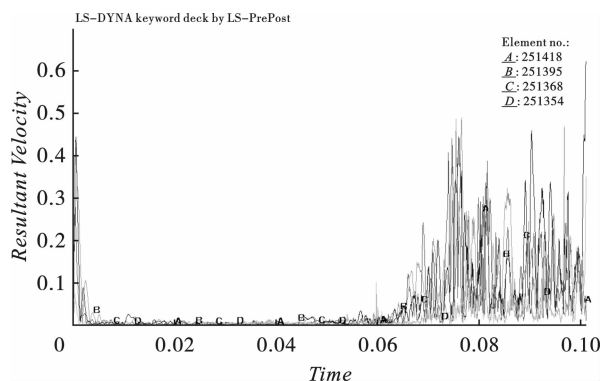


图 15 各节点振动合速度时程曲线

Fig. 15 Time history curve of resultant velocity for each node

3 结论

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,对综合管廊在满仓燃气爆炸荷载下进行了动态响应模拟分析,主要得到以下结论:

(1) 燃气爆炸冲击波随传播距离的增加,峰值压力逐渐降低,同时超压持续时间逐渐变短。冲击波在受限空间壁面的反射叠加造成其峰值压力后期呈现略微增加趋势。上部通行仓泄压口正上方冲击波最大峰值压力为 2.88 MPa,超过混凝土抗拉强度,会对墙体造成一定程度的破坏。

(2) 管廊内部燃气爆炸冲击波峰值压力随距离增加近似以多项式形式衰减,通过数值方法拟合峰值压力方程

$$p = 0.5314x^2 - 1.8897 + 2.7943 \quad (3)$$

(3) 数值试验条件下,满仓燃气爆炸工况导致损伤部位主要集中在燃气仓墙角或结构出现形状突变等位置。燃气仓顶部设置泄压口,可避免上部通行仓出现混凝土直接破坏;燃气爆炸后即使局部混凝土产生贯穿裂纹,钢筋笼的存在可有效避免对管廊整体造成结构性损坏。

(4) 管廊燃气仓墙角处由于较强的约束作用,其刚度明显大于墙面中心位置,导致管廊燃气仓墙面中部区域振动效应较为强烈,振动合速度最大可达到 0.4 m/s。

参考文献 (References)

- [1] 邓小娇,姚安林,徐涛龙,等. 城市综合管廊燃气舱室输气管道泄漏扩散规律研究[J]. 中国安全生产科学技术,2019,15(11):84-89.

- [1] DENG Xiao-qiao, YAO An-lin, XU Tao-long, et al. Study on leakage and diffusion law of gas pipeline in gas cabin of urban utility tunnel[J]. Safety Production Science and Technology in China, 2019, 15(11): 84-89. (in Chinese)
- [2] 刘中宪,王治坤,张欢欢,等. 燃气爆炸作用下地下综合管廊动力响应模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 62.
- [2] LIU Zhong-xian, WANG Zhi-kun, ZHANG Huan, et al. Dynamic response simulation of underground utility tunnel under gas explosion[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 62. (in Chinese)
- [3] 王大龙,周心权,张玉龙,等. 煤矿瓦斯爆炸火焰波和冲击波传播规律的理论研究与实验分析[J]. 矿业安全与环保, 2007(2): 1-3, 89.
- [3] WANG Da-long, ZHOU Xin-quan, ZHANG Yu-long, et al. Theoretical research and experimental analysis on propagation law of flame wave and shock wave in coal mine gas explosion[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2007(2): 1-3, 89. (in Chinese)
- [4] 芦建兵. 基于 LS-DYNA 的综合管廊燃气泄漏爆炸分析[J]. 工程与建设, 2020, 34(1): 13-16, 20.
- [4] LU Jian-bing. Gas leakage and explosion analysis of utility tunnel based on LS-DYNA[J]. Engineering and Construction, 2020, 34(1): 13-16, 20. (in Chinese)
- [5] 陈 泷. 燃气爆炸荷载下框架结构的动力响应研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- [5] CHEN Long. Study on dynamic response of frame structure under gas explosion load[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 张 娥. 矿井可燃性气体爆炸特性的实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [6] ZHANG E. Experimental study on explosion characteristics of combustible gas in mine[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] 吴燕燕. 室内燃气爆炸作用下钢框架结构动力响应与连续倒塌分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [7] WU Yan-yan. Dynamic response and progressive collapse analysis of steel frame structures subjected to indoor gas explosion[D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2012. (in Chinese)
- [8] 张 杨. 综合管廊在燃气爆炸作用下的动力响应[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [8] ZHANG Yang. Dynamic response of utility tunnel under gas explosion[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019. (in Chinese)
- [9] 刘慧慧. 矿井混合燃气爆炸特性及传播规律[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [9] LIU Hui-hui. Explosion characteristics and propagation law of mixed gas in mine[D]. Taiyuan: North China University, 2015. (in Chinese)
- [10] 汤晓瑜,瞿兴文. 城市地下综合管廊燃气泄漏效应模拟仿真分析[J]. 山西建筑, 2019, 45(12): 143-144.
- [10] TANG Xiao-yu, ZAI Xing-wen. Simulation analysis of gas leakage effect of urban underground utility tunnel[J]. Shanxi Architecture, 2019, 45(12): 143-144. (in Chinese)
- [11] 孙加超,邓勇军,姚 勇,等. 综合管廊在燃气仓内爆炸作用下的结构动力响应数值分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(3): 42-47.
- [11] SUN Jia-chao, DENG Yong-jun, YAO Yong, et al. Numerical analysis of structural dynamic response of utility tunnel under explosion in gas bunker[J]. Concrete and Cement Products, 2018(3): 42-47. (in Chinese)
- [12] 刘希亮,李 焯,王新宇,等. 管廊内燃气爆炸作用下不同抗爆结构性能研究[J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 195-204.
- [12] LIU Xi-liang, LI Ye, WANG Xin-yu, et al. Study on performance of different anti explosion structures under gas explosion in pipe gallery[J]. Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 195-204. (in Chinese)
- [13] 颜事龙,徐 颖. 水耦合装药爆破破岩机理的数值模拟研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 921-924.
- [13] YAN Shi-long, XU Yin. Numerical simulation study on rock breaking mechanism of water coupled charge blasting[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6): 921-924. (in Chinese)
- [14] 周晓青,洪家柱. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土墙的动态响应模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(1): 153-158.
- [14] ZHOU Xiao-qing, HONG Jia-zhu. Numerical simulation of dynamic responses of RC walls under blast loading[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(1): 153-158. (in Chinese)
- [15] THOMAS Borrvall, WERNER Riedel. The RHT concrete model in LS-DYNA[C]. Strasbourg: 8th European LS-DYNA Users Conference, 2011.
- [16] 张秀华,段忠东,张春巍. 爆炸荷载作用下钢筋混凝土梁的动力响应和破坏过程分析[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(4): 50-53.
- [16] ZHANG Xiu-hua, DUAN Zhong-dong, ZHANG Chun-wei. Dynamic response and failure process analysis of reinforced concrete beams under blast loading[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2009, 37(4): 50-53. (in Chinese)