

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.023

加油站埋地储油罐爆炸对盾构隧道影响的 数值分析及处理措施

张志华

(中铁大桥勘测设计院集团有限公司,武汉430050)

摘要: 以武汉地铁某盾构隧道下穿加油站为背景,采用范登伯格和兰诺伊 TNT 当量法转换公式,确定了该加油站油气爆炸当量值为 31.0 kg。利用 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元分析软件对加油站埋地储油罐爆炸进行了仿真数值模拟,得到了油罐爆炸作用在隧道结构上的冲击波压力时程曲线和峰值压力 2.7 kPa。同时,利用人防相关规范推荐的常规武器地面爆炸动荷载经验计算公式得到压力值为 2.4 kPa。对比两种方法,结果表明:接触爆炸传播至隧道结构上的冲击波超压值小于 3 kPa,对比结果基本一致,可通过合理结构设计满足爆炸荷载作用。最后,为降低地铁施工和运营风险,结合工程实际提出了相关保护措施,可为类似工程案例提供参考。

关键词: 盾构隧道;储油罐爆炸;动力效应;触地爆炸;数值模拟

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)02-0136-05

Numerical Analysis of Impact from Gas Station Oil Tank Explosion on Shield Tunnel and Treatment Measures

ZHANG Zhi-hua

(China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co Ltd, Wuhan 430050, China)

Abstract: Based on the background of a shield tunnel running through a gas station in Wuhan Metro, the equivalent value of oil and gas explosion in the gas station is determined to be 31.0 kg by using the conversion formula of Vandenberg and Lannoy TNT equivalent method. Numerical simulation was conducted for the explosion of buried oil tank in the gas station, and the shock wave pressure curve and the peak pressure of 2.7 kPa were obtained by using the dynamic finite element analysis software of ANSYS/LS-DYNA. At the same time, a pressure value of 2.4 kPa was obtained by using the empirical dynamic load calculation formula for ground explosion of conventional weapons recommended by relevant civil air defense codes. Comparing the two methods, the results show that the overpressure value of shock wave propagating from the explosion to the tunnel structure is less than 3 kPa, and the comparison results are basically consistent, which can meet the explosion load requirements through reasonable structural design. Finally, in order to reduce the risk of subway construction and operation, combined with the actual project, the relevant protection measures are proposed, which can provide reference for similar project cases.

Key words: shield tunnel; oil tank explosion; dynamic effect; ground explosion; numerical simulation

随着我国经济水平的高速增长和城市化进程的

不断加快,各地城市轨道交通建设如火如荼,线网建设越来越密集,周边环境越来越复杂,对地铁线路走向的限制因素也越来越多,因此隧道下穿重要的建(构)筑物的实例屡见不鲜,然而隧道正穿加油站的情况却比较少见。通过期刊查阅,国内目前对隧道

收稿日期:2020-02-20

作者简介:张志华(1986-),男,工程师、硕士研究生,主要从事城市轨道交通工程的结构设计和研究工作,(E-mail) huazicug@foxmail.com。

临近加油站的案例,大多是围绕地铁施工对加油站的影响展开研究,康永盛通过有限元的数值模拟和现场监控量测的方法,对郑州地铁 1 号线盾构隧道施工对临近加油站沉降变形控制进行了研究^[1];任志亮等通过合理控制爆破的手段,对青岛地铁矿山法隧道侧穿加油站施工保护方案进行了研究^[2]。然而在加油站对盾构隧道的影响方面研究的比较少。假定加油站爆炸,爆炸空气冲击波压缩地面并将应力脉冲传入地下介质时,会在土中形成空气冲击波感生的地冲击,变成施加在地下结构上的荷载^[3]。结合相关工程案例,采用理论分析和数值模拟两种方法,分别对储油罐地面爆炸作用下,传至隧道结构上爆炸冲击波超压进行计算和对比分析,从而可为盾构管片结构设计提供爆炸输入荷载。研究结论证明储油罐的爆炸工况对盾构隧道结构安全影响基本可控,同时为进一步降低隧道施工及后期运营阶段的风险,提出相关保护措施,旨在为类似工程

现象提供参考。

1 工程案例及场景拟定

武汉轨道交通某盾构区间隧道因外界因素限制,隧道需下穿一座加油站。该加油站内设 4 个 30 m³ 的卧式油罐,其中 3 个为汽油罐,1 个为柴油罐,总储量 105 m³,埋地深度为 1.3 m,储油罐为圆柱形钢结构,罐体周围采用砂分层填充,按《汽车加油加气站设计与施工规范》^[4]判断为二级加油站。储油罐是加油站的重要组成部分,同时也是最危险的部分,一旦发生爆炸,后果不堪设想,按照相关规范要求,一般汽车加油站的储油罐按埋地设置。

罐室底板与隧道竖向净距约为 10.6 m,油罐外皮与隧道的净距约为 11.45 m。空间关系如图 1 所示。隧道结构采用 C50 钢筋混凝土管片,厚度 350 mm。

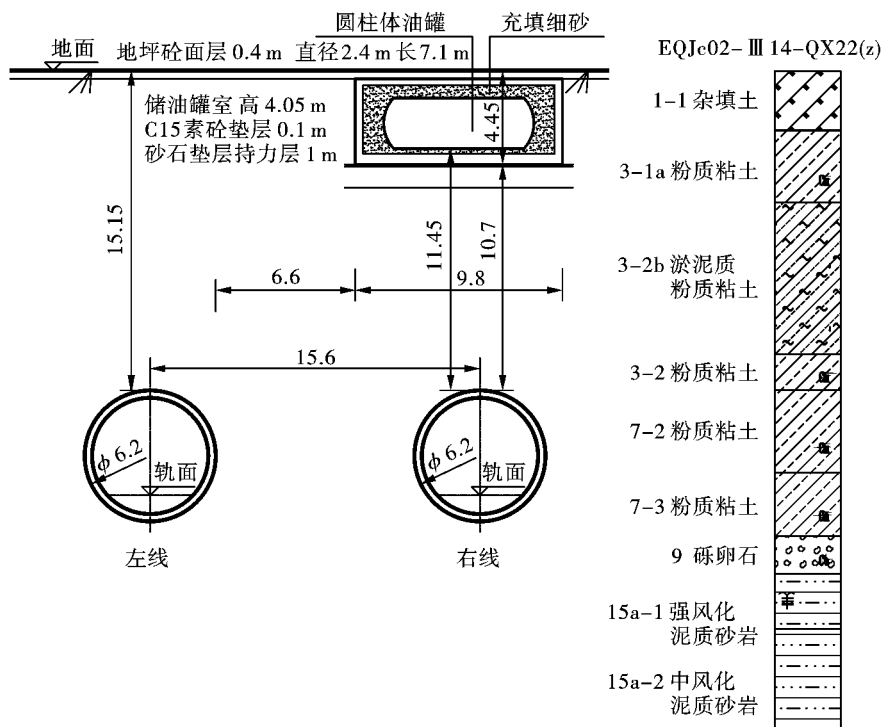


图 1 隧道与油罐关系图(单位:m)

Fig. 1 Relation of tunnel and oil tank(unit:m)

按最不利的工况进行组合,即罐室内 4 个油罐同时发生爆炸,参照《综合能耗计算通则》范登伯格和兰诺伊 TNT 当量法转换公式,将油气的爆炸转换成相对应的 TNT 当量爆炸进行分析。

$$Q_{TNT} = vV_0\rho H_c/q_{TNT} \quad (1)$$

式中: Q_{TNT} 为 TNT 当量,单位为 kg; v 为蒸汽云当量系数,通常取 0.04; V_0 为储罐的公称容积,取

105 m³; ρ 为油品比重,取 $0.76 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; H_c 为油品的平均发热量,取 43.73 kJ/kg; q_{TNT} 为 TNT 爆炸时所释放出的能量,取值范围 4120 ~ 4690 kJ/kg,一般计算时取其平均值 4500 kJ/kg。

本工程中本案例中埋地储油罐爆炸对应的 TNT 当量依照式(1)计算 Q_{TNT} 为 31.0 kg。

2 数值分析

2.1 分析模型

本次模拟使用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件进行计算,设计炸药当量值为 31.0 kg,建模范围取隧道水平方向两侧 3~5 倍洞径,隧道底面以下取 3~5 倍洞径,顶面以上取至地表,于隧道拱顶位置设置 A 点做为效应的跟踪监测点。模型的顶部为自由面,炸药置于近地表的中间位置,其余面均为无反射边界条件。炸药和空气定义为 ALE 单元,土体定义为 Lagrange 单元,用 * CONTROL_ALE 关键字进行 ALE 算法控制,使用 * ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 关键字,进行接触定义。见图 2。

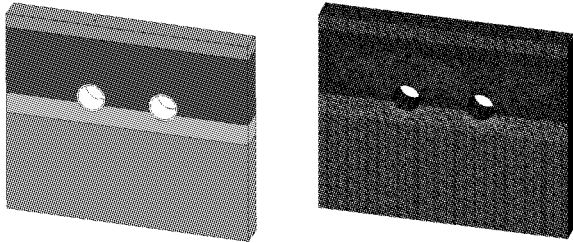


图 2 有限元计算模型
Fig. 2 Numerical model

2.2 材料参数

炸药炸药爆炸过程中压力 P_{eso} 和比容 V 的关系通过 JWL 状态方程描述,表达如下^[5]

$$P_{eso} = A(1 - \omega/(R_1V))e^{-R_1V} + B(1 - \omega/(R_2V))e^{-R_2V} + \omega E_{os}/V \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为试验确定的常数; E_{os} 为初始比内能; V 为相对体积。见表 1。

土体采用 * MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型进行数值模拟,主要材料参数如表 2 所示。

空气材料采用 MAT_NULL 材料模型和线性多项式状态方程 EOS_LINEAR_POLYMIAL 模拟。

$$P = C_0\mu + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4\mu + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (3)$$

$$\mu = \rho/\rho_0 - 1 \quad (4)$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 为常数; E 为空气的单位体积内能; ρ 为空气密度,取 1.2 g/cm^3 。见表 3。

2.3 计算结果分析

为监测加油站正下方隧道结构上的冲击波引起的超压变化,在右线隧道拱顶单元设置了监测点(单元 2910),如图 3 所示。

表 1 炸药的物力力学参数

Table 1 Mechanical parameters of explosives

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆速/ ($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_{os}/GPa
1.65	6.9	371	3.23	4.15	0.9	0.15	7

表 2 岩土的物力力学参数

Table 2 Mechanical parameters of rock and soil

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	剪切模 MPa	泊松比	弹性模 MPa	塑性屈服作用常数
1.8	1.2	0.42	3.4	7.033×10^{-7}

表 3 空气的物力力学参数

Table 3 Mechanical parameters of air

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E_{os}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{-3})$
1.2	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

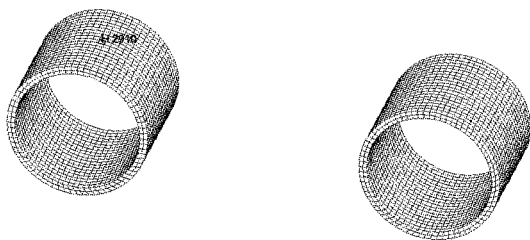


图 3 监测单元设置
Fig. 3 Observation unit

图 4 为计算输出不同时刻的爆炸冲击波分布图,从图中可以观察到爆炸冲击波超压形成与发展过程,在爆炸的瞬间,冲击波以柱面波的形式向外扩散。

由图 5 可以看出,爆炸冲击波在隧道结构顶产生的压力,在很短时间内达到峰值,继而随着时间的持续不断下降,并趋于平缓。从应力时程曲线可知,爆源传至隧道顶的爆炸冲击波超压 p 为 2.7 kPa。

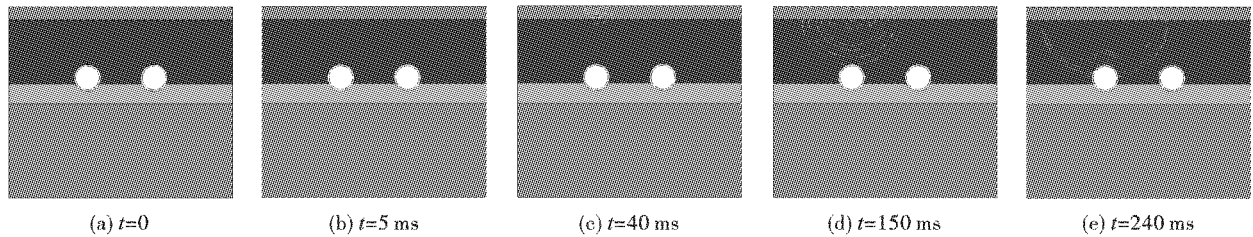


图 4 不同时刻冲击波应力云图

Fig. 4 Shock wave chart of shock wave in different time

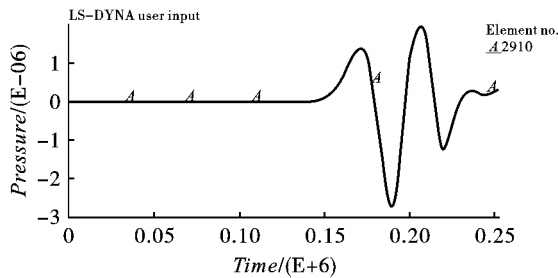


图 5 拱顶监测点应力时程曲线

Fig. 5 Stress time history curve of vault monitoring point

2.4 数值模拟与理论计算的比较

根据爆炸理论,对于土壤爆炸,当装药深度小于某一计算值时,属于接触爆炸,否则为封闭爆炸。按装药深度判断^[6],本加油站拟定的爆炸工况属于接触爆炸。《人民防空地下室设计规范》^[7]附录 B 中常规武器地面爆炸动荷载计算方法,可得到地面直接产生的土中压缩波最大压力,该公式来自于美军 TM5-855-1 手册^[8,9],是基于大量的试验和分析,具有较好的可靠度。

$$P = 6.82 \times 10^{-3} \rho c (5.4R/W^{1/3})^{-n} \quad (5)$$

式中: R 为爆心至作用点的距离,m; ρ 为土的质量密度, kg/m^3 ; c 为土的地震波波速, m/s ; W 武器的装药量,按 TNT 当量换算; n 土的衰减系数;结合本拟定场地参数计算得 $P = 2.4 \text{ kPa}$ 。

2.5 爆炸破坏分析

由上述的计算可知,数值模拟与经验公式计算结果比较接近,得到的冲击波超压均小于 3 kPa ,远小于隧道结构采用 C50 钢筋混凝土的轴心抗拉强度 1.89 MPa 。表 4 为 1000 kg TNT 地面爆炸时冲击波超压对建筑物的破坏程度准则对照表^[10],可见本次冲击波超压小于最小等级的 5 kPa ,未对隧道结构造成破坏,隧道结构设计应将爆炸产生的荷载作为附加荷载考虑,通过结构合理配筋可满足结构受力及裂缝控制要求^[11]。

3 处理措施

通过计算分析,储油罐的爆炸对盾构隧道结构

安全影响基本可控,为降低盾构施工阶段及后期地铁运营阶段的风险,该工程针对地铁隧道下穿加油站设计采用了以下保护措施:

表 4 建筑物危害压力准则
Table 4 Standard of injuries to structures judged by overpressure

超压/kPa	破坏作用
5 ~ 6	门、窗玻璃部分破碎
6 ~ 15	受压面的门窗玻璃大部分破碎
15 ~ 20	窗框损坏
20 ~ 30	墙裂缝
40 ~ 50	墙裂大缝,屋瓦掉落
60 ~ 70	木建筑厂房房柱折断,房架松动
70 ~ 100	砖墙倒塌
100 ~ 200	防震钢筋混凝土破坏,小房屋倒塌
200 ~ 300	大型钢结构破坏

(1)下穿加油站范围轨道结构按高等及特殊减振设计,采用橡胶隔振垫或钢弹簧浮置板道床,以减小列车运行振动对油罐渗油的影响。

(2)加强隧道的防杂散电流检测,增设道床防杂散电流措施。

(3)按照《汽车加油站加气设计与施工规范》(GB50156)相关要求,对现有加油站储油池及油罐进行防渗、防爆改造。

(4)加强隧道下穿加油站范围管片结构强度,保证结构本身安全可靠。

(5)盾构穿越时加强施工过程控制,包括严格控制盾构掘进参数,及时进行同步注浆和二次注浆,加强施工监控量测等。

4 结语

(1)数值模拟分析得到埋地储油罐爆炸在隧道结构顶部产生的冲击波超压为 2.7 kPa ,均未超过混凝土的轴心抗拉抗、压强度,未对结构造成损坏,监测的应力时程曲线衰减过程基本符合爆炸冲击波的一般规律。

(2)经验公式计算与数值模拟具有较高的一致

性,也验证了数值模拟结果的准确性。

(3)对比建(构)筑物的危害压力准则,当冲击波超压小于5 kPa时,对结构的影响较小,可通过对结构合理配筋,保证结构使用安全。

(4)该工程采取了相关措施以减小加油站与隧道工程的相互影响,盾构施工已完成顺利穿越,可为类似案例提供一定参考。

参考文献(References)

- [1] 康永胜. 郑州地铁盾构隧道下穿加油站的沉降分析[J]. 隧道建设, 2015, 35(8): 766-771.
- [1] KANG Yong-sheng. Analysis on settlement induced by shield tunneling underneath oil station: case study on Zhengzhou Metro[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(8): 766-771. (in Chinese)
- [2] 任志亮, 张 晖. 地铁区间侧穿既有加油站处理方案研究[J]. 铁道勘察, 2016, 42(2): 100-102.
- [2] REN Zhi-liang, ZHANG Hui. The research on management plan of a subway project with a tunnel section nearby the existing gas Station [J]. Railway Investigation and Surveying, 2016, 42(2): 100-102. (in Chinese)
- [3] 柳锦春, 方 秦, 还 毅, 等. 炸药地面接触爆炸下土中感生地冲击的实用计算方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 121-124.
- [3] LIU Jin-chun, FANG Qin, HUAN Yi, et al. Practicable calculating method of indirect ground shock in soilat surface contact explosion[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(2): 121-124. (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB50156—2012 汽车加油加气站设计与施工规范[S].
- [5] 蒋 楠, 周传波. 爆破振动作用下既有铁路隧道结构动力响应特性[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(6): 63-68.
- [5] JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo. Dynamic response characteristics of existing railway tunnel structure subjected to blasting vibration [J]. China Railway Science, 2011, 32(6): 63-68. (in Chinese)
- [6] 李冀祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [7] 中华人民共和国国家标准. GB50038—2005 人民防空地下室设计规范[S].
- [8] US Department of the Army. 美陆军技术手册 TM5-855-1 常规武器防护设计原理[M]. 方秦, 等, 译. 中国人民解放军工程兵工程学院, 1997.
- [9] 杜修力, 廖维张, 田志敏, 等. 炸药爆炸作用下地下结构的动力响应分析[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 474-480.
- [9] DU Xiu-li, LIAO Wei-zhang, TIAN Zhi-min, et al. Dynamic response analysis of underground structures under explosion-induced loads [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5): 474-480. (in Chinese)
- [10] 傅智敏, 黄金印, 臧 娜. 爆炸冲击波伤害破坏作用定量分析[J]. 消防科学与技术, 2009, 28(6): 390-395.
- [10] FU Zhi-min, HUANG Jin-yin, ZANG Na. Quantitative analysis of explosion shock wave damage[J]. Fire Science and Technology, 2009, 28(6): 390-395. (in Chinese)
- [11] 谢 乐, 杨志勇, 李欢秋. 爆炸作用下矩形隧道衬砌结构动力响应研究[J]. 爆破, 2018, 35(4): 40-46.
- [11] XIE Le, YANG Zhi-yong, LI Huan-qiu. Dynamic response of rectangular tunnel lining structure under explosion[J]. Blasting, 2018, 35(4): 40-46. (in Chinese)

英文编辑: 黄 刚

(上接第126页)

- [16] 汪智勇, 陈旭峰. SiO₂、Al₂O₃ 和 Fe₂O₃ 对静态破碎剂性能的影响[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2017, 50(1): 2-7.
- [16] WANG Zhi-yong, CHEN Xu-feng. The Influence of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ on the properties of static demolition agent[J]. Expansive Agents & Amp Expansive Concrete, 2017, 50(1): 2-7. (in Chinese)
- [17] SILVA VD, RANJITH P, PERERA M, et al. A modified, hydrophobic soundless cracking demolition agent for non-explosive demolition and fracturing applications [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 19: 1-13.
- [18] 副田孝一, 土屋和義, 松久真人, 等. 静的破碎剂的長期膨脹圧特性[J]. 石膏と石灰, 1994, 1994(248): 37-43.

英文编辑: 何 松