

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.022

下穿高速公路输水隧洞爆破振动响应分析*

吕虎波¹, 李佳², 彭亚雄³, 吴立²

(1. 浙江省隧道工程集团有限公司, 杭州 310005; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 武汉 430074;
3. 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湘潭 411201)

摘要: 输水隧洞下穿高速公路爆破施工将导致路面振动, 对路面结构稳定性产生不利影响, 掌握爆破引起路面振动响应规律至关重要。因此, 为研究隧洞爆破作用下高速公路路面振动响应特征, 依托平潭及闽江口输水工程, 以输水隧洞下穿既有 G15 高速公路为研究对象, 采用现场振动监测和数值模拟方法, 研究了隧洞爆破开挖引起上覆高速公路路面振动响应特征及衰减规律。研究表明: 由于隧洞掏槽眼爆破药量最大, 同时缺少临空面导致过大夹制作用, MS1 段爆破引起的高速路面质点峰值振速最大; 爆破引起的高速公路路面测点垂直方向峰值振速最大, 可能导致路面动力沉降; 隧洞已开挖部分的自由面, 有效地削弱了爆破地震波效应, 加快了爆破振动衰减。

关键词: 输水隧洞; 下穿高速公路; 爆破振动; 衰减规律

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0136-07

Study on Blasting Vibration of Diversion Tunnel Undercrossing Expressway

LV Hu-bo¹, LI Jia², PENG Ya-xiong³, WU Li²

(1. Zhejiang Tunnel Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou 310005, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

3. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The blasting construction of water diversion tunnel under an expressway will lead to pavement vibrations and adversely affect the stability of the pavement structure, so it is very important to find out the response law of pavement vibrations caused by blasting. In order to study the vibration response characteristics of the expressway pavement close to the tunnel blasting, we took the diversion tunnel undercrossing the existing G15 expressway in the Pingtan to Minjiang water conveyance project as the research object so that to study the vibration response characteristics and attenuation law of expressway pavement by field vibration monitoring and numerical simulation. The results show that the peak particle vibration velocity of the road surface caused by MS1 section blasting is due to the maximum amount of blasting charge in the cut holes of the tunnel and its lack of enough free surface, which leads to increased confinement. The largest blasting peak vibration velocity appears in the vertical direction of at the measuring point, which may lead to dynamic settlement of the pavement. In addition, the free surface of the excavated part of the tunnel effectively weakens the blasting seismic effect and accelerates the attenuation of blasting vibrations.

Key words: diversion tunnel; undercrossing expressway; blasting vibration; attenuation law

跨区域的输水工程能够有效缓解区域内与区域间的缺水状况,缓解城市水资源缺乏问题。然而,在输水工程建设中,会与市政交通等线路交错,导致输水隧洞下穿铁路、高速公路、房屋等既有建(构)筑物的工程问题突出,隧洞下穿建(构)筑物施工对结构稳定性与安全性会造成极大威胁^[1-3]。

隧道下穿高速公路施工必将引起公路路面沉降和结构变形^[4-6]。许有俊等模拟了双圆盾构隧道下穿高速铁路路基全过程施工^[7],研究了路基顶面横向沉降槽形态变化特征。雷亚峰等提出了跟管钻进结合超长管棚施工方法^[8],有效地控制隧道下穿高速公路变形。罗刚等研究了双线盾构下穿高速公路施工导致路面和边坡失稳机制和路面沉降规律^[9]。隧道下穿公路爆破施工时,爆破地震波将造成公路结构振动,导致路面动力沉降、路基边坡动力失稳等灾害^[10-12]。舒磊等结合现场监测和数值模拟^[13],研究了引水隧洞爆破诱发既有隧道振动响应特征。叶宇等模拟了不同相对位置条件下隧道下穿高速公路爆破施工^[14],研究了爆破作用下公路挡墙和路基的振动规律。黄智刚在分析隧洞下穿高速公路爆破风险基础上,提出了精细化输水隧洞爆破设计方案^[15,16]。

针对下穿高速公路输水隧洞爆破振动危害问题,依托平潭及闽江口输水工程,以输水隧洞下穿既有G15高速公路为研究对象,利用现场振动监测和数值模拟,分析高速公路路面振动响应与动应力特征,研究下穿高速公路输水隧洞爆破振动响应规律。

1 工程概况

1.1 工程简介

平潭及闽江口输水工程是福建跨区域的大型水利项目。本工程第4标段为大樟溪~石溪输水线路工程,包括9条施工支洞和输水主洞,其中施工支洞累计长度4.1 km,主洞累计长度37.9 km。隧洞沿线主要分布火山岩和侵入岩,裂隙较为发育且连通性差,地下水赋存少、潜水埋深为10~40 m。

输水隧洞下穿既有G15高速公路施工交叉点坐标($X=2839484.345, Y=428469.359$),交叉位置高速公路路面高程约为49 m,输水隧洞顶高程约为

25 m,隧洞顶板与公路路面的高差约为24 m,下穿段高速轴线与隧洞轴线夹角约为 83° ,隧洞下穿位置如图1所示。

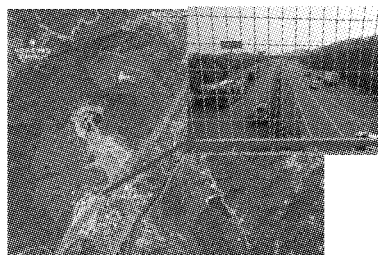


图1 隧洞下穿高速位置

Fig. 1 The position of the tunnel undercrossing high-speed way

1.2 隧洞爆破设计

输水隧洞于桩号DP4+655至DP4+805位置处,下穿总长度为150 m,该区域内隧洞围岩等级均为IV类。隧洞断面为平底圆形,底宽×高为4.013 m×4.65 m,如图2所示。下穿高速公路隧洞采取全断面法开挖爆破,进尺取1 m,炮孔深度取 $L=1.1$ m,炮孔直径 $d=38\sim 42$ mm,具体爆破参数如表1所示。

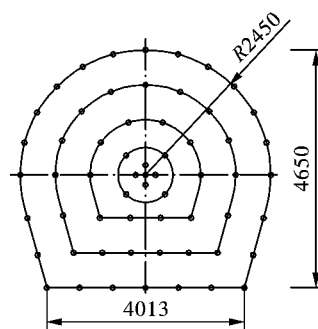


图2 隧洞下穿高速爆破设计方案(单位:mm)

Fig. 2 Blasting design of the tunnel (unit:mm)

2 爆破振动监测

2.1 监测方案

下穿高速公路输水隧洞爆破施工不可避免地会对既有高速公路结构产生不利影响,为了研究高速公路爆破振动响应特征及其衰减规律,为控制爆破地震波有害效应控制提供依据,开展了现场爆破振动监测。在高速公路应急车道外侧路面,沿垂直隧洞轴线方向设置了一条共5个监测点水平测线。从与隧洞轴线位置起,每隔10 m一个测点。

2.2 监测结果及分析

现场爆破振动监测采用TC4850爆破测振仪,设置的采样频率为4000 sps,测试时间1.0 s。通过

收稿日期:2021-06-16

作者简介:吕虎波(1977-),男,工程师,主要从事地下工程施工与管理工, (E-mail) 642661939@qq.com。

通讯作者:吴立(1963-),男,湖南株洲人,教授,主要研究岩土与爆破工程, (E-mail) lwu@cug.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(41672260);湖南省自然科学基金项目(2020JJ5163);湖南省教育厅科学研究项目(20C0815)

3次爆破共测得15组数据。典型爆破振动曲线和监测数据如图3~4所示。

表1 爆破设计参数
Table 1 Blasting design parameters

炮眼名称	掏槽眼	辅助眼	底眼	周边眼
炮眼数量/个	4	29	7	19
炮眼深度/m	1.5	1.3	1.3	1.3
每孔装药量/kg	1.040	0.770	0.825	0.132
雷管段别	MS1	MS3、MS5、MS7、MS9	MS13	MS11
总装药量/kg	34.775			
炮眼总数/个	62(不含空孔1个)			
单耗药量/(kg·m ⁻³)	1.79			

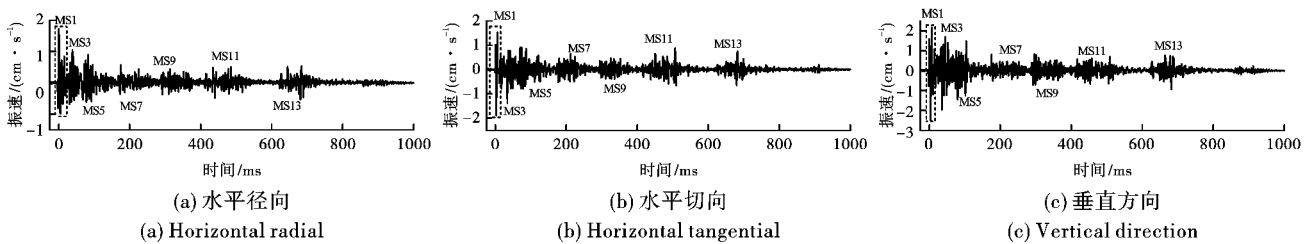


图3 振动时程曲线

Fig. 3 The time vibration history curve

由图3可以基本分辨出各延期段爆破引起的振动历程及峰值振速,由于MS1~MS5微差间隔时间较短,爆破振动存在明显叠加作用。此外,各延期段爆破引起的峰值振速差异较为明显;由于掏槽眼爆破药量最大,同时缺少临空面导致过大夹制作用,MS1段的峰值振速最大。水平径向、水平切向和垂直方向的振动峰值速度分别为1.742 cm/s、1.996 cm/s、2.505 cm/s,垂直方向的峰值振速最大,爆破振动将对高速公路路面沉降产生较大影响。为进一步分析振动衰减规律,采用Sadovsky公式对实测数据进行非线性拟合^[17],结果如图4所示。拟合系数 r^2 为0.946,表明拟合具有较好精度,反映了输水隧洞爆破开挖影响下高速公路路面振动衰减规律。

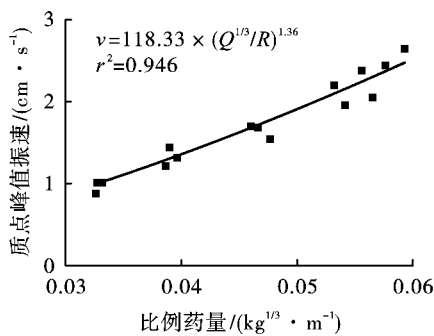


图4 峰值振速拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of vibration velocity

3 数值模拟分析

3.1 数值模型

为了详细研究输水隧洞爆破作用下高速公路路面振动响应特征,采用LS-DYNA建立了下穿高速公路输水隧洞爆破动力有限元模型^[18]。模型材料包括围岩、炸药、路面和空气4个部分,模型尺寸为50 m×60 m×50 m,隧洞拱顶至路面距离取24.0 m,隧洞底部到洞顶的距离为4.6 m,隧洞下方岩石21.4 m,装药量共34 kg。采用cm-g-μs单位制。

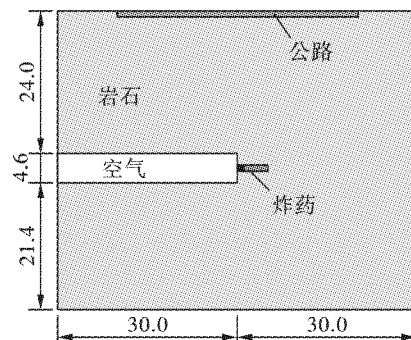


图5 数值模型示意图(单位:m)

Fig. 5 Numerical model diagram (unit: m)

* MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型模拟铵梯炸药,其计算参数如表2所示; * MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型模拟围岩和路面材料,其计算参数如表3所示; * MAT_NULL 模型模拟空气。围岩和

路面使用 Lagrange 网格,炸药和空气使用 Euler 网格,并利用 ALE 算法进行耦合。

表 2 炸药计算参数

Table 2 Parameters of explosive

密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	爆速 D	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa	V
1.64	4000	3.74×10^2	3.23×10^{-2}	4.15	0.95	0.3	7.0	1.0

表 3 围岩和路面计算参数

Table 3 Parameters of surrounding rock

密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	泊松比	弹性模量/GPa
2.614	80	15	0.50	40
2.800	32	20	0.31	70

3.2 振动速度特征分析

为了分析高速公路路面的爆破振动速度特点和分布规律,沿隧洞轴线方向依次选取掌子面的路面投影点的水平距离为 -20 m, -10 m, 0 m, 10 m, 20 m 的 5 个监测点。经计算得到各监测点的振速时程曲线如图 6 所示,各方向峰值振速及合速度统计如表 4 所示。

由图 6 和表 4 可知,在隧洞爆破地震波作用下高速公路路面垂直方向(Z 方向)的峰值振速最大,其中掌子面正上方路面合速度达到 1.924 cm/s,水平径向和水平切向的峰值振速基本相同;随爆心距的增加,高速公路路面的各方向峰值振速及合速度

均逐渐减小。

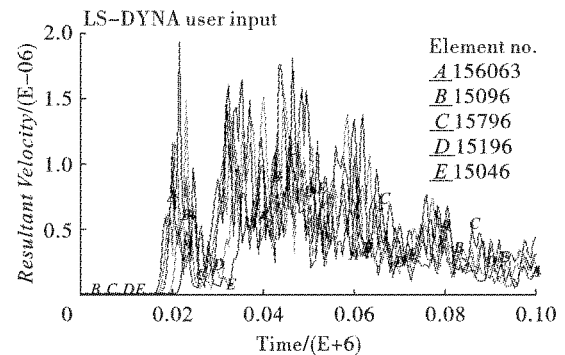


图 6 振速时程曲线图

Fig. 6 Time history curve of vibration velocity

表 4 各监测点峰值振速

Table 4 Peak vibration velocity at each monitoring point

水平距离/m		-20	-10	0	10	20
节点编号		15063	15096	15796	15196	15046
峰值振速/ ($cm \cdot s^{-1}$)	X	0.762	0.934	1.212	1.001	0.978
	Y	0.784	1.011	1.312	1.015	0.986
	Z	0.856	1.203	1.515	1.214	1.012
	合速度	1.152	1.355	1.924	1.526	1.338

对比隧洞掌子面前后方爆破振速衰减规律,水平距离 20 m 的监测点合速度为 1.526 cm/s,衰减了 20.68%,而后方水平距离为 20 m 的监测点合速度为 1.152 cm/s,衰减了 40.12%。说明了隧洞爆破开挖过程中,相同爆心距条件下隧洞未开挖上部路面的爆破峰值振速大于已开挖部分。隧洞已开挖部分产生自由面,削弱了爆破地震波传播,使得隧洞已开挖部分爆破振速衰减更快。因此,隧洞施工过程中应重点关注掌子面前方高速公路路面振动有害效应,做好相应控制措施。

3.3 动应力特征分析

为分析爆破作用下高速公路路面的动应力特点

和分布规律,高速公路路面不同时刻的应力云图如图 7 所示;并沿垂直隧洞轴线方向,依次选取距离爆源水平距离为 0 m, 5 m, 10 m, 15 m 的 4 个监测点,监测点各方向应力峰值与爆源水平距离关系如图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知,炸药爆炸后,在 $t=1996.4 \mu s$ 时,掌子面正上方高速公路路面受爆破振动影响产生较大动应力,随着时间增加路面各点动应力增大,呈现出随着爆破振动向外扩展的趋势。当 $t=5294.8 \mu s$,振动效应对路面边界产生了影响,随后爆破振动继续向外扩散,路面动应力值逐渐降低。对比分析各监测点动应力峰值特点,在隧洞爆破地震波作

用下,高速公路路面各监测点Z方向(垂直方向)动应力峰值均最大,另外X和Y方向动应力峰值均远小于Z方向。在爆源正上方监测点的应力峰值最大,其x方向应力峰值达到了142.16 kPa,y方向应力峰值达

到了584.61 kPa,z方向应力峰值达到了144.13 kPa,且随着水平距离的增加,监测点各方向的峰值应力不断减小。随着水平距离的不断增大,监测点的爆心距也在不断增大,所受到爆破振动的影响越小。

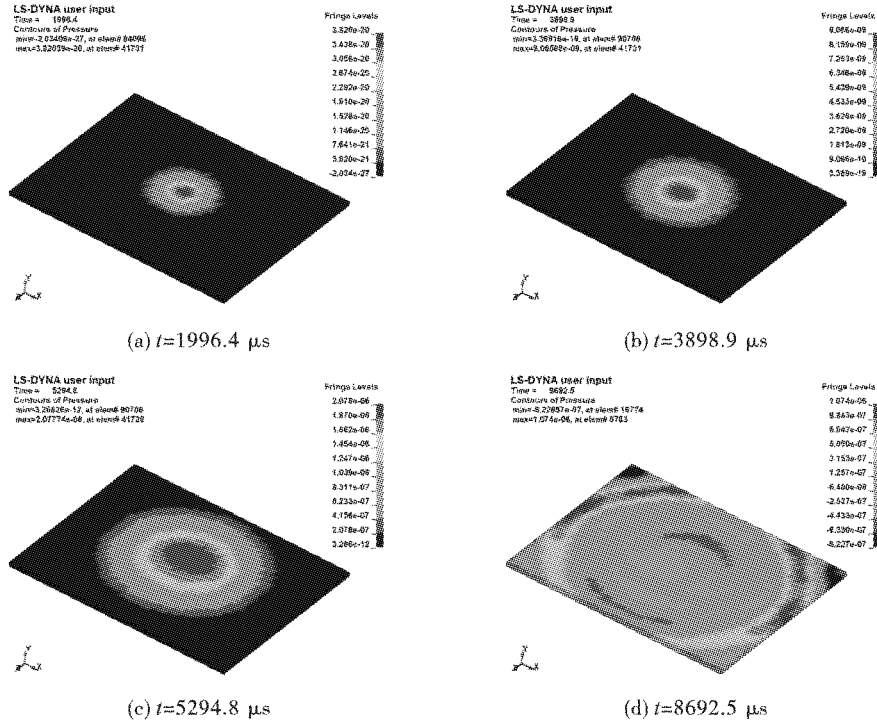


图7 高速公路路面的应力云图

Fig. 7 Stress diagram of expressway pavement

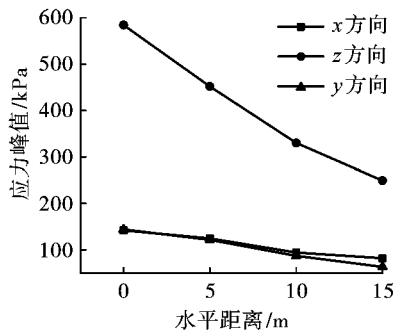


图8 三个方向应力峰值

Fig. 8 Stress peak values of three directions

4 结论

采用现场振动测试和数值模拟方法,重点研究了下穿高速公路输水隧道爆破振动响应特征及衰减规律。主要研究结论如下:

(1)隧道爆破中掏槽眼药量最大并且缺少临空面导致过大夹制作用,使得MS1段爆破引起的峰值振速最大。同时引起路面测点垂直方向峰值振速最大,可能导致公路路面产生动力沉降。

(2)相同爆心距条件下隧洞未开挖上部路面的

爆破峰值振速大于已开挖部分。隧洞已开挖部分形成了自由面,削弱了爆破振动效应。

(3)隧道爆破作用下上覆高速公路路面垂直方向动应力峰值最大,与实测分析结果一致。爆源正上方应力峰值最大,随着爆心距增大,爆破振动有害效应减小。

参考文献 (References)

[1] 杨成全,舒大强,陈明,等. 下穿隧洞爆破掘进对既有隧洞的振动影响[J]. 爆破,2016,33(3):5-9,52.

[1] YANG Cheng-quan, SHU Da-qiang, CHEN Ming, et al. Vibration effects on existing tunnel induced by blasting excavation of underpass tunnel [J]. Blasting, 2016, 33(3):5-9,52. (in Chinese)

[2] 陈仁朋,曾巍,吴怀娜,等. 盾构隧道下穿引起砌体结构建筑沉降损伤实例研究[J]. 岩土工程学报, 2020,42(12):2301-2307.

[2] CHEN Ren-peng, ZENG Wei, WU Huai-na, et al. Case study of tunneling-induced settlement and damage of masonry buildings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020,42(12):2301-2307. (in Chinese)

- [3] 刘建友,赵 勇,吕 刚,等. 隧道下穿高速铁路路基风险分级及风险评价方法研究[J]. 现代隧道技术, 2020,57(6):8-16,54.
- [3] LIU Jian-you, ZHAO Yong, LV Gang, et al. Research on risk classification and assessment method for tunnels crossing under high-speed railway subgrade[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6):8-16, 54. (in Chinese)
- [4] 赵俊澄,陈志敏,文 勇,等. 复杂交通荷载下超浅埋隧道下穿高速公路动力响应与变形控制研究[J]. 公路, 2020,65(4):355-361.
- [4] ZHAO Jun-cheng, CHEN Zhi-min, WEN Yong, et al. Study of dynamic response and deformation control of ultra-shallow buried tunnel undercrossing expressway under complex traffic loads[J]. Highway, 2020, 65(4):355-361. (in Chinese)
- [5] 郑 俊,丁振杰,吕 庆,等. 新建隧道下穿运营公路引起的路面沉降控制基准[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020,52(3):51-58,67.
- [5] ZHENG Jun, DING Zhen-jie, LV Qing, et al. Control standard for settlement of pavement caused by a new tunnel passing underneath an existing highway[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(3):51-58, 67. (in Chinese)
- [6] 郭 瑞,郑 波,黎 晨. 隧道下穿松散高填土路堤的沉降规律及其影响范围研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019,39(4):601-608.
- [6] GUO Rui, ZHENG Bo, LI Chen. Settlement law and its influence range of tunnel crossing underneath loose high filling embankment[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(4):601-608. (in Chinese)
- [7] 许有俊,陶连金,李文博,等. 地铁双线盾构隧道下穿高速铁路路基沉降分析[J]. 北京工业大学学报, 2010,36(12):1618-1623.
- [7] XU You-jun, TAO Lian-jin, LI Wen-bo, et al. A numerical simulation study on the settlement laws of the high-speed railway's subgrade induced by the construction of twin shield tunnel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2010, 36(12):1618-1623. (in Chinese)
- [8] 雷亚峰,施成华. 浅埋大断面软弱围岩隧道下穿高速公路变形控制技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2018,15(5):1239-1246.
- [8] LEI Ya-feng, SHI Cheng-hua. Study on deformation control technology of shallow and large cross-section tunnel beneath expressway in soft rock[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(5):1239-1246. (in Chinese)
- [9] 罗 刚,潘少康,张玉龙,等. 双线盾构隧道下穿机场高速沉降及变形规律[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019,39(4):100-108.
- [9] LUO Gang, PAN Shao-kang, ZHANG Yu-long, et al. Settlement and deformation law of a double-track shield tunnel underpass airport expressway[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(4):100-108. (in Chinese)
- [10] 程跃辉,江 鸿,陈 伟. 隧道下穿匝道爆破振动控制技术分析及效果分析[J]. 爆破, 2017,34(3):63-67.
- [10] CHENG Yue-hui, JIANG Hong, CHEN Wei. Blasting vibration control technology and effect in tunnel underneath ramp[J]. Blasting, 2017, 34(3):63-67. (in Chinese)
- [11] 邓祥辉,夏道洪,王 睿,等. 关林子隧道下穿既有道路爆破振动影响[J]. 兰州理工大学学报, 2020,46(6):119-124.
- [11] DENG Xiang-hui, XIA Dao-hong, WANG Rui, et al. Influence of blasting vibration of guanlinzi tunnel on the existing down-traversing road[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(6):119-124. (in Chinese)
- [12] 邓祥辉,杨 俊,王 睿. 浅埋大断面隧道下穿既有道路的施工工法[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019,40(5):596-602.
- [12] DENG Xiang-hui, YANG Jun, WANG Rui. Construction method of shallow tunnel with large section down-traversing existing road[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40(5):596-602. (in Chinese)
- [13] 舒 磊,仇文革,龚 伦,等. 下穿隧道爆破施工对既有隧道的振动影响及对策研究[J]. 铁道标准设计, 2013(7):70-77.
- [13] SHU Lei, CHOU Wen-ge, GONG Lun, et al. Vibration influence on existing tunnel caused by blasting construction of diversion tunnel passing under it and countermeasures[J]. Rail Way Standard Design, 2013(7):70-77. (in Chinese)
- [14] 叶 宇,余春涛,刘新荣,等. 某铁路隧道下穿高速公路爆破振动研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019,15(1):219-225.
- [14] YE Yu, YU Chun-tao, LIU Xin-rong, et al. Research on blasting vibration of a railway tunnel under-crossing expressway[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(1):219-225. (in Chinese)
- [15] 黄智刚. 下穿高速公路输水隧洞爆破设计[J]. 水利规划与设计, 2020(11):137-140.
- [15] HUANG Zhi-gang. Blasting design of underpass expressway conveyance tunnel[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2020(11):137-140. (in Chinese)
- [16] 黄智刚,汪宏兵,郑守铭,等. 长距离小断面输水隧洞施工下穿高速公路控制技术[J]. 西部探矿工程, 2021,33(5):172-175.

- [16] HUANG Zhi-gang, WANG Hong-bing, ZHENG Shou-ming, et al. Control technology of long distance and small section water conveyance tunnel under expressway [J]. Western Exploration Project, 2021, 33(5): 172-175. (in Chinese)
- [17] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [18] 龚书堂. 输水隧洞下穿高速公路施工控制技术研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021.
- [18] GONG Shu-tang. Study on the construction control technology of diversion tunnel undercrossing expressway [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021. (in Chinese)

英文编辑: 黄 刚

(上接第 135 页)

4 总结

现场混装炸药新技术实现了民用爆炸物品的生产、购买、运输、储存、爆破作业和退库的封闭化管理,能够有效预防爆炸物品流失社会,从根源上遏制涉爆案件和事故的发生;针对目前现场混装新技术在爆破作业中应用率非常低下的现状,需要在交通部门、工信部门、公安部门三个政府职能部门监管下,四个民用爆炸物品从业单位各司其职、通力配合,沿着民爆物品的流量和流向管理这根主线,按照《安全生产法》和各种规章制度和标准的要求,明确现场混装炸药车在整个生产、使用过程中每一个环节涉及的民爆生产企业、民爆销售企业、危险物品的运输企业和爆破作业单位安全生产主体责任及管理职责及各自主管部门的监管职责,才能真正使用好现场混装这项新技术。

参考文献 (References)

- [1] 民用爆炸物品安全管理条例(中华人民共和国国务院令 第 466 号)[Z].
- [2] 白建明,王宏斌. 爆破作业服务一体化在露天矿山的应用实践[J]. 煤矿爆破, 2018(5): 25-27.
- [2] BAI Jian-ming, WANG Hong-bin. Application practice of explosion service integration in open pit mine [J]. Coal Mine Blasting, 2018(5): 25-27. (in Chinese)
- [3] 工信部规[2016]331号.《民用爆炸物品行业发展规划(2016—2020年)》[R]. 北京: 工业和信息化部, 2016.
- [4] 工信部安全[2018]237号.《工业和信息化部关于推进民用行业高质量发展的意见》[R]. 北京: 工业和信息化部, 2018.
- [5] 《中华人民共和国安全生产法》[M]. 北京: 中国法制出版社, 2021.
- [6] 杨旭升,晏俊伟,张金辉. 推进爆破一体化创新发展研究[J]. 爆破, 2013, 30(2): 33-36.
- [6] YANG Xu-sheng, YAN Jun-wei, ZHANG Jin-hui. Research on promoting innovation and development of blasting integration [J]. Blasting, 2013, 30(2): 33-36. (in Chinese)
- [7] 邱位东. 工业炸药现场混装新技术的发展现状与新进展[J]. 科技新导报, 2013(10): 96.
- [7] QIU Wei-dong. The development status and new progress of on-site mixed loading technology of industrial explosives [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(10): 96. (in Chinese)
- [8] 杨茂森. 关于推广现场混装炸药车技术的一些思考[J]. 爆破, 2017, 34(1): 160-165.
- [8] YANG Mao-sen. Some thoughts on popularizing technology of site mixed explosive vehicles [J]. Blasting, 2017, 34(1): 160-165. (in Chinese)
- [9] 冯有景. 现场混装炸药车[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014: 7-8.
- [10] 孟广雄,姜祖勇,马平,等. 现场混装炸药智能化生产及安全管理探究[J]. 广州化工, 2020, 48(3): 118-121.
- [10] MENG Guang-xiong, JIANG Zu-yong, MA Ping, et al. Exploration on intelligent production and safety management of bulk explosive mixed on site [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 48(3): 118-121. (in Chinese)
- [11] 王艳平,陈锐. 推进我国民爆生产与爆破服务一体化实质性发展的对策研究与实践探讨[J]. 煤矿爆破, 2015(3): 1-7.
- [11] WANG Yan-ping, CHEN Rui. Countermeasures research and Practical discussion on promoting industrial explosive materials production combined with blasting services [J]. Coal Mine Blasting, 2015(3): 1-7. (in Chinese)
- [12] 石磊. 爆破服务一体化模式标准化管理现状与展望[J]. 工程爆破, 2016, 22(3): 87-90.
- [12] SHI Lei. The situation and future of standardization management of integrated blasting service [J]. Engineering Blasting, 2016, 22(3): 87-90. (in Chinese)

英文编辑: 李立峰