

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.05.010

西部高海拔环境下山岭隧道施工中的 微振控制爆破技术*

王景春 刘凯林 李永昊

石家庄铁道大学大型结构诊断与控制研究所(河北石家庄,050043)

[摘 要] 以甘肃省甘南藏族自治州夏河隧道为研究背景,对高海拔环境下山岭隧道微振控制爆破技术进行了研究,以降低爆破振动对周边环境的影响。分析总结了导致原方案振动强度大的主要问题,对爆破参数进行优化调整。通过缩短掘进尺、改用小直径中空直孔掏槽形式,调整炮孔布置及各项参数,引入数码电子雷管精细设计,最后形成适用于夏河隧道的小台阶、短进尺、毫秒延期微振控制爆破方案。结果表明:爆破效果良好,振速控制在 0.5 cm/s 以内。提出的微振控制爆破技术能够实现有害效应控制,为复杂环境下隧道施工提供参考。

[关键词] 隧道;微振动;爆破控制;复杂环境

[分类号] TD235.1;O389

Micro-Vibration Controlled Blasting Technology in the Construction of Mountain Tunnel under High Altitude Environment in Western China

WANG Jingchun, LIU Kailin, LI Yonghao

Structure Health Monitoring and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University (Hebei Shijiazhuang, 050043)

[ABSTRACT] During the excavation of Xiahe Tunnel in Gannan Tibetan Autonomous Prefecture, Gansu Province, the micro-vibration controlled blasting technology of mountain tunnel in high altitude environment was studied to reduce the impact of blasting vibration on the surrounding environment. The main problems causing the high vibration intensity of the original scheme were analyzed and summarized, and the blasting parameters were optimized and adjusted. By shortening the driving footage, changing the small-diameter hollow straight hole cutting form, adjusting the blast holes layout and various parameters, applying the digital electronic detonator, a small bench, short footage, millisecond delay and micro-vibration control blasting scheme suitable for the construction of Xiahe Tunnel was finally formed. The field tests show that the blasting outcome is excellent, and the vibration velocity could be controlled within 0.5 cm/s. The blasting technology proposed not only realizes the control of negative impacts, but also can provide reference for tunnel projects in the complex environment.

[KEYWORDS] tunnel; micro-vibration; blasting control; complex environment

引言

随着西部地区经济的发展,基于多山、高海拔的复杂地理环境,特高、特长的山岭隧道成为西部交通建设的必然选择^[1]。故需要对隧道钻爆法施工产生的振动进行精确控制。

学者们对于隧道钻爆施工减振控制方面开展了

许多卓有成效的工作。周慈亮等^[2]详细介绍了某型电子雷管在隧道控制爆破中的应用,介绍了电子雷管的概念、主要功能及在隧道控制爆破中的优势。赵志刚等^[3]为减少超大断面黄土隧道开挖爆破对既有隧道中人、车通行安全的影响,对爆破参数及施工工序进行了设计研究,提出了合理的爆破施工参数及控制技术。王松青等^[4]利用现场条件与爆破器材,通过对钻爆法施工方案和爆破参数进行修改,

* 收稿日期:2021-12-12

基金项目:铁路隧道衬砌脱空的裂损机理及其失稳前兆的研究(51608336);片岩隧道松动圈控制技术研究(YC2022067)

第一作者:王景春(1968-),男,博士,教授,主要从事隧道工程及安全技术研究。E-mail: wjc36298@163.com

通信作者:刘凯林(1998-),男,硕士研究生,主要从事爆破安全技术方面的研究。E-mail: 925544643@qq.com

有效地控制了爆破振动对周围建筑物的扰动,在复杂环境隧道控制爆破中有较好的应用。陈至昊等^[5]依据控制爆破的相关理论,优化掏槽形式、改变炮孔排间距,使爆破振速降至 0.5 cm/s 以内,实现了浅埋隧道微振控制爆破。傅洪贤等^[6]在隧道施工中引入电子雷管,并在现场进行单孔连续起爆试验,根据振动监测结果优化爆破参数和减振措施,形成有效的隧道微振爆破技术。

这些研究的背景各具特点,但大部分爆区周围环境复杂性相对较弱,爆破施工对周边危害小,受保护对象和所需考虑因素单一。目前,复杂环境下山岭隧道的爆破振动控制和爆破施工技术研究较少^[7],对低振速要求下掘进尺、爆破参数以及施工方法等尚无较好的确定方法,更少有施工遇到影响少数民族生活区(人文敏感地带)的特殊情况。

以高海拔山岭隧道——夏河隧道为工程背景,综合考虑隧道近距离穿越周围有藏民生活区的山岭、环境复杂、房屋结构稳定性差等特点,从爆破施工和振动控制方面入手,对复杂环境隧道微振控制爆破技术进行研究,以实现安全爆破开挖以及对人文、生态环境的保护。

1 工程概述

夏河隧道地处甘肃省甘南藏族自治州夏河县,整体呈东西走向,海拔 3 030 ~ 3 542 m。隧道右线 K24 + 572 ~ K25 + 084,左线 ZK24 + 560 ~ ZK25 + 109,两线间距 20 m,跨度 12.16 m,断面形状为马蹄形。隧道施工采用新奥法,由东向西单向爆破开挖,施工时左线先行 25 m。所在山体陡峻,洞身岩性为三叠系薄层泥质板岩夹砂质板岩,节理发育,围岩级别以Ⅳ级为主,最大埋深约 220 m。

1.1 周边环境

爆破地点 K25 + 084 与 ZK25 + 109 及其以东沿线 200 m 周边环境复杂,如图 1 所示。黄茨滩村房屋分布在秦达公路两旁:公路东边房屋紧邻开挖山体,与隧道水平距离为 30 m;公路西边房屋密集,最近距离 50 m。隧道北边为家禽养殖场,距离 50 m;西南侧为明德小学。洞口段外与高架桥相连,隧道轴线地面标高与村庄地面标高相差 10 m。

1.2 工程难点

人在安静环境下对于大于0.6cm/s的地面振速会有明显的不适感觉,而广义的微振爆破概念为不会让人有不适感觉^[8]。鉴于本工程隧道围岩强度低、洞壁稳定性较差,且周边环境复杂等情况,将

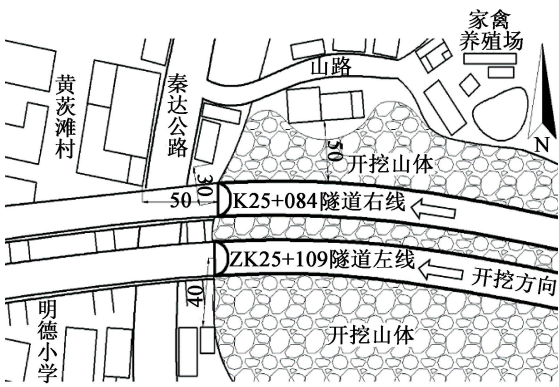


图 1 隧道周边示意图(单位:m)

Fig.1 Schematic diagram of the tunnel and its surroundings (unit: m)

其概念量化,认为当振速控制在 0.5 cm/s 以下,即实现微振爆破。

项目工程难点如下:

1)高海拔地区气候环境恶劣,施工条件受限,人员及机械设备的工效大幅下降,有效工作时间短,爆破质量难以保证。在工期内安全顺利通成隧道,时间紧、任务重、难度大^[9]。

2)附近有村庄、学校、养殖场,四周需要保护的目标较多,距离近、要求高、安全顾虑大。

3)村庄房屋类型多为 20 世纪 70~80 年代修建的土坯房、砖房,部分墙体存在可见裂缝,自身抗拉和抗剪强度低,存在安全隐患。因此,对爆破振动控制是本次工程重点之一。

4)该地段为藏民生活区域,属人文环境敏感地带,爆破与施工的不良影响需从生态与人文多点出发考虑。

2 爆破方案

2.1 原爆破方案及效果分析

原爆破方案采用上、下台阶法开挖,上台阶超前开挖 12.0 m,单循环进尺 3.0 m,炮孔直径 42 mm。掏槽为多级复式楔形掏槽,孔深 3.3 m,单孔装药量 1.20 kg;周边孔深 3.1 m,孔间距 0.6 m,单孔装药量 0.63 kg,线装药密度 0.20 kg/m,密集系数为 0.83;辅助孔深 3.1 m,单孔装药量 0.60 kg,孔间距 0.7~1.0 m;底板孔深 6.2 m,单孔装药量 0.65 kg,孔间距 0.6 m。受高海拔严寒条件影响,乳化炸药极易冻结、硬化、变形^[10],降低装填与爆破质量;故选用 2#岩石硝铵炸药,规格为 $\varnothing 32$ mm、200 g。除周边光面孔采用间隔装药外,其他炮孔为连续装药结构。起爆方式为孔内毫秒延期起爆,导爆管连接,雷

管起爆。

施工后发现,村庄以及养殖场处多次感受到明显振感。经检测,村中部分地区爆破振动强度超过安全标准要求,房屋结构安全存在隐患。除此之外,还存在噪音扰民的情况。

原爆破方案设计主要为提高施工效率,缩短施工工期,减少高海拔地区恶劣环境下作业时间;而当开挖接近复杂区域时,未能顾及对周边环境的影响。原方案爆破振动强度过大,究其原因主要有:第一,掘进尺选择过长,单次爆破开挖量大,对周围环境扰动明显,且增加了方案整体设计的炸药用量;第二,采用的多级复式楔形掏槽,虽有利于提高循环进尺,扩大槽腔体积,但掏槽深、炮孔多、药量大,掏槽孔单段最大起爆药量超标;第三,起爆网路设计不合理,雷管延期起爆时间间隔选择过短,而所需分部起爆的段别过多,传统雷管段别有限,且高段位雷管漂移时间大,引爆误差明显,同时起爆炮孔最长达 80 个,振动叠加效应显著。

2.2 爆破方案优化

根据上述分析结果,重新将周边复杂环境纳入考虑,坚持多打孔、弱爆破、少扰动的原则,对方案进行优化。

2.2.1 掘进尺优化

原爆破方案为增大有效进尺,仅设计单循环炸药量达 210 kg,各段别药量偏大,而段别数量有限,有害效应难以控制。

现方案决定,减小单次爆破规模,以控制不影响周围房屋的安全振速为前提。经计算并结合现场测量反馈后发现,当循环进尺控制在 1.0 m 左右时,单段药量适宜,可确保爆破掘进安全高效,易于实现微振爆破要求。因此,现方案采用 1.0 m 短进尺、上台阶超前开挖 5.0 m 的小台阶控制爆破方案。

2.2.2 掏槽孔优化

掘进尺缩短后,对掏槽形式进行修改。考虑到隧道所在山体的围岩裂隙及节理发育,采用有利于降低爆破振动的直眼掏槽方式。掏槽孔布置为小直径中空直孔掏槽形式,分为两圈,形状如图 2 所示。中心圆圈的空孔可为掏槽孔增加自由面,减小岩石的夹制作用,降低掏槽孔爆破时的振动。

2.2.3 减振控制

高海拔、低温条件将影响传统爆破器材的各项使用性能,进而影响控制爆破的效果。由于数码电子雷管有着较好的抗水性、抗寒性,且能够根据实际需要来设置延期间隔时间,因此,更能满足高海拔复杂环境下的减振需求^[11]。决定引入数码电子雷管

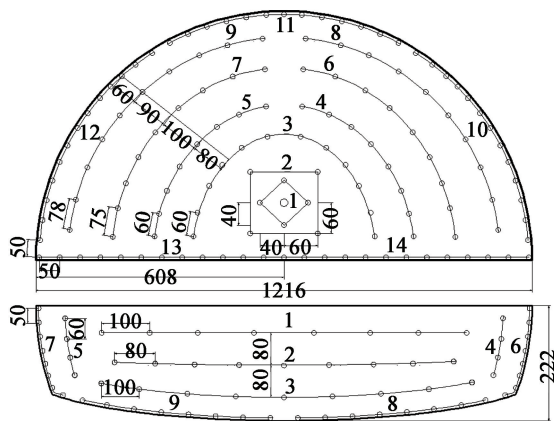


图 2 炮孔布置及段别(单位:cm)

Fig. 2 Arrangement of blast-holes and sections (unit: cm)

代替原方案的导爆管雷管,以提高延期精确性,降低振动叠加效应,实现爆破的精细化控制。

入孔前,对数码电子雷管扫描录入时做好分组标记,每组电子雷管按录入顺序用记号笔写上段别,不仅利于工人掌握,且方便后续组网与在线检测,确保无故障可靠起爆。每孔双发雷管,分别装在药柱底部 1/3 和 2/3 处,两发雷管起爆时间一致。延期时间方面:周边孔、辅助孔相邻段别间延期 50 ms;掏槽孔、底板孔相邻段别间延期 100 ms;不同炮孔之间延期 100 ms。

最后,根据隧道整体施工状况与地面振动情况不断调整,优化出适合该地段的隧道掘进爆破参数,形成了适用于夏河隧道复杂环境下短进尺、小台阶、微振动的控制爆破方案。其中,光面孔距 0.5 m,最小抵抗线 0.6 m,线装药密度 0.24 kg/m,装药结构为不耦合装药;钻孔后保证孔壁干燥,避免积水结冰;装药完及时用沙子、岩粉等干固体填塞,注意填塞质量;按照设定延期时间起爆。具体爆破参数见表 1。炮孔布置以及段别见图 2。

2.3 爆前准备工作

1) 由 GB 6722—2014《爆破安全规程》中的公式 $v = K(Q^{1/3}/R^\alpha)^{[12]}$, 严格控制振速来验算最大单段装药量是否安全。海拔高、空气稀薄、气候干燥等特殊条件下,即使同类岩体,系数 K 与衰减指数 α 也会存在较大差异。为确保控制效果,通过现场试爆试验对 K 、 α 进行修正。

2) 将人群密集区域和存在安全隐患的民房设置为重点监测地点,以实时监测结果为依据,结合藏民感受,对爆破方案进行动态调整^[13]。

3) 施工前做好协商工作,爆破活动安排在每天固定时间段内,避开休息时间,周围 300 m 设定为警

表 1 台阶法开挖炮孔参数
Tab.1 Parameters of blasting holes in excavation by bench method

方法	炮孔种类	个数	孔深/ m	单孔药量/ kg	虚拟段别	延期时间/ ms	最大单段药量/ kg	总药量/ kg
上 台 阶	掏槽孔 1 [#]	5	1.2	0.47	1	0	1.88	1.88
	掏槽孔 2 [#]	4	1.2	0.44	2	100	1.76	1.76
	辅助孔	66	1.0	0.32	3~9	200~500	3.84	21.12
	周边孔	39	1.0	0.24	10~12	600~700	3.12	9.36
	底板孔	25	1.1	0.35	13~14	800~900	4.55	8.75
合计		139						42.87
下 台 阶	辅助孔	32	1.0	0.30	1~5	0~200	2.70	9.60
	周边孔	16	1.0	0.24	6~7	300~350	1.92	3.84
	底板孔	16	1.1	0.35	8~9	450~550	2.80	6.30
	合计	64						19.74

戒区域,爆破前释放警戒信号。

3 爆破振动及效果

本爆破工程的主要危害效应是爆破振动。采用中国科学院 TC-4850 爆破测振仪监测,仪器布置在距隧道较近民房附近。

几次试爆后,选取代表性地点监测结果波形图,见图 3。可以看出,0~0.5 s 内,波形曲线之间具有较为明显的微差间隔,数码电子雷管成功发挥精细控制作用,相比原方案,爆破振动叠加被有效削弱。另外,图 3 中,爆破峰值振速为 0.48 cm/s,略大于采用萨道夫斯基公式计算的理论值,这可能与各段别选取的微差时间间隔有关,但整体数据相差不大。

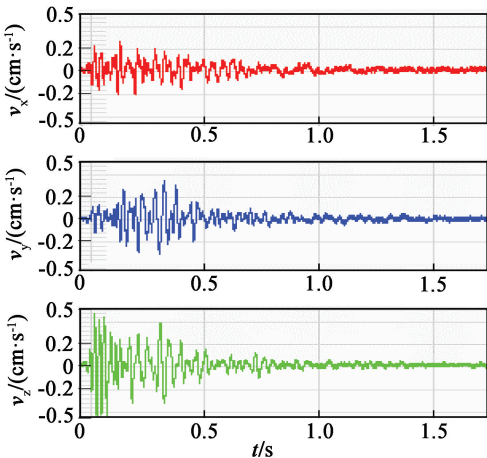


图 3 振动波形图

Fig.3 Vibration waveform

爆破后测得多组振动数据均满足 GB 6722—2014《爆破安全规程》中振动频率 $f>50\text{ Hz}$ 时对土

坯房、毛石房的安全控制要求,且振速控制在 0.5 cm/s 以内。随后,对附近居民进行访问调查,均感觉振动较小,学校处几乎无振感,未对藏民生活造成影响,达到微振爆破标准。

爆破施工后,隧道现场爆破效果良好,单循环进尺稳定在 1.0~1.1 m,未见明显的超欠挖现象,掌子面平滑规整,炮孔利用率达 90% 以上,在实现低爆破振速条件下,保障了掘进速度,隧道顺利经过敏感地区。实践证明,设计的方案可以满足复杂环境下控制爆破的需求,取得了良好的社会效益。

4 结论

1)高海拔复杂环境下,隧道爆破掘进采用 1.0 m 短进尺、5.0 m 小台阶、毫秒延期起爆的爆破方法,可以有效保证隧道的施工效率,维持弱围岩隧道结构的稳定性,降低爆破施工对周边环境的影响。

2)爆破振动的控制是复杂环境下施工的关键。通过对掘进尺、掏槽形式等进行优化,改变爆破参数,采取减振措施,可将建筑物处的振速控制在 0.5 cm/s 以下,并极大地消除居民的恐惧心理和不适感觉,满足微振爆破要求。

3)在高海拔条件下,数码电子雷管不仅发挥了对环境良好的适应性,而且通过设定不同部位炮孔的延时间隔起爆,有效地发挥了错峰降振的作用,可较好地应用于高海拔地区的爆破施工。

参 考 文 献

[1] 刘敦文,江树林,唐宇,等. 穿越脉状破碎断层隧道

- 光面爆破技术研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(2): 79-84.
- LIU D W, JIANG S L, TANG Y, et al. Research on smooth blasting technology of tunnel passing through broken vein fault[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2): 79-84.
- [2] 周慈亮, 汤有富, 郑琪, 等. 某型电子雷管在隧道控制爆破中的应用[J]. 爆破器材, 2021, 50(3): 51-54.
- ZHOU C L, TANG Y F, ZHENG Q, et al. Application of an electronic detonator in tunnel controlled blasting[J]. Explosive Materials, 2021, 50(3): 51-54.
- [3] 赵志刚, 张文喆, 王伟, 等. 大断面黄土隧道近距离爆破控制效果分析[J]. 爆破器材, 2020, 49(2): 52-58.
- ZHAO Z G, ZHANG W Z, WANG W, et al. Control effect of closed distance blasting in large section loess tunnel[J]. Explosive Materials, 2020, 49(2): 52-58.
- [4] 王松青, 张全峰, 汪海波, 等. 武汉地铁区间隧道下穿建筑物爆破振动控制技术研究[J]. 工程爆破, 2020, 26(1): 85-90.
- WANG S Q, ZHANG Q F, WANG H B, et al. Research on blasting construction technology in subway tunnel beneath buildings in Wuhan[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(1): 85-90.
- [5] 陈至昊, 王海亮, 邹德蕴. 浅埋暗挖隧道侧穿危楼的微振动爆破技术研究[J]. 爆破, 2019, 36(3): 37-42.
- CHEN Z H, WANG H L, ZOU D Y. Blasting technology with micro-vibration for shallow tunnel through the side of dilapidated residential buildings[J]. Blasting, 2019, 36(3): 37-42.
- [6] 傅洪贤, 赵继罡, 高宇璠. 铁路隧道近距下穿地铁隧道的微振爆破技术[J]. 铁道工程学报, 2019(9): 72-78.
- FU H X, ZHAO J G, GAO Y F. Micro-vibration blasting technology for railway tunnels beneath existing metro tunnel in short distance[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019(9): 72-78.
- [7] 傅洪贤, 孔恒, 吴进科. 复杂环境下隧道爆破施工控制技术[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊2): 286-291.
- FU H X, KONG H, WU J K. Controlled technology of tunnel blasting in complex environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(Suppl. 2): 286-291.
- [8] 杨年华. 爆破振动理论与测控技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [9] 王腾蛟, 姜波, 李海川, 等. 复杂环境下洞库爆破开挖安全技术[J]. 工程爆破, 2020, 26(2): 49-56, 64.
- WANG T J, JIANG B, LI H C, et al. Safety technology of cavern blasting excavation in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 49-56, 64.
- [10] 王涛, 吴校良, 李新, 等. 高寒高海拔露天矿山大规模控制爆破的实践[J]. 工程爆破, 2019, 25(1): 60-63.
- WANG T, WU X L, LI X, et al. Practice of large-scale controlled blasting in high cold and high altitude open pit mines[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1): 60-63.
- [11] 叶春雷, 郑德明, 戴春阳, 等. 复杂环境下数码电子雷管在土石方爆破工程中的应用[J]. 爆破, 2019, 36(4): 76-79, 95.
- YE C L, ZHENG D M, DAI C Y, et al. Application of digital electronic detonator in soil-rock blasting engineering in complex situation[J]. Blasting, 2019, 36(4): 76-79, 95.
- [12] 国家安全生产监督管理总局. 爆破安全规程: GB 6722—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- State Administration of Work Safety. Safety regulations for blasting: GB 6722—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [13] 郭明福, 王海亮, 徐品德, 等. 复杂环境下火车站场地平整控制爆破[J]. 工程爆破, 2021, 27(3): 70-73, 112.
- GUO M F, WANG H L, XU P D, et al. Controlled blasting for railway station ground leveling in a complex environment[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(3): 70-73, 112.