doi:10.3963/j. issn. 1001 -487X. 2023. 02. 010

隧道仰拱部位光面爆破技术及工程应用*

李向平[1],龚伟毅[1],张 震[2]
(1. 中铁十二局集团 第一工程有限公司,西安 710038;2. 江汉大学 精细爆破国家重点实验室,武汉 430056)

摘 要: 隧道仰拱部位采用传统爆破开挖技术开挖错台大、超挖严重。仰拱传统爆破开挖技术未采用光面爆破方法且人工凿岩钻机钻凿周边孔外插角过大是导致超挖严重的重要原因。针对隧道仰拱传统爆破开挖技术存在的问题,基于大量工程实践,结合光面爆破理论提出了隧道仰拱部位光面爆破技术。仰拱部位光面爆破技术周边孔采用间隔装药,采用水袋填塞装药间隙,根据仰拱断面形状调整周边孔装药参数。仰拱轮廓线上周边眼距离为30~50 cm,光爆层的厚度大于周边眼间距10~30 cm。采用钻孔反力支座可以减小周边孔钻孔外插角,保证每个炮孔均钻至设计深度,有效控制超挖。结合实际工程开展现场试验对比仰拱采用光面爆破技术与传统爆破开挖技术的爆破效果,采用光面爆破技术仰拱轮廓超挖远远小于采用传统爆破技术开挖。对比仰拱分别采用光面爆破技术和传统爆破开挖技术开挖12 m的成本,仰拱采用光面爆破技术开挖成本较采用传统方法降低35.14%,仰拱部位采用光面爆破技术开挖具有显著的经济效益。

关键词: 隧道仰拱;传统爆破开挖技术;光面爆破技术;超挖;爆破效果
中图分类号: U25;U455.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 -487X(2023)02 -0069 -06

Smooth Blasting Technology for Tunnel Inverted Arch and its Engineering Application

LI Xiang-ping[1], *GONG Wei-yi*[1], *ZHANG Zhen*[2]
(1. The 1st Engineering Co., Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, Xi′an 710038, China;
2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: The dislocation and overbreak of tunnel inverted arch are serious when traditional blasting excavation technology is used. This is because traditional blasting technology does not adopt the smooth blasting method, and the angle of the perimeter holes is too large when drilled by manual rock drilling rigs. By therefore analyzing the traditional blasting excavation technique of invert, the cause of serious studiedthe smooth blasting technology for inverted arch is proposed based on the smooth blasting theory and a large quantity of engineering practice. Water decking charge structure is adopted in the perimeter holes, which can be adjusted according to the inverted arch shape. The spacing between the perimeter holes is 30~50 cm, and the thickness of the smooth blasting layer is greater than the perimeter hole spacing by 10~30 cm. Additionally, a drilling counterforce support is used to reduce the angle of the perimeter holes which can ensure each blast hole to be drilled to the design depth. After comparing the blasting effects of the proposed smooth blasting technology and traditional blasting technology for the inverted arch by field tests, the contour overbreak by the smooth blasting technology is far less than that of traditional blasting technology, and the cost of every 12 m tunnel excavation is reduced by 35.14%.

Key words: tunnel inverted arch; traditional blasting excavation technology; smooth blasting technology; over-

收稿日期: 2023 -01 -23
作者简介: 李向平(1979 -),男,高级工程师,从事隧道与地下工程方面的研究工作,(E-mail)14257536@qq.com。
通讯作者: 张 震(1993 -),男,讲师、工学博士,主要从事工程爆破方面的研究工作,(E-mail)zhangzhen9168@163.com。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42102329);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重大课题(K2021G024)

break; blasting effect

隧道仰拱结构是在隧道底部设置的将整个衬砌结构组合成一个闭环的反向拱形支护结构，是隧道支护体系的重要组成部分之一。《铁路隧道设计规范》(TB10003—2016)中指出，采用钻爆法施工隧道一般宜设置仰拱[1]。隧道仰拱与上部衬砌结构封闭成环，可以提高支护体系承载力，对限制隧道周边位移，控制隧道围岩塑性区的发展有着重要的作用[2-4]。仰拱部位采用钻爆法开挖时，超欠挖往往难以避免，过量超欠挖对隧道施工安全生产和工程质量有重大影响，同时会严重影响工程经济效益[5-7]。

隧道开挖过程中超欠挖控制是隧道工程和工程爆破领域的重要研究课题，国内外学者基于大量隧道钻爆法开挖工程，分析总结了导致隧道超欠挖的因素并提出相应的超欠挖控制措施。Mottahedi 等将导致隧道超欠挖的因素分成可控、非可控、半可控三类，并采用混合 ANFIS-PSO 模型对隧道超挖进行预测[8]。马元磊和贺鹏在过断层巷道掘进中采用光面爆破方案，有效控制了巷道超欠挖[9]。梁东彪基于现场试验及数值模拟研究了周边孔爆破参数对隧道超欠挖的影响[10]。张继春等结合实际特大断面隧道爆破开挖工程，经现场爆破试验提出了隧道光面爆破开挖方案，有效控制了围岩超欠挖及爆破损伤[11]。冯海暴等基于九瑞高速岩质隧道工程，根据实际调查和现场试验，提出了影响超欠挖和造价耗费的主要因素及控制措施[12]。Chen 等指出传统周边孔钻孔模式忽略了初衬的影响，隧道初衬的存在导致周边孔钻孔外插角过大，隧道超挖严重，并提出了长短孔联合的周边孔钻孔新模式以控制隧道超欠挖[13]。通过文献调研发现，现有研究中学者多是针对隧道上部轮廓的超欠挖问题进行研究，针对隧道仰拱部位钻爆法施工的超欠挖分析及控制技术研究少有涉及。

对隧道仰拱部位采用传统爆破开挖技术超挖严重的原因进行了分析。针对隧道仰拱传统爆破开挖技术存在的问题，基于大量工程实践，提出了基于钻孔反力支座的减小周边孔外插角的钻孔方法，并对仰拱周边孔进行光面爆破设计，综合提出了隧道仰拱部位光面爆破技术。最后结合实际工程开展现场试验对比了仰拱采用光面爆破技术与传统爆破开挖技术的爆破效果及成本。

1　传统爆破开挖技术隧道仰拱超挖分析

传统的隧道仰拱部位爆破开挖采用抬炮，仰拱轮廓周边孔采用连续装药，爆破开挖未采用光面爆破方法。周边孔采用连续装药时，炮孔轴线方向装药位置爆炸产生的压力远大于炮孔周边岩石的极限抗压强度，周边岩石形成压碎圈。因此，炮孔间未能沿周边孔连线形成裂缝，仰拱轮廓圆顺度较差，超挖严重。

此外，考虑到仰拱部位开挖面积及施工效率，炮孔一般采用气腿式风动凿岩钻机人工钻凿。凿岩机钻孔时支腿承担凿岩机工作时产生的后座力并对凿岩机施加适当的轴推力。钻凿仰拱轮廓上的周边孔时，为了发挥凿岩机支腿的支撑作用，提高钻孔效率和稳定性，需要保证气腿与地面呈一定角度，此时钻孔外插角相较于隧道上部轮廓周边孔外插角更大，仰拱每循环开挖接茬错台较大，仰拱部位超挖严重。图 1 为仰拱部位周边孔钻凿示意图。

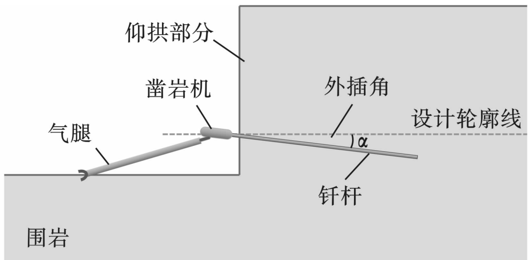


图 1　仰拱部位周边孔钻凿

Fig. 1　Drilling of the perimeter hole at inverted arch

2　隧道仰拱部位光面爆破技术

为了解决隧道仰拱超挖严重的问题，基于光面爆破理论，在大量工程实践的基础上，总结提出了隧道仰拱部位光面爆破技术。

2.1　隧道仰拱部位光面爆破施工技术要求

仰拱作为隧道施工中的重要工序，控制好仰拱超欠挖，能够很好地降低施工成本、提高施工质量。基于大量工程实践，提出隧道仰拱部位光面爆破施工技术要求如下：

(1)仰拱部位零欠挖、少超挖，平均线性超挖量控制在 12 cm 以内。

(2)仰拱周边眼痕迹保存率，硬岩不应小于 80%，中硬岩不应小于 65%，并应在仰拱开挖轮廓面上均匀分布。

(3)仰拱每循环开挖接茬错台不大于 15 cm。

2.2　隧道仰拱部位光面爆破技术要点

2.2.1　爆破设计

隧道爆破开挖效果受地质条件影响较大，因此

在对仰拱部位进行爆破设计时需要辨析地层岩性、围岩完整程度、节理裂隙等地质条件。此外,通过采集现场岩样开展岩石物理力学实验获得岩石单轴饱和抗压强度等参数,为仰拱部位光面爆破设计提供基础。

基于地质条件及岩石力学参数,参考爆破手册及工程经验设计仰拱部位光面爆破方案。周边眼沿着仰拱轮廓线布设,当地质条件相对较差时可向内偏移一定距离,偏移距离根据现场试验不断优化确定。仰拱轮廓线上周边眼距离为 30 ~ 50 cm,地质条件较差时取小值,地质条件较好时取大值。仰拱部位周边眼与相邻辅助眼的距离,即光爆层的厚度大于周边眼间距 10 ~ 30 cm。

仰拱轮廓线上周边眼装药采取间隔装药,根据光面爆破工程经验,周边孔装药长度通常为炮孔长度的 20% ~ 30%。仰拱部位两端与隧道边墙连接位置因开挖层厚度减小,仰拱部位两端一定范围周边眼装药量作适当降低调整,以免因装药过多导致两端超挖。此外,周边眼装药药卷之间间隙可以采用水袋填充,利用水的不可压缩特性均匀的将炸药爆炸荷载传递到炮孔内的各个位置。

2.2.2　钻孔

为了解决人工钻凿仰拱周边孔时外插角过大,仰拱开挖错台及超挖严重的问题,通过配置钻孔反力支座减小气腿与地表之间的夹角,进而可以起到降低周边孔外插角的目的。图 2 为工程实践中使用的钻孔反力支座。仰拱部位周边孔钻孔时,气腿端部抵在开挖反力支座横梁上以提供反力,此时气腿与地表之间夹角可以足够小,钻杆可尽可能贴近仰拱设计轮廓线,周边孔的外插角大大减小。钻孔反力支座对钻孔角度起到保障作用,且可保证每个炮孔均钻至设计深度,可有效控制超挖。

图 2　钻孔反力支座

Fig. 2　Counterforce support for drilling

人工钻凿仰拱部位炮孔时钻进速度每分钟不得大于 0.5 m,岩质较硬地段应降低钻速,防止钻速过快造成飘钻,影响钻孔质量。施工过程中由现场技术员负责对钻孔过程进行盯控,当发现炮眼水流颜色发生变化、突进等异常情况时及时记录,并在装药前对开挖班进行交底,以便及时调整炸药用量。

3　仰拱光面爆破技术现场应用

3.1　工程概况

某山岭隧道设计断面面积为 116.33 m^2,设计采用钻爆法施工。隧道穿越Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩,其中Ⅱ、Ⅲ级围岩段隧道采取全断面开挖,Ⅳ、Ⅴ级围岩采用台阶法开挖。隧道施工时仰拱部分最后开挖,与掌子面相隔一定安全步距。图 3 给出了隧道仰拱开挖轮廓,仰拱开挖断面面积为 15.31 m^2。隧道穿越Ⅲ级围岩时,开展了仰拱光面爆破开挖试验并与传统仰拱爆破开挖效果进行了对比。

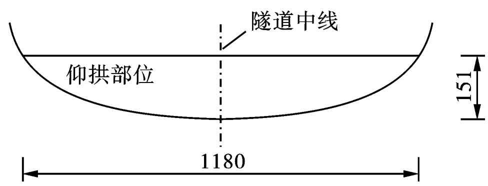


图 3　仰拱轮廓(单位:cm)

Fig. 3　Inverted arch contour(unit:cm)

3.2　仰拱开挖爆破设计

基于第 2.2.1 节内容,开展仰拱部位光面爆破设计。仰拱部位围岩为Ⅲ级,设计开挖进尺为 3 m。周边眼布置在仰拱轮廓线上,周边眼间距取 40 cm。辅助眼间距取 100 cm,仰拱部位周边眼与相邻辅助眼的距离取 70 cm。仰拱部位炮孔布置如图 4 所示。

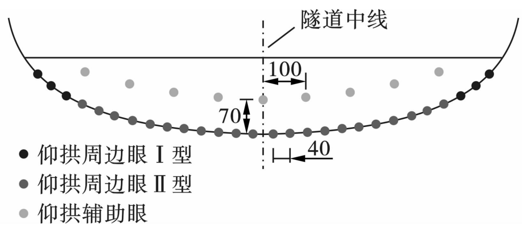


图 4　仰拱部位炮孔布置(单位:cm)

Fig. 4　Blasthole arrangement of inverted arch(unit:cm)

仰拱轮廓线上周边眼采取间隔装药,辅助孔采取连续装药。炸药为 2 号岩石乳化炸药,直径 32 mm,单根药卷重量为 0.3 kg。周边眼分两种类型,轮廓两端周边眼装药量作适当降低调整。表 1 给出了仰拱开挖爆破具体参数。仰拱部位设有Ⅰ型周边眼 22 个,每个炮孔内装有 2.5 节炸药,单孔药量为 0.75 kg。仰拱部位设有Ⅱ型周边眼 6 个,每个炮孔内装有 2 节炸药,单孔药量为 0.60 kg。仰拱部位设有辅助孔 9 个,每个炮孔装有 3 节炸药,单孔装

药量为 0.9 kg。周边眼装药间隙填塞水袋,所有炮孔孔口采用水袋进行封堵,单节水袋长度为 30 cm。图 5 为周边孔及辅助孔的装药结构图。

表 1　仰拱开挖爆破参数

Table 1　Blasting parameters of inverted arch excavation

炮孔类型	数量	段位	孔深/m	单孔药量/kg	小计/kg	装药类型
仰拱周边眼Ⅰ型	22	3	3	0.75	16.5	间隔装药
仰拱周边眼Ⅱ型	6	3	3	0.60	3.6	间隔装药
仰拱辅助孔	9	1	3	0.90	8.1	连续装药

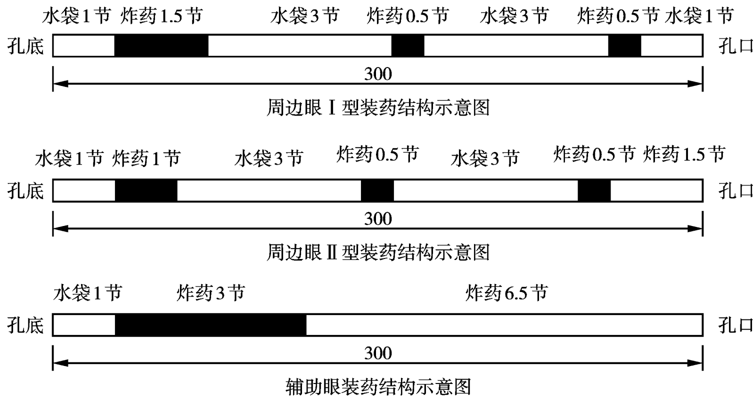


图 5　装药结构(单位:cm)

Fig. 5　Charge structures(unit:cm)

3.3　爆破施工

钻孔前,测量员对仰拱轮廓进行放样,根据爆破设计将炮孔布置在仰拱开挖断面上,钻孔人员根据炮孔标记位置钻孔。钻凿炮孔时凿岩机气腿支撑在钻孔反力支座上,钻杆尽可能保持水平,从而减小仰拱轮廓周边孔的外插角,降低仰拱部位的超挖。图 6 给出了利用钻孔反力支座进行仰拱部位周边孔钻孔的现场图。

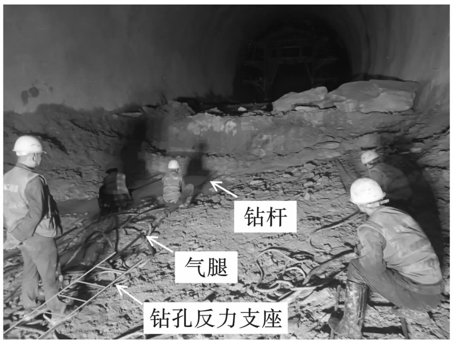


图 6　周边孔钻孔

Fig. 6　Drilling of perimeter blastholes

钻孔完毕后,爆破班组按照爆破设计填塞炸药,安装起爆网路,经检查无误后起爆。待通风完成后,爆破人员入场检查有无盲炮,确认安全后进行出渣及基底清理工作。采用挖机进行出渣,出渣时为避免机械对基底破坏,预留 20 cm 人工配合机械清理。

清底完成后,由爆破技术人员对仰拱爆破效果进行分析,根据轮廓圆顺度、炮眼残留率、错台大小、超欠挖情况、开挖进尺等对爆破效果总结分析,针对本次爆破存在的问题制定改进措施,后续施工中严格把控问题环节或进行参数调整,最终实现爆破优化。

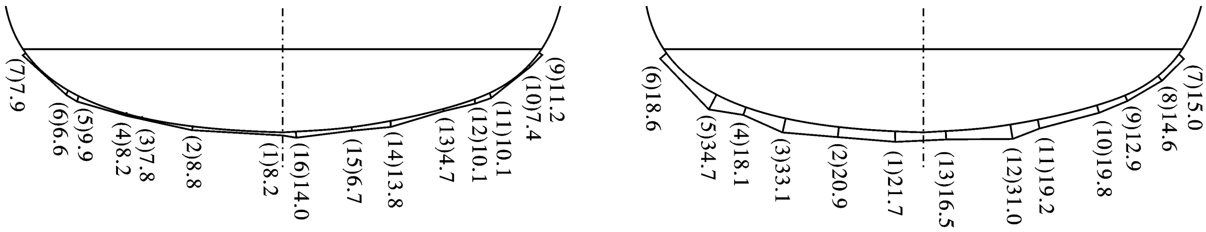
3.4　仰拱光面爆破效果及成本分析

为了评估仰拱光面爆破效果,清底后对仰拱轮廓面进行三维扫描,形成断面扫描数据。将仰拱光面爆破开挖断面与采用传统爆破技术开挖断面进行对比,分析仰拱光面爆破技术对仰拱超欠挖控制的效果。图 7 给出了仰拱采用光面爆破技术及传统爆破技术开挖后的典型断面超欠挖分布。

由图 7 可以看出,两种方法开挖仰拱部位都未产生欠挖。采用光面爆破技术开挖仰拱,测量得到超挖面积为 0.254 m^2,最大超挖为 14 cm。采用传统爆破开挖技术开挖仰拱,测量得到超挖面积为 1.087 m^2,最大超挖为 33.1 cm。仰拱采用传统爆破开挖技术超挖面积是采用光面爆破技术的 4.28 倍,采用光面爆破技术仰拱轮廓超挖远远小于采用传统爆破开挖技术。此外,经测量仰拱采用光面爆破开挖平均线性超挖控制在 10 cm 以内,接茬错台控制在 5 cm 以内,炮眼残留率控制在不小于 80%。图 8 给出了采用光面爆破技术的仰拱爆破效果。

表 2 对比了仰拱分别采用光面爆破技术开挖和

传统爆破技术开挖 12 m 的成本,其中混凝土只计算了超耗用量。分析数据可以得到,采用传统爆破技术开挖,混凝土超耗费用占据总费用的 70.22%,而采用光面爆破技术开挖混凝土超耗费用仅占总费用的 42.37%。仰拱采用光面爆破技术开挖成本较采用传统爆破技术开挖降低 35.14%,因此仰拱部位推广采用光面爆破技术开挖具有显著的经济效益。



(a) 光面爆破技术
(a) Smooth blasting technology

(b) 传统爆破开挖技术
(b) Traditional blasting excavation technology

图 7　仰拱断面超挖(单位:cm)
Fig. 7　Overbreak of inverted arch(unit:cm)

图 8　仰拱光面爆破效果
Fig. 8　Smooth blasting effect of inverted arch

4　结论

分析了隧道仰拱部位采用传统爆破开挖技术开挖超挖严重的原因。基于光面爆破理论,在大量工程实践的基础上,总结提出了隧道仰拱部位光面爆破技术,得到结论如下:

1)隧道仰拱部位采用传统爆破开挖技术超挖严重的重要原因是周边孔未采用光面爆破方法且人工凿岩钻机钻凿周边孔外插角过大。

2)隧道仰拱部位光面爆破设计需考虑地质条件影响,仰拱轮廓线上周边眼距离为 30 ~ 50 cm,光爆层的厚度大于周边眼间距 10 ~ 30 cm,周边眼装药采取间隔装药,装药间隙采用水袋填充。

表 2　仰拱开挖成本分析
Table 2　Cost analysis of inverted arch excavation

开挖方法	项目	指标	单价/元	费用/元	总计/元
光面爆破技术开挖	作业班次	6 人 4 班	200	4800	16 470
	炸药	112 kg	10	1120	
	雷管	188 发	19	3572	
	砼超耗	14.04 m^3	497	6978	
传统爆破技术开挖	作业班次	5 人 4 班	200	4000	25 392
	炸药	128 kg	10	1280	
	雷管	120 发	19	2280	
	砼超耗	35.88 m^3	497	17 832	

3)基于钻孔反力支座人工钻凿周边孔可极大减小周边孔外插角,有效控制超挖。

4)现场试验表明采用光面爆破技术仰拱轮廓超挖远远小于采用传统爆破开挖技术开挖,仰拱部位采用光面爆破技术开挖具有显著的经济效益。

参考文献(References)

[1]　国家铁路局. TB 10003—2016 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社,2017.

[2]　禚振礼. 隧道仰拱结构支护性能研究[D]. 西安:长安

大学,2016.

[2] ZHUO Zhen-li. Research on the supporting performance of tunnel invert structure[D]. Xi′an:Chang′an University, 2016.(in Chinese)

[3] 王明年,翁汉民,李志业. 隧道仰拱的力学行为研究[J]. 岩土工程学报,1996,18(1):46-53.

[3] WANG Ming-nian, WENG Han-min, LI Zhi-ye. Study on the mechanic behavior of tunnel invert[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1996,18(1):46-53.(in Chinese)

[4] 王传武,陈丽俊,陈建勋,等. 大跨度软岩公路隧道仰拱承载性能及安全性研究[J]. 中国公路学报,2022, 35(7):203-215.

[4] WANG Chuan-wu, CHEN Li-jun, CHEN Jian-xun, et al. Research on bearing performance and safety of invert of large-span soft-rock highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(7):203-215.(in Chinese)

[5] 张运良,曹 伟,王 剑,等. 水平层状岩体隧道超欠挖控制爆破技术[J]. 铁道科学与工程学报,2010, 7(5):70-74.

[5] ZHANG Yun-liang, CAO Wei, WANG Jian, et al. Blasting technique for controlling excessive and insufficient excavation in tunnel with horizontal layered rock mass[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2010,7(5): 70-74.(in Chinese)

[6] 王海亮,何 闯. 钢拱架限制下的隧道超欠挖控制爆破技术[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2016, 35(5):49-54.

[6] WANG Hai-liang, HE Chuang. Control blasting technique of overbreak and underbreak under the limitation of steel arch in metro tunnel[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology,2016,35(5):49-54.(in Chinese)

[7] 张 豪,谢明君,韦 征,等. 基于隧道点云数据的超欠挖检测应用研究[J]. 浙江工业大学学报,2021, 49(5):539-545.

[7] ZHANG Hao, XIE Ming-jun, WEI Zheng, et al. Research on application of overbreak-underbreak detection based on tunnel point cloud data[J]. Journal of Zhejiang University of Technology,2021,49(5):539-545.(in Chinese)

[8] MOTTAHEDI A, SERESHKI F, ATAEI M. Overbreak prediction in underground excavations using hybrid ANFIS-PSO model[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,80:1-9.

[9] 马元磊,贺 鹏. 光面爆破技术在过断层巷道掘进的研究与应用[J]. 爆破,2020,37(4):59-62,165.

[9] MA Yuan-lei, HE Peng. Research and application of smooth blasting technique in tunneling through fault[J]. Blasting, 2020,37(4):59-62,165.(in Chinese)

[10] 梁东彪. 周边孔爆破参数对隧道围岩损伤及超欠挖的影响研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.

[10] LIANG Dong-biao. Study on the influence of periphery hole blasting parameters on surrounding rock damage and overbreak and underbreak of tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2019.(in Chinese)

[11] 张继春,潘 强,郑爽英,等. 特大断面公路隧道的光面爆破技术研究[J]. 爆破,2018,35(4):52-57.

[11] ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, ZHENG Shuang-ying, et al. Technique of smooth blasting of highway tunnel with super-large section[J]. Blasting,2018,35(4):52-57.(in Chinese)

[12] 冯海暴,蒋万德,曲俐俐,等. 九瑞高速岩质隧道钻爆法施工超欠挖控制措施及成本分析[J]. 隧道建设, 2012,32(6):887-891.

[12] FENG Hai-bao, JIANG Wan-de, QU Li-li, et al. Overbreak/shortbreak control technology for and cost analysis on rock tunnels constructed by drilling and blasting method: case study on tunnels on Jiujiang-Ruichang highway[J]. Tunnel Construction,2012,32(6):887-891.(in Chinese)

[13] CHEN J, QIU W, ZHAO X, et al. Experimental and numerical investigation on overbreak control considering the influence of initial support in tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2021,115:104017.

英文编辑:陈东方