

## 浅埋偏压铁路隧道爆破施工中的超挖控制与优化

袁枫杰<sup>1</sup> 王昊乾<sup>1</sup> 宋官平<sup>1</sup> 袁浪<sup>1</sup> 高航<sup>1</sup> 徐前卫<sup>2</sup>

(1. 中铁二局第五工程有限公司, 610031, 成都; 2. 同济大学交通运输工程学院, 200092, 上海)

**摘要** [目的]隧道施工的超挖现象会影响隧道开挖的顺利进行与安全性,并且增加施工成本并降低经济效益。隧道施工超挖主要是由爆破施工不合理导致的。为了在根本上解决超挖问题,须对爆破设计及爆破施工工艺进行研究并优化。[方法]结合重庆铁路枢纽东环线(重庆东环线铁路)浅埋偏压上下交叠铁路隧道工程,通过理论分析和现代计算机技术,分析了拱顶、拱腰和拱脚超挖现象的原因,对钻孔位置进行动态优化设计,提出了超挖控制措施和解决方案。[结果及结论]隧道拱顶处的超挖主要由于爆破后机械开挖对破碎区围岩的二次扰动导致,拱腰和拱脚的超挖主要由爆破用药量及钻眼施工的不恰当引起。不仅如此,节理裂隙的存在,也会导致围岩强度大幅降低。因此,应在拱顶处适当爆破欠挖,以降低对围岩的扰动,后续再配合人工和机械开挖修边,进而降低超挖量。其次,根据围岩属性,并基于GA-SVR模型与遗传算法,对炮眼间距进行合理优化。现场监测结果表明,在未采用最优炮眼间距的初始阶段节理发育地层,开挖产生的超挖量约为40 cm,而采用最优炮眼间距后,该超挖量降至9 cm左右,说明设计间距的优化能有效控制隧道超挖。上述成果可为类似工程提供借鉴和参考。

**关键词** 浅埋偏压铁路隧道; 爆破超挖; 机器学习; 控制措施

**中图分类号** U455.6

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2024.06.043

## Construction Optimization of Shallow Railway Tunnels under Unsymmetrical Pressure for Reducing Blasting Over-excavation

YUAN Fengjie<sup>1</sup>, WANG Haoqian<sup>1</sup>, SONG Guoping<sup>1</sup>, YUAN Lang<sup>1</sup>, GAO Hang<sup>1</sup>, XU Qianwei<sup>2</sup>

(1. The Fifth Company of China Railway 2nd Bureau Group 610031, Chengdu, China; 2. School of Transportation Engineering, Tongji University, 200092, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] Over-excavation in tunnel construction, mainly caused by inappropriate blasting, will affect the smooth progress and safety of tunnel excavation, increase construction cost and reduce economic benefits. In order to radically solve this problem, blasting design and blasting construction technology should be studied and optimized. [Method]

Based on the shallow buried unsymmetrical pressured layered railway tunnel project for Chongqing Railway Hub East Ring Line(Chongqing East Ring Railway), the causes of vault, arch haunch and arch foot over-excavation are analyzed with theoretical method and modern computer technology. The drilling positions are designed with dynamic optimization, and control measures and solutions for over-excavation are put forward.

[Result & Conclusion] Over-excavation at the tunnel vault is mainly caused by the secondary disturbance of the surrounding rock in smashed area by mechanical excavation after blasting, and over-excavation at the arch waist and arch foot is mainly caused by the improper amount of blasting explosive and improper drilling. In addition, the existence of rock cracks will also lead to significant decrease of the surrounding rock strength. Therefore, proper blasting and under-excavation should be done at the vault to reduce the disturbance of the surrounding rock, and then manual + mechanical excavation and trimming should be combined to reduce the amount of over-excavation. Secondly, according to the attributes of surrounding rock, and based on GA-SVR model and genetic algorithm, the blasthole spacing is properly optimized. On-site monitoring results show that in the initial stage without optimized blasthole spacing, the over-excavation in cracked stratum is about 40cm, which is reduced to about 9cm after the blasthole spacing optimization. The results indicate that optimizing the blasthole spacing can effectively control tunnel over-excavation. The above results can provide reference for similar projects.

**Key words** shallow railway tunnel under unsymmetrical pressure; blasting over-excavation; machine learning; control measures

## 0 引言

随着我国运输网路加密拓展和建设规模不断扩大,隧道工程面临的地质条件与工程环境也越发复杂。超挖一直是隧道施工中的重难点技术问题。超挖直接可能造成初期支护背后空洞及不必要的混凝土损失,不仅会危及工程质量,还会降低工程

的经济效益。对于节理裂隙发育的围岩,其地质条件存在很大的不可预见性,由超挖导致的施工技术指导和管理存在极大的不可控性<sup>[1]</sup>。

对于隧道超挖预测、影响因素分析及控制措施的研究,已有学者完成了大量的工作。例如,运用神经网络、计算机模拟、结构面地质特征分析和现场调查等手段,对超挖情况进行预测并分析其原因<sup>[2-4]</sup>;采用理论分析、数值模拟与现场监测相结合的方法,对超挖影响因素以及超挖对隧道围岩稳定性的影响进行了分析,并提出控制隧道超挖的工艺措施<sup>[5-8]</sup>。上述研究表明,超挖不仅关系到隧道施工质量,而且对围岩稳定性具有重要的影响。

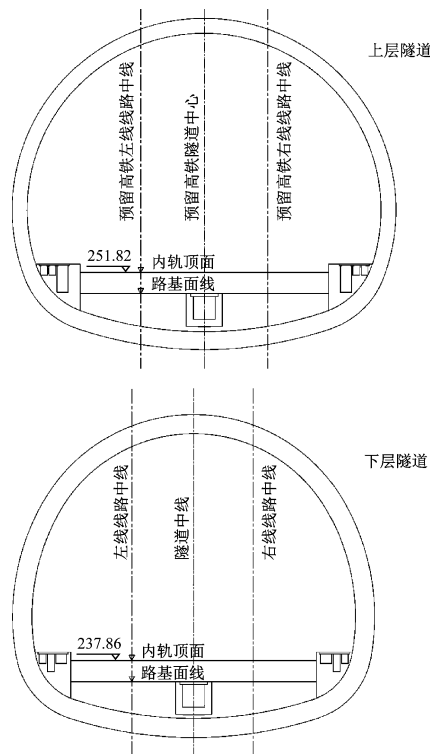
虽然关于隧道超挖的研究工作已有很多,但是关于多节理裂隙地层浅埋偏压交叠隧道超挖的研究尚不多见。如何针对随机性较大的节理裂隙岩体中隧道正确开挖并控制超挖的研究,具有较大的研究价值和指导意义。本文结合某浅埋偏压隧道工程实例,分析了隧道超挖的原因,对钻眼进行动态施工优化与设计,提出超挖解决措施,以期指导现场安全顺利施工,保证工程质量并节约成本,为类似工程的超欠挖控制技术提供参考借鉴。

## 1 工程概况

重庆铁路枢纽东环线的鸡公咀隧道位于重庆市南岸区广阳镇内,为上下层交叠隧道。下层为东环正线双线隧道,全长 472.75 m;上层为预留高铁隧道,全长 380.36 m;拱顶最大埋深为 26.47 m,上下层轨面最小高差为 13.96 m,最小净岩层厚度约为 1.71 m。鸡公咀上下层交叠隧道控制位置断面如图 1 所示。上下层隧道的支护结构采用相同形式,图 2 为鸡公咀下层隧道支护结构示意图。

隧道上覆地层为第四系全新统人工填筑土、坡残积层粉质黏土<4-1>。下伏基岩为侏罗系下统珍珠冲组泥岩夹砂岩<12-1>、三叠系上统须家河组砂岩<13-1>及泥岩<13-2>,节理裂隙较发育。隧址区地质纵断面图如图 3 所示。

由于隧道开挖围岩等级为Ⅳ级和Ⅴ级,为了减少上、下层交叠隧道施工的相互影响,本工程采取先施工下层隧道、后开挖上层隧道的施工方案。下层隧道采取钻爆法施工,对应的炮眼布置如图 4 所示。上层隧道采取两台阶法施工,采用“弱爆破+机械”联合开挖,即上半台阶采取钻爆法施工,下半台阶采用机械开挖,对应的炮眼布置如图 5 所示。



注:图中数据为轨顶标高,单位为 m。

图 1 鸡公咀上下层交叠隧道控制位置断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cross section of control position in Jigongzui overlapping tunnel

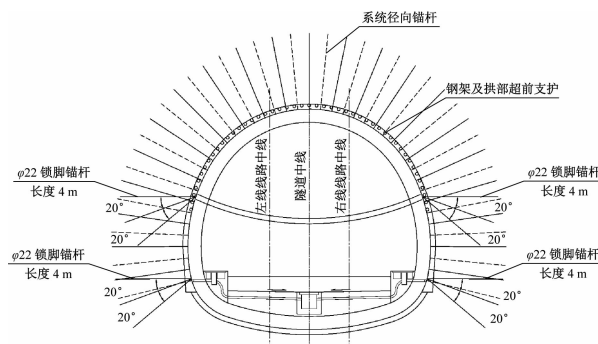


图 2 鸡公咀下层隧道支护结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Jigongjui lower tunnel support structure

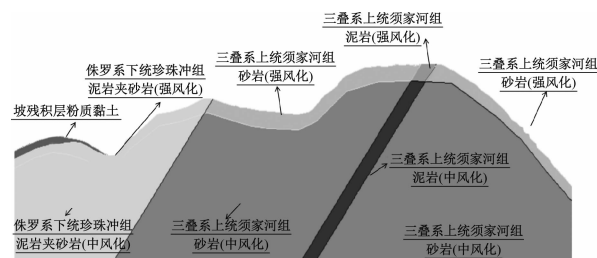
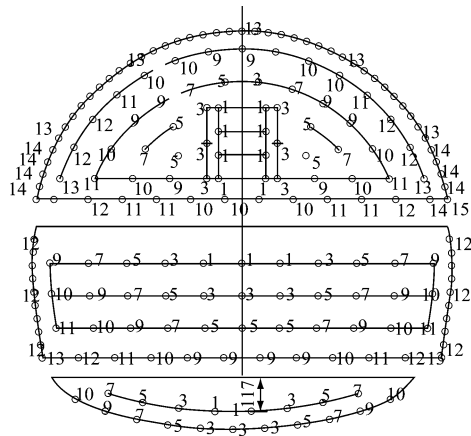
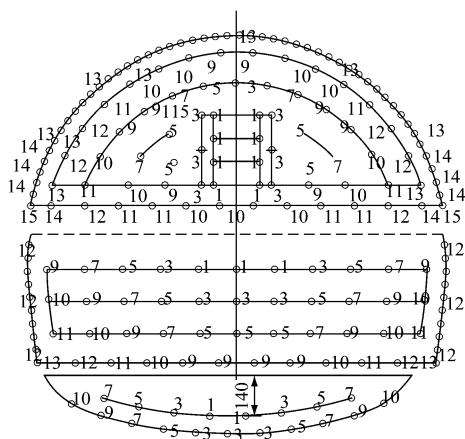


图 3 隧址区地质纵断面图

Fig. 3 Geological profile of the tunnel site



a) IV级围岩

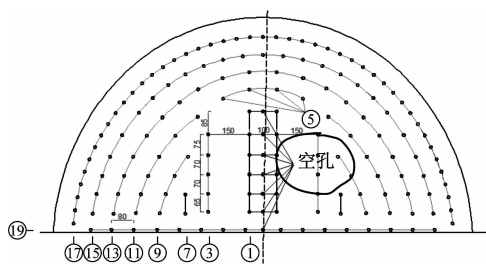


b) V级围岩

注:图中数字为毫秒延期电雷管起爆段别。

图4 下层隧道不同围岩处的炮孔布置图

Fig. 4 Layout of the blasting holes at different surrounding rocks of the lower tunnel



注:图中圆圈内部的数字表示电雷管起爆段别。

图5 上层隧道上台阶炮孔布置图

Fig. 5 Layout of the blasting holes in the upper tunnel steps

## 2 超挖现象及原因分析

### 2.1 隧道掌子面地质情况

隧道掌子面揭露围岩性状如图6所示。由现场情况可知,掌子面以青灰色的中厚层砂岩为主,质硬,产状稳定,其中夹产状黑色的中-薄层泥岩,泥岩

质软。砂岩中发育两组节理,延展性好,多发育于拱顶和掌子面右侧,节理发育处青灰色砂岩常被强风化,呈土黄色。



图6 掌子面现场照片

Fig. 6 Photo of tunnel excavation face

### 2.2 施工超挖现象

在隧道开挖过程中,由于岩层产状与进尺方向存在空间上的小角度斜交,掌子面地质情况及节理缝的密集程度难预测,导致现场施工没有固定的施工参数可依循,甚至有时候需要进行工艺试验。

受地质条件复杂的影响,在早期的现场施工中曾出现较多超挖现象。超挖现象在拱顶、拱腰和拱脚表现各不相同。拱顶处超挖现象呈不规则状,超挖不均匀,表现为某一部位突然超挖值增大,甚至超出周边超挖的3~4倍。拱腰和拱脚处的超挖现象则相反,其超挖呈规则状,特点是超挖值在各点均匀分布。超挖现象实景图如图7所示。



a) 拱顶处

b) 拱腰处

图7 超挖现象实景图

Fig. 7 Pictures of the tunnel over-excavation

### 2.3 隧道超挖原因

导致隧道超挖的原因有很多,通常可划分为3类:围岩自身条件、施工技术和现场施工管理。

#### 2.3.1 围岩自身条件

正确认识围岩自身条件是超挖控制的基础,否则现场技术指导和管理具有一定的盲目性和危险性。对于鸡公咀隧道工程:首先,由于掌子面发育两组节理,节理缝处被风化为土黄色,遇水则软化、泥化,导致部分围岩较破碎,围岩完整性及稳定性



较差,易发生超挖现象;其次,受掌子面节理发育的影响,岩石强度受地质条件影响程度不同,即每一循环的围岩条件不可预测,导致超挖现象一直存在,且超挖数值随机。每一循环的围岩条件不可预测,是因为渗水会导致岩石整体或局部的强度降低。而裂隙张开程度和岩体风化范围导致该处强度变化幅度大。

总之,鸡公咀隧道的超挖现象受节理控制,施工时围岩节理缝流出的水直接使掌子面附近的围岩强度陡降,加之黄色强风化砂岩沿节理缝展布于掌子面,使得渗水时围岩强度受影响范围较大。

### 2.3.2 施工技术

除了岩体内节理裂隙分布的影响外,钻眼、爆破及机械开挖等工程施工技术均会影响超挖。

鸡公咀隧道拱顶处超挖是由爆破后的机械开挖直接导致的。一旦机械开挖用力过猛或角度过陡,就会导致节理处的风化岩石或岩石夹泥不停下落,最终使得该处岩体全部被挖掉,直至节理缝尖灭消失。具体表现为某一部位超挖值随机增大,且在施工中难以控制。

鸡公咀隧道拱腰和拱脚处也存在超挖现象。虽然此处也存在节理缝,但机械开挖的角度接近水平,故该处的软弱岩体不会彻底掉落。此处的超挖主要由爆破用药量不当及钻眼施工不当引起。爆破用药量可做工艺试验,根据工艺试验结果逐步减少用药量,进而确定单孔合理用药量。进一步分析工艺试验结果可知,在稳定使用单孔合理用药量的前提下,若仍发生超挖,则主要是由钻眼角度偏差过大导致的。

## 3 炮眼间距优化

影响钻爆施工效果的因素众多,既有复杂多变的围岩材料自身,更有施工人员的操作水平,加之钻爆施工影响因素之间有着极其复杂的交互耦合作用,因而钻爆法施工工艺参数的选择是一个极其复杂的难题。在装药结构一定的情况下,炮眼间距对光爆效果的影响最大。炮眼间距过大,可能会出现欠挖,给后续施工带来困难;炮眼间距过小,会使围岩振动过大,导致超挖现象。由此,本文选择对炮眼间距进行优化以控制超挖。

### 3.1 炮眼间距优化模型

#### 3.1.1 炮眼间距优化原理

将 SVM(支持向量机)算法引入到钻爆工艺参

数的优化中。建立周边眼间距、辅助眼间距、最小抵抗线等优化参数同岩石单轴抗压强度、周边眼装药集中度、围岩级别、埋深及拱顶下沉与爆破松动圈深度之间的非线性映射模型,再通过此模型实现对隧道钻爆工艺参数的控制优化。

SVR 算法是 SVM 对回归问题的一种运用,其将输入样本集合变换到高维空间,使得其分离性状得到改善。 $\varepsilon$ -SVR( $\varepsilon$  为核参数)算法是最有效、最常见的支持向量回归算法。这是一个多参数组合最优化问题,算法的性能取决于惩罚参数  $C$ 、 $\varepsilon$  及核函数频宽  $\sigma$  这 3 个参数,且仍然需要依靠使用者的经验。由于遗传算法在解决组合优化问题上具有突出优势,因此加入遗传算法来自动搜寻训练效果最好的 SVR 模型参数( $C$  和  $\varepsilon$ ),以提高 SVR 的泛化性能和计算效率,形成 GA-SVR(进化支持向量机)算法。

#### 3.1.2 优化模型

爆破对围岩的破坏程度可以用隧道围岩变形量、围压松动区和断面超欠挖情况统计等 3 个比较直观的标准来考察。其中,断面超欠挖情况统计主要体现在水平收敛、拱顶下沉、拱脚松动、拱腰松动等指标上。在对断面超欠挖情况统计分析时,由于标准的 SVR 算法回归输出变量只能是一维变量,在此有必要采用线性加权和法对光爆考察指标进行归纳求和。参考文献[9]的研究成果,光爆考察指标的权重如表 1 所示。

表 1 光爆考察指标的权重

Tab.1 Weight of smooth blasting assessment indexes

| 指标   | 权重值  |
|------|------|
| 水平收敛 | 0.20 |
| 拱顶下沉 | 0.40 |
| 拱脚松动 | 0.15 |
| 拱腰松动 | 0.25 |

在 SVR 模型中,选用 RBF(径向基函数,也称高斯核函数),并采用表 1 中的权重,以现场测试的钻爆参数及围岩参数构建学习样本,之后利用 GA(遗传算法)对模型参数进行搜索优化,得到最优的 SVR 模型参数,如表 2 所示。

### 3.2 模型计算

任选 2 个断面的光爆参数进行优化。参照地勘报告,任意选定的 2 个断面勘察信息如表 3 所示。

表 2 最优 SVR 模型参数  
Tab. 2 Optimal SVR model parameters

| 参数            | 最优值    |
|---------------|--------|
| $C$           | 821.72 |
| $\sigma$      | 43.18  |
| $\varepsilon$ | 0.87   |
| 适应度           | 0.92   |

表 3 任意选定的 2 个断面勘察信息  
Tab. 3 Survey information of two random selected cross-sections

| 断面里程     | 围岩类型  | 围岩级别 | 弹性模量/<br>GPa | 泊松比  | 埋深/m  |
|----------|-------|------|--------------|------|-------|
| DK63+760 | 泥岩夹砂岩 | V 级  | 1.65         | 0.42 | 28.26 |
| DK64+940 | 砂岩    | IV 级 | 1.93         | 0.43 | 52.37 |

参照 TB 10003—2016《铁路隧道设计规范》中洞周水平位移相对收敛允许值以及下沉允许值的规定,得出这 2 个断面的洞周围岩变形允许值如表 4 所示。

表 4 选定断面的洞周围岩变形允许值  
Tab. 4 Allowable rock deformation around the hole in selected cross-section

| 断面里程     | 水平收敛允许值/mm | 拱顶下沉允许值/mm |
|----------|------------|------------|
| DK63+760 | 8~13       | 15~45      |
| DK64+940 | 10~20      | 15~45      |

为了安全起见,允许洞周变形全部取下限值,则相应的松动圈范围取值为 1.4 m。将以上信息输入到 GA-SVR 模型中,在确保围岩稳定的前提下,满足松动圈控制要求,得到优化后的炮眼间距如表 5 所示。

表 5 优化后的炮眼间距  
Tab. 5 Optimized borehole distance

| 里程       | 周边眼间距<br>平均值/cm | 辅助眼间距<br>平均值/cm | 炮眼排距<br>平均值/cm |
|----------|-----------------|-----------------|----------------|
| DK63+760 | 63              | 72              | 61             |
| DK64+940 | 64              | 60              | 72             |

### 3.3 优化控制结果分析

在执行优化方案后,拱顶、拱腰超挖情况分别如图 8 和图 9 所示,隧道的超挖值统计结果如表 6 所示。由表 6 可知,拱顶处超挖已经完全控制在 $(9 \pm 2)$  cm 范围,与之前超挖量基本为 $(40 \pm 15)$  cm (局部超挖量达 70 cm)相比,控制效果较为理想;拱脚拱腰处通过 4 循环的现场管理,超挖已从超挖至

平均 30~40 cm,从工艺试验阶段控制在 20 cm 左右到最后控制在 $9 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$ ,控制效果亦较为理想。



图 8 炮眼优化后拱顶处超挖情况

Fig. 8 Over-excavation at the arch crown after optimizing the borehole



图 9 炮眼优化后拱腰处超挖情况

Fig. 9 Over-excavation at the arch waist after optimizing the borehole

## 4 超挖控制措施

### 4.1 机械开挖

节理缝的机械开挖有两种情况:①拱腰和拱脚处,由于开挖角度较好,对节理缝的扰动小,故不需处理;②拱顶处,由于针对节理缝的机械开挖角度和力度处理不当,导致软弱岩石不能自稳持续掉块,引发超挖。

对于拱顶处的节理发育部位,可先采取“宁欠不超”的弱爆处理,再由工人手持机械,对欠挖处即节理缝发育处的软弱岩石进行修边,从而减少对节理缝中岩石或泥的扰动,进而控制超挖。

### 4.2 钻眼控制

钻眼的角度偏差往往是引起超挖的主要原因。控制钻眼角度偏差的施工主要在于加强对现场一线操作工人的管理。具体措施步骤如下:

1) 指定固定的专业人员进行钻眼施工,并对拱腰和拱脚处的钻眼定位。

表6 执行优化方案后的隧道超挖值统计结果

Tab.6 Statistics of tunnel over-excavation value after executing the optimized scheme

| 开挖循环段               | 左拱脚超挖量<br>$a_1/\text{cm}$ | 左拱腰超挖量<br>$a_2/\text{cm}$ | 拱顶超挖量<br>$a_3/\text{cm}$ | 右拱腰超挖量<br>$a_4/\text{cm}$ | 右拱脚超挖量<br>$a_5/\text{cm}$ | 平均线形超挖量<br>$a_g/\text{cm}$ |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|
| DK64+82.0—DK64+83.2 | 41.0                      | 20.0                      | 53.5                     | 34.5                      | 48.0                      | 39.40                      |
| DK64+80.8—DK64+82.0 | 42.3                      | 35.0                      | 35.0                     | 44.0                      | 33.0                      | 37.85                      |
| DK64+79.6—DK64+80.8 | 43.3                      | 37.0                      | 60.3                     | 41.0                      | 37.0                      | 43.71                      |
| DK64+78.4—DK64+79.6 | 26.3                      | 32.0                      | 27.3                     | 21.0                      | 19.0                      | 25.11                      |
| DK64+77.2—DK64+78.4 | 22.5                      | 24.0                      | 18.3                     | 14.0                      | 11.0                      | 17.96                      |
| DK64+76.0—DK64+77.2 | 12.8                      | 15.0                      | 11.0                     | 15.0                      | 10.0                      | 12.75                      |
| DK64+74.8—DK64+76.0 | 7.0                       | 8.0                       | 11.8                     | 11.0                      | 9.0                       | 9.36                       |
| DK64+73.6—DK64+74.8 | 6.5                       | 8.0                       | 12.3                     | 11.0                      | 10.0                      | 9.56                       |
| DK64+72.4—DK64+73.6 | 8.5                       | 5.0                       | 8.0                      | 8.0                       | 6.0                       | 7.10                       |
| DK64+71.2—DK64+72.4 | 9.3                       | 7.0                       | 7.3                      | 6.0                       | 6.0                       | 7.10                       |
| DK64+70.0—DK64+71.2 | 6.8                       | 8.0                       | 7.3                      | 1.0                       | 7.0                       | 6.00                       |

注:  $a_g = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5) / 5$ 。

2) 对工人进行翔实易懂的技术交底。交底内容包括设计角度及已经可能出现的岩石性质,使其钻眼时胸有成竹。

3) 在放炮后组织工人回到钻眼部位,对现场超挖进行量测,并和超挖处的工人现场讨论超挖原因,尽量控制下一循环的超挖。

4) 对部分一直超挖的工人进行更换。重复以上步骤。

## 5 结语

本文结合重庆铁路枢纽东环线鸡公咀隧道浅埋偏压隧道工程实例,分析了超挖的原因,通过现代计算机技术对开挖炮眼间距进行动态优化设计,提出了超挖解决措施,得到如下结论:

1) 隧道超挖主要原因是围岩条件、工程技术和现场施工管理,其中围岩条件是施工的基础,岩层节理发育影响了掌子面的岩石强度,是导致超挖的主要原因。

2) 通过 GA-SVR 计算模型和 GA 对炮眼间距进行了优化,减少了工程超挖量,可有效控制隧道超挖。

3) 对炮眼布置进行优化后,在实际施工中进一步采取的超挖控制措施包括:对拱顶处节理发育部位采取弱爆欠挖处理,再由工人手持机械进行隧道轮廓修边;加强对现场一线操作工人的管理,控制钻眼角度的偏差。实施效果表明,上述措施有效控制了超挖。

## 参考文献

- [1] 吕庆洲. 顶管超挖量影响因素的分析及相关问题的解决[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(增刊2): 788.  
LÜ Qingzhou. Analysis of influencing factors of pipe jacking over-break and solutions of related problems[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S2): 788.
- [2] 吴继敏, 陈显春, 李文奇, 等. 金丽温高速公路连拱隧道超挖预测及原因分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(5): 56.  
WU Jimin, CHEN Xianchun, LI Wenqi, et al. Forecast of over-break and analysis of cause of formation in double-arch tunnels in Jinliwen highway[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(5): 56.
- [3] 陆中玟, 吴立, 李波, 等. 地质参数分析与隧道超挖预测优化研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 189.  
LU Zhongle, WU Li, LI Bo, et al. Optimization of tunnel over-break prediction based on geological parameter analyses[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 189.
- [4] 魏继红, 孙少锐, 彭建忠, 等. 高速公路连拱隧道超挖预测及评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊1): 3324.  
WEI Jihong, SUN Shaorui, PENG Jianzhong, et al. Study on overexcavation prediction and evaluation of expressway multi-arch tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S1): 3324.
- [5] 张海波. 铁路隧道钻爆施工超挖控制优化措施研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(2): 108.  
ZHANG Haibo. Research on optimal measures for overcutting control in railway tunnel construction by drilling and blasting method[J]. Railway Construction Technology, 2020(2): 108.

- [6] 尚彦军, 庞文利, 王开洋, 等. 太古代片麻状花岗岩浅埋隧道变形破坏及地面塌陷分析: 以集宁隧道为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1574.

SHANG Yanjun, PANG Wenli, WANG Kaiyang, et al. Deformation damage of shallow tunnels and caveinduced ground collapse in Archeozoic gneissic granites—the Jining tunnel as case example [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1574.

- [7] 宋建学, 张瑞鑫, 孙宇赫. 机械顶管施工中超挖和地面超载引起的地表沉降规律研究[J]. 建筑科学, 2018, 34(11): 134.

SONG Jianxue, ZHANG Ruixin, SUN Yuhe. Research on surface settlement regularity caused by over excavation and ground overloading in mechanical pipe jacking[J]. Building Science, 2018, 34(11): 134.

- [8] 王建秀, 邹宝平, 胡力绳. 隧道及地下工程光面爆破技术研究现状与展望[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 800.

WANG Jianxiu, ZOU Baoping, HU Lisheng. Advance and trend

in smooth blasting technology for tunnel and underground engineering[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 800.

- [9] 方昱, 刘开云. 山岭隧道钻爆法施工参数控制的优化[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(1): 14.

FANG Yu, LIU Kaiyun. Control optimization of drilling and blasting parameters during mountain tunnel construction period [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(1): 14.

· 收稿日期:2022-01-01 修回日期:2024-01-26 出版日期:2024-06-10

Received:2022-01-01 Revised:2024-01-26 Published:2024-06-10

· 第一作者:袁枫杰,工程师,397708055@qq.com

通信作者:徐前卫,副教授,xuqianwei@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 233 页)

XIA Wuyang, DAI Cong, LI Shiqi. In-situ test on loose circle of surrounding rocks on carbonaceous phyllite tunnel[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(3): 72.

- [7] 朱俊福. 深部层状岩体巷道围岩松动圈形成机理及其工程应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.

ZHU Junfu. Study on the formation mechanism and its engineering application of broken rock zone in deep bedded rock mass [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

- [8] 李宁, 刘乃飞, 李国峰. 软岩及土质隧洞围岩稳定性评价新

方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1812.

LI Ning, LIU Naifei, LI Guofeng. New method for stability evaluation of soil and soft rock tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1812.

· 收稿日期:2022-12-12 修回日期:2023-11-13 出版日期:2024-06-10

Received:2022-12-12 Revised:2023-11-13 Published:2024-06-10

· 通信作者:徐前卫,副教授,xuqianwei@tongji.edu.cn

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

#### (上接第 237 页)

WANG Xiaoming. Construction technology application of shield machine crossing anchor pipe clearance area in water-rich sand [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(12): 135.

- [6] 李小斌, 吴肖玉. 桩基及围护施工中遇地下障碍物的处理技术[J]. 科技创新导报, 2012, 9(1): 46.

LI Xiaobin, WU Xiaoyu. Treatment technology of underground obstacles in pile foundation and enclosure construction [J]. Science

and Technology Innovation Herald, 2012, 9(1): 46.

· 收稿日期:2021-12-02 修回日期:2022-01-05 出版日期:2024-06-10

Received:2021-12-02 Revised:2022-01-05 Published:2024-06-10

· 第一作者:史力,高级工程师,103632031@qq.com

通信作者:汪杰,工程师,2432185329@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license