

# 大跨小净距公路隧道光面爆破设计及施工技术

吴 江

(宁波交通工程建设集团有限公司,浙江 宁波 315000)

**摘要:** 光面爆破广泛应用于山岭隧道开挖掘进,可以有效减少超欠挖现象,保证隧道开挖轮廓线与设计更接近。然而,由于优化理论的缺乏以及围岩性质的复杂多变,难以保证在任意地质条件下对爆破参数进行精确标定。文章依托某一级公路大跨小净距隧道工程,对隧道光面爆破效果进行优化。提出隧道光面爆破的主要设计参数,并给出周边眼间距、抵抗线、密集系数、装药量合理的取值范围,以及合理的装药结构和起爆顺序;提出隧道光面爆破的施工工艺流程和技术要点。结果表明:爆破参数优化后,光面爆破效果得到显著改善,最大超挖和平均超挖分别减少了46%、47%,半孔保留率达到85%以上,隧道炮孔利用率达到93%以上,为今后类似工程提供了依据和指导。

**关键词:** 公路隧道; 光面爆破; 爆破参数; 装药结构; 施工工艺

**中图分类号:** U455.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-8993(2024)06-0057-05

**doi:** 10.13402/j.gcjs.2024.06.078

## Design and construction technology of smooth blasting for highway tunnel with large span and small clearance distance

WU Jiang

(Ningbo Communications Engineering Construction Group Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

**Abstract:** Relying on a large-span and small-clearance tunnel project of a primary highway, the effect of tunnel surface blasting is optimized. The main design parameters of tunnel face blasting are proposed, and the reasonable range of values of peripheral eye spacing, resistance line, density coefficient and charge volume are given, and the reasonable charging structure and detonation sequence are given; the construction process and technical points of tunnel face blasting are proposed, and the final blasting parameters are optimized, and the effect of face blasting is significantly improved, the maximum over-excavation and the average over-excavation are reduced by half, and the retention rate of the half-hole reaches more than 85%, and the utilization rate of the tunnel shell hole reaches more than 93%, which is a basis for the guidance of similar projects in the future. More than 85%, the utilization rate of tunnel holes reaches more than 93%, which provides the basis and guidance for similar projects in the future.

**Key words:** highway tunnel; surface blasting; blasting parameters; charging structure; construction technology

岩石隧道采用钻爆法施工时,爆破方案的好坏对隧道爆破开挖速度起着关键性的作用,爆破效果的好坏直接影响后期渣土运输、初支和二衬支护的速度和成本。目前最常采用的就是光面爆破技术,通过合理设计光面爆破参数,减小对周

边围岩扰动,同时获得光滑整齐的爆破轮廓面。

在隧道光面爆破因素影响分析基础上,如何正确确定大断面光面爆破设计参数以获得最佳的爆破效果,一直是工程爆破研究的热点和难点问题。近年来,国内外针对隧道光面爆破效果改善和爆破参

收稿日期: 2023-10-19

基金项目: 吴 江(1966—),男,高级工程师,从事隧道爆破施工方向的设计及研究。

数优化的主要研究成果有:田宝华等<sup>[1]</sup>通过对隧道穿越水平软弱地层时的爆破效果模拟分析,提出合理的爆破控制参数;秦桂芳等<sup>[2]</sup>开展了不耦合系数及周边眼间距等多工况计算,优化得到合适的爆破参数;耿立才等<sup>[3]</sup>应用工程类比法和光面爆破设计原理,给出了砂岩地层的爆破参数;刘国强等<sup>[4]</sup>分析了岩溶隧道不同周边眼爆破参数下的围岩损伤厚度及等效应力,提出岩溶隧道的爆破优化方法;周涵<sup>[5]</sup>等采用短导洞掏槽、多种起爆方式实现全断面一次爆破成孔的光爆效果;张林<sup>[6]</sup>采用声波探测法确定围岩损伤范围,进而确定了隧道泥岩砂岩段的爆破参数;刘敦文<sup>[7]</sup>提出适用于节理裂隙发育、穿越破碎带断层的山岭隧道光面爆破方法;高建坡<sup>[8]</sup>、刘锦东等<sup>[9]</sup>通过对隧道爆破参数优化,得到光滑平整的轮廓线,并将爆破振动控制在安全范围内;周杰<sup>[10]</sup>通过模拟不同爆破参数下的爆破效果,并通过跟踪量测显示,有效减少超欠挖;巩中江<sup>[11]</sup>等针对铁路隧道超欠挖控制,提出相应的爆破参数优化方法,最终爆破效果满足光爆控制要求,还有学者对隧道开挖施工的振动及围岩变形做出了研究<sup>[12-14]</sup>。

综上所述,在大跨隧道光面爆破参数的研究方面仍然存在诸多不足,例如节理裂隙发育段围岩光面爆破效果较差,隧道超挖较大。针对上述问题,本文依托余姚市城西工业园区配套道路新建工程大山四线小净距隧道,针对光面爆破效果不理想的问题,分析其原因,并对爆破施工参数进行优化,以期对大断面隧道的光面爆破提供借鉴和参考。

## 1 工程概况

余姚市城西工业园区配套道路新建工程路线长度为 1.19 km,按双向六车道一级公路标准进行设计,设计时速为 80 km/h。沿线共新建四线短隧道 1 座,其中机动车车行左、右洞长分别为 468、467 m,非机动车左、右洞长分别为 477、480 m。

隧道洞身和洞顶主要为含角砾粉质黏土、强风化凝灰岩和中风化凝灰岩。受断层 Fw3 影响,断层产状  $220^{\circ} \sim 250^{\circ} \angle 60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ,影响带宽约 20 ~ 50 m。断层内岩石张拉破碎,以碎块岩为主,岩

石节理裂隙十分发育,洞身和洞顶岩体破碎,围岩易掉块,隧道无自稳能力,跨度为 5 m 或更小时,可稳定数日。该段隧道围岩主要以Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级围岩为主。地下水为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水,水量随季节变化,雨季易出现涌水现象。

隧道施工应严格按“早预报、预加固、弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤量测、快衬砌”的原则组织施工,爆破需要采用光面爆破技术进行施工,合理选取爆破参数,严格控制爆破振动、爆破飞石等有害效应,避免对周边围岩和环境造成过度损害。

由于本隧道工程为四线大断面小净距隧道,且穿过断裂带,岩体较破碎,节理裂隙发育,地质条件十分复杂,导致隧道光面爆破效果较差,爆破后围岩的壁面十分粗糙、不规则,隧道轮廓周边超挖较大,顶部产生一定的超挖,大幅增加初期支护的喷射混凝土量。主要原因是由于裂隙围岩地质条件差,光面爆破施工参数设置不合理,不能根据地质条件、断面形状、进尺等进行动态优化,爆破装药结构等施工工艺不合理。因此,需要根据隧道的实际情况进行爆破施工参数优化。

## 2 隧道光面爆破参数设计

### 2.1 隧道光面爆破参数设计方法

针对隧道光面爆破,首先需要从设计角度入手,采取合理的周边眼间距、抵抗线、密集系数,严格控制周边眼装药量大小,采取合理的装药结构和起爆顺序,以实现较好的光面爆破效果。下面详细描述光面爆破主要参数及取值方法。

#### 2.1.1 合理确定周边眼最小抵抗线

最小抵抗线参数设置不合理,会直接影响爆破效果。如果抵抗线设置过大,容易造成欠挖;如果抵抗线设置过小,就会造成严重的隧道周边围岩超挖,对围岩造成过度损伤。

周边眼抵抗线  $W$  可根据下式确定:

$$W = (10 \sim 20)d^{[15]} \quad (1)$$

式中:  $d$  为炮孔直径, mm。隧道炮孔直径一般为 40 mm,故  $W = (40 \sim 80)$  cm。

#### 2.1.2 合理确定周边眼间距

要想实现较好的光面爆破效果,要求周边眼

间距不能超过抵抗线。一旦超过，会直接影响爆破效果，周边眼间距越小，则爆破施工成本越高。因此，需要选择合理、经济的周边眼间距。通常周边眼间距为：

$$a = mW_{\min}^{[15]} \tag{2}$$

式中： $a$  为周边眼间距，m； $m$  为炮眼密集系数，一般取值 0.6 ~ 1.0，岩石强度越低，则取较小值，岩石强度越高，则取较大值； $W_{\min}$  光面爆破最小抵抗线，m。

2.1.3 合理确定装药量

为保证能够破岩且不会造成超欠挖，需合理确定周边眼装药量。需要根据围岩的强度，合理确定装药量大小，并采取间隔装药的方式进一步分散爆破能量。

光面爆破周边眼参考建议数值如表 1 所示<sup>[16]</sup>。

根据表 1 的建议值，本文中根据围岩的单轴饱和抗压强度对围岩进行分级，Ⅲ级、Ⅳ级围岩为中硬岩，Ⅴ级围岩视为软岩，分别确定本工程中Ⅲ级、Ⅳ级、Ⅴ级围岩的光面爆破参数，如表 2 所示。

2.2 采用合理的装药结构

隧道光面爆破时，周边眼装药结构通常采用间隔装药和不耦合装药结构，如图 1 所示。很多隧道工程施工时往往忽略了采用导爆索进行间隔装药，大多采用集中装药型式，导致周边孔爆破振动较大，爆破效果较差。

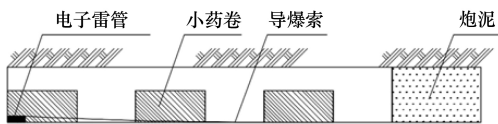


图 1 周边眼光面爆破装药结构

2.3 合理的起爆顺序

对于隧道光面爆破来说，掏槽眼先起爆，然后是辅助眼起爆，周边眼起爆，最后是底板眼起爆，利于抛渣。周边眼应同时起爆或者以较短的延期时间，电子雷管可以采用 1 ms 时间间隔，应力波在垂直于两相邻药包连线方向上会发生叠加，从而得到平整的破坏面。

2.4 隧道光面爆破参数设计实例

以Ⅲ级围岩台阶法施工为例，设计进尺为 3.0 ~ 4.0 m，图 3 中以 3.5 m 示例，根据围岩情况和施工需要在 3.0 ~ 4.0 m 内调整，隧道爆破炮孔设计如图 2、3 所示，爆破施工参数如表 3 所示。

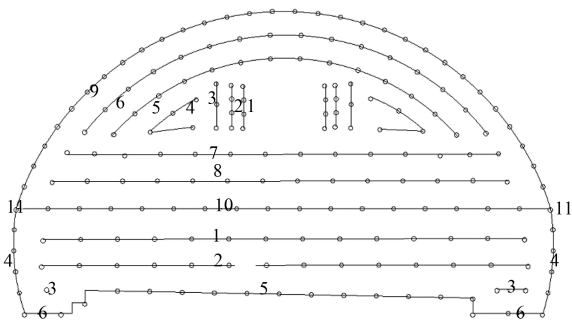
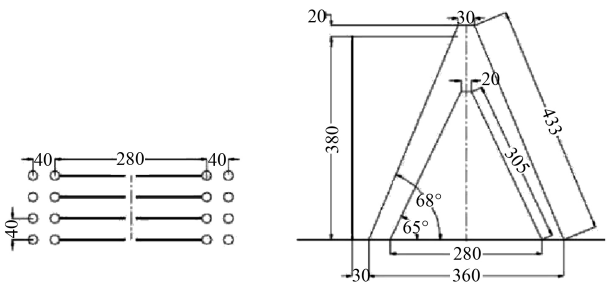


图 2 Ⅲ级围岩上下台阶开挖法炮孔布置及起爆顺序



(a) 掏槽孔、排间距示意；(b) 二级掏槽俯视图

图 3 Ⅲ级围岩爆破掏槽孔布置 cm

表 1 光面爆破周边眼参考数值

| 岩石类别 | 单轴饱和抗压强度/MPa | 炮眼间距/cm | 抵抗线/cm  | 密集系数      | 装药集中度/(kg·m <sup>-1</sup> ) |
|------|--------------|---------|---------|-----------|-----------------------------|
| 硬岩   | >60          | 55 ~ 70 | 60 ~ 80 | 0.7 ~ 1.0 | 0.30 ~ 0.35                 |
| 中硬岩  | 30 ~ 60      | 45 ~ 55 | 45 ~ 60 | 0.7 ~ 1.0 | 0.20 ~ 0.30                 |
| 软岩   | ≤30          | 35 ~ 45 | 40 ~ 50 | 0.6 ~ 0.8 | 0.07 ~ 0.12                 |

表 2 本工程周边眼光面爆破参数设计

| 岩石类别 | 炮眼间距/cm | 抵抗线/cm | 密集系数 | 装药集中度/(kg·m <sup>-1</sup> ) |
|------|---------|--------|------|-----------------------------|
| Ⅲ级   | 50      | 70     | 0.71 | 0.25                        |
| Ⅳ级   | 45      | 65     | 0.69 | 0.20                        |
| Ⅴ级   | 40      | 60     | 0.67 | 0.15                        |

表 3 III级围岩隧道掘进爆破参数表(进尺 3.5 m 示例)

| 台阶        | 炮孔名称 | 炮孔数量/个 | 炮孔深度/m | 孔距/m | 排距/m | 钻孔角度/(°) | 雷管段别/段      | 装药量/kg |       |
|-----------|------|--------|--------|------|------|----------|-------------|--------|-------|
|           |      |        |        |      |      |          |             | 单孔     | 合计    |
| 上台阶<br>开挖 | 掏槽孔  | 8      | 3.0    | —    | —    | 35       | 1           | 2.3    | 18.4  |
|           | 掏槽孔  | 8      | 4.3    | —    | —    | 22       | 3           | 3.3    | 26.4  |
|           | 辅助孔  | 72     | 3.8    | 0.95 | 0.7  | 0        | 5、7、9、11、12 | 2.1    | 151.2 |
|           | 周边孔  | 30     | 3.8    | 0.7  | —    | -5       | 13          | 0.9    | 27    |
|           | 底孔   | 18     | 3.8    | 0.9  | 1.0  | 0        | 14、15       | 2.6    | 46.8  |
|           | 合计   | 136    | —      | —    | —    | —        | —           | —      | 269.8 |
| 下台阶<br>开挖 | 掘进孔  | 31     | 3.8    | 1.05 | 0.95 | 0        | 1、3、5       | 2.1    | 65.1  |
|           | 周边孔  | 8      | 3.8    | 0.6  | —    | -5       | 7           | 0.9    | 7.2   |
|           | 底板孔  | 18     | 3.8    | 0.95 | 0.8  | -5       | 9、11        | 2.2    | 39.6  |
|           | 合计   | 57     | —      | —    | —    | —        | —           | —      | 111.9 |

每循环进尺 3.5 m，每循环总方量 460.98 m<sup>3</sup>。最大段起爆药量 46.8 kg，其中上台阶开挖断面 74.62 m<sup>2</sup>；开挖量：261.17 m<sup>3</sup>；循环进尺 3.5 m；单位药耗：1.03 kg/m<sup>3</sup>；下台阶开挖断面 57.09 m<sup>2</sup>；开挖量：199.8 m<sup>3</sup>；循环进尺：3.5 m；单位药耗：0.56 kg/m<sup>3</sup>当进尺调整时控制最大单段药量不大于 54 kg。最大一次起爆药量 269.8 kg，平均炸药单耗 0.82 kg/m<sup>3</sup>，实际单耗取值 0.6~1.15 kg/m<sup>3</sup>，根据围岩情况调整。每循环实际总装药量 381.7 kg，当进尺调整时控制每循环实际总装药量小于 420 kg。围岩稳定性较差时，循环进尺控制在 2.5~3.0 m 范围内。

3 隧道光面爆破施工工艺

隧道光面爆破施工流程如图 4 所示。

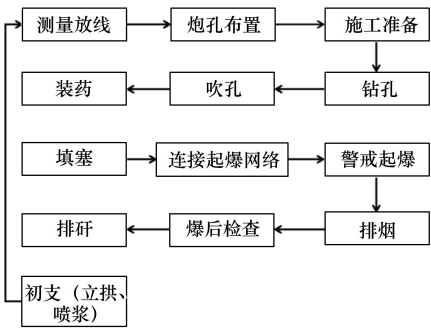


图 4 隧道光面爆破施工流程

光面爆破施工要点：

(1) 测量放线：测量员在每次循环开始前严格按照设计进行测量放线，以此得到隧道的轮廓，为后续炮孔布置做好准备。

(2) 炮孔布置：炮孔布置顺序为掏槽眼、周边眼、辅助眼、底板眼。炮孔的布置：排间距、外插角须严格按照设计图纸执行，不得私自修改炮孔布置方案。

(3) 钻孔：孔深、角度、排间距等必须严格按照设计施工，尤其是掏槽眼和周边眼，周边眼外插角过大会造成超挖，一般控制在 3~5°。

(4) 吹孔：钻孔结束后要用高压气流将孔内岩石碎渣吹出，方便后续装药。

(5) 装药：装药时应用炮棍将药卷运送到底部，保持孔内药柱连续，光爆孔必须采用导爆索进行不耦合间隔装药。

(6) 填塞：为保证爆破质量，须在装药后进行填塞，且填塞要质量和长度，避免出现填塞不密实和出现空洞等现象。

(7) 网络连接：电子雷管起爆应对电子雷管延期时间与爆破网路进行检查，确保延时设置和网路连接正确。

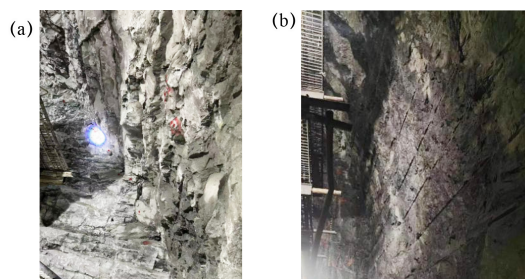
(8) 起爆警戒：隧道爆破具有一定危险性，飞石、爆炸冲击、炮眼中毒等，因此放炮前须进行警戒并疏散人群。

(9) 爆后检查：爆破完成炮眼排除后，安全员应对爆破结果进行检查并进行找顶，将新暴露的拱顶处危石处理掉，防止发生危险。

4 隧道光面爆破作业效果

通过优化爆破施工参数，隧道光面爆破效果得到大幅改善，大幅减少初期支护的喷射混凝土

量,有效降低了混凝土填充的成本,减少了对围岩的扰动,确保了围岩的自承能力和稳定性,光面爆破优化前和优化后的效果对比如图5所示。



(a) 爆破优化前; (b) 爆破优化后

图5 隧道爆破效果对比

(1) 爆破后围岩壁面平整光滑,无危石、掉块等现象发生;

(2) 炮孔的半眼痕率较高,半孔保留率达到85%以上,远高于光面爆破的质量控制标准80%,光面爆破效果良好;

(3) 隧道轮廓周边超挖大幅度减小。经过测量,隧道最大超挖由0.52 m降低到0.276 m,隧道平均超挖由0.236 m降低到0.125 m,比之前减小一半,超挖现象得到大幅度改善;

(4) 隧道炮孔利用率达到93%以上,高于90%的质量控制标准。

## 5 结 论

(1) 针对大跨小净距隧道光面爆破,首先从设计角度入手,根据围岩等级、地质条件等选择合理的周边眼间距、抵抗线、密集系数,严格控制周边眼装药量大小,采用导爆索进行不耦合间隔装药,严格按照掏槽眼、辅助眼和周边眼的起爆顺序爆破。

(2) 从施工角度严格按照光面爆破施工工艺流程及控制标准,控制好钻孔角度等关键参数,可获得较好的光面爆破效果。

(3) 本次爆破参数优化后,光面爆破效果得到显著改善,最大超挖和平均超挖减少了一半,半孔保留率达到85%以上,隧道炮孔利用率达到93%以上,并且爆破后的隧道断面轮廓岩壁结构平整光滑,光面爆破效果良好。

## 参考文献:

- [1] 田宝华,张彪,余龙文,等.水平缓倾岩层隧道爆破参数优化研究[J].爆破,2023,40(3):52-58.
- [2] 秦桂芳,曾灿,徐间锋,等.基于HJC损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证[J].爆破器材,2022,51(6):45-51.
- [3] 耿立才,马福彬,张继春,等.光面爆破技术在隧道掘进中的应用研究[J].公路,2022,67(9):458-463.
- [4] 刘国强,刘彬,张庆明,等.岩溶隧道光面爆破参数优化及其应用研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(S2):50-57.
- [5] 周涵,孙从煌,曲艳东,等.小断面长陡斜坡隧道短导洞光面爆破技术研究[J].现代隧道技术,2021,58(2):228-237.
- [6] 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.
- [7] 张林.泥岩砂岩互层隧道光面爆破围岩损伤试验研究[J].四川建筑,2021,41(1):126-128.
- [8] 高建坡,王海,乔宏伟,等.软弱围岩大断面隧道爆破设计[J].青海交通科技,2020,32(5):113-117.
- [9] 刘锦东,王许峰,张文波.复杂条件下隧道爆破施工方案研究[J].水利水电技术,2019,50(2):133-138.
- [10] 周杰.软岩隧道光面爆破参数设计的数值模拟研究[J].成都大学学报(自然科学版),2018,37(4):441-444.
- [11] 巩中江,柴敬尧,杨长庚.铁路隧道光面爆破施工技术与管理实例[J].隧道建设(中英文),2017,37(12):1593-1599.
- [12] 罗燕平,刘得第,王生,等.软岩浅埋连拱隧道施工围岩变形特征分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(2):91-97.
- [13] 管晓明,宫哲,程飞,等.隧道掌子面前后方围岩爆破振动及精准控制研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2023,40(1):49-54;74.
- [14] 张坤勇,徐娜,臧振君,等.隧道开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法[J].河北工程大学学报(自然科学版),2020,37(3):57-63.
- [15] 翟武杰,第伟伟.软岩巷道掘进爆破参数优化设计及应用[J].内蒙古煤炭经济,2021(17):37-38.
- [16] 杨芸森.矿山岩巷掘进周边控制爆破影响因素及参数优化研究[J].内蒙古煤炭经济,2023(8):4-6.