

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.015

## 黄柏山隧道光面爆破技术\*

王振浩

(中铁十六局集团有限公司,北京 100018)

**摘要:** 在围岩条件允许情况下,大断面隧道采用全断面光面爆破技术开挖,可加快施工进度,提高施工效率。而进行全断面开挖时,爆破技术参数的合理性与否将直接决定着隧道爆破的效果。为改善爆破效果,针对赣深高铁黄柏山长大隧道工程地质条件与钻孔机械特点,提出了大断面隧道全断面开挖光面爆破技术方案,并通过工程类比和经验公式计算合理调整了原先的隧道钻爆参数。现场试验结果:隧道开挖断面轮廓较为平整,炸药单耗由试验前 $1.16\text{ kg/m}^3$ 降低到 $1.07\text{ kg/m}^3$ ,炮孔利用率从83.5%提高至91.2%,周边孔孔痕率由试验前的73.6%提高至87.4%,有效地提高了隧道开挖施工进度、降低了施工成本。

**关键词:** 大断面隧道;光面爆破;炮孔利用率;炸药单耗

**中图分类号:** TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0100-07

## Smooth Blasting Technology of Huangbaishan Tunnel

WANG Zhen-hao

(China Railway 16<sup>th</sup> Bureau Group Co., Ltd., Beijing 100018, China)

**Abstract:** With the permission of surrounding rock conditions, adopting the full-face smooth blasting technology can accelerate construction progress and improve construction efficiency in large section tunnel blasting excavation. Meanwhile, the rationality of blasting technical parameters will directly determine the blasting effect of full section excavation. According to the engineering geological conditions and drilling machinery characteristics of Huangbaishan long and large tunnel of Jiangxi-Shenzhen high-speed railway, a full-face smooth blasting technology scheme of large-section tunnel is proposed. Furthermore, the drilling and blasting parameters of tunnel are determined according to the engineering analogy and the empirical formula calculation. Field blasting tests show that the contour of the tunnel excavation section is relatively smooth, the powder factor decreases from  $1.16\text{ kg/m}^3$  to  $1.07\text{ kg/m}^3$ , the utilization rate of blastholes increases from 83.5% to 91.2%, and the peripheral hole mark rate increases from 73.6% to 87.4%, which efficiently improves tunnel excavation process and reduces construction costs.

**Key words:** large cross-section tunnel; smooth blasting; utilization ratio of blasting hole; powder factor

当今,高速铁路作为我国标志性的基础工程建设得到了迅猛的发展,为满足边远山区的交通出行需求,穿越高山峻岭的长大、深埋隧道也不断涌现<sup>[1,2]</sup>。钻爆法历经100多年的发展,具有技术成熟、操作方便、适用性强等特点,是目前国内外隧道

开挖中最为常见的应用方法。为减少超欠挖、提高爆破效果,光面爆破技术在隧道开挖爆破工程中得到了广泛的应用<sup>[3]</sup>。

近年来,隧道技术人员和相关学者依托实际工程,针对隧道光面爆破技术和参数优化等问题展开了大量研究。凌伟明、刘殿书等通过理论分析,明晰了相邻光爆孔间岩体裂隙的形成是应力波与爆生气体的共同作用<sup>[4,5]</sup>。彭刚健分析了光面爆破作用机理和作用过程<sup>[6]</sup>,提出光面爆破参数的理论计算方

收稿日期:2022-03-21

作者简介:王振浩(1978-),男,高级工程师、学士,主要从事隧道工程、爆破工程方面的技术与管理工, (E-mail)349899328@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41972286)

法。宗琦等理论分析了光面爆破中空气垫层装药结构参数及不耦合系数的计算方法<sup>[7]</sup>。结合工程实际,学者在光面爆破参数设计、复杂地质条件下的应用等方面积累了大量经验。如满奕针对花岗岩地层的隧道光面爆破开挖<sup>[8]</sup>,优化调整了爆破参数,确定了合理的光面爆破技术设计方案。巩中江通过优化装药结构、周边孔长度、炮孔间距等爆破参数<sup>[9]</sup>,可有效提高爆破质量,缩短工期,节约施工成本。刘俊轩针对硬岩场地中不同形式的掏槽孔<sup>[10]</sup>,分析了其掏槽爆破效果,最终提出了适用于工程实际的全断面光面爆破技术设计方案。毛建安针对不同级别围岩的爆破效果进行分析<sup>[11]</sup>,得出适当增加周边孔、采用小直径药卷不耦合装药可较好的完成光面爆破。李启月通过一系列试验分析<sup>[12]</sup>,指出在Ⅳ级围岩较好情况下以及Ⅲ级以上围岩爆破施工中,预留光面爆破层全断面一次爆破技术可较好控制断面轮廓形状、提高孔痕率。随着交通线路的不断完善,新建铁路隧道面临的地质条件也愈加复杂,光面爆破技术在复杂地质条件中的应用也得到发展。付玉华等考虑高原岩应力和岩体损伤条件<sup>[13]</sup>,综合分析提出损伤条件下深部岩体光面爆破计算方法。刘敦文等依托穿越裂隙发育、断层破碎带的隧道项目<sup>[14]</sup>,通过设计周边孔间距、装药结构等参数提出了合理的爆破方案,取得了较好的光面爆破效果。姚洪瑞对富水软弱围岩中光面爆破技术的可行性进行研究<sup>[15]</sup>,得出“短进尺弱爆破”技术方案可以有效降低爆破施工对围岩造成的扰动。

在参考上述成果的基础上,本文结合赣深高铁黄柏山隧道工程实际,针对隧道开挖过程中光面爆破效果不理想的现状,基于工程类比与经验公式计算分析方法,设计了合理的光面爆破技术参数,通过现场试验及应用,取得了良好的开挖爆破效果,可为类似工程提供参考。

## 1 工程概况

黄柏山隧道全长 6425.25 m,起于江西省信丰县止于全南县,断面面积 139.3 m<sup>2</sup>,为单洞双线的高速铁路隧道。隧道全线基岩为花岗岩地层,节理裂隙发育一般、岩体较完整,围岩级别为Ⅱ-Ⅲ级,坚固性系数  $f$  为 8~15,采用钻爆法施工。虽然黄柏山隧道开挖断面面积大,但围岩的整体稳定性较好,在隧址工程地质条件和围岩稳定性状况分析的基础上,拟采用全断面开挖方式。为控制隧道轮廓断面的平整性、减少超欠挖,降低爆破对围岩的损伤破坏效应,设计采用全断面光面爆破技术进行隧道开挖。

## 2 隧道光面爆破技术设计

### 2.1 试验段开挖爆破基本条件

黄柏山隧道穿越区域基岩主要为弱风化花岗岩,岩体较完整,设计试验段围岩级别为Ⅲa级,岩体坚固性系数为 10~12。根据围岩地质条件,为提高开挖效率,加快施工进度,设计采用全断面一次爆破开挖方式。现场采用的钻孔设备为气腿式凿岩机,据其特点选择钻孔直径  $d = 40$  mm,使用二号岩石乳化炸药,药卷直径  $d_1 = 32$  mm,每卷药卷长 200 mm、重 200 g。

### 2.2 炮孔布置

隧道开挖断面面积 139.3 m<sup>2</sup>,工程地质条件及稳定性较好,在允许范围内尽量增加循环进尺,加快施工进度,根据以往工程经验、现场施工设备和循环作业能力,设计取循环进尺 3.6 m,炮孔利用率  $\eta = 0.9$ ,孔深  $L = 4.0$  m。

#### 2.2.1 周边孔布置

##### (1) 光爆层厚度 $W$

光面爆破中的光爆层厚度即周边孔的最小抵抗线,与开挖的隧道断面大小有关,光爆层厚度取值不当会造成超挖或欠挖,对后续施工造成较为严重的影响,故合理选择光爆层厚度在光面爆破中极其重要。隧道开挖断面大,光爆层岩石受到的夹制作用较小,容易在光爆孔的爆破作用下破碎并崩落,光爆层厚度可取较大值;隧道开挖断面较小时,光爆层岩石受到的夹制作用较大,在光爆孔的爆破作用下破碎崩落较困难,光爆层厚度需取较小值。同时,光爆层厚度还与地质构造和岩石性质有关,开挖坚硬岩石光爆层厚度需取较小值,松软破碎的岩石可取较大值。可根据式(1)、(2)确定

$$W = (10 \sim 12)d \quad (1)$$

$$W = (0.6 \sim 0.8)m \quad (2)$$

式中: $W$ 为光爆层厚度,cm; $d$ 为炮孔直径,cm。

考虑隧道穿越区域基岩主要为弱风化花岗岩、岩体较完整,设计段围岩级别为Ⅲa级、岩石较坚硬,光爆层厚度应取较小值,取  $W = 15d$  ( $d = 4$  cm),即 60 cm。

##### (2) 周边孔间距 $a$

光面爆破中周边孔的孔间距应小于光爆层厚度,使爆破后炮孔之间形成平整壁面,但孔间距过小会增加钻孔数量,延长钻孔时间,从而增加成本,所以要合理选取周边孔的孔间距,可根据式(3)、(4)确定

$$a = (8 \sim 18)d \quad (3)$$

$$a = (0.5 \sim 0.7)m \quad (4)$$

考虑设计段工程地质条件较好,岩石硬度较大,取  $a=0.5\text{ m}$ 。

### (3) 炮孔密集系数 $m$

炮孔密集系数是周边孔间距  $a$  和光爆层厚度  $W$  的比值,如式(5)所示。炮孔密集系数对光面爆破效果具有显著影响,其值由岩性条件决定,岩性越好炮孔密集系数越大,取值范围一般为  $0.6\sim 1$ 。

$$m = \frac{a}{W} \quad (5)$$

将周边孔间距  $a$  和光爆层厚度  $W$  代入式(5),计算可得  $m=0.83$ ,在符合一般的取值范围规定。

## 2.2.2 掏槽孔布置

### (1) 掏槽形式

掏槽孔在整个隧道爆破过程中最先起爆,目的是为后续隧道开挖爆破创造第二自由面,掏槽效果的好坏会直接影响隧道整体开挖的爆破效果,掏槽

的深度直接影响隧道循环进尺,它是加快隧道施工进度、降低隧道施工成本的重要途径。掏槽孔一般布置在开挖掌子面中下部,有利于钻孔施工且为其他炮孔爆破增加自由面,同时方便岩石抛掷。此隧道为典型的大断面隧道,综合考虑采用三级楔形掏槽,各级掏槽孔交错布置,掏槽孔布置如图1所示。

### (2) 掏槽孔布孔参数

结合钻孔施工设备,掏槽孔直径为  $40\text{ mm}$ ,共布置 38 个掏槽孔。从内向外布置三级掏槽孔:一级掏槽孔 12 个,长度为  $300\text{ cm}$ ,角度设置为  $60^\circ$ ;二级掏槽孔 14 个,长度为  $400\text{ cm}$ ,角度设置为  $65^\circ$ ;三级掏槽孔 12 个,长度  $460\text{ cm}$ ,角度设置为  $70^\circ$ 。为了保证掏槽效果,掏槽孔的深度一般大于其他炮孔,故掏槽孔深度为  $4.3\text{ m}$ 。各级掏槽孔交错布置,如图1所示。

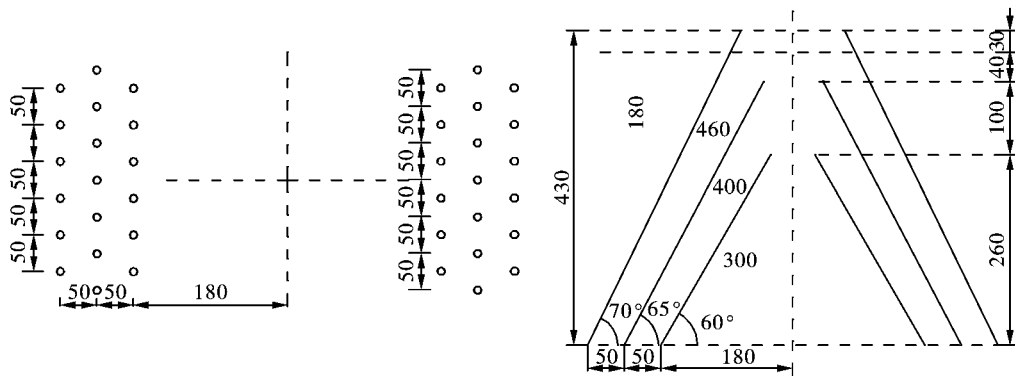


图1 掏槽孔布置示意图(单位:cm)

Fig. 1 Schematic layout of cutting hole(unit:cm)

## 2.2.3 辅助孔布置

掏槽孔与周边孔之间的炮孔称为辅助孔,又称扩槽孔,辅助孔可有效的扩大掏槽体积并根据隧道断面形状依次向外扩挖。前后排炮孔按爆破漏斗原理或三角形原理进行交错布置,由于越靠近掏槽孔的辅助孔爆破夹制作用越大,故靠近掏槽孔的辅助孔抵抗线应取小值,最外层的辅助孔抵抗线最大。设计辅助孔垂直开挖掌子面方向,深度  $400\text{ cm}$ ,炮孔间距  $70\sim 90\text{ cm}$ ,从内到外逐渐递增。

## 2.2.4 底孔布置

底孔位于整个隧道开挖断面的最下方,受到的夹制作用较大,通常需要加大装药量,以增强爆破效果。设计隧道底孔间距为  $60\text{ cm}$ ,炮孔长度  $400\text{ cm}$ 。根据现场施工设备,结合以上分析,得出黄柏山隧道光面爆破的炮孔布置如图2所示。隧道断面共布置炮孔 280 个,其中掏槽孔 38 个、辅助孔 161 个、周边孔 59 个、底孔 22 个。

## 2.3 炮孔装药结构与装药量

### 2.3.1 周边孔装药量与装药结构

#### (1) 光爆孔装药集中度( $f$ )

装药集中度是单位炮孔长度中的装药量,单位  $\text{kg/m}$  或  $\text{g/m}$ 。光面爆破中周边孔装药量由装药集中度( $f$ )确定,装药集中度( $f$ )的取值与岩石的坚固性系数和岩石的结构面分布有关,取值范围一般为  $50\sim 350\text{ g/m}$ ,其值不宜过大,否则会失去光面爆破效果。根据设计段围岩条件,装药集中度( $f$ )取  $150\text{ g/m}$ 。

#### (2) 光爆孔装药量和装药结构

光面爆破周边孔采用不耦合间隔装药,药卷沿炮孔深度方向均匀间隔分布。不耦合间隔装药可使爆破荷载均匀的作用在炮孔壁上,形成较为平整的开挖轮廓面。孔底段加强装药,以克服岩体的夹制作用。设计周边孔长  $4\text{ m}$ ,炮孔直径  $40\text{ mm}$ ,不耦合系数为  $1.25$ ,采用直径为  $32\text{ mm}$ ,长  $200\text{ mm}$  的二号

岩石乳化炸药药卷。单孔装药量按装药集中度150 g/m 计算,计算可得单孔装药量为600 g,即直径32 mm 的二号岩石乳化炸药3卷。孔底夹制作用大,集中加强装药1.5卷,剩余1.5卷均匀分为

3段间隔装入炮孔中,每段间隔为80 cm。共布置59个周边孔,光爆层总装药量 $Q_z = 35.4$  kg,周边孔装药结构如图3(a)所示。

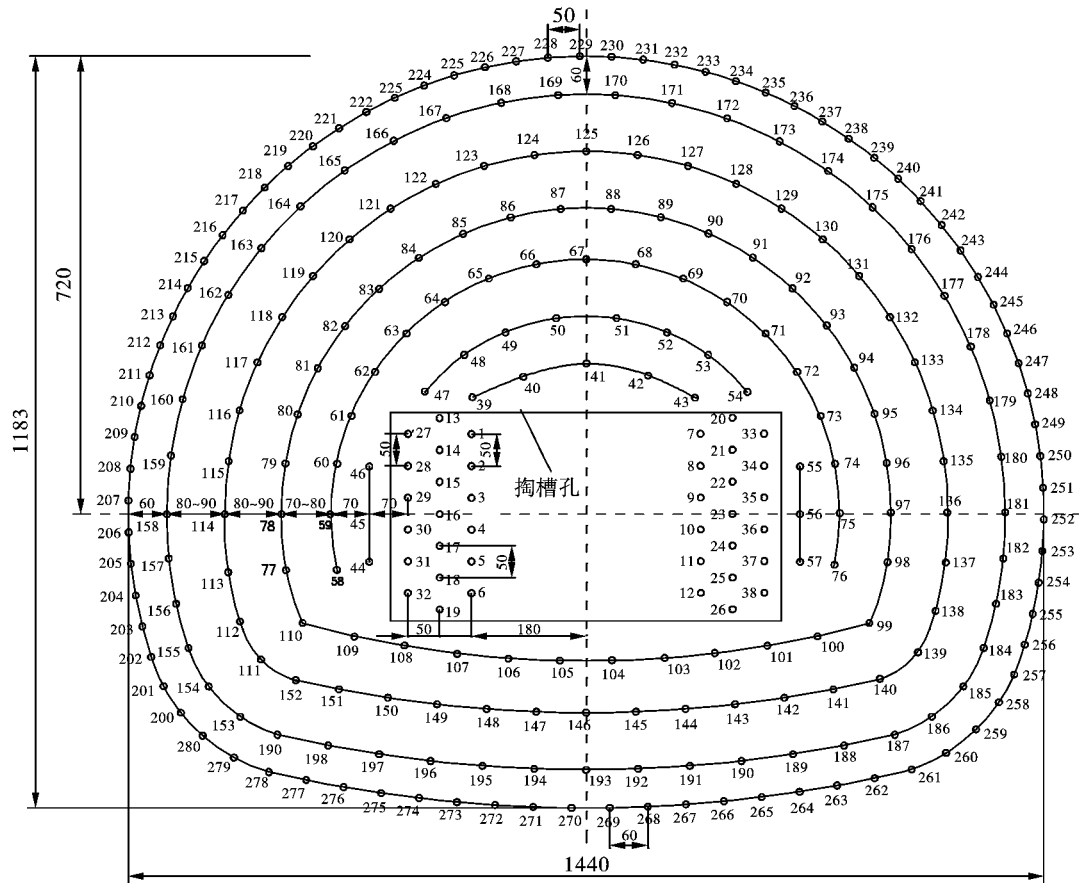


图2 炮孔布置示意图(单位:cm)

Fig. 2 Holes layout diagram(unit:cm)

2.3.2 掏槽孔、辅助孔、底孔的装药量与装药结构

掏槽孔、辅助孔、底孔均采用连续装药,药卷直径32 mm,长200 mm,单药卷重0.2 kg 的二号岩石乳化炸药。装药量按照装药系数进行计算,如式(6)所示

$$v = r \times a \times L \quad (6)$$

式中, $v$  为单孔装药量,kg; $r$  为每米药卷炸药质量为1 kg/m; $a$  为装药系数,根据不同炮孔种类选取不同数值,一般取0.5~0.72; $L$  为炮孔长度,m。

(1) 掏槽孔

掏槽孔分为三个段别,一级掏槽孔12个,炮孔长度3 m,取装药系数为0.67;二级掏槽孔14个,炮孔长度4 m,取装药系数为0.7;三级掏槽孔12个,炮孔长度4.6 m,取装药系数为0.7。分别带入式(6)计算有

$$v_{T1} = 1 \times 0.67 \times 3 = 2.01 \text{ kg}$$

$$v_{T2} = 1 \times 0.7 \times 4 = 2.8 \text{ kg}$$

$$v_{T3} = 1 \times 0.7 \times 4.6 = 3.22 \text{ kg}$$

根据计算取一级掏槽孔单孔装药量为2.0 kg,即10卷,二级掏槽孔单孔装药量为2.8 kg,即14卷;三级掏槽孔单孔装药量为3.2 kg,即16卷。掏槽孔装药结构如图3(b)、(c)、(d)所示。掏槽孔总装药量为

$$Q_T = 12 \times 2 + 14 \times 2.8 + 12 \times 3.2 = 101.6 \text{ kg}$$

(2) 辅助孔

辅助孔长4 m,装药系数为0.55,带入式(6)计算有

$$v_F = 1 \times 0.55 \times 4.0 = 2.2 \text{ kg}$$

根据计算取辅助孔单孔装药量为2.2 kg,即11卷。辅助孔装药结构如图3(e)所示。辅助孔总装药量为

$$Q_F = 161 \times 2.2 = 354.2 \text{ kg}$$

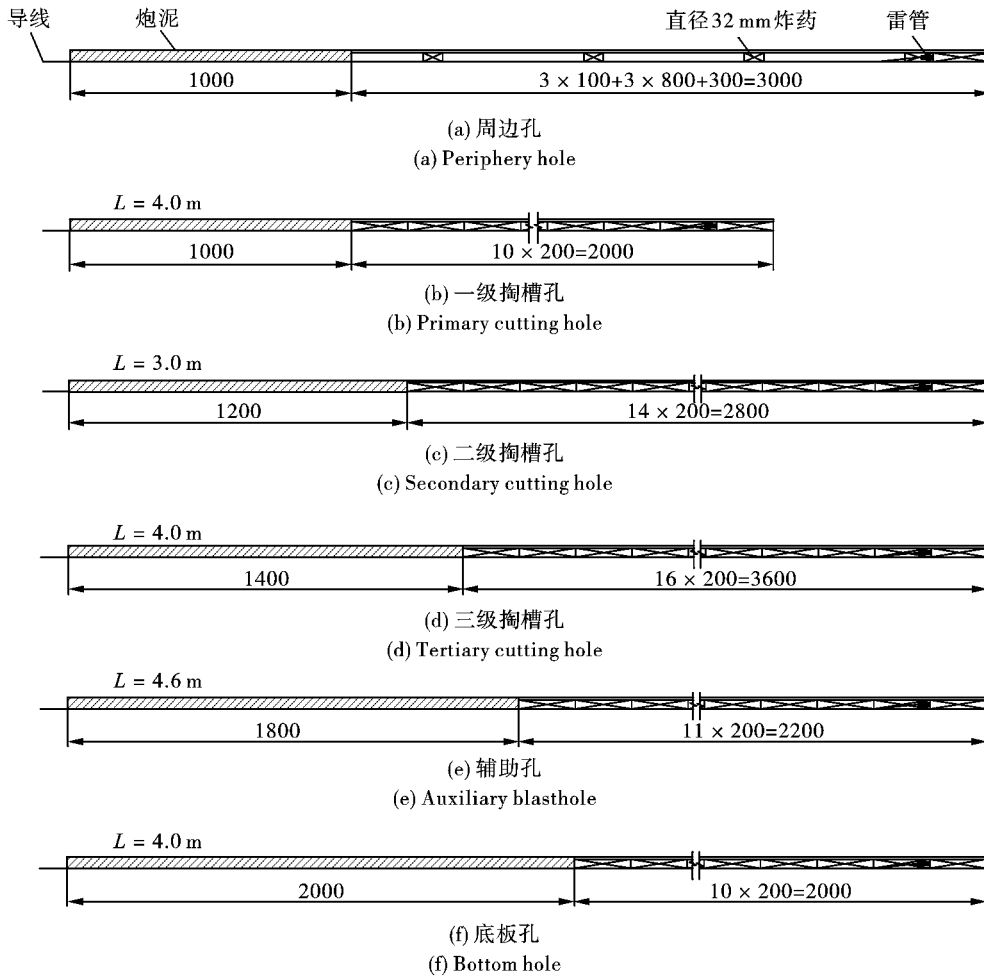


图3 装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 3 Chart of charge structure(unit:cm)

### (3) 底孔

底孔孔长4 m,装药系数为0.5,带入式(6)计算有

$$v_F = 1 \times 0.5 \times 4.0 = 2.0 \text{ kg}$$

根据计算取底孔单孔装药量为2.0 kg,即10卷。

底孔装药结构如图3(f)所示。底孔总装药量为

$$Q_D = 22 \times 2.0 = 44.0 \text{ kg}$$

综合考虑,本隧道全断面光面爆破单循环进尺总装药量为

$$Q = Q_T + Q_F + Q_D + Q_Z = 101.6 + 354.2 + 44.0 + 35.4 = 535.2 \text{ kg}$$

可计算单耗为

$$q = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{SL\eta} = \frac{535.2}{139.3 \times 4 \times 0.9} = 1.07 \text{ kg/m}^3$$

按照上述设计,得出黄柏山隧道光面爆破设计方案,爆破参数如表(1)所示。

## 3 全断面光面爆破技术应用效果

在黄柏山隧道按上述光面爆破技术方案设计

进行了5次现场爆破试验,光面爆破效果如图4所示。由图4可见,试验后隧道开挖轮廓面平整度显著提高,超欠挖状况得到了有效改善。为了更好的将上述光面爆破方案和现场原有爆破方案进行对比,根据表2所示的铁路隧道光面爆破质量评定标准,统计试验前后的相关参数,对两种方案爆破效果进行对比评价,如表3所示。

由表3可以得出,光面爆破试验后爆破效果得到显著改善,平均线性超挖量从原来的28.3 cm下降到了17.4 cm,局部欠挖量从18.4 cm下降到4.7 cm,炮孔痕迹保存率从73.6%提高到87.4%,隧道开挖轮廓面的平整度得到有效提高,减小了后续施工作业的成本投入。炮孔利用率从83.5%提高到91.2%,此外炸药单耗也从原来的1.16 kg/m<sup>3</sup>下降到1.07 kg/m<sup>3</sup>,可以有效加快施工进度并节约经济成本。

表 1 爆破参数表  
Table 1 Blasting parameter table

孔别	炮孔编号	数量	孔长/m	单孔装药量/ kg(卷)	总装药量/kg	装药结构	起爆顺序	雷管段别
掏槽孔	1 ~ 12	12	3.0	2.0(10)	24.0	连续	I	1
	13 ~ 26	14	4.0	2.8(14)	39.2	连续	II	3
	27 ~ 38	12	4.6	3.2(16)	38.4	连续	III	5
	39 ~ 43	5	4.0	2.2(11)	11.0	连续	IV	6
	44 ~ 57	14	4.0	2.2(11)	30.8	连续	V	7
辅助孔	58 ~ 76	19	4.0	2.2(11)	41.8	连续	VI	8
	77 ~ 110	34	4.0	2.2(11)	74.8	连续	VII	9
	111 ~ 152	42	4.0	2.2(11)	92.4	连续	VIII	10
	153 ~ 199	47	4.0	2.2(11)	103.4	连续	IX	11
周边孔	200 ~ 258	59	4.0	0.6(3)	35.4	间隔	X	13
底孔	259 ~ 280	22	4.0	2.0(10)	44.0	连续	X	13
合计		280			535.2			

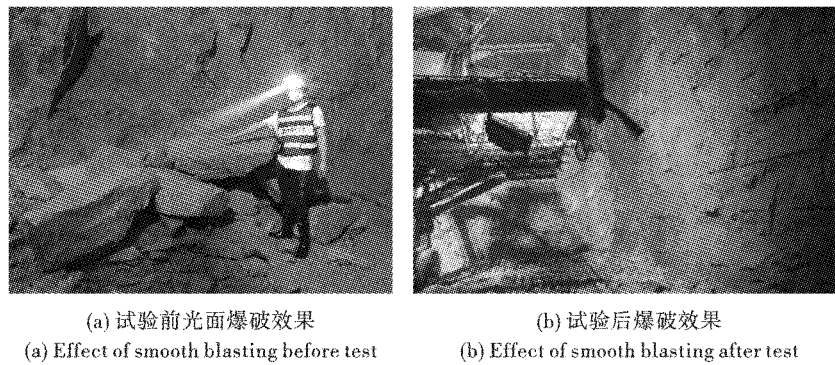


图 4 光面爆破前后效果对比图  
Fig. 4 Figures of effect comparison before and after smooth blasting

表 2 铁路隧道光面爆破质量评定标准

Table 2 Standard for quality evaluation of smooth blasting in railway tunnels

序号	项目	硬岩	中硬岩	软岩
1	平均线性超挖量/cm	16 ~ 18	18 ~ 20	20 ~ 25
2	最大线性超挖量/cm	20	25	25
3	两炮衔接台阶最大尺寸/cm	15	20	20
4	炮孔痕迹保存率/%	≥80	≥70	≥50
5	局部欠挖量/cm	5	5	5
6	炮孔利用率/%	90	90	95

表 3 试验前后爆破质量对比

Table 3 Comparison of blasting quality before and after test

项目	光面爆破 试验前	光面爆破 试验后
平均线性超挖量/cm	28.3	17.4
最大线性超挖量/cm	36.7	18.8
两炮衔接台阶最大尺寸/cm	19.4	13.9
炮孔痕迹保存率/%	73.6	87.4
局部欠挖量/cm	18.4	4.7
炮孔利用率/%	83.5	91.2

## 4 结论

依托赣深高铁黄柏山隧道项目,提出了适合现场工程地质和施工条件的大断面隧道全断面光面爆破技术方案,通过现场试验证明了参数选择的合理性,取得了较好的应用效果,得到了以下结论:

(1)大断面隧道全断面光面爆破设计中,掏槽孔分级分层布置可有效的增加掏槽效果,辅助孔间距采用从内到外逐渐递增的布置形式,不但可减少

钻孔作业量也可降低炸药单耗。

(2)为增强光面爆破效果,周边孔设计时可适当的减小孔间距、提高不耦合系数或小耦合系数时采用间隔装药能有效减小围岩损伤、增加开挖轮廓面的平整度。

(3)提出的光面爆破技术方案在黄柏山隧道得到较好的验证,光面爆破效果良好,其中炸药单耗由试验前 $1.16\text{ kg/m}^3$ 降低到 $1.07\text{ kg/m}^3$ ,炮孔利用率从83.5%提高至91.2%,有效的降低了施工成本,可为类似条件下的大断面隧道高效掘进提供参考。

### 参考文献(References)

- [1] 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.地下空间与工程学报,2013,9(4):800-807.
- [1] WANG Jian-xiu, ZUO Bao-ping, HU Li-sheng. Advance and trend in smooth blasting technology for tunnel and underground engineering [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(4): 800-807. (in Chinese)
- [2] 王梦恕,谭忠盛.中国隧道及地下工程修建技术[J].中国工程科学,2010,12(12):4-10.
- [2] WANG Meng-shu, TAN Zhong-shen. The construct technology of tunnel and underground engineering in China [J]. Strategic Study of CAE 2010, 12(12): 4-10. (in Chinese)
- [3] 汪旭光.爆破设计与施工[M].北京:冶金工业出版社,2012.
- [4] 凌伟明.光面爆破和预裂爆破破裂机理的研究[J].中国矿业大学学报,1990(4):82-90.
- [4] LING Wei-ming. A study on the fracture mechanism of smooth blasting and pre-split blasting [J]. China University of Mining and Technology, 1990(4): 82-90. (in Chinese)
- [5] 刘殿书,李胜利.爆破工程[M].北京:科学出版社,2011.
- [6] 彭刚健.岩体巷道光面爆破参数的分析与应用[J].中国矿业,2009,18(10):103-106.
- [6] PENG Gang-jian. Analysis of smooth blasting parameter on tunnels in soft-fractured rock mass [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(10): 103-106. (in Chinese)
- [7] 宗琦,陆鹏举,罗强.光面爆破空气垫层装药轴向不耦合系数理论研究[J].岩石力学与工程学报,2005(6):1047-1051.
- [7] ZONG Qi, LU Peng-ju, LUO Qiang. Theoretical study on axial decoupling coefficients of smooth blasting with air cushion charging construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(6): 1047-1051. (in Chinese)
- [8] 满奕.花岗岩地层隧道光面爆破设计参数优化研究[J].铁道科学与工程学报,2011,8(2):64-67.
- [8] MAN Yi. Optimization of smooth blasting parameters of tunnels in granite stratum [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2011, 8(2): 64-67. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] GONG Zhong-jiang, CHAI Jing-yao, YANG Chang-geng. Construction technology of smooth blasting used in railway tunnel and its management practice [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(12): 1593-1599. (in Chinese)
- [10] 刘俊轩,栾龙发,张智宇,等.全断面光面爆破技术在坚硬岩巷掘进中的应用[J].爆破,2014,31(3):80-84,109.
- [10] LIU Jun-xuan, LUAN Long-fa, ZHANG Zhi-yu, et al. Application of whole section smooth blasting technology in hard rock drift driving [J]. Blasting, 2014, 31(3): 80-84, 109. (in Chinese)
- [11] 毛建安.光面爆破技术在向莆铁路青山山特长隧道工程中的应用[J].现代隧道技术,2011,48(5):134-138.
- [11] MAO Jian-an. Application of smooth blasting to the Qingyunshan Tunnel on the Xiangtang-Putian railway [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(5): 134-138. (in Chinese)
- [12] 李启月,赵新浩,魏新傲,等.大断面隧道轮廓控制爆破技术研究与应用[J].黄金科学技术,2019,27(3):350-357.
- [12] LI Qi-yue, ZHAO Xin-hao, WEI Xin-ao, et al. Study and application of contour control blasting technology for large section tunnel [J]. Gold Science and Technology, 2019, 27(3): 350-357. (in Chinese)
- [13] 付玉华,李夕兵,董陇军.损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J].岩土力学,2010,31(5):1420-1426.
- [13] FU Yu-hua, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Analysis of smooth blasting parameters for tunnels in deep damaged rock mass [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1420-1426. (in Chinese)
- [14] 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.
- [14] GUO Dun-wen, JIANG Shu-lin, TANG Yu, et al. Research on smooth blasting technology of tunnel passing through broken vein fault. Engineering Blasting, 2021, 27(2): 79-84. (in Chinese)
- [15] 姚洪瑞.软弱围岩大断面隧道光面爆破[J].爆破,2020,37(2):42-47.
- [15] YAO Hong-rui. Smooth blasting for large cross-section tunneling in weak surrounding rocks [J]. Blasting, 2020, 37(2): 42-47. (in Chinese)