

文章编号: 0451—0712(2005)10—0221—05

中图分类号: U455.6

文献标识码: B

# 公路隧道的光面爆破

刘仁旭, 汲红旗

(路桥集团第一公路工程局隧道公司 北京市 100085)

摘 要: 介绍了光面爆破技术的应用及爆破参数的确定和施工过程的质量控制与爆破效果。  
关键词: 隧道; 光面爆破; 爆破参数; 施工技术

## 1 工程概况

父子关隧道位于沪蓉西高速公路 ZK35+210~ZK36+300、YK35+250~YK36+170 处, 是一座上下行分离的四车道高速公路中长隧道, 左洞长 1 025 m, 右洞长 870 m, 隧道最大埋深约 166 m。计算行车速度为 80 km/h, 隧道净空高 5.0 m, 建筑限界净宽为:  $2 \times (0.75 \text{ m} + 0.25 \text{ m} + 0.5 \text{ m} + 2 \times 3.75 \text{ m} + 0.5 \text{ m} + 0.25 \text{ m}) = 2 \times 9.75 \text{ m}$ 。本隧道围岩可分为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类三大类, 其中Ⅱ类围岩长度为 127 m, Ⅲ类围岩长度为 340 m, Ⅳ类围岩长度为 1 510 m。Ⅳ类围岩开挖面积为  $95.47 \text{ m}^2$ , 采用全断面开挖和光面爆破, 非电毫秒雷管起爆, 减少了超欠挖和减弱了对围岩的扰动, 提高了开挖质量并确保了施工安全。

## 2 光面爆破法简介

光面爆破的实质是按照隧道断面的设计轮廓线合理布置周边眼而进行的一种控制爆破, 实质上就是爆破光面层, 而实施爆破之后, 在隧道周边形成一

个光滑平整的边壁, 使隧道断面既符合设计轮廓要求, 又要使围岩不产生损伤, 从而保持围岩的完整和自身承载能力, 以达到快捷、高效、优质的施工目的。光面爆破分为全断面一次爆破和预留光面层两种。对于父子关隧道可采用全断面一次爆破法。

### 2.1 隧道施工采用光面爆破的必要性

(1) 隧道开挖实施光面爆破后, 在隧道周边形成一个光滑平整的边壁, 使隧道断面既符合设计轮廓要求, 又使隧道围岩不产生损伤, 从而保持围岩的完整性和自身承载能力, 有利于隧道的维护。

(2) 避免了隧道施工时产生欠挖或超挖, 于是减少了欠挖处理的时间和超挖所需的填料, 加快了施工进度, 保证了工程质量, 降低了成本。

(3) 由于采用光面爆破技术, 防止了爆破对隧道围岩的强烈振动, 保持了隧道围岩的稳定性, 达到了安全施工的目的。

(4) 因地下水发育, 拱部需挂设防水板。只有做好光面爆破才能保证防水板衬砌混凝土与围岩的紧

收稿日期: 2005—09—01

施加支撑, 在中墙靠后行洞一侧用灌木丛覆盖, 从而削弱和消除爆破产生的冲击波。

通过一系列有效措施, 掘进、支护工作顺利进行, 到 9 月底右洞上台阶贯通, 到 10 月底, 左右洞开挖及初期支护全面结束。全过程围岩稳定。实践证明, 在骨塘连体隧道采用单导洞、全断面长台阶施工法, 是切实可行的。其显著优点是便于采用整体全液压模板台车进行二次衬砌, 能有效保证施工质量, 整体铺设防排水层更有利于提高隧道的防水能力; 减少了侧导洞的开挖及支护的时间, 工序简单, 便于管

理, 大幅度提高了连体隧道施工机械化程度, 提高了工效, 缩短了施工工期。

## 6 结语

骨塘隧道“单导洞施工法”概念的提出和使用, 克服了连体隧道“三导洞”方案施工技术复杂、机械化程度不高、施工进度慢、围岩受扰动次数多的缺点, 质量、进度、效益达到预期要求, 实践证明该工法是成功的, 在类似工程可以借鉴。

密贴合,预防空洞的产生,不出现滴水渗水,保证施工质量。

## 2.2 光面爆破质量标准

目前,国家尚无鉴别光面爆破质量的统一标准,可根据工程种类的围岩条件,定出相应的标准。一般说来,光面爆破应达到以下要求:

(1)开挖轮廓尺寸基本符合设计要求,欠挖不大于 50 mm,超挖不大于 150 mm,壁面不平度小于 150 mm;

(2)爆破后壁面上保留的半眼孔痕率,坚硬且完整性好的岩石 $\geq 80\%$ ,中等强度的岩石 $\geq 65\%$ ,软岩或节理发育的岩石 $> 50\%$ ;

(3)爆破后对保留部分岩体的破坏轻微,保留下的炮眼壁面上无粉碎和明显的爆破缝隙,没有松软破碎的岩体,爆破后尽量无大的危岩浮石,对于坚硬面完整的岩体,无危岩或有极少危岩;

(4)2 排光面炮眼衔接处的“台阶”,对于隧道工程,应控制在 100~150 mm 以内。

## 3 施工方法与机具

Ⅳ 类围岩地段采用简易台车钻孔、全断面光面控制爆破。钻孔采用 YT-28 型气腿式凿岩机,钻头直径为 42 mm。设置工作台架作为平台进行操作,钻爆平台(自制)分 4 层,立体作业。高压风管和水管用软管直接固定在平台上。钻尾的短胶管直接用卡头同平台的管口相连,用 ZLC50B 侧卸式装载机和反铲挖掘机装渣,自卸汽车运输至洞外。

## 4 爆破设计

### 4.1 进尺与炮眼深度的选择

一般随着眼深的增加,单循环的进尺也越高。但钻眼的深度与钻眼机械有关,随着眼深的增加,钻眼效率降低,而且眼孔易出现弯曲,孔间误差过大影响爆破效果。通过实践证明,父子关隧道在Ⅲ级围岩条件下,每循环进尺 3.0 m,炮眼深度在 3.2~3.4 m 比较合适。

### 4.2 爆破器材及起爆顺序

选择 2 号岩石硝铵炸药,规格为  $\phi 32 \times 200$  (0.15 kg/卷)和  $\phi 25 \times 200$  (0.12 kg/卷),塑料导爆管采用 1:15 段非电毫秒雷管。光面爆破时,从掏槽眼开始,一层一层从截面中心往外进行,最后是周边眼爆破。布置雷管段号时应注意,安排合理的段间隔时间,前一段的起爆要尽量为后一段爆破创造良好

的临空面。

### 4.3 掏槽眼

掏槽效果的好坏直接影响掘进效果和炮孔利用率。直眼掏槽在提高进尺方面具有很大潜力。然而其中心孔直径达 125 mm,气腿式凿岩机很难达到这种要求。而父子关隧道开挖采用简易开挖台架,配备普通 YT-28 型气腿式凿岩机。父子关隧道钻爆施工中采用斜眼掏槽。

### 4.4 爆破参数选择

影响光面爆破效果的主要参数是:周边炮眼间距  $E$ 、周边眼密集系数  $m$ 、最小抵抗线  $W$ 、不偶合系数  $D$ 、装药集中度  $q$ 。实践证明这些参数是共同起作用的,只有这些参数都在正确的范围内时,爆破效果才是最理想的。各种参数中周边眼装药集中度  $q$ ,是最重要的参数。所以对光面爆破来讲,根据地质条件、炸药品种、性能等因素,正确设计装药集中度  $q$  是最重要的。

影响光面爆破参数变化的因素很多,主要有岩石的爆破性能、炸药品种、一次爆破的断面大小、断面形状、凿岩设备性能、地质条件等。其中最主要的也是影响最大的,应该说是地质条件的变化。

#### 4.4.1 周边眼间距 $a_0$

周边眼间距和最小抵抗线是光面爆破的 2 个重要参数。一般原则是:软岩和层理节理发育的岩层上,眼距应小而抵抗线应大,在坚硬稳定的岩层上,眼距应大些,抵抗线应小些。隧道跨度较大时,眼距适当加大。隧道开挖施工爆破可按下式确定周边眼间距  $a_0$ 。

$$a_0 = (12 \sim 20) d_p$$

式中: $d_p$  为炮眼直径;mm。

对于隧道光面爆破的周边眼间距可取 600~700 mm,若开挖面曲率较大,岩石对爆破的夹制作用较强,炮眼间距可缩小至 450~500 mm,导向空眼和装药眼之间的间距一般不小于 400 mm。以理论为依据,通过反复试验和综合分析论证,父子关隧道Ⅳ类围岩可取  $a_0 = 60$  cm。

#### 4.4.2 炮眼密集系数 $m$

炮眼密集系数也称炮眼邻近系数,它表达了炮眼间距  $a_0$  与最小抵抗线  $W$  之间的关系即  $m = a_0/W$ ,是光面爆破参数确定中的一个关键值。目前,在工程施工中,光面层厚度的确定,一般情况下,周边眼间距  $a_0$  与光面层厚度  $W$  的比值为:

$$m = a_0/W = 0.8 \sim 1.0$$

当  $m > 1$  时,说明  $a_0$  值偏大,  $W$  值偏小,爆破时易出现眼间裂缝,周边眼尚未沟通前应力波已传到二圈眼,这样光面眼就变成偏斗爆破。当  $a_0 = W$  时,  $m = 1$ 。爆破时光面眼之间的裂缝形成较好;当  $m = 0.5$  时,即  $2a_0 = W$ ,光面层不易爆下来,实践表明  $m = 0.8 \sim 1.0$  时较好。

#### 4.4.3 光面爆破的最小抵抗线

理论和实践证明,光面爆破炮眼间距与最小抵抗线之比取 0.8 为好,即:

$$E/W = 0.8, W = 1.25E$$

当岩石坚韧时,抵抗线  $W$  应减小;岩石破碎时,在节理裂隙发育处,抵抗线  $W$  应增大。

#### 4.4.4 不耦合系数 $D$

炮眼直径与药包直径的比值称为不耦合系数。当不耦合系数  $D = 1$  时,表示药包与孔壁紧密接触。当  $D > 1$  时,表示药包与孔壁之间存在着空气间隙。当药包与孔壁之间存在着空气间隙时,爆破将在间隙中衰减很多,导致作用于孔壁的冲击压力大为减小,从而减小了传递给岩面的爆炸能量。因此,在实际施工中,主要采用耦合装药改变装药结构来实现控制爆破。

研究表明,不耦合系数的大小与炮壁上的最大切向应力之间呈指数关系。因此,当炮眼直径为 32~45 mm 时,不耦合系数  $D = 1.5 \sim 2.0$ 。

#### 4.4.5 装药集中度 $q$

(1) 循环耗药量的计算。

$$Q = k \times S \times L$$

式中:  $k$  为爆破 1 m<sup>3</sup> 岩石的用药量, kg/m<sup>3</sup>;  $S$  为导坑断面面积;  $L$  为炮眼深度。

(2) 炸药量的分配。

爆破隧道不同部位的炮眼所起的作用不同,因而各部位炮眼的装药量也不同。

$$q = k \times a_0 \times \omega \times L \times \lambda$$

式中:  $q$  为单眼装药量, kg;  $k$  为单位炸药消耗量, kg/m<sup>3</sup>;  $\omega$  为炮眼爆破方向的抵抗线, m;  $a_0$  为炮眼间距, m;  $L$  为炮眼深度, m;  $\lambda$  为炮眼的部位系数, 掏槽炮眼  $\lambda = 2 \sim 3$ , 扩槽炮眼  $\lambda = 2$ , 掘进槽土  $\lambda = 0.8$ , 掘进槽侧  $\lambda = 1$ , 内圈炮眼  $\lambda = 0.6$ , 底眼  $\lambda = 1.5$ 。

#### 4.4.6 装药结构

(1) 周边眼装药结构。

将每卷乳化炸药剖成 4 等分间隔装药,并在各卷药间串联导爆线,让药卷架空于钻孔中间,适当采用孔底集中装药以提高炮眼利用率,为了充分利用

炸药能量,使炸药威力均匀作用在两炮眼的岩石中,相邻药卷错开,使峒壁爆裂光滑整齐,提高光爆效果。

(2) 掏槽眼装药结构。

掏槽眼采用正向装药起爆。

#### 4.4.7 辅助眼参数的确定

内圈眼孔所在的位置即是光爆抵抗线的外边缘,内圈眼孔爆破质量好坏,直接影响着周边孔的光爆质量。实践表明,内圈眼孔距  $E' = 1.5 \sim 2.0\omega$ ,掏槽眼扩大孔既是掏槽眼的辅助炮眼,又是对掏槽炮所在爆槽口起扩大“战果”的作用,因而它的炮孔底部与掏槽孔底部距离应比其他扩大炮小一些,才便于保证槽口顺利地向外扩展,其孔底间距视岩石坚硬程度而定,一般在 50~100 cm。扩大炮孔间距需视岩石坚硬强度而定,扩大孔孔口间距为周边孔距的 1.5~2.0 倍,并根据实际情况及时调整。

#### 4.4.8 合理段间隔时间的选择

爆破时产生超挖,主要有两个原因,一是由于爆轰波的相互叠加而加剧了对围岩的破坏;二是各段间隔秒差过小而使爆破中未能充分形成自由面。经过多次试验得出周边眼用导爆索,父子关隧道掏槽眼和辅助眼采用 1、2、3、4、5、6 段,周边眼采用 7、8 段雷管串联导爆线起爆效果最好。

底板眼的爆破,习惯的做法是加大装药量,并且最后同时起爆,以达到翻渣的目的,便于出渣。但是隧道爆破振动观测表明,隧道爆破产生的地震动强度,除掏槽眼最大外,其次是底板眼的爆破,有时底板眼爆破产生的地震动强度最大,从保护围岩的角度来看,显然是不合理的。所以我们改变了传统的习惯做法,将底板眼分成两段分开起爆,底板眼同段起爆,共同作用的炸药量,改变了底板眼抵抗线的方向,实际上是缩小了底板眼的抵抗线,从而减小底板眼爆破产生的地震动强度。

### 5 影响隧道开挖质量的主要因素

隧道的开挖质量主要表现在对围岩的损伤程度,在施工中要把对围岩的损伤控制在最小限度。保护围岩的措施视围岩性质、围岩固有的自支护能力而定,对坚硬围岩主要是控制对遗留岩体的损伤,对软弱破碎岩体则是如何防止围岩的松弛,提高围岩的自支护能力。为了控制好隧道的开挖质量,应做好以下几项工作。

(1) 提高操作人员的技术水平。

通过对司钻人员进行岗前培训,特别是周边眼和掏槽眼的司钻手,应熟练掌握炮眼的角度、眼口位置的选择、眼底位置的控制等,施工人员要有很强的责任心。

#### (2) 严格控制钻眼精度。

由于钻眼精度(误差)对隧道产生的超欠挖( $h$ )主要受周边炮眼的外插角 $\theta$ 、开口位置 $e$ 和钻眼深度 $L$ 的影响,三者之间的关系如下: $h=e+L\tan\theta$ 。随着外插角 $\theta$ 和钻眼深度 $L$ 的增大, $h$ 值也相应增大。

为了减少因钻眼误差而引起的超欠挖,必须做到:

①周边炮眼的开口位置应尽量在开挖轮廓线上,即 $e=0$ ;

②周边炮眼的外插角根据钻眼深度和允许超欠挖计算,一般应控制在 $3^\circ$ 以内(当 $L=3\text{ m}$ 时, $h=15.7\text{ cm}$ );

③所有炮眼(掏槽眼除外)的眼底位置应尽可能的在同一垂直面上。

#### (3) 提高测量放线精度。

控制超欠挖主要是控制好开挖轮廓线(或周边孔线)的精度。在进行施工测量放样前,应首先熟读设计文件,掌握设计开挖断面各部位的尺寸,同时考虑预留沉落量和变形量。周边轮廓线的放线误差应 $\leq 2\text{ cm}$ 。

#### (4) 选择合理的爆破参数。

爆破技术的好坏主要表现于爆破参数的合理选定。在控制爆破中,主要的技术参数包括:周边炮眼的布置、掏槽炮眼的布置、炮眼装药结构、单位岩石炸药消耗量和起爆顺序等。

#### (5) 采用与地质条件相适应的施工方法。

地质条件是确定爆破参数的基本依据。在现场施工中,应紧跟开挖面对围岩进行观测描述,并对围岩的节理裂隙状态进行预测,据此调整爆破参数和施工方法或采取局部内炮眼、局部空孔不装药、加密炮眼、局部调整起爆顺序等辅助措施。如遇到断层破碎带时,采取预裂爆破或预留光爆层的方法施工。

#### (6) 选择合理的施工机具。

钻机本身的结构尺寸,因右侧有风水管接头,钻杆中心至右侧外缘 $13\text{ cm}$ ,这就必须形成最小错台 $13\text{ cm}$ ,因此形成右侧超挖或错台大于左侧;外插角的大小与台架的宽度有关,决定了风钻能否紧贴岩壁,钻孔取决于外插角的控制。

#### (7) 采取恰当的施工方法。

台阶法与全断面开挖或是有轨运输与无轨运输,以及不同的出渣方式,都影响光爆参数的选择,效果相应就有所改变。

#### (8) 加强现场的施工组织管理。

在控制隧道超欠挖中,需要建立一个比较完善、统一的质量保证体系,对作业全过程及相关因素实行严格的科学管理,对开挖质量实行过程控制。加强施工自检,隧道开挖后,立即组织有关人员对开挖断面进行检查,对超欠挖较严重的部位及时进行处理,使开挖质量始终处于受控状态。现场的组织管理,包括人员组织、作业安排、技术交底与指导、质量检测及相应的规章和技术标准的制定等。管理的目的就是要将众多的因素置于可控状态,达到爆破设计的基本要求。

### 6 光面爆破全过程的质量控制

#### 6.1 测量放线

众所周知,隧道轮廓测量画线的精度直接影响隧道开挖效果,特别是周边眼的精度,直接影响超挖值。要解决这一问题,首先要克服过去施工中存在的“宁超勿欠”思想,严格按设计轮廓放样,钻孔前准确地将中心线,引至作业面,并用支距法定出掏槽孔、周边孔和紧靠周边的一圈内圈眼孔位置,并做出明显的标志。每次测量放线时,对上次爆破断面进行检查,并及时调整爆破参数,以达最佳的爆破效果。

#### 6.2 钻孔作业

(1)首先钻正顶孔。在拱顶距作业面 $1\text{ m}$ 处悬挂一临时中心线,以保证炮孔沿坑道中心线钻进,然后,在此孔内插入炮棍作为其他炮孔的方向标准。

(2)预量钻杆长度,做好记号,保证各孔孔底落在一个面上,周边孔的深度不得超过扩大孔的深度。

(3)钻孔爆破周边孔必须达到“准、直、平、齐”的标准。

准:就是按周边孔参数要求,孔位要选准,当孔位受岩石的层理、节理或其他原因影响时,可使刷帮孔位上下稍移动,不能左右移动,压顶拱弧线上的孔位可左右移动,不能上下移动。

直:就是侧墙孔孔口要开在同一条垂线上,孔底要落在同一垂直面内,先以拱顶孔为方向打好拱脚孔;插上炮杆,吊正垂球,尔后在垂线上依次钻孔,为保证连续作业,各个炮孔由下而上先开眼 $3\sim 5\text{ cm}$ ,确保孔口在同一垂线上,为了减少周边孔的倾斜角度,控制错台,无论是浅孔还是深孔,都尽量用长钻

杆钻孔,并且使钻机紧贴岩壁,尽量缩小周边孔与毛洞外轮廓线的距离。

平:就是各炮眼相互平行,侧墙平行于中线。

齐:就是各孔底要落在同一面上,爆出的断面齐整,便于下一循环作业。

### 6.3 严格执行质量评定标准

严格执行交通部发布的《公路工程质量检验评定标准》(JTGF80—1—2004)。

## 7 结语

为了达到理想的光爆效果,必须严格按钻爆设计布眼,才能实现设定的周边炮眼间距 $E$ 和最小抵抗线 $W$ 。每茬炮均用测量仪器准确放出线、炮眼位置及角度,按眼钻孔、清孔,不合格的眼孔要重新钻,检查合格后,方可按设计要求装药再连线爆破。

施工中应根据围岩的不同情况,及时调整爆破参数,选择合理的钻爆参数,不断完善爆破设计。

在父子关隧道快速掘进过程中,光爆施工效果良好,Ⅳ类围岩拱部炮眼保存率达到98%,边墙光面

爆破炮眼保存率达到90%,平均线性超挖小于8 cm,不仅有效地发挥了围岩的自稳能力,提高了开挖质量,而且还提高了经济效益。

### 参考文献:

- [1] 张志毅,王中黔. 交通土建工程爆破工程师手册[M]. 北京:人民交通出版社,2002.
- [2] 张志呈. 爆破原理与设计[M]. 重庆:重庆大学出版社,1992.
- [3] 齐景狱,刘正雄,张儒林,等. 隧道爆破现代技术[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [4] 卓国平. 龙潭隧道的光面爆破[J]. 铁道工程学报,2003,78(2).
- [5] 邵鸿博. 正阳隧道光面爆破施工技术[J]. 铁道工程学报,2003,78(2).
- [6] 顾义磊,李晓红,杜云贵,王心飞. 隧道光面爆破合理爆破参数的确定[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2005,28(3).
- [7] JTJ042—94,公路隧道施工技术规范[S].

## 投 稿 须 知

《公路》月刊于1956年创刊,由中华人民共和国交通部主管,是中国公路行业出版最早的中央级技术类科学技术期刊,是公路运输类核心期刊,是交通部和全国优秀科技期刊。

1. 本刊刊登的内容以实用科学、实用技术为主,兼顾理论研究、科学实验与标准规范,还包括方针、政策、管理等内容,对技术水平领先、有创造性、适用推广价值较高的文章优先刊登。

2. 投寄本刊的稿件,可以是原稿,也可以是打印稿或E-mail文稿(作者必须与原稿核对无误,并签字认可),具体格式请参照本刊近期出版的《公路》杂志。稿件请作、译者自留备份,本刊概不退稿。若文章被采用,本刊即行寄样刊和稿酬,不再另发“用稿通知”。

3. 文稿应有“摘要”和“关键词”。“摘要”为全文的浓缩,以提供文章内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文章重要内容。“关键词”为“摘要”的浓缩,可选3~8个。

4. 文章中科技术语和名词,请用规定的通用词语。文章内容应符合国家标准和各种行业标准要求,应使用法定计量单位。公式、图表应清晰准确,符合国家标准要求。各级标题应明确、清晰。

5. 文章中摘编、引用他人作品,请遵守《著作权法》规定在参考文献中写出。

6. 文章著作权,除《著作权法》另有规定外,属于作者。文责自负。署名作者的人数和顺序由作者自定。

7. 文章题目、摘要及关键词、作者的姓名和工作单位名称,要求作者翻译成英文。

8. 来稿请注明作者的真实姓名、工作单位和详细地址、电话。作者本人的详细信息,包括:学历、简历、身份证号码。请作、译者注意:来稿作者信息不详者,稿件一律不采用。

9. 所有来稿文责自负。

10. 投稿方式:

您可直接将稿件寄给本刊,地址见本刊“目次”页;您还可通过E-mail:paper@chn-highway.com投稿。通过E-mail投稿的作者请注意留下详细联系地址及电话,否则本刊不接受投稿。