

文章编号:1671-8879(2017)02-0073-08

水平层状围岩隧道爆破控制技术

邓祥辉^{1,2}, 陈建勋¹, 罗彦斌¹, 李旭东¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 西安工业大学 建工学院, 陕西 西安 710032)

摘 要:针对水平层状围岩隧道开挖时,由于水平层理的影响以及爆破扰动,极易导致隧道拱部发生离层、掉块以及严重的超挖、欠挖等问题。采用爆破应力波传播理论分析了爆破应力波对水平节理岩体的作用机理,从理论上解释了水平层状围岩隧道拱顶发生离层、平顶的原因;依托大梁崮公路隧道工程进行现场爆破参数优化试验;并针对拱部超挖严重,上台阶下部边墙欠挖的情况,提出了控制措施。研究结果表明:通过爆破参数优化,上台阶开挖单次爆破可减少 6% 的起爆药量,下台阶可减少 29% 的起爆药量;从爆破效果来看,优化后 6 个试验断面平均超挖由原来的 7.81 m² 减少为 2.56 m²,优化后超挖面积仅为优化前的 31%,欠挖也得到有效改善,优化后的爆破方案不仅能大幅减少隧道超欠挖,减少炸药用量,还能提高开挖后围岩的质量,使隧道施工更安全;拱部超挖可通过内移周边眼、适当增加周边眼间距、减少装药量以及非连续装药等措施进行控制;上台阶下部边墙欠挖可通过缩小周边眼间距或增设周边眼等措施来解决。研究成果不仅可保证依托工程的施工安全,减少超欠挖,节约成本,加快施工进度,还可为类似工程提供参考。

关键词:隧道工程;水平层状围岩隧道;爆破参数;优化;现场试验

中图分类号:U451

文献标志码:A

Blasting control technology of horizontal stratified rock tunnel

DENG Xiang-hui^{1,2}, CHEN Jian-xun¹, LUO Yan-bin¹, LI Xu-dong¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. School of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, Shaanxi, China)

Abstract: Due to the influence of horizontal joint and blasting disturbance, separation and slack drop are more prone to occur in arch crown during the excavation of horizontal stratified rock tunnel. At the same time, excessive and insufficient excavation is very common. In this paper, the propagation theory of explosive stress wave was used to analyze the mechanism of horizontal joint under the influence of propagation of stress wave, and the reasons of separation and flat top in tunnel arch crown in horizontal layered rock were explained theoretically. Meanwhile, field blasting parameter optimization tests were conducted to Daliangmao Tunnel. Control measures were proposed to solve the problems of excessive excavation in arch crown and insufficient excavation in sidewall corners of upper steps. The results show that after blasting parameter optimization, the initiation dose of a single shot blasting on the upper steps reduces by 6%, and that of the lower steps reduces by 29%. In terms of blasting effect, the average excessive

收稿日期:2016-11-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51278063);陕西省重点科技创新团队支持计划项目(2014KCT-29);

陕西省交通运输厅建设科技项目(13-14K);陕西省教育厅专项科技计划项目(15JK1337)

作者简介:邓祥辉(1976-),男,四川德阳人,西安工业大学副教授,工学博士,长安大学博士后,E-mail:dh_gl@163.com。

excavation area of the six test sections reduces from 7.81 m^2 to 2.56 m^2 after the optimization of blasting solution. The excessive area is only 31% of the original solution and the insufficient excavation can also be controlled effectively. The excessive excavation in the arch crown can be controlled by moving inside periphery holes, appropriately increasing the distance among periphery holes, reducing the amount of charge and taking non-continuous charge. Insufficient excavation of sidewall corners of upper steps can be solved by narrowing periphery holes or adding additional periphery holes. Therefore, the optimized blasting solution can not only greatly reduce the excessive and insufficient excavation of tunnel, reduce the amount of explosives, but also can improve the stability of surrounding rock after excavation, so as to make the tunnel construction safer. The results of this paper can ensure the security of tunnel construction, reduce the excessive and insufficient excavation, save cost and speed up the construction progress. It can provide references for similar projects as well. 3 tabs, 8 figs, 25 refs.

Key words: tunnel engineering; horizontal stratified rock tunnel; blasting parameter; optimization; field test

0 引言

层状结构是自然界中岩体结构分布最为广泛的一种形式,据分析,自然界中具有层状构造的沉积岩体约占陆地面积的 $2/3$,许多变质岩也具有显著的层状构造特征。水平层状岩体是一种典型的层状岩体,这种水平层状结构直接导致岩体在受力、变形等方面具有明显的各向异性。同时,岩体在破坏过程中其破坏机理、破坏方式也明显不同于其他类型的岩体^[1-2]。当隧道穿越水平层状岩体时,由于层间结合力较差,容易在隧道拱部发生岩体掉块、离层、甚至局部坍塌等情况^[3-4]。这些情况的发生一般导致拱部超挖严重,而边墙则常常欠挖^[5-6]。因此,研究水平层状围岩隧道开挖爆破控制技术,对于保证隧道施工安全,提高围岩稳定性,减少超欠挖,节约成本和加快施工进度等具有重要的现实意义。

目前,对于水平层状围岩隧道的研究,主要集中在水平层状围岩结构特征^[7-8]、水平层状围岩的力学特性^[9-10]、水平层状围岩隧道的变形监测^[11-12]、水平层状围岩隧道支护参数优化^[13-14]、层状围岩隧道稳定性分析^[15]等方面。由于层状围岩结构和隧道受力特性复杂,在实际隧道开挖过程中,超欠挖严重,很难控制隧道的爆破效果。这主要是由于水平节理对爆破效果产生较大影响所致。针对节理对岩体爆破效果的影响,国外学者早在 20 世纪 60~70 年代就开始了研究。如 Rinehart 针对应力波在一般节理岩体中的传播过程和规律进行了研究,认为岩体节理、裂隙对应力波传播影响较大^[16]。随着研究的深入,研究人员发现节理岩体的破坏模式在很大程度

上受节理分布的控制^[17-19]。从后续研究成果来看,对水平层状岩体及爆破控制技术的研究主要体现在两方面:一方面,通过理论分析、室内试验研究爆炸应力波与层状岩体受力、破坏形式的关系,如夏致晰等通过理论分析和室内试验研究层状节理对应力波的影响,认为在相同传播距离内,层数较多、软硬相间的层状岩体对爆炸应力波有更大的衰减作用^[20-21];另一方面,对层状围岩、特别是水平层状围岩隧道超欠挖问题进行了研究。如张振刚等针对大林隧道Ⅳ、Ⅴ级水平层状围岩台阶法施工过程中层间存在软弱夹层,以及光面爆破效果较差的问题进行了施工控制爆破现场试验,提出了合理的爆破开挖参数^[22];杨峰等针对雀儿溪隧道爆破超欠挖严重,难以形成设计要求的拱形轮廓的问题,根据具体情况及时调整和优化爆破参数,有效减少了隧道超挖和控制了欠挖^[23];何英伟等对水平层岩隧道施工超欠挖的影响因素进行了分析,从提高钻孔精度、控制装药参数、规范装药结构和加强施工管理等 4 个方面进行控制,提出了水平层状围岩全断面法施工的钻爆设计参数,有效减少了超欠挖现象^[24]。

从上述分析不难看出,目前对于水平层状围岩隧道爆破开挖还存在两方面问题:一是水平节理对爆破应力波传播过程和衰减规律的理论研究成果不多,爆破后超欠挖严重的现象没有令人信服的理论解释;二是对于爆破参数的定性研究很多,而对于隧道开挖后不同位置超欠挖的定量试验数据不多,无法提出具有理论深度的合理化措施和建议。基于此,本文在分析水平节理对爆破应力波影响规律的基础上,通过现场扫描毛洞轮廓,结合现场爆破试

验,优化水平层状围岩隧道爆破参数,以达到减少超挖、欠挖,降低工程造价,减少对围岩的扰动和破坏,预防局部掉块、塌方等的目的。

1 水平层状岩体爆破机理分析

1.1 应力波在水平节理中的传播理论

在隧道爆破开挖过程中,炸药爆炸后产生的冲击波随着传播距离的增加而急剧衰减为应力波^[25]。应力波在岩体传播过程中产生透射和反射,导致岩体产生裂缝和破坏。因此,研究应力波在水平层状岩体中的传播和衰减规律,对于揭示水平层状岩体破坏机理非常重要。

如图1所示,建立 $j+1$ 层水平层岩,应力波向下传播的方向定义为 z 轴正方向,位移为 u ,方向与 z 轴一致。

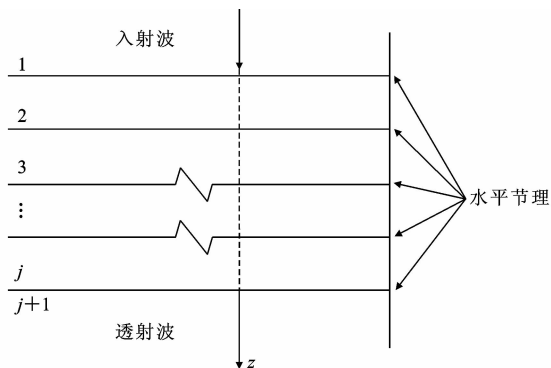


图1 应力波入射水平层状岩体

Fig. 1 Propagation of stress waves in horizontal stratified rock

假定每层岩体内部为横观各向同性,则应力波的波动方程为

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = \frac{\lambda_j + 2G_j}{\rho_j} \frac{\partial^2 u_j}{\partial z^2} \quad (1)$$

式中: λ_j 为第 j 层岩层的Lame系数; G_j 为第 j 层岩层剪切模量; u_j 为第 j 层岩层中的位移; t 为时间; ρ_j 为第 j 层岩层密度。

则应力波传播速度为

$$v_j = \sqrt{(\lambda_j + 2G_j) / \rho_j} \quad (2)$$

式中: v_j 为应力波在第 j 层岩层的传播速度,由岩体的物理性质决定。

对式(1)的二阶微分方程进行求解,并根据各岩层层面上位移、应力的连续性和边界条件,推导出相邻两岩层层面上应力峰值的传递关系式为

$$\begin{cases} \sigma_{Tj+1} = \frac{2\rho_{j+1}v_{j+1}}{\rho_jv_j + \rho_{j+1}v_{j+1}} \sigma_{Tj} e^{-i\omega \frac{d_j}{v_j}} \\ \sigma_{Rj+1} = \frac{\rho_{j+1}v_{j+1} - \rho_jv_j}{\rho_jv_j + \rho_{j+1}v_{j+1}} \sigma_{Rj} e^{-2i\omega \frac{d_j}{v_j}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i 为虚数; ω 为波的频率; d_j 为第 j 层岩层厚度; σ_{Tj} 、 σ_{Rj} 分别为第 j 层岩体中压应力和拉应力的峰值。

根据式(3)可得到应力波传播的透射系数和反射系数为

$$\begin{cases} T = \frac{2\rho_{j+1}v_{j+1}}{\rho_jv_j + \rho_{j+1}v_{j+1}} \\ F = \frac{\rho_{j+1}v_{j+1} - \rho_jv_j}{\rho_jv_j + \rho_{j+1}v_{j+1}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: T 、 F 分别为应力波传播的透射系数和反射系数。

从式(3)、式(4)可见,应力波的透射和反射取决于岩层波阻抗 ρ_jv_j 。岩层完整性越好越密实,压缩应力波峰值就越大,也更容易透射;反之则拉伸应力波峰值越大,越容易反射。

1.2 应力波对节理岩体的作用机理

在爆炸应力波作用下,岩体水平节理发生不同程度的张开,原则上是距离爆源越近,张开度越大。当应力波要穿过张开型的水平节理裂隙时,由于节理中充满着软弱介质和空气,其波阻抗远小于入射岩体,应力波较容易透射进入。但是,当应力波要从水平节理再透射进入相邻岩层时,由于要透射的介质波阻抗远大于节理介质,应力波很难透射进入相邻岩石介质,而绝大部分应力波将被反射,反射的应力波对反射岩层形成拉伸作用。如此反复传播和作用,应力波在岩层中的传播随着远离爆源而呈现出急剧下降的趋势,导致距离爆源较近的水平岩层耗散掉绝大部分爆炸能量,在上部围岩压力和自身重力作用下,这部分水平岩层很容易破坏。这就是导致水平层状围岩隧道拱顶发生离层、平顶的机理。

2 工程概况

大梁峁隧道位于陕西省志丹县境内,为双洞分离式特长隧道,设计采用双向4车道技术标准。左线全长4 278 m,里程桩号ZK79+030~ZK83+308;右线全长4 310 m,里程桩号YK79+045~YK83+355。隧道最大埋深250 m,最小埋深28 m,工程试验段隧道埋深范围为110~180 m。

2.1 工程地质概况

隧址区沿线出露地层为第四系上更新统新黄土、中更新统老黄土和白垩系下统环河华池组泥砂岩互层,隧道洞身段为白垩系下统环河华池组泥砂岩互层。洞身段岩体为中风化砂岩,褐红色,粉砂质结构,中厚层状结构,水平层理发育,钙质胶结,多与

泥岩呈互层状产出,层厚为 10~30 cm。岩体较完整,岩芯主要呈短柱状、柱状。试验段为Ⅳ级围岩,围岩物理力学参数见表 1。隧道围岩特征如图 2 所示。本试验在洞身段进行,试验段采用上下台阶法施工,每循环进尺 3.0 m。为尽可能减少对围岩的扰动,采用光面爆破施工。

表 1 围岩力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of surrounding rock					
层岩名称	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$
泥岩	5.0	0.28	23.0	400.0	32
砂岩	10.0	0.25	23.0	800.0	38



图 2 隧道围岩特征

Fig. 2 Surrounding rock characteristics of tunnel

2.2 隧道初期支护参数

隧道开挖后应及时进行喷锚支护。具体参数为:12 cm 厚的 C25 喷射混凝土;设置 $\Phi 8$ mm 钢筋网,网格间距 25 cm \times 25 cm;采用间距为 1.2 m \times 1.2 m(梅花形布置)的 $\Phi 25$ mm 锚杆。为保证拱部注浆效果,拱部中空 $\Phi 25$ mm 注浆锚杆为 3.5 m。同时,在拱部增设 $\Phi 22$ mm 螺纹钢网片,网格间距 50 cm \times 50 cm,并将其与锚杆端部焊接牢固,以加强支护网。

3 爆破开挖现场试验分析

3.1 试验方案和步骤

通过对比未优化爆破参数和优化爆破参数的爆破效果来确定合理的爆破参数和爆破方案。试验的主要步骤如下:①初步确定爆破参数和爆破方案;②实施爆破和扫描爆破毛洞;③分析隧道断面的超欠挖情况和部位;④针对超欠挖情况和部位优化爆破参数;⑤重复步骤②~④,直到爆破后超欠挖面积显著减小;⑥确定水平层岩隧道爆破方案。

3.2 原设计爆破参数与效果分析

钻孔采用风动凿岩机配合自制台车施工,采用

连续装药结构进行爆破开挖。炸药采用 NJ-2 乳化炸药,药卷规格 32 mm \times 250 mm,药卷质量 200 g/支。爆破方案和主要参数见图 3 和表 2。爆破采用 8 个段位的雷管进行光面爆破。周边眼间距为 50 cm 左右,炮眼沿设计轮廓线内移 10 cm,炮眼垂直打设,炮孔超深 0.2 m。采用二级复式水平楔形掏槽,共计 12 个掏槽眼,掏槽眼分为掏槽眼 1 和掏槽眼 2 两列,与开挖面的夹角分别取 50 $^\circ$ 、57 $^\circ$,孔深分别为 2.5、4.0 m,掏槽眼 1 和掏槽眼 2 的水平距离为 80 cm。掏槽眼 1 炮眼眼底距离为 60 cm,掏槽眼 2 炮眼眼底距离为 100 cm。掏槽眼平面布置如图 3 所示。掏槽眼孔深、装药量以及延时参数如表 2 所示。起爆方式采用传统的火花起爆,通过炮孔内微差毫秒雷管实现掏槽眼、辅助眼、周边眼、底板眼的起爆顺序,原设计爆破方案如下页图 4 所示。

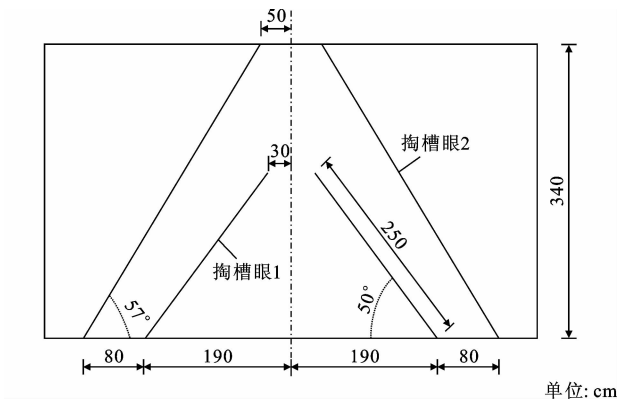


图 3 掏槽眼布置

Fig. 3 Layout of cutting holes

表 2 原设计的爆破参数

Tab. 2 Blasting parameters of original design						
部位	炮眼类型	段别	炮眼数	炮眼长度/m	单孔装药量/kg	总药量/kg
上台阶	掏槽眼	1	8	2.5	1.2	9.6
		3	8	4.0	2.4	19.2
		5	8	3.2	2.0	16.0
	辅助眼	7	10	3.2	2.0	16.0
		9	8	3.2	1.5	12.0
		11	5	3.2	1.2	6.0
	周边眼	13	37	3.2	0.8	29.6
	底板眼	15	10	3.2	1.8	18.0
	合计		96			126.4
下台阶	辅助眼	2	6	3.2	2.4	14.4
		4	5	3.2	2.4	12.0
	周边眼	6	6	3.2	0.8	4.8
	底板眼	8	10	3.2	2.7	27.0
	合计		27			58.2

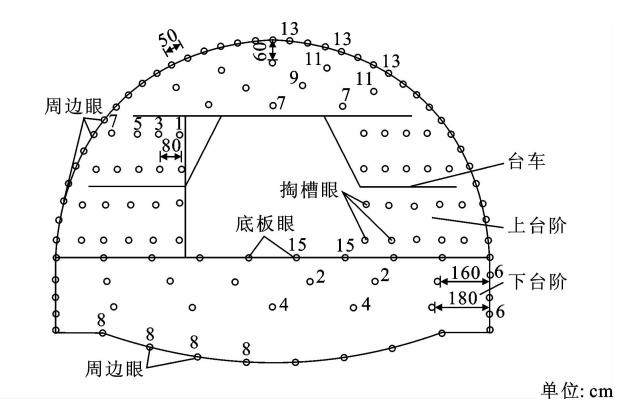


图 4 大梁岭隧道爆破方案原设计

Fig. 4 Original blasting design scheme for Daliangmao Tunnel

本试验采用 BJSD 系列断面仪对隧道开挖断面的爆破效果进行测量和数据采集,测试断面上台阶超欠挖情况如图 5 所示。

从效果来看,超挖主要在拱部和拱腰。爆破后看不到炮眼残痕,拱部常常沿某一层理面整体脱落,形成平顶现象。从离层的高度来看,一般会脱落 2~4 层,形成较大的超挖面积。欠挖则出现在边墙位置,相对来说,不同断面边墙欠挖面积远小于同断面的超挖面积。

从毛洞扫描数据来看,最大超挖断面为 ZK80+872.6,最大线性超挖量和超挖面积分别为 77.5 cm

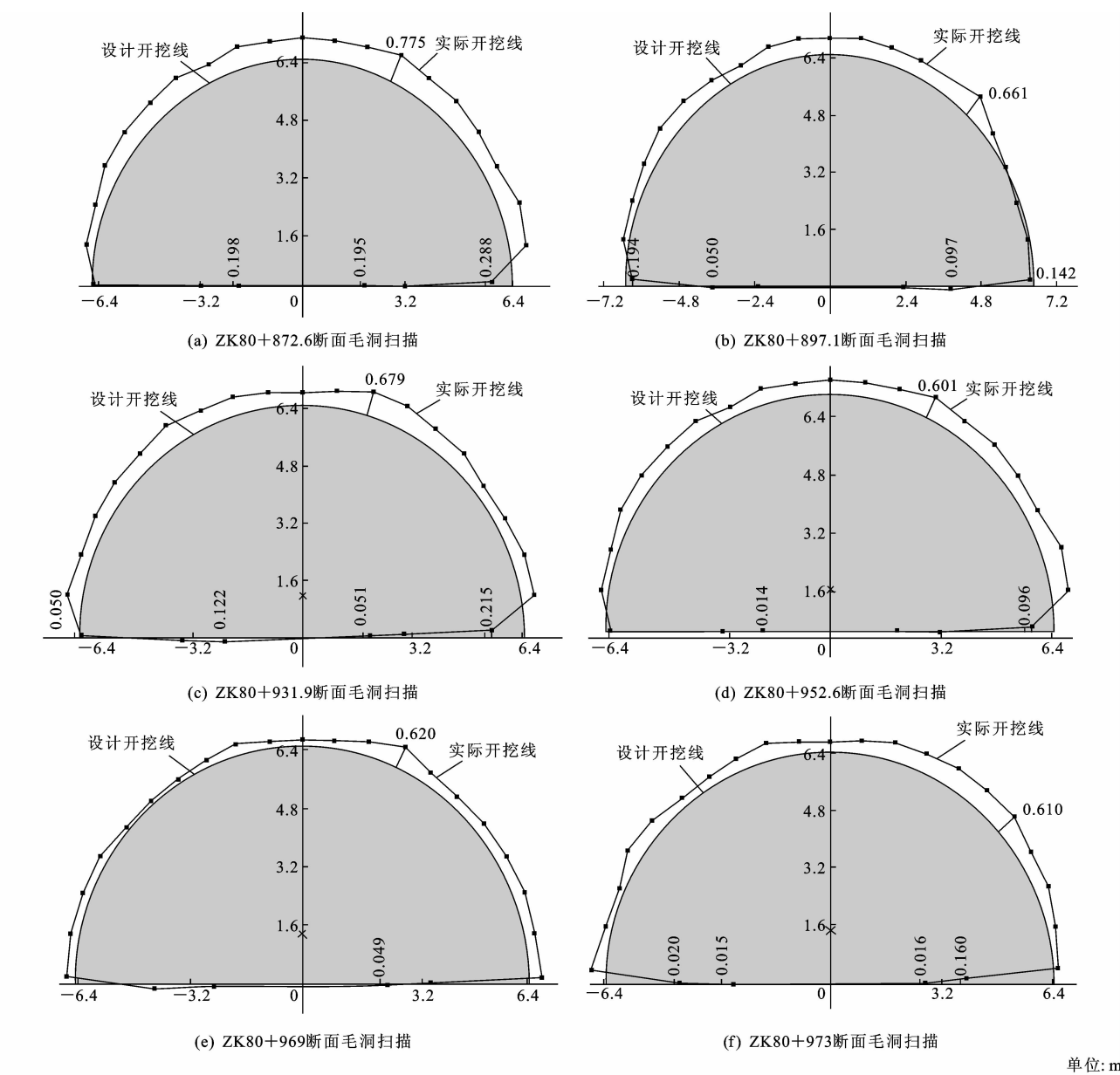


图 5 典型断面毛洞扫描

Fig. 5 Scanning of typical cross sections of hole

和 10.24 m²。6 个断面的平均超挖面积达 7.81 m²，从统计数据可见，超挖非常严重；而最大欠挖断面为 ZK80+897.1，欠挖面积为 2.87 m²，其他 5 个断面在右下角位置也出现不同程度的欠挖。从扫描的图形和数据分析可知，欠挖问题不显著，而拱部超挖情况则比较严重，这与之之前分析的水平层理对爆炸应力波的作用机理是吻合的。因此，需要对爆破参数进行优化。

超挖、欠挖原因分析如下所述。

(1)隧道拱部超挖原因分析。水平层岩隧道拱部超挖主要受三方面因素的影响：一是层岩厚度对超挖的影响，层岩厚度越薄，超挖越严重，大梁崙隧道水平层岩层厚为 10~30 cm，层厚较薄，爆破震动对层岩稳定性影响较大；二是岩层层间黏聚力对超挖的影响，依托工程是砂岩和泥岩互层围岩，2 种不同岩性的岩体层间黏聚力相对较弱，开挖扰动导致黏聚力进一步降低，临空层及相邻层易出现离层、甚至失稳掉落现象；三是围岩强度对拱部超挖的影响，由于围岩为泥岩和砂岩，岩石强度较低，在荷载作用和施工扰动下，围岩容易出现剪切破坏。

(2)上台阶下部边墙欠挖原因分析。由于水平层岩力学性质表现出较大的各向异性，水平向岩体强度相对较高，因此，相同条件下边墙出现欠挖。

根据以上超欠挖原因分析，对于拱部超挖主要通过内移周边眼、适当增加周边眼间距、减少装药量及非连续装药等措施进行控制。对于上台阶下部边墙欠挖可通过缩小此处周边眼间距或者增设周边眼来解决。

3.3 爆破参数优化

根据超欠挖的情况，仍然在Ⅳ级围岩的条件下对爆破参数进行优化。考虑到原设计掏槽效果较好，因此沿用原设计掏槽眼布置参数。其他参数优化思路如下。

(1)拱顶和拱腰是超挖严重部位，周边眼设置间距为 50~55 cm，间距设置应满足以下 2 个原则：①当围岩情况较好时取大值，反之取小值；②当钻孔位置处于较软的泥岩层时取大值，当钻孔位置处于相对较硬的砂岩层时，则取小值。同时，为减少拱部超挖，炮眼沿设计轮廓线适当内移，一般为 15~20 cm，内移原则与上述原则类似。

(2)为减少超挖，周边眼单孔药量由原来的 0.8 kg 降至 0.6 kg。装药方式由原来的连续装药改为非连续装药，沿深度每支药卷间隔 50 cm 左右。

(3)边墙位置有一定的欠挖，周边眼间距由原设

计的 50 cm 缩短为 45 cm，沿设计轮廓线内移量 10 cm 不变；同时，在边墙处加设一钻孔，钻孔布置如图 6 所示，装药量如表 3 所示。

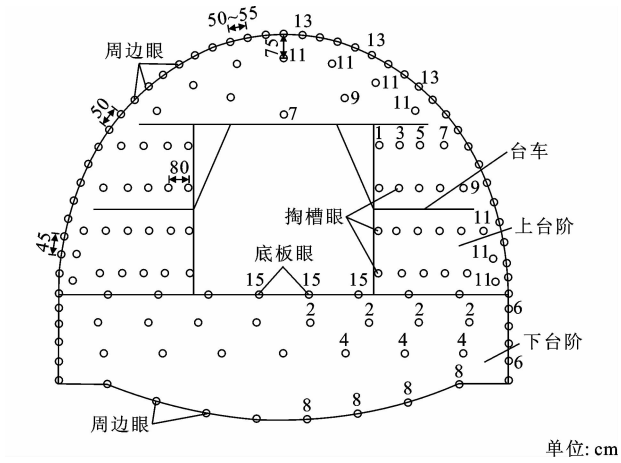


图 6 大梁崙隧道爆破方案优化

Fig. 6 Optimization blasting scheme of Daliangmao Tunnel

表 3 优化后的爆破参数

Tab. 3 Blasting parameters after optimization scheme

部位	炮眼类型	段别	炮眼数	炮眼长度/m	单孔装药量/kg	总药量/kg
上台阶	掏槽眼	1	8	2.5	1.2	9.6
		3	8	4.0	2.4	19.2
		5	8	3.2	1.6	12.8
	辅助眼	7	9	3.2	1.4	12.6
		9	8	3.2	1.2	9.6
		11	13	3.2	1.2	15.6
	周边眼	13	39	3.2	0.6	23.6
	底板眼	15	10	3.2	1.6	16.0
	合计		103			119.0
下台阶	辅助眼	2	8	3.2	1.5	12.0
		4	7	3.2	1.2	8.4
	周边眼	6	8	3.2	0.6	4.8
	底板眼	8	10	3.2	1.6	16.0
	合计		33			41.2

(4)边墙超欠挖较小，周边眼一般内移 10~15 cm，钻孔布置视围岩层厚而定。为保证爆破效果，掏槽眼、辅助眼仍采用原起爆方式和连接，周边眼和底板眼采用导爆索连接和引爆。

3.4 参数优化后爆破效果

根据上述分析，对爆破参数进行优化，爆破效果如下页图 7 所示。

从实际爆破效果来看，由于增加了周边孔的数量，同时减少了装药量，爆破对邻近层岩扰动明显减小。由于岩层厚度仅为 10~30 cm，受到较大扰动的岩层很容易出现离层而掉落，因此几乎很难留下



图 7 参数优化后拱部爆破效果

Fig. 7 Blasting effect of arch zone after parameters optimization

残孔。但从直观上看,爆破参数优化后虽然不能留下残孔,但爆破后的围岩,特别是拱部围岩相对于优化前更加完整,掉块明显减少。同时,拱部离层高度和平顶宽度明显减小,超挖量明显下降。

爆破参数经优化调整后,上台阶单次起爆药量由原来的 126.4 kg 降低至 119.0 kg,装药量降低 6%。同时,下台阶单次起爆药量由原来的 58.2 kg 减少至 41.2 kg,装药量减少 29%。单次起爆药量的大幅减少,有效地降低了对围岩的扰动和破坏。从爆破后扫描结果来看,可大幅减少超欠挖面积。典型试验断面扫描效果如图 8 所示。

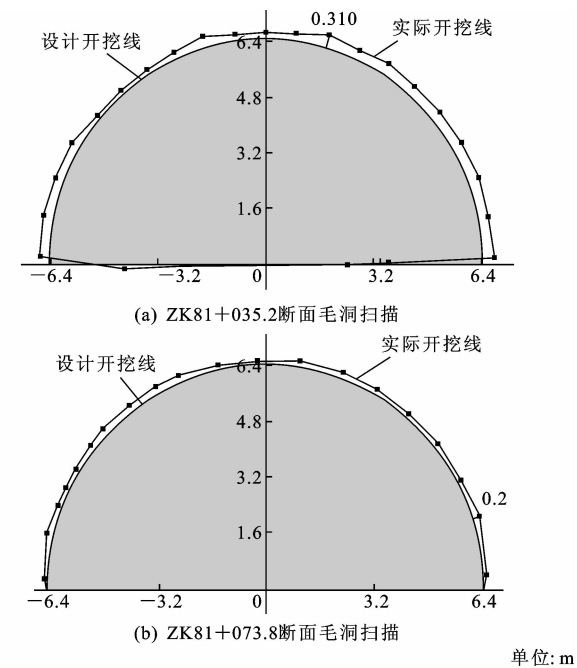


图 8 优化后典型断面毛洞扫描

Fig. 8 Scanning of typical cross sections of hole after optimization

由图 8 可见,在扫描断面中,最大线性超挖量为 31 cm,平均线性超挖量控制在 14.2 cm,超挖面积

为 2.56 m²,仅为优化前的 31%;欠挖面积很小,几乎可以忽略。

采用优化后的爆破方案,一方面可大幅减少超欠挖面积,节省喷射混凝土用量,降低工程造价;另一方面,由于起爆药量大幅减少,有效减少了对围岩的扰动,提高了隧道围岩开挖后的质量,可有效减少掉块,大大提高工程的安全性,保证了初期支护施工的安全性。

4 结 语

(1)根据大梁峁隧道拱部超挖严重,边墙欠挖明显等情况,对布孔参数、装药量、起爆方式等进行了优化。从现场试验结果来看,优化后超挖面积仅为优化前的 31%,欠挖现象得到有效改善,爆破效果良好。

(2)大梁峁隧道开挖爆破方案优化后,上台阶开挖单次爆破可减少 6%的起爆药量,下台阶可减少 29%的单次起爆药量。爆破对围岩扰动更小,可有效保证开挖后围岩质量,使隧道施工更安全。

(3)在水平层状围岩隧道爆破施工中,拱部超挖可以通过内移周边眼、适当增加周边眼间距、减少装药量及非连续装药等措施进行控制;上台阶下部边墙欠挖可通过缩小此处周边眼间距或者增设周边眼来解决。

(4)本文仅针对Ⅳ级中厚水平层状围岩隧道进行了爆破技术控制试验研究,考虑到层厚、围岩等级对爆破效果的影响,建议后续对其他层厚,以及Ⅲ、Ⅴ级围岩的爆破技术控制作进一步研究。

参考文献:

References:

[1] LISJAK A, GRASSELLI G, VIETOR T. Continuum-discontinuum analysis of failure mechanisms around unsupported circular excavations in anisotropic clay shales[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 65: 96-115.

[2] 郝文广. 水平岩层隧道围岩变形机理研究与有限元分析[J]. 铁道建筑技术, 2013(6): 30-34, 49.

HAO Wen-guang. Deformation mechanism and finite element analysis of tunnel in horizontal layered rock-mass[J]. Railway Construction Technology, 2013(6): 30-34, 49.

[3] 闫永杰, 翁其能, 吴秉其, 等. 水平层状围岩隧道顶板变形特征及机理分析[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2011, 30(增 1): 647-649.

- YAN Yong-jie, WENG Qi-neng, WU Bing-qi, et al. Analysis of roof deformation characteristics and mechanism in horizontal layer rock tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2011, 30(S1): 647-649.
- [4] 李晓红, 夏彬伟, 李 丹, 等. 深埋隧道层状围岩变形特征分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1163-1167.
LI Xiao-hong, XIA Bin-wei, LI Dan, et al. Deformation characteristics analysis of layered rockmass in deep buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1163-1167.
- [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.
ZHANG Yun-liang, CAO Wei, WANG Jian, et al. Blasting technique for controlling excessive and insufficient excavation in tunnel with horizontal layered rockmass[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2010, 7(5): 70-74.
- [6] 常 伟. 水平泥岩砂岩互层隧道超欠挖控制技术[J]. 国防交通工程与技术, 2014(2): 69-71.
CHANG Wei. On the overcut-and-undercut-controlling techniques for tunnels in horizontally-bedded sandstone and mudstone interbed[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2014(2): 69-71.
- [7] 赵平劳. 层状结构岩石抗剪强度各向异性试验研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1990, 26(4): 135-139.
ZHAO Ping-lao. The experimental study of anisotropy of shear strength of bedded rock[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science, 1990, 26(4): 135-139.
- [8] 高新强, 孔 超, 艾旭峰. 水平泥岩砂岩互层隧道支护体系力学特性试验研究[J]. 公路工程, 2014, 39(6): 49-55.
GAO Xin-qiang, KONG Chao, AI Xu-feng. Experiment study of mechanical characteristics of support system for tunnel in horizontally bedded sandstone and mudstone interbed[J]. Highway Engineering, 2014, 39(6): 49-55.
- [9] 赵小平, 左建平, 裴建良. 锦屏层状大理岩断裂机制的细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 534-542.
ZHAO Xiao-ping, ZUO Jian-ping, PEI Jian-liang. Meso-experimental study of fracture mechanism of bedded marble in Jinping[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 534-542.
- [10] 刘卡丁, 张玉军. 层状岩体剪切破坏面方向的影响因素[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 335-339.
LIU Ka-ding, ZHANG Yu-jun. Influence factors on shear failure orientation of layered rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 335-339.
- [11] 温 森, 赵延喜. 深埋隧洞层状围岩变形分析[J]. 金属矿山, 2009(4): 11-15.
WEN Sen, ZHAO Yan-xi. Analysis of the deformation of stratified rock surrounding deep tunnels[J]. Metal Mine, 2009(4): 11-15.
- [12] 冯文凯, 王豫川, 王兴平, 等. 高速公路隧道水平层状围岩支护优化[J]. 中国公路学报, 2009, 22(2): 65-70.
FENG Wen-kai, SHI Yu-chuan, WANG Xing-ping, et al. Support optimum on horizontal bedded surrounding rock of expressway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(2): 65-70.
- [13] 钟放平. 水平层状围岩隧道锚喷支护参数优化试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2008, 5(1): 59-63.
ZHONG Fang-ping. Experimental study on bolt-shotcrete parameter optimization of tunnel in horizontal layered surrounding rock masses[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2008, 5(1): 59-63.
- [14] 周应麟, 邱喜华. 层状岩层围岩隧道稳定性的探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 345-348.
ZHOU Ying-lin, QIU Xi-hua. Study on stability of stratified rock tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 345-348.
- [15] 张玉军, 刘道平. 层状岩体的三维弹塑性有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1615-1619.
ZHANG Yu-jun, LIU Yi-ping. 3D elasto-plastic FEM analysis on layered rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(11): 1615-1619.
- [16] RINEHART J S. Effects of transient waves in rocks[J]. Mining Research, 1962, 2: 713-726.
- [17] 张 奇. 应力波在节理处的传递过程[J]. 岩土工程学报, 1986, 8(6): 99-105.
ZHANG Qi. Propagation process of stress wave in jointed rock masses[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(6): 99-105.
- [18] 张力民, 吕淑然, 刘红岩. 节理岩体爆破破坏模式的机理分析及数值模拟[J]. 金属矿山, 2009(7): 16-19.
ZHANG Li-min, LU Shu-ran, LIU Hong-yan. Mechanism analysis and numerical simulation of the blast failure modes of jointed rock masses[J]. Metal Mine, 2009(7): 16-19.