

文章编号: 1674—8247(2019)06—0021—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.004

水平产状砂质板岩铁路隧道洞室成形爆破参数研究

孟令瀚 崔光耀

(北方工业大学, 北京 100144)

摘 要:本文依托贵广铁路同马山隧道工程,根据理论分析及现场作业反馈,对水平产状砂质板岩隧道的洞室爆破成形参数进行研究。研究结果表明:(1)对于此段工程隧道,爆破参数拟定为炮眼直径 42 mm,不耦合系数 1.4,周边眼间距 443 mm,炮眼密集系数 0.73,最小抵抗线 610 mm,单孔装药量 0.42 kg,周边眼数目 62;(2)根据选定参数进行的洞室光面爆破,得到 79% 的隧道断面平均线超挖量符合要求,75% 的隧道断面最大线超挖量符合要求,爆破效果良好。研究成果可为水平层状围岩地区隧道建设提供有利借鉴。

关键词:铁路隧道;水平产状;砂质板岩;洞室成形;爆破参数

中图分类号:U215.3 文献标志码:A

Study on Blasting Parameters of Cavern Formation of Railway Tunnel in Horizontal Occurrence Sandy Slate

MENG Linghan CUI Guangyao

(North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on Tongmashan tunnel of Guizhou-Guangzhou Railway, this paper studies the blasting parameters for cavern formation of tunnel in the horizontal occurrence sandy slate according to theoretical analysis and field operation feedback. The results show that: (1) in this section of tunnel, the blasting parameters are proposed to be 42 mm for blasthole diameter, 1.4 for uncoupling coefficient, 443 mm for distance between peripheral holes, 0.73 for hole density coefficients, 610mm for minimum resistance line, 0.42 kg for charge of single hole, and 62 for number of peripheral holes; (2) according to the selected parameter, the smooth blasting was carried out. Both 79% average line overbreak and 75% maximum line overbreak of tunnel section meet the requirement, and the blasting effect is good. The research results can provide a useful reference for tunnel construction in horizontal layered surrounding rock area.

Key words: railway tunnel; horizontal occurrence; sandy slate; cavern formation; blasting parameters

在我国,层状结构的沉积岩约占陆地总面积的 77.3%,而水平岩层正是隧道工程作业常见的一种地质构造。目前,我国修建隧道主要是以基于新奥法原理的钻爆法工艺为主,钻爆法最基本的原则就是要减少对围岩的扰动、控制爆破成形。但在隧道的钻爆施

工过程中,对水平岩层的断面控制技术一直是一大难题。爆破处理稍有不当,便会引起洞室的拱顶落石、大面积平顶,甚至坍塌的安全事故。这不仅会造成山体岩石失稳,而且直接影响隧道洞室成形效果,延误衬砌施作,增加工程量。

收稿日期:2019-05-21

作者简介:孟令瀚(1995-),男,在读硕士研究生。

基金项目:国家自然科学基金(51478277)

引文格式:孟令瀚,崔光耀.水平产状砂质板岩铁路隧道洞室成形爆破参数研究[J].高速铁路技术,2019,10(6):21-25.

MENG Linghan, CUI Guangyao. Study on Blasting Parameters of Cavern Formation of Railway Tunnel in Horizontal Occurrence Sandy Slate [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 21-25.

目前,国内外开展的研究主要有:通过实验或数值模拟的方法,对隧道爆破控制技术及安全性进行研究^[1-5];在复杂围岩条件下的隧道施工破坏机理研究^[6-8];对于隧道洞室爆破成形技术的部分参数优化研究^[9-10]。由此可见,目前研究虽对爆破技术和破坏机理有所介绍,但针对水平层状的砂质板岩隧道洞室光面爆破成形的研究不足。因此,研究水平产状砂质板岩隧道洞室爆破成形,对于水平层状围岩地区隧道建设意义重大。

1 工程概况

1.1 工程地质

研究工程位于贵广铁路贵州省黔南州三都县境内的同马山隧道。隧道穿越呈东北向延伸的山脉山脊(绝对高程1 150~1 500 m),埋深最大处约700 m,全长13 931 m。隧道岩性以砂质板岩水平岩层为主。

1.2 工程难点

同马山隧道采用钻爆法施工,是贵广铁路全线重难点工程之一,在建设过程中存在的工程难点问题如下:

(1)由于围岩环境问题,隧道开挖过程中遇到大量水平产状砂质板岩,爆破参数的选取和施工安全面临极大挑战,稍有操作不当不仅影响施工质量,甚至会引发安全事故。

(2)现有规范中荷载计算公式是基于连续介质条件下提出的,而对于非连续、平行或垂直于层理方向的物理力学性质研究尚不明确。

(3)据地质调查结果可知,同马山隧道工程地质围岩主要呈中厚水平层状结构。与非层状岩结构相比层状岩稳定性较差,由于层理面对应力波的影响,使得爆破开挖洞室成形困难。因此光面爆破设计参数是一大难点。

2 光面爆破标准

对于光面爆破技术,因为其复杂的影响因素,很难仅仅通过理论计算就确定其爆破参数,还应根据施工现场的反复试验来对参数进行最终的校核,实现良好的爆破效果。光面爆破的质量评价通常采用的标准有5点。

(1)平均线性超挖量不得大于100 mm,最大线性超挖量不得大于250 mm,但当允许的超挖量在眼深小于3 m时,线性超挖量不得大于150 mm;眼深为5 m时,线性超挖量不得大于250 mm。线性超挖量是指实际开挖轮廓线与设计开挖线的差值。

(2)壁面光滑,凹凸度在50 mm左右。

(3)炮孔眼痕率≥50%,并在围岩表面均匀分布。

(4)不应出现欠挖,特别是在坚硬岩层中,或欠挖应符合相关规范的要求。

(5)围岩内原有裂隙未发生过度衍生,且出现的新裂缝未超限或没有明显的炮震裂隙,围岩完整稳定。

用眼痕保留程度作为光面爆破的评价指标,分为5个质量等级,如表1所示。

表1 光面爆破评价指标

级别	眼痕情况
1	沿全孔长留下眼痕
2	除炮孔个别地方外,全孔都有眼痕
3	全孔长的30%~70%留有眼痕
4	全孔长的50%以下留有眼痕
5	全孔长的个别地方外留有眼痕

3 爆破参数确定

3.1 炮孔直径

选择合适的炮孔直径对凿岩速度、炮孔数、炸药单耗、隧道壁平整度等均有影响。炮孔直径大则药卷直径大,炸药相对集中,能够提高爆破速度和爆炸的稳定性。但若直径过大,既会降低钻孔速度,还会影响炸药的均匀分布,使得爆破的石渣块度较大,洞壁的平整度也会受损,甚至会影响围岩的稳定性。应综合隧道围岩、炸药设备和现场安排等多方因素,对炮孔直径进行选择,在本工程中采用YT28风动凿岩机钻孔,孔径为42 mm。

3.2 不耦合系数

隧道工程爆破开挖中,往往需对断面边界处进行光面处理,这不仅能保持围岩的稳定性,还能降低后期的衬砌施工的难度,保证施工质量。要达到光面爆破的效果,就必须要求炸药的爆轰力等于围岩应力,这样才能在爆破过程中不产生多余的围岩破坏圈,形成规整的断面。为此,要求周边孔爆破不能在岩石中产生压碎圈,即要求:

$$R_c = r_b \tag{1}$$

即:
$$r_b \left(\frac{\rho_0 D_0^2 K_d^{-2k}}{K_D S_c (k+1)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} = r_b \tag{2}$$

求解得到不耦合系数:

$$K_d = \left(\frac{\rho_0 D_0^2}{K_D S_c (k+1)} \right)^{\frac{1}{2k}} \tag{3}$$

式中: R_c ——装药半径;
 r_b ——炮孔半径;
 K_d ——径向不耦合系数;
 S_c ——岩石单轴抗压强度;
 α ——冲击衰减系数, $\alpha = 2 + \frac{u}{1-u}$, u 为岩石泊

松比;
 K_D ——动载作用下岩石抗压强度增大系数,取10~15;
 ρ_0 ——炸药密度;
 D_0 ——炸药爆速;
 k ——绝热指数,取1.3。
由此得到不同岩石强度下光面爆破不耦合系数,如表2所示。

表2 岩石强度与不耦合系数关系表

岩石抗压强度/MPa	不耦合系数	岩石抗压强度/MPa	不耦合系数	岩石抗压强度/MPa	不耦合系数
5	1.9	40	1.4	75	1.2
10	1.7	45	1.3	80	1.2
15	1.6	50	1.3	85	1.2
20	1.5	55	1.3	90	1.2
25	1.5	60	1.3	95	1.2
30	1.4	65	1.3	100	1.2
35	1.4	70	1.2	—	—

3.3 线装药密度

线装药密度 q_0 (单位长度炮孔的装药量)是通过炮孔直径和选择的不耦合系数确定的。在采用环向不耦合连续装药结构时可用下式计算:

$$q_0 = \frac{\pi d^2 \rho}{4 K_d^2} \tag{4}$$

式中: ρ ——炸药密度;
 K_d ——不耦合系数;
 d ——炮孔直径。

3.4 周边眼间距

周边眼的孔距(E)指沿劈裂面炮孔的中心距。隧道洞室爆破成形原理实际是使爆炸产生的裂缝贯通炮孔中心,形成与设计断面形状一致的破裂面,且断面形状规整。因此,合理的周边眼间距对于裂缝的有效贯通至关重要。

通用公式适用于一般完整岩石断面,而对于层状岩石,相邻的结构面削弱了爆炸产生的应力波。因此针对层状岩结构爆破,对其裂隙区半径 R_k 进行修正:

$$R_k = r_b \left(\frac{\lambda f_i^n \rho_0 D_0^2 K_d^{-2K}}{S_i (k+1)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \tag{5}$$

由爆生气体引起每个炮眼产生裂缝的长度 r'_k 计算公式为:

$$r'_k = \left(\frac{P_b}{S_i} \right) \times r_b \tag{6}$$

P_b 爆生气体充满炮孔时的静压,根据凝聚炸药状态方程求得

$$P_b = \left(\frac{P_c}{P_k} \right)^{k/n'} \times \left(\frac{v_c}{v_b} \right)^k \times P_k \tag{7}$$

式中: f_i ——透射系数;
 n ——裂缝穿过结构面层数;
 P_c ——理想气体爆压, $P_c = \frac{1}{8} \rho D^2$;
 P_k ——临界压力;
 n' ——凝聚炸药的等熵指数, $n' = 3$;
 K ——控制爆破单位用药量系数, $K = 0.5$;
 v_c ——装药体积;
 v_b ——炮眼体积。

由此得到不同岩石强度下炮眼间距,如表3所示。

表3 岩石强度与周边眼间距关系表

岩石抗压强度/MPa	炮眼间距/mm	岩石抗压强度/MPa	炮眼间距/mm	岩石抗压强度/MPa	炮眼间距/mm
5	384	40	456	75	585
10	389	45	472	80	606
15	397	50	488	85	628
20	406	55	506	90	649
25	422	60	525	95	671
30	432	65	545	100	694
35	443	70	565	—	—

3.5 周边眼最小抵抗线

最小抵抗线(W)指临空面至劈裂面的距离,即光面层厚度。若最小抵抗线过大,光面层岩石不能被有效破碎,出现欠挖;若最小抵抗线过小,将造成洞室壁面不平整或出现超挖,甚至破坏围岩稳定性。一般根据现场的工程地质环境进行调整,对于可燃性差的坚韧岩石,最小抵抗线取值较小,反之较大。

由此得到不同岩石强度下光面爆破最小抵抗线,如表4所示。

表4 岩石强度与最小抵抗线距离关系表

岩石抗压强度/MPa	最小抵抗线距离/mm	岩石抗压强度/MPa	最小抵抗线距离/mm	岩石抗压强度/MPa	最小抵抗线距离/mm
5	640	40	610	75	654
10	626	45	614	80	662
15	618	50	619	85	670
20	612	55	625	90	678
25	616	60	632	95	686
30	613	65	639	100	694
35	610	70	647	—	—

3.6 周边眼炮孔密集系数

炮孔密集系数 m ,指炮孔间距与最小抵抗线的比值,即 $m = E/W$ 。为了使两相邻孔之间爆破产生的应力波叠加后再抵达抵抗线边缘,取得更好的爆破效果,通常设计抵抗线不小于周边眼间距。

当最小抵抗线不小于二倍孔距时,即 $m \leq 0.5$,孔间裂缝不易贯通,光面爆破难以实现;当最小抵抗线等于孔距时,即 $m = 1$,光面爆破洞室成形效果较好;当最

小抵抗线小于孔距时,即 $m > 1$,爆破后大概率形成孔间裂缝,在应力波传到二圈眼时炮孔裂隙还未沟通,则为偏斗爆破非光面爆破。由现场试验得出 m 取值由软岩到硬岩在0.6~1.0。

3.7 周边眼单孔装药量

周边眼单孔装药量指爆破单位体积的原岩所需装药量,也称为单位耗药量。其受限于围岩属性、炮孔体积、设备类型、洞径等因素,也直接影响原岩的破碎度、线孔使用率、已有衬砌质量等。因此,选取合理的单眼装药量对光面爆破尤为重要。

(1) 普氏理论计算公式为:

$$q = 1.1k(\frac{f}{S})^{\frac{1}{2}} \tag{8}$$

式中: k ——炸药做功能力修正系数, $k = 525/p$; p 为所选炸药做功能力;

f ——岩石坚固性系数(常数),对于厚度为0.4 m的层状岩系数修正为0.65;

S ——隧道掘进断面面积。

(2) 经验计算公式为:

$$q = \frac{kf^{0.75}}{\sqrt[3]{S_x} \sqrt{d_x}} \times e_x \tag{9}$$

式中: k ——常数,取0.25~0.35;断面影响系数 $S_x = S/5$; S 为隧道断面面积;

d_x ——药径影响系数, $d_x = d_c/32$; d_c 为药卷直径;

e_x ——炸药爆力影响系数, $e_x = 320/e$; e 为炸药所做功。

由此得到不同岩石强度下光面爆破单孔装药量,如表5所示。

表5 岩石强度与单孔装药量关系表

岩石抗压强度 /MPa	单孔装药量 /kg	岩石抗压强度 /MPa	单孔装药量 /kg	岩石抗压强度 /MPa	单孔装药量 /kg
5	0.22	40	0.44	75	0.59
10	0.26	45	0.47	80	0.60
15	0.30	50	0.49	85	0.62
20	0.33	55	0.51	90	0.64
25	0.36	60	0.53	95	0.65
30	0.39	65	0.55	100	0.67
35	0.42	70	0.57	-	-

3.8 周边眼数目

光面爆破的周边眼数目由其平均装药量原则计算得出:

$$N = \frac{B_L - B}{E} + 1 \tag{10}$$

式中: B_L ——隧道断面周长,可由 $B_L = c \sqrt{S}$ 求得; c 为断面形状系数,取 $c = 3.86$;

B ——隧道断面宽度;

E ——炮眼平均间距。

由此得到不同岩石强度下光面爆破周边眼数目关系,如表6所示。

表6 岩石强度与炮眼数目关系表

岩石抗压强度 /MPa	炮眼数目	岩石抗压强度 /MPa	炮眼数目	岩石抗压强度 /MPa	炮眼数目
5	72	40	60	75	47
10	71	45	58	80	45
15	69	50	56	85	43
20	68	55	54	90	42
25	66	60	52	95	41
30	63	65	50	100	39
35	62	70	48	-	-

3.9 参数确定

综上,对照同马山隧道的岩石强度得到全断面法开挖光面爆破理论参数:炮眼直径为42 mm,不耦合系数取1.4,周边眼间距为443 mm,炮眼密集系数为0.73,最小抵抗线为610 mm,单孔装药量0.42 kg,周边眼数目为62。实际爆破参数根据现场进行适当调整。

4 爆破施工及效果

4.1 爆破施工流程

(1) 施工准备:根据相关规范结合现场实际情况编制钻爆设计、设计开挖工法、配置风钻及人员。

(2) 测量放线:测量组在断面测量时加密断面测点标注,点间距约为50 cm,便于控制周边眼间距。在完成一次循环后,对超欠挖及光面成形进行评估,在欠挖部位用红油漆标注,以便下一循环的调整。

(3) 钻孔:按照钻爆设计要求进行布孔,根据测量组布置的点位进行钻眼。钻孔过程中要控制外插角的角度($1^\circ \sim 2^\circ$),采用统一钻杆进行钻孔,保证孔深度统一。钻孔过程中每层台架之间安装导向钳,便于两边对称钻孔(特别是掏槽眼之间)。

(4) 清孔:钻孔完毕后,用高压风进行清空,清空后用炮钳对钻孔深度进行复合,确保钻孔不被堵塞。

(5) 装药:装药严格按照爆破设计进行装药,周边眼采用间隔装药,掏槽眼、辅助眼采用集中装药。

(6) 连线:周边眼采用传爆线连接,传爆线分段并联,并隔孔安装非电毫秒雷管,确保起爆效果,联系完毕后对炮孔进行堵塞。

(7) 爆破效果检查:出碴完成后,推台架前,检查爆破效果,观察光面成形效果、炮眼保存情况及与前一循环的错台情况,以便及时调整爆破参数。

4.2 爆破施工效果

在隧道光面爆破中,爆破参数直接影响施工质量。同马山地区岩石属于水平层产状岩,由于其较差的围岩环境,增大了其光面爆破的参数确定的难度。为验证效果,根据光面爆破标准,对实施此参数的163个隧道断面进行超欠挖统计。统计结果如表7所示。

表7 隧道断面线超挖量统计表

	最大线超挖量	平均线超挖量
合格	75%	79%
不合格	25%	21%

由表7可知,断面最大线超挖量有75%的隧道断面合格,25%的不合格;断面平均线超挖量有79%的隧道断面合格,21%的不合格。在隧道开挖过程中,光面爆破参数对于最大线超挖量和平均线超挖量的控制效果良好。对于局部区段由于围岩条件差,开挖后岩石不能自稳,爆破效果未达到理想目标,应进行加固处理。

5 结论

(1)通过理论推导及经验取值,得到同马山隧道全断面法开挖光面爆破理论参数:炮眼直径为42 mm,不耦合系数取1.4,周边眼间距为443 mm,炮眼密集系数为0.73,最小抵抗线610 mm,单孔装药量0.42 kg,周边眼数目为62个。

(2)实际工程验证效果良好,断面最大线超挖量有75%的隧道断面合格,断面平均线超挖量有79%的隧道断面合格。

参考文献:

[1] 文潮,王占江,李运良,等. 预制沟槽对爆破震动阻隔效应的实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(2):345-351.
WEN Chao, WANG Zhanjiang, LI Yunliang, et al. Experimental Study on Effect of Prefabricated Damping Ditch/Slot on Reduction of Blasting Wave [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(2): 345-351.

[2] 唐炫. 隧道锚洞室爆破数值模拟及围岩振动监测分析[J]. 轻工科技, 2018, 34(12): 69-71.
TANG Xuan. Blasting Numerical Simulation and Surrounding Rock Vibration Monitoring Analysis of Tunnel Anchor Chamber [J]. Light Industry Science and Technology, 2018, 34(12): 69-71.

[3] 匡亮,谭永杰,丁文学,等. 下穿密集民房浅埋硬质岩隧道爆破减震技术[J]. 高速铁路技术, 2013, 4(4): 49-55.
KUANG Liang, TAN Yongjie, DING Wenxue, et al. Vibration-reducing Blasting Technology Applied in Construction of Shallow Hard-rock Tunnel Passing under Crowded Houses [J]. High Speed Railway Technology, 2013, 4(4): 49-55.

[4] 夏晨曦,韩辉. FTA在地铁隧道爆破作业安全控制中的应用研究[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 1075-1077.
XIA Chenxi, HAN Hui. Study on FTA in Security Control of Subway Tunnel Blasting Excavation [J]. Construction Technology, 2017, 46(S2): 1075-1077.

[5] 陈仁超. 铁路隧道软弱围岩在安全步距下快速施工技术研究[J]. 高速铁路技术, 2016, 7(1): 84-90.
CHEN Renchao. Research on Fast Construction Technology of Weak Surrounding Rock in Railway Tunnel under Safe Distance [J]. High Speed Railway Technology, 2016, 7(1): 84-90.

[6] 涂瀚. 水平层状围岩隧道稳定性及破坏机理研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 75-79.
TU Han. Research on the Stability and Failure Mechanism of Horizontal Layered Surrounding Rock Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(9): 75-79.

[7] 张中雷,王林桂,李厚龙,等. 复杂环境大区深孔台阶爆破技术[J]. 工程爆破, 2019, 25(1): 19-23.
ZHANG Zhonglei, WANG Lingui, LI Houlong, et al. The Bench Blasting Technique of Large-scale Deep-hole in Complex Environment [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1): 19-23.

[8] 赵金帅,冯夏庭,王鹏飞,等. 爆破开挖诱发的地下交叉洞室微震特性及破裂机制分析[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2563-2573.
ZHAO Jinshuai, FENG Xiating, WANG Pengfei, et al. Analysis of Microseismic Characteristics and Fracture Mechanism of Underground Caverns Induced by Blasting Excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2563-2573.

[9] 于飞飞,张娜,张宪堂,等. 水平层状岩隧道炮孔参数优化及爆破成形研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 63-69.
YU Feifei, ZHANG Na, ZHANG Xiantang, et al. Blasting Parameters Optimization and Blasting Forming of Horizontal Layer Rock Tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(1): 63-69.

[10] 尹俊宏,徐萍. 大断面地下洞室爆破成形控制关键技术研究[J]. 工程爆破, 2007, 13(4): 28-31.
YIN Junhong, XU Ping. Research on Key Technology of Blasting Forming Control in Large-section Underground Cavern [J]. Engineering Blasting, 2007, 13(4): 28-31.

(编辑:车晓娟 张红英)