

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.02.008

软弱围岩大断面隧道光面爆破*

姚洪瑞

(中铁十四局集团有限公司, 济南 250014)

摘要: 富水软弱围岩条件下爆破过程中的围岩稳定性问题,是隧道光面爆破施工安全的关键。以张吉怀铁路岩屋冲一号隧道为工程背景,根据隧道全程位于IV~V级富水软弱围岩的地质条件和“台阶法”的施工方法,提出采用短进尺的浅孔弱爆破方案,并结合TSP超前地质预报、红外探水、超前钻孔等技术获取详细地质信息,进而采取超前支护和注浆治水等措施,提高围岩自稳能力。通过采取以上施工方案及安全措施,工程在施工期间未发生突水、突泥以及围岩失稳塌方等事故,并如期顺利贯通。研究表明:富水软弱围岩中隧道爆破施工应综合考虑现场地质条件和施工方法,从降低爆破施工对围岩造成的扰动和提高围岩稳定性两方面提高施工安全性。

关键词: 大断面隧道; 软弱围岩; 光面爆破; 台阶法; 高铁隧道

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)02-0042-06

Smooth Blasting for Large Cross-section Tunneling in Weak Surrounding Rocks

YAO Hong-ru

(China Railway 14th Bureau Group Co Ltd, Jinan 250014, China)

Abstract: The stability of the weak surrounding rocks with surface and underground water is the key of blasting safety in tunnel excavation. Taking Yanwuchong No. 1 Tunnel of Zhang-Ji-Huai railway as the project background, this paper introduces the short-footage shallow hole weak blasting scheme based on the geological conditions of level IV ~ V water-rich soft surrounding rock as well as the implemented two-step method. Additionally, the TSP advanced geological prediction, infrared water detection, and advanced drilling are employed to obtain details geological information, and the advance support and grouting water control are utilized to enhance the stability of surrounding rock. Through the adoption of the above construction scheme and safety measures, the project is completed as scheduled, and there is no water or mud inrush and rock collapse take place during the tunnel excavation. The results show that the blasting construction of tunnel in the soft surrounding rock with rich water should take the field geological condition and construction method into consideration comprehensively, so as to improve the construction safety by reducing the disturbance caused by blasting construction and improving the stability of surrounding rock.

Key words: large cross-section tunnel; weak rock; smooth blasting; benching tunneling method; high-speed railway tunnel

随着国家对铁路、公路的大力推进,大断面、长纵深隧道越来越多,隧道穿越的地质越来越复杂,目

前主要开挖方法为钻爆法^[1-3]。钻爆法拥有适用范围广,施工灵活等优点,隧道施工为了减少超欠挖,主要采用光面爆破技术,隧道光面爆破方案主要取决于隧道工程地质、工程进度等因素,因此针对不同的隧道施工需要设计合理的爆破方案。

收稿日期:2020-01-12

作者简介:姚洪瑞(1972-),男,学士、高级工程师,从事工程施工管理和技术研究,(E-mail)529601018@qq.com。

基金项目:山东省重点研发计划(2019JZZY020314)

岩屋冲一号隧道是张家界经吉首至怀化(张吉怀)高铁的控制性工程,该隧道洞身位于IV~V级软弱围岩中,且地表水系发育,对爆破施工安全造成不利影响。针对富水软弱围岩中爆破施工的安全问题,刘朝阳设计了微台阶精细爆破的施工方案,并在仁新高速坪田隧道工程中进行了应用^[4]。陈鸿等介绍了采用微台阶带仰拱一次开挖快速封闭成环、铁路单线隧道二次衬砌仰拱及仰拱填充大区段、碎石换填基底加固、反坡排水等技术在蒙华铁路中条山隧道的应用^[5]。高朋飞等以琅琊山隧道为实例,分析了隧道爆破对软弱围岩稳定性的影响,并介绍了爆破施工参数的选取方法^[6]。夏孝维等提出了利用超前地质预报获取围岩和地层信息,并根据围岩状态变换爆破方法的施工方案,并在兰海高速公路麻崖子隧道进行了应用^[7]。

由于地质条件的复杂性和施工要求的差异性,不同项目的参数设计差异显著^[8-10]。为保证岩屋冲

一号隧道的爆破效果和施工安全,提出了“弱爆破、短开挖、强支护、早闭合、勤量测”的施工原则,并设计了结合超前地质预报、超前支护、浅孔微差爆破等措施的“台阶法”光面爆破施工方案,提高岩屋冲一号隧道施工的安全性,取得了良好的爆破效果。

1 工程概况

张家界经吉首至怀化高铁某标段线路全长32.202 km,位于怀化市麻阳县。该标段的岩屋冲一号隧道为设计时速350 km/h的客运线,双线电力牵引,双线隧道轨面上净空面积按不小于100 m²,为大断面隧道。该隧道洞身位于沅麻红层盆地,围岩主要为粉质黏土、泥质粉砂岩、粉砂岩、泥质砂岩及泥质等软弱岩层。这些软弱节理裂隙发育、岩体破碎,并且沅麻红层盆地多有狭长沟谷,沟谷内多发育溪流,导致了岩体稳定性的进一步劣化,岩屋冲一号隧道围岩稳定性评价如表1。

表1 岩屋冲一号隧道围岩稳定性评价表

Table 1 Stability evaluation for the surrounding rocks in No. 1 tunnel of Yanwuchong project

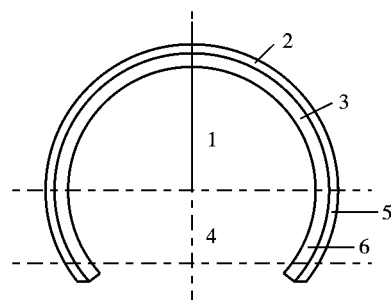
编号	围岩级别	工程地质评价	分布范围
1	IV	洞身围岩主要为泥质粉砂岩和粉砂岩,强~弱风化,红褐色,节理裂隙发育,岩体破碎,多呈碎块状,敲击易碎,岩质较软,隧址地表水较发育,该段基岩岩层倾角较缓,节理裂隙发育,岩体破碎。	33.33%
2	V	洞身围岩主要为泥质粉砂岩,强~弱风化,红褐色,强风化层厚2~20 m,节理裂隙发育,岩体破碎,多呈碎块状,敲击易碎,岩质较软,地下水主要为基岩裂隙水,较发育,岩层倾角较缓,节理裂隙发育,岩体破碎,线路附近局部见小型坍塌。	66.67%

岩屋冲一号隧道按照“新奥法”原理设计并施工。富水软弱围岩中的爆破施工的安全性,以及围岩的稳定性,是岩屋冲一号隧道工程的难点和关键。为保证安全施工及围岩稳定,制定了“弱爆破、短开挖、强支护、早闭合、勤量测”的施工原则,采用“台阶法”施工(如图1)并结合超前地质预报、超前支护、浅孔微差爆破等技术,提高围岩稳定性,并降低爆破振动对围岩稳定性的影响。

2 爆破设计

岩屋冲一号隧道凿岩采用一字钎头,直径为 $\phi = 40$ mm,炮孔孔径为 $\phi = 42$ mm。为提高软弱围岩下爆破施工的安全性,按照“弱爆破、短开挖”的施工原则,确定每循环进尺为150 cm,因此掏槽孔孔深为170 cm、其它炮孔深为160 cm。由于炸药单耗对爆破效果和围岩稳定性都有较大的影响,根据岩屋冲一号隧道的岩石特性、炸药性能、断面面积、炮孔直径及孔深等因素,设计采用2号岩石炸药,炸

药单耗量 q 取为1.0 kg/m³。为降低爆破施工对围岩造成的扰动,采用塑料导爆管非电起爆系统,毫秒微差起爆,根据以上参数,进行爆破参数设计验算。



注:1. 上半部开挖;2. 拱部锚喷支护;3. 拱部衬砌;

4. 下半部开挖;5. 边墙锚喷支护;6. 边墙衬砌

图1 张吉怀高铁岩屋冲一号隧道“台阶法”施工示意图

Fig. 1 Zhangjihuai high speed rail Yanwuchong No. 1 tunnel “step method” construction schematic

2.1 单孔装药量计算

利用式(1)计算单孔装药量^[10]

$$Q_i = n_i \cdot l_i \cdot r \quad (1)$$

式中: Q_i 代表 i 种类炮孔的单孔装药量, kg; n_i 代表 i 种类炮孔的装填系数, %; l_i 代表 i 种类炮孔的孔深, m; r 代表每米炸药的质量, kg/m; i 代表炮孔种类, $i=1$ (掏槽眼), $i=2$ (底板眼), $i=3$ (辅助眼), $i=4$ (周边眼)。

根据式(1)计算可得:

(1) 掏槽眼: $n_1 = 75\%$, $l_1 = 1.7$ m, $r = 0.78$ kg/m, 因此 $Q_1 = 0.99$ kg, 取值为 1 kg。

(2) 底板眼: $n_2 = 75\%$, $l_2 = 1.6$ m, $r = 0.78$ kg/m, 因此 $Q_2 = 0.94$ kg, 取值为 0.9 kg。

(3) 辅助眼: $n_3 = 75\%$, $l_3 = 1.6$ m, $r = 0.78$ kg/m, 因此 $Q_3 = 0.88$ kg, 取值为 0.9 kg。

(4) 周边眼: 周边眼通常为辅助眼的 $1/3 \sim 1/4$, 取 $Q_4 = 0.2$ kg。

炮孔采用炮泥堵塞, 浅孔堵塞长度不小于 20 cm, 深孔不小于 30 cm。

2.2 炮孔参数设计

2.2.1 掏槽孔参数设计

掏槽孔主要作用为辅助孔及周边孔提供合适爆破临空面, 掏槽孔爆炸效果的好坏影响着隧道成型的效果。考虑岩性、断面宽度、凿岩台架尺寸等条件, 本隧道采用二级复式楔形掏槽, 一级掏槽孔角度取 76° , 二级掏槽孔角度取 66° , 孔底距取 20 cm, 上、下掏槽孔间距由岩性决定, 取为 50 cm。

2.2.2 辅助孔(底板孔)爆破参数设计

辅助孔是破碎岩石的主要炮孔, 其均匀布置在掏槽孔周围, 炮孔孔距及排距主要取决于岩石的单轴抗压强度、节理裂隙发育程度、以及前期的施工参数。综合以上因素, 辅助孔孔距取 80 ~ 90 cm, 排距取 80 ~ 90 cm; 底板孔孔距取 85 cm, 排距取 85 cm。

2.2.3 周边孔光面爆破参数设计

周边孔布置在隧道开挖边界上, 孔底位于开挖边界外约 10 cm, 采用光面爆破^[11,12]。间距取 45 cm, 最小抵抗线值取 50 cm。

2.3 爆破施工工艺

2.3.1 炮孔布置及设计参数

图 2 所示为岩屋冲一号隧道上下台阶炮孔布置图, 采用光面爆破控制开挖轮廓线。为减轻爆破施工对围岩的扰动, 采用浅孔弱爆破方案, 每循环进尺控制在 1.5 m, 严格控制周边孔的眼距和装药量, 尽量减少超欠挖, 边开挖边喷混凝土 3 ~ 4 cm, 并按设

计要求及时施作锚杆、钢筋网和格栅钢架, 再复喷至设计要求厚度, 尽量使初期支护封闭成环, 防止围岩失稳崩塌。各炮孔设计参数如表 2 所示。

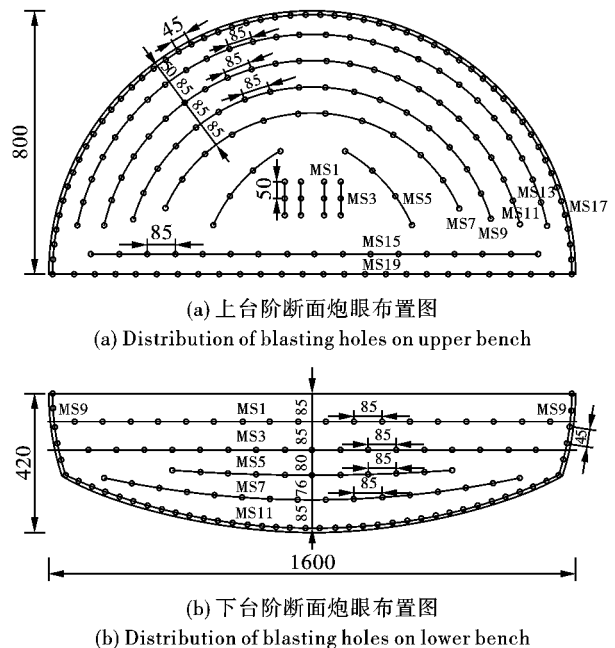


图 2 岩屋冲一号隧道炮孔布置图(单位: cm)

Fig. 2 Distribution of blasting holes in No. 1 tunnel of Yanwuzhong project (unit: cm)

表 2 岩屋冲一号隧道爆破炮孔设计

Table 2 Blasting hole design for No. 1 tunnel of Yanwuzhong project

部位	毫秒雷管段号	炮眼名称	孔深/m	孔数/个	单孔装药量/kg
上断面	1	掏槽眼	1.7	6	1.0
	3	掏槽眼	1.7	6	1.0
	5	辅助眼	1.6	8	0.9
	7	辅助眼	1.6	12	0.9
	9	辅助眼	1.6	18	0.9
	11	辅助眼	1.6	24	0.9
	13	辅助眼	1.6	28	0.9
	15	辅助眼	1.6	19	0.9
	17	周边眼	1.6	56	0.2
下断面	19	底板眼	1.6	24	0.9
	1	辅助眼	1.6	18	0.9
	3	辅助眼	1.6	17	0.9
	5	辅助眼	1.6	11	0.9
	7	辅助眼	1.6	16	0.9
合计	9	周边眼	1.6	10	0.2
	11	底板眼	1.6	34	0.9
合计				307	

2.3.2 起爆网路

起爆网路为复式网路,联结采用电雷管-导爆管雷管-非电毫秒雷管的起爆网路。各炮孔采用非电毫秒雷管微差起爆技术,以控制单段雷管的起爆药量和起爆时间,使爆破震动波不叠加,以降低对围岩的破坏。为了保证后起爆的网路不被先起爆的炸断,采用孔内微差的起爆网路。具体起爆网路联结为:①孔内采用1~19段非电毫秒雷管;②掏槽孔采用1~3段复式网路联接;③其它孔采用5~19段单式网路联接;④孔外采用1段非电毫秒雷管复式网路联接。

隧道爆破炮孔起爆顺序均为:掏槽孔~崩落孔(辅助眼)~周边孔~底板孔。崩落孔由里向外逐层起爆。采用多段微差毫秒雷管起爆由里向外起爆,其中周边孔比辅助孔要跳2段,间隔时间为50~110 ms,且用同一段雷管和导爆索连接同时起爆。

3 安全措施

由于岩屋冲一号隧道围岩为富水软弱岩体,为提高爆破施工的安全性,采取了地质超前预报、超前支护及排水等措施,提高岩体稳定性。

3.1 超前地质预报

超前地质预报的目的是在施工前掌握前方的岩体结构、性质、状态,以及地下水、瓦斯等的赋存情况、地应力情况等地质信息,为进一步的施工提供指导。由于岩屋冲一号隧道全程位于富水软弱围岩中,为爆破过程的安全性,采用了TSP地质预报系统、红外探水技术、超前地质钻孔、加深炮孔等措施,预报施工掌子面前方的岩体条件和含水构造。

3.1.1 TSP超前地质预报

TSP超前地质预报通过小药量爆破所产生的地震波信号沿隧道方向以球面波的形式传播,在不同岩层中地震波以不同的速度传播在其界面处被反射,并被高精度的接收器接收。通过计算机软件分析前方围岩性质、节理裂隙分布、软弱岩层及含水状况等,最终显示屏上显示各种围岩构造界面与隧道轴线相交所呈现的角度及掌子面的距离,以预测不良地质段的性质,并可初步测定岩石的弹性模量、密度、泊松比等参数以供参考。TSP地质预报系统现场测试示意图如图3(a)所示。

3.1.2 红外探水

岩层由于分子振动和晶体格振动,每时每刻都在向外辐射电磁波,并形成红外辐射场。当探测前方不存在隐伏的地质异常体时,红外辐射场就是常值;而当探测前方存在隐伏的地质异常体时,地质异常体产生的辐射场就要叠加在正常辐射场上,从而使得正常辐射场发生畸变。红外探测的原理就是通过探测仪测量掌子面前方红外辐射场的异常,预测前方的地质条件。红外探水的工作流程为:①从掌子面后方的探测段起点,按5 m点距布设测点;②使用红外线探水仪量测各测点的初始场强(目标场强);③对场强发生变化的测点重复量测,并作横向、垂向扫描,记录所在测点场强的极大和极小值;④以纵坐标为红外辐射场强,横坐标为测点,绘制红外探测曲线图;⑤根据曲线图,采用趋势外推法,判断掌子面前方的含水构造。红外探水示意图如图3(b)所示。

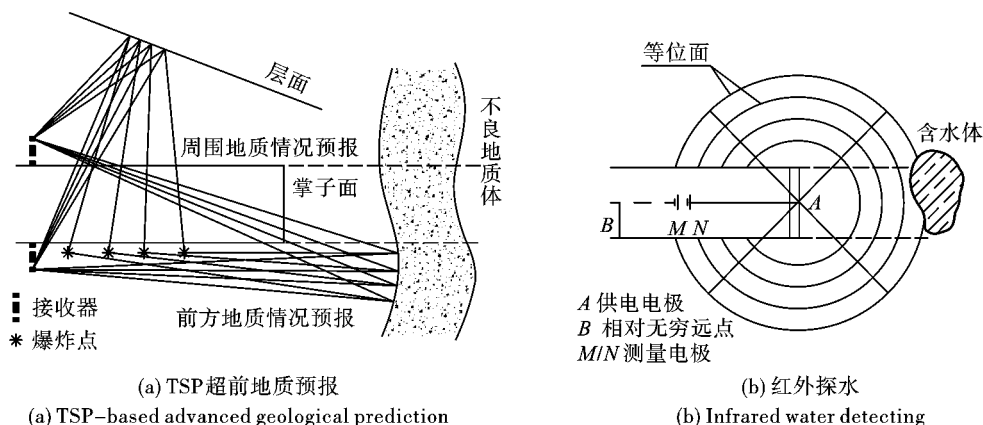


图3 超前地质预报措施示意图

Fig. 3 Schematic diagram of advanced geological forecasting measures

3.1.3 超前地质钻孔及加深炮孔

采用冲击钻和回转钻进装置取岩芯,钻孔直径

采用 $\phi = 89$ mm。活动断裂带超前探测长度80~100 m 搭接长度不小于10 m,其余地段超前探测长

度不小于30 m,前后两次搭接长度不小于5 m。利用岩芯,验证中近距离物探超前探的结果。

在隧道开挖工作面上的炮眼钻孔来探测前方围岩的地质情况,在每一循环钻设炮孔时布设3~15个钻孔,较循环进尺加深3 m以上作为探测孔,探测掌子面前方地质条件。

3.2 超前支护及治水

3.2.1 超前支护

为增强岩屋冲一号隧道围岩的自稳能力,针对超前地质预报的破碎区域,采用了超前管棚支护和超前小导管的超前支护方式。

超前管棚采用管棚钻机或水平地质钻机造孔,钢管洞外分节加工,并按设计钻设注浆孔,采用钻机推进器顶进,高压注浆泵注浆。

超前小导管采用手持风钻钻孔,将小导管送入风钻钎尾套开动风钻顶入,注浆泵注浆,超前小导管尾部与钢架焊接牢固,并严格控制小导管数量、间距及外插角。

3.2.2 治水措施

岩屋冲一号隧道地表水系发育,为降低水对围岩稳定性的不利影响,采取排堵结合的治水措施。对于与地表存在良好水力联系、地下水发育、具有中等富水性和强富水的断层及影响带地段采用“以堵为主,限量排放”的原则,其余地段按照“以排为主,防、排、堵、截相结合,因地制宜,综合治理”的原则进行处理。

地表水主要采用截流进行治理,在开挖边线5 m以外设截水天沟,将水引离洞口,防止地表水冲刷自然坡,灌入洞内,以保证隧道洞口结构稳定。

地下水主要采用堵水措施进行治理。在加强施工过程中的地质超前预报的基础上,通过注浆来改良软弱破碎岩体、封堵地下水。根据注浆目的的不同,注浆施工方案主要包括超前周边注浆、局部注浆、径向注浆等。超前周边注浆主要用于在易涌水地段封闭围岩,以控制地下水涌出。断层破碎带施工采用小导管法进行注浆对隧道四周及掌子面围岩进行固结堵水,并加强初期支护防拱部及掌子面失稳坍塌。对注浆盲区、注浆后的岩面渗漏水应采用小导管法进行补注浆。上述注浆方案的适用范围如表3。

4 现场施工结果

以上爆破施工方案及安全措施在张吉怀高铁岩屋冲一号隧道进行了应用。经观察,光面爆破效果良好,施工过程中未发生突水、突泥以及围岩失稳塌

方等事故。该隧道于2018年7月9日如期顺利贯通。通过采取的两台阶的浅孔弱爆破施工方案,以及超前地质预报、超前支护及治水措施,有效保证了岩屋冲一号隧道的工程质量和施工安全,施工效果如图4所示。

表3 隧道注浆方案适用范围表
Table 3 Employable conditions for different slip casting schemes

序号	方案名称	适用范围
1	超前周边注浆	①加固隧道前方轮廓线外约3~5 m范围内的围岩,防止地下水、泥等从隧道周边涌入隧道内; ②每循环加固段长(20~30 m)、钻孔和注浆量较大、作业周期较长; ③水压较高、水量较大地段。
2	局部注浆	①以封堵围岩裂隙(或管道)股状流水为主,通过注浆减小地层水向隧道内的排泄量; ②主要适用于隧道开挖后,洞壁较大的股状出水点处,小范围的面状淋水部位。
3	径向注浆	①隧道开挖后,洞壁渗漏水较大时,或支护结构变形较大时,通过径向注浆达到堵水减排和加固围岩、限制变形的目的; ②主要用于节理裂隙密集及围岩破碎段带水开挖后的加固堵水注浆,也用于全断面超前预注浆段或周边帷幕注浆段开挖后的补充注浆。

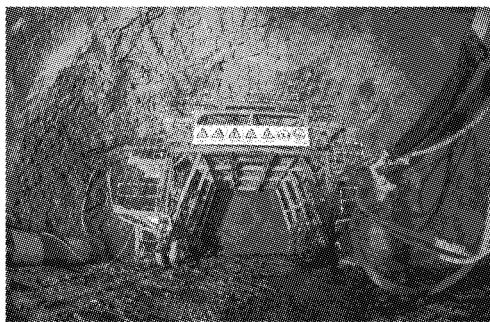


图4 “台阶法”光面爆破施工方案在张吉怀高铁岩屋冲一号隧道应用

Fig. 4 Employment of benching tunneling method-based smooth blasting in No.1 tunnel of Yanwuchong project of Zhangjiajie-Jishou-Huaihua high-speed railway system

5 结论

以张吉怀高铁岩屋冲一号隧道爆破工程为背景,针对隧道全程处于富水软弱围岩中的地质条件和“台阶法”的施工方法,提出了“弱爆破、短开挖、强支护、早闭合、勤量测”的设计原则,并介绍了浅

孔弱爆破的光面爆破的施工方案,以及超前探测、超前支护及排水等安全措施。结合现场的施工结果,得出如下结论:

(1)采用上下两台阶的浅孔弱爆破施工方案,在保证爆破效果的基础上,有效降低爆破对软弱围岩的扰动。

(2)采用了包括 TSP 超前地质预报、红外探水和超前钻孔等探测手段获取地质信息,并有针对性的采用超前管棚、超前小导管、超前周边注浆、局部注浆以及径向注浆等支护和治水措施,提高了围岩的自稳能力。

(3)采用基于“台阶法”的浅孔弱爆破施工方法,以及超前探测、超前支护及治水等措施,有效解决了张吉怀高铁岩屋冲一号隧道富水软弱围岩爆破施工的安全性问题。

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[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(4):800-807.
- [1] WANG Jian-xiu, ZOU 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] 张继春,潘强,郑爽英,等. 特大断面公路隧道的光面爆破技术研究[J]. 爆破,2018,35(4):52-57.
- [2] ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, ZHENG Shuang-ying, et al. Technique of smooth blasting of highway tunnel with super-large section [J]. Blasting, 2018, 35(4): 52-57. (in Chinese)
- [3] 吉凌,周传波,刘赶平,等. 特大断面隧道倒 T 型掏槽爆破研究与应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2020,48(2):54-60.
- [3] JI Ling, ZHOU Chuan-bo, LIU Gan-ping, et al. Investigation and application of inverted T cut blasting for super-large cross section tunnel excavation [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 54-60. (in Chinese)
- [4] 刘朝阳. 微台阶精细爆破开挖工法在软弱围岩隧道中的应用[J]. 建筑技术开发,2019,46(18):106-107.
- [4] LIU Chao-yang. Application of fine blasting micro-step excavation method in soft rock tunnel [J]. Building Technology Development, 2019, 46(18): 106-107. (in Chinese)
- [5] 陈鸿,殷晓东,李勇. 蒙华铁路中条山隧道施工关键技术[J]. 隧道建设,2017,37(12):1585-1592.
- [5] CHEN Hong, YIN Xiao-dong, LI Dong. Key construction technologies for Zhongtiaoshan Tunnel on Menghua Railway [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(12): 1585-1592. (in Chinese)
- [6] 高鹏飞,刘阳春,傅菊根. 琅琊山隧道软弱围岩爆破施工技术[J]. 现代矿业,2016,32(11):42-43.
- [6] GAO Peng-fei, LIU Yang-chun, FU Ju-gen. Blasting construction technology of weak wall rock in Langyashan tunnel [J]. Modern Mining, 2016, 32(11): 42-43. (in Chinese)
- [7] 夏孝维,黄志军,陈阳. 高地应力软岩隧道施工方法与监测[J]. 铁道建筑,2013(9):48-51.
- [7] XIA Xiao-wei, HUANG Zhi-jun, CHEN Yang. Construction method and monitoring of high ground stress soft rock tunnel [J]. Railway Engineering, 2013(9): 48-51. (in Chinese)
- [8] 袁红所,张家铭,贺立新,等. 复杂地质条件下隧道爆破方案优化设计[J]. 爆破,2016,33(1):50-54,67. (in Chinese)
- [8] YUAN Hong-suo, ZHANG Jia-ming, HE Li-xin, et al. Optimization of Tunnel's Blasting Scheme under Complicated Geological Conditions [J]. Blasting, 2016, 33(1): 50-54, 67. (in Chinese)
- [9] 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.
- [9] 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)
- [10] 刘赶平. 大断面隧道光面爆破设计[J]. 爆破,2019,36(2):65-71,77.
- [10] LIU Gan-ping. Smooth blasting design for large cross-section tunnel excavation [J]. Blasting, 2019, 36(2): 65-71, 77. (in Chinese)
- [11] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2007:196-216.
- [12] 满轲,刘晓丽,王锡勇,等. 周边孔炮眼间距对光面爆破效果的影响[J]. 科学技术与工程,2016,16(29):47-53.
- [12] MAN Ke, LIU Xiao-li, WANG Xi-yong, et al. Research on the smooth blasting influenced by the surrounding hole space [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(29): 47-53. (in Chinese)