

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.04.010

聚能爆破在隧道开挖成型控制中的仿真试验研究*

熊炎林^① 种玉配^① 齐燕军^② 刘书奎^②

①中铁隧道局集团有限公司勘察设计研究院(广东广州,511400)

②中国矿业大学力学与土木工程学院(江苏徐州,221116)

[摘要] 为了提高水平岩层隧道光面爆破效果,减少隧道爆破开挖超欠挖量,提高施工速度和减少工程投资,以段家坪隧道为例,采用数值模拟和现场试验对聚能爆破在隧道开挖成型控制中的作用进行研究。数值模拟结果表明,聚能结构一侧上的围岩节点振动速度和单元应力均大于非聚能结构一侧。现场聚能爆破试验表明,周边眼聚能装药结构能够更好地控制水平砂泥岩地层隧道爆破成型,大部分超挖量控制在15 cm以内,最大超挖量减少了78.9%。

[关键词] 聚能爆破;开挖;超欠挖;数值模拟;现场试验

[分类号] U455.6

Simulation Test of Shaped Charge Blasting in Shaping Control of Tunnel Excavation

XIONG Yanlin^①, ZHONG Yupei^①, QI Yanjun^②, LIU Shukui^②

①Survey Design and Research Institute of China Railway Tunnel Group Co., Ltd. (Guangdong Guangzhou, 511400)

②School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Jiangsu Xuzhou, 221116)

[ABSTRACT] In order to improve the smooth blasting effect of horizontal rock tunnel, reduce the overbreak and underbreak, increase the construction speed and reduce the project investment, by taking Duanjiaping tunnel as an example, the control of shaped charge blasting in tunnel excavation was studied by numerical simulation and field test. Numerical simulation results show that vibration velocity and unit stress of surrounding rock particles on one side of the energy-accumulating structure are greater than those on the other side of the non-energy-accumulating structure. Field tests show that the surrounding eyeball shaped charge structure can better control the blasting formation of tunnels in horizontal sand and mudstone strata. Most of the over-excavation was controlled within 15 cm, and the maximum over-excavation is reduced by 78.9%.

[KEYWORDS] shaped charge blasting; excavation; overbreak and underbreak; numerical simulation; field test

引言

近年来,我国不断加大基础设施投资建设力度,使得铁路、公路、地铁隧道工程的建设规模不断飞速发展,特别是西部地区发展更快。水平岩层是目前隧道施工作业中经常遇到的一种地质构造。在水平岩层的超欠挖控制技术中,光面爆破是一个关键的技术节点。隧道光面爆破如果处理不好,隧道拱顶会出现大面积平顶、落石、塌顶等现象,不仅直接影响隧道的光面爆破效果,还会影响隧道的围岩稳定性、初支支护的数量以及二衬混凝土的工程量,增加

工程投资^[1-3]。

王飞等^[4]分析了水平岩层隧道的超挖与爆破作业扰动、开挖应力释放、地下水影响等因素均有关系。周宴成^[5]以柳林隧道为例,通过将周边眼间距70 cm调小为60 cm,将单层掏槽眼改变为三层掏槽眼来控制隧道爆破成型。陈旺^[6]以南吕梁山隧道为例,周边眼采用底部1卷炸药、中部1/3卷炸药的间隔装药结构来提高光面爆破效果。侯小军^[7]以横山隧道为例,遵循短进尺、弱爆破、多分段次微差爆破,减少对围岩的扰动,加快了施工进度。冯海暴等^[8]优化最大一段允许爆破装药量,将周边眼外插角控制在2°以内,隧道一次性开挖平均合格率从

* 收稿日期:2019-04-10

基金项目:国家自然科学基金(51608520);中铁隧道局集团有限公司科技创新计划(2015-13)

第一作者:熊炎林(1982-),男,本科,高级工程师,主要从事隧道与地下工程科研与管理工。E-mail:1604514@qq.com

通信作者:种玉配(1991-),男,硕士,助理工程师,主要从事隧道与地下工程科研与管理工。E-mail:815501773@qq.com

67.4% 上升到 83.9%。刘东等^[9]从地质条件、钻孔精度、测量放线、爆破技术和现场管理 5 个因素提出了控制隧道超欠挖的技术措施。肖云华等^[10]提出隧道围岩超欠挖曲线分形维数与节理间距、节理走向、洞轴线成双对数线性关系。申洪雨^[11]通过精细计算光爆层厚度、周边眼密集系数、装药量,提高了光面爆破效果,超挖量减少了 15%。以上学者主要通过改变起爆间隔、周边眼装药、布置参数来提高光面爆破效果。

本文中,针对段家坪隧道,采用数值模拟和现场试验对聚能爆破在隧道开挖成型控制中的作用进行研究,设计出一种周边眼聚能装药结构,从而提高水平岩层隧道的光面爆破效果,减少隧道爆破开挖的超欠挖量,加快施工进度,降低工程成本。

1 工程概况

段家坪隧道位于陕西省延安市宜川县境内蒙华铁路第九标段,隧道进口里程 DK446 + 664.02,出口里程 DK457 + 387.00,隧道全长 10 722.98 m,为单洞双线隧道,最大埋深 450 m,两处浅埋处最小覆土为 3.5 m 与 14.0 m。

段家坪隧道隧址通过地层含有三叠系砂泥岩,该岩层为水平岩层,发育 2 至 3 组节理。段家坪水平岩层隧道在前期的钻爆开挖过程中,特别是在拱顶部位,出现了 1 ~ 2 m 的特大掉块,拱肩位置超挖严重,以及拱脚位置欠挖,极大地影响了后续工序的顺利进行,并且大面积的回填与二次爆破大大增加了工程造价。

2 数值模拟

2.1 材料单元的选取

在 ANSYS/LS-DYNA 中,一般采用高性能炸药材料 * Mat_High_Explosive_Burn 来模拟炸药的爆轰,采用状态方程 * Eos_JWL 来描述爆炸时炸药材料的压力特征,同时可以描述炸药爆炸产生的单位体积的内能、爆轰产物的压力和相对体积参数^[12]。使用炸药的具体参数见表 1。

一般采用 * Mat_Plastic_Kinematic 来描述岩石材料,这是一种考虑了材料失效的随动硬化、各向同性以及应变率的模型^[12]。砂岩的力学参数见表 2。

一般采用 * Mat_Null 来描述空气材料,这是一种可以描述流体和气体的材料模型,并且计算过程中可以允许状态方程忽略偏应力的影响,同时需要与状态方程 * Eos_Linear_Polynomial 一起应用^[12]。表 3 为空气主要参数。

一般采用 * Mat_Soil_And_Foam 来描述塞炮泥材料^[12]。表 4 为炮泥主要参数。

2.2 计算模型建立

如图 1 所示,建立三维有限元计算模型,周边眼炮眼深度为 3.0 m,装药结构为分段装药,孔底预留 0.2 m 保护层,炮泥填塞 0.4 m。模型外尺寸为 0.8 m × 0.4 m × 3.2 m,药卷直径为 32 mm,炮眼直径为 42 mm,建立单孔柱状装药模型。模型上表面采用自由边界,其余的面均采用无反射边界,采用等距网格对计算模型中的炸药、岩石、空气和炮泥介质进行划分,炸药聚能结构如图 2 所示。

表 1 炸药及状态方程主要参数

Tab. 1 Main parameters of explosive and state equation

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(m \cdot s^{-1})$	p_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	w	E/GPa
1.05	4 018	18.5	216.7	0.184	4.2	0.9	0.15	4.192

表 2 砂岩材料参数

Tab. 2 Main parameters of sandstone

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	μ	E/GPa	σ/MPa	E_t/GPa	ε	σ_b/MPa
2.6	0.32	3.8	42.68	2	3.5	2.15

表 3 空气主要参数

Tab. 3 Main parameters of air

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	C_0	C_4	C_5	E_0	V_0
1.29×10^{-3}	-1×10^{-6}	0.4	0.4	2.5×10^{-6}	1

表 4 炮泥主要参数

Tab. 4 Main parameters of stemming

$\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E_{\text{eq}} / \text{GPa}$	K / GPa	μ
1.8	0.016	1.3×10^4	0.2

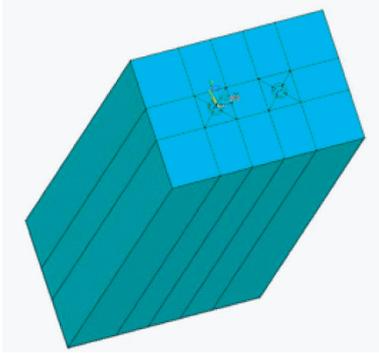
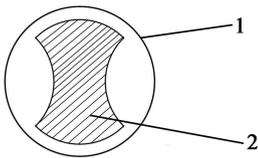


图 1 聚能爆破数值模型

Fig. 1 Numerical model of shaped charge blasting



1 - 炮孔壁; 2 - 炸药。

图 2 炸药聚能结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the explosive charge

2.3 计算结果分析

在不同时刻下岩体的应力云见图 3。

由图 3 可知,在 20 μs 时,在聚能结构两侧岩体中首先出现较大的爆炸应力,随着时间的不断增加,在炸药周围,应力区域呈现椭圆形分布形式,聚能结构两侧分布范围较广。选取炸药周围岩体不同的节点和单元,观察岩体质点振动速度和单元应力情况。单元和节点选取如图 4 所示。图 4 中,A 侧、B 侧各节点距离炮孔中心距离由近及远分别为 12、14、16、18 cm 和 20 cm。A 侧距离炮孔中心最远的节点到模型 A 侧边界距离为 20 cm。B 侧距离炮孔中心最远的节点在模型 B 侧边界上。

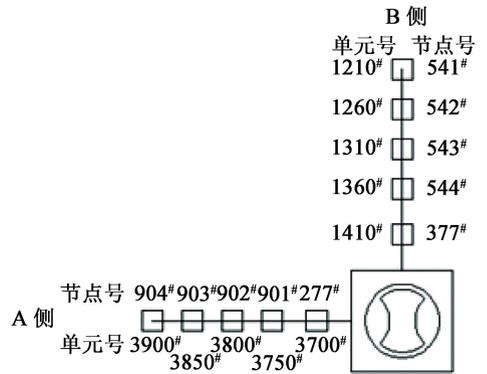
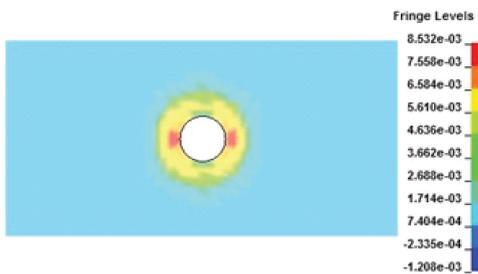


图 4 节点和单元位置示意图

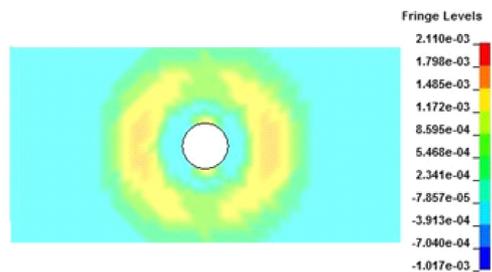
Fig. 4 Schematic diagram of node and cell location

统计每个节点的最大振动速度和每个单元的最大应力,如表 5 和表 6 所示。

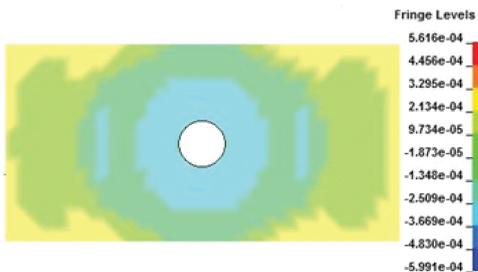
绘制节点最大振动速度和单元最大应力随着距



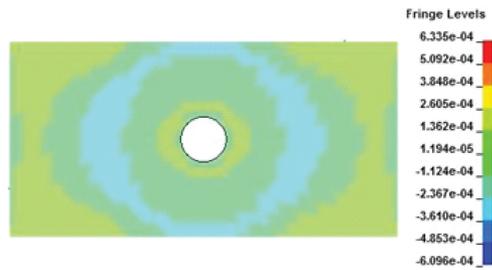
(a) 20 μs



(b) 40 μs



(c) 90 μs



(d) 130 μs

图 3 不同时刻下岩石的应力云图

Fig. 3 Stress nephogram of rock at different times

表5 不同节点的最大振动速度

Tab.5 Maximum vibration velocity of different nodes

A 侧节点	277 [#]	901 [#]	902 [#]	903 [#]	904 [#]
最大振动速度 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	2 135	1 560	1 093	692	479
B 侧节点	377 [#]	544 [#]	543 [#]	542 [#]	541 [#]
最大振动速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1 882	1 157	694	575	370

表6 不同单元的最大应力

Tab.6 Maximum stress of different elements

A 侧单元	3700 [#]	3750 [#]	3800 [#]	3850 [#]	3900 [#]
最大应力/GPa	0.42	0.19	0.18	0.13	0.07
B 侧单元	1410 [#]	1360 [#]	1310 [#]	1260 [#]	1210 [#]
最大应力/GPa	0.22	0.19	0.09	0.06	0.04

炸药中心距离的变化曲线,如图5和图6所示。

从图5和图6可知,靠近聚能结构一侧(A侧)的围岩节点振动速度和单元应力均大于非聚能结构一侧(B侧)。爆炸瞬间,聚能结构一侧首先出现爆破破碎区和裂隙区,爆生气体能够沿着聚能结构方向扩大岩体裂隙,增加聚能结构方向的岩体破碎效果。随着与炸药中心距离的增大,岩体的质点振动

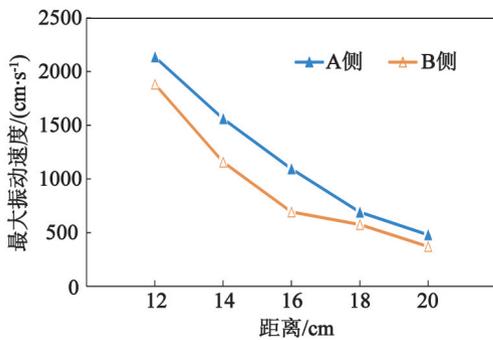


图5 节点最大振动速度随距离的变化

Fig.5 Changes of maximum node vibration velocity with distance

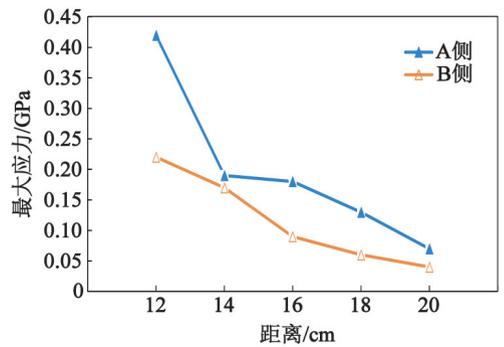


图6 单元最大应力随距离的变化

Fig.6 Maximum stress change with distance of element

速度和单元应力均不断减小,但是聚能结构方向上的节点最大振动速度和单元最大应力均大于非聚能结构一侧。

3 现场试验

3.1 前期爆破效果

前期全断面开挖爆破参数如表7所示。

图7为隧道开挖断面轮廓图。正数代表超挖,负数代表欠挖。由图7可知,从拱顶开始到两侧的拱肩区域内,隧道的超挖量比较大,最大超挖量达到了108.4 cm,拱部的超挖量基本在50 cm以上,隧道开挖断面呈现出矩形形状。

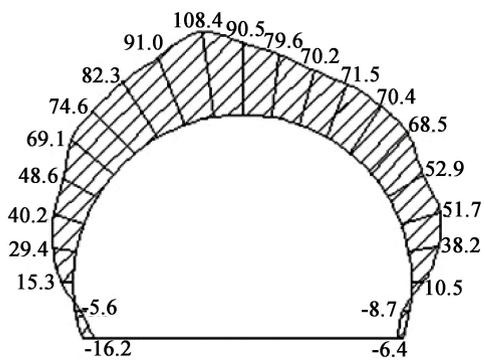
3.2 聚能爆破效果

对原方案中周边眼的装药结构进行了优化改进,采用了具有对称凹槽型的聚能装药结构,如图8所示。将 $\varnothing 32$ cm的PVC管剖分为4等分,将其中相对的两片(图8中1[#]和2[#])翻转180°后成凹槽形状,另外两片形状不做改变,并保留底部2~3 cm的PVC管不进行剖分,以便装药成型。将 $\varnothing 32$ cm药卷沿着药卷纵向剖分成两半,将其中一半塞入带有聚能结构的PVC管中,然后采用胶带对带有聚能结构

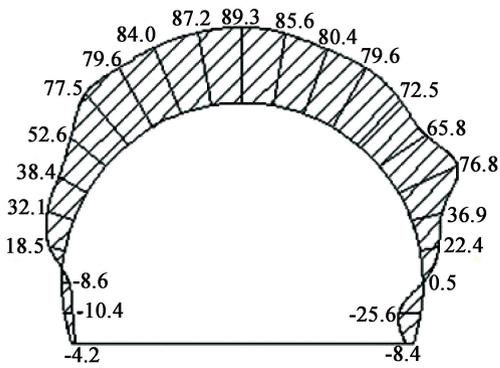
表7 全断面开挖爆破参数

Tab.7 Excavation blasting parameters for full section

序号	炮眼分类	炮眼个/数	雷管段数	炮眼深度/m	装药结构	单孔装药量/kg	合计药量/kg
1 [#]	掏槽眼	20	1	3.5	连续	1.8	90.0
2 [#]	扩槽眼	33	3	3.5	连续	1.8	59.4
3 [#]	辅助眼	23	5	3.0	连续	1.6	36.8
4 [#]	辅助眼	29	7	3.0	连续	1.4	26.6
5 [#]	周边眼	44	9	3.0	间隔	1.4	33.6
6 [#]	底板眼	9	11	3.5	间隔	2.0	18.0
合计		158					264.4



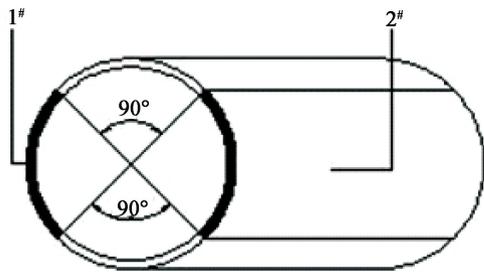
(a) 掌子面位置处



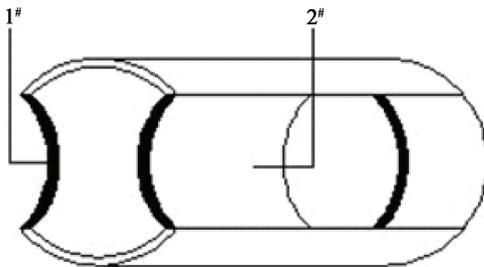
(b) 掌子面后方 1m 位置处

图 7 隧道开挖断面轮廓(单位:cm)

Fig. 7 Tunnel excavation section profile (unit:cm)



(a) 加工前



(b) 加工后

图 8 PVC 管加工成型效果图

Fig. 8 Processing and forming effect diagram of PVC pipe

的PVC管进行加固,然后放入周边眼中。

聚能装药结构主要是凹槽的聚能作用,所以在入孔装药时,必须严格使相邻两个周边眼聚能装药结构中的凹槽正对隧道轮廓线,或者相邻两个周边

眼聚能装药结构中的凹槽中心的连线平行于隧道轮廓线,图 9 为周边眼装药示意图。

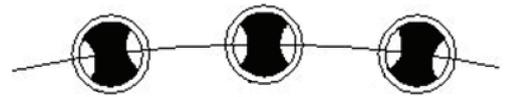
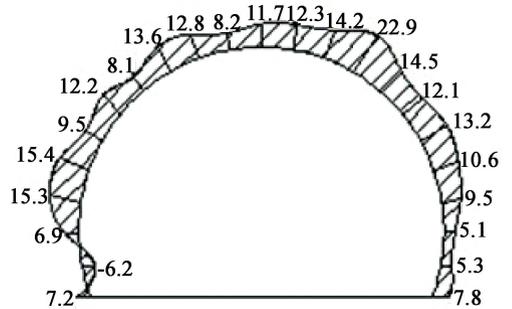


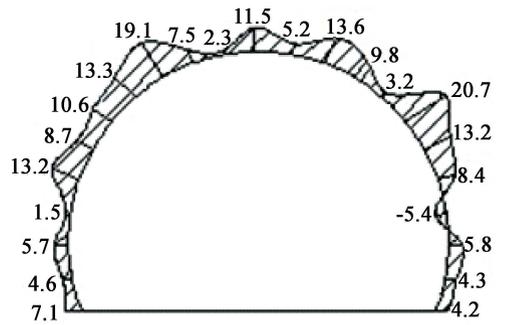
图 9 周边眼装药示意图

Fig. 9 Schematic charge of control hole

从图 10 可见,采用具有凹槽型的周边眼聚能装药结构以后,隧道超欠挖已经控制在一个比较合理的范围,个别部位的超挖值,如 DK452 + 109.1 里程右侧拱肩处的超挖量为 20.7 cm,DK452 + 088.7 里程右侧拱肩处的超挖量为 22.9 cm,其余各位置处的超欠挖量均在 15 cm 左右,并且相对初始爆破方案下的最大超挖量减少了 78.9%。



(a) DK452 + 088.7 断面



(b) DK452 + 109.1 断面

图 10 试验段隧道开挖断面轮廓(单位:cm)

Fig. 10 Tunnel excavation section profile of test section (unit:cm)

图 11 为现场试验围岩爆破成型效果图。从图 11 可以看出,采用具有凹槽型的周边眼聚能装药结构以后,隧道围岩爆破成型效果很好,断面上的半圆形炮痕残存基本完整,清晰可见。

4 小结

采用数值模拟和现场试验对聚能爆破在隧道开



图 11 现场试验围岩爆破成型效果图

Fig. 11 Blasting shaping effect of surrounding rock in site test

挖成型控制中的作用进行研究,主要成果如下:

1) 聚能结构一侧的围岩节点最大振动速度和单元最大应力均大于非聚能结构一侧。随着与炸药中心距离的增大,岩体的节点振动速度和单元应力均不断减小。

2) 凹槽型的聚能装药结构,能够很好地控制隧道爆破开挖成型效果,隧道爆破超挖量基本控制在 15 cm 以内,相对原始爆破方案下的最大超挖量减少了 78.9%。

参 考 文 献

- [1] 韩攀攀. 水平岩层隧道超欠挖控制技术与长大公路隧道辅助坑道设置的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
HAN P P. Study of the technology for controlling excessive and insufficient excavation in tunnel with horizontal layer and the set of auxiliary tunnel in the long tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [2] 李顺波. 水平缓倾岩层大断面隧道安全快速施工技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2016.
LI S B. The technical research of safely and rapidly construction on large section tunnel of horizontal gently inclined rock [D]. Shi-jiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2016.
- [3] 刘鹏, 吉锋, 温书亿. 隧道水平岩层变形破坏机制的模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(3): 82-87.
LIU P, JI F, WEN S Y. Simulation study on the deformation and failure mechanism of level rock in tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(3): 82-87.
- [4] 王飞, 赵晓勇, 马宏韬. 水平岩层隧道超挖原因及合理超挖数量分析[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(4): 75-80.
WANG F, ZHAO X Y, MA H T. Analysis of the over-breaking reason and reasonable overbreaking quantity in the horizontal rock stratum tunnel [J]. Journal of Railway

Engineering Society, 2018, 35(4): 75-80.

- [5] 周宴成. 隧道水平岩层钻爆施工技术研究[J]. 山西建筑, 2009, 35(11): 139-141.
ZHOU Y C. Study on drilling dynamite of horizontal rock in tunnel [J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(11): 139-141.
- [6] 陈旺. 单线铁路隧道水平岩层施工技术[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(6): 142-147.
CHEN W. Construction techniques for a single-track railway tunnel in a horizontal stratum [J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(6): 142-147.
- [7] 侯小军. 横山隧道水平岩层快速施工综合技术[J]. 隧道建设, 2012, 32(S1): 45-49.
HOU X J. Comprehensive rapid construction technology for Hengshan Tunnel in horizontal stratum [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(S1): 45-49.
- [8] 冯海暴, 蒋万德, 曲俐俐, 等. 九瑞高速岩质隧道钻爆法施工超欠挖控制措施及成本分析[J]. 隧道建设, 2012, 32(6): 887-891.
FENG H B, JIANG W D, QU L L, et al. Over-break/shortbreak control technology for and cost analysis on rock tunnels constructed by drilling and blasting method; case study on tunnels on Jiujiang-Ruichang highway [J]. Tunnel Construction, 2012, 32(6): 887-891.
- [9] 刘冬, 高文学, 刘明高. 隧道超欠挖成因及其控制技术[J]. 地下空间与工程学报, 2007, 3(8): 1468-1471.
LIU D, GAO W X, LIU M G. The cause of excessive or insufficient excavation in tunnel construction and its control [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, 3(8): 1468-1471.
- [10] 肖云华, 王清, 陈剑平, 等. 隧道围岩超欠挖与节理和洞轴线之间的关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(3): 455-459.
XIAO Y H, WANG Q, CHEN J P, et al. Relationship among overbreak-underbreak of tunnel, joints and tunnel axes [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(3): 455-459.
- [11] 申洪雨. 大跨度软岩公路隧道控制爆破技术[J]. 铁道建筑, 2007(4): 55-56.
SHEN H Y. Controlled blasting technique used in highway large-span soft-rock tunnel [J]. Railway Engineering, 2007(04): 55-56.
- [12] 种玉配, 熊炎林, 齐燕军. 轴向不耦合装药结构形式优化仿真研究[J]. 工程爆破, 2018, 24(2): 1-7.
ZHONG Y P, XIONG Y L, QI Y J. Simulation study of optimization on the axial uncoupling charging structure [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 1-7.