DOI: 10.15986/j.1006-7930.2026.04.009

基于径向不耦合系数的光爆参数优化及应用

杨腾添[1,2]

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司,天津 300300; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘要: 针对合理光爆参数选取难题,根据爆炸荷载下孔间岩石破裂机理,提出了基于径向不耦合系数的光爆参数计算方法,然后通过数值分析对比得出最优爆破参数,最后成功应用于实际工程,结果表明:在保证孔间岩石开裂贯通并避免孔壁岩石过度粉碎的条件下,计算得出铜川隧道里程DK96+152处径向不耦合系数K_d的合理取值范围为1.60~2.92,提出了K_d=1.6~1.9四种爆破方案;通过对4种爆破方案数值分析,从围岩损伤和施工成本两方面考虑,K_d取1.7,L取0.5 m时围岩损伤较低并且施工成本最优;将优选的光爆参数应用于铜川隧道施工现场,优化后实测最大超挖距离下降了0.27 m(64%),超挖面积下降了2.82 m^2(57%),单循环节省投资约3 902元,取得了理想光爆效果,能够为相关工程光面爆破参数的合理选取提供参考。

关键词: 光面爆破; 径向不耦合系数; 参数优化; 数值模拟; 工程应用

中图分类号: TU 455 **文献标志码**: A **文章编号**: 1006-7930(2026)04-0550-07

Optimization and application of smooth blasting parameters based on the radial decoupling coefficient

YANG Tengtian[1,2]

(1. China Railway Construction Bridge Engineering Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300300, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: To the challenge of selecting reasonable blasting parameters, a calculation method for smooth blasting parameters based on the radial decoupling coefficient was proposed according to the mechanism of rock fracture between holes under explosive load. Then, the optimal blasting parameters were obtained through numerical analysis and comparison. Finally, these parameters were successfully applied to actual engineering projects. The results show that, under the condition of ensuring the cracking and interconnection of rock between holes while avoiding excessive crushing of the rock wall, the reasonable range of the radial decoupling coefficient K_d at the DK96+152 section of the Tongchuan Tunnel is calculated to be 1.60~2.92. Four blasting schemes with K_d values of 1.6 to 1.94 were proposed. Through numerical analysis of the four blasting schemes, considering both the damage to the surrounding rock and the construction cost, it was found that when K_d is 1.7 and L is 0.5 m, the damage to the surrounding rock is lower and the construction cost is optimal. The optimized smooth blasting parameters were applied to the construction site of the Tongchuan Tunnel, where the actual measured maximum overbreak distance was reduced by 0.27 m (64%), the overbreak area was reduced by 2.82 m^2 (57%), and the investment was saved by about 3 902 yuan per cycle. An ideal smooth blasting effect was achieved, which can provide a reference for the reasonable selection of smooth blasting parameters in related engineering projects.

Key words: smooth blasting; radial decoupling coefficient; parameter optimization; numerical simulation; engineering applications

随着交通建设规模的不断扩大,隧道工程在交通工程中的占比也逐步提高。在隧道工程建设当中,控制平整光滑的轮廓面从而提高隧道工程质量至关重要[1]。目前,光面爆破是隧道开挖的主要爆破方法,但由于爆破参数选取不合理造成超挖问题严重,使得爆破效果达不到预期要求[2-4]。因此,合理选取光爆参数对提高工程质量具有重要意义。

理论研究方面,马芹永[5]、Feng等[6]根据岩石爆

收稿日期: 2024-07-04 **修回日期**: 2026-04-03
基金项目: 中国国家铁路集团有限公司重大课题(P2018G048);中国铁建大桥工程局集团有限公司科技研究开发计划(2020-B07)
第一作者: 杨腾添(1989—),男,博士,高级工程师,硕士生导师,主要从事隧道及地下工程领域的科研工作. E-mail: 737412033@qq.com

破机理，推导出炮孔间距和光爆层厚度的计算方法；汪海波等[7]以爆破损伤范围为依据对强制放顶爆破参数进行计算，并成功应用于现场，验证了计算方法的可靠性；叶志伟等[8]研究了工程爆破中常用的多种小不耦合系数装药组合工况下炸药单点起爆后的炮孔壁压力；李芳涛等[9]基于统一强度和摩尔库伦强度准则，提出了考虑中主应力和环向拉应力影响的围岩粉碎区的计算方法，并计算了裂隙区范围；Zhao 等[10]研究表明延长相邻炮孔微差起爆时间能够提高孔间裂纹密度。

试验研究方面，费鸿禄等[11]采用室内试验和数值模拟相结合的方法，优选出交错扇形深孔崩落法的最优排间间隔时间；杨仁树等[12]研究了炮孔数目与断面面积的相关性，并给出了炮孔密度优化建议；Uenishi 等[13]、陈啸林等[14]通过数值模拟研究了光爆参数对岩石孔间裂纹扩展的影响规律；李卓等[15]通过数值模拟，并基于岩石损伤对炮孔间距进行了优化；刘国强等[16]分析了不同周边眼爆破参数下的围岩损伤厚度及围岩等效应力，提出一种针对岩溶隧道的参数优化方法。

现有研究从理论、模拟和试验角度为光爆参数优化奠定基础，但工程应用中仍存在不足：一是多数优化停留于理论阶段，缺乏实际工程验证，实用性有待检验；二是对径向不耦合系数等核心参数研究不够深入，难以精准调控成缝与围岩保护；三是参数优化多聚焦单一效果，未综合考虑超挖控制与施工成本，缺乏兼顾质量与经济的综合选取思路。

针对上述问题，本文立足隧道光面爆破“保证孔间成缝、避免孔壁过度破碎”的实际需求，以径向不耦合系数为核心，提出基于该系数的光爆参数计算方法，通过理论推导明确其合理取值范围；结合铜川隧道围岩条件开展多工况数值分析，从围岩损伤与施工成本双维度对比优选爆破参数；依托西延铁路铜川隧道工程进行现场验证，通过实测超挖与分析结果对比检验方法合理性，为光爆参数选取提供工程化优化思路与应用参考。

1　光爆参数确定方法

1.1　理论依据

光爆参数直接决定了光爆效果能否达到预期目标，因此如何合理确定光爆参数至关重要。针对光面爆破，目前广泛认可的是孔间成缝为应力波与爆生气体共同作用的结果[17]。在应力波起裂阶段，炸药爆炸后，冲击应力波迅速作用于炮孔壁，使孔壁岩石产生径向压应力与环向拉应力。当环向拉应力大于岩石动态抗拉强度时，炮孔壁沿连心线方向产生初始径向裂纹，为后续裂纹贯通提供起裂条件。在爆生气体扩充阶段，应力波作用时间短、衰减快，随后爆生气体进入裂纹内部并产生准静态压力，推动初始裂纹沿炮孔连心线方向持续、定向扩展。相邻炮孔产生的裂纹不断延伸、交汇、搭接，最终形成连续、平整的孔间贯通裂纹，使岩石沿设计轮廓面整齐断裂，实现理想光爆效果。

文章围绕光面爆破既要保证孔间岩石开裂贯通又要尽可能避免孔壁岩石过度粉碎这一目标，来确定径向不耦合系数的取值范围。考虑到岩石首先会受到爆炸引起的冲击荷载，因此要求岩石孔壁在冲击荷载作用下不会发生压碎并能够开裂，需要满足以下要求：

(1)爆炸荷载作用下孔壁岩石径向应力低于岩石动态抗压强度；

(2)爆炸荷载作用下孔壁岩石环向应力高于岩石动态抗拉强度；

(3)爆生气体扩充所产生的孔间裂纹长度不小于炮孔间距。

径向不耦合系数 K_d 对围岩损伤控制起决定作用，基于上述分析首先确定 K_d 的合理取值范围，再进一步确定炮孔间距 h 的取值。

1.2　参数计算

对于不耦合装药，爆炸在炮孔壁产生的冲击压力 P_1 为

$$P_1 = nP_w(K_d)^{-2\alpha}(K_l)^{-1} \tag{1}$$

$$P_w = (\rho_0 D^2)/8 \tag{2}$$

式中：n 为不耦合装药炮孔壁压力增大倍数，n 取 8[8]；α 取 3；P_w 为初始压力；ρ_0 为炸药密度；D 为爆轰速度；K_d 为径向不耦合系数，$K_d=d_b/d_c$，d_b 和 d_c 分别为炮孔直径和炸药直径；K_l 为轴向不耦合系数，$K_l=l_b/l_c$，l_b 和 l_c 分别为炮孔长度和炸药长度。

冲击压力作用在炮孔壁并以应力波的形式向周围岩体传播，岩石单元径向受到压应力，环向受到拉应力，其径向应力 σ_{1r} 和环向应力 $\sigma_{1\theta}$ 表达式为

$$\sigma_{1r} = P_1\left(\frac{r}{r_b}\right)^{-\alpha} \tag{3}$$

$$\sigma_{1\theta} = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_{1r} \tag{4}$$

式中：r 为岩石中任意一点到炮孔中心的距离；r_b 为炮孔半径；α 为压力衰减指数，$\alpha=2\text{-}v/(1\text{-}v)$；$v$ 为岩石泊松比。

当环向应力 $\sigma_{1\theta}$ 达到其动态抗拉强度 σ_{td} 时，可求

解出应力波作用下的岩石裂纹扩展长度l_1为

$$l_1=r_b\left[\frac{\sigma_{td}(1-\nu)}{nP_w(K_1)^{-1}\nu}\right]^{-\frac{1}{\alpha}}(K_d)^{\frac{2\alpha}{\alpha}} \tag{5}$$

冲击压力形成的动态应力场会迅速消失,爆生气体发生绝热膨胀作用于初始裂缝并形成准静态应力场,炮孔受到的准静态压力P_2为

$$P_2=P_k(P_w/P_k)^{\frac{\gamma}{k}}K_d^{-2\gamma}K_1^{-\gamma} \tag{6}$$

式中:γ取1.33;k取3;P_k为临界压力,通常取200 MPa。

根据弹性力学厚壁圆筒理论可求解光面爆破爆生气体产生的准静态应力场,岩石单元径向应力σ_{2r}和环向应力$\sigma_{2\theta}$表达式为

$$\sigma_{2r(\theta)}=P_2\left(\frac{r_b}{r}\right)^2 \tag{7}$$

当环向应力$\sigma_{2\theta}$达到其动态抗拉强度σ_{td}时,可得爆生气体作用下的岩石裂纹扩展长度l_2为

$$l_2=r_b\left[P_k(P_w/P_k)^{\frac{\gamma}{k}}K_1^{-\gamma}/\sigma_{td}\right]^{\frac{1}{2}}K_d^{-\frac{\gamma}{2}} \tag{8}$$

针对上述要求(1)和要求(2),可推导出径向不耦合系数K_d的取值范围为

$$\left(\frac{nP_w}{\sigma_{cd}K_1}\right)^{\frac{1}{2\alpha}}<K_d<\left(\frac{nP_w\nu}{\sigma_{td}K_1(1-\nu)}\right)^{\frac{1}{2\alpha}} \tag{9}$$

针对上述要求(3)可推导出炮孔间距L为

$$L=2r_b\left[\sigma_{td}(1-\nu)/nP_w(K_1)^{-1}\nu\right]^{-\frac{1}{\alpha}}(K_d)^{\frac{2\alpha}{\alpha}}+2r_b\left[P_k(P_w/P_k)^{\frac{\gamma}{k}}K_1^{-\gamma}/\sigma_{td}\right]^{\frac{1}{2}}K_d^{-\frac{\gamma}{2}} \tag{10}$$

当围岩条件和施工方案确定以后,公式中涉及到的物理力学参数均为已知值,可求解出径向不耦合系数并在此基础上求解出炮孔间距。

1.3 计算实例

铜川隧道位于陕西省铜川市境内,全长21.4 km,服务于西安至延安高速铁路。根据地质调查结果,隧道围岩主要为Ⅳ级,以花岗岩、砂岩和泥岩为主,节理裂隙发育。结合铜川隧道里程DK96+152处现场情况对光爆参数进行计算,计算采用以下参数:不耦合装药炮孔壁压力增大倍数n取8;炸药密度ρ_0为1.32 g/cm^3;爆轰速度v_D为0.53 cm/μs,轴向不耦合系数K_1为1.0。通过室内SHPB压杆系统测得岩石动态抗压强度σ_{cd}为183 MPa;动态抗拉强度σ_{td}为13.2 MPa,泊松比v为0.22。

根据式(9)计算得径向不耦合系数取值范围$1.60<K_d<2.92$,已有研究结果表明径向不耦合系数宜采用2~3[18],与本文计算结果相符。

2 光爆参数优选

2.1 模型建立

根据上节计算得到的铜川隧道里程DK96+152处径向不耦合系数的合理取值范围,文章设计了K_d为1.6、1.7、1.8和1.9四种工况,见表1。通过动力分析有限元软件建立平面应变数值模型对不同工况进行模拟分析,对比模拟结果以得到铜川隧道里程DK96+152处的最优光爆参数。

表1 设计工况

Tab. 1 Design working condition

工况	径向不耦合系数K_d	炮孔间距L/m
工况1	1.6	0.58
工况2	1.7	0.50
工况3	1.8	0.38
工况4	1.9	0.34

岩样取用铜川隧道施工现场围岩,选用岩石RHT模型并按照PAN等[19]提供的岩石RHT参数确定方法来确定岩样参数,具体参数见表2。空气选用NULL材料模型,空气密度为1.29 g/cm^3;炸药选用HIGH_EXPLOSIVE_BURN高爆轰模型,具体参数见表3。岩石单元采用Lagrange算法,空气和炸药单元采用ALE算法,以流固耦合方式建模,模型四周设置透射边界来模拟岩石无限域。

表2 岩石RHT模型材料参数

Tab. 2 Material parameters of the rock RHT model

参数名称	取值	参数名称	取值
密度RO/(g/cm^3)	2.67	孔隙度指数NP	3.0
初始孔隙度$ALPHA$	1.0	参考压缩应变率EOC	3×10^{-5}
粉碎压力PEL/MPa	40.0	参考拉伸应变率EOT	3×10^{-6}
压实压力PCO/GPa	21.0	断裂压缩应变率EC	3×10^{25}
Hugoniot多项式系数A_1	25.7	断裂拉伸应变率ET	3×10^{26}
Hugoniot多项式系数A_2	37.8	压缩应变率相关指数$BETAC$	0.03

续表 2

参数名称	取值	参数名称	取值
Hugoniot 多项式系数 A_3	21.3	拉伸应变率相关指数 $BETAT$	0.01
EOS 多项式参数 B_0	1.22	拉伸体积塑性应变分数 PTF	0.001
EOS 多项式参数 B_1	1.22	压缩屈服面参数 GC*	0.53
EOS 多项式参数 T_1 /GPa	25.7	拉伸屈服面参数 GT*	0.7
EOS 多项式参数 T_2	0	侵蚀塑性应变 $EPSF$	2.0
弹性剪切模量 $SHEAR$ /GPa	23.0	剪切模量折减系数 XI	0.5
抗压强度 FC /MPa	96.5	损伤参数 D_1	0.04
相对抗拉强度 FT*	0.04	损伤参数 D_2	1.0
相对抗剪强度 FS*	0.21	最低损伤残余应变 EPM	0.015
失效面参数 A	2.44	残余面参数 AF	0.25
失效面参数 N	0.76	残余面参数 NF	0.61
洛德角相关因子 Q_0	0.68	Gruneisen gamma $GAMMA$	0
洛德角相关因子 B	0.05		

表 3　炸药材料参数

Tab. 3　Explosive material parameters

密度 ρ /g•cm^{-3}	爆速 v_D /cm•μs^{-1}	爆轰压力 P_{CJ} /GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	初始内能 E /GPa
1.32	0.53	2.92	246.1	10.5	7.2	2.4	0.07	4.2

2.2　结果分析

四种工况下孔间岩石破裂情况如图 1 所示，从图中可以看到，四种工况的孔间岩石在爆破荷载作用下均呈现贯穿效果，但各工况围岩损伤有所不同，围岩损伤大致随着径向不耦合系数 K_d 增大而减小。

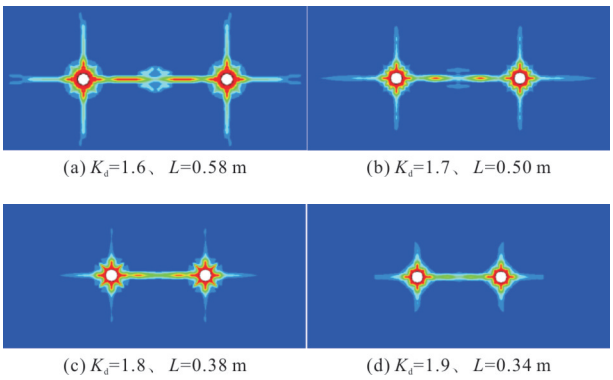


图 1　不同工况下孔间岩石破裂情况

Fig. 1　Rock fracture between holes under different working conditions

为验证文章提出的径向不耦合系数 K_d 计算方法的合理性，绘制了孔间连线中点的应力时程曲线（正值为拉应力），如图 2 所示。从图中可以看到，四种工况测点的环向应力均达到了其动态抗拉强度，其中工况一测点最大环向应力与其抗拉强度相差较大，工况二、工况三和工况四测点最大环向应力均略微大于其抗拉强度，孔间岩石能够开裂贯通，这表明根据径向不耦合系数 K_d 计算得出的炮孔间距 L 是合理的。

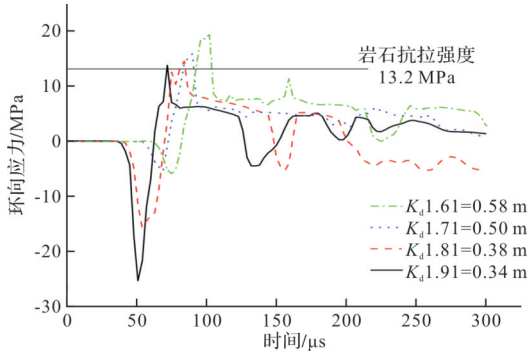


图 2　不同工况下孔间连线中点应力时程曲线

Fig. 2　The time history curve of the stress at the midpoint of the connection between the holes under different working conditions

从图 3 所示的各工况围岩损伤情况中可以看到，四种工况的围岩粉碎区宽度分别为 5.6、4.4、5.1 cm 和 3.9 cm，围岩粉碎范围较小，这也表明理论计算方法能够有效避免围岩过度粉碎。根据水工行业规范[18]，以损伤变量 D=0.2 为围岩爆破损伤临界值，当 D>0.2 时，围岩出现粉碎并产生裂隙；当 D>0.28 时，爆破荷载产生的围岩损伤会影响开挖质量。因此文章以 D=0.2 确定围岩最大裂隙长度，以 D=0.28 作为影响开挖质量的围岩损伤范围。

工况一最大裂隙长度(22.4 cm)及围岩损伤范围(17.5 cm),相较于其他三种工况,工况一爆破效果较差。工况二的最大裂隙长度(13.5 cm)大于工况三(9.5 cm)和工况四(9.6 cm),而工况二围岩损伤范围(8.6 cm)与工况三(7.6 cm)和工况四(7.6 cm)相差不大,但工况三和工况四的炮孔间距小于工况二,考虑实际情况,炮孔间距减小则炮孔数量和药量会增加,这增大了经济成本和时间成本。综合上述分析,考虑围岩损伤和施工成本两方面,以工况二作为铜川隧道里程DK96+152处的光爆参数效果最优。

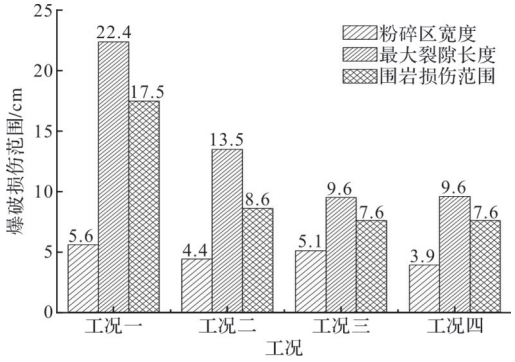


图 3 不同工况下围岩损伤情况

Fig. 3 Peripheral rock damage under different working conditions

3 工程应用

3.1 模拟开挖

铜川隧道横截面为马蹄形,开挖半径7.1 m,开挖高度12 m,循环进尺2.5 m,采用光面爆破和台阶法进行开挖。本文以铜川隧道上台阶开挖为研究对象,对爆破开挖过程进行数值模拟。

根据现场地质条件和实际开挖情况建立相应的数值模型,数值模型在长、宽、高三个方向上的尺寸分别为20、4.5 m和12 m,数值模型共包含591 850个六面体单元,如图4所示。为了降低网格尺寸对计算结果的影响并提高运算效率,炮孔附近网格单元尺寸设置为1 cm,模型边界网格单元尺寸设置为10 cm,采用流固耦合算法防止爆炸过程中岩石单元产生畸变。模型四周设置无反射边界以避免反射应力波对计算结果产生影响,掌子面设置为自由面来模拟临空面。

图5为光爆参数优化后(K_d取1.7,L取0.5 m)的数值模拟结果,从爆破损伤云图可以看到,围岩损伤程度较低,周边孔间岩石产生贯通裂隙,光面爆破效果较理想。

围岩损伤程度用不同颜色表示,从炮孔中心向外逐渐由红色转变为蓝色,损伤逐渐降低。为了将

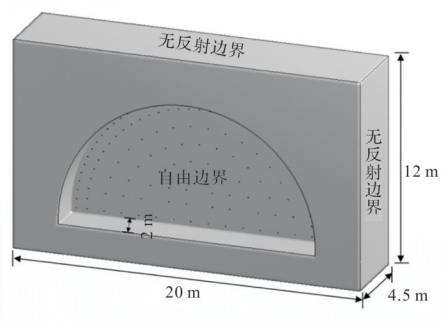


图 4 爆破开挖数值模型

Fig. 4 Numerical model of blasting excavation

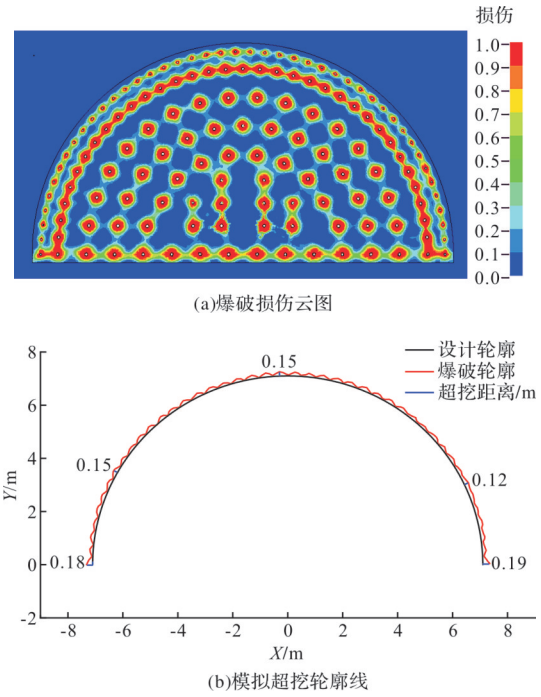


图 5 光爆参数优化后模拟结果

Fig. 5 Numerical simulation results after optimization

隧道超挖情况量化,使用图像处理软件对损伤值为0.2的轮廓线进行跟踪,如图5(b)所示,超挖位置分布均匀,超挖距离集中在0.15 m左右,测量所得超挖面积为2.53 m^2。

3.2 现场应用

图6(a)为铜川隧道里程DK96+002处原光面爆破方案上台阶周边眼布置情况,将优化后的光爆参数(K_d取1.7,L取0.5 m)应用于铜川隧道里程DK96+152处上台阶爆破开挖过程当中,优化后的周边孔布置情况如图6(b)所示。

在隧道现场使用隧道剖面仪测量光爆参数优化前断面DK96+002的超挖轮廓线,如图7(a)所示,从图中可以看到最大超挖距离0.42 m,测量所得超挖面积为4.94 m^2,光面爆破效果并不理想。使用隧道剖面仪测量光爆参数优化后断面DK96+152的超挖轮廓线,如图7(b)所示,最大超挖距离0.15 m,实测所得超挖面积2.12 m^2。现场实测超挖距离集

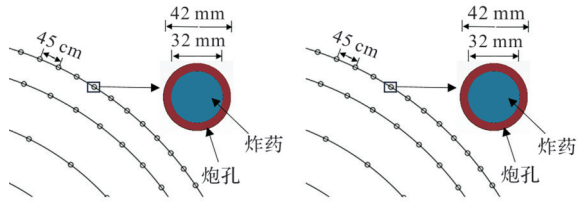


图 6　周边孔布置图

Fig. 6　Layout of peripheral holes

中在 0.14 m 左右，对比图 5(b)可知，实测结果与参数优化后的数值模拟结果相吻合，因此所建立的数值模型是有效的，适用于光面爆破研究。

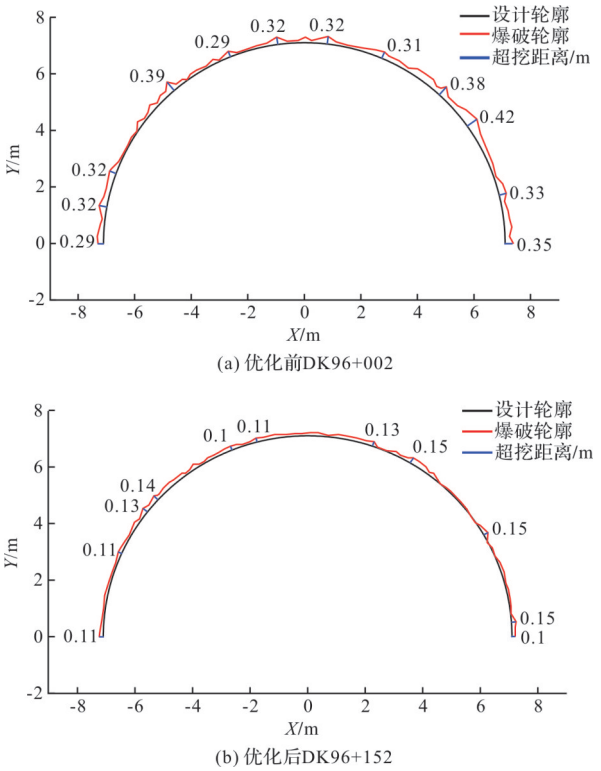


图 7　现场实测超挖轮廓线

Fig. 7　Measured over-excavation contours on site

从图 8 所示的铜川隧道里程 DK96＋152 现场光面爆破效果照片可以看到，光面爆破效果较理想。

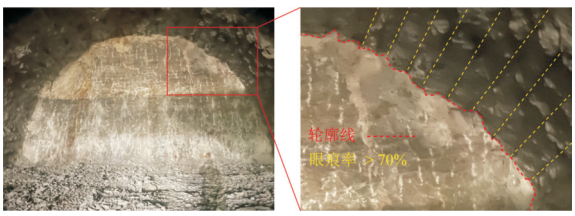


图 8　现场 DK96+152 光面爆破效果照片

Fig. 8　Site DK96+152 smooth blasting effect photo

光爆参数优化后的最大超挖距离相较于优化前下降了 0.27 m(64%)，实测超挖面积相较于优化前下降了 2.82 m²(57%)，单循环节省混凝土约 7 m³，优化后周边眼炮孔数量由 54 缩减为 44 个。周边孔优化前后经济效益对比见表 4。

表 4　周边孔优化前后经济效益对比

Tab. 4　Comparison of economic benefits before and after optimization of peripheral holes

项目	优化前数量	优化后数量	单价	节省金额/元
雷管	54 支	44 支	17 元/支	170
混凝土	4.95 m³	2.13 m³	500 元/m³	3 500
炸药	64.80 kg	31.68 kg	7 000 元/t	232
合计				3 902

据表 4 可知，周边孔优化后单循环节省投资约 3 902 元(单延米节省 1 560 元)，优化后的光面爆破方案大幅降低了经济成本；同时，优化后减少了 18.5%(10 个孔)周边孔的钻进工作及 2.82 m²的超挖回填工作，大幅降低了周边孔钻孔及初喷阶段工作时间。

4　结论与讨论

(1)基于孔间岩石破裂机理，从保证孔间岩石开裂贯通并避免孔周岩石粉碎角度，提出了基于 K_d 的光面爆破参数计算方法，得出铜川隧道里程 DK96＋152 处 K_d 合理取值范围。

(2)结合铜川隧道里程 DK96＋152 现场情况，建立了 K_d=1.6～1.9 四种工况下数值分析模型，综合考虑围岩损伤和施工成本，提出 K_d=1.7、L=0.5 m 时围岩爆破损伤较低且施工成本最优。

(3)将优化后的光爆参数应用于现场，实测最大超挖距离相较于优化前下降了 0.27 m(64%)，超挖面积相较于优化前下降了 2.82 m²(57%)，减少了 18.5%(10 个孔)周边孔的钻进工作，单延米节省成本约 1 560 元。

本文光爆参数优化基于工程现场典型断面的围岩条件开展，建模与分析过程中未考虑非均匀地应力场和节理面的影响，存在一定局限性。后续将通过建立非均匀地应力、软弱破碎带与爆破荷载的耦合模型，同时开展不同装药结构的光爆效果研究，分析其对爆破裂纹扩展、围岩损伤的影响机制，探究装药结构与不耦合系数的协同优化规律，构建多因素协同的光爆参数优化体系，进一步完善研究成果，为工程实践提供更全面的技术支撑。

参考文献 References

[1]　王继峰．岩石爆破技术的现状与发展[J]．煤矿爆破，2005(3)：25-28.
WANG Jifeng．The present situation and development of rock blasting technology [J]．Coal Mine Blasting，2005(3)：25-28.

[2]　田兴朝，陶铁军，娄乾星，等．白竹山隧道爆破超挖原因

分析与控制研究[J]. 工程爆破,2022,28(5):60-66.
TIAN Xingchao, TAO Tiejun, LOU Qianxing, et al. Cause analysis and control research on over excavation of Baizhushan tunnel by blasting [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(5): 60-66.

[3] 龙先林. 隧道爆破掘进超欠挖原因分析及控制措施[J]. 交通世界,2022(27):69-71.
LONG Xianlin. Analysis on causes and control measures of over-under excavation in tunnel blasting excavation [J]. Transpo World, 2022(27): 69-71.

[4] 郭建,李兵,刘桂勇,等. 钻爆法施工隧道超欠挖控制研究[J]. 工程爆破,2021,27(1):79-84.
GUO Jian, LI Bing, LIU Guiyong, et al. Study on control of backbreak and underbreak in tunnel excavation by drilling and-blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 79-84.

[5] 马芹永. 光面爆破炮眼间距及光面层厚度的确定[J]. 岩石力学与工程学报,1997,16(6):590-594.
MA Qinyong. Definition of hole-space and burden in smooth blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(6): 590-594.

[6] FENG Xiaomei, ZHUANG, Jinzhao, JU Jinsan, et al. Smooth blasting hole spacing and smooth surface layer depth optimization [J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(8): 2703-2707.

[7] 汪海波,贾虎,徐颖,等. 基于爆破损伤的强制放顶爆破参数设计与应用[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(5):45-50.
WANG Haibo, JIA Hu, XU Ying, et al. Design and application of blasting parameters in forced caving based on blasting damage [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(5): 45-50.

[8] 叶志伟,陈明,李桐,等. 小不耦合系数装药爆破孔壁压力峰值计算方法[J]. 爆炸与冲击,2021,41(6):119-129.
YE Zhiwei, CHEN Ming, LI Tong, et al. A calculation method of the peak pressure on borehole wall for low decoupling coefficient charge blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(6): 119-129.

[9] 李芳涛,胡志平,陈南南,等. 爆破荷载作用下隧道围岩裂隙范围计算方法研究[J]. 振动与冲击,2022,41(8),260-269.
LI Fangtao, HU Zhiping, CHEN Nannan, et al. A study of fracture range of tunnel surrounding rock under blasting [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(8): 260-269.

[10] ZHAO Jianjian, ZHANG Yong, RANJITH P G. Numerical simulation of blasting-induced fracture expansion in coal masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: 28-39.

[11] 费鸿禄,郭玉新. 基于LS-DYNA的交错扇形深孔崩落法排间间隔时间优化研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(4):127-137.
FEI Honglu, GUO Yuxin. Study on optimized selection for row interval time of staggered sector deep-hole caving method based on LS-DYNA [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2022, 18(4): 127-137.

[12] 杨仁树,王越,林志博. 煤矿岩巷爆破掘进炮孔密度优化研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(1):183-191.
YANG Renshu, WANG Yue, LIN Zhibo. Optimization of blasting hole density in rock roadway driving [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 183-191.

[13] UENISHI K, YAMACHI H, YAMAGAMI K, et al. Dynamic fragmentation of concrete using electric discharge impulses [J]. Construction and Building Materials, 2014, 67(Part B): 170-179.

[14] 陈啸林,彭磊. 爆破参数对预裂爆破裂纹扩展规律的影响研究[J]. 有色金属(矿山部分),2023,75(4):97-106.
CHEN Xiaolin, PENG Lei. Influence of blasting parameters on the crack propagation law of presplitting blasting [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(4): 97-106.

[15] 李卓,刘浩杉,黄永辉,等. 基于岩石爆破损伤的合理炮孔参数研究[J]. 有色金属工程,2022,12(4):100-108.
LI Zhuo, LIU Haoshan, HUANG Yonghui, et al. Study on optimization of blast hole arrangement under rock blasting damage [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(4): 100-108.

[16] 刘国强,刘彬,张庆明,等. 岩溶隧道光面爆破参数优化及其应用研究[J]. 隧道建设(中英文),2021,41(S2):50-57.
LIU Guoqiang, LIU Bin, ZHANG Qingming, et al. Parameter optimization of smooth blast in Karst Tunnel and its application [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(S2): 50-57.

[17] 王凯飞,张昌锁,郝兵元,等. 高地力环境下聚能爆破动、静作用对岩石内裂纹起裂与扩展机理研究[J]. 煤炭科学技术,2023,51(S1):50-64.
WANG Kaifei, ZHANG Changsuo, HAO Bingyuan, et al. Study on initiation and propagation mechanism of internal cracks caused by dynamic and static action of shaped charge blasting under in-situ stress [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(S1): 50-64.

[18] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范:DL/T 5389—2007[S]. 北京:中国电力出版社,2009.
National Development and Reform Commission. Construction technical specifications on rock-foundation excavating engineering of hydraulic structures: DL/T 5389—2007 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.

[19] PAN Cheng, XIE Lixiang, LI Xing, et al. Numerical investigation of effect of eccentric decoupled charge structure on blasting-induced rock damage[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 663-679.

(编辑 吴海西)