

# 不耦合系数对光面爆破的影响分析

魏振国<sup>1</sup>, 黄智勇<sup>2</sup>, 杨军强<sup>1</sup>, 李战江<sup>2</sup>, 祝 贺<sup>1</sup>, 朱 玺<sup>2</sup>

(1. 中铁七局集团第三工程有限公司, 陕西 西安 710032; 2. 西成铁路客运专线陕西  
有限责任公司, 陕西 西安 710016)

[摘要] 为探究不耦合系数对光面爆破效果的影响,结合秦岭九天山隧道工程,采用 ANSYS/LS-DYNA 与 LSPrepost 软件,对炮孔间距 450mm、空气间隔 600mm 条件下,不耦合系数分别为 1.14、1.25、1.43、1.67 和 2.00 的爆破过程进行数值模拟,分析其有效应力变化与岩石损伤演化规律。研究表明:有效应力峰值及平均值均随不耦合系数的增大而减小,呈反比关系;当炸药直径为 28mm、不耦合系数为 1.43 时,爆破效果最佳,还可有效控制爆破成本。

[关键词] 隧道;光面爆破;不耦合系数;数值模拟

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0033-07

## Analysis of Effect of Decoupling Coefficient on Smooth-surface Blasting

WEI Zhenguo<sup>1</sup>, HUANG Zhiyong<sup>2</sup>, YANG Junqiang<sup>1</sup>, LI Zhanjiang<sup>2</sup>, ZHU He<sup>1</sup>, ZHU Xi<sup>2</sup>

(1. China Railway Seventh Group Co., Ltd. Third Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China;

2. Xi'an-Chengdu Railway Passenger Dedicated Line Shaanxi Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

**Abstract:** To investigate the influence of the decoupling coefficient on the effectiveness of smooth-surface blasting, the Qinling Jiutian Mountain Tunnel project was utilized. Employing ANSYS/LS-DYNA and LSPrepost software, simulations were conducted for blasting processes with decoupling coefficients of 1.14, 1.25, 1.43, 1.67, 2.00. The analysis examined changes in effective stress and the evolution of rock damage. Results indicate that both peak and average effective stress decrease inversely with increasing decoupling coefficient. Optimal blasting performance was achieved with a 28mm explosive diameter and a decoupling coefficient of 1.43, while also effectively controlling blasting costs.

**Keywords:** tunnels; smooth-surface blasting; decoupling coefficient; simulation

## 0 引言

在岩土工程或爆破工程中,光面爆破通常是指爆破面是平滑而不是复杂不规则的。不耦合系数为炮孔直径与炸药直径的比值,不耦合系数决定了光面爆破对孔壁的损伤大小,尤其是周边孔爆破对岩壁的影响。在爆破作业耦合装药情况下,冲击应力波直接作用在孔壁上,环向拉应力迅速增大,导致裂隙发展过快,对孔壁区域爆破面及轮廓线处的岩体损伤程度较大,因此不耦合装药较适用于周边孔的爆破。杨国梁等<sup>[1]</sup>通过对比应变曲线,发现径向不耦合系数为 1.5 时可显著提高炸药能量利用,

能延长爆生气体作用时间,裂隙区能充分扩展,爆破效果最好。潘祖瑛等<sup>[2]</sup>通过三维倾斜摄影技术建立三维模型,对孔网参数优化前后的爆破效果进行了评价,孔网参数优化后,半壁孔率提升 27.09%。董源等<sup>[3]</sup>采用 LS-DYNA 程序对轴向不耦合系数进行数值研究,揭示了轴向不耦合系数对爆破效果的影响。黄永辉等<sup>[4-5]</sup>采用理论分析结合模型试验获得了不同不耦合系数条件下的抛掷动能值,研究表明,在一定范围内选取较大的不耦合系数可以减小扩腔能耗。田栩帆等<sup>[6]</sup>采用有机玻璃板介质模拟岩石材料,利用透射式动态焦散线试验系统,研究了切缝药包径向空气不耦合装药爆破下的孔周裂纹扩展和损伤演化规律。梁瑞等<sup>[7]</sup>基于 RHT 动态响应力学关系,采用 ANSYS/LS-

DYNA 软件研究了偏心不耦合装药条件下不耦合系数对岩体爆破荷载的影响,以及爆破过程中岩体的损伤情况。成琮等<sup>[8]</sup>为了探究偏心不耦合爆破岩石的最优不耦合系数,建立 6 组单孔二维 ANSYS/LS-DYNA 模型,分析 PK 本构岩石在偏心不耦合爆破荷载作用下的损伤效应。楼晓明等<sup>[9]</sup>研究了孔内爆炸冲击波在各介质面的冲击压力,获得了径向不耦合装药条件下孔壁初始冲击压力的计算表达式,模拟了径向不耦合装药时冲击波的作用过程。孙博闻等<sup>[10]</sup>基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件,开展了预应力、不耦合装药系数及起爆方式耦合作用下爆破效果的数值研究,并通过炮孔内壁峰值压力的监测分析了药包的破岩能力。贾进章等<sup>[11]</sup>采用 LS-DYNA 软件对不耦合装药结构下 CO<sub>2</sub> 的致裂效果进行数值模拟,分别得到了不同径向不耦合系数下的损伤分布云图、孔壁压力时程曲线、峰值速度分布,采用 Logistic 函数对损伤分布进行描述。陈诗伟等<sup>[12]</sup>通过室外混凝土模型爆破试验,探究了孔壁峰值冲击压力与空气间隔轴向不耦合系数的内在联系。基于上述研究,基于秦岭九天山隧道光面爆破工程,采用 ANSYS/LS-DYNA 软件结合现场工程实际研究不耦合系数对能量传递和破碎效果的影响,以达到最优的爆破效果。

## 1 工程概况

秦岭九天山隧道位于陕西省商洛市柞水县境内,设计时速为 350km/h,线间距为 5m,隧道正线起讫里程 DK65+149.000—DK78+442.000,全长 13 293m,隧道最大埋深约 1 200m。Ⅱ级围岩长 5 445m,Ⅲ级围岩长 5 240m,Ⅳ级围岩长 2 165m,Ⅴ级围岩长 443m。2 个辅助斜井总长 4 731m,其中Ⅱ级围岩长 1 130m,Ⅲ级围岩长 2 196m,Ⅳ级围岩长 509m,Ⅴ级围岩长 1 405m。隧道采用复合式衬砌,初期支护采用喷锚支护。隧道设计为双线单洞,设 2 座斜井辅助正洞施工,如图 1 所示。



图 1 秦岭九天山隧道

Fig. 1 Qinling Jiutianshan tunnel

## 2 理论计算

在光面爆破中,炮孔孔壁在爆炸过程中受到爆轰气体的能量冲击,所受到的冲击压力直接影响炮

孔附近区域岩石的破碎情况,而孔壁初始冲击压力与不耦合系数密切相关,爆破专家针对 2 种装药结构提出 3 种计算方法。

1) 在研究耦合装药结构的孔壁初始冲击压力时,一般采用弹性波理论对其进行计算<sup>[13-14]</sup>,计算公式如下:

$$P_d = \frac{\rho_e D_e^2}{\gamma + 1} \cdot \frac{2\rho_m C_p}{\rho_m C_p + \rho_e D_e} \quad (1)$$

式中:  $P_d$  为孔壁初始冲击压力(Pa);  $\rho_m$  为岩石密度(kg/m<sup>3</sup>);  $C_p$  为岩石弹性波速(m/s);  $\rho_m C_p$  是岩石的波阻抗;  $\rho_e$  为炸药密度(kg/m<sup>3</sup>);  $D_e$  为炸药爆速(m/s);  $\rho_e D_e$  为炸药的波阻抗;  $\gamma$  为绝热指数,是熵值为常数时的压力-体积曲线的斜率,其值与炸药密度等自身性质有关,通常取  $\gamma=3$ 。

2) 在传统的不耦合系数装药爆破孔壁压力峰值计算时,确定冲击波碰撞压力增大倍数  $n$  有难度,导致计算结果与实际差距较大,因此本文在不耦合系数 $<1.5$ 时采用叶志伟等<sup>[15]</sup>提出的小不耦合系数装药爆破孔壁压力峰值计算方法:

$$P_r = n' P_w (d_e/d_b) \quad (2)$$

$$P_w = (\rho_e D^2)/2(\gamma + 1) \quad (3)$$

式中:  $P_r$  为孔壁压力峰值;  $P_w$  为平均爆轰压力;  $d_e$  为装药直径;  $d_b$  为炮孔直径;  $d_e/d_b$  为装药不耦合系数的倒数;  $\rho_e$  为炸药密度;  $D$  为炸药爆速;  $\gamma$  为绝热指数,通常取  $\gamma=3$ ;  $n'$  为优化过的放大系数。

3) 在耦合系数 $>1.5$ 时采用陈明等<sup>[16]</sup>提出的计算方法:

$$P_r = (P_w/P_k)^{k/\gamma} P_k (d_e/d_b)^{2\gamma n' l_s} \quad (4)$$

式中:  $P_k$  为炸药的临界压力,一般中等威力炸药取 200MPa;  $k$  为绝热指数,取 1.3;  $l_s$  为装药长度与炮孔药室长度的比值。

秦岭九天山隧道岩体多为花岗岩,岩石密度为 2.721g/cm<sup>3</sup>,炸药密度为 1.245g/cm<sup>3</sup>,炸药爆速为 3 500m/s,炸药长度取 30cm,炮孔药室无炸药区域采用堵塞材料填充,考虑堵塞材料与孔壁间的高摩擦阻力,近似取  $l_s=1$ ,将上述数据代入式(1)中可得耦合装药下的孔壁初始压力为 5.78GPa。采用式(2),(3)计算得出,当不耦合系数取 1.14, 1.25, 1.43, 1.61 和 2.00 时,孔壁压力峰值分别为 4.86, 4.02, 2.92, 1.78, 0.53GPa。

不耦合装药结构计算得到的孔壁冲击压力峰值比耦合装药的小,主要原因是耦合装药爆破时,炸药产生的高温高压气体和冲击应力波对孔壁周围的空气间隙进行挤压,挤压过程中部分爆轰能量被缓冲,最后作用于孔壁岩石,并通过孔壁裂隙

区向周边区域透射。相比于耦合装药,不耦合装药冲击应力波在传播过程中发生衰减,有效作用力的峰值在一定范围内下降,从而使孔壁周围岩石形成较为完整的破碎面;而且孔壁周边的空气圆环降低了爆炸应力波的传播速度,高压气体对岩石的挤压时间增加,提升了两者间的破坏效率,改善了岩壁爆破效果。因此,秦岭九天山隧道爆破采取不耦合装药结构更合适。

3 数值模拟

3.1 建立模型

为了减轻计算机模拟的工作负载,取周边眼双孔作为计算模型,单位制采用  $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 。根据九天山隧道的钻眼情况,炮孔直径取 40mm,且默认掏槽眼和辅助眼的爆破已经完成。光爆层厚约 55cm。每个炮孔沿轴线方向布置 2 段炸药,采用空气间隔装药。隧道开挖宽度和高度分别为 13.72,10.39m,断面面积为 124.64 $\text{m}^2$ ,考虑到计算机的计算效率问题,主要对周边眼进行研究,所以整个模型长 $\times$ 宽 $\times$ 高为 200cm $\times$ 200cm $\times$ 100cm,除自由面外,其他面均为无反射边界。模型定义岩体、空气、炸药、炮泥材料模型,不耦合装药结构如图 2 所示,红色段为炸药,炸药之间的棕色段为间隔空气,蓝色段为炸药与炮孔之间的空气介质,堵塞材料长度取 40cm,炸药长度取 30cm。考虑爆破时产生的巨大能量会使单一算法的网格发生大幅度的不规则变形,影响模拟效率,因此选用复杂动力爆破荷载的流固耦合算法定义结构单元和网格属性之间的联系。在划分网格时,爆破岩石为固体,空气、堵塞及炸药为流体,结合在一起后实现整体区域的受力传导<sup>[17]</sup>。



图2 不耦合间隔装药  
Fig.2 Uncoupled spaced charge

3.2 划分网格

三维模型是在 ANSYS/LS-DYNA 中的 APDL 软件中建立的,APDL 划分网格较为便捷,确保每个 PART 单元都选取合适的划分方法。为了在后处理软件 LSPrePast 中更好地观察应力波的扩散过程及岩石的损伤发展情况,整体模型网格划分如图 3 所示,红色区域为围岩部分,绿色为空气和爆破岩石流固耦合区域。

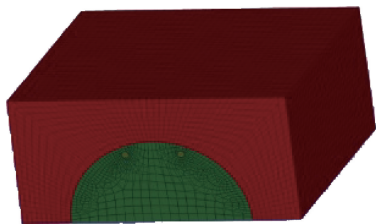


图3 模型网络  
Fig.3 Model grid

3.3 材料参数

本文隧道岩石材料采用 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 模型。HJC 模型是率相关的损伤型本构模型,能较好地分析材料在极端应变和高应变率环境下的动态行为<sup>[18]</sup>。

1) 岩石参数

岩石材料参数基于秦岭九天山勘察报告选取,具体如下:密度为 2.721 $\text{g/cm}^3$ ,抗压强度为 125.56MPa。模型强度参数包括:标准化内聚力强度为 0.44,标准化压力强度系数为 1.50,完整强度参数为 0.61,应变率敏感系数为 0.007,最大强度 SFMAX 为 17.0。压力与体积响应参数为:第一、第二、第三压力系数分别为 0.12, -1.97 和 5.37GPa;理想气体爆压为 0.001 4MPa,压碎体积应变为 0.005,压实点压力为 0.012GPa,压实点体积应变为 0.01。此外,剪切模量为 0.16GPa,弹性模量为 100GPa,断裂塑性应变参数  $D_1$  和  $D_2$  分别为 0.04 和 1,材料破碎的最小塑性应变 EFMIN 为 0.01,最大抗拉强度为 45MPa。

2) 炸药材料模型

选用 2 号岩石乳化炸药进行硬质围岩隧道光面爆破模拟,炸药密度为 1.245 $\text{g/cm}^3$ ,爆轰压力 PCJ 为 7.4GPa;单位体积内能  $E$  为 4.192GPa;材料常数  $A$  为 214.4GPa,  $B$  为 0.182GPa,  $R_1$  为 4.2GPa,  $R_2$  为 0.95GPa。

3) 空气材料模型

空气材料模型通过 LS-DYNA 中的编号 9 \* MAT\_NULL 来定义属性,并通过状态方程 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 加以描述。

4) 堵塞材料参数

堵塞材料与孔壁间的高摩擦阻力延长了爆轰能量在炮孔中的作用时间,使得炸药能够完全反应并防止过多的爆炸气体泄漏,从而提升了炸药的使用效率。隧道现场的炮孔一般采用炮泥作为堵塞材料,采用 \* MAT\_SOIL\_AND\_FOAM 模型,密度为 1.8 $\text{g/cm}^3$ ,弹性模量为 63.85MPa;常数  $A_0$  为 3.4 $\text{e}^{-8}$ ,  $A_1$  为 7.033 $\text{e}^{-2}$ ,  $A_2$  为 0.3,理想气体爆压为



$6.9\times10^{-3}\text{MPa}$ 。

3.4 无反射边界条件

在隧道爆破模型中,边界条件的设置可以直接影响模型中爆炸波的传播、结构响应及与周围环境的相互作用。通过适当设置边界条件,数值模拟可以更好地反映实际情况,提供更准确和可靠的结果。此模型在围岩周边设置无反射边界条件,主要是通过后处理软件 LSPrePost 中的 SET-SEGM 建立无反射界面,然后通过 k 文件管理中的 Boundary 命令建立无反射边界条件。爆破岩石区域与空气接触的工作面为自由面,称之为反射边界,模型边界设定情况如图 4 所示。

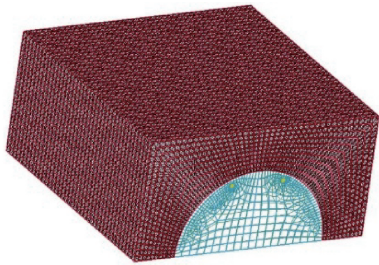


图 4 无反射边界设定

Fig. 4 No reflection boundary setting

4 岩石损伤分析

4.1 光爆参数

根据秦岭九天山隧道实际情况,针对不耦合系数进行设计,模型炮孔直径设置为 40mm,根据现有岩石乳化炸药型号均匀改变炸药直径,分别确定为 35,32,28,24,20mm,从而确定不耦合系数  $k$  分别为 1.14,1.25,1.43,1.67 以及 2.00。设定装药空气间隔为 600mm,炮孔间距为 450mm。

4.2 有效应力分析

为了更好地观察炮孔间的应力变化情况,沿  $y$  轴模型进行切割处理,爆破模拟结果如图 5 所示。在爆破初始阶段,即时间  $t=10\mu\text{s}$  时,高压气体首先沿药柱底端形成典型的锥形漏斗状应力集中区,该区域的应力分布梯度呈现轴对称特征。随着爆轰产物的持续膨胀,气体扩散主方向由底端轴向扩展逐渐转为径向三维扩展,导致应力波阵面形态发生明显改变。在此过程中,初始的锥形应力波前缘通过能量耗散与波形叠加作用,其传播模式逐步从定向传播转变为各向同性传播,最终在介质中形成典型的球面应力波,这种波形演化规律充分体现了爆轰能量由局部集中到空间扩散的传递特性。

由图 5 可知,爆炸产生的应力波由孔壁向周边传播,且 2 个炮孔径向和纵向间的应力波逐步叠加,使炮孔间的岩石受到的切向拉应力增大,加快了两

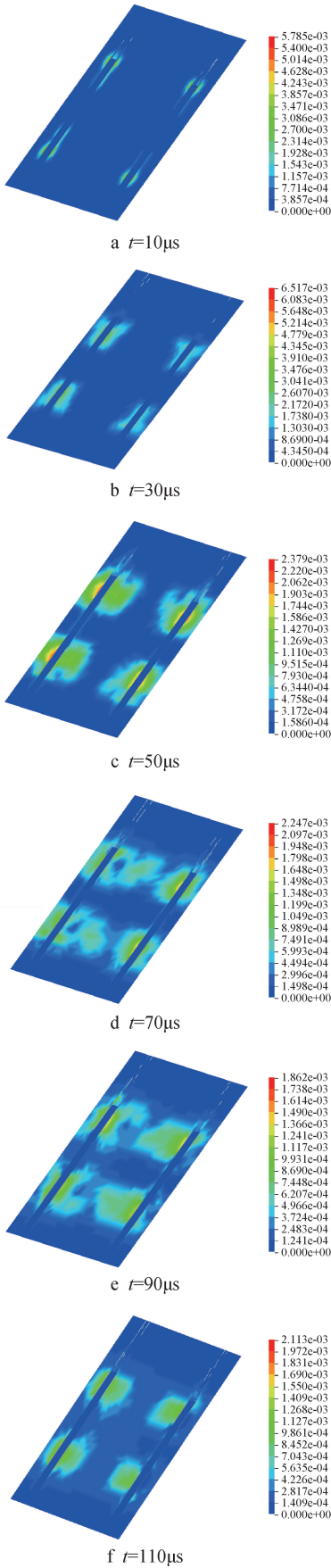


图 5 有效应力云图(单位:MPa)

Fig. 5 Cloud map of effective stress (unit:MPa)



炮孔间裂缝贯通的发展过程。4 段炸药的应力波沿炮孔  $x$  和  $y$  方向传播,逐渐叠加,最终作用于爆破岩石的中心区域。选取炮孔间纵深方向的观测单元研究其应力变化,如图 6 所示。

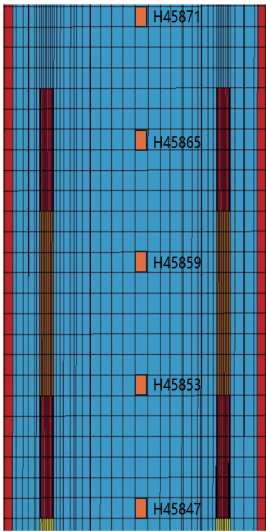


图 6 观测点位置  
Fig. 6 Observation point position

装药空气间隔为 600mm,炮孔间距为 450mm,不耦合系数为 1.14, 1.25, 1.43, 1.67, 2.00 时的有效应力曲线如图 7,8 所示。

根据以上三维计算模型处理后得到的观测单元的有效应力变化趋势大概一致,都是在爆破后  $100\mu\text{s}$  左右到达应力峰值,随后逐渐减弱,且在一定范围内浮动,说明爆炸能量在传播时遭遇衰减,能量被逐渐消耗。对每个观测单元的有效应力曲线进行对比分析,可以发现观测单元 45847 和 45865 的有效应力最大值比其他 3 个观测单元的峰值大很多,且两者差异不大。这主要是由于炸药首先作用于孔壁,此时孔壁处的应力最大,然后应力波沿径向和纵向传播,在纵向传播时,遇到间隔空气的缓冲作用,爆轰冲击波的作用时间增大,到达间隔空气段区域岩石的时候能量受到了抵消,所以观测单元 45853, 45859 和 45865 所受到的切向拉应力较小,因此最大有效应力也相应减小。这也印证了空气间隔装药在一定程度上能减小短时间内能量剧增对岩体的破碎程度,可以有效调节爆轰能量的分布,能让炸药能量得到均速稳定的释放,使炮孔孔壁受力更均匀,也使爆破后的碎石粒径分布更统一,在节约炸药消耗的情况下,达到最好的爆破效果。

观测单元的有效应力峰值如表 3 所示。由表 3 可知,当不耦合系数取 1.14~1.43 时,岩体能破碎

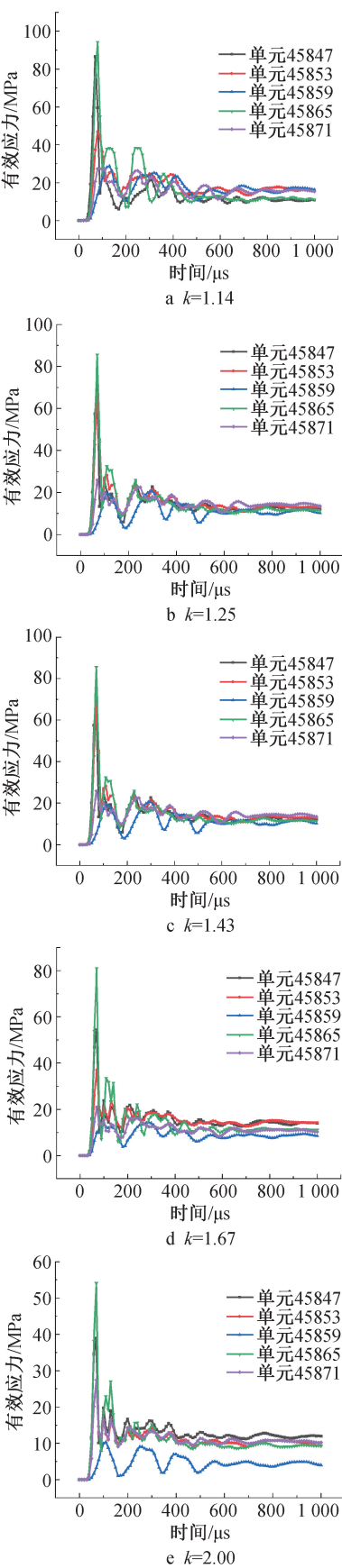


图 7 不同工况下的有效应力曲线  
Fig. 7 Effective stress curves under different working conditions

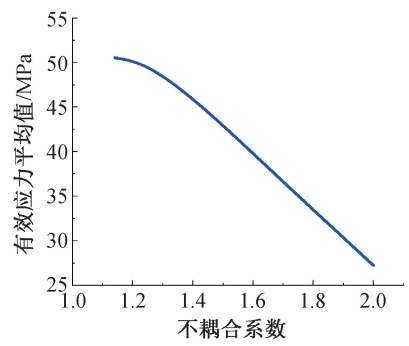


图 8 有效应力平均值随不耦合系数的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of the average effective stress with the decoupling coefficient

成缝,可达到预期效果,取 1.67~2.00 时,达不到预期效果。

表 3 观测单元有效应力峰值

| Table 3 Peak effective stress of observation unit |         |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
|   | MPa     |         |         |         |         |
| 项目  | 不耦合系数   |         |         |         |         |
|   | 1. 14   | 1. 25   | 1. 43   | 1. 67   | 2. 00   |
| 单元编号 45847  | 87. 969 | 78. 179 | 70. 702 | 56. 984 | 41. 366 |
| 单元编号 45853  | 48. 621 | 39. 647 | 25. 876 | 39. 081 | 13. 738 |
| 单元编号 45859  | 26. 060 | 21. 495 | 18. 552 | 13. 920 | 9. 241  |
| 单元编号 45865  | 23. 810 | 64. 099 | 65. 732 | 38. 039 | 25. 194 |
| 单元编号 45871  | 66. 314 | 46. 052 | 45. 262 | 39. 691 | 46. 670 |
| 有效应力平均值   | 50. 555 | 49. 894 | 45. 225 | 37. 543 | 27. 242 |

对炮孔间距为 450mm、空气间隔为 600mm、不耦合系数为 1.14,1.25,1.43,1.67,2.00 的条件下,不耦合系数取 1.14~m,m 属于 1.43~1.67 区间某个临界值时,岩体能破碎成缝,可以达到预期效果,取 m~2.00 时,不能达到预期效果。

4.3 岩石损伤分析

由于篇幅较长,故只罗列出不耦合系数在 1.43 时模型的损伤随时间的演化情况,如图 9 所示。

由图 9 可知,在炸药爆破初始阶段,即在  $t=30\mu\text{s}$  时,爆炸损伤云图在纵向上呈锥形分布,在径向上呈圆形分布,炸药爆炸产生的能量使炮孔壁附近的岩体产生破坏,破坏主要集中在装药段附近,且能量由炸药中心沿炮孔轴向两端传递扩散。在爆破  $60\mu\text{s}$  时,炮孔岩壁附近的岩体形成裂隙区,沿轴线方向逐渐贯通发展,且能量传递更加均匀,能量以椭球面的圆柱波形式向四周延伸,并逐渐衰减。在  $t=60\sim90\mu\text{s}$  时,孔壁处的岩壁彻底破碎,纵向上形成贯穿的裂隙,并形成压碎区,且能量波逐渐沿径向方向冲击。在  $t=120\mu\text{s}$  时,岩体在爆轰气体和应力波的作用下,损伤持续积累,随后爆炸气体的膨胀做功,初始裂缝进一步发育,最终形成连续贯通的光爆面,这主要依靠两炮孔间的应力波和

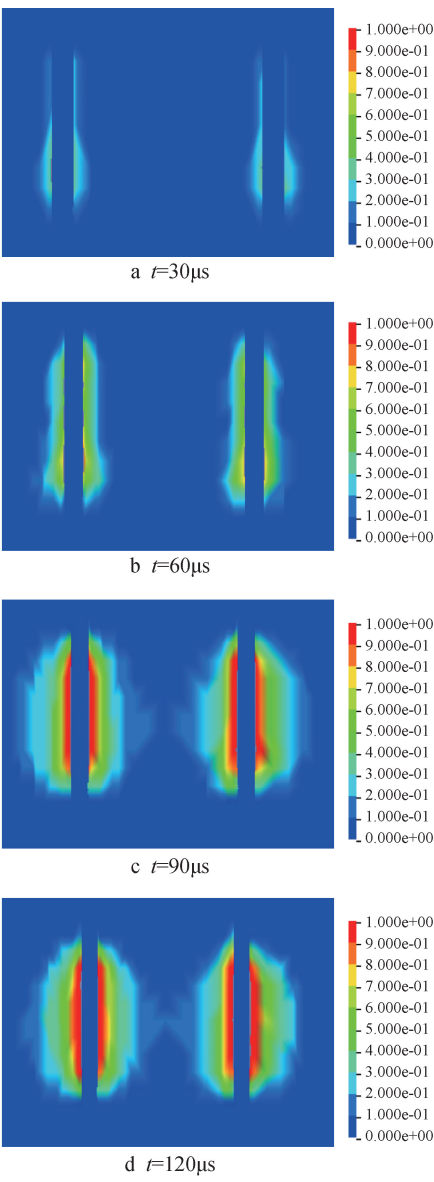


图 9 不耦合系数为 1.43 损伤随时间的演化情况(单位:MPa)

Fig. 9 Damage evolution over time at decoupling coefficient of 1.43( unit:MPa)

冲击波的叠加破坏作用。

5 现场试验结果

采用优化后的方案后,爆炸冲击荷载对轮廓线周边岩体的破碎程度良好,形成的断面轮廓线更加平滑美观,提升了围岩的整体支护稳定性能,超欠挖现象发生较少,减少了二次衬砌喷射混凝土的用量,提高了整体的经济效益。现场施工效果如图 10 所示。

6 结语

1)在同等炮孔间距、空气间隔和炮孔直径下,通过调整炸药直径控制不耦合系数,随着不耦合系数增大,有效应力峰值持续减小,有效应力与不耦合系数成反比。

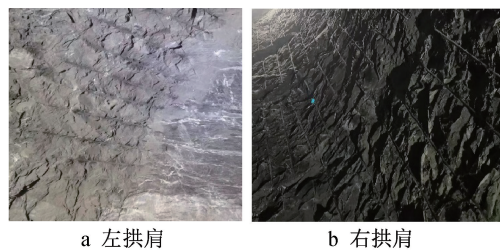


图 10 光面爆破效果

Fig. 10 Effect of smooth-surface blasting

2) 光面爆破施工过程中,不耦合系数取值对岩石破碎效果有着至关重要的作用。在秦岭九天山隧道工程中,炮孔间距为 450mm、空气间隔为 600mm 工况下,炮孔直径为 40mm、炸药直径为 28mm、不耦合系数在 1.43 时光面爆破效果最优,也可降低爆破成本。

参考文献:

[ 1 ] 杨国梁,邹泽华,张赫,等. 径向不耦合装药爆破下页岩的动态应变分布及损伤分形特征[J]. 爆破, 2024, 41 ( 3 ) : 26-32,42.  
YANG G L, ZOU Z H, ZHANG H, et al. Dynamic strain distribution and damage fractal characteristics of shale under radial uncoupled charge blasting[J]. Blasting, 2024, 41 ( 3 ) : 26-32,42.

[ 2 ] 潘祖瑛,张西良,仪海豹,等. 离心不耦合条件下寒区碎软岩体预裂爆破参数优化方法[J]. 金属矿山, 2024 ( 9 ) : 161-166.  
PAN Z Y, ZHANG X L, YI H B, et al. Optimization method for pre-splitting blasting parameters of fractured soft rock mass in cold regions under centrifugal decoupling conditions[J]. Metal mine, 2024 ( 9 ) : 161-166.

[ 3 ] 董源,何艳飞,马晨阳,等. 不耦合空气间隔装药结构爆破机理分析[J]. 长江技术经济, 2024, 8 ( 4 ) : 104-112.  
DONG Y, HE Y F, MA C Y, et al. Blasting mechanism of uncoupled air interval charge structure [J]. Technology and economy of Changjiang, 2024, 8 ( 4 ) : 104-112.

[ 4 ] 黄永辉,秦丽绚,徐锐,等. 工程爆破扩腔能耗随不耦合系数的变化规律[J]. 兵工学报, 2025, 46 ( 3 ) : 236-244.  
HUANG Y H, QIN L X, XU R, et al. Variation law of energy consumption of engineering blasting cavity expansion with decoupling coefficient [J]. Acta armamentarii, 2025, 46 ( 3 ) : 236-244.

[ 5 ] 黄永辉,阮迅,雷振,等. 装药不耦合系数对台阶爆破破碎块体抛掷运动规律影响研究[J]. 工程科学与技术, 2025, 57 ( 2 ) : 223-233.  
HUANG Y H, RUAN X, LEI Z, et al. Influence of charge uncoupling coefficient on the throwing movement of broken blocks in bench blasting[J]. Advanced engineering sciences, 2025, 57 ( 2 ) : 223-233.

[ 6 ] 田帆帆,王正雄,陈浩,等. 不耦合系数对切缝药包爆生裂纹扩展及分形特征的影响[J]. 有色金属工程, 2024, 14 ( 7 ) : 130-137,162.

TIAN X F, WANG Z X, CHEN H, et al. Effect of uncoupling coefficient on the expansion and fractal characteristics of bursting cracks of slit packs[J]. Nonferrous metals engineering, 2024, 14 ( 7 ) : 130-137,162.

[ 7 ] 梁瑞,曹晓睿,周文海,等. 不耦合装药系数对岩体爆破损伤的影响[J]. 黄金科学技术, 2024, 32 ( 2 ) : 306-317.  
LIANG R, CAO X R, ZHOU W H, et al. Effect of uncoupled charge coefficients on rock blast damage[J]. Gold science and technology, 2024, 32 ( 2 ) : 306-317.

[ 8 ] 成琼,张延年,屈林永,等. 偏心不耦合系数对爆破裂隙影响的数值模拟[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49 ( 2 ) : 259-268.  
CHENG Q, ZHANG Y N, QU L Y, et al. Numerical simulation of the effect of eccentric decoupling coefficient on blasting crack [J]. Journal of Guangxi University ( natural science edition ), 2024, 49 ( 2 ) : 259-268.

[ 9 ] 楼晓明,武硕,姚炳金,等. 径向不耦合装药孔壁冲击压力特性[J]. 金属矿山, 2024 ( 4 ) : 28-36.  
LOU X M, WU S, YAO B J, et al. Impact pressure characteristics of radial uncoupled charge on hole wall [J]. Metal mine, 2024 ( 4 ) : 28-36.

[ 10 ] 孙博闻,郭建,李斌,等. 预应力条件下不耦合装药系数对爆轰聚能效果的数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2024, 24 ( 10 ) : 4048-4055.  
SUN B W, GUO J, LI B, et al. Numerical simulation of the effect of decoupling coefficient on concentrated energy blasting under prestressed conditions [J]. Science technology and engineering, 2024, 24 ( 10 ) : 4048-4055.

[ 11 ] 贾进章,邢迎欢,李斌,等. 不耦合系数对 CO<sub>2</sub> 相变致裂影响数值模拟及研究[J]. 工程爆破, 2023, 29 ( 6 ) : 110-121.  
JIA J Z, XING Y H, LI B, et al. Numerical simulation and experimental study on the effect of uncoupling coefficient on CO<sub>2</sub> phase change cracking [J]. Engineering blasting, 2023, 29 ( 6 ) : 110-121.

[ 12 ] 陈诗伟,郭文康,卢韦,等. 轴向不耦合空气间隔装药孔壁冲击压力模型试验研究[J]. 福建建设科技, 2023 ( 3 ) : 57-59,98.  
CHEN S W, GUO W K, LU W, et al. Axial uncoupled air spacer charge hole wall impact pressure model test study [J]. Fujian construction science & technology, 2023 ( 3 ) : 57-59,98.

[ 13 ] 楼晓明,王振昌,陈必港,等. 空气间隔装药孔壁初始冲击压力分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42 ( 11 ) : 2875-2884.  
LOU X M, WANG Z C, CHEN B G, et al. Initial shock pressure analysis for hole wall with air-decked charge [J]. Journal of China coal society, 2017, 42 ( 11 ) : 2875-2884.

[ 14 ] 杨国梁,杨仁树,姜琳琳. 轴向间隔装药爆破沿炮孔的压力分布[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32 ( 6 ) : 653-657.  
YANG G L, YANG R S, JIANG L L. Pressure distribution along borehole with axial air-deck charge blasting [J]. Explosion and shock waves, 2012, 32 ( 6 ) : 653-657.

[ 15 ] 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.



分别为 0.96,0.91,表明减水剂掺量与流动性有较  
强的相关性,最佳掺量为 4kg/m<sup>3</sup>。

3)胶凝材料配合比对 UHPC 具有较大影响,适  
量矿物掺合料替代水泥,随着掺量增加,对 UHPC  
力学性能、流动性能均有利。胶凝材料的最佳配合  
比为水泥:矿粉:粉煤灰=400:60:40kg/m<sup>3</sup>。

参考文献:

[ 1 ] 黎维良. 超高性能混凝土材料在桥梁工程中的应用[J]. 合成材料老化与应用,2023,52(1):147-149.  
LI W L. Application of super performance concrete materials in bridge engineering[J]. Synthetic materials aging and application, 2023,52(1):147-149.

[ 2 ] 蒋欣,汤大洋,胡所亭,等. 超高性能混凝土在国内外桥梁工程中的应用[J]. 铁道建筑,2021,61(12):1-7.  
JIANG X,TANG D Y,HU S T,et al. Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering all over the world [J]. Railway engineering,2021,61(12):1-7.

[ 3 ] 杜杰贵,王雄锋,陈波,等. 纤维混杂超高性能混凝土流动性与抗压强度研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(15):73-78.  
DU J G,WANG X F,CHEN B,et al. Study on flowability and compressive strength of hybrid fiber reinforced ultra-high performance concrete [J]. Construction technology, 2023, 52(15):73-78.

[ 4 ] 肖广生,徐英喧,罗玉龙,等. 基于普通混凝土预制构件生产线改造生产粗骨料 UHPC 桥面板的应用[J]. 施工技术(中英文),2024,53(4):63-66,120.  
XIAO G S,XU Y X,LUO Y L,et al. Application of coarse aggregate UHPC bridge deck retrofit production based on ordinary concrete prefabricated component production line [J]. Construction technology,2024,53(4):63-66,120.

[ 5 ] 胡翔翔,梁兴文,李东阳,等. 超高性能混凝土配合比设计及其受拉性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(3):39-46.  
HU A X,LIANG X W,LI D Y,et al. Mix design method and uniaxial tensile characteristics of ultra-high performance concrete [J]. Journal of Hunan University ( natural sciences ),2018,45(3):39-46.

[ 6 ] 杜永超,徐海宾,雷余鹏,等. 低掺量钢纤维对 UHPC 性能的影响[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版),2022,32(3):21-24.  
DU Y C,XU H B,LEI Y P,et al. Effect of steel fiber on UHPC performance at low content [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology ( natural science edition ),2022,32(3):21-24.

[ 7 ] 张海蛟,李扬,赵宇翔. 普通聚羧酸减水剂在超高性能混凝土中的应用研究[J]. 新型建筑材料,2023,50(12):131-134.  
ZHANG H J, LI Y, ZHAO Y X. Application of common polycarboxylic acid water reducing agent in ultra-high performance concrete [J]. New building materials, 2023, 50(12):131-134.

[ 8 ] 周尚猛,王伟. 超高性能混凝土铺装体系在钢桥面中的应用[J]. 桥梁建设,2019,49(S1):20-25.  
ZHOU S M, WANG W. Application of ultra-high performance concrete pavement system to steel bridge deck [J]. Bridge construction,2019,49(S1):20-25.

[ 9 ] 卫煜,陈平,明阳,等. 超细高活性矿物掺合料对 UHPC 水化和收缩性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2022,41(2):461-468.  
WEI Y, CHEN P, MING Y, et al. Effect of ultra-fine high-activity mineral admixtures on the hydration and shrinkage properties of ultra-high performance concrete ( UHPC ) [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2022, 41(2): 461-468.

(上接第 39 页)

YE Z W,CHEN M,LI T,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.

[16] 陈明,刘涛,叶志伟,等. 轮廓爆破孔壁压力峰值计算方法[J]. 爆炸与冲击,2019,39(6):103-112.  
CHEN M,LIU T, YE Z W, et al. Calculation methods for peak pressure on borehole wall of contour blasting[J]. Explosion and shock waves,2019,39(6):103-112.

[17] 蒋宝峰. 小断面隧道掘进高效钻爆工艺与周边控制技术研究

[J]. 施工技术(中英文),2025,54(13):125-130.  
JIANG B F. Efficient drilling and blasting technology and surrounding control technology for small section tunnel excavation [J]. Construction technology,2025,54(13):125-130.

[18] 方秦,孔祥振,吴昊,等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学,2014,31(3):197-204.  
FANG Q,KONG X Z,WU H,et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook consitiutive model parameters of rock [J]. Engineering mechanics,2014,31(3):197-204.