

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.06.008

避免山岭隧道爆破超挖与欠挖的优化方法及应用*

汪家甫

中铁十五局集团有限公司(湖北荆门,448000)

[摘要] 针对襄阳-荆门高速铁路徐高岭隧道施工过程中出现的超、欠挖问题,采用三维数值模拟方法研究了爆破方案中最小抵抗线、辅助眼间距及周边眼间距等对爆破施工质量的影响规律。在原爆破参数优化分析的基础上,基于最小化平均线性超、欠挖量,确定了优化后的爆破参数。通过三维激光扫描技术对优化爆破参数后的施工质量进行了综合评价。结果表明:当最小抵抗线从60 cm增加到75 cm时,平均线性超挖减少了约63.6%;当周边眼间距从40 cm增加到55 cm时,平均线性超挖减少了约77.8%;当辅助眼间距从90 cm增加到105 cm时,平均线性超挖仅减少了20.0%。采用优化后的爆破参数进行施工,三维激光扫描所得平均线性超挖与欠挖分别控制在8 cm与4 cm之内。爆破方法优化后,开挖与设计轮廓线吻合良好,实现了爆破施工质量的有效控制;现场爆破施工质量良好,避免了大面积的超、欠挖问题。

[关键词] 铁路隧道;爆破;超挖与欠挖;最小抵抗线;辅助眼;周边眼

[分类号] U455

Optimization Methods and Application for Over Excavation and Under Excavation Control in Mountain Tunnel Blasting

WANG Jiafu

China Railway Fifteenth Bureau Group Co., Ltd. (Hubei Jingmen, 448000)

[ABSTRACT] In response to the problems of over excavation and under excavation during the construction of Xugaoling Tunnel on Xiangyang-Jingmen high-speed railway, 3D numerical simulation technology was used to explore the impact of the minimum resistance line, auxiliary hole, and perimeter hole spacing on the quality of blasting construction in the blasting plan. Based on the optimization analysis of the original blasting parameters, the optimized blasting parameters were determined by minimizing the average linear over excavation and under excavation. Subsequently, a comprehensive evaluation of the construction quality using optimized blasting parameters was conducted through 3D laser scanning technology. The results indicate that when the minimum resistance line increases from 60 cm to 75 cm, the amount of over excavation decreases by about 63.6%. When the perimeter hole spacing increases from 40 cm to 55 cm, the amount of over excavation decreases by about 77.8%. When the auxiliary hole spacing increases from 90 cm to 105 cm, the amount of over excavation only decreases by 20.0%. Using optimized blasting parameters for construction, the average linear over excavation and under excavation obtained from 3D laser scanning are controlled within 8 cm and 4 cm, respectively. The excavation and design contour lines match well, achieving effective control of the quality of blasting construction. The optimized on-site blasting construction quality is excellent, avoiding the problem of large-scale over excavation and under excavation.

[KEYWORDS] railway tunnel; blasting; over excavation and under excavation; minimum resistance line; auxiliary hole; perimeter hole

0 引言

钻爆法因适用性强、灵活性大、可靠性高以及经

济实用等优点而被广泛应用于交通隧道、水工隧道、矿山巷道以及市政隧道等工程中,同时也是目前我国铁路隧道建设最常用的施工方法之一。当前,我国已经成为世界上利用钻爆法建造铁路隧道数量最

* 收稿日期:2023-12-28

基金项目:中铁十五局集团有限公司科技研发项目(2023C7)

第一作者:汪家甫(1986—),男,高级工程师,主要从事高速铁路隧道钻爆法智能建造关键技术研究。E-mail:316335334@qq.com

多、总里程最长的国家^[1-2]。因此,通过合理设计爆破参数来保证隧道施工质量、加快施工进度具有重要的工程意义。

为此,诸多学者与技术人员采用数值模拟、理论分析以及试验等手段对爆破参数进行优化,进而提高施工质量。陈玉等^[3]借助数值模拟软件,研究了微差、孔间距、装药量及孔径对爆破轮廓成型效果的影响规律;基于光面爆破评价标准,选出了最优爆破方案,并在现场获得了良好的成型效果。周杰^[4]借助有限元软件进行仿真模拟,计算分析了不同装药结构和炮孔间隔对围岩爆破效果的影响。结果表明:优化装药结构和炮孔间隔可以显著改善爆破效果,有效减少超挖及欠挖量。Zou等^[5]研究了周边孔距、最小抵抗线、装药浓度、岩体类型、爆速、钻孔角度以及装药形式等对光面爆破质量的影响规律,将超断面面积与超断面距离作为观测参数,在确定各因素的灵敏度基础上,得出岩体类型对爆破质量影响最大的结论,为光面爆破参数设计提供了参考。田兴朝等^[6]理论计算了在空气不耦合装药条件下的粉碎区和裂隙区半径,并分析了周边孔布设参数对隧道爆破超挖的影响规律,提出控制周边孔布设参数是减少隧道爆破超挖的有效方法。Tian等^[7]通过地应力和节理的综合影响理论,推导出爆炸应力波的衰减公式,并进行了现场爆破试验验证。结果显示:所提衰减公式能准确预测应力波的峰值,优化周边孔距计算和孔网布置后,有效控制了超挖量,为减少隧道爆破超、欠挖提供了实际参考。郝广伟等^[8]进行了现场不同循环进尺下的隧道掘进爆破试验,对比分析了超、欠挖与围岩成型效果。结果表明:循环进尺越小,隧道围岩超挖越小,爆破成型越好。宿利平等^[9]以平均半孔率、平均炮孔利用率、粉尘浓度降低率等作为爆破效果衡量指标,进行正交试验,确定了水封光面爆破中较优的装药结构参数;优化后的水封光面爆破技术在提高爆破效率的同时,还表现出了显著的爆破效果。

然而,隧道爆破效果受多因素影响,相关参数变异性较大,作用机理复杂,尚未建立系统、全面的分析方法。现有爆破参数优化研究成果中的最小抵抗线、周边眼间距、辅助孔间距等关键参数难以直接应用到具体隧道工程实践中。直接套用这些研究成果存在很大的不确定性,可能会降低爆破效率或造成材料浪费。

为此,依托襄阳-荆门高速铁路(简称襄荆高铁)徐高岭隧道工程,通过三维数值模拟手段探究了辅助眼间距、周边眼间距以及最小抵抗线等对爆破质

量的影响规律;对原爆破参数进行优化;最后,通过三维激光扫描技术对优化参数后的爆破质量进行了定量评价。可为后续类似工程施工提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

襄荆高铁是一条湖北省内连接襄阳市与荆门市的重要铁路,也是八纵八横中呼南通道的重要组成部分。徐高岭隧道为襄荆高铁的控制性工程之一,坐落于荆门市东宝区境内,采用典型的单洞双线设计方案。隧道起止里程 DK100+242.92~DK102+567.0,总长 2.32 km,开挖断面 151.0 m²,净空断面 144.0 m²,最大埋深 221.02 m,属于典型的埋深特长大断面隧道。隧址区地形以低山为主,中间高而两侧低。洞身穿越爆破试验段主要为瘤状灰岩,IV级围岩。对瘤状灰岩进行一系列测试,得到:密度 $\rho_0 = 2\ 600\ \text{kg/m}^3$,抗压强度 $f_c = 154\ \text{MPa}$,抗拉强度 $T = 6.3\ \text{MPa}$,弹性模量 $E = 66\ \text{GPa}$,泊松比 $\nu = 0.15$,孔隙率 $q = 1.2\%$ 。

1.2 爆破设计

爆破试验段采用两台阶施工法,通过分部爆破循环方式来快速回拓断面,单次爆破循环进尺为 2.0 m。上台阶爆破布置如图 1 所示。其中,最小抵抗线为 65.0 cm,周边眼间距为 45.0 cm,辅助眼间距为 100.0 cm。周边眼与辅助眼采用空气间隔装药方式,其他炮孔采用底部连续装药。所有炮孔均为反向爆破,炸药为乳化炸药,装药量等参数如表 1 所示。

1.3 爆破效果分析

根据原爆破设计方案进行施工后,隧道轮廓出现了不同程度的超挖现象,如图 2 所示。其中,隧道左侧拱肩平均超挖达 20.0 cm,右侧拱肩平均超挖为 25.0 cm,两侧拱脚超挖为 15.0~20.0 cm。对原爆破设计方案进行分析发现,导致隧道超挖现象严重的原因是:

1) 最小抵抗线距离偏小。由于靠近爆破中心,抵抗线附近的岩石容易受到过强的爆破冲击而破坏严重。

2) 周边眼间距与辅助眼间距较小,容易导致相邻炮孔之间的爆破覆盖面积过大,从而引起破坏范围过分扩展,产生超挖现象。

为此,需要对原爆破方案中最小抵抗线、周边眼间距及辅助眼间距等进行优化,以期能够减少爆破导致的超挖现象,进而提高爆破施工的质量与效率。

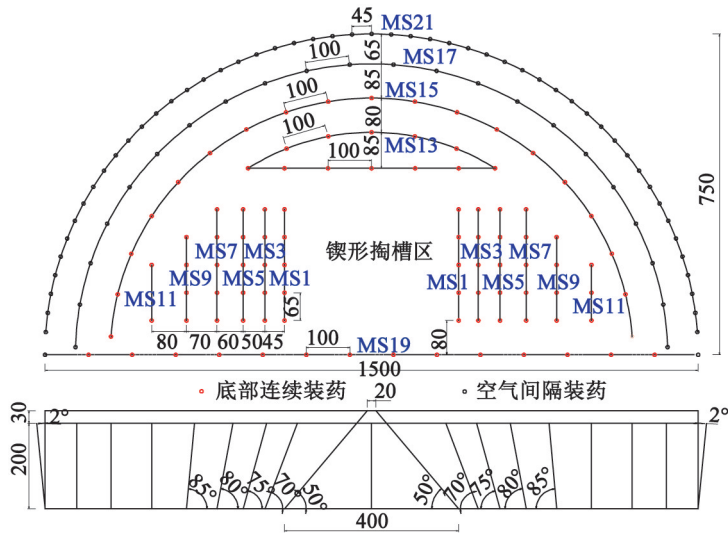


图 1 炮孔布置(单位:cm)
Fig. 1 Borehole layout (Unit:cm)

表 1 原始爆破参数

Tab. 1 Original blasting parameters

炮孔名称	炮孔个数	孔深/ m	装药量/ kg	总药量/ kg
掏槽眼	66	2.3	1.5	99.0
辅助眼	41	2.0	0.9	36.9
底板眼	14	2.0	1.2	14.8
周边眼	53	2.0	0.3	15.9
合计	174			166.6

2 基于 HJC 的爆破方案的数值模拟

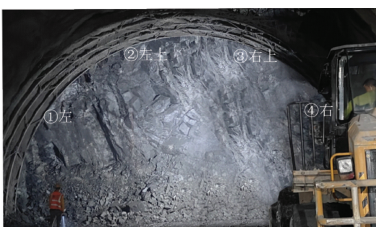
2.1 模型的构建

采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件来构建三维数值模型,如图 3(a)所示。模型尺寸为 20.0 m × 16.0 m × 15.0 m,隧道直径为 15.0 m。数值模型边界条件如图 3(b)所示。对边界施加严格的位移约束,即左、右边界约束 X 向位移,上、下边界约束 Y 向位移,前、后边界约束 Z 向位移,并采用无反射边界条件消除边界反射波的影响。根据隧道原爆破方案设置炮孔,如图 3(c)所示。其中,岩石区域的单元最小尺寸为 0.5 m,爆破区域为 0.1 m,共计 120 万个单元。数值模拟过程中,忽略爆轰产物的温度效应与气动穿透现象。

为了准确捕捉爆破载荷作用下围岩的动力响应,将双重网格技术与多物质耦合算法相结合。即围岩区域采用拉格朗日单元及算法,来实现围岩大变形时动力响应的准确模拟;空气与炸药区域采用拉格朗日-欧拉单元,来充分模拟气体流动与爆炸传播过程。此外,不同介质之间的耦合采用多物质算法来保证围岩与爆破之间的相互作用,从而考虑岩石与爆炸间的相互作用。

2.2 模型参数的确定

HJC(Holmquist-Johnson-Cook)动力损伤本构模型通过引入损伤参数来描述围岩微裂纹的产生、发展以及聚合对围岩强度的影响^[10],故 HJC 本构模型能够描述围岩从弹性到破坏阶段的完整力学行为。



(a) 全貌



(b) 左



(c) 左上



(d) 右上



(e) 右

图 2 施工现场的爆破超、欠挖情况

Fig. 2 Over excavation and under excavation in blasting at the construction site

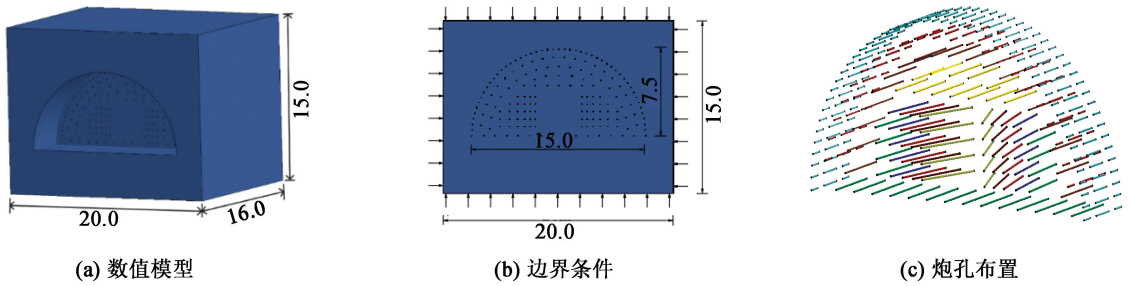


图3 三维隧道爆破模型(单位: m)

Fig.3 3D model of tunnel blasting (Unit: m)

相比 Mohr-Coulomb 模型等传统的本构模型, HJC 本构模型还可以准确预测围岩在高应变率冲击载荷下的裂隙演化规律与破坏模式。采用 HJC 本构模型对围岩爆破质量进行数值分析的有效性与准确性已经获得验证^[11-14]。为此, 采用 HJC 本构模型^[15]来描述隧道围岩的力学响应机制。

HJC 本构模型的力学参数主要包括强度参数、损伤参数、硬化参数以及失效应变等, 这些参数分别控制围岩的初始强度、硬化行为、裂纹演变对强度的影响及最终破坏的应变^[16]。结合现场测试结果与经验参考值, 最终确定了适合本工程的 HJC 本构模型力学参数, 见表 2。这些参数能够全面地反映工程中围岩的抗压与抗拉性能、裂纹演化特性以及大变形的硬化行为等, 从而进一步保证了数值模拟的准确性。

炸药选择高强爆炸模型。该模型主要通过炸药密度、爆速以及爆压等参数来控制炸药的爆炸特性。

选择与工程现场相同的乳化炸药, 药卷直径为 32 mm, 密度为 1 200 kg/m³, 爆速为 3 200 m/s, 采用 JW(L) (Jones-Wilkins-Lee) 状态方程来描述爆炸过程中压力与体积之间的转换关系。炸药材料参数如表 3 所示。

爆破冲击波在空气区域以声速传播的形式进行。在声速传播过程中, 冲击波会对岩石区域产生动态加载, 进而破坏岩石。此外, 空气区域中气体流动的自由表面效应也会直接影响爆破冲击波在空气中的膨胀传播模式。因此, 空气区域中气动力学性质的准确模拟对数值模拟结果影响显著。为此, 参考相关文献^[17], 采用空气密度为 1.29 kg/m³ 的理想气体模型, 空气材料参数见表 4。表 4 中: C_0 为声速传播特性参数; $C_1 \sim C_6$ 为非线性压力-体积关系经验参数; E_0 为内能。

2.3 数值模拟方案的确定

采用 Box-Behnken 响应面试验设计方法进行爆

表 2 HJC 本构模型参数

Tab.2 Parameters of HJC constitutive model

密度 $\rho/$ ($g \cdot cm^{-3}$)	剪切模量 G/Pa	归一化 内聚强 度 A	归一化 压力硬 度系数 B	应变率 系数 C	压力硬化 系数 N	准静态抗 压强度 F_c/Pa	准静态最大 拉伸强度 T/Pa	参考应 变率 ϵ_0/s^{-1}	压碎塑性 应变 ϵ_f/min	归一化最 大强度 S_{max}
2.6	12.5×10^9	0.55	1.23	0.001 86	0.79	1.54×10^8	6.3×10^6	1×10^{-4}	0.01	5
压碎体 积应力 p_c/Pa	压碎体 积应变 U_c	压实体 积压力 p_l/Pa	压实体 积应变 U_l	损伤 系数 d_1	损伤 系数 d_2	压力 系数 k_1	压力 系数 k_2	压力 系数 k_3	失效 应变 F_s	
5.1×10^7	0.001 62	1.2×10^9	0.012	0.04	1.0	0.12	0.25	0.42	0.01	

表 3 炸药材料参数

Tab.3 Material parameters of the explosive

密度 $\rho/$ ($kg \cdot m^{-3}$)	爆速 $D/$ ($m \cdot s^{-1}$)	气体压强系数 A/GPa	压强衰减系数 B/GPa	气体膨胀性能 参数 R_1	气体膨胀性能 参数 R_2	无量纲热 容比 ω	初始能量 E_0/GPa
1 200	3 200	276	0.233	5.25	1.6	0.28	8.56

表 4 空气材料参数

Tab.4 Material parameters of air

C_0	C_1	C_2	C_3
0	0	0	0
C_4	C_5	C_6	E_0/GPa
0.4	0.4	0	0.025

破参数优化的数值模拟方案规划^[18]。首先,在每个因素高、中、低 3 个水平进行设计试验;然后,系统考察各因素水平组合下的响应情况。数值模拟最小抵抗线、周边眼间距与辅助眼间距 3 个因素,主要进行敏感性分析,各个因素各设置 4 个水平,构建了 16 组数值模拟方案,见表 5。

表 5 数值模拟方案

Tab.5 Numerical schemes

方案	最小抵抗线	周边眼间距	辅助眼间距
1 [#]	65	45	100
2 [#]	65	55	90
3 [#]	75	50	105
4 [#]	70	40	105
5 [#]	70	45	100
6 [#]	75	50	90
7 [#]	65	40	105
8 [#]	60	55	95
9 [#]	70	45	90
10 [#]	75	40	95
11 [#]	60	50	90
12 [#]	65	45	95
13 [#]	75	40	100
14 [#]	70	55	95
15 [#]	60	50	105
16 [#]	60	55	100

2.4 数值模拟结果分析

2.4.1 爆破动态围岩损伤

爆破后,隧道围岩损伤的动态演化过程可以较

好地反映围岩破坏范围的时域演变规律。方案 6[#] 的爆破过程如图 4 所示。随着爆破时间的推移,围岩损伤经历了起始破碎期、破碎扩展期、破坏生成期和爆破覆盖期。在起始破碎期,如图 4(a) 300 μs 时,掏槽眼爆破产生的冲击波与高温、高压气体迅速破碎周边岩石,并初步形成损伤度较高的破碎区域;在破碎扩展期,如图 4(b) 600 μs 时,炮孔间的围岩区域已经基本破碎贯通,高损伤区逐渐向外扩展;在破坏生成期,如图 4(c) 900 μs 时,外围炮孔爆破产生的振动压力进一步导致岩石裂纹的扩展,破坏了岩石完整性,从而形成了较大的破坏区;在爆破覆盖期,如图 4(d) 1 200 μs 时,破坏区域不断增大,进而覆盖了整个预定的爆破区域。这一过程为围岩在爆破载荷下的连续动态破坏过程,可为预测和控制岩石爆破破坏范围提供参考。

2.4.2 爆破效果对比

选择 8 组代表性的数值模拟结果进行分析,如图 5 所示。对比 8 组数据可知:

1) 最小抵抗线远离爆破中心时,隧道轮廓的超挖区域呈减少趋势。当最小抵抗线从 65 cm 增加到 70 cm,超挖区域由最初轮廓的 50% 减少到约 30%。当最小抵抗线达到 75 cm 时,爆破区域的岩石破碎不充分,产生欠挖现象。主要原因是最小抵抗线间距过大,会导致岩石遭受爆破冲击过弱而引起欠挖。

2) 周边眼间距增大,超挖区域由最初轮廓的 60% 减小到约 30%。当周边眼间距从 45 cm 增加到 50 cm 时,有助于减少超挖现象。当周边眼间距达到 55 cm 时,因为应力波叠加后无法形成贯通裂缝,导致爆破作用区域范围内的岩石无法完全破碎,最终造成欠挖现象;由于周边眼间距过大,各周边眼产生的应力波在岩石中传播时难以有效叠加,形成足够大的应力场,从而无法在预期作用范围内形成贯通裂缝,导致部分岩石无法完全开裂破碎,最终出现欠挖的情况。

3) 辅助眼间距增大时,因爆破加载覆盖面的减少,超挖程度相应降低。当辅助眼间距从 90 cm 增

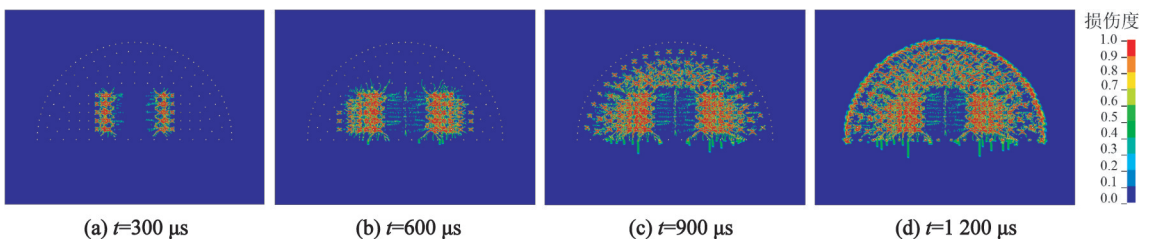


图 4 围岩损伤云图

Fig.4 Damage cloud map of the perimeter rock

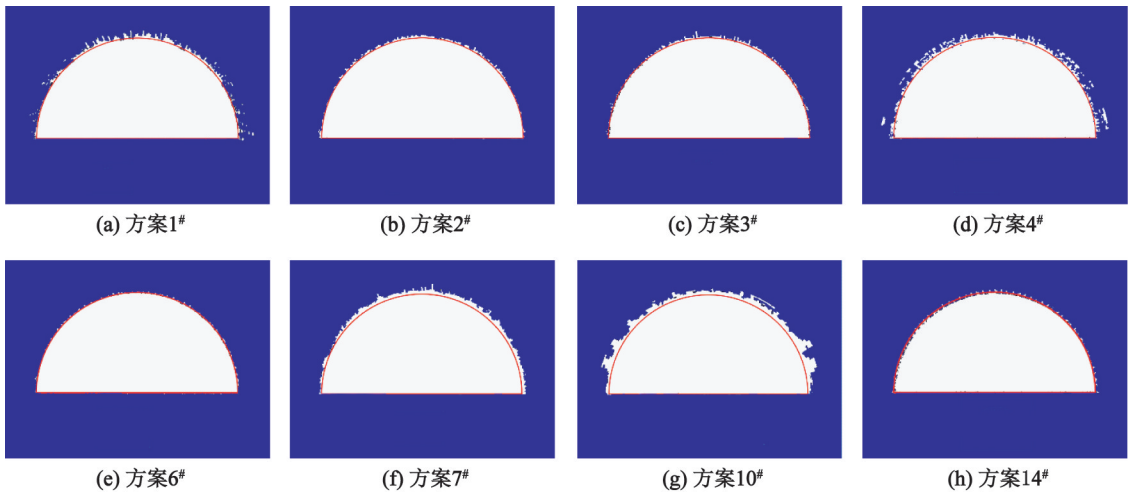


图 5 各方案下的爆破效果
Fig. 5 Blasting outcomes of each program

加到 100 cm 时,超挖区域从轮廓的 25% 略微减小到约 20%。当辅助眼间距超过 100 cm 后,临近辅助眼之间的爆破破坏效应无法实现有效叠加和贯通,会导致岩石剥离不畅,造成隧道轮廓线出现不连续、分段式的超挖或欠挖缺陷。

对比分析发现,相比原爆破方案(方案 1[#]),方案 6[#]爆破后的岩石破碎更为均匀,隧道开挖轮廓线与设计断面吻合度较高;同时,也没有出现原爆破方案中的超挖现象;在保证岩石有效破碎的前提下,还实现了爆破范围与强度的有效控制。

2.4.3 围岩主拉应力

为了进一步评估不同爆破参数对围岩损伤的影响,提取上述 8 种方案中设计轮廓线拱顶附近元素的峰值主拉应力,结果如图 6 所示。可知,通过增加最小抵抗线的长度、周边眼间距和辅助眼间距,设计轮廓线附近元素的峰值主拉应力逐渐减小。这表明,调整这些参数,可以有效地减少围岩的损伤程度。例如,当小抵抗线从 65 cm 增加到 70 cm 时,围

岩峰值主拉应力从 11 MPa 降低到 8 MPa;当周边眼间距从 45 cm 增加到 55 cm 时,围岩峰值主拉应力从 15 MPa 降低到 10 MPa;当辅助眼间距从 90 cm 增加到 105 cm 时,围岩峰值主拉应力从 8 MPa 降低到 6 MPa。综上分析,方案 6[#]中最小抵抗线为 75 cm、辅助孔间距 90 cm 以及周边孔间距 50 cm 时,围岩的损伤相对最小。

2.4.4 围岩线性超挖

8 组数值模拟方案爆破后的平均线性超、欠挖情况如图 7 所示。可知,当最小抵抗线距离从 60 cm 增加到 75 cm 时,平均线性超挖从 11 cm 降低到 4 cm,减少了约 63.6%;当周边眼间距从 40 cm 增加到 55 cm 时,平均线性超挖从 18 cm 降低到 4 cm,减少了约 77.8%;当辅助眼间距从 90 cm 增加到 105 cm 时,平均线性超挖只从 5 cm 降低到 4 cm,仅减少约 20.0%。3 个变量对平均线性超挖的影响由大到小为:周边眼间距、最小抵抗线距离、辅助眼间距。根据平均线性超挖控制指标,方案 6[#]的最小,为 8

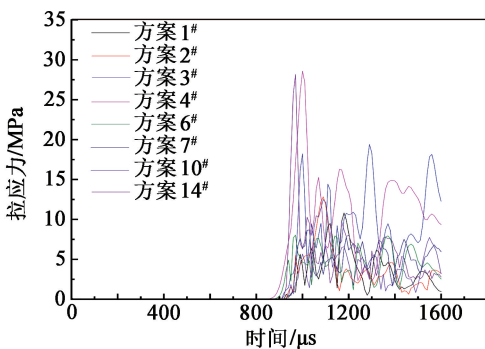


图 6 各方案的拉应力变化曲线

Fig. 6 Tensile stress variation curves of each program

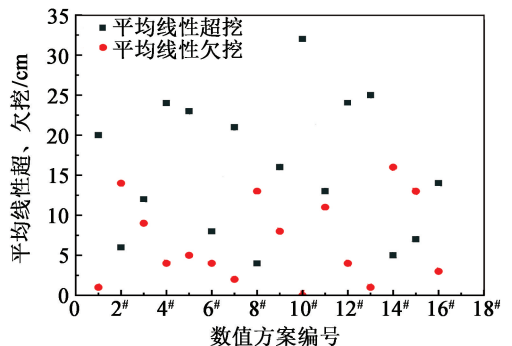


图 7 各方案平均线性超、欠挖

Fig. 7 Average linear over excavation and under excavation of each scheme

cm,满足工程规范要求^[19]。因此,后续施工过程中推荐采用方案 6#的爆破参数,即周边眼间距 50 cm、辅助眼间距 90 cm、最小抵抗线 75 cm,以期改善爆破质量。

确定方案 6#中的参数组合为优化后的爆破参数。为验证所确定爆破参数的优化效果,进行现场爆破施工,并利用三维激光扫描技术评价爆破质量。

3 爆破参数优化分析

3.1 爆破质量优化结果

经过多轮循环爆破施工作业后,采用三维激光扫描技术获取隧道掌子面爆破后的点云数据,结果如图 8 所示。从图 8 可知,采用优化爆破参数进行施工后,隧道掌子面轮廓平整、光滑,没有出现崩塌或过度碎石的情况。隧道爆破区域控制在工程允许误差范围内,最大超挖不超过 15 cm。实际开挖与设计轮廓线基本吻合,基本实现了爆破施工质量的有效控制,避免了大面积超、欠挖现象的发生,保证了施工进度。

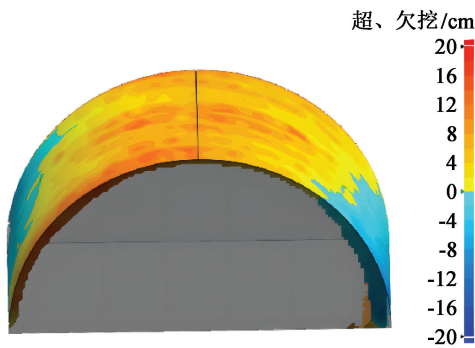


图 8 点云数据云图

Fig. 8 Cloud map of point cloud data

3.2 爆破质量结果分析

进一步对三维点云数据进行处理,进而分析不同断面位置的爆破质量。通过纵向间隔 2 m 来进行层状切片,共获得 4 个不同轴向距离的二维断面点云,如图 9 所示。可知,采用优化的爆破参数施工后,掌子面轮廓的平均线性超挖为 8.0 cm,与三维数值模拟结果基本吻合^[20]。然而,在轴距 2 m 处,隧道左侧出现 10 cm 的超挖,右侧出现 15 cm 的欠挖。主要原因是右侧为硅质岩,抗压强度为 25 MPa;左侧为砂岩,抗压强度为 10 MPa,左、右两侧岩性和抗压强度不同。在轴距 4 m 处,左侧顶部局部区域出现约 20 cm 的超挖,原因是该区域为粉砂岩,抗压强度低,在爆破载荷作用下容易破碎过度。在

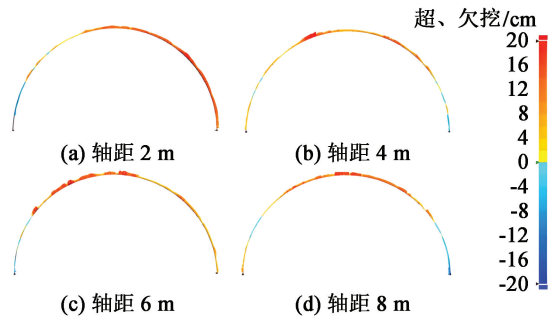


图 9 不同轴距位置的爆破断面二维点云切片

Fig. 9 2D slice point clouds of blasting section at different axis distances

轴距 6 m 处,左侧拱肩局部出现约 10 cm 的超挖,右侧出现约 5 cm 的超挖。这是因为左侧为粉砂岩,右侧为硅质岩,左、右两侧岩性不同,左侧岩石相对较软,导致爆破超挖明显;右侧岩石相对较硬,导致爆破效果相对较好。在轴距 8 m 处,隧道拱顶中心区域出现约 16 cm 的超挖,这是由于该区域为砂岩,抗压强度低,在爆破作用下破碎过度而产生超挖。

4 结论

依托襄荆高铁徐高岭隧道工程,采用三维数值模拟方法探究了周边眼间距、辅助眼间距及最小抵抗线对爆破效果的影响规律,对原有的爆破设计参数进行了优化,并通过三维激光扫描技术对优化参数后的爆破质量进行了定量评价。得出的主要结论如下:

1)随着周边眼间距与辅助眼间距的逐渐增大,爆破范围呈现减小趋势,平均线性超挖相应减小,有助于控制超挖。随着最小抵抗线远离爆破中心,爆破引起的超挖范围会逐渐减少,主要原因是距爆心较近的抵抗线附近的岩石更易遭受过强爆破冲击而破坏过度。

2)基于数值模拟结果,优化得到了适用于工程应用的工程参数,即:最小抵抗线为 75 cm,辅助眼间距 90 cm,周边眼间距 50 cm。最优爆破参数应用于现场爆破后,隧道轮廓线平整,形成的隧道开挖轮廓线与设计轮廓线基本吻合,应用效果良好。

采用数值模拟计算方法进行了爆破参数的优化,实现了爆破质量的有效控制,可为同类隧道施工提供参考。然而,隧道光面爆破的效果受到多种因素的影响,为了确保爆破效果的最优化,建议加强对光面爆破现场的监测工作,实时并合理地调整爆破参数。

参 考 文 献

- [1] 马伟斌. 铁路山岭隧道钻爆法关键技术发展及展望[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 64-85.
MA W B. Development and prospects of key technologies in drilling and blasting methods for railway mountain tunnels [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(3): 64-85.
- [2] 谭忠盛, 吴金刚. 我国隧道钻爆法施工技术回顾与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(6): 899-920.
TAN Z S, WU J G. Review and prospects of drilling and blasting tunnel construction technology in China [J]. Tunnel Construction, 2023, 43(6): 899-920.
- [3] 陈玉, 黄国栋, 马龙浩, 等. 砂岩隧道全断面光面爆破一次成形技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021(增刊1): 283-290.
CHEN Y, HUANG G D, MA L H, et al. Research on full-section smooth blasting one-time shaping technology for sandstone tunnels [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021 (Suppl. 1): 283-290.
- [4] 周杰. 软岩隧道光面爆破参数设计的数值模拟研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 441-444.
ZHOU J. Numerical simulation study of smooth blasting parameter design for soft rock tunnel [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2018, 37(4): 441-444.
- [5] ZOU B, XU Z, WANG J, et al. Numerical investigation on influential factors for quality of smooth blasting in rock tunnels [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(14): 9854313.
- [6] 田兴朝, 陶铁军, 姜乾星, 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 X C, TAO T J, LOU Q X, et al. Cause analysis and control research on over excavation of Baizhushan Tunnel by blasting [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(5): 60-66.
- [7] TIAN X C, TAO T J, LIU X, et al. Calculation of hole spacing and surrounding rock damage analysis under the action of in situ stress and joints [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 22331.
- [8] 郝广伟, 张万志, 李世堂, 等. 不同循环进尺下水平层状岩隧道爆破成型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020(增刊1): 316-322.
HAO G W, ZHANG W Z, LI S T, et al. Research on the shaping effect of horizontal layered rock tunnel under different blasting cyclical footage [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020 (Suppl. 1): 316-322.
- [9] 宿利平, 洪政, 谷桂丽, 等. 隧道掘进水封光面爆破装药结构的优化试验研究[J]. 爆破器材, 2023, 52(5): 44-49.
SU L P, HONG Z, GU G L, et al. Experimental study on optimization of charging structure for water sealed smooth blasting of tunnel excavation [J]. Explosive Materials, 2023, 52(5): 44-49.
- [10] 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. Determining of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 197-204.
- [11] 林琛, 徐建军, 杨晋伟, 等. 基于 HJC 模型的钢筋混凝土侵蚀仿真失效准则与参数[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(2): 100-105.
LIN C, XU J J, YANG J W, et al. The failure criteria and parameters of HJC model based perforation simulation [J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(2): 100-105.
- [12] 姜乾星, 陶铁军, 田兴朝, 等. 基于 HJC 本构模型的石灰岩冲击破坏形态数值模拟方法研究[J]. 爆破, 2022, 39(4): 71-79.
LOU Q X, TAO T J, TIAN X C, et al. Research on numerical simulation method of limestone impact failure based on HJC constitutive model [J]. Blasting, 2022, 39(4): 71-79.
- [13] 李睿, 刘磊, 张志华, 等. 基于 HJC 模型高温后大理岩 SHPB 实验数值模拟研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(1): 37-44.
LI R, LIU L, ZHANG Z H, et al. Numerical simulation study of marble damaged by high temperature in SHPB experiment based on HJC model [J]. Engineering Blasting, 2022, 28(1): 37-44.
- [14] 侯飞. HJC 模型参数确定及隧道光面爆破炮孔间距优化[J]. 价值工程, 2023, 42(34): 81-83.
HOU F. Determination of HJC model parameters and optimization of tunnel smooth blasting hole spacing [J]. Value Engineering, 2023, 42(34): 81-83.
- [15] 秦桂芳, 曾灿, 徐间锋, 等. 基于 HJC 损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证[J]. 爆破器材, 2022, 51(6): 45-51.
QIN G F, ZENG C, XU J F, et al. Numerical simulation and engineering verification of smooth blasting in limestone tunnel based on HJC damage constitutive mo-

- [17] 张研, 王鹏鹏. 基于 RVM 的爆破振动速度预测模型 [J]. 爆破, 2022, 39(1): 168-174.
ZHANG Y, WANG P P. Blasting vibration velocity prediction model based on RVM [J]. Blasting, 2022, 39(1): 168-174.
- [18] 张研, 王伟, 邓雪沁. 基于相关向量机的 TBM 掘进速度预测模型 [J]. 现代隧道技术, 2020, 57(3): 108-114.
ZHANG Y, WANG W, DENG X Q. Prediction model of TBM advance rate based on relevance vector machine [J]. Modern Tunneling Technology, 2020, 57(3): 108-114.
- [19] 陈财森, 胡海荣, 程志炜, 等. 基于 BA-RVM 算法的发动机故障诊断技术研究 [J]. 计算机工程与科学, 2023, 45(2): 332-337.
CHEN C S, HU H R, CHENG Z W, et al. Engine fault diagnosis technology based on BA-RVM algorithm [J]. Computer Engineering & Science, 2023, 45(2): 332-337.
- [20] ESFANDYARI M, DELOUEI A A, JALAI A. Optimization of ultrasonic-excited double-pipe heat exchanger with machine learning and PSO [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2023, 147: 106985.
- [21] 余修武, 谢晓永, 梁北孔, 等. 基于粒子群优化和巷道分区的深井 WSN 定位算法 [J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(2): 166-171.
YU X W, XIE X Y, LIANG B K, et al. A deep mine WSN localization algorithm based on both particle swarm optimization and tunnel partition [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(2): 166-171.
- [22] 杨维, 李歧强. 粒子群优化算法综述 [J]. 中国工程科学, 2004, 6(5): 87-94.
YANG W, LI Q Q. Survey on particle swarm optimization algorithm [J]. Engineering Science, 2004, 6(5): 87-94.
- [23] OKOJI A I, OKOJI C N, AWARUN O S. Performance evaluation of artificial intelligence with particle swarm optimization (PSO) to predict treatment water plant DBPs (haloacetic acids) [J]. Chemosphere, 2023, 344: 140238.
- [24] 黄晶柱, 钟依禄, 黄裘俊, 等. 基于高斯过程回归矿山爆破飞石距离预测模型 [J]. 工程爆破, 2023, 29(2): 73-79, 108.
HUANG J Z, ZHONG Y L, HUANG Q J, et al. Prediction model of blasting flyingrock distance in mine based on Gaussian process regression [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(2): 73-79, 108.
- del [J]. Explosive Materials, 2022, 51(6): 45-51.
- [16] 任亮, 喻贤明, 王凯, 等. 基于 HJC 模型的 UHPC 冲击压缩性能数值研究 [J]. 应用力学学报, 2021, 38(5): 1910-1918.
REN L, YU X M, WANG K, et al. Numerical study on impact compression behavior of UHPC using HJC model [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(5): 1910-1918.
- [17] 刘锦, 李峰辉, 刘秀秀. 基于 HJC 模型的煤岩冲击损伤特性研究 [J]. 工程爆破, 2021, 27(2): 35-42, 65.
LIU J, LI F H, LIU X X. Study on impact damage characteristics of coal rock based on HJC model [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(2): 35-42, 65.
- [18] 陶连金, 安林轩, 安军海, 等. 响应曲面法优化城市深埋隧道新意法设计参数 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(4): 426-430.
TAO L J, AN L X, AN J H, et al. Study on optimization of ADECO-RS approach design parameters of urban deeply buried tunnels by response surface methodology [J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2015, 25(4): 426-430.
- [19] CHEN Y, CHEN S, WU Z, et al. Optimization of genetic algorithm through use of back propagation neural network in forecasting smooth wall blasting parameters [J]. Mathematics, 2022, 10(8): 1271.
- [20] 李瑶, 嵇一, 吴勇生, 等. 基于三维激光扫描技术的超欠挖算法在隧道开挖中的应用 [J]. 铁道标准设计, 2021, 65(10): 200-204.
LI Y, ZHUO Y, WU Y S, et al. Application of over under-cut algorithm in tunnel excavation based on 3D laser scanning technology [J]. Railway Standard Design, 2021, 65(10): 200-204.

(上接第 57 页)