

水工隧洞光面爆破超欠挖影响因素数值模拟分析

何俊波

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2026年9月27日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月29日

摘要

针对引水隧洞光面爆破超欠挖控制问题, 以引江补汉工程12-1#平洞IV级围岩段为背景, 采用ANSYS/LS-DYNA建立隧洞周边孔爆破数值模型, 以总超挖面积和最大超挖值为评价指标, 研究周边孔间距和光爆层厚度对超欠挖的影响规律, 在单因素数值模拟的基础上, 开展 3×3 全因子数值试验, 并采用极差分析比较周边孔间距和光爆层厚度对不同评价指标的影响程度。结果表明: 增大周边孔间距和光爆层厚度总体有利于减小超挖, 但两者均存在合理范围。周边孔间距增大可减弱相邻炮孔应力叠加, 降低轮廓附近岩体损伤; 间距过大时, 孔间裂纹贯通不足, 易引起欠挖和轮廓不平整。光爆层厚度增大可抑制自由面反射拉伸作用, 缩小高损伤区; 厚度过大则会削弱裂纹贯通能力, 增加局部欠挖风险。总体上, 周边孔间距对总超挖面积影响较明显, 光爆层厚度对最大超挖值影响较明显。工程中应综合超欠挖控制和轮廓成形要求, 合理匹配这两项参数, 为类似水工隧洞光面爆破参数设计提供参考。

关键词

光面爆破, 周边孔间距, 光爆层厚度, 超欠挖, 数值模拟

Numerical Simulation Analysis of Influencing Factors of Overbreak and Underbreak in Smooth Blasting of Hydraulic Tunnels

Junbo He

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: September 27, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

Aiming at the control of overbreak and underbreak in smooth blasting of diversion tunnels, the Class IV surrounding rock section of the 12-1# adit of the Yangtze-to-Hanjiang Water Diversion Project is taken as the research background. ANSYS/LS-DYNA is used to establish a numerical model for blasting of tunnel perimeter holes. Taking the total overbreak area and maximum overbreak value as evaluation indices, the influence laws of perimeter hole spacing and the thickness of smooth blasting layer on overbreak and underbreak are investigated. On the basis of single-factor numerical simulation, 3×3 full-factor numerical tests are carried out, and range analysis is adopted to compare the influence degrees of perimeter hole spacing and smooth blasting layer thickness on different evaluation indices. The results show that increasing the perimeter hole spacing and smooth blasting layer thickness is generally beneficial for reducing overbreak, while both parameters have a reasonable range. Increasing perimeter hole spacing can weaken the stress superposition of adjacent blast holes and reduce rock mass damage near the tunnel contour. Excessively large spacing results in insufficient crack penetration between holes, which easily causes underbreak and uneven contour. Increasing the thickness of the smooth blasting layer can restrain the reflected tensile effect of the free surface and shrink the high damage zone. Nevertheless, excessive thickness weakens crack penetration capacity and increases the risk of local underbreak. In general, perimeter hole spacing has a prominent effect on the total overbreak area, and the thickness of the smooth blasting layer exerts a significant influence on the maximum overbreak value. In engineering practice, the two parameters should be reasonably matched with comprehensive consideration of the requirements of overbreak-underbreak control and contour formation. This study can provide references for the parameter design of smooth blasting of similar hydraulic tunnels.

Keywords

Smooth Blasting, Perimeter Hole Spacing, Smooth Blasting Layer Thickness, Overbreak and Underbreak, Numerical Simulation

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

钻爆法因具有经济、高效、地质适应能力强等优势被广泛应用于隧道岩土体开挖工程中[1]。在隧洞施工过程中,爆破开挖效果不仅直接影响施工进度和成本,还会对围岩扰动程度、安全稳定性及后续支护结构受力产生重要影响[2][3]。然而,地质条件复杂且爆破荷载作用具有不确定性,爆破振动、应力波传播与岩体损伤演化相互耦合,增加了围岩损伤控制难度。因此,如何在隧洞爆破开挖中降低围岩损伤、减少超欠挖并保障围岩稳定,已成为爆破设计与施工的关键问题。

国内外学者围绕光面爆破破岩机理、参数优化及超欠挖控制开展了大量研究。Persson 等[4]从爆炸应力波、爆生气体和岩石断裂机制出发,系统论述了光面爆破的破岩原理及主要参数确定方法。Zou 等[5]基于 LS-DYNA 建立了三维隧道光面爆破模型,结合正交试验和极差分析对周边孔间距、最小抵抗线、线装药密度等 7 个因素进行了主次排序,指出围岩类型、装药参数和爆破参数对光面爆破质量的影响存在明显差异。Yang 等[6]通过爆破试验与数值模拟相结合,分析了引水隧洞周边孔爆破对围岩的损伤特征,建立了考虑爆源间距和炮孔间距的超挖范围预测方法。Liu 等[7]采用遗传算法与改进支持向量回归

相结合的智能算法,建立了地质条件、超欠挖控制指标与光面爆破参数之间的非线性映射关系,实现了山岭隧道光面爆破参数的智能优化。丁家仁等[8]建立了引水隧洞周边孔双孔爆破模型,分析了光爆层厚度和周边孔间距对光面爆破效果的影响,并将优化参数用于现场试验;胡桂斌[9]针对夹泥灰岩隧道开展正交试验,综合考虑周边孔间距、径向不耦合系数、光爆层厚度和装药结构的影响,优化后现场超挖面积明显降低。

已有研究多采用单因素分析或简化双孔模型,对周边孔间距与光爆层厚度共同作用下超欠挖指标的定量比较仍不充分。针对上述问题,本文以引江补汉工程 12-1#平洞为背景,建立隧洞周边孔爆破数值模型,开展两因素单因素模拟及正交数值试验;以总超挖面积和最大超挖值为评价指标研究周边孔距与光爆层厚度对引水隧洞光面爆破超欠挖的影响规律。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

引江补汉工程是南水北调后续工程的重要组成部分,采用深埋长隧洞有压自流输水方式,输水线路全长约 194.7 km,设计流量 $212 \text{ m}^3/\text{s}$ 。工程沿线地形起伏较大、地质条件复杂,隧洞围岩以 III~V 级为主,施工组织和开挖支护难度较高。12-1#平洞为主体工程 6 标施工支洞,全长约 2.68 km,主要承担主洞施工交通、通风排水及作业面服务任务,其地理位置图如图 1 所示。

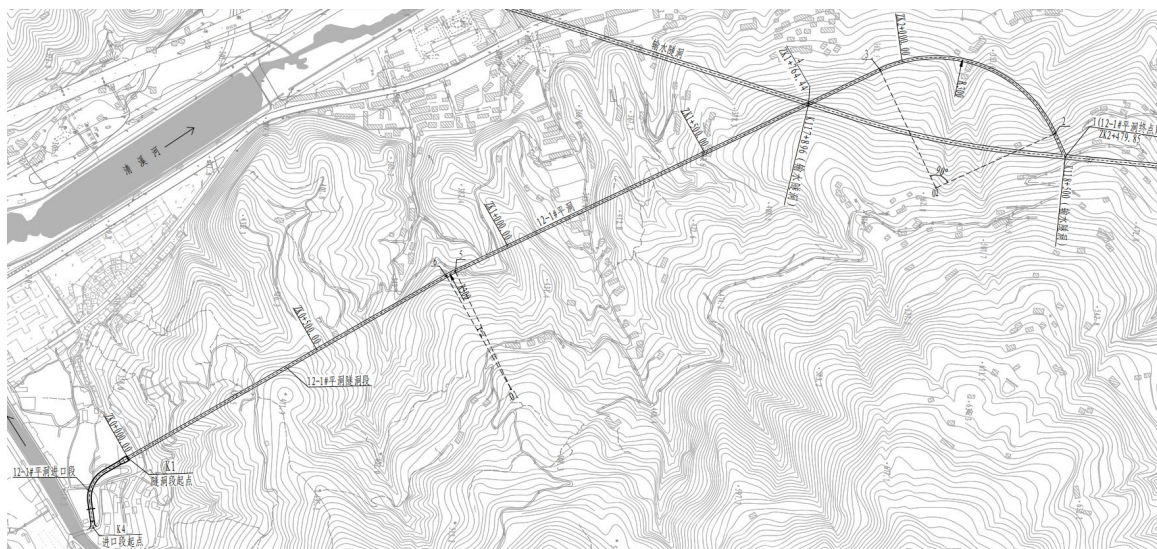


Figure 1. Geographic location map of 12-1# adit

图 1. 12-1#平洞地理图

12-1#平洞 IV 级围岩段采用全断面钻爆法施工,设计循环进尺为 2.0 m。隧洞净断面尺寸为 $7.5 \text{ m} \times 6.5 \text{ m}$,设计开挖断面尺寸为 $9.1 \text{ m} \times 9.2 \text{ m}$,钻孔采用凿岩台车及 YT-28 气腿式凿岩机。

2.2. 工程问题与研究内容

受围岩条件和钻爆施工参数影响,隧洞开挖过程中易出现超欠挖问题,严重超挖会增加出渣、支护和回填工作量,扩大围岩扰动范围,并影响开挖轮廓成形及围岩稳定。因此开展光面爆破超欠挖影响规律研究具有重要工程意义。

在光面爆破施工中,周边孔间距和光爆层厚度是影响轮廓岩体损伤及超挖控制的重要爆破参数。周

边孔间距主要影响相邻炮孔间的应力波叠加程度和孔间裂纹贯通状态，光爆层厚度则影响爆炸应力波向自由面的传播及反射拉伸作用，进而影响围岩损伤范围和开挖轮廓成形。基于此，本文选取周边孔间距和光爆层厚度作为主要研究参数，采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件分析其对隧洞光面爆破超挖特征的影响规律。

3. 数值模型建立

3.1. 模型尺寸及边界条件

本研究选取平洞#12-1 IV 类围岩段进行爆破损伤数值模拟，由于此次研究内容为周边孔距(a)与光爆层厚度(W)对隧洞爆破超欠挖的影响，而周边孔位于隧洞预计开挖轮廓线上，其爆破参数设计合理与否直接影响隧洞超欠挖情况，保持其他爆破参数不变的情况下，忽略掏槽孔与辅助孔的影响，隧洞轮廓线内仅保留周边孔抵抗线以内的部分岩体。采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件建立数值模型，使用 LS-PrePost 后处理软件进行结果分析。

考虑计算机效率，模型设计为 $14\text{ m} \times 14\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的三维模型，采用 3D solid 164 单元类型，建立三维数值模型如图 2 所示。模型四周边界均设置无反射边界条件[10]，掌子面设置禁止节点 z 轴位移和 x 、 y 轴转动。为了确保计算的准确性，空气与炸药采用 ALE 算法，防止爆破过程中导致的网格畸变[11]，岩石单元采用 Lagrange 算法，岩石、空气与炸药之间采用流固耦合算法，数值计算单位均为 $\text{g-cm-}\mu\text{s}$ 。

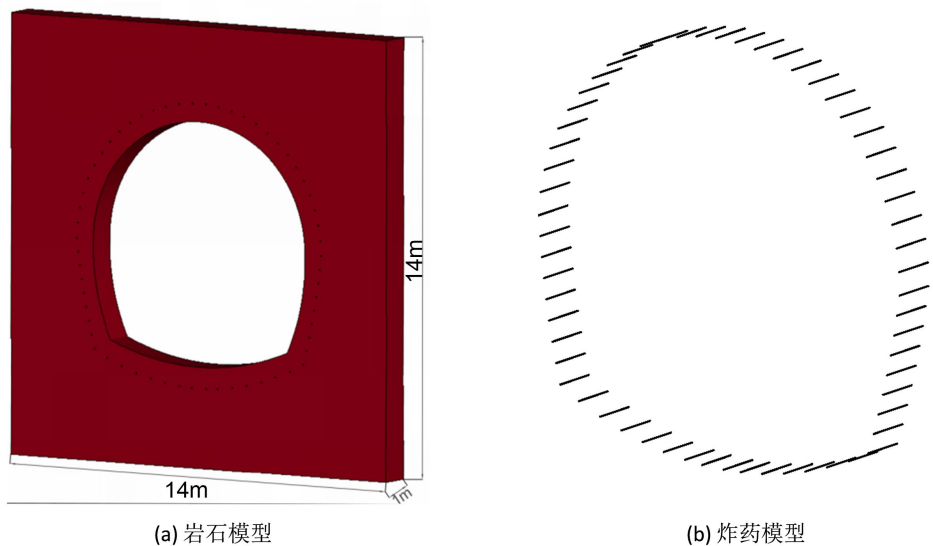


Figure 2. Three-dimensional numerical model diagram of water diversion tunnel
图 2. 引水隧洞三维数值模型图

3.2. 材料本构模型及参数

(1) 岩石模型及参数

岩石采用 HJC 本构模型，该模型适用于脆性材料在冲击及爆炸荷载下的力学行为模拟，能够反映岩石在围压作用下的强度提高、应变率强化、塑性变形累积及损伤软化等特征。其损伤演化规律可以定义损伤变量 D 从 0 到 1 的演化过程，当 D 到达临界值时，材料单元丧失承载力，可模拟宏观开裂与剥落。HJC 模型在 LS-DYNA 通过关键字 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE 来调用，其具体参数如下表 1 所示。

Table 1. Material parameters of rock mass for HJC model**表 1.** 岩体 HJC 模型材料参数

$R_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	G/GPa	A	B	C	N	F_c/MPa	T/MPa	EPS_0/s^{-1}	$EF_{\min}$
2416	38.93	0.55	1.23	0.0097	0.894	22.16	12.37	1.00×10^{-6}	0.01
SFMAX	$P_{\text{crush}}/\text{MPa}$	U_{crush}	$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	U_{lock}	D_1	D_2	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa
17.02	0	0.00125	0.20	0.174	0.04	1.00	3.90	-22.30	53.70

(2) 空气模型

空气材料采用的是空材料，根据关键字***MAT_NULL**来定义，其状态方程用线性多项式表示，定义关键字为***EOS_LINEAR_POLYNOMIAL**。状态方程表达式为：

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_0 \quad (1)$$

式中： C_0 、 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 均为常数， μ 为体积比， E_0 为内能与初始体积比。空气材料参数具体取值见表2。

Table 2. Material parameters of air**表 2.** 空气材料参数

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0/MPa	V_0
1.20	0	0	0	0	0.40	0.40	0	0.25	0

(3) 炸药模型

炸药采用高能炸药材料模型，用关键字***MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN**定义炸药，在爆炸过程中的动力膨胀特性可用JWL状态方程来表示：

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (2)$$

式中： P 为爆炸压力， ω 、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 为炸药性质常数， V 为相对体积， E_0 为单位体积内能。炸药材料参数取值如表3。

Table 3. Material parameters of explosive**表 3.** 炸药材料参数

$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	V_0
1105	7.45	22.00	625.30	23.29	5.25	1.60	0.28	8.56	1.00

4. 数值模拟结果及分析

在LS-DYNA后处理中，HJC本构模型的损伤变量 D 反映了岩石单元的损伤累积程度， $D=0$ 表示单元完好， $D=1$ 表示单元完全丧失承载力。根据《水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范》(SL 47-2020) [12]附录C，当爆破作用引起岩体弹性波速降低率超过10%时，可判定岩体发生爆破损伤。陈俊桦等[13]提出的考虑岩体完整程度的岩石爆破损伤模型，采用基于纵波波速衰减的损伤变量对爆破损伤程度进行定量描述。基于该研究建立的损伤变量与声波波速之间的关系公式可得当波速降低率达到规范规定的10%时，对应的损伤变量为 $D=0.19$ 。刘亮等[14]基于声波特性测试和损伤理论，对不同深度岩体的损伤状态进行了研究；经统计分析认为，钻爆开挖条件下岩体达到临界破碎状态时，损伤变量约为0.75~0.85。

柏明武等[15]基于围岩钻孔岩芯编录、钻孔波速测试等原位试验,对桐梓隧道灰岩开挖损伤区的宏观损伤特征进行研究,提出了综合损伤因子确定方法,并将其取值为 0.22~0.48 用于损伤区范围判定。结合 12-1#平洞的围岩和地质条件,取 $D = 0.3$ 作为初始岩石爆破有效损伤阈值,即认为当 $D \geq 0.3$ 时,岩石开始受损。各工况均采用统一的网格划分与失效判据,提取相同基准轮廓范围内的损伤单元进行统计,以消除网格尺寸差异带来的偏差,保证不同工况之间的可比性。

4.1. 不同周边孔间距

周边孔间距是指开挖轮廓线上相邻两个炮孔间的距离,为探讨不同周边孔间距对引水隧洞超欠挖的影响,在原模型建立的基础上,建立不同周边孔间距工况的数值模型,保持炮孔直径、光爆层厚度 $W = 60\text{ cm}$ 和装药结构形式等条件不变,具体工况设置如表 4 所示。

Table 4. Working conditions with different perimeter hole spacings
表 4. 不同周边孔距工况

工况	$a1$	$a2$	$a3$	$a3$	$a4$
周边孔间距(a)/m	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55

为直观对比周边孔间距对围岩损伤范围及开挖轮廓形成的影响,选取各工况末时刻的损伤云图进行分析。不同周边孔间距对于引水隧洞光面爆破岩石损伤效果的影响如图 3 所示。

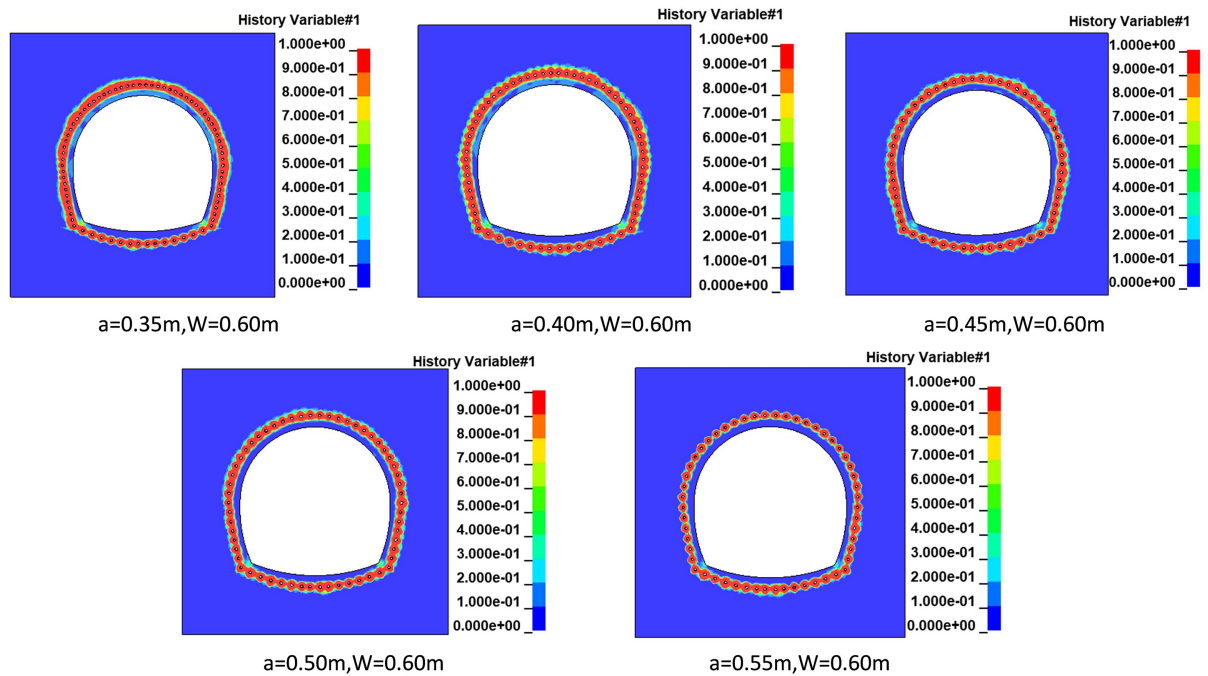


Figure 3. Nephograms of surrounding rock damage under different perimeter hole spacings
图 3. 不同周边孔间距下围岩损伤云图

由图 3 可知,当光爆层厚度固定为 0.60 m 时,随着周边孔间距的增大,隧洞轮廓外围岩的损伤范围整体呈减小趋势。当孔间距为 0.35 m 时,孔间应力波叠加强烈,轮廓面附近岩体损伤区域较宽,局部出现明显的过度破碎;当孔间距增大至 0.45~0.50 m 时,损伤范围逐渐收窄,轮廓面趋于平整;继续增大至 55 cm 时,由于相邻炮孔间距较大,孔间裂纹未能很好贯通,爆破后未能形成光滑隧洞轮廓,且出现一定

欠挖现象。

选择 Isos 视图, 且将损伤范围改为 0.3 至 1, 得到最终的爆破损伤等值云图, 选择 Post Line 视图, 得到爆破损伤等值曲线图。最终将爆破模拟最终损伤等值曲线图导入到 CAD 绘图工具中, 与设计开挖轮廓线缩放到同等比例, 描绘最外圈的等值曲线即为模拟结果实际开挖轮廓线。根据对实际开挖轮廓线与设计开挖轮廓下对比分析可得 $a1\sim a5$ 工况的总超挖面积以及最大超挖值数据, 具体数值如图 4 所示。

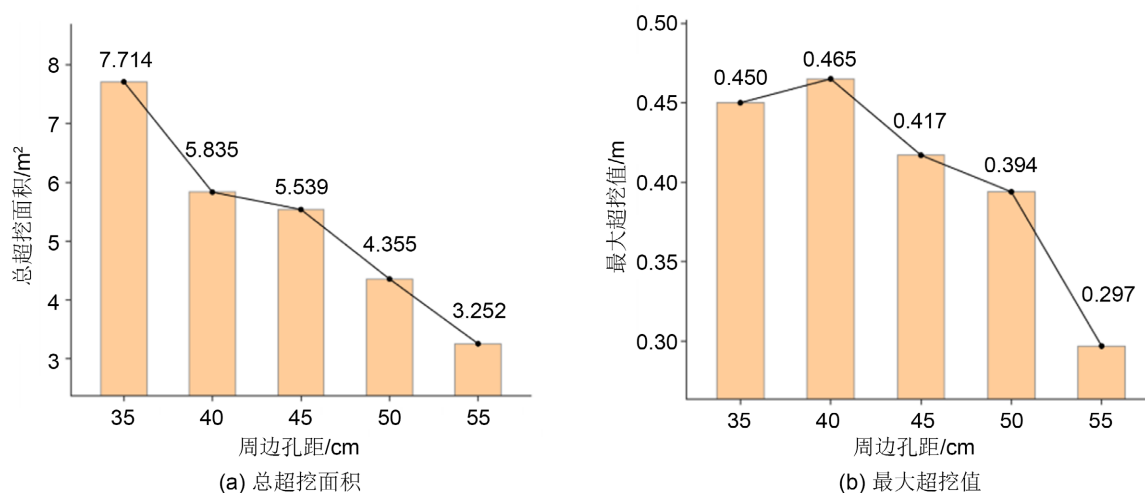


Figure 4. Total overbreak area and maximum overbreak value under different hole spacings

图 4. 不同孔间距下总超挖面积和最大超挖值

由图 4 可知, 总超挖面积随周边孔间距增大而显著减小。孔间距从 0.35 m 增至 0.55 m 时, 总超挖面积由 7.714 m² 降至 3.252 m², 降幅约为 57.8%。最大超挖值同样呈下降趋势, 由 0.465 m 降至孔间距为 0.55 m 的 0.297 m。这是由于周边孔间距较小时, 孔间应力波叠加增强, 爆炸能量在孔间区域过度集中, 轮廓面附近岩体承受多次加载, 损伤累积范围扩大, 超挖量增加; 随着孔间距增大, 孔间应力波叠加作用减弱, 单孔负担的爆破面积增大, 但若装药量保持不变, 作用于孔壁的爆炸能量相对分散, 对围岩的扰动减小, 因此超挖面积和最大超挖值均有所降低。当周边孔距由 0.50 m 到 0.55 m 时, 总超挖面积与最大超挖值都明显减小, 这是由于相邻炮孔中心连线处附近岩体未贯通, 开始出现欠挖, 导致总超挖面积开始减小, 随着孔间距继续增大, 炮孔间的欠挖也更严重, 总超挖面积继续减小。

4.2. 不同光爆层厚度

光爆层厚度是指周边孔与最外层辅助眼之间的一层岩石圈, 其厚度就是周边眼的最小抵抗线, 本模型由于仅保留周边孔抵抗线以内部分岩体, 光爆层厚度即为周边孔到隧洞轮廓内自由面的距离。为探讨不同光爆层厚度对引水隧洞超欠挖的影响, 在原模型建立的基础上, 保持周边孔间距 $a=0.45$ m、炮孔直径、连续装药结构形式等条件不变, 建立不同光爆层厚度工况的数值模型, 具体光爆层参数如表 5 所示。

Table 5. Working conditions with different thicknesses of smooth blasting layer

表 5. 不同光爆层厚度工况

工况	W1	W2	W3	W4	W5
光爆层厚度(W)/m	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80

相同孔间距下不同光爆层厚度对于引水隧洞光面爆破岩石损伤效果的影响如图 5 所示。

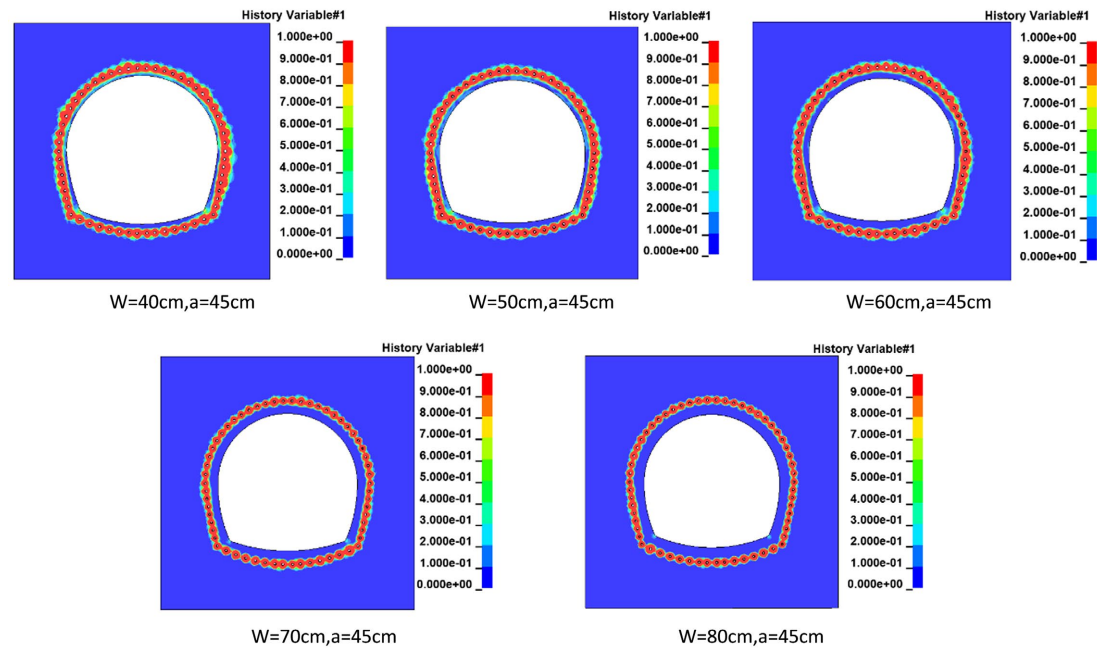


Figure 5. Nephograms of surrounding rock damage under different thicknesses of smooth blasting layer
图 5. 不同光爆层厚度下围岩损伤云图

由图 5 可以看出，当周边孔间距固定为 45 cm 时，随着光爆层厚度增大，隧洞轮廓外围岩的高损伤区范围总体呈收窄趋势。当光爆层厚度为 0.40 m 时，周边孔距自由面较近，爆炸应力波到达自由面后反射形成拉伸波，轮廓面附近出现连续的强损伤带，高损伤区宽度较大并向外侧扩展，因而产生较大的超挖；当光爆层厚度为 0.50~0.60 m 时，高损伤区宽度较 0.40 m 时有所减小，损伤云图形态较为接近，孔间裂纹贯通仍较好，超欠挖指标变化不大；当光爆层厚度为 0.70 m 时，高损伤区虽进一步收窄，但孔间裂纹贯通程度已开始下降，轮廓局部出现不连续迹象；当光爆层厚度为 0.80 m 时，高损伤区继续收窄，轮廓附近损伤分布明显不连续，孔间裂纹难以贯通，导致欠挖现象发生。

根据上述方法可获得 W1~W5 工况的总超挖面积以及最大超挖值数据，如图 6 所示。

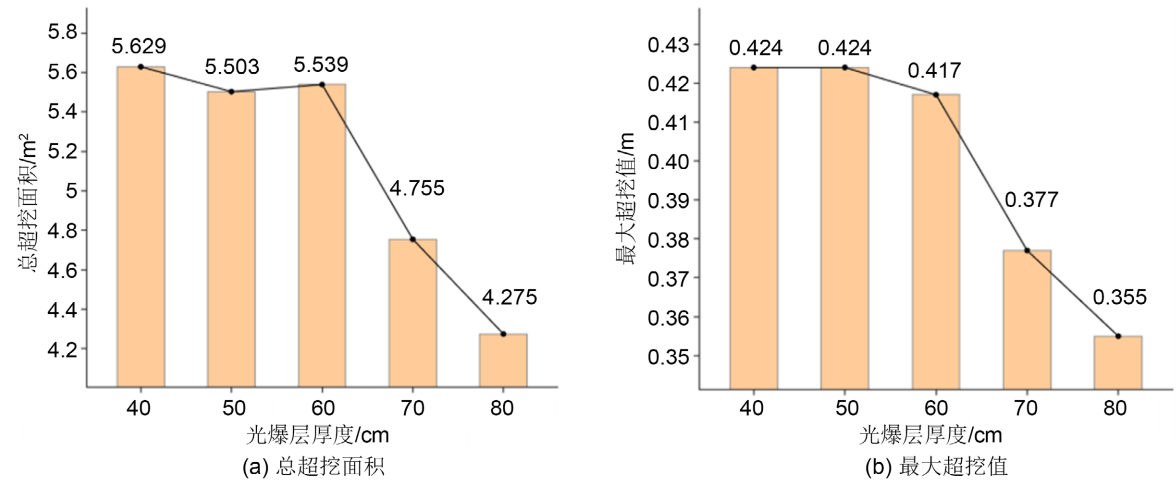


Figure 6. Total overbreak area and maximum overbreak value under different thicknesses of smooth blasting layer
图 6. 不同光爆层厚度下总超挖面积和最大超挖值

由图 6 可知, 光爆层厚度由 0.40 m 增大至 0.80 m 时, 总超挖面积由 5.629 m² 降至 4.275 m², 最大超挖值由 0.424 m 降至 0.355 m, 分别降低约 24.1%和 16.3%。其中, 0.40~0.60 m 范围内两项指标变化较缓, 且孔间裂纹贯通较好; 当厚度增至 0.70 m 时, 两项指标进一步下降, 但孔间裂纹贯通程度开始降低; 当厚度增至 0.80 m 时, 指标继续下降, 主要原因是孔间裂纹难以贯通并出现欠挖。因此, 光爆层厚度增大带来的指标下降不一定代表爆破效果改善, 参数评价还应结合轮廓连续性和欠挖情况。其机理在于: 光爆层厚度较小时, 周边孔距自由面较近, 压应力波在自由面反射形成拉伸波, 轮廓面附近易发生层裂和拉伸破坏; 随厚度增大, 反射拉伸波逐渐衰减, 但单孔承担的爆破岩体量增加, 孔间裂纹贯通能力下降。

4.3. 全因子数值试验

为探究周边孔间距与光爆层厚度对引水隧洞光面爆破超欠挖的耦合作用规律, 选取周边孔间距 a 、光爆层厚度 W 两个关键影响因素开展 3×3 全因子数值试验。结合单因素模拟结果确定因素水平: 周边孔间距设置 0.40 m、0.45 m、0.50 m 共 3 个水平, 光爆层厚度设置 0.50 m、0.60 m、0.70 m 共 3 个水平, 合计 9 组计算工况。以总超挖面积和最大超挖值作为评价指标, 两项指标越小表示超挖程度越低; 同时结合孔间裂纹贯通状态, 规避欠挖风险。试验方案及模拟计算结果如表 6 所示。

Table 6. Full factorial numerical test scheme and simulation result data
表 6. 全因子数值试验方案与模拟结果数据

工况编号(c)	周边孔间距(a)/m	光爆层厚度(W)/m	总超挖面积/m ²	最大超挖值/m
c1	0.40	0.50	6.057	0.477
c2	0.40	0.60	5.835	0.465
c3	0.40	0.70	5.155	0.374
c4	0.45	0.50	5.503	0.424
c5	0.45	0.60	5.539	0.417
c6	0.45	0.70	4.193	0.344
c7	0.50	0.50	4.556	0.457
c8	0.50	0.60	4.355	0.394
c9	0.50	0.70	3.552	0.328

对试验结果开展极差分析, 分别计算各因素不同水平下评价指标的平均值与极差 R , 极差大小表征因素对评价指标的影响程度, 极差越大代表该因素对指标的影响越显著, 极差计算结果见表 7。

Table 7. List of range calculation results
表 7. 极差计算结果表

评价指标	统计量	周边孔间距 a /m			光爆层厚度 W /m		
		0.40	0.45	0.50	0.50	0.60	0.70
总超挖面积 /m ²	水平和 K	17.047	15.235	12.463	16.116	15.729	12.900
	水平均值 $\bar{K}$	5.682	5.078	4.154	5.372	5.243	4.300
	极差 R	1.528	—	—	1.072	—	—
最大超挖值 /m	水平和 K	1.316	1.185	1.179	1.358	1.276	1.046
	水平均值 $\bar{K}$	0.439	0.395	0.393	0.453	0.425	0.349
	极差 R	0.046	—	—	0.104	—	—

表 7 表明, 在本文试验水平范围内, 提高周边孔间距和光爆层厚度, 两项指标的水平平均值总体呈下降趋势, 但两因素对不同评价指标的影响程度存在差异。

极差结果表明: 对于总超挖面积, $R_a = 1.528 \text{ m}^2 > R_W = 1.072 \text{ m}^2$, 周边孔间距的影响相对较大; 对于最大超挖值, $R_W = 0.104 \text{ m} > R_a = 0.046 \text{ m}$, 光爆层厚度的影响相对较大。

4.4. 参数组合分析与工程参数选取

综合总超挖面积和最大超挖值两项评价指标, 在本次 3×3 全因子数值试验范围内, 工况 c9 对应的参数组合 $a = 0.50 \text{ m}$ 、 $W = 0.70 \text{ m}$ 的两项指标均为所有工况中的最小值, 分别为 3.552 m^2 和 0.328 m , 可视为按超挖指标评价的优选组合。然而, 超挖指标不能单独反映孔间裂纹贯通和轮廓成形情况。结合前文单因素模拟结果可知, 周边孔间距或光爆层厚度过大时, 孔间裂纹贯通程度下降, 轮廓面可能出现不连续, 并伴随局部欠挖风险。因此, 工程参数的选取还应综合考虑超挖控制、孔间裂纹贯通、轮廓连续性和欠挖风险。

综合分析表明, $a = 0.50 \text{ m}$ 、 $W = 0.70 \text{ m}$ 虽在超挖指标上表现最优, 但孔间裂纹贯通不足, 不宜直接作为工程采用参数; 原设计参数 $a = 0.45 \text{ m}$ 、 $W = 0.60 \text{ m}$ 在超欠挖控制与轮廓成形之间能够取得较好平衡。因此, 本文将 $a = 0.45 \text{ m}$ 、 $W = 0.60 \text{ m}$ 作为 12-1#平洞IV级围岩段光面爆破的工程采用参数。

5. 爆破施工方案

根据前述数值模拟及参数组合分析结果、工程经验以及相关规范, 综合考虑超挖控制、孔间裂纹贯通、轮廓连续性和局部欠挖风险, 选取 $a = 0.45 \text{ m}$ 、 $W = 0.60 \text{ m}$ 作为工程爆破的周边孔距及光爆层厚度, 其他参数设计如下。

炮孔直径为 42 mm , 炸药选用 2#岩石乳化炸药, 药卷规格为 $\phi 32 \text{ mm} \times 300 \text{ g}$ 。每循环共布置炮孔 125 个, 其中掏槽孔 12 个、辅助孔 53 个、周边孔 46 个、底板孔 14 个, 炮孔布置如图 7 所示; 周边孔、辅助孔和底板孔深均为 2.2 m , 掏槽孔深为 2.5 m , 掏槽孔与掌子面夹角约为 75° 。单循环设计炸药用量约为 149.9 kg , 炸药单耗为 1.2 kg/m^3 , 炮孔利用率取 0.90。

掏槽孔、辅助孔和底板孔采用连续装药结构, 周边孔采用间隔装药结构, 药卷通过导爆索连接并固定在竹片上, 如图 8 所示。掏槽孔、辅助孔和周边孔单孔装药量分别取 1.8 kg 、 1.5 kg 和 0.4 kg 。

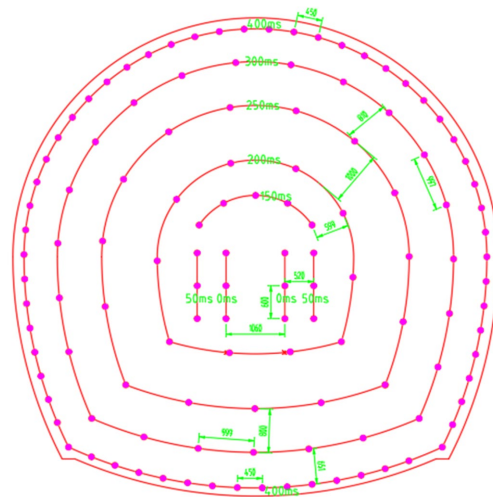


Figure 7. Layout plan of blast holes
图 7. 炮孔平面布置图

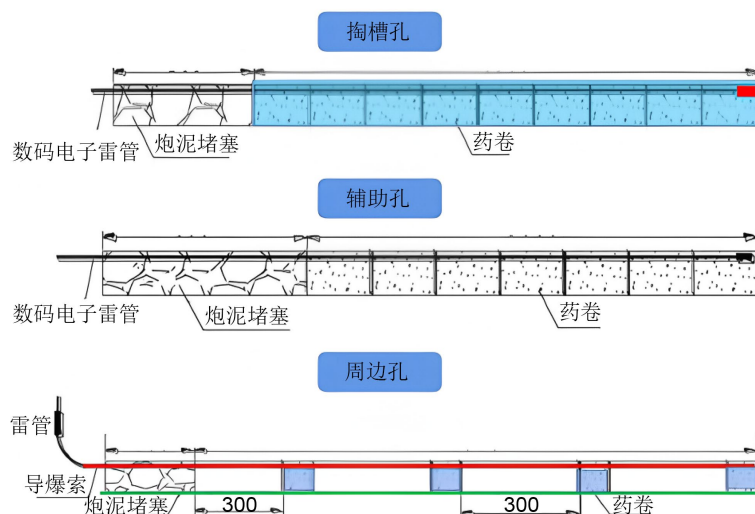


Figure 8. Charge structure of blast holes for tunnel blasting
图 8. 隧洞爆破炮孔装药结构形式

6. 结论

(1) 在本文设置的试验范围内, 提高周边孔间距和光爆层厚度, 两项指标的水平平均值总体呈下降趋势。对于总超挖面积, 周边孔间距的极差为 1.528 m^2 , 大于光爆层厚度的 1.072 m^2 , 说明周边孔间距对总超挖面积的影响相对较大; 对于最大超挖值, 光爆层厚度的极差为 0.104 m , 大于周边孔间距的 0.046 m , 说明光爆层厚度对最大超挖值的影响相对较大。

(2) 周边孔间距增大会减弱相邻炮孔间的应力波叠加, 有利于降低轮廓附近岩体损伤和超挖; 但间距过大时, 孔间裂纹难以贯通, 容易引起欠挖和轮廓不平整。光爆层厚度增大可减弱自由面反射拉伸作用, 使高损伤区收窄; 但厚度过大时, 单孔负担的爆破岩体量增加, 同样会削弱裂纹贯通能力。

(3) 在本次数值试验范围内, $a = 0.50 \text{ m}$ 、 $W = 0.70 \text{ m}$ 参数组合对应的总超挖面积和最大超挖值最低, 但孔间裂纹贯通不足, 存在较高的局部欠挖风险, 不能直接作为工程采用参数。综合超挖控制、孔间裂纹贯通和轮廓成形要求, 确定 $a = 0.45 \text{ m}$ 、 $W = 0.60 \text{ m}$ 为本工程光面爆破施工参数, 具体施工方案见第 4 章。

参考文献

- [1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [2] Jang, H., Kawamura, Y. and Shinji, U. (2019) An Empirical Approach of Overbreak Resistance Factor for Tunnel Blasting. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **92**, Article ID: 103060. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103060>
- [3] Verma, H.K., Samadhiya, N.K., Singh, M., Goel, R.K. and Singh, P.K. (2018) Blast Induced Rock Mass Damage around Tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **71**, 149-158. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.08.019>
- [4] Persson, P.A., Holmberg, R. and Lee, J. (1993) *Rock Blasting and Explosives Engineering*. CRC Press.
- [5] Zou, B., Xu, Z., Wang, J., Luo, Z. and Hu, L. (2020) Numerical Investigation on Influential Factors for Quality of Smooth Blasting in Rock Tunnels. *Advances in Civil Engineering*, **2020**, Article ID: 9854313. <https://doi.org/10.1155/2020/9854313>
- [6] Yang, Y., Jiang, N., Zhou, C., Meng, X., Zhu, B. and Cai, Z. (2024) Damage Analysis and Safety Control of Surrounding Rock around Peripheral Hole of Diversion Tunnel. *Engineering Failure Analysis*, **160**, Article ID: 108226. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108226>
- [7] Liu, K. and Liu, B. (2017) Optimization of Smooth Blasting Parameters for Mountain Tunnel Construction with Specified Control Indices Based on a GA and ISVR Coupling Algorithm. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **70**,

- 363-374. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.007>
- [8] 丁家仁, 曹华彰, 蒋楠, 等. 引水隧洞光面爆破参数优化数值模拟及现场试验研究[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(5): 46-53.
 - [9] 胡桂斌. 夹泥灰岩隧道爆破参数对超欠挖的影响研究[J]. 工程爆破, 2024, 30(2): 78-87.
 - [10] 何忠明, 蔡军, 王利军, 等. 地铁隧道爆破开挖引起地表位移沉降的数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(9): 3496-3502.
 - [11] 王峥峥, 张杨生. 基于 ALE 算法的隧道开挖爆破振动特性数值分析[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(3): 279-284.
 - [12] 中华人民共和国水利部. SL 47-2020 水工建筑物岩石地基开挖施工技术规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2021.
 - [13] 陈俊桦, 张家生, 李新平. 考虑岩体完整程度的岩石爆破损伤模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 857-866.
 - [14] 刘亮, 卢文波, 陈明, 等. 钻爆开挖条件下岩体临界破碎状态的损伤阈值统计研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(6): 1133-1140.
 - [15] 柏明武, 陈世万, 左双英, 等. 灰岩隧道开挖损伤区特征研究: 以桐梓隧道为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(5): 71-83.