

文章编号:2096-5052(2026)01-0001-12

DOI:10.19952/j.cnki.2096-5052.2026.01.01

结构面对隧道钻爆围岩损伤影响的 数值试验研究

王建秀¹, 曹安生¹, 高元博², 刘鹏飞¹, 严龙¹, 林路宇³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001;
3. 厦门路桥工程投资发展有限公司, 福建 厦门 361026)

摘要:为揭示结构面几何参数对隧道爆破开挖围岩损伤演化与断面成型质量的影响机理,以厦门海沧疏港通道隧道工程为原型,采用 LS-DYNA 建立三维数值模型开展数值试验,研究不同结构面倾角、宽度和间距对隧道钻爆围岩损伤分布的影响。结果表明:结构面对围岩爆破损伤具有显著的方向性控制作用,损伤沿结构面倾向优先延伸,而在法向上受到明显限制;结构面倾角由 0° 增加至 90°, 断面损伤由近似对称逐步转为定向导向控制的非对称扩展,受分割阻隔作用主导而呈局部化与离散化特征;结构面宽度由 0.1 m 增加至 0.7 m, 显著强化了界面弱化效应与应力波场散射耗能,超挖面积与最大超挖显著增加;结构面间距由 0.6 m 增加至 2.4 m, 超挖减小、轮廓平整性增加。研究成果可为揭示隧道爆破的能量控制、参数优化与成型质量提升提供依据。

关键词: 结构面; 隧道钻爆; 数值试验; 围岩损伤; 超欠挖

中图分类号: U45; TU452

文献标志码: A

引用格式: 王建秀, 曹安生, 高元博, 等. 结构面对隧道钻爆围岩损伤影响的数值试验研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2026, 8(1): 1-12. WANG Jianxiu, CAO Ansheng, GAO Yuanbo, et al. Numerical experimental study on the influence of structure plane on the damage of surrounding rock in tunnel drilling and blasting[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(1): 1-12.

Numerical experimental study on the influence of structure plane on the damage of surrounding rock in tunnel drilling and blasting

WANG Jianxiu¹, CAO Ansheng¹, GAO Yuanbo², LIU Pengfei¹, YAN Long¹, LIN Luyu³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Water Resources and Hydropower 11th Engineering Bureau Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China;

3. Xiamen Road and Bridge Engineering Investment Development Co., Ltd., Xiamen 361026, Fujian, China)

Abstract: To reveal the influence mechanism of geometric parameters of structural planes on the damage evolution of surrounding rock and the quality of section formation during tunnel blasting excavation, taking the Xiamen Haicang Expressway Tunnel project as a prototype, a three-dimensional numerical model was established using LS-DYNA to conduct numerical experiments. The influence of different structural plane dip angles, widths, and spacing on the distribution of blasting-induced damage in the tunnel surrounding rock was investigated. The results indicated that structural planes exerted a pronounced directional control effect on blasting damage. Damage preferentially extended along the dip direction of the structural planes, while being significantly constrained in the normal direction. As the dip angle increased from 0° to 90°, the cross-sectional damage pattern transitioned from approximately symmetrical to an

收稿日期: 2026-02-04; 修回日期: 2026-02-23; 接受日期: 2026-02-24; 出版日期: 2026-03-20

基金项目: 上海市住建委重点资助项目(沪建科 2024-Z02-007); 中国水利水电第十一工程局有限公司资助项目(kh0023020232375, kh0023020250483); 厦门路桥建设集团有限公司科技资助项目(2024137)

作者简介: 王建秀(1971—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为岩石动力学与工程、工程地下水与环境控制。

E-mail: wang_jianxiu@163.com

asymmetrical expansion dominated by directional guidance, exhibiting localized and discrete characteristics due to segmentation and blocking effects. When the structural plane width increased from 0.1 m to 0.7 m, the interface weakening effect and stress wave scattering energy dissipation were significantly enhanced, leading to a notable increase in overbreak area and maximum overbreak. Conversely, as the structural plane spacing increased from 0.6 m to 2.4 m, overbreak decreased and contour smoothness improved. The research findings provided a basis for understanding energy control, parameter optimization, and the improvement of formation quality in tunnel blasting.

Keywords: structural plane; tunnel drilling and blasting; numerical experimentation; surrounding rock damage; overbreak and underbreak

Received: 2026-02-04; **Revised:** 2026-02-23; **Accepted:** 2026-02-24; **Published:** 2026-03-20

0 引言

结构面作为岩体中的地质不连续界面(如层面、节理、断层及软弱夹层等),切割岩体形成结构体,致使岩体呈现显著的非均质性、不连续性及力学各向异性,从根本上制约其整体稳定性^[1-2]。在爆破动载作用下,结构面会引发应力波产生复杂的反射与透射,导致波场与能量重分布,使得围岩损伤分布趋于复杂化,并常诱发局部超欠挖,严重影响隧道爆破成形质量,进而增加施工成本并延误工期^[3-4]。此外,过强的爆破振动易导致结构面自身力学性质劣化,显著增大岩体滑坡、崩塌以及隧道塌方、冒顶等动力灾害的风险^[5-7]。研究表明,相较于岩石本身的性质,结构面的产状、密度及其力学特性对爆破作用下围岩损伤范围与形态的控制作用更为关键^[8-9]。因此,系统揭示结构面基本参数对围岩损伤演化规律的影响,对于精准预测与防控爆破诱发的工程地质灾害具有至关重要的意义。

史春宇等^[10]采用霍普金森装置,对预制不同结构面倾角的岩样进行冲击试验,探讨结构面倾角对爆破振动波传递的影响规律。Zeng等^[11]基于节理岩体地质力学模型研究爆破应力波与岩体结构的关系,分析结构条件对应力波场分配的影响。陈雪峰等^[12]制作含节理爆破模型并设置不同节理厚度工况,研究爆破应力波传播特性。邓祥辉等^[13]依托大梁岭公路隧道开展水平层状围岩现场爆破参数优化试验,并针对拱部超挖严重、上台阶下部边墙欠挖等问题提出控制措施。胡英国等^[14]基于玉龙喀什水利枢纽开展原位爆破试验,研究结构面对爆破块度形成的作用。于建新等^[15]采用 LS-DYNA 分析水平层状围岩在不同地应力水平及不同炮孔类型条件下支护结构的振动与应力变化规律。Ma等^[16]建立单孔、双孔与四孔掏槽模型,并基于 LS-DYNA 对泥岩、砂岩及层状岩石中的应力波传播、裂缝扩展与断

裂机理进行对比分析。钟权等^[17]基于 LS-DYNA 并采用等效加载方法,模拟隧洞围岩爆破开挖过程的损伤演化,分析围岩节理面与开挖对损伤演化特性的作用。Jiang等^[18]基于 LS-DYNA 二维模型系统分析围压大小与不连续面倾角对应力波传播、岩石损伤模式及不连续面扩展行为的影响。Pan等^[19]基于 3DEC 开展层状岩体隧道爆破动力响应分析,系统讨论岩层宽度、产状与节理强度等参数对动力响应的影响。目前,有关结构面对隧道钻爆的影响已有较多的研究成果,但主要集中于单孔或少孔的简化起爆方式,难以充分反映真实多炮孔时序起爆条件下应力波叠加与空间干涉效应,有关结构面对隧道钻爆围岩损伤影响的数值试验研究亟待开展。

以厦门海沧疏港通道隧道工程为背景,选取典型试验段开展现场钻爆试验,在此基础上建立并验证数值模型。采用数值试验方法,系统探究结构面倾角、宽度与间距关键参数对围岩损伤的影响。研究形成一套“原型试验-数值验证-虚拟试验-规律分析”的系统方法,相关成果与结论可为揭示结构面对围岩爆破损伤的控制机制、优化爆破设计与施工控制提供理论依据与方法支撑。

1 材料与方法

1.1 原型分析

数值试验选择厦门海沧疏港通道隧道工程为原型。该隧道位于厦门市海沧区,围岩为Ⅲ级,部分地区第四系发育。隧道采用台阶法施工。试验段隧道的设计标准断面高 6.61 m,宽 12.48 m,面积 65.31 m²。隧道断面设计图如图 1 所示。

选择 CK1+965—CK1+972 为试验段。试验段围岩结构面发育,主要为近直立或倾斜姿态的平行结构面(见图 2)。结构面倾角较大,接近垂直,局部存在向掌子面左侧或右侧倾斜的结构面。基于统计窗法测得结构面平均间距为 1.2 m,平均宽度为 0.2 m,优势结构面产状为 240°∠76°。

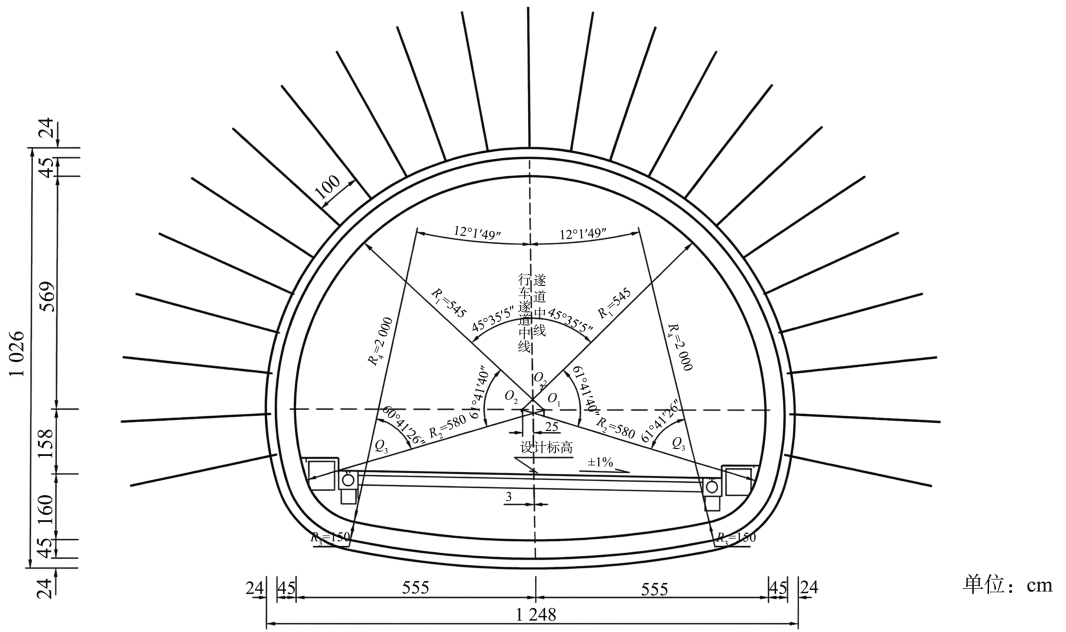
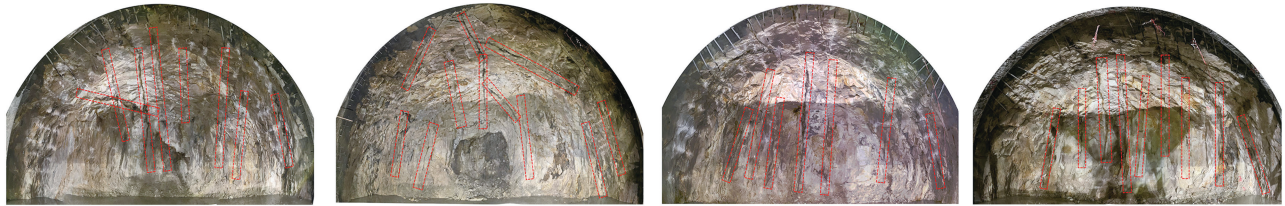


图 1 隧道断面设计图

Fig.1 Tunnel section design drawing



(a) 里程CK1+965

(b) 里程CK1+967.1

(c) 里程CK1+969

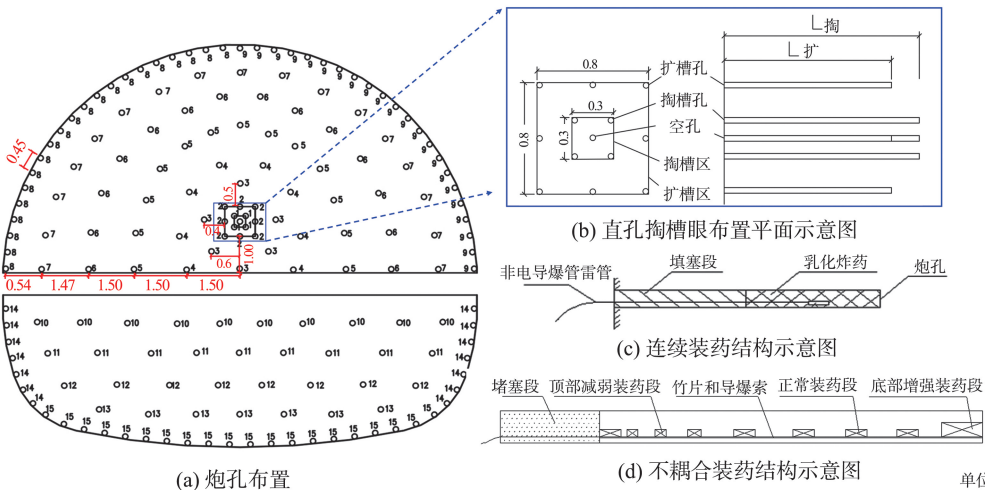
(d) 里程CK1+971.5

图 2 隧道掌子面结构面

Fig.2 Structural plane of the tunnel face

隧道采用光面爆破,周边孔孔距 0.45 m,最小抵抗线 0.54 m,周边眼沿设计轮廓线内移 0.1 m,外插角 3°。隧道共布置 181 个炮孔,每一个掘进循环进尺 1.5 m,炮孔深度 1.8 m,总装药量为 106.05 kg (见图 3)。试验段上台阶上断面共布置 113 个炮孔,总装药量为 65.35 kg。掏槽孔选用直孔掏槽,掏

槽孔位于掌子面先开挖的台阶中下部。掏槽孔、辅助孔、底板孔均采用连续装药结构,乳化炸药直径 40 mm。周边孔炮孔直径 40 mm,采用直径 34 mm 乳化炸药,为不耦合装药结构,不耦合系数 1.18。各炮段的起爆间隔为 50 μs。



(a) 炮孔布置

(d) 不耦合装药结构示意图

单位: m

图 3 台阶法爆破开挖炮孔布置

Fig.3 The layout of blast holes excavated by step blasting

1.2 模型及材料参数

根据研究区域的实际工况和爆破方案,建立长为 18 m、宽为 1.8 m、高为 11 m 的几何模型,如图 4(a)所示。岩体采用尺寸为 5 cm 的网格进行划分,炸药采用 1 cm 的网格进行划分,整体共有 10 611 629 个单元,达到了千万级别(见图 4(b))。模型网格选用 SOLID164 单元和 cm-g- μ s 单位制。构建与原型试验段产状相同的结构面,平均间距取为 1.2 m,平均宽度取为 0.2 m,倾角取为 76° (见图 4(c)、(d))。模型中炮孔布置与实际的爆破方案一致,共有 113 个炮孔(见图 4(e)~(g))。掏

槽孔、扩槽孔和辅助孔均采用耦合装药结构,炮孔直径为 40 mm。周边眼采用不耦合装药结构,炮孔直径为 40 mm,药卷直径为 34 mm,不耦合系数为 1.18。各炮段的起爆间隔为 50 μ s,通过 INITIAL-DETONATION 设置位于炸药顶部中心位置的起爆点。模型的四周采用无反射边界条件,上下表面约束 Z 方向的位移,X 和 Y 方向的转动。采用 ALE 算法进行模拟。模型中将岩体设置为固体,炸药和空气定义为流体,并设置一个炸药和空气的流动域(见图 4(h)),通过 *ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 算法将流体和固体进行耦合。

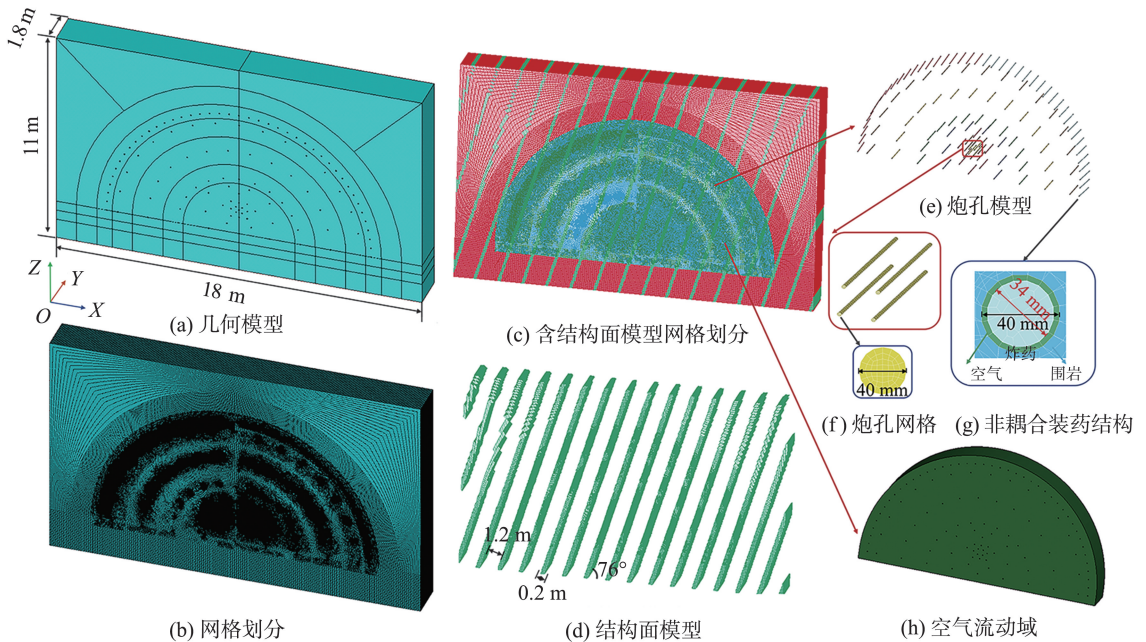


图 4 隧道爆破数值模型

Fig.4 Numerical model of tunnel blasting

岩体和结构面采用 RHT 模型^[20]。RHT 模型构建了独立的弹性极限面、屈服面与残余强度面,并通过损伤变量刻画拉伸与压剪破坏的发展过程,能够更真实地反映材料从微裂纹萌生、宏观裂缝扩展直至颗粒介质流动阶段的力学响应^[21-22]。基于现场采集的岩体和结构面岩样进行单轴压缩与巴西劈裂试验,直接获取弹性模量 E 、单轴抗压 f_c 与抗拉强度 f_t 、泊松比 ν_s 等基本参数。剪切模量 G 、拉压强度比 F_T^* 、粉碎压力 p_{c1} 、拉伸应变速率相关指数 B_1 、压缩应变速率相关指数 B_c 和 Hugoniot 多项式系数 A_1 、 A_2 、 A_3 、多项式状态方程的参数 B_0 、 B_1 、 T_1 、 T_2 可基于试验测得的参数推导出。模型给定了参考压缩应变速率 E_{oc} 、参考拉伸应变速率 E_{ot} 、断裂压缩应变速率 E_c 、断裂拉伸应变速率 E_t 、损伤参数 D_2 、罗德角相关因子 B 参数的取值。剩余的参数剪压强度比 F_s^* 、压实压力 P_{co} 、压缩屈服面参数 G_c^* 、拉伸屈服面参

数 G_t^* 、剪切模量折减系数 X_1 、破坏面参数 A 、破坏面指数 n 、拉压子午比参数 Q_0 、孔隙度指数 N 、损伤参数 D_1 、最小损伤残余应变 E_{pm} 、残余应力强度参数 A_r 、残余应力强度指数 N_r 可结合工程勘察报告和参考文献^[23]确定。研究区域岩体和结构面的 RHT 模型参数如表 1 所示。

模型中的 2# 乳化炸药采用高能炸药材料模型 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN^[24]。炸药的爆轰由 JWL 状态方程^[25]定义。爆轰过程中压力和比容关系为

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

式中, A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药常数, P 为压力, V 为相对体积, E_0 为初始比内能。炸药参数见表 2, 其中 R_0 为炸药密度, D 为爆轰速度, P_{cj} 为 Chapman-Jouguet 压力。

表 1 RHT 模型参数
Table 1 Parameters of the RHT model

材料类型	f_c/MPa	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	α_0	G/GPa	F_T^*	A_1/GPa	A_2/GPa	A_3/GPa	B_0
岩体	91.66	2 855	1.06	6.442	0.073	47.19	63.23	20.14	1.34
结构面	48.32	2 060	1.12	4.231	0.064	8.51	11.42	3.63	1.34
材料类型	B_1	T_1	T_2	p_{el}/GPa	β_c	B_t	$E_{oc}/(10^{-14}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_{ot}/(10^{-15}\cdot\text{s}^{-1})$	$E_c/(10^{-22}\cdot\text{s}^{-1})$
岩体	1.34	47.19	0	30.55	0.024 76	0.029 77	3.0	3.0	3.0
结构面	1.34	8.51	0	16.11	0.025 67	0.029 77	3.0	3.0	3.0
材料类型	$E_l/(10^{-22}\cdot\text{s}^{-1})$	D_2	B	F_s^*	P_{co}	G_c^*	G_t^*	X_1	A
岩体	3.0	1.0	0.010 5	0.38	0.06	0.4	0.7	0.48	1.6
结构面	3.0	1.0	0.010 5	0.38	0.06	0.4	0.7	0.48	1.6
材料类型	n	Q_0	N	D_1	E_{pm}	A_f	N_f		
岩体	0.56	0.64	4.0	0.04	0.012	1.6	1.6		
结构面	0.56	0.64	4.0	0.04	0.012	1.6	1.6		

表 2 炸药模型参数
Table 2 Parameters of the explosive model

$R_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{ej}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0
1 500	7 450	22	562.3	23.29	5.25	1.77	0.3	0.07

周边眼采用不耦合装药,炸药与炮孔孔壁之间为空气。模型中炸药的流动域采用的也是空气材料。研究中采用 * MAT_NULL 模型和 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程^[24]模拟空气材料。其状态方程如式(2)所示。

$$P_a = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E, \quad (2)$$

式中, P_a 为爆轰压力, C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 为状态方程常数, μ 为比例体积, E 为内能参数。空气参数如表 3 所示。

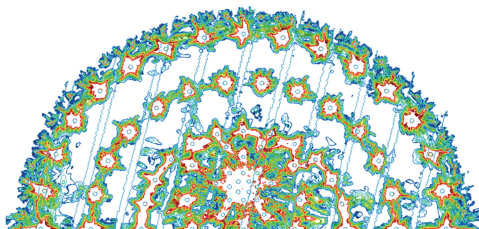
表 3 空气材料及状态方程参数
Table 3 Air materials and equation of state parameters

密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	$E/10^{-4}$ MPa
0.012 9	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5

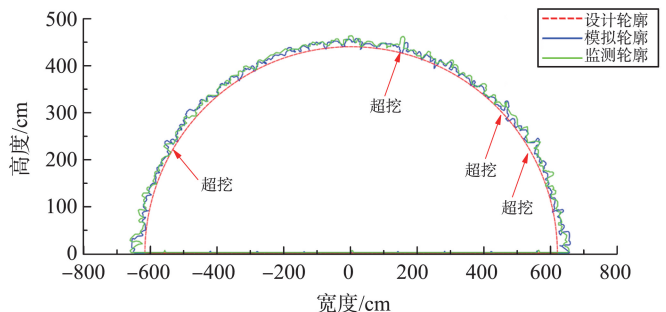
1.3 模型有效性验证

为验证数值模型的有效性,将现场监测和模拟中得到的隧道轮廓超欠挖进行对比(见图 5)。将模拟得到的隧道围岩损伤图 5(a)导入 Image J 软件中提取隧道轮廓线,并转化为 DXF 格式。将其导入 CAD 中,通过自编插件和设计隧道轮廓进行对比,得到其超欠挖信息,如图 5(b)所示。模拟和现场监测的开挖轮廓线与设计曲线形态较为接近,在结构面与断面相交的位置出现局部超挖,基本没有出现欠挖。模拟中隧道断面超挖面积为 $3.255 9 \text{ m}^2$,与

现场测得的超挖面积 $3.661 64 \text{ m}^2$ 较为接近。设计断面面积为 65.31 m^2 ,现场试验断面轮廓面积为 68.57 m^2 ,断面超挖率为 4.99%;数值模拟断面轮廓面积为 68.97 m^2 ,断面超挖率为 5.6%。在监测和模拟断面中每隔 10° 测量一个点的超欠挖值,模拟中各测点的平均超挖为 $0.154 4 \text{ m}$,现场测试的为 $0.162 6 \text{ m}$,其误差为 5.04%。综合可知,数值模型具有较高的可信度,能够较为准确的模拟含结构面岩体隧道的爆破开挖。



(a) 模拟中隧道围岩损伤



(b) 隧道开挖轮廓和设计轮廓对比图

图 5 隧道围岩损伤和超欠挖信息

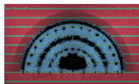
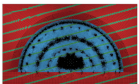
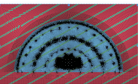
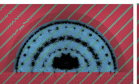
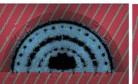
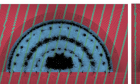
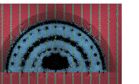
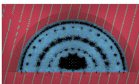
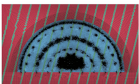
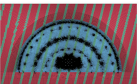
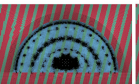
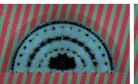
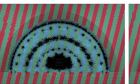
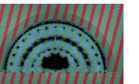
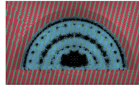
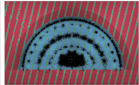
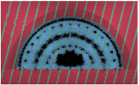
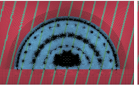
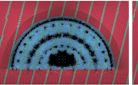
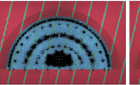
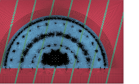
Fig.5 Tunnel surrounding rock damage and overbreak and underbreak information

1.4 数值试验工况设计

数值试验考虑结构面倾角、宽度与间距对钻爆质量的影响。试验中采用的结构面倾角为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 76° 、 90° ，结构面宽度为0.1、

0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 m，间距为0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4 m。以实际工况为基础，单次改变一个参数，表4为三个参数对应计算工况的有限元模型。

表4 计算工况
Table 4 Calculation conditions

结构面参数	结构面基本参数	计算工况						
		一	二	三	四	五	六	七
倾角	间距 1.2 m, 宽度 0.2 m							
		0°	15°	30°	45°	60°	76°	90°
宽度	间距 1.2 m, 倾角 76°							
		0.1 m	0.2 m	0.3 m	0.4 m	0.5 m	0.6 m	0.7 m
间距	倾角 76° , 宽度 0.2 m							
		0.6 m	0.9 m	1.2 m	1.5 m	1.8 m	2.1 m	2.4 m

2 结果与讨论

2.1 围岩损伤演化过程分析

隧道的钻爆开挖对围岩质量的影响可采用损伤表征。选取与原型现场试验一致的结构面工况开展钻爆过程中围岩损伤演化分析。隧道钻爆中围岩损伤演化过程如图6所示。由图6(a)可知，损伤最先在掏槽孔附近出现并迅速增大，形成初始破裂，且损伤局限于爆源附近，尚未出现方向性扩展。由图6(b)可知，由于掏槽形成的自由面使反射拉伸作用增强，扩槽孔起爆后围绕掏槽区出现环状损伤带。当损伤扩展至倾斜结构面附近时，可观察到损伤分布出现形态畸变。随着辅助孔起爆（见图6(c)），损伤开始向掌子面外侧扩展，但扩

展形态明显受结构面倾角影响，损伤在结构面倾向方向上被拉伸。损伤沿结构面倾向方向呈连续扩展，而在垂直结构面方向迅速衰减，呈现明显不对称分布，说明入射应力波在结构面处发生折射并沿层理传播，形成导波效应，使能量集中于结构面一侧并维持较长传播距离。由图6(e)可知，随着更多辅助孔起爆，多源应力波在结构面附近相互叠加、反射与折射，使层理倾向方向的损伤进一步加强并逐渐连成带状。进入周边孔起爆阶段（见图6(f)），轮廓线附近出现一圈新的浅层损伤带，其分布仍呈现沿结构面方向强化、垂直方向弱化的特征。在 $1\ 050\sim 2\ 000\ \mu\text{s}$ 中，爆破能量逐渐耗散，损伤区趋于稳定，远处围岩基本保持完整。综上，结构面对爆破损伤具有显著方向性控制，使损伤主要沿结构面延伸、垂直方向受限。

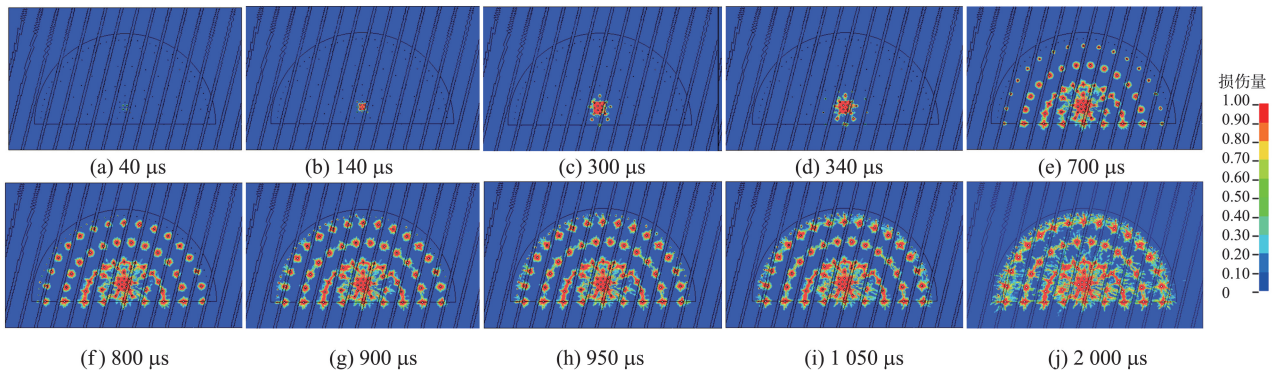


图6 爆破围岩损伤演化过程

Fig.6 Evolution process of surrounding rock damage caused by blasting

2.2 结构面倾角对围岩损伤影响

不同结构面倾角中围岩的损伤分布如图7所

示。当结构面倾角较小($0^\circ\sim 15^\circ$)时(见图7(a)、(b)),损伤带沿结构面方向呈现条带化与断续连接

现象,但整体仍保持较好的左右对称性,表明此时结构面主要表现为波阻抗突变界面,应力波在结构面处发生反射、透射与散射,使损伤更倾向于沿结构面扩展。当倾角增至中等范围(30°~60°)时(见图7(c)~(e)),损伤各向异性显著增强。高损伤区由近似环带逐步演化为沿结构面倾向拉伸的斜向带状,并出现明显的非对称性。这表明结构面对损伤的导向作用增强,斜入射应力波在结构面上产生较大的切向分量,易诱发沿结构面剪滑错动,导致损伤沿结构面方向优先扩展与连通。当结构面倾角增大至76°~90°时(见图7(g)、(h)),损伤定向扩展仍可观察到,但结构面的分割阻隔效应逐步占优,跨结构面的能量传递效率降低。尤其在90°工况中(见

图7(g)),损伤分布重新趋于左右对称,高损伤主要局限于爆源邻域与轮廓控制带附近,结构面两侧损伤联系被削弱,体现出直立结构面对爆破应力波的强反射与散射作用。结构面倾角显著控制围岩损伤由整体近对称扩展向定向主导扩展,再向分割阻隔主导演化的过程。当倾角较小时,应力波以结构面反射、散射与界面耗能为主,能量在结构面两侧分配较均衡,损伤形态整体对称性较强;当倾角处于中等范围时,结构面的导向作用最为突出,应力波与裂纹更易沿结构面倾向侧迁移,导致损伤非对称性增强;当倾角接近垂直时,结构面分割与阻隔效应占主导,跨结构面的能量传递受限,裂纹扩展连通性降低,损伤逐渐表现为局部化与离散化。

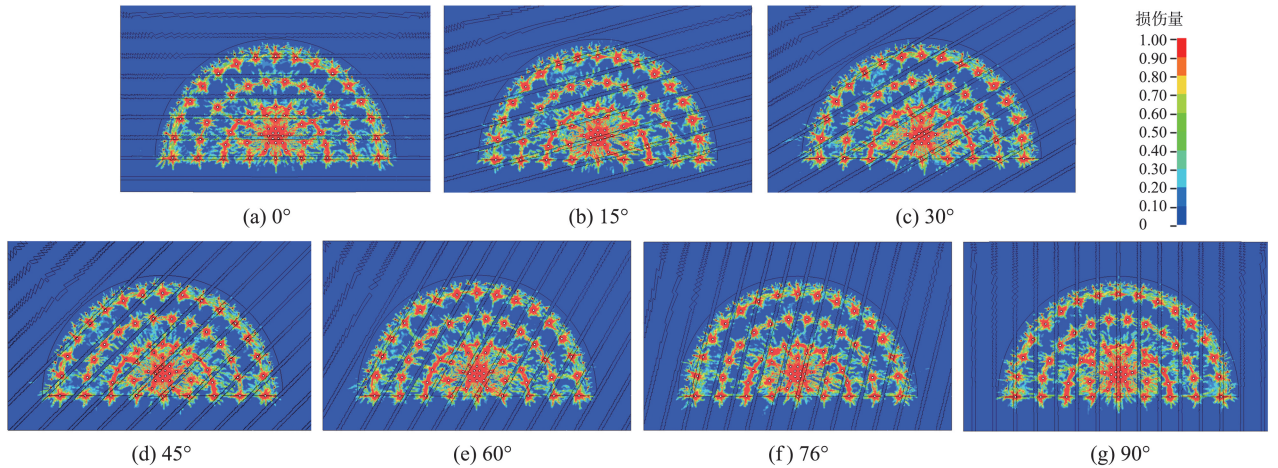


图 7 不同倾角结构面围岩损伤分布

Fig.7 Damage of rock masses with structural planes of different inclinations

不同倾角结构面断面轮廓超欠挖情况如图 8 所示。在结构面与隧道轮廓相交处,隧道超挖要显著

大于其他区域。不同倾角结构面断面轮廓的超挖面积、平均线性超挖和最大线性超挖如表 5 所示。

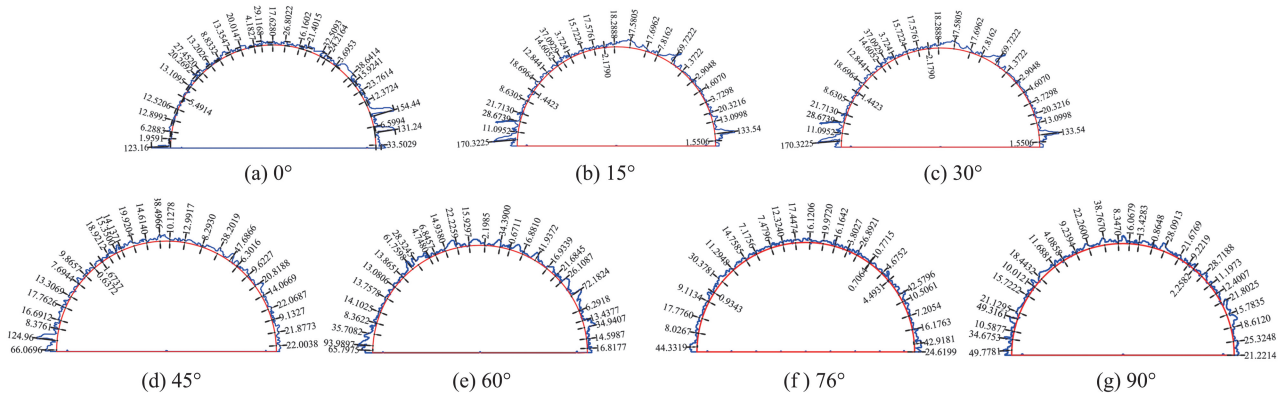


图 8 不同倾角结构面围岩损伤分布

Fig.8 Damage of rock masses with structural planes of different inclinations

不同倾角隧道相较现场实测围岩的超挖面积变化范围为 0.88~1.26 倍,平均线性超挖变化范围为 0.94~1.77 倍,最大线性超挖变化范围为 0.78~3.03 倍。这表明结构面作为弱化界面与波传播不连续面,会改变爆破损伤的扩展路径并降

低围岩整体抗扰能力,从而导致轮廓超挖加剧。从超挖面积看:30°达到最大,60°次之,而 76°最小。说明在中等倾角条件下,结构面对裂纹贯通具有更强的导向作用,损伤更易沿结构面倾向形成带状扩展并与周边眼损伤带耦合,导致轮廓外

扩范围增加,超挖面积显著增加。当倾角增至较大倾角($76^{\circ}\sim 90^{\circ}$)时,结构面起到分割阻隔作用,跨结构面能量传递与裂纹连通被削弱,使超挖面积减小。从平均线性超挖和平均超挖看,随着倾角增大,超挖总体降低,说明大倾角结构面中超挖得到明显抑制。综合可知: $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 工况最大线性超挖更显著,表现为局部显著超挖; $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 工况以超挖面积偏大为特征,表现为轮廓整体外扩;当倾角增至 $76^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,结构面阻隔效应增强,裂纹连通与能量传递受限,超挖总体降低。

表5 不同倾角结构面隧道轮廓超挖

Table 5 Overbreak of tunnel contours with structural planes of different inclinations

结构面倾角/ $(^{\circ})$	超挖面积/ m^2	平均线性超挖/ m	最大线性超挖/ m
0	3.993 7	0.288 1	1.544 5
15	4.040 1	0.257 8	1.703 2
30	4.621 5	0.270 7	1.600 8
45	3.834 4	0.216 2	1.249 6
60	4.532 3	0.252 5	0.939 9
76	3.258 0	0.154 4	0.443 3
90	3.375 6	0.188 1	0.497 7

2.3 结构面宽度对围岩损伤影响

含不同宽度结构面围岩的损伤分布如图9所示。含有结构面的围岩损伤分布由环带型向明显

各向异性转变。结构面宽度进一步决定了这种各向异性损伤的连通程度与影响范围。当结构面宽度较小时($0.1\sim 0.2\text{ m}$),结构面虽已对应力波场产生扰动,但对跨结构面的传递仍保留一定通道,损伤总体仍以炮孔周围高损伤斑块与轮廓损伤圈为主,仅在结构面附近出现方向性拉伸与轻微不均匀外扩,左右差异开始显现但尚不突出。宽度增至中等范围(约 $0.3\sim 0.5\text{ m}$)后,结构面消减与界面多次反射效应增强,孔间损伤更易沿结构面方向发生贯通,轮廓附近损伤圈的连续性被削弱并转化为更明显的台阶化与条带化外扩,倾向侧的损伤连通与外偏特征更为突出,表明此时结构面对裂纹扩展的导向作用与应力波场叠加效应处于更敏感阶段。宽度增大至 $0.6\sim 0.7\text{ m}$ 时,结构面的分割阻隔与耗能作用占主导,跨结构面的应力波透射与裂纹连通受到更强抑制,损伤轮廓连通性降低、分布趋于离散化。总体而言,结构面宽度对损伤演化并非单调增强或减弱,而呈现明显的阶段性:宽度较小($0.1\sim 0.2\text{ m}$)时,损伤仍以近环带状为主,仅出现轻微偏置;宽度中等($0.3\sim 0.5\text{ m}$)时,损伤最易沿结构面贯通并条带化外扩;宽度较大($0.6\sim 0.7\text{ m}$)时,阻隔耗能增强,连通性下降,损伤趋于局部化、离散化。

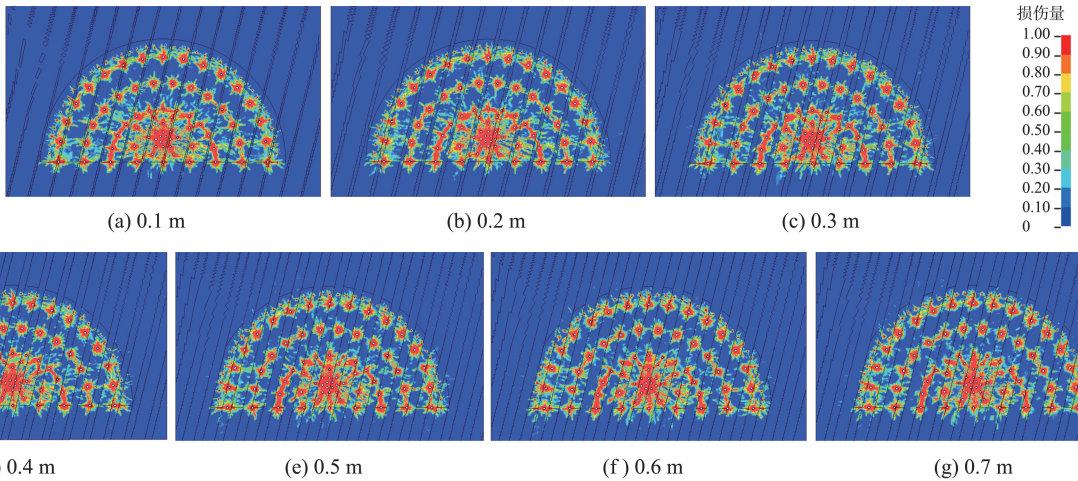


图9 不同宽度结构面围岩损伤分布

Fig.9 Damage of rock masses with structural planes of different widths

不同宽度结构面断面轮廓与设计轮廓的对比情况如图10所示,不同宽度结构面断面轮廓的超挖面积、平均线性超挖和最大线性超挖如表6所示。结构面宽度增大将显著恶化断面成型质量。当宽度为 0.1 m 时,超挖较小,轮廓较平顺。宽度增至 0.2 m 后,轮廓外扩与局部起伏开始明显。当宽度增加至 0.3 m 和 0.4 m 的中等范围时,拱部及拱肩附近出现更突出的台阶化,断面局部超挖显著增加。宽度增

大至 $0.5\sim 0.7\text{ m}$,轮廓总体外扩进一步加剧,超挖面积与平均线性超挖增加并在 0.7 m 达到最大。但最大线性超挖随宽度呈非单调变化,表明在较大宽度条件下超挖主要表现为断面整体外扩,而局部最大偏离更受应力波叠加效应与块体失稳破坏模式控制。宽度增加提高了结构面夹层的柔度与弱化程度,孔间裂隙更易沿结构面贯通并诱发拱部块体松动,从而使超挖面积与平均线性超挖整体增大;而在

0.3~0.4 m 阶段,结构面既足够弱化以触发块体解体,又仍保持一定的应力波耦合与叠加条件,更易形成拱部局部强破坏与大块剥落,导致最大线性超挖达到峰值。结构面宽度对断面超挖表现为随宽度增

加整体外扩,而局部极端超挖在中等宽度更为突出的规律,这与前述损伤由环带向定向贯通、再向局部化演化的趋势具有一致性。

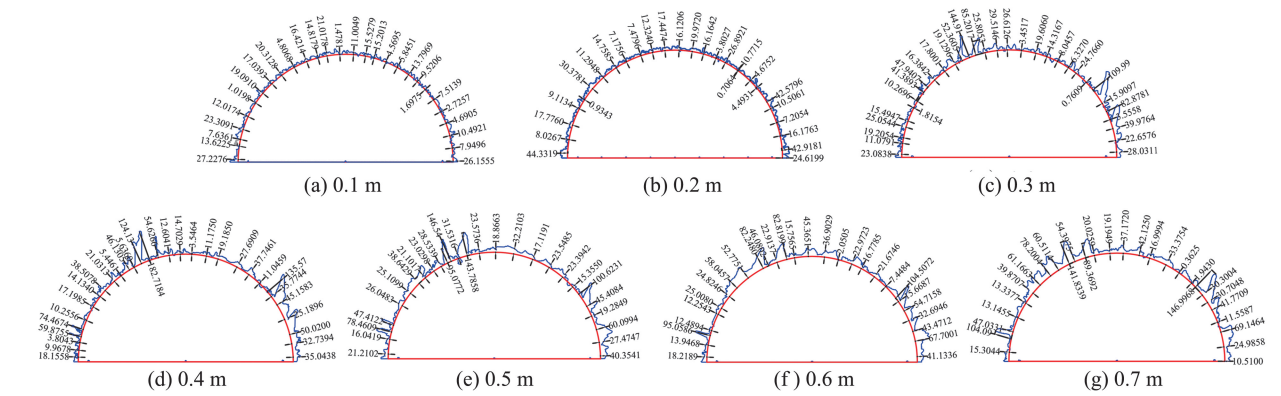


图 10 不同宽度结构面围岩损伤分布

Fig.10 Damage of rock masses with structural planes of different widths

表 6 不同宽度结构面隧道轮廓超挖

Table 6 Overbreak of tunnel contours with structural planes of different widths

结构面宽度/m	超挖面积/ m ²	平均线性超挖/m	最大线性超挖/m
0.1	2.397 1	0.124 0	0.272 3
0.2	3.258 0	0.154 4	0.443 3
0.3	4.549 4	0.330 2	1.449 1
0.4	5.934 9	0.371 1	1.827 1
0.5	6.453 6	0.387 7	1.465 4
0.6	7.142 7	0.429 5	1.045 1
0.7	7.551 0	0.459 4	1.469 9

2.4 结构面间距对围岩损伤影响

含不同间距结构面围岩的损伤分布如图 11 所示。损伤明显受结构面密度控制,表现为沿结构面方向的条带化与分段化特征,且轮廓附近损伤带的连续性随间距变化而显著改变。当结构面间距较小(0.6~0.9 m)时,结构面密集,传播路径中界面较多,应力波在多次反射、散射与界面耗能作用下快速

衰减,导致损伤更集中于孔周及掏槽区附近,轮廓外侧损伤带被结构面切割成若干分段,贯通性较弱,整体外扩范围相对受限。间距增大至中等水平(1.2~1.8 m)后,结构面密度降低,波能衰减减弱,孔间损伤更易发生连通,轮廓附近损伤带的连续性增强,同时结构面的定向控制更易显化,损伤沿结构面方向外扩的趋势更明显,拱部局部区域更易形成较强的损伤聚集与延伸。间距较大时(2.1~2.4 m)时,结构面对损伤的分割作用继续减弱,整体损伤形态逐渐向完整围岩靠近,轮廓损伤带更趋连续和平顺,但仍可观察到局部区域受结构面导向影响而出现轻微的不均匀扩展。综合来看,结构面间距通过控制结构面密集程度,进而调节应力波在围岩中的耗能强度与裂纹连通条件:小间距强化分割与耗能,使损伤趋于局部集中且难以贯通;中等间距更利于损伤连通并沿结构面方向扩展;大间距损伤趋近于完整围岩工况所呈现的连续扩展特征。

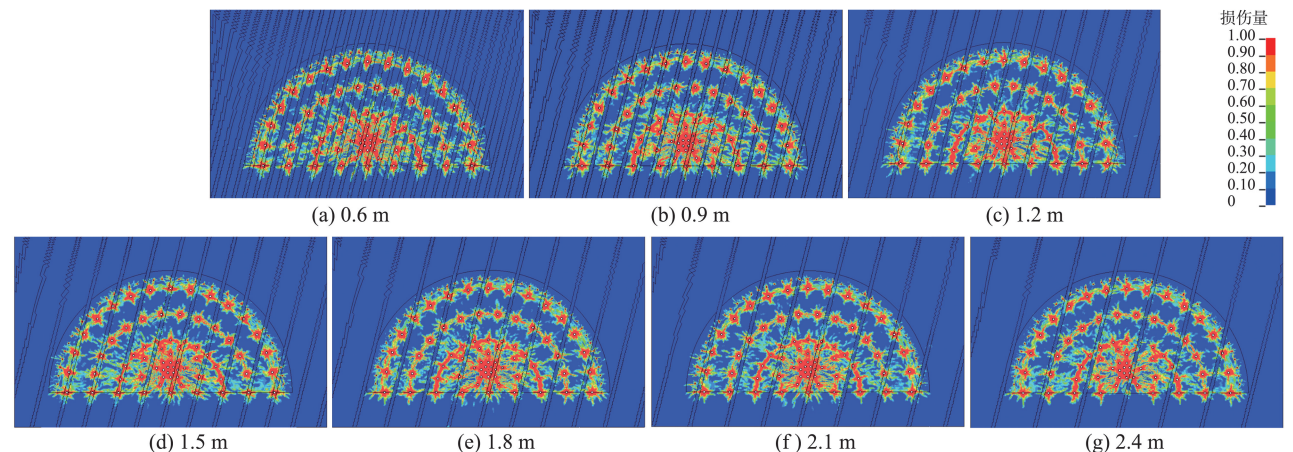


图 11 不同间距结构面围岩损伤分布

Fig.11 Damage of rock masses with structural planes of different spacing

不同间距结构面断面轮廓超欠挖情况如图 12 所示,不同间距结构面断面轮廓的超挖面积、平均线性超挖和最大线性超挖如表 7 所示。含结构面围岩的开挖断面整体以超挖为主,轮廓线在拱部与拱脚附近更易出现外扩与台阶化起伏,局部伴随少量欠挖,反映出结构面作为弱化界面使损伤更倾向沿结构面贯通并诱发围岩块体松动脱落。随着结构面间距由 0.6 m 增大至 2.4 m,断面轮廓的整体偏离程度逐步减弱,轮廓形态由明显锯齿状、局部突出的不规则外扩,逐渐过渡为更连续、接近设计弧线的平顺外形。由表 7 可知,超挖面积随结构面间距增大总体单调降低,由 0.6 m 时的 4.397 8 m² 降至 2.4 m 时的

2.571 1 m²;平均线性超挖和最大线性超挖呈现明显的非单调波动:小间距(0.6~0.9 m)阶段超挖较大,体现为多条结构面参与的贯通破裂与块体化剥落;在 1.2 m 间距下超挖处于相对较低水平,说明该间距下超挖更均匀且极端超挖得到一定抑制;当间距增大至 2.1~2.4 m 时,尽管平均水平进一步降低,但 2.1 m 出现最大线性超挖,表明在结构面数量减少后,超挖由分布性外扩转向更局部、偶发的极值控制,即当单条结构面与开挖轮廓在不利位置相交时,易形成少数但更突出的极端超挖点。总体而言,增大结构面间距能够有效降低超挖并改善轮廓成型质量。

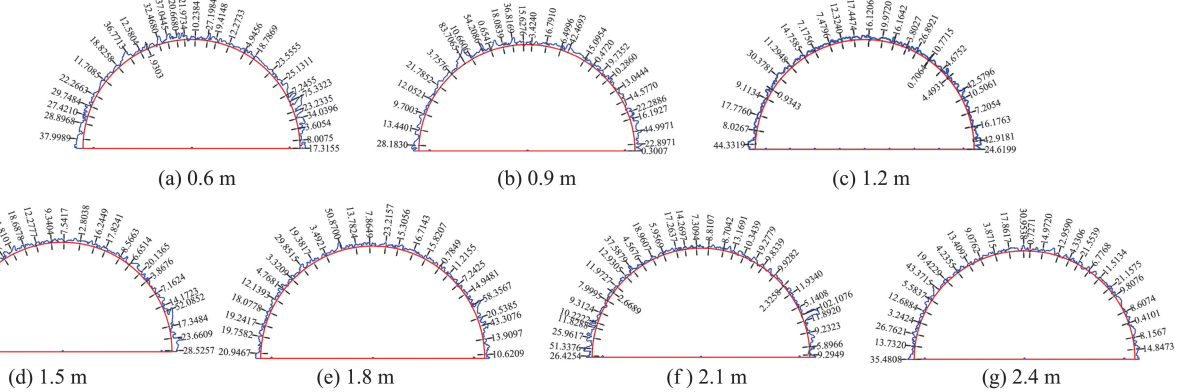


图 12 不同间距结构面围岩损伤分布

Fig.12 Damage of rock masses with structural planes of different spacing

表 7 不同间距结构面隧道轮廓超挖

Table 7 Overbreak of tunnel contours with structural planes of different spacing

结构面间距/m	超挖面积/m ²	平均线性超挖/m	最大线性超挖/m
0.6	4.397 8	0.231 5	0.753 3
0.9	4.177 2	0.196 7	0.837 1
1.2	3.258 0	0.154 4	0.443 3
1.5	3.167 7	0.190 6	0.587 6
1.8	3.016 7	0.182 8	0.583 5
2.1	2.804 2	0.159 5	1.021 0
2.4	2.571 1	0.138 4	0.433 7

3 结论

(1) 结构面倾角较小时,损伤分布整体较对称,轮廓总体较平顺;倾角中等时,结构面导向效应增强,损伤非对称性显著加剧,轮廓外扩、起伏突出;倾角较大时,分割阻隔作用增强,损伤趋于局部离散,超挖整体受抑且轮廓复杂度减弱。

(2) 结构面宽度较小时,超挖与轮廓起伏相对较弱;宽度中等时,结构面弱化与应力波场耦合显著,损伤沿结构面贯通并条带化扩展,超挖面积与轮

廓台阶化起伏显著增强;宽度较大时,隔离阻隔与耗能作用增加,损伤转为局部集中、零散分布,轮廓波动减小。

(3) 结构面间距较小时,损伤以局部集中为主,超挖面积与轮廓粗糙度较大;间距中等时,削峰效应减弱,非对称响应更为突出;间距较大时,结构面控制作用减弱,损伤形态更连续、轮廓更平顺且超挖显著降低。

参考文献:

- [1] 韩世迎,王航龙,彭俊,等. 结构面影响深埋隧道硬质围岩岩爆特征试验研究[J]. 岩土力学, 2025, 46(6): 1765-1776.
HAN Shiying, WANG Hanglong, PENG Jun, et al. Experimental investigation on influence of structural plane on rockburst characteristics of hard surrounding rock in a deep-buried tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(6): 1765-1776.
- [2] 胡新伟,杨石扣,孙宽,等. 含结构面深埋隧洞围岩分区破裂机理研究[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(增刊2): 572-580.
HU Xinwei, YANG Shikou, SUN Kuan, et al. Research on zonal disintegration mechanisms of surrounding rock in

- deep-buried tunnels with structural planes [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21 (Suppl.2): 572-580.
- [3] 马建军, 沈琨越, 郑楠, 等. 基于 JHB-4D-LSM 的含软弱夹层隧道围岩爆破动力分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(3): 47-57.
MA Jianjun, SHEN Kunyue, ZHENG Nan, et al. Blasting analysis of tunnel surrounding rock with weak interlayers based on JHB-4D-LSM [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(3): 47-57.
- [4] 徐帮树, 张万志, 石伟航, 等. 节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(6): 1248-1255.
XU Bangshu, ZHANG Wanzhi, SHI Weihang, et al. Experimental study of parameters of tunneling blasting in jointed layered rock mass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1248-1255.
- [5] 单仁亮, 柏皓博, 孙鹏, 等. 深部岩体结构面动力特性与致灾效应研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(6): 21-41.
SHAN Renliang, BAI Haobo, SUN Peng, et al. Research progress on the dynamic characteristics of structural planes in deep rock mass and associated disaster-inducing effects [J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(6): 21-41.
- [6] 朱金养, 郭浩森, 罗文俊. 深埋硬岩隧洞岩爆风险与结构面倾角关系探讨[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1): 60-69.
ZHU Jinyang, GUO Haosen, LUO Wenjun. Discussion on relationship between rockburst risk and structural plane inclination of deep hard rock tunnel [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1): 60-69.
- [7] TAO Z G, SHU Y, YANG X J, et al. Physical model test study on shear strength characteristics of slope sliding surface in Nanfen open-pit mine [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2020, 30(3): 421-429.
- [8] 李地元, 邱加冬, 李夕兵. 冲击载荷作用下层状砂岩动态拉压力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2091-2097.
LI Diyuan, QIU Jiadong, LI Xibing. Experimental study on dynamic tensile and compressive properties of bedding sandstone under impact loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(10): 2091-2097.
- [9] 陈毅. 深埋硬岩隧道结构面对岩爆破坏特征的影响研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(7): 105-108.
CHEN Yi. Research on the influence of structural plane of deep buried hard rock tunnel on rockburst failure characteristics [J]. Water Resources and Power, 2024, 42(7): 105-108.
- [10] 史春宇, 张志鸿, 周杰, 等. 不同角度结构面岩体的爆破振动传播特性研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(5): 184-189.
SHI Chunyu, ZHANG Zhihong, ZHOU Jie, et al. Study on blasting vibration transmission characteristics of rock mass of structural planes with different angles [J]. Mining Research and Development, 2023, 43(5): 184-189.
- [11] ZENG S, WANG S P, SUN B, et al. Propagation characteristics of blasting stress waves in layered and jointed rock caverns [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 36(3): 1559-1573.
- [12] 陈雪峰, 赵孝学, 汪海波, 等. 节理充填岩体爆炸应力波传播规律模型试验与应用研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(12): 130-134.
CHEN Xuefeng, ZHAO Xiaoxue, WANG Haibo, et al. Model tests and application research on propagation laws of blasting stress wave in jointed and filled rock mass [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(12): 130-134.
- [13] 邓祥辉, 陈建勋, 罗彦斌, 等. 水平层状岩体隧道爆破控制技术[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 73-80.
DENG Xianghui, CHEN Jianxun, LUO Yanbin, et al. Blasting control technology of horizontal stratified rock tunnel [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2017, 37(2): 73-80.
- [14] 胡英国, 饶宇, 柴朝政, 等. 岩体结构面对爆破块度的影响机制研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(9): 1870-1879.
HU Yingguo, RAO Yu, CHAI Chaozheng, et al. Influence mechanism of rock joints on blasting fragmentation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(9): 1870-1879.
- [15] 于建新, 刘文金, 张馨, 等. 初始地应力影响下水平层状岩体隧道支护结构的爆破振动响应特征[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 100-110.
YU Jianxin, LIU Wenjin, ZHANG Xin, et al. Blasting vibration response characteristics of tunnel support structures in horizontally layered rock masses under initial in-situ stress [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2025, 44(5): 100-110.
- [16] MA L H, JIANG X, CHEN J, et al. Analysis of damages in layered surrounding rocks induced by blasting during tunnel construction [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2021, 21(7): 2150089.
- [17] 钟权, 冷振东, 彭峥, 等. 节理岩体隧洞开挖爆破损伤

- 特性及爆破方案研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35 (2): 89-94.
- ZHONG Quan, LENG Zhendong, PENG Zheng, et al. Blasting excavation of deep tunnel with jointed rock mass: damage properties and schemes [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35 (2): 89-94.
- [18] JIANG X D, XUE Y G, KONG F M, et al. Dynamic responses and damage mechanism of rock with discontinuity subjected to confining stresses and blasting loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 172:104404.
- [19] PAN Y D, LI S Y, GUO J, et al. Numerical study on response characteristics of layered rocks under tunnel blasting [C]//Proceedings of the 2022 12th International Conference on Environment Science and Engineering (ICESE 2022). Singapore: Springer, 2023: 118-128.
- [20] RIEDEL W, KAWAI N, KONDO K I. Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(2): 283-293.
- [21] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures [J]. Journal of Applied Mechanics, 2011, 78(5): 051003.
- [22] TAYLOR L M, CHEN E P, KUSZMAUL J S. Microcrack-induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1986, 55(3): 301-320.
- [23] 骆正坤, 李新平, 孙吉主, 等. 深埋跨断层隧道爆破开挖动力响应规律研究[J]. 爆破, 2020, 37(3): 56-62.
- LUO Zhengkun, LI Xinping, SUN Jizhu, et al. Study on dynamic response law of blasting excavation in deep cross-fault tunnel [J]. Blasting, 2020, 37(3): 56-62.
- [24] BRIAN G. LS-DYNA[®] keyword user's manual, volume II: material models [M]. California, USA: Livermore Software Technology Corporation, 2012: 66-68.
- [25] MEYER R, KÖHLER J, HOMBURG A. Explosives [M]. New York, USA: Wiley, 2002: 253.

(编辑:张延欣)

· 通知消息 ·

《隧道与地下工程灾害防治》征稿细则

《隧道与地下工程灾害防治》是由国家教育部主管,山东大学主办,国内外公开发行的专业性学术期刊,国内统一连续出版物号 37-1516/U,国际标准连续出版物号 2096-5052,RCCSE 中国核心学术期刊,中国知网(CNKI)检索,《公路运输领域高质量科技期刊分级目录》T2 级,美国 EBSCO 数据库、美国 GeoRef 数据库、瑞典 DOAJ 数据库收录。

一、宗旨及内容

本刊旨在立足中国、面向世界、服务学者、服务社会、引领国际学术前沿,为从事隧道与地下工程研究的专业工作者、高校教师及研究生提供一个多学科交叉融合、开放的学术交流平台。

本刊重点报道国内外隧道与地下工程建设进展、灾害预报与防治、安全控制、信息化、智能化、多学科交叉等方面的重要研究成果,及其他行业领域的新技术、新方法、新装备、新工艺等在隧道与地下工程领域的应用,大力宣传国内外隧道与地下工程灾害防治技术的学术理论、创新思想。

二、投稿、审稿和稿件录用

1. 所有稿件均未在国内外公开发表,请勿一稿多投。

2. 投稿可通过网络系统投稿,网址: http://tunnel.sdujournals.com/Journalx_sdydxgczhfz/authorLogOn.action。作者可扫描我刊二维码关注“隧道与地下工程灾害防治”,微信号 sydzhfz,随时了解稿件进展情况。

3. 本刊所有稿件采用同行专家评议(双盲审稿)。本刊一般自收到稿件起 3 个月内返回审稿意见,外审专家因故未能及时发回审稿意见者,时间可能适当延长,在此期限后作者如未收到本刊联系修改的函件等,在书面通知编辑部并收到编辑部确认回复之后,可对稿件另作处理。稿件定稿后作者不得随意要求撤稿和更改。凡向本刊投稿的作者,均视为同意此约定。

4. 专家审稿请登录: <http://tunnel.sdujournals.com>“专家审稿”。

5. 所有经审稿专家评审通过并录用的稿件,免收审稿费。

6. 文稿刊出后寄送 3 份当期纸刊以致谢。

