

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.002

## 隧道周边孔空孔导向孔间爆生裂纹扩展机制研究<sup>\*</sup>

颜晓明<sup>1</sup>,董千<sup>2a,2b</sup>,董曼平<sup>1</sup>,徐小龙<sup>2a,2b</sup>,潘关勇<sup>1</sup>,孙金山<sup>2a,2b</sup>,姚颖康<sup>2a,2b</sup>,魏东<sup>1</sup>

(1. 湖北交投建设集团有限公司,武汉 430070;2. 江汉大学 a. 精细爆破国家重点实验室;  
b. 湖北(武汉)爆炸与爆破技术研究院,武汉 430056)

**摘要:** 隧道钻爆法施工中,周边孔孔间爆生裂纹扩展贯通效果决定爆破开挖轮廓面的成形质量。为探究空孔对隧道周边孔孔间爆生裂纹扩展规律及贯通效果的影响机制,首先基于隧道周边孔空孔导向双孔起爆裂纹扩展模型试验,研究有/无空孔导向下周边孔孔间裂纹扩展贯通效果,并分析炮孔间距 $L$ 及不耦合系数 $K$ 对孔间裂纹扩展贯通的影响机制;其次通过数值模拟研究有/无空孔导向下孔间应力波传播规律,并进一步揭示空孔对于孔间裂纹扩展贯通的导向机制。结果表明:无空孔导向时,当 $K=2.0$ 且 $L=11D$ (炮孔直径)或 $K=1.25/1.5$ 且 $L=13D$ 时,炮孔间裂纹贯通效果相对较好;有空孔导向时,当 $K=1.5$ 且 $L=13D$ 时,空孔的导向作用最为显著,炮孔间形成与炮孔连心线几乎重合的平整贯通裂纹;空孔孔壁处反射拉伸波与后续入射波叠加形成的应力集中效应使孔间裂纹扩展路径向炮孔连心线方向偏转,从而实现对炮孔间裂纹扩展贯通的导向作用;此外,空孔导向下周边孔裂纹区半径明显小于无空孔工况,表明空孔具有引导周边孔孔间裂纹定向贯通并抑制其沿非预期方向扩展的双重调控机制。

**关键词:** 隧道爆破;周边孔;空孔导向;裂纹扩展;模型试验;数值模拟

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)02-0014-12

## Blast-induced Crack Propagation Mechanism Between Tunnel Perimeter Holes Guiding Effect of Empty Holes

YAN Xiao-ming<sup>1</sup>, DONG Qian<sup>2a,2b</sup>, DONG Man-ping<sup>1</sup>, XU Xiao-long<sup>2a,2b</sup>,  
PAN Guan-yong<sup>1</sup>, SUN Jin-shan<sup>2a,2b</sup>, YAO Ying-kang<sup>2a,2b</sup>, WEI Dong<sup>1</sup>

(1. Hubei Communications Investment Construction Group Co., LTD., Wuhan 430070, China;  
2. a. State Key Laboratory of Precision Blasting; b. Hubei(Wuhan) Institute of Explosion  
Science and Blasting Technology, Jiangnan University, Wuhan 430056 China)

**Abstract:** The quality of tunnel contour surfaces in drilling and blasting construction is fundamentally governed by the propagation efficiency and coalescence behavior of fractures generated between perimeter blast holes. This research employed physical modeling and computational analysis to investigate the influence of empty holes around a tunnel perimeter on the propagation law and coalescence effectiveness of cracks. Firstly, comparative model experiments were conducted to evaluate crack propagation and coalescence effectiveness between perimeter holes with and

收稿日期(Date of reception): 2025-09-11

网络首发日期(Published online): 2025-11-19

作者简介: 颜晓明(1979-),男,副高级工程师、本科,从事公路交通工程方面的科研和管理工作,(E-mail)3426808904@qq.com。

通信作者: 董千(1987-),男,副教授、博士,主要从事隧道与地下工程爆破理论与技术、岩石动力学方面的教学与研究工作,(E-mail)dongqian@jhun.edu.cn。

基金项目: 湖北省教育厅科研计划重点项目(D20234404)

**About the author:** YAN Xiao-ming(1979-), male, deputy senior engineer, undergraduate, mainly engaged in scientific research and management work in highway traffic engineering, (E-mail)3426808904@qq.com.

**Corresponding author:** DONG Qian(1987-), male, associate professor, Ph. D, mainly engaged in teaching and research work in the fields of tunnel and underground engineering blasting theory and technology, as well as rock dynamics, (E-mail)dongqian@jhun.edu.cn.

**Fund Programs:** Key Scientific Research Project of Hubei Provincial Department of Education(D20234404)

without relief-hole guidance, and to systematically analyze how blast-hole spacing ( $L$ ) and the decoupling coefficient ( $K$ ) affect these processes. Subsequently, numerical simulations were employed to study the stress wave propagation between holes under both configurations, thereby elucidating the fundamental mechanisms through which empty holes optimize fracture propagation paths and enhance coalescence effectiveness. Results indicate that effective crack coalescence between blast holes occurs under two parameter sets without empty hole guidance,  $K=2.0$  with  $L=11D$  or  $K=1.25/1.5$  with  $L=13D$ , where  $D$  denotes blast hole diameter. The empty hole guidance demonstrates optimal performance at  $K=1.5$  and  $L=13D$ , producing a smoothly coalesced crack that aligns nearly perfectly with the inter-hole connecting line. The observed guiding phenomenon results from stress concentrations at the empty-hole walls, where superimposed reflected tensile waves and incident waves redirect fracture paths toward the inter-hole centerlines, thereby controlling crack propagation trajectories and coalescence patterns. Both experimental modeling and computational analysis revealed that the radius of the crack zone around the perimeter holes under empty-hole guidance was significantly smaller than under conventional blasting, demonstrating their dual functionality in simultaneously directing inter-hole crack coalescence while restricting undesirable radial fracture propagation.

**Key words:** tunnel blasting; perimeter holes; empty holes guidance; crack propagation; model test; numerical simulation

隧道钻爆法施工过程中,周边孔孔间爆生裂纹的扩展贯通效果直接决定开挖轮廓面的成形质量,而隧道周边孔爆破时产生的爆生气体与应力波易诱发围岩产生随机裂纹网络,导致开挖轮廓面不平整,进而引发超欠挖以及围岩稳定性降低等工程问题,增加后续支护成本及施工安全风险<sup>[1]</sup>。为精准控制裂纹扩展路径、提升爆破成形质量,空孔导向爆破技术以其结构简单、成本低廉、适应性强等优势,逐渐成为研究热点。围绕空孔对爆生裂纹扩展的影响机制,国内外学者从不同方面开展了相关研究:在理论分析方面,早期研究已系统阐述了其理论基础,认为空孔的核心作用在于其应力集中效应,从而引导裂纹定向扩展<sup>[2,3]</sup>。在此基础上,田国宾基于弹性力学和断裂力学理论推导出空孔周围拉应力解析解<sup>[4]</sup>,并给出了空孔与炮孔最优间距的理论判据;梁瑞等则进一步量化了空孔周围拉应力集中区域的范围<sup>[5]</sup>;李涛等通过应力波传播分析<sup>[6]</sup>,发现空孔可引导爆炸能量分布从而实现裂纹定向扩展。在模型试验方面,目前研究聚焦于不同爆破参数下空孔对裂纹扩展的影响。Mohanty 最早通过模型试验证明在装药孔间设置空孔可引导爆生裂纹向其方向扩展<sup>[7]</sup>;相关研究进一步明确了空孔直径与形状是调控其对裂纹导向效果的关键参数<sup>[8,9]</sup>;岳中文等通过数字激光动态焦散线实验<sup>[10]</sup>,揭示了空孔直径增大对裂纹定向断裂精度与应力集中效应的增强作用。数值模拟方面的研究则侧重于量化空孔对应应力波传播及能量分布的影响,并指出当炮孔与空孔的间距处于一定的区间范围时,爆炸能量会集中于炮孔与空孔的连心线方向分布<sup>[11,12]</sup>。而此区间范围受地应力显著调控,Xu 等基于离散元法(PFC)构建

了高应力硬岩双导向孔爆破模型<sup>[13]</sup>,提出炮孔与空孔临界距离判据,并揭示了高地应力对空孔导向能力的削弱作用;此外,Li 等发现空孔对裂纹的导向作用随地应力增大而减小<sup>[14]</sup>,当地应力超过 25 MPa 时,其导向作用基本可忽略。Huang 等开展的研究表明初始应力的存在改变了应力波传播及空孔周围拉应力分布<sup>[15]</sup>,从而影响裂纹扩展;Rong 等发现增大空孔直径可有效提高高地应力下爆生裂纹的扩展贯通效果<sup>[16,17]</sup>。在现场试验方面,研究集中于利用空孔的导向作用来优化各类爆破工程的效果。张伟等在深部硬岩巷道周边孔中设置了大直径空孔<sup>[18]</sup>,有效提高了半孔率;余绍山等在某铁路隧道开展的爆破试验中发现<sup>[19]</sup>,在周边孔布置偏位空孔可有效降低超欠挖值。此外,空孔效应也广泛应用于静态爆破、掏槽爆破等场景,并被证实能够有效改善爆破效果<sup>[20-22]</sup>。

综上所述,现有研究多聚焦空孔的单一参数(如直径、间距或形状)对炮孔间裂纹扩展规律的影响。对于隧道周边孔爆破中,炮孔间距、不耦合系数等多参数耦合作用下的孔间裂纹扩展规律的研究较为缺乏。基于此,本文开展隧道周边孔空孔导向双孔起爆模型试验,研究不同爆破参数(炮孔间距  $L$  及不耦合系数  $K$ )下周边孔孔间爆生裂纹扩展及贯通效果,同时建立数值计算模型,研究周边孔双孔起爆应力波传播规律以及孔间裂纹扩展贯通过程,并系统分析空孔对周边孔孔间应力波传播和裂纹扩展贯通效果的影响规律,以揭示隧道周边孔空孔导向孔间裂纹扩展机制,研究结果可为隧道周边孔空孔导向爆破参数设计提供理论依据。

# 1 隧道周边孔空孔导向双孔起爆裂纹扩展模型试验

## 1.1 试验方法

Rommanith 所开展的研究表明<sup>[23]</sup>,有机玻璃在爆炸荷载下的裂纹扩展行为与均质岩石高度一致。因此,本文采用有机玻璃作为模型材料制备模型试

件,分别开展周边孔双孔起爆模型试验(无空孔)和周边孔空孔导向双孔起爆模型试验(含空孔,空孔布置于装药孔连心线中央),并设置不同的不耦合系数  $K$  和炮孔间距  $L$ ,以研究不同爆破参数下模型试件炮孔间裂纹扩展贯通效果。模型试验试件尺寸均为:长 $\times$ 宽 $\times$ 厚=600 mm $\times$ 400 mm $\times$ 8 mm,如图 1 所示。

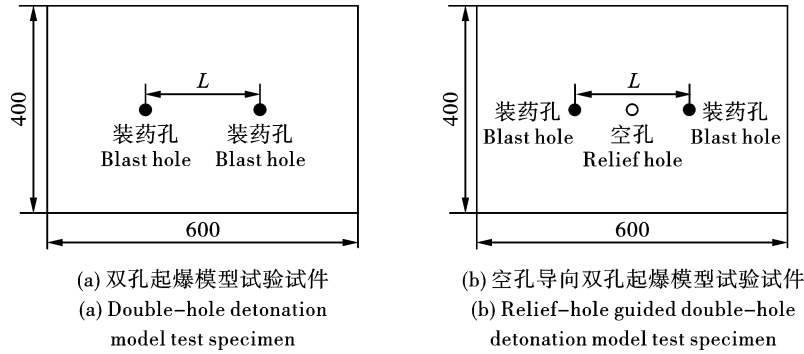


图 1 模型试验试件(单位:mm)

Fig. 1 Model test specimens(unit:mm)

模型试验采用直径约 7.5 mm 的电子雷管作为爆源,通过改变炮孔直径  $D$  以实现不同的装药不耦合系数  $K$ ,试验共设置 5 个不耦合系数,分别为 1、1.25、1.5、1.75 和 2.0,对应炮孔直径分别设置为 7.5 mm、9.375 mm、11.25 mm、13.125 mm 和 15 mm。针对每一种不耦合系数  $K$ (也即炮孔直径),周边孔双孔起爆模型试件均设置了 4 种炮孔间距  $L$ ,分别为  $9D$ 、 $11D$ 、 $13D$  和  $15D$ ,共包含 20 个工况,每种工况均重复 2 次试验,共 40 个试件。而对于周边孔空孔导向双孔起爆模型试件,考虑到空孔的导向作用,设置的装药孔间距  $L$  相对于周边孔双孔起爆模型试件相对较大,分别为  $11D$ 、 $13D$  和  $15D$ ,同样包含 5 种不耦合系数,共计 15 种工况,每种工况均重复 2 次,共 30 个试件。

模型试验的步骤如下:

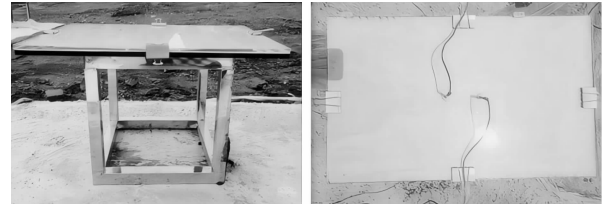
1) 在模型试件下层铺设 10 mm 厚木板形成应力缓冲层,在选定位置钻孔贯穿试件和木板,形成预设炮孔,木板的作用:一是为了便于电子雷管在炮孔内更好地居中,防止雷管爆炸过程中破片刮花模型试件表面,影响模型试件裂纹观测效果;二是避免电子雷管的聚能穴部分对模型试件加载,导致施加荷载不均匀进而影响试验结果。

2) 用夹子固定试件和木板的组合体,将其悬空平放于铁质底座上,如图 2(a)所示。

3) 将电子雷管放置于组合体炮孔正中,以防止雷管移位,使雷管轴线与炮孔轴线同轴,如图 2(b)

所示。

4) 通过起爆器起爆电子雷管,待爆后安全检查无隐患后,回收模型试件。



(a) 模型试件与木板的组合体 (a) Combination of model specimen and wooden board  
(b) 安装电子雷管后的模型试件 (b) Model specimen after installing electronic detonators

图 2 双孔起爆模型试验过程图

Fig. 2 Process diagram of double-holes detonation model test

## 1.2 试验结果分析

炮孔间距为  $9D$  时,不同不耦合系数下周边孔双孔起爆模型试件爆生裂纹扩展结果如图 3 所示(图中虚线代表炮孔间的爆生裂纹,下同)。由图可见两炮孔间有多条裂纹扩展贯通,且贯通裂纹分布复杂无序,未能形成光滑且单一的贯通裂纹,且随着不耦合系数增大,炮孔间主贯通裂纹(位于炮孔连心线附近)逐渐向炮孔连心线靠近。

炮孔间距分别为  $11D$ 、 $13D$  和  $15D$  时,有/无空孔导向双孔起爆模型试件的试验结果对比如图 4: 当不耦合系数为 1.0 和 1.25 时,无空孔导向工况下,随着炮孔距离增加到  $11D$  和  $13D$ ,两炮孔间扩展

形成的贯通裂纹数量逐渐趋于单条,且主贯通裂纹更加平滑,更接近炮孔连心线。当炮孔间距增加至 $15D$ 时,两炮孔间均无裂纹扩展贯通。对比分析不同试验工况下的试验结果,可以发现在炮孔不耦合系数 $K=1.25$ 且炮孔距离为 $13D$ 时,模型试件炮孔间的贯通裂纹较为平整且比较接近于炮孔连心线,孔间裂纹成缝效果相对较好。有空孔导向工况下,不耦合系数为 $1.0$ 或 $1.25$ 且炮孔间距为 $11D$ 时,模

型试件的空孔处均产生了垂直于炮孔连心线方向的裂纹(如图4中虚线裂纹所示),原因是相邻炮孔的应力波在空孔垂直于炮孔连心线两端区域叠加产生的拉应力超过模型材料抗拉强度,导致裂纹萌生扩展,且随着不耦合系数增加,这种垂直于炮孔连心线的裂纹逐渐消失。当炮孔间距为 $13D$ 或 $15D$ 时,炮孔间基本都能形成一条贯通裂纹。

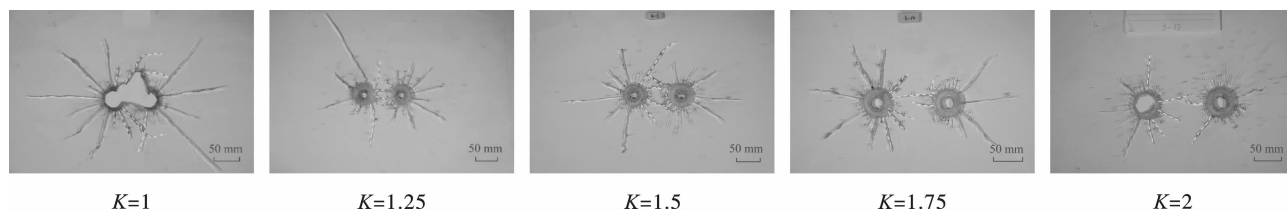


图3 炮孔间距为 $9D$ 时不同不耦合系数双孔起爆模型试验加载后的试件  
Fig. 3 Specimens loaded with different decoupling coefficients of double-holes detonation model test when the distance between the blast holes is  $9D$

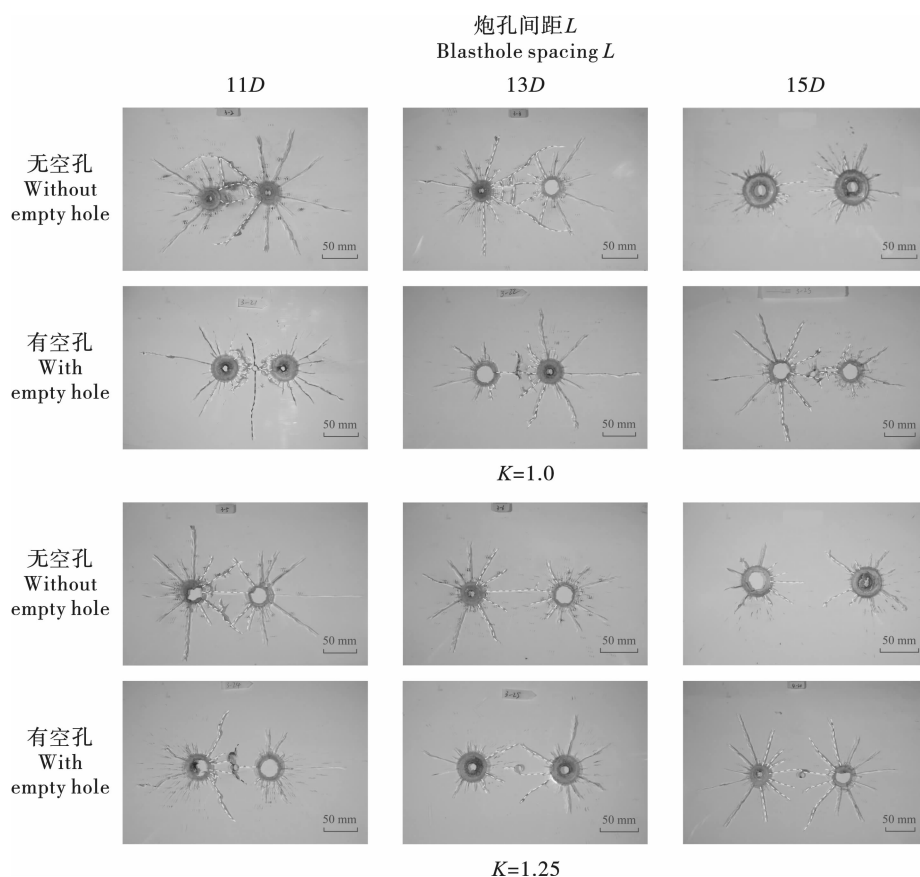


图4 不耦合系数 $K=1.0$ 和 $1.25$ 下有空/无空孔导向时炮孔间裂纹贯通效果对比  
Fig. 4 Comparison of crack penetration effects between blastholes with/without empty hole guidance under decoupling coefficients  $K=1.0$  and  $1.25$

当不耦合系数为 $1.5$ 时,如图5所示,无空孔导向工况下炮孔间距为 $11D$ 和 $13D$ 时,两炮孔间均形成单条贯通裂纹,但炮孔间距为 $13D$ 时,贯通裂纹

更加平滑且更接近炮孔连心线,而当炮孔间距为 $15D$ 时,两炮孔间仍未形成贯通裂纹。有空孔导向工况下,炮孔间距为 $11D$ 或 $13D$ 时,两炮孔间均形

成单条贯通裂纹,但炮孔间距为  $13D$  时,炮孔间贯通裂纹更加平整,基本与炮孔连心线重叠,且炮孔其他方向扩展的裂纹数量更少,长度也更短,此时空孔的导向作用最为明显。炮孔间距为  $15D$  时,由于孔间距过大,空孔处的应力集中效应减弱,即使有空孔导向的情况下,两炮孔间也未能形成贯通裂纹。对

比炮孔间距为  $13D$  时有、无空孔模型试件炮孔间裂纹扩展贯通效果发现,存在空孔时主贯通裂纹更加光滑平整,裂纹几乎沿炮孔连心线扩展贯通,且孔间没有其他副贯通裂纹,而且炮孔周围沿其他方向扩展的裂纹数量更少,表明空孔对于孔间裂纹的扩展贯通有明显的导向作用。

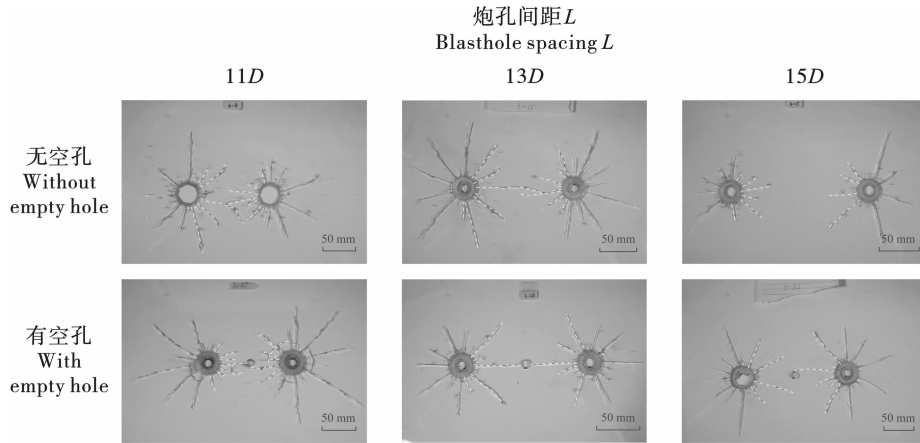


图5 不耦合系数  $K = 1.5$  下有/无空孔导向时炮孔间裂纹贯通效果对比

Fig. 5 Comparison of crack penetration effects between blastholes with/without empty hole guidance under a decoupling coefficient  $K = 1.5$

当不耦合系数为 1.75 和 2.0 时,如图 6 所示,无空孔导向工况下,炮孔间距为  $11D$  或  $13D$  时,两炮孔间能够形成贯通裂纹,且炮孔其他方向的扩展的裂纹相较于不耦合系数为 1.0、1.25 模型试件数量更少,长度也更短;而炮孔间距为  $15D$  时两炮孔间未能形成贯通裂纹。有空孔导向工况下,不耦合系数为 1.75 且炮孔间距为  $11D$  和  $13D$  或不耦合系数为 2.0 且炮孔间距为  $11D$  时,试件两炮孔间能够形成贯通裂纹;对比分析不同试验工况下的试验结果,可以发现在炮孔不耦合系数为 2.0 且炮孔间距为  $11D$  时,孔间裂纹成缝效果相对较好;炮孔间距为  $15D$  时,两炮孔间均未能形成贯通裂纹。

基于模型实验结果可以发现:无空孔导向条件下,在炮孔不耦合系数  $K = 2$  且炮孔距离为  $11D$  或不耦合系数  $K = 1.25$  或 1.5 且炮孔距离为  $13D$  时,模型试件孔间的贯通裂纹较为平整且比较接近于炮孔连心线,孔间裂纹成缝效果相对较好;有空孔导向条件下,当装药间距为  $13D$  且不耦合系数为 1.5 时,空孔的导向作用效果最好,而当装药孔间距达到  $15D$  且不耦合系数超过 1.5,或者不耦合系数为 2 且孔间距大于  $11D$  时,孔间难以形成贯通的裂纹,上述现象说明空孔与起爆孔的间距是影响空孔导向作用的关键因素:当孔间距较小时,无法发挥空孔对

裂纹扩展的导向作用且孔间介质的破坏程度也较为严重;而当孔间距较大时,空孔处的应力集中效应减弱,导致孔间裂纹不能有效扩展贯通。

为系统研究不耦合系数对单个炮孔附近裂纹长度的影响,并对比有、无空孔导向工况下裂纹扩展情况,取装药炮孔间距为  $13D$  的试验工况,统计该试验工况下两个炮孔周边裂纹区平均半径的平均值,绘制有、无空孔两种条件下不耦合系数  $K$  与炮孔周边裂纹平均半径的关系图,分析不耦合系数  $K$  与单个炮孔周围裂纹长度的关系,并对比有、无空孔时两个装药炮孔周边爆生裂纹区平均半径的平均值,如图 7 所示。

由图 7 可以发现,炮孔周围裂纹区平均半径随着不耦合系数  $K$  的增大而减小,当  $K = 2$  时取得最小值。产生这种现象的原因是随着不耦合系数的增大,炸药爆炸能量消耗在炮孔空气内的部分也相应增大,导致炮孔壁上爆炸荷载的幅值也随之减小,因此炮孔周围介质内爆生裂纹的扩展长度也相应减小。另外,有空孔导向时装药孔周边爆生裂纹区平均半径明显低于无空孔工况,具体为当不耦合系数分别为 1、1.25、1.5、1.75 和 2 时,装药孔周边裂纹区平均半径分别为 49.8 mm、45.6 mm、43.6 mm、42.4 mm 和 41.6 mm,相对于无空孔工况的模型试

验结果,裂纹区平均半径分别减小了9.1%、8.2%、8.4%、5.7%和4.4%,整体减小了7.2%。此现象表明空孔除了对装药孔孔间爆生裂纹的扩展及贯通

具有明显的导向作用之外,还能对装药孔周边爆生裂纹沿其他方向扩展起到抑制作用。

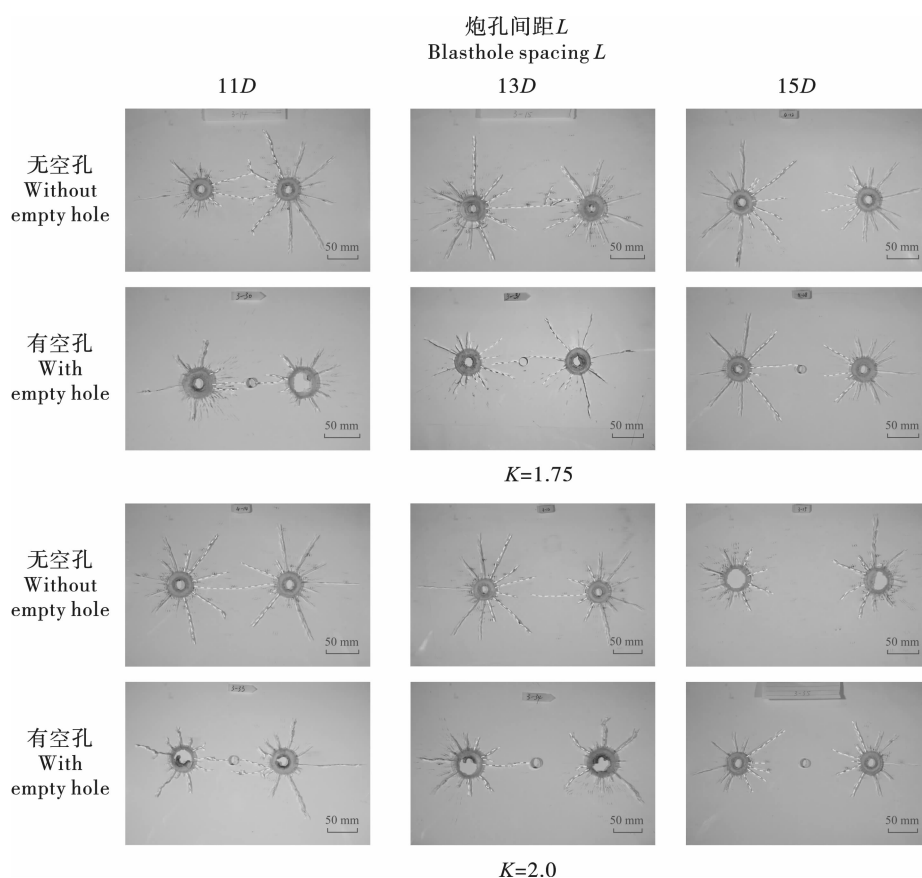


图6 不耦合系数  $K=1.75$  和  $2.0$  下有/无空孔导向时炮孔间裂纹贯通效果对比  
Fig. 6 Comparison of crack penetration effects between blastholes with/without empty hole guidance under decoupling coefficients  $K=1.75$  and  $2.0$

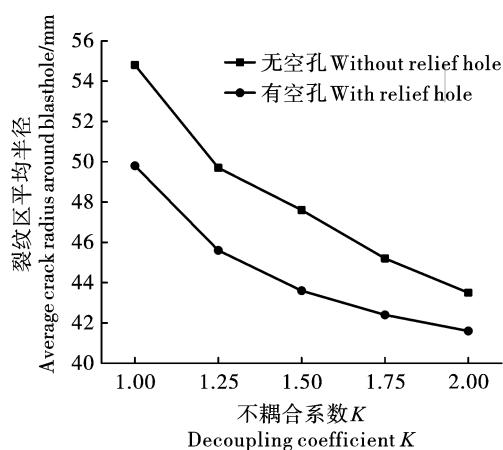


图7 有/无空孔导向下不耦合系数与炮孔周边裂纹平均半径的关系图

Fig. 7 Relationship between decoupling coefficient and average radius of cracks around blastholes with/without empty hole guidance

## 2 隧道周边孔空孔导向双孔起爆裂纹扩展数值模拟

### 2.1 数值模型及材料计算参数

基于模型试验所设计的试件,分别建立了无导向孔和有导向孔双孔起爆数值模型,模型尺寸同样为  $600\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ 。参考模型试验结果可知,当不耦合系数为  $1.5$  时,无论有/无导向孔模型试件内炮孔间裂纹扩展贯通效果均较好。因此,在数值模拟计算中选取不耦合系数  $1.5$  作为基准参数,构建上述  $2$  种数值模型,并参照模型试验炮孔装药结构,设置炮孔直径  $D$  均为  $11.25\text{ mm}$ ,炸药直径均为  $7.5\text{ mm}$ ,且设置孔间距分别为  $11D$ 、 $13D$  和  $15D$  的工况,以明确空孔和孔间距双重影响下孔间爆生裂纹的扩展贯通规律。同时为进一步研究不耦合系数对空孔导向孔间裂纹扩展贯通规律的影响,对于炮孔间距为  $13D$  的空孔导向双孔起爆数值模型,还

设置了不耦合系数为 1、1.25、1.75 和 2.0 的工况。所建立数值模型主要由炸药、岩石模拟材料、空气域组成,均采用实体单元(SOLID 164),其中岩石模拟材料采用拉格朗日算法,炸药和空气采用 ALE 算法,并设置炸药初始膨胀空间,采用流固耦合关键字 CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 定义岩石模拟材料和流体之间的相互作用,其中双孔起爆裂纹扩展数值计算模型如图 8 所示。

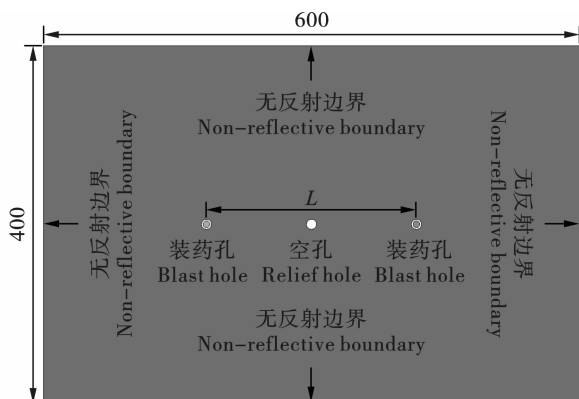


图 8 双孔起爆裂纹扩展数值计算模型(单位:mm)

Fig. 8 Numerical model of double-hole detonation and crack propagation(unit:mm)

此外,数值模型网格划分采用六面体映射网格,

其中岩石模拟材料网格尺寸设置为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  进行划分,为保证数值模拟的精确性,炸药区域进行局部加密处理,所建立 2 种数值模型的整体单元数量均约为  $3.5 \times 10^5$ ,其中模型内炮孔附近的网格划分如下图 9 所示。其次,所建立 2 种数值计算模型内炮孔均设置与模型试验保持一致,同时起爆,且模型四周采用无反射边界,以防止应力波在模型边界处反射,减少对数值计算结果的影响。

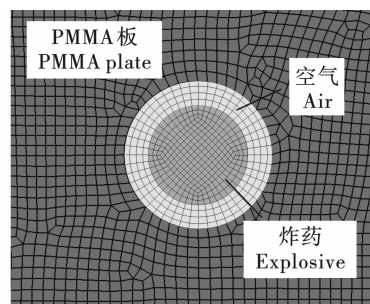


图 9 模型内炮孔附近网格划分

Fig. 9 Locally refined mesh around blast holes

数值模型内不同材料的计算参数如下:

①岩石模拟材料(PMMA)通过 \* MAT\_JOHN-SON\_HOLMQUIST\_CERAMICS 材料模型进行表征,具体参数如表 1 所示<sup>[24]</sup>。

表 1 岩石模拟材料(PMMA)计算参数

Table 1 Calculation parameters of rock simulated material(PMMA)

| $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $G/\text{GPa}$ | $A$  | $B$                  | $C$                | $M$ | $N$  | $D_1$                | $D_2$ | $K_1$ | $K_2$  | $K_3$ |
|----------------------------------------|----------------|------|----------------------|--------------------|-----|------|----------------------|-------|-------|--------|-------|
| 2.53                                   | 0.34           | 0.93 | $8.8 \times 10^{-2}$ | $3 \times 10^{-3}$ | 0.4 | 0.77 | $5.6 \times 10^{-2}$ | 0.89  | 0.5   | -11.54 | 3.2   |

②炸药采用 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型进行表征,结合 JWL 状态方程来模拟炸药爆炸过程,炸药爆轰过程中压力与体积的关系为

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

式中: $P$  为爆轰产物压力; $E$  为单位体积内炸药

内能; $V$  为相对体积; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为 JWL 状态方程参数。数值模拟中炸药材料参数及状态方程参数如表 2 所示,其中  $\rho_0$  为炸药密度, $D$  为炸药爆速, $P_{CJ}$  为炸药爆炸时的压力。

③空气材料则采用 \* MAT-NULL 材料模型进行描述,空气材料状态方程采用 \* EOS- LINEAR-POLYNOMIAL 表征,相关的参数取值如表 3 所示。

表 2 炸药材料参数及状态方程参数

Table 2 Explosive material parameters and equation of state parameters

| $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | $P_{CJ}/\text{GPa}$ | $A/\text{GPa}$ | $B/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ |
|------------------------------------------|------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|-------|-------|
| $1.15 \times 10^3$                       | $3.0 \times 10^3$                  | 10.5                | 220            | 0.8            | 4.5   | 1.1   |

表 3 空气材料参数及状态方程参数

Table 3 Air material parameters and equation of state parameters

| $\rho_0(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $C_4$ | $C_5$ | $E_0$ | $V_0$ |
|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 1.2                                     | 0.4   | 0.4   | 0     | 1     |

## 2.2 数值与模型试验结果对比分析

以模型试验中炮孔间裂纹扩展贯通效果最好的装药孔间距为  $13D$  且不耦合系数  $K$  为 1.5 的工况为例,对比分析模型试验和数值模拟结果。基于有效应力云图,分析含/无空孔双孔起爆后应力波传播与裂纹扩展的动态规律,如图 10 所示。由图可见,炮孔初始起爆阶段( $t < 20 \mu\text{s}$ ),爆炸冲击波在炮孔周围形成粉碎区,无空孔和有空孔模型应力场分布基本一致,尚未形成明显的裂纹扩展路径。在  $20 \sim 40 \mu\text{s}$  期间,应力波传播范围增大,相邻炮孔的爆生裂纹从炮孔边缘开始,沿着应力波传播方向扩展,并形成初始裂纹网络。在  $40 \sim 60 \mu\text{s}$  期间,应力波在炮孔连心线中心位置相遇发生干涉现象。无论有无空孔,裂纹扩展状况无较大差别,裂纹均呈现多向扩展特征,但有空孔工况下炮孔间裂纹更偏向于炮孔连心线。在  $60 \sim 80 \mu\text{s}$  期间,裂纹扩展基本成形,应力波逐渐衰减。有空孔存在的情况下,两炮孔间形成了单一且清晰的贯通裂纹。无空孔存在时,出现双裂纹竞争扩展。在  $80 \sim 100 \mu\text{s}$  期间,应力波逐渐衰减为零,裂纹扩展趋于稳定。无空孔工况下,两炮孔间有两条水平向裂纹扩展,且均偏离炮孔连心线方向,而含空孔工况下,裂纹沿连心线方向稳定扩展并贯穿空孔,形成了平整的贯通裂纹。

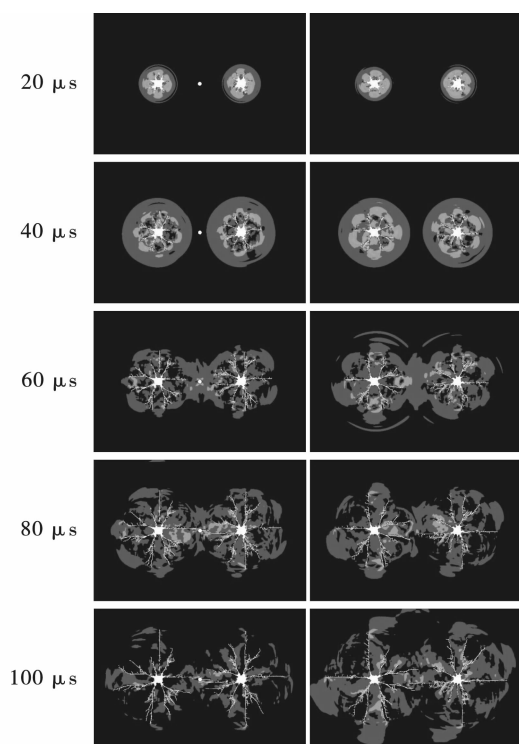


图 10 所建立数值模型内不同时刻应力波传播及裂纹扩展规律

Fig. 10 Laws of stress wave propagation and crack propagation at different times in the established numerical model

此外,对比分析该工况下模型试件和数值模型炮孔间裂纹贯通后的效果,如图 11 所示,可见数值模拟与模型试验结果呈现高度一致性。无空孔工况下,模型试验与数值模拟炮孔间裂纹均呈现多分支扩展特征,在接近水平方向也都出现两条以上的副裂纹进行扩展。有空孔工况下,模型试验与数值模拟均呈现单一主裂纹沿炮孔连心线扩展贯通,贯通裂纹光滑平直,主裂纹扩展路径基本重合。模型试验与数值模拟结果共同验证了空孔导向机制的有效性。同时注意到,有空孔工况下炮孔周围的副裂纹长度明显短于无空孔工况下副裂纹长度。以上结果验证了数值模拟结果的准确性。

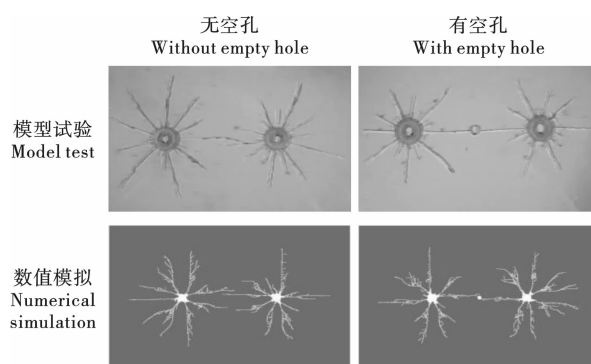


图 11 模型试验与数值模拟结果对比分析

Fig. 11 Comparative analysis of model test and numerical simulation results

为深入分析空孔对孔间裂纹扩展贯通的导向机制,以图 10 所示工况为例,选取空孔两侧孔壁单元  $A$  和  $B$  (如图 12 所示),以及无空孔数值模型对应位置的单元  $C$  和  $D$  为观测点,对比分析有/无空孔工况下上述单元垂直于炮孔连心线方向的应力 ( $Y$ -Stress) 时程曲线,如图 13 所示。

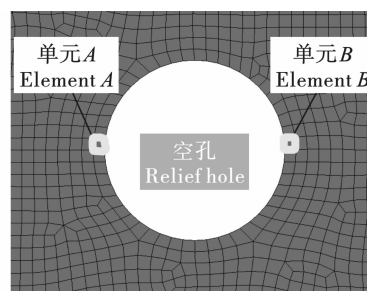


图 12 选取的空孔孔壁单元  $A$  和  $B$

Fig. 12 Selected hole wall elements  $A$  and  $B$  of the empty hole

由图 13 可知,有/无空孔工况下,上述单元均在  $40 \mu\text{s}$  左右产生应力波动,但对于无空孔模型,单元  $C$  和  $D$  均首先出现明显的压缩波作用,而后应力值由负转正,并产生幅值分别为  $18.22 \text{ MPa}$  和  $21.45 \text{ MPa}$  的

拉伸波作用。对于有空孔模型,由于空孔提供了应力波的反射边界并改变了空孔周围应力场分布,对于单元  $A$  和  $B$ ,入射压缩波和反射拉伸波在极短的时间内发生叠加,因此在前期几乎观测不到明显的压应力波动,而随之产生了急剧上升的拉应力作用,其幅值高达 49.86 MPa 和 49.27 MPa,远大于岩石模型材料的抗拉强度,导致微裂纹在空孔连心线处启裂并扩展。上述应力时程曲线分析表明,空孔的存在改变了爆炸应力波能量传递路径以及动态应力场分布,并在空孔孔周炮孔连心线处产生拉应力集中,其幅值为无空孔工况的 2.3 ~ 2.74 倍,达到了岩石材料裂纹启裂扩展的临界条件,从而实现从炮孔间裂纹扩展贯通的导向作用。

### 2.3 炮孔间距对孔间裂纹扩展贯通规律的影响分析

整理出炮孔间距为  $11D$  和  $15D$  工况下数值模型内炮孔裂纹扩展过程,如图 14 所示。当孔间距为  $11D$  时,无论是否存在空孔,两炮孔间均形成了密集的裂纹网络,且呈现显著的“树状”分叉特征。这是因为相邻炮孔起爆后,由于孔间距较小,爆炸产生的压缩应力波在极短时间内到达孔间中点区域并叠加,形成高强度的环向拉应力场,该应力场峰值超过岩石模拟材料的动态抗拉强度,使得材料在多个薄弱点同时起裂,形成多源裂纹扩展。当炮孔间距为  $15D$  时,较大孔间距导致两炮孔应力波在到达中点

前显著衰减,根据应力波传播规律,其幅值随距离呈指数下降,裂纹仅在起裂初期短暂扩展,随后因能量不足而停滞。无空孔工况下,爆生裂纹呈现多向扩展特征,裂纹围绕炮孔呈放射状分布,炮孔连心线方向裂纹因动力不足未能到达中心区域连接贯通。有空孔工况下,空孔处的应力集中效应引导裂纹向裂纹连心线方向扩展,但因能量不足无法驱动完全贯通,仅形成断续微裂纹链。

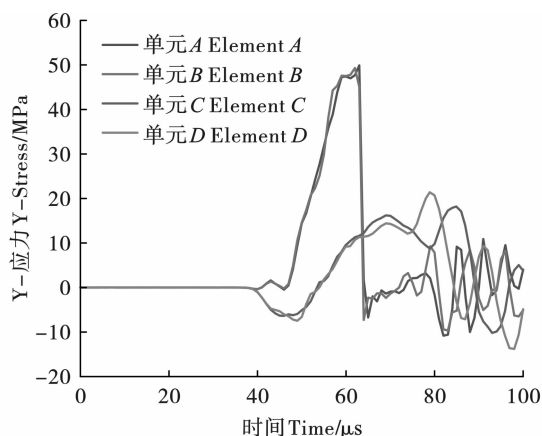


图 13 炮孔间距为  $13D$  时有/无空孔工况下  
选定单元竖直方向应力时程曲线

Fig. 13 Vertical stress-time history curves of the specified element under the working conditions with/without empty holes when the blasthole spacing is  $13D$

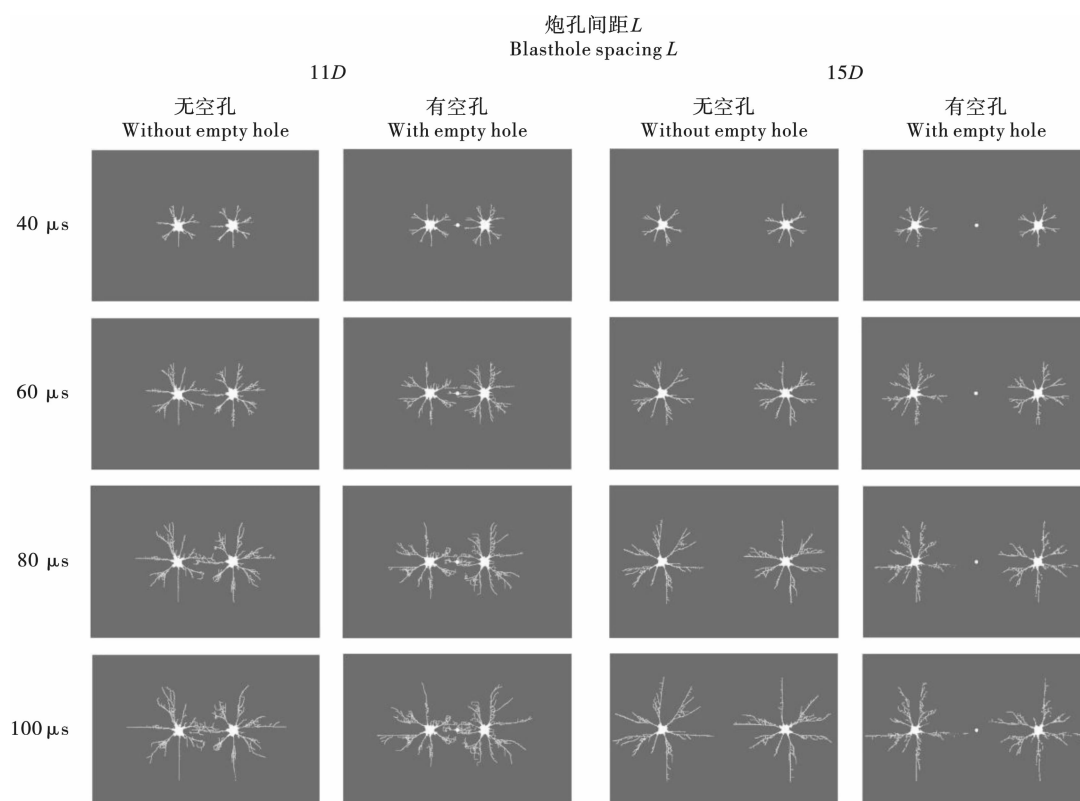


图 14  $11D$  和  $15D$  孔距下炮孔间裂纹扩展过程

Fig. 14 Crack propagation process between blast holes under the spacing of  $11D$  and  $15D$

对比不同炮孔间距下裂纹扩展效果可以发现,空孔对裂纹扩展存在一定的调控作用。同时,空孔附近裂纹数量的多少,反映出“空孔效应”的强弱。炮孔间距相同时,有空孔导向工况下,裂纹分叉数量较无空孔工况少。这表明空孔结构对非预期方向的次生裂纹萌发与扩展具有抑制作用,而对于炮孔连心线方向则有促进作用。这种抑制效应主要源于空孔对爆生应力波的反射耗散作用以及裂纹尖端应力集中区的定向释放机制。通过这种机制,应力波能量更多地集中在连心线方向,从而减少其他方向的裂纹扩展,优化了裂纹扩展路径。

#### 2.4 不耦合系数对空孔导向孔间裂纹扩展贯通规律的影响分析

对照模型试验,整理出炮孔间距  $13D$  条件下,所开展的不同不耦合系数空孔导向数值模型计算结果,如图 15 所示。图 15 表明随着不耦合系数  $K$  增

大,炮孔粉碎圈半径显著减小,且炮孔间连心线方向发育的裂纹数量同样减少,同时炮孔周边裂纹的长度变短。当不耦合系数  $K=1.0$  和  $1.25$  时,模型内裂纹网络相对密集,呈放射状,孔间形成多分支贯通但路径曲折的裂纹;而当  $K$  值增大至  $1.5$  时,炮孔间裂纹基本沿炮孔连心线方向扩展贯通;当不耦合系数  $K=1.75$  时,两炮孔均沿连心线方向产生向空孔扩展延伸的裂纹,同时空孔处也产生裂纹向炮孔延伸,但由于应力波传播能量不足导致孔间裂纹未能贯通;当不耦合系数  $K=2.0$  时,应力波的能量进一步衰减,炮孔间沿连心线方向的裂纹扩展长度同步减小,未能出现孔间贯通裂纹。上述现象与模型试验结果较为一致,可以发现空孔引导炮孔间裂纹扩展时,不耦合系数  $K$  通过影响爆炸应力波传播衰减规律,显著改变孔间裂纹的贯通质量。

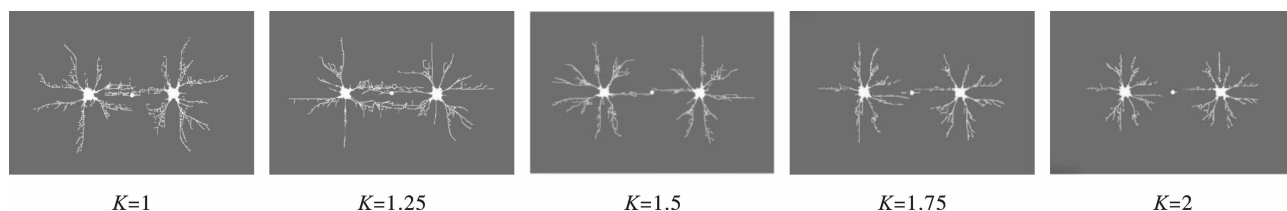


图 15 炮孔间距为  $13D$  时不同不耦合系数数值模拟结果对比

Fig. 15 Comparison of numerical simulation results for different decoupling coefficients when the blasthole spacing is  $13D$

其次,参照 2.2 小节模型试验结果分析,同样统计出数值模型中炮孔周围裂纹扩展区的平均半径,不耦合系数为  $1.0$ 、 $1.25$ 、 $1.5$ 、 $1.75$  和  $2.0$  时,炮孔周围裂纹区平均半径分别为  $53.4\text{ mm}$ 、 $49.78\text{ mm}$ 、 $47.63\text{ mm}$ 、 $45.5\text{ mm}$  和  $41.67\text{ mm}$ 。为量化分析并进一步对比数值模拟与模型试验中炮孔间距  $L=13D$  工况下炮孔周边裂纹区平均半径随不耦合系数  $K$  的变化规律,整理出不同不耦合系数下数值模拟与模型试验中炮孔周边裂纹区平均半径,如图 16 所示。由图 16 可见,数值模拟计算出的裂纹区平均半径与模型试验结果较为接近,当不耦合系数分别为  $1$ 、 $1.25$ 、 $1.5$ 、 $1.75$  和  $2$  时,数值模拟炮孔周边裂纹区平均半径比模型试验的裂纹区平均半径分别大  $7.23\%$ 、 $9.17\%$ 、 $9.24\%$ 、 $7.31\%$  和  $0.17\%$ ,平均偏差率为  $6.62\%$ ,同时两者在变化趋势上也呈现出一致性,再次验证了数值模拟计算结果的准确性。两组数据均显示裂纹区平均半径随不耦合系数增大而单调递减,这一结果再次证明增大不耦合系数可有效抑制炸药能量向岩体的传递,减小爆破损伤范围。

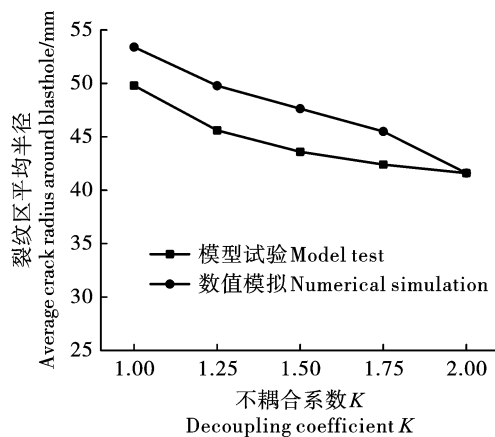


图 16 炮孔间距为  $13D$  时数值模拟与模型试验裂纹区平均半径长度对比

Fig. 16 Comparison of average radius lengths of crack zones between numerical simulation and model test when blasthole spacing is  $13D$

由上述数值模拟分析可得出结论:不耦合系数  $K$  是调控空孔导向效应强弱的关键参数。针对本文所开展的模型试验和数值模拟,存在一个最优区间 ( $K=1.5$  左右),在此区间内炸药能量得到适度控

制,既能驱动主裂纹向空孔定向扩展,又避免了过强冲击导致炮孔周围粉碎区过大;当  $K$  值过小(如 1.25)时,过高能量输入会削弱空孔的导向效果并引起炮孔周围过度损伤;当  $K$  值过大(如 1.75)时,过低的能量输入则导致应力集中效应不足,空孔难以有效引导炮孔间的裂纹萌生和贯通。

### 3 结论

(1)无空孔导向时当  $K=2.0$  且  $L=11D$  或  $K=1.25/1.5$  且  $L=13D$  时,炮孔间裂纹贯通效果相对较好;有空孔导向时当  $K=1.5$  且  $L=13D$  时,空孔的导向作用最为显著,炮孔间形成与炮孔连心线几乎重合的平整贯通裂纹。

(2)空孔的存在改变了爆炸应力波能量传递路径以及动态应力场分布,并在空孔周围炮孔连心线处产生拉应力集中,其幅值为无空孔工况的 2.3 ~ 2.74 倍,从而实现对炮孔间裂纹扩展贯通的导向作用。

(3)模型试验与数值模拟结果均表明空孔导向下周边孔裂纹区半径明显小于无空孔工况,表明空孔具有引导周边孔间裂纹定向贯通并抑制其沿非预期方向扩展的双重调控机制。

(4)对于围岩比较完整且无显著节理裂隙的隧道工程,建议设置周边孔采用  $L$  为  $13D$  且  $K$  为 1.5 的空孔导向爆破参数,以实现较为理想的孔间裂纹贯通效果,提高开挖轮廓面的成形质量,降低超挖值。

本文通过模型试验和数值模拟揭示了空孔对于炮孔间裂纹扩展的导向机制,但在研究过程中采用了均质有机玻璃材料简化了实际工程岩体的非均质性,且所建立数值模型忽略了天然岩体的节理裂隙。同时模型试验和数值模拟均采用了二维模型,与实际隧道工程岩体所处的三维应力状态存在一定差异,这些简化会导致高估炮孔间裂纹的贯通能力。因此,本文的研究结果主要适用于节理裂隙不明显发育的岩体地层隧道爆破,对于结构面发育的围岩,其适用性需通过进一步的现场试验与三维数值模拟予以验证。

### 参考文献 (References)

- [1] 满 轲,刘晓丽. 周边空孔效应对爆破振速及围岩损伤的影响研究[J]. 工程力学,2020,37(11):127-134,184.
- [1] MAN Ke, LIU Xiao-Li. The effect of surrounding empty holes on the blasting velocity and damaged zones[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 127-134, 184. (in Chinese)
- [2] LANGEFORS U, KIHLSSTROM B. The modern technique of rock blasting[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1978.
- [3] 付佳佳,陈必港,尤 涛,等. “空孔效应”对光面爆破效果的影响分析[J]. 有色金属(矿山部分),2017,69(1):44-49.
- [3] FU Jia-jia, CHEN Bi-gang, YOU Tao, et al. Analysis on the influence of empty hole effect on smooth blasting[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2017, 69(1): 44-49. (in Chinese)
- [4] 田国宾. 周边空孔对爆破断裂与损伤控制的机理研究[D]. 西安:西安科技大学,2022.
- [4] TIAN Guo-bin. Research on fracture and damage control mechanism of empty hole in perimeter blasting[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [5] 梁 瑞,王兵兵,周文海,等. 空孔对爆生裂纹扩展的力学行为研究[J]. 有色金属工程,2023,13(11):82-88,125.
- [5] LIANG Rui, WANG Bing-bing, ZHOU Wen-hai, et al. Study on the mechanical behavior of empty holes on blasting crack propagation[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(11): 82-88, 125. (in Chinese)
- [6] 李 涛,倪 羽,王志亮. 岩石爆破损伤演化与动力响应的空孔效应[J/OL]. 高压物理学报, 2025: 1-14. [2025-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1147.04.20250901.1505.004>.
- [6] LI Tao, NI Yu, WANG Zhi-liang. Effect of empty-holes on the blasting induced damage evolution and dynamic response of rock[J/OL]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025: 1-14. [2025-09-01]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1147.04.20250901.1505.004>. (in Chinese)
- [7] MOHANTY B. Explosion generated fractures in rock and rock-like materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(4-5): 889-898.
- [8] 岳中文,郭 洋,王 煦,等. 空孔形状对岩石定向断裂爆破影响规律的研究[J]. 岩土力学,2016,37(2): 376-382.
- [8] YUE Zhong-wen, GUO Yang, WANG Xu, et al. Study on the influence of cavity shape on rock directional fracture blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(2): 376-382. (in Chinese)
- [9] 杨仁树,陈 程,王 煦,等. 不同直径空孔对爆生裂纹扩展行为影响规律的实验研究[J]. 煤炭学报,

- 2017,42(10):2498-2503.
- [9] YANG Ren-shu, CHEN Cheng, WANG Xu, et al. Experimental investigation on the influence of different diameter empty holes on the crack growth behavior of blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10):2498-2503. (in Chinese)
- [10] 岳中文, 郭 洋, 许 鹏, 等. 定向断裂控制爆破的空孔效应实验分析[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(3):304-311.
- [10] YUE Zhong-wen, GUO Yang, XU Peng, et al. Analysis of empty hole effect in directional fracture controlled blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(3):304-311. (in Chinese)
- [11] CHEN Bao-bao, LIU Chang-you, YANG Jing-xuan. Design and application of blasting parameters for presplitting hard roof with the aid of empty-hole effect[J]. Shock and Vibration, 2018, 2018:8749415.
- [12] CAO Ru-yang, LI Yun-peng, CHUN Feng, et al. Study on the guiding mechanism of multiple and empty holes under explosion load[J]. Mining, Metallurgy and Exploration, 2024, 41(1):277-286.
- [13] XU Rui-zong, XIE Liang-fu, MA Long, et al. Research on the damage characteristics of rock masses based on double guide-hole blasting under high in-situ stress[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):19266.
- [14] LI Qian, LI Hai-bo, HE Li-heng, et al. Effect of empty-hole on the rock blasting under in-situ stress[J]. Computers and Geotechnics, 2025, 185:107290.
- [15] CHEN Huang, ZHANG Zong-xian, YANG Li-yun, et al. Effect of prestress on propagation of blasting-induced main crack in specimens with empty hole[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 126:103928.
- [16] RONG Hai, LI Nan-nan, CHEN Cao, et al. Numerical simulation of blasting behavior of rock mass with cavity under high in-situ stress[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1):16046.
- [17] 郭德茂. 地应力影响下基于 SPH-FEM 耦合方法的楔形掏槽爆破效果与优化研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2025.
- [17] GUO De-mao. Research on wedge cut blasting effect and optimization based on SPH-FEM coupling method under the influence of in-situ stress[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2025. (in Chinese)
- [18] 张 伟, 褚夫蛟, 王银刚, 等. 空孔在硬岩光面爆破作用中的试验与应用[J]. 爆破, 2023, 40(2):48-52, 137.
- [18] ZHANG Wei, CHU Fu-jiao, WANG Yin-gang, et al. Experiment and application of empty hole in smooth blasting of hard rock[J]. Blasting, 2023, 40(2):48-52, 137. (in Chinese)
- [19] 余绍山, 王 薇, 李姚伟奇. 周边眼偏位空孔爆破设计优化研究与应用[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(4):1509-1520.
- [19] YU Shao-shan, WANG Wei, LI Yao-wei-qi. Research and application of offset hole for peripheral blasting design and optimization[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(4):1509-1520. (in Chinese)
- [20] 金冰燕, 李文杰, 唐 刚, 等. 禁爆条件下硬岩隧洞“取芯+劈裂”破岩力学机理与施工技术[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(28):12222-12230.
- [20] JIN Bing-yan, LI Wen-jie, TANG Gang, et al. Mechanical mechanism and construction technology of “coring + splitting” rock breaking in hard rock tunnel under explosion-proof conditions[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28):12222-12230. (in Chinese)
- [21] 高 轩, 尹训江, 王帅帅, 等. 铁路隧道机械化装药掏槽爆破参数的优化[J]. 爆破器材, 2025, 54(4):46-54, 64.
- [21] GAO Xuan, YIN Xun-jiang, WANG Shuai-shuai, et al. Parameter optimization of mechanized charging cut blasting in railway tunnel construction[J]. Explosive Materials, 2025, 54(4):46-54, 64. (in Chinese)
- [22] 李曙光. 铁路隧道空孔直眼掏槽爆破数值模拟及现场应用[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(2):610-619.
- [22] LI Shu-guang. Numerical simulation of straight cutting blasting of empty hole in railway tunnel and its application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(2):610-619. (in Chinese)
- [23] ROSSMANITH H P, DAEHNKE A, NASMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, 1997, 20(11):1617-1636.
- [24] 李剑飞. 爆炸荷载下 I 型裂纹动态扩展行为的数值模拟及实验研究[D]. 成都:四川大学, 2021.
- [24] LI Jian-fei. Numerical simulation and experimental study on dynamic propagation behavior of mode-I cracks under blast loading[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021. (in Chinese)