起爆次序对深埋巷道直眼掏槽爆破效果的影响*

丁勇[1],郝琪琪[2],崔松[1],王晓南[1],苏伯阳[1],刘传义[2],张凤鹏[2]

(1.本溪龙新矿业有限公司, 辽宁 本溪市 117013;
2.深部金属矿智能开采与装备全国重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要:针对深埋巷道掘进爆破效率低的问题,研究了高应力条件下起爆次序对直眼掏槽爆破效果的影响。通过物理模型试验与数值模拟相结合的方法,揭示不同起爆次序下应变场演化、裂纹扩展及槽腔成形的动态规律。采用金属丝电爆炸技术模拟炸药爆破,结合围压加载装置施加静压力,利用数字图像相关方法(DIC)与超高速相机捕捉试样表面应变场及裂纹扩展过程,并基于三维扫描结果分析不同起爆次序的槽腔形态差异。结果表明:当首爆孔位于最大主应力方向(起爆次序二)时,空孔环向应变显著增强,且易形成贯穿性裂纹。三维扫描结果显示,起爆次序二的槽腔体积较起爆次序一大,孔底残留率降低。数值模拟进一步验证首爆孔沿最大主应力方向时,损伤区分布更均匀,槽腔张开角增大,能有效提升后续炮孔的能量利用率。研究证明,优先起爆最大主应力方向炮孔可优化损伤区分布、改善槽腔形态并减少孔底残留。

关键词:深埋巷道;直眼掏槽爆破;起爆次序;应变场演化;成腔形态

中图分类号:TD235 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0067-08

Influence of Detonation Sequence on the Blasting Effect of Parallel Cut in Deep Buried Roadways

DING Yong[1], *HAO Qiqi*[2], *CUI Song*[1], *WANG Xiaonan*[1], *SU Boyang*[1], *LIU Chuanyi*[2], *ZHANG Fengpeng*[2]

(1.Benxi Longxin Mining Co., Ltd., Benxi, Liaoning 117013, China;
2.State Key Laboratory of Intelligent Deep Metal Mining and Equipment, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: To address the issue of low blasting efficiency in deep buried roadways excavation, the influence of detonation sequence under high stress conditions on the blasting effectiveness of parallel cut was studied. By combining physical model tests with numerical simulations, the dynamic laws of strain field evolution, crack expansion, and groove cavity formation with different detonation sequences were revealed. The metal wire electric explosion technology was used to simulate explosive blasting, combined with a confining pressure loading device to apply static pressure. The digital image correlation method (DIC) and ultra-high-speed camera were used to capture the surface strain field and crack expansion process of the specimens. Based on the 3D scanning results, the differences in groove shape with different detonation sequences were analyzed. The results show that when the first blast hole is located in the direction of the maximum principal stress (detonation sequence two), the circumferential strain of the empty hole is significantly increased, and it is easy to form penetrating cracks. The 3D scanning results show that the groove cavity volume of detonation sequence two is larger than that of detonation sequence one, and the residual rate at the bottom of the hole is reduced. Numerical simulation further verifies that when the first blast hole is along the direction of maximum principal stress, the distribution of damage zone is more uniform, the opening angle of the groove cavity increases, and the energy utilization efficiency of subsequent blast holes is effectively improved. The research has shown that prioritizing detonation in the direction of maximum principal stress can optimize the distribution of damage zones, improve the shape of the groove cavity, and reduce residue at the bottom of the hole.

Key words: Deep buried roadway, Parallel cut blasting, Detonation sequence, Evolution of strain field, Groove cavity shape

---

* **收稿日期**:2025-04-23
基金项目:国家自然科学基金项目(52274114);辽宁省科学技术计划项目(2023JH1/10400004)
作者简介:丁勇(1989—),男,江苏沭阳人,工程师,主要从事采矿工艺、采矿技术的管理和研究工作。E-mail:903196524@qq.com
通信作者:郝琪琪(1992—),男,山西吕梁人,博士研究生,主要从事深部矿山工程爆破与岩体稳定性分析研究工作。E-mail:neuhaoqiqi@163.com

0 引言

掏槽作为巷道掘进爆破过程的关键环节,其效果直接影响巷道掘进效率。根据炮孔方向与掘进断面的相对位置关系,掏槽方式可分为直眼掏槽和斜眼掏槽。其中,直眼掏槽钻孔作业受巷道断面尺寸限制小,广泛应用于中小断面巷道掘进。深埋巷道掘进爆破处于高应力环境,地应力对爆破效果影响显著。因此,开展高应力条件下直眼掏槽爆破问题研究具有重要意义。

研究人员针对掏槽爆破过程中岩石的破碎机理及相关参数优化问题开展了大量研究工作。王从银[1]分析了直眼掏槽爆破中槽腔的形成机理及大空孔作用原理,进而确定了合理的爆破参数。张奇等[2]通过模型试验分析了直眼掏槽爆破机理,探讨了炸药单耗、空孔作用、破碎块度和抛掷作用等关键问题。李启月等[3]通过数值模拟研究发现空孔改变了掏槽爆破的应力分布,对岩石槽腔破碎具有导向作用。朱永民等[4]针对硬岩掘进爆破中钻眼效率低、作业时间长及爆破效果差等问题,从装药结构、炸药性能与掏槽方式层面进行了理论分析与实践探索。张万志等[5]通过增设复式掏槽短眼、优化掏槽眼参数及装药量等,实现了硬岩隧道全断面平整度提升与炸药单耗降低。姚高辉等[6]介绍了天井一次爆破成井的两种掏槽爆破方案,并对两种掏槽爆破方案进行了数值模拟分析,分析结果表明,两种掏槽方案形成的掏槽断面尺寸均可满足设计要求,槽腔断面呈现出两端大中间小的特点,具有较好的掏槽效果。孟海利等[7]研究发现大直径中空孔直眼掏槽爆破可显著提升周边岩体破岩效率和爆破能量利用率。桂玮等[8]采用数值模拟分析了不同空孔位置对双阶直眼筒形掏槽爆破的影响,结果表明,4 个空孔均匀布置在装药孔连线中点位置为最优方案。张召冉等[9]通过理论计算与现场应用发现,空孔周围片裂破碎区的发育程度与岩石强度成显著负相关。王雁冰等[10]研究发现掏槽孔超深深度为 400 mm 时,炸药爆炸能量可充分用于破岩。

目前,深部高地应力对掏槽爆破效果的影响受到越来越多的关注。丁晨曦等[11]通过数值模拟计算发现,较大的地应力削弱了孔间爆炸应力波的相互作用,相邻炮孔减弱了爆炸主裂纹扩展的导向效应;即使在高地应力环境下,大空孔直眼掏槽爆破依然能够显著增加岩石破坏程度和破碎范围。李启月等[12]通过数值模拟分析了不同地应力环境下单孔直眼掏槽爆破的动态响应特征,结果表明,应力场对爆破裂纹的传播轨迹具有显著调控作用。GAO Jing 等[13]通过数值模拟研究发现,采用延时起爆策略可优化不同侧压系数条件下的五孔掏槽爆破效果。刘伟等[14]研究发现,动态卸载扰动更易诱发岩爆灾害。WU Zhengyu 等[15]发现地应力方向可显著调控深部爆破空孔效应,其中垂直应力会抑制岩体拉伸破坏。李新平等[16]通过数值模拟分析发现,高地应力环境下,初始地应力显著抑制掏槽爆破效果。张宇菲[17]开展了围压下的掏槽爆破相似材料试验,总结了围压效应对掏槽爆破成腔效果的影响规律。张宪堂等[18]采用水泥砂浆试件开展了双向等压下不同空孔直径的掏槽爆破试验,试验结果表明,当空孔直径过小时,空孔附近的应力值较低;而当空孔直径过大时,爆炸能量会从空孔泄出,导致应力集中叠加后产生的压应力与拉应力减小。XIE Lixiang 等[19]开展了双向静压应力条件下的掏槽爆破模拟研究,结果表明,随着双向静压应力的增加,爆破损伤区域呈现缩小的趋势。皇新宇等[20]基于 RHT 本构模型开展了四孔掏槽爆破数值模拟研究,分析了不同地应力条件下的岩石损伤及应力场动态演化过程。上述研究成果为高应力下掏槽爆破机理的认识和参数优化提供了重要参考,然而,不同起爆次序下深埋巷道直眼掏槽过程中的应变场演化、裂纹动态扩展过程等问题仍有待进一步研究。

本文采用围压加载装置对巷道模型施加三向静压力模拟深埋巷道地应力环境,采用金属丝电爆炸方法提供爆炸能量,开展不同起爆次序下的直眼掏槽爆破物理模型试验。利用超高速相机联合数字图像相关方法监测爆破过程中试样表面的应变演化过程以及裂纹扩展行为,并基于三维扫描结果比较了不同起爆次序下的爆破成腔形态。在此基础上,结合数值模拟方法再现试验过程,深入分析深埋巷道掏槽爆破内部损伤演化规律。

1 试验装置和试验设计

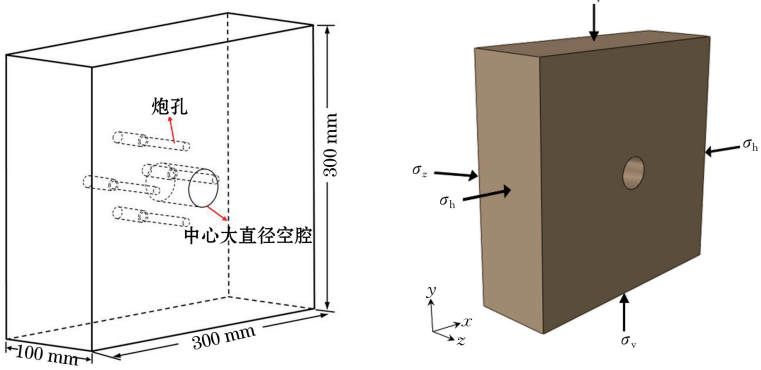
1.1 围压加载系统

本试验中的加载平台由抗冲击双轴加载系统和轴向加载系统组成。其中,双轴加载系统采用门式框架结构,为负载适应型电液伺服系统,可实现多通道异步协调加载。同时配备各种型号的加载垫块,可以实现尺寸范围 100 mm×100 mm×100 mm 至

500 mm×500 mm×250 mm 试件的静压力加载。试验中的垂直力和水平力最大均为 5 000 kN。系统能够实现 60 min 以上的保压能力，满足本研究试验需求。

1.2　试验方案

为更真实地模拟工程现场地应力条件，在试验中仅预留一个自由面，其余面施加围压应力。试验中的试件模型和围压应力加载方式如图 1 所示。本试验采用一种多紫铜丝并联结构的电极元件提供爆炸载荷，该元件通过多重绝缘防护防止电极击穿，最终与 Marx 储能器正负极对接实现爆炸能量控制。在考虑模型尺寸与释放能量稳定的前提下，设计了如图 2 所示的电极结构。该电极结构采用多金属丝并联共电极设计思路，能够在爆炸后产生一个柱状冲击波，可用于室内模拟柱状药包的爆炸试验。所设计的电极由玻璃纤维空心管、四氟聚乙烯绝缘管、有机玻璃管、负极铜环、负极铜条及正极铜棒等组成。玻璃纤维管的内径为 3 mm，外径为 6 mm。导电负极采用直径为 2.8 mm 的紫铜棒，正极则采用截面尺寸为 1.5 mm×2 mm 的铜条，以保证电流的顺利传输。起爆金属丝选用直径为 0.2 mm 的紫铜丝，主体起爆结构为 8 条铜丝并联，该设计可在爆炸后实现能量的有效分散。此外，电极结构还采用了多重绝缘处理，防止在电流传输过程中发生正负极击穿现象。铜丝与电极之间采用焊锡进行焊接，以提高电极的稳定性。在使用时电极正负极分别连接 Marx 储能器的正负极输出端。



（a）试件模型　　（b）围压加载示意

图 1　试件模型和围压加载示意

Fig.1　The specimen model and schematic of confining pressure loading

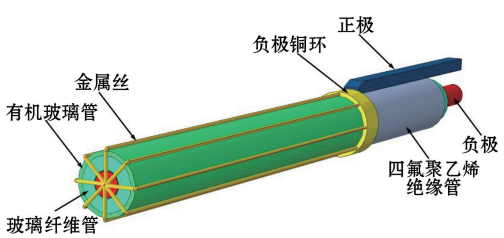
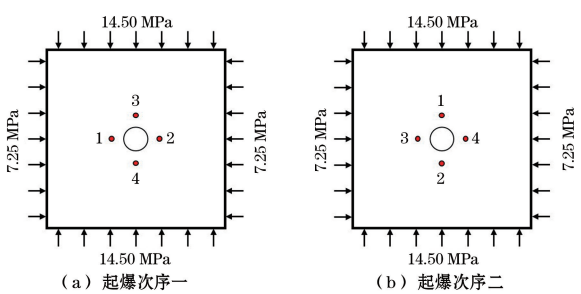


图 2　模拟柱状药包的电极结构

Fig.2　Electrode structure of the simulated column-shaped charge

爆破试验系统的充电电压为 52 kV，对应的能量为 5.41 kJ。采用数字图像相关方法与高速相机记录爆破过程中试件自由面的变形破裂过程，高速相机采集帧率设置为 5×10^5 帧/s，每次拍摄照片 180 张。起爆次序分为两种方式，如图 3 所示。起爆次序一为左→右→上→下，对应起爆最小主应力方向炮孔；起爆次序二为上→下→左→右，对应起爆最大主应力方向炮孔。不同起爆次序的试验围压条件为垂直方向应力 14.50 MPa，水平方向应力为垂直方向的 1/2。



（a）起爆次序一　　（b）起爆次序二

图 3　不同起爆次序下的爆破试验方案

Fig.3　Blasting test schemes with different detonation sequences

2　试验结果与讨论

2.1　应变场演化

不同起爆次序下试件 xy 平面应变场演化过程

如图 4 所示。由图 4 可以看出,58 μs 时,试样表面分布有三个应变集中区,首爆炮孔位置为拉应变集中区,其两侧近乎对称地分布着两个压应变集中区。随着爆破过程的进行,应变集中区的范围不断增大。通过对比发现,在相同时刻,先起爆上侧炮孔产生的拉应变集中区的长轴尺寸明显大于先起爆左侧炮孔产生的拉应变集中区的长轴尺寸,说明先起爆上侧炮孔更容易产生平行于最小主应力方向的变形。

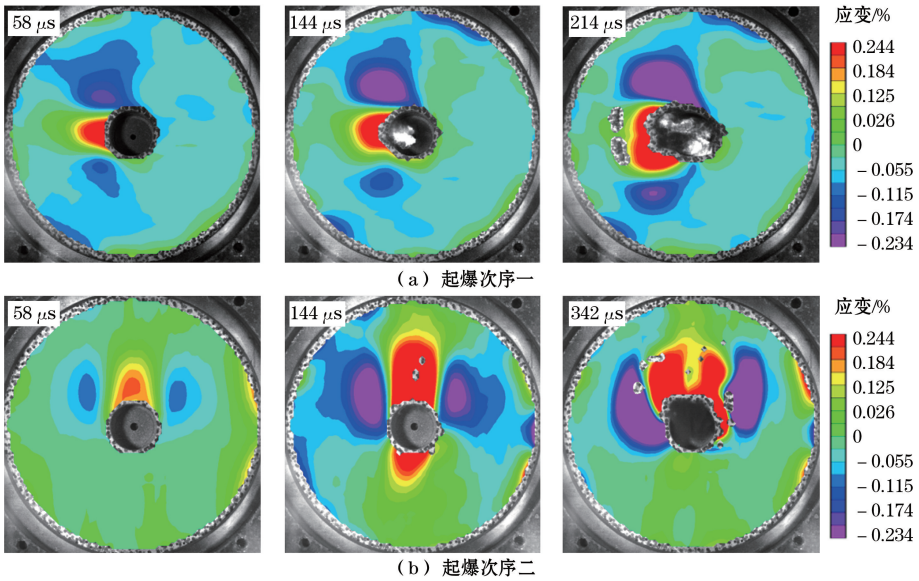


图 4 不同起爆次序下试件 *xy* 平面的应变场演化过程

Fig.4 The evolution process of strain field in *xy* plane with different detonation sequences

根据笛卡尔坐标系与极坐标系的转换关系,提取了如图 5 所示的炮孔与空孔连线上的不同位置测点的环向应变。如左侧孔起爆时,试件产生的环向应变对应 *y* 方向应变。环向应变时程曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出,先起爆上侧炮孔时产生的环向应变大于先起爆左侧炮孔。采用起爆次序一时,监测点 *A* 至 *D* 的环向应变峰值分别为 7 720 με、6 870 με、3 700 με、1 840 με;采用起爆次序二时,监测点 *A* 至 *D* 的环向应变峰值分别为 8 000 με、9 310 με、7 380 με、4 500 με。结果表明,在相同的爆炸能量下,采用起爆次序二更容易在空孔与爆破孔间形成贯穿性裂纹,有利于在掏槽爆破中形成完整的槽腔。

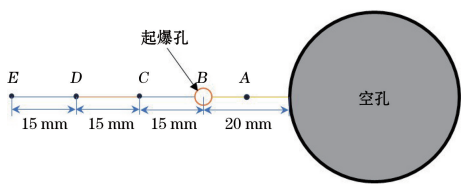


图 5 监测点布置

Fig.5 Layout of monitoring point

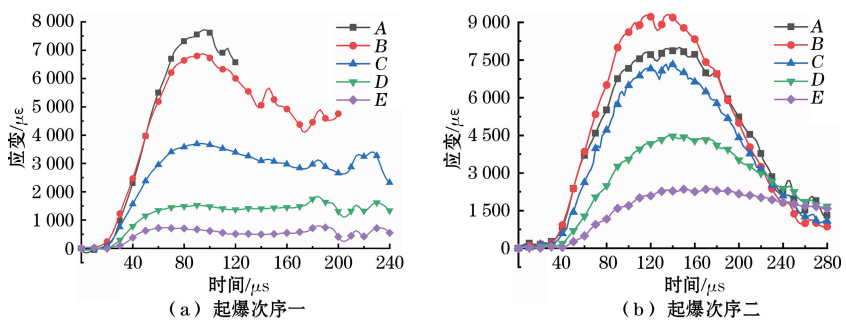


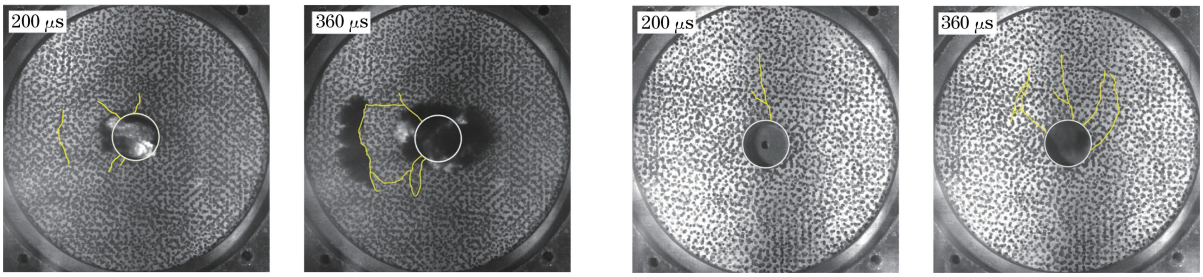
图 6 不同起爆次序下环向应变时程曲线

Fig.6 Time history curves of circumferential strain with different detonation sequences

2.2 裂纹演化

图 7 为不同起爆次序下试件的裂纹演化特征。由 200 μs 时的裂纹分布状态可以看出,先起爆左侧炮孔时,试件会优先在左侧位置出现一条竖向裂纹;

而先起爆上侧炮孔时，会先出现一条由空孔壁向外延伸的竖向裂纹。360 μs 时，先起爆上侧炮孔会产生多条竖向裂纹；而先起爆左侧炮孔时，从空孔壁产生的裂纹与最大主应力（垂直）方向的夹角约为30°。由此可见，围压作用下试件的爆生裂纹更易沿着最大主应力方向扩展。

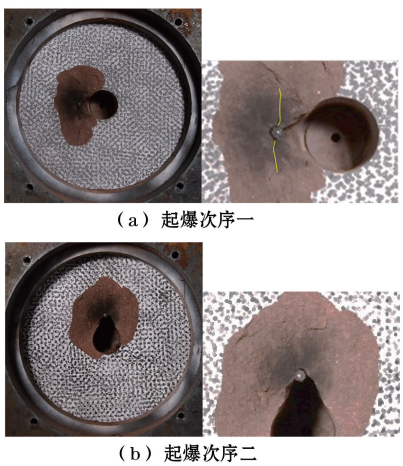


（a）起爆次序一　（b）起爆次序二

图 7　不同起爆次序下试件的裂纹演化特征

Fig.7　Crack evolution characteristics of specimens with different detonation sequences

图 8 为不同起爆次序下试件的表面爆破漏斗形态及炮孔局部放大图。由图 8 可以看出，两种爆破方案的爆破漏斗均呈椭圆形，并且椭圆的长轴方向平行于最大主应力方向。先起爆左侧炮孔时，炮孔的上下两侧出现了两条平行于最大主应力方向的裂纹，而先起爆上侧炮孔时则无明显的周边裂纹出现。这表明，最大主应力方向对爆破过程中岩石的破裂形态具有显著的导向作用，决定了爆破漏斗的最终形态。



（a）起爆次序一

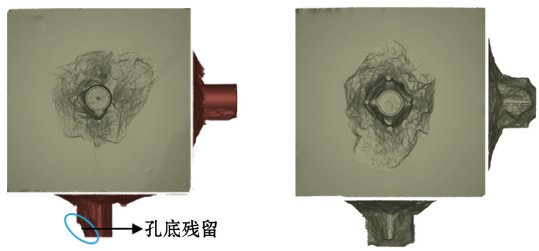
（b）起爆次序二

图 8　不同起爆次序下试件的爆破漏斗形态

Fig.8　The shape of blasting craters of spcimens with different detonation sequences

2.3　成腔形态

图 9 为不同起爆次序下多孔爆破的三维扫描结果。从三维扫描结果可以看出，在两种起爆次序下，爆破漏斗表面呈现出不同的几何形态。起爆次序一（先起爆最小主应力方向）时，爆破漏斗表面几何形态接近圆形；起爆次序二（先起爆最大主应力方向）时，爆破漏斗表面几何形态呈现为长轴平行于最大主应力方向的椭圆形。两种起爆次序下，内部槽腔形态也存在明显区别。起爆次序一时，试件只有左侧和下侧爆破孔起爆后形成了完整的槽腔；起爆次序二时，4 个爆破孔起爆后均成功形成了完整槽腔。



（a）起爆次序一　（b）起爆次序二

图 9　不同起爆次序下爆破成腔三维扫描图

Fig.9　Three-dimensional scanning diagrams of blasting cavity with different detonation sequences

产生这一差异的主要原因在于：侧压系数为1/2时，空孔壁左右两侧的环向静应力明显大于上下两侧的环向静应力。因此，在先起爆最大主应力方向的炮孔时，上下炮孔起爆后更容易产生沿最大主应力方向（竖直方向）扩展的裂纹，表面爆破漏斗呈现为椭圆形。而当先起爆最小主应力方向的炮孔时，由于空孔壁左右两侧环向压应力较大，炮孔与空孔之间的径向裂纹发育与贯通受到抑制，致使其成腔难度增加。

3　数值模拟

3.1　计算模型

数值模拟模型以室内试验中的无静载荷掏槽爆破试验为基础，如图 10 所示。利用 Ansys 自带的前处理器创建了三维数值模拟模型，为了保证模型计算的准确性，在炸药及其附近等重点关注区域进行了网格细化处理。数值模型单元包括岩石、炸药和空气耦合层，计算时采用了流固耦合算法。选择 TNT 作为爆炸能量的来源，并采用 JWL 状态方程描述爆炸压

力的变化。其中,炸药的爆压为 21 GPa。岩石材料参数采用 RHT 本构模型,部分参数见表 1。

表 1 岩石参数

Table 1 Parameters for the rock

密度/(kg/m³)	剪切模量/GPa	抗压强度/MPa	孔隙开始压碎压力/MPa
2 352	22.8	48.3	33.46
压实压力/GPa	初始孔隙比	剪压强度比	拉压强度比
6.0	1.0	0.211	0.11



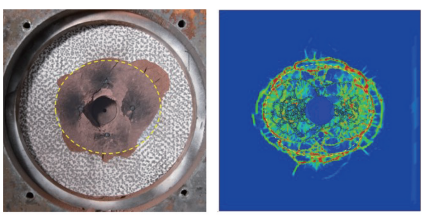
(a) 数值模型平面 (b) 网格模型

图 10 数值模拟计算模型

Fig.10 Numerical simulation models

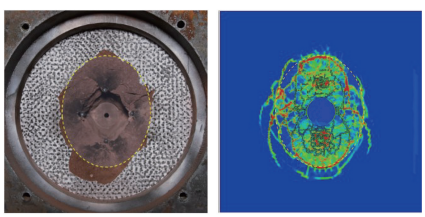
3.2 数值模拟与试验结果对比

图 11 展示了两种起爆次序下爆破试验与数值模拟的试件表面损伤形态对比。可以看出,爆破试验与数值模拟计算结果具有较好的一致性。如图 11(b)中,爆破试验形成的爆破漏斗其左下角出现了明显的片落现象,而数值模拟结果中环向损伤裂纹位置与试验中片落区域基本一致。



爆破试验 数值模拟

(a) 起爆次序一



爆破试验 数值模拟

(b) 起爆次序二

图 11 不同起爆次序下爆破试验与数值模拟表面损伤形态对比

Fig.11 Comparison of surface damage morphology between blasting tests and numerical simulations with different detonation sequences

3.3 损伤演化过程

为分析不同起爆次序下首爆孔周围静应力对损伤演化的影响,提取了图 12 中虚线框区域的损伤分布云图。其中,区域 A 为起爆次序一的损伤结果提取区域,区域 B 为起爆次序二的损伤结果提取区域。图 13 为不同起爆次序下首爆孔起爆后的损伤分布云图。

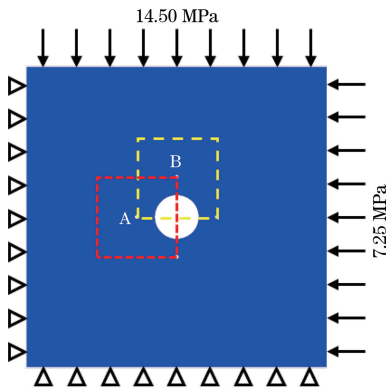
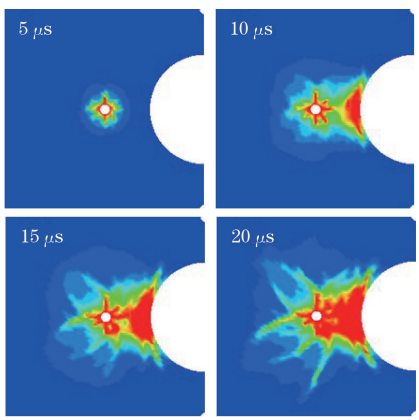
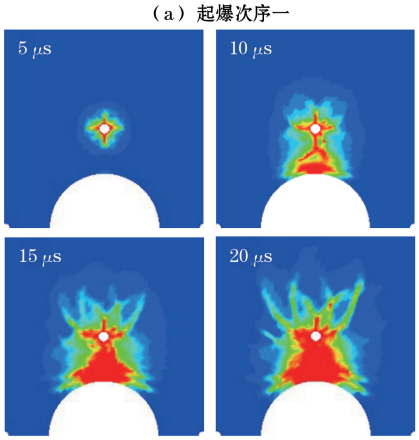


图 12 损伤提取位置

Fig.12 The extraction location of damage



(a) 起爆次序一



(b) 起爆次序二

图 13 不同起爆次序下首爆孔起爆后损伤分布云图

Fig.13 Damage distribution cloud maps after detonation of the first blast hloe with different detonation sequences

由图 13 可以看出，首爆孔起爆后 5 μs 时，不同起爆次序下的炮孔邻近区域均产生了平行于最大主应力方向的损伤裂纹；而 10 μs 时，不同起爆次序下的损伤分布云图呈现出明显差异，起爆次序一的爆破孔右侧的损伤裂纹密度大于左侧，起爆次序二左右两侧的损伤裂纹密度无明显差异，但损伤裂纹的长度明显大于起爆次序一的损伤裂纹长度，且爆破孔下部的损伤长度大于上部的损伤长度；20 μs 时，起爆次序一爆破孔周边的损伤裂纹呈现出偏向最大主应力方向的趋势，起爆次序二爆破孔周边出现了较多平行于最大主应力方向的损伤裂纹。

图 14 为剩余爆破孔起爆后的内部损伤云图。由图 14 可以看出，2 000 μs 时，起爆次序一工况下左右爆破孔起爆后，炮孔临近区域出现了孔底残留现象；4 000 μs 时，底部爆破孔起爆后也出现了明显的孔底残留现象。对比两种起爆次序下的内部槽腔面积可以看出，起爆次序二的成腔效果优于起爆次序一。这是由于先起爆左右两侧爆破孔时，致裂爆破孔与空孔间的岩石需要克服空孔周边的环向压应力才能形成贯穿性破坏，而环向应力过大易导致爆破失败。即使致裂成功，爆破所形成的“V”形槽张开角也较起爆次序二所形成的“V”形槽张开角小，从而减少了后续炮孔的补偿空间，导致后续爆破中易出现孔底残留现象。

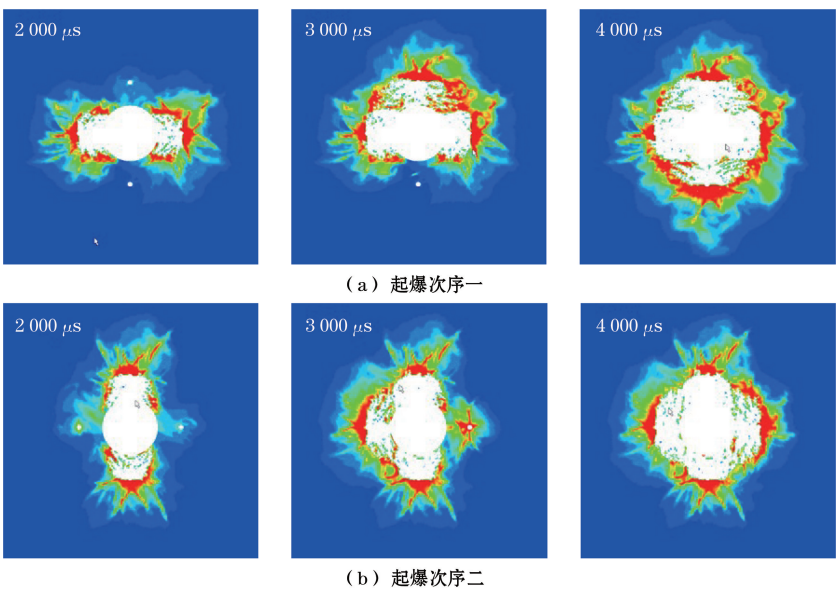


图 14　不同起爆次序下剩余爆破孔起爆后内部损伤分布云图

Fig.14　Internal damage distribution cloud maps after detonation of residual blast holes with different detonation sequences

4　结论

(1) 起爆次序会显著影响空孔环向应变分布，与起爆次序一相比，起爆次序二空孔周围监测点的环向应变峰值明显提高。首爆孔布置在最大主应力方向时，可有效增强空孔环向应变并促进贯穿性裂纹形成，显著提升槽腔贯通效率。裂纹演化特征及爆破漏斗形态分析表明，围压加载下试件的爆生裂纹更易沿着最大主应力方向扩展，最大主应力方向对爆破过程中岩石的破裂形态具有显著的导向作用。

(2) 三维扫描结果显示，在深部直眼掏槽爆破中首爆孔布置在最大主应力方向时，更容易爆破形成槽腔。其原因为空孔左右两侧的环向压应力较大，会抑制炮孔与空孔间的径向裂纹发育与贯通，致使其成腔难度大。

(3) 数值模拟结果表明，优先起爆最大主应力方向炮孔的方案(起爆次序二)能够扩大损伤区范围、改善槽腔几何形态，并减少孔底残留，为后续爆破创造更优的自由面条件。

参考文献(References)：

[1]　王从银.直眼掏槽的破岩机理及掏槽设计[J].爆破，1995(2)：51-55.
WANG Congyin. Rock breaking mechanism and hole cut design for parallel hole cut[J]. Blasting, 1995(2):51-55.

[2]　张奇，张玉明，雒昆利.直眼掏槽的爆破作用及参数计算[J].岩土力学，1997(2)：51-56.
ZHANG Qi, ZHANG Yuming, LUO Kunli. Parameter calculation for multi-step and multi-stage blasting with vertical borehole cutting[J]. Rock and Soil Mechanics, 1997(2):51-56.

[3] 李启月,徐敏,范作鹏,等.直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J].爆破,2011,28(4):23-26.
LI Qiyue, XU Min, FAN Zuopeng, et al. Simulation of rock failure process in cutting by parallel hole andanalysis on empty hole effect[J]. Blasting,2011,28(4):23-26.

[4] 朱永民,郭景秋,郭爱清.提高硬岩巷道爆破效率的研究与实践[J].煤矿开采,2002(3):47-49.
ZHU Yongmin, GUO Jingqiu, GUO Aiqing. Study and practice of raising explosive efficiency in hard rock[J]. Coal Mining Technology,2002(3):47-49.

[5] 张万志,徐帮树,葛颜慧,等.硬岩隧道全断面开挖掏槽爆破参数优化[J].爆破,2022,39(2):94-99.
ZHANG Wanzhi, XU Bangshu, GE Yanhui, et al. Optimization of cutting blasting parameters for full face excavation of hard rock tunnel[J]. Blasting,2022,39(2):94-99.

[6] 姚高辉,李宜鑫.中深孔一次爆破成井的掏槽爆破方式优化研究[J].矿业研究与开发,2023,43(9):21-25.
YAO Gaohui, LI Yixin. Study on optimization of undercut blasting method of disposable blasting well in middle-deep holes[J]. Mining Research and Development,2023,43(9):21-25.

[7] 孟海利,孙鹏昌,薛里,等.大直径中空孔直眼掏槽爆破的空孔应力集中效应研究[J].爆破,2023,40(4):60-65+153.
MENG Haili, SUN Pengchang, XUE Li, et al. Study on stress concentration effect of large-diameter emptyhole in burn cut blasting[J]. Blasting,2023,40(4):60-65+153.

[8] 桂玮,宗琦,汪海波,等.基于RHT模型的立井掏槽爆破空孔布置方式对破岩效果影响研究[J/OL].工程爆破:1-13[2025-04-20].https://doi.org/10.19931/j.EB.20240309.
GUI Wei, ZONG Qi, WANG Haibo, et al. Research on the influence of vertical shaft grooving and blasting hole arrangement on rock breaking effect based on RHT model [J/OL]. Engineering Blasting:1-13[2025-04-20].https://doi.org/10.19931/j.EB.20240309.

[9] 张召冉,王岩,刘国庆.空孔对直眼掏槽参数及爆破效果的影响研究[J].爆炸与冲击,2023,43(1):141-156.
ZHANG Zhaoran, WANG Yan, LIU Guoqing. Theoretical study of the influence of empty-hole on both theblasting parameters and the blasting effect of straight-hole cutting [J]. Explosion and Shock Waves,2023,43(1):141-156.

[10] 王雁冰,张航,杨仁树,等.掏槽孔超深深度对爆破效果的影响[J].工程科学学报,2023,45(2):182-194.
WANG Yanbing, ZHANG Hang, YANG Renshu, et al. Experiment study on overdepth coefficient of the cut hole in coal mine roadway excavation blasting[J]. Chinese Journal of Engineering,2023,45(2):182-194.

[11] 丁晨曦,梁欣桐,杨仁树,等.高地应力巷道掏槽爆破的应力演化与损伤破裂研究[J].煤炭科学技术,2024,52(7):79-88.
DING Chenxi, LIANG Xintong, YANG Renshu, et al. Study on stress evolution and damage fracture of cut blasting in high in-situ stress roadway [J]. Coal Science and Technology,2024,52(7):79-88.

[12] 李启月,黄武林,吴正宇,等.不同地应力条件下直眼掏槽破岩的理论研究与数值模拟[J].中国安全生产科学技术,2016,12(11):57-62.
LI Qiyue, HUANG Wulin, WU Zhengyu, et al. Theoretical study and numerical simulation on rock failure process in cutting by parallel hole under different ground stress conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology,2016,12(11):57-62.

[13] GAO Jing, XIE Shizhen, ZHANG Xiantang, et al. Study on the 2D optimization simulation of complex five-hole cutting blasting under different lateral pressure coefficients [J]. Complexity,2020:4639518.

[14] 刘伟,张伟,陈士海.深部岩石巷道爆破卸荷的破裂范围研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2013,32(2):66-70.
LIU Wei, ZHANG Wei, CHEN Shihai. Study on cracking area of deep rock tunnel under blasting unloading [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2013,32(2):66-70.

[15] WU Zhengyu, LUO Dayou, CHEN Feng, et al. Numerical simulation of empty-hole effect during paralle-hole cutting under different in situ stress conditions[J]. Advances in Civil Engineering,2021:8881491.

[16] 李新平,宋凯文,罗忆,等.高地应力对掏槽爆破及爆破应力波影响规律的研究[J].爆破,2019,36(2):13-18+53.
LI Xinping, SONG Kaiwen, LUO Yi, et al. Study on influence of high in-situ stress on cut blasting and blast waves[J]. Blasting,2019,36(2):13-18+53.

[17] 张宇菲.高地应力岩巷掏槽爆破围压效应模型试验研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2018.
ZHANG Yufei. Model test study on confining pressure effect of cut blasting in high geo-stress rock lane[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing,2018.

[18] 张宪堂,董国庆,余辉,等.围压下空孔直径对直眼掏槽爆破振动的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(3):44-52.
ZHANG Xiantang, DONG Guoqing, YU Hui, et al. Influence of empty hole diameters on blasting vibration of parallel cut under confining pressure [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2023,42(3):44-52.

[19] XIE Lixiang, LU Wenbo, ZHANG Qinghui, et al. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cutblasting [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,58:257-270.

[20] 皇新宇,纪强,张宪堂,等.地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版).2022,41(2):60-69.
HUANG Xinyu, JI Qiang, ZHANG Xiantang, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress[J].Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2022,41(2):60-69.