



我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展

杨仁树 李成孝 陈骏 邹凤仪 王雁冰 肖成龙 张召冉

引用本文:

杨仁树, 李成孝, 陈骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224–241.
YANG Renshu, LI Chengxiao, CHEN Jun. Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224–241.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1804>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数值模拟的岩石巷道深孔分段装药掏槽爆破研究

Research on deep hole segmented charge cut blasting of rock roadway based on numerical simulation

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 100–111 <https://doi.org/10.12438/cst.2022-0906>

煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨

Discussion on ultra-deep depth problem of slot hole in blasting excavation of rock roadway in coal mine

煤炭科学技术. 2020, 48(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/bb046330-479c-47e8-a8eb-57f2814d8726>

煤矿岩巷爆破掘进炮孔密度优化研究

Optimization of blasting hole density in rock roadway driving

煤炭科学技术. 2021, 49(1): 183–191 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.013>

周边眼聚能爆破参数数值模拟研究

Study on numerical simulation on shaped charge blasting parameters of peripheral holes

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/92f02cc4-5623-473f-8b6e-41e3f5d1ca63>

空孔直径对有围压直眼掏槽爆破破碎效果的影响

Influence of diameter of empty hole on the fragmentation effect of parallel cut blasting under confining pressure

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 55–64 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1357>

竖井二氧化碳“二阶二段”筒形掏槽爆破技术及应用

Application and carbon dioxide two-step barrel cut blasting technology in coal mine shaft

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 65–71 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2023-0468>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨仁树, 李成孝, 陈 骏, 等. 我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 224–241.

YANG Renshu, LI Chengxiao, CHEN Jun, *et al.* Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 224–241.

我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展

杨仁树^{1,2}, 李成孝³, 陈 骏³, 邹凤仪³, 王雁冰^{2,3}, 肖成龙⁴, 张召冉⁵

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 4. 北京理工大学 机电工程学院, 北京 100081; 5. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘 要: 巷道是煤炭生产的动脉。基于岩巷钻爆法施工, 从爆破关键技术、掘进装备、爆破器材等方面, 系统梳理了我国煤矿岩巷爆破掘进经历了爆破质量控制、掘进速度提升和巷道安全服役保障 3 个阶段的发展历程。在总结分析 3 个阶段发展特点及历程的基础上, 重点介绍了煤矿岩巷爆破新技术的研究进展及工程应用: ①周边定向断裂控制爆破技术, 控制了爆炸能量在介质中的分布, 验证了聚能药包对于提升巷道轮廓成型质量、降低围岩损伤以及减少炮眼数量的作用。②掏槽眼超深爆破参数优化技术, 超深与循环进尺和巷道轮廓面面积相关, 超深值直接影响炮眼利用率和单耗, 针对淮南顾北矿的典型案列, 当超深为 400 mm 时, 爆破效果最好。③孔内分段装药爆破技术, 最优上段炸药占比为 0.382, 结合数码电子雷管进行分段起爆, 开创了在煤矿巷道采用数码电子雷管爆破的先例。④“相似”掏槽爆破技术, 从理论上分析了传统掏槽爆破与“相似”掏槽爆破的区别, 提出并证实了均化抵抗线的重要性。综合应用上述爆破技术, 使全断面爆破的炮眼数量从(5~6)*S* 的平均水平降低至(3~4)*S* (*S* 为巷道断面面积), 实现了增加单循环进尺、提高炮眼利用率、控制巷道轮廓成型质量、降低围岩损伤等效果。从煤矿地下空间工程全生命周期来看, 不断优化的爆破技术, 降低了对围岩和结构体的循环动力扰动, 保障了煤矿岩巷工程的长期服役安全。

关键词: 岩巷爆破掘进; 掏槽眼超深; 分段装药; 聚能药包; “相似”掏槽爆破; 数码电子雷管

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0224-18

Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China

YANG Renshu^{1,2}, LI Chengxiao³, CHEN Jun³, ZOU Fengyi³, WANG Yanbing^{2,3},
XIAO Chenglong⁴, ZHANG Zhaoran⁵

(1. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory for GeoMechanics & Deep Underground Engineering, Beijing 100083, China; 3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 4. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 5. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Roadways are the arteries of coal production. Based on the construction of rock roadway drilling and blasting method, from the aspects of key blasting technology, tunneling equipment, blasting equipment, etc., the development process of rock roadway blasting in China's coal mines has gone through three stages: blasting quality control, driving speed increase, and roadway safety service guarantee. On the basis of summarizing and analyzing the development characteristics and history of the three stages, the research progress and engineering application of the new technology of rock roadway blasting in coal mines are mainly introduced: ① Peripheral directional fracture control blasting technology controls the distribution of blast energy in the medium, and verifies the effect of shaped charges on improving the quality of roadway profile formation, reducing surrounding rock damage and reducing the number of blast holes. ② In terms of parameter optimization technology for ultra-deep blasting of cutting holes, the ultra-depth is related to the cycle footage and the area of the

收稿日期: 2022-10-08 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-1804

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51934001)

作者简介: 杨仁树(1963—), 男, 安徽和县人, 教授, 博士。E-mail: yrs@cumtb.edu.cn

roadway profile surface, and the ultra-depth value directly affects the utilization rate and unit consumption of the blast hole. For the typical case of Gubei Mine in Huainan, the blasting effect is the best when the over-depth is 400 mm. ③ In terms of segmental charge blasting technology in the hole, the optimal proportion of the upper explosive is 0.382, combined with the digital electronic detonator for segmental detonation, creating a precedent for the use of digital electronic detonator blasting in coal mine roadways. ④ In terms of similar-cut blasting technology, the difference between traditional notch blasting and similar-cut blasting is analyzed theoretically, and the importance of equalized resistance line is proposed and confirmed. The comprehensive application of the above blasting technologies reduces the number of blastholes in full-face blasting from an average level of (5–6) S to (3–4) S (S is the cross-sectional area of the roadway). The effects of increasing single-cycle footage, improving blast hole utilization, controlling roadway profile forming quality, and reducing surrounding rock damage have been achieved. From the perspective of the entire life cycle of the coal mine underground space project, the continuously optimized blasting technology reduces the cyclic dynamic disturbance to the surrounding rock and structure, and ensures the long-term service safety of the coal mine rock roadway project.

Key words: rock roadway blasting excavation; cut hole ultra-deep; segmented charge; shaped charge; similar cut blasting; digital electronic detonator

0 引 言

煤炭为国民经济和社会发展提供了可靠的能源保障,2021年,我国原煤产量达41.3亿t,煤炭消费量占能源消费总量的56%,煤炭在我国能源体系中的主体地位和“压舱石”作用短期内不会改变。煤炭资源赋存特征和行业长期发展的惯性决定了我国煤矿以井工开采为主,2019年井工煤矿数量和产量仍分别占总量的92.6%和81.8%^[1]。岩巷是煤矿通风、物料运输、人员通行以及机械调配的重要通道,是保证井下生产系统正常运转的动脉。

我国煤矿井巷年掘进长度超过10 000 km,其中岩巷长度超过2 000 km^[2]。相对于煤巷而言,岩巷掘进难度大、耗时长,对煤矿安全高效开采影响显著。因此,岩巷掘进理论与技术一直是矿井建设工程的核心研究内容之一。

煤矿巷道掘进的主要方法有钻爆法和综合机械化掘进法^[3-7]。我国煤矿巷道掘进的机械化程度约为60%^[8],综合机械化掘进方法主要应用于煤巷掘进施工,其主要优势在于速度快、安全性高,人员少。然而,在岩巷掘进中,巷道断面、岩层条件、机械装备可靠性等是限制机械方法广泛使用的主要因素。钻爆法因其施工灵活、操作简单、成本低以及施工环境适应性强等优点,是煤矿岩巷掘进施工的基本方法。在我国构建新发展格局和实现碳排放目标的指导下,对采用钻爆法掘进的矿井来说,提高爆破掘进效率、加快装备迭代、采用新型爆破技术是解决采掘失衡矛盾、加快释放优质煤炭产能的关键。

回顾总结我国煤矿岩巷爆破掘进施工技术发展的3个阶段,梳理钻爆法施工中关键爆破技术、掘进装备、爆破器材的革新过程,介绍煤矿岩巷爆破中新开发的4种技术及典型工程应用案例,为推动我国

煤炭工业“十四五”高质量发展提供借鉴。

1 我国煤矿岩巷爆破掘进发展的3个阶段

1.1 爆破质量控制阶段

20世纪80年代初,随着改革开放政策的实施,社会经济发展对煤炭的需求量猛增,我国煤炭产能稳步提升(图1),但行业整体呈粗放式发展。至90年代末,煤炭出现供大于求局面,大型国有煤炭企业通过减人增效等政策改善经营。对当时的绝大多数煤矿而言,煤炭开采普遍存在技术不配套、劳动生产率低等问题。针对钻爆法施工工艺,则主要是爆破器材和技术落后、爆破效果差的问题。

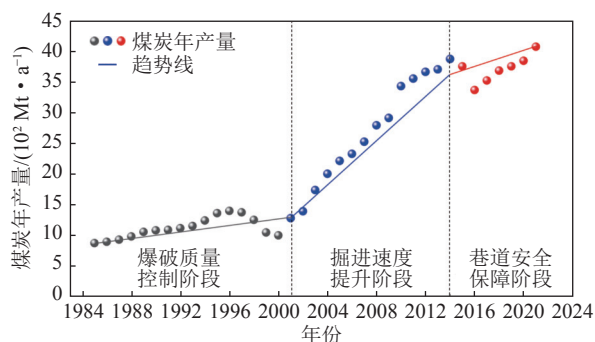


图1 我国历年煤炭产量

Fig.1 Coal production of China in each year

原煤炭工业部曾在1964年就提出煤矿质量标准化建设,但面对恢复和提高生产力、保障煤炭供应等繁重任务,质量标准化建设工作未能起到预期效果。80年代中期,我国煤炭工业总结多年的经验与教训,逐步发展完善并形成一整套科学管理体系,为了实现国内统一标准,于1986年在全国开展实施质量标准化建设。在此期间,原煤炭工业部科技局、技术司先后汇编了煤炭工业50项先进技术,原中国统配煤矿总公司编写了100项科技资料汇编,均有爆破相

关的重点技术获得全国推广应用^[9],如:“三小”光爆锚喷岩巷掘进技术、光爆锚喷技术、岩巷断裂控制爆破技术等。

为进一步提高煤矿质量标准化建设的水平,原国家煤矿安全监察局分别于 2004 年、2009 年、2013 年和 2017 年对原部颁标准进行修订,现在执行的是原国家煤矿安全监察局于 2020 年印发的《煤矿安全生产标准化考核定级办法(试行)》(煤安监行管〔2020〕16 号)版本^[10]。

1.1.1 巷道成型质量的关键在周边

2000 年前,我国煤矿巷道断面普遍小于 10 m^2 ,钻眼深度在 2.0 m 以下的岩巷循环进尺超过 50%,且主要采用楔形掏槽形式进行爆破作业,这种掏槽形式成腔效果好、炮眼利用率高。但受巷道小断面限制,实际钻眼时,楔形掏槽的角度难以控制,爆破中易产生“冲天炮”,对工程进度造成很大影响。

这一阶段的巷道成型质量差,超挖现象严重,在煤矿井巷工程^[11]、公路铁路隧道工程^[12-14]中普遍存在。过度的超挖需要大量的支护材料进行填充,造成巷道支护成本高。为降低支护成本,煤炭企业普遍关注巷道爆破成型质量,“三小”光爆掘进技术、岩巷断裂控制爆破技术等岩巷掘进施工中受到普遍欢迎,应用范围不断扩大。

“三小”光爆锚喷掘进技术主要采用小钻头、小锚杆及小药卷,实施光面爆破、锚喷支护,形成一套适用于中、小断面岩巷掘进的作业线。该技术在提高岩巷掘进速度和成型质量,改善作业环境,降低成本等方面效果显著。在实际应用中,宗琦等^[15]、李海燕^[16]采用“三小”爆破技术,打眼时间缩短了约 30%,循环进尺提高了 20%,相应地节约了材料、水电等掘进成本。“三小”光爆锚喷掘进技术迄今仍然在公路、铁路隧道中广泛使用。

部分学者从光面爆破的其他角度来提高周边爆破效果,戴俊等^[17-18]计算了光面爆破相邻炮孔的起爆时差,对相邻炮孔裂纹扩展进行了模拟。徐颖等^[19]计算了光面爆破中周边眼装药不耦合系数、间距以及装药集中度,优化了爆破参数。付玉华等^[20]提出了损伤条件下光面爆破炮孔间距的计算方法,研究表明较小的炮孔间距会加剧围岩损伤,合理的光面爆破参数会提高爆破质量。王海亮等^[21]研究了控制巷道成型质量的影响因素,采用间隔装药和不耦合装药装填周边眼可以保证较高的周边眼痕率,保证围岩稳定性和巷道轮廓成型。

同时期,国内外不少学者开始致力于有关定向

断裂控制爆破技术的理论与应用研究。主要包括了采用刻槽眼、聚能切缝药包、聚能射流药包等形式(图 2)的定向断裂控制爆破。国外的 Foser 公司^[22]提出了刻槽方法,这种方法可以通过增加炮眼间距减少炮眼数量,从而缩短钻眼时间。WILLIAMS^[23]通过理论计算了含 V 型缺口的各向同性材料特征方程,获得了尖端应力与切口张角的关系。然而,在炮眼壁进行刻槽操作在实际施工过程中存在困难,目前没有高效的钻眼器械可以完成刻槽钻眼,因此这种方法使用较少。

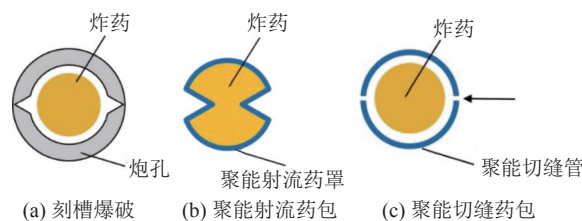


图 2 不同类型的定向断裂控制爆破形式

Fig.2 Different types of directional fracture controlled blasting

研究者开始聚焦于炸药及管壳作用的聚能爆破。聚能爆破主要分为聚能射流爆破(图 2b)和聚能切缝爆破(图 2c)。CORNISH 等^[24]研究了聚能射流爆破的作用机理,通过对射流颗粒形状、分离以及沉积结果对比发现颗粒碰撞速度是影响爆破效果的决定性因素。HAYES 等^[25]设计出了射流聚能药卷,对爆破碎片进行了对比,同时采用 X 射线观察了聚能射流效应。聚能切缝爆破对于药卷的处理更加高效,FOURNEY 等^[26]研制出了双侧聚能切缝药包,研究表明切聚能缝药包具有定向断裂控制效果。XUE 等^[27]研究了聚能药包在高应力下的作用机理,在切顶爆破施工中建立了纵向和侧向的模型。国内如杨永琦等^[28]率先采用动光弹动态量测技术,优选出定向切缝药包爆破新方法,李孝林等^[29]论述了断裂爆破的基本原理和技术要点,工程应用证实了巷道定向断裂控制爆破工艺取得了良好的爆破效果。

1.1.2 煤矿许用炸药保障爆破作业安全

1976 年全国统配煤矿发生的瓦斯和煤尘爆炸事故中,有 35% 是由于爆破作业不安全引起的^[30]。而大部分瓦斯、煤尘爆炸事故与炸药的瓦斯安全性能有很大关系。开发适用的煤矿许用炸药是煤矿质量标准化建设阶段的重要任务。

煤矿许用炸药是我国工业炸药的重要组成部分,由于煤矿井下环境的特殊性,国内曾使用过多种煤矿许用炸药^[31],包括:①煤矿许用膨化硝酸铵炸药,是煤炭行业“九五”重点推广计划项目。②煤矿许用

粉状铵梯炸药,曾是煤炭行业用量最大的炸药,《全国民用爆破器材业发展“十五”计划纲要》明确指出,逐步淘汰铵梯炸药等落后产品;③煤矿许用水胶炸药,是在浆状炸药的基础上发展起来的一种新型炸药,其对瓦斯、煤尘的安全性较高;④煤矿许用乳化炸药,是全国推广应用最多的煤矿许用炸药品种;⑤煤矿许用粉状乳化炸药,是推广应用的无梯煤矿许用炸药之一,为我国煤矿许用工业炸药增添了新品种;目前,乳化炸药^[32]和水胶炸药^[33]在煤矿井下爆破中应用最为广泛。

1.2 掘进速度提升阶段

进入21世纪后,特别是我国加入世界贸易组织以后,全国对煤炭的需求量大幅提升,原有煤炭产能难以满足实际需求。然而,增加煤炭产能不仅要提高采煤效率,还要开拓新的采煤工作面,这就需要掘进更多的巷道,而开拓新巷道,特别是岩石巷道,需要的施工作业周期长,施工难度大,掘进速度难以快速提升。尽管岩巷工程量只占所有巷道的1/5左右,然而其工程周期占到整体的40%~60%,采掘比例失调的问题逐渐显现^[34]。

2001—2014年,为顺应时代发展,缓解采掘失衡矛盾,国内开展科研攻关,着重解决采掘速度低的关键技术问题,这一时期是煤矿岩巷爆破掘进的速度提升阶段。

1.2.1 巷道进尺的关键在掏槽

掏槽爆破是钻爆法施工的关键技术特征,其效果的优劣对掘进速度、工效和成本有较大的影响^[35]。诸多专家学者通过加大爆破进尺结合不同掏槽形式,在煤矿岩巷全断面掘进中开展应用。例如,坚固砂岩的硬岩巷道掘进施工中,采用楔形掏槽和中深孔爆破技术以后,单循环进尺增加,炮眼利用率提高,爆破效果显著^[36];白色细砂岩、层节理不发育的巷道中,以往采用的单楔形掏槽导致循环进尺低但应用底部复式楔形掏槽和中深孔爆破技术之后,掘进速度大幅提高^[37];在岩性较坚硬、整体性好、断面小的青砂岩巷道中,中深孔爆破采用直眼掏槽较斜眼掏槽更好,爆破块度适中,进尺增加显著^[38];以砂质泥岩为主的大断面岩巷掘进中,采用双楔形掏槽全断面中深孔爆破掘进工艺,实现了优质、快速、安全、高效施工^[39];在坚硬岩性如含玄武岩的断面中,使用双楔形垂直掏槽方式,可以获得较大的掏槽腔体,克服岩石的夹制作用^[40]。

对我国91例煤矿岩巷爆破掘进案例的统计结果表明^[41-43]:

1) 掏槽方式显著影响爆破效果。目前,斜眼掏槽仍然是主要掏槽方式,占总案例的3/4左右。这是由于煤矿岩巷通常采用浅孔爆破,斜眼掏槽可以获得更大的槽腔,但随着炮眼深度增加,采用斜眼掏槽会受到掏槽眼角度的限制,要想获得更大的眼底距必须减小掏槽眼角度,这样会影响斜眼掏槽效果,因此深孔爆破常考虑采用直眼掏槽。

2) 孔深直接影响单循环进尺。2010年以后,岩巷爆破掘进钻眼深度小于2.0 m的案例比例降低至34.69%。这说明早期受到钻眼设备、炸药类型以及地质环境的限制,钻眼深度普遍较低。随着煤炭行业发展,相关设备及技术大幅度提升,使得2.0 m以下的浅孔逐渐减少。近几年钻眼深度在2.2~2.5 m的数量分别是20世纪和21世纪初的4倍和2倍。

3) 断面面积变化体现技术进步。20世纪时,巷道断面以小断面为主,21世纪以来巷道断面大小集中在10~20 m²。这表明,随着煤矿装备改进及掘进技术提高,促进巷道断面逐渐增大。通过爆破图表分析,当断面增大后,集中在下部的掏槽眼爆破后创造的槽腔并不能覆盖到巷道上部,这造成上部区域剩余炮眼的抵抗线明显大于下部。因此,现有的掏槽眼布置是否适用于中大断面巷道值得深入研究和讨论。

1.2.2 液压凿岩设备的发展

20世纪60年代,液压凿岩设备已经在欧洲问世。1980年,我国第一台用于生产的液压凿岩机研制成功。到90年代末期,先后有十余种机型通过鉴定^[44-46],形成了我国液压凿岩设备研制和使用的雏形。

大型液压凿岩设备在煤矿岩巷掘进的大范围应用效果一直不佳,对山东、河北、安徽、山西4省的200条煤矿岩巷掘进施工作业情况的问卷调查结果表明^[35]:截至2014年,仍有50%的巷道采用7655型凿岩机;仅有18条巷道采用液压钻车,占比9%。岩巷掘进作业线中,有80%的巷道采用耙矸机作为排矸设备。其中,耙矸机加矿车的组合占38%,耙矸机加带式输送机的组合占30%。

这是由于:①液压凿岩设备的一次投资、维护成本巨大。②国产液压设备适用性较差、配套设施还不完善。③国内劳动力成本低、气动凿岩设备操作简便、易于管理。

回顾这一时期的岩巷掘进情况可见,钻眼装备落后、爆破技术水平低仍是当时煤矿岩巷爆破掘进施工面临的主要问题。掘进施工作业线整体的机械化水平低、设备组合配套效果差,阻碍了施工组织效

率的提高,是煤矿岩巷掘进速度提高的另一主要制约因素。

针对大型液压凿岩设备在煤矿岩巷中的使用,主要应注意2个问题^[47]:

1) 合理设计爆破方案。随着煤矿机械化程度提高,大型机械设备需要大断面的行车通道,巷道净高甚至达到5 m,单凭工人进行全断面钻眼往往难度极大,使用大型钻眼设备效率更高,而设备受巷道宽度和钻眼深度限制,在钻进斜眼时会出现空间不够的情况,需要在设计爆破方案时予以考虑。

2) 设备安全使用和后期维护。大型设备长期服役于煤矿井下恶劣环境,任何因素,如爆破、粉尘、矿井水、井下装备、人为失误等,都可能造成设备故障。设备维修将造成整个工作线的停摆或延期,降低矿企和一线工人对掘进机械的使用预期,不利于国内大型凿岩设备的推广,逐渐形成恶性循环。在使用凿岩台车等大型设备时,矿企应建设专门队伍、做好培训、形成预案,真正使机械设备发挥应有价值。

1.2.3 数码电子雷管的发展

数码电子雷管和塑料导爆管是这一阶段发展最迅速的爆破器材^[48]。我国的数码电子雷管研究起步较早,原冶金部安全环保研究院与多家单位合作,于1988年开发出我国第一代数码电子雷管^[49]。虽然其具有巨大的技术优势,但因成本过高,在一段时期内都未能大范围推广^[50]。数码电子雷管的安全可靠性也是制约其在煤矿井下使用的另一个因素。《爆破安全规程》规定,煤矿井下爆破总体延期时间不能超过130 ms。煤矿通常使用5段电雷管,这使得爆破设计严格受到雷管段别的限制,制约了数码电子雷管在煤矿爆破的应用。

经过二十余年的发展,我国数码电子雷管技术及主流产品性能指标已经达到甚至超越国际领先水平^[51]。为进一步提高本质安全水平、优化民爆物品产业结构,2021年,工业和信息化部发布《“十四五”民用爆炸物品行业安全发展规划》(工信部规〔2021〕183号)指出,执行工业雷管减量置换为工业数码电子雷管政策,全面推广工业数码电子雷管,2022年6月底停止生产其他工业雷管。这表明数码电子雷管在煤矿岩巷掘进爆破中的应用势在必行,然而针对数码电子雷管在煤矿岩巷中的应用研究几乎处于空白。

1.3 巷道安全服役保障阶段

2014年以后,钻爆法施工工艺获得了长足进步,巷道断面更大,掘进速度加快,煤矿岩巷快速掘进方

面取得了多项突破性成果。随着煤矿深度逐步增加,开拓巷道的地质条件和环境趋于恶劣,各类煤矿灾害时有发生。因此,对爆破施工的安全性要求日趋严格,提高对煤矿井下人员和设备的安全保障是这一时期的重要任务。

1.3.1 爆破技术保障安全高效掘进

针对爆破掘进作业,主要关注爆破参数科学合理、爆破过程安全可靠和降低爆破振动对围岩、既有工程的损伤等问题。

采用聚能药包^[52-55]的方法有效改善了巷道成型质量,具有显著的减振降损效果。丁晨曦等^[56]开展了双缝以及三缝聚能药包试验,结果表明炮眼中部的定向断裂效果最好,其次是炮眼底部。许鹏等^[57]研究了层理对聚能药包爆炸效果的影响,现场试验结果表明^[58-59],周边眼采用聚能药包可以提高巷道轮廓成型质量,半眼痕率大幅提高,围岩爆破损伤减小。针对煤矿爆破安全,付晓强^[60]从爆破振动角度,分析了聚能药包的减振降损效果,开展了爆炸振动的传播特征和信号精确识别研究。申涛等^[61]采用数值模拟方法,开展了聚能药包定向控制爆炸机理研究,分析了爆炸过程中冲击波相互作用、爆炸流场压力时空分布和聚能管形态变化等对爆破效果的影响。

在爆炸应力场作用下岩石损伤测试方面,主要采用声波检测、钻孔窥视、声发射、微地震监测、钻孔CT、围岩变形监测以及地质雷达等手段确定围岩损伤范围。单仁亮等^[62]按照相似理论,采用水泥砂浆模型,通过爆破前后超声波波速变化来评价模型损伤程度。褚怀保等^[63]为进一步揭示基于损伤累积的爆破振动波传播与衰减规律,设计混凝土试块进行损伤累积及爆破振动试验。杨仁树等^[64]根据盒维数的计算原理,建立了分形维数与爆破损伤度之间的对应关系。孙久政等^[65]利用智能声速测试系统,在爆破掘进方式下对巷道顶板损伤进行了现场测试。闫长斌等^[66]利用智能型声波仪,对巷道围岩在爆破动荷载作用下产生的累积损伤效应进行了现场试验研究。唐红梅等^[67]基于围岩开挖爆破主频率衰减过程定义损伤变量,得到围岩爆破损伤量随爆心距变化的函数关系式,对围岩损伤破坏进行分区。闫长斌等^[68]为揭示岩体爆破累积损伤效应及损伤演化规律,建立了以岩体声速降低率为基准量的岩体爆破累积损伤演化模型。陈俊桦等^[69]在考虑岩石初始损伤等影响因素的基础上,提出预裂爆破参数计算式,对比分析了经验和理论的线装药密度。苏国韶等^[70]提出一种基于高斯过程的岩体爆破效应预测的新方

法,并应用于三峡工程坝区岩体爆破振动速度、爆破损伤深度与损伤半径的预测。刘亮等^[71]指出保留岩体与可开挖岩体的分界面处于一种临界破碎状态,利用岩体损伤变量来表征岩体的破碎程度。朱和玲等^[72]引进核磁共振检测技术,以岩石孔隙度、横向弛豫时间 T2 谱等参数为判据,以及核磁共振成像技术定量确定岩体爆破损伤范围。夏红兵等^[73]通过电法 CT 成像技术,探测微量炸药爆炸前后裂隙岩体深孔之间电阻率的变化,以及切面内的岩体损伤裂隙发育形态和空间分布。

此外,随着我国地下煤炭资源的持续开发,许多井巷工程由建设阶段转入稳定运营阶段,在碳达峰、碳中和政策背景下,部分矿井到达其生命周期,一些落后产能和安全生产不合规矿井也面临淘汰。这些关闭/废弃矿井中遗留了大量的煤炭、非常规天然气,以及丰富的地下空间、矿井水、地热等资源,国内已有一些地区率先开展了关闭/废弃矿井资源开发利用的试验研究^[74-75]。煤矿地下空间工程结构体系开启了新的生命周期,如何使地下空间工程长期保持安全、稳定、可靠的运营品质,已成为现阶段我国地下空间工程发展面临的突出问题,而探明地下空间工程结构体系在全生命周期中的动态性能演变规律和效应,建立科学有效的地下空间工程服役安全评价标准和控制方法^[76],是解决这一突出问题的重要法宝,也是当前急需解决的关键难题。对此,钱七虎^[77]探讨了重大地下工程的安全建设与风险管理问题,建议加强重大事故预测预报和防治的基础理论、建立基于现代化、信息化技术的地下工程安全风险管理体系。谢和平等^[78]将“煤矿巷道智能化掘进理论”列为“十四五”期间我国矿业学科应促进的前沿方向,其构建了工程扰动岩石动力学的创新概念,分析了不同深度和应变率下扰动岩石的动态特性、爆破开挖扰动和动态钻孔扰动下岩体的动态响应,建立三维岩石动力学理论,制定防灾减灾技术措施,总结和分析基于应变率的岩石加载状态分类标准^[79]。

1.3.2 掘进装备和爆破器材的智能化发展

煤矿智能化是煤炭工业高质量发展的核心技术支撑,是煤矿自动化、数字化发展的新阶段^[80]。

在掘进装备方面,吴昊骏等^[47]提出了我国凿岩台车智能化发展思路。朱海斌^[81]应用三维激光扫描技术,对井巷区域进行全方位的自动化扫描,用于获取高精度高分辨率的数字巷道模型。丁恩杰等^[82]分析了基于物联网的矿山设备状态感知系统架构,建立矿山机械设备状态大数据分析智能化应用平台,

实现了矿山机械设备全生命周期的信息感知、状态诊断和预测性维护。段云等^[83]开发了钻孔数字化与钻孔岩性自动识别技术,力图实现露天钻孔设计、钻孔作业和爆区岩性识别的数字化和智能化。

在爆破器材方面,新型智能化炸药装填设备和数码电子雷管的发展是提高爆破施工精度的有利保证^[84]。适用于煤矿井下使用的炸药现场混装技术,实现了“集中生产远程配送”,集炸药生产、运输、使用于一体,利用现代机、电、液、仪一体化技术,实现炸药与岩性的智能匹配,进一步实现炸药现场混装车装药、爆破作业的智能化、无人化^[85-86]。汪旭光等^[87]提出了“智能爆破”的发展方向,在煤矿井下爆破中,采用 5G 网络、可见光通信、Wi-Fi、Zigbee 等通信手段,结合物联网、GIS 等技术,可以对凿岩、测量等爆破相关设备进行精确定位与导航。谢先启^[88]提出“精细爆破”概念,对于高地应力和复杂地质条件下的深部采矿,重点研究合理的爆破开挖程序、爆破参数及爆破对围岩的损伤控制措施。加强性能可调控炸药和起爆、传爆器材的研制,开发数码电子雷管起爆系统和低能导爆索非电起爆系统;研制新型的爆破振动、冲击波和噪声测试仪器,实现爆破负面效应监测的便携化、自动化和信息化。

综上所述,我国煤矿岩巷爆破掘进先后经历了 3 个发展阶段:①爆破质量控制阶段,目的是解决全国煤矿开采秩序混乱、施工质量低、建设成本高等问题;②掘进速度提升阶段,为满足国内经济建设快速发展对煤炭产能的需求,缓解煤矿井下采掘失衡的矛盾;③巷道安全服役保障阶段,在煤矿建设中,贯彻新发展理念,更加重视地下空间工程长期保持安全、稳定、可靠的运营品质。

针对煤矿岩巷爆破掘进中存在的各类问题,其根本点在于如何引导炸药爆炸能量有效释放,关键点在于提高掏槽眼的爆破效率,让爆炸能量更好地服务于岩石破碎,着重点在于保障周边眼的爆破效果,降低对围岩的直接破坏和振动损伤。

2 岩巷爆破新技术

爆炸载荷具有瞬态、高幅值以及强间断等特征,爆炸不同于静载和普通冲击作用;岩石材料具有非均质、各向异性、多组分等特性;我国煤矿深部开采中的岩体通常处于高温、高地应力等复杂环境中,这些都为巷道围岩爆破的控制带来困难。

为此,笔者针对煤矿岩巷爆破掘进中涉及的关键科学问题,开展了一系列基础理论和实践研究。

通过建立复杂条件下岩石的动态应力应变关系,揭示深部围岩在原岩应力场和爆炸应力场作用下的力学行为;分析爆破动载对围岩的破坏效应,探究爆破对围岩自身承载力的影响;研究爆破动载对围岩损伤破坏的评价与控制方法,揭示复杂条件下围岩内部的爆破损伤演化机理。在认识和把握爆破基础理论的前提下,结合我国煤矿岩巷爆破掘进中存在的现实难题,开发了适用性强、实施效果好的岩巷爆破新技术。

2.1 周边定向断裂控制爆破技术

2.1.1 技术概要与机理

炸药爆破破岩机理非常复杂,现阶段的主流观点认为,先由爆炸应力波直接作用造成岩石粉碎、破裂,随之而来爆生气体的气楔作用使岩石裂纹进一步扩展,甚至发生断裂。基于上述原理,提出了基于聚能药包的周边定向控制断裂爆破技术。

为了验证聚能药包的效果,开展了双缝、三缝以及四缝聚能药包爆破试验,不同聚能药包如图 3 所示。采用有机玻璃作为试件材料进行了爆炸试验,并用动态焦散线系统^[89-91]对爆炸过程进行观测。

3 种不同聚能药包的爆炸效果及数值模拟^[92]在图 4 中展示。图 4 a 表明,试件中沿切缝方向的裂纹明显长于非切缝方向,随着切缝数量增多,主裂纹数量也随之增加。诸多研究业已证实,普通药包炸药爆炸时,产生的裂纹是随机分布的。采用聚能药包后,爆炸裂纹则沿切缝方向扩展,实现了裂纹的定向控制,据此奠定了周边定向断裂控制爆破的基础。爆炸后在切缝方向产生初始裂纹,在爆炸应力波和爆轰气体作用下,裂纹继续扩展,图 4 b 为主裂纹扩展速度随时间变化曲线。由图可知,各条主裂纹的传播速度从 800 m/s 左右逐渐震荡减小至 600 m/s 左右,传播衰减规律相似,说明各切缝方向的裂纹扩展具有一致性,没有先后及强弱之分。图 4 c 为聚能药包爆破试验的数值模拟结果,利用 ABAQUS 建立了聚能药包爆破模型,炸药采用了 JWL 方程,从应力云图中可以发现应力峰值主要集中在切缝附近,这与试验结果相符合。

此外,还进行了普通装药、单聚能装药、双层聚能装药爆炸试验,试验结果如图 5 所示。在相同炮眼直径与装药量情况下,双层聚能装药结构爆炸裂纹扩展长度远大于其余 2 种。

2.1.2 技术应用案例

在山西阳煤五矿五采区轨道巷进行聚能药包现场试验。该巷道断面为直墙半圆拱,巷道断面面积

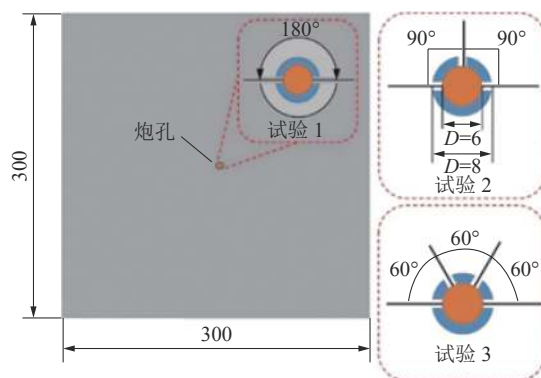


图 3 聚能药包示意

Fig.3 Schematic of shaped charge

为 16.48 m²,岩性为泥岩、细砂岩以及灰岩。原爆破方案的周边眼采用普通药包,单炮眼药量为 0.6 kg,周边眼间距为 400 mm;新的聚能药包方案中,周边眼间距为 500 mm,单炮眼药量保持不变。

将普通药包和聚能药包的爆破效果对比,如图 6 所示。普通药包爆破后巷道轮廓面凹凸不平,这是炸药能量随机释放导致的。采用聚能药包后可以清晰观察到半眼痕,并且巷道轮廓面光滑,这说明采用聚能药包能够有效控制炸药能量释放,提高巷道轮廓成型质量、减少爆破后对巷道轮廓的人工修整时间、削弱爆破对围岩的损伤破坏。

此外,对巷道围岩钻眼进行声波测试,将普通药包和聚能药包爆破后围岩损伤变量随钻眼深度变化绘制成曲线,如图 7 所示。普通药包装药段损伤变量在 0.45 左右,损伤范围为 0.55 m。聚能药包装药段处最大损伤变量在 0.3 左右,损伤范围为 0.35 m,损伤范围相比普通药包降低了 46.15%。使用聚能药包后在其他区域的损伤变量峰值与损伤范围均小于普通药包,证明聚能药包不仅能够控制定向断裂,还具有降低围岩损伤的作用。

2.2 掏槽眼超深爆破参数优化技术

2.2.1 技术概要与机理

超深是一种在掏槽爆破中常见的技术,在钻眼过程中,通常掏槽眼的深度比其他炮眼更深,而掏槽眼与其他炮眼在垂直方向的深度差即为超深(ΔL),如图 8 所示。炸药量一定时,炮眼爆炸产生的漏斗半径和深度存在极限值,设置掏槽眼超深爆破可以增强炮眼底部岩石破碎作用,减弱岩石夹制作用和增大槽腔体积,从而达到提高整体爆破效果的目的。

尽管超深的应用非常普遍,有 94.51% 的煤矿岩巷使用了掏槽眼超深爆破。然而,绝大多数巷道爆破设计的超深值均为 200 mm^[41-42,93]。我国煤矿巷道

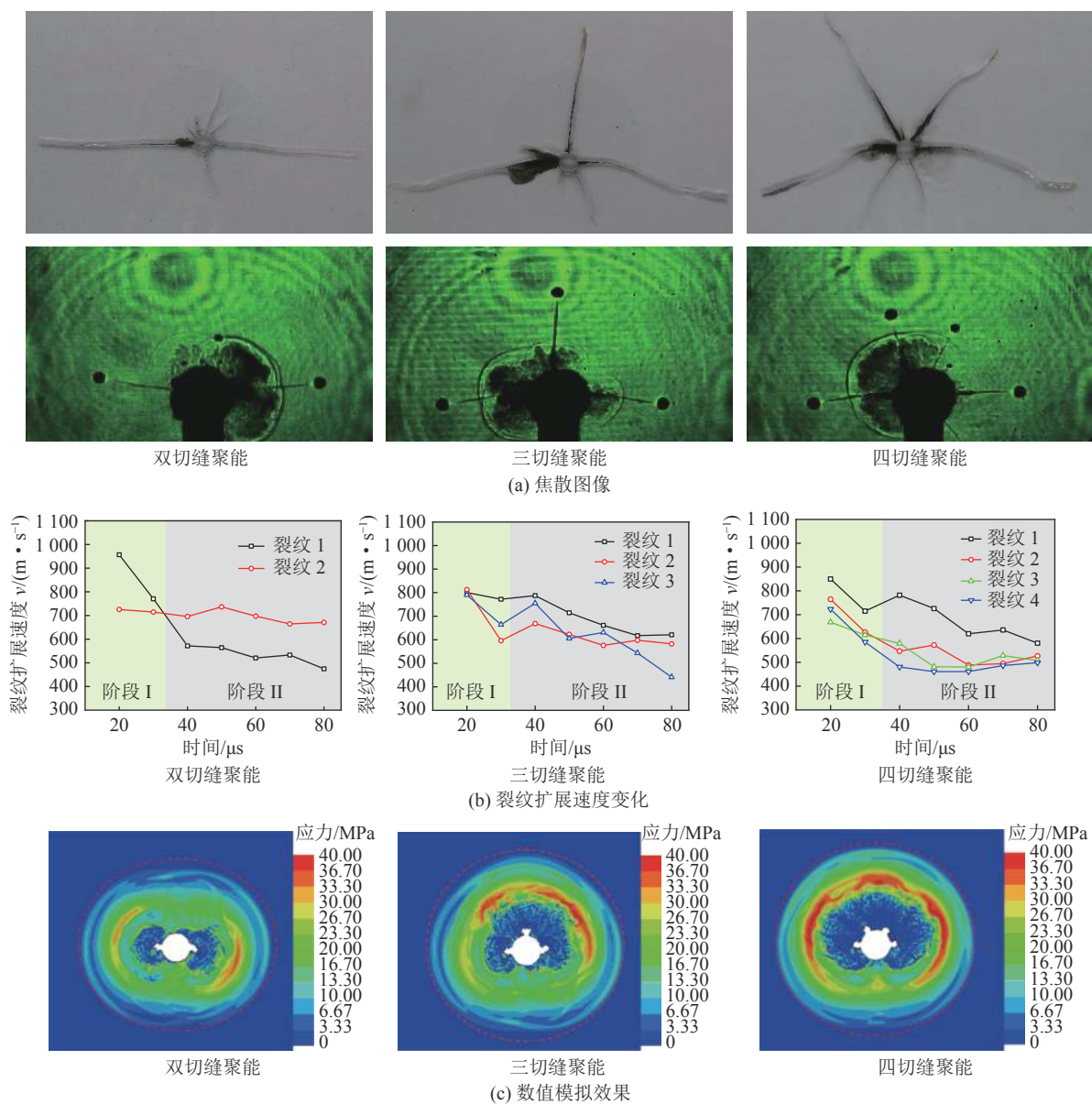


图 4 3 种不同聚能药包爆炸效果及数值模拟

Fig.4 Numerical simulation and experimental effect of three different shaped charge explosions

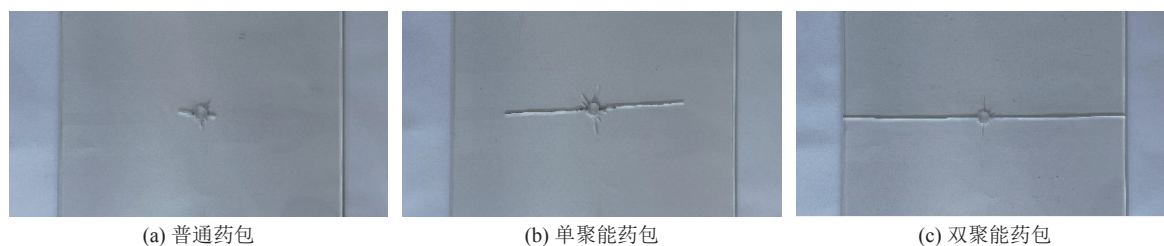


图 5 不同装药形式爆炸结果

Fig.5 Explosion results of different charge forms

断面面积逐年增加,在大断面爆破方案设计时,仍然依赖在煤矿质量标准化建设阶段推广使用的小断面爆破设计方案。这种放大版的爆破设计方案存在的问题之一,是造成掏槽眼仍保持在平行直墙位置,距离巷道顶部距离较远。而掏槽眼超深则停留在

200 mm,并未因断面面积、掏槽形式以及钻眼深度的变化而改变,因此超深维持在 200 mm 是否合理值得深入探索。

2.2.2 技术应用案例

为验证掏槽眼超深深度变化对爆破效果的影响,

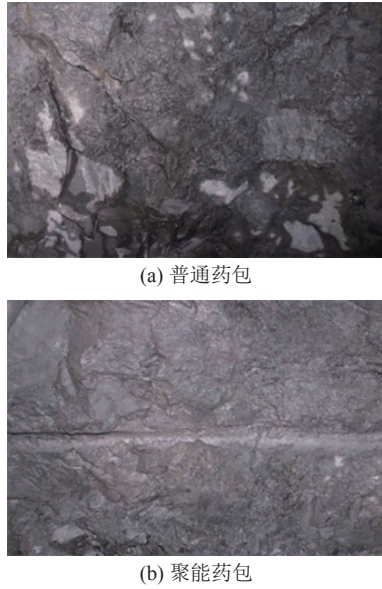


图 6 2 种药包爆破效果对比

Fig.6 Comparison of blasting effects of two types of charge

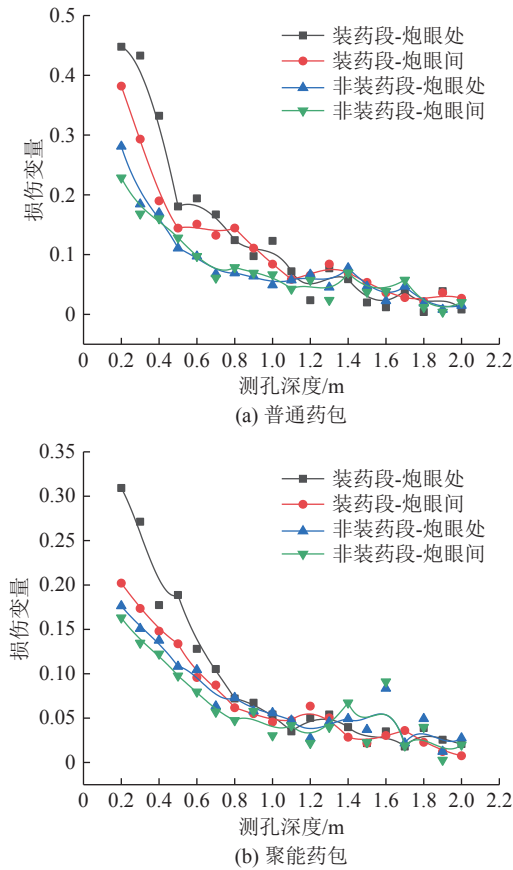


图 7 损伤变量变化曲线

Fig.7 Change curves of the damage degree

在淮南顾北煤矿-648 m 水平降温硐室进行了现场试验研究。该巷道的岩石主要有泥岩以及中细砂岩构成, 相关研究结果见文献 [94-95]。该巷道断面为直墙半圆拱型, 采用上、下台阶分段爆破, 试验在上台阶的半圆拱处进行, 上台阶的净断面面积为

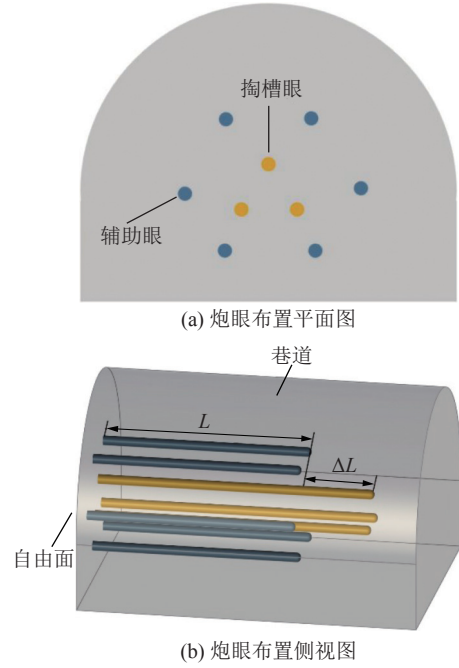


图 8 掏槽眼超深示意

Fig.8 Schematic of ultra-depth of cutting hole

21.88 m²。设置超深深度分别为 200、300、400、500 mm。图 9 为超深为 500 mm 时的爆破设计图。

图 10 为不同超深方案的爆后效果, 当超深从 200 mm 增加至 500 mm 时, 巷道轮廓面更加平整, 并且爆后碎石块度分布更加均匀。炮眼利用率和单耗随超深的变化如图 11 所示。当超深为 200 mm 时, 炮眼利用率最低, 单耗最高; 随着超深深度增加, 炮眼利用率增加, 当超深为 400 mm 时, 炮眼利用率达到最大值, 超深为 500 mm 时, 炮眼利用率有所降低。

单耗变化表现出类似的规律, 超深在 200~400 mm 范围内, 单耗随着超深增加而降低, 当超深达到 500 mm, 所需要的单耗恢复到和 200 mm 相近的水平。现场试验结果表明, 超深直接影响爆后的炮眼利用率以及单耗, 当超深为 400 mm 时, 爆破效果最好。

2.3 孔内分段装药爆破技术

2.3.1 技术概要与机理

为解决中深孔爆破中存在的炮眼利用率低以及炮眼底部岩石抛掷困难等问题, 提出了孔内分段装药爆破技术。分段装药爆破破岩形成爆破槽腔的过程与传统的连续装药不同, 如图 12 所示。连续装药由于装药集中于炮眼底部, 造成抵抗线 W_1 较大; 钻眼较深时, 炮眼底部夹制作用强, 导致爆破槽腔较小, 炮眼利用率低。采用分段装药, 让靠近炮眼顶部的炸药先起爆, 此时抵抗线 W_2 较小, 能够创造出新的自由面, 这也降低了靠近炮眼底部炸药的抵抗线 W_3 ,

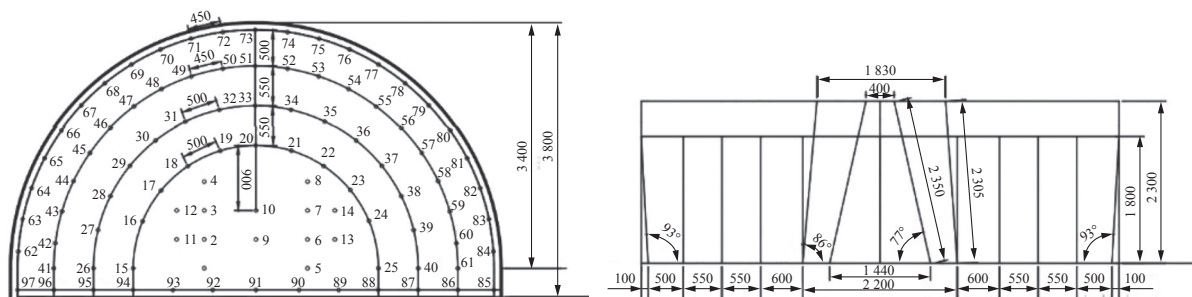
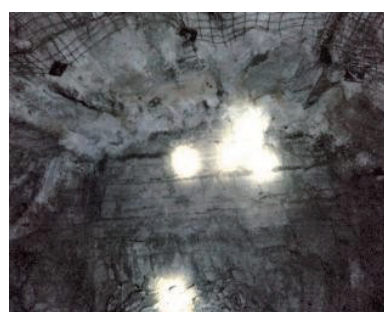


图 9 超深 500 mm 时炮眼布置

Fig.9 Layout of blast holes at ultra-depth of 500 mm



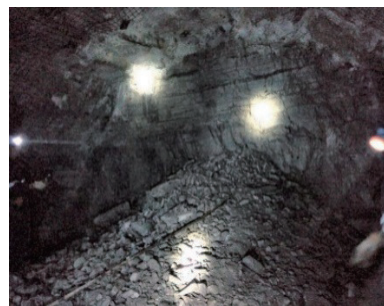
(a) 超深深度为 200 mm 时半眼痕



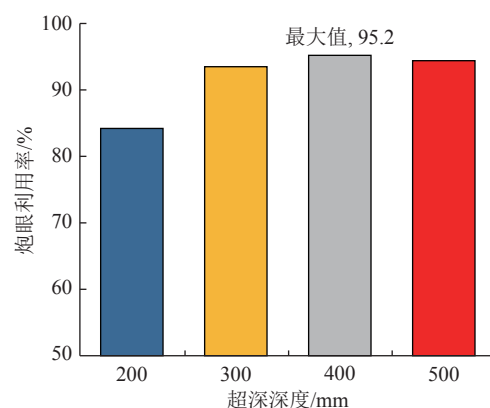
(b) 超深深度为 200 mm 时爆堆



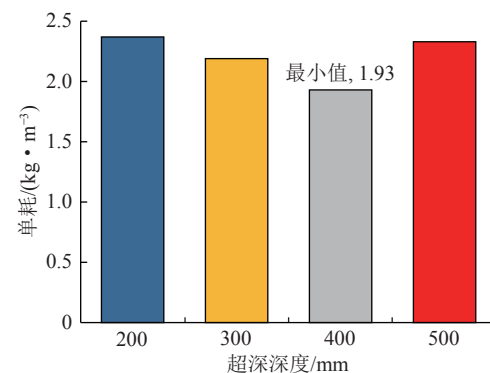
(c) 超深深度为 500 mm 时半眼痕



(d) 超深深度为 500 mm 时爆堆

图 10 不同超深时的爆后效果^[95]Fig.10 Post blasting effect at different ultra-depth^[95]

(a) 炮眼利用率



(b) 单耗

图 11 炮眼利用率和单耗随超深深度变化

Fig.11 Variation of blast hole utilization and unit consumption with ultra-depth

使得爆破完成时最终形成的槽腔体积要大于连续装药。

图 13 为 2 种装药结构示意图,连续装药和分段装药的炸药长度、堵塞长度相同。对于分段装药,靠近炮眼顶部的装药 l_1 称为上段炸药,靠近炮眼底部的装药 l_2 称为下段炸药,上段炸药与装药总长度的比值 $l_1/(l_1+l_2)$ 称为上段炸药占比。

2.3.2 技术应用案例

在淮南顾北煤矿北-1 煤顶板轨道上山巷道中进行了中深孔分段装药掏槽爆破现场试验。掘进巷道岩性以泥岩为主,由于断面较大,在断面下部布置 8

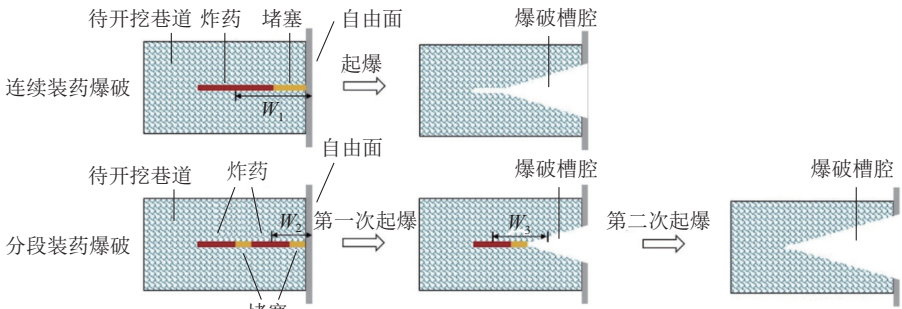


图 12 不同装药结构形成的爆腔示意
Fig.12 Blasting cavity formed by different charge structures

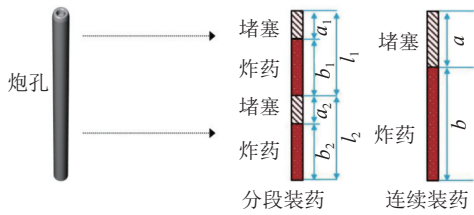


图 13 不同装药结构示意图
Fig.13 Schematic of different charge structures

个下掏槽眼(1~8),在断面上部布置8个上掏槽眼(9~16),此时掏槽区域呈现出下部大、上部小的趋势,类似于打靶试验,因此称这种掏槽方式为靶式掏槽。掏槽眼深度为2.8 m,其他炮眼深度为2.4 m,超深400 mm。掏槽眼采取了分段装药,靠近炮眼底部炸药占比为0.618。采用数码电子雷管起爆,下部槽眼先起爆,上部掏槽眼后起爆。图14为中深孔分段装药爆破设计图,表1为各炮眼的起爆顺序和时差。

图15为数码电子雷管使用过程以及中深孔分段装药爆破效果。从爆后断面以及爆堆效果可以看出,利用分段装药可以在中深孔爆破掘进中取得良好效果,爆后轮廓面平整,爆堆分布合理,块度均匀。此次爆破单次进尺为2.30 m,炮眼利用率为95.83%,远高于传统连续装药爆破。

2.4 “相似”掏槽爆破技术

2.4.1 技术概要与机理

岩石巷道断面形状以直墙半圆拱居多,传统爆破掘进的掏槽眼会布置在断面下部的直墙区域,当断面较小时,这种布置炮眼方式创造的掏槽槽腔能满足剩余炮眼起爆需要。当断面较大时,掏槽眼起

爆创造的新自由面处于断面下部,这使得断面下部剩余炮眼抵抗线较小,断面上部炮眼的抵抗线较大,最终造成上部炮眼附近岩石爆破时比下部抛掷困难。

“相似”掏槽的原理是掏槽眼围成区域的形状与巷道断面的形状相似,当掏槽眼起爆后,其创造的槽

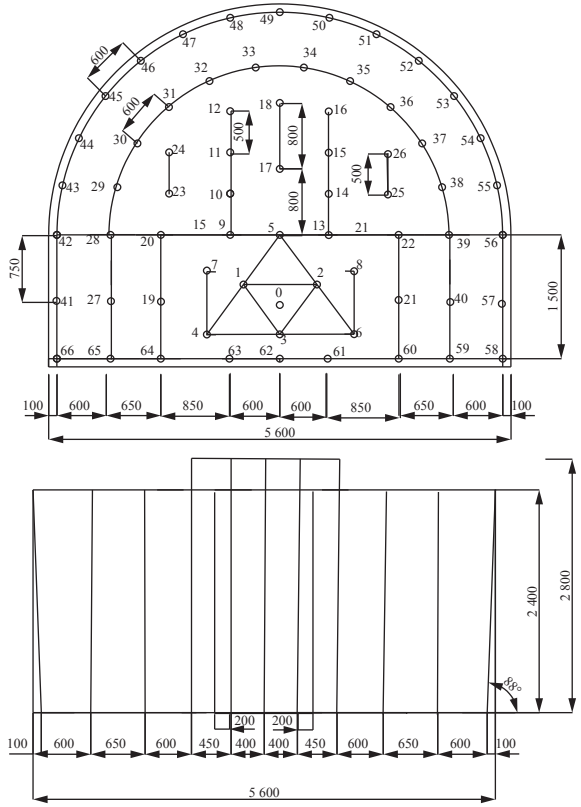


图 14 中深孔分段装药爆破
Fig.14 Blasting chart of medium deep hole section charge

表 1 炮眼起爆顺序和时差

Table 1 Blasting sequence and time difference of blasthole

炮眼	下掏槽眼口 (1~8)	下掏槽眼底 (1~8)	上掏槽眼口 (9~16)	上掏槽眼底 (9~16)	中心眼口 (17~18)	中心眼底 (17~18)	辅助眼 I (19~26)	辅助眼 II (27~40)	周边眼 (41~57)	底眼 (58~66)
段别	1-1	1-2	1-3	1-5	1-4	1-6	3	4	5	5
延期时间/ms	0	20	40	60	50	80	95	110	130	130

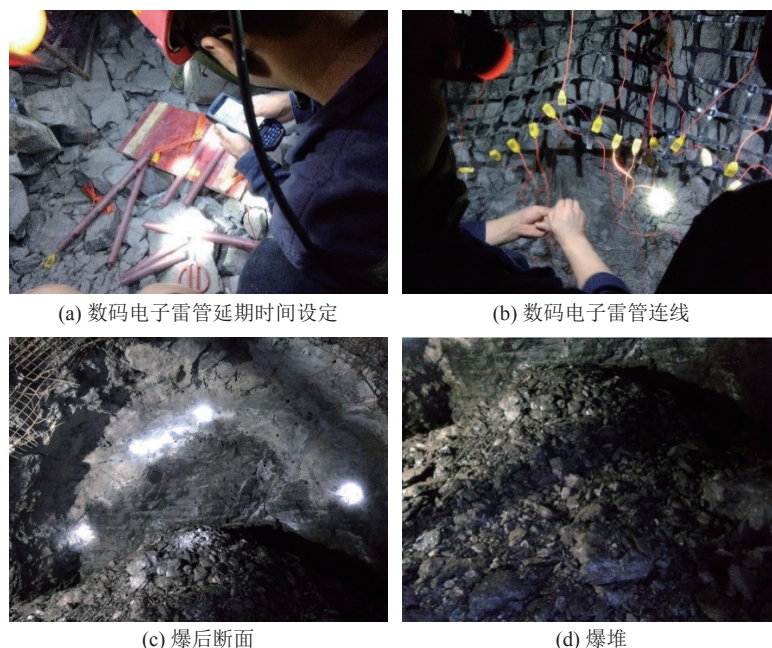


图 15 分段装药爆破效果
Fig.15 Blasting effect of segmented charge

腔几何中心与断面几何中心重叠,产生的新自由面会使靠近槽腔所有炮眼的最小抵抗线降低。图 16 为传统掏槽与“相似”掏槽爆破的原理。图 16a 中传统掏槽眼起爆后,剩余炮眼的抵抗线不一致 ($W_1 \neq W_2$),并且随着断面面积增加,这种差异会更明显。图 16b 中掏槽眼起爆后剩余爆破的抵抗线趋于一致 ($W_2 = W_3$),使得爆破效果更好。

2.4.2 技术应用案例

为验证“相似”掏槽爆破在工程应用的可靠性,在淮南顾北煤矿北-1 煤带式输送机石门巷道进行“相似”掏槽爆破试验。原爆破方案采用斜眼掏槽爆破,掏槽眼 6 个,深度 2.0 m,集中在断面下部,其他炮眼深度 1.8 m,超深深度 200 mm,所有炮眼采用连续装药,炮眼数目为 120 个,单次掘进深度在 1.4~1.6 m,炮眼利用率在 80% 左右。

新的“相似”掏槽爆破方案考虑了掏槽眼超深对爆破效果的影响,并将分段装药爆破技术和周边定向断裂控制爆破技术同时应用到现场爆破实践中。图 17 为“相似”掏槽爆破布置图,其中掏槽眼 1~6 为下部掏槽眼,10~16 为上部掏槽眼,由图可知,两部分掏槽眼形成的区域边界与巷道轮廓基本相似,因此掏槽眼爆破后形成的槽腔能够降低剩余炮眼的最小抵抗线并使其趋于均匀。

在爆破参数设计方面,掏槽眼深 2.6 m,采用分段装药,上段装药占比 0.382,下段装药占比为 0.618,孔内分段装药进行延期起爆。其他炮眼深度 2.2 m,

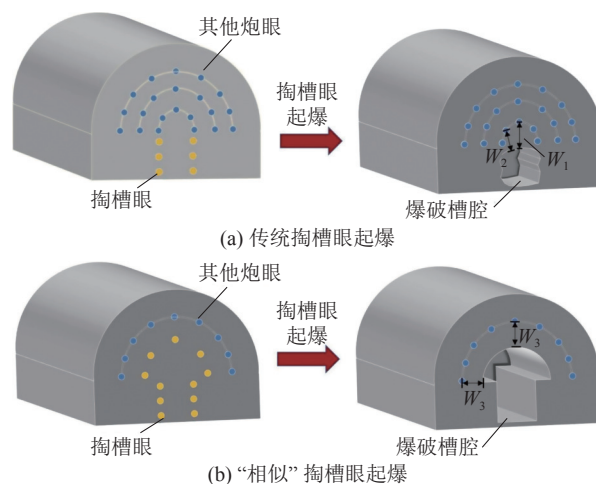


图 16 “相似”掏槽爆破原理
Fig.16 Principle of similar cut blasting

超深深度 400 mm,周边眼采用聚能药包。所有炮眼均采用数码电子雷管引爆,下部掏槽眼先起爆,上部掏槽眼后起爆。

图 18 为“相似”掏槽爆破效果,爆后轮廓面平整,断面轮廓清晰,爆堆分布合理,没有明显大块和较远飞石。多次试验的平均进尺在 2.12 m,平均炮眼利用率为 95.79%,炮眼数目减少约 30%。现场试验结果表明,新的岩巷爆破掘进技术适用于中深孔爆破,能够大幅提高爆破效率,降低炸药单耗,缩短爆破作业时间。

2.5 技术总结

淮南顾北煤矿岩巷爆破掘进典型案例表明,在

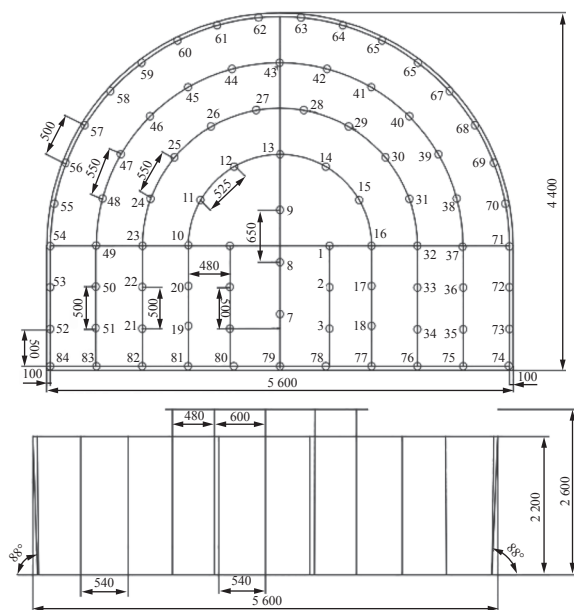


图17 “相似”掏槽爆破炮眼布置图

Fig.17 Layout of similar cut blasting holes



(a) 爆后断面



(b) 爆堆

图18 “相似”掏槽爆破现场效果

Fig.18 Site effect drawing of similar cut blasting

应用数码电子雷管的基础上,通过联合应用周边定向断裂控制爆破技术、掏槽眼超深爆破参数优化技术、孔内分段装药爆破技术和“相似”掏槽爆破技术,使全断面爆破的炮眼数量最多减少了50%(原炮眼数量为 $(5\sim6)S$ (S 为断面面积,新技术应用后的炮眼数量为 $(3\sim4)S$)。全断面钻眼效率提升50%,炸药单耗和围岩损伤降低,但掘进进尺和炮眼利用率获得提升,巷道成型质量更好。

从煤矿地下空间工程全生命周期角度出发,爆破理论不断丰富和爆破技术的持续进步,能够有效降低爆破对围岩和结构体的循环动力扰动,降低围岩和结构体的强度劣化和损伤,保障了地下空间

工程的长期服役安全。

3 结 论

我国煤矿岩巷掘进历经60多年发展历程,掘进技术、装备和器材都取得了显著进步。钻爆法仍然是煤矿岩巷掘进施工的主流,但传统的钻爆技术需要根据生产需要以及装备发展进行相应的调整和创新才能适用未来岩巷掘进施工。

1)使用数码电子雷管取代了传统电雷管,煤矿爆破技术与数码电子雷管的结合使用开创了国内先例,从根本上优化了炮眼间延期时间并与新爆破技术相结合,为以后数码电子雷管在井下爆破施工中的应用提供了参考。

2)提出了周边定向断裂控制爆破技术,控制了爆炸能量的分布,降低了围岩损伤。

3)对掏槽眼超深深度进行了优化,以淮南顾北矿区现场应用为例确定了最佳超深深度为400 mm,提高了炮眼利用率。

4)提出了孔内分段爆破技术,确定了最优上段炸药占比(0.382),提高了单循环进尺,解决了中深孔爆破中炮眼底部岩石夹制作用大的问题。

5)提出了“相似”掏槽爆破技术,从根本上改变了掏槽眼布置方式,实现了均化炮眼抵抗线的目的,减少了炮眼数量。

参考文献(References):

- [1] 贺佑国,刘文革,李艳强.世界煤炭工业发展综论[J].中国煤炭,2021,47(1):126-135.
HE Youguo, LIU Wenge, LI Yanqiang. Overview of world coal industry development[J]. China Coal, 2021, 47(1): 126-135.
- [2] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术70年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(1): 1-30.
- [3] WU F, GONG QM, LI ZG, et al. Development and application of cutterhead vibration monitoring system for TBM tunnelling[J]. 2021, 146: 104887.
- [4] 岳中文,岳小磊,杨仁树,等.随钻岩性识别技术研究进展[J].矿业科学学报,2022,7(4):389-402.
YUE Zhongwen, YUE Xiaolei, YANG Renshu, et al. Progress of lithology identification technology while drilling[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(4): 389-402.
- [5] 谢良涛,严鹏,范勇,等.钻爆法与TBM开挖深部洞室诱发围岩应变能释放规律[J].岩石力学与工程学报,2015,34(9):1786-1795.
XIE Liangtao, YAN Peng, FAN Yong, et al. Releasing of strain energy induced by excavation using drilling and blasting method

- and TBM in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(9): 1786–1795.
- [6] BALLAND C, MOREL J, ARMAND G, *et al.* Ultrasonic velocity survey in Callovo-Oxfordian argillaceous rock during shaft excavation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2009, 41(1): 69–79.
- [7] 左进京, 杨仁树, 肖成龙, 等. 煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型试验研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(4): 335–341.
- ZUO Jinjing, YANG Renshu, XIAO Chenglong, *et al.* Model test of empty hole cut blasting in coal mine rock drivage[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(4): 335–341.
- [8] 王国法, 任怀伟, 赵国瑞, 等. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 1–11.
- WANG Guofa, REN Huaiwei, ZHAO Guorui, *et al.* Analysis and countermeasures of ten “pain points” of intelligent coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(6): 1–11.
- [9] 江苏省煤炭工业总公司技术发展处. 煤炭部100项重点推广项目简介(上)[J]. 江苏煤炭, 1994, 19(2): 64.
- Jiangsu Coal Industry Corporation Technology Development Division. Introduction to 10 key promotion projects promoted by the Ministry of Coal Industry (1)[J]. Jiangsu Coal, 1994, 19(2): 64.
- [10] 煤矿安监局. 国家煤矿安全监察局关于印发《煤矿安全标准化管理体系考核定级办法(试行)》和《煤矿安全标准化管理体系基本要求及评分方法(试行)》的通知[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国中央人民政府, (2020-05-11)[2022-10-08] http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020/05/28/content_5515531.htm.
- [11] 傅菊根, 李心民. 控制井巷掘进超欠挖的关键[J]. 煤矿爆破, 1998(3): 21–23.
- FU Jugen, LI Xinmin. The key to controlling over excavation and under excavation in roadway excavation[J]. Coal Mine Blasting, 1998(3): 21–23.
- [12] 郭陕云. 隧道深孔钻爆超挖问题浅析(上)[J]. 铁道建筑, 1986(9): 11–13.
- GUO Shanyun. Analysis on overbreak of deep hole drilling and blasting in tunnels (Part I)[J]. Railway Engineering, 1986(9): 11–13.
- [13] 谢连城. 大瑶山隧道复合式衬砌模型试验研究: 超挖回填层对复合式衬砌承载能力的影响[J]. 长沙铁道学院学报, 1987(2): 77–88.
- XIE Liancheng. Experiments and research of the multilayer lining of the da Yao Mountain tunnel: the influence of overbreak back-filling layer on the bearing capacity of the multilayer lining structure[J]. Journal of Changsha Railway University, 1987(2): 77–88.
- [14] 赵会兵. 钻爆法施工隧道的超欠挖概率统计规律研究[J]. 隧道建设, 1999, 16(3): 106–110.
- ZHAO Huibing. Study on the law of probability statistics for over excavating and under excavating during construction of tunnel by drilling and blasting method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999, 16(3): 106–110.
- [15] 宗琦, 张魁, 孙宜龙. 小直径炮眼小直径药卷在煤巷掘进中的应用[J]. 西安科技学院学报, 2002, 22(2): 137–140.
- ZONG Qi, ZHANG Kui, SUN Yilong. Application of minor diameter blasting hole and minor diameter explosive to tunneling blasting in coal[J]. Xi'an University of Science & Technology Journal, 2002, 22(2): 137–140.
- [16] 李海燕. “三小”光爆锚喷掘进技术[J]. 煤矿开采, 1995(3): 48–50.
- LI Haiyan. “Three small” smooth blasting bolt shotcrete tunneling technology[J]. Coal Mining Technology, 1995(3): 48–50.
- [17] 戴俊, 李传净, 陈哲浩, 等. 光面爆破相邻炮孔裂纹扩展模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18): 193–197.
- DAI Jun, LI Chuanjing, CHEN Zhehao, *et al.* Simulation of crack growth in adjacent blasting holes of smooth blasting[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(18): 193–197.
- [18] 戴俊, 杨永琦. 光面爆破相邻炮孔存在起爆时差的炮孔间距计算[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 253–258.
- DAI Jun, YANG Yongqi. Calculation of shot hole separation in smooth blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 253–258.
- [19] 徐颖, 徐勇, 傅菊根. 软岩巷道掘进中光面爆破参数的初步探讨[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2007, 27(2): 14–16, 48.
- XU Ying, XU Yong, FU Jugen. Preliminary study on parameters of tunnel excavation smooth blasting in soft rock[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology(Natural Science), 2007, 27(2): 14–16, 48.
- [20] 付玉华, 李夕兵, 董陇军. 损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1420–1426.
- FU Yuhua, LI Xibing, DONG Longjun. Analysis of smooth blasting parameters for tunnels in deep damaged rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1420–1426.
- [21] 王海亮, 周楠楠, 张鲁南. 控制巷道成型质量主要影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(9): 54–56.
- WANG Hailiang, ZHOU Nannan, ZHANG Lunan. Study on main factors of controlling roadway molding[J]. Coal Technology, 2015, 34(9): 54–56.
- [22] 苏洪. 爆炸荷载下围岩损伤断裂主动控制技术及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- SU Hong. Study on the technology and mechanism of active control of rock damage under explosion load[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2018.
- [23] WILLIAMS ML. Stress singularities resulting from various boundary conditions in angular corners of plate in extension[J]. Journal of Applied Mechanics, 1952(19): 526–534.
- [24] CORNISH R, MILLS JT, CURTIS JP, *et al.* Degradation mechanisms in shaped charge jet penetration[J]. International Journal of Impact Engineering, 2001, 26(1): 105–114.
- [25] HAYES G. Linear shaped charge collapse mode[J]. Journal of Materials Science, 1984, 19(9): 3049–3058.
- [26] FOURNEY WL, DALLY JW, HOLLOWAY DC. Controlled blasting with ligamented charge holders[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1978, 15(3): 121–129.
- [27] XUE HJ, Gao YB, Zhang XY, *et al.* Directional blasting fracturing technology for the stability control of key strata in deep thick

- coal mining[J]. *Energies*, 2019, 12(24): 1–19.
- [28] 杨永琦, 杨仁树, 杜玉兰, 等. 定向断裂控制爆破机制与生产试验[J]. *爆破*, 1995(1): 40–43.
- YANG Yongqi, YANG Renshu, DU Yulan, *et al.* Mechanism and production test of directional fracture controlled blasting[J]. *Blasting*, 1995(1): 40–43.
- [29] 李孝林, 庄金钊. 定向断裂控制爆破新技术及现场应用[J]. *爆破*, 1999, 16(3): 5.
- LI Xiaolin, ZHUANG Jinzhao. New technology of directional fracture controlled blasting and its field application[J]. *Blasting*, 1999, 16(3): 5.
- [30] 孟繁里. 煤矿井下爆破事故产生原因分析[J]. *阜新矿业学院学报(自然科学版)*, 1993, 12(2): 55–58.
- MENG Fanli. Analyses of cause of blasting accident under the shaft of coal mine[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 1993, 12(2): 55–58.
- [31] 王肇中, 汪旭光. 我国煤矿许用炸药的研究与发展[J]. *中国矿业*, 2006, 15(2): 43–46.
- WANG Zhaozhong, WANG Xuguang. Research and development on coal-mining permissible explosives in China[J]. *China Mining Magazine*, 2006, 15(2): 43–46.
- [32] 汪旭光, 郑炳旭, 宋锦泉, 等. 中国爆破技术现状与发展[C]//中国工程爆破协会, 中国力学学会. 中国爆破新技术Ⅲ. 北京: 冶金工业出版社, 2012, 10: 27–36.
- WANG Xuguang, ZHEN Binxu, SONG jinquan, *et al.* Present situation and development of blasting technology in china[C]//China's New Blasting Technology Ⅲ, Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012, 10: 27–36.
- [33] 刘杰, 李志前. 当代含水炸药的骄子—水胶炸药[J]. *煤矿爆破*, 2003(2): 28–29.
- LIU jie, LI Zhiqian. Water gel explosive is a proud son of containing water explosives in the present age[J]. *Coal Mine Blasting*, 2003(2): 28–29.
- [34] 王虹. 我国煤矿巷道掘进技术和装备的现状与发展[J]. *煤炭科学技术*, 2010, 38(1): 57–62.
- WANG Hong. Present status and development of mine roadway heading technology and equipment in China coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2010, 38(1): 57–62.
- [35] 杨仁树. 我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2013, 41(9): 18–23.
- YANG Renshu. Present status and outlook on safety and high efficient heading technology of mine rock roadway in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2013, 41(9): 18–23.
- [36] 杨仁树, 郭东明, 杨立云, 等. 中深孔爆破在海孜煤矿中硬岩巷道掘进中的应用[J]. *煤炭技术*, 2007, 26(3): 37–38.
- YANG Renshu, GUO Dongming, YANG Liyun, *et al.* Application of medium and deep hole blasting technology in medium hard rock tunnel boring at Haizi Coal Mine[J]. *Coal Technology*, 2007, 26(3): 37–38.
- [37] 崔长生. 底部复式楔形掏槽中深孔爆破技术的推广应用[J]. *中国煤炭*, 2009, 35(5): 59–60.
- CUI Changsheng. Popularization and application of deep-hole blasting technique in bottom compound-term wedge cutting[J]. *China Coal*, 2009, 35(5): 59–60.
- [38] 宗琦, 刘菁华. 煤矿岩石巷道中深孔爆破掏槽技术应用研究[J]. *爆破*, 2010, 27(4): 35–39.
- ZONG Qi, LIU Jinghua. Application research on cutting technology of mid-deep hole blasting in coal mine rock tunnel[J]. *Blasting*, 2010, 27(4): 35–39.
- [39] 白忠胜, 潘长春, 李清, 等. 中深孔爆破技术在邢东矿大断面岩巷掘进中的应用[J]. *中国矿业*, 2010, 19(6): 79–81.
- BAI Zhongsheng, PAN Changchun, LI Qing, *et al.* Application of medium deep hole blasting technology in rock roadway of large cross-section instruction at Xingdong coal mine[J]. *China Mining Magazine*, 2010, 19(6): 79–81.
- [40] 何闯, 王海亮, 王路杰, 等. 中深孔光爆技术在硬岩倾斜巷道掘进中的应用[J]. *煤炭技术*, 2015, 34(10): 68–70.
- HE Chuang, WANG Hailiang, WANG Lujie, *et al.* Application of medium to long hole smooth blasting technology in hard rock inclined roadway driving[J]. *Coal Technology*, 2015, 34(10): 68–70.
- [41] 杨仁树, 王渝, 宫国慧, 等. 弓长岭铁矿巷道掘进掏槽孔超深长度优化试验研究[J]. *金属矿山*, 2020(7): 16–24.
- YANG Renshu, WANG Yu, GONG Guohui, *et al.* Experimental study on the ultra-deep length optimization of the excavation cutting holes in the tunnel of Gongchangling Iron Mine[J]. *Metal Mine*, 2020(7): 16–24.
- [42] 杨仁树, 王越, 林志博. 煤矿岩巷爆破掘进炮孔密度优化研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(1): 183–191.
- YANG Renshu, WANG Yue, LIN Zhibo. Optimization of blasting hole density in rock roadway driving[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(1): 183–191.
- [43] 杨仁树, 郑昌达, 李清, 等. 近50年我国竖井爆破掘进参数统计与分析[J]. *中国矿业大学学报*, 2022, 51(6): 1031–1044, 1085.
- YANG Renshu, ZHEN Changda, LI Qing, *et al.* Statistics and analysis on blasting excavation parameters of vertical shaft in China's recent 50 years[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2022, 51(6): 1031–1044, 1085.
- [44] 杨善元, 杨永琦. 液压凿岩机的构造性能及其发展趋势[J]. *煤炭科学技术*, 1988, 16(3): 29–32, 63.
- YANG Shanyuan, YANG Yongqi. Structure performance and development trend of hydraulic rock drill[J]. *Coal Science and Technology*, 1988, 16(3): 29–32, 63.
- [45] 王维德. 国外液压凿岩机[J]. *有色金属: 矿山部分*, 1978(1): 49–56.
- WANG Weide. Foreign hydraulic rock drill[J]. *Nonferrous Metals: Mining Section*, 1978(1): 49–56.
- [46] 李军. 液压凿岩机的发展与应用[J]. *有色金属: 矿山部分*, 2008, 60(3): 36–38.
- LI Jun. Development and application of hydraulic rock drill[J]. *Nonferrous Metals: Mining Section*, 2008, 60(3): 36–38.
- [47] 吴昊骏, 纪洪广, 龚敏, 等. 我国地下矿山凿岩装备应用现状与凿岩智能化发展方向[J]. *金属矿山*, 2021(1): 185–201, 212.
- WU Haojun, JI Hongguang, GONG Min, *et al.* Present application status of rock drilling equipment in underground mine and the development direction for intelligent rock drilling in

- China[J]. *Metal Mine*, 2021(1): 185–201, 212.
- [48] 汪旭光. 中国工程爆破与爆破器材的现状 & 展望[J]. *工程爆破*, 2007(4): 1–8.
WANG Xuguang. Current status and future prospect of engineering blasting and explosive materials in China[J]. *Engineering Blasting*, 2007(4): 1–8.
- [49] 张 力. 数码电子雷管的发展及应用研究[J]. *采矿技术*, 2014, 14(5): 68–69, 165.
ZHANG Li. Development and application of digital electronic detonator[J]. *Mining Technology*, 2014, 14(5): 68–69, 165.
- [50] 汪旭光, 沈立晋. 工业雷管技术的现状和发展[J]. *工程爆破*, 2003, 9(3): 52–57.
WANG Xuguang, SHEN Lijin. The state-of-the-arts of industrial detonators[J]. *Engineering Blasting*, 2003, 9(3): 52–57.
- [51] 颜景龙. 中国电子雷管技术与应用[J]. *中国工程科学*, 2015, 17(1): 36–41.
YAN Jinglong. Technology and application of Chinese electronic detonator[J]. *Engineering Sciences*, 2015, 17(1): 36–41.
- [52] YANG RS, DING CX, LI YL, *et al.* Crack propagation behavior in slit charge blasting under high static stress conditions[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 117–123.
- [53] 苏 洪, 龚 悦, 杨仁树, 等. 爆炸荷载作用下预裂缝宽度对裂纹扩展的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(3): 579–586.
SU Hong, GONG Yue, YANG Renshu, *et al.* Influence of pre-splitting crack width on crack propagation under blast loading[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(3): 579–586.
- [54] 宋俊生, 王雁冰, 高祥涛, 等. 定向断裂控制爆破机理及应用[J]. *矿业科学学报*, 2016, 1(1): 16–28.
SONG Junsheng, WANG Yanbing, GAO Xiangtao, *et al.* The mechanism of directional fracture controlled blasting and its application[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 1(1): 16–28.
- [55] DING CX, YANG RS, LEI Z, *et al.* Fractal damage and crack propagation in decoupled charge blasting[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 141: 106503.
- [56] DING CX, YANG RS, XIAO CL, *et al.* Directional fracture behavior and stress evolution process of the multi-slit charge blasting[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 152: 107037.
- [57] 许 鹏, 陈 程, 郭 洋, 等. 含垂直层理介质在切缝药包爆破下裂纹扩展行为的试验研究[J]. *矿业科学学报*, 2019, 4(6): 498–505.
XU Peng, CHEN Cheng, GUO Yang, *et al.* Experimental study on crack propagation of slit charge blasting in media with vertical bedding plane[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2019, 4(6): 498–505.
- [58] 弥壮壮, 张向荣, 李 刚, 等. 煤矿岩巷爆破掘进周边质量控制技术研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(8): 103–106.
MI Zhuangzhuang, ZHANG Xiangrong, LI Gang, *et al.* Study on the surrounding quality control technology in the blasting excavation of coal mine rock roadway[J]. *China Mining Magazine*, 2019, 28(8): 103–106.
- [59] 王 渝, 陈帅志, 赵 勇, 等. 铁矿巷道周边定向断裂爆破机理及现场试验研究[J]. *中国矿业*, 2021, 30(8): 103–109.
WANG Yu, CHEN Shuaizhi, ZHAO Yong, *et al.* Study on the mechanism and field test of directional fracture blasting of iron mine tunnel surrounding[J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(8): 103–109.
- [60] 付晓强. 切缝药包减振降损试验与综合评价研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
FU Xiaoqiang. Experiment and comprehensive evaluation on vibration reduction and loss reduction of slit charge[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2018.
- [61] 申 涛, 罗 宁, 向俊庠, 等. 切缝药包爆炸作用机理数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1172–1180.
SHEN Tao, LUO Ning, XIANG Junxiang, *et al.* Numerical simulation on explosion mechanism of split-tube charge holders[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1172–1180.
- [62] 单仁亮, 黄 博, 耿慧辉, 等. 爆破动载作用下新喷射混凝土累积损伤效应的模型试验[J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 289–296.
SHAN Renliang, HUANG Bo, GENG Huihui, *et al.* Model experiment to study cumulative damage effects of young shotcrete under blasting load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 289–296.
- [63] 褚怀保, 叶红宇, 杨小林, 等. 基于损伤累积的爆破振动传播规律试验研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(2): 173–177.
CHU Huaibao, YE Hongyu, YANG Xiaolin, *et al.* Experiments on propagation of blasting vibration based on damage accumulation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 173–177.
- [64] 杨仁树, 许 鹏. 爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(12): 3065–3071.
YANG Renshu, XU Peng. Fractal study of media damage under blasting loading[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(12): 3065–3071.
- [65] 孙久政, 李树刚, 王红胜, 等. 薄层复合顶板爆破损伤试验研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(4): 571–575.
SUN Jiuzheng, LI Shugang, WANG Hongsheng, *et al.* Experimental study on the mechanism of thin-layered compound roof[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(4): 571–575.
- [66] 闫长斌, 徐国元, 杨 飞. 爆破动荷载作用下围岩累积损伤效应声波测试研究[J]. *岩土工程学报*, 2007, 29(1): 88–93.
YAN Changbin, XU Guoyuan, YANG Fei. Measurement of sound waves to study cumulative damage effect on surrounding rock under blasting load[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(1): 88–93.
- [67] 唐红梅, 周云海, 廖云平. 地下工程施工爆破围岩损伤分区研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(23): 202–206.
TANG Hongmei, ZHOU Yuntao, LIAO Yunping. Damage zone of surrounding rock of underground engineering under construction blasting[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(23): 202–206.
- [68] 闫长斌. 基于声速变化的岩体爆破累积损伤效应[J]. *岩土力学*, 2019, 28(8): 103–106.

- 2010, 31(S1): 187–192.
- YAN Changbin. Blasting damage cumulative effect of rock mass based on sound velocity variation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(S1): 187–192.
- [69] 陈俊桦, 张家生, 李新平. 基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数研究及应用[J]. *岩土力学*, 2016, 37(5): 1441–1450.
- CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Xinping. Study of presplitting blasting parameters and its application based on rock blasting-induced damage theory[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(5): 1441–1450.
- [70] 苏国韶, 宋咏春, 燕柳斌. 岩体爆破效应预测的一种新方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S1): 3509–3514.
- SU Guoshao, SONG Yongchun, YAN Liubin. A new method for forecasting of blasting effect in rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S1): 3509–3514.
- [71] 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.
- LIU Liang, LU Wenbo, CHEN Ming, *et al.* Statistic damage threshold of critical broken rock mass under blasting load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1133–1140.
- [72] 朱和玲, 周科平, 张亚民, 等. 基于核磁共振技术的岩体爆破损伤试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(7): 1410–1416.
- ZHU Heling, ZHOU Keping, ZHANG Yamin, *et al.* Experimental study of rock damage by blasting based on nuclear magnetic resonance technique[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1410–1416.
- [73] 夏红兵, 徐 颖, 宗 琦, 等. 爆炸荷载作用下裂隙岩体内损伤范围的观测研究[J]. *岩土力学*, 2013, 32(7): 1410–1416.
- XIA Hongbing, XU Ying, ZONG Qi, *et al.* Observation study of fissure rock damage range under blasting load[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 32(7): 1410–1416.
- [74] 袁 亮, 姜耀东, 王 凯, 等. 我国关闭/废弃矿井资源精准开发利用的科学思考[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1): 14–20.
- YUAN Liang, JIANG Yaodong, WANG Kai, *et al.* Precision exploitation and utilization of closed/abandoned mine resources in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1): 14–20.
- [75] 袁 亮, 杨 科. 再论废弃矿井利用面临的科学问题与对策[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 16–24.
- YUAN Liang, YANG Ke. Further discussion on the scientific problems and countermeasures in the utilization of abandoned mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 16–24.
- [76] 杨仁树, 王雁冰. 地下空间工程服役安全的认识与思考[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(4): 487–495.
- YANG Renshu, WANG Yanbing. Understanding and considering service safety in underground space engineering[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(4): 487–495.
- [77] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(10): 945–1956.
- QIAN Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(10): 945–1956.
- [78] 谢和平, 苗鸿雁, 周宏伟. 我国矿业学科“十四五”发展战略研究[J]. *中国科学基金*, 2021, 35(6): 856–863.
- XIE Heping, MIAO Hongyan, ZHOU Hongwei. Development strategy of mining discipline in China during the 14th five-year plan period[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(6): 856–863.
- [79] XIE HP, ZHU JB, ZHOU T, *et al.* Conceptualization and preliminary study of engineering disturbed rock dynamics[J]. 2020, 6(2): 6.
- [80] 王国法, 任怀伟, 庞义辉, 等. 煤矿智能化(初级阶段)技术体系研究与工程进展[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(7): 1–27.
- WANG Guofa, REN Huaiwei, PANG Yihui, *et al.* Research and engineering progress of intelligent coal mine technical system in early stages[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(7): 1–27.
- [81] 朱海斌. 三维激光扫描技术在井巷工程中的应用[J]. *中国煤炭*, 2019, 45(12): 37–42.
- ZHU Haibin. Application of 3D laser scanning technology in sinking and driving engineering[J]. *China Coal*, 2019, 45(12): 37–42.
- [82] 丁恩杰, 俞 啸, 廖玉波, 等. 基于物联网的矿山机械设备状态智能感知与诊断[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(6): 2308–2319.
- DING Enjie, YU Xiao, LIAO Yubo, *et al.* Key technology of mine equipment state perception and online diagnosis under Internet of Things[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(6): 2308–2319.
- [83] 段 云, 熊代余, 徐国权. 钻孔数字化与钻孔岩性自动识别技术[J]. *金属矿山*, 2015(10): 125–129.
- DUAN Yun, XIONG Daiyu, XU Guoquan. A new technology for digital drilling and automatic lithology identification[J]. *Metal Mine*, 2015(10): 125–129.
- [84] 李胜林, 梁书锋, 李 晨, 等. 露天矿山深孔台阶爆破技术的现状与发展趋势[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(5): 598–605.
- LI Shenglin, LIANG Shufeng, LI Chen, *et al.* Current status and development trend of deep hole bench blasting technology in open-pit mines[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(5): 598–605.
- [85] 万红彬. 混装车与混装炸药爆破应用技术的现状及发展[C]// 第六届全国尾矿库安全运行与尾矿综合利用技术高峰论坛论文集, 中国矿业杂志社, 2014, 172–177.
- WAN Hongbin. Present Situation and Development of Application Technology of Mixed Loading Truck and Mixed Loading Explosive Blasting[C]// *Proceedings of the 6th China Tailings Pond Safety Operation and Tailings Comprehensive Utilization Technology Summit Forum*, China Mining Journal, 2014, 172–177.
- [86] 李 鑫, 查正清, 龚 兵, 等. BGRIMM炸药现场混装技术新进展[J]. *有色金属工程*, 2015, 5(3): 75–77.
- LI Xin, ZHA Zhengqing, GONG Bing, *et al.* Site mixing technology new progress of BGRIMM explosive[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2015, 5(3): 75–77.
- [87] 汪旭光, 吴春平. 智能爆破的产生背景及新思维[J]. *金属矿山*, 2022(7): 2–6.

- WANG Xuguang, WU Chunping. Background and new thinking about intelligent blasting[J]. *Metal Mine*, 2022(7): 2-6.
- [88] 谢先启. 精细爆破发展现状及展望[J]. *中国工程科学*, 2014, 16(11): 14-19.
- XIE Xianqi. Precision blasting current status and its prospective[J]. *Engineering Sciences*, 2014, 16(11): 14-19.
- [89] 李成孝, 张渊通, 安晨. 单侧开半圆孔PMMA试件 I 型和 I - II 混合型裂纹动态扩展及数值模拟研究[J]. *矿业科学学报*, 2020, 5(5): 490-501.
- LI Chengxiao, ZHANG Yuantong, AN Chen. Study on the dynamic propagation and numerical simulation of mode I and mixed mode I - II cracks in PMMA specimens with unilateral semicircular holes[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2020, 5(5): 490-501.
- [90] 骆浩浩, 张渊通, 左进京, 等. 冲击荷载下运动裂纹与空孔相互作用的焦散线试验研究[J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(2): 210-216.
- LUO Haohao, ZHANG Yuantong, ZUO Jinjing, *et al.* Caustics experimental study on the interaction between moving cracks and voids under impact loading[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2): 210-216.
- [91] 杨立云, 张飞, 陈思羽, 等. 相邻巷道围岩动态裂纹起裂与扩展行为研究[J]. *矿业科学学报*, 2021, 6(5): 558-568.
- YANG Liyun, ZHANG Fei, CHEN Siyu, *et al.* Study on dynamic crack initiation and propagation behavior of surrounding rock of adjacent roadway[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(5): 558-568.
- [92] KANG YQ, LI Y, XIAO CL. Fractal damage and crack propagation of PMMA in multiple slit charge blasting[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 103249: 103249.
- [93] 杨仁树, 张召冉, 安晨, 等. 煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(1): 10-23.
- YANG Renshu, ZHANG Zhaoran, AN Chen, *et al.* Discussion on ultra-deep depth problem of slot hole in blasting excavation of rock roadway in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(1): 10-23.
- [94] 杨仁树, 王雁冰, 张召冉, 等. 井巷工程掏槽爆破新技术及应用[J]. *中国科学基金*, 2022, 36(1): 120-127.
- YANG Renshu, WANG Yanbing, ZHANG Zhaoran, *et al.* New technology and application of cutting blasting in shaft and roadway engineering[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, 36(1): 120-127.
- [95] 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.