



移动扫码阅读

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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.01.002
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. doi:10.13199/j.cnki.cst.2020.01.002

煤矿岩巷掘进爆破掏槽孔超深问题探讨

杨仁树^{1,3}, 张召冉², 安晨³, 郑昌达³, 丁晨曦³, 肖成龙³

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144;
3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 掏槽技术是影响煤矿岩巷钻爆法掘进效率的关键, 为了探讨掏槽孔超深深度(掏槽孔与非掏槽孔深度之差)与炮孔利用率之间的关系, 采用文献检索法和现场试验开展相关研究, 以近 40 年岩巷爆破掘进实际案例为对象, 从时间、岩性、断面大小、炮孔深度、掏槽形式等 5 个维度对我国煤矿岩巷掘进施工相关文献进行了统计分析研究。研究结果表明: 自 20 世纪 80 年代以来, 岩巷爆破设计的掏槽孔超深深度均设定约为 200 mm, 炮孔利用率维持在 90% 左右, 5 个维度中岩性对炮孔利用率的影响最为显著, 并就掏槽孔超深深度为 200、300、400 和 500 mm 时进行了现场爆破试验, 炮孔利用率较超深深度为 200 mm 时的 89% 分别提高到 93%、97% 和 97%, 最大提高了 8%, 试验条件下掏槽孔超深深度的最优为 400 mm; 掏槽孔超深深度与炮孔利用率具有较强的相关关系, 适当加大掏槽孔超深深度能显著提高炮孔利用率, 而不同施工条件下掏槽孔超深深度的确定有待研究。

关键词: 岩巷掘进; 钻爆法; 掏槽; 斜眼掏槽; 直眼掏槽; 超深深度

中图分类号: TD235.4 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2020)01-0010-14

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

YANG Renshu^{1,3}, ZHANG Zhaoran², AN Chen³, ZHENG Changda³, DING Chenxi³, XIAO Chenglong³

(1. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;
2. School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100141, China;
3. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The cutting technology is the key of affecting the efficiency of drilling and blasting method of rock roadway in coal mine. In order to explore the relationship between the ultra-deep depth of the cutting holes (the difference between the depth of the cutting hole and the non-cutting hole) and the utilization rate of the blast hole, a literature search was used combined with field tests. Taking the actual cases of rock tunnel blasting in the past 40 years as research objects, the relevant literature on the construction of coal mine rock tunnels in China were analyzed from five aspects including time, lithology, section size, blast hole depth, and trenching form. The research results show that since the 1980s, the ultra-deep depth of the slotted holes designed for rock blasting has been set to about 200 mm, and the blast-hole utilization rate has been maintained at about 90%. Among the five aspects, lithology has the most significant effect on the blasthole utilization rate. On-site blasting tests were carried out on the ultra-deep depths of 200, 300, 400, and 500 mm. The utilization rate of the holes was increased to 93%, 97%, and 97% from 89% when the ultra-deep depth was 200 mm. The maximum increase is 8%. Under test conditions, the optimal depth of the slotted hole is 400 mm; there is a strong correlation between the ultra-deep depth of the slotted hole and the utilization rate of the blast hole. Increasing the ultra-deep depth of the slotted hole can significantly increase the utilization rate of the blasted hole, and the determination of the ultra-deep depth of the slotted hole under different construction conditions needs further study.

Key words: rock roadway excavation; drilling and blasting method; cut; wedge-hole cut; straight-hole cut; extra-depth

收稿日期: 2019-12-10; 责任编辑: 曾康生
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。Tel: 010-62331403, E-mail: yrs@cumt.edu.cn.
通讯作者: 张召冉(1981—), 男, 山东临朐人, 副教授, 博士。Tel: 010-88801916, E-mail: zhaoran2011@foxmail.com

0 引 言

钻爆法是岩石井巷掘进的主要工法之一,在岩巷施工中占95%以上^[1],而岩巷钻爆法掘进水平常年维持在70~80 m/月^[2-3],岩巷钻爆法掘进速度处于低位水平是造成我国煤矿“采掘失衡”矛盾的重要因素之一。

提高炮孔利用率甚至是百分之百利用一直是爆破学术界为之努力的目标,提高炮孔利用率的关键在于掏槽,掏槽孔爆破后新形成的槽腔为后续辅助孔爆破提供新自由面。所以,对于如何提高炮孔利用率,加快岩巷掘进速度,学术界围绕掏槽技术开展了大量的研究。如张文魁^[4]比较系统地介绍了国内外直眼掏槽的各种方法,并比较了它们的技术效果;王文龙等^[5]认为选择恰当的掏槽方法和掏槽参数是提高爆破效率的关键,并评价了8种直眼掏槽的效果;王树仁^[6]认为毫秒雷管的出现促进了平行龟裂、螺旋掏槽、筒形等直眼掏槽技术的推广应用,炮眼深度能达到1.5~1.8 m;张奇等^[7]研究表明,炮孔深度、孔距及空孔直径是影响直眼掏槽爆破效果的主要因素;杨仁树等^[8]将双楔形掏槽技术应用于硬岩爆破,爆破效果良好;宗琦等^[9]探讨了影响炮孔深度的主要因素及合理确定炮孔深度的方法,并推荐了合理的掏槽形式和掏槽参数;龚敏等^[1]研究

了楔形掏槽孔角度、中心孔等因素对掏槽效率的影响;单仁亮等^[10]提出了准直眼掏槽技术;张召冉等^[11]提出了“多阶段”掏槽技术,现场应用效果好;杨国梁等^[12]运用数值模拟对复式楔形掏槽破岩机理进行研究。

从以上研究成果可以看出,学术界关注重点在于掏槽技术和掏槽参数,而对于掏槽孔超深深度(掏槽孔深度与其他炮孔深度之差)与其他炮孔利用率之间关系没有引起足够的重视。因此,笔者在文献检索的基础上系统分析掏槽深度与其他炮孔深度关系,探讨分析目前掏槽爆破参数存在的问题及解决思路。

1 数据样本及整体分析

以中国知网为数据样本获取平台,检索“岩巷”、“爆破”、“掏槽”、“掘进”等关键词,搜索期刊包括《煤炭学报》《岩石力学与工程学报》《煤炭科学技术》《中国矿业》《中国煤炭》《煤炭工程》《建井技术》等行业期刊,搜集有工程实际案例的论文82篇(其中,文献中报道不同爆破参数案例共计91个(有炮孔利用率参数的工程实例69个)),具体见表1。表1中是1980年以来公开发表的有关煤矿岩巷爆破施工论文,按照文献报道时间、巷道名称、岩性、掏槽孔深度、炮孔深度、掏槽形式等指标进行整理。

表1 岩巷样本数据
Table1 Rock roadway sample data

矿名及文献来源	炮孔深度/m	发表年份	断面/m ²	普氏系数	掏槽方式	掏槽孔深度/m	掏槽孔超深/m	炮孔利用率/%
文献[14]	1.20	1995	5.00	—	斜眼掏槽	1.40	0.20	90.50
天河煤矿 ^[15]	1.20	2005	7.30	—	直眼掏槽	1.40	0.20	83.00
加福煤矿 ^[16]	1.30	1994	5.40	6.0	斜眼掏槽	1.50	0.20	—
洽溪煤矿 ^[17]	1.40	2010	6.60	6.0	斜眼掏槽	1.60	0.20	—
苏桥煤矿 ^[18]	1.40	2014	6.50	5.0	斜眼掏槽	1.60	0.20	85.80
245回风巷 ^[19]	1.40	2015	5.62	10.0	斜眼掏槽	1.60	0.20	91.40
东曲矿14241工作面 ^[20]	1.50	2019	8.40	—	斜眼掏槽	1.70	0.20	—
岱河煤矿 ^[21]	1.50	2006	9.17	5.0	斜眼掏槽	1.70	0.20	93.00
四矿己三东专回岩巷 ^[22]	1.50	2013	17.90	8.0	斜眼掏槽	1.70	0.20	85.00
四矿己三东专回岩巷 ^[22]	1.55	2014	17.90	9.0	斜眼掏槽	1.70	0.15	96.00
黄峰寺矿区 ^[23]	1.60	1980	8.40	6.0	斜眼掏槽	1.70	0.10	—
刘桥二矿 ^[24]	1.60	1998	7.28	2.0	斜眼掏槽	1.80	0.20	—
刘桥二矿 ^[25]	1.60	1999	7.28	—	斜眼掏槽	1.75	0.15	—
淮北矿区芦岭煤矿 ^[26]	1.60	2001	—	—	直眼掏槽	1.80	0.20	—
芦岭煤矿二水平西大巷 ^[26]	1.60	2001	—	4.0	直眼掏槽	1.80	0.20	—

续表

矿名及文献来源	炮孔深度/m	论文年代	断面/m ²	普氏系数	掏槽方式	掏槽孔深度/m	掏槽孔超深/m	炮孔利用率/%
文献[27]	1.60	1997	11.40	—	斜眼掏槽	1.80	0.20	95.10
姚桥矿[28]	1.60	1998	11.40	4.8	斜眼掏槽	1.80	0.20	95.10
文献[29]	1.60	2015	14.53	15.0	斜眼掏槽	1.80	0.20	85.00
金家渠煤矿 11 采区车场 ^[30]	1.60	2019	23.10	5.5	斜眼掏槽	1.80	0.20	100.00
华丰矿-1 010 m 西岩巷 ^[31]	1.70	2011	15.76	6.0	斜眼掏槽	1.80	0.10	88.00
华恒矿-1 000 水平副暗斜井 ^[32]	1.70	2012	14.70	7.0	斜眼掏槽	1.80	0.10	70.50
华恒矿-1 000 水平副暗斜井 ^[32]	1.70	2013	14.70	7.0	斜眼掏槽	1.85	0.15	82.30
华恒矿-1 000 水平副暗斜井 ^[32]	1.70	2014	14.70	7.0	斜眼掏槽	1.90	0.20	94.10
长平煤矿 ^[33]	1.80	2018	—	—	斜眼掏槽	2.00	0.20	—
淮南矿区 ^[34]	1.80	2007	8.03	11.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	—
峰峰矿务局羊渠河矿二坑 ^[35]	1.80	1996	12.40	5.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	94.00
赵各庄矿十三水平东翼电车道 ^[36]	1.80	2004	14.09	7.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	85.00
宁煤集团二矿车场大巷 ^[37]	1.80	2005	16.83	6.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	94.00
许厂煤矿 1160 轨道大巷 ^[38]	1.8	2007	10.11	6.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	95.00
新发煤矿西三主运输道 ^[39]	1.80	2008	14.20	10.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	95.00
柳泉-700 m 水平轨道下山 ^[40]	1.80	2011	10.50	6.0	斜眼掏槽	2.00	0.20	95.00
陈四楼矿 ^[41]	1.80	2014	13.70	—	斜眼掏槽	2.00	0.20	89.00
文献[42]	1.80	2018	—	—	直眼掏槽	2.00	0.20	89.00
孔庄煤矿 ^[43]	1.85	2010	—	2.5	直眼掏槽	2.00	0.15	—
大山矿区 ^[44]	2.00	1989	3.60	12.0	直眼掏槽	2.20	0.20	—
杨村煤矿 ^[45]	2.00	1999	14.50	6.0	—	2.20	0.20	—
蒋庄煤矿 ^[46]	2.00	2018	16.00	—	斜眼掏槽	2.00	0	—
许楼井北一采区集中皮带巷 ^[47]	2.00	2001	7.50	5.0	直眼掏槽	2.00	0	97.00
岱河煤矿 ^[21]	2.00	2007	14.15	9.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	90.50
马河五号井 ^[48]	2.00	2007	5.00	5.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	90.00
海孜煤矿Ⅲ 101 回风巷 ^[49]	2.00	2007	17.13	9.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	90.00
文献 ^[50]	2.00	2009	5.77	5.0	直眼掏槽	2.20	0.20	93.00
轩岗煤电焦家寨矿 1010 轨道运输大巷 ^[51]	2.00	2012	16.81	5.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	89.00
文献[52]	2.00	2013	3.60	13.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	88.50
文献[53]	2.00	2013	16.20	11.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	90.00
卧龙湖煤矿 ^[54]	2.00	2013	12.68	13.0	直眼掏槽	2.20	0.20	92.00
新发镇野猪洞 ^[55]	2.00	2014	18.28	11.0	直眼掏槽	2.20	0.20	87.00
团杉木树煤矿 ^[56]	2.00	2014	10.85	6.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	91.00
唐口煤矿 ^[57]	2.00	2015	—	5.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	90.00
桃园煤矿Ⅱ 1 回风上山 ^[58]	2.00	2015	14.00	9.0	斜眼掏槽	2.20	0.20	90.50
常村煤矿 ^[59]	2.00	2019	12.90	7.5	斜眼掏槽	2.20	0.20	97.00
阳煤一矿 ^[60]	2.00	2019	10.92	—	斜眼掏槽	2.20	0.20	83.00
潘三煤矿 1482(3)底板抽排巷 ^[61]	2.10	2004	8.03	11.0	斜眼掏槽	2.20	0.10	90.00
淮南矿区 ^[34]	2.10	2007	—	—	斜眼掏槽	2.20	0.10	91.00

续表								
矿名及文献来源	炮孔深度/m	论文年代	断面/m ²	普氏系数	掏槽方式	掏槽孔深度/m	掏槽孔超深/m	炮孔利用率/%
邢东矿 ^[62]	2.20	2010	13.94	6.0	斜眼掏槽	2.40	0.20	—
陶二矿南大巷 ^[63]	2.20	2007	25.95	5.0	斜眼掏槽	2.50	0.30	90.00
陶二矿中央变电所 ^[63]	2.20	2007	22.16	5.5	斜眼掏槽	2.50	0.30	90.00
赵家寨煤矿 ^[64]	2.20	2008	17.67	13.0	斜眼掏槽	2.40	0.20	88.50
陈四楼矿 ^[65]	2.20	2009	16.87	10.0	斜眼掏槽	2.40	0.20	81.00
百善煤矿 ^[66]	2.20	2009	—	—	直眼掏槽	2.40	0.20	95.00
某煤矿 880 轨道大巷 ^[67]	2.20	2013	19.00	9.0	斜眼掏槽	2.40	0.20	95.00
谢桥矿东二 C 组-450~-610 m 胶带上山 ^[68]	2.20	2014	20.10	9.0	斜眼掏槽	2.50	0.30	90.00
兴隆庄煤矿 ^[69]	2.30	2000	—	5.0	斜眼掏槽	2.50	0.20	—
兴隆庄煤矿 ^[70]	2.30	2010	—	5.0	斜眼掏槽	2.50	0.20	—
文献 ^[71]	2.30	2018	—	—	直眼掏槽	2.50	0.20	—
淮北刘店煤矿北翼东回风大巷 ^[72]	2.30	2010	17.30	7.0	直眼掏槽	2.50	0.20	90.20
刘店煤矿 ^[73]	2.30	2012	17.30	4.0	直眼掏槽	2.50	0.20	90.20
平煤二矿三水平庚一采区西翼回风上山 ^[74]	2.30	2013	21.20	6.0	斜眼掏槽	2.50	0.20	85.00
许疃煤矿 ^[75]	2.40	2011	19.39	7.0	斜眼掏槽	2.60	0.20	—
潘西煤矿 ^[76]	2.40	2011	—	6.0	斜眼掏槽	2.60	0.20	94.00
马家沟煤矿 ^[77]	2.50	1982	9.44	—	—	2.70	0.20	—
龙固煤矿七五开拓大巷 ^[78]	2.50	2009	13.00	5.0	斜眼掏槽	2.60	0.10	90.00
南屯煤矿-432 m 水平总回风巷 ^[79]	2.50	2009	12.28	5.0	斜眼掏槽	2.70	0.20	92.00
华丰矿-1 010 m 西岩巷 ^[31]	2.50	2011	15.76	6.0	斜眼掏槽	2.70	0.20	94.00
平煤二矿三水平庚一采区西翼回风上山 ^[80]	2.50	2014	21.20	7.0	斜眼掏槽	2.70	0.20	88.24
某煤矿开采区东翼带式输送机大巷 ^[81]	2.50	2015	19.02	10.0	斜眼掏槽	2.70	0.20	90.00
九里山矿 16121 底抽巷 ^[82]	2.50	2019	4.20	6.0	直眼掏槽	2.70	0.20	89.00
平煤八矿-693 水平丁戌组西大巷 ^[83]	2.60	2004	17.40	5.0	直眼掏槽	2.80	0.20	88.50
口孜东矿-967 m 水平西翼轨道大巷 ^[84]	2.60	2013	30.88		斜眼掏槽	2.80	0.20	88.50
城郊煤矿轨道运输大巷及胶带运输大巷 ^[85]	2.60	2014	15.70	5.0	直眼掏槽	2.80	0.20	88.50
潘三矿 ^[86]	2.70	2014	20.70	9.0	斜眼掏槽	2.90	0.20	92.00
汾西矿业 ^[87]	2.80	2012	11.96	—	斜眼掏槽	2.90	0.10	—
大同矿务局马脊矿运输大巷 ^[88]	2.80	1996	12.39	7.0	直眼掏槽	3.00	0.20	98.00
文献 ^[89]	2.80	2010	—	—	直眼掏槽	3.00	0.20	90.00
淮南潘一矿 ^[90]	2.80	2012	—	7.0	斜眼掏槽	3.00	0.20	85.70
东滩煤矿三采区轨道大巷 ^[91]	3.00	2002	18.17	5.0	斜眼掏槽	3.00	0	—
西主运道 ^[92]	3.00	1992	17.19	5.0	直眼掏槽	3.20	0.20	90.00
卸载重车道 ^[92]	3.00	1992	25.04	5.0	斜眼掏槽	3.20	0.20	90.00
平煤八矿二号井运输上山 ^[93]	3.00	2015	13.90	8.0	直眼掏槽	3.00	0	89.38
平煤十三矿-185 m 总回风 ^[94]	3.20	2001	10.15	5.0	直眼掏槽	3.40	0.20	86.88
东一岩石集中巷 ^[95]	3.60	1997	12.10	5.0	直眼掏槽	3.80	0.20	85.00

注:1.为便于处理将单楔形、双楔形等掏槽技术统一归为斜眼掏槽;角柱式掏槽、菱形掏槽等统一归为直眼掏槽。2.“—”表示文献中没有报道相关信息。

从表 1 可以看出,斜眼掏槽技术和直眼掏槽技术是岩石巷道钻爆法掘进的 2 大主流掏槽形式,分别占据 73%和 25%,如图 1 所示。1965 年我国引入国外岩巷掘进的先进经验,开展掏槽技术研究^[13],而后在我国煤矿中得到大规模应用,2 大技术广泛应用于不同岩性(以岩石普氏系数 f 表征)断面的巷道中。整体上看(图 2a),炮孔深度(非掏槽炮孔深度)由浅到深占比依次递减。按年代划分来看,炮孔深度的发展随时间的推移而有较为明显的变化,20 世纪 80—90 年代,炮孔深度以 2.0 m 以下为主(占 56.25%,图 2b),2.0~2.2 m 仅占比 12.5%;到 2001—2010 年,2.0 m 以下爆破方案占比下降明显(占比仅 33.33%,图 2c),而 2.0~2.2 m 占比则上升到 44.44%,2.2~2.5 m 爆破方案增长约 1 倍,占比 11.11%;2010 年以来,2.0 m 以下爆破方案占比进一步下降至 34.69%,2.0~2.2 m 占比降至 28.57%,而 2.2~2.5 m 爆破方案增至 22.45%,是 2001—2010 年的 2 倍余,是 20 世纪的约 4 倍,2.5 m 以上爆破方案,由 20 世纪 80—90 年代的 25%,降至 2000—

2009 年的 11.11%后,2010 年以来(图 2d)略有增长至 14.29%。

从报道的文献看,20 世纪 90 年代以来(所收集 90 年代以前文献因未报道炮孔利用率,故此处只统计 20 世纪 90 年代及以后数据),岩巷爆破炮孔利用率维持在 85%~95%,如图 3 所示。由于文献报道的特殊性(均为优秀案例),炮孔利用率指标应普遍高于行业平均水平,虽然不能反映整个行业的情况,但也具有一定的代表性,代表了岩巷掘进发展的趋势。

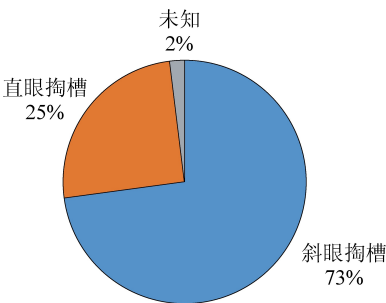


图 1 掏槽技术分布
Fig.1 Distribution of cut technology

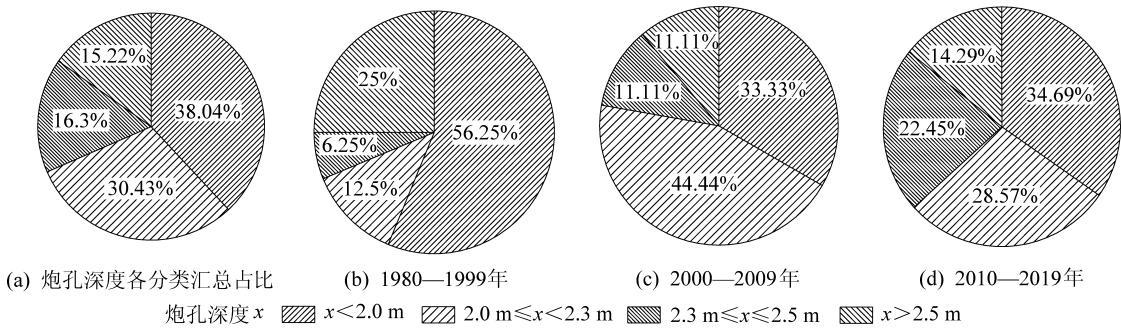


图 2 炮孔深度变化统计
Fig.2 Statistic chart of variation of blasthole depth

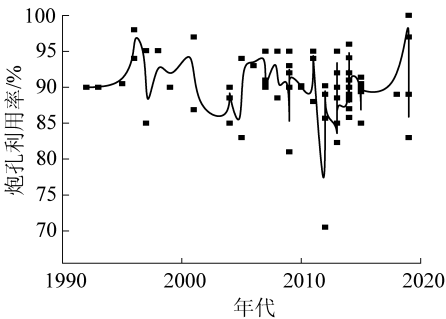


图 3 炮孔利用率统计
Fig.3 Blasthole utilization ration statistics

从以上分析可以看出,我国从 20 世纪 80—90 年代推广中深孔爆破技术以来,煤炭行业对循环进尺的要求随着时代的发展而发生变化。首先,该年代行业内普遍采用炮孔深度 2.0 m 以下爆破方案,虽然炮孔深度大于 2.5 m 的爆破方案也占较大比例,

但是从 21 世纪前 10 年看,占比反而下降,说明炮孔深度大于 2.5 m 爆破方案并没有大规模应用,主要原因为机械装备较为落后,深孔爆破凿岩工作量大,一次排矸量多,支护量大,完成一个正规循环占用时间长,反而不如炮孔深度小于 2.0 m 爆破方案,能够在不打破正规循环的基础上保证较高的进尺水平。其次,2000 年以后,从炮孔深度的变化还可以看出,炮孔深度变化的时期正处于中国煤炭“黄金十年”,巨量煤炭资源的开采带来岩巷掘进量的剧增,同时,随着施工装备的进步及新的施工技术的出现,解决了凿岩、支护、排矸问题,炮孔深度 2.0 m 以上爆破方案才在岩巷施工中得到广泛应用。随着井巷工程技术、装备等不断进步,有理由认为,在我国岩石巷道掘进的接下来发展中,炮孔深度 2.0 m 以下爆破方案占比将进一步下降,2.2 m 以上乃至 2.5 m 以上

的深孔爆破方案占比将大幅上升。

2 不同维度下掏槽孔超深深度分析

2.1 时间维度与掏槽孔超深深度

关于掏槽孔与其他炮孔深度关系,整体上看,如图4所示,从20世纪90年代至今,炮孔利用率基本维持在80%以上,个别达到95%以上,甚至100%。可以看出炮孔利用率并没有随着时间的推移发生大的变化,而是趋于稳定,即90%左右,即使2013年个别岩巷的炮孔利用率仅为70%,炮孔利用率的振荡幅度高达20%左右,但仅为个例,不影响整体趋势。而从掏槽孔与其他炮孔的深度关系来看,20世纪90年代以来,掏槽孔超深深度一直维持在200 mm,个别为100或300 mm。可以认为从时间维度上,整个行业普遍认同掏槽孔超深200 mm的设计。

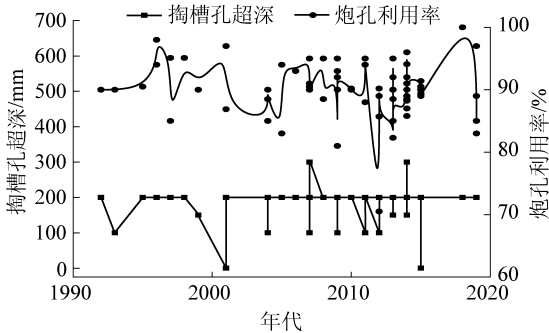


图4 时间维度下炮孔利用率与掏槽孔超深深度

Fig.4 Utilization ratio of blasthole and extra-depth of blasthole in time aspect

以年代来划分,在2000年以前,炮孔利用率在85%以上,掏槽孔超深深度也开始以200 mm为主,20世纪90年代末文献报道数量的增加,说明岩巷掘进工程量呈现增长趋势,炮孔利用率也逐步稳定在90%以上,结合图2分析,此时期主要以炮孔深度小于2.0 m为主,中深孔爆破技术开始探索并应用,可以视为我国岩巷掘进技术“萌芽期”。2010年以前,炮孔利用率基本稳定在85%~95%,掏槽孔超深一般为200 mm,炮孔深度也开始向2.0~2.2 m及以上深度发展,文献报道数量呈现增长趋势,此时正值“黄金十年”期间,巷道掘进量增长迅速,可以视为我国岩巷掘进技术“发展期”。2010年以后,经过前2个阶段的技术储备,我国岩巷掘进进入“爆发期”,文献报道数量显著增多,炮孔利用率约90%,结合炮孔深度变化趋势,此时行业2.3~2.5 m炮孔深度的应用增多,但掏槽孔超深基本保持在200 mm。

2.2 断面维度与掏槽孔超深深度

断面大小影响到着掏槽技术的选择,小断面巷

道的夹制作用比中大断面巷道大,爆破较为困难。但从断面维度整体上分析(图5),炮孔利用率并没有随着断面面积的增大而呈现规律性的变化(炮孔利用率明显提升),炮孔利用率始终约为90%,而掏槽孔超深也没有随断面面积的变化而发生规律性的变化,掏槽孔超深也约为200 mm。

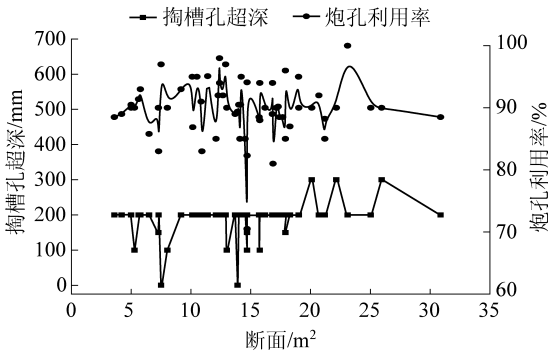


图5 断面维度炮孔利用率与掏槽孔超深深度

Fig.5 Utilization ratio of blasthole and extra-depth of blasthole in section aspect

以断面大小进行划分,小断面巷道(10 m²以下)、中等断面巷道(10~15 m²)、中大等断面巷道(15~20 m²)、大断面巷道(20 m²以上)的炮孔利用率平均均为90%,可以看出,在掏槽孔超深深度基本不变的情况下,各个断面区间内平均炮孔利用率无明显变化,并没有随着断面的增大而提高。而从小断面可以看出,断面从3~10 m²,炮孔利用率具有上升的趋势,但到中大断面后,炮孔利用率约90%±5%。

2.3 岩石普氏系数维度与掏槽孔超深深度

行业内普遍采用岩石的普氏系数 f 反映岩石可爆性。众所周知,软/硬岩爆破效率不同,普遍认为软岩爆破效率高,炮孔利用率高,硬岩爆破效率较低,炮孔利用率较难得到保证。从图6a中可以看出,随着 f 的增大,炮孔利用率呈现下降的趋势。而掏槽孔超深深度基本维持在200 mm左右,没有发生大的变化。根据 f 值的不同,当 $4.0 < f \leq 6.0$, (图6b),炮孔利用率平均为91%,而当 $7.0 < f \leq 10$ 和 $f > 10.0$,炮孔利用率均为89%。说明硬岩巷道爆破较为困难,炮孔利用率较软岩下降2%。从图6b中可以看出,软岩爆破炮孔利用率与掏槽孔超深关系较大,炮孔利用率随着掏槽孔超深的增加而增加。当 $4.0 < f \leq 6.0$,超深深度每增加100 mm,炮孔利用率随之增加5%左右。从图6c可以看出,当 $6.0 < f \leq 10.0$,炮孔利用率的增减也随着超深深度而变化,不超深时,炮孔利用率仅为87%左右,而超深300 mm时,炮孔利用率能达到95%以上,相差8%。当 $f \geq 11.0$ 时(图6d),掏槽孔超深深度200 mm时,炮孔

利用率均在 90% 以下,超深小于 200 mm 时,炮孔利

用率降为 85%。

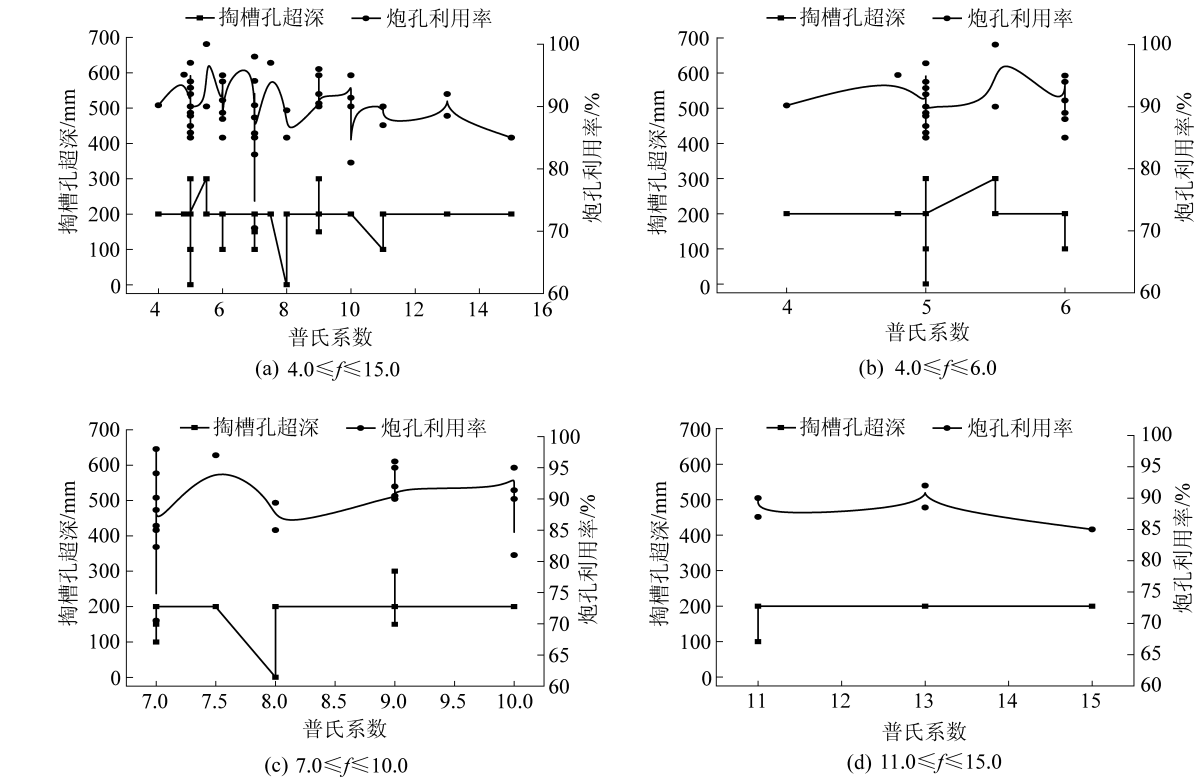


图 6 岩性维度炮孔利用率与掏槽孔超深深度

Fig.6 Utilization ratio of blasthole and extra-depth of blasthole in lithology aspect

2.4 炮孔深度维度与掏槽孔超深深度

炮孔深度(非掏槽孔的炮孔深度)及炮孔利用率决定了单循环进尺水平,随着炮孔深度增加,爆破夹制阻力增大,获得高炮孔利用率的难度加大。如图 7 所示,炮孔深度由最初的 1.5 m 左右发展到 3.5 m 左右,虽然 3.0 m 以后有略微下降的趋势,但炮孔利用率始终维持在 90% 左右。而掏槽孔超深深度没有发生较大变化,基本维持在 200 mm 左右。

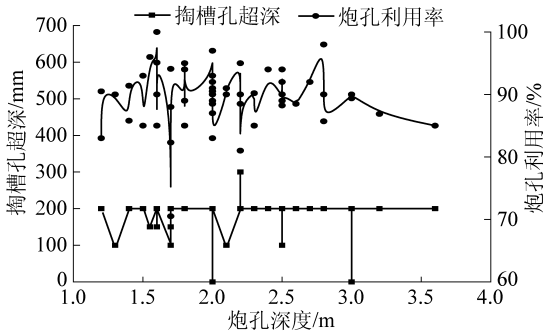


图 7 炮孔深度维度炮孔利用率与掏槽孔超深深度

Fig.7 Utilization ratio of blasthole and extra-depth of blasthole in blasthole depth aspect

2.5 掏槽形式维度与掏槽孔超深深度

以直眼掏槽和斜眼掏槽分别进行分析,如图 8 所示。从整体上看,无论采用斜眼掏槽技术还是直眼掏槽技术,炮孔利用率也基本维持在 90% 左右。

而掏槽孔超深深度基本为 200 mm 左右。

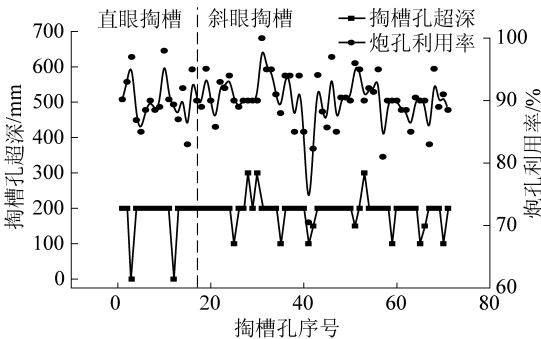


图 8 掏槽形式维度炮孔利用率与掏槽孔超深深度

Fig.8 Utilization ratio of blasthole and extra-depth of blasthole in cut technology aspect

2.6 掏槽孔超深与炮孔利用率关系

综上所述,从 20 世纪 80 年代以来(时间维度),掏槽形式、断面大小、炮孔深度、岩性 4 个维度不断变化,而炮孔利用率(90% 左右)和掏槽孔超深深度(200 mm 左右)基本不变的结论存在以下问题:①掏槽形式、断面大小、炮孔深度 3 个维度下掏槽孔超深(超深 200 mm 左右时)与炮孔利用率相关性不大。上述结论与普遍认为的岩石越硬、断面越小、炮孔越深,岩石爆破受到的夹制阻力越大,掏槽越困难,炮孔利用率越低的基本结论不一致。②上述 3 个因素下,当掏槽孔超深超过 200 mm 时(比如

300~500 mm 时),炮孔利用率是否发生明显变化。③在超深 200 mm 左右时,岩性、掏槽孔超深深度与炮孔利用率具有较强的相关性。④现阶段,掏槽孔超深率(掏槽孔超深深度与非掏槽孔深度之比)随着炮孔深度的增加而呈下降的趋势,见表 2。掏槽孔超深率并没有随之提高是否正确。⑤现有条件下,能否将平均炮孔利用率提高到 95% 以上,加大掏槽孔超深,炮孔利用率的极限能达到多少。因此,目前不论掏槽形式、断面大小、岩性、炮孔深度等条件,掏槽孔超深均为 200 mm 的合理性值得商榷,掏槽孔超深合理取值需要深入研究和讨论。

表 2 炮孔深度与掏槽孔超深率关系

Table 2 Relationship between blasthole depth and rate of extra-depth		
炮孔深度/m	掏槽孔超深率/%	平均炮孔利用率/%
1.2~1.4	13.3~15.5	90
1.5~1.85	9.8~12.1	
2.0~2.2	8.6~9.5	
2.3~2.5	7.7~8.4	
2.5 以上	4.6~6.3	

3 掏槽孔超深与炮孔利用率关系的讨论

3.1 掏槽孔超深 200 mm 的原因分析

如前所述,从 5 个维度分析可知,行业普遍认可掏槽孔超深 200 mm 的设计理念,主要原因如下:

1) 非掏槽孔爆破破岩机理方面的影响。由相关爆破破岩机理可知,自由面对岩石的破碎具有重要影响。岩石爆破中,掏槽孔先爆破,爆破后形成的槽腔为后续炮孔的爆破提供自由面,有利于提高破岩效果,所以掏槽爆破质量(深度、体积等)对单循环进尺水平具有重要影响。掏槽是单自由面爆破,夹制作用大,相比其他炮孔而言掏槽更困难,炮孔利用率更低,但通过适当加大掏槽孔深度,使爆后槽腔深度相对增加有利于非掏槽孔的破岩。

2) 传统施工工艺影响。早期爆破掘进中,受到凿岩设备、爆破工艺和排矸效率等因素的制约,主要采用浅孔爆破技术(周边孔和辅助孔深度 1.2~1.5 m)。大量实践证明掏槽孔超深 200 mm 就能够获得较高的炮孔利用率(大于 90%)和较好的爆破效果,基本能够满足掘进效率的要求。但随着爆破器械和工艺的进步,岩巷爆破掘进的炮孔深度不断增加,由浅孔爆破向中深孔爆破发展,现在深孔爆破技术也在不断完善。然而,掏槽孔超深深度却一直沿用浅孔爆破超深深度,没有随之进行优化,限制了

岩巷爆破掘进水平的进一步提升,这是一个亟待解决的工程实践问题。

3) 凿岩机械及工艺等方面的影响。对岩巷施工来讲,爆破是整个掘进施工工艺的一部分,凿、破、装、运、支缺一不可。高效掘进需要在不打破正规循环的基础上进行,凿岩质量及水平是爆破取得成功的先决条件。我国凿岩机械以气腿式凿岩机为主,钎杆的型号以 1.8、2.0、2.2、2.5、3.0 m 为主。现场施工为尽可能地节约凿岩时间,避免频繁更换钎杆,一般掏槽孔及其他炮孔均采用同一规格钎杆施工。在此条件下,结合爆破破岩机理,既能充分利用钎杆长度,又能使得掏槽孔获得一定的超深深度。因此,掏槽孔超深 200 mm 在岩巷掘进中被普遍采用。

3.2 掏槽孔超深大于 200 mm 时效果分析

如前所述,掏槽孔提供的自由面越充分越有利于非掏槽孔的爆破。炮孔深度确定后,掏槽孔超深为 200~500 mm 时(以 100 mm 进行递增),以 1.8 m 炮孔深度为例,则掏槽孔深度为 2.0~2.3 m。在装药参数等不变的情况下,假设掏槽孔炮孔利用率为 80%,则爆破后槽腔深度分别为 1.60、1.68、1.76 和 1.84 m。显然,当掏槽孔深度不小于 2.30 m 时,形成的槽腔深度已经超过炮孔深度,而此时炮孔利用率理论上达到 100%。但根据爆破理论和爆破实践,施工中一般以周边孔的炮孔利用率为最终的炮孔利用率。由于各圈炮孔间微差起爆,周边孔的爆破效果还受制于辅助孔的影响,导致炮孔利用率要低于理论值。所以,掏槽孔超深有利于炮孔利用率的提高。但是掏槽孔超深深度不宜持续增加,当掏槽槽腔可以满足非掏槽孔爆破所需的自由面和碎胀空间时,继续增大掏槽孔超深深度并无必要,反而会增加钻孔作业时间,降低施工效率。

4 掏槽孔超深优化现场试验

为研究掏槽孔超深深度对炮孔利用率的影响效应,进行了一定岩性条件下的现场爆破试验。

4.1 工程概况

阳煤五矿某高抽巷岩性以砂质泥岩、页岩为主,围岩的普氏系数为 4~6,巷道为矩形断面,净宽×净高=2.70 m×2.75 m。雷管采用矿用毫秒延期电雷管,最后一段延期时间不超过 130 ms。炸药采用三级煤矿许用乳化炸药(φ32mm×180 mm,200 g/卷)。炮孔直径为 42 mm。

4.2 原爆破方案及爆破效果评价

1) 原爆破方案。原爆破方案(图 9)掏槽形式为楔形掏槽,布置三对楔形掏槽孔,掏槽孔深度 2.0 m,

辅助孔及周边孔孔深 1.8 m,掏槽孔的超深深度为 200 mm。掏槽孔与自由面夹角为 79°,孔底距 250 mm,辅助孔角度均为 90°,周边孔角度为 87°。周边孔孔口距离巷道周边 100 mm,周边孔孔距 625 mm。掏槽孔装药量为 0.8 kg/孔,周边孔、底孔、辅助孔装药量均为 0.6 kg/孔。

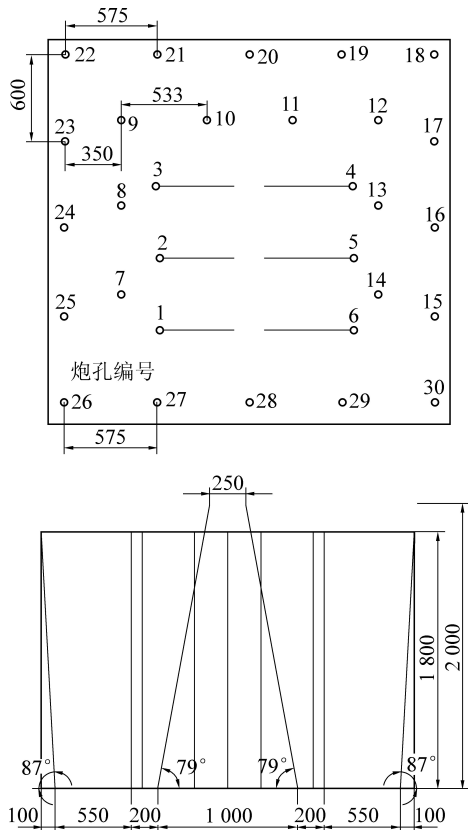


图 9 原方案炮孔布置

Fig.9 Layout of blasthole of original scheme

2) 爆破效果。从爆破效果来看,原爆破方案(掏槽孔超深 200 mm)的单循环爆破进尺为 1.60 m,平均炮孔利用率为 89%,炸药单耗为 1.52 kg/m³。

4.3 掏槽孔超深方案优化及爆破效果

1) 掏槽孔超深方案优化设计。在原爆破方案的基础上,以掏槽孔超深深度为单一变量,设计了 3 组试验方案,具体见表 3。

表 3 掏槽孔超深爆破方案

Table 3 Cut hole extra-depth blasting scheme

超深深度/mm	掏槽角度/(°)	掏槽深度/m	试验次数/次
300	80	2.1	3
400	80	2.2	3
500	81	2.3	3

2) 爆破效果及分析。对 200、300、400 和 500 mm 不同超深的爆破试验效果进行分析(表 4 和图 10)。

表 4 试验方案与原爆破方案爆破效果对比
Table 4 Comparison of blasting effect between test scheme and original blasting scheme

序号	指标	超深长度			
		200 mm	300 mm	400 mm	500 mm
1	炮孔利用率/%	89	93	97	97
2	单循环进尺/m	1.60	1.67	1.75	1.75
3	炮孔利用率变化/%	—	+4	+8	+8

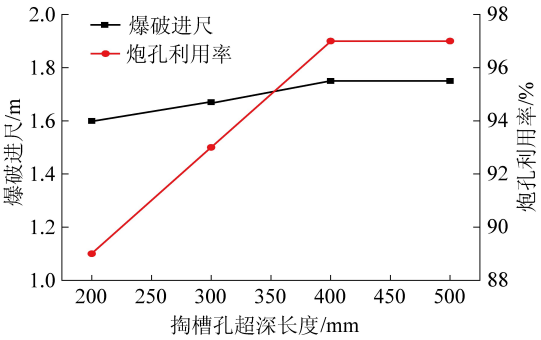


图 10 掏槽孔超深深度与单循环进尺及炮孔利用率

Fig.10 Relationship between extra-depth of cut hole, single-cycle footage and blasthole utilization

与原爆破方案(掏槽孔超深 200 mm)对比,单循环进尺由 1.60 m 提高到 1.67、1.75 和 1.75 m,炮孔利用率从 89% 提高到 93%、97% 和 97%。3 组实验方案的平均单循环进尺分别增加 0.07、0.15 和 0.15 m,平均炮孔利用率分别增加 4%、8% 和 8%。

以试验巷道为例,若以炮孔深度为 x ,掏槽孔超深深度为 y ,则就爆破效果而言,当 $y=400$ 或 $y=500$ mm 时最优,但从掘进效率上讲,即 $x+400$ mm 为最优掏槽孔深度。

5 结 论

为研究掏槽孔超深对炮孔利用率的影响规律,以文献分析和现场试验为基础进行了初步研究,得到如下结论。

1) 近 40 年来我国煤矿岩石巷道掘进不论断面、岩性、掏槽技术、炮孔深度等如何变化,掏槽孔超深深度基本为 200 mm,炮孔利用率基本为 90%,两者具有较强的相关关系。为此,不同施工条件下掏槽孔超深深度的确定,进而进一步提高炮孔利用率、增加单循环进尺是岩巷钻爆法掘进亟需解决的工程技术难题。

2) 基于岩性、断面、掏槽形式、炮孔深度 4 个维度分析,岩性和掏槽孔超深对炮孔利用率具有较大影响。现场试验结果初步表明,一定岩性条件下掏槽孔超深能够显著的提高炮孔利用率。在试验巷

道,掏槽孔深度为 $x+400\text{ mm}$ 时最优,炮孔利用率达到97%以上,炮孔利用率比 $x+200\text{ mm}$ 时提高8%。

3)炮孔利用率的提高有利于保障岩巷掘进进尺水平,缓解我国煤炭企业“采掘矛盾”,保障煤炭资源的持续供应。所以,进行掏槽孔超深深度优化研究,进而提高炮孔利用率,具有重要的现实意义。

参考文献(References):

- [1] 龚敏,文斌,王华.掏槽参数对煤矿岩巷爆破效果的影响[J].爆炸与冲击,2015,35(4):576-584.
GONG Min, WEN Bin, WANG Hua. Influences of cut parameters on blasting effect in rock roadway of coal mine[J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(4): 576-584.
- [2] 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.
- [3] 黄宝龙.岩巷掘进掏槽爆破理论与技术研究进展[J].中国矿业,2014,23(10):103-106.
HUANG Baolong. Progress of theory and technique of cutting blasting in rock drive[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(10): 103-106.
- [4] 张文魁.直眼掏槽爆破技术[J].建井技术,1984,5(1):23-27.
ZHANG Wenkui. Straightcut blasting technology[J]. Mine Construction Technology, 1984, 5(1): 23-27.
- [5] 王文龙,钱建尧.直眼掏槽方法的现场优化试验研究[J].煤炭科学技术,1992,20(7):20-22.
WANG Wenlong, QIAN Jianyao. Experimental research on optimization of straight-cut[J]. Coal Science and Technology, 1992, 20(7): 20-22.
- [6] 王树仁.我国煤矿岩巷爆破技术的回顾与展望[J].建井技术,1996,17(S2):13-16.
WANG Shuren. Review and prospect of rock mine blasting technology in China[J]. Mine Construction Technology, 1996, 17(S2): 13-16.
- [7] 张奇,杨永琦,员永峰,等.直眼掏槽爆破效果的影响因素分析[J].岩土力学,2001,22(2):144-147.
ZHANG Qi, YANG Yongqi, YUAN Yongfeng, et al. Study on factors affecting parallel hole cut blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2001, 22(2): 144-147.
- [8] 杨仁树,张志帆,孙强,等.淮南矿区深部硬岩巷道钻爆技术研究[J].煤炭科学技术,2005,33(2):42-45.
YANG Renshu, ZHANG Zhifan, SUN Qiang, et al. Research on drilling and blasting technology for deep mine hard rock roadway in Huainan mining area[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(2): 42-45.
- [9] 宗琦,任军.关于巷道掘进爆破中的合理炮眼深度和掏槽技术[J].煤矿爆破,2001,8(1):7-11.
ZONG Qi, REN Jun. About reasonable blasthole depth and grooving technology in roadway excavation and blasting[J]. Coal Mine Blasting, 2001, 8(1): 7-11.

- [10] 单仁亮,黄宝龙,高文蛟,等.岩巷掘进准直眼掏槽爆破新技术应用实例分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(2):224-232.
SHAN Renliang, HUANG Baolong, GAO Wenjiao, et al. Case Studies of new technology application of quasi-parallel cut blasting in rock roadway drive[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(2): 224-232.
- [11] 张召冉,杨仁树.岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(3):551-559.
ZHANG Zhaoran, YANG Renshu. Multi-step cutting technology and its application in rock roadways[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3): 551-559.
- [12] 杨国梁,姜琳琳,杨仁树.复式楔形深孔掏槽爆破研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(5):755-760.
YANG Guoliang, JIANG Linlin, YANG Renshu. Investigation of cut blasting with duplex wedge deep holes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 755-760.
- [13] 山崎宪之资,马治,高长葆.巷道的掘进方法[J].矿业工程,1965,2(9):47-48.
Yamazaki Kenzo, MA Zhi, GAO Changbao. Excavation method of roadway[J]. Mining Engineering, 1965, 2(9): 47-48.
- [14] 张云鹏,韩光滢,史国梁.提高巷道掘进爆破效率降低掘进成本的有效途径[J].河北理工学院学报,1995,2(3):11-15.
ZHANG Yunpeng, HAN Guangying, SHI Guoliang. Effective ways to improve roadway driving blasting efficiency and reduce driving cost[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 1995, 2(3): 11-15.
- [15] 肖泽民,刘金明.柱状、楔形混合掏槽在天河煤矿的应用[J].江西煤炭科技,2005,12(1):35-36.
XIAO Zemin, LIU Jinming. Application of column and wedge-shaped mixed cut in Tianhe Coal Mine[J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 2005, 12(1): 35-36.
- [16] 汪德金.平巷浅眼多循环快速施工[J].煤矿爆破,1994,1(4):16-21.
WANG Dejin. Shallow-eye multi-cycle rapid construction in flat lanes[J]. Coal Mine Blasting, 1994, 1(4): 16-21.
- [17] 王启锦.巷道掘进的超欠挖控制[J].采矿技术,2010,10(S1):89-91.
WANG Qijin. Excessive and under excavation control of roadway driving[J]. Mining Technology, 2010, 10(S1): 89-91.
- [18] 陈文炼.论两次掏槽中深孔爆破在岩巷掘进中的应用[J].江西煤炭科技,2014,21(4):45-48.
CHEN Wenlian. Application of twice cutting medium-length hole blasting in rock drive[J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 2014, 21(4): 45-48.
- [19] 徐海峰.小断面硬岩巷道爆破掘进试验探讨[J].煤矿爆破,2015,22(4):23-25.
XU Haifeng. Discussion on blasting excavation in hard rock roadway of small cross section[J]. Coal Mine Blasting, 2015, 22(4): 23-25.
- [20] 王捷.炮掘岩石巷道的爆破参数优化[J].山东煤炭科技,2019,26(9):26-28.
WANG Jie. Blasting parameter optimization of blasting rock

- roadway[J].Shandong Coal Science and Technology, 2019, 26(9):26-28.
- [21] 刘名李.岩巷掘进炸药消耗与爆破效果试验分析[J].煤矿爆破, 2006, 13(1):9-12.
- LIU Mingli. The Relationship between explosive consumption and blasting effect in stone drifting[J]. Coal Mine Blasting, 2006, 13(1):9-12.
- [22] 杨战标, 张波.大断面硬岩巷道聚能爆破快速掘进技术应用[J].煤炭工程, 2013, 45(11):40-41, 44.
- YANG Zhanbiao, ZHANG Bo. Application of rapid excavation technology for concentrated energy blasting in large section hard rock roadway[J]. Coal Engineering, 2013, 45(11):40-41, 44.
- [23] 刘缉阳, 赵世宏, 蔡铁林.黄峰寺区光面爆破喷锚支护的应用[J].湖南冶金, 1980, 8(4):44-55.
- LIU Jiyang, ZHAO Shihong, CAI Tielin. Application of shotcrete anchor support for smooth blasting in Huangfengsi District[J]. Hunan Metallurgy, 1980, 8(4):44-55.
- [24] 胡坤伦, 施增武, 张正法, 等.煤巷掘进钻爆施工新技术的应用研究[J].煤矿爆破, 1998, 5(3):31-33.
- HU Kunlun, SHI Zengwu, ZHANG Zhengfa, *et al.* Application of new technology for drilling and blasting construction of coal roadway[J]. Coal Mine Blasting, 1998, 5(3):31-33.
- [25] 谢绍颖, 王福清, 胡坤伦.钻爆施工新技术在煤巷掘进中的应用[J].煤矿安全, 1999, 30(10):22-23.
- XIE Shaoying, WANG Fuqing, HU Kunlun. Application of new drilling and blasting construction technology in coal roadway driving[J]. Coal Mine Safety, 1999, 30(10):22-23.
- [26] 王芝宝.光面爆破在松软岩层中的应用[J].煤矿爆破, 2001, 8(2):36-37.
- WANG Zhibao. Application of smooth blasting in soft rock formation[J]. Coal Mine Blasting, 2001, 8(2):36-37.
- [27] 宗琦.岩巷掘进爆破中的一项技术革新[J].有色金属(矿山部分), 1997, 49(4):49.
- ZONG Qi. Technical innovation in rock roadway driving blasting[J]. Non-Ferrous Metals(Mine Part), 1997, 49(4):49.
- [28] 徐颖, 刘积铭, 罗良友, 等.长延期微差爆破在煤矿中的应用[J].建井技术, 1998, 19(1):5-8.
- XU Ying, LIU Jiming, LUO Liangyou, *et al.* Application of long delay millisecond blasting in coal mine[J]. Mine Construction Technology, 1998, 19(1):5-8.
- [29] 高文乐, 周奥博, 张强.坚硬岩石巷道爆破掘进参数优化[J].爆破, 2015, 32(2):64-67, 105.
- GAO Wenle, ZHOU Aobo, ZHANG Qiang. Parameters optimization on tunnel blasting in hard rock[J]. Blasting, 2015, 32(2):64-67, 105.
- [30] 吕兆海, 赵长红, 杨皓博, 等.大断面岩巷爆破施工工艺对比研究[J].中国煤炭, 2019, 45(8):81-86, 90.
- LV Zhaohai, ZHAO Changhong, YANG Haobo, *et al.* Contrastive study on blasting construction technology of large-section rock roadway[J]. China Coal, 2019, 45(8):81-86, 90.
- [31] 孙惠民, 周明, 马立强, 等.深部高应力大断面岩巷快速钻爆成套技术[J].煤炭工程, 2011, 58(8):31-33, 36.
- SUN Huimin, ZHOU Ming, MA Liqing, *et al.* Completed rapid drilling and blasting technology for deep mine rock roadway with high stress and large cross section[J]. Coal Engineering, 2011, 58(8):31-33, 36.
- [32] 李廷春, 刘洪强.煤矿下山巷道爆破掘进技术试验研究[J].岩土力学, 2012, 33(1):35-40, 47.
- LI Tingchun, LIU Hongqiang. Experimental study of blasting technology of dip roadway excavation in coal mine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1):35-40, 47.
- [33] 李刚, 牛磊, 李文龙.煤矿硬岩巷道快速掘进技术研究[J].煤炭科学技术, 2018, 46(11):13-20.
- LI Gang, NIU Lei, LI Wenlong. Study on rapid excavation technology for hard rock roadway in coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(11):13-20.
- [34] 胡坤伦, 杨仁树, 徐晓峰, 等.煤矿深部岩巷掘进爆破试验研究[J].辽宁工程技术大学学报, 2007, 29(6):856-858.
- HU Kunlun, YANG Renshu, XU Xiaofeng, *et al.* Experimental research on blasting of deep rock roadway in coal mine[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 29(6):856-858.
- [35] 郭志兴, 董桂林, 耿宏银, 等.乳化炸药在岩巷掘进工作面爆破新工艺[J].煤矿爆破, 1996, 3(1):7-10, 17.
- GUO Zhixing, DONG Guilin, GENG Hongyin, *et al.* New blasting technology of emulsified explosive in rock roadway driving face[J]. Coal Mine Blasting, 1996, 3(1):7-10, 17.
- [36] 贾广发.聚能定向断裂爆破技术在巷道掘进中的试验及应用[J].建井技术, 2004, 25(5):13-14.
- JIA Guangfa. Test and application of concentrated energy directional fracture blasting technology in roadway excavation[J]. Mine Construction Technology, 2004, 25(5):13-14.
- [37] 张文江, 姚建萍, 王义和, 等.聚能管爆破技术在岩巷掘进中的应用[J].建井技术, 2005, 26(2):18-21.
- ZHANG Wenjiang, YAO Jianping, WANG Yihe, *et al.* Application of concentrated tube blasting technology in rock roadway excavation[J]. Mine Construction Technology, 2005, 26(2):18-21.
- [38] 李恩璞, 赵进, 张慧, 等.许厂煤矿岩巷快速掘进试验研究[J].煤炭技术, 2007, 26(1):44-46.
- LI Enpu, ZHAO Jin, ZHANG Hui, *et al.* Experimental research on rapid excavation of rock roadway in Xuchang Coal Mine[J]. Coal Technology, 2007, 26(1):44-46.
- [39] 叶晓辉.岩巷快速掘进技术在新发煤矿的应用[J].煤炭技术, 2008, 27(9):53-55.
- YE Xiaohui. The application of rapid excavation technology in rock lane in Xinfu Coal Mine[J]. Coal Technology, 2008, 27(9):53-55.
- [40] 王旭锋, 张东升, 邵鹏, 等.深部软岩锚喷支护巷道快速掘进技术[J].采矿与安全工程学报, 2011, 28(3):415-419.
- WANG Xufeng, ZHANG Dongsheng, SHAO Peng, *et al.* A rapid excavation technology for shotcreting and bolting roadway in deep soft rock[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(3):415-419.
- [41] 陈群忠.深部岩巷钻爆法掘进技术研究及应用[J].煤炭工程, 2014, 46(3):26-28.
- CHEN Qunzhong. Study and Application of drilling and blasting

- heading technology to deep mine rock roadway[J].Coal Engineering,2014,46(3):26-28.
- [42] 梁文江.直眼掏槽爆破的应用[J].能源与环境,2018,37(4):63-64.
- LIANG Wenjiang.Application of straight-cut blasting[J].Energy and Environment,2018,37(4):63-64.
- [43] 陈季斌,燕永峰.巷道快速掘进爆破技术[J].煤矿爆破,2010,17(04):31-33.
- CHEN Jibin, YAN Yongfeng. Blasting technology of high speed drifting in workings[J].Coal Mine Blasting,2010,17(4):31-33.
- [44] 罗章华.直线角柱掏槽爆破应用效果[J].探矿工程,1989,33(6):52-54.
- LUO Zhanghua. Application Effect of Straight Angle Column Cutout Blasting[J].Exploration Engineering,1989,33(6):52-54.
- [45] 孔庆军,张洪坡.大断面(14.5m²)岩巷快速掘进[J].山东煤炭科技,1999,6(2):7-9.
- KONG Qingjun, ZHANG Hongpo. Rapid excavation of rock roadway with large section(14.5m²)[J].Shandong Coal Science and Technology,1999,6(2):7-9.
- [46] 彭浩,朱思刚,刘思凯.中深孔爆破技术在大断面岩巷掘进中的研究与应用[J].山东煤炭科技,2018,25(1):48-49.
- PENG Hao, ZHU Sigang, LIU Sikai. Research and application of deep hole blasting technology in large section rock roadway driving[J].Shandong Coal Science and Technology,2018,25(1):48-49.
- [47] 裘世军,刘现贵,满为民.采用直眼菱形掏槽中深孔爆破技术实现岩巷快速掘进[J].煤炭技术,2001,22(11):28-30.
- QIU Shijun, LIU Xiangui, MAN Weimin. Adopting the rhombus cut and the mid-deep hole smooth blasting technology to realize fast heading in rock drift[J].Coal Technology,2001,22(11):28-30.
- [48] 王宇锋,梅甫定,林增勇,等.光爆技术在小断面巷道掘进中的应用[J].爆破,2007,24(3):39-41.
- WANG Yufeng, MEI Fuding, LIN Zengyong, *et al.* Application of smooth blasting in small-sectional roadway excavation[J].Blasting,2007,24(3):39-41.
- [49] 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,2007,28(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 Coalmine[J].Coal Technology,2007,28(3):37-38.
- [50] 周宜芳,孟键.岩石巷道钻眼爆破参数研究[J].宿州学院学报,2009,24(6):103-104.
- ZHOU Yifang, MENG Jian. Research on drilling blasting parameters of rock roadway[J].Journal of Suzhou University,2009,24(6):103-104.
- [51] 赵宏伟.煤矿岩巷快速掘进技术研究与实践[J].中国煤炭,2012,38(8):69-71.
- ZHAO Hongwei. Research and application of technology of fast excavation in rock roadway[J].China Coal,2012,38(8):69-71.
- [52] 邓光茂,栾龙发.花岗片麻岩地区小断面巷道掏槽爆破技术研究[J].工程爆破,2013,19(6):22-24,34.
- DENG Guangmao, LUAN Longfa. Study on cut blasting technology for a small section roadway in granitic gneiss region[J].Engineering Blasting,2013,19(6):22-24,34.
- [53] 崔毕铮,李壮文.煤矿硬岩巷道中深孔爆破试验研究[J].洛阳理工学院学报:自然科学版,2013,23(4):14-16,96.
- CUI Bizheng, LI Zhuangwen. Experiment on medium-length hole blasting in hard rock tunnel of coal mines[J].Journal of Luoyang Institute of Science and Technology: Natural Science Edition,2013,23(4):14-16,96.
- [54] 平琦,刘延俊,周鲁军,等.硬岩巷道掘进爆破参数设计优化[J].煤炭工程,2013,45(12):39-41.
- PING Qi, LIU Yanjun, ZHOU Lujun, *et al.* Optimization of blasting parameter design for mine hard rock roadway heading[J].Coal Engineering,2013,45(12):39-41.
- [55] 刘俊轩,栾龙发,张智宇,等.全断面光面爆破技术在坚硬岩巷掘进中的应用[J].爆破,2014,31(3):80-84,109.
- LIU Junxuan, LUAN longfa, ZHANG Zhiyu, *et al.* Application of whole section smooth blasting technology in hard rock drift driving[J].Blasting,2014,31(3):80-84,109.
- [56] 罗江云,陶彦建,周军,等.岩巷掘进中深孔爆破技术在杉木树煤矿的应用[J].科技创新导报,2014,11(27):81-84.
- LUO Jiangyun, TAO Yanjian, ZHOU Jun, *et al.* Application of deep-hole blasting technology in rock tunnel excavation in Shanshan Coal Mine[J].Science and Technology Innovation Herald,2014,11(27):81-84.
- [57] 王海亮,张鲁南.深井岩巷掘进爆破优化研究[J].煤炭技术,2015,34(4):82-84.
- WANG Hailiang, ZHANG Lunan. Research on deep rock tunneling blasting optimization[J].Coal Technology,2015,34(4):82-84.
- [58] 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.
- [59] 马宁.中深孔爆破技术在岩巷快速掘进中的应用[J].煤矿现代化,2019,28(2):18-19,22.
- MA Ning. Application technology analysis of medium deep hole blasting technology in rapid excavation of rock roadway[J].Coal Mine Modernization,2019,28(2):18-19,22.
- [60] 张浩,朱海军.中小断面岩巷爆破工艺优化及掘进实践[J].山西冶金,2019,42(1):149-151.
- ZHANG Hao, ZHU Haijun. Blasting technology optimization and driving practice of small and medium section rock roadway[J].Shanxi Metallurgy,2019,42(1):149-151.
- [61] 孙强,杨仁树,廖青中,等.提高深部岩石巷道爆破掘进效率的理论探讨与实践[J].建井技术,2004,25(S1):40-44.
- SUN Qiang, YANG Renshu, LIAO Qingzhong, *et al.* Theoretical discussion and practice of improving blasting efficiency in deep rock roadways[J].Mine Construction Technology,2004,25

- (S1):40-44.
- [62] 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.
- [63] 李玉文,孙利辉,杨本生,等.大断面岩巷中深孔一次光爆技术研究[J].煤炭工程,2007,54(9):37-39.
LI Yuwen, SUN Lihui, YANG Bensheng, *et al.* Study on one-time smooth blasting technology for middle and deep holes in large section rock roadway [J]. Coal Engineering, 2007, 54(9): 37-39.
- [64] 任亚东.中深孔爆破技术在坚硬岩石巷道的应用[J].中州煤炭,2008,30(6):3-4,13.
REN Yadong. Application of medium and deep hole blasting technology in hard rock roadway [J]. Zhongzhou Coal, 2008, 30(6): 3-4, 13.
- [65] 邢顶门,王新生.中深孔爆破在硬岩施工中的应用研究[J].煤炭技术,2009,28(10):108-110.
XING Dingmen, WANG Xinsheng. Application research on medium-length hole blasting in hard rock drift excavation [J]. Coal Technology, 2009, 28(10): 108-110.
- [66] 毛传森,周泉,姬敏.中深孔反向光面爆破技术在岩石掘进中的应用[J].煤矿爆破,2009,16(1):26-28.
MAO Chuansen, ZHOU Quan, JI Min. Application of medium-deep-hole opposite smooth blasting technology in rock tunneling [J]. Coal Mine Blasting, 2009, 16(1): 26-28.
- [67] 杨仁树,张召冉,杨立云,等.基于硬岩快掘技术的切缝药包聚能爆破试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(2):317-323.
YANG Renshu, ZHANG Zhaoran, YANG Liyun, *et al.* Cumulative blasting experiment study of slotted cartridge based on hard-rock rapid driving technology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(2): 317-323.
- [68] 宗琦,王传兵,汪海波.大断面岩石上山中深孔爆破技术试验研究[J].建井技术,2014,35(4):34-37.
ZONG Qi, WANG Chuanbing, WANG Haibo. Experimental study on blasting technology with medium depth borehole in mine large cross section rock rise [J]. Mine Construction Technology, 2014, 35(4): 34-37.
- [69] 王建周,刘克华.中深孔爆破在岩巷掘进中的应用[J].山东煤炭科技,2000,7(S1):65-66.
WANG Jianzhou, LIU Kehua. Application of Medium and Deep Hole Blasting in Rock Tunnel Driving [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2000, 7(S1): 65-66.
- [70] 李剑峰.中深孔爆破在岩巷掘进中的应用[J].工程爆破,2010,16(2):97.
LI Jianfeng. Application of deep hole blasting in rock roadway excavation [J]. Engineering Blasting, 2010, 16(2): 97.
- [71] 李建军.某矿岩巷快速掘进的工业性试验[J].内蒙古煤炭经济,2018,36(22):149-151.
LI Jianjun. Industrial test of rapid excavation of a mine rock roadway [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2018, 36(22): 149-151.
- [72] 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.
- [73] 张文凤.中深孔爆破技术在岩巷掘进中的应用[J].煤矿爆破,2012,19(2):36-38.
ZHANG Wenfeng. Application of middle-deep hole blasting technology in rock roadway excavation [J]. Coal Mine Blasting, 2012, 19(2): 36-38.
- [74] 刁先鹏,胡坤伦,吉永明,等.大断面岩巷中深孔光面爆破技术[J].建井技术,2013,34(2):36-38.
DIAO Xianpeng, HU Kunlun, JI Yongming, *et al.* Smooth blasting technology for meddle-deep holes in large section rock roadway [J]. Mine Construction Technology, 2013, 34(2): 36-38.
- [75] 张长武,代志彬,杨林.许疃煤矿下山巷道爆破掘进技术[J].煤矿爆破,2011,18(3):32-33.
ZHANG Changwu, DAI Zhibin, YANG Lin. Application of heading blasting technology in diphead tunnel of Xutuan Coal Mine [J]. Coal Mine Blasting, 2011, 18(3): 32-33.
- [76] 张炜,张东升,邵鹏,等.深部高应力岩巷快速钻爆施工技术[J].煤炭学报,2011,36(1):43-48.
ZHANG Wei, ZHANG Dongsheng, SHAO Peng, *et al.* Fast drilling and blasting construction technology for deep high stress rock roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 43-48.
- [77] 高树棠.巷道光面爆破技术(二)[J].建井技术,1982,3(2):54-56.
GAO Shutang. Smooth blasting technology of roadway (Part 2) [J]. Mine Construction Technology, 1982, 3(2): 54-56.
- [78] 薛创.岩巷中深孔爆破施工与支护[J].煤炭技术,2009,28(10):49-50.
XUE Chuang. Blasting construction with medium-depth holes and support in rock roadway [J]. Coal Technology, 2009, 28(10): 49-50.
- [79] 曲延伦,刘鹏.兖州矿区岩巷快速施工装备及配套工艺研究与应用[J].中国煤炭,2009,35(9):71-74.
QU Yanlun, LIU Peng. Rock entry fast construction equipment and complementary technical process used in Yanzhou Mining Area: a research and application [J]. China Coal, 2009, 35(9): 71-74.
- [80] 张会听,李润奇,刁先鹏.复合型掏槽及中深孔一次起爆技术在大断面岩巷掘进中的应用[J].煤炭技术,2014,33(5):168-170.
ZHANG Huiting, LI Runqi, DIAO Xianpeng. Use of composite undercutting and middle-deep hole one-time detonation technology in driving large section of rock roadway [J]. Coal Technology, 2014, 33(5): 168-170.
- [81] 罗吉,宗琦,汪海波.大断面硬岩巷道中深孔爆破试验研究[J].煤炭技术,2015,34(1):37-39.
LUO Ji, ZONG Qi, WANG Haibo. Experimental study of medium deep hole blasting in hard rock tunnel with large cross section [J]. Coal Technology, 2015, 34(1): 37-39.
- [82] 马乐辉,李锋.大直径深孔中空眼直眼掏槽爆破技术应用研

- 究[J].中国煤炭,2019,45(6):108-113.
- MA Lehui, LI Feng. Research on application of large-diameter deep hollow bore straight cutting blasting technology[J]. China Coal, 2019, 45(6): 108-113.
- [83] 楚俊选, 王志甫. 大断面岩巷快速施工[J]. 煤炭工程, 2004, 50(4): 31-32.
- CHU Junxuan, WANG Zhifu. Rapid construction of rock tunnel with large cross section[J]. Coal Engineering, 2004, 50(4): 31-32.
- [84] 任重远. 大断面岩巷全断面一次成巷快速掘进技术[J]. 煤炭工程, 2014, 46(4): 43-45, 48.
- REN Zhongyuan. Full section completed rapid heading technology of mine large cross section rock roadway[J]. Coal Engineering, 2014, 46(4): 43-45, 48.
- [85] 黄启明, 冯星宇, 赵伟. 大断面岩巷中深孔爆破快速掘进技术应用[J]. 煤炭工程, 2014, 46(2): 28-30, 33.
- HUANG Qiming, FENG Xingyu, ZHAO Wei. Application of rapid heading technology with deep borehole blasting in mine large cross section rock roadway[J]. Coal Engineering, 2014, 46(2): 28-30, 33.
- [86] 徐颖, 汪海波, 宗琦. 深孔光面爆破技术在大断面硬岩巷道中的应用研究[J]. 煤矿爆破, 2014, 21(4): 28-30.
- XU Ying, WANG Haibo, ZONG Qi. Application of deep-hole smooth blasting technique in large section hard rock roadway[J]. Coal Mine Blasting, 2014, 21(4): 28-30.
- [87] 孙文光, 马宁, 刘国庆. 中深孔爆破施工技术的应用研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(19): 106-107.
- SUN Wenguang, MA Ning, LIU Guoqing. Research on application of middle-deep hole blasting construction technology[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(19): 106-107.
- [88] 张奇, 杨永琦, 程肖锦, 等. 平巷直眼掏槽爆破新方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(S1): 536-539.
- ZHANG Qi, YANG Yongqi, CHENG Xiaojin, et al. New method of cut blast with holes perpendicular of face drift[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(S1): 536-539.
- [89] 高有存. 中深孔复合眼强力掏槽爆破技术的应用[J]. 煤矿爆破, 2010, 17(3): 36-38.
- GAO Youcun. Application of effectively composite spiral cut blasting method in medium-deep hole[J]. Coal Mine Blasting, 2010, 17(3): 36-38.
- [90] 华根勇, 傅菊根, 段锋. 深孔光面爆破技术在井巷掘进中的应用[J]. 煤炭工程, 2012, 59(3): 41-42.
- HUA Genyong, FU Jugen, DUAN Feng. Application of deep-hole smooth blasting technology in tunnel excavation[J]. Coal Engineering, 2012, 59(3): 41-42.
- [91] 刘端举, 高文乐, 黄博. 大断面岩巷快速掘进中的爆破时差分析与技术研究[J]. 建井技术, 2012, 33(4): 30-33.
- LIU Duanju, GAO Wenle, HUANG Bo. Blasting time difference analysis and technical research in rapid excavation of rock tunnel with large cross section[J]. Mine Construction Technology, 2012, 33(4): 30-33.
- [92] 柴顺志. 平巷中深孔爆破试验[J]. 建井技术, 1992, 13(5): 39-42, 48.
- CHAI Shunzhi. Blasting experiment of middle and deep holes in level roadways[J]. Mine Construction Technology, 1992, 13(5): 39-42, 48.
- [93] 刁先鹏. 含大直径中空孔的直眼掏槽在岩巷掘进中的应用[J]. 中国煤炭, 2015, 41(8): 77-80.
- DIAO Xianpeng. The application of parallel cut with large diameter hollow bore in rock drivage[J]. China Coal, 2015, 41(8): 77-80.
- [94] 曹昊举. 中深孔光面爆破技术在岩巷施工中的应用[J]. 建井技术, 2001, 22(6): 15-16, 11.
- CAO Haoju. Application of smooth blasting technology for medium and deep holes in rock lane construction[J]. Mine Construction Technology, 2001, 22(6): 15-16, 11.
- [95] 张世良, 杨伯达. 平巷中深孔光面爆破的实践与认识[J]. 建井技术, 1997, 18(3): 5-8.
- ZHANG Shiliang, YANG Boda. Practice and understanding of smooth blasting of middle and deep holes in roadway[J]. Mine Construction Technology, 1997, 18(3): 5-8.