

· 研究进展 ·

井巷工程掏槽爆破新技术及应用

杨仁树^{1, 2*} 王雁冰² 张召冉³ 左进京¹ 郑昌达² 李书莹²

1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083

2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083

3. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144

[摘要] 为缓解井巷掘进速度低而产生的“采掘失衡”矛盾, 笔者及所在课题组提出了3种新型掏槽爆破方法, 即“准楔形复式+超深”掏槽爆破、“二阶二段”掏槽爆破和孔内分段掏槽爆破。本文对3种新方法的技术要点和破岩机理进行系统全面的介绍, 同时给出了应用实例。这3种掏槽爆破方法主要通过先裂后掏——Ⅰ段爆破为Ⅱ段爆破提供新的自由面、空间补偿以减小底部岩石夹制作用, 或改变炸药能量分配——调整岩石的抗爆力与炸药破岩能力的匹配关系, 从而降低孔底部岩石的夹制作用, 增加岩石的破碎程度。在理论上较传统的掏槽爆破方法具有明显的优越性。工程应用案例也表明, 掏槽爆破新方法改善了爆破效果, 提高了掘进效率, 实用性强。具有推广应用价值。

[关键词] 井巷工程; 掏槽爆破; 超深; 二阶二段; 孔内分段

钻爆法是我国岩石井巷施工的主要方法之一, 工程占比95%以上^[1]。岩巷钻爆法的月掘进水平仅70~80 m^[2, 3], 掘进速度低是矿井采掘失衡的主要矛盾, 造成煤矿重大事故隐患。在岩巷钻爆法施工中, 掏槽爆破效果是重要影响因素^[4, 5]。因此, 为了缓解采掘失衡矛盾, 提高岩石巷道的掘进速度, 对掏槽爆破的研究显得至关重要。

自20世纪80年代以来, 许多学者围绕掏槽爆破开展了大量的研究工作。雷永健等在现场施工中发现采用单螺旋掏槽方式更能提高平巷掘进的爆破效率^[6]。陈士海等通过坚硬岩石巷道的中深孔爆破试验, 发现了复式桶式掏槽在中深孔爆破中完全适用^[7]。刘优平等对含空孔的掏槽爆破进行研究, 从理论上分析了空孔的应力集中效应^[8]。郑祥滨等对单螺旋空孔直眼掏槽的爆炸应力波传播规律与成腔过程进行数值模拟研究, 认为爆破效果与装药孔至空孔的距离有密切的关系^[9]。单仁亮等探讨了巷道掏槽爆破的作用机理, 简述了冲击波、应力波和爆生气体在掏槽爆破中的作用, 并分析了岩石性质、炸药



杨仁树 北京科技大学校长, 中国爆破行业协会轮值会长, “深部岩土力学与地下工程”国家重点实验室矿山建设工程学术带头人。主要从事: 矿山建设工程、岩土工程、工程爆破等领域的研究与教学工作。科研成果先后获国家科技进步二等奖2项, 省部级科技进步一等奖9项。曾获“孙越琦优秀青年科技奖”“中央国家机

关优秀青年”“茅以升北京青年科技奖提名奖”“江苏省跨世纪学术、技术带头人培养对象(第二层次)”“高等学校青年教师奖(研究类)”“教育部首届“青年教师奖”“煤炭工业技术创新优秀人才奖”等奖项。作为项目负责人或主要参与人, 先后承担国家863计划项目、国家自然科学基金重点项目、国家科技支撑计划、国家重点研发计划等项目20多项, 发表学术论文100余篇(其中SCI、EI检索论文60多篇), 出版专著、教材4部, 获国家发明专利22项。

性能、设计计算和施工工艺对巷道掏槽爆破效果的影响^[10]。宗琦等对比了菱形直眼掏槽和楔形掏槽爆破效果, 认为直眼掏槽中菱形较为实用, 而当巷道断面较大时, 楔形掏槽可获得较大掏槽体积^[11]。单仁亮等提出了岩巷准直掏槽爆破技术, 并进行了现场应用研究^[12]。袁永华等通过不同掏槽模型的相

收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-08-14

* 通信作者, Email: yrs@cumtb.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51934001)的资助。

似试验, 得出了楔形微差爆破能有效提高掘进效率的特点^[13]。杨国梁等结合了数值模拟分析和现场试验, 研究了深孔爆破的机理, 发现了复式楔形掏槽爆破有利于炮孔底部岩体破碎的特点^[14]。余永强等发现中深孔爆破和复式楔形掏槽爆破有效提高了硬岩巷道掘进时的炮孔利用率^[15]。

单螺旋掏槽以及复式桶式掏槽爆破等与现阶段巷道爆破方式差别较大, 打孔位置不易掌握, 工人施工难度较大。为进一步提高岩石井巷掘进效率, 近年来, 笔者及所在课题组在长期的理论研究和工程实践中研发了三种新型掏槽爆破方法, 即“准楔形复式+超深”掏槽爆破、“二阶二段”掏槽爆破和孔内分段掏槽爆破, 这三种新型爆破方法与现阶段巷道爆破方式接近, 仅改变掏槽孔深并在需要的情况下略微移动位置即可, 工人易上手, 并在实际应用中取得了理想的爆破破碎效果。本文着重对三种方法的理论成果、关键技术和应用案例进行系统全面的介绍。

1 巷道“准楔形复式+超深”掏槽爆破

整理分析近三十年来 91 个巷道爆破掘进案例发现^[16], 在设计爆破参数时, 掏槽孔的深度一般比其他炮孔超出 200 mm, 但并没有明确的工程意义, 爆后平均炮孔利用率约为 85%。对工程经验的依赖造成炮孔利用率低, 严重影响了巷道掘进效率。通过提出“准楔形复式+超深”掏槽爆破方法, 即掏槽孔与辅助掏槽孔的孔深大于其余炮孔的孔深, 孔深的差值一般在 200 mm 以上, 提高炮孔利用率, 增加单循环进尺。

1.1 爆破破岩机理分析

定量炸药下, 存在最佳深度使爆破漏斗半径、深度、体积达到最大值, 增加炮孔深度将增大爆破碎石块度^[17]; 合理布置掏槽孔超深值有利于增加槽腔深度, 增大槽腔体积, 从而改善辅助孔爆破条件; 掏槽孔超深值对被爆岩体内应力波传播过程影响不明显, 掏槽孔超深值增加有利于槽腔底部岩石破碎、增大槽腔底面积。

“准楔形复式+超深”掏槽爆破技术与一般的掏槽爆破技术相比, 在时间上表现为起爆顺序的不同, 在空间上表现为掏槽孔超深深度的不同。在硬岩爆破时, 周围岩体对掏槽区岩体的夹制作用增加, 形成槽腔的难度加大, 因此, 将掏槽孔作为 I 段起爆, 炸药起爆后, 在应力波和爆生气体的共同作用下, 掏槽区的岩体迅速抛出, 为辅助掏槽孔的 II 段起爆提供新的自由面和补偿空间, 同时中心孔 II 段起爆, 将

抛出的岩石二次破碎, 减小大块率。掏槽孔的超深增大了形成新的自由面的面积, 为后续岩体的爆破创造了更多空间。

1.2 关键技术

图 1 为掏槽孔布置示意图, 在原有斜眼爆破的基础上, 增加一组掏槽孔, 形成“复式”掏槽结构。炮孔 1~8 为掏槽孔, 9~10 为中心孔, 11~14 为辅助掏槽孔, 掏槽孔与辅助掏槽孔的钻孔深度为 H , 其余炮孔的钻孔深度为 h , 掏槽超深即为 $H-h$ 。掏槽孔和辅助掏槽孔与自由面有一定角度, 掏槽孔倾斜角度 θ_1 一般为 $70^\circ \sim 80^\circ$, 辅助掏槽角度 θ_2 一般在 $85^\circ \sim 88^\circ$, 近似楔形, 中心孔与自由面垂直。一般情况下 X, 掏槽孔为 I 段起爆, 中心孔和辅助掏槽孔为 II 段起爆, 其余炮孔如辅助孔、周边孔和底孔依次起爆, 总段数不超过 V 段。“准楔形复式+超深”掏槽爆破在软岩与硬岩巷道条件下均有良好的适用性, 一般情况下, 硬岩巷道条件下仅需适当增大药量或者适当减小炮孔间距等即可达到想要的爆破效果。

1.3 应用案例

淮浙煤电顾北矿 -648 m 水平降温硐室全长 241.154 m, 施工段巷道岩性主要有泥岩、中细砂岩、菱铁质细砂岩等。巷道为直墙拱形巷道, 分上下台阶进行爆破, 试验选用上台阶进行。上台阶断面净高 3 800 mm, 净宽 6 800 mm, 净断面 21.88 m^2 。雷管采用矿用毫秒延期电雷管, 炸药采用三级煤矿水胶炸药, 尺寸为 $\Phi 27 \times 430 \text{ mm}$ (0.294 kg/卷)。

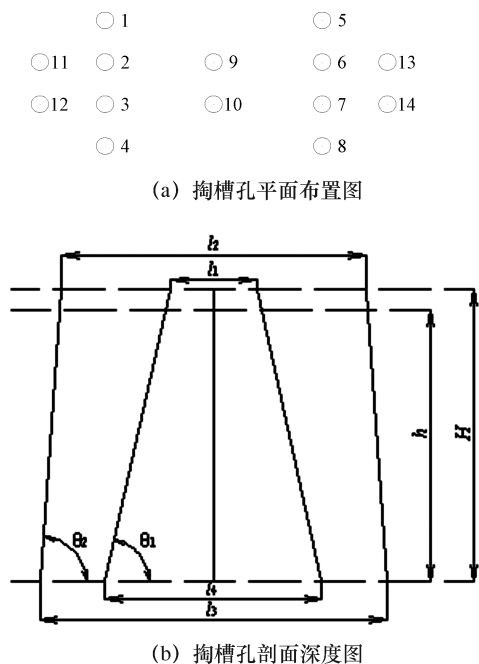
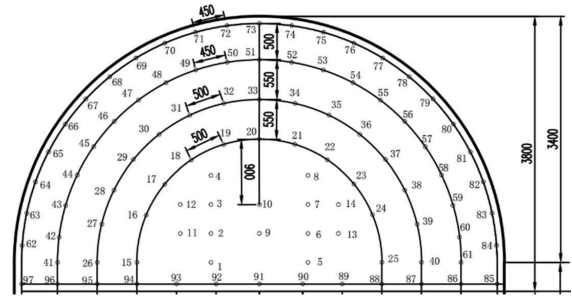


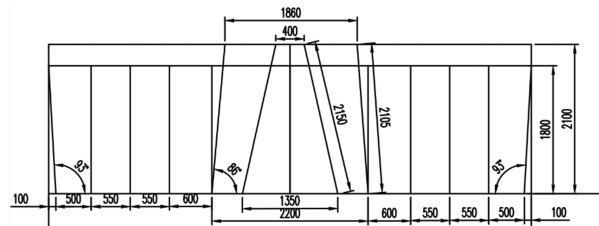
图 1 “准楔形复式+超深”掏槽爆破掏槽孔布置示意图

原爆破方案共布置 7 对掏槽孔,掏槽形式为普通的楔形掏槽,掏槽孔与辅助掏槽孔深度均为 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 77°,辅助掏槽孔与自由面夹角为 73°。辅助孔角度均为 90°,周边孔角度为 93°。装药量为掏槽孔与辅助掏槽孔 0.88 kg/孔,周边孔、底孔、辅助孔均为 0.59 kg/孔。掏槽孔与辅助掏槽孔均为 I 段起爆。“准楔形复式+超深”掏槽爆破方案在原方案的基础上,新增了 2 个中心孔,设置了 4 对掏槽孔,2 对辅助掏槽孔,同时将辅助掏槽孔与自由面的夹角增大至 86°。炮孔布置图以超深 300 mm 为例,如图 2 所示。掏槽孔为 I 段起爆,中心孔与辅助掏槽孔为 II 段起爆。掏槽孔与辅助掏槽孔装药量为 0.75 kg/孔,中心孔为 0.3 kg/孔,辅助孔与底孔为 0.6 kg/孔,周边孔为 0.45 kg/孔。设计超深值分别为 200 mm、300 mm、400 mm、500 mm 四种方案各试验 2 次。

对不同超深的爆破试验方案的爆破效果进行分析,分析结果见表 1。可发现,新方案的炮孔利用率相比原方案的 84% 明显提升,同时,在超深 300 mm 的情况下,炮孔利用率达到了 95.9%,并且巷道成型质量与大块率也要优于其他方案。现场爆破效果对比图见下图 3。



(a) 上台阶炮孔平面布置图

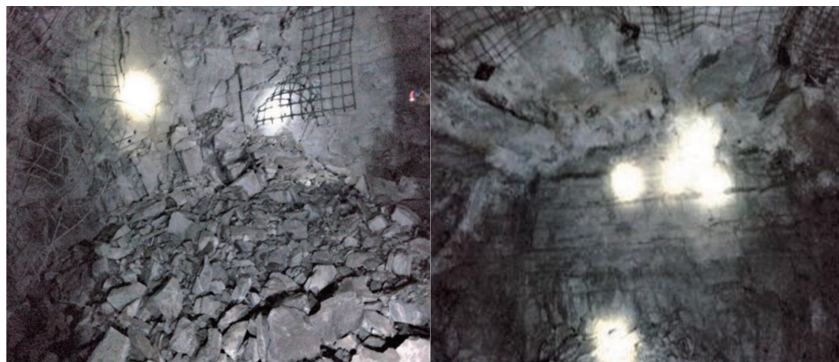


(b) 上台阶炮孔剖面深度图

图 2 优化后方案炮孔布置图(超深 300 mm)

表 1 新旧方案爆破效果对比

超深(mm)	单循环进尺平均值(m)	炮孔利用率平均值(%)	巷道成型质量	大块率
200(旧)	1.600	84.20	一般	高
200	1.695	94.15	良好	一般
300	1.725	95.90	良好	良好
400	1.705	95.30	良好	一般
500	1.700	94.60	良好	一般



(a) 原方案爆破后断面图及半眼痕图(不明显)



(b) 新方案(300mm超深)爆破后断面图及半眼痕图

图 3 新旧方案爆破效果对比图

2 巷道“二阶二段”掏槽爆破

巷道爆破参数设计中,炮孔深度一般 1.5~2.2 m,单循环进尺 1.4~2 m,为提高单循环进尺,通常采用中深孔爆破的方法,炮孔深度 2.7~3.0 m^[18],但受到瓦斯、地质等条件限制,煤矿巷道中深孔爆破效果较差,循环进尺 1.8~2.2 m。通过采用“二阶二段”掏槽爆破方法,将掏槽孔分为两段起爆,同时将掏槽区岩石分为深浅不同的两个台阶进行起爆^[19],大幅提高单循环进尺,提升巷道掘进效率。

2.1 爆破破岩机理分析

“二阶二段”掏槽三维模型^[19]如图 4 所示,其中 A'G'、B'H'、C'I'、D'J' 为一阶掏槽孔,槽口宽为 $S_{-阶}$,槽底宽为 e ,炮孔长度为 $h/\sin\alpha$,AG、BH、CI、DJ、EL、FK 为二阶掏槽孔,槽口宽为 $S_{二阶}$,槽底宽为 f ,炮孔长度为 $H/\sin\beta$,掏槽孔间距均为 a 。理想爆破条件下的爆破参数采用下式计算^[17]:

$$V_1 = (ae + S_{-阶}a + \sqrt{a^2 e S_{-阶}})h/3$$

$$V_2 = [2af + S_{二阶}(2a) + \sqrt{4a^2 f S_{二阶}}]H/3$$

$$V_2/V_1 \leq K_s/(K_s - 1)$$

$$S_{-阶} = e + 2h/\tan\alpha$$

$$S_{二阶} = f + 2H/\tan\beta$$

其中, K_s 为岩石的碎胀系数, V_1, V_2 分别为一阶掏槽与二阶掏槽爆破岩体体积。

试验发现“二阶二段”掏槽爆破后槽腔宽度比普通槽腔宽度增大 66%,体积比普通楔形掏槽增大了 186%,同时,“二阶二段”掏槽槽腔平均深度是普通楔形掏槽的 1.25 倍,大块率比普通楔形掏槽减少了 22.9%^[20]。分析认为,“二阶二段”掏槽方式,充分利用新形成的自由面,强化对岩石的拉伸破坏效果,将爆炸能量更多地用来破坏底部岩体,使爆破深度更大,同时,槽腔破坏范围变小且大块率降低。

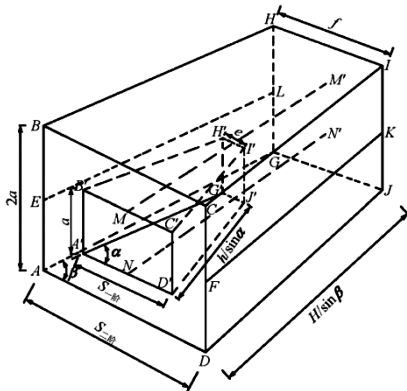


图 4 “二阶二段”槽腔模型^[17]

“二阶二段”掏槽爆破与传统爆破方法的主要区别在于其起爆时差与掏槽孔深度不同。新方法首先起爆中心孔与一阶掏槽孔,利用岩石夹制作用较小的浅孔形成新的自由面和槽腔,为之后二阶爆破的岩石提供额外的空间,降低夹制阻力,促进岩石破碎与更大槽腔的形成。

2.2 关键技术

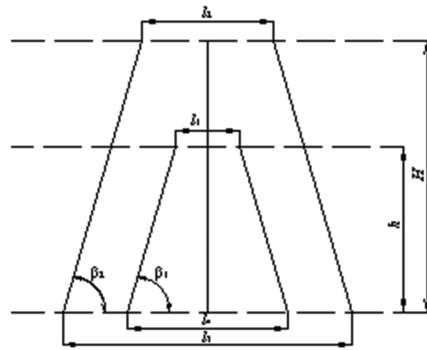
图 5 为“二阶二段”掏槽孔布置示意图,炮孔 1—2 为中心孔,炮孔 3—8 为一阶掏槽孔(次掏槽孔),炮孔 9—16 为二阶掏槽孔(主掏槽孔)。一阶掏槽孔和二阶掏槽孔与自由面呈一定角度布置,一阶掏槽孔倾斜角度 β_1 一般为 $70^\circ \sim 80^\circ$,二阶掏槽角度 β_2 一般在 $75^\circ \sim 85^\circ$,中心孔与工作面垂直。实际应用时,由于中心孔和一阶掏槽深度较浅,因此令其首先起爆。随后,二阶掏槽同时起爆,其利用中心孔以及一阶掏槽爆破后形成的新自由面和新槽腔进行破岩^[17, 18]。这种掏槽技术使得掏槽区能量分次释放,提高了炮孔能量利用率,并且一深一浅的两次掏槽爆破使孔底距增大,布孔更简便,掏槽更容易,在实际工程中有着良好的适用性。

2.3 应用案例

淄矿集团正通煤业高家堡煤矿西区胶带大巷全长 2 200 m,岩性以中粒砂岩、泥岩、铝质泥岩为主,岩石的坚固性系数 f 为 6~8,巷道为直墙半圆拱,宽 5.7 m,高 4.45 m。使用矿用毫秒延期电雷管、2 号岩石乳化炸药。炮孔直径为 42 mm。



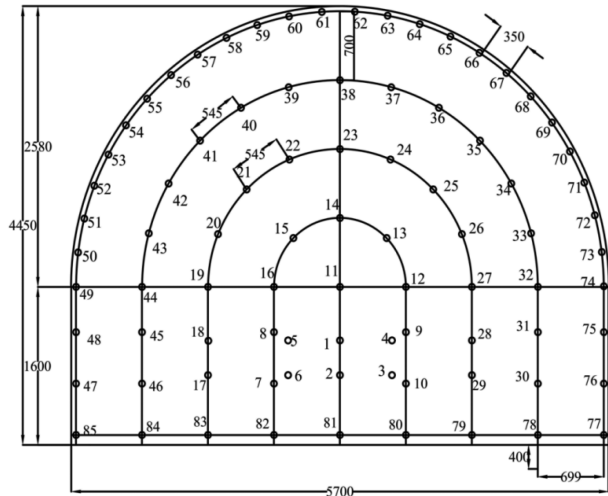
(a) 掏槽孔平面布置图



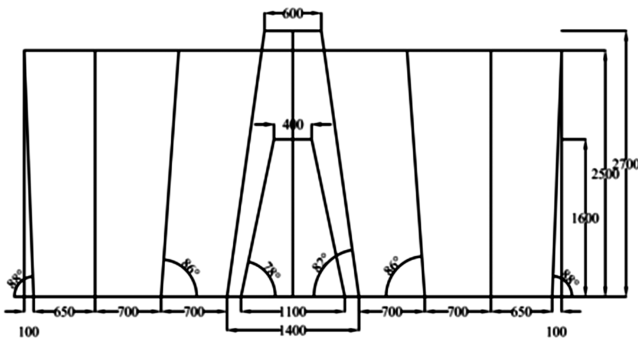
(b) 掏槽孔剖面深度图

图 5 “二阶二段”掏槽孔布置示意图

原爆破方案的掏槽形式为楔形掏槽，布置四对楔形掏槽孔，掏槽孔深 2.3 m，垂直深度比辅助眼、周边眼深 2.0 mm。掏槽孔与自由面夹角为 75°，辅助掏槽孔与自由面夹角为 82°。采用二阶二段掏槽方案，一阶掏槽孔深 1.6 mm，二阶掏槽孔深 2.7 mm，其余孔深 2.5 mm，一阶掏槽孔底距为 400 mm，二阶孔底距为 600 mm，掏槽孔间距均为 350 mm，新方案炮孔布置图如图 6 所示。



(a) 断面炮孔平面布置图



(b) 断面炮孔剖面深度图

图 6 “二阶二段”爆破炮孔布置图

表 2 新旧方案爆破效果对比

指标	原爆破方案	新爆破方案
掏槽形式	楔形	二阶二段
单循环进尺(m)	1.75	2.3
炮孔利用率	83.3%	92%
眼痕率	<30%	>60%
超挖(mm)	>150	<100
月进尺(m/月)	75	85
单耗(kg/m ³)	3.15	2.85

原方案与二阶二段爆破方案的爆破效果对比见表 2。从爆破效果来看，原方案中爆破进尺为 1.9 m，炮孔利用率平均为 83.3%，炸药单耗为 3.15 kg/

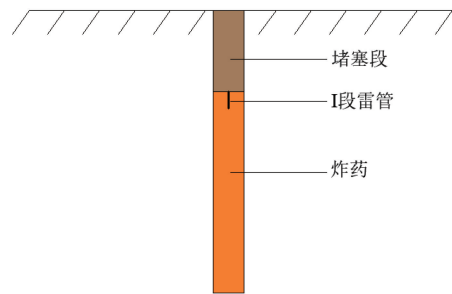
m³，周边超欠挖严重，巷道成型质量不佳，眼痕率不足 30%。而二阶二段爆破方案的单循环进尺平均为 2.3 m，较原方案增加了 0.55 m，炮孔利用率为 92%，比原方案提高了 8.7%，由于掏槽效果好，其他炮孔的炮孔利用率高，周边成型轮廓平整，半眼痕率超过 60%。

3 立井孔内分段掏槽爆破

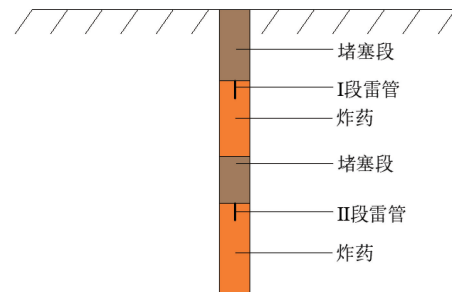
随着立井井筒开拓深度的不断增加，加大爆破循环进尺是提高掘进效率的重要措施，我部分矿区已经采用孔深超过 5 m 的中深孔爆破技术钻爆施工工艺。然而制约中深孔爆破技术的瓶颈问题是炮眼利用率低，单循环爆破进尺无法满足生产需求，尤其是在遇到普氏系数超过 12 的坚硬岩石时，问题更加突出^[21, 22]。通过孔内分段掏槽爆破方法，即把直眼掏槽中的炮孔分为上下两段(图 7)，上下分段装药，利用炮泥将两段炸药间隔开来，上下两段炸药利用两段雷管进行微差起爆^[23]，有效地提高了掏槽爆破效率。

3.1 爆破破岩机理分析

利用大型计算软件 AUTODYN 中的 SPH 无网格光滑粒子流方法对立井深孔分段掏槽爆破进行模拟^[24]。从立井掏槽孔连续装药和分段装药两种情



(a) 一次起爆



(b) 分段起爆

图 7 装药结构示意图

况下掏槽腔体的形成过程(图 8)和岩石的抛掷速度时程曲线和有效应力时程曲线等方面对比和分析，发现分段装药改变了爆炸能量对岩体的作用力状态，改变了岩石的抗爆力与炸药破岩能力的匹配关

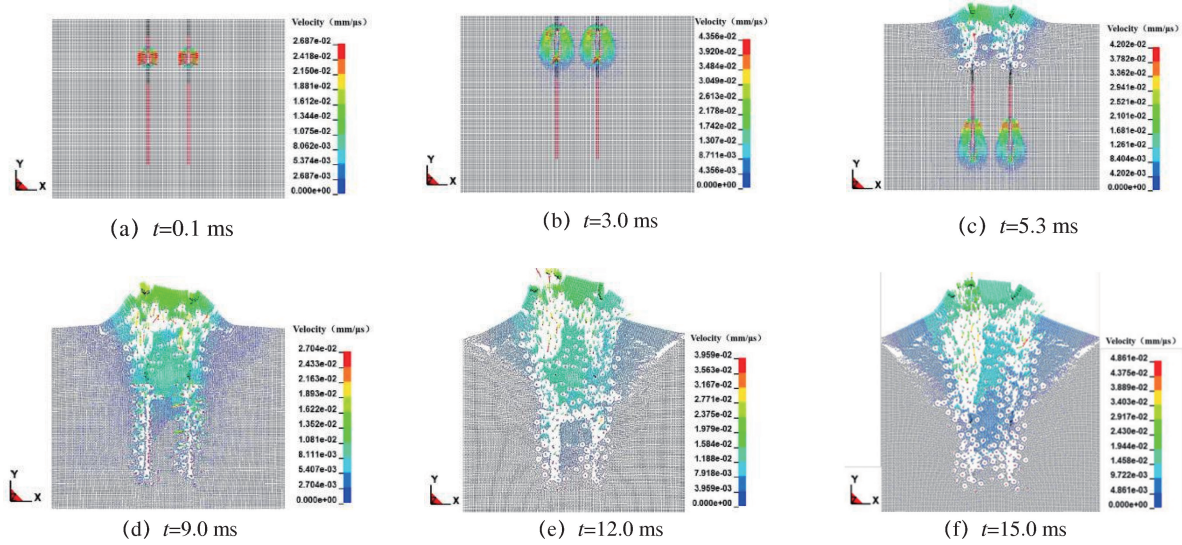


图 8 孔内分段装药不同时刻岩石抛掷形态

系,从而降低了深炮孔底部岩石的夹制作用,增强了岩石的有效破碎程度,同时分段装药破岩的等效抵抗较连续装药时大,从而提高了深孔破岩深度。此外,对比不同分段比例下爆破腔体的损伤,发现上分段装药占比 0.4 时炮孔利用率、掏槽腔体积最大,大块率占比最小。

在模型试验中,制作了长 210 mm、105 mm、63 mm 和 147 mm 的 4 种规格的药包,组合模拟分段装药结构,进行爆破试验^[23]。分别设计不同的分段比例(5 : 5、3 : 7、7 : 3 和不分段),4 个模型的装药结构及顺序见图 9。比较各组炮眼利用率、槽腔体积与爆后块度结果,发现上下分段为 3 : 7 的炮孔利用率最高 95%,比例为 5 : 5 的次之,7 : 3 和不分段的爆破效果较差。说明上下分段掏槽爆破时,爆炸产生的能量更多的用于破碎岩体,使槽腔体积更大。同时,炸药能量集中于下部,使下部岩体破碎更充分,侧面减轻了对槽腔区域外的围岩破坏。模型试验结果数据见表 3。

孔内分段掏槽爆破利用上下分段爆破的形式使炸药能量的分配发生了改变,由于在深孔爆破中,岩石受到的夹制作用随着炮孔深度的增加而非线性的增大,但在装药条件不变的情况下,炸药的破岩能力是恒定的,因此让夹制作用小、自由面充分、所需破岩能量小的上部岩石内炸药先起爆,为夹制作用大、基本没有自由面、所需破岩能量大的下部岩石爆破创造充足的自由面、裂隙区和破碎区,减小下分段的夹制作用,促进下部岩石的破碎,使理论破岩深度加大。总的来说,采用孔内分段掏槽爆破技术可以在不改变炸药总能量的前提下,提高掏槽效率,优化爆破效果。

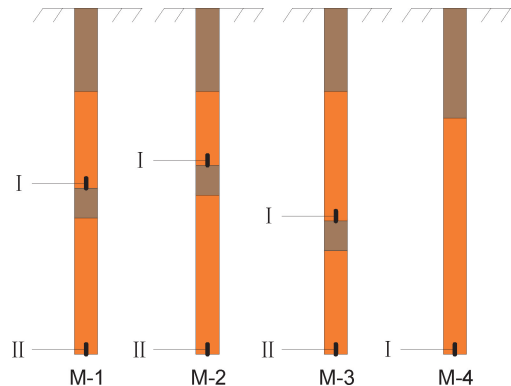


图 9 模型试验装药结构及起爆顺序示意图

表 3 模型试验结果对比

模型编号	上下比例分段	掏槽深度/cm	炮眼利用率	槽腔平均直径/cm	槽腔体积/cm ³
M-1	5 : 5	28.0	93.3%	19.0	7 910
M-2	3 : 7	28.8	95.0%	18.9	8 150
M-3	7 : 3	25.5	85.0%	19.4	7 520
M-4	不分段	26.1	87.0%	19.2	7 600

3.2 关键技术

利用上分段首先起爆将上部岩石向上抛掷,从而在下分段之上形成一个小槽腔,为下分段爆破产生充足的自由面,同时也在下分段中产生部分裂隙甚至破坏,增强下分段爆破时应力波对岩石的反射拉伸破坏作用,促进槽腔底部岩石的破碎,从而获得更大的槽腔。这种方法的关键在于根据现场实际情况确定合适的分段比例和合理的延期时间。该方法适用于岩石普氏系数高,打眼困难的立井硬岩深孔爆破中。

3.3 应用案例

山东省莱州市瑞海矿业副井井筒净直径 6.5 m,

掘进荒径 7.3 m,掘进断面 41.85 m²,岩性以辉长岩为主,岩石硬度 $f=12$ 。炸药使用 2 号岩石乳化炸药,掏槽眼眼深 5 200 mm,辅助眼及周边眼眼深 5 000 mm,炮孔孔径 55 mm。

原掏槽爆破方案的掏槽形式为直眼掏槽,8 个掏槽孔以圆形布置。在原爆破方案的基础上,采用掏槽孔分段装药方法,不改变掏槽孔的炮孔布置,对掏槽装药结构采用上下顺序微差起爆,上分段采用 I 段雷管,下分段采用 III 段雷管,间隔 1.0 s,上下两段采用碎石间隔 500~600 mm,然后辅助眼周边眼顺序起爆。剩余炮孔(辅助眼和周边眼)装药结构不变。优化后爆破参数见表 4。

采用孔内分段掏槽爆破技术优化后的爆破方案的单循环进尺平均为 5.0 m,炮眼利用率 96.2%,比原方案普通直眼掏槽相比,有效进尺增加了 0.8 m,炮眼利用率提高了 9.7%。可以看出孔内分段掏槽爆破方法在不改变总装药量的情况下对提升立井硬岩掏槽爆破效率作用明显。

4 三种掏槽爆破方案对比分析

“准楔形复式+超深”掏槽爆破是巷道爆破中最泛用、最基础、最关键的技术,在浅孔和中深孔爆破中均可使用,在使用该爆破技术的基础上,为了提高在中深孔爆破中的爆破效果,可以将孔内分段掏槽

爆破和“二阶二段”掏槽爆破与“准楔形复式+超深”掏槽爆破结合起来,将掏槽爆破分成先浅后深的两次爆破(文中孔内分段使用直眼掏槽为例举出)。但是“二阶二段”掏槽爆破是布置一浅一深的两排掏槽孔,先爆破浅孔、再爆破深孔来减小岩石的夹制作用,而孔内分段是在一个掏槽孔内直接进行前后比例适合的两段装药进行延时爆破。其中孔内分段掏槽爆破打孔统一深度角度方便工人施工,较“二阶二段”掏槽打孔更为便捷,但是由于需要在同一炮孔内进行两段毫秒延时,需要更精细的延时设置来确保同一孔内后一段爆破不受前一段爆破的影响。因此,无论浅孔还是中深孔爆破均可使用“准楔形复式+超深”掏槽爆破技术,其中在中深孔爆破时可以根据条件选用孔内分段掏槽爆破和“二阶二段”掏槽爆破来提高爆破效果。

5 结语

为缓解井巷掘进速度低而产生的采掘失衡矛盾,通过对三种掏槽爆破新方法进行全面系统地总结、梳理:掏槽孔的超深增大了形成裂隙区的范围、新自由面面积和最后形成槽腔的体积,为后续岩体爆破提供了充足的空间,提高了炮孔利用率和掘进效率;“二阶二段”掏槽爆破的核心是“先裂后掏”,中心孔与一阶掏槽的先爆破为二阶掏槽的爆破提供了

表 4 孔内分段掏槽爆破参数表

序号	名称	眼号	眼数(个)	圈径(mm)	眼深(mm)	装药量		爆破顺序	联线方式
						(卷/眼)	(kg/圈)		
1	掏槽上	1~8	8	1600	5200	3	19.2	I	串 并 联
2	掏槽下		8	1600	5000	6	38.4	III	
3	辅助眼	9~20	12	3000	5000	7	76.8	IV	
4	辅助眼	21~37	17	4500	5000	7	108.8	V	
5	辅助眼	38~59	22	5900	5000	7	140.8	VI	
6	周边眼	60~91	32	7100	5000	7	179.2	IX	
合计			91				563.2		

新的自由面和补偿空间,减少了底部岩石的夹制作用,提高了掏槽爆破效率;孔内分段掏槽爆破的核心是改变炸药能量的分配,在未改变炸药总能量的前提下,有效形成自由面,改善爆破效果,提高掘进效率。三种新的掏槽爆破方法已在现场实践中证实了其良好的适用性,值得进一步研究与推广应用。

参 考 文 献

[1] 杨仁树. 我国煤矿岩巷安全高效掘进技术现状与展望. 煤炭科学技术, 2013, 41(9): 18—23.

[2] 龚敏, 文斌, 王华. 掏槽参数对煤矿岩巷爆破效果的影响. 爆炸与冲击, 2015, 35(4): 576—584.

[3] 黄宝龙. 岩巷掘进掏槽爆破理论与技术研究进展. 中国矿业, 2014, 23(10): 103—106.

[4] 王文龙. 钻眼爆破. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 30—35.

[5] 李爱军. 钻爆法岩巷四位一体快速掘进技术研究与应用. 煤炭科学技术, 2017, 45(7): 39—43, 131.

[6] 雷永健, 周传波, 饶学治. 合理掏槽方法和爆破参数提高平巷掘进爆破率的实践. 工程爆破, 2006, 12(1): 71—74.

[7] 陈士海, 魏海霞, 薛爱芝. 坚硬岩石巷道中深孔掏槽爆破试验研究. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S1): 3498—3502.

- [8] 刘优平, 黎剑华, 林大能, 等. 掏槽爆破中空孔效应的理论与试验研究. 矿业研究与开发, 2007, 27(5): 75—77.
- [9] 郑祥滨, 璩世杰, 范利华, 等. 单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究. 岩土力学, 2008, 29(9): 2589—2594.
- [10] 单仁亮, 周纪军, 黄宝龙, 等. 巷道掏槽爆破影响因素分析. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 25—27, 54.
- [11] 宗琦, 刘菁华. 煤矿岩石巷道中深孔爆破掏槽技术应用研究. 爆破, 2010, 27(4): 35—39.
- [12] 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. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 224—232.
- [13] 袁文华, 马芹永, 黄伟. 楔形掏槽微差爆破模型试验与分析. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3352—3356.
- [14] 杨国梁, 姜琳琳, 杨仁树. 复式楔形深孔掏槽爆破研究. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 755—760.
- [15] 余永强, 王超, 褚怀保, 等. 硬岩巷道中深孔爆破掘进复楔形掏槽试验研究. 爆破, 2013, 30(2): 95—99.
- [16] 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. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 10—23.
- [17] 安晨. 基于掏槽孔超深值的阳煤五矿岩巷掘进爆破技术研究. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
- [18] 信志鹏. 巷道掘进作业中深孔爆破的应用研究. 西部探矿工程, 2020, 32(10): 135—136.
- [19] 张召冉, 杨仁树. 岩石巷道“多阶段”掏槽技术及应用研究. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 551—559.
- [20] 张召冉, 丁晨曦, 左进京, 等. 岩巷二阶二段掏槽破岩机制与试验研究. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 93—104.
- [21] 王鹏越. 超大直径深立井施工技术现状及展望. 煤炭工程, 2018, 50(6): 47—50.
- [22] 李清, 张随喜, 张迪, 等. 立井基岩深孔定向断裂爆破应用技术研究. 建井技术, 2013, 34(1): 28—30.
- [23] Yang R, Zheng C, Yang L, et al. Study of two-step parallel cutting technology for deep-hole blasting in shaft excavation. Shock and Vibration, 2021, 3: 1—12.
- [24] 左进京. 立井深孔分段掏槽与周边定向断裂损伤控制试验研究. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.

New Technology and Application of Cutting Blasting in Shaft and Roadway Engineering

Yang Renshu^{1, 2*} Wang Yanbing² Zhang Zhaoran³ Zuo Jinjing¹ Zheng Changda² Li Shuxuan²

1. Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083

2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083

3. China School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144

Abstract In order to alleviate the contradiction of “mining imbalance” caused by low driving speed, the author and his research group proposed three improved new cutting blasting methods, namely “quasi wedge compound + ultra deep” cutting blasting, “Two stage and two section” cutting blasting and in hole segmented cutting blasting. In this paper, the technical points of the three new methods and the mechanism of rock breaking by blasting are introduced systematically and comprehensively. At the same time, the application examples are given. The three cutting blasting methods mainly provide new free surface and space compensation for the second section blasting through “first splitting and then cutting” - i. e. the first section blasting can reduce the rock clamping effect at the bottom of the hole, or “change the energy distribution of the explosive”, that is, change the matching relationship between the anti blasting force of the rock and the rock breaking ability of the explosive, so as to reduce the rock clamping effect at the bottom of the hole, It increases the degree of rock fragmentation. Compared with the traditional cut blasting method, it has obvious advantages in theory. The engineering application cases also show that these three cutting blasting methods improve the blasting effect and tunneling efficiency, and have strong practicability. It has the value of popularization and application.

Keywords shaft engineering; cutting blasting; ultra deep; two stage and two section; inner hole section

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: yrs@cumtb.edu.cn