“露天矿绿色智能爆破”科研成果转化
《爆破工程 B》教学案例

一、科研项目基本信息介绍

以学生为中心，以项目为载体，根据教学内容和课程进度安排，以学生应用能力和实践能力培养为核心，开发实践式项目教学案例。课程案例来自于申请人科研项目、科研成果以及实际工程问题。涉及的相关项目、成果等信息如下：

（1）国家自然科学基金青年科学基金项目, 52004202, 露天矿高台阶抛掷爆破粉尘精准控制机理研究, 2021/01-2023/12, 24 万元, 已结题, 主持.

（2）陕西省教育厅重点科学研究计划, 18JS067, 高陡边坡预裂爆破减震机理及稳定性影响机制研究, 2018/01-2020/12, 4 万元, 已结题, 主持.

（3）新疆煤炭资源绿色开采教育部重点实验室，教育部重点实验室开放课题, KLXGY-KB2424, 露天矿高台阶松动爆破粉尘精准控制机理研究, 2024/01-2025/12, 6.0 万元, 在研, 主持.

（4）西安科技大学博士启动金, 2017QDJ008, 抛掷爆破拉斗铲倒堆工艺参数优化方法研究, 2017/04-2019/05, 10 万元, 已结题, 主持.

（5）企业委托项目, 6000230842, 复杂环境下露天矿上山道路爆破动力效应精准控制方法研究, 2023/09-2024/09, 49 万元,在研, 主持.

（6）国家自然科学基金青年基金项目, 51604264, 露天矿台阶抛掷爆破效果-多参数响应机理研究, 2017/01-2019/12, 19 万元, 已结题, 参加.

（7）肖双双, 杨晴, 马亚洁, 张永贵, 董国伟, 王红胜. 一种露天煤矿抛掷爆破粉尘浓度计算方法, 2024.04.26, 中国, ZL202210464411.0（授权发明专利）

（9）肖双双, 马力. 一种抛掷爆破智能施工方法, 2018.08.14, 中国, ZL201710456625.2（授权发明专利）

（9）肖双双, 马力. 一种露天矿台阶爆破布孔方法, 2018.07.24, 中国, ZL201710456624.8（授权发明专利）

（10）肖双双, 李克民, 张永贵. 抛掷爆破-拉斗铲倒堆工艺参数优化理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2023.10.

（11）肖双双,林士桢,刘锦, 龚伟.基于倒数误差法的抛掷爆破振动速度集成预测模型[J]. 煤炭科学技术,2025,53(11):295-306.

（12）肖双双, 林士桢, 郭桢炜, 董国伟, 王红胜. 基于 GA-LSSVM 与 RF 的松动爆破振动峰值速度集成预测[J]. 采矿与安全工程学报, 1-11. （已录用）

二、科研促进教学案例

（一）露天矿爆破智能设计平台案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破智能设计平台案例

（2）案例简介

基于三维地质模型与爆破优化算法，自动生成最优孔位、孔深、孔斜的布孔设计图，将科研成果“爆破数字化设计软件”直接应用于教学，体现智能化技术与传统工艺的融合，将抽象理论转化为具象操作，显著提升学生的工程实践与创新能力。

2.案例实际应用效果简介

《爆破工程 B》第八章露天爆破主要学习露天浅孔爆破、深孔台阶爆破、硐室爆破等内容，使学生掌握露天浅孔爆破中沟槽爆破及孤石爆破的爆破设计；熟练掌握露天深孔台阶爆破，会进行露天台阶爆破的参数设计与计算；了解硐室爆破特点。露天矿爆破智能设计平台案例是对相关内容的补充，通过相关案例的学习，让学生对爆破参数设计等内容有更深入的了解。

3.支撑材料

（1）授权发明专利：肖双双，马力．一种抛掷爆破智能施工方法，2018.08.14，中国，ZL201710456625.2

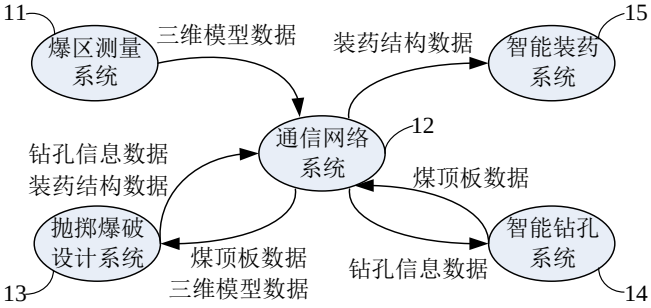


图 1-1 爆破智能施工流程

（2）软件：爆破数字化综合处理系统 KSBP

① 系统简介

系统采用面向对象技术、ADO/X 数据访问和控制技术、数据库开发技术、三维显示技术、露天矿山爆破技术，集三维可视化图形平台、地质信息管理系统、爆破器材信息管理、露天矿爆破智能设计、爆破模拟及效果分析于一体的开放性系统。系统在布孔、装药、连线和施工方案输出等方面都实现了智能化，优化爆破设计参数，有效利用爆破能量提高爆破效果，降低矿山剥离成本。

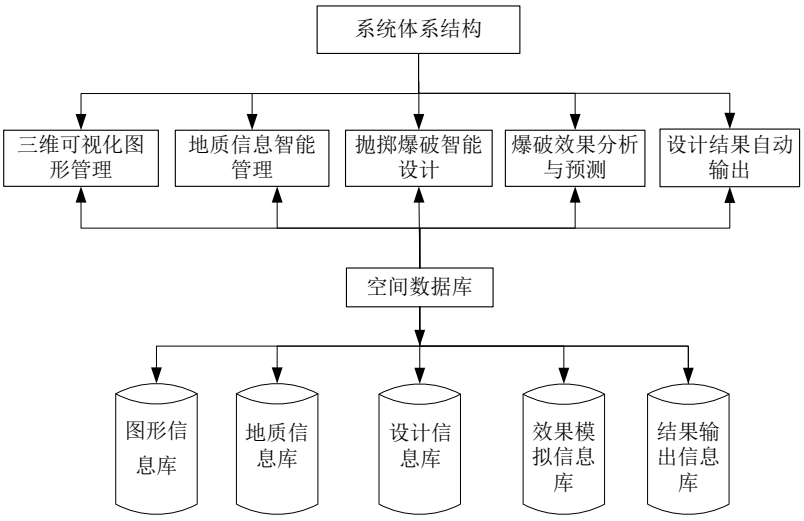


图 1-2 爆破智能设计系统体系结构图



图 1-3 爆破数字化综合处理系统

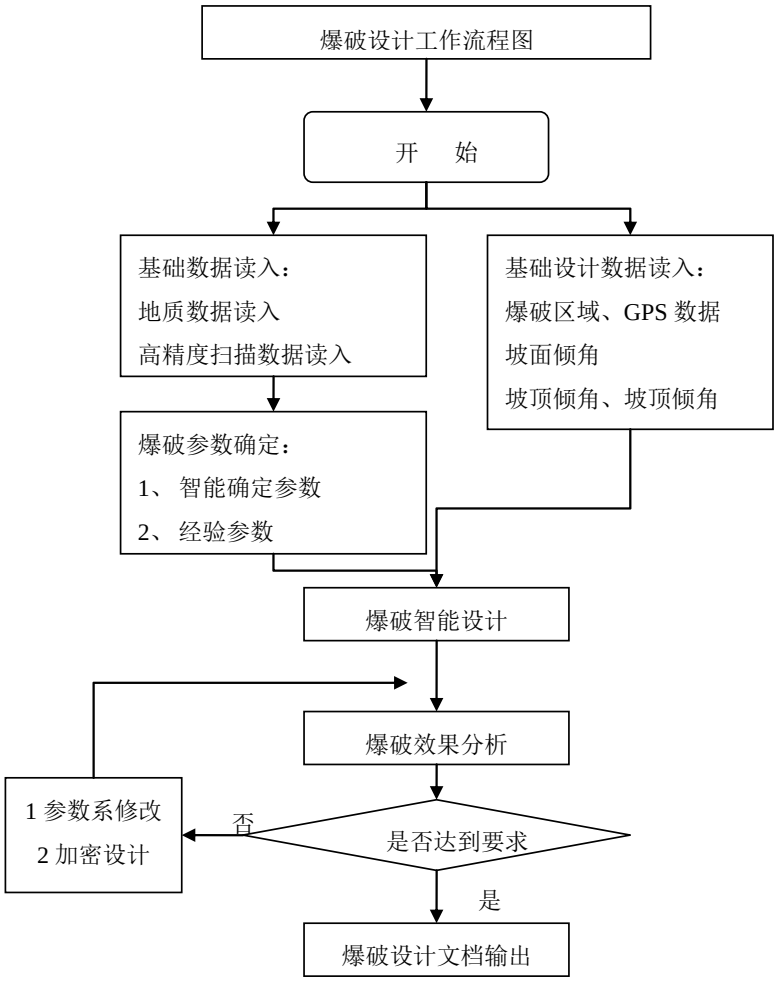


图 1-4 爆破设计应用系统的工作流程

② 主要模块设计

a. 三维可视化图形平台的开发

本系统的图形平台是从底层开发的，包含了全三维条件下图形的编辑和显示功能，具有独立自主的知识产权。

平台可以在三维空间下设计点、直线、曲线、多边形、文字等基本图形单元，也可以设计爆破专用的图元，如炮孔、连线、坡顶线、坡底线、坡顶面、煤顶板等。

图形平台可以做各种三维视角下的图形投影，可以在三维空间里任意地旋转、平移。默认的视图方式有：俯视、仰视、左视、右视、前视、后视、东西向俯视、南北向俯视、东北-西南向俯视、西北-东南向俯视等。图形可在三维视图下实现任意大小的缩放，方便查看图形的全局和细节。

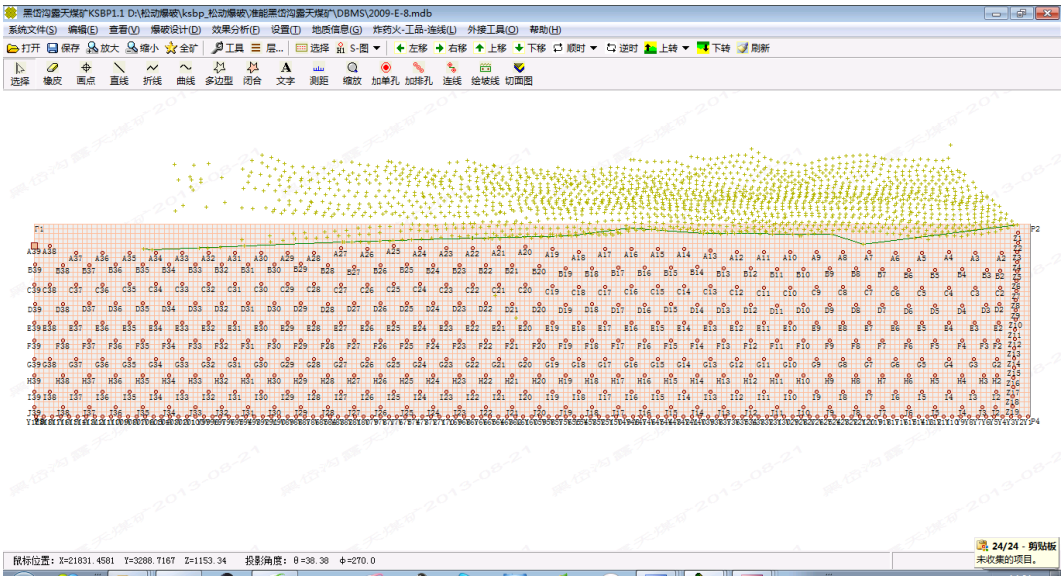


图 1-5 三维平台运行效果图

b. 地质信息管理系统的开发

本系统可以为矿山建立完整的地质信息管理，用户可以查看矿山所有地质钻孔原始数据和地层地质年代数据，在三维图形平台上可以查看地质钻孔柱状图和任何位置的地层地质年代图，系统可以进行任意点的数据插值、可以绘制任意地质纵切面。系统的爆破设计以地质信息数据为基础，爆破设计更科学、更贴近实际。

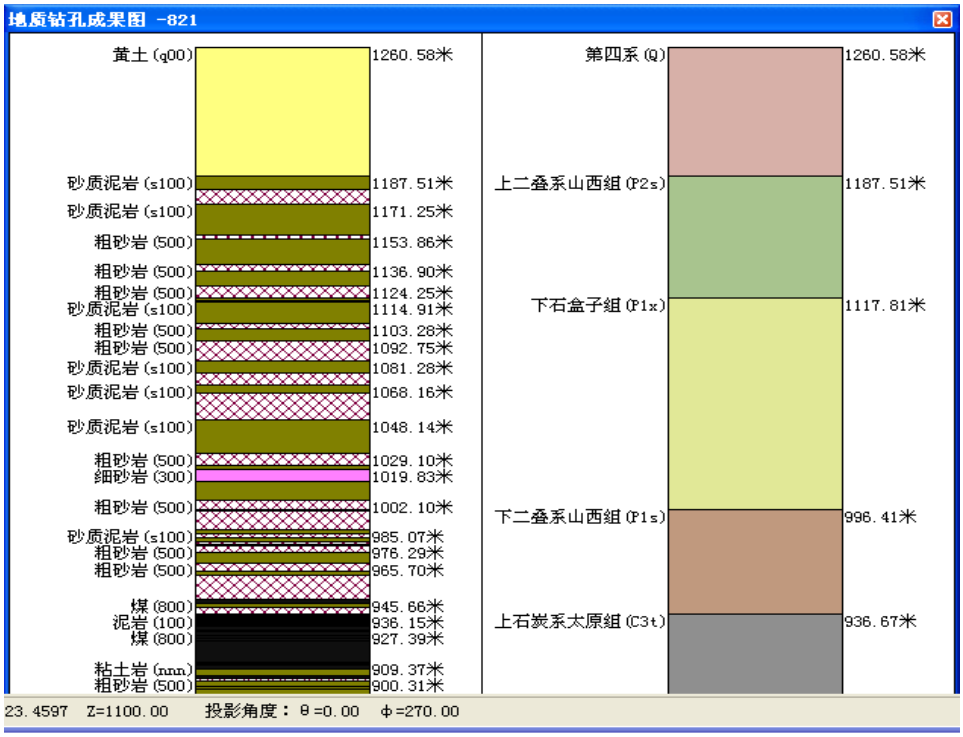


图 1-6 单点地质数据的切面图

c. 松动爆破智能设计

爆破数字化综合处理系统以台阶爆破设计为核心，包括预裂爆破设计和松动爆破设计。主要包括：炮孔设计、连线设计和装药设计等。

系统实现了单个炮孔和群体炮孔两种设计技术。群孔设计可以一次为一个爆区设计所有炮孔，包括孔网参数设计、装药结构设计、布孔方式设计、孔内延时设计及孔内火工品设计等。单孔设计主要是针对特殊炮孔等，单孔设计时可以查看炮孔周围岩石信息、岩层地质年代信息和装药结构示意图等。

系统实现了手动连线与自动连线设计功能。自动连线是针对爆区内有规律的连线专门开发的功能，适合大量有规律的连线设计；手动连线更为灵活，主要针对少量连线，可以为两个或多个炮孔进行单独连线设计。

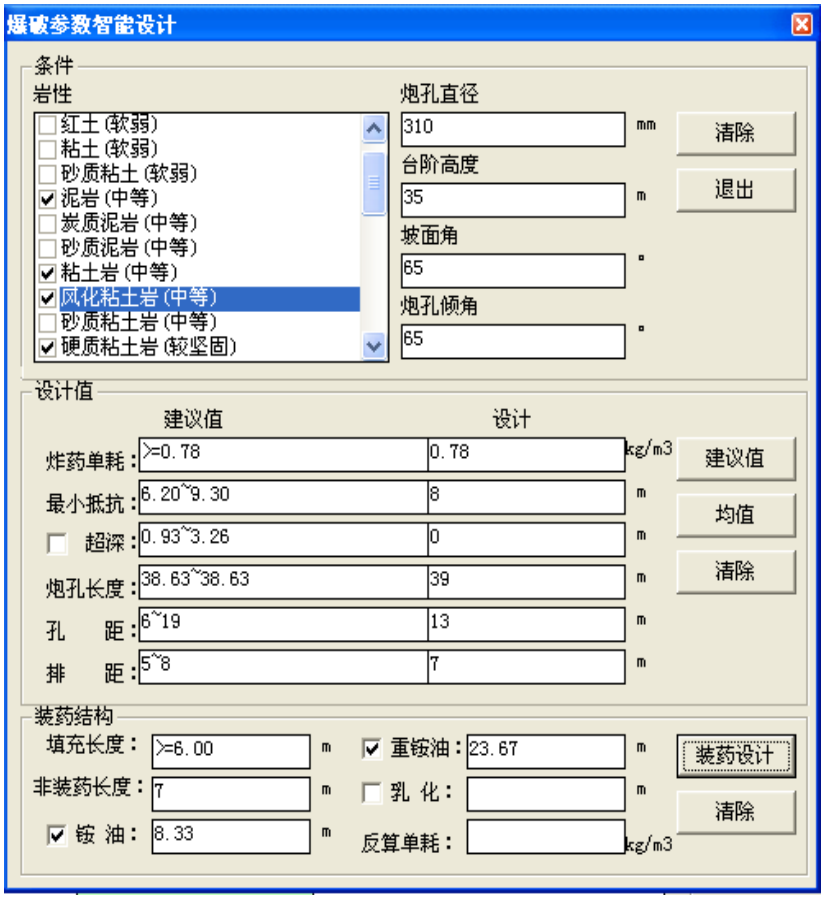


图 1-7 爆破参数智能设计

d. 松动爆破智能匹配设计

系统可以不断补充完善的标准设计数据库，每次设计能够智能匹配矿区岩层结构，准确确定孔网参数、加密孔的数量和位置、单耗等；

根据设计参数、设计区域的岩石性质、装药、连线等基本参数，建立基础数据库，并将爆破效果输入数据库。

随着爆破次数的增加，数据库数据量将逐渐完善。

根据数据库建立设计—效果之间的相互联系：先期将首先完成设计参数到爆破效果的单向关系。后期将根据统计结果反算效果与设计的对应关系。最后建立预期效果的智能设计系统。预计项目完成后，能够实现按需求效果的智能自动完成爆设计。

e. 爆破效果分析与预测

采用广义非线性系统理论建立预测模型。可以模拟爆堆形态曲线和爆破效果（如大块率），通过与真实数据的比较，可以验证模拟系统的准确性，精度不低于 80%，可为优化爆破设计提供参考依据。

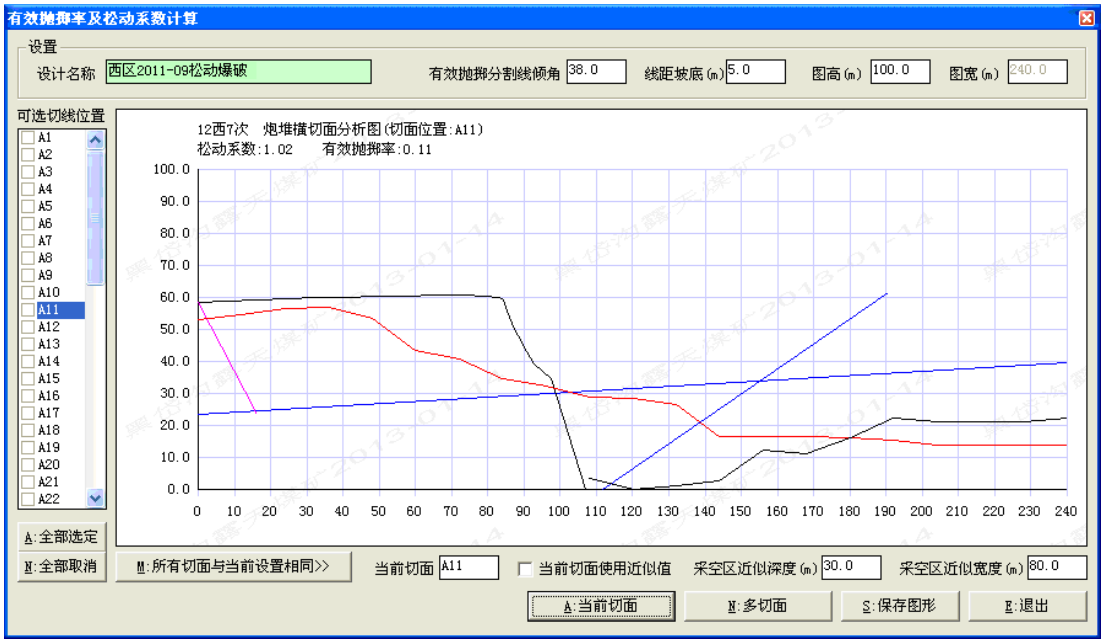


图 1-8 模拟效果预期图

e. 分析计算和设计图表的输出

系统对设计进行分析计算，将结果以数据表或图型文件的方式保存。设计结果以图/表方式输出（包括 Word、Excel、txt、jpg 等格式）输出图表用户可以自由定义。

主要输出图表包括：炮孔位置图、连线图、延时图、岩石移动方向图、孔迹图、孔深/孔长/超深/欠深图、单耗图、基本信息表、炸药火工品用量表、各排基本信息表、单孔详细信息表等。系统对设计进行分析统计，将统计结果以施工文档和施工图等形式输出，输出文档格式有（doc、xls、txt、jpg 等），输出的主要文件如表 1-1。

表 1-1 系统自动输出图表文档

类型	序号	名称
图	1	连线图
	2	等时线图
	3	连线延时方向图
	4	孔深/孔长/超深/欠深图
	5	单耗图
	6	岩石初始移动方向图
数据表	1	基本信息表
	2	炸药火工品用量表
	3	各排基本信息表
	4	单孔详细信息表
文档	1	基本信息

类型	序号	名称
	2	炸药火工品用量
	3	各排基本信息
	4	单孔详细信息
	5	爆破设计说明书



图 1-9 连线延时方向图

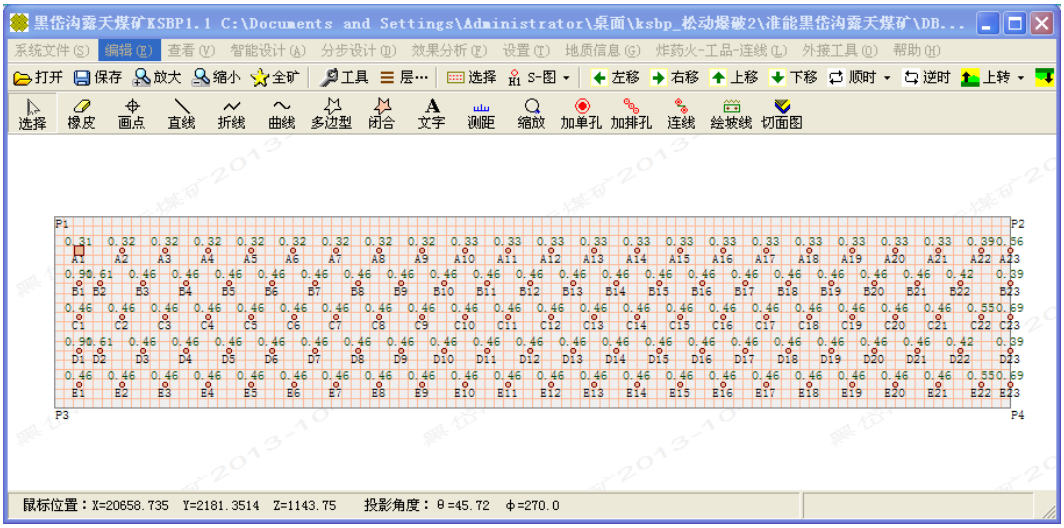


图 1-10 单孔单耗图

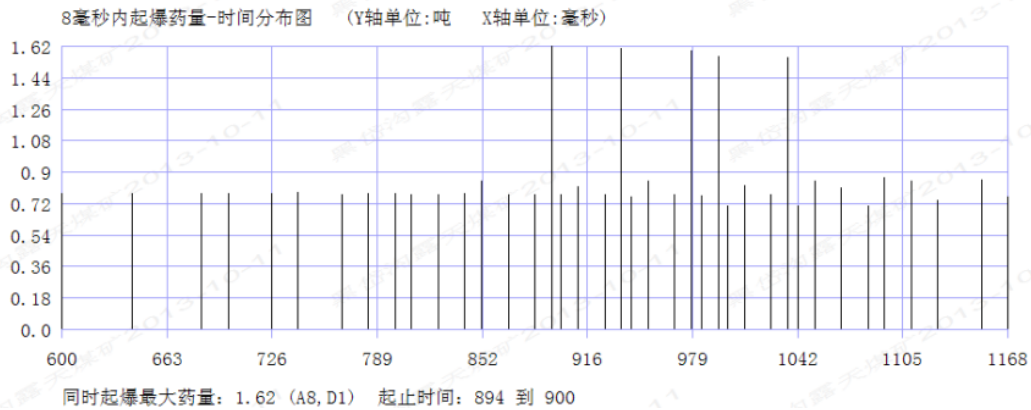
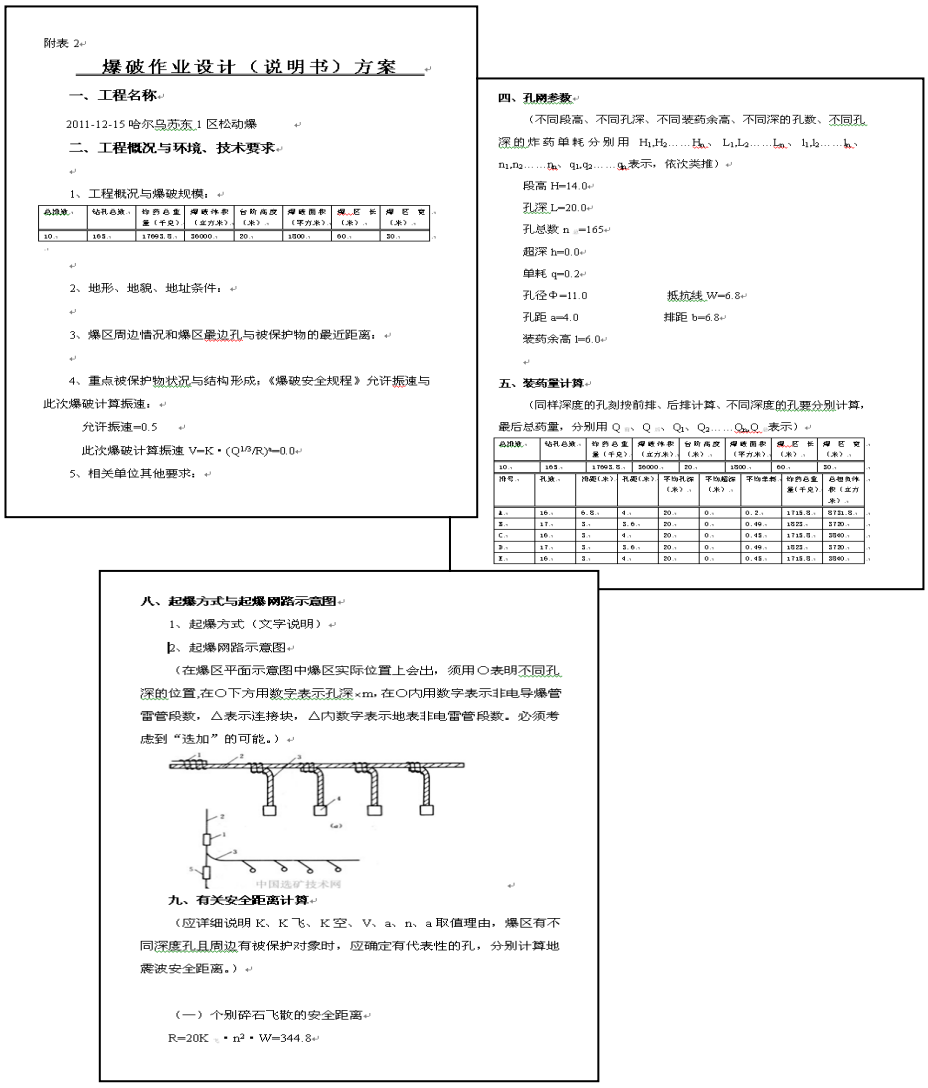


图 1-11 起爆药量-时间分布图



附表 2

爆破作业设计（说明书）方案

一、工程名称

2011-12-15 哈尔乌苏东 1 区松动爆

二、工程概况与环境、技术要求

1、工程概况与爆破规模：

总排数	钻孔总数	炸药总重量（千克）	爆破体积（立方米）	台阶高度（米）	爆破面积（平方米）	爆区长（米）	爆区宽（米）
10	165	17693.8	36000	20	1800	60	30

2、地形、地貌、地址条件：

3、爆区周边情况和爆区最边孔与被保护物的最近距离：

4、重点被保护物状况与结构形成：《爆破安全规程》允许振速与此次爆破计算振速：

允许振速=0.5

此次爆破计算振速 $V=K\cdot(Q^{1/3}/R)^{\alpha}=0.0$

5、相关单位其他要求：

四、孔网参数

（不同段高、不同孔深、不同装药余高、不同深的孔数、不同孔深的炸药单耗分别用 $H_1,H_2\cdots\cdots H_n$、$L_1,L_2\cdots\cdots L_n$、$l_1,l_2\cdots\cdots l_n$、$n_1,n_2\cdots\cdots n_n$、$q_1,q_2\cdots\cdots q_n$表示，依次类推）

段高 H=14.0

孔深 L=20.0

孔总数 $n_{总}$=165

超深 h=0.0

单耗 q=0.2

孔径Φ=11.0　　抵抗线 W=6.8

孔距 a=4.0　　排距 b=6.8

装药余高 l=6.0

五、装药量计算

（同样深度的孔刻按前排、后排计算、不同深度的孔要分别计算，最后总药量，分别用 $Q_{总}$、$Q_{一}$、Q_1、$Q_2\cdots\cdots Q_n$,Q 表示）

总排数	钻孔总数	炸药总重量（千克）	爆破体积（立方米）	台阶高度（米）	爆破面积（平方米）	爆区长（米）	爆区宽（米）
10	165	17693.8	36000	20	1800	60	30

排号	孔数	沟渠(米)	孔距(米)	平均孔深（米）	平均超深（米）	平均单耗	炸药总量（千克）	总堵塞体积（立方米）
A	16	6.8	4	20	0	0.2	1718.8	8721.8
B	17	3	3.6	20	0	0.49	1823	3720
C	16	3	4	20	0	0.48	1718.8	3840
D	17	3	3.6	20	0	0.49	1823	3720
E	16	3	4	20	0	0.48	1718.8	3840

八、起爆方式与起爆网路示意图

1、起爆方式（文字说明）

2、起爆网路示意图

（在爆区平面示意图中爆区实际位置上会出，须用○表明不同孔深的位置,在○下方用数字表示孔深<m，在○内用数字表示非电导爆管雷管段数，△表示连接块，△内数字表示地表非电雷管段数。必须考虑到“连加”的可能。）

中国选矿技术网

九、有关安全距离计算

（应详细说明 K、K飞、K空、V、a、n、a 取值理由，爆区有不同深度孔且周边有被保护对象时，应确定有代表性的孔，分别计算地震波安全距离。）

（一）个别碎石飞散的安全距离

$R=20K_{飞}\cdot n^2\cdot W=344.8$

图 1-12 自动生成的施工文档

（3）论文-基于加权聚类分析的抛掷爆破参数智能设计方法

露天矿进行抛掷爆破之后，统计每次抛掷爆破爆区几何形态指标、岩体可爆性指标、抛掷爆破参数指标以及抛掷爆破效果综合评价指标，并进行抛掷爆破效果综合评价，根据评价结果将统计数据加入抛掷爆破样本库及理想抛掷爆破样本库。智能设计流程见图 1-13。

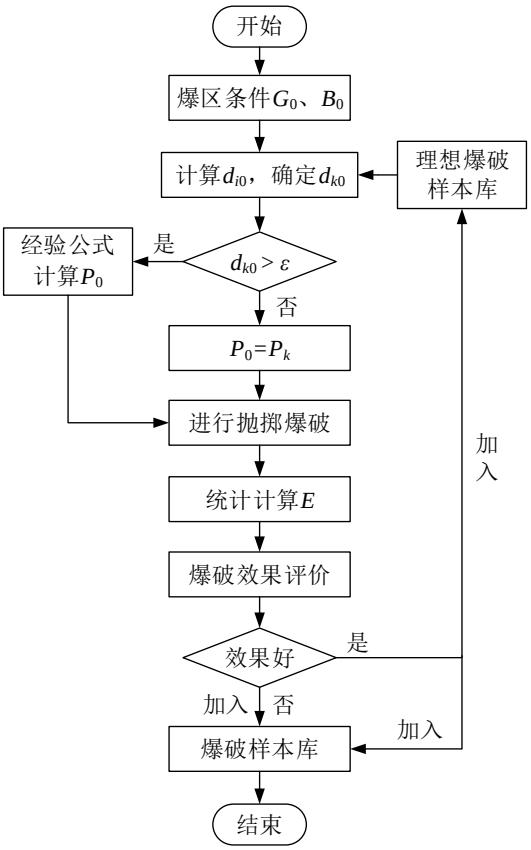


图 1-13 抛掷爆破智能设计流程

（二）露天矿智能钻孔技术与应用案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿智能钻孔技术与应用案例

（2）案例简介

针对传统钻孔的困境，结合发明专利《一种抛掷爆破智能施工方法》、《一种露天矿台阶爆破布孔方法》等，介绍露天矿智能钻孔系统，包括无人驾驶钻机、钻进过程智能感知与自适应控制等。同时将追求钻孔参数的极致优化，体现精益求精的工匠精神融入课程，实现思政教育有机渗透。

2.案例实际应用效果简介

《爆破工程 B》第二章凿岩机械主要学习气动凿岩机、液压凿岩机、潜孔钻机、牙轮钻机等内容，使学生了解常用钻孔方法，掌握破岩机理，掌握牙轮钻机破岩机理，了解其他钻机机械特点。露天矿智能钻孔技术与应用案例是对相关内容的补充，通过相关案例的学习，让学生对智能钻孔相关内容有更深入的了解。

3.支撑材料

（1）智能钻孔-露天矿智能无人开采装备综述（来源矿山大课堂）

穿孔：穿孔是露天矿开采的第一步，其目的是在矿岩中钻出一定深度和直径的炮孔，为后续爆破作业提供条件。穿孔设备主要包括牙轮钻机和浅孔钻机，这些设备通过精确的导航和定位系统，实现钻孔位置的精确定位和孔口深度的精确控制。

智能穿孔设备是露天矿开采工艺中的核心装备之一。其智能化主要体现在以下几个方面：

精确定位与深度控制：利用卫星定位和激光测距技术，实现钻孔位置的精确化定位和钻孔深度的精确控制。这不仅提高了穿孔作业的精度，还为后续爆破作业提供了有力保障。

液压系统自动调节与控制：通过智能化的液压系统，实现凿岩流程的自动化和辅助穿孔作业系统的优化。这不仅提高了穿孔效率，还降低了操作人员的劳动强度。

自适应故障诊断与远程通讯：智能检测设备对钻机的主要工作过程和设备的主要运行状态进行实时监控，及时发现并处理故障。同时，通过远程通讯技术，实现数据的实时传输和远程监控，提高了设备的可靠性和维护效率。

（2）授权发明专利：肖双双，马力．一种抛掷爆破智能施工方法，2018.08.14，中国，ZL201710456625.2

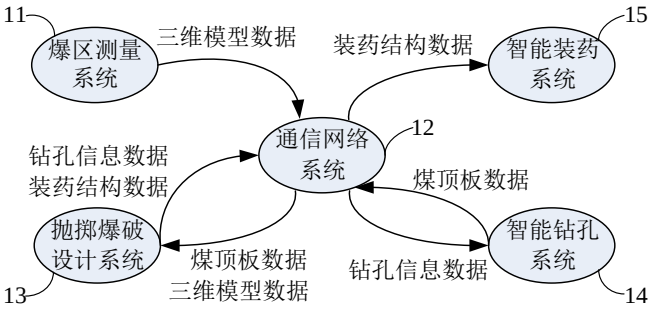


图 2-1 爆破智能施工流程

（3）远程操控牙轮钻机-来源准能集团智能化建设成果视频集锦

黑岱沟露天煤矿采用智能牙轮钻机，根据北斗导航定位精准寻孔、钻孔。



图 2-2 远程操控牙轮钻机



图 2-3 牙轮钻机远程操控

（4）炮孔智能测量机器人-来源准能集团黑岱沟露天煤矿

① 重点解决的痛点难点问题

深孔爆破是露天矿开采的重要环节，在露天矿的深孔爆破作业前，需要对炮孔深度以及孔内水深进行测量(验孔)，通过验孔作业确定装药类型和装药量，验孔对爆破效果可产生直接影响。

传统测量方式误差大，影响爆破效率。传统验孔作业通过皮尺进行人工测量，测量精度仅为厘米级，较大程度影响装药核算的准确性，导致爆破效率降低。

验孔作业环境恶劣且劳作强度大。验孔作业需在野外露天环境下进行，需克服严寒或酷暑等恶劣天气条件，且每次验孔作业需对上百个炮孔进行孔深和水深测量，恶劣环境下高强度工作对作业人员是巨大的挑战。

② 解决方案介绍

露天矿炮孔孔深水深测量机器人由 6 轴机械臂、北斗定位仪、控制器、运动底盘、孔深测量仪等组成，可实现炮孔定位、水深孔深自动测定等功能。

露天矿炮孔孔深水深测量机器人采用无人机自动拍照、图像拼接、图像识别技术，实现对拟定爆区内炮孔坐标标定，为机器人提供导航信息；采用自动导航规划及图像识别技术进行炮孔定位，并通过智能孔深测定装置实现炮孔孔深和孔内积水深度探测，提升测量精度至毫米级；采用无线通信技术，实时传输探测数据与装药数据，并通过智能识别与控制技术，实现炸药车自动精准装药作业，提升爆破效果并减少炸药浪费情况发生。



图 2-4 炮孔智能测量机器人

③ 应用推广情况及应用效果

2019 年 1 月起，露天矿炮孔孔深水深测量机器人在国能准能集团黑岱沟露天煤矿应用 3 台，累计测量 122469 个爆破孔。

应用前，采用传统人工方式测量孔深与水深，测量精度低，仅为厘米级，影响装药核算的准确性，存在炸药使用效率低问题；每次爆破作业的待验孔数量为上百个量级，重复劳作强度高。应用后，孔深与水深测量精度提高至毫米级，提升了装药核算的准确性，可节约炸药用量 1%-3%，以年爆破一亿吨矿岩估算，每吨矿岩的炸药单耗约 0.1 公斤/吨，每年可节约 100 吨至 300 吨炸药，炸药价格按 1 万元/吨计算，每年可节省炸药费用 100 万元至 300 万元；高强度的验孔作业可由机器人自动完成，降低了工作人员劳动强度。

（三）露天矿爆破振动智能控制案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破振动智能控制案例

（2）案例简介

露天煤矿爆破具有一次装药量大、爆破振动效应显著等特点。为降低爆破对未爆岩体的影响，保持高边坡边坡稳定及作业安全，需要研究爆破振动控制技术。通常采用爆破振动记录仪检测地表垂直、径向和横向三向爆破质点振动速度，分析爆破振动衰减规律，得出爆区周围振动场的分布，以便根据国家《爆破安全规程》（GB6722-2014）的爆破振动速度允许值，合理调整装药量、爆破参数、连线方式、延时间隔和爆破规模等。给出降低爆破振动的方案。本案例主要包括了爆破振动监测方案、监测结果分析以及爆破振动控制方法等内容，融入环保与安全理念。

2.案例实际应用效果简介

《爆破工程 B》第十章爆破安全主要学习爆破振动、爆破飞石、爆破冲击波，重点是爆破的振动的估算及降振措施，使学生了解爆破的同时必然伴随着危害效应，重点掌握爆破振动的估算，如何降低爆破振动效应，掌握爆破飞石产生的原因及对策，掌握爆破冲击波特性

及衰减规律。露天矿爆破振动控制案例库是对相关内容的补充，通过相关案例的学习，让学生对爆破振动监测方案、监测结果分析以及爆破振动控制方法等内容有更深入的了解。

3.支撑材料

（1）爆破振动检测原理

爆破振动波传至拾振器时，使拾振器产生感生电压输出，感生电压信号超过预设的触发电平值时，爆破振动记录仪开始自动地记录传感器输入的振动信号，并将振动波储存在仪器内，关闭电源后也不会丢失。野外检测结束后，通过计算机中专用软件与爆破振动记录仪连接、通讯，可以读取并分析爆破振动波。爆破振动检测仪基本工作原理如图 2-1 所示。

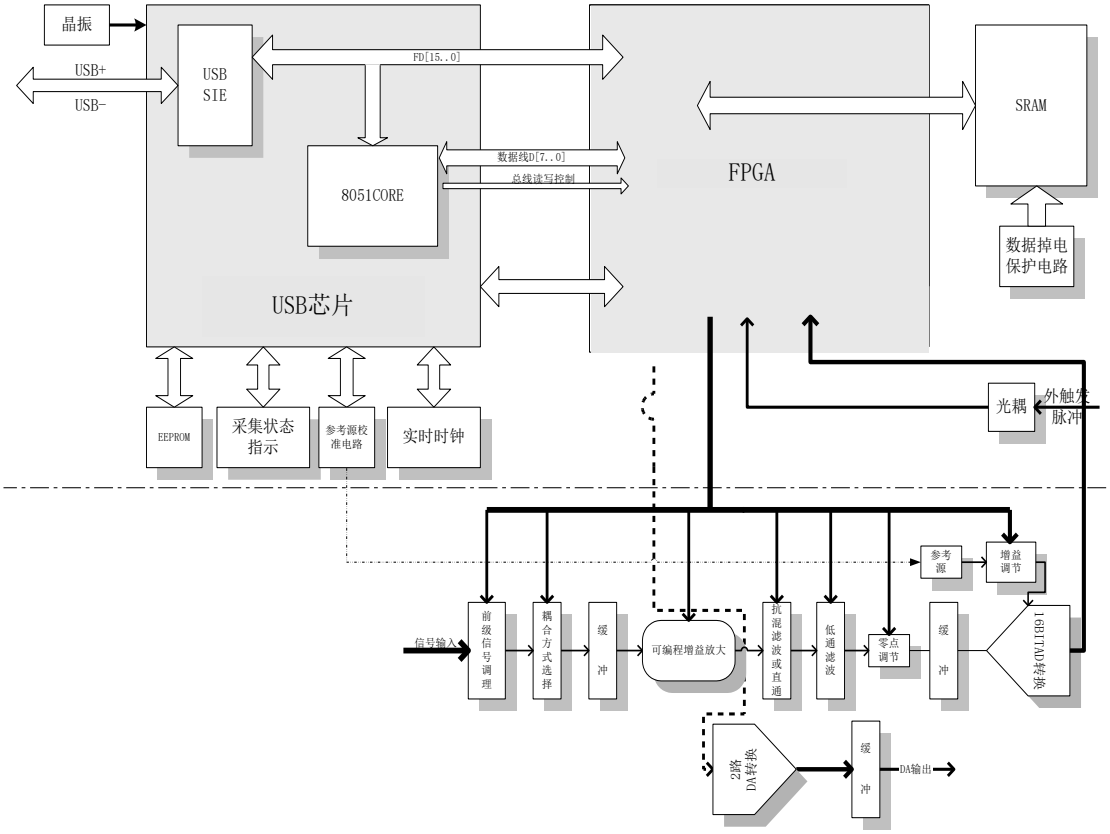


图 2-1　爆破振动检测仪基本工作原理图

（2）测点布置原则

a. 测点布置在距离振源不同距离的房屋周边基岩和基础上，尽量测得在保护房屋附近的爆破振动质点速度；

b. 振源距选煤场和排土场较远时，则将测振点布置在靠近爆破振源一侧的基岩上或坡脚处；

c. 对于已形成的高台阶尽量使测点布置在台阶边缘，并考虑与爆源不在同一高程的多个台阶上，分析地形高差对爆破振动的影响。

对于覆土较厚的区域，爆破振动检测点只能布置在碾压密实的路面上，地表的振动基本能反映地表土层的真实振动情况，故将传感器布置在地表能测出地基土层的爆破振动速度。所有传感器用快干石膏粉牢固粘结在地表。

爆破振动检测系统及爆破振动测点布置分别见图 2-2、图 2-3。

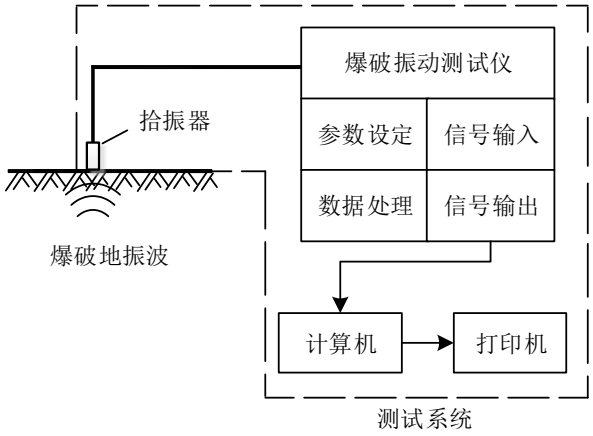


图 2-2　爆破振动检测系统框图

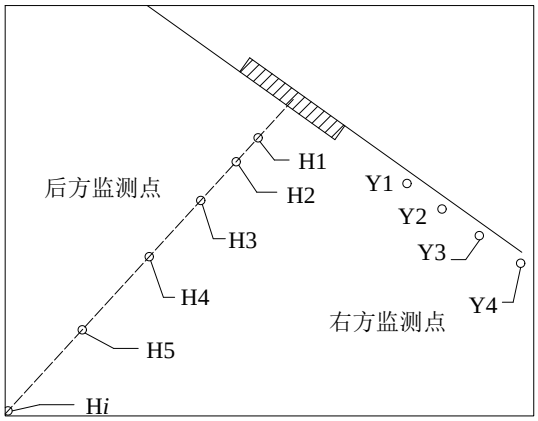


图 2-3　现场爆破振动测点布置示意图



图 2-4　仪器工作示意图

采用爆破振动测试系统对多场爆破进行现场监测，获得不同爆源条件下爆破振动数据，探索地质地形条件、爆源对爆破振动效应的影响。

对比分析相同爆源条件下不同高程、不同传播距离处各测点的爆破振动数据，探索高程、传播距离对爆破振动效应的影响；对比分析不同爆源条件下相同位置测点的爆破振动数据，探索爆源对爆破振动效应的影响。

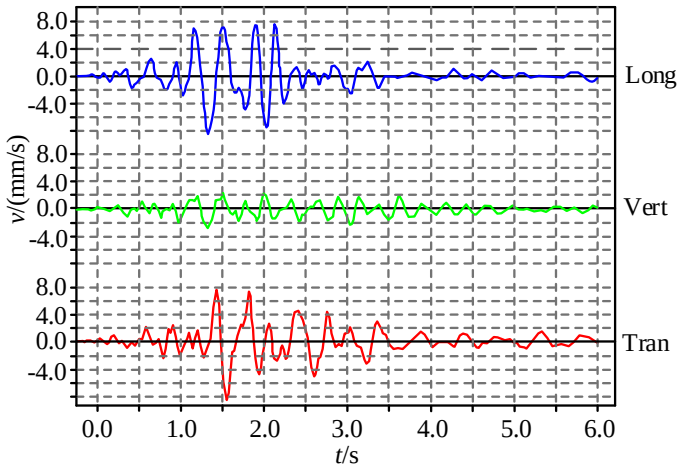


图 2-5 典型爆破震动波形图

（3）爆破振动测试结果

在某露天矿上山道路现场进行了松动爆破振动测试，测试布置了 4 个监测点，分别为 A、B、C、D，均获得了有效数据。松动爆破振动监测测点布置及设备现场安装如图 2-6 所示。



（a）测点布置



（b）传感器固定



（c）测振仪

图 2-6 爆破振动现场监测

（4）爆破地震波分析

测试获得了各测点不同方向的最大振速曲线图以及最大振速、主振频率、持续时间等数据，分别如图 2-7、表 2-1 所示。

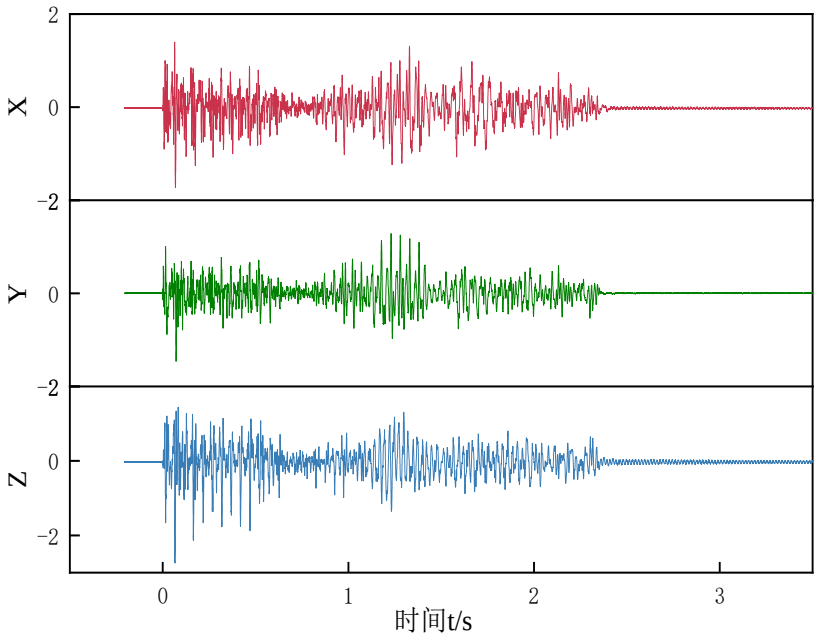


图 2-7　爆破振动测试典型波形图

表 2-1　爆破振动监测数据

测点	方向	最大振速（cm/s）	主振频率（Hz）	振动持续时间（s）
A	X	-1.726	19.836	2.345
	Y	-2.735	39.368	2.904
	Z	-1.462	59.204	2.354
B	X	-1.712	19.836	4.509
	Y	-1.389	61.035	5.739
	Z	-1.383	37.842	2.665
C	X	-0.377	19.836	5.641
	Y	-0.547	19.836	2.483
	Z	-0.513	19.531	2.604
D	X	-0.772	39.368	2.575
	Y	0.509	20.447	2.625
	Z	0.508	59.509	2.562

由表 2-1 可知，各测点因爆心距离等不同，最大振速变化较大，最大振速在 0.377~2.735cm/s 之间，平均为 1.136cm/s，距离爆区越近振动速度越大，振动速度最大值一般出现在 0.1~0.3s 时段内。各监测点 X、Y、Z 三个方向爆破振动主振频率均在 19~62Hz 之间，主要集中在 19~20Hz 之间，振动主频最大值为 61.035Hz，出现在 B 测点 Y 方向。松动爆破振动频率范围较窄，主振频率较低，基本没有高频成分，属于低频振动。根据图 6-8 及表 6-2 可以看出，各监测点振动持续时间在 2~6s 之间。

（5）爆破振动控制方法

为有效控制爆破振动有害效应，应严格控制微差起爆时间，并尽量降低单段起爆药量，同时采取以下技术措施：

① 采用微差爆破技术，通过控制起爆时间，实现逐孔起爆，使爆破地震波及应力波叠加，改善爆破效果的同时控制爆破振动。

② 灵活控制最小抵抗线方向。通常最小抵抗线方向上的爆破振动较小，反向最大，通过调整自由面方向及最小抵抗线方向，使保护构筑物等位于最小抵抗线方向的侧向。

③ 增加装药的分散性和临空面，可减小爆破振动速度公式 1 的 k 与 a 值，进而降低爆破振动速度。

④ 爆破过程中进行爆破振动监测，利用监测数据分析振动强度及其影响因素，指导后续爆破作业。

⑤ 采用不耦合装药，利用炸药与孔壁间的孔隙缓冲爆破能量，以降低爆破振动。

⑥ 必要时采用分段装药，或者分区分段进行爆破作业。

（四）露天矿爆破效果智能评估案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破效果智能评估案例

（2）案例简介

引入以“三维激光扫描”、“无人机摄影测量”和“人工智能图像识别”为核心的智能评估技术，实现爆破效果从定性描述到定量分析的革命性变革。

2.案例实际应用效果简介

培养学生数据驱动思维，将技术创新与经济效益、安全环保紧密结合，全方位塑造学生符合新时代要求的工程价值观。

3.支撑材料

（1）基于 GRNN 的抛掷爆破爆堆形态预测模型

抛掷爆破爆堆形态影响扩展平台量、辅助剥离量，影响抛掷爆破爆堆总剥离成本，预测抛掷爆破爆堆形态可以作为判断抛掷爆破设计是否合理的重要依据，并能够指导改善抛掷爆破效果。此外，根据抛掷爆破爆堆形态可以计算有效抛掷率、爆堆松散系数，它们是评价爆破效果最重要的指标，准确确定这两个参数可以指导露天矿制定生产计划，充分发挥拉斗铲的生产能力，保证露天煤矿生产的持续稳定。

①抛掷爆破效果影响因素分析

根据抛掷爆破爆堆形成过程可知，影响抛掷爆破效果的因素主要包括工程地质条件、施工质量及爆破技术条件三个方面。其中，工程地质条件主要包括岩体节理裂隙发育程度、结构面产状、岩石物理力学性质、煤层厚度等。当岩体的裂隙与自由面垂直时，爆生气体容易过早逸散，降低爆破能量的利用率，抛掷爆破效果一般较差；当裂隙与自由面平行时，相邻

炮孔间的相互作用较大，抛掷爆破效果一般较好。在其他条件不变的情况下，岩石的抛掷距离随着岩石密度的降低而增大，随着岩石弹性模量的降低而降低。而煤层厚度影响抛掷岩石飞行时间，相同条件下，煤层厚度越大，岩石飞行越远，抛掷爆破爆堆越宽。

施工质量主要包括钻孔、装药、填塞、连线等环节的施工质量。施工质量直接影响孔距、排距、装药结构等爆破参数，影响炸药在炮孔中的分布情况及爆破延时，进而影响抛掷爆破质量，甚至影响爆破安全。

爆破技术条件主要包括孔网参数、装药结构、起爆方式、延时、炸药单耗、炸药特性等。如底盘抵抗线偏小容易产生飞石，偏大则岩石抵抗爆破作用的阻力大，容易导致根底。装药结构、起爆药包位置直接影响爆轰波传播方向、爆炸应力波及爆生气体的作用时间、炸药能量的利用率。在一定范围内，增加炸药单耗可以提高有效抛掷率，改善抛掷爆破效果，但炸药单耗也不宜过大。炸药性质影响鼓包运动形态及运动速度，进而影响抛掷岩石的堆积形态。此外，抛掷量和抛掷爆破台阶高度与采掘带宽度之比存在线性关系，即抛掷爆破台阶高度与采掘带宽度之比增大时，有效抛掷量增加，且增大抛掷爆破台阶高度可提高钻孔利用率，增大抛掷距离，改善爆破效果。

②预测样本库统计方法

抛掷爆破后，利用三维激光扫描仪扫描爆堆，以一定间隔作爆堆剖面图，得到爆堆曲线。以通过采空区最低点的水平线为 x 轴，通过下一次抛掷爆破高台阶坡顶点的垂直线为 y 轴，建立平面直角坐标系。从 x=0 开始，以 10m 为间距在爆堆曲线上取点，获得各点高度值 h_1、h_2、…、h_m，如图 4-1 示：

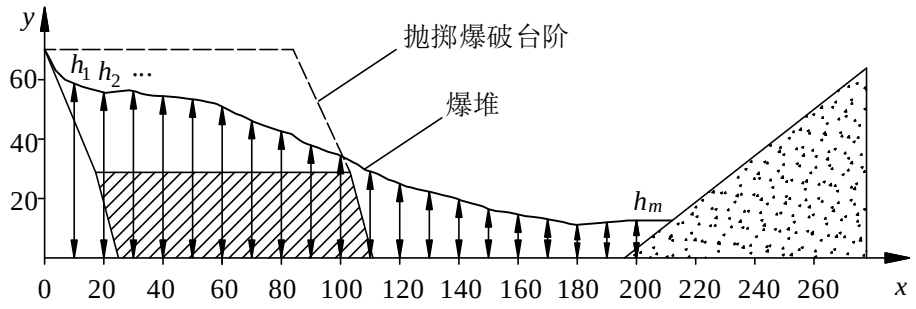


图 0-1 爆堆曲线数据统计示意图

对于特定的露天矿，抛掷爆破台阶的工程地质条件变化较小；工艺成熟应用之后，施工质量也基本不变；为了方便施工，通常采用相同的孔径、炮孔倾角、装药结构、采掘带宽度和炸药，通过调整孔距、排距等参数改善抛掷爆破效果。因此，本文选取抛掷爆破台阶高度、底盘抵抗线、煤层厚度、炸药单耗、孔距、排距等 6 个指标作为抛掷爆破爆堆预测指标。每个样本包括 6 个预测指标和 m 个爆堆曲线高度指标。

③ 预测模型的建立

影响抛掷爆破爆堆形态的因素众多，采用传统的预测采用灰色预测、时间序列等方法预测效果并不理想。文中选择广义回归神经网络建立抛掷爆破爆堆形态预测模型。

广义回归神经网络（GRNN）是一种基于非线性理论的神经网络模型，它以Nadaraya-Watson非参数核回归分析为基础，以样本数据为后验条件，执行Parzen非参数估计，不需设定特定的模型，仅需初始化核函数中的光滑因子。与BP神经网络相比，其具有较高的预测精度及稳定性，并具有收敛速度快、计算量小、样本较少的情况下也能取得较好的预测效果等优点，在岩土工程、交通运输等领域广泛应用。

选取抛掷爆破台阶高度等六个指标作为广义回归神经网络的网络输入，以抛掷爆破爆堆形态作为网络的输出，构建抛掷爆破爆堆形态预测模型，如图4-2所示。

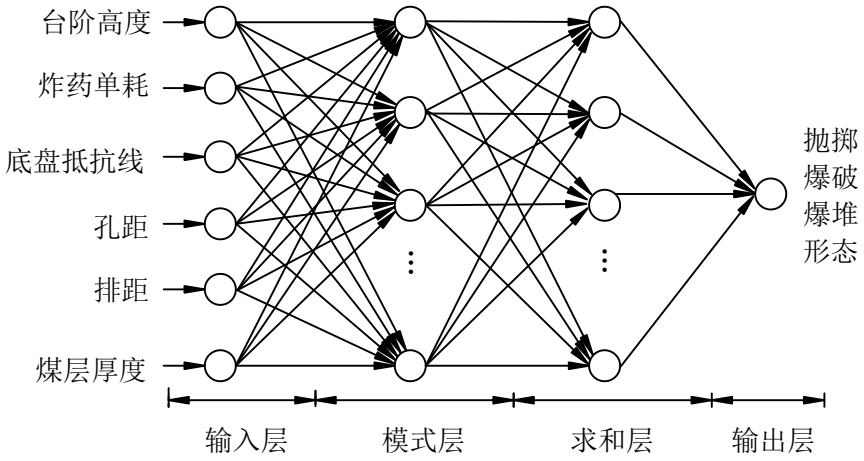


图4-2 抛掷爆破爆堆形态预测模型

图4-2中，输入层神经元数目 m 等于输入向量的维数，本预测模型中 m=6，输入变量直接传递至模式层。

④ 激光扫描仪扫描

在抛掷爆破前后，采用激光扫描仪扫描抛掷爆破台阶及爆堆，获得相关的扫描数据，如图4-3所示。利用扫描数据计算可得爆区的有效抛掷率为31.2%，进一步证明了此次抛掷爆破效果良好。

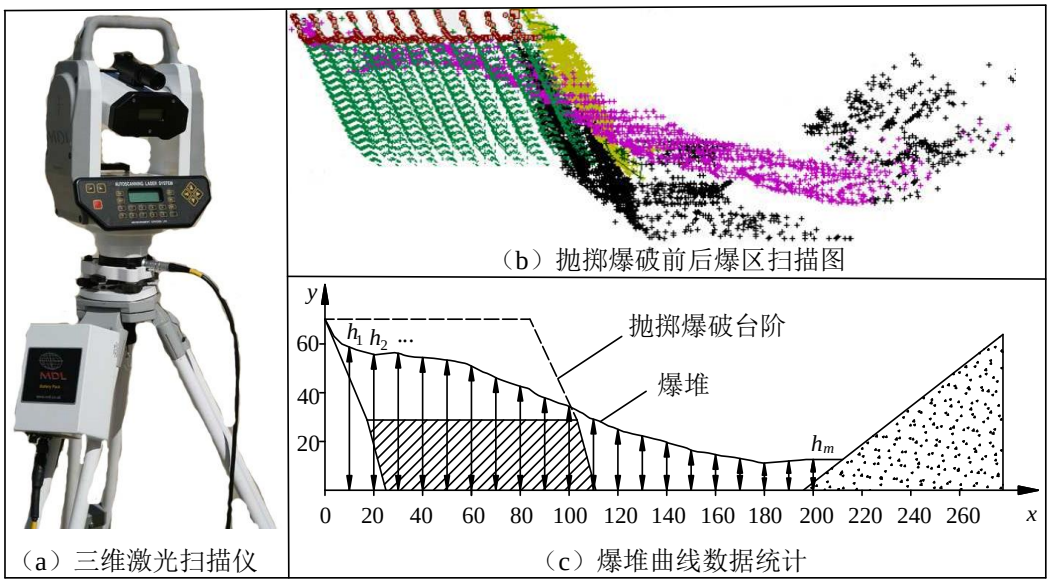


图4-3 抛掷爆破前后爆区三维扫描及数据统计

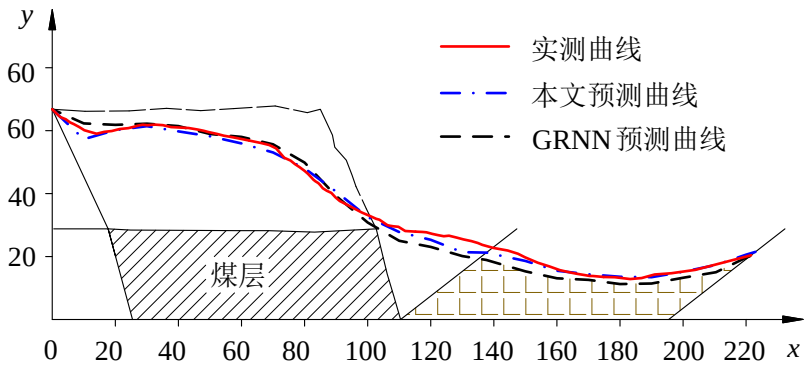


图 4-4 抛掷爆破爆堆形态预测结果

（2）爆破效果预测模型

①建立爆破效果预测样本库

通过统计大量的爆破效果预测样本，利用数理统计的方法，分析得到爆破效果影响因素与爆破效果评价指标之间的关系，从而根据这种关系预测新设计的爆破效果。因此需要建立爆破效果样本库，样本库包含的样本越多，涵盖的信息就越全，爆破效果预测的就越准确。

爆破效果预测样本库的每个样本包含影响爆破效果的影响因素及评价爆破效果的评价指标，前者为自变量，称为影响因子；后者为因变量，称为评价因子。

②自变量贡献值的计算与判别

假设函数 $f=g(X_1,X_2,...,X_n)$ 的 n 个自变量均为有限域[6-8]。X_n 表示炸药单耗、底盘抵抗线等影响因子，$n=8p-1$。设 X_i 的取值范围为 $\left[\min X_{ij},\max X_{ij}\right]$（$i=1,2,...,n$，$j=1,2,...,m$），$f$ 的值也为有限域 $\left[\min f,\max f\right]$。令 f^1，f^2…，f^k 分别表示根底面积、根底高度等评价因子，$k=1,2,...,9$。

将影响因子 X_i 均分 N 个区间，有序列：

$$X_i(0)=\min X_{ij}\quad（i=1,2,...,n，\ j=1,2,...,m）$$

$$X_i(1)=X_i(0)+\Delta X_i$$

…

$$X_i(N)=X_i(0)+N\Delta X_i$$

式中：$\Delta X_i=(\max X_{ij}-\min X_{ij})/N$。

X_i 的第 l 分段范围为 $[X_i(0)+(l-1)\Delta X_i,X_i(0)+l\Delta X_i]$（$l=1,2,...,N$）。

搜索 X_i 在第 l 分段范围内的所有样本，如果样本数 $K<K'$，则认为该区间为无效区间；否则，若 $K\geq K'$，则认为该区间为有效区间。其中，K' 为设置的默认数。最终可以筛选出 L 个有效区间。

对 X_i 的第 l 分段区间内的所有样本的 f 值取离差：

$$\eta_{il}=\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}\left|f_i-\bar{f}_i\right|$$

式中，K 为 X_i 的第 l 区间内样本的个数；f_i 为 X_i 第 l 区间内样本因变量的 f 值，$i=1,2,...,K$；$\overline{f_i}$ 为 X_i 第 l 区间内样本因变量的 f 的平均值。

则 X_i 对 f 的贡献值为

$$C_i=\frac{1}{L}\sum_{l=1}^{L}\eta_{il}$$

X_i 对 f 的贡献值 C_i 越小，说明固定 X_i，f 的波动越小，亦即 X_i 对 f 的影响越大。因此，可以根据各参数对 f 的贡献值的大小可以确定影响各评价因子的主要影响因子。

③ 基于聚类分析的样本筛选

样本筛选是指从样本库中选出与待预测样本相似的样本。对于待预测样本，假设其各影响因子分别为：$X_1',X_2',...,X_n'$。利用聚类分析中的划分法的思想进行样本筛选，具体步骤如下：

（1）根据贡献值最小的影响因子，选取样本。假设最主要的影响因子为 X_i，则利用式选取与 X_i' 最近的 m_1 个样本作为初始样本。其中，m_1 为给定值；

$$\varepsilon_j=\left|X_i'-X_j\right|\quad(j=1,2,...,m)$$

（2）在 m_1 个初始样本中，根据第二影响因子（假设为 X_j），选取距离 X_j' 最近的 m_2 个样本；

（3）根据全部主要影响因子选取最终样本。当样本数较少时，可以当样本数达到一定数量结束筛选。

④运用回归分析预测爆破效果

对选择的最终样本数据做线性回归，预测根底面积、根底高度等九个评价因子。

分析最终样本中的每个主要影响因子 X_{ij} 与各评价因子 f_j 得离散点 (X_{ij},f_j)，其中，i 为影响因子编号，j 为样本编号。对这些离散点做一元线性回归，得回归方程。根据回归方程及 X' 可以得到一个 f'，将所有 f' 累加并取平均值即可得到预测结果。

（五）露天矿穿爆粉尘智能防控案例库

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿穿爆粉尘智能防控案例库

（2）案例简介

露天矿采场暴露在自然环境中、空间大、生产密集、生产强度大，其产尘点多、粉尘产生量大、扩散范围广，不仅严重污染矿区空气，易造成职工尘肺病等职业病，加速设备磨损，降低露天矿采场能见度，恶化工作环境，甚至引起粉尘爆炸，影响露天矿生产效率和生产安全，污染露天矿周边生态环境，影响矿区周边居民生产生活和身体健康。因此，露天矿粉尘防治工作十分重要。国内在露天矿粉尘防治方面进行了大量深入的研究和实践，粉尘防治工作取得了较为显著的成效，但露天矿各生产环节粉尘至今仍难以彻底遏制，粉尘职业危害防

控形势依然十分严峻。基于国家自然科学基金青年科学基金项目、教育部重点实验室开放课题等，分析穿孔、爆破产尘机理与控制技术，突出绿色开采与环境保护的课程思政元素，使学生深刻理解“绿水青山就是金山银山”的绿色发展理念，增强通过科技创新推动行业绿色转型的信心与使命感。

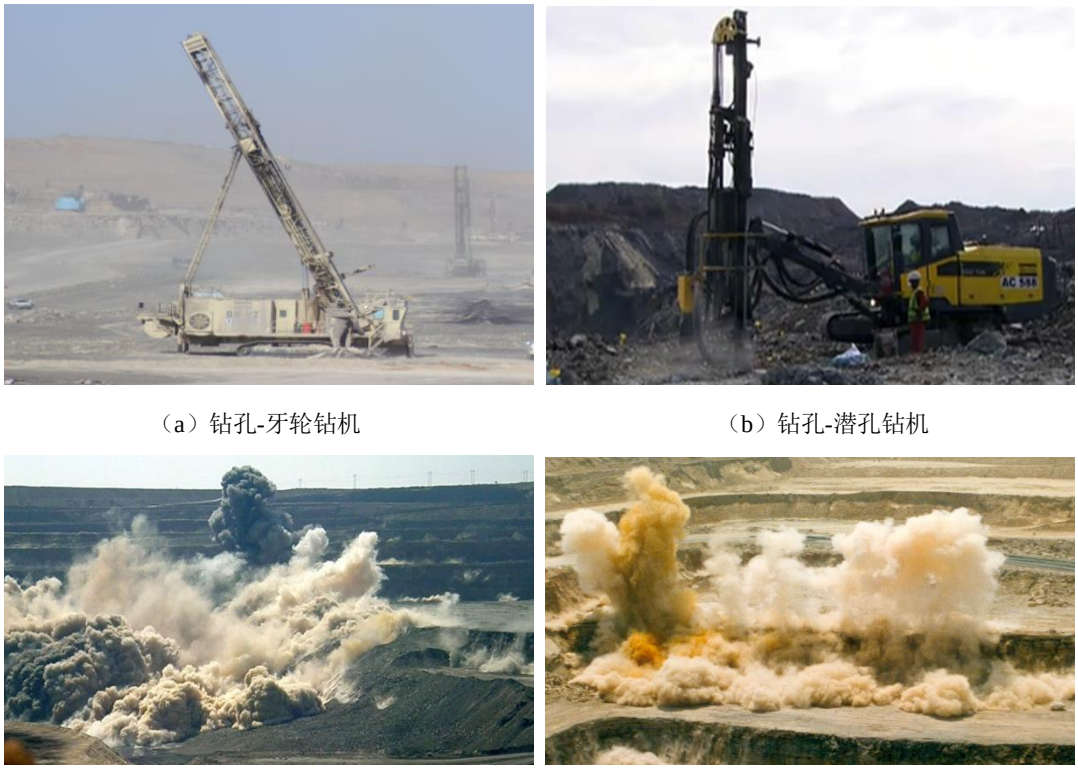
2.案例实际应用效果简介

通过本案例的学习，让学生对目前国内露天矿穿爆粉尘防控的研究进展有深入了解，培养学生环境保护、职业健康的理念。

3.支撑材料

（1）论文：我国露天矿粉尘防控理论技术研究进展与展望

① 露天矿产尘机理及粉尘运移规律研究现状



（a）钻孔-牙轮钻机　（b）钻孔-潜孔钻机

（c）爆破-抛掷爆破　（d）爆破-松动爆破

图 5-1　露天矿穿爆环节产尘

② 粉尘浓度预测及监测预警研究现状

表 5-1 粉尘浓度预测方法及其特点

预测方法	提出/应用者	年份	应用领域	主要特点
灰色理论 GM 模型	陈日辉	2000	矿井粉尘浓度预测	加入滑动平均处理原始数据，预测结果相对误差较小
基于人工神经网络的粉尘模拟和预测	李明	2005	粉尘影响因素与尘肺病发病率之间的剂量-反应关系分析	非线性预测方法，有较强的自适应能力，但方法单一，鲁棒性较差
滑动相关、集合回归	毛炜峰	2007	盆地沙尘多发季节沙	改进常规回归分析方法，结合滑动相关

预测方法	提出/应用者	年份	应用领域	主要特点
法组合			尘日数预测	以及集合回归方法建立了超级集合模型
统计回归分析法、寿命表法	韩磊	2016	煤工尘肺未来发病情况预测	半定量法预测，预测结果的准确度较低
GM-GRNN 组合模型	王永斌	2016	尘肺病发病人数预测	GM（1，1）-GRNN 组合模型的拟合及预测效果优于 GM（1，1）模型和 BPNN 模型。
贝叶斯决策分析技术	沈阳	2018	高速公路隧道掘进工粉尘累计暴露情况预测	在风险概率的基础上进行的定量评估预测，提高粉尘长期累计暴露评估的客观性
ARIMA-GRNN 组合模型	卞子龙	2019	尘肺病预测	GRNN 广义神经网络回归模型具有很强的非线性映射能力，预测精度高，稳定性较好，适用于非线性和不稳定数据
WAWBO-FGM 组合模型	刘杰	2021	废气中烟（粉）尘排放浓度变化预测	经 WAWBO 算法优化过后的 FGM 模型预测精度更高
差分自回归移动平均预测	王月红	2021	矿井粉尘浓度预测	适用于非平稳数据的处理
随机森林-马尔科夫模型	王雅宁	2021	露天矿粉尘浓度预测	经马尔科夫修正后预测精度较高，误差较小

③ 露天矿粉尘防治技术研究现状

④ 露天矿粉尘防治发展趋势和研究展望

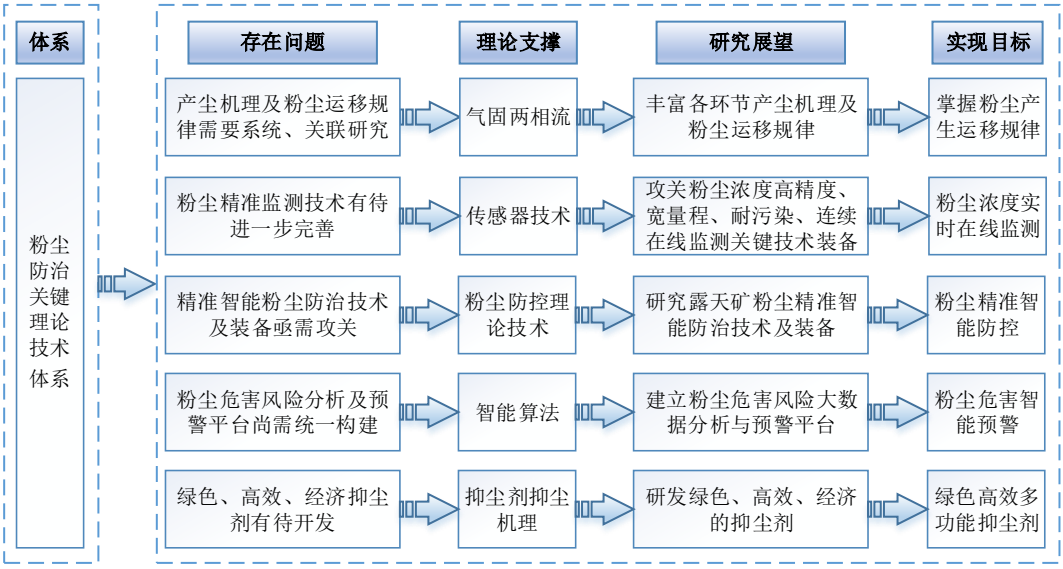


图 5-2　露天矿粉尘防治关键理论技术体系

（2）露天煤矿采—爆—运粉尘源头一体化智能控制关键技术

辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院

① 创新突破

采装、爆破、运输是露天煤矿最重要的产尘来源，从源头实现采—爆—运粉尘一体化智能控制是露天煤矿生态文明建设的重要途径。本成果基于化学官能团特征构建了粉尘亲水性

快速辨识成套方法；建立了采—爆—运粉尘扩散运移大数据智能分析模型，为一体化源头智能控制提供了理论判据；首次提出了从物料本质上改善粉尘疏水性的抑尘剂复配方法；创新性提出了原岩抑尘剂注水 + 大功率雾炮的采装减尘技术、爆破毯吸能 + 吸尘棉过滤的爆破防尘技术、重载卡车承重道路夏季高分子凝并保湿抑尘剂与冬季防冻型凝并保湿抑尘剂制备及规模化生产关键技术；能够为露天煤矿采——爆运重点粉尘源头一体化智能控制提供完备的理论、技术及工艺支撑与保障。

② 科研成果

获煤炭科技进步奖三等奖 1 项；中国国际高新技术成果交易会优秀产品奖证书 1 项；授权发明专利 10 余项。

③ 工程应用

已在新疆大南湖二矿、山西安家岭露天矿、内蒙古霍林河煤矿等 10 余个大型露天煤矿推广应用。

④ 行业影响

创新性成果推动了露天煤矿生态文明及绿色矿山建设。为露天煤矿年均创造产值 1.6 亿元，节约投资 2.5 亿元，新增税收 7500 万元，环境效益尤为显著，应用情景广阔。

（3）论文：“双碳”视角下我国露天煤矿的绿色可持续发展

（4）国家自然科学基金青年科学基金项目-露天矿高台阶抛掷爆破粉尘精准控制机理研究

① 爆破产尘机理

露天矿台阶爆破过程中，爆炸应力波与爆生气体膨胀作用使岩石破碎，瞬间产生高数米甚至数十米、浓度极高的粉尘颗粒。一般认为露天矿台阶爆破产生的粉尘主要集中在炮孔孔口、爆区临空面（图 5-3）及爆区向前推移中的裂缝 3 个位置。目前，国内学者多利用气固两相流理论、数值模拟及相似模型试验等分析爆破粉尘颗粒受力状态，揭示露天矿爆破起尘机理。例如，蒋仲安等分析了爆破烟尘源及其特征，建立了露天矿爆破烟尘粒子运动轨迹的数学模型，基于粒子系统对爆破烟尘云形状进行了模拟研究。林柏泉等采用高压气体模拟爆炸冲击波，利用纹影仪以及高速摄像机，研究了爆炸扬尘过程中粉尘颗粒的运动特征，分析了粉尘的运动轨迹及其水平、纵向速度，结果表明：粉尘颗粒的运动轨迹大致呈抛物线型，其上升过程中受到重力、气流曳引阻力等的作用，速度逐渐降低直至峰值高度，随后在重力作用下沉于管道底部。葛少成等以抚顺露天矿台阶松动爆破为工程背景，运用气固两相流及爆炸力学理论，采用 Fluent 软件数值模拟与现场测试相结合的方法，讨论了爆破粉尘不同时刻的颗粒轨迹，分析了爆破扬尘机理，并研究了粉尘质量浓度、粒径分布规律。结果表明：在爆破冲击运动阶段及蘑菇云形成阶段，大量的粉尘在爆破冲击动能的作用下冲入开放的大气空间，随后扩散阶段，粉尘在无风条件下运移速度很低，粒径为 60～100 μm 的粉尘沉降缓慢，粒径在 40 μm 以下粉尘自然沉降困难。

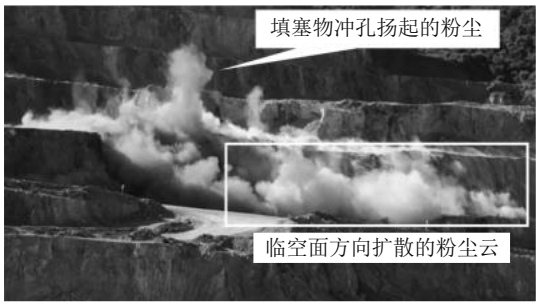


图 5-3　露天矿爆破粉尘来源

目前，国内学者分析了露天矿台阶爆破产尘集中位置及其起尘特征，研究了粉尘颗粒的受力状态、运动轨迹和速度特性，建立了粉尘颗粒的运动方程，揭示了粉尘颗粒运动特性，但尚需进一步分位置、分阶段探究爆破起尘机理，研究爆破参数、装药量、湿度等对产尘量的影响规律，明确影响产尘量的关键因素，提出爆破产尘量的计算方法。

② 爆破粉尘运移规律

露天矿爆破粉尘在爆炸冲击动能等作用下加速向外运移扩散，该过程大致可分为冲击运动、蘑菇云形成和扩散 3 个阶段，属于多相流理论中气固两相流的研究范畴，常用的研究方法包括理论分析、数值模拟、现场实测等。例如，张昕等运用箱模型云团扩散理论，建立了爆破云团扩散控制微分方程，探索了爆破烟尘扩散规律，得到了爆破云团半径、云团高度和空气卷吸量随时间的变化关系。杨红刚等对高斯模型进行了修正，构建了改进型高斯扩散模型，采用 Matlab GUI 工具箱对所构建的模型进行了可视化软件设计。所设计的软件可以实现粉尘源强计算、爆破粉尘浓度分布三维图绘制等功能。晋良海等采用分形几何理论建立了分形分布函数，以 Rosin-Rammler 分布函数为基准函数，通过激光粒度分布仪测量了粉尘样品分散度，求出了函数特征值，研究了露天梯段爆破粉尘体积分散度的空间分布规律和特征，结果表明：爆破粉尘分散度具有良好的分形特征，其分形维数为 2.110~2.251。纪大波等通过对爆破粉尘摄影及现场实测，建立了粉尘浓度与图像灰度的数学关系，进而揭示了粉尘浓度空间分布规律，结果表明：爆区正侧方 50 m 处起爆后 96 s 内平均粉尘浓度为 1 602 mg/m^3，粉尘浓度与粉尘图像灰度的比例系数为 9.117 mg/m^3。

露天矿爆破粉尘运移扩散受采场风流、温度等诸多因素影响。采场风流结构与露天矿采场结构、采场尺寸、风速、风向、地形、地貌等因素有关。杜翠凤等运用现场测试和数值模拟相结合的方法，研究了深凹露天矿采场内的流场分布规律，确定了深凹露天矿采场内风流结构为复环流—直流式，认为增加风速有利于矿区底部粉尘等物质的排出，但不利于高处有害物质排出矿外。张鹏飞等选定多种气象因子分析了其对浮尘扩散和自然沉降的影响，研究了准东露天煤矿开采期引起的自然降尘污染的时空变化规律，结果表明风为该地区影响自然降尘的主要气象因子。为了揭示露天矿内部的温度场分布及逆温层的演变规律，金龙哲等利用现场采集的数据，分析了露天矿及其周围平原地区冬季逆温特征及其成因。汤万钧等采用计算流体力学等方法研究了露天矿采场几何尺寸特点以及逆温现象对露天矿粉尘聚集的影

响规律，认为逆温现象是矿坑内粉尘聚集的重要原因，是露天矿粉尘污染多发的一个主要因素。王远等根据深凹露天矿岩壁阴坡面和阳坡面受太阳辐射影响的不同，选取 4 个典型位置来设计现场试验，采用量纲分析法和多元非线性回归分析法建立了深凹露天矿岩壁温度变化的经验模型，探究了自然环境下深凹露天矿岩壁温度场分布规律。

综上，国内学者对松动爆破粉尘运移规律及影响因素进行了大量的研究，取得了丰硕的成果，对于指导露天矿爆破粉尘监测预警、防治及其工程实践等发挥了重要作用。

③ 爆破粉尘防治技术研究进展

目前，国内学者提出了多种爆破粉尘控制技术，如爆破工艺防尘技术、水预湿被爆体降尘技术、压力水降尘技术、爆炸水雾技术等。

爆破工艺防尘技术主要采用孔底起爆、保证堵塞长度、完善炸药配方、挤压爆破、水封爆破等技术减少爆破产尘量。水封爆破是用水炮泥填塞钻孔，利用炸药爆炸产生的高温、高压破坏水炮泥，使水雾化并与爆破产生的粉尘接触，从而实现降尘。喷雾洒水是向悬浮在空气中的粉尘喷射水雾，增加粉尘重量，从而降尘。例如，金龙哲等分析了高效水炮泥降尘机理，测定了高效水炮泥溶液的表面张力及润湿能力，并进行了高效水炮泥爆破降尘试验，结果表明：使用高效水炮泥能有效降低炮采过程中粉尘的浓度。

水预湿被爆体降尘技术通过在爆破前将待爆岩石用水淋湿，借助粉尘颗粒间液桥力的作用使爆破粉尘颗粒凝聚，增大粉尘颗粒团的重力，从而实现降尘。李战军等研究表明：爆破岩石含水率达到 4%时，降尘率最高。该技术仅可用于地表、尘土堆等条件下的降尘。

压力水降尘技术通过钻孔将压力水提前注入待爆岩体，提高岩体的湿润性，降低产尘量。有研究表明：当注水湿润度达到 1%时，降尘率可达 50%。该技术要求待爆岩体节理裂隙发育。

爆炸水雾技术通过爆炸悬挂或铺设的水袋产生水雾捕捉爆破粉尘。露天矿通常将水袋铺设到爆区地表导爆索之上，水袋内加入水或者掺有抑尘剂的水溶液、起泡泡沫等材料制剂，在起爆时依靠导爆索的爆炸冲击力将水袋破坏并将水或者水溶液喷洒至半空中，以此形成大面积水幕层降尘。颜事龙等采用高速摄像法记录爆炸水雾运动过程，研究了不同比药量对爆炸水雾运动特性的影响，试验结果表明：在炸药爆炸能量作用下，水雾运动过程明显分为近场、中场和远场 3 个阶段，3 个阶段持续时间分别为 4～6、30、240 ms，且随着比药量增大，爆炸水雾初始抛撒半径、抛撒速度和抛撒均匀性增大。张昭等研究了地表水袋爆炸水雾形成过程及布置参数，针对水袋直径、起爆药量、发泡剂浓度进行了对比试验，利用高速摄像系统及分析软件分析了水雾形成过程，结果表明：对于直径为 300 mm 的水袋，当比药量为 0.55 kg/m^3、发泡剂浓度为 5 kg/m^3 时，爆炸水雾降尘效果最佳；对于直径为 200 mm 的水袋，当比药量 0.83kg/m^3、发泡剂浓度为 5 kg/m^3 时，爆炸水雾降尘效果最佳。不同爆破控尘方法的原理及技术特点见表 5-2。

5-2 不同爆破控尘方法的原理及技术特点

序号	控尘方法	控尘原理	技术特点
1	水封爆破	用水炮泥填塞钻孔，利用炸药爆炸使水雾化，并与爆破粉尘接触。	成本低，降尘效率高，但水袋可能产生二次污染，影响爆破施工。
2	喷雾洒水	向粉尘喷射水雾，增加粉尘重量。	可远程控制，对水质要求高，冬季不适用。
3	水预湿被爆体	爆破前把待爆岩石用水淋湿，借助液桥力的作用使粉尘凝聚。	操作简单，对爆破施工影响小，但降尘效果不佳，耗水量大，冬季不适用。
4	压力水降尘	通过钻孔将压力水提前注入待爆岩体，提高岩体的湿润性。	施工复杂，要求待爆岩体节理裂隙发育。
5	爆炸水雾	爆炸悬挂或铺设的水袋产生水雾捕捉爆破粉尘。	成本低，但水袋可能产生二次污染，工艺复杂。

以上露天矿爆破粉尘控制技术多为湿式降尘技术。由于水的表面张力较大，阻止了水对粉尘微粒的润湿，使得纯水的降尘效果不理想。一般在水中添加抑尘剂等材料制剂，以改善降尘效果。例如，蒋仲安等采用多种基料和表面活性剂作为爆破烟尘降尘剂成分，以润湿度和表面张力为试验指标，运用试验对比方法确定了爆破烟尘降尘剂配方。此外，也有学者研发了较为先进的除尘技术，如磁化水降尘技术、超声波雾化降尘技术、预荷电喷雾技术等。但由于受空间、经济性、适用性等因素制约，现阶段在露天矿爆破降尘中较难推广应用。

综上所述，以上爆破粉尘控制技术各具特色，水封爆破、水预湿被爆体、爆炸水雾等降尘技术也取得了较好的工程实践效果。

④ 抛掷爆破粉尘运移过程高速摄影

根据现场观测及前人研究，露天矿抛掷爆破粉尘的运动过程可分为冲击运动、蘑菇云形成和扩散运动三个阶段（杨国彦，1996；蒋仲安，2007），如图 11 所示。起爆后的 0~3.99s 内为冲击运动阶段，冲击运动阶段持续时间约 4s。由于爆炸冲击力远大于粉尘颗粒的重力等其他力，在爆炸冲击力的作用下，粉尘颗粒以颗粒团的形式高速冲入空气，粉尘颗粒受高压气流等的作用加速运动，当粉尘颗粒的速度大于爆生气体速度时，粉尘颗粒加速过程结束，粉尘在空气阻力的作用下，速度逐渐降低，粉尘颗粒减速上升。

起爆后的 3.99~22.39s 内为蘑菇云形成阶段，蘑菇云形成阶段持续时间约 18s。在蘑菇云形成阶段，爆生气体的上升气团质量逐渐增加，体积逐渐膨胀，上升速度逐渐减小，粉尘颗粒由于惯性继续向上运动，粉尘缓慢上升和扩散，大量粉尘颗粒的运动轨迹叠加，形成了蘑菇云形状的粉尘云层。粉尘扩散速度趋于稳定。

起爆后的 22.39~219.64s 内为扩散运动阶段，扩散运动阶段的持续时间在 197s 以上。在扩散运动阶段，粉尘颗粒的冲击动能已经消耗完毕，粉尘颗粒向周围扩散，在水平方向随着风流运移；在垂直方向上，受到空气浮力、重力等的作用，颗粒物达到匀速沉降状态。爆破粉尘随着爆破产生气流以及自然风流进行扩散。大颗粒粉尘依靠自身重力快速沉降，而小颗粒粉尘可长时间悬浮，形成具有一定体积的粉尘云，并产生明显的粉尘浓度分层现象，粉尘浓度沿程逐渐减小。



（a）起爆前



（b）冲击运动阶段



（c）蘑菇云形成阶段



（d）扩散运动阶段

图 5-4　抛掷爆破起尘过程

⑤ 抛掷爆破起尘机理

抛掷爆破产尘位置主要集中在炮孔孔口、爆区向前推移中的裂缝及爆区临空面 3 个位置。粉尘主要是炮孔填塞的碎石粉尘、矿岩在爆破冲击作用下破碎形成的粉尘、以及爆破前沉积于爆区周边的大量粉尘。抛掷爆破台阶钻孔时，每个炮孔会产生 7000~12000kg 的岩粉，这些岩粉部分用于填塞炮孔，其余残留在在炮孔周围，在爆破冲击作用下，岩粉冲向空中；抛掷爆破过程中，爆炸应力波与爆生气体膨胀作用使岩石破碎，产生的粉尘向空气中抛掷，瞬间高度可达数十米，浓度 2000mg/m^3 以上。爆破冲击作用以及抛掷爆破岩石回落地表会将爆破前沉积于爆区周边的大量粉尘扬起，产生大量粉尘。

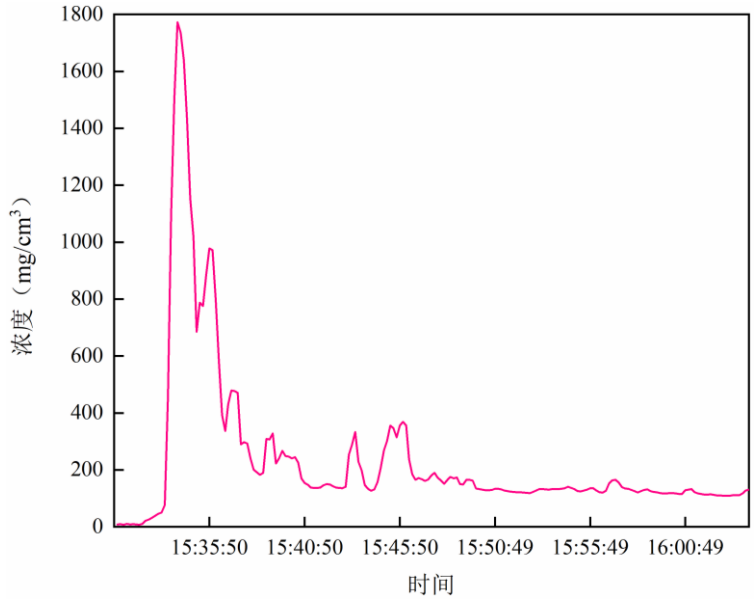
⑥粉尘浓度测定及运移规律分析

在抛掷爆破爆区后方 128m 挡墙处、155m 挡墙处布置两个测点，两测点间距 206m，采用 CCZ3000 直读式粉尘浓度测量仪对抛掷爆破粉尘浓度进行了测定。

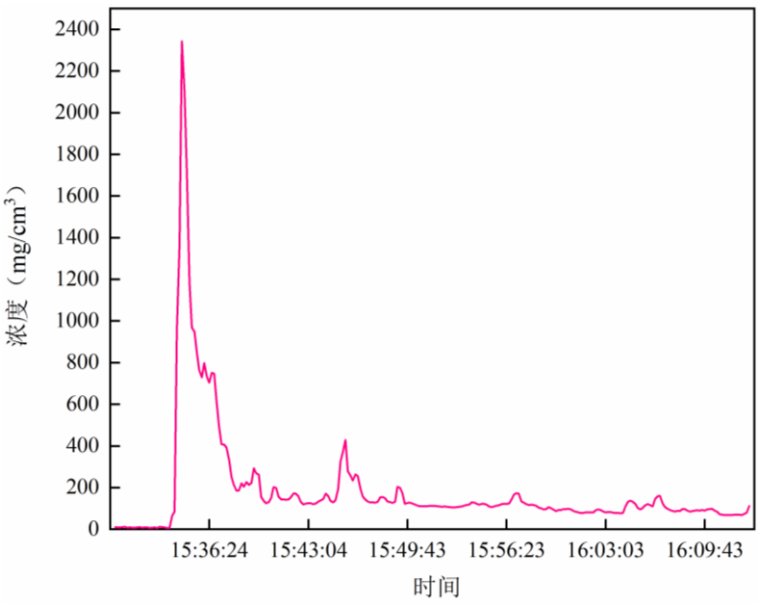


图 5-5　直读式粉尘浓度测量仪现场布置图

两测点的粉尘浓度时程曲线如图 **5-6** 所示。



（a）测点 1 浓度-时间变化图



（b）测点 2 浓度-时间变化图

图 5-6 测点粉尘浓度时程曲线

本次抛掷爆破在 15：33：28 起爆，测点 1 粉尘浓度在 15：33：40 即起爆后的 12s 增大至 455mg/m^3。随后粉尘不断扩散，在 15：34：10 即起爆后的 42s 粉尘浓度达到峰值 1772mg/m^3。随后开始下降，并出现一定的起伏波动，在 16:06:29 粉尘监测停止，粉尘浓度降到 137mg/m^3，在浓度达到峰值后的 32 分钟内每分钟下降约 51mg/m^3。

测点 2 在 15：33：40 即起爆后的 12s 粉尘浓度为 7.3mg/m^3，15：34：14 即起爆后的 46s 增大至 961mg/m^3。随后粉尘不断扩散，在 15：34：34 即起爆后的 66s 粉尘浓度达到峰值 2343mg/m^3。随后开始下降，并出现一定的起伏波动，在 16:12:43 停止粉尘监测，粉尘浓度降到 112mg/m^3，在浓度达到峰值后的 38 分钟内，平均每分钟下降约 59mg/m^3。

粉尘运移主要受以下三个方面的影响：

① 粉尘颗粒物理性质，包括粉尘颗粒的形状、密度、体积、质量等。

② 粉尘初始运动状态，包括粉尘颗粒的初始位置、初始速度、加速度等。

③ 爆区环境因素，包括爆破时的空气温度、湿度、风速、风向、爆区周边的地形条件等。

⑥ 提出了多方式协同精准控尘方法

采用预洒水、水封爆破、爆炸水雾协同降尘方案，如图 33 所示。分别向抛掷爆破高台阶的上盘、坡面、下盘及下部内排土台阶坡面洒水，根据已有研究成果初步按含水率 4%控制单位面积预洒水量，水封爆破与爆炸水雾的水袋直径均为 300mm，水中均添加抑尘剂。

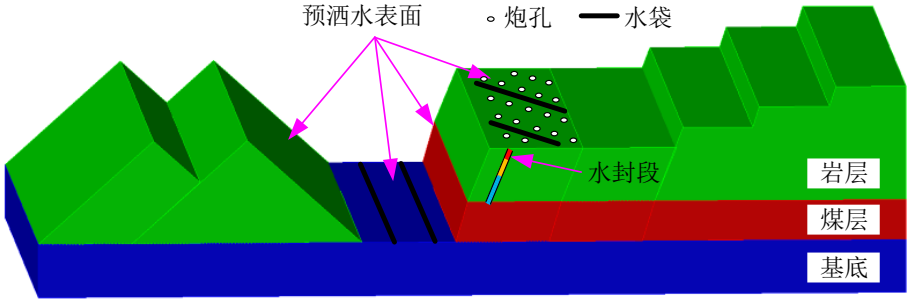


图 5-7 爆破协同控尘方案示意图

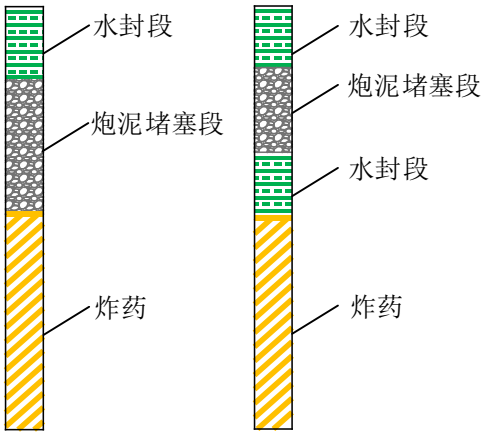


图 5-8 水封结构示意图

此外，针对已有防尘技术存在的问题，提出了一种简单易行、精准控制、显著改善抛掷爆破控尘效果的露天煤矿抛掷爆破粉尘智能控制方法。

（六）露天矿爆破块度智能识别案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破块度智能识别案例

（2）案例简介

以矿山生产实际需求为驱动，引入以计算机视觉（CV）和深度学习（DL）为核心的智能识别技术，实现对爆破块度的快速、客观、精准的量化分析。

2.案例实际应用效果简介

培养学生运用 AI 工具解决实际工程问题的能力，树立成本与效率意识。

3.支撑材料

（1）岩块粒度分析软件 Split-Desktop 4.0

（2）WipFrag 软件

（3）矿岩块度分析解决方案-来源【云・讲堂】

在岩体爆破工程中，爆破矿堆块度分布统计、对爆破块度的控制等都是较为复杂的过程，传统的爆破矿堆块度分布统计通常是采用人工抽样筛分的方式，该方式在效率和安全性上存在一定的问题。

将 WipFrag 软件与无人机两项技术结合，对现场爆堆的岩矿进行拍照，扫描出使用不同爆破方式产生的爆区块度，完成对比，并统计相应的块度分布，以选出最优爆破方案。

粒度分析软件 WipFrag 能够实现将矿岩的粒度数字化分析并以直观的图表展示出来，无需攀爬矿堆，使用相机或手机，对矿岩爆堆进行拍照，能在一分钟内完成图像分析。

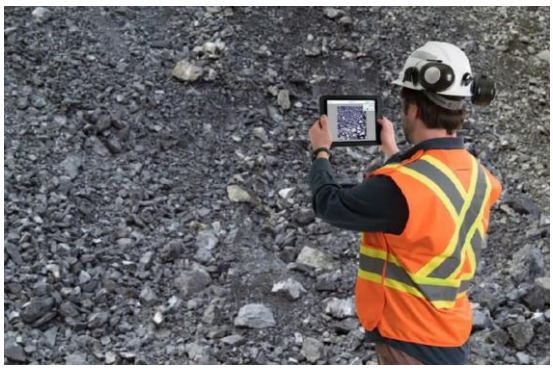


图 6-1 现场拍照



图 6-2 无人机拍摄路线



图 6-3 现场图像获取

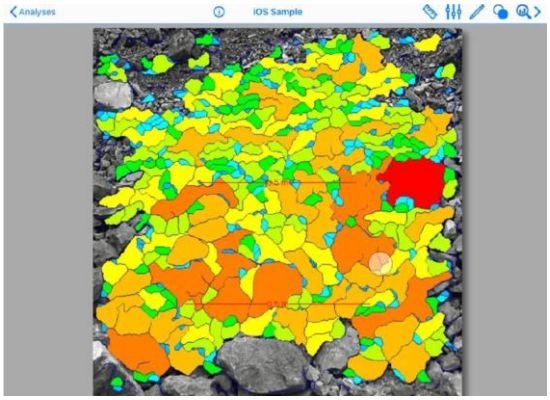


图 6-4 自动识别块度尺寸

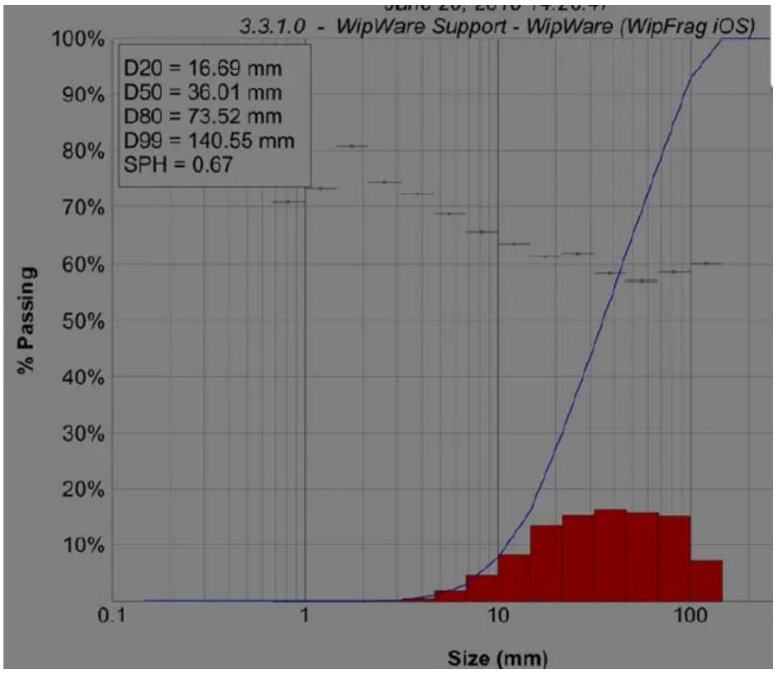


图 6-5 矿岩尺寸统计图表

（七）露天矿爆破振动智能预测案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破振动智能预测案例

（2）案例简介

结合学术论文《基于倒数误差法的抛掷爆破振动速度集成预测模型》、《基于 GA-LSSVM 与 RF 的松动爆破振动峰值速度集成预测》等核心研究成果，将机器学习集成算法引入振动预测领域，实现对爆破振动峰值速度（PPV）等关键参数的高精度、智能化预测。

2.案例实际应用效果简介

使学生掌握爆破振动的影响机制、关键影响因素及智能预测模型的基本原理。

3.支撑材料

（1）基于倒数误差法的抛掷爆破振动速度集成预测模型-论文

目前，大部分单一模型往往因为某些异常值而出现不稳定的预测，导致预测结果存在较大的偏差。使用不同的预测模型进行集成可以引入数据的多样性，有助于更好地捕捉数据的复杂性和潜在的非线性关系。由于考虑了多个模型的意见，对于个别模型中的异常值或噪声具有一定的鲁棒性，异常值可以被相对平滑地抵消，因此预测精度相对较高。本文采用 GA-LSSVM 与 Elman-Adaboost 两种预测模型及倒数误差法集成方法构建振动速度集成预测模型。其中，GA-LSSVM 是一种基于支持向量机（SVM）的模型，适用于处理非线性、高维度的数据，并且具有较好的泛化能力。而 Elman-Adaboost 对误差较大的样本数据具有较强的识别能力，可实现动态增强学习，具有较高的数据动态处理能力和适用性。

模型框架如图 7-1 所示。该预测模型主要分为两部分：模型分别预测与预测模型集成。具体步骤如下：首先 GA-LSSVM、Elman-Adaboost 两种预测模型分别对数据进行识别训练，分别输出预测结果；然后，通过倒数误差法对两个预测结果进行集成，赋予预测效果一般的模型较小的权重，两种预测模型相辅相成，得出最终预测结果。

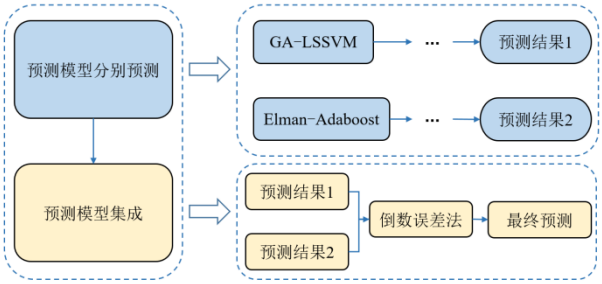


图 7-1 模型构建框架图

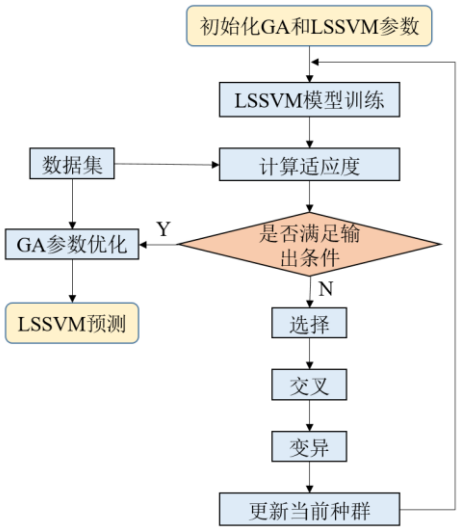


图 7-2 基于 GA-LSSVM 的振动速度预测模型

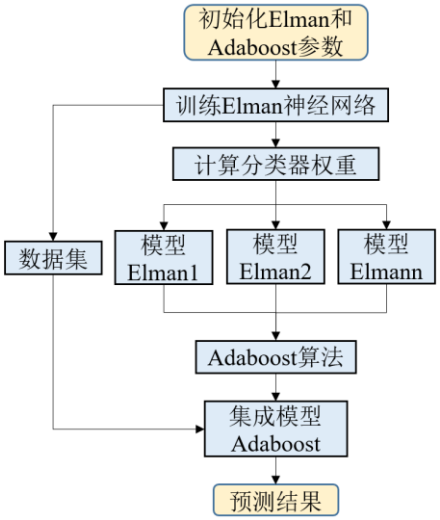


图 7-3 Elman-Adaboost 预测流程图

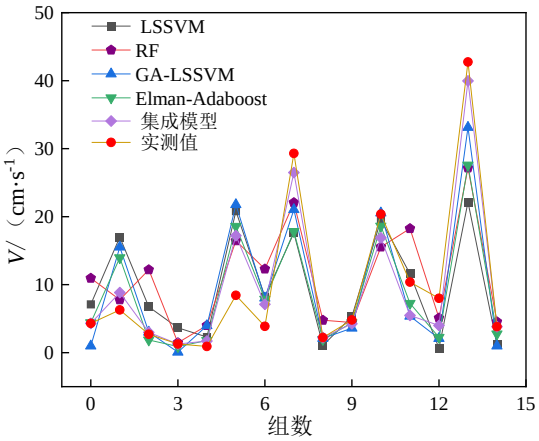


图 7-4 模型预测结果对比图

（2）基于 GA-LSSVM-RF 的松动爆破振动峰值速度集成预测-论文

选择采用遗传算法优化最小二乘支持向量机（GA-LSSVM）与随机森林（RF）两种预测模型及倒数误差法集成方法构建振动速度集成预测模型。模型框架如图 3 所示，该预测模型主要分为两部分：模型分项预测与预测模型集成。具体步骤如下：首先 GA-LSSVM、RF 两种预测模型分别对数据进行识别训练，分别输出预测结果；然后，通过倒数误差法对两个预测结果进行集成，赋予预测效果一般的模型较小的权重，两种预测模型相辅相成，得出最终预测结果。

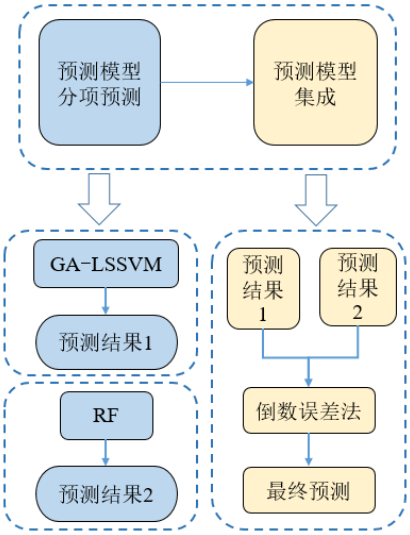


图 7-5 模型构建框架图

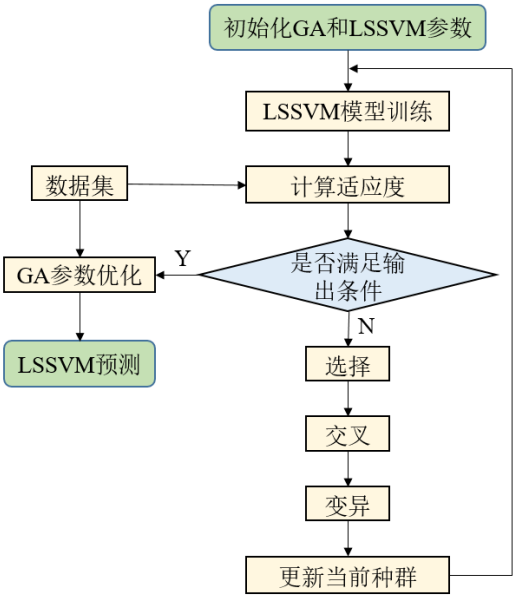


图 7-6 GA-LSSVM 预测流程图

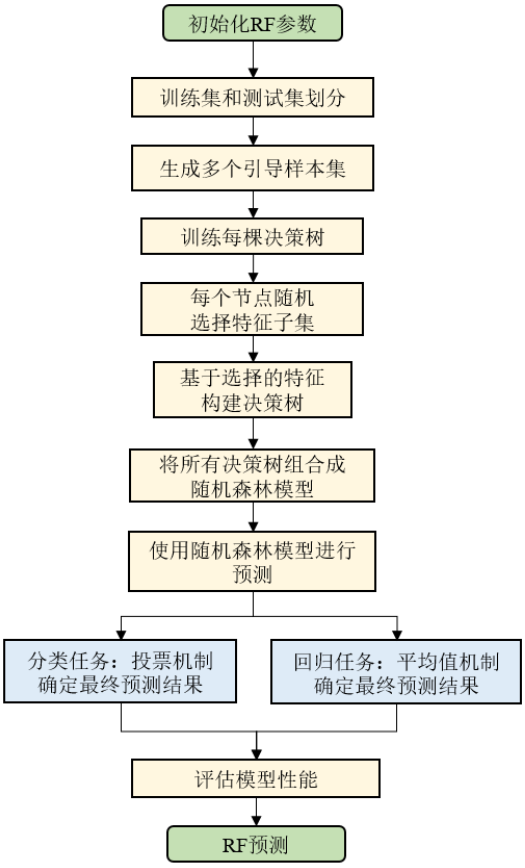


图 7-7 RF 预测流程图

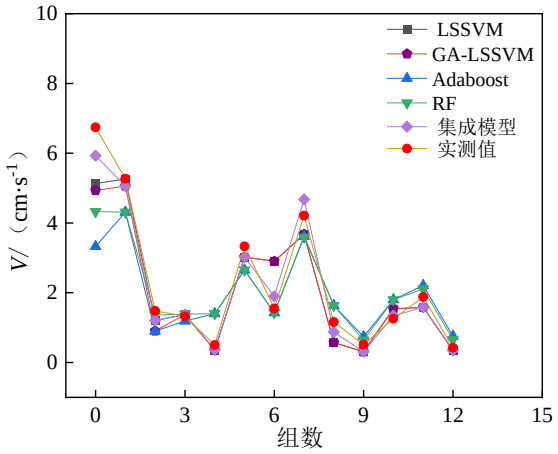


图 7-8 模型预测结果对比图

（八）露天矿爆破参数反馈优化案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破参数反馈优化案例

（2）案例简介

将每次爆破后的实际效果数据作为下一次爆破设计的输入，从而实现爆破参数的自适应、自优化，驱动生产效能持续提升。

2.案例实际应用效果简介

使学生理解爆破参数反馈优化的基本逻辑与流程，掌握将多源监测数据转化为参数优化建议的系统性方法，深刻领会“数据是宝贵资产”的价值观念，树立系统化、闭环化的复杂工程问题解决思路。

3.支撑材料

（1）设计参数的反馈优化调整-博士论文

① 设计参数优化调整

根据爆破设计的理想值与预测值的对比，可以验证爆破设计参数是否合理。

优化调整思路为：首先，根据ξ的大小，找到爆破效果较差的评价因子，从理想爆破样本库中筛选出以上评价因子符合条件的样本。然后，计算筛选出样本的以上评价因子的主要影响因子的平均值，利用该平均值作为影响因子的优化结果。再根据优化后的爆破参数进行爆破效果预测，直至爆破效果符合要求。

② 设计参数的反馈调整

根据爆破后统计的实际值与预测值的对比，可以验证预测的准确性。预测的误差率Ψ较大，多是因为爆破效果预测样本库中与待预测区域条件相似的样本较少；也有可能是预测模型有待进一步优化。以上预测模型是取各主要影响因子预测结果的平均值作为最终预测结

果，可以根据各影响因子的影响程度取各主要影响因子预测结果的加权平均值，并根据实际爆破效果不断调整各影响影子的权重，以优化预测模型。

此外，由于最终预测的爆破效果要符合爆破要求，预测误差较大，说明实际爆破效果不符合爆破要求。因此需要根据实际爆破效果与要求爆破效果反馈调整爆破参数。爆破参数的反馈调整也是调整较差评价因子的主要影响因子，可能需要多次反馈调整才能使爆破效果符合要求。

③工作流程与体系结构

通过对系统功能的分析，确定系统的总体工作流程如图 8-1 所示。

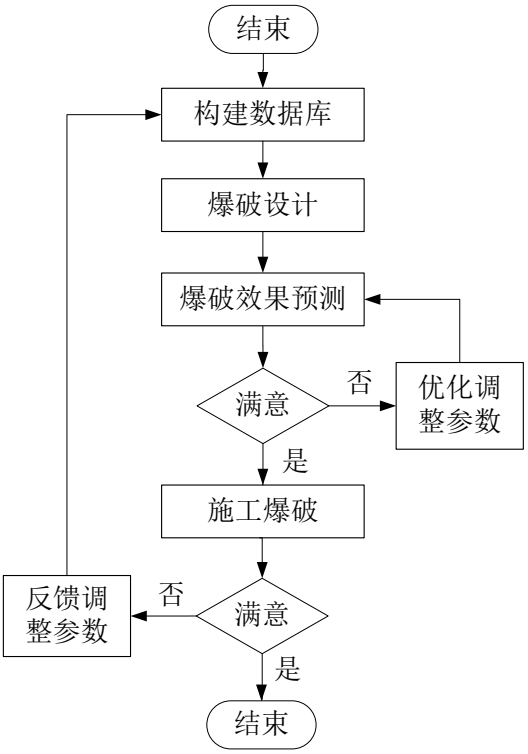


图 8-1 系统的工作流程

根据系统的工作流程，可以确定设计参数反馈优化调整的数据流程见图 8-2。

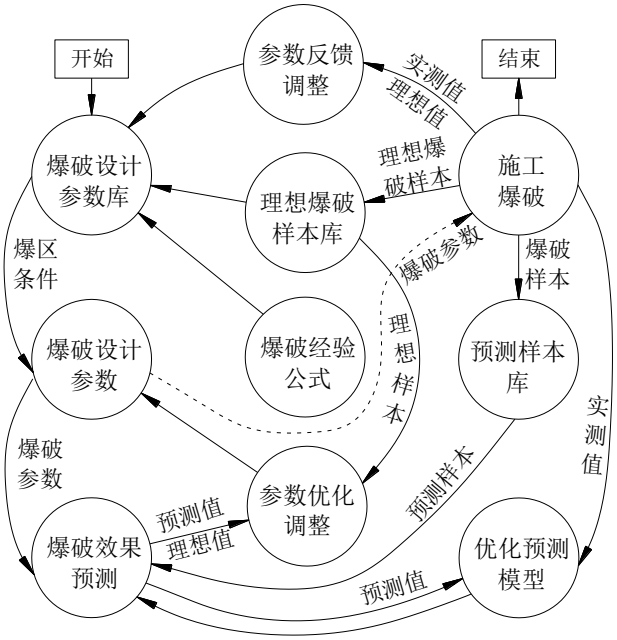


图 8-2 反馈调节数据流程图

由图 8-2 可知，首先根据爆破设计参数库及爆区条件，确定爆破设计参数；然后利用爆破参数进行爆破效果预测，若爆破效果预测值与理想值偏差较大，则进行参数优化调整，直至预测的爆破效果满足爆破要求；再利用确定爆破参数进行施工并爆破。根据爆破效果实测值与预测值，优化预测模型，根据爆破效果实测值与理想值反馈调整爆破参数。此外，每次的爆破样本均放入预测样本库，爆破效果良好的爆破样本放入理想爆破样本库。其中，爆破设计参数库由理想爆破样本库中的爆破参数、根据爆破经验及经验公式确定爆破参数以及反馈调整确定的爆破参数组成。爆破参数设计时，首先根据爆破条件从理想爆破样本库中筛选爆破样本，进行参数设计；若符合条件的样本较少，则根据条件类似的反馈调整参数后的样本进行参数设计；若没有符合前两者的爆破样本，则根据爆破经验确定爆破参数。

根据数据流程，可以确定系统的功能结构。通过对系统功能的归纳总结，将系统划分为 5 个功能模块，包括爆破参数设计模块、爆破效果预测模块、参数优化调整模块、参数反馈调整模块及预测模型优化模块。系统的数据库主要包括预测样本库、理想爆破样本库、爆破经验库、反馈调整样本库，其中后三者组成爆破设计参数库。系统的体系结构见图 8-3。

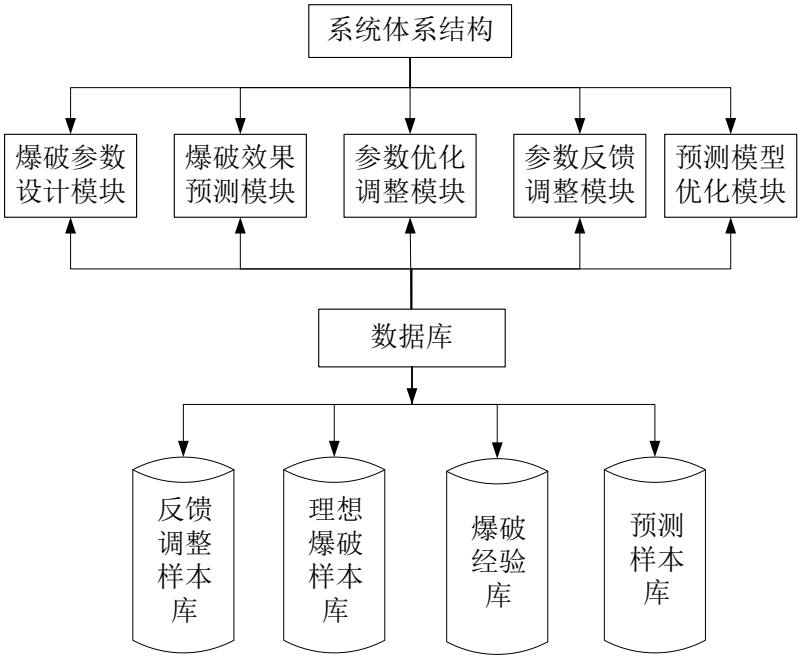


图 8-3 系统体系结构图

（九）露天矿爆破与生态协同重建案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿爆破与生态协同重建案例

（2）案例简介

引入“爆破-生态协同”新理念，将生态重建的最终需求前置于爆破设计阶段，通过精准的爆破控制，为后续复绿创造有利条件。使学生掌握协同重建的基本原理，培养学生面向生态目标的爆破设计能力，深刻内化“绿水青山就是金山银山”的生态文明思想，培养“全生命周期”的系统工程思维。

2.案例实际应用效果简介

通过案例的学习，让学生对目前国内露天煤矿生态环境保护方面所做的工作有充分的认识，对学生进行生态文明教育，培养学生“绿水青山就是金山银山”的理念，提高学生的绿色发展、环境保护意识及社会责任感。

3.支撑材料

（1）牢记嘱托 奋力书写中国式现代化内蒙古新篇章——霍林郭勒市：“煤海”翻“绿波”，矿山展新颜（公开新闻）

近年来，霍林郭勒市认真贯彻落实习近平生态文明思想和“绿水青山就是金山银山”的发展理念，扛起筑牢我国北方重要生态安全屏障、建设祖国北疆万里绿色长城的责任，守矿山“绿”底色，获生态“金银山”，积极助力推进绿色矿山建设。

传统的矿山环境，既没有环保措施，又缺少长远规划，进入高质量发展阶段，继续走老路是行不通的。2018 年 7 月至今，累计投入 9.68 亿元、绿化治理面积 3.77 万亩。在非煤矿山方面，将 22 个非煤矿山整合为 6 个，其余部分取缔并开展生态修复，治理面积 1100 亩。在无主矿山方面，高标准修复排土场、裸露山体、废弃采坑 4142 亩，切实发挥党政生态“兜底”作用。截至目前，霍林郭勒市所有达到治理条件的矿山已全部复绿。

国家电投内蒙古公司北露天煤矿还在排土场上建设了分散式风电示范项目。据北露天煤矿矿长刘敬玉介绍，作为全球首例排土场风电项目，内蒙古公司北露天煤矿排土场风电场首期建设一台容量为 4MW 的风电机组。该项目采用“自发自用”模式，风电所发电力全部用于露天煤矿生产用电和电驱矿卡充电；平均年发电量 1166.2 万千瓦时，每年可节约标煤 3562.74 吨，减少二氧化硫排放量 26.82 吨，减少二氧化碳排放量 9586.16 吨。



图 9-1　分散式风电示范项目

（2）【建设我国北方重要生态安全屏障】—通辽市霍林河露天煤矿打造生态矿山样板（公开新闻）

通辽市霍林河露天煤矿是我国五大露天煤矿之一，富足的煤炭资源拉动了霍林郭勒市繁荣发展的同时，也曾造成了生态治理的“欠账”。2018 年，“霍林河露天煤矿生态治理滞后问题”被中央生态环境保护督察组点名批评。通辽市、霍林郭勒市党委和政府深刻警醒、迅速行动，确立了“一年大变样，三年彻底整改，打造我国高寒地区绿色矿山标杆”的整改目标，高标准做好矿山生态治理建设。

霍林河露天煤矿地处北方高寒及草原生态脆弱地区，每年仅有 3 个月的无霜期，11 月份至翌年 3 月极寒天气可达到零下 37 度，矿区年均降水量 347 毫米，最小年降水量仅为 195.8 毫米，年均蒸发量 1724.8 毫米，是降水量的 5 倍，高寒地区固有的气候土壤条件导致幼苗成活率低，修复难度大。为最大程度克服自然因素限制，提高科学治理水平，保障治理效果，通辽市成立专项工作组，全面制定整改方案，持续增加绿色投入，霍林郭勒市夯实属地责任，坚持挂好“专家号”，推广“土办法”，打造“自维持、免维护”的自然生态系统。委托中科院生

态环境研究中心、中国环境科学研究院编制《一号露天矿排土场生态修复专项治理方案》，系统实施“覆土整形、供水系统、水土保持、土壤改良、植被重塑、浇灌系统”等六大修复治理工程。



（a）西四排土场治理前　　（b）西四排土场治理后

图 9-2　西四排土场治理前后

甄选出 16 种牧草、7 种乔木、12 种灌木，形成可自然演替的群落结构。对排土场进行近自然地形重塑，底部周边修建储水设施，坡面建设纵向排水沟和横向截水沟，形成“外排内蓄”的大气降水管理系统。采取有机肥、长效控释肥、微生物菌剂等肥料改良土壤，土壤养分指标由六级提升到四级。以生物措施固本，恢复植被系统，以工程措施固形，建立生物立地条件，实现两种措施的优势互补。如今，霍林河煤矿复垦绿化率提高到 97%，植被覆盖度由原来的 35%以下提高到 51.5%，水土流失强度由 4049 吨/公顷·年，下降至 3443 吨/公顷·年，生态系统服务价值量由 2420 万元/年提升到 4830 万元/年，矿山复垦效果显著，生态功能得到稳固恢复。霍林河露天煤矿整改典型案例被生态环境部纳入“督察整改看成效”专栏，典型经验做法在中央电视台焦点访谈栏目播出。



（a）沿帮排土场治理前　　（b）沿帮排土场治理后

图 9-3　沿帮排土场治理前后

霍林河露天煤矿生态修复成果直观实现了生态价值的全面释放，具备条件的排土场牧草刈割后，免费作为矿区周边牧民牲畜过冬饲料，带动周边牧区脱贫致富，有效促进牧企和谐。此外，大部分矿区属于太阳能资源丰富区，修复区土地从矿区废弃地复原为植被稳定覆盖的绿地，土地价值得到有效提升，为后续发展清洁能源打下了坚实基础。今后，通辽市将继续深入贯彻习近平生态文明思想，坚定不移走好以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展新路子，以霍林河露天煤矿整改为契机，一体推进绿色矿山、绿色园区、绿色工厂建设，高水平建设全域生态城市，着力完善生态文明制度体系，为群众提供更多更优质的生态产品供给，全面筑牢祖国北方重要生态安全屏障。

（3）准能矿山生态旅游区—绿色矿山建设成果（公开新闻）

近年来，准能集团坚决贯彻习近平生态文明思想，全面贯彻“绿水青山就是金山银山”理念，大力推进矿山地质环境修复治理和资源高效开发利用，相守青山、与绿共生，勇当“绿水青山就是金山银山”理念的积极传播者和模范践行者。

作为集煤炭开采、坑口发电及煤炭循环经济产业为一体的大型综合能源企业，公司以高标准绿色矿山建设推进高碳产业低碳发展，分步实施碳达峰行动。公司探索形成集成水土流失控制技术体系、生态重构技术体系、复垦绿化标准化作业流程三大技术体系，做到了排弃地复垦全覆盖、无死角，实现了“地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重现、生物多样性重组与保护”，成功将昔日沟壑纵横的“鸡爪子”山改造成万亩良田，破解了大型露天煤矿开发与保护协同推进的重大技术难题，为黄河流域生态环境保护和高质量发展提供了低成本、易推广的实用技术。

截至目前，公司复垦绿化总投入 28.81 亿元，完成绿化面积 9.85 万亩，矿区复垦率达到 100%，植被覆盖率由 25%提高至 80%以上，生态系统实现正向演替、良性循环。近五年实施生态治理项目 214 项，矿区生态系统生产总值（GEP）增加 14 亿元，实现了经济发展与生态保护双赢。



图 9-4　复垦区域

（十）露天矿高陡边坡预裂爆破减震机理与应用案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿高陡边坡预裂爆破减震机理与应用案例

（2）案例简介

深入揭示预裂爆破减震机理，使学生掌握预裂爆破的成缝机理和减震机理，理解应力波在岩体中和遇到裂缝时的传播、衰减规律。

2.案例实际应用效果简介

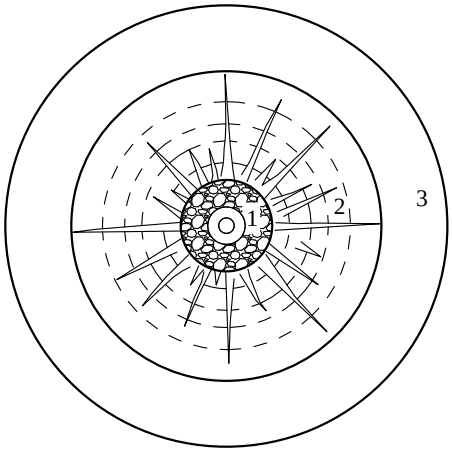
培养学生根据地质条件和爆破参数，定性定量分析预裂爆破减震效果的能力，强化科学基础，贯穿“本质安全”设计理念

3.支撑材料

（1）A preliminary study on the design method for large-diameter deep-hole presplit blasting and its vibration-isolation effect-论文

① 预裂爆破成缝机理分析

根据岩石爆破理论，炸药在无限大的岩体中爆炸时，在岩体内部将产生粉碎区、裂隙区和弹性震动区，如图 10-1 所示。



1-粉碎区　2-裂隙区　3-弹性震动区

图 10-1　无限岩体内的爆破破坏分区

预裂爆破的目的不是破碎岩石，而是分离爆破区和保留区的岩体，形成预裂缝。因此预裂爆破通常采用不耦合装药或者低密度炸药，使炸药爆炸后作用于孔壁的压力小于岩体的动态抗压强度，避免孔壁周围的岩石受压产生破坏，即不产生粉碎区。预裂缝的形成过程如下：

当相邻的预裂炮孔同时起爆时，首先孔壁岩石受到猛烈的冲击压力，应力波以钻孔为中心向四周传播，在径向产生压应力，切向产生拉应力。炮孔壁的炮孔连心线方向因应力集中和应力波叠加作用而出现较长的径向初始裂缝，如图 2（a）所示。随后爆生气体的准静态应力的作用使初始径向裂缝贯通并扩展。由于最长的径向裂隙扩展所需要的能量最小，所以炮孔连心线方向是裂隙扩展的最优方向，其他方向的裂隙发展甚微，从而保证了裂缝沿连心线方向贯通，最后形成具有一定宽度的贯通裂缝，如图 10-2（b）所示。

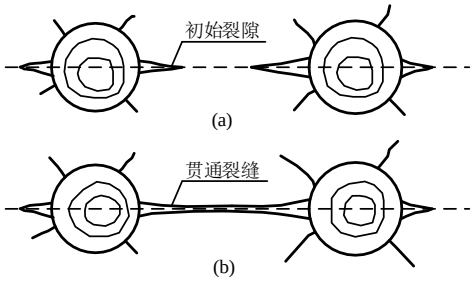


图 10-2 预裂面形成过程

②预裂爆破参数设计

预裂爆破的关键是形成贯通的预裂缝，但由于预裂孔是在正面没有自由面的条件下起爆的，如果爆破参数设计不合理，在坚硬的岩体中常产生闭合微缝；在松软破碎的岩体中常使裂隙沿临接预裂孔的节理、裂隙发展，使岩体结构面破坏严重，为临近炮孔爆破产生后冲破

坏创造条件。因此，需要根据预裂爆破机理，综合考虑炸药性质、岩体的物理力学性质等因素的影响，合理设计预裂爆破参数。

大孔径深孔条件下，由于药包过重，搬运、装填困难，影响施工效率，一般不采用径向不耦合装药技术，而是采用空气间隔装药技术。此外，采用低密度炸药以降低爆轰压力，在装药量一定的情况下延长装药长度，改善炸药沿炮孔轴向的应力分布状态。

大孔径深孔条件下，预裂爆破参数主要包括炮孔直径、炮孔倾角、炮孔装药量、孔距等。其中，炮孔间距、炮孔装药量是预裂爆破最重要的参数。炮孔间距大，难以形成光滑的预裂面；反之，需要增加预裂孔数量，增大钻孔费用。炮孔装药量大容易破坏预裂孔孔壁；反之难以形成预裂面。

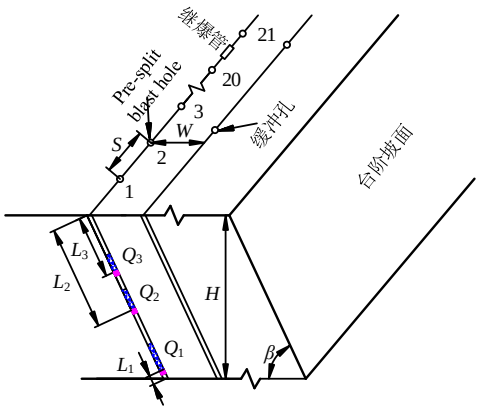


图 10-3 预裂孔装药结构及起爆网络示意图

③ 现场应用

根据计算结果，设计 Q=150kg，W=4.0m，S=3.4m 或 S=4.0m，其余参数相同，进行现场预裂爆破试验。在爆区后方和侧方布置测点，如图 10-4 所示，利用 TC-4850 爆破测振仪监测各测点的爆破质点震动速度，进行震动波形数据的采集。根据监测数据对比分析 S=3.4m 与 S=4.0m 时的预裂爆破减震效果。

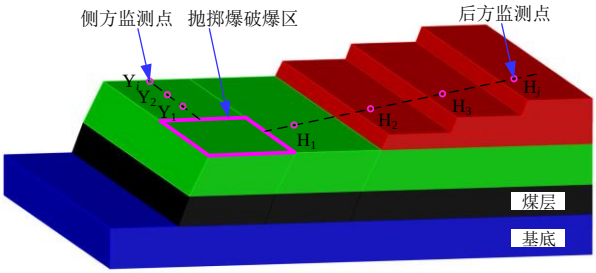


图 10-4 监测点布置示意图

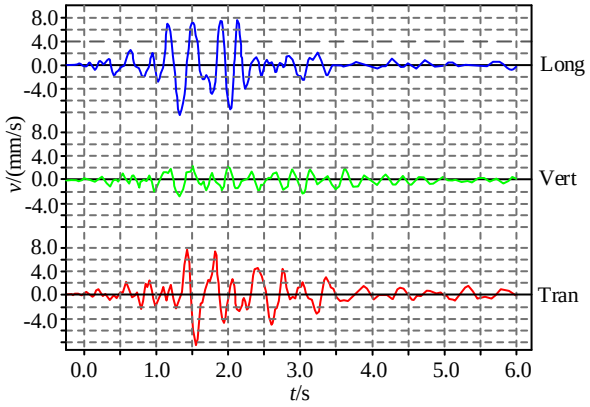


图 10-5 典型爆破震动波形图

监测数据如表 3 所示，其他参数相同的情况下，*S*=3.4m 时的质点震动速度较小，减震率平均为 20.7%。





图 6 露天矿预裂爆破效果

表 3 预裂爆破监测数据与减震效果

测点编号	测点位置	距爆心水平距/m	单响药量/kg	矢量合速度 cm/s		减震率/%
				S=4.0m	*S*=3.4m	
H1	后方	100	10000	9.48	6.72	29.1%
H2	后方	200	10000	5.51	4.59	16.7%
H3	后方	300	10000	3.65	3.09	15.3%
H4	后方	400	10000	2.87	2.44	15.0%
H5	后方	500	10000	1.34	1.05	21.6%
Y1	侧方	200	10000	5.74	4.77	16.9%
Y2	侧方	250	10000	4.65	3.92	15.7%
Y3	侧方	350	10000	1.85	1.47	20.5%
Y4	侧方	450	10000	1.48	1.23	16.9%
Y5	侧方	550	10000	1.28	0.91	28.9%
Y6	侧方	850	10000	1.03	0.78	24.3%

（十一）露天矿抛掷爆破拉斗铲倒堆工艺参数优化案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿抛掷爆破拉斗铲倒堆工艺参数优化案例

（2）案例简介

对抛掷爆破、拉斗铲倒堆两大核心环节的工艺参数进行系统性、一体化优化。

2.案例实际应用效果简介

使学生掌握抛掷爆破-拉斗铲倒堆工艺的完整流程，理解抛掷爆破参数与拉斗铲作业参数之间的内在联系与制约关系。培养学生“系统思维”和全局优化的工程管理理念。

3.支撑材料

抛掷爆破-拉斗铲倒堆工艺参数优化理论-专著

1）抛掷爆破拉斗铲倒堆工艺生产环节

抛掷爆破拉斗铲倒堆工艺的实施涉及爆区测量、抛掷爆破设计、抛掷爆破施工、准备拉斗铲作业平台、拉斗铲倒堆作业、煤层穿爆、煤层开采七个环节。

（1）爆区测量

用激光扫描仪和 GPS 测量仪测量台阶坡面、上部平盘，建立台阶三维模型（图 4），以控制前排孔底盘抵抗线和孔深。

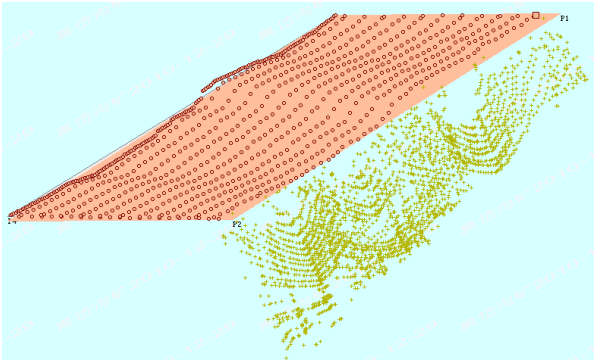
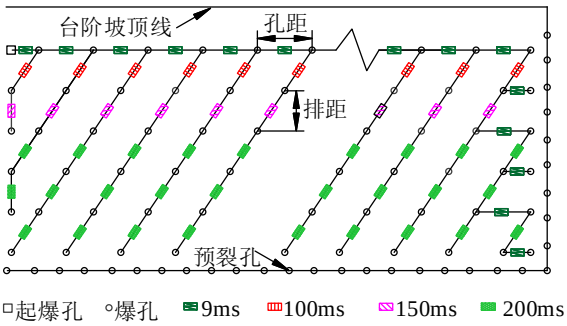


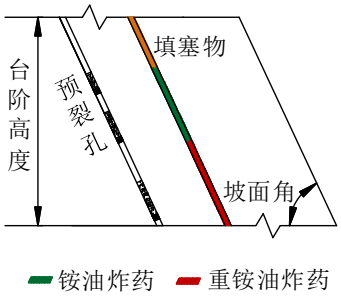
图 11-1 抛掷爆破爆区三维模型

（2）抛掷爆破设计

根据爆区内岩体物理力学性质等，设计孔距、排拒、装药结构、连线（图 5）等，编制抛掷爆破设计方案。



（a）孔网参数



（b）装药结构

图 11-2 抛掷爆破参数示意图

（3）抛掷爆破施工

① 使用 GPS 测量仪进行钻孔位置高精度定位，之后采用可调节角度的钻机按设计的穿孔方向、角度以及孔深等数据进行钻孔；

② 利用炸药混装车进行装药；

③ 使用高精度非电雷管等连线；

④ 根据警戒要求做好警戒工作，起爆；

⑤ 抛掷爆破后利用三维激光扫描仪扫描爆堆，统计计算爆堆松散系数、有效抛掷率等指标。

（4）准备拉斗铲作业平台

包括推土机平整爆堆、单斗挖掘机降段、推土机平整作业平台等过程，如图 11-3 所示。



（a）推土机平整爆堆



（b）单斗挖掘机降段



（c）推土机平整作业平台



（d）拉斗铲作业平台

图 11-3 拉斗铲作业平台形成过程

（5）拉斗铲倒堆作业

拉斗铲通过行走线路（图 6d）进入工作面进行倒堆剥离作业，将剥离物倒堆至内排土场，揭露煤层。

（6）煤层穿爆

对煤层进行钻孔、装药、连线，实施松动爆破。

（7）煤层开采

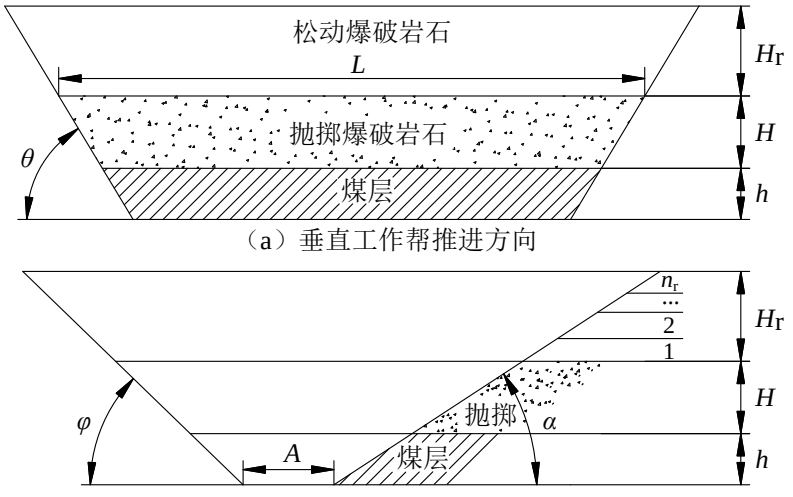
把爆破破碎后的煤层分三个台阶，采用端工作面的作业方式开采。上部煤台阶追踪煤层穿孔爆破台阶开采，下部煤台阶追踪上部煤台阶开采。

2）抛掷爆破台阶参数优化

抛掷爆破台阶参数主要包括台阶高度、台阶坡面角、采掘带宽度、工作线长度等。它们影响抛掷爆破效果、拉斗铲生产效率，进而影响整个矿山的生产成本和经济效益[170-172]。

传统上多根据经验公式结合类似矿山生产实际设计台阶参数，各参数的确定具有先后顺序，且较为独立。参数的优化设计也多采用两种方式。一种是根据矿山具体条件，提出多个可行方案，通过技术经济比较优选其中的一个方案；另外一种则是在假设其他参数已知的情况下，考虑设备线性尺寸、台阶稳定性等因素的限制，以生产成本最小或露天矿生产能力最大等为目标，对单个参数进行优化。显然，第一种方式比选方案有限，难以保证最优方案被提出并选中；而第二种方式则忽略了参数间的相互影响，对各参数进行独立优化。事实上，这些参数并不是相互独立的，而是相互联系，甚至相互影响、相互约束的。如台阶高度和台阶坡面角共同影响台阶的稳定性及有效抛掷率。相同稳定性条件下，台阶高度增加，台阶坡面角必须降低；台阶高度、工作线长度、采掘带宽度共同影响拉斗铲生产效率，假定其中两个参数固定不变，对另外一个参数进行优化，优化结果仅是假设条件下的最优值，并不一定是全局最优值。

因此，较为科学方法是综合各种因素，以多个待优化台阶参数为变量，以生产成本最小或者其他指标为目标，建立优化模型，对各参数进行综合优化设计。抛掷爆破台阶参数优化设计即要求保证矿山生产的安全，又要求使矿山的生产成本最低，这两个方面相互冲突、相互竞争，属于多目标优化设计问题。



（a）垂直工作帮推进方向

（b）平行工作帮推进方向

图 11-4 露天矿采场断面示意图

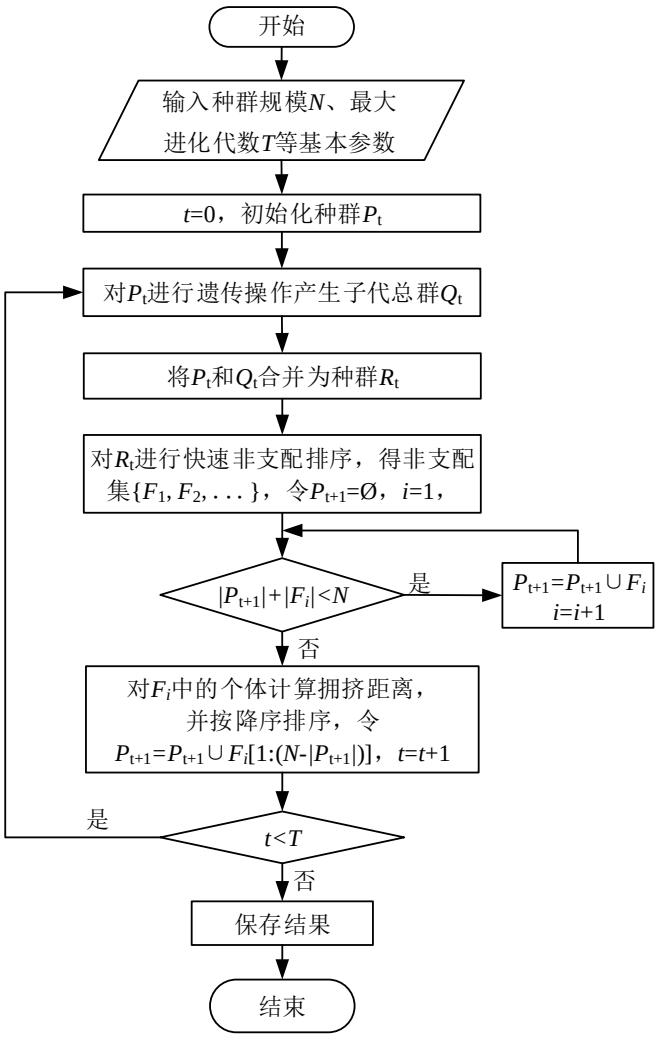


图 11-5　NSGA-II 主要流程

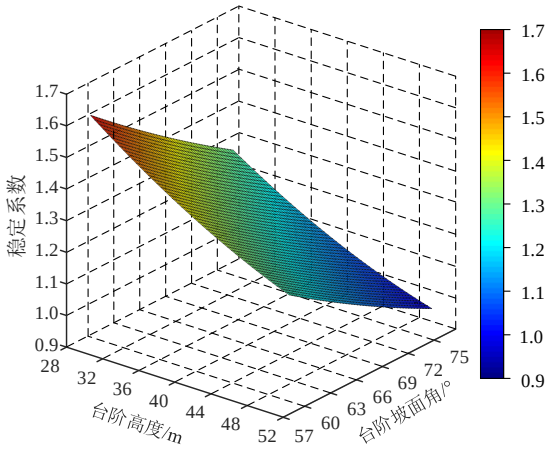


图 11-6 抛掷爆破台阶稳定系数

2）拉斗铲作业工作面参数优化

拉斗铲采用扩展平台倒堆方式时，拉斗铲作业工作面参数影响推土机和刷帮单斗挖掘机的辅助作业量以及拉斗铲的二次倒堆量，不合理的拉斗铲作业工作面参数将导致露天矿生产能力降低、生产成本显著增大。此外，由于拉斗铲自重较大，拉斗铲站立在平整后的爆堆上

作业存在滑坡等安全隐患。因此，需要综合考虑安全、技术、经济等多个方面因素，提出拉斗铲作业平台高度（作业平台顶距煤层顶板的高度）、作业平台宽度等的优化方法，以保证拉斗铲作业安全，提高拉斗铲生产效率，降低倒堆工艺系统剥离成本。

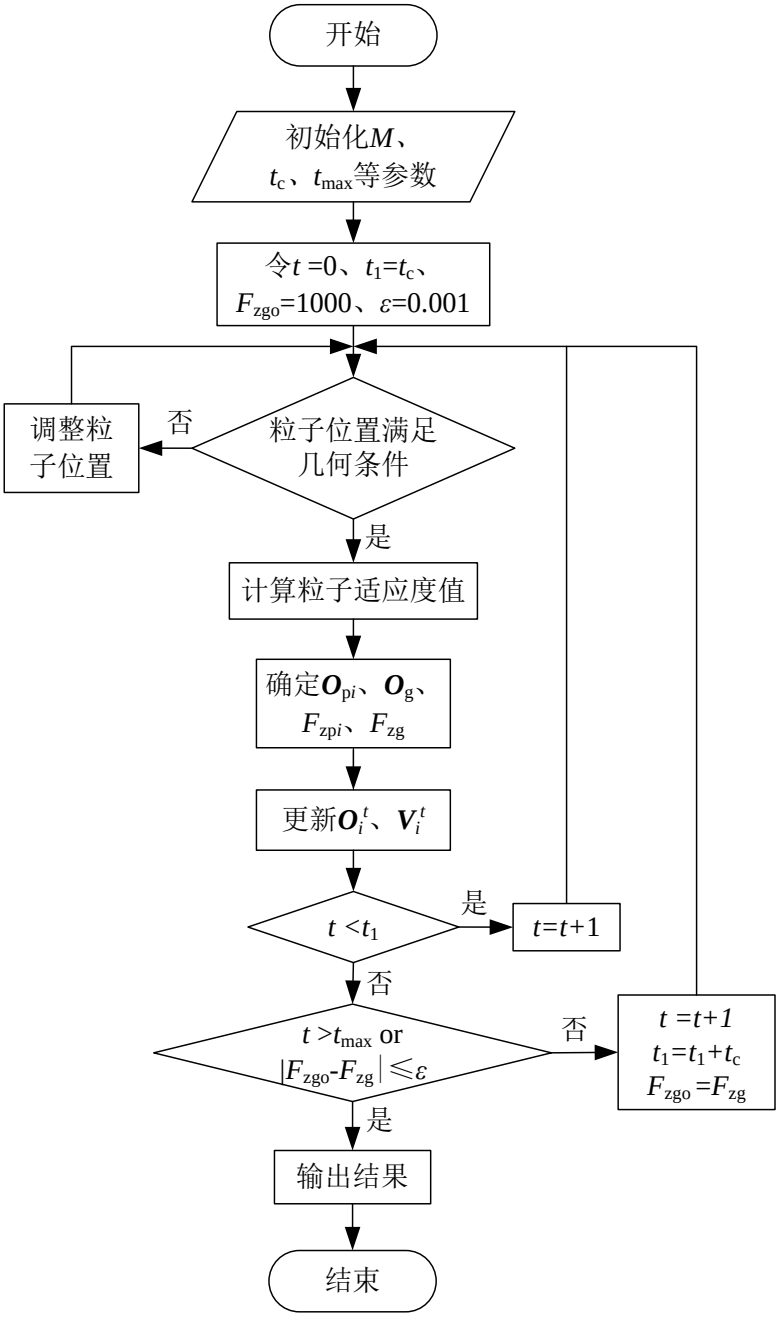


图 11-7 粒子群优化算法流程图

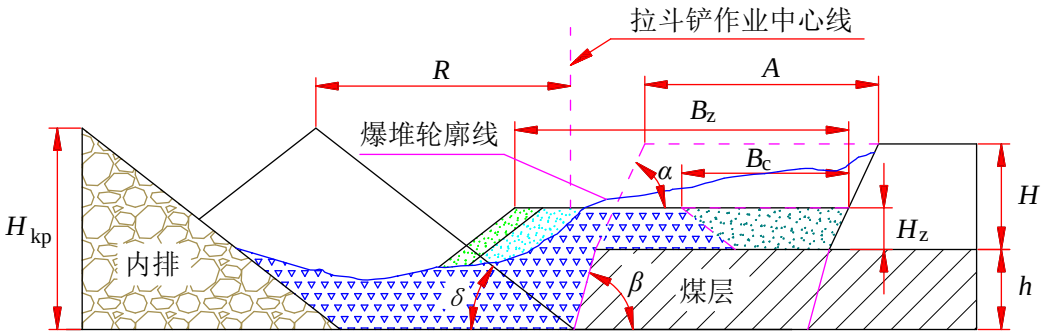


图 11-8 作业平台宽度计算示意图

（十二）露天矿智能爆破管理系统案例

1.案例名称

（1）案例名称

露天矿智能爆破管理系统案例

（2）案例简介

基于对国内外知名矿业企业、学术机构及矿山软件公司的公开技术报告、学术文献与行业综述的深度剖析与整合，通过对比国内外典型智能化露天矿爆破技术，使学生系统

2.案例实际应用效果简介

使学生了解智能爆破技术在技术框架、核心装备、软件平台、应用模式等方面的主要特点、发展阶段与典型应用。拓宽学生学术视野，增强行业自信与使命感。

3.支撑材料

黑岱沟露天煤矿智能爆破管理系统（公开资料）：

黑岱沟露天煤矿采用智能牙轮钻机、炮孔智能测量机器人、智能装药车等设备实现了首动布孔、精准装药、微差爆破。爆破设计软件根据采区地质数据设计爆破方案，钻机根据北斗导航定位精准布孔，智能机器人通过感应探头完成孔深、水深等数据测量，炸药车根据炮孔数据智能装填炸药，1000 多吨炸药根据设定时间参数渐次引爆，采区 35%、近 170 万立方米的岩石就精准排弃到下方采空区。



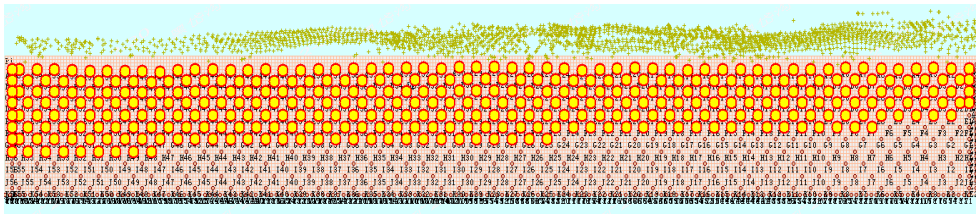
（a）激光扫描仪



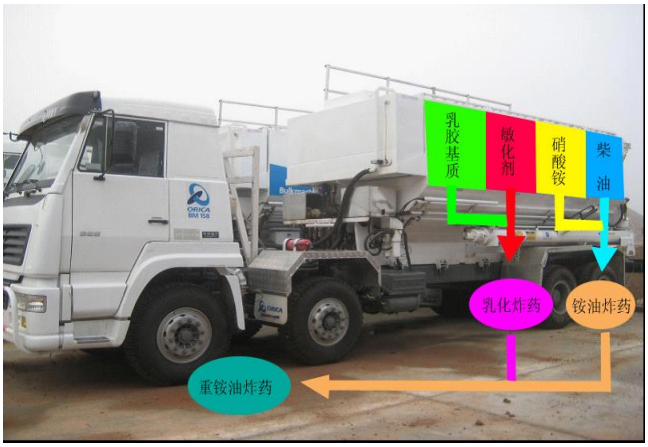
（b）牙轮钻机远程操控



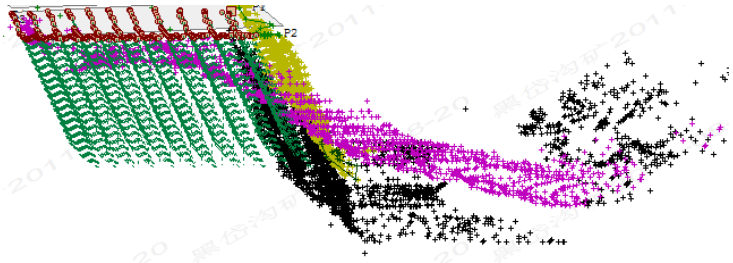
（c）钻孔测量机器人



（d）爆破过程模拟



（e）炸药混装车



（f）爆破前后的爆区形态

图 12-1 抛掷爆破智能施工

三、创新点

（1）内容体系创新：构建“绿色与智能”双核驱动的全链条案例体系。将教学内容项目化重组，淘汰落后、陈旧的内容，适度摆脱教材束缚，增加科技前沿、应用技术背景、发展方向等内容，提高课程教学的系统性、实践性、趣味性和灵活性，构建开放式、可拓展的案例库体系。

（2）教学模式创新：创建“科研驱动、虚实结合、数据赋能”的一体化教学模式。改革教学方法，重构教学流程，建立“课前自主学习、课堂引导教学、课后实践锻炼”的理论-实践一体化教学模式。融合案例式教学、问题式教学、专题讨论式教学、翻转课堂等改革教学方法。

（3）思政设计创新：实现“技术性”与“思想性”的有机深度融合。融入先进理论、技术、装备以及新质生产力、习近平生态文明思想等，丰富课程思政元素，提高教学内容的前瞻性，实现“知识传授+价值引领”双目标，形成了全方位价值塑造体系。

（4）系统思维创新：强化“闭环优化”与“全生命周期”的顶层设计理念。以项目为载体，根据教学内容和课程进度安排，以学生应用能力和实践能力培养为核心，设计符合《爆破工程 B》课程教学要求的案例库框架，开发实践式项目教学案例，构建“问题-技术-方案-评价”完整教学链。