棉花坑矿井采掘设备配置优化方案探讨

秦旭忠[1],宋丽霞[1],李祖荣[2],王 伟[2],张德全[1],张煜晖[1]

(1.中核矿业科技集团有限公司,北京 101149;
2.中核韶关锦原铀业有限公司,广东 韶关 512329)

摘要:棉花坑矿井因采掘设备配置失衡而存在生产效率低和安全性差等问题。根据采掘设备的配置特点及棉花坑矿井的生产现状,构建了基于线性理论的设备配置优化模型,并运用模型对目前 2 种采矿工艺下的主要采掘设备进行了计算和分析;提出了铲运设备无线远程控制、掘进设备精准导向控制和井下电机车有轨智能无人运输的矿井采掘设备智能化建设总体方案,同时给出了不同采矿工艺下主要采掘设备的配置优化方案。

关键词:线性理论;采掘设备;智能化

中图分类号:TD868 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)03-0057-06

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2023.03.13

采掘设备是影响井下采矿效率的重要因素之一[1]。随着人工智能、数据计算和物联网等技术的发展和普及,采掘智能化技术被广泛应用于矿山,成为矿业发展的重要方向之一[2]。针对某金属矿山的人工驾驶有轨运输系统,采用无线通信、激光雷达和安全监测等技术对电机车进行自动控制改造,实现了井下有轨运输系统的智能化、无人化和高效化[3]。国内某金矿运用自动化出矿系统实现了从装矿、运行到卸矿的全流程自动化作业,使矿山生产效率大幅上升[4]。

棉花坑矿井目前主要采用上向水平分层充填法和分段深孔采矿法,其生产过程中的凿岩、爆破和出矿等工序基本依靠人工来完成,存在生产效率低和安全性差等问题。此外,存在各采掘设备在性能上和数量上的配置失衡,这导致井下设备闲置和矿石留滞现象发生,制约了矿井的生产效率。针对棉花坑矿井存在的问题,进行采掘设备的合理配置分析和智能化建设工作,以期实现矿井的绿色高效生产。

1 采掘设备配置现状

目前棉花坑矿井配备的采掘设备有液压凿岩台车、内燃铲运机、运矿卡车等(表 1)。

表 1 棉花坑矿井采掘设备清单

Table 1 Allocation of mining equipment of Mianhuakeng mine

设备分类	设备名称	规格	数量/台
凿岩设备	BoomerK41 型液压凿岩台车		1
	YGZ-90 型凿岩机		4
	YT28 型凿岩机		3
铲运设备	ST2K 型铲运机	2 m^3	1
	WJ-2(B)型铲运机	2 m^3	1
	WJ-1 型铲运机	1 m^3	1
	ACY-15 型铲运机	1.5 m^3	1
运矿设备	UK-8 型运矿卡车	8 t	2
	XYUK-12 型运矿卡车	12 t	2
	ZK3-6 型电机车	250 V	1

目前采掘设备配置存在的问题主要有:1)采掘设备配置失衡。如在分层采矿工艺中,使用的主要采掘设备有 BoomerK41 型液压凿岩台车、ST2K 型铲运机、XYUK-12 型运矿卡车和 ZK3-6 型电机车,上述设备的生产能力在配置上存在一定失衡问题。2)采掘设备对现有采矿工艺的适应性较差。如采用分段深孔采矿法开采 0 m 中段破

收稿日期:2023-03-28

第一作者简介:秦旭忠(1995—),男,青海民和人,硕士,工程师,主要从事采矿工艺和地压控制研究。

通信作者简介:宋丽霞(1983—),女,山西运城人,硕士,高级工程师,主要从事硬岩铀矿高效开采工艺研究。

碎矿体时，若使用现有铲运机在出矿穿脉进行出矿作业，则极易因松散矿堆滑落而引起施工人员伤亡。3)设备自动化和智能化程度低。

2 采掘设备配置优化模型构建

采掘设备的配置受矿井生产能力、矿体规模和施工人员等因素的影响，且各设备在数量和性能上存在线性关系[5]。实现采掘设备的最优配置，实质上是在生产矿量、矿石流转和主井提升等因素的约束下，求解经济效益最优解的过程，是典型的线性规划问题[6]。

2.1 目标函数确定

为提高矿井生产能力，分析优化采掘设备配置，以设备的生产施工能力为目标建立函数[7]。

$$\max Z_i = C_i X_i , \tag{1}$$

式中：Z_i —设备生产能力，t/班；C_i —设备台班生产能力，t/(班·台)；X_i —处于工作状态的设备数量，台。

2.2 设备施工效率计算

2.2.1 凿岩设备

对于矿井凿岩设备，采用经验公式计算其施工效率[8]2。

$$C_d = 144WNTK_1K_2\gamma/\pi D^2A , \tag{2}$$

式中：C_d—凿岩机械生产能力，t/(班·台)；W—凿岩机械冲击功，J；N—凿岩机械冲击器频率，Hz；T—班工作时间，棉花坑矿井采用四六制，即 6 h/班；K_1 —凿岩钻机冲击器冲击能力的利用系数，取 0.6；K_2 —凿岩钻机班工作时间利用系数，取 0.6；γ—矿岩体重，t/m³，根据棉花坑矿岩体重报告取 2.56 t/m³；D—钻孔直径，cm；A—矿岩凿碎比功，J/m³，取 700 J/m³。

将棉花坑矿井现有凿岩设备的相关参数代入式(2)，得出各设备的台班生产能力(表 2)。

表 2 凿岩设备台班生产能力

Table 2 Production capacity of drilling equipments

凿岩设备名称	生产能力/[t/(班·台)]
YGZ-90 型凿岩机	137
YT28 型凿岩机	96
Boomer 系列凿岩台车	386

2.2.2 铲运设备

对于矿井铲运设备，采用经验公式计算其施工效率[8]2。

$$C_c = 3600VTK_3K_4\gamma/t_1K_5 , \tag{3}$$

式中：C_c—铲运机械生产能力，t/(班·台)；V—铲运机械铲斗容积，m³；T—班工作时间，取 6 h/班；K_3 —铲运机机班工作时间利用系数，取 0.8；K_4 —铲运机满斗系数，取 0.9；γ—矿岩体重，t/m³，取 2.56 t/m³；K_5 —原岩在铲斗中的松散系数，取 1.5；t_1 —铲运机 1 次循环所用时间，s，根据现场情况取 400 s。

将棉花坑矿井现有铲运机的相关性能参数代入式(3)，得出各设备的台班生产能力(表 3)。

表 3 铲运设备台班生产能力

Table 3 Production capacity of shoveling equipments

铲运设备名称	生产能力/[t/(班·台)]
ST2K 型铲运机	159
WJ-1 型铲运机	79
ACY-15 型铲运机	119
WJ-2(B)型铲运机	159

2.2.3 运矿设备

对于矿井运矿设备，采用经验公式计算其施工效率[8]2。

$$C_e = 60TQK_6\gamma/t_2 , \tag{4}$$

式中：C_e—机车运矿能力，t/(班·台)；Q—机车载重，t/次；T—班工作时间，取 6 h/班；K_6 —机车工作时间利用系数，取 0.8；γ—矿岩体重，t/m³，取 2.56 t/m³；t_2 —机车运行周期，min，根据现场情况取 20 min。

将棉花坑矿井现有运矿车的相关性能参数代入式(4)，得出各设备的台班生产能力(表 4)。

表 4 运矿设备台班生产能力

Table 4 Production capacity of ore transportation equipments

运矿设备名称	生产能力/[t/(班·台)]
UK-8 型运矿卡车	262
XYUK-12 型运矿卡车	393

2.3 模型约束条件设定

在设定模型约束条件时，一般需要结合矿井的实际情况选取主要影响因素[9-10]。根据棉花坑矿井生产现场的实际情况，选取 4 个方面作为主

要约束。

2.3.1　生产矿量约束

为保证矿井的经济效益，凿岩设备、铲运设备和运矿设备的生产能力均需大于矿井最低生产要求[11]。

$$\begin{cases} C_d N_d \geqslant S_m \\ C_c N_c \geqslant S_m \\ C_e N_e \geqslant S_m \end{cases}, \tag{5}$$

式中：C_d—凿岩机械生产能力，t/(班·台)；N_d—凿岩机械数量，台；C_c—铲运机械生产能力，t/(班·台)；N_c—铲运机械数量，台；C_e—机车生产能力，t/(班·台)；N_e—机车数量，台；S_m—矿井生产要求处理的矿岩量，t/班，根据棉花坑矿井三期设计要求，每班需处理约 150 t 矿岩。

2.3.2　矿流量约束

为避免矿石在井下出现留滞现象，要求运矿能力不低于铲运能力，铲运能力不低于凿岩能力[12]。

$$C_d N_d \leqslant C_c N_c \leqslant C_e N_e , \tag{6}$$

式中：C_d—凿岩机械生产能力，t/(班·台)；N_d—凿岩机械数量，台；C_c—铲运机械生产能力，t/(班·台)；N_c—铲运机械数量，台；C_e—机车生产能力，t/(班·台)；N_e—机车数量，台。

2.3.3　设备利用率约束

富裕系数为设备生产能力与矿井生产要求产能的比值，若其值小于 1，则设备生产能力无法满足矿井生产要求；若其值过大，则会出现设备闲置情况。为了充分利用各设备，将富裕系数约束在 1～1.5[13]。

$$\begin{cases} 1 \leqslant a_d = (144 N_d W N T K_1 K_2 \gamma D^2)/(\pi A S_m) \leqslant 1.5 \\ 1 \leqslant a_c = (3\,600 N_c V T K_4 K_5 \gamma)/(t_1 K_6 S_m) \leqslant 1.5 \\ 1 \leqslant a_e = (60 N_e Q T K_7)/(t_2 S_m) \leqslant 1.5 \end{cases}, \tag{7}$$

式中各符号含义与式(3)～(6)一致。

2.3.4　主井提升约束

目前棉花坑矿井只有 1 个主井，为了避免在井下储存过量矿石，要求井下生产与主井提升的矿石量大致相等[14]。

$$C_e N_e \approx R , \tag{8}$$

式中：C_e—机车生产能力，t/(班·台)；N_e—机车数量，台；R—主井提升能力平均值，t/班，根据现场调查统计约为 310 t/班。

3　模型应用及分析

3.1　上向水平分层充填法

上向水平分层充填法主要用于棉花坑矿井－150 m水平以下的矿体，采矿的基本工艺流程为：凿岩→装药爆破→通风→松石处理→采场出矿(大块岩石进行二次破碎)→充填→下一分层回采，回采过程中涉及的采掘设备及其富裕系数见表 5。

表 5　上向水平分层充填法采掘设备及富裕系数

Table 5　Mining and driving equipment and affluence factor of upward horizontal slicing and filling method

设备型号	数量/台	富裕系数
BoomerK41 型凿岩台车	1	2.58
YT28 型气腿式凿岩机	3	1.92
XYUK-12 型运矿卡车	2	2.01
UK-8 型运矿卡车	2	1.34
ST2K 型铲运机	1	1.00

由表 5 和模型可得出：1)当 BoomerK41 型凿岩台车数量为 1 台时，完全能满足矿井生产要求，通过利用率约束可知，该设备存在一定闲置。2)YT28 型气腿式凿岩机作为凿岩工序的辅助性设备，其数量为 3 台时，基本能满足矿井生产要求。3)当 ST2K 型铲运机数量为 1 台时，其富裕系数为 1.00，说明在生产中需要适当增加设备数量或性能。4)当 UK-8 和 XYUK-12 型运矿卡车的数量均为 2 台时，完全满足矿井生产要求。5)根据矿流量约束，要求 BoomerK41 型凿岩台车和 ST2K 型铲运机的数量比约为 1∶2；但考虑到棉花坑矿井采场规模较小，无法实现多辆铲运机同时运转，因此只能通过提高单台铲运机的生产能力来实现采掘设备间的合理配置。6)根据主井提升约束，要求 XYUK-12 型运矿卡车的数量约为 2 台；但随着开采深度的增加，运距不断增大，相应的富裕系数会逐渐变小，最终会出现主井闲置的现象，因此必要时需增加运矿卡车的数量。

3.2　分段深孔采矿法

分段深孔采矿法主要用于 0 m 水平南部的破碎矿体，采矿的基本工艺流程为：凿岩→装药爆破→通风→松石处理→铲运机出矿(大块岩石进

行二次破碎)→最终集中充填,回采过程中涉及的采掘设备及其富裕系数见表 6。

表 6 分段深孔采矿法采掘设备及富裕系数

Table 6 Mining and driving equipment and affluence factor of sublevel deep hole mining method

设备型号	数量/台	富裕系数
YGZ-90 型凿岩机	4	3.65
ST2K/2 m^3 型铲运机	1	1.28

由表 6 和模型可得出:1)当 YGZ-90 型凿岩机数量为 4 台时,完全满足矿井生产要求,且存在一定的闲置情况。2)当 ST2K 型铲运机数量为 1 台时,其富裕系数为 1.28,基本满足矿井生产要求。3)根据矿流量的约束,要求 YGZ-90 型凿岩机和 ST2K 型铲运机的数量比约为 1∶3;考虑到现场操作 YGZ-90 型凿岩机的人员较少,仅能保证 1～2 台设备的运转,因此铲斗容积为2 m^3的铲运机基本能满足矿流量约束。4)根据该工艺的要求,铲运机需要在破碎矿堆下完成出矿,必要时还需进入采空区内部完成最后矿体的清理和废石充填工作,极易出现松散矿堆滑落、采空区顶板冒落等危害,因此需提高铲运机施工的智能化和无人化程度。

4 采掘设备配置优化方案

4.1 主要采掘设备智能化建设总体方案

4.1.1 铲运设备无线远程控制

通过分析可知,在分层充填采矿工艺中,需提高铲运机的生产能力以实现采掘设备的合理配置;在分段深孔采矿工艺中,需提高铲运机的智能化程度以保证施工人员的安全。因此,对现有的铲运机进行无线远程控制改装,在不改变铲运机手动操作习惯的前提下,通过无线通信、电子控制、低延时视频传输等技术实现车辆的远程无线遥控驾驶。

改装后的铲运机可完成:1)分层充填采矿工艺下的高效出矿;2)分段深孔采矿工艺中破碎矿堆下的铲运出矿;3)危险采空区下充填废石的铲运和平场等。

4.1.2 掘进设备精准导向控制

棉花坑矿井的矿体具有厚度薄、品位低、规模小和破碎等特点,在开采过程中极易因爆破质量低而导致大量资源的贫化和损失[15]。因此,为了提高爆破质量,实现该类矿体的精细化开采,运用无线通信、电子控制和计算机等技术对矿井现有的 Boomer 系列凿岩台车进行智能化控制改装,通过提高钻孔精度改善爆破质量。

设备改装完成后可实现以下功能:1)施工人员无需进入危险工作面,只需在巷道外或地表通过计算机远程操作,进一步提高了井下施工的安全性;2)系统可自动识别设计参数,并根据参数自动调整钻杆完成钻孔;3)系统实时监控钻孔进度,并在显示器上显示孔轴的倾向、倾角、孔深和孔位坐标等重要参数。

4.1.3 井下电机车有轨智能无人运输

目前棉花坑矿井在－150 m 水平集中出矿。为提高井下的出矿效率,实现矿石的高效运转,对现有的电机车出矿系统进行改装升级,综合运用无线通信、自动化和网络等多个系统实现智能化和无人化出矿。升级改装完成后电机车具有无人驾驶、自动装矿、自动运输、智能避让和故障监测等功能。

4.2 主要采掘设备配置优化

采掘设备的配置优化可从设备数量、设备性能和设备安全性等方面考虑[16]。通过模型分析可看出,在目前的采矿工艺下,棉花坑矿井的各采掘设备除铲运机外富裕系数均大于 1,说明在数量和性能上基本满足矿井的日常生产要求。因此,主要从设备安全性方面进行采掘设备的配置优化研究。通过运用远程智能控制等技术对现有设备进行智能化改装,实现设备的无人化、远程化和精细化操作,从而提高井下的施工质量和安全程度[17]。

4.2.1 上向水平分层充填法

在该采矿工艺下改装优化的采掘设备主要有凿岩台车、铲运机和电机车,优化后单一采场所需的主要采掘设备见表 7,采矿的基本工艺流程为:设计人员完成炮孔设计→改装后的 BoomerK41 型凿岩台车识别参数并完成精准钻孔→装药→爆破→通风→松石处理→ST2K 型铲运机远程铲运矿石→ST2K 型铲运机远程充填废石→运矿卡车运矿石至溜井→－150 m 有轨智能电机车统一出矿。

表 7　优化后上向水平分层充填法单一采场主要采掘设备

Table 7　Optimized single stope mining equipment of upward horizontal slicing and filling method

设备名称	数量/台	操作人数/个
BoomerK41 型凿岩台车	1	1
ST2K 型铲运机	1	1
ZK3-6 型电机车	1	0

4.2.2　分段深孔采矿法

在该采矿工艺下改装优化的采掘设备主要为铲运机和电机车，优化后单一采场所需的主要采掘设备见表 8，采矿的基本工艺流程为：施工中深孔→装药→爆破→通风→松石处理→ST2K 型铲运机远程铲运矿石至溜井→－150 m 有轨智能电机车统一出矿→统一集中充填。

表 8　优化后分段深孔采矿法单一采场主要采掘设备

Table 8　Optimized single stope mining equipment of sublevel deep hole mining method

设备	数量/台	操作人数/个
YGZ-90 型凿岩机	1	2
ST2K 型铲运机	1	1
ZK3-6 型电机车	1	0

5　结论

1）根据采掘设备配置优化的特点，结合棉花坑矿井的实际生产现状，构建了基于线性理论的设备配置优化模型；并运用优化模型分析得出矿井现有的各采掘设备在性能和数量上基本满足矿井的生产要求，甚至存在一定富裕。

2）从采掘设备的安全性方面考虑，提出了铲运设备无线远程控制、掘进设备精准导向控制和井下电机车有轨智能无人运输的矿井采掘设备智能化建设总体方案；并针对不同采矿工艺，给出了单一采场的主要采掘设备配置优化方案。

参考文献：

[1] 邓涛. 滨湖煤矿薄煤层智能化开采技术体系及应用研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2021.

[2] 李燕平. 井下智能化开采技术分析与展望[J]. 中国石油和化工标准与质量，2020，40(10)：184-185.

[3] 张鑫. 某金属矿井下有轨智能无人运输系统研究与应用[J]. 现代矿业，2022，38(9)：189-193＋199.

[4] 梁新民，王怀勇，陈小伟，等. 铲运机自动化出矿系统在上向分层充填采场的应用研究[J]. 有色设备，2021，35(3)：68-75.

[5] 刘猛，黄春，王京京，等. 基于混合整数线性规划的塔吊选型与布置优化[J]. 土木工程与管理学报，2020，37(2)：142-150.

[6] 何巧婷，周利，侯梦曦，等. 改进的混合整数线性模型优化化工厂多层设备布局[J]. 计算机与应用化学，2019，36(4)：372-378.

[7] 白晓阳，樊永利. 大型露天矿山设备选型与优化配置分析[J]. 中国设备工程，2021(15)：96-97.

[8] 康海岳，周科平，高如高，等. 矿山设备静态—突变综合优选模型及其应用[J]. 黄金科学技术，2016，24(2)：101-107.

[9] 母传伟. 基于线性规划单纯形法优化矿山岩石运输调配[D]. 秦皇岛：燕山大学，2016.

[10] 陈忠强，王李管，熊书敏，等. 基于模糊预测性线性规划的矿山产能分配方案优化分析[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2014，45(9)：3166-3173.

[11] 王博. 石灰石露天矿开采技术及设备优化配置策略[J]. 设备管理与维修，2021(24)：118-119.

[12] 钱坤，李振生，郑可心，等. 矿山机械设备在铁矿中的合理运用探讨[J]. 中国金属通报，2019(9)：81＋83.

[13] 杜景军，杜鹃，宁振明，等. 地下矿山粗破系统设备配置方案分析[J]. 矿山机械，2017，45(6)：81-82.

[14] 王纪瑶. 矿山机械设备在铁矿中的合理运用[J]. 现代制造技术与装备，2015(5)：90-91.

[15] 蒋威杰. 缓倾斜破碎薄矿体高效采矿技术及应用[J]. 中国金属通报，2022(7)：22-24.

[16] 陈发兴. 浅谈地下金属矿山采掘机械化及智能化[J]. 有色金属设计，2020，47(4)：1-3＋6.

[17] 牛永明，高明. 现代化特大矿井采掘设备管理模式的探索与研究[J]. 中国煤炭，2019，45(2)：130-132.

Discussion on Optimization Scheme of Mining Equipment Allocation in Mianhuakeng Mine

QIN Xuzhong[1], SONG Lixia[1], LI Zurong[2], WANG Wei[2], ZHANG Dequan[1], ZHANG Yuhui[1]
(1. China Nuclear Minging Science and Technology Corporation, CNNC, Beijing 101149, China;
2. Shaoguan Jinyuan Uranium Co., Ltd., CNNC, Shaoguan 512329, China)

Abstract: The problems of low production efficiency and poor safety exist in Mianhuakeng mine due to the imbalance of mining equipment allocation. According to the characteristics of mining equipment allocation and the production status of Mianhuakeng mine, an optimization model of mining equipment allocation based on linear theory is constructed, and the main mining equipment under two mining technologies are calculated and analyzed by using the model. The overall plan of intelligent construction of mining equipment in Mianhuakeng mine is proposed, which includes wireless remote control of shoveling equipment, precise guidance control of driving equipment and intelligent unmanned transportation of underground electric locomotive and rail. Meanwhile, the optimization plan of main mining equipment configuration under different mining technology is given.

Key words: linear theory; mining equipment; intelligentization

(Continued from page 56)

Application of Frequency Converter Based on Modbus Communication in an In-situ Leaching Mine

ZHUANG Zhixu, LI Xilong, CAO Junpeng, TIAN Shuang, ZHOU Wenmeng
(Tongliao Uranium Co., Ltd., CNNC, Tongliao 028000, China)

Abstract: The automatic industrial control system is often used in the in-situ leaching and mining industry. With the increase of the monitoring and control equipment in the in-situ leaching mine, the traditional analog communication has the disadvantages of high cost of line laying and large number of I/O modules. Modbus communication mode is used for the frequency converter in the well pad control system of an in-situ leaching mine in Inner Mongolia to complete the remote acquisition and control of its parameters and reduce the project construction cost. The remote one-button start and stop of the frequency converter and frequency regulation at the uranium leaching monitoring center in a certain place are realized, which further improves the work efficiency.

Key words: in-situ leaching uranium; Modbus communication; frequency converter