



中国煤炭学会科技系列丛书

中国煤炭学会 编

第十届全国煤炭工业
生产一线
青年技术创新文集

**DISHIJIEQUANGUOMEITANGONGYE
SHENGCHANYIXIAN
QINGNIANJISHUCHUANGXINWENJI**

 煤炭工业出版社

中国煤炭学会科技系列丛书

第十届全国煤炭工业生产一线 青年技术创新文集

中国煤炭学会 编

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

第十届全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集/
中国煤炭学会编. --北京: 煤炭工业出版社, 2016
(中国煤炭学会科技系列丛书)
ISBN 978-7-5020-5487-8

I. ①第… II. ①中… III. ①煤矿开采—文集
IV. ①TD82-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 206976 号

第十届全国煤炭工业生产一线青年技术创新文集

编 者 中国煤炭学会
责任编辑 曲光宇 赵 冰 梁晓平
责任校对 姜惠萍 孔青青
封面设计 王 滨

出版发行 煤炭工业出版社(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
电 话 010-84657898(总编室)
010-64018321(发行部) 010-84657880(读者服务部)

电子信箱 cciph612@126.com

网 址 www.cciph.com.cn

印 刷 北京玥实印刷有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 889mm×1194mm¹/₁₆ 印张 36³/₄ 字数 1070 千字

版 次 2016 年 9 月第 1 版 2016 年 9 月第 1 次印刷

社内编号 8350 定价 110.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换,电话:010-84657880

编 审 委 员 会

主 任 王显政

副 主 任 田 会 刘 峰 刘国林

委 员 张少春 尚建选 马宏伟 张 群 宋 飞 姜庆乐

廖永平 熊志军 丁言伟 岳燕京 白希军 王 蕾

张 哲

主 编 刘 峰 刘国林

副 主 编 熊志军 丁言伟

编审人员 陶 赛 赵 奇 曲光宇 朱晓莉

目次

一、采煤生产

单一薄煤层露天开采新工艺探讨	刘光伟 (3)
孤岛工作面微震特征参数识别研究	陈 鹏 陈学习 (14)
复杂地质条件下综放工作面布置方式研究	李振安 (21)
基于非线性动力学的急倾斜特厚煤层超前预爆破弱化 分析	崔 峰 来兴平 曹建涛 单鹏飞 (26)
大同矿区“三硬”地质条件下大采高回采关键技术	郭远游 朱芳红 (39)
戊组煤层开采对上覆煤岩影响效果研究	齐晓菲 (45)
深井超高水充填工作面无煤柱开采技术研究	陈 锋 (54)
煤矿采动区地面“L”型井抽采技术及现场试验	李日富 孙东玲 付军辉 (59)
征地制约影响下露天矿运煤系统方案 研究	张 亮 马 力 钮景付 杨 洋 高富强 刘月亭 (65)
季节性剥离露天矿采场露煤方案优化研究	张周爱 黄玉凯 (72)

二、井巷施工

细径超高热处理锚杆在煤矿支护中的应用研究	吴建星 (81)
软岩矿井运输大巷护巷煤柱宽度优化设计	张连伟 杨思远 (90)
龙口海域极软地层围岩变形机制与钢管混凝土支架支护 技术研究	王 波 王 军 单仁亮 (97)
针对厚煤层应力集中巷道支护技术的优化分析	刘大江 (107)
采动影响下断层赋存带巷道矿压动力显现 特征	王宏伟 姜耀东 李彦伟 邓代新 林志男 (112)
基于 CBR 的煤矿回采巷道支护智能决策系统研究与实现	王向前 孟祥瑞 (124)
淮南矿区深部典型回采巷道围岩变形破坏特征与稳定性 控制研究	陈登红 华心祝 杨 科 (133)
充填采场覆岩运动的时间相依性分析及试验研究	赵家巍 赵利涛 杨洪增 (142)
赵家寨煤矿“三软”煤层巷道锚网支护技术应用研究	于 涛 (149)
特厚煤层回采巷道支护设计与矿压观测研究	秦庆举 杨 眷 (158)
综采工作面过斜交老巷技术研究	任 刚 陈 利 陆 军 (167)
高应力穿层软岩巷道注浆加固关键技术研究	韩金生 (173)
基于巷道变形特征的锚网索支护技术研究	王 超 李 明 徐志超 (178)
煤矿井筒多管路筒支梁受力分析	武 讲 (184)
“联合支护”技术在平煤四矿丁戊组石门的研究与应用	赵朋朋 (189)

三、煤矿安全

贵州煤矿安全生产形势及煤层赋存特性研究	李青松 (197)
深部开采底板岩体固流耦合分析	孙文斌 郭惟嘉 刘进晓 周少良 (201)
浅埋煤层采空区外部漏风动力及防治技术	陈万胜 (206)
自动调压技术在综放工作面瓦斯治理工作中的研究与应用	翟伟 (211)
PDCA 循环法在急倾斜煤层冲击地压风险预控中的应用实践	曹民远 (218)
皖北矿区主要水文地质问题及其对策	胡荣杰 段中稳 孙本魁 (226)
“七强一大”在鹤岗矿区兴安煤矿综采工作面防治冲击地压中的推广应用	刘洋 (235)
采空区不同漏风下的采煤面最小防火推进度 研究	张巨峰 杨峰峰 郑超 谢亚东 张建江 苗在全 (241)
铜锣坪煤矿通风系统改造效果分析	黄伟铭 (247)
急倾斜煤层综采采空区推底治理技术研究	刘安福 周忠国 (249)
峰峰集团瓦斯治理示范矿井建设研究与实践	王金宝 (254)
矿井水情监测监控预警系统设计开发与应用	杨晓东 (259)
基于能位测定和 SF ₆ 示踪技术对谢桥煤矿 1321(3) 工作面采空区及小煤柱漏风 状态研究	聂士斌 戴广龙 (266)
煤层群采动裂隙条件下瓦斯卸压抽采技术模式及应用	田富超 (273)
低透气性煤层卸压带范围及瓦斯抽放效果考察	程龙 (283)
三软煤层大倾角综放工作面安全防护措施探索	杨鲁彬 (287)
瓦斯含量计算方法的对比研究与影响因素分析	覃佐亚 (292)
高压水射流卸压增透瓦斯治理技术在国投新集高突区域消突研究与应用	常先隐 童闯 (296)
“U+I”型通风下综放工作面采空区遗煤及支架上方煤壁瓦斯涌出及运移 规律研究	刘彦青 张浪 李伟 桑聪 张书林 (308)
赵各庄矿矿井通风系统优化研究	王东辉 (319)
宽沟煤矿 W1121 回采工作面冲击地压防治研究	张传玖 陈建强 (328)
矿井综合防尘技术研究	付伟 (336)
水质分析在验证老空水是否疏放完毕中的应用	赵金龙 (340)
基于物联网的数字式煤矿安全监测监控技术研究	孟庆勇 (345)

四、机电运输

基于 PIC 单片机的锂电池管理系统的开发	张逸群 (355)
口孜东矿地面生产集控系统开发及应用	张志峰 (362)
浅谈福建铜锣坪煤矿低成本主要通风机无人值守远程监控系统的设计及实现	李燕福 (368)
基于物联网的煤矿井下大型设备接近监测技术研究	王红尧 田劼 程新 孟国营 (375)
DMI44 × 132 型筛网沉降过滤离心机的应用研究	邱广雷 (383)
煤岩体介质中无线通信频率及衰减机制研究	王伟峰 李珍宝 马砺 何源 (388)
煤矿井下低压电磁兼容技术研究及应用	孔二伟 (396)
基于三维电子罗盘的矿用本安型瞬变电磁天线姿态角测量仪研制	许洋铖 吴燕清 (402)
瞬变电磁虚拟波场反演成像方法及其在井下超前探测中的应用效果	范涛 (407)
综采工作面供电方式探讨	张志超 魏亚东 孟匡匡 尚平 (415)

基于 PLC 的顺煤流集控系统在杨营矿井的应用	刘顺强	王新华	吴小伟	(422)
综放工作面 ZF10000/23/35 型液压支架快速稳装技术的应用			郭艳军	(427)
综采放顶煤工作面处理重型支架倒架方法研究			关佳林	(430)
基于电磁波测距的矿井目标精确定位技术研究	李晨鑫	温良	姚永辉	孟庆勇 (434)
液压支架立柱导向套拆装机的设计			徐伟	(443)

五、其 他

基于半平面体理论的煤柱底板应力传递规律研究	朱志洁	张宏伟	霍丙杰	陈 莹	(453)	
基于移动终端的矿山安全运维体征数据可视化软件	鲁法明	王艳晓	崔海东	曾庆田	(462)	
重介系统黏度改善技术在林西矿选煤厂的应用				王永成	(468)	
大跨度顶空采煤顺槽泡沫混凝土充填技术应用				姚 刚	(471)	
湘中、湘东南坳陷有机质热演化主控因素及非常规天然气勘探						
方向研究	秦明阳	郭建华	蔡宁波	郑振华	张良平 (478)	
厚松散层倾斜煤层开采地表沉陷规律研究				康新亮	(489)	
煤层气地面负压排采模式研究及应用				牛国斌	(499)	
新疆维吾尔自治区矿山环境遥感监测方法与实践			强建华	于 浩	(505)	
张小楼千米深井开采地表移动规律实测研究				王 琳	(513)	
富氧再生技术在煤基甲醇制烯烃装置的应用				孙保全	(519)	
基于光谱定量的矿井极性气体特征吸收峰提取				王连聪	(526)	
变面长采场顶板围岩塑性区的渐变扩展效应		王新丰	贺龙祥	龙海洋	(535)	
电磁法技术联合探测矿井水害研究	邱占林	吴超凡	鲍道亮	郭玉森	刘耀华	黄聪明 (541)
新街一井煤炭与天然气资源协调开发方案						
研究	刘 兵	崔安义	谢松岩	许茂业	姬文瑞 (547)	
利用波阻抗反演重构地震数据提高煤层厚度预测精度				孙 喆	(553)	
神东煤泥处置常见问题分析及措施				朱子祺	(561)	
超高速数字图像相关实验的参数优化	杨立云	王学东	孙金超	马佳辉	(566)	
附录 未入选的论文					(575)	

一、采煤生产

单一薄煤层露天开采新工艺探讨

刘 光 伟

(辽宁工程技术大学矿业学院)

摘 要 针对单一薄煤层赋存矿山,露天开采剥采比大;井工开采效率低,造成资源浪费。为尽可能回收矿山资源,提出了一种吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采新工艺;系统研究了该工艺条件下,沟底开采参数、分条区宽度、长度、机械铲与吊斗铲跟进距离;提出分条区开采煤量接续方案;优化研究开采过程中运输系统及吊斗铲走行方式;并对国外某露天煤矿进行实例研究。结果表明,对于单一薄煤层露天矿,吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采工艺具有:系统可靠性较高、生产成本低、地表扰动小等特点,可有效保护环境,提高劳动生产率,最大限度回收矿山资源;实现科学、环保、绿色、智能一体化开采,同时对丰富和发展采矿理论具有重要的意义。

关键词 吊斗铲 端帮采煤机 露天矿 开采工艺

0 引言

我国薄煤层储量丰富,分布广泛,由于薄煤层开采技术难度大、开采成本高等因素限制,往往对单一薄煤层不进行开采。若采用露天开采,剥采比大,需移运大量剥离物,占用土地,破坏环境,违背了露天矿山绿色开采发展的新理念^[1-3];若采用矿井开采,开采难度大、工人劳动强度大、生产人员作业条件差,设备生产效率低,同时煤层顶底板损失,回采率低,造成资源浪费。随着我国中厚煤层储量减少及煤炭资源的日趋贫乏,为提高煤炭资源回收率,尽可能回收资源^[4-6],国家和煤炭生产企业越来越重视薄煤层的设计规划、科学合理开采。

目前国内学者针对薄煤层开采进行了相关研究;李建平^[7-8]等人介绍了我国薄煤层开采设备的现状和发展趋势,分别对薄煤层采煤机、刨煤机、螺旋钻采煤机的采煤工艺特点、主要设备的技术参数作了说明,并提出其存在的主要问题和的发展趋势;徐刚^[9]展望了我国综采技术的发展趋势,以高效集约化生产为发展方向,以安全、高效、高采出率、环境友好为目标,以自动化与信息化为依托,从而提高设备的可靠性,提高生产效率。国内学者研究内容主要侧重于井工矿最下一薄煤层开采,对于赋存较浅的单一薄煤层开采技术尚未做细致研究。

本文针对单一薄煤层开采过程中剥采比大、回采率低、资源浪费等问题,提出了一种新的开采方法,将露天开采与井工开采工艺相结合,即吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采综合工艺(图1)。该方法大大减少了露天矿山剥离量,降低矿山开采扰动对周围矿山环境的影响;同时端帮采煤机回采薄煤层,提高劳动生产率,增加了矿山经济效益^[10-11]。

1 吊斗铲端帮采煤机开采工艺

吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采新工艺是指:在单一煤层矿田内,采用吊斗铲掘沟,机械铲

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51304104);辽宁省煤炭资源安全开采与洁净利用工程研究中心开放基金资助课题(TU15KF07)。

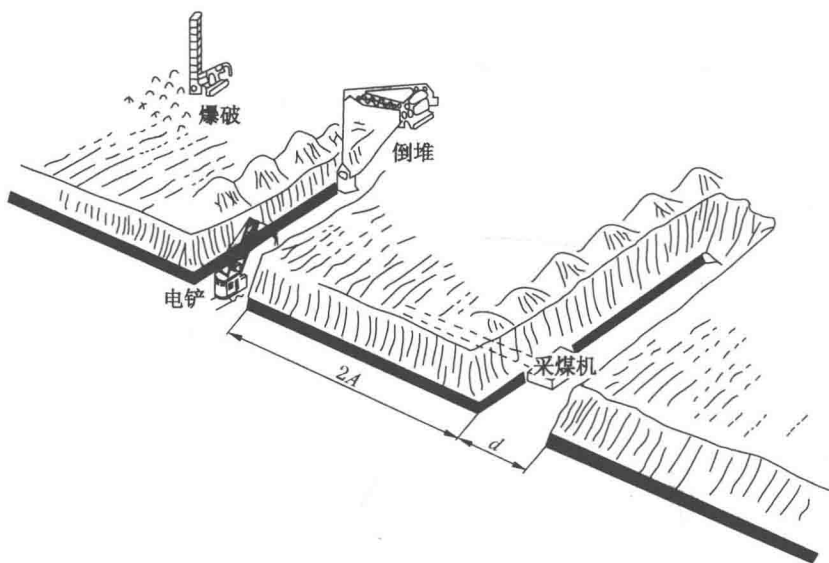


图1 吊斗铲—机械铲—端帮采煤机开采示意图

回采沟底煤量，形成端帮采煤工作面及运煤系统通路，端帮采煤机垂直掘沟方向，回采层状矿体。该开采工艺将露天与井工采煤工艺相结合，系统可靠性较高，提高煤炭回采率，实现资源回收最大化。吊斗铲机械铲采煤机开采方案适用于单一薄煤层、剥采比大于经济剥采比的矿山；该方案可实现剥离物横向移运，将采掘、运输、排土作业于一体，具有技术可靠、生产成本低等优点^[12-15]；分条区开采，与传统露天开采相比，最大限度减少了剥离量，有效减少地表扰动，有利于保护环境，减少地表平整治理费用，将矿区复垦工作动态地贯穿于整个采矿生命周期中，进行动态复垦规划，实现矿山绿色开采；端帮采煤机开采薄煤层，实现无人工作面开采，极大地提高劳动生产率，开采过程中留煤柱，减少地表下沉，及时填充，防止煤炭自然；减少对环境的影响。从而实现科学、环保、绿色、智能一体化回收薄煤层资源。

1.1 薄煤层分条区剥采比

薄煤层条区生产剥采比是指开采每一条带过程中，发生的剥离量与回采煤量之间的比值。分条区开采过程中，发生剥离量即为掘沟工程量。

若地表高低起伏，掘沟工程量受到地表影响，其横断面面积沿掘沟纵向不等，掘沟工程量体积由若干个垂直纵轴的断面积乘以相邻断面之间距离来计算。吊斗铲分条带掘沟如图2所示。条区剥离量 V_k 及生产剥采比 n 的计算式为

$$V_k = \frac{S_0 + S_1}{2} L_1 + \frac{S_1 + S_2}{2} L_2 + \frac{S_2 + S_3}{2} L_3 + \cdots = \sum_{i=1}^n \frac{S_{i-1} + S_i}{2} L_i \quad (1)$$

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_{i-1} + S_i}{2} L_i}{(A + d) h_{\text{煤}} \gamma \eta_{\text{yl}}} \leq n_j \quad (2)$$

为简化计算，假设地表平坦，条区剥采比如式(3)所示。为保证在该工艺系统条件下，开采此部分薄煤层经济合理，根据式(3)推导可知，当剥离物与煤层厚度关系满足式(4)时，可以采用分条区开采工艺。

$$n = \frac{[d + (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}}) \cot \alpha] \times H_{\text{剥离}}}{(A + d) h_{\text{煤}} \gamma \eta_{\text{yl}}} \leq n_j \quad (3)$$

$$\frac{H_{\text{剥离}}}{h_{\text{煤}}} \leq \frac{n_j \times (A + d) \gamma \eta_{yl}}{d + (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}}) \cot \alpha} \quad (4)$$

式中 S_i ——掘沟沟道横截面面积, m^2 ;
 L_i ——相邻沟道横截面之间影响距离, m ;
 A ——条带区宽度, m ;
 d ——沟底宽度, m ;
 $h_{\text{煤}}$ ——煤层厚度, m ;
 γ ——煤容重, t/m^3 ;
 η_{yl} ——端帮采煤机回采率;
 n_j ——经济合理剥采比, m^3/t ;
 $H_{\text{剥离}}$ ——剥离物厚度, m ;
 α ——沟道坡面角, $(^\circ)$ 。

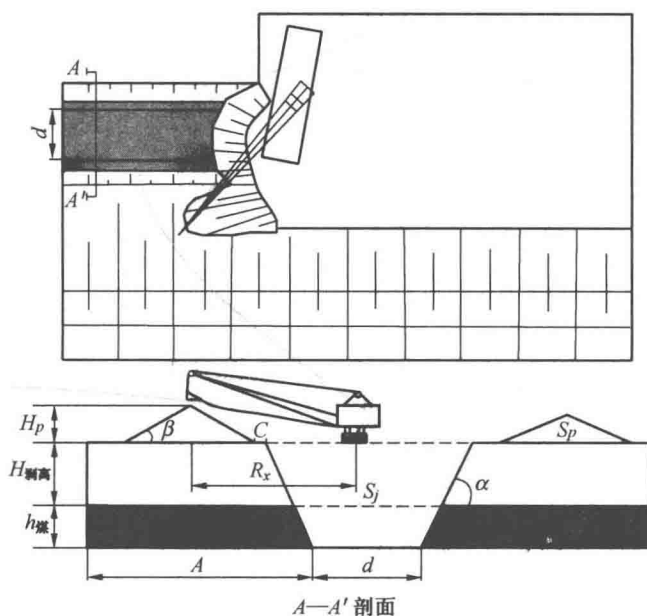


图2 吊斗铲分条带掘沟示意图

1.2 吊斗铲端帮采煤机开采参数优化研究

1.2.1 沟底宽度确定

(1) 沟底宽度与采掘设备关系。假设掘沟过程中吊斗铲位于沟道中心线上, 可向沟道两侧排土 (图3), 则沟道沟底宽度与设备参数之间需满足如下关系式:

$$R_s \geq \frac{d}{2} + C + (h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}}) \cot \alpha + H_p \cot \beta \quad (5)$$

$$S_p = S_j \times K_s \quad (6)$$

$$S_j = [d + (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}}) \cot \alpha] H_{\text{剥离}} \quad (7)$$

$$H_p \geq \sqrt{\frac{S_j K_s}{2 \cot \beta}} \quad (8)$$

$$d \leq \frac{2H_p^2 \cot \beta}{K_s H_{\text{剥离}}} - (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}}) \cot \beta \quad (9)$$

式中 R_x ——吊斗铲卸载半径；
 H_p ——排土堆高度；
 β ——排土堆稳定角，(°)；
 C ——安全距离；
 S_p ——排土堆排断面面积， m^2 ；
 K_s ——爆破松散系数。

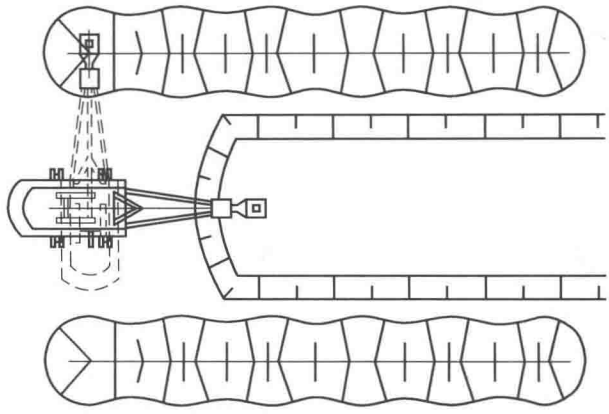


图3 吊斗铲掘沟两侧排土示意图

吊斗铲倒堆采煤机分条区开采工艺沟底宽度不仅需要满足倒堆设备参数的条件，同时要满足不同运输方式条件下的沟底宽度。

(2) 沟底宽度与运输方式关系。采用一台端帮采煤机，向两侧煤工作面进行回采；回采的煤炭直接由单斗卡车外运；沟底采用回返式调车方式。该运输方式条件下，沟底宽度如式(10)所示；单台双向端帮采煤机卡车运输沟底宽度如图4所示。该运煤工艺系统，汽车运输机动灵活，适用于端帮采煤机走行的要求。但由于装车过程的间断性，自卸卡车的入换和等待，限制了端帮采煤机连续作业的特点，降低了端帮采煤机的效率。

$$d = 2R + b_{\text{车宽}} + b_{\text{采煤机宽}} + L_{\text{胶带}} + 2e \tag{10}$$

综上所述，吊斗铲倒堆采煤机分条区开采，沟底宽度应同时满足式(11)。

$$2R + b_{\text{车宽}} + b_{\text{采煤机宽}} + L_{\text{胶带}} + 2e \leq d \leq \frac{2H_p^2 \cot \beta}{K_s H_{\text{剥离}}} - (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}}) \cot \beta \quad (\text{卡车运输}) \tag{11}$$

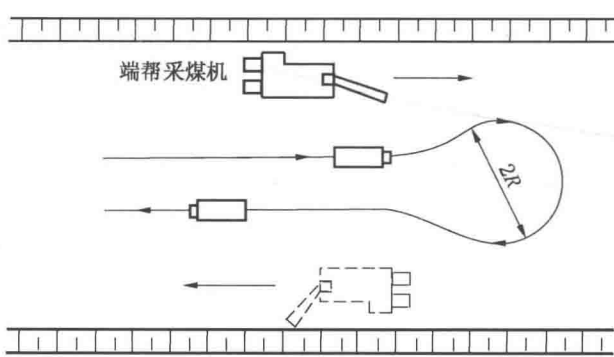


图4 回返式调车沟底宽度示意图

1.2.2 分区开采条带宽度及机械铲跟进距离

(1) 分区条带宽度确定。分条区宽度由端帮采煤机煤臂长度确定，根据采煤机煤臂长度划分条区。分条区条带宽度如图 5 所示。

(2) 机械铲与吊斗铲跟进距离研究。吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采工艺条件下，为避免坑底无存煤的出现，当吊斗铲故障，机械铲正常工作时，坑底煤量 M 无法满足的情况下，确定吊斗铲与机械铲的合理跟进距离，保证沟底足够的备采煤量。机械铲与吊斗铲跟进距离如图 6 所示。

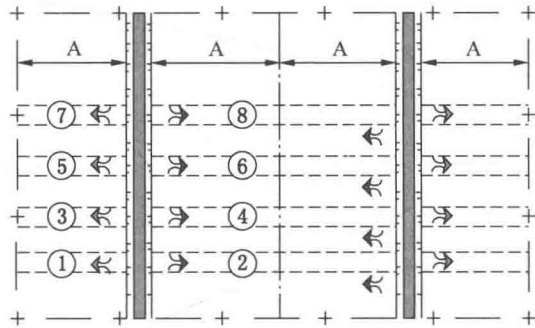


图 5 分条区条带宽度示意图

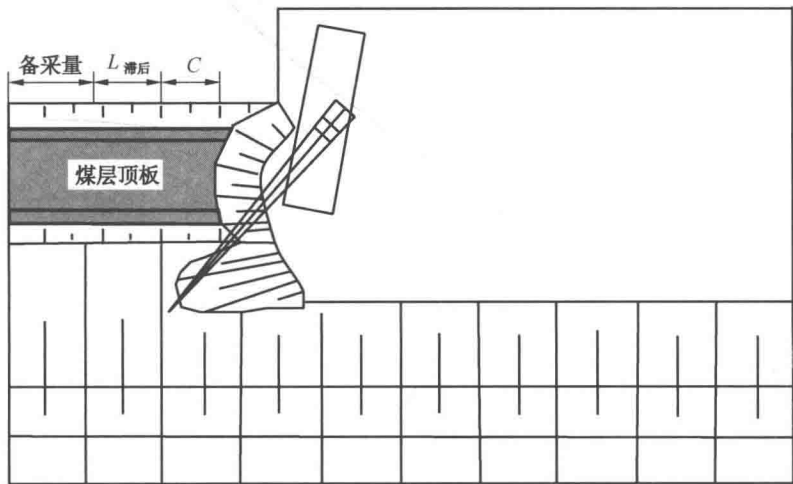


图 6 机械铲—吊斗铲跟进距离示意图

为了保证吊斗铲倒堆与采煤作业的有序衔接，应使吊斗铲完成一个纵向作业循环的时间与机械铲完成一个纵向循环的时间相等。吊斗铲完成一个作业循环时间 T_1 见式 (12)；吊斗铲出现故障，滞后距离见式 (13)。机械铲与吊斗铲跟进距离 $L_{跟进}$ 见式 (14)。

$$T_1 = \frac{[d + (2h_{煤} + H_{剥离}) \cot \alpha] H_{剥离} L K_s^2 t_x}{3600 \lambda E K_m} \tag{12}$$

$$L_{滞后距离} = \frac{L T_{维修}}{T_1} \tag{13}$$

$$L_{跟进} = L_{滞后距离} + C + L_{备采煤量} \tag{14}$$

式中 L ——吊斗铲完成一次作业循环距离, m;
 t_x ——吊斗铲一个挖掘周期的循环时间, h;
 λ ——吊斗铲有效利用率;
 E ——吊斗铲斗容, m^3 ;
 K_m ——吊斗铲满斗系数;
 $T_{\text{维修}}$ ——吊斗铲维修时间, h。

1.2.3 分区开采沟道长度的确定

吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采工艺条件下, 各个工艺环节开采相互影响较小; 吊斗铲掘沟后, 进行下一条带的掘沟工程; 沟底露煤由机械铲进行回采, 机械铲将沟底露煤回采结束后, 形成满足端帮采煤机作业及运输的沟道。露天矿年生产能力 A_p 计算式为

$$A_p = A_{\text{采煤机}} + A_{\text{电铲}} = (2A - NW)h_{\text{煤}}L_{\text{分}}\gamma + 2dh_{\text{煤}}L_{\text{分}}\gamma \quad (15)$$

式中 N ——分区开采数;
 W ——煤柱宽度, m;
 $L_{\text{分}}$ ——分区开采沟道长度, m。

为形成该采煤系统, 吊斗铲需完成两条沟道作业工程量, 吊斗铲完成两条沟道的剥离量如式(16)所示。

$$Q = \frac{2A_p[d + (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}})\cot\alpha]H_{\text{剥离}}}{(2A - NW + 2d)h_{\text{煤}}} \quad (16)$$

吊斗铲理论年剥离量 Q_w 如式(18)所示。

$$t_{sh} = t + \frac{2(\alpha_{sh} - \alpha)}{\omega} \quad (17)$$

$$Q_w = \frac{3600T_bEK_w}{t_{sh}} \quad (18)$$

式中 t_{sh} ——吊斗铲实际挖掘循环时间, s;
 t ——理论挖掘循环时间, s;
 α_{sh} ——吊斗铲勺斗从挖掘到排土的实际平均回转角, ($^\circ$);
 α ——理论回转角, ($^\circ$);
 ω ——回转速度, r/min;
 T_b ——日历工作班数;
 K_w ——挖掘系数。

为满足矿山工程量正常接续, 且保证开采沟段长度, 需满足 $Q_w \geq Q$, 则分条区开采沟道长度需满足式(19)。

$$\frac{1800T_bEK_w}{[d + (2h_{\text{煤}} + H_{\text{剥离}})\cot\alpha]\gamma H_{\text{剥离}}t_{sh}} \geq L \quad (19)$$

2 条带间煤量回采方案研究

2.1 煤柱宽度的确定

由于端帮采煤机回采煤炭过程中, 无须支护设备, 在吊斗铲掘沟、机械铲回采沟底煤炭后, 形成采煤工作面及沟底运输通路后, 需计算出留设煤柱的合理尺寸及煤柱间距, 保证安全、高效回采。

以 Hustrulid 及 Gaddg 公式为基础^[16-19], 计算实验室中煤样试件的单轴抗压强度与现场临界立方体试件单轴抗压强度的换算公式(20)。

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{0.9}} \quad (20)$$

取现场临界立方体试件的边长为 0.9 m, 实验室标准试样直径 D 为 0.05 m, 可得煤层现场临界立方体试件的强度 σ_m 与实验室标准试样强度 σ_c 之间的关系式:

$$\sigma_m = \sigma_c \sqrt{\frac{D}{0.9}} = 0.2357 \sigma_c \quad (21)$$

按 Bieniawski 煤柱强度计算公式 (22), 结合单一煤柱荷载计算的有效面积理论^[20], 可以得到巷间煤柱上的静载荷 q :

$$\sigma_p = \sigma_m \left(0.64 + 0.36 \frac{W}{h} \right) = 0.2357 \sigma_c \left(0.64 + 0.36 \frac{W}{h} \right) \quad (22)$$

$$q = \gamma_{\text{岩}} \times H + \frac{B_{\text{巷}} \times \gamma_{\text{岩}} \times H}{W} = \gamma_{\text{岩}} \times H \left(1 + \frac{B_{\text{巷}}}{W} \right) \quad (23)$$

式中 σ_m ——实验室煤样试件单轴抗压强度, MPa;

σ_c ——现场临界立方体试件单轴抗压强度, MPa;

D ——实验室试件直径或立方体边长, m;

σ_p ——煤柱强度, MPa;

h ——煤柱高度, m;

q ——煤柱静载荷集度, kN/m²;

$\gamma_{\text{岩}}$ ——覆岩岩体平均容重, kN/m³;

H ——煤层平均采深, m;

$B_{\text{巷}}$ ——巷道宽度, m。

在 Bieniawski 煤柱强度计算式 (22) 中, 当给定巷道 (或煤柱) 高度 h 时, 煤柱强度 σ_p 会随煤柱宽度 W 的增加而增加。当回采巷道煤柱的宽度为 W 时, 煤柱所承担的静载荷集度 q 恰好与煤柱强度 σ_p 相等。取煤柱的静载荷集度 q 等于煤柱强度 σ_p 作为煤柱临界宽度 W 的判据, 煤柱临界宽度见式 (25) 和式 (26)。

$$\gamma_{\text{岩}} \times H \left(1 + \frac{B_{\text{巷}}}{W} \right) = 0.2357 \sigma_c \left(0.64 + 0.36 \frac{W}{h} \right) \quad (24)$$

$$\frac{0.085 \sigma_c}{h} W^2 - (\gamma_{\text{岩}} \times H - 0.15 \sigma_c) W - B_{\text{巷}} \times \gamma_{\text{岩}} \times H = 0 \quad (25)$$

$$W = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{h(\gamma_{\text{岩}} \times H - 0.15 \sigma_c) + \sqrt{h^2(\gamma_{\text{岩}} \times H - 0.15 \sigma_c) + 0.34 \sigma_c B_{\text{巷}} \gamma_{\text{岩}} H h}}{0.17 \sigma_c} \quad (26)$$

式 (25) 表明, 煤柱临界宽度 W 与巷道高度 h 、巷道宽度 $B_{\text{巷}}$ 、煤层标准试件单轴抗压强度 σ_c 、煤层覆岩厚度 H 和覆岩平均容重 $\gamma_{\text{岩}}$ 等因素相关。

2.2 煤量回采方案研究

当吊斗铲第一条幅掘沟工程完成后, 机械铲回采沟底煤量; 形成采煤工作面及沟底运煤系统, 端帮采煤机投入使用。煤量回采方案, 分为两种: ①前进式单台单向单条带回采 (图 7); ②后退式单台双向双条带回采 (图 8)。

(1) 前进式单台单向单条带回采方案。吊斗铲掘沟露出煤层顶板, 机械铲回采沟底煤量, 形成端帮采煤工作面及运输系统后, 端帮采煤机沿沟道一侧前进式逐一逐条带回采煤量; 当一侧煤量回采结束后, 反向回采沟道另一侧煤炭。该方案端帮采煤机行走路径长度为 $2L$, 卡车运输距离较长。当两侧煤炭回采后, 进行沟道回填作业工序, 端帮煤炭暴露时间较长, 增加了煤炭自然发火危险。

(2) 后退式单台双向双条带回采方案。吊斗铲掘沟露出煤层顶板, 机械铲回采沟底煤量, 形成端帮采煤工作面及运输系统后, 端帮采煤机沿着沟道两侧后退式逐一回采煤量; 回采第一条幅之后, 及时对回采巷道进行充填, 防止煤炭自燃。该方案卡车运输距离较短, 是单台单向单条带回采距离的

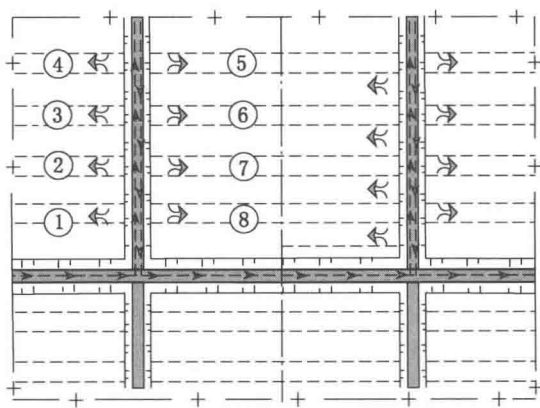


图7 前进式单台单向单条带回采

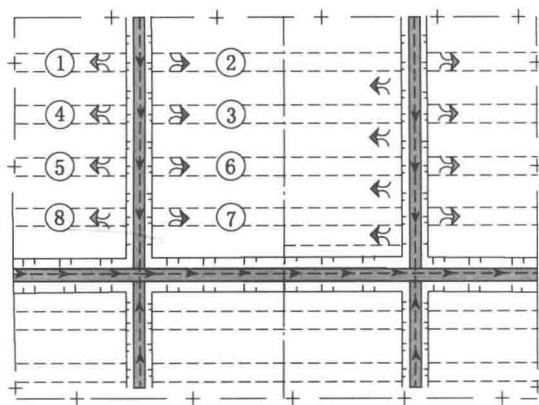


图8 后退式单台双向双条带回采

一半；内排跟进，及时回填。但采煤机回采过程中，“S”形两侧反复折返开采，降低设备效率。

3 实例分析

3.1 矿区基本条件概述

国外某矿田内，经勘探条区西北部赋存一层焦煤，平均厚度 3.0 m，煤层倾角 $3^{\circ} \sim 5^{\circ}$ ，煤容重 1.4 t/m^3 ，覆盖岩层平均视密度 2.60 t/m^3 。该煤层赋存平均深度 60 m，若采用露天开采，该条区内平均剥采比大于经济剥采比，剥离量大，且端帮压煤。矿区露天开采境界如图 9 所示。

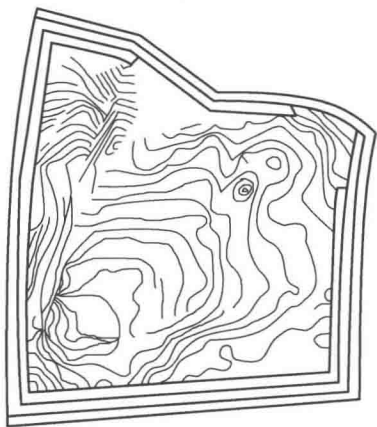


图9 露天开采境界图

针对该矿特殊煤层赋存情况，如何降低成本，实现煤炭资源高效回收，保证矿山生产接续是该矿亟待解决的问题。为了最大限度回收资源，提出采用吊斗铲倒堆机械铲采煤机综合开采工艺。

3.2 矿区综合开采工艺研究

3.2.1 开采参数

根据该矿山设计年生产焦煤 5.0 Mt，根据式 (11)、式 (19)、式 (26) 分别计算出吊斗铲倒堆机械铲采煤机分条区开采条件下沟底宽度、条带长度及煤柱宽度，通过实验室测算出煤层单轴抗压强度。矿山开采各项参数见表 1。

表1 矿山开采参数表

参 数	数 值	参 数	数 值
沟底宽度 d/m	45.0	运煤开车载重/ t	91
条带长度 L/m	1700	沟道帮坡角/ $(^{\circ})$	55
煤柱宽度 W/m	2.8	年产量 A_p/Mt	5.0
运煤卡车尺寸/ $(\text{m} \times \text{m} \times \text{m})$	$10.8 \times 5.9 \times 4.9$	巷道宽度 $B_{\text{巷}}/\text{m}$	5.0
运煤卡车转弯半径 R/m	10.75	巷道高度 h/m	3.0
端帮采煤机尺寸/ $(\text{m} \times \text{m} \times \text{m})$	$16.6 \times 8.3 \times 8.5$	煤层单轴抗压强度 σ_c/MPa	13.0
吊斗铲斗容 E/m^3	61	岩层厚度 H/m	60