

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.08.014

季节性剥离露天煤矿内排开拓运输系统优化

白润才, 刘 闯, 刘光伟, 曹 博

(辽宁工程技术大学 矿业学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要:针对近水平煤层季节性剥离露天煤矿内排时期运距长, 汽车运输成本高的特点, 在理论分析与计算的基础上, 提出了通过建立临时排土桥优化开拓运输系统的设想, 并对临时排土桥的类型与设置条件做出了技术经济分析, 给出了临时排土桥参数模型及其优化算法, 研究成果在蒙东能源西二号露天煤矿得到了实际应用, 结果表明建立临时排土桥优化开拓运输系统的经济效益显著。

关键词:季节性剥离; 露天煤矿; 近水平; 内排时期; 开拓运输系统

中图分类号:TD824

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)08-099-06

Optimization of in-pit haulage system development during internal dumping in seasonal stripping surface coal mine

BAI Runcai, LIU Chuang, LIU Guangwei, CAO Bo

(College of Mining and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: For the features of long haul distances and high motor transport haulage cost during internal dumping in near horizontal surface coal mine with seasonal stripping, on the basis of theoretical calculation and analysis, the paper proposes a thought that building temporary connection bridges to optimize in-pit haulage system development. And an techno-economic analysis about form and building requirements of temporary connection bridges is made, the parameters model and optimization algorithm of temporary connection bridges are provided. The research production has been practical applied to West 2 surface coal mine of Mengdong energy holdings co., LTD. The results show that building temporary connection bridges to optimize in-pit haulage system development generates remarkable economical benefits.

Key words: seasonal stripping; surface coal mine; flat dipping; internal dumping; in-pit haulage system development

改革开放以来, 中国露天煤炭事业发展迅猛, 相继开发建设了若干大型露天煤田, 新建或已建成一批千万吨级露天矿。这些新建露天煤矿大都具有如下特点: 广泛分布在内蒙古、山西、新疆等北方及西北地区, 冬季漫长而寒冷, 为有效避开冬季恶劣的剥离施工条件, 剥离工程多实行季节性作业(即剥离工程集中在夏秋两季, 形成超前剥离, 采场大量露煤; 冬春两季只采煤, 不剥离); 煤层多为近水平赋存; 剥离多采用单斗-卡车工艺; 露天矿生产能力大, 剥离工程量大; 采场几何尺寸大, 剥离工作线长^[1-2]。正是基于上述特点, 季节性剥离露天矿无论采用单环内排还是双环内排, 均普遍存在内排运输距离长, 运输费用大的问题。

露天矿运输工作是露天矿整个生产工艺过程中的一个重要环节, 露天矿运输成本占全部生产成本的

收稿日期:2014-04-08

基金项目:辽宁省教育厅科学研究基金资助项目(L2011051)

作者简介:白润才(1961-)男, 辽宁工程技术大学教授, 博士生导师, 主要从事露天采矿技术方面的研究, (E-mail) bairuncai@126.com

50%以上,通过优化开拓运输系统来减少运输费用是降低露天矿生产成本的主要技术手段之一^[3-8]。为了解决露天矿内排时期由于采用传统开拓运输系统造成的上述问题,在采区中间建立临时排土桥连接采场与内排土场,成为近水平煤层露天煤矿的优先选择。目前有关临时排土桥的研究都以非季节性剥离露天矿为研究对象,其剥离工程全年作业,中间桥多设置为双桥,逐步式发展^[9-14]。由于非季节性剥离露天矿的剥离作业方式与季节性剥离露天矿截然不同,其关于临时排土桥的设置与优化理论不能适用于季节性剥离露天矿,因此,有必要研究季节性剥离条件下近水平煤层露天煤矿内排时期开拓运输系统优化理论。

采用理论分析与计算相结合的方法,结合实例应用研究,提出季节性剥离条件下临时排土桥的设置方式与参数优化算法,丰富和发展了露天矿开拓运输系统优化理论,为大型近水平煤层露天煤矿内排开拓运输系统优化提供基础。

1 临时排土桥设置

1.1 临时排土桥设置条件与方式

修筑临时排土桥的目的是为了降低露天矿剥离运输成本。与循环内排相比,由于修筑临时排土桥,剥离运输系统发生了变化,在缩短内排运距、降低剥离运输成本的同时,也增加了两项费用:1)修筑、拆除临时排土桥,出现二次剥离,产生二次剥离费用;2)排土桥上部剥离平盘剥离物经排土桥进入对应的排土平盘,产生反向运输费用。因此,只有满足节约的运输费用小于二次剥离费用与反向运输费用总和的条件,修筑临时排土桥才有意义。

露天矿临时排土桥一般有两种设置方式:单桥和双桥,其核心是保持剥离运输系统的通畅性。季节性剥离露天矿的矿山工程发展有其自身的特点,剥离作业呈现间歇性。正是这种间歇性,使得剥离运输系统没有不间断维持通畅性的必要,即在非剥离作业时期,剥离运输系统可以中断。季节性剥离露天矿临时排土桥的修筑巧妙地利用了这一特点,只在采场中部建立单桥,剥离作业期间修筑排土桥,非剥离作业期部分(全部)拆除排土桥,回采桥下压煤。而不必建立逐步式交替发展的双桥,可大大减少修筑、拆除临时排土桥的工程量与工程费用,降低系统复杂程度和施工难度。

1.2 设置临时排土桥节约的运输费用

对于大型近水平煤层露天矿,剥离物内排时,传统的开拓运输系统通常是采用双环内排(绕两侧端帮建立内排运输环线)或单环内排(绕一侧端帮建立内排运输环线)^[15]。如图 1 所示,双环运输内排时,内排运距

$$L_x = L_g + L_d, \quad (1)$$

式中: L_x 为循环内排运距,km; L_g 为工作帮运距,km; L_d 为端帮运距,km。

在露天矿采场中部修筑临时排土桥后,剥离物分别通过排土桥和两侧端帮进入内排土场,形成两个新的双环内排运输线路,如图 2 所示。此时,剥离物内排运距

$$L_q = L_g/2 + L_d, \quad (2)$$

式中 L_q 为临时排土桥内排运距,km。

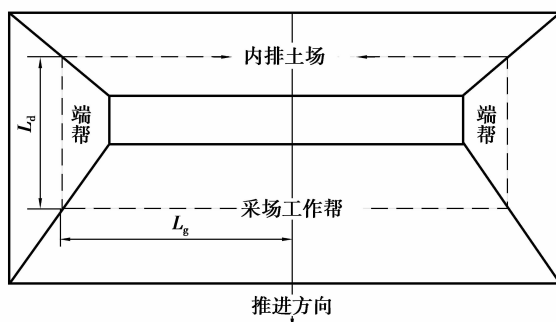


图 1 露天矿双环运输内排示意

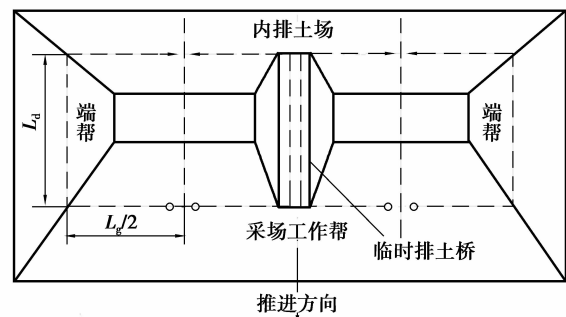


图 2 露天矿临时排土桥内排示意

则修筑临时排土桥后节约的内排运输费用

$$F_j = C_1 V_1 L_g / 2, \quad (3)$$

式中: F_j 为节约的内排运输费用,百万元; C_1 为剥离物运输单价,元/($\text{m}^3 \cdot \text{km}$); V_1 为年剥离量, Mm^3 。

比较式(1)、(2)、(3)可知,修筑临时排土桥可缩短内排运距 $L_g/2$,节约内排运输费用 $C_1 V_1 L_g / 2$,经济效益显著。

2 临时排土桥模型及其参数优化

2.1 临时排土桥发展演变过程

季节性剥离露天矿的临时排土桥随剥离工程的发展而变化。在采场工作帮推进过程中,预先留设部分临时排土桥(图3(a));剥离工程作业时,利用剥离物回填采空区,贯通临时排土桥,建立运输通路(图3(b));剥离工程竣工后,部分拆除临时排土桥,揭露排土桥下压煤,运输通路中断(图3(c));次年剥离工程开工前,优先回采揭露的临时排土桥下压煤(图3(d)),剥离工程开工后,利用剥离物回填桥下压煤采空区,贯通临时排土桥,恢复运输通路。综上所述,临时排土桥处于修筑—拆除—修筑的动态循环演变过程中。在这一过程中,不可避免地出现由于拆除临时排土桥而产生的二次剥离,且临时排土桥的高度越高,二次剥离量越大,剥离费用越高;同时,临时排土桥越高,剥离物从采场排弃至内排土场所产生的反向运输越少,反向运输费用越少。为此,有必要研究使反向运输费用与二次剥离费用总和最小的临时排土桥参数,为确定露天矿经济合理的临时排土桥参数提供理论支持。

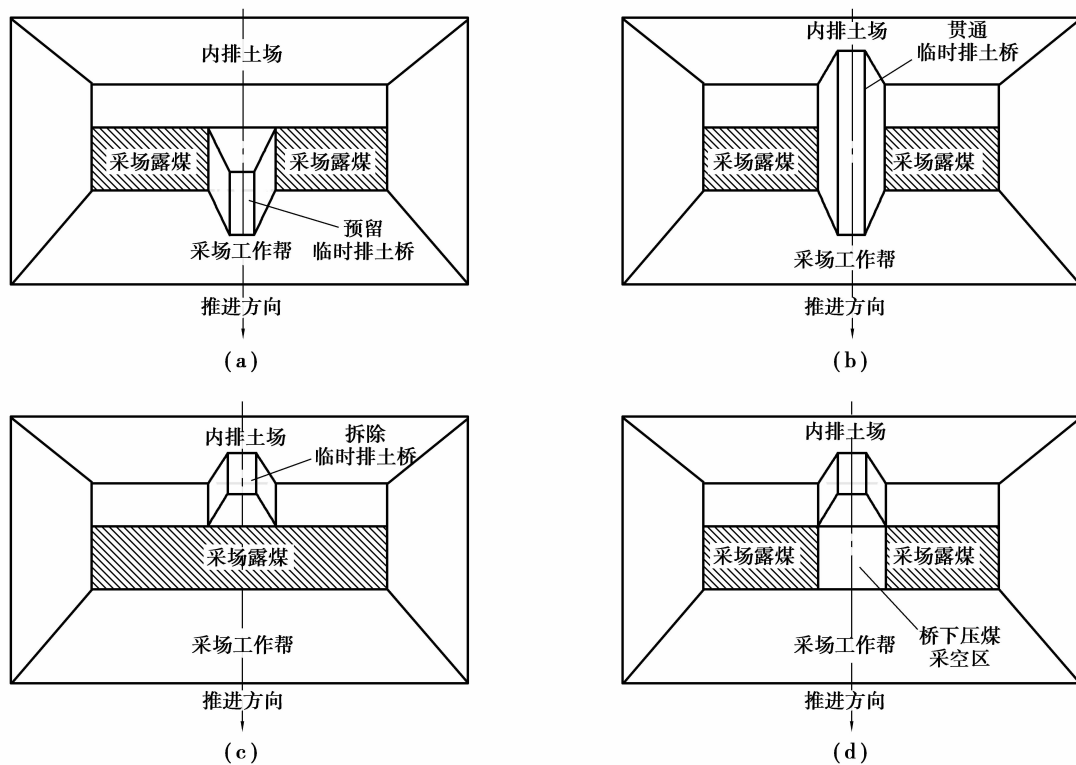


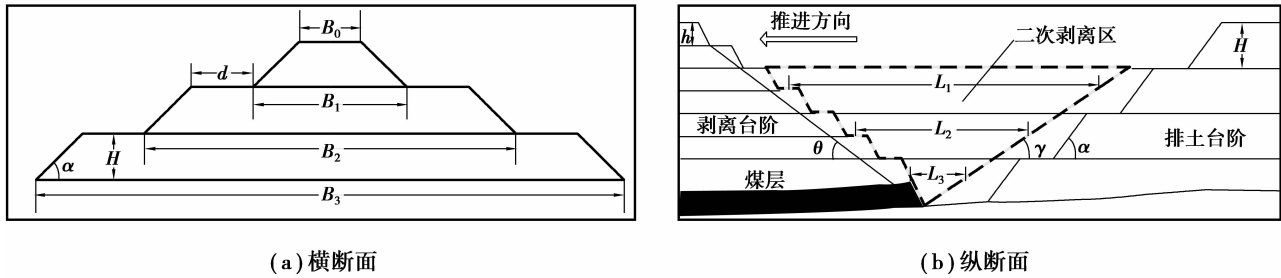
图3 露天矿临时排土桥演变过程

2.2 临时排土桥模型及其参数

为了给临时排土桥工程量计算及其参数优化提供基础,建立临时排土桥模型。对应图3(b)中的临时排土桥,图4是临时排土桥的横、纵断面。临时排土桥连接剥离台阶与内排台阶,排土桥两侧均作为剥离运输通道,运输平台宽度由设计运输道路宽度确定;排土桥台阶高度与内排台阶高度相同,每两个剥离台阶对应一个排土桥台阶。临时排土桥参数确定如图4所示。

2.3 临时排土桥参数优化

分析临时排土桥模型及其参数可知,临时排土桥参数优化的关键就在于优化排土桥高度。而排土桥的



(a) 横断面
(b) 纵断面

d —运输平台宽度, m; H —排土台阶高度, m; α —排土台阶坡面角, ($^\circ$); B_0 —排土桥顶部宽度, m;
 n —运输平台的数量, 个; B_i —第 i 个运输平台的底部宽度, m; h —剥离台阶高度, $h = H/2$, m;
 L_i —第 i 个运输平台拆除部分的平均长度, m; θ —采场工作帮坡角, ($^\circ$); γ —排土场稳定帮坡角, ($^\circ$)

图 4 临时排土桥断面

高度由运输平台数量 n 决定, 因此, 对排土桥高度的优化过程实质上就是对运输平台数量 n 的优化。

由于临时排土桥总是处于修筑—拆除—修筑的动态演变过程, 在拆除排土桥过程中, 会产生一定量的二次剥离(图 4(b)中虚线框区域)。产生二次剥离量的多少与临时排土桥的运输平台数量 n 有关, n 越大, 二次剥离量越大, 二次剥离费用越高; 反之, n 越小, 二次剥离量越小, 二次剥离费用越低。

另外, 剥离工程作业期间, 剥离物从剥离平盘经临时排土桥运输至对应的内排土平盘, 排土桥上部平盘剥离物存在反向运输, n 越大, 排土桥上部剥离平盘越少, 反向运输越少, 运输费用越低; 反之, n 越小, 排土桥上部剥离平盘越多, 反向运输越多, 运输费用越高。

综上所述, 一方面, n 越大, 二次剥离量越大, 二次剥离费用越高; 另一方面, n 越大, 反向运输越少, 运输费用越低。在这种矛盾因素的作用下, 理论上能找到使二次剥离费用与反向运输费用之和最小的 n 。即, 当排土桥实际运输平台数量大于 n 时, 总费用因二次剥离量增加而增加; 反之, 小于 n 时, 总费用因反向运输增加而增加。

2.3.1 二次剥离费用

每年拆除临时排土桥产生的二次剥离费用可由式(4)~(6)表示。

$$F_b = 1/1\ 000\ 000 C_2 \sum_{i=1}^n S_i L_i, \quad (4)$$

$$S_i = (B_0 - 2d - H \cot \alpha) H + (2d + 2H \cot \alpha) H i, \quad (5)$$

$$L_i = (\cot \theta + \cot \gamma) (n + 1/2) H - (\cot \theta + \cot \gamma) H i, \quad (6)$$

式中: F_b 为拆除排土桥产生的费用, 百万元; C_2 为土岩剥离单价, 元/ m^3 ; S_i 为排土桥第 i 个运输平台横断面积, m^2 。

令 $S_i = P + Q \cdot i$, $L_i = J \cdot (n + 1/2) - J \cdot i$, 则二次剥离费用

$$F_b = 1/1\ 000\ 000 C_2 J [P n^2 / 2 + Q n (n + 1/2) (n + 1) / 6], \quad (7)$$

式中: $P = (B_0 - 2d - H \cot \alpha) H$, $Q = (2d + 2H \cot \alpha) H$, $J = (\cot \theta + \cot \gamma) H$ 。

若对台阶数量 n 求导, 得

$$\frac{dF_b}{dn} = 1/1\ 000\ 000 C_2 J [(P + Q)n + Q(n^2 - n) / 2 + JQ / 12] > 0. \quad (8)$$

即每年拆除临时排土桥产生的二次剥离费用 F_b 随运输平台数量 n 的增加而增加。

2.3.2 剥离物反向运输费用

剥离物反向运输产生的费用可由式(9)表示。

$$F_y = \frac{C_3 V_2}{H'} (H' - nH)^2, \quad (9)$$

式中: F_y 为剥离物反向运输产生的费用, 百万元; C_3 为剥离物提升单价, 元/ $(m^3 \cdot m)$; V_2 为每年通过临时排土桥的剥离量, Mm^3 ; H' 为地表至煤层底板的高差, m。

若对台阶数量 n 求导,得

$$\frac{dF_y}{d_n} = (nH - H') \frac{2HC_3V_2}{H'} \quad (10)$$

因为 $\frac{HC_3V_2}{H'} > 0, nH < H'$, 所以 $\frac{dF_y}{d_n} < 0$ 。

剥离物反向运输的费用随排土桥运输平台数量 n 增加而减少。

2.3.3 二次剥离与反向运输总费用

$$F_z = F_b + F_y \quad (11)$$

令 $f(n) = F_z$, $f(n)$ 是关于 n 的一元三次函数,对 $f(n)$ 求导数

$$f(n)' = An^2 + Bn + C \quad (12)$$

式中: $A = 1/1\ 000\ 000C_2JQ/2$, $B = 1/1\ 000\ 000C_2J(P + Q/2) + 2C_3V_2H^2/H'$, $C = 1/1\ 000\ 000C_2J/12 - 2C_3V_2H$ 。

令 $f(n)' = 0$, 根据露天矿实际情况, 总有 $\Delta > 0$, 此时方程有两个实根, 由 n 的取值范围 $(0, H'/H)$, 可确定函数 $f(n)$ 的极小值; 借助于计算机编程, 绘制 $f(n)$ 函数图像, 确定临时排土桥运输平台最佳数量 n' 。

3 工程实例

在数学模型分析的基础上, 结合国电蒙东能源控股有限责任公司西二号露天煤矿(以下称“西二矿”)的实际情况, 研究西二矿临时排土桥的修筑方案。

西二矿位于内蒙古锡林浩特市, 设计生产能力为 10.0 Mt/a, 是典型的近水平煤层季节性剥离露天煤矿。主采煤层为 6 号煤层, 采场工作帮地表至煤底板的距离 $H' = 110$ m, 剥离工作线平均长度 $L_g = 1.85$ km, 运输平台宽度 $d = 20$ m, 排土台阶高度 $H = 24$ m, 排土台阶坡面角 $\alpha = 33^\circ$, 采场工作帮坡角 $\theta = 17.5^\circ$, 排土场的稳定帮坡角 $\gamma = 14^\circ$ 。

根据 2013 年西二矿剥、采、排工程计划安排, 计划年剥离量 $V_1 = 64.00$ Mm³, 在采场中部修筑单桥, 排土桥顶部宽度 $B_0 = 30$ m。计划通过临时排土桥的剥离量 $V_2 = 35.00$ Mm³, 剥离物运输单价 $C_1 = 0.95$ 元 \cdot (m³ \cdot km), 土岩剥离单价 $C_2 = 5.00$ 元 \cdot m³, 剥离物提升单价 $C_3 = 0.01$ 元 \cdot (m³ \cdot m)⁻¹, 则通过修筑临时排土桥节约的运输费用 $F_j = 0.95 \times 64 \times 1.85 / 4 \times 100 = 2\ 812$ 万元。

在编写的 F_b, F_y, F_z 的函数图像绘制程序中, 输入西二矿各项参数, 绘制的函数图像如图 5 所示。计算结果显示, 使 2013 年西二矿 F_z 最小的临时排土桥运输平台数量 $n' = 2$, 对应的 F_z 为 1 006.37 万元。

那么, $F_j - F_z = 1\ 805.63$ 万元, 即 2013 年西二矿修筑临时排土桥节约的运输费用小于二次剥离费用与反向运输费用总和, 减少生产成本 1 805.63 万元, 修筑临时排土桥经济效益显著。

4 结 论

1) 对于近水平煤层季节性剥离露天煤矿, 通过在采场中部建立临时排土桥连接采场与内排土场, 以缩短内排运距、降低运输成本, 是优化露天矿开拓运输系统的一种重要方法, 丰富与发展了露天矿开拓运输系统优化理论。

2) 临时排土桥的修筑应以产生经济效益为目的, 修筑临时排土桥节约的运输费用应大于拆除临时排土桥产生的二次剥离费用与剥离物反向运输费用之和。这对露天煤矿生产规模提出了要求, 只有具备一定生产规模的大型露天煤矿, 修筑临时排土桥才是有意义的。

3) 通过优化临时排土桥参数, 可以很好地解决剥离物反向运输费用与拆除排土桥造成的二次剥离费用

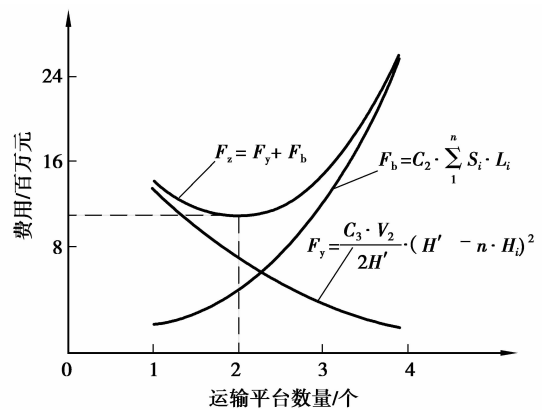


图 5 2013 年西二矿临时排土桥 F_b, F_y, F_z 函数图像

之间的矛盾,使得反向运输费用与二次剥离费用总和达到最小,有效降低剥离运输成本,使修筑临时排土桥产生的经济效益最大化。

参考文献:

- [1] 张幼蒂. 现代露天开采技术国际发展与我国露天采煤前景[J]. 露天采矿技术, 2005(3):1-3.
ZHANG Youdi. International development of advanced surface mining technology and the prospect of surface mining in China[J]. Opencast Mining Technology, 2005(3):1-3.
- [2] 才庆祥. 我国亿吨露天煤矿群及露天煤矿绿色开采技术[C] //第七次煤炭科学技术大会文集(上册). 北京:中国煤炭工业协会, 2011:243-252.
- [3] 杨荣新. 露天采矿学[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 1990:77-78.
- [4] 蔡美峰, 齐金铎. 大型露天矿降低成本增加效益的途径[J]. 钢铁, 1997, 32(sup):178-180.
CAI Meifeng, QI Jinduo. Ways of decreasing costs and increasing benefits in large scale open pit mines[J]. Iron and Steel, 1997, 32(S):178-180.
- [5] 曹博. 复杂条件露天矿采区转向及运排系统工程优化研究与应用[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2011.
- [6] 王运敏, 刘盛华, 郑维刚. 我国大型露天矿开采的主要薄弱环节及其对策[J]. 金属矿山, 1998(5):5-10.
WANG Yunmin, LIU Shenghua, ZHENG Weigang. The main weak links in China's large scale open-pit mining and their counter measure[J]. Metal Mine, 1998(5):5-10.
- [7] 唐廷宇, 韩家铎. 浅析露天矿山开采的优化途径[J]. 矿业工程, 2008, 6(3):13-14.
TANG Tingyu, HAN Jiahua. Discuss the optimization way of the open pit mining under the market economics[J]. Mining Engineering, 2008, 6(3):13-14.
- [8] 范军富, 宋子岭, 王东, 等. 露天煤矿开拓运输系统优化研究[J]. 露天采矿技术, 2011(6):34-36.
FAN Junfu, SONG Ziling, WANG Dong, et al. Optimization of surface coal mine in-pit haulage system development[J]. Opencast Mining Technology, 2011(6):34-36.
- [9] 车兆学. 安家岭露天煤矿内排开拓运输系统优化[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(4):494-497.
CHE Zhaoxue. Optimization of internal dumping development haulage system in Anjialing surface coal mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(4):494-497.
- [10] 车兆学, 才庆祥. 露天煤矿内排时期下部水平开拓运输系统优化[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(10):33-37.
CHE Zhaoxue, CAI Qingxiang. Optimization of horizontal development and transportation system at bottom of open pit mine during internal dumping period[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(10):33-37.
- [11] 周伟, 才庆祥, 谢廷堃, 等. 大型近水平露天煤矿转向期间开拓运输系统优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4):404-408.
ZHOU Wei, CAI Qingxiang, XIE TING-KUN, et al. Optimization of in-pit development transport system during transitional period in large open pit mine with flat coal deposit[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(4):404-408.
- [12] 张防修. 大型露天煤矿采区转向过渡开拓运输系统的研究[J]. 露天采矿技术, 2007(6):1-3.
ZHANG Fangxiu. Study on pit haulage system in transition period for mining-in-areas In large surface coal mines[J]. Surface Mining Technology, 2007(6):1-3.
- [13] 尚涛, 才庆祥, 刘勇, 等. 露天矿分区过渡期间合理开拓运输系统选择[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4):412-415.
SHANG Tao, CAI Qingxiang, LIU Yong, et al. Optimal selection of pit haulage system in transition period for mining-in-areas[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(4):412-415.
- [14] 刘勇, 车兆学, 李志强, 等. 露天煤矿端帮残煤开采及边坡暴露时间分析[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(6):728-731.
LIU Yong, CHE Zhaoxue, LI Zhiqiang, et al. Analyses of end slope remnant coal mining and slope exposure time[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2006, 35(6):728-731.
- [15] 于汝绶, 习永锋. 露天矿工作线长度的优化[J]. 中国矿业学院学报, 1986(1):14-28.
YU Rushou, XI Yongfeng. Optimization of the economical length of working-line in open pit mining[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1986 (1):14-28.