

高速刨煤法刨煤机工况参数的多目标优化^{*}

康晓敏^{**} 王伟超 魏晓华

(辽宁工程技术大学机械工程学院,阜新 123000)

摘要:针对普遍应用的高速刨煤法,分析输送机出现多次装载的情况,为更加合理有效地计算输送机装载量不同时的装载断面面积,提出一种计算平均装载断面面积的方法。并在此基础上以刨煤机单位能耗最低、输送机装载断面合理利用、刨煤机生产能力最大为目标,采用线性加权和法对刨煤机工况参数进行多目标优化,为刨煤机参数的合理选择和研发应用提供理论依据。

关键词:刨煤机;多目标优化;高速刨煤法;工况参数

中图分类号:TD421 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2016.05.027

Multi-objective Optimization of Working Parameters of Coal Plow for Overtaking Plowing Method

KANG Xiaomin^{**} WANG Weichao WEI Xiaohua

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000)

Abstract: For overtaking plowing method, multiple loads of the conveyor are analyzed, and a method for calculating average cross-sectional loading area is presented in order to calculate cross-sectional loading area reasonably and effectively for different loads. Based on this method, multi-objective optimization is performed using the linear weighted sum method to find the combinations of working plow parameters that produce the minimum specific energy consumption and reasonable utilization of cross-sectional loading area of the conveyor, while preserving the highest productivity. A theoretical basis is provided for working parameters selection, and research and application of the coal plow.

Key words: coal plow; multi-objective optimization; overtaking plowing method; working parameters

1 引言

刨煤机成套开采技术是实现薄煤层安全、高效、自动化开采的主要发展方向。刨煤方式和刨煤机工况参数的选择合理与否对刨煤机生产能力和高效运行具有重要影响,主要包括刨头速度、输送机链速、刨削深度、刨煤机生产能力、输送机输送能力等。如何选择和合理确定这些参数,是充分发挥刨煤机性能、保证其运行的关键。对于刨煤机工况参数选择和计算的研究有很多^[1-7],主要侧重于上行和下行时输送机单次装载的货载断面面积均匀性分析,以及在此基础上的参数优化。

高速刨煤法,也称为超速法,由于高刨速的发展方向使其的应用更加广泛,成为目前世界上普遍使用的刨煤方式。高速刨煤法的特点是:刨头速度 V_h 大于输送机链速 V_s ,并且在刨头上行和下行刨煤过

程中,刨头速度、输送机链速和刨削深度不变。由于高速刨煤法的刨头速度大于输送机链速,输送机必然出现多次装载,针对这种刨煤方式,本文将分析输送机多次装载的断面面积情况,提出一种计算平均装载断面面积的方法,进而综合考虑刨煤机单位能耗、输送机装载断面面积、刨煤机生产能力,对刨煤机工况参数进行多目标优化,为刨煤机的研发和现场应用提供理论基础。

2 高速刨煤法输送机装载量分析及平均装载断面面积的计算方法

高速刨煤法可在输送机运行中实现多次装载,因此合理选择刨头速度和刨削深度,可使输送机接近均匀满载。另外提高刨头速度可使产量提高。

为了充分了解高速刨煤法情况下输送机的装载量情况,下面具体分析不同刨头速度和输送机链速之比条件下的装载量。设刨头速度与输送机链速的比值为 k_v 。由于刨头速度的不断提高,因此分析 $1 < k_v \leq 4$ 的情况。这里省略了详细的推导过程,速比不同时的输送机装载量简化如图1所示。

2016-01-25 收稿,2016-04-06 接受,2016-10-25 网络发表

^{*} 国家自然科学基金(51104082),中国煤炭工业协会2011年度科学技术研究指导性计划(MTKJ2011-330)资助

^{**} 通讯作者,E-mail:fxkxm@163.com;Tel:13904186975

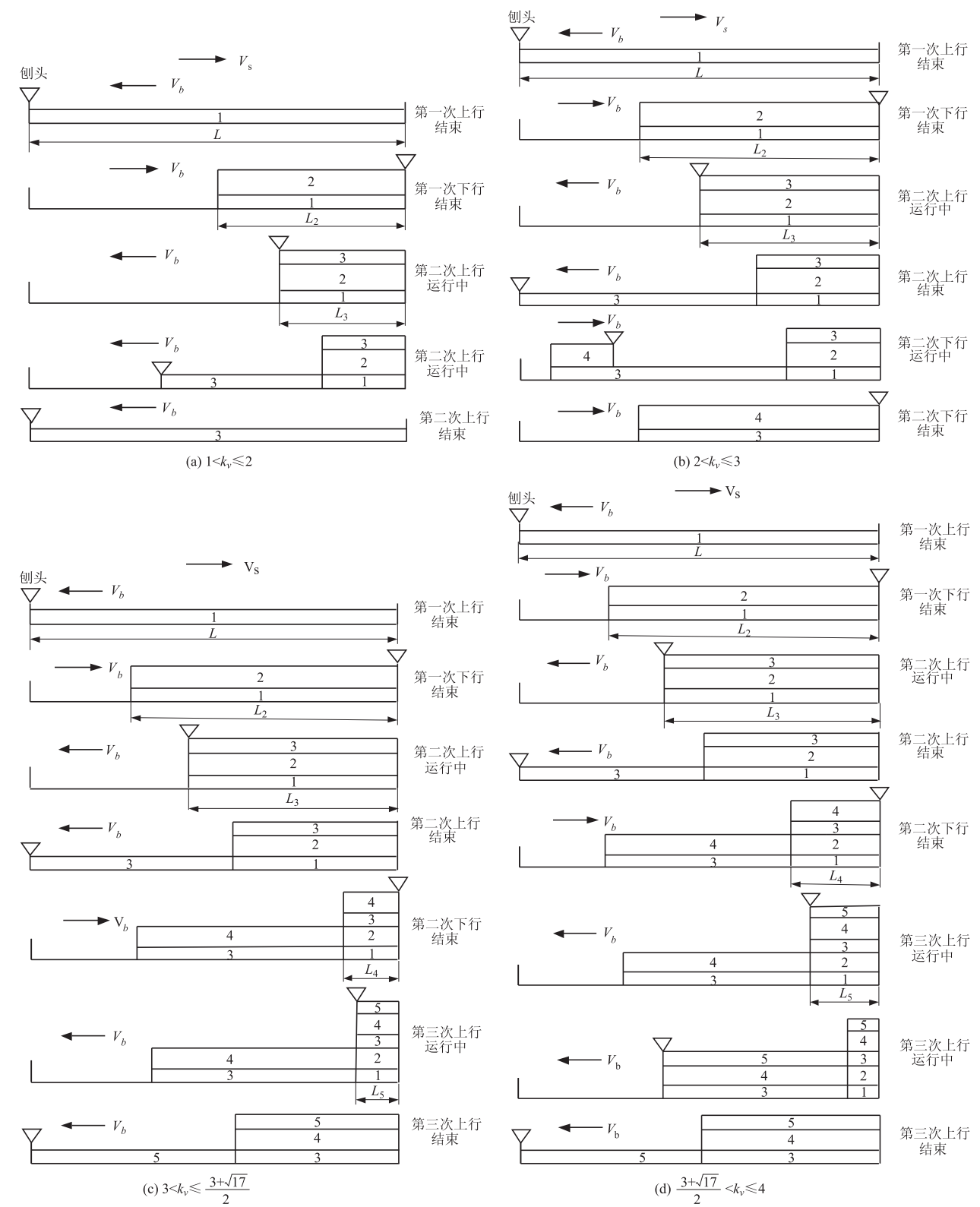


图 1 速比不同时的输送机装载量

由图 1 可以看出,当 $1 < k_v \leq 3$ 时,输送机最多出现 3 次装载的情况;当 $3 < k_v \leq 4$ 时,输送机最多出现 5 次装载的情况。同时,可以观察到,在输送机整个长度上,会出现几种不同的装载量,例如如图 1

(b)第二次下行运行中的情况,同时存在装载一次、两次、三次的长度。刨煤过程中,输送机装载情况以及装载断面面积的计算是刨削深度、刨头速度等刨煤机工况参数选择的关键指标。因此,对于速比变化

造成的输送机装载量不同,甚至差别很大的情况,这里提出一种计算平均装载断面积的方法,为计算断面积与合理选择刨煤机参数提供直接有效的依据。从图 1 中可以看出,不同速比情况下的刨煤过程中,在整个工作面长度上,出现不同的装载次数,以及相同次数的装载断面的长度不同,而且装载次数最多的断面长度较短,以图 1(c)为例进行说明,从第一次下行结束到第二次上行结束的刨煤过程中,装载 3 次的断面长度随着刨煤机和输送机的运行在不断变化,即相同装载次数的断面在输送机上出现的长度不一样,长度最大时是第二次上行运行中的 L_3 ,以此类推,可以得到 2 次装载的最大长度是 L_2 ,4 次装载的最大长度是 L_4 ,5 次装载的最大长度是 L_5 ,可通过分析得出, L_5 最短。考虑到装载次数和各种装载次数的断面的长度对输送机装载断面积的影响,本文采用加权平均方法计算平均装载断面积。相同装载次数的断面在输送机上的长度越长,对输送机装载断面积计算的影响就越大,因此首先得到各装载次数的装载断面的最大长度,然后将各装载次数的断面积按照其最大长度占整个工作面长度的比例求加权平均值,得到平均装载断面积。由于多次装载的时候较多,这里不考虑一次装载的影响。具体的公式推导过程如下:

1) 当 $1 < k_v \leq 3$ 时

设刨煤时上行和下行时装载一次的断面积分别为 A_s 、 A_x (单位: m^2), 可表示为

$$A_s = \frac{Hh k_v \gamma}{k_v + 1}$$

(1)

$$A_x = \frac{Hh k_v \gamma}{k_v - 1}$$

(2)

式中, H 为刨煤机工作面煤层厚度, m ; h 为刨削深度, m ; γ 为煤的松散系数。

图 1(a)、(b) 中, 装载 2 次的断面积为 $A_s + A_x$, 设在输送机上的最大长度为 L_2 。装载 3 次的断面积为 $2A_s + A_x$, 设在输送机上的最大长度为 L_3 。 L_2 、 L_3 可分别由图 1 推导得出:

$$L_2 = \frac{L(k_v - 1)}{k_v}$$

(3)

$$L_3 = \frac{L(k_v - 1)}{k_v + 1}$$

(4)

式中, L 为工作面长度, m 。

针对多次装载对断面积的影响, 将各不同装载次数断面积按其最大长度占整个工作面长度的比例

求加权平均值, 得到平均装载断面积 A_p 。

$$A_p = \frac{(A_s + A_x)L_2 + (2A_s + A_x)L_3}{L_2 + L_3}$$

(5)

将式(1)~(4)代入式(5)得到:

$$A_p = \frac{Hh \gamma k_v^2 (5k_v + 1)}{(k_v - 1)(2k_v + 1)(k_v + 1)}$$

(6)

2) 当 $3 < k_v \leq 4$ 时

装载 2 次和 3 次的最大长度公式与式(3)、(4)相同。由图 1(c)、(d) 可得, 装载 4 次的断面积为 $2A_s + 2A_x$, 在输送机上的最大长度为 L_4 。装载 5 次的断面积为 $3A_s + 2A_x$, 在输送机上的最大长度为 L_5 。 L_4 、 L_5 可由图 1 经过推导计算得出

$$L_4 = \frac{L(k_v - 3)}{k_v}$$

(7)

$$L_5 = \frac{L(k_v - 3)}{k_v + 1}$$

(8)

得到

$$A_p = \frac{[(A_s + A_x)L_2 + (2A_s + A_x)L_3 + (2A_s + 2A_x)L_4 + (3A_s + 2A_x)L_5]}{(L_2 + L_3 + L_4 + L_5)}$$

(9)

将式(1)~(4)、(7)~(8)代入式(9)得到

$$A_p = \frac{Hh \gamma k_v^2 (7k_v^2 - 14k_v - 5)}{(2k_v + 1)(k_v - 2)(k_v + 1)(k_v - 1)}$$

(10)

分析不同装载次数断面的最大长度占工作面长度 L 的比例与速比的关系。设 $H = 1.4\text{ m}$, $h = 0.05\text{ m}$, $L = 150\text{ m}$, $\gamma = 1.5$, 可计算得到图 2, 图 2(a) 为 $1 < k_v \leq 3$ 时, 2 次装载和 3 次装载的断面的最大长度与工作面长度 L 的比值, 均随着速比增加而逐渐增加。图 2(b) 为 $3 < k_v \leq 4$ 时, 装载 2~5 次的断面的最大长度分别与工作面长度 L 的比值, 可以看到, 2 次、3 次装载断面的最大长度所占比例均在 50% 以上; 随着速比增加, 4 次、5 次装载断面的所占比例增加, 但所占比例最多没有超过 25%。因此前面提出的平均断面积计算方法是比较合适的。

进一步将求得的平均装载断面积和各不同装载次数的断面积比较, 如图 3(a)、(b) 所示。当 $1 < k_v \leq 3$ 时, 利用公式求得的平均断面积接近于 2 次和最多 3 次装载断面积的中间值。当 $3 < k_v \leq 4$ 时, 平均断面积和最多 5 次装载的断面积相差较大, 与 3 次装载的断面积比较接近, 这是因为 4、5 次装载的断面积较大, 但其所占比例较小。在实际运行过程中, 会出现煤层垮落, 以及刨落的煤装入输送机后

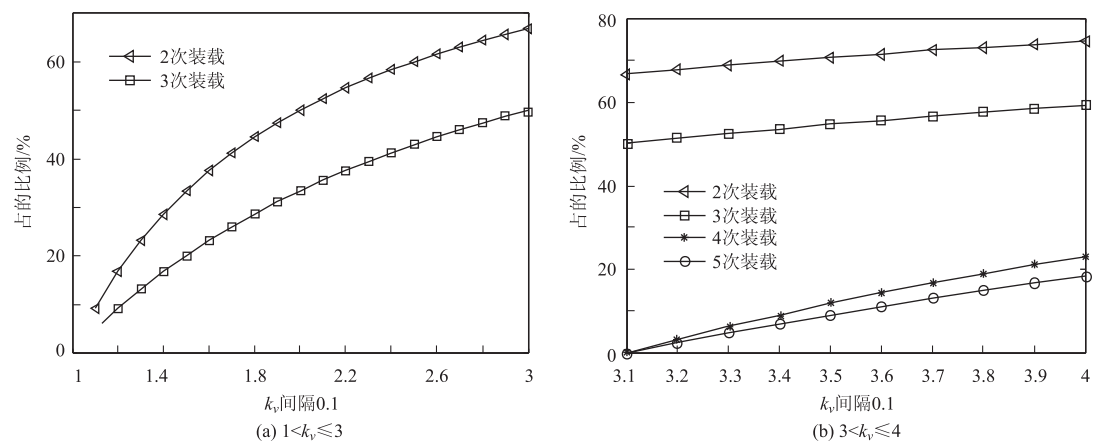


图2 不同速比时各装载断面最大长度占工作面长度 L 的比例

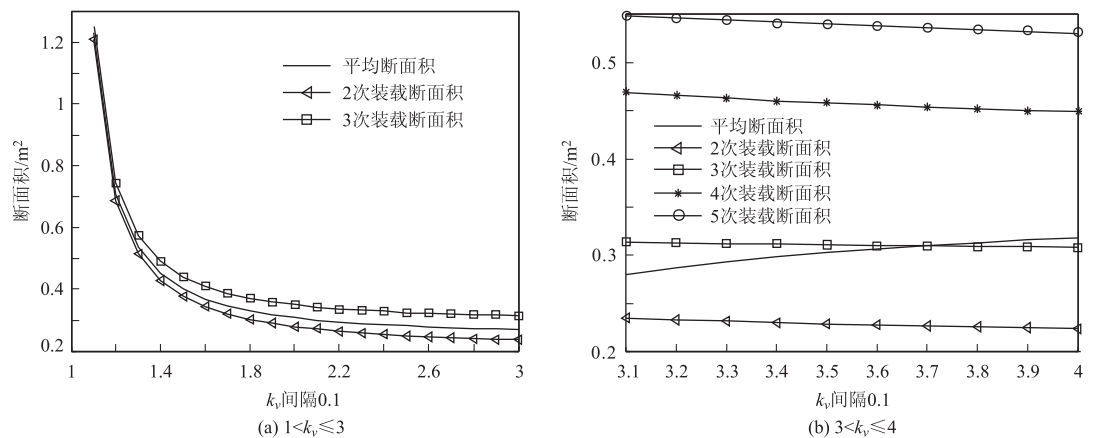


图3 平均断面积与多次装载断面积的比较

存在自然安息角,所以这里考虑占长度最多的装载情况,也即为了更能充分利用输送机的装载断面积,结合图 2 和图 3,平均装载断面积的计算方法是比较合理有效的。

3 高速刨煤法刨煤机工况参数的多目标优化

如前所述,刨煤机的主要工况参数有刨头速度、输送机链速、刨削深度、刨煤机生产能力、输送机输送能力。这些参数的计算和选择涉及多个因素,如能耗、生产能力、输送机装载利用情况等,这些指标非常重要,也是设计和生产刨煤机时最应关心的。这里针对高速刨煤法,考虑刨煤机单位能耗、输送机装载断面积、生产能力多个因素对刨煤机工况参数进行多目标优化,为刨煤机设计和运行提供指导。

3.1 设计变量

在设计刨煤机时,刨煤机工况参数的确定过程是:根据用户要求的生产能力,选用合适的输送机输送能力,进而确定输送机链速和装载断面积,然后确

定刨头速度、刨削深度。因此刨煤机工况参数中的已知条件有:用户要求的生产能力、输送机输送能力、链速、输送机装载断面积,而刨头速度、刨削深度是需要进一步确定的。由于刨头速度的确定需要考虑输送机链速,所以将速比作为设计变量之一。刨削深度是刨煤机运行参数中非常关键的参数。因此将速比和刨削深度作为设计变量 x_1 、 x_2 ,表示为

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = [x_1 \quad x_2]^T = [k_v \quad h]^T \quad (11)$$

3.2 目标函数

将刨煤机单位能耗最低、输送机装载断面积合理利用、生产能力最大作为优化目标。下面分析各目标函数。

1) 刨煤机单位能耗目标函数

刨煤机单位能耗是指刨削单位体积的煤刨煤机所做的功。这里刨煤机所做的功由刨链总牵引力做功得到。刨煤机单位能耗 H_w ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$)、刨削下来的煤的体积 V 和总牵引力所做的功 W_q 可表示为

$$H_w = \frac{W_q}{V} \tag{12}$$

$$V = H \cdot h \cdot k_v \cdot V_s \cdot t \tag{13}$$

$$W_q = \frac{F_0 \cdot k_v \cdot V_s \cdot t}{\eta \cdot 3600} \tag{14}$$

式中, H_w 为单位能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; W_q 为刨链总牵引力所做的功, $\text{kW} \cdot \text{h}$; V 为刨削煤的体积, m^3 ; V_s 为输送机链速, m/s ; t 为刨头的运行时间, s ; F_0 为刨煤机刨链总牵引力, kN ; η 为刨煤机驱动装置的传动效率。

将式(13)和式(14)代入式(12), 得到刨煤机单位能耗目标函数为

$$f_1(X) = H_w = \frac{F_0}{H \cdot h \cdot \eta \cdot 3600} \tag{15}$$

刨链总牵引力 F_0 由刨削力、装煤力、摩擦力等几部分组成,

$$F_0 = F_Z + F_L + F_{ub} + F_{ux} + F_c \tag{16}$$

式中, F_Z 为刨刀总刨削力, kN ; F_L 为刨头装煤力, kN ; F_{ub} 为刨头重力引起的摩擦力, kN ; F_{ux} 为刨刀与煤壁之间的摩擦力, kN ; F_c 为刨链摩擦力, kN 。

刨刀总刨削力可由刨头单侧所有刨刀刨削力之和求得, 单个刨刀刨削力 Z 可由式(17)表示^[1]。

$$Z = Z_0 + f_z \cdot Y \tag{17}$$

式中, Z_0 为单个锐利刨刀刨削力, N , 由式(18)得出; f_z 为截割阻抗系数; Y 为单个刨刀的煤壁挤压力, N , 由式(19)得出。

$$Z_0 = 1.1A \frac{0.0035b_p + 0.03}{(b_p + h \tan \psi)k_6} h t_p k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \frac{1}{\cos \beta} \tag{18}$$

式中, A 为煤的抗截强度, N/mm ; h 为刨削深度, mm ; b_p 为刨刀工作部分的计算宽度, mm ; t_p 为刨槽宽度, mm ; ψ 为截槽侧面崩落角, $(^\circ)$; k_1 为外露自由表面系数; k_2 为截角的影响系数; k_3 为刨刀前刃面形状系数; k_4 为刨刀排列方式系数; k_5 为地压系数; k_6 为考虑煤的脆塑性的系数; β 为刨刀相对刨头牵引方向的安装角度, $(^\circ)$ 。

$$Y = k_n (1 + 1.8S_z) Z_0 \tag{19}$$

式中, k_n 为煤壁挤压力与锐利刨刀刨削力的比值; S_z 为刨刀磨损后在切削平面上的投影面积。

刨头的装煤力是指把刨头前面的煤堆装入输送机过程中, 刨头对煤堆的作用力。在刨头前面运动的煤堆, 实际上处于煤壁、顶板、底板、刨头、输送机等围成的空间中, 刨头向前运行, 处于此空间中的煤

互相挤压, 处在上面的煤被下面的煤挤到输送机上。刨头装煤力的计算公式为^[8]

$$F_L = F_R + F_G + F_K \tag{20}$$

式中, F_R 为刨头装载表面插入煤堆的插入力; F_G 为煤堆从刨头装载表面移动到装载高度所需的力; F_K 为克服煤堆的内摩擦阻力的力。 F_R 、 F_G 、 F_K 可由文献[8]中的公式得到。

刨链的摩擦力 F_c 表示为

$$F_c = 2\mu_c q g L \tag{21}$$

式中, μ_c 为刨链与滑架之间的摩擦系数; $g = 9.8 \text{ m}/\text{s}^2$, 重力加速度; q 为刨链单位长度质量, kg/m 。

刨头重力引起的摩擦力 F_{ub} 和刨刀与煤壁之间的摩擦力 F_{ux} 表示为

$$F_{ub} = \mu_b m g \tag{22}$$

$$F_{ux} = \mu_x \cdot F_X \tag{23}$$

式中, μ_b 为刨头与滑架之间的摩擦系数; m 为刨头的质量, kg ; μ_x 为刨刀与煤壁之间的摩擦系数; F_X 为刨刀侧向力, N , $F_X = K_x \cdot F_Z$, K_x 为侧向力系数 $K_x = 0.1 \sim 0.2$ ^[9]。

2) 输送机装载断面面积利用目标函数

设已选定输送机的最大装载断面面积为 $A_0 (\text{m}^2)$, 将前面求得的平均装载断面面积 A_p 与之比较, 考虑刨煤机装载次数最多的断面面积情况, 为使输送机满足装载条件, 将 A_0 与 A_p 的差值最大作为优化目标, 使输送机装载断面面积得到合理利用, 则目标函数为

$$f_2(X) = A_0 - A_p \tag{24}$$

3) 刨煤机生产能力目标函数

考虑刨煤机生产能力最大的目标函数为

$$f_3(X) = Q = 3600 \rho H h k_v V_s \tag{25}$$

式中, Q 为刨煤机生产能力, t/h ; ρ 为煤的实体密度, t/m^3 。

把上述三个目标函数采用线性加权和法进行组合, 将其中求目标函数极大值转化为求负的极小值, 并采用均值化方法对各子目标函数进行无量纲化处理, 得到目标函数为

$$\min F(X) = w_1 f_1(X) - w_2 f_2(X) - w_3 f_3(X) \tag{26}$$

式中, $w_1 \sim w_3$ 为各目标函数的加权系数, 可根据实际工作面要求和刨煤机情况确定。

3.3 约束条件

关于速比, 刨头速度不能和输送机速度相同, 并且由目前的刨头速度发展情况, 速比的范围可确定为: $1 < k_v \leq 4$ 。刨削深度受刨刀的结构限制, 不应超

过刨刀露于刀座之外的长度 l_p (即刨刀外露长度), 若在脆性很大的煤层, 截割时崩落角很大, 可适当增加刨削深度进行刨削, 但以不超过刀座较宽部位为宜, 因此, 有 $0 < h \leq l_p$ 。刨煤机平均装载断面积 A_p 应小于等于确定的输送机装载断面积 A_0 。刨煤机生产能力 Q 应小于等于输送机输送能力 Q_s (t/h),

$$Q_s = 3600\rho_s A_0 V_s k_\psi$$

(27)

式中, ρ_s 为煤的松散密度, t/m³; k_ψ 为装满系数。

由上述分析, 得到约束条件为

$$\begin{cases} g_1(X) = x_1 > 1 \\ g_2(X) = x_1 \leq 4 \\ g_3(X) = x_2 > 0 \\ g_4(X) = x_2 - l_p \leq 0 \\ g_5(X) = Q \leq Q_s \\ g_6(X) = A_p \leq A_0 \end{cases}$$

(28)

3.4 优化求解及计算实例

在实际设计生产中, 由于设计变量刨削深度和速比都是离散变量, 因此本文采用枚举法编制 MATLAB 程序对刨煤机工况参数进行多目标优化。

以某矿刨煤机参数为例: 刨链规格为 $\phi 38 \times 137$ (棒料直径和链环节距, mm); 单侧刨刀总数 22 把; 刨头质量 $m_2 = 5736$ kg; 刨头与滑架之间的摩擦系数 $\mu_b = 0.2$; 刨链与滑架之间的摩擦系数 $\mu_c = 0.25$; 刨刀与煤壁之间的摩擦系数 $\mu_x = 0.3$; 煤层厚度 $H = 1.4$ m, 脆性煤, 抗截强度 $A = 100$ N/mm; 工作面长度 $L = 150$ m; 刨削深度 $h = 0.05$ m; 输送机断面积 $A_0 = 0.48$ m², 输送机链速 $V_s = 1.3$ m/s; 货载装满系数 $k_\psi = 0.9$; 煤的实体密度 $\rho = 1.3$ t/m³; 煤的松散密度 $\rho_s = 0.8$ t/m³; 刨刀外露长度 $l_p = 0.07$ m。

在生产中刨削深度不会很小, 所以确定各参数的取值范围是: $0.01 \text{ m} \leq h \leq 0.07 \text{ m}$, 间隔 0.001 m ; $1 < k_v \leq 4$, 间隔 0.1 。枚举出满足约束的所有参数方案, 通过比较选取最优的组合方式。考虑加权系数为部分典型值时, 运行优化程序得到的优化结果如表 1 所示。

表 1 加权系数不同的多目标优化结果

w_1	w_2	w_3	$x_1(h)$ /m	$x_2(k_v)$	H_w /(kW·h/m ³)	$A_0 - A_p$ /m ²	Q /(t/h)
1	0	0	0.07	2	0.5260	0.0129	1192.5
0	1	0	0.01	3	2.1878	0.4215	255.53
0	0	1	0.061	3.1	0.5715	0.1110	1610.7
0.3	0.3	0.4	0.044	4	0.7010	0.1775	1499.1
0.4	0.3	0.3	0.043	3	0.7115	0.2284	1098.8
0.45	0.1	0.45	0.063	3	0.5605	0.1114	1609.8

由优化结果可以看出:

1) 当只考虑刨煤机单位能耗最低时 ($w_1 = 1, w_2 = 0, w_3 = 0$), 得到刨削深度为最大, 刨头速度与链速之比为 2, 此时, 输送机最大装载断面积与平均断面积差值很小, 说明输送机断面积得到了充分利用, 生产能力也较高。

2) 当只考虑输送机最大装载断面积与平均断面积的差值最大时 ($w_1 = 0, w_2 = 1, w_3 = 0$), 得到刨削深度为最小值, 速比为 3, 此时单位能耗很高, 生产能力很小。此种情况在实际生产中不建议采用, 仅作为选择参考。

3) 当只考虑刨煤机生产能力最大时 ($w_1 = 0, w_2 = 0, w_3 = 1$), 得到刨削深度较大, 速比也较高, 单位能耗较低, 断面积差值也较小。

4) 当各目标函数的加权系数值接近, 其中考虑生产能力偏多时 ($w_1 = 0.3, w_2 = 0.3, w_3 = 0.4$), 得到刨削深度为 0.044 m, 速比为最高值 4, 此时, 单位能耗不高, 断面积差值也不是很高。

5) 当各目标函数的加权系数值接近, 其中考虑单位能耗偏多时 ($w_1 = 0.4, w_2 = 0.3, w_3 = 0.3$), 刨削深度为 0.043 m, 与考虑生产能力偏多时的值接近, 速比为 3, 单位能耗值相比略微高一点, 断面积差值更高, 生产能力降低较多。

6) 当重点考虑生产能力和单位能耗时 ($w_1 = 0.45, w_2 = 0.1, w_3 = 0.45$), 此时刨削深度较大为 0.063 m, 速比为 3; 得到的单位能耗值较小, 断面积差值较小, 生产能力较高, 与只考虑生产能力最大时的优化结果接近。说明此种条件能够满足单位能耗以及生产能力的要求, 还能兼顾输送机断面积的充分利用。

从以上优化结果可以分析得出, 单纯考虑断面积差值最大的情况不可取, 导致单位能耗非常高, 生产能力很低, 同时, 输送机装载断面积没有得到充分利用。考虑单位能耗或者生产能力, 以及同时考虑这两个因素, 而较少考虑断面积差值, 可以得到较好的优化参数和结果, 能够使输送机断面积得到充分利用, 还能保证低单位能耗和高生产能力。在优化过程中, 调整加权系数, 尤其是适当调整断面积利用目标函数的加权系数, 可以得到较为满意的结果, 为刨煤机参数选择和实际生产运行提供有效的依据和参考。

4 结论

分析刨煤方式中应用广泛的高速刨煤法, 针对

输送机出现多次装载的情况,分析刨头速度和输送机链速的比值不同时的装载量,提出一种计算平均装载断面积的方法,为选择各种运行参数提供依据。通过各种速比条件下,不同装载次数的装载断面的最大长度占工作面长度比例的分析,以及平均断面积与多次装载断面积的比较,得出平均装载断面积的计算公式是较合理有效的。采用线性加权法和,并利用 MATLAB 编制程序,以刨煤机单位能耗最低、输送机装载断面积合理利用、生产能力最大为目标,对关键的刨煤机工况参数——刨头速度和刨削深度,进行多目标优化。优化结果表明,主要考虑单位能耗、生产能力,适当考虑输送机装载断面积,可以得到较好的优化结果,能够为刨煤机参数选择、现场生产运行提供有效直接的参考依据和理论基础。

参考文献

[1]索洛德 В И,格托帕诺夫 В Н,拉切克 В М. 采矿机械与综合机组的设计计算[M]. 殷永龄,翟培祥,译. 北京:煤炭工业出版社,

1989.
[2]保晋 E 3,乜拉麦德 B 3,顿 B B. 采煤机破煤理论[M]. 王庆康,门迎春,译. 北京:煤炭工业出版社,1992.
[3]杨成银. 刨煤机运行速度与输送机货载量的分析[J]. 矿山机械,1999,(3):23-24.
[4]康晓敏,李贵轩,郝志勇. 以极小化单位能耗为目标优化刨削深度[J]. 煤矿机械,2004,(9):42-43.
[5]康晓敏,李贵轩,郝志勇. 以输送机货载断面积均匀化为目标优化刨削深度[J]. 矿山机械,2005,33(2):14-16.
[6]郝志勇,李贵轩,康晓敏. 刨煤机工作面输送机货载均匀性研究[J]. 煤炭工程,2004,(12):57-60.
[7] MYSZKOWSKI M. Efficiency Optimization of Plow Systems Through the Precise Planning of New and Comprehensive Enhancement of Operating Longwalls[C]// DYCZKO A,KICKI J,MYSZKOWSKI M,et al. New Techniques and Technologies in Thin Coal Seam Exploitation: International Mining Forum 2011. London: Taylor & Francis Group,2011:45-54.
[8]康晓敏. 刨煤机动力学分析及对刨链可靠性影响的研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学机械工程学院,2009.
[9]李贵轩,李晓豁. 采煤机械设计[M]. 沈阳:辽宁大学出版社,1994.

(上接第 1028 页)
道错距不宜太大,综合考虑,左右洞开挖错距取 2.5~3 倍洞径较为合理。

参考文献

[1]李奎. 水平层状隧道围岩压力拱理论[D]. 成都:西南交通大学,2010.
[2]夏永旭,鲁彪. 双连拱隧道中隔墙结构优化研究[J]. 公路,2005,3(8):167-169.
[3]朱正国,乔春生,高保彬. 浅埋偏压连拱隧道的施工优化及支护受力特征分析[J]. 岩土力学,2008,29(10):2747-2752,2758.
[4]曾宪营,黄亮. 高速公路连拱隧道中隔墙受力数值模拟及量测[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(7):75-78.
[5]陈秋南,包太,徐泽沛. 隧道工程[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
[6]李学东,陈建平. 当家湾双连拱隧道施工中隔墙数值模拟分析[J]. 路基工程,2009,14(6):121-123.

[7]王飞. 偏压连拱隧道中隔墙受力与接顶时机研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2007,19(11):148-150.
[8]王海强,张成良,陈娱. 浅埋偏压连拱隧道衬砌裂缝监测与分析[J]. 世界科技研究与发展,2016,38(2):341-346.
[9]袁勇,王胜辉,杜国平,等. 双连拱隧道支护体系现场监测试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(3):480-484.
[10]刘涛,沈明荣,陶履彬,等. 连拱隧道动态施工模型试验与三维数值仿真模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(9):1802-1808.
[11]张志强,何川. 连拱隧道中隔墙设计与施工力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(8):1632-1638.
[12]申玉生,高波. 双连拱隧道施工偏压力学特性的监测与分析研究[J]. 岩土力学,2006,27(11):2061-2065.
[13]陈贵红,李玉文,赵玉光. 连拱隧道中墙受力研究[J]. 中国铁道科学,2005,26(1):21-25.
[14]中华人民共和国行业标准. 公路隧道设计规范(JTGD70-2004)[S]. 北京:人民交通出版社,2004.