

# 基于综合截割性能优化的采煤机变速截割控制

刘永刚<sup>1,2</sup>, 侯立良<sup>2</sup>, 秦大同<sup>1,2</sup>, 闫忠良<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 汽车工程学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 针对目前滚筒采煤机在生产过程中采用单一牵引调速影响截割性能的问题,对采煤机的变速截割进行了探索研究.考虑变速截割的可行性及可靠性,按截割阻抗的大小对煤层硬度进行了平均划分;综合考虑不同截割性能指标的要求,对其进行加权平均作为优化目标,对截割运动参数进行了优化;在此基础上,对由截割阻抗变化引起的不同工况的调速策略进行了比较分析,得到了截割性能最优的变速截割调速控制策略.研究结果可为采煤机高效变速截割奠定理论基础.

**关 键 词:** 采煤机;参数优化;截割性能;变速截割;调速控制

中图分类号: TD 421

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)01-0118-06

## Variable Speed Cutting Control of Shearer Based on Cutting Performance Optimization

LIU Yong-gang<sup>1,2</sup>, HOU Li-liang<sup>2</sup>, QIN Da-tong<sup>1,2</sup>, YAN Zhong-liang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China. Corresponding author:

LIU Yong-gang, E-mail: andyliuyg@cqu.edu.cn)

**Abstract:** Variable speed cutting of shearer was studied, in order to solve the practical problem that the cutting performance of the drum shearer decreases when changing the hauling speed only. Considering the feasibility and reliability of variable speed cutting, the hardness of the coal seam was divided into several ranges by its cutting impedance. Aiming at the weighted average optimization of lump coal rate, cutting energy consumption rate and productivity, the cutting motion parameters of shearer were optimized. Besides, various speed control strategies of conditions caused by cutting impedance change were compared, and the speed control strategies for the best cutting performance of different conditions were obtained. The results provide a good reference for the research of high efficiency variable speed cutting.

**Key words:** shearer; parameters optimization; cutting performance; variable speed cutting; speed control

目前,煤炭仍是我国的主要消费能源,其中的90%需要采用井工开采<sup>[1]</sup>.采煤机综采是现今最常用、最安全的井工开采方法,逐步替代了老旧的爆破开采方式.目前,采煤机在实际工作过程中,其滚筒转速一般是固定不变的,工人或系统仅能根据截割工况的变化调节采煤机牵引速度.固定的滚筒转速不仅不能保证较高的采煤效率,而且会使块煤率下降,降低了原煤的经济价值和使用范围<sup>[2-3]</sup>.采煤机的变速截割虽然尚未应用于实

际的煤炭开采,但也有了一定探索和研究.Wang等<sup>[4]</sup>考虑多方面因素影响,对牵引速度和滚筒转速进行了优化,为采煤机变速截割参数最优值选择提供了参考;Hu等<sup>[5]</sup>对变速截割过程中的传动系统电气特性进行了实验分析;恒希传等<sup>[6]</sup>通过理论分析指出为达到较好的截割效果,有必要进行截割电机的变频调速,然后通过理论计算分析了其可行性,为变速截割过程中滚筒转速调节提供了理论支持;马正兰等<sup>[7]</sup>通过理论分析对运

动参数进行了优化,指出利用变速截割的方法可以提高采煤机的截割性能;刘送永等<sup>[8]</sup>根据采煤机截割特征创建了理论分析模型,分析了不同因素对截割比能耗的影响及其影响规律;Zhang 等<sup>[9]</sup>对提高块煤率的采掘及生产技术进行了对比分析研究,提出了一系列解决方案;Venkataraman 等<sup>[10]</sup>利用旋转实验台对截割性能影响因素进行分析,研究结果表明采煤机截割性能主要受滚筒结构参数和运动参数的影响;Bakhtavar 等<sup>[11]</sup>根据研究指出:为保证在截割过程中产生尽可能少的截割粉尘,应考虑降低采煤机滚筒转速或者增加截割深度。

当前采煤机变速截割的研究虽有了一定的进展,但所做的研究和探索等仅是对截割运动参数与截割性能参数之间的分析,尚未对具体变速截割调速策略对截割性能的影响予以分析.本文在基于截割性能的截割运动参数优化的基础上,进一步对采煤机截煤过程中的调速控制策略进行对比分析,得到了不同截割阻抗变化条件下的最优的变速截割调速控制策略。

# 1 截割运动参数优化

## 1.1 主要参数

由以上分析可知,采煤机滚筒截煤时的截割性能与其结构参数和运动参数均有关系.若选定某一型号的采煤机,其结构参数已定,则其截割性能仅与截割运动参数有关.本文以某一 300 kW 电牵引滚筒采煤机为研究对象,进行截割运动参数的优化与调速控制研究,所用采煤机主要结构参数如表 1 所示。

表 1 采煤机主要结构参数	
Table 1 Main configuration parameters of shearer	
名称	主要参数
截割滚筒参数	截齿顺序式布置;滚筒直径为 1 600 mm;
	滚筒截深为 800 mm;双头截齿;
	叶片升角为 20°;叶片崩落角为 60°
齿轮组传动比	牵引部传动比为 198 截割部传动比为 38
牵引电机参数	额定功率为 50 kW
截割电机参数	额定功率为 300 kW

煤具有非均匀性、各向异性的特点,煤层的物理性质极不稳定.采煤机在截割煤层的过程中,对每一截割阻抗都进行运动参数的优化及调节是不现实的,所得结果适应性也不能满足要求.因此,本文将截割阻抗 A 位于 180 ~ 360 N/mm 中的中

硬煤层及硬煤层平均划分为 5 段,如图 1 所示.以各范围中截割阻抗中值所对应的最优牵引速度及滚筒转速作为对应范围内的最优运动参数。

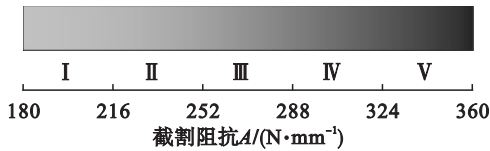


图 1 煤层范围平均划分  
Fig. 1 Coal ranges divided in average

## 1.2 截割性能评价

采煤机的截割性能一般从经济性和生产效率等方面予以评价.采煤机截割运动参数的优化是否合理应通过对比优化前后的块煤率等性能指标的变化来分析,重点考虑以下 3 个性能指标的影响。

### 1.2.1 截割块煤率

块煤率用于衡量所截煤炭质量的好坏,提高块煤率不仅可以提高煤炭价格,还可以降低采煤机及工作过程中产生的粉尘.一般以切削图的面积  $S_m/\text{mm}^2$  作为其分析与评价指标.图 2 为截齿切削示意图。

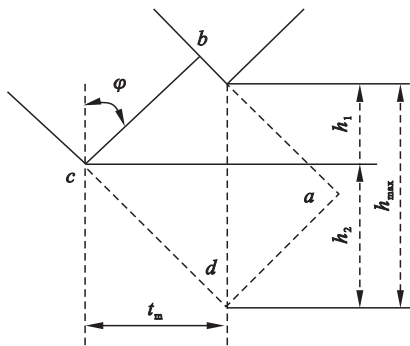


图 2 截齿切削示意图  
Fig. 2 Figure of pick cutting

图中,  $h_1, h_2$  分别为采煤机工作过程中截齿 1, 2 及截齿 2, 3 之间的最大进给量, mm;  $h_{\max}$  为滚筒单个截齿的最大实际切削厚度, mm;  $t_m$  为截线距, mm; 其计算过程为

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{H_m t_m}{\pi D \tan \varphi}, \\ h_2 &= \frac{H_m t}{\pi D} \left( \frac{\pi D}{m} - \frac{t_m}{\tan \varphi} \right), \\ h_{\max} &= \frac{H_m}{m} = \frac{1\,000\,v_d}{mn}, \\ t_m &= \frac{h_{\max}}{\frac{1}{\tan \varphi} + \frac{mh_{\max}}{\pi D \tan \delta}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

则切削图的面积为

$$S_m = l_{ad} l_{cd} \sin 2\varphi = \frac{(1\,000\,v_q \pi D \tan \delta)^2 \tan \varphi}{m^2 (\pi D n \tan \delta + 1\,000\,v_q \tan \varphi)^2} \left( 1 + \frac{1\,000\,v_q}{\pi D n \tan \delta} \right). \quad (2)$$

式中： $v_q$  为牵引速度，m/min； $n$  为滚筒转速，r/min； $D$  为滚筒直径，mm； $\varphi$  为崩落角，rad； $\delta$  为叶片升角，rad； $H_m$  为滚筒旋转一周的进给量，mm； $m$  为每条截线的截齿数，个。

1.2.2 滚筒截割比能耗

截割比能耗  $H_w/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$  表示截割单位体积的原煤时所需要的能量，截割比能耗越低，能量消耗越少，主要用来评价采煤机的截割经济性。运动参数对截割比能耗的影响关系如下：

$$H_w = \frac{K_w A n m}{n m b + 1\,000\,v_q \tan \varphi} \times 10^{-3}. \quad (3)$$

式中： $K_w$  为修正系数，取  $2.78^{[9]}$ ； $b$  为截齿齿刃宽度，mm。

1.2.3 采煤生产率

采煤机的生产率  $Q/(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$  表示采煤机单位工作时间下的采煤量。如式(4)所示，滚筒转速变化不会影响到生产率，而牵引速度与生产率成正比关系。

$$Q = K_v H L \rho v_q. \quad (4)$$

式中： $K_v$  为采煤生产系数，根据一般经验取值为 60； $H$  为采高，m； $L$  为滚筒截深，m； $\rho$  为煤炭密度，t/m<sup>3</sup>，此处取为 1.4 t/m<sup>3</sup>。

1.3 优化结果

以切削图面积  $S_m$  (块煤率)、截割比能耗  $H_w$  和生产率  $Q$  的加权平均最优为优化目标，以牵引速度  $v_q$  和滚筒转速  $n$  为设计变量，

$$\mathbf{X} = [x_1, x_2]^T = [v_q, n]^T. \quad (5)$$

以截割电机功率、牵引电机功率以及装煤约束等为约束条件，建立优化目标函数为

$$\min F(\mathbf{X}) = K_1[-S(\mathbf{X})] + K_2 H_w(\mathbf{X}) + K_3[-Q(\mathbf{X})]. \quad (6)$$

式中， $K_1, K_2, K_3$  表示块煤率、截割比能耗及生产率所对应的权重系数， $K_1 + K_2 + K_3 = 1$ ，根据一般经验及相关企业生产工作的要求，此处确定  $K_1 = 0.4$ ， $K_2 = 0.2$ ， $K_3 = 0.4$ 。采用模拟退火算法(SA)对传统的粒子群算法(PSO)的优化结果进行进一步的优化，得到 PSO-SA 优化算法，提高了传统 PSO 优化算法的全局搜索能力。本文利用 PSO-SA 算法对采煤机截割过程中的牵引速度  $v_q$  和滚筒转速  $n$  进行优化，其优化结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出，为使采煤机工作时的综合截割性能最优，应随截割阻抗的增加相应地减小牵引速度和滚筒转速，但滚筒转速的降低相对更快。考虑到变速截割的可实现性，本文采用分级变速的思想，当截割阻抗范围出现变化时，根据图 3 中的值对运动参数进行调节。将图 3 中的最优牵引速度、最优滚筒转速和各范围下的截割阻抗中值分别代入式(2)，式(3)和式(4)中，经计算可得不同截割阻抗范围下的采煤机的各项截割性能，如表 2 所示。

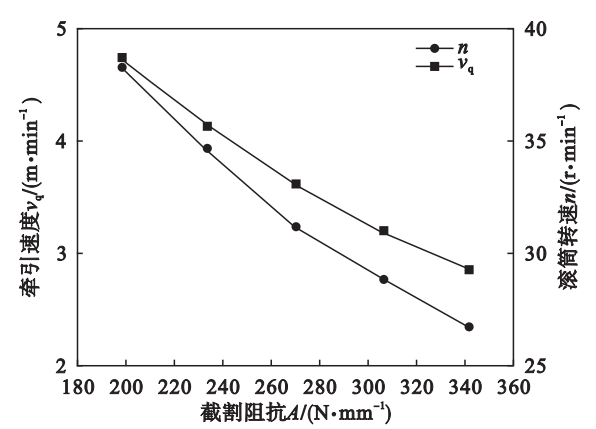


图 3 截割运动参数优化结果  
Fig. 3 Optimization of the kinematic parameters

表 2 优化后的运动参数及其截割性能  
Table 2 Optimized motion parameters and cutting performances

$A$ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$	$n$ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	$v_q$ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$	$S_m$ $\text{mm}^2$	$H_w$ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3}$	$Q$ $\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$
180 ~ 216	38.2	4.7	2 599.9	0.006 8	794.64
216 ~ 252	34.6	4.1	2 426.5	0.008 2	693.84
252 ~ 288	31.1	3.6	2 302.1	0.009 7	606.48
288 ~ 324	28.8	3.2	2 094.6	0.011 5	534.24
324 ~ 360	26.7	2.8	1 951.5	0.013 3	477.12

2 截割阻抗减小时的调速策略

由于煤层性质不稳定，假设煤层截割阻抗可在所划分的范围内自由变化，如图 4 所示，结合图

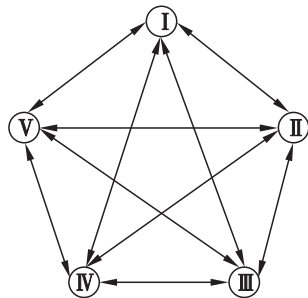


图 4 煤层截割阻抗范围变化示意图  
Fig. 4 Change of coal seam cutting impedance ranges

3 可知,不同的变化对应不同的调节量及调节方向.同时,综合式(1),式(4)可知,牵引速度和滚筒转速对各截割性能的影响不尽相同:生产率仅与牵引速度相关;切削图面积与牵引速度呈正相关关系,与滚筒转速呈负相关关系;截割比能耗与之相反,截割比能耗与牵引速度呈负相关关系,与滚筒转速呈正相关关系.因此,截割运动参数的调节方向和顺序不同,调速过程中各截割性能的综合效果也是不同的.以截割阻抗范围Ⅲ及其所对应的截割运动参数为例:设煤层截割阻抗降至范围Ⅱ,则相应地提高牵引速度及滚筒转速.不同的调速策略有三种:①先调节滚筒转速再调节牵引速度;②先调节牵引速度再调节滚筒转速;③同步调节牵引速度与滚筒转速.

采煤机结构参数一定时,截割性能仅与运动参数有关,为便于分析,设两者均为线性变化但时序不同.以策略①为例,其具体调速步骤如图 5 所示.

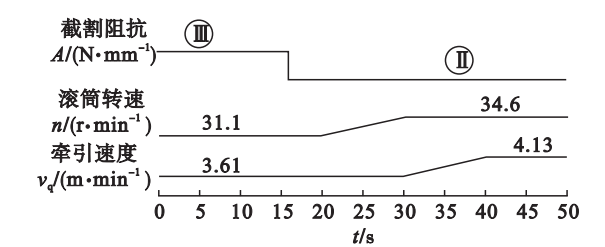


图 5 变速截割调速步骤  
Fig. 5 Speed control step of variable speed cutting

根据相关公式计算可以得到该调速过程中采煤机截煤时的各截割性能的变化,如图 6 所示.

由图 6a 可以看出,随着滚筒转速的上升,会使切削图面积逐渐减小,即块煤率逐渐降低;而随着牵引速度的上升会使切削图面积不断增大,即块煤率不断提高;相比而言,牵引速度的变化对切削图面积的影响更加显著,因此最终的切削图面积较初始状态增加约 5%,即在策略①的条件下块煤率出现上升.由图 6b 可以看出,随着滚筒转速的上升,截割比能耗逐渐增加,而随着牵引速度的上升,使截割比能耗逐渐降低,牵引速度对截割比能耗的影响更加明显,最终截割比能耗下降了 3.15%.由图 6c 可以看出,采煤机的生产率仅与牵引速度有关,因此调节滚筒转速时生产率保持不变,而后随着牵引速度的增加生产率提高约 14.4%.

同理,可以得到采煤机在该工况下调速时,采用策略②和策略③时的调速过程中各截割性能曲线变化,对其进行分析比较,如图 7 所示.

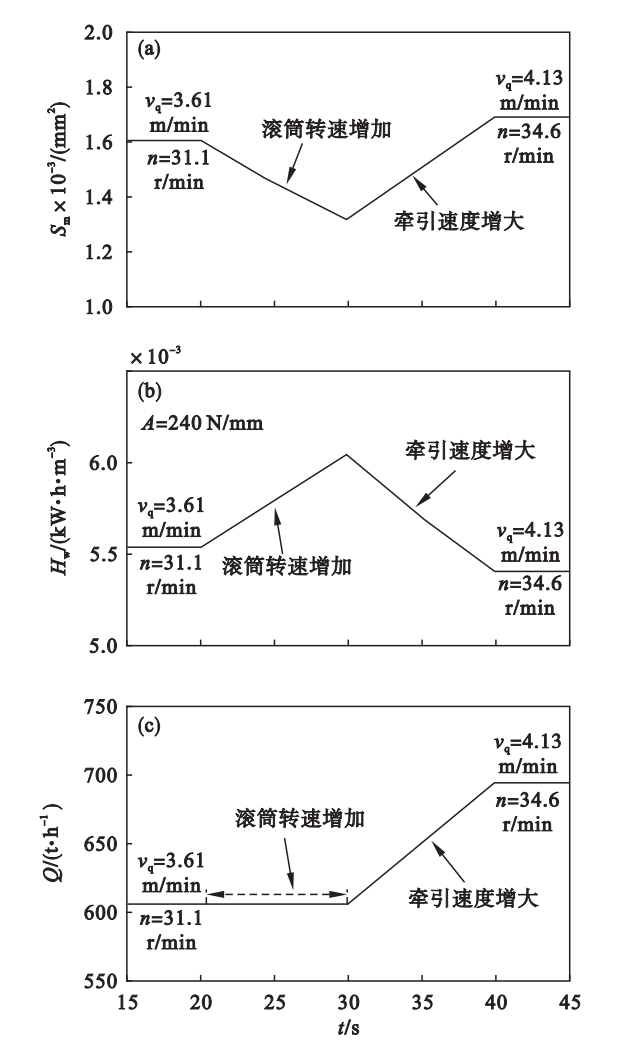


图 6 采用策略①时各截割性能曲线  
Fig. 6 Cutting performance of strategy one  
(a)一切削图面积;(b)一截割比能耗;(c)一生产率.

结合图 7,分别根据三种截割性能指标对三种策略进行从优到劣的排序.

- 1) 按块煤率从大到小:②,③,①;
- 2) 按截割比能耗从低到高:②,③,①;
- 3) 按生产率从高到低:②=③,①.

根据图 7 及上述对比可得:相较于策略①与策略③,截割阻抗减小时,采用策略②进行调速可以获得最高的块煤率、最低的截割比能耗及较高的生产率.因此,在截割阻抗减小的情况下,应选择策略②,即先增大牵引速度,待稳定后再提高滚筒转速的方式进行变速调节,能够表现出比策略①与策略③更优的综合截割性能.

### 3 截割阻抗增加时的调速策略

在截割阻抗增加的情况下,以煤层硬度由范围Ⅲ变化至范围Ⅳ的过程为例,为保证较高的截割性能,在此过程中应降低牵引速度和滚筒转速.



相似地,可以得到策略①、策略②以及策略③调速过程中各截割性能曲线并进行比较,其结果如图 8 所示.

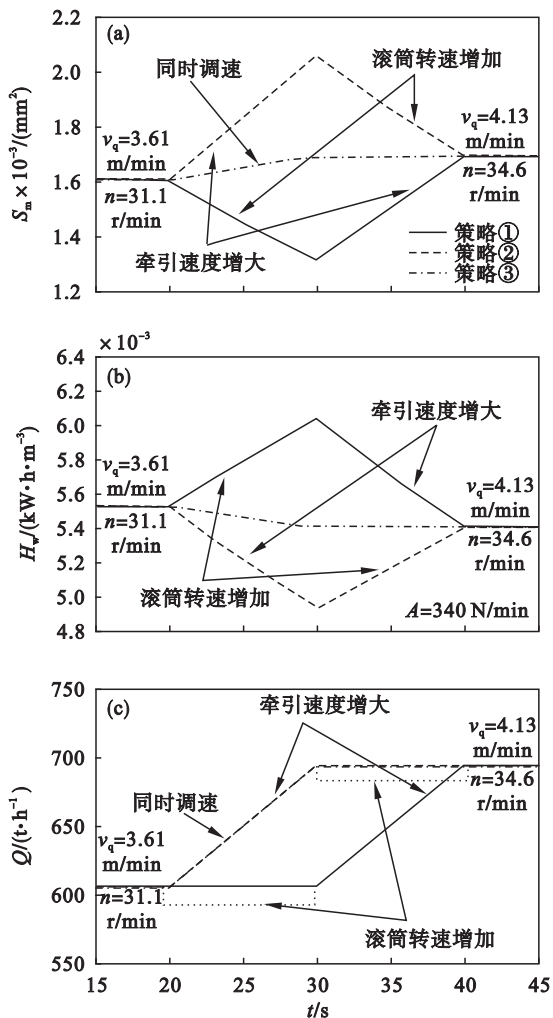


图 7 截割阻抗减小时不同控制策略对比  
Fig. 7 Comparison between different strategies when the cutting impedance decreases  
(a)一切削图面积; (b)一截割比能耗; (c)一生产率.

结合图 8, 分别根据三种截割性能指标对三种策略进行从优到劣的排序.

- 1) 按块煤率从大到小: ①, ③, ②;
- 2) 按截割比能耗从低到高: ①, ③, ②;
- 3) 按生产率从高到低: ①, ② = ③.

根据图 8 及上述对比可得: 相较于策略②与策略③, 截割阻抗增加时, 采用策略①能够使采煤机在调速过程中保持较高的综合截割性能, 即在变速截割的过程中块煤率、截割比能耗及生产率的表现均为最优. 因此, 在煤层截割阻抗增加的情况下, 应选择策略①进行变速, 先降低滚筒转速, 待稳定后再降低牵引速度.

综上所述, 在由煤层截割阻抗变化引起的采煤机工况变化时, 应根据变化情况采用不同的调速策略进行采煤机的变速截割控制, 以保证采煤

机具有相对最优的综合截割性能.

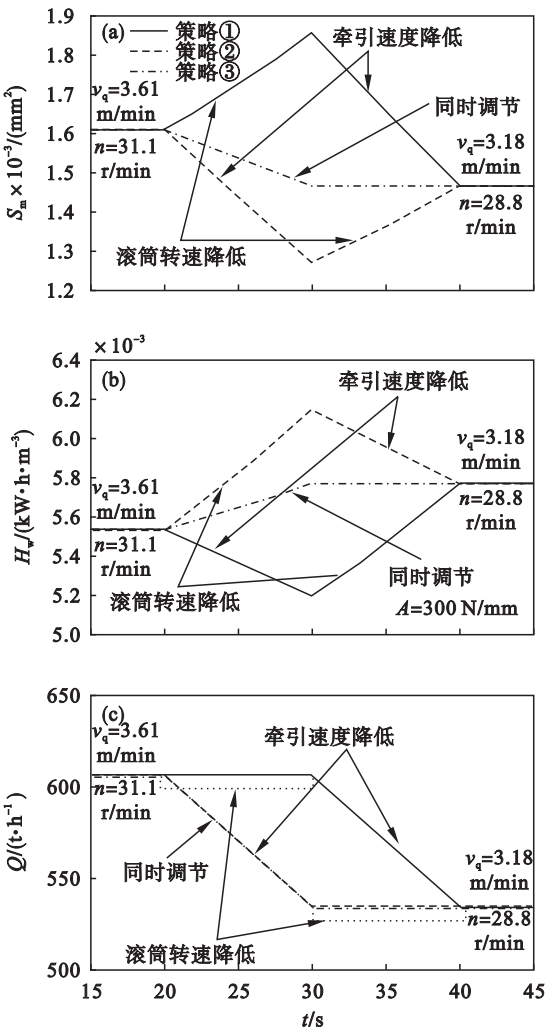


图 8 截割阻抗增加时不同控制策略对比  
Fig. 8 Comparison between different strategies when the cutting impedance increases  
(a)一切削图面积; (b)一截割比能耗; (c)一生产率.

## 4 结 论

1) 通过理论计算分析了牵引速度、滚筒转速与截割性能之间的关系, 为变速截割策略制定提供理论基础.

2) 基于对煤层的平均划分, 以各范围中值点为优化点, 为实现调速过程中三种截割性能加权平均最优, 对滚筒转速和牵引速度进行了分段优化, 获取了不同截割阻抗范围内最优运动参数.

3) 截割阻抗减小时, 选择策略②, 即先增大牵引速度, 待稳定后再提高滚筒转速; 截割阻抗增加时, 采用策略①, 即先降低滚筒转速, 待稳定后再降低牵引速度.

(下转第 137 页)