

文章编号:0253-9993(2012)12-2112-06

纵轴式掘进机横摆运动参数的优化设计

赵丽娟¹,刘旭南¹,曹 拓²

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院,辽宁 阜新 123000;2. 兖矿集团有限公司 机电设备制造厂,山东 邹城 273500)

摘要:建立了掘进机横摆过程中液压杆伸缩量与横摆速度之间的数学模型,由单位能耗反求法推导出理论横摆速度,并估算了其取值范围;应用 Matlab 计算出不同横摆速度下的载荷曲线;在多体动力学仿真软件 ADAMS 中建立了掘进机的刚柔耦合模型,并对不同横摆速度及相应载荷下的模型进行动态仿真;以掘进机生产率、回转台可靠性及寿命为约束条件,对横摆速度进行优化。结果表明:基于某工况,在保证回转台可靠工作的前提下,液压杆伸出速度为 2.887 mm/s,即横摆线速度为 1.106 m/min 时,该型号掘进机能达到经济截割。

关键词:掘进机;回转台;虚拟样机;优化设计;经济截割

中图分类号:TD421.5 文献标志码:A

Horizontal swing movement parameters optimization design of longitudinal road header

ZHAO Li-juan¹, LIU Xu-nan¹, CAO Tuo²

(1. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. Electromechanical Equipment Manufacturing Plant, Yankuang Group, Zoucheng 273500, China)

Abstract: Mathematical model between hydraulic piston rod expansion capacity and horizontal swing velocity was built during the horizontal swing movement of the road header. Theoretical velocity was derived from unit energy consumption reverse method, and its value range was estimated. By using Matlab software, load curves of different horizontal swing velocities was calculated. The road header's rigid-flexible coupling model was built in multi-body dynamics simulation software ADAMS and dynamic simulations were done under different velocities and load cases. Take productivity of road header, reliability and lifetime of gyration platform as constraint conditions, the velocities of horizontal swing movement were optimized. The results show that on the premise of gyration platform working reliably, when the expansion speed of piston rod is 2.887 mm/s, namely horizontal swing velocity is 1.106 m/min, the road header gets the economical cutting.

Key words: road header; gyration platform; virtual prototype; optimization design; economical cutting

随着采煤机械化程度的提高,为了满足矿井产量及巷道断面不断扩大的要求,悬臂式掘进机正朝着大截割功率和重型化方向发展。国内对悬臂式掘进机的设计与研究工作也主要集中在如何加大截割功率、提高截割效率上^[1-2]。目前,各大掘进机生产商多在追求截割效率,却很少考虑到节约成本、减少能耗以

及设备可靠性等方面的问题。掘进机主要通过悬臂左右摆动来实现煤岩断面截割,因此,截割臂横摆速度不仅决定了截割效率,而且也是影响掘进机掘进能力和回转台寿命的重要参数。采用虚拟样机技术,可使设计人员在虚拟环境中模拟掘进机横摆的各种工况,根据横摆工况快速分析出回转台的受力情况,获

收稿日期:2011-11-21 责任编辑:许书阁

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2007BAF12B00);辽宁省教育厅高等学校创新团队资助项目(2007T070)

作者简介:赵丽娟(1964—),女,辽宁阜新人,教授,博士生导师。Tel:0418-3352413, E-mail:zlj2120@163.com。通讯作者:刘旭南(1985—),男,辽宁开原人,博士研究生。E-mail:yuwuknan@163.com

取横摆液压杆的最优伸缩速度,为掘进机经济截割以及优化设计提供一种新的方法。

1 数学模型的建立

1.1 截割头功率的计算

掘进机截割部由截割头、伸缩部、截割减速器和截割电机组成。截割电机具有较大的转速,通过大传动比减速器将转速降低,以增大截割头的扭矩使其具有较强的截割能力。行星轮系结构具有体积小、传动比大、传动效率高特点^[3],而被广泛应用于掘进机减速器设计中。行星减速器的传动比为

$$i_{H_n1} = \frac{Z_1^n}{Z_3^n + Z_1^n} \quad (1)$$

其中, Z_1^n 为第 n 级太阳轮齿数; Z_3^n 为第 n 级齿圈齿数。则第 $n+1$ 级输出功率为

$$P_{n+1} = P_n - |P_n(1 - i_{H_n1})| (1 - \eta_n) \quad (2)$$

式中, P_n, P_{n+1} 分别为第 n 级、 $n+1$ 级输出功率, kW; η_n 为第 n 级转化轮系的效率。

某型号掘进机行星减速装置如图 1 所示,转化轮系的效率相同,在不考虑花键传递损失功率的前提下,根据式(1),(2)可求得截割头功率为

$$N = \left[P - P \left(1 - \frac{Z_1^1}{Z_3^1 + Z_1^1} \right) (1 - \eta) \right] \times \left[1 - \left(1 - \frac{Z_1^2}{Z_3^2 + Z_1^2} \right) (1 - \eta) \right] \quad (3)$$

式中, N 为截割头功率, kW; P 为截割电机功率, kW。

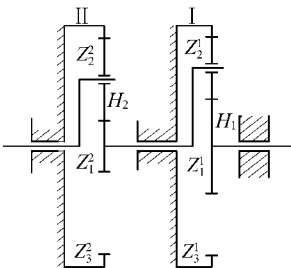


图 1 行星减速机构简图

Fig. 1 Diagram of planetary deceleration mechanism

H_1, H_2 分别表示一级和二级行星架

1.2 截割头横摆加速度的求解

根据单位时间内截割头上消耗的功率反求截割头的横摆速度,截割头质心点横摆线速度^[4]为

$$x_1 = \sqrt{2a^2(1 - \cos \alpha) + b^2 + 2ab\sqrt{2(1 - \cos \alpha)} \sin\left(\delta - \frac{\alpha}{2}\right)} - b \quad (8)$$

由方程组(7)可以得到缩量 x_2 和摆动角度 α 的关系,即

$$x_2 = b - \sqrt{2a^2(1 - \cos \alpha) + b^2 - 2ab\sqrt{2(1 - \cos \alpha)} \sin\left(\delta - \frac{\alpha}{2}\right)} \quad (9)$$

$$V_b = N / (60H_wLD) \quad (4)$$

其中, H_w 为单位能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$; L 为截割头长度, m; D 为截割头平均直径, m; V_b 为截割头横摆速度, m/min 。单位能耗 H_w 取决于煤岩特性、工作机构的类型和参数,由于悬臂式掘进机截割时,至少存在两个以上的自由度,对于 $f=8$ 的煤岩,可取 $H_w=6$ 。

截割头横摆角速度:

$$\omega_b = 3V_b / (\pi R) \quad (5)$$

式中, ω_b 为截割头横摆角速度, $(^\circ)/\text{s}$; R 为回转中心到滚筒质心的距离, m。

1.3 掘进机横摆时液压杆伸缩速度的确定

截割头横摆与左右油缸位置关系如图 2 所示,液压组件 A_1B_1 和 A_2B_2 的原始长度均为 b ,某一时刻截割头摆动角度为 α ,液压杆伸出量 x_1 ,则向右侧摆动时间 t 后液压组件 A_1C_1 长度为 $b+x_1$,回转台中心到液压杆回转中心的距离 OB_1 长度为 a , OB_1 与液压组件 A_1B_1 所成的角度为 δ ;液压杆缩量 x_2 , A_2C_2 长度为 $b-x_2$,回转台中心到液压杆回转中心的距离 OB_2 长度也为 a ,其与液压组件 A_2B_2 所成的角度为 δ 。得到方程组(6),(7):

$$\begin{cases} B_1C_1^2 + b^2 - 2bB_1C_1 \cos(\delta + \theta_1) = (b + x_1)^2 \\ B_1C_1^2 = a^2 + a^2 - 2aa \cos \alpha \\ \theta_1 = (180^\circ - \alpha) / 2 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} B_2C_2^2 + b^2 - 2bB_2C_2 \cos(\delta - \theta_2) = (b - x_2)^2 \\ B_2C_2^2 = a^2 + a^2 - 2aa \cos \alpha \\ \theta_2 = (180^\circ - \alpha) / 2 \end{cases} \quad (7)$$

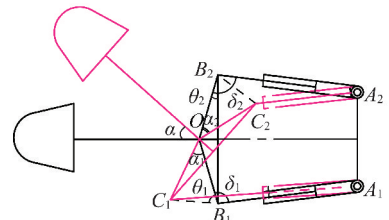


图 2 截割头横摆与左右油缸位置关系

Fig. 2 Positional relationship of left and right cylinder when the cutting head horizontal swing

由方程组(6)可以得到伸出量 x_1 和摆动角度 α 的关系,即

以该型号掘进机为例, a, b, δ 分别为 806.040 mm, 1 802.28 mm 及 83.308 $^\circ$, 由函数表达式(8), (9)可以得到液压杆伸出、缩进长度与截割头摆角的关系, 如图 3 所示。由图 3 可见, 液压杆伸出的速度要比缩进的速度快, 且该差值随着截割头横摆角度的增大而增大。液压组件极限位置的限制导致该截割头单侧最大摆角为 33 $^\circ$ 对应的伸出、缩进量分别为 428.2 mm 和 409.2 mm, 当单侧摆动时间一定时, 通过图 3 便可推导出液压杆的伸缩速度。

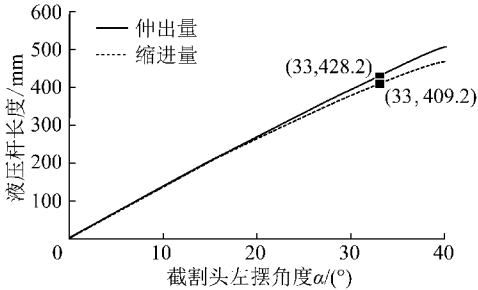


图 3 液压杆伸出缩进长度与摆动角度的关系
Fig. 3 Relationship between telescopic lengths of hydraulic piston rod and swing angles

通过掘进机相关参数 $Z_1^1 = 14, Z_3^1 = 88, Z_1^2 = 17, Z_3^2 = 59; \eta = 0.9604; P = 220 \text{ kW}; H_w = 6; L = 0.765 \text{ m}; D = 0.675955 \text{ m}$, 计算得到截割头最大横摆线速度 $V_{b \max} = 1.38 \text{ m/min}$ 。按等间距插值法得到 5 组横摆速度, 通过横摆速度及式(5), (8), (9)可得截割头单侧横摆相关运动参数见表 1。

表 1 截割头单侧横摆运动参数

Table 1 Cutting head unilateral horizontal swing movement parameters

组别	单侧横摆所需要时间/s	横摆线速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	回转台摆动速度/ $(^\circ \cdot \text{s}^{-1})$	液压杆伸出速度/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
1	118.9	1.380	0.2777	3.600
2	132.0	1.243	0.2500	3.245
3	148.3	1.106	0.2225	2.887
4	169.3	0.969	0.1950	2.530
5	197.6	0.832	0.1674	2.172

2 截割头载荷计算

在掘进机截岩过程中, 作用于单个截齿上的截割阻力常采用前苏联学者提出的计算方法^[5], 作用于截齿上的截割阻力 $Z(\text{kN})$ ^[6-8]、牵引阻力 $Y(\text{kN})$ 分别为

$$Z = P_k [k_T k_g k'_y (0.25 + 0.18th) + 0.1S_j] \quad (10)$$

$$Y = k_{n1} Z \quad (11)$$

式中, P_k 为岩石的接触强度, MPa; k_T 为截齿的类型系数; k_g 为截齿几何形状影响系数; k'_y 为截齿截角影响系数; t 为平均截线距, mm; h 为平均切削厚度, mm; S_j 为齿的后刃面磨钝后在牵引方向的投影面积, mm^2 ; k_{n1} 为牵引阻力影响系数。

基于掘进机破岩机理, 通过式(10), (11)应用 Matlab 软件编制程序计算出每个截齿上的力, 并将其转化到截割头质心处^[9]。得到 5 组力、力矩曲线, 如图 4, 5 所示; 通过截割头瞬时力矩及转速计算出其最高截割功率曲线, 如图 6 所示, 通过图 6 可以看出截割头上的截割功率峰值接近截割电机额定功率, 由电机输出特性曲线额定功率与最大功率关系可知, 此时的截割电机已达到了最大截割功率。可见 Matlab 载荷计算方法与单位能耗反求法计算的结果是一致的。

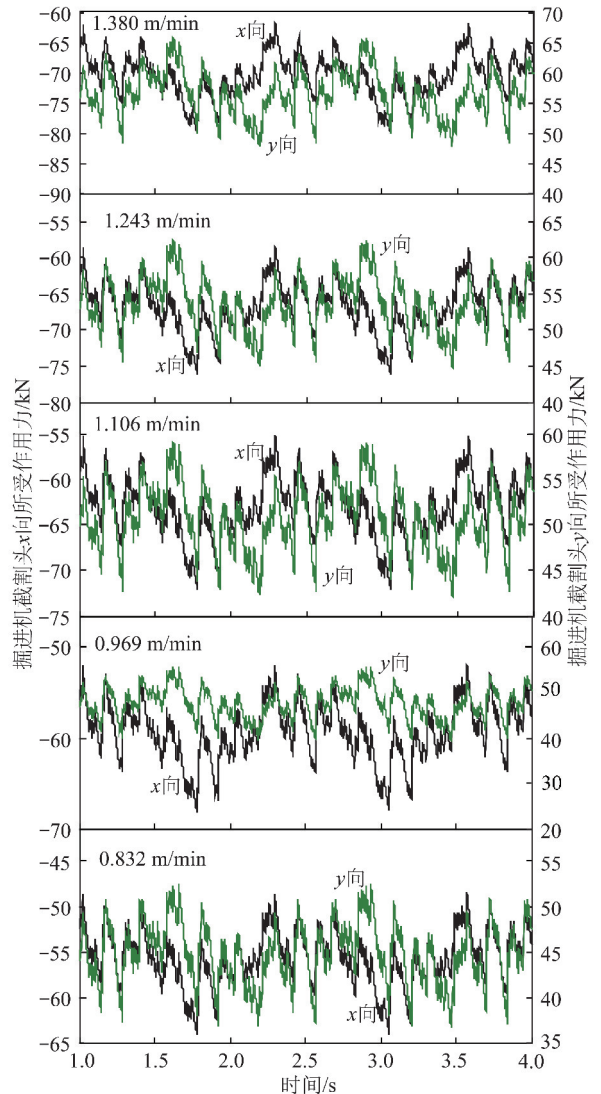


图 4 5 组横摆速度下掘进机截割头三向力曲线
Fig. 4 Three-axis force curves on roadheader's cutting head under five different horizontal swing velocities

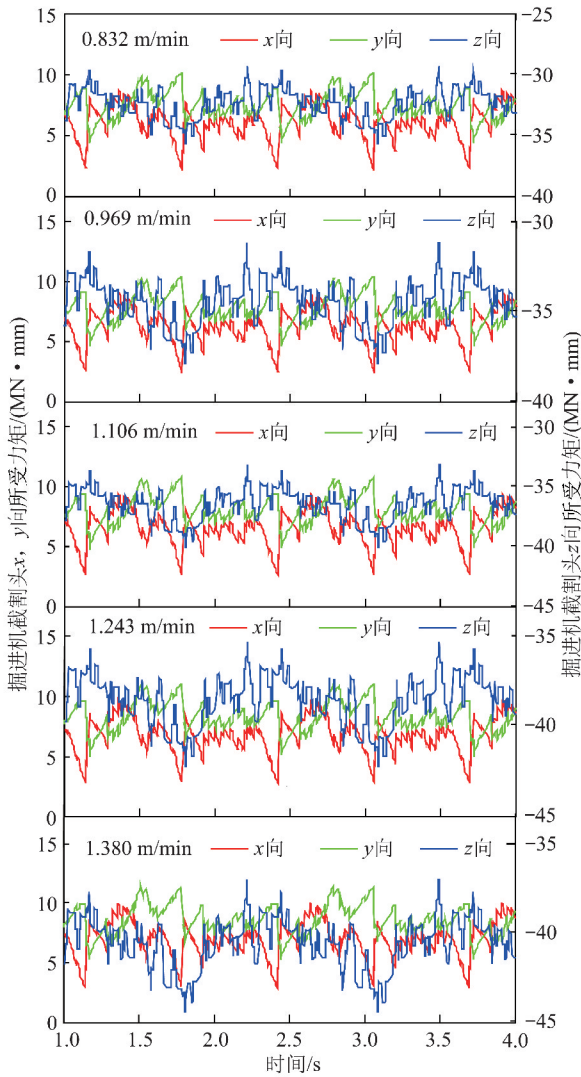


图 5 5 组横摆速度下掘进机截割头三向力矩曲线

Fig. 5 Three-axis torque curves on roadheader's cutting head under five different horizontal swing velocities

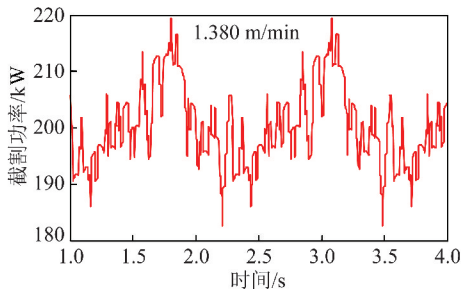


图 6 截割头最高截割功率曲线

Fig. 6 The highest cutting power curve of cutting head

3 虚拟样机模型建立及横摆速度优化

3.1 虚拟样机模型的建立

通过三维实体建模软件 Pro/Engineer 实现掘进机模型的建立及虚拟装配,利用 Pro/E 与 ADAMS 之间的无缝接口软件 Mechanism/Pro^[10-11] 将掘进机几

何模型导入到 ADAMS 中,利用有限元分析软件 ANSYS 对回转台进行网格划分并生成模态中性文件,读入到 ADAMS 中并替换相应的刚性回转台,通过施加约束、接触、驱动以及导入在 Matlab 中生成的载荷文件^[12-14],最终建立刚柔耦合掘进机虚拟样机模型如图 7 所示。

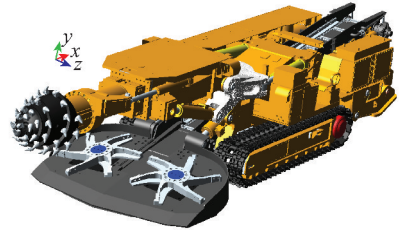


图 7 掘进机刚柔耦合虚拟样机模型

Fig. 7 The virtual prototype of roadheader

3.2 横摆速度的优化

对掘进机横摆速度进行优化既可以提高回转台的设计质量,缩短设计周期,又可以提高生产效率,降低生产成本。将表 1 中的液压杆伸出速度作为设计变量,通过 step 函数进行插值并得到 5 次序列值,就可以对比液压杆伸出速度取不同值时截割生产率与回转台应力和寿命的优劣性,从而确定较优方案。

基于掘进机虚拟样机模型的动态仿真,便可得到回转台最大应力节点的时域应力曲线,图 8 显示的是回转台螺栓孔处同一节点在不同横摆速度下的应力曲线,由图 8 可见,随着横摆速度的降低,应力值也普遍降低且应力波动更为均匀。通过 ADAMS 后处理中的 Durability 模块导出 nSoft FE-fatigue 需要的 DAC(时间历程载荷)、FES(应力结果)和 LAF(模态)文件^[15],在 nSoft 中以 Von Mises 为参考量进行疲劳寿命预测。图 9 为横摆速度 1.38 m/min,即液压杆伸出速度为 3.60 mm/s 时的回转台疲劳寿命报告。根据 1~4 s 内的疲劳损伤值计算出液压杆在该伸出速度下回转台最大应力节点 10790 的疲劳寿命,同理计算其它 4 组摆速下回转台疲劳寿命见表 2。

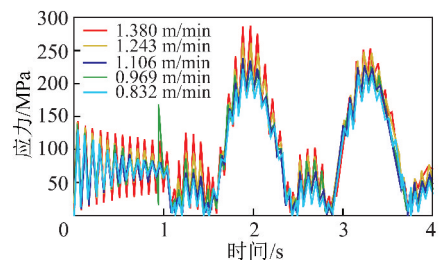


图 8 回转台 5 组应力曲线对比

Fig. 8 The comparison of gyration platform stress under 5 different horizontal swing velocities

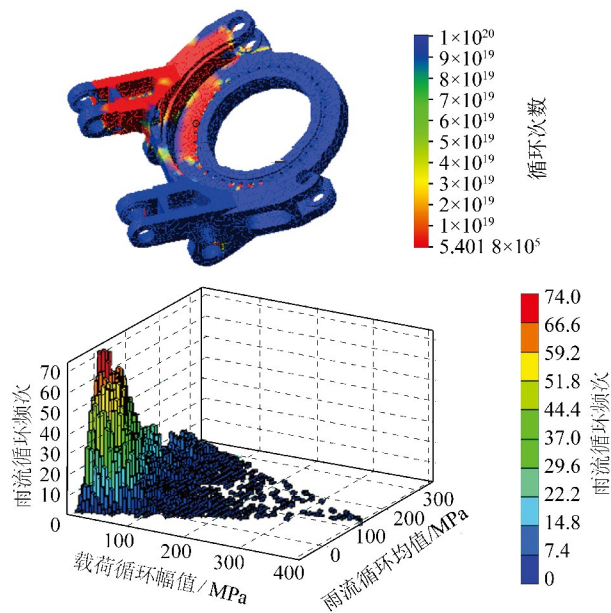


图9 横摆速度 1.38 m/min 的疲劳寿命报告

Fig. 9 Fatigue life report when the horizontal swing speed is 1.38 m/min

表 2 5 组摆速下回转台最大应力及疲劳寿命关系

Table 2 Gyration platform maximum stress and fatigue life relationship of 5 different horizontal swing velocities

组别	液压杆伸出速度/(mm·s ⁻¹)	最大应力值/MPa	疲劳寿命循环次数	Damage
1	3.600	271.431 0	5.401 8×10 ⁵	1.851 23×10 ⁻⁶
2	3.245	264.096 3	7.245 0×10 ⁵	1.380 36×10 ⁻⁶
3	2.887	248.583 6	3.150 6×10 ⁶	3.173 96×10 ⁻⁷
4	2.530	240.660 1	3.150 6×10 ⁶	3.173 96×10 ⁻⁷
5	2.172	236.870 6	7.507 5×10 ⁶	1.332 00×10 ⁻⁷

通过表 2 可知,随着横摆速度的降低,回转台的应力情况得到了改善,寿命也有所提高。

理论截割生产率为

$$Q_T = 60\gamma\lambda AV_b$$

式中, A 为截割头的横截平均面积; γ 为煤岩的容重; λ 为煤岩松散系数^[16]。

掘进机在截割特定工作面时,以上参数变化不大,当横摆速度下降时,整机的生产率也下降。为了达到经济截割应在保证回转台的强度和寿命的前提下,尽可能的提高其回转速度。

采用多次样条曲线绘制多目标纵轴优化,如图 10 所示,液压杆伸出的最优速度为 2.887 mm/s;此时回转台所受最大应力为 248.583 6 MPa;疲劳寿命循环达到 3 150 600 次,Damage 为 3.173 96×10⁻⁷;截割生产率也能达到较大值,通过优化计算得到最大理论截割生产率为 115.8 t/h。

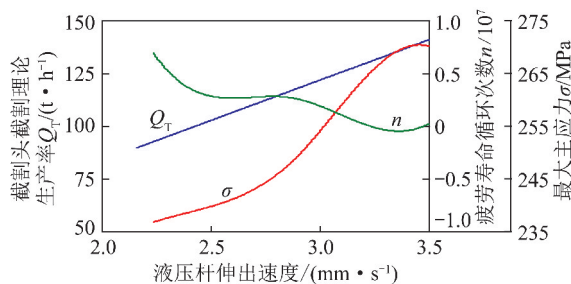


图 10 多目标纵轴优化

Fig. 10 Multi-target longitudinal axis optimization graph

4 结 论

(1)纵轴式掘进机截割头横摆过程中,其横摆角度越大,液压杆伸出与缩进量的差值也越大,且具有非线性。

(2)通过截割头最高截割功率曲线验证了单位能耗反求法的准确性。

(3)在某种工况下,液压杆伸出的最优速度为 2.887 mm/s,回转台所受应力为 248.583 6 MPa 小于其许用应力,此时最大理论截割生产率为 115.8 t/h。

通过优化分析找出了掘进机在截割过程中液压杆的最佳伸缩速度,基于该方法可以在保证关键零部件可靠性及寿命的前提下,提高掘进机的截割效率,减少能源的浪费,为产品的优化、性能评价提供一种全新的手段。

参考文献:

[1] 田 劫. 悬臂掘进机掘进自动化截割成形控制系统研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2010:5-7.
Tian Jie. Research on boom-type roadheader auto cutting and profiling control system[D]. Beijing: China University of Mining Technology(Beijing),2010:5-7.

[2] 李军利. 悬臂掘进机掘进断面自动成形理论与控制策略研究[D]. 太原:太原理工大学,2009:1-7.
Li Junli. Research on automatic cross section profiling theory and control strategy for boom-type roadheader[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2009:1-7.

[3] 周建兴,刘 更,吴立言,等. 中心轮浮动式行星传动动态均载性能研究[J]. 机械科学与技术,2009,28(7):857-861.
Zhou Jianxing, Liu Geng, Wu Liyan, et al. Load sharing characteristic of a planetary gear system with load balancing mechanism[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2009, 28(7):857-861.

[4] 李 军. 部分断面横轴悬臂式掘进机截割头设计参数的验算与优化设计[D]. 长春:吉林大学,2005:38-53.
Li Jun. Checking parameter and optimizing design to selective cross shaft roadheader cutting head design[D]. Changchun: Jilin University, 2005:38-53.

[5] 赵丽娟,何景强,许 军,等. 截齿排列方式对薄煤层采煤机截

- 荷的影响[J]. 煤炭学报, 2010, 36(8): 1401-1406.
- Zhao Lijuan, He Jingqiang, Xu Jun, et al. Effect of pick arrangement on the load of shearer in the thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 36(8): 1401-1406.
- [6] 李晓豁, 姜丽丽. 掘进机截割硬岩的载荷模拟研究[J]. 中国工程机械学报, 2008, 6(4): 415-417.
- Li Xiaohuo, Jiang Lili. Excavator loading simulation for hard-rock cutting[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2008, 6(4): 415-417.
- [7] 汲方林. 横轴式掘进机截割头仿真及优化设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2006: 20-25.
- Ji Fanglin. Transverse roadheader cutting head simulation and optimized design[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2006: 20-25.
- [8] 李晓豁. 掘进机截割的关键技术研究[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 87-115.
- Li Xiaohuo. Key technology research on roadheader cutting[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007: 87-115.
- [9] 赵丽娟, 董萌萌. 含硫化铁结核薄煤层采煤机工作机构载荷问题研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 840-844.
- Zhao Lijuan, Dong Mengmeng. Study on load problems of working mechanism of the shearer in containing pyrites and thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 840-844.
- [10] 赵丽娟, 刘旭南, 吕铁亮. 基于虚拟样机技术的采煤机截割部可靠性研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(5): 738-746.
- Zhao Lijuan, Liu Xunan, Lü Tieliang. Reliability research of shearer cutting unit based on virtual prototyping technology[J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2010, 35(5): 738-746.
- [11] 赵丽娟, 马永志. 刚柔耦合系统建模与仿真关键技术研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(2): 243-248.
- Zhao Lijuan, Ma Yongzhi. Study on key technologies in modeling and simulation of rigid-flexible coupled multi-body system[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(2): 243-248.
- [12] 赵丽娟, 马永志. 基于多体动力学的采煤机截割部可靠性研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1271-1275.
- Zhao Lijuan, Ma Yongzhi. Reliability research on shearer cutting unit based on multi-body dynamic[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(9): 1271-1275.
- [13] 廉自生, 刘楷安. 采煤机摇臂虚拟样机及其动力学分析[J]. 煤炭学报, 2005, 30(6): 801-804.
- Lian Zisheng, Liu Kaian. Virtualprototype of shearer ranging arm and its dynamics analysis[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(6): 801-804.
- [14] 赵丽娟, 刘威, 许军, 等. 基于多体动力学的刨煤机关键零件的可靠性研究[J]. 制造业自动化, 2011, 33(8): 81-84.
- Zhao Lijuan, Liu Wei, Xu Jun, et al. Reliability research on key parts of coal plough based on multi-body dynamics[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(8): 81-84.
- [15] 王国军, 胡仁喜, 陈欣. Nsoft 疲劳分析理论与应用实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Wang Guojun, Hu Renxi, Chen Xin. Nsoft fatigue theory and its application to guide tutorial[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2007.
- [16] 周游. EBZ45 型掘进机截割头参数改进设计及动态仿真分析[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 15-18.
- Zhou You. Improving parameters design and dynamic simulation analysis of EBZ45 tunneling machine[D]. Changsha: Central South University, 2011: 15-18.