

纵轴式掘进机的横摆机械性能优化研究

安士君

(唐山重型装备集团有限责任公司 河北 唐山 063000)

摘要: 随着机械自动化的发展, 大功率、重型悬臂式掘进机逐渐应用到深层煤炭开采中。本文以纵轴掘进机为研究对象, 通过数学模型建立了截割头功率的理论计算模型, 并列出了各机械组件的力学关系。利用数值模拟软件验证了数学模型的有效性, 并建立了虚拟样机对横摆机械性能进行了具体优化。本文研究为纵轴悬臂式掘进机机械设计优化提供了可靠的依据。

关键词: 井下开拓; 横摆机械; 数学模型

0 引言

随着我国矿井开采巷道断面的增大, 重型化、大功率悬臂式掘进机受到煤矿企业青睐。国内关于悬臂式掘进机研究主要集中在提高截割效率、增加截割功率上, 却很少研究机械设备的可靠性、能耗以及开采成本等问题。纵轴悬臂式掘进机的截割效率是由横摆速度决定的, 该参数也决定着掘进机回转台寿命和掘进能力。笔者采用虚拟样机技术对掘进机横摆性能进行分析, 提出了经济截割最优伸缩速度, 为煤矿机械设备的性能优化提供了参考。

1 数学模型

1.1 截割头功率计算

纵轴悬臂式掘进机由截割电机、截割减速器、伸缩部、截割头组成。减速器将截割电机输出的大传动比转速降低, 增加了截割头扭矩的同时增强了掘进机的截割能力。行星齿轮是减速器的主要部件, 它传动效率高、传动比大、体积小, 在掘进机减速器设计中被广泛应用。行星齿轮传动比数学模型和第 $n+1$ 级输出功率分别为:

$$i_{H_{n+1}} = \frac{Z_1^n}{Z_3^n + Z_1^n} \tag{1}$$

$$P_{n+1} = P_n - [P_n(1 - i_{H_{n+1}})](1 - \eta_n) \tag{2}$$

纵轴悬臂式掘进机行星减速器具有相同的转化轮系, 按照上述两个公式在不计算传递功率损失的前提下, 可以得到该掘进机截割头功率为:

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

1.2 截割头横摆加速度的求解

将截割头看成一个质点, 该质点横摆线速度为:

$$V_b = N / (60 H_w L D) \tag{4}$$

按照实际掘进工作, 公式 (4) 中的单位能耗由掘进机参数、机构类型、和煤岩体特性决定。本文研究的纵轴悬臂式掘进机存在两个以上的截割自由度, 因此, 单位能耗取 6 比较合适。得到的截割头横摆角速度为:

$$\omega_b = 3V_b / (\pi R) \tag{5}$$

1.3 确定液压杆伸缩速度

根据相关文献和图 1 得到悬臂式掘进机时油缸位置和截割头横摆的关系方程组:

$$\begin{cases} B_1 C_1^2 + b^2 - 2bB_1 C_1 \cos(\delta + \theta_1) = (b + x_1)^2 \\ B_1 C_1^2 = a^2 + a^2 - 2aa \cos \alpha \\ \theta_1 = (180^\circ - \alpha) / 2 \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} B_2 C_2^2 + b^2 - 2bB_2 C_2 \cos(\delta - \theta_2) = (b - x_2)^2 \\ B_2 C_2^2 = a^2 + a^2 - 2aa \cos \alpha \\ \theta_2 = (180^\circ - \alpha) / 2 \end{cases} \tag{7}$$

通过方程组 (6) 可以求得横摆摆动角度和伸出量的关系:

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

通过方程组 (7) 可以求得横摆摆动角度和伸进量的关系:

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

如图 1 所示, 纵轴悬臂式掘进机的 a 、 b 和摆角分别为 793.519mm、1792.75mm 和 84.617 度。通过上述公式 (8) 和 (9) 可以计算出截割头摆角、伸进长度和液压杆伸出长度之间的关系, (如图 2 所示)。

由上述计算和图例可以看出, 液压杆缩进速度要比伸出速度慢, 而且随着悬臂式掘进机截割头摆动角度的增加这个速度差会越来越大。按照掘进机的机械设计需求, 截割头

液压组件不能超过 35 度的最大摆角。因此, 按照图 2 可计算出液压杆的缩进量为 398.7 毫米 mm、伸出量为 431.6 毫米 mm, 按照一定的单位时间可测量出图 2 中液压杆的伸缩速度。按照该款纵轴悬臂式掘进机设计参数可以利用上述公式计算出横摆在单侧摆动时的参数, 如表 1

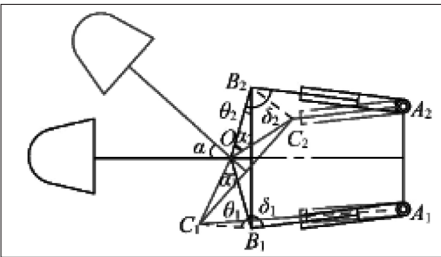


图 1 油缸和横摆位置关系

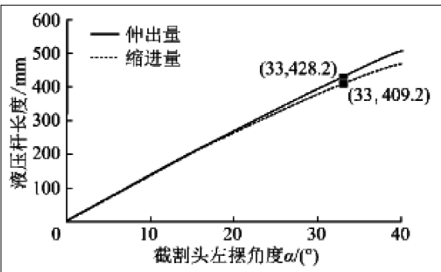


图 2 摆角、伸出进长度关系

表 1 截割头单侧横摆运动参数

组别	单侧横摆所需时间/s	横摆线速度/(m./min-1)	回转台摆动速度/(度/s)	液压杆伸出速度/(mm./s-1)
1	120.7	1.452	0.2689	3.523
2	129.4	1.196	0.2431	3.197
3	150.6	1.099	0.2136	2.905
4	170.9	0.972	0.2001	2.496
5	200.7	0.795	0.1728	2.095

所示。

2 截割头载荷计算

在煤矿井下掘进机开拓过程中，按照国外学者的研究成果可以计算出单个截齿在截割过程中收到的截割阻力，牵引阻力和截割阻力分别为：

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

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

按照煤矿工程力学分析，利用数值模拟软件结合上述两个公式可以将开拓时每个截齿的受力情况绘制出来，（如图 3 和图 4 所示）。

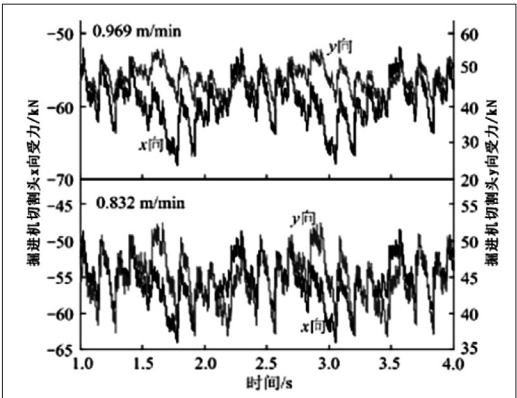


图 3 三向力曲线

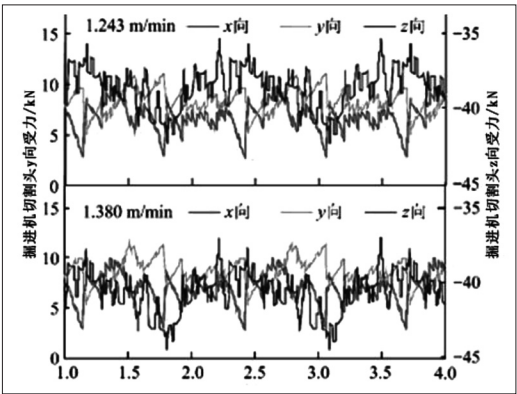


图 4 三向力矩曲线

按照上述两图可以计算出截割头在工作过程中的最高截割功率和转速及瞬间力矩的相关性，由此看出，截割电机额定功率非常接近截割有的最高截割功率。可以推断，按照前文论述的数学模型反向求出的单位功耗和数值模拟软件求出的截割载荷是相同的。

3 机械性能优化

笔者利用 Pro/E 三维实体建模软件配置虚拟样机模型，利用无缝接口软件在 ADAMS 中导入虚拟样机模型，并配备有限元分析软件。最终建立了具有刚柔耦合特性的纵轴悬臂式掘进模型。

通过软件对悬臂式掘进机进行横摆速度优化可以降低机械生产成本、提高单位时间内的开采效率、缩短截割头设计时间、提高回转台的机械性能质量。例如，将表 1 中液压杆伸出速度作为机械优化核心，利用步骤函数得到五次序列值，可以比照五次不同截割功率下液压杆的伸出速度、回转台疲劳性、液压杆寿命以及截割头受到的应力，以此来获得最佳的优化方案。通过机械性能优化得到如图 5 所示的横摆机械性能报告和表 2 所示的机械性能关联参数。

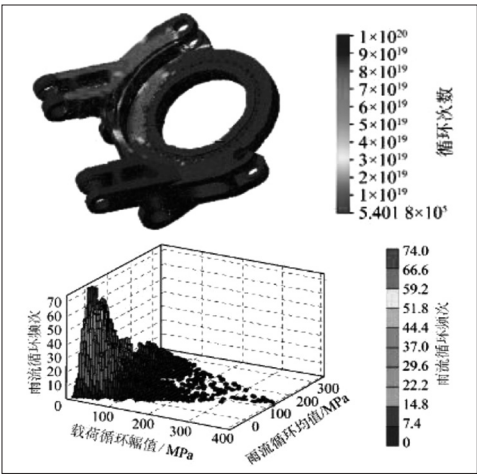


图 5 横摆机械性能报告

表 2 五组摆速下回转台疲劳寿命和最大应力的关系

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	损失
1	3.592	269.5773	5.3925×10^5	1.79516×10^{-6}
2	3.183	259.1857	7.1720×10^5	1.40135×10^{-6}
3	2.901	250.0124	3.0871×10^6	3.20159×10^{-7}
4	2.617	239.5984	3.0871×10^6	3.20159×10^{-7}
5	2.255	235.9657	7.4923×10^6	1.29633×10^{-7}

4 结语

煤矿开采中，纵轴悬臂式掘进机发挥着巨大功效，在截割头横摆开拓中，液压杆伸出量和缩进量差值是随着横摆摆动角度的增加而增大的，呈现出非线性关系。利用数学模型反向求解推到出的截割头单位时间功耗和数值模拟软件绘制出的截割头最高功率基本相符，为横摆机械性能的模拟优化奠定了理论基础。采用虚拟样机建立了截割头工作模型并得出了最佳伸缩速度。该优化方法的提出为较少煤矿机械能耗、提高悬臂式掘进工作效率提供了新的改进手段。

参考文献：

[1] 李刚,牛磊,李文龙. 煤矿硬岩巷道快速掘进技术研究[J]. 煤炭科学技术. 2018(11), :13-20.
[2] 王晓龙,杨玉虎,黄田. 全断面岩石隧道掘进机支撑-推进-换步机构静刚度分析[J]. 机械工程学报. 2018(01), :56-65.
[3] 袁晓明,邹易达, 雪梅,阎鹏,张立杰. 部分断面掘进机截割头截割性能研究[J]. 机械工程学报. 2017(24), :193-200.