

含夹矸煤层条件下采煤机螺旋滚筒优化设计

李明昊¹,郝哲¹,范佳艺²,赵丽娟^{3,4},乔捷¹

(1. 沈阳理工大学机械工程学院,辽宁沈阳 110159;2. 沈阳航空航天大学机电工程学院,辽宁沈阳 110136;
3. 辽宁工程技术大学机械工程学院,辽宁阜新 123000;4. 辽宁省大型工矿装备重点实验室,辽宁阜新 123000)

摘要:采煤机截割夹矸煤层时,螺旋滚筒易失效。为提高螺旋滚筒的可靠性,基于刚柔耦合技术、灵敏度设计理论和相关失效性理论进行优化设计;基于破煤机理,对螺旋滚筒的瞬时负载进行数值模拟,建立采煤机刚柔耦合虚拟样机联合仿真模型,通过刚柔耦合虚拟样机仿真获得螺旋滚筒的薄弱区域、应力和振动性能指标;结合可靠性灵敏度理论,分析了关键零件的应力可靠度、振幅可靠度及其动态与渐变灵敏度结果;基于相关失效性理论,得到了螺旋滚筒相关多失效模式可靠度及螺旋滚筒设计变量的可靠性灵敏度,建立改进遗传算法对螺旋滚筒进行可靠性优化设计。结果表明,滚筒综合可靠度由 0.888 5 提高到 0.977 5。优化后的螺旋滚筒设计变量灵敏度绝对值均降低,综合可靠性得到提升。将刚柔耦合技术、可靠性灵敏度设计理论和相关失效性理论相结合,提出一种适用于含夹矸煤层的采煤机螺旋滚筒优化设计方法,为设计高效螺旋滚筒提供了一种有效途径。

关键词:含夹矸煤层;采煤机;螺旋滚筒;优化设计;遗传算法

中图分类号:TD421

文献标志码:A

Optimization design of shearer's spiral drum under the condition of coal seam with gangue

LI Minghao¹, HAO Zhe¹, FAN Jiayi², ZHAO Lijuan^{3,4}, QIAO Jie¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;
3. College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
4. Liaoning Provincial Key Laboratory of Large-Scale Mining Equipment, Fuxin 123000, China)

Abstract: The spiral drum is liable to failure when the shearer works in coal seam with gangue. To improve the reliability of the spiral drum, this study optimized its design based on the rigid-flexible coupling technology, reliability sensitivity design theory and dependent failure theory. Based on the coal breaking theory, the instantaneous load of the spiral drum was simulated numerically and a rigid-flexible coupling virtual prototype model of shearer was established, by which the indexes of the weak area, stress and vibration performance of the spiral drum were obtained. Combined with reliability sensitivity theory, the stress reliability, amplitude reliability and dynamic and gradient sensitivity results of key parts were analyzed. Based on the dependent failure theory, the reliability sensitivity of multiple failure modes related to the drum and the design variables of the drum were obtained. Based on improved genetic algorithm, the reliability optimization design of spiral drum was carried out. The results show that the comprehensive reliability of the spiral drum is increased from 0.888 5 to 0.977 5. With a reduction in all the absolute values of the sensitivity of the design variables, the optimized spiral drum is more robust and its comprehensive reliability is improved. The proposed optimal design method for shearer's spiral drum

收稿日期:2022-05-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51674134);辽宁省教育厅青年科技人才育苗项目(LG202029);辽宁省博士科研启动基金计划项目(2020-BS-153);辽宁省教育厅基本科研基金项目(LJ2019JL024)

作者简介:李明昊(1990—),男,辽宁铁岭人,副教授,研究方向为机械系统动力学分析与控制、刚柔耦合可靠性技术。

E-mail:lmh0315@126.com

in coal seam with gangue provides an effective way to design efficient spiral drums.

Key words: coal seam with gangue; shearer; spiral drum; optimization design; genetic algorithm

螺旋滚筒是采煤机在截割含夹矸煤层时的直接工作部件,截割含夹矸煤层时,螺旋滚筒受载复杂,易出现多模式失效^[1]。国内外诸多学者对螺旋滚筒的设计进行了较深入研究。刘晋霞等^[2]利用颗粒流离散元软件(particle flow code,PFC)研究了不同截割速度对煤岩截割过程的影响,结果表明,煤岩截割过程中,镐型截齿截割速度总体呈非线性减小趋势,且随牵引速度、滚筒角速度的增大分别呈现非线性减小趋势增强和明显增大的特点,当滚筒角速度一定时,提高牵引速度可在一定程度上降低截割比能耗;Hurt等^[3]探究了截齿几何形状、螺旋滚筒形状及采煤机运动学参数对截齿寿命的影响;Achanti等^[4]研究了截割深度、截线间距及滚筒转速对工作面粉尘的影响;Gajewsk等^[5]根据不同类型截齿的磨损程度,研究了呈现扭矩分布的各类截齿截割功率,并基于神经网络以截割功率和扭矩为输入对截齿磨损状态进行预测;Reid等^[6]利用卡尔曼滤波系统分析截齿载荷,为螺旋滚筒的瞬时载荷模拟提供了新的理论方法;刘送永等^[7]建立了螺旋叶片参数与目标参数的数学模型,发现螺旋升角对装煤量与抛煤力学特性有很大影响,找到了最佳螺旋升角值;陆辉等^[8]通过模拟滚筒截割过程获得的截齿受力曲线函数加载至截齿,研究镐型截齿的疲劳寿命并对其优化;秦大同等^[9]建立了采煤机运动参数与螺旋滚筒截割性能指标评价模型,基于退火-粒子群算法对螺旋滚筒进行优化设计;张强等^[10]测试了采煤机在煤岩现场截割中的滚筒载荷受力,通过截割实验数据得到螺旋滚筒三向载荷的差异,测试结果与工作面粉尘实际工况相符合;赵丽娟等^[11]通过刚柔耦合虚拟样机技术对螺旋滚筒的截割、装煤和落煤性能进行分析,对螺旋滚筒进行优化设计。

以往围绕螺旋滚筒的研究为采煤机设计与开发提供了一定理论基础,但采煤机在截割含夹矸煤层时,工况恶劣、载荷复杂、失效模式多,因此提出一种考虑多失效模式的方法是设计高效螺旋滚筒的关键。将刚柔耦合技术、可靠性灵敏度设计理论和相关失效性理论相结合,利用构建的改进遗传算法,提出一种适用于含夹矸煤层的采煤机螺旋滚筒优化设计方法,可有效指导高效螺旋滚筒设计。

1 理论背景

螺旋滚筒在工作过程中,镐型截齿会受到截割阻力、牵引阻力和侧向力,分别用 Z_j 、 Y_j 和 X_j 表示,如图 1 所示。

当镐型截齿截割全煤时,截齿的截割阻力、截齿牵引阻力、截齿的侧向力分别为^[12]:

$$Z_j = 10\bar{A}_p \frac{0.35b_p + 0.3}{(b_p + h_{\max} \tan \varphi) K_\psi} \times h_{\max} t_{cp} K_T K_g K_y \frac{1}{\cos \beta} + 100 f' \sigma_{cm} S_a K_\delta, \quad (1)$$

$$Y_j = Y_0 + 100 \sigma_{cm} S_a K_\delta, \quad (2)$$

$$X_j = 0.2 Z_j. \quad (3)$$

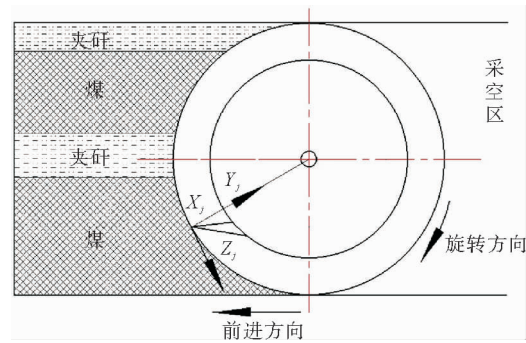


图 1 滚筒截割含夹矸煤岩受力分析

Fig. 1 Force analysis of drum cutting coal with gangue

式中: \bar{A}_p 为非地压影响区煤层的截割阻抗平均值, N/mm; b_p 为截齿工作的计算宽度, cm; h_{\max} 为截齿最大切削厚度, cm; φ 为截齿所处位置的角度, ($^\circ$); K_ψ 为煤的脆性系数; t_{cp} 为截齿切削宽度, cm; K_T 为截齿的类型系数; K_g 为刀头形状系数; K_y 为截齿截角影响系数; β 为截齿与牵引方向之间偏转角, ($^\circ$); f' 为截割阻抗系数; σ_{cm} 为煤的单向抗压强度, MPa; S_a 为截齿磨损后, 磨损面在截割平面上的投影面积, cm^2 ; K_δ 为矿体应力状态的体积系数; Y_0 为锋利截齿受到的牵引阻力。

当镐型截齿截矸石时,截齿的截割阻力、牵引阻力和侧向力分别为:

$$Z_j' = P_K' [K_T K_g K_y (0.25 + 1.8 h_{\max} \sin \theta \cdot t_{cp}) + 0.1 S_j], \quad (4)$$

$$Y_j' = 2.5 Z_j' (0.15 + 0.000 56 P_K') / (10 h_{\max} \sin \theta)^{0.4}, \quad (5)$$

$$X_j' = Z_j' \left(\frac{C_1}{C_2 + 10h_{\max} \sin \theta} + C_3 \right) \frac{h_{\max} \sin \theta}{t_{cp}} \quad (6)$$

式中: P_K' 为矸石的接触强度, MPa; S_j 为截割夹矸时, 截齿磨损在截割平面上的投影面积; C_1 、 C_2 和 C_3 为螺旋滚筒叶片上截齿不同排列方式的系数。

2 螺旋滚筒负载数值模拟

螺旋滚筒动态负载是分析采煤机螺旋滚筒可靠性的重要依据。基于内蒙古鄂尔多斯文玉煤矿工作面赋存条件, 对采煤机截割的煤岩试样进行物理和力学特性参数测试。

2.1 煤岩力学特性测试

依据国家标准 GB/T 2356.1—2009《煤和岩石物理力学性质测定方法》, 煤岩测试流程如图 2 所示。

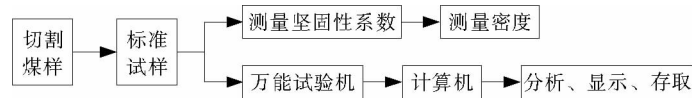


图 2 煤岩测试流程图

Fig. 2 Flow chart of the coal and rock test

为测试煤岩的抗压强度, 使用 DQ-1 型岩石切割机、202-0 型电热恒温干燥箱、比重瓶、WDW-100E 型微机电子万能试验机对煤样分析处理, 如图 3、图 4 所示, 测得煤岩物理和力学特性参数如表 1 所示。

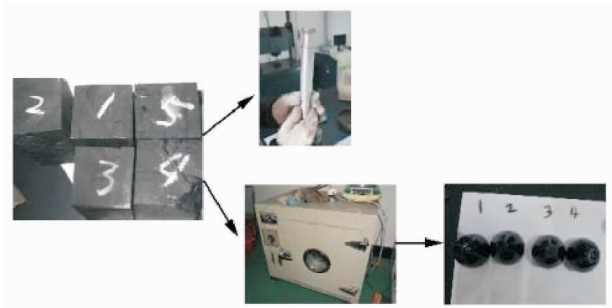


图 3 煤岩物理特性参数测试实验

Fig. 3 Coal and rock physical characteristics test

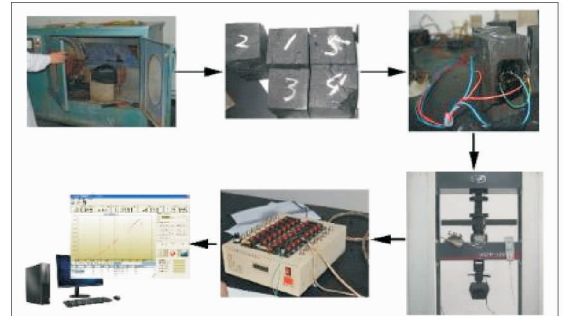


图 4 煤岩力学特性参数测试实验

Fig. 4 Coal and rock mechanical properties test

表 1 煤岩物理力学特性参数

Table 1 Physical and mechanical properties of coal and rock

煤岩类型	弹性模量/MPa	视密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	真密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比 μ	坚固性系数 f	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
煤	4 388	1 309	1 332	0.23	2.0	1.08	17.71
夹矸煤	3 600	2 627	2 841	0.24	4.1	4.37	35.57

2.2 瞬时载荷数值模拟

使用课题组的“采煤机瞬时载荷数值模拟软件”, 对采煤机截割夹矸工况(图 1)的瞬时载荷进行数值模拟, 得到滚筒转速为 58 r/min、牵引速度为 4 m/min 时截齿三向力和力矩曲线如图 5、图 6 所示, 可为构建采煤机刚柔耦合模型提供载荷数据支撑。

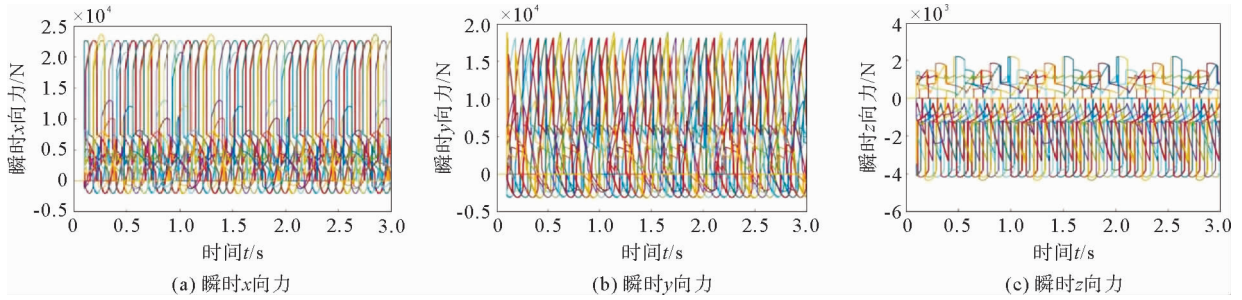


图 5 三向力曲线

Fig. 5 Three-way force load curve

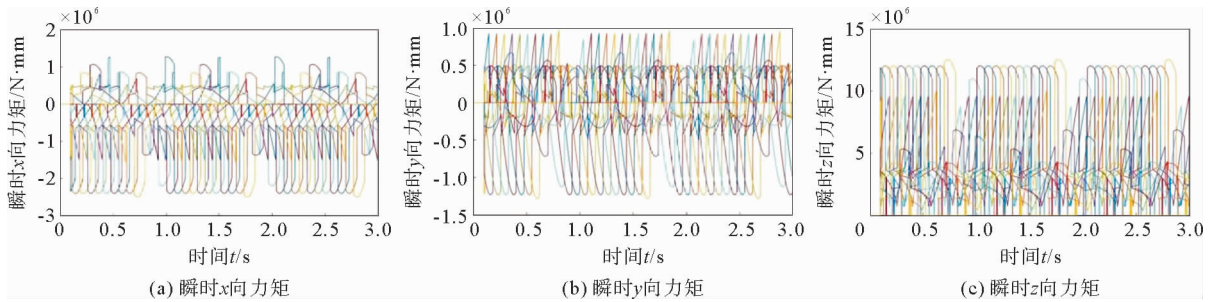


图 6 三向力矩曲线

Fig. 6 Three-way torque load curve

3 螺旋滚筒刚柔耦合分析

将建立的采煤机整机三维模型导入 ADAMS 中,设置材料特性参数、约束和驱动,建立采煤机刚性虚拟样机模型。利用 ANSYS,采用 solid185 单元对螺旋滚筒进行精度为 6 级的网格划分,结合质量单元 MASS21,构建螺旋滚筒的模式中性文件。替换采煤机的螺旋滚筒刚性模型,加载图 5、图 6 生成的三向力和力矩曲线,生成采煤机刚柔耦合模型^[13],如图 7 所示。

对建立的刚柔耦合模型,选用 GSTIFF 和 I3 积分器进行求解,得到采煤机前截割部螺旋滚筒应力云图和最大应力点曲线如图 8、图 9 所示。结果表明,螺旋滚筒筒型齿尖位置的应力值最大,应力最大值及对应时刻分别为 869.31 MPa 和 2.17 s。

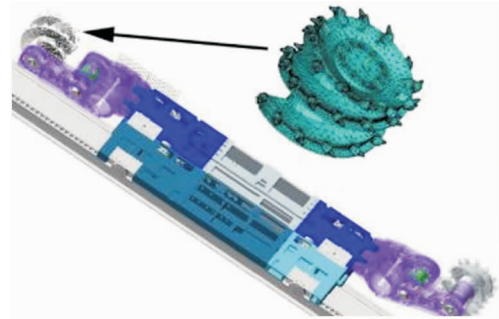


图 7 采煤机刚柔耦合模型

Fig. 7 Virtual prototype model of the coupled shearer

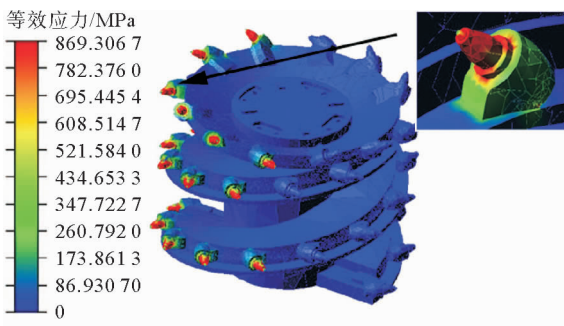


图 8 螺旋滚筒的应力云图

Fig. 8 Stress nephogram of spiral drum

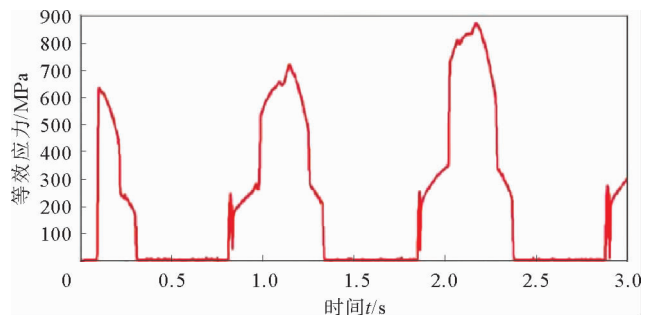


图 9 螺旋滚筒的最大应力点曲线

Fig. 9 Stress node curve of spiral drum

4 螺旋滚筒渐变与动态可靠性灵敏度分析

4.1 设计变量与约束条件

螺旋滚筒设计变量众多,合理选取设计变量是螺旋滚筒优化设计的关键。滚筒的动力学特性与牵引速度有直接联系;滚筒直径、螺旋升角和截线距作为螺旋滚筒的主要尺寸,对滚筒的瞬时负载有重要影响;滚筒宽度是影响采煤机截割深度的重要参数,对滚筒的瞬时负载有重要影响。因此,以牵引速度 v_q 、螺旋滚筒直径 D 、螺旋升角 a 、螺旋滚筒宽度 B 和截线距 T 为设计变量,约束条件为:

$$\begin{cases} 2 \leq v_q \leq 6, \\ 1050 \leq D \leq 1250, \\ 8 \leq a \leq 18, \\ 500 \leq B \leq 800, \\ 50 \leq T \leq 70. \end{cases} \quad (7)$$

4.2 螺旋滚筒等效力渐变与动态可靠性灵敏度分析

依据 4.1 节选取的螺旋滚筒设计变量,对不同设计变量的螺旋滚筒模型进行仿真。利用 MATLAB 进行数据拟合,结合螺旋滚筒的材料特性,构造的螺旋滚筒应力状态函数 $G_{yl}(\mathbf{X})$ 为:

$$G_{yl}(v_q, D, a, B, T) = -0.0223 v_q^3 - 0.239 v_q^2 - 33.17 v_q - 8.04 \times 10^{-6} D^3 - 0.278 D^2 - 32.22 D + 0.099 a^3 - 3.74 a^2 + 43.79 a - 4.35 \times 10^{-6} B^3 + 0.0092 B^2 - 6.51 B - 0.0028 T^3 + 0.556 T^2 - 35.26 T + 556.08. \quad (8)$$

根据矩法机械工程材料性能退化理论,对构建的可靠性指标 $\beta_{yl}(t)$ 进行可靠度计算^[14],计算设计变量对可靠度均值的灵敏度:

$$\frac{dR_{yl}(\beta_{yl}(t), t)}{d\mathbf{X}^T} = \frac{dR_{yl}(\beta_{yl}(t), t)}{d\beta_{yl}(t)} \frac{\partial \beta_{yl}(t)}{\partial \mu_{G_{yl}(t)}} \frac{\partial \mu_{G_{yl}(t)}}{d\mathbf{X}^T}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \beta_{yl}(t)}{\partial \mu_{G_{yl}(t)}} = \frac{1}{\sigma_{G_{yl}(t)}}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mu_{G_{yl}(t)}}{d\mathbf{X}^T} = \left[\frac{\partial G_{yl}(t)}{\partial \mathbf{X}_1}, \frac{\partial G_{yl}(t)}{\partial \mathbf{X}_2}, \dots, \frac{\partial G_{yl}(t)}{\partial \mathbf{X}_n} \right], \quad (11)$$

$$\frac{\partial \beta_{yl}(t)}{\partial \sigma_{G_{yl}(t)}} = -\frac{\mu_{G_{yl}(t)}}{\sigma_{G_{yl}(t)}^2}. \quad (12)$$

可靠性灵敏度量纲归一化为:

$$\alpha_{yl} = \frac{dR_{yl}(\beta_{yl}(t), t)}{d\mathbf{X}} \frac{\sigma^*}{R_{yl}(\beta_{yl}(t), t)}. \quad (13)$$

式(9)~(13)中: $\mu_{G_{yl}(t)}$ 为螺旋滚筒应力状态函数 $G_{yl}(\mathbf{X})$ 的均值, $R_{yl}(\mathbf{X})$ 为螺旋筒应力的可靠度, σ^* 为螺旋滚筒设计变量的二阶矩。

利用式(9)~(13)对构建的螺旋滚筒应力状态函数求解,结合性能退化理论,得到了螺旋滚筒设计变量应力渐变灵敏度如图 10 所示,应力均值 v_q 、 D 、 a 、 B 、 T 的灵敏度数值结果分别为 -3.97×10^{-2} 、 -2.83×10^{-5} 、 -7.93×10^{-4} 、 -4.88×10^{-5} 、 4.06×10^{-4} 。

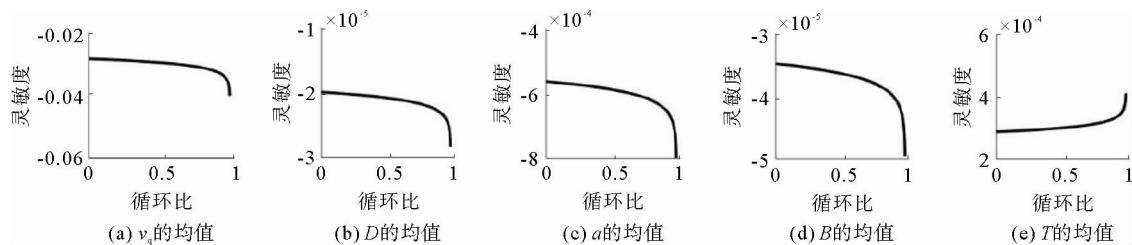


图 10 螺旋滚筒设计变量应力渐变灵敏度

Fig. 10 Stress gradient sensitivity of spiral drum design variables

4.3 螺旋滚筒振幅渐变与动态可靠性灵敏度分析

提取 4.2 节中不同螺旋滚筒设计变量对应的振幅分析结果,利用 MATLAB 进行数据拟合。构造的螺旋滚筒振幅状态函数 $G_{zf}(\mathbf{X})$ 为:

$$G_{zf}(v_q, D, a, B, T) = 0.0018v_q^3 - 0.0194v_q^2 + 0.0456v_q + 4.48 \times 10^{-22}D^3 + 1.14 \times 10^{-6}D^2 - 0.0031D + 4.98 \times 10^{-5}a^3 - 0.0014a^2 + 0.011a + 6.001 \times 10^{-10}B^3 - 1.26 \times 10^{-6}B^2 + 7.96 \times 10^{-4}B + 1.33 \times 10^{-6}T^3 - 7.09 \times 10^{-4}T^2 + 0.0618T + 0.54. \quad (14)$$

基于式(9)~(13)的构造方法,求解构建的螺旋滚筒振幅状态函数,结合性能退化理论,得到滚筒设计变量的振幅渐变灵敏度结果如图 11 所示,振幅均值灵敏度数值结果分别为 -1.33×10^{-3} 、 -2.93×10^{-5} 、 -1.5710×10^{-5} 、 -3.9810×10^{-6} 、 -5.39×10^{-4} 。

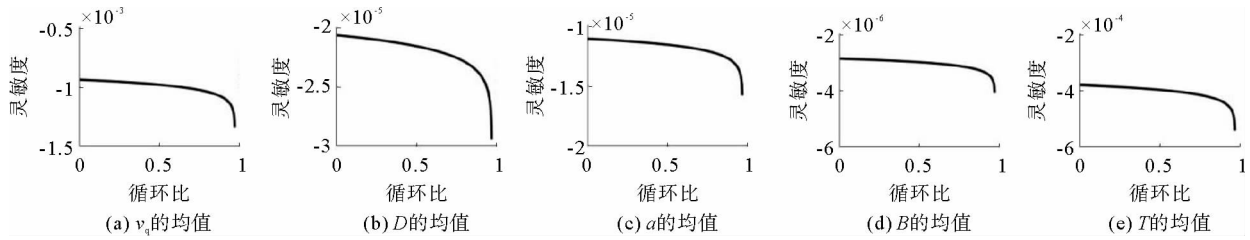


图 11 振幅渐变灵敏度

Fig. 11 Amplitude gradient sensitivity

4.4 考虑相关失效性的螺旋滚筒可靠性分析

考虑螺旋滚筒应力失效和振动幅度失效两种失效形式,由于失效形式之间存在相关性,在进行优化设计之前,应综合考虑失效形式共同作用下的滚筒相关性之间的数值关系^[15]。基于二元 Gumbel Copula 函数,构建考虑相关失效性的螺旋滚筒失效概率为:

$$P_{gt}(t) = P_{yl}(t) + P_{zf}(t) - C(P_{yl}(t), P_{zf}(t)). \quad (15)$$

式中: $P_{gt}(t)$ 为螺旋滚筒失效概率, $P_{yl}(t)$ 为螺旋滚筒应力失效概率, $P_{zf}(t)$ 为螺旋滚筒振幅失效概率, $C(P_{yl}(t), P_{zf}(t))$ 为两种失效形式的相关系数。经计算,螺旋滚筒相关失效模式可靠度为 0.888 5。

设计变量对失效概率的均值可靠性灵敏度为:

$$\frac{\partial P_{gt}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} = \frac{\partial P_{yl}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} + \frac{\partial P_{zf}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} - \frac{\partial C(P_{yl}(t), P_{zf}(t))}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T}. \quad (16)$$

式中:

$$\frac{\partial P_{yl}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} = \frac{\partial P_{yl}(t)}{\partial \beta_{yl}(t)} \frac{\partial \beta_{yl}(t)}{\partial \mu_{G_{yl}(t)}} \frac{\partial \mu_{G_{yl}(t)}}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial P_{yl}(t)}{\partial \beta_{yl}(t)} = -\varphi(-\beta_{yl}(t)), \quad (18)$$

$$\frac{\partial P_{zf}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} = \frac{\partial P_{zf}(t)}{\partial \beta_{zf}(t)} \frac{\partial \beta_{zf}(t)}{\partial \mu_{G_{zf}(t)}} \frac{\partial \mu_{G_{zf}(t)}}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T}, \quad (19)$$

$$\frac{\partial P_{zf}(t)}{\partial \beta_{zf}(t)} = -\varphi(-\beta_{zf}(t)), \quad (20)$$

$$\frac{\partial C(P_{yl}(t), P_{zf}(t))}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} = \frac{\partial C(P_{yl}(t), P_{zf}(t))}{\partial P_{yl}(t)} \frac{\partial P_{yl}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T} + \frac{\partial C(P_{yl}(t), P_{zf}(t))}{\partial P_{zf}(t)} \frac{\partial P_{zf}(t)}{\partial \bar{\mathbf{X}}^T}. \quad (21)$$

基于相关性失效分析的式(15)~(21),对考虑应力失效和振幅失效相关性的螺旋滚筒可靠性灵敏度进行求解,得到考虑相关失效性的设计变量的均值灵敏度结果分别为 -8.59×10^{-3} 、 -1.76×10^{-3} 、 -6.01×10^{-3} 、 -2.11×10^{-3} 、 1.32×10^{-3} 。因此,牵引速度、滚筒直径、螺旋升角、滚筒宽度的增加,会降低螺旋滚筒

的可靠性;截线距的增加,会提高螺旋滚筒的可靠性。对螺旋滚筒可靠性影响程序从高到低的顺序为牵引速度、滚筒宽度、滚筒直径、截线距、螺旋升角。

5 基于遗传算法的螺旋滚筒优化设计

基于 Ackley 性能测试函数,选择混合策略的改进遗传算法进行求解^[16]。搭建螺旋滚筒的可靠性优化设计状态函数为:

$$\min G_{yh} = G_{xg}(\mathbf{X}) + \omega F_{gt}(\mathbf{X}), \quad (22)$$

$$G_{xg}(\mathbf{X}) = \omega_1 G_{y1}(\mathbf{X}) + \omega_2 G_{z1}(\mathbf{X}). \quad (23)$$

式中: ω 为影响螺旋滚筒综合可靠度的加权系数; ω_1 、 ω_2 为状态函数间权值系数,均取 $1/2$ ^[11]; $F_{gt}(\mathbf{X})$ 为可靠性灵敏度的分析结果。

对基于改进遗传算法进行初始化,设置种群大小、进化数和适应度函数值误差,约束条件如式(7)所示,对建立的状态函数进行求解并圆整后设计变量最优解如表 2 所示。

表 2 设计变量最优解
Table 2 Optimal design variables

设计变量	牵引速度 $v_q/(m \cdot \min^{-1})$	滚筒直径 D/mm	螺旋升角 $\alpha/(^\circ)$	滚筒宽度 B/mm	截线距 T/mm
初始值	4.0	1 150.0	14.0	800	60.0
预测值	3.1	1 104.5	12.1	762	69.2
圆整值	3.0	1 105.0	12.0	760	70.0

基于表 2 的数据,建立优化后的螺旋滚筒模态中性文件,对优化设计后的滚筒重新进行可靠性灵敏度分析,滚筒综合可靠度由 0.888 5 提高到 0.977 5。优化后设计变量 v_q 、 D 、 α 、 B 、 T 的均值灵敏度量纲归一化数值结果分别为 -6.05×10^{-4} 、 -1.59×10^{-4} 、 -4.83×10^{-5} 、 -1.88×10^{-4} 、 1.44×10^{-4} 。

优化后的灵敏度绝对值均降低,螺旋滚筒更加稳健,螺旋滚筒综合可靠性得到提升。该型采煤机螺旋滚筒根据改进遗传算法得到的最优解进行设计和制造并投入生产,如图 12 所示。目前采煤机工作性能稳定,螺旋滚筒工作可靠,螺旋滚筒除正常磨损外,未出现可靠性失效情况,年产量实现了翻倍增长,提升至 290 万吨。

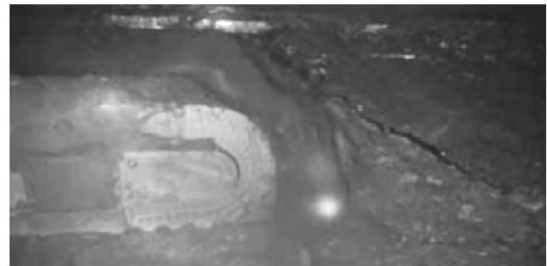


图 12 采煤机工作状态
Fig. 12 Working state of shearer

6 结论

对采煤机截割的夹矸煤层进行分析,测试了夹矸煤岩试样的物理、力学特性,利用课题组“采煤机瞬时载荷数值模拟软件”对采煤机截割夹矸工况的瞬时载荷进行数值模拟,对建立的采煤机刚柔耦合模型进行分析,得到了螺旋滚筒的仿真分析结果。

1) 基于可靠灵敏度分析理论和相关失效性理论,得到了螺旋滚筒的应力和振幅可靠性分析结果,结果表明,牵引速度、滚筒直径、螺旋升角、滚筒宽度的增加,会降低螺旋滚筒的可靠性;截线距的增加,会提高螺旋滚筒的可靠性。对螺旋滚筒可靠性影响程序从高到低的顺序为牵引速度、滚筒宽度、滚筒直径、截线距、螺旋升角。

2) 基于遗传算法的优化设计结果表明,滚筒综合可靠度由 0.888 5 提高到 0.977 5。优化后的灵敏度绝对值均降低,螺旋滚筒更加稳健,综合可靠性得到提升。

本研究将刚柔耦合技术、相关失效性理论和灵敏度设计理论相结合,提出的适用于含夹矸煤层的采煤机螺旋滚筒优化设计方法,为设计高效螺旋滚筒提供了新途径。

参考文献:

- [1] 刘晋霞,马超,焦志愿,等. 镐型截齿对含不同分布夹矸层煤岩的截割过程研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2018,37(5):97-103.
LIU Jinxia, MA Chao, JIAO Zhiyuan, et al. The process of conical pick cutting coal with rock parting based on LS-DYNA [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018,37(5):97-103.
- [2] 刘晋霞,戚方新,张超. 镐型截齿不同截割速度对煤岩截割过程影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022,41(1):66-74.
LIU Jinxia, XIAN Fangxin, ZHANG Chao. Research on the influence of various cutting speeds of conical pick on coal cutting process[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022,41(1):66-74.
- [3] HURT K G, MACANDREW K M. Cutting efficiency and life of rock-cutting picks[J]. Mining Science & Technology, 1985,2(2):139-151.
- [4] ACHANTI V B, KHAIR A W. Cutting efficiency through optimized bit configuration an experimental study using a simulated continuous miner[J]. Mineral Resources Engineering, 2012,10(4):427-434.
- [5] GAJEWSKI J, JONA J. Towards the identification of worn picks on cutterdrums based on torque and power signals using artificial neural networks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011,26(2):22-28.
- [6] REID A W, MCAREE P R, MEEHAN P A, et. al. Longwall shearer cutting force estimation[J]. Journal of Dynamic Systems, 2016,136(3):1834-1893.
- [7] 刘送永,杜长龙,崔新霞. 采煤机滚筒螺旋叶片结构参数研究[J]. 工程设计学报, 2008,15(4):290-294.
LIU Songyong, DU Changlong, CUI Xinxia. Research on structure parameters of helical vane on shearer drum[J]. Journal of Engineering Design, 2008,15(4):290-294.
- [8] 陆辉,王义亮,杨兆建. 采煤机镐形截齿疲劳寿命分析及优化[J]. 煤炭科学技术, 2013,34(7):100-106.
LU Hui, WANG Yiliang, YANG Zhaojian. Analysis and optimization on fatigue life of pick cutter for cutting drum of coal shearer[J]. Coal Science and Technology, 2013,41(7):100-106.
- [9] 秦大同,王镇,胡明辉. 基于多目标优化的采煤机滚筒最优运动参数的动态匹配[J]. 煤炭学报, 2015,40(增2):532-539.
QIN Datong, WANG Zhen, HU Minghui. Dynamic matching of optimal drum movement parameters of shearer based on multi-objective optimization[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(S2):532-539.
- [10] 张强,王海舰,吴泽光,等. 滚筒式采煤机煤岩截割力学特性及测试系统研究[J]. 工程设计学报, 2017,24(4):459-464.
ZHANG Qiang, WANG Haijian, WU Zeguang, et al. Research of coal-rock cutting mechanical characteristic and test system for drum shearer[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2017,24(4):459-464.
- [11] 赵丽娟,范佳艺,罗贵恒. 采煤机螺旋滚筒振动可靠性分析[J]. 振动工程学报, 2020,33(1):82-87.
ZHAO Lijuan, FAN Jiayi, LUO Guiheng. Vibration reliability analysis of shearer's spiral drum[J]. Journal of Vibration Engineering, 2020,33(1):82-87.
- [12] 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[J]. 煤炭学报, 2009,34(6):840-844.
ZHAO Lijuan, DONG Mengmeng. 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.
- [13] 赵丽娟,赵名扬,刘旭南. 基于VP与BP神经网络的采煤机摇臂壳体可靠性分析[J]. 机械强度, 2017,39(6):1379-1384.
ZHAO Lijuan, ZHAO Mingyang, LIU Xunan. Research on reliability of shearer's rocker shell based on VP and BP neural network[J]. Journal of Mechanical Strength, 2017,39(6):1379-1384.
- [14] 杨周,朴银成,权哲优. 盘式制动器热-机耦合渐变可靠性灵敏度分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022,43(1):48-55.
YANG Zhou, PAK Unsong, KWON Cholu. Gradual reliability sensitivity analysis of thermal-mechanical coupling of disc brakes[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022,43(1):48-55.
- [15] 王海峰,王新刚,胡福豪. 疲劳和刚度失效模式下矿井提升机主轴系统的可靠性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019,40(11):199-206.
WANG Haifeng, WANG Xingang, HU Fuhao. Frequency reliability and sensitivity analysis of double servo turret system [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019,40(11):199-206.
- [16] 李强,张宇献. 基于量子进化在线序贯极限学习机的变桨系统故障检测[J]. 太阳能学报, 2022,43(1):44-51.
LI Qiang, ZHANG Yuxian. Fault detection based on online sequential extreme learning machine using quantum evolution-ary algorithm for pitch system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022,43(1):44-51.

(责任编辑:齐敏华)