

软质滤棒取料机构设计及有限元分析

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.4008

王庆九¹ 张 千¹

邱 宇¹ 汪 骞²

1. 湖北中烟工业有限责任公司

湖北 武汉 430040

2. 湖北工业大学

机械工程学院

湖北 武汉 430068

摘 要: 为满足新型软质滤棒的复合添加需求,设计了一种软质滤棒取料机构。该机构主要由滤棒拨叉、机械爪和斜面-导杆机构组成。运用 ANSYS Workbench 软件对软质滤棒进行瞬态动力学仿真,同时,对取料机构中的弹簧结构进行疲劳寿命分析。结果表明,软质滤棒的最大等效应力为 8.3563 MPa,小于其材料 PLA 的许用应力 33 MPa,这表明滤棒在取料过程中不会发生破坏。在实际工况下,弹簧结构的疲劳损伤较小,其最大等效交变应力为 526.91 MPa,小于其许用应力 786 MPa,这进一步说明了取料机构可靠。可见,所设计的软质滤棒取料机构在结构和性能上均能满足新型软质滤棒的复合添加需求。

关键词: 取料机构;软质滤棒;Workbench;瞬态动力学

中图分类号: TS43

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)04-0061-07

引文格式: 王庆九,张 千,邱 宇,等. 软质滤棒取料机构设计及有限元分析[J]. 包装学报,2025,17(4): 61-67.

1 研究背景

复合滤棒是指以滤棒为原料,将两种或两种以上的滤棒按一定比例和顺序重新切割排布,消除间隙或实现特定长度的间隙后再次使用成型纸包裹,分切后得到的滤棒。相较于传统过滤嘴,复合滤棒在降低有害物质和减少焦油的同时,能更有效地保持烟草的原始风味^[1]。近年来,国内外众多研究机构和企业致力于复合滤棒成型机的研发。英国 MOLINS 公司制造的 DR2-5 型复合滤棒成型机可以实现最大速度为 200 m/min 的二元复合滤棒生产^[2];德国 HAUNI 公司制造的 MUFL-E 型滤棒成型机可以实现最大速度为 500 m/min 的二元复合滤棒生产;意大利 ITM 公司制造的 SOLARIS 型滤棒成型机采用独特短棒排列模式,可以实现三元复合滤棒生产^[3];中烟机械技术中心有限责任公司与许昌烟机公司合作开发的 ZL41

型复合滤棒成型机可以实现最大速度为 400 m/min 的二元复合滤棒生产^[4]。

当前,大部分滤棒复合系统是针对软质滤棒,利用负压鼓轮间的协同作用实现滤棒的复合。然而,最近市场上出现了一种新型的软质滤棒,其内部结构为不规则的蜂窝状截面,长度为 20 mm,外径为 6 mm,如图 1 所示。现有的滤棒复合系统无法满足这种新型滤棒的复合添加需求。新型软质滤棒与负压鼓轮无法紧密贴合,难以保证滤棒在鼓轮槽内的稳定吸附。

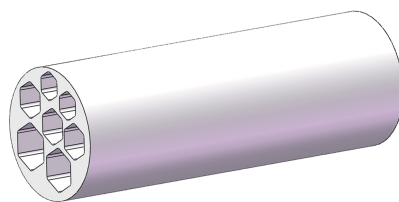


图 1 新型软质滤棒

Fig. 1 New soft filter rod

收稿日期: 2025-03-29

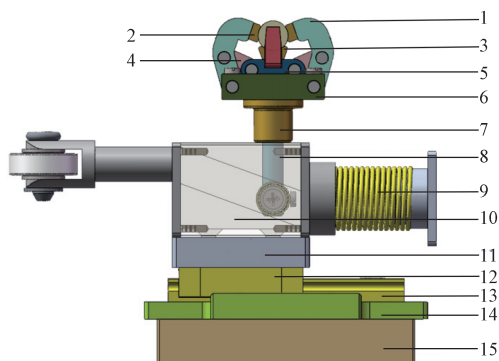
作者简介: 王庆九,男,工程师,主要研究方向为电气控制设计及优化, E-mail: wangqj@hjl.hbtobacco.cn

通信作者: 汪 骞,男,硕士生,主要研究方向为智能轻工装备, E-mail: 1925729505@qq.com

针对新型软质滤棒的复合问题，本课题组设计了一套基于 XTS 输送系统（eXtended transport system）的软质滤棒复合系统。软质滤棒取料机构作为软质滤棒复合系统的关键组成部分，位于 XTS 输送系统的动子上，在运作过程中需承受周期性的冲击载荷。其平稳性和精确性将直接影响整个软质滤棒复合系统的生产质量和效率。因此，本研究对软质滤棒取料机构进行建模，并对新型软质滤棒进行瞬态动力学分析，以验证取料机构的设计合理性和运行稳定性。

2 软质滤棒取料机构设计

软质滤棒取料机构主要由滤棒拨叉、机械爪和斜面-导杆机构组成，如图 2 所示。



1—夹爪；2—抱爪压块；3—抱爪垫块；4—连杆；5—连接件；6—基座；7—轴套；8—竖直推杆；9—弹簧；10—斜块推杆；11—滑块过渡板；12—滑块；13—滑轨；14—盒底板；15—动子。

图 2 软质滤棒取料机构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the feeding mechanism of the soft filter rod

夹爪与基座、夹爪与连杆、连杆与连接件之间均通过销轴铰接，竖直推杆与连接件固定连接，在竖直推杆两侧安装的深沟球轴承嵌入斜块推杆内部的斜槽中，以实现导向。取料过程如下：新型软质滤棒从上方连续装入取料装置的滤棒腔中，随着 XTS 动子的运动，取料装置被输送至负压传送装置的上方。当斜块推杆末端的轴承受到由凸轮施加的水平推力后，推杆产生水平位移，此位移通过斜面-导杆机构转化为竖直方向的移动，进而带动竖直推杆向上运动。竖直推杆在轴套导向下驱动连接件抬升，进而带动连杆和夹爪绕铰接点转动，使两侧夹爪张开或闭合，实现取料动作。同时，当动子继续向右移动时，滤棒在导向压板及曲线弧面的引导下准确进入夹爪夹持区，实现精确定位与压入，完成取料过程的末端导向与夹紧。整个过程借助 XTS 系统的精准控制策略，实现

连续、稳定、高效的滤棒夹取动作。

3 软质滤棒取料机构有限元分析

新型软质滤棒的材料为聚乳酸（PLA），其具有柔软的质地，在生产过程中会受到周期性的冲击载荷。为确保新型软质滤棒能在无损状态下运输至负压传送装置，本研究采用瞬态动力学分析方法，并运用 ANSYS Workbench 软件对其进行瞬态动力学仿真，旨在验证该滤棒取料机构的设计合理性及运行稳定性^[5,6]。

3.1 瞬态动力学原理介绍

仅用静力学分析对需要承受冲击和碰撞载荷的对象进行评估是不充分的，因为它无法精确地模拟实际工况^[7]。因此，进行动力学分析是必不可少的步骤。瞬态动力学分析是一种常用于分析确定结构在随时间变化的载荷作用下的动力学响应方法^[8]。与静力学分析不同，瞬态动力学分析要考虑随时间变化的载荷及其对阻尼和惯性的影响^[9]。结构动力学方程为

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t), \quad (1)$$

式中： M 表示系统的质量矩阵； C 表示系统的阻尼矩阵； K 表示系统的刚度矩阵； $\ddot{u}(t)$ 表示加速度向量； $\dot{u}(t)$ 表示速度向量； $u(t)$ 表示位移向量； $F(t)$ 表示系统的载荷向量。

在 ANSYS Workbench 中，求解瞬态动力学问题一般采用 Newmark 法^[10]。该方法通过在离散的时间点上求解平衡方程来实现，在处理显式瞬态问题方面具有显著优势。在连续时间点之间的时间增量被称为积分时间步长。Newmark 法能够自动调整至适宜的步长，使误差估计逐步趋近于零。Newmark 法对动力学方程的求解过程见式（2）和（3），在一个积分时间步长内有

$$\ddot{u}_{t+\Delta t} = \ddot{u}_t + [(1-\delta)\ddot{u}_t + \delta\ddot{u}_{t+\Delta t}]\Delta t, \quad (2)$$

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \dot{u}_t\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\ddot{u}_t + \alpha\ddot{u}_{t+\Delta t}\right]\Delta t^2, \quad (3)$$

式中， δ 、 α 为参数。

3.2 有限元模型构建

使用 SolidWorks 三维建模软件对软质滤棒取料机构进行建模。为了保证计算的精度，减少计算量，对模型进行一定简化，保留模型关键部位的几何特征，如图 3 所示。

抱爪压块、抱爪垫块为铜合金，新型软质滤棒为 PLA。各材料属性如表 1 所示。

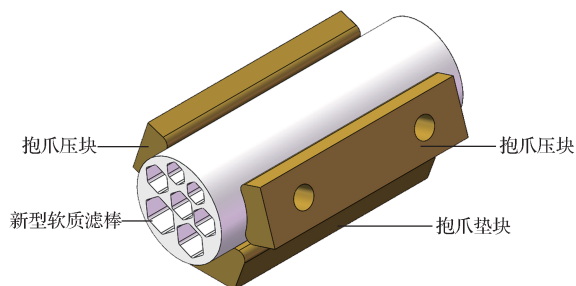


图3 软质滤棒取料机构简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of the soft filter rod feeding mechanism

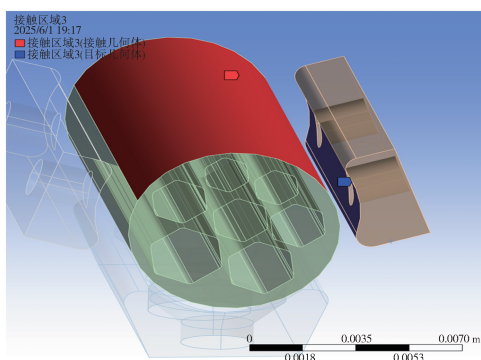
表1 材料属性

Table 1 Material properties

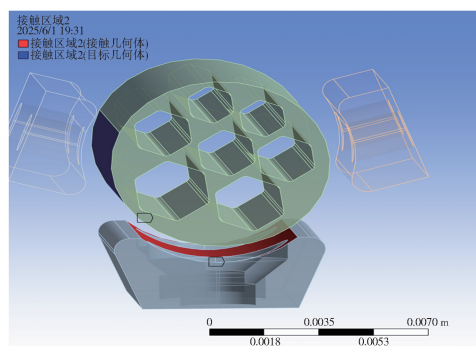
材料	密度 / ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量 / MPa	泊松比	屈服强度 / MPa
铜合金	8300	110 000	0.34	280
PLA	1170	2636	0.40	50

3.3 连接关系建立

在构建有限元模型之后, 为了实现对运动装置在动态过程中的动力学仿真, 用运动关节将各个部件相互连接^[11]。在瞬态动力学仿真中, 连接关系的设定是否合理, 将决定计算过程能否顺利进行和计算结果是否可靠^[12]。ANSYS Workbench 默认的连接关系是基于系统接触的自动检测机制, 而在本文中, 此连接关系是不合理的, 因此在建立连接关系前, 需要先删除导入模型后默认的连接关系。在 Transient Structural 模块中, 根据机构的实际自由度及软件对冗余约束的反馈, 调整连接方式, 以避免冗余约束带来的干扰。在建立局部参考坐标系时, 还应注意其方向设置, 确保运动副约束方向与机构的预期自由度一致。此外, 应尽量保证两个构件之间仅设置一组运动副, 以简化约束关系并提高计算效率。故在本研究所构建的简化滤棒取料机构中, 抱爪压块和滤棒采用 Frictionless 接触模型, 抱爪垫块和滤棒采用 Bonded 接触模型, 如图 4 所示。



a) Frictionless 接触模型



b) Bonded 接触模型

图4 软质滤棒取料机构中的连接关系

Fig. 4 Connections in the feeding mechanism of the soft filter rod

3.4 网格划分

在有限元分析中, 仅网格节点和单元参与计算。求解开始之前, Meshing 平台会自动生成默认的网络。然而, 这些默认网络的质量通常无法满足工程计算的需求, 因此对于复杂结构, 需要进行局部网格细化。各区域具体网格划分如下: 物料采用四面体主导网格划分; 两侧抱爪压块和抱爪垫块采用 Body Sizing 方法, 网格大小设置为 3 mm; 滤棒采用 Body Sizing 方法, 网格大小设置为 1.5 mm^[13, 14]。整体模型网格划分的节点数为 14 215, 单元数为 7634。简化后的网格有限元模型如图 5 所示。

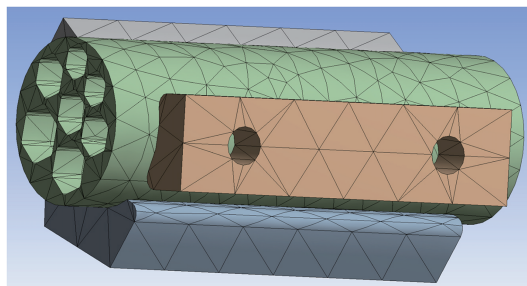


图5 简化后的网格有限元模型

Fig. 5 Simplified mesh finite element model

3.5 仿真参数设定

根据设备运行监测数据, 当软质滤棒完全进入取料机构的滤棒腔后, 取料机构的单次工作周期为 0.12 s, 其中夹爪压块的机械动作位移为 0.06 mm, 运动方向沿其末端的 x 轴负方向。结合实际工况, 仿真总时间设置为 0.1 s, 以覆盖主要载荷作用阶段。初始时间步长设为 25 μs , 最小时间步长为 10 μs , 最大时间步长为 250 μs , 以确保时间积分的精度与稳定性。在仿真过程中, 在夹爪压块末端施加一个沿 x 轴负方向的位移边界条件, 位移量为 0.06 mm。以上设置能

够有效反映工作过程中的冲击载荷与动态响应特性,满足仿真精度与物理一致性要求。

3.6 仿真结果分析

对软质滤棒取料机构进行瞬态计算,0.1 s内机构的等效应变、等效应力、总变形分布图及其相应曲线如图6~8所示。

由图6~8可知,在0.1 s时,物料的最大等效应力为8.3563 MPa,最大等效应变为0.002 861 9,最大变形量为0.008 725 9 mm;最大等效应力点在滤棒相邻

蜂窝的连接处。该新型软质滤棒的材料为PLA,其屈服强度为50 MPa,取安全系数1.5,则许用应力 $[\sigma]$ 为33 MPa。物料的最大等效应力小于其许用应力。可见,该新型软质滤棒具有可靠的强度,本文设计的滤棒取料机构的结构较为合理。

4 弹簧结构疲劳寿命分析

4.1 疲劳寿命分析方法介绍

疲劳寿命分析是评估材料或结构在循环载荷作

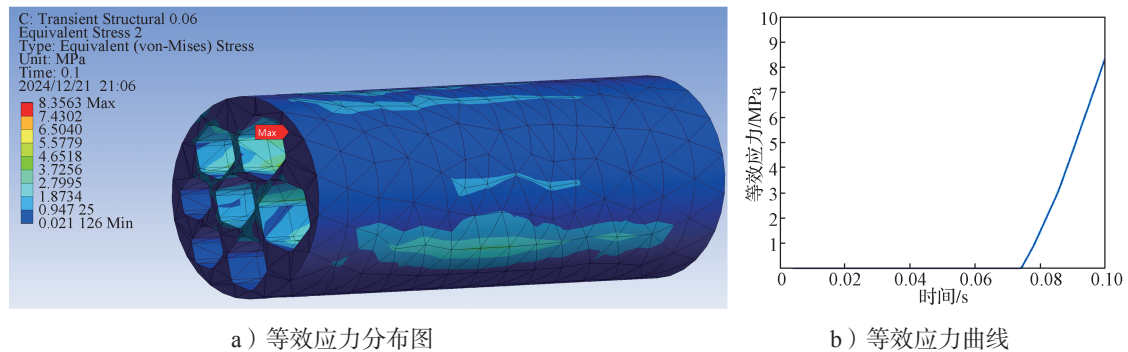


图6 等效应力分布图与等效应力曲线

Fig. 6 Equivalent stress distribution map and equivalent stress curves

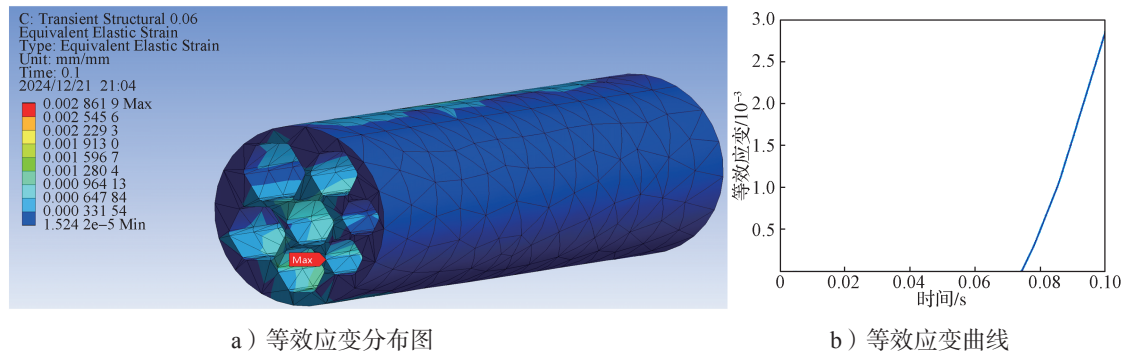


图7 等效应变分布图与等效应变曲线

Fig. 7 Equivalent strain distribution map and equivalent strain curve

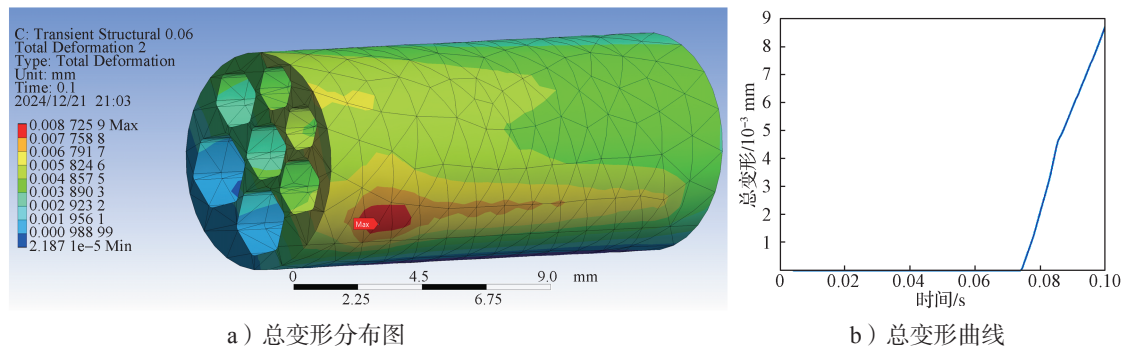


图8 总变形分布图与总变形曲线

Fig. 8 Total deformation and total deformation curves

用下疲劳性能的关键方法。本研究采用线性累积损伤理论,通过 Miner 法则来计算弹簧结构的疲劳损伤。根据 Miner 法则,变幅载荷下 n 个循环所造成的损伤可以表示为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{N_i^f}, \quad (4)$$

式中: N_i 为第 i 级载荷下的循环次数; N_i^f 为第 i 级载荷下的疲劳寿命。当 $D \geq 1$ 时,结构发生疲劳失效。

4.2 有限元模型构建

使用 SolidWorks 三维建模软件对软质滤棒取料机构中的移动结构进行建模。为了保证计算的精度,减少计算量,对模型进行一定简化,保留模型关键部位的几何特征,如图 9 所示。

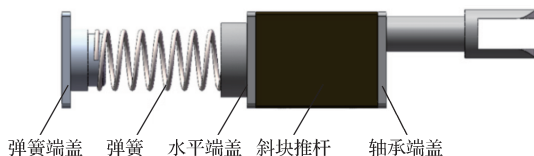


图 9 移动结构的三维模型

Fig. 9 3D model of the moving structure

将建立的弹簧结构模型导入 ANSYS Workbench 2024 中,确保模型的几何结构和材料属性准确无误。

表 3 弹簧钢的 S-N 曲线参数

Table 3 Bilinear S-N curve parameters of spring steel

第一疲劳强度系数 (A) /MPa	第一疲劳强度指数 (m)	第二疲劳强度系数 (C) /MPa	第二疲劳强度指数 (r)	过渡点的循环次数 (N_q)	过渡点的应力振幅 (S_q) / MPa
960	0.335	460	0.3	1.0×10^6	800

准确输入弹簧钢的疲劳性能参数,设置合理的约束条件以模拟实际工作中的支撑和固定情况,并施加相应的循环载荷,载荷幅值为 12.5 N,对应弹簧压缩量为 11.5 mm,按实际工况(8000 次/d)设定循环次数。选择合适的求解器和求解参数,进行疲劳寿命计算,最后提取疲劳损伤分布云图和疲劳寿命结果,用于分析结构的疲劳性能。

4.3 疲劳仿真结果与分析

弹簧结构的疲劳损伤分布云图如图 11 所示。依据弹簧钢的疲劳损伤分布云图和疲劳寿命结果,得到其在不同循环次数下的累计损伤,如表 4 所示。从表 4 可以看出,随着循环次数的增加,累计损伤逐渐增大。当循环次数为 2×10^7 时,累计损伤值为 0.426 680;而当循环次数降低到 0.1×10^7 时,累计损伤值仅为 0.021 334。

实际工况是,单个推料机构每天运行 8000 次,

材料属性如表 2 所示。

表 2 所选材料属性

Table 2 Selected material properties

材料	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量 /MPa	泊松比	屈服强度 /MPa
铝合金	2770	71 000	0.33	280
弹簧钢	7850	210 000	0.30	1180

考虑弹簧在工作过程中受到周期性的冲击载荷,设置弹簧力为 12.5 N,压缩距离为 11.5 mm。对模型进行网格划分,在应力集中区域进行细化处理。整体模型网格划分的节点数为 55 162,单元数为 27 939。简化后的移动结构有限元模型如图 10 所示。

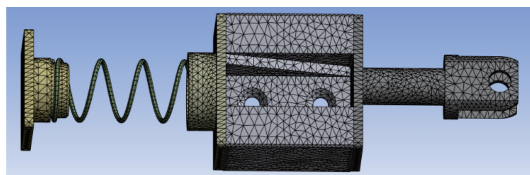


图 10 简化后的移动结构有限元模型

Fig. 10 Simplified finite element model of a moving structure

采用双线性 S-N 曲线评估弹簧钢的疲劳性能。依据 GB/T 3075—2021《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》,得到弹簧钢的 S-N 曲线参数,见表 3。

每半年进行一次维修。假设半年运行天数为 180,则半年内的运行次数为 0.144×10^7 。根据表 4,当循环次数为 0.1×10^7 时,累计损伤为 0.021 334,可得弹簧钢在半年内的累计损伤为

$$0.021\ 334 \times \frac{0.144 \times 10^7}{0.1 \times 10^7} = 0.030\ 721。 \quad (5)$$

此累计损伤值相对较小,远小于失效阈值($D=1$),这表明弹簧结构疲劳损伤可控,即在半年内弹簧结构的疲劳损伤并不严重。

移动结构的等效交变应力云图如图 12 所示。由图 12 可知,弹簧的等效交变应力最大为 526.91 MPa。弹簧钢的屈服强度为 1180 MPa 时,取安全系数 1.5,则许用应力 $[\sigma]$ 为 786 MPa。可见,弹簧的最大等效交变应力小于许用应力。这表明,弹簧结构在实际工况下的疲劳损伤较小,软质滤棒取料机构设计合理。

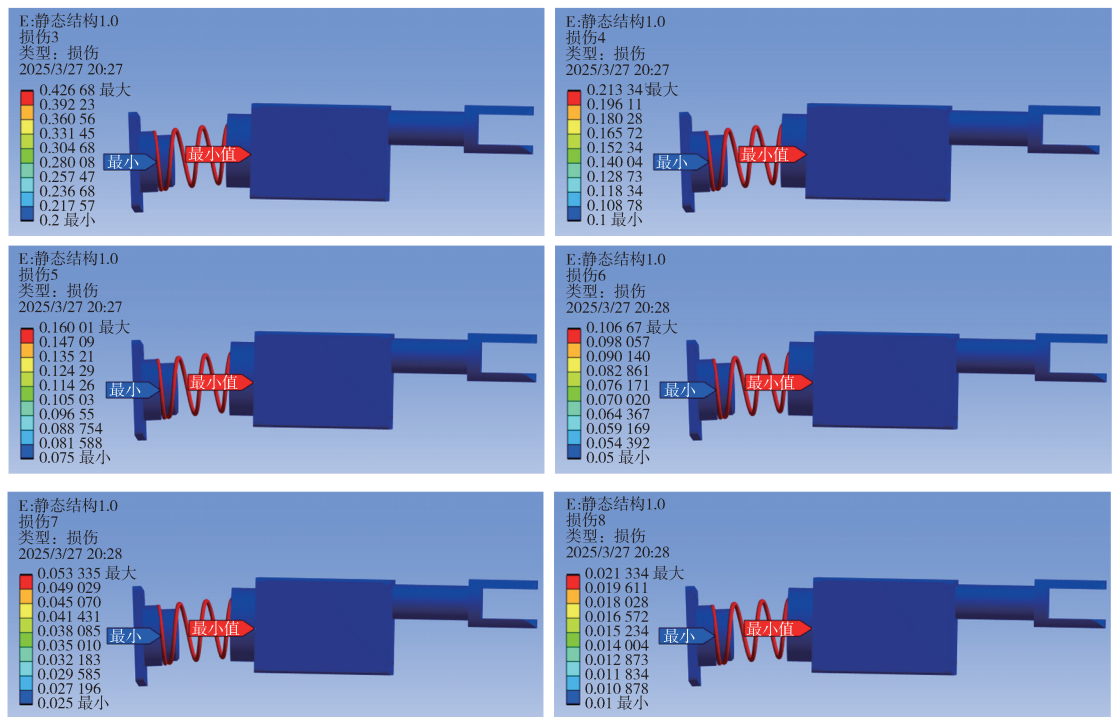


图 11 移动结构的疲劳损伤分布云图

Fig. 11 Fatigue damage cloud of a mobile structure

表 4 弹簧钢在不同循环次数下的累计损伤值

Table 4 Cumulative damage values of spring steel at different cycles

循环次数 / 10^7	2	1	0.75	0.5	0.25	0.1
累计损伤	0.426 680	0.213 340	0.160 010	0.106 670	0.053 335	0.021 334

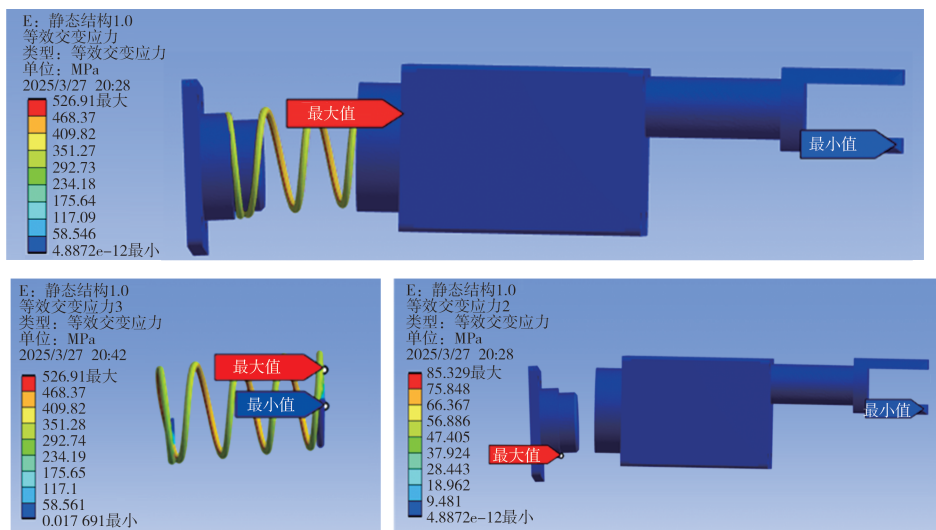


图 12 移动机构的等效交变应力云图

Fig. 12 Equivalent alternating stress contour of a moving mechanism

5 结语

本研究围绕新型软质滤棒复合系统的实际需求，设计了一种基于 XTS 输送系统的取料机构，并结合三

维建模与有限元方法对其进行了系统性分析。通过瞬态动力学仿真验证了在周期性冲击载荷下，软质滤棒在取料过程中的结构完整性。疲劳寿命分析结果表明，关键部件（如弹簧结构）在长期高频运行工况下仍具

良好的可靠性,满足半年维保周期的使用要求。因此,所设计机构在结构强度、运行稳定性及疲劳耐久性方面是合理、可行的。本研究为设计高效、稳定、自动化的软质滤棒提供了技术支撑。下一步研究将结合实验验证与控制策略优化,进一步提升机构的精度与运行可靠性。

参考文献:

- [1] 陈子毅. 新型滤棒成型机加热控制系统研究与改进 [D]. 广州: 广东工业大学, 2018.
- [2] 李红武, 张强, 卢伟, 等. DR2-5 复合滤棒成型机的改造 [J]. 烟草科技, 2010, 43(10): 16-18.
- [3] 傅靖刚, 张建超, 吴钊, 等. 红外线光电检测系统在三元复合滤棒成型过程中的应用 [J]. 烟草科技, 2017, 50(8): 85-90.
- [4] 赵德林. ZL41 复合滤棒成型机交接轮工作原理分析 [J]. 机械工程师, 2013(4): 196-197.
- [5] 李福海, 张宏文, 李勇, 等. 摘锭式采棉机凸轮机构的瞬态动力学分析 [J]. 机械设计与制造, 2013(4): 128-130.
- [6] 田原, 钟飞, 杨小俊, 等. 烟用滤棒上下料机构设计及有限元分析 [J]. 包装与食品机械, 2023, 41(1): 80-85.
- [7] 赵九峰. 碰碰车与防撞梁正碰撞工况的瞬态动力学分析 [J]. 起重运输机械, 2021(23): 43-47.
- [8] BANERJEE S, BALAMURUGAN V, SUNIL M, et al. Transient Dynamic Finite Element Analysis of the Air-Defence Weapon System Mount Assembly of Tracked Vehicle[J]. Procedia Engineering, 2016, 144: 382-389.
- [9] AMRI R, LAAMOURI A, MANCHOUL S, et al. Transient Dynamic Finite Element Simulation for Prediction of Surface Integrity Induced by Waterjet Peening[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020, 234(1): 105-119.
- [10] WANG G X, YIN X Q, LI H R. A New Method Based on Improved Newmark Method of Solving Nonlinear Static-Dynamic Coupling Analysis[C]//2016 International Conference on Mechanics and Architectural Design. Hong Kong: World Scientific, 2017: 487-498.
- [11] 付应海, 唐文评, 石勇, 等. 超静定储运装置仿真分析及结构优化 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 40-46.
- [12] 刘栋, 刘子凌, 张亚玲, 等. 立式蜗壳泵轴承-转子系统瞬态动力学响应研究 [J]. 流体机械, 2021, 49(11): 41-47, 97.
- [13] 薛睿渊, 张永楠, 张希恒, 等. 不同网格划分方式下阀门有限元分析结果差异性研究 [J]. 西华大学学报(自然科学版), 2025, 44(2): 106-112.
- [14] 曾然, 侯力, 游云霞, 等. 高压模拟装置筒体的瞬态动力学分析 [J]. 机械设计与制造, 2019(增刊1): 99-103.

(责任编辑: 邓彬)

Design and Finite Element Analysis of Soft Filter Rod Feeding Mechanism

WANG Qingjiu¹, ZHANG Qian¹, QIU Yu¹, WANG Qian²

(1. Hubei China Tobacco Industry Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: To meet the composite addition requirements of a novel soft filter rod, a feeding mechanism is designed, which mainly consists of a filter rod fork, a mechanical gripper, and an inclined plane-guide rod mechanism. Transient dynamics analysis was performed using ANSYS Workbench software to simulate the mechanical behavior of the soft filter rod, while fatigue life analysis was conducted on the spring structure within the mechanism. The results show that the maximum equivalent stress of the soft filter rod is 8.3563 MPa, less than the allowable stress (33 MPa) of its PLA material, indicating no damage during feeding. Under actual working conditions, the spring exhibits minimal fatigue damage, with a maximum equivalent alternating stress of 526.91 MPa, below its allowable stress (786 MPa), further verifying the reliability of the mechanism. The designed feeding mechanism thus satisfies both structural and performance requirements for composite addition of soft filter rods.

Keywords: feeding mechanism; soft filter rod; Workbench; transient dynamics