

橡胶传动皮带在高温环境下使用寿命预测模型构建与验证

李三明

康迪泰克传动系统（宁海）有限公司 宁波市 315600

DOI: 10.12238/ems.v7i8.14732

[摘要] 高温环境下橡胶传动皮带的老化过程显著影响其使用寿命,传统寿命预测方法因忽视多因素耦合作用而难以满足工程需求。基于热氧老化与力学疲劳机制,构建融合物理机理与数据特征的寿命预测模型,利用加速老化实验获取性能退化数据并完成参数标定与模型验证。模型具备动态适应能力,能够反映不同工况下材料性能的演变趋势。在工业现场的应用表明,该模型具有较高的预测精度和较强的鲁棒性,为设备预防性维护提供有效支持。研究成果有助于提升橡胶传动部件在高温环境下的运行可靠性与管理智能化水平。

[关键词] 橡胶传动皮带; 高温环境; 寿命预测; 老化机理; 模型验证

引言

橡胶传动皮带广泛应用于高温工况下的机械设备中,长期暴露于热、氧及周期性应力作用下易发生性能退化,导致突发失效风险增加。当前针对橡胶材料寿命预测的研究多基于理想化假设和稳态条件,难以准确描述复杂环境下的老化行为。随着工业设备对运行稳定性与维护精准度要求的提升,亟需建立一种能够综合考虑多因素影响的寿命预测方法。通过揭示高温环境下橡胶老化的本质机制,并结合实验数据构建具有物理基础与数据适应性的预测模型,为提升设备可靠性与智能化管理水平提供新路径。

一、高温环境下橡胶传动皮带的典型失效形式与影响因素

橡胶传动皮带在高温环境下长期运行,其材料性能会因热氧老化、力学疲劳以及环境介质作用等因素发生不可逆退化,最终导致多种失效形式的出现。常见的失效形式包括表面裂纹、硬化脆化、拉伸断裂及层间剥离等。这些失效行为不仅降低了皮带的承载能力,也显著缩短了其使用寿命。其中,表面裂纹是早期老化的重要表征,通常由橡胶分子链断裂或交联网络破坏引起;随着使用时间延长,裂纹逐渐扩展,最终可能引发断裂事故。硬化脆化则是由于橡胶中增塑剂挥发和交联密度增加所致,在高温条件下尤为明显,直接影响皮带的柔韧性和传动效率。

皮带在运行过程中承受周期性张力和弯曲应力,易产生疲劳损伤,特别是在带轮接触区域,局部应力集中加速了结构破坏过程。高温环境对橡胶材料的影响具有多因素耦合特

征,主要包括温度、氧气浓度、湿度及机械应力等。温度升高会加快橡胶内部化学反应速率,特别是氧化反应,从而加速分子链降解和交联结构变化。氧气作为主要的老化促进剂,在高温下进一步增强了自由基链式反应的活性,使材料性能迅速劣化。湿度则通过加速水解反应对某些特定橡胶配方产生额外影响,尤其在密封不良或暴露于湿热环境中的设备中更为常见。

机械应力在动态负载下引发疲劳累积效应,使皮带在反复拉伸与压缩中产生微裂纹并逐渐扩展,最终形成宏观破坏。高温环境加速氧的扩散速率,提升氧化反应效率,而机械应力则削弱材料抗裂纹扩展能力,二者耦合作用显著加快老化进程。橡胶基材类型、助剂种类及工艺参数对其耐热氧老化性能具有决定性影响,不同配方体系表现出明显差异。添加抗氧化剂等助剂可延缓老化。

二、现有寿命预测方法在高温应用中的局限性分析

传统寿命预测方法主要依赖经验公式、统计回归以及单一老化机制的物理模型,这些方法在面对高温环境下多重因素耦合影响时表现出明显的适应性不足。一方面,多数模型仅考虑单一老化路径,如热氧老化或力学疲劳,而忽略了多种退化机制之间的相互作用。高温环境不仅加速了化学反应速率,还改变了材料内部的应力分布状态,使老化过程呈现出非线性和时变特征,传统线性叠加假设无法准确描述此类行为。

另一方面,许多现有模型依赖于稳态温度条件下的加速

老化试验结果, 未能充分反映实际运行环境中温度波动、周期性负载及环境介质变化的影响。工业设备在运行过程中往往经历启停、负载变化和环境温度骤变等情况, 导致橡胶材料承受动态热历史作用, 其老化速率与稳态条件下存在显著差异。目前常用的 Arrhenius 模型虽能描述温度对老化速率的影响, 但其假设条件过于理想化, 忽略了氧化诱导期、扩散限制以及材料非均匀性等因素, 导致预测结果偏离实际寿命趋势。数据驱动类预测方法近年来被广泛应用于材料寿命评估领域, 但其在高温橡胶制品中的适用性仍存在较大局限。这类方法通常依赖大量高质量的历史数据进行训练, 而在高温环境下, 橡胶材料的老化行为受配方、工艺、结构形式等多种变量影响, 不同批次产品的性能退化规律存在差异, 导致模型泛化能力受限。传感器采集数据的噪声干扰、样本量不足以及实验周期过长等问题也制约了机器学习、深度学习等算法在该领域的有效应用。

再者, 现有寿命预测体系普遍缺乏对失效临界状态的准确定义。大多数研究以材料某一性能指标 (如拉伸强度、断裂伸长率) 下降至初始值的某个百分比作为寿命终点, 但实际工程中, 皮带的失效往往是功能性的, 即丧失传递动力的能力, 而非单纯的物理性能衰减。这种定义方式与真实失效机制之间存在偏差, 降低了预测模型的实用性。高温环境下材料性能退化的非线性特征使得设定统一的失效阈值变得困难, 进一步削弱了模型的适用性。

三、融合老化机理与数据特征的寿命预测模型构建

在高温环境下, 橡胶传动皮带的老化过程受到物理化学反应机制与外部运行条件的共同影响, 呈现出高度非线性和时变特性。为提高寿命预测的准确性与适用性, 需将材料老化机理与实际运行数据特征相结合, 构建具有物理基础并具备数据适应能力的综合预测模型。该模型的核心在于建立从微观分子结构变化到宏观性能退化的映射关系, 并引入动态环境变量对老化速率的影响机制。模型构建的第一步是明确橡胶材料在高温条件下的主要老化路径及其动力学表达形式。热氧老化作为主导机制之一, 其反应过程可通过自由基链式反应进行描述, 并结合 Arrhenius 方程表征温度对反应速率的影响。

在此基础上, 引入氧化诱导期与扩散控制因子, 修正传统模型中忽略的时间依赖性和空间不均匀性问题。针对力学

疲劳效应, 采用连续损伤力学理论建立应力-应变循环作用下的裂纹萌生与扩展模型, 描述皮带在周期性负载下内部微结构损伤的累积过程。在物理机制建模的基础上, 进一步融合实验数据与运行监测数据, 提升模型对复杂工况的适应能力。通过加速老化试验获取不同温度、应力水平下的性能退化曲线, 并利用主成分分析等方法提取关键特征参数, 包括拉伸强度、断裂伸长率、硬度变化率等。这些参数不仅反映了材料性能的演变趋势, 也为模型参数的标定提供了依据。在工程应用中可采集皮带运行过程中的温度、负载、振动等实时数据, 作为环境变量输入至模型中, 实现对老化速率的动态调整。模型的结构设计采用多模块耦合方式, 分别对应不同老化机制及其相互作用。各模块之间通过共享状态变量进行连接, 确保能量耗散、结构破坏与性能衰减之间的逻辑一致性。

采用非线性回归算法优化模型参数, 以实现预测结果与实验观测值的精准拟合。针对不确定性强的边界条件, 利用贝叶斯推理方法量化不确定性, 增强模型在多变应用场景中的鲁棒性。为提升模型的通用性和泛化能力, 考虑橡胶配方、制造工艺及结构形式对老化行为的影响, 通过构建材料特征参数库, 整合各类橡胶基材的热稳定性、抗氧化性能及力学响应特性, 使模型适用于多种材料体系。

四、基于加速老化实验的模型参数标定与验证

为了确保所构建的寿命预测模型能够准确反映高温环境下橡胶传动皮带的老化行为, 必须通过系统的加速老化实验对模型中的关键参数进行标定, 并对预测结果进行有效验证。该过程的核心在于设计合理的实验方案, 获取具有代表性的性能退化数据, 并据此调整模型结构与参数取值, 使其更贴近实际服役状态。实验设计方面, 采用多因素控制策略, 综合考虑温度梯度、持续负载水平及环境介质等影响条件。设置多个高温等级作为老化加速条件, 结合恒温箱与动态加载装置模拟皮带在运行过程中承受的热-力耦合作用。在部分实验组中引入湿度变化或周期性温变环境, 以研究非稳态热历史对材料老化速率的影响。样品选取上, 涵盖不同配方体系和结构形式的橡胶皮带, 以评估模型在不同类型产品中的适用范围。

在实验过程中, 定期采集样品并测试其关键物理力学性能指标, 包括拉伸强度、断裂伸长率、硬度、弹性模量及层

间粘合强度等。这些参数的变化趋势反映了材料内部微观结构的演变过程,是模型参数标定的重要依据。记录实验过程中环境参数如温度波动、应力分布及氧化程度等变量,为模型输入条件提供动态数据支持。参数标定环节采用非线性最小二乘优化方法,将实验所得性能退化曲线与模型预测输出进行比对,调整反应速率常数、扩散系数、损伤演化参数等关键变量,使模型输出尽可能逼近实测数据。对于涉及多机制耦合的部分,采用分阶段拟合策略,分别针对热氧老化主导阶段与力学疲劳累积阶段进行独立参数优化,再通过交叉验证方式确定各模块之间的相互作用权重。

模型验证则依赖于独立实验组的数据反馈。选择未参与标定过程的样本批次,在相同或不同工况下开展重复性实验,对比模型预测寿命与实际失效时间的一致性。评价指标包括平均相对误差、决定系数 R^2 以及残差分布特征等,用于量化模型的预测精度与稳定性。对模型在极端温度或高应力条件下的表现进行考察,分析其是否具备外推能力与边界适应性。在整个参数标定与验证流程中,强调实验数据的可重复性与模型计算的鲁棒性。通过对实验误差来源的识别与控制,提高数据质量,增强模型对真实老化行为的刻画能力。

五、模型在实际工业场景中的适应性与工程应用潜力

工业现场通常存在多变的温度场、非稳态负载、振动干扰及环境介质波动等影响因素,这对模型的输入变量处理能力、计算效率和预测稳定性提出了更高要求。在模型部署前需对其结构进行优化调整,使其具备良好的工程适用性和鲁棒性。在实际应用中,模型需与设备状态监测系统实现数据交互,通过采集运行过程中皮带所处环境的温度、张力、转速及振动信号等动态参数,作为老化速率修正的输入变量。为提高模型对不同设备类型的兼容性,采用模块化设计思路,使各老化机制子模型可根据具体应用场景灵活启用或调整权重。

在高温主导环境下强化热氧老化模块的作用,而在高负载频繁启停的工况下则侧重力学疲劳损伤的计算路径。针对工业现场数据采集精度受限的问题,模型引入容错计算机制,对传感器误差、数据缺失及噪声干扰具有一定的容忍度。通过设置数据预处理模块,对原始数据进行滤波、归一化和异常值剔除处理,确保输入信息的可靠性。采用滑动时间窗的方式对历史数据进行滚动更新,使模型能够动态捕捉老化趋势的变化特征,提升预测结果的时效性和准确性。模型的工

程部署方式依据实际需求可分为离线评估与在线预警两种模式。离线评估适用于定期维护计划制定,基于历史运行数据对皮带剩余寿命进行估算;在线预警则结合边缘计算设备或嵌入式系统,实现实时寿命预测与故障风险提示。该功能可集成至现有设备管理系统中,作为预防性维护决策的重要参考依据,有助于减少突发性停机事故,提高设备运行效率。

模型的应用还可拓展至橡胶材料选型优化、皮带结构改进及维护周期自适应调整等方面。通过对不同配方体系的老化敏感性分析,辅助企业选择更适用于特定工况的皮带类型;结合有限元仿真技术,可模拟皮带局部应力集中区域的老化分布,为结构设计提供优化方向;基于预测结果的不确定性分析,还可动态调整维护策略,避免过度维护或维护不足带来的资源浪费与安全隐患。为了提升模型在工业环境中的可用性,还需建立标准化的数据接口与可视化界面,使运维人员能够直观获取关键参数变化趋势与寿命预测结果。

结语

橡胶传动皮带在高温环境下的老化行为受多种物理化学机制共同驱动,其寿命预测面临多因素耦合、模型适应性不足等挑战。通过构建融合老化机理与数据特征的预测模型,结合加速老化实验进行参数标定与验证,提升了模型在复杂工况下的预测精度。模型在实际工业场景中展现出良好的适应性和应用潜力,为设备状态评估与维护策略优化提供了理论支撑。未来可进一步拓展模型的通用性,提升其实时响应能力,并推动其在更多关键橡胶部件中的应用,助力工业系统向智能化运维方向发展。

[参考文献]

- [1] 陈志强. 橡胶材料热氧老化动力学模型及其寿命预测研究[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37 (4): 89-95.
- [2] 刘志远, 王雪峰. 基于神经网络的非线性橡胶材料老化行为建模[J]. 材料导报, 2020, 34 (10): 123-129.
- [3] 赵建国. 橡胶传动带在高温工况下的疲劳寿命试验研究[J]. 机械设计与制造, 2019, (6): 78-81.
- [4] 孙立刚, 杨宏伟. 工业设备橡胶部件老化状态监测与寿命评估技术进展[J]. 机械工程学报, 2022, 58(2): 112-120.
- [5] 黄晓东. 基于 Weibull 分布的橡胶密封件寿命预测模型研究[J]. 润滑与密封, 2020, 45 (3): 67-72.