

汽车塑料零部件老化性能检测研究

李晓男

开封市产品质量检验检测中心 河南 开封 475000

摘 要：汽车塑料零部件长期受光照、温湿度交替及污染物耦合作用，极易发生老化失效，直接影响整车外观品质与使用安全性。为精准掌握车用塑料老化规律，提升老化检测精度，本文系统剖析塑料材料自身特性、外界环境工况及微观结构演变对应的老化机理。结合现有检测技术存在的维度单一、模拟工况不全等问题，搭建多技术融合检测体系，设计标准化加速老化试验方案，筛选量化老化评价指标。通过自然老化与加速老化数据对比验证试验有效性，对检测数据开展清洗与归一化处理，构建多层级老化评价指标体系，并依托机器学习算法建立智能评价模型。研究结果可为车用塑料零部件老化检测、性能评定与寿命预判提供可行的技术参考。

关键词：汽车塑料零部件；老化机理；加速老化试验；性能检测；评价模型

引言：随着汽车轻量化发展推进，塑料材料在整车内外饰结构中的应用占比持续提升，其服役耐久性直接关联整车质量与用户使用体验。车辆长期处于复杂户外环境，塑料零部件易出现变色、失光、开裂、力学衰减等老化问题，传统检测方式难以全面匹配实际工况的多因素耦合老化特征。目前行业内普遍存在老化机理分析不细致、检测方法单一、评价体系不够完善等问题，老化状态判定多依赖经验与宏观指标，量化精度不足。为此，本文围绕汽车塑料零部件老化性能检测展开系统性研究，从机理分析、检测体系、试验方法、数据处理与模型构建多方面开展探究，为完善车用塑料老化检测技术体系提供理论与试验支撑。

1 汽车塑料零部件老化机理剖析

1.1 材料特性与老化关联

汽车塑料零部件的老化性能，由自身高分子材料特性决定。现阶段汽车内外饰常用的 ABS、聚丙烯、聚氯乙烯等材料，分子结构各不相同，耐老化性能存在显著区别。高分子材料的分子链中含有大量活性化学键，稳定性较差，极易发生氧化、裂解反应。塑料制品加工过程中添加的抗氧化剂、增韧剂等助剂，是保障材料性能的关键，长期使用中助剂会逐渐消耗流失，使塑料原有力学性能大幅下降。不同塑料的结晶度、分子密度存在差异，结晶度较低的材料结构疏松，外界物质更易侵入基体内部，从根本上降低零部件的抗老化能力，引发变形、脆裂等故障。

1.2 环境因素对老化的影响

汽车塑料零部件长期暴露在复杂户外环境中，外界

条件是加速老化的主要外因。太阳光中的紫外线会直接破坏高分子化学键，引发光氧老化，造成塑料表面褪色、粉化。车辆运行中持续的高温暴晒、冬季低温冻存，会形成冷热交替工况，让塑料基体反复膨胀收缩，产生结构性疲劳损伤。户外雨水、湿气会引发材料水解反应，路面油污、大气酸碱污染物附着在零部件表面，会持续腐蚀塑料表层。多种环境因素协同作用，会持续加剧材料劣化，大幅缩短汽车塑料零部件的服役周期。

1.3 老化过程中的微观结构演变

塑料零部件的宏观老化失效，源于内部微观结构的不可逆损伤。老化初期，材料内部仅出现少量分子链断裂，微观结构变化微弱，零部件外观与性能无明显异常。随着老化持续进行，分子链断裂数量不断增加，分子交联结构被破坏，材料内部逐渐产生微孔和细微裂纹。在长期环境应力作用下，微孔不断扩张、裂纹持续延伸，材料致密性彻底受损，分子排布趋于紊乱。这种微观结构的持续劣化，直接导致塑料韧性、强度下降，脆性显著提升，最终造成零部件开裂、脱落等老化失效问题^[1]。

2 汽车塑料零部件老化性能检测技术体系构建

汽车塑料零部件老化受光照、温度、湿度等多因素耦合影响，失效形式复杂，单一检测方法无法全面、准确表征材料老化状态。依据车用塑料实际服役工况，构建标准化、系统化的老化检测技术体系，能够有效弥补传统检测方式的不足，提升试验数据精度与可靠性，为塑料零部件性能评定、质量改进及工程应用提供可靠技术依据。（1）现有检测技术梳理与评估。现阶段车用

塑料老化检测主要采用人工加速老化试验,涵盖紫外老化、湿热老化、热氧老化等主流方法,工艺成熟、通用性强,是车企常规性能检测的主要手段。紫外老化可有效模拟光照引发的塑料褪色、粉化、光氧裂解问题,但无法体现温湿度耦合老化效应。湿热与热氧试验侧重温度、湿度造成的材料性能衰减,难以表征紫外辐射导致的微观结构损伤。同时,传统检测多依靠外观变化和宏观力学指标进行评价,缺少微观形貌与化学组分的定量分析,存在检测维度单一、工况模拟不充分、评价结果片面等问题。(2)多技术融合检测方案设计。针对单一检测技术的局限性,结合多场耦合老化特点,建立宏观测试与微观表征相结合的融合检测方案。整合加速老化试验、力学性能测试、扫描电镜微观观测及红外光谱成分分析手段,通过加速老化试验复现零部件实际服役老化规律,获取力学、外观宏观性能变化数据,利用微观检测技术精准识别材料表面形貌、分子结构及官能团的细微劣化特征,实现宏观失效现象与微观损伤机制的对应分析,完整覆盖塑料全流程老化变化规律。(3)检测设备选型与优化。根据融合检测方案要求,选用符合汽车材料检测标准的试验设备,包括紫外老化试验箱、高低温湿热试验箱、万能材料试验机、扫描电子显微镜等。结合车辆真实运行工况校准设备参数,优化光照强度、温湿度区间、试验循环周期等关键指标^[2]。

3 基于加速老化试验的性能检测方法

3.1 加速老化试验方案设计

本次加速老化试验严格遵循相关性、重复性与加速性核心原则,依托汽车塑料零部件实际服役环境,制定标准化、可落地的试验方案。试验以车用内外饰通用塑料为研究对象,复刻车辆露天停放、高速行驶、高低温交替等真实工况,剔除无效试验变量,保证试验条件与实际用车环境高度匹配。试验参数结合行业检测标准与车企实测数据确定,固定紫外光照强度、环境温度、相对湿度、试验循环时长等核心参数,通过强化环境应力的方式压缩老化周期,替代耗时较长的自然老化试验。试验全程设置标准化操作流程,统一试样尺寸、摆放角度、试验间隔时间,规避人为操作偏差与设备波动带来的试验干扰。同时设置多组平行试样与空白对照组,保障试验数据可重复、可对比,通过可控的加速环境模拟塑料零部件全生命周期的老化演变过程,提升试验效率与工况拟合度。为进一步提升试验科学性,本次试验依据 GB/T16422 等汽车塑料老化试验规范设置循环工况,采用光照、高温、凝露交替循环的复合老化模式,模拟车辆夏季暴晒、雨天受潮、冬季低温静置的交替服役特

征。相较于单一恒定老化试验,复合应力循环方式能够有效复现塑料材料热胀冷缩、光氧裂解与水汽侵蚀的耦合损伤过程,使加速老化的损伤机理与实际自然老化机理保持一致,避免因试验模式单一导致的试验失真,进一步提升试验结果的工程适用性。

3.2 老化性能指标选取与量化

结合汽车塑料零部件的失效特征,筛选贴合实际检测需求的核心性能指标,完成指标量化分级,构建完善的老化评价体系。(1)力学性能指标:选取拉伸强度、断裂伸长率、冲击强度等核心参数,对应零部件使用过程中开裂、脆断、形变等失效问题,通过万能试验机完成周期性检测,记录指标衰减幅度。(2)外观性能指标:以表面色差、光泽度、粉化等级为检测参数,采用色差仪、光泽度测试仪进行量化统计,替代传统肉眼主观判定方式,精准识别表层老化损伤。(3)热稳定性指标:通过热重试验检测材料热分解温度与热失重比例,判定老化后塑料材料的结构稳定性。所有指标均参照汽车材料检测国标设定量化阈值,定期采集各老化阶段的检测数据,形成完整的性能变化数据集,为后续老化规律分析提供量化支撑。在指标量化过程中,统一各项参数的测试环境与试验速率,严格控制室温、湿度等测试环境条件,规避测试环境干扰。同时引入性能保留率作为核心评价参数,以初始试样性能为基准,计算不同老化周期后的性能衰减比例,实现不同老化阶段、不同材质试样之间的横向对比,让老化程度的评价更加客观、量化,有效解决了传统定性评价一致性差、精度不足的问题^[3]。

3.3 加速老化与自然老化的相关性验证

为保障加速老化试验数据的真实性与可靠性,开展加速老化与自然老化的对照试验,完成数据相关性验证。选取同种规格塑料试样,分别开展户外自然老化试验与室内加速老化试验,保持试样材质、尺寸、检测频次完全统一。全程同步记录两组试样的力学参数、外观参数与热稳定参数的变化数据,对比两种老化方式下材料性能的变化趋势、损伤特征与老化速率差异。采用统计学分析方法对两组试验数据进行拟合计算,量化数据相关系数,判定加速老化试验的拟合精度。通过相关性验证,修正加速试验参数偏差,校准试验加速倍率,消除人工加速环境带来的试验误差。验证结果可明确加速老化试验与自然老化的对应关系,确保加速老化检测方法能够真实反映汽车塑料零部件的自然老化状态,保障检测结果具备工程参考价值。本次验证采用皮尔逊相关系数与线性拟合模型对两类试验数据进行定量分析,精

准判定性能衰减趋势的同步性。针对部分存在偏差的性能参数,通过调整加速试验的应力等级与循环频次完成参数修正,确定合理的加速老化倍率。通过相关性校准后的试验方法,可有效规避加速试验常见的过老化、机理偏移等问题,保证室内加速试验能够精准等效替代长期户外自然老化试验,大幅缩短车用塑料零部件耐久性性能的研发与检测周期。

4 老化性能检测的数据处理与评价模型构建

4.1 检测数据的采集与预处理

针对汽车塑料加速老化试验的全流程数据建立标准化采集机制,统一各类性能参数的采集节点、记录精度与采样频次,规避人为记录偏差和设备采样误差。采集内容涵盖试样力学参数、外观参数、热稳定参数及试验环境参数,保证原始数据的完整性、连续性和真实性,为后续分析提供可靠原始样本。原始试验数据中普遍存在噪声数据、偶然异常值和量纲不统一问题,无法直接用于模型分析,需开展系统化预处理工作。(1)数据清洗:通过阈值筛选、对比较核的方式,剔除设备波动、操作失误、环境扰动产生的异常数据,保留有效试验样本。(2)数据归一化:对拉伸强度、色差、热失重等不同量纲的参数进行统一标准化处理,将各类数据映射至同一数值区间,消除量纲差异带来的分析干扰,提升后续模型运算精度与数据拟合效果。

4.2 老化性能评价指标体系构建

结合汽车塑料零部件的实际服役要求,从结构安全、使用功能、长期耐久三个维度搭建多层次老化性能评价指标体系。指标选取贴合车用场景,摒弃无效冗余参数,兼顾零部件表层老化特征与内部性能衰减规律。体系分为目标层、准则层与指标层,目标层为塑料零部件整体老化性能等级;准则层包含安全性能、功能性能、耐久性能三类;指标层细化为冲击强度保留率、拉伸强度衰减率、表面色差等级、光泽度损失率、热稳定性参数等核心实测指标。采用层次分析法完成各指标权重分配,依据各参数对零部件失效的影响程度确定权重占比,避免主观赋值偏差。同时参照国家汽车塑料检测标准和行业技术规范,划分各指标的优良、合格、不合格阈值,形成标准化量化评判依据,实现对塑料零部件

老化状态的客观分级评价。

4.3 基于机器学习的评价模型开发

为摆脱传统人工评价主观性强、精度低、效率差的问题,依托预处理后的老化检测数据集搭建机器学习评价模型。模型以各类老化性能实测指标为输入特征,以零部件老化等级和剩余使用寿命为输出标签,完成模型结构搭建与参数初始化。将整理后的数据集按比例划分为训练集、验证集与测试集,通过训练集数据完成模型迭代训练,持续修正模型内部参数,拟合各指标与老化状态的关联规律。利用验证集调试模型超参数,降低模型过拟合、欠拟合风险,借助测试集检验模型预测准确率与稳定性。模型优化完成后,可依托实时检测数据快速输出零部件老化程度与寿命预测结果,实现老化性能的智能化判定。该模型能够适配不同类型车用塑料零部件的检测评价工作,可为车企零部件质量管控、服役寿命评估、材料选型优化提供数据支撑与技术参考^[4]。

结束语: 本文通过对汽车塑料零部件老化机理、检测技术、试验方法及评价模型的系统性研究,明确了材料属性、环境工况与微观结构演变的老化关联机制。针对传统检测技术短板,搭建了宏观与微观结合的多技术融合检测体系,确立了标准化加速老化试验流程与量化评价指标。通过自然老化对照验证了加速试验的可行性与准确性,结合数据预处理手段构建完善的评价体系,依托机器学习实现老化性能智能评估。

参考文献

- [1] 孟令威,张自强,张邦成,王秋红,彭其飞.汽车塑料燃油箱耐火性能检测装置结构设计与分析[J].工程与试验,2021,61(2):68-72.
- [2] 周革.汽车零部件疲劳性能自动化检测系统优化研究[J].汽车测试报告,2023(22):7-9.
- [3] 杨文叶,朱长春,姜子敬,李文中,李振兴,马秋.汽车塑料尾门专用复合材料和胶粘剂粘接性能的研究[J].汽车工艺与材料,2022(3):58-64.
- [4] 胡小天,石玺源,钱文奎,范怡佳,王喆.基于工业机器人的汽车零部件缺陷检测系统设计研究[J].汽车测试报告,2026(2):10-12.