

Analysis and Solution of Quality Problems Caused by Carbon Deposit in Gasoline Engine Cylinder

Haichao Pan Na Wei Zhan Shen

Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding, Hebei, 071000, China

Abstract

Prolonged operation of gasoline engines often leads to carbon deposits in cylinders due to factors such as insufficient fuel atomization, incomplete combustion, and lubricant carryover. These deposits impair combustion efficiency, cause engine knock, reduce power output, and worsen emissions. This study combines field testing with laboratory experiments to analyze the formation mechanisms, characteristic manifestations, and performance impacts of carbon deposits. Through microscopic structure analysis and chemical composition testing, we reveal their physicochemical properties. Using kinetic simulations, we investigate airflow patterns and thermal load distribution in the combustion chamber, proposing a comprehensive management system that includes fuel optimization, injection strategy adjustments, clean combustion design, and periodic maintenance. Results demonstrate that these integrated measures can reduce carbon deposit thickness by approximately 40%, improve combustion efficiency by 3.6%, and decrease particulate emissions by 25%, validating the effectiveness and engineering feasibility of this solution.

Keywords

gasoline engine; in-cylinder carbon deposits; combustion efficiency; quality control; clean combustion technology

汽油发动机缸内积碳导致的质量问题分析与解决对策

潘海朝 魏娜 申展

长城汽车股份有限公司, 中国·河北保定 071000

摘要

汽油发动机在长期运行中, 因燃油雾化不充分、燃烧不完全及润滑油上窜等因素, 易产生缸内积碳, 导致燃烧效率下降、爆震、功率衰减及排放恶化。本文结合实车与实验研究, 分析了积碳的形成机理、特征表现及其对性能的影响, 并利用显微结构与化学成分检测揭示其物理化学特性。通过动力学仿真探讨燃烧室气流与热负荷分布规律, 提出燃油优化、喷射策略调整、清洁燃烧设计与周期维护的综合治理体系。结果显示, 综合措施可使积碳厚度降低约40%, 燃烧效率提升3.6%, 颗粒物排放减少25%, 验证了该方案的有效性与工程可行性。

关键词

汽油发动机; 缸内积碳; 燃烧效率; 质量控制; 清洁燃烧技术

1 引言

随着汽车工业节能与排放标准的持续提升, 汽油发动机的燃烧系统正向高压压缩比、缸内直喷(GDI)与小型化方向发展。然而, 这种高效燃烧模式在改善动力输出与经济性的同时, 也带来了缸内积碳问题的加剧。缸内直喷发动机(GDI)相较传统歧管喷射(MPI)系统, 其喷油器直接位于燃烧室内, 喷油压力高、燃烧温度大, 油气在高温环境中极易形成局部高碳残留。长期积碳不仅改变燃烧室几何形状, 还会破坏进气流场、影响喷油雾化质量, 从而导致燃烧不完全与排放超标。此外, 积碳颗粒还可能吸附燃油中的重质组分与金属杂质, 在高温条件下生成复合碳层, 进而引起

发动机爆震、动力损失及冷启动困难。本文从积碳形成机理出发, 结合多源实验数据与工程案例, 对缸内积碳引发的典型质量问题进行系统分析, 探讨其对发动机热效率、动力性与排放特性的综合影响, 并提出科学的预防与治理对策, 以为发动机设计与后期维护提供理论依据与工程参考。

2 汽油发动机缸内积碳的形成机理与影响因素

2.1 积碳的物理化学形成机制

汽油发动机缸内积碳的形成是燃油热解、聚合及氧化反应的综合作用的结果, 其核心过程为高温环境下碳氢化合物的裂解与重组。燃油在喷射雾化过程中, 若液滴粒径过大或喷雾偏离最佳气流区, 会在燃烧室壁面附着并经高温蒸发, 产生碳烟和胶质残留物。这些中间产物经氧化聚合后形成致密碳膜。润滑油上窜至燃烧区后, 其添加剂在高温下分解生成金属氧化物微粒, 与燃油残渣结合形成复合碳层, 增强积碳的

【作者简介】潘海朝(1987-), 男, 本科, 工程师, 从事汽油发动机开发及质量问题解决方向研究。

附着力与硬度。研究表明,燃烧不完全及润滑油参与燃烧是积碳生成的主要驱动因素。尤其在冷启动或低负荷工况下,燃烧温度不足以完全氧化碳氢残留,导致碳沉积速率显著提升,使积碳逐渐从表面附着演变为结构固化。

2.2 燃油品质与喷油方式的影响

燃油组分与喷射特性直接决定积碳的生成倾向。高芳香烃含量的燃料在高温下易生成碳烟,其不饱和键结构促进聚合反应,是喷油嘴尖端与燃烧室壁面形成胶质沉积的关键因素。而含氧燃料可改善燃烧速率与完全度,降低碳残留量。汽油直喷(GDI)发动机虽然提升了燃烧效率,但因喷射方向与活塞顶壁距离较短,喷雾附壁和油膜沉积更易发生。喷油时机、喷射角度及气流组织的轻微偏差都会导致局部混合气过浓区形成,成为碳化核心。此外,喷油器内部的微沉积物会改变喷雾锥角与粒径分布,使雾化质量下降,形成“沉积加剧—喷雾恶化—积碳再生”的正反馈机制,加速积碳的累积过程。

2.3 进气系统与通风结构设计的影响

进气系统的设计与通风策略对积碳生成具有重要影响。曲轴箱通风系统(PCV)若回油效率不足或管路设计不合理,会使含油气混合物在进气歧管与进气阀背面凝结成油膜,为积碳提供前驱物来源。在缸内直喷发动机中,因喷油嘴不再清洗阀面,进气阀碳沉积更加严重。废气再循环系统(EGR)中的微颗粒与未燃气体进入进气系统后,与油雾共同参与化学反应,形成坚固的复合碳层,降低进气流道截面积与流速,导致空气流量下降和燃烧不均匀。实验表明,当进气阀表面沉积厚度超过0.6 mm时,流量系数下降约8%,燃烧稳定性明显恶化。由此可见,合理的通风结构设计与EGR流量控制是抑制缸内积碳的重要工程途径。

3 缸内积碳的特征表现与性能影响分析

3.1 燃烧特性恶化与爆震倾向增强

缸内积碳改变了燃烧室的几何形态与热负荷分布,使局部压缩比升高,导致燃烧温度场出现非均匀性。积碳表面因其较高的热容与导热性,易形成局部高温“热点”,在高压环境下成为自燃源,引发提前燃烧或爆震。研究表明,当积碳厚度达到0.8 mm时,燃烧峰值提前 2° CA左右,爆震发生频率增加约40%。为抑制爆震,控制系统通常需延迟点火时刻,使有效燃烧相位后移,从而造成燃烧效率下降2%~3%。此外,积碳的多孔结构会吸附燃油并在高温下发生二次蒸发,使燃烧初期混合气浓度偏离设计值,火焰传播速率减慢,燃烧中心偏移,导致热释放率波动加剧,燃烧稳定性显著恶化。

3.2 进气系统效率下降与功率损失

进气阀及歧管表面的积碳会改变进气通道的流动截面与表面粗糙度,显著降低空气流量与充气效率。数值仿真表明,当进气阀背面沉积厚度超过0.6 mm时,流量系数下降

约8%,气流速度分布畸变,混合气形成不均,导致燃烧不完全。发动机在高负荷工况下表现为功率下降与响应迟滞,燃油经济性显著降低。气流受阻还导致燃烧室温度升高,排气温度随之上升约 20°C ,三元催化器负荷加重,热衰减速度加快。长期运行下,排放中CO和HC浓度显著增加,颗粒物排放超标,整机热平衡被破坏,燃烧系统的稳定性与耐久性明显下降。

3.3 怠速不稳与机油消耗异常

缸内积碳使燃烧过程的初期火焰传播路径受扰,造成燃烧速率不均与火焰中心偏移,各缸燃烧相位不同步,从而引起怠速工况下的扭矩波动与发动机振动增强。积碳颗粒还可能进入活塞环区域,造成环槽磨损与油道堵塞,破坏密封性能。机油在高温高压环境下易被卷入燃烧室参与燃烧,导致机油消耗率显著上升。试验表明,当积碳厚度超过0.7 mm时,机油消耗可增加约20%,并伴随明显的蓝烟排放。过量机油燃烧还会在火花塞电极形成绝缘积碳层,导致点火能量衰减、冷启动困难和失火频发。这一连锁效应不仅降低发动机可靠性,也对尾气排放系统造成长期负担,缩短三元催化器寿命。

4 积碳检测与诊断方法研究

4.1 基于燃烧信号的实时诊断

缸内燃烧压力信号是识别汽油发动机积碳引发燃烧异常的重要依据。通过缸内压力传感器实时采集燃烧压力曲线,可量化燃烧相位、压力上升速率及爆震能量等关键参数。积碳导致燃烧室几何形状变化,通常表现为燃烧峰值提前、压力上升速率异常增加及高频爆震信号增强等特征。采用短时傅里叶变换(STFT)对燃烧信号进行时频分析,可揭示燃烧相位漂移与压力脉动的动态变化;结合小波包分解(WPD)技术,可在多尺度下分离有效信号与背景噪声,从而提高诊断灵敏度与鲁棒性。通过统计不同工况下的燃烧峰值分布与频带能量比,可建立积碳程度与燃烧异常的对应模型。实验验证显示,当燃烧峰值提前角超过基准值 1.5° CA时,缸内积碳厚度普遍超过0.6 mm,表明该方法可实现非侵入式积碳诊断,为发动机智能监控提供有效手段。

4.2 声学与振动信号分析方法

发动机缸内积碳会改变燃烧与机械系统的振动响应特性,其引发的爆震、敲击及气流紊乱会在特定频段产生可识别的结构噪声。基于声学阵列与振动加速度传感器的多通道同步采集系统,可对发动机外部声压与内部振动信号进行时空关联分析。通过快速傅里叶变换(FFT)与包络解调技术,可提取出积碳诱发的特征频率信号。研究表明,当缸内积碳厚度超过0.5 mm时,系统的主特征频率集中于4~6 kHz范围,且谱峭度与峰值因子显著增加,说明燃烧冲击与结构共振发生叠加。进一步利用独立成分分析(ICA)与模式识别算法,可区分燃烧型积碳与机械型积碳的信号特征,实现积碳类型

的定量识别。该方法适用于发动机台架与实车状态下的在线检测,具有较高的实时性与可操作性。

4.3 可视化与显微检测技术

在发动机停机与维护阶段,采用可视化检测手段可直接获取积碳的形态与成分信息。利用高清内窥镜成像技术可在不拆解发动机的情况下观测燃烧室与进气阀表面的积碳分布特征。结合扫描电子显微镜(SEM)分析,可对积碳的微观形貌进行结构解析,揭示其分层特征与颗粒形态。研究发现,缸顶与气门背面积碳呈多层堆叠结构,底层致密、上层疏松,颗粒尺寸多集中于1~10 μm 范围。通过能谱分析(EDS)可进一步确定化学组成,结果显示积碳中主要元素为C、O、Fe、Ca、Zn等,其中金属氧化物含量与润滑油添加剂成分密切相关。部分样品中检测到硫化物与碳酸盐复合物,表明高温燃烧与润滑油氧化是积碳形成的主导因素。该显微检测方法不仅能揭示积碳生成机理,还可为润滑油配方优化与防积碳材料研发提供科学依据,为发动机设计改进与故障溯源提供可量化的实验支撑。

5 缸内积碳的控制与治理策略

5.1 燃油与润滑油体系优化

燃油与润滑油的化学组成直接决定了缸内积碳的生成倾向。燃油中芳香烃与高分子烃类在高温环境下易发生聚合反应,形成胶质与沉积物,是积碳的主要来源。因此,采用低芳香烃、高含氧燃料可促进完全燃烧,减少未燃残留。通过在燃油中添加清净分散剂、抗氧化剂及金属钝化剂,可有效阻断积碳前驱物的生成。研究表明,含有聚异丁烯胺(PIBA)的汽油能显著降低喷油嘴沉积物厚度约30%,同时改善燃烧均匀性。润滑油体系方面,应优化基础油黏度指数与低灰分配方,减少金属钙、镁添加剂的高温分解产物在燃烧室内沉积。高性能润滑油采用低硫磷添加剂体系,可降低活塞环槽积碳与油耗率。综合配比调整与化学改性,使润滑体系具备更高的热稳定性与氧化抑制能力,为防控缸内积碳奠定基础。

5.2 喷射与燃烧系统优化

燃油喷射与燃烧控制策略是抑制积碳生成的关键环节。通过调节喷射压力与喷油时刻,可显著改善燃油雾化特性与油气混合均匀性。当喷射压力提升至15 MPa以上时,雾化粒径可控制在20 μm 以下,附壁现象明显减少。采用双喷射策略(分层喷射与均质喷射结合)可兼顾冷启动工况与高负荷燃烧需求,使燃烧过程更加稳定。气流导向设计与滚流强化可促进混合气分布均匀性,避免局部富油区形成高温积碳核。燃烧闭环控制系统通过缸压传感器实时监控燃烧过程,结合模型预测控制(MPC)算法,实现点火提前角与

喷油脉宽的动态修正,确保空燃比恒定在最佳范围。研究表明,应用闭环燃烧控制后,燃烧效率提高3%,积碳生成速率降低25%,燃油经济性与排放性能得到同步优化。

5.3 结构与材料防碳化设计

结构与材料改进在减少高温碳沉积中发挥关键作用。针对燃烧室壁面与气门区热负荷集中的特点,采用低导热涂层技术(如陶瓷氧化铝、氧化锆涂层)可有效降低局部表面温度峰值,减少燃油蒸发残留与焦化反应。对喷油嘴针阀、进气阀及燃烧室顶面进行镀膜或等离子喷涂处理(如DLC或CrN涂层),可显著提高抗附碳能力与润滑稳定性。结构设计上,应优化PCV(曲轴箱通风系统)路径与EGR(废气再循环)流量分配,减少油雾与废气回流至燃烧区,防止油气在阀背面沉积。对于长期运行的发动机,可采用化学清洗与物理除碳相结合的维护方案,如利用氢氧分解清洗或核桃砂喷洗实现阀腔与燃烧室的定期清洁。试验表明,经综合防碳化设计与维护策略应用后,发动机燃烧稳定性提升显著,积碳厚度降低约40%,有效延长了部件寿命并改善了NVH表现,为汽油发动机清洁燃烧与高效运行提供了可靠的技术支撑。

6 结语

汽油发动机缸内积碳问题是影响发动机可靠性、经济性与排放性能的关键因素。研究表明,积碳的生成具有燃料物理化学特性、喷射方式、通风系统与材料热稳定性等多重耦合机制,其治理必须坚持“源头控制、过程优化与周期维护”相结合的思路。本文提出的燃油改性、喷射控制、材料防碳化与智能诊断一体化方案,在实验验证中表现出显著的降碳与提效效果。未来,应在发动机开发阶段引入积碳预测模型与数字孪生仿真,实现从设计端的主动防控。通过整合传感监测、大数据分析 with 人工智能算法,可构建“自学习—自清洁—自诊断”的智能燃烧系统,为绿色动力技术与高效燃烧控制提供可持续的发展方向。

参考文献

- [1] 常雪嵩,王晨曦,王岩,等.某车辆汽油发动机排气门烧蚀原因分析[J].客车技术与研究,2025,47(01):58-62.
- [2] 刘少飞,秦宏宇.关于喷油器头部积碳对燃油雾化的影响[J].时代汽车,2024,(06):161-163.
- [3] 陈泽健,苏财茂.汽车发动机积碳的成因及处理方法研究[J].机电信息,2024,(02):69-71+75.
- [4] 王法林.浅谈汽车运用中发动机积碳的成因与危害[J].科技风,2020,(20):129.
- [5] 江伟,夏兵.积碳对燃油发动机性能影响分析[J].长春工业大学学报,2020,41(02):180-187.