

汽车发动机燃烧效率提升研究

袁建昌

中联农业机械股份有限公司 河南 郑州 475100

摘要：汽车发动机作为车辆动力核心，其燃烧效率关乎能源利用与环保性能。本研究围绕汽车发动机燃烧效率提升展开，深入剖析热力学基础、关键影响因素及效率损失机理。详细阐述燃烧模式优化、燃料改性、进气与喷射系统改进、热管理与废气再循环等提升技术。同时指出当前面临燃烧稳定性与效率难以兼顾等技术瓶颈。最后展望未来，提出人工智能应用、新型燃料发动机探索及全生命周期效率评估等发展方向。

关键词：汽车发动机；燃烧效率；提升关键技术

引言：随着全球能源危机加剧与环保要求日益严苛，提升汽车发动机燃烧效率已成为汽车工业可持续发展的关键所在。当前，传统发动机在燃烧过程中普遍存在传热损失、不完全燃烧等问题，导致能源利用率低下且污染物排放居高不下。在此背景下，深入研究汽车发动机燃烧效率提升技术迫在眉睫。这不仅有助于降低汽车燃油消耗、减少尾气排放，还能推动汽车行业向绿色低碳方向转型，对实现全球节能减排目标具有重大而深远的意义。

1 汽车发动机燃烧效率理论基础

1.1 热力学基础与效率定义

(1) 热力学第一定律与指示效率：热力学第一定律（能量守恒定律）指出，发动机燃烧燃料产生的热量，一部分转化为气缸内气体推动活塞做功的指示功，其余以热量形式散失。指示效率是指示功与燃料完全燃烧释放热量的比值，反映燃料化学能向机械功的转化程度，受燃烧充分性、缸内压力温度等影响，是衡量发动机内部能量转化效率的核心指标。(2) 机械损失与有效热效率：机械损失指发动机运转中，运动部件摩擦（如活塞与气缸壁、曲轴轴承）、辅助系统消耗（如机油泵、水泵）的能量。有效热效率是实际输出的有效功与燃料燃烧热量的比值，等于指示效率减去机械损失占比，更贴近发动机实际工作效率，是评价发动机整机能量利用水平的关键参数，机械损失越小，有效热效率越接近指示效率。

1.2 燃烧过程关键影响因素

(1) 燃料特性：十六烷值决定柴油着火难易，值越高越易自燃，减少燃烧延迟；挥发性影响汽油雾化效果，挥发性好易与空气混合，提升燃烧均匀性；含氧量高的燃料（如乙醇）可减少局部缺氧，降低不完全燃烧损失。(2) 燃烧室结构：压缩比越高，缸内终温终压

越高，燃料燃烧越充分，指示效率越高，但过高易引发爆震；湍流强度强可加快燃料与空气混合，缩短燃烧时间，减少传热损失；合理喷油策略（如多次喷射）能优化混合气形成，提升燃烧效率。(3) 进气条件：进气温度高可促进燃料蒸发混合，利于低温启动；进气压力高（如增压）增加进气量，提升燃烧功率与效率；适度EGR（废气再循环）可降低缸内温度，但过高会稀释混合气，导致燃烧效率下降^[1]。

1.3 效率损失机理分析

(1) 传热损失、泵气损失、不完全燃烧损失：传热损失是缸内高温气体通过缸壁、活塞等向冷却系统散热；泵气损失是进气行程吸入空气、排气行程排出废气消耗的功；不完全燃烧损失因燃料与空气混合不均、燃烧不充分，导致部分燃料未转化为功。(2) 典型工况下的效率衰减原因：冷启动时，发动机温度低，燃料雾化差、燃烧不充分，且机油粘度大、机械损失高；低负荷时，进气量少，混合气偏浓，缸内温度低，燃烧速度慢，泵气损失占比升高，双重因素导致效率显著衰减。

2 汽车发动机燃烧效率提升关键技术

2.1 燃烧模式优化

(1) 均质充量压缩点火（HCCI）的燃烧控制策略：HCCI技术通过将均质混合气在气缸内压缩至自燃，无需火花塞点火，可实现高效燃烧。其核心控制策略包括精准调控进气温度与压力，通过废气再循环（EGR）调节缸内残余废气量，优化燃料喷射timing与喷油量，确保混合气在最佳时机自燃。同时，借助电控系统实时监测缸内燃烧状态，动态调整参数，避免早燃或失火，平衡燃烧效率与运转稳定性，在中低负荷工况下可显著降低燃油消耗。(2) 反应活性控制压缩点火（RCCI）的分层燃烧设计：RCCI利用不同反应活性的燃料分层喷射实现燃烧控制，通常将高活性燃料（如柴油）直接喷入气

缸，低活性燃料（如汽油）通过进气道喷入形成均质混合气。分层燃烧设计通过控制两种燃料的比例与喷射位置，构建从缸内中心到边缘的反应活性梯度，实现可控的温和燃烧。这种设计可拓宽燃烧边界，减少传热损失与爆震风险，在全负荷范围内提升热效率，同时降低有害排放^[2]。（3）低温燃烧（LTC）的NOx与碳烟协同抑制：LTC通过降低缸内燃烧温度（通常控制在1800K以下），抑制NOx生成；同时，通过优化混合气浓度与湍流强度，避免局部缺氧，减少碳烟产生。其关键在于通过高比例EGR、精准喷油控制与进气参数调节，维持低温环境下的稳定燃烧。例如，结合高压喷射增强混合气均匀性，配合可变气门正时延长燃烧持续期，实现NOx与碳烟排放的协同降低，同时保证燃烧效率不显著下降。

2.2 燃料改性技术

（1）含氧燃料的燃烧特性：生物柴油含氧量高（通常10%-12%），燃烧时可减少局部缺氧，降低碳烟排放，且十六烷值较高，着火性能好，可改善燃烧稳定性；但其粘度较大，需搭配适配的喷射系统，避免雾化不良。乙醇燃料含氧量约34.7%，辛烷值高，抗爆震性能强，可提高压缩比，提升热效率；同时，其蒸发潜热大，能降低缸内温度，抑制NOx生成，但低温启动性能较差，需与传统燃料混合使用或优化进气加热系统。

（2）高辛烷值燃料的抗爆震性能提升：高辛烷值燃料（如95#、98#汽油）可承受更高的压缩比而不发生爆震，为发动机设计更高压缩比创造条件，进而提升热效率。通过添加抗爆剂（如甲基叔丁基醚MTBE）或优化燃料分子结构（如增加异构烷烃比例），可提高燃料辛烷值。高抗爆震性能使发动机在高负荷工况下能稳定燃烧，减少因爆震导致的动力损失与燃油消耗，同时延长发动机使用寿命。（3）燃料添加剂对燃烧速率的影响：添加combustion improver（如有机金属化合物、过氧化物）可加快燃料氧化反应速度，缩短燃烧延迟期，提高燃烧速率。例如，在柴油中添加硝酸酯类添加剂，可促进燃料在低温下的分解与着火，改善冷启动性能与低负荷燃烧效率；在汽油中添加清洁剂类添加剂，可减少积碳生成，维持燃烧室清洁度，避免因积碳导致的燃烧不均匀，间接提升燃烧速率与效率^[3]。

2.3 进气与喷射系统改进

（1）可变气门正时（VVT）的动态配气优化：VVT技术通过电控液压机构调节气门开启与关闭的timing，实现不同工况下的配气优化。在低负荷工况下，延迟进气门关闭，增加残余废气量，降低泵气损失；在高负荷工况下，提前进气门开启、延迟排气门关闭，延长进气时

间与气门重叠期，增加进气量，提升动力输出。动态配气优化可使发动机在全工况范围内匹配最佳空燃比，减少不完全燃烧损失，提升热效率。（2）高压共轨喷射系统的喷油规律控制：高压共轨系统通过高压油泵将燃油加压至1500-2500bar，存储于共轨管中，再由电控喷油器精准控制喷油。其核心是实现灵活的喷油规律，如预喷射、主喷射、后喷射的组合控制：预喷射可降低缸内温度，减少爆震与NOx生成；主喷射确保燃料充分雾化与混合，提升燃烧效率；后喷射可促进碳烟氧化，降低排放。通过精确控制喷油压力、喷油duration与喷油次数，可优化燃烧过程，减少能量损失^[4]。（3）进气滚流比与燃烧室形状的匹配设计：进气滚流是气缸内空气绕垂直于曲轴轴线的旋转运动，高滚流比可增强混合气湍流强度，促进燃料与空气均匀混合。燃烧室形状需与进气滚流比匹配，例如，浅盆形燃烧室搭配高滚流进气道，可在压缩行程中维持强滚流，加快燃烧速度；缩口形燃烧室则通过优化气流运动，减少传热损失。匹配设计可使混合气在燃烧室内快速、均匀燃烧，缩短燃烧时间，降低传热与不完全燃烧损失，提升热效率。

2.4 热管理与废气再循环（EGR）

（1）低散热材料与冷却系统优化：采用低导热系数的材料（如陶瓷涂层、耐高温合金）喷涂于气缸壁、活塞顶等部件，减少缸内热量向冷却系统传递，降低传热损失。冷却系统优化通过电控节温器、可变流量水泵等部件，动态调节冷却液流量与温度：在冷启动阶段，减少冷却液流量，快速提升发动机温度；在高负荷阶段，增加流量，避免过热。通过精准控制发动机工作温度，维持最佳燃烧环境，提升效率。（2）EGR率对燃烧效率与排放的双重影响：低EGR率（5%-15%）可引入少量废气，降低缸内燃烧温度，抑制NOx生成，且对燃烧效率影响较小；中高EGR率（15%-30%）虽能进一步减少NOx，但会降低缸内氧气浓度与燃烧温度，导致燃烧速度减慢，不完全燃烧损失增加，效率下降。因此，需根据工况动态调整EGR率，在排放控制与效率提升间找到平衡，例如，低负荷工况采用较高EGR率降低泵气损失，高负荷工况降低EGR率保证燃烧效率^[5]。

（3）智能EGR阀门控制策略：智能EGR阀门通过电控单元（ECU）实时接收发动机转速、负荷、进气温度等信号，动态调节阀门开度，精准控制EGR率。在瞬态工况（如加速、减速）下，快速调整阀门响应速度，避免EGR率波动导致的燃烧不稳定；在稳态工况下，维持EGR率稳定，确保燃烧效率与排放性能最优。同时，结合EGR冷却系统，降低废气温度，提高EGR率控制精

度,进一步优化燃烧过程。

3 汽车发动机燃烧效率提升的挑战与未来展望

3.1 当前技术瓶颈

(1) 燃烧稳定性与效率的矛盾: 为提升效率常采用高压缩比、高EGR率等手段, 但高压缩比易引发爆震, 破坏燃烧稳定性; 高EGR率会稀释混合气, 导致燃烧速度减慢、失火风险增加。例如, HCCI燃烧模式虽效率高, 但在高负荷工况下易出现压力波动, 难以兼顾稳定性与效率的平衡。(2) 新型燃烧模式的控制精度需求: RCCI、LTC等新型燃烧模式依赖多参数协同调控, 对进气温度、喷油timing、EGR率等参数的精度要求极高。现有传感器与电控系统难以实现毫秒级动态响应, 当发动机工况突变(如加速)时, 参数调节滞后易导致燃烧过程紊乱, 影响模式适用性。(3) 成本与耐久性平衡问题: 高压共轨喷射系统、低散热陶瓷涂层等高效部件制造成本较高, 推高整车售价; 同时, 新型燃料(如生物柴油)对发动机部件的腐蚀性较强, 长期使用易导致喷油器磨损、气缸壁腐蚀, 缩短发动机寿命, 增加维护成本, 难以在成本与耐久性间找到最优平衡点。

3.2 未来发展方向

(1) 人工智能在燃烧控制中的应用: 利用深度学习算法分析海量燃烧数据(如缸压曲线、排放数据), 可构建精准的燃烧模型, 实时预测工况变化并优化喷油参数(如喷油压力、次数)。例如, 通过AI算法动态调整RCCI模式下双燃料比例, 实现燃烧稳定性与效率的智能平衡, 提升控制精度与响应速度。(2) 氢燃料内燃机与氨燃料发动机的探索: 氢燃料燃烧无碳排放, 且燃烧速度快, 可大幅提升热效率; 但氢易发生早燃、回火, 需优化燃烧室结构与进气系统。氨燃料含氮量高, 可抑制

NOx生成, 且来源广泛; 但其燃烧速度慢, 需搭配助燃技术(如添加氢气), 未来有望成为零碳燃烧的重要方向。(3) 全生命周期效率评估与碳足迹分析: 传统效率评估仅关注发动机运行阶段, 未来将延伸至燃料生产、发动机制造、报废回收全流程。通过碳足迹分析量化各环节碳排放, 例如对比生物柴油与传统柴油的全周期碳排放量, 为高效低碳技术研发提供决策依据, 推动行业向全链条绿色化发展。

结语

汽车发动机燃烧效率提升研究意义重大且成果可期。通过对其热力学基础、影响因素及损失机理的剖析, 我们明确了提升方向。诸多关键技术, 如燃烧模式优化、燃料改性等的探索应用, 为效率提升提供了有力支撑。尽管当前面临燃烧稳定性、控制精度、成本耐久性等挑战, 但随着人工智能、新型燃料等技术的不断发展, 未来有望突破瓶颈。相信在持续研究与创新下, 汽车发动机燃烧效率将显著提高, 推动汽车行业迈向更高效、环保的新阶段。

参考文献

- [1]徐坚.汽车发动机电控技术与节能减排的关系探讨[J].内燃机与配件,2025,(05):92-94.
- [2]王天慧.汽车发动机常见故障与保养技术探究[J].大众汽车,2025,(01):127-129.
- [3]李勇.汽车发动机热效率提升路径探析[J].汽车测试报告,2024,(19):75-77.
- [4]王磊,赵宇.缸内直喷汽油机燃烧与排放控制技术研究进展[J].汽车工程,2020,42(7):77-78.
- [5]郭志佳.汽车发动机燃烧效率提升研究[J].建筑技术科学,2025,(06):90-91.