

铁路内燃机车柴油机排放污染物生成机理及减排策略研究

杨 洋

国能朔黄铁路机辆分公司 河北 沧州 062350

摘 要: 本文聚焦铁路内燃机车柴油机排放污染物问题。阐述了其工作原理与排放特性,剖析氮氧化物、颗粒物、一氧化碳及碳氢化合物的生成机理。进而提出机内净化、机外后处理及运行管理等减排策略。最后展望未来,指出清洁能源替代、智能化减排和全生命周期减排是发展趋势,旨在为铁路内燃机车柴油机减排提供全面参考。

关键词: 铁路内燃机车; 柴油机排放污染物; 生成机理; 减排策略

引言: 铁路运输在经济发展中作用关键,内燃机车是重要动力。然而,其柴油机排放的氮氧化物、颗粒物等污染物,对生态环境和人体健康危害严重。随着环保要求提高,降低铁路内燃机车柴油机污染物排放迫在眉睫。深入研究其排放污染物生成机理,并探寻有效减排策略,对推动铁路绿色发展、实现可持续发展目标意义重大。

1 铁路内燃机车柴油机工作原理与排放特性

1.1 柴油机基本工作循环

铁路内燃机车柴油机采用四冲程工作循环,依次完成进气、压缩、做功、排气四个过程,为机车运行提供动力源。进气冲程中,活塞下行使气缸内形成负压,空气经进气门吸入缸内,无燃油混入,保证进气纯度。压缩冲程里,活塞上行压缩空气,由于压缩比极高(通常14~22),缸内空气温度升至柴油自燃点(约350°C)以上,无需火花塞点火^[1]。做功冲程时,喷油嘴将高压柴油雾化喷入气缸,柴油与高温空气迅速混合并自燃,产生大量高温高压气体推动活塞下行,通过曲轴将直线运动转化为旋转运动,驱动机车车轮运转。排气冲程中,活塞再次上行,排气门打开,燃烧后的废气经排气门排出缸外,完成一次循环。

1.2 典型污染物分类与危害

铁路内燃机车柴油机排放的典型污染物主要分为氮氧化物(NO_x)、颗粒物(PM)、一氧化碳(CO)及碳氢化合物(HC)四类,对生态环境和人体健康均存在显著危害。 NO_x 主要包括一氧化氮和二氧化氮,高温燃烧是其主要生成条件,排放后会参与光化学反应,形成光化学烟雾,刺激人体呼吸道和眼睛,引发哮喘、支气管炎等疾病,同时还会加剧酸雨形成,腐蚀建筑物、破坏土壤和水体生态。颗粒物按粒径可分为PM10和PM2.5,前者可被鼻腔和咽喉阻挡,后者能穿透呼吸道屏障进入血液循环,携带重金属、多环芳烃等有害物质,诱发肺癌、

心血管疾病等。CO是不完全燃烧产物,具有强毒性,会与人体血红蛋白结合,阻碍氧气输送,轻度中毒引发头晕、恶心,重度可导致昏迷甚至死亡。HC多为未完全燃烧的燃油和润滑油成分,部分物质具有致癌性,且会与 NO_x 协同作用形成二次污染物。

2 铁路内燃机车柴油机排放污染物生成机理

2.1 氮氧化物(NO_x)生成机理

铁路内燃机车柴油机氮氧化物(NO_x)的生成机理主要包括热力型、燃料型和快速型三类,其中热力型 NO_x 是主导成分,占比达80%以上。热力型 NO_x 的生成遵循泽尔多维奇机理,核心条件是高温、高氧浓度和长停留时间。柴油机压缩比高,燃烧时缸内温度可达2000°C以上,此时空气中的氮气(N_2)和氧气(O_2)在高温作用下发生解离反应, N_2 解离为氮原子(N), O_2 解离为氧原子(O),随后氮原子与氧原子、氧气分子结合,依次生成一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2)。燃料型 NO_x 源于燃油中的氮元素,铁路柴油含氮量极低,因此燃料型 NO_x 生成量极少,可忽略不计。快速型 NO_x 则产生于燃烧初期,燃油喷入后与高温空气快速混合燃烧,在富燃料区域短暂生成,因柴油机燃烧过程中氧浓度整体较高,快速型 NO_x 占比不足5%。另外,喷油提前角、负荷大小会影响缸内温度和燃烧持续时间,进而改变 NO_x 的生成量,负荷越大、温度越高, NO_x 排放越多。

2.2 颗粒物(PM)生成机理

铁路内燃机车柴油机颗粒物(PM)的生成机理复杂,主要源于燃油不完全燃烧、润滑油窜入燃烧室及添加剂分解,其成分包括碳烟、可溶性有机成分(SOF)、硫酸盐及金属颗粒等。碳烟是PM的核心成分,生成于富燃料、高温缺氧的局部燃烧区域。燃油雾化不充分时,部分燃油分子在高温下发生热裂解,形成碳氢自由基,自由基相互聚合形成碳核,碳核进一步吸附周围未燃烧的燃油和碳氢化合物,逐渐长大形成碳烟颗粒^[2]。可溶性有机成分

主要来自未完全燃烧的燃油和窜入缸内的润滑油，润滑油因活塞环密封性能下降进入燃烧室后，部分未燃烧或部分燃烧产物会吸附在碳烟表面，成为PM的重要组成部分。硫酸盐源于燃油中的硫元素，燃烧后生成二氧化硫（SO₂），部分SO₂进一步氧化为三氧化硫（SO₃），与缸内水蒸气结合形成硫酸雾，凝结后成为PM的一部分。金属颗粒则来自燃油添加剂、润滑油添加剂及发动机磨损产生的金属碎屑，虽含量较少，但会增强PM的毒性。

2.3 一氧化碳（CO）与碳氢化合物（HC）生成机理

一氧化碳（CO）与碳氢化合物（HC）的生成均与燃烧不完全密切相关，但其生成条件和路径存在差异。CO是燃油不完全燃烧的中间产物，核心生成原因是缸内局部区域氧浓度不足、燃烧温度过低或燃油与空气混合不均。柴油机燃烧过程中，若喷油雾化效果差、混合气形成时间短，部分燃油会处于富燃料环境，无法充分氧化为二氧化碳（CO₂），只能转化为CO；此外，低负荷工况下缸内温度较低，燃烧反应速度减慢，也会导致CO生成量增加。HC的生成路径更为复杂，主要包括燃油雾化不良、燃烧淬熄、润滑油窜烧及排气吹脱。燃油雾化不充分时，部分油滴未与空气混合便随废气排出；燃烧淬熄是指火焰靠近气缸壁时，受低温缸壁影响火焰熄灭，未燃烧的燃油留在缸壁表面，随后被废气带走；润滑油窜入燃烧室后，部分未燃烧成分会以HC形式排放；排气吹脱则是气门重叠期内，新鲜混合气被废气吹入排气管，直接形成HC排放，低负荷、怠速工况下HC生成量更为显著。

3 铁路内燃机车柴油机减排策略

3.1 机内净化技术（源头减排）

机内净化技术作为铁路内燃机车柴油机减排的源头手段，通过优化燃烧过程、改进发动机结构，从根本上减少污染物生成，具有成本低、无二次污染的优势。核心技术包括喷油系统优化、燃烧室改进、进气系统优化及电控技术应用。喷油系统优化通过采用高压共轨喷油技术，精准控制喷油压力、喷油timing和喷油量，使燃油雾化更充分，混合气混合更均匀，减少局部富燃料和缺氧区域，降低PM、CO及HC排放，同时合理调整喷油提前角，平衡NO_x与PM的生成量。燃烧室改进采用缩口型、球形等优化结构，增强缸内气流扰动，促进燃油与空气快速混合，提升燃烧效率，减少不完全燃烧产物。进气系统优化通过增压中冷技术，提高进气密度和充量系数，降低缸内燃烧温度，抑制NO_x生成，同时优化进气涡流强度，进一步改善燃烧质量^[3]。电控技术通过发动机电控单元（ECU）实时监测工况，动态调整喷油、进气等参数，使发动机在不同负荷下均处于最优燃烧状态，实现多污

染物协同减排。

3.2 机外后处理技术（末端治理）

机外后处理技术针对柴油机排气中的污染物进行末端净化，是降低已生成污染物排放的关键手段，适用于现有机车改造和新机车配置，减排效果直接且显著。主流技术包括选择性催化还原（SCR）、颗粒捕集器（DPF）、氧化型催化转化器（DOC）及组合后处理系统。SCR技术通过向排气管喷射尿素水溶液，尿素分解产生氨气（NH₃），在催化剂作用下与NO_x发生反应，将其转化为无害的氮气和水，NO_x去除率可达80%以上，是控制NO_x的核心技术。DPF通过过滤体捕捉排气中的颗粒物，当颗粒物积累到一定量时，通过主动或被动再生方式将其燃烧分解为CO₂排出，PM去除率可达90%以上，有效减少颗粒物排放。DOC主要用于氧化CO、HC及颗粒物中的可溶性有机成分，同时将部分NO氧化为NO₂，为SCR反应和DPF再生提供条件。实际应用中多采用DOC+DPF+SCR组合系统，实现多污染物协同治理，满足严格的排放法规要求。

3.3 运行与管理策略（过程管控）

运行与管理策略通过优化机车运行工况、强化日常管理，在不改变发动机结构和硬件配置的前提下，实现污染物排放的过程管控，是减排体系的重要补充。运行优化方面，通过列车运行控制系统合理规划运行路线和速度曲线，减少机车怠速、急加速、急减速等不良工况，降低低负荷、高负荷极端工况的占比，因为这些工况下燃烧效率低，污染物排放量大。合理控制机车牵引重量和运行速度，使柴油机长期处于经济工况运行，平衡动力输出与减排需求。日常管理方面，建立完善的机车维护保养制度，定期检查喷油嘴、活塞环、进气系统等关键部件，保证部件性能完好，减少因部件磨损、密封不良导致的污染物排放增加；严格控制燃油和润滑油质量，选用低硫柴油和高效润滑油，降低燃油杂质和硫含量对排放的影响。

4 未来发展趋势

4.1 清洁能源替代

清洁能源替代是铁路内燃机车柴油机减排的核心发展方向，旨在通过替代传统化石燃料，从源头消除或减少污染物排放，兼顾环保性与可持续性。主流替代能源包括生物柴油、液化天然气（LNG）、氢气等，且已逐步进入试点应用阶段。生物柴油以动植物油脂、废弃餐饮油为原料，与传统柴油兼容性好，可直接用于现有柴油机，燃烧后PM、CO及HC排放显著降低，且具有可再生性，碳排放接近碳中和。LNG作为清洁化石能源，硫含量极低，燃烧后NO_x排放比传统柴油降低30%以上，PM

排放几乎为零，目前已在部分货运机车中推广使用，但其储存和加注设施需进一步完善。氢气作为终极清洁能源，燃烧产物仅为水，无任何污染物排放，氢燃料内燃机车和氢燃料电池机车成为研发热点，多家企业已成功试制样机，但其加氢基础设施建设、氢气储运成本及安全性仍需突破。

4.2 智能化减排

智能化减排依托大数据、物联网、人工智能等技术，实现柴油机运行状态的实时监测、精准调控和智能优化，大幅提升减排效率和稳定性。核心发展方向包括智能控制、智能诊断和协同调控三大领域。智能控制方面，基于人工智能算法优化ECU控制策略，实现喷油、进气、点火等参数的自适应调节，根据机车负荷、路况、环境温度等动态变化，实时调整燃烧过程，确保污染物排放最低且动力性能不受影响。智能诊断方面，通过在柴油机关键部件安装传感器，实时采集振动、温度、压力、排气成分等数据，结合大数据分析技术，提前预判部件磨损、故障隐患及排放超标风险，实现故障早发现、早处理，避免因部件故障导致的排放增加。协同调控方面，构建机车-地面协同管控平台，将单机车运行数据上传至地面控制中心，中心结合全线路机车运行状态，优化列车运行调度和柴油机工作模式，实现多机车整体减排效益最大化，推动减排技术从单机优化向系统协同升级。

4.3 全生命周期减排

全生命周期减排打破了传统末端治理和源头减排的单一视角，将减排范围延伸至柴油机设计、生产、使用、维护、报废全流程，实现全链条、全方位的污染控制，是未来铁路机车减排的高阶发展趋势。设计阶段采用绿色设计理念，优化柴油机结构和燃烧系统，选用环保材料，

提升部件可靠性和耐久性，从设计源头降低污染物生成潜力和能源消耗。生产阶段推广清洁生产工艺，减少生产过程中的废水、废气、废渣排放，降低柴油机生产环节的环境影响^[4]。使用和维护阶段通过智能化管控、精细化保养，优化运行工况，减少使用过程中的污染物排放，延长部件使用寿命，降低维护频率和废弃物产生量。报废阶段建立完善的回收处置体系，对柴油机废旧部件进行分类回收、翻新再利用或环保处置，减少废旧部件对环境的污染，提高资源利用率。未来，全生命周期减排将结合生命周期评价（LCA）方法，量化各环节环境影响，构建全流程减排评价体系，推动铁路机车产业向绿色低碳方向全面转型。

结束语

铁路内燃机车柴油机排放污染物问题不容忽视，本文全面分析了其生成机理，并从机内净化、机外后处理及运行管理等方面提出减排策略。未来，清洁能源替代、智能化减排和全生命周期减排等趋势将推动铁路内燃机车向绿色低碳转型。持续深入研究与实践这些减排措施，对改善环境质量、保障铁路运输可持续发展具有深远意义。

参考文献

- [1]宋清林,范圣波,林建华,等.内燃机车排放标准与技术研究[J].铁道机车与动车,2023(12):27-31.
- [2]杨名名,彭燕,李鸿博,等.内河船和铁路机车排放控制技术[J].内燃机与配件,2025(3):104-106.
- [3]成鹏.浅谈内燃机车目前环保现状和发展方向[J].探索科学,2020(3):172-173.
- [4]杨洋,杨晓彤,黄守刚,等.道口群约束下铁路内燃机车牵引节能运行综合建模[J].铁道运输与经济,2025,47(5):16-26.