

重型柴油机达到国 IV 标准的技术路线比对

随着柴油机的不断应用，柴油机的排放问题日益受到关注，各国纷纷提出了苛刻的排放标准。为了限制柴油机的排放，2005 年欧洲实施了欧 IV 排放标准，美、日、印等国也采取相应标准以进一步降低排放限值。按照 GB17691 的要求，我国于 2010 年 1 月 1 日起开始实施国 IV 标准，国 IV 标准要求为国 III 限值的基础上，氮氧化物 (NO_x) 进一步降低 30%，颗粒物 (PM) 降低超过 80%，CO、HC 及烟度排放降低也接近 30%。

与汽油机相比，柴油机 CO 和 HC 的排放要少得多，但排放的 NO_x 与汽油机在同一个数量级，而微粒的排放要比汽油机大几十倍甚至更多，因此，降低 NO_x 和 PM 排放是柴油机排放控制的重点。由于柴油机 PM 和 NO_x 的排放具有“相互异致”的关系，实现重型柴油机从国 III 到国 IV 的过渡目前有三种技术方案：机前处理、机内净化及排气后处理。机前处理主要是改进燃油品质，降低硫含量等，用以降低 PM 等的排放；机内净化主要是通过优化燃烧，改善进气以及采用电控喷射技术等，目的是改善燃烧，减少 NO_x 和 PM 等的生成。排气后处理则主要是采用各种过滤净化装置或催化转化器，对排气进行处理。重型柴油机达到国 IV 标准的技术路线主要有两条：一条是优化燃烧+SCR 路线，另一条是 EGR+DPF 路线，如图 1 所示。

优化燃烧+SCR 技术路线

优化燃烧+SCR 技术路线首先通过喷射系统优化、喷射定时提前以及增压中冷等技术优化发动机的燃烧，把颗粒物 (PM) 降到适当的水平，这样会导致 NO_x 排放的提高；再利用 SCR 技术，将 NO_x 转化为对环境没有危害的 N₂ 和 H₂O。目前该路线主要在欧洲采用，又称为欧洲路线。

1. SCR 系统组成及工作原理

SCR 系统主要由 SCR 催化转化器、电控单元 (ECU)、尿素罐、尿素泵 (尿素溶液供给模块)、计量器、喷嘴及各种传感器等组成，如图 2 所示。

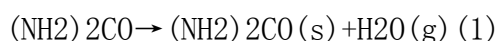
SCR 系统在工作时，首先给空气分配阀通电，输出压力稳定的空气，一路空气供给喷嘴，雾化尿素水溶液；另一路空气供给尿素泵，控制尿素水溶液回

流量的大小。然后尿素泵起动，在计量器的进口处建立具有一定压力的尿素水溶液待用。ECU 采集柴油机的转速和转矩信号以及催化器的进口温度信号。按照控制策略需求尿素水溶液流量的控制指令，驱动电路驱动计量器动作，尿素水溶液与雾化空气混合经喷嘴进入排气管。在排气管中尿素水溶液经蒸发、热解以及水解一系列的物理化学反应后部分或全部分解成氨气 (NH₃) 和水 (H₂O) 并与排气充分混合，然后进入 SCR 催化转化器。在催化剂的催化作用下，NH₃ 与 NO_x 迅速反应生成 N₂ 和 H₂O，随废气排入大气。

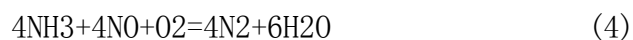
2. SCR 系统降低 NO_x 排放的机理

在将 NO_x 转化为 N₂ 和 H₂O 的过程中，涉及的化学反应比较多，也比较复杂，但主要的反应有如下几个：

(1) NH₃ 的生成



(2) NO_x 的催化还原



柴油机排放的氮氧化物中 NO 含量通常占 85%~95%，因此在 NO_x 的催化还原反应中化学方程式 (4) 是最主要的反应，但是化学方程式 (5) 的反应优先级比化学方程式 (4) 高，废气中的 NO₂ 和一部分 NO 能够通过化学方程式 (5) 快速地被消除。经过化学方程式 (4) 和 (5) 的反应，大部分的 NO_x 被转化为无害的 NH₃ 和 H₂O。

在 SCR 系统中，NO_x 转化的效率与 NO₂/NO 的比例、排气温度等有密切关系。有研究表明：当 NO_x 中 NO₂ 与 NO 的比例达到 1:1，排气温度在 300~400℃时，NO_x 的转化效率最高。

EGR+DPF 技术路线

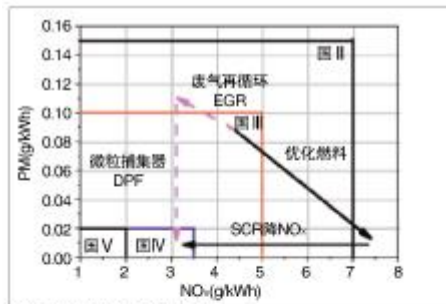


图1 两种柴油后处理路线

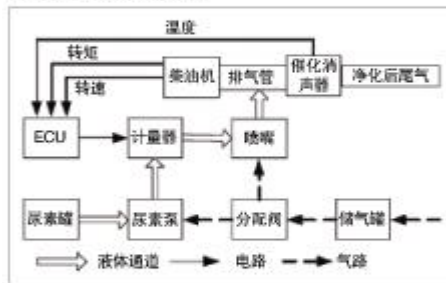


图2 SCR系统组成及工作原理图

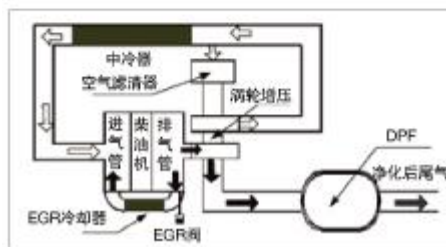


图3 采用EGR+DPF技术路线的柴油机结构

如图 3 所示，EGR+DPF 技术路线首先采用 EGR 技术降低 NO_x 的排放量，同时允许 PM 有一定程度的升高，升高的微粒用 DPF 捕集，从而达到同时降低 NO_x 和 PM 的效果。该路线主要在美国使用，故又称为美国路线。

1. EGR 技术

如图 3 所示，EGR 技术降低 NO_x 的基本原理是将部分排气引入进气管，再循环到燃烧室内，利用废气中的 N₂ 等惰性气体延缓反应的进行，同时，利用

废气中比热较高的 CO₂ 和 H₂O 等,降低缸内最高燃烧温度,从而减少 NO_x 的生成。再循环废气对新混合气有稀释作用,降低了混合气中 O₂ 的浓度,破坏了 NO_x 的生成条件,也可以有效抑制 NO_x 的生成。

废气混入燃烧室的多少,通过 EGR 率来表示。合理的 EGR 率对降低 NO_x 的排放有重要作用。有研究表明,大约 60%~70%的 NO_x 是在高负荷时产生的,此时采用合适的 EGR 率对于减少 NO_x 的排放是很有效的。EGR 率为 15%时,NO_x 排放可以减少 50%以上;而 EGR 率为 25%时,NO_x 排放可以减少 80%以上;但是随着 EGR 率的增加,发动机燃烧速度变慢,燃烧稳定性差,HC 排放和油耗增加。虽然 EGR 对柴油机缸内 NO_x 形成有明显的抑制作用,但同时会增加排气烟度,需要采取相应的措施降低排气烟度。

2. DPF 技术

DPF 是减少 PM 排放的一种废气处理装置,先用收集器过滤废气中的微粒物质,然后通过对收集的微粒进行氧化来清洁捕集器。微粒过滤的机理通常有碰撞吸附、惯性拦截、扩散拦截、重力沉降等。

(1)碰撞原理:柴油机排出的尾气流经微粒过滤器时,由于过滤器设计的结构特点使尾气在过滤器中流动时不断地发生拐弯,这样在拐弯处惯性较大的微粒脱离流动轨迹,与过滤器单元发生碰撞而吸附或沉积在过滤器单元中。

(2)拦流原理:柴油机排出的尾气流经微粒过滤器时,发生两种情况:一是直径大于过滤材料孔径的微粒被截流了下来;二是直径比过滤材料孔径小的微粒由于相互粘着,聚合成直径较大的微粒被截流了下来。

(3)扩散原理:柴油机排出的尾气中的微粒由于气体分子的热运动而做布朗运动,微粒越小,这种运动越明显,由于布朗运动造成了扩散效应,当尾气流经过滤器单元时,纤维状的过滤器单元对微粒的运动起到了汇集的作用,造成微粒浓度梯度,引起微粒的扩散输运,从而可使微粒被捕捉。

(4)重力沉降原理：当缓慢运动的柴油机排出的尾气流经微粒过滤器时，由于尾气滞留的时间比较长，较大的微粒可能由于重力作用而脱离原来的流动轨迹沉积在过滤器单元上。

DPF 把微粒从柴油机的排气中过滤出来，沉积在滤芯内，它本身不能清除微粒。而微粒的积聚会增加排气流动阻力，增加柴油机排气背压，影响柴油机的换气和燃烧，降低功率输出，增加燃油消耗，因此，必须及时清除 DPF 中积聚的微粒，解决 DPF 的再生问题。再生的方法有两种：一种是被动再生，通过在燃油中加入添加剂或在过滤材料表面涂催化层来降低 PM 的燃点，使 PM 能在较低的温度下燃烧掉；另一种是主动再生，利用外界能量来提高 DPF 内的温度，以达到 PM 的燃点，使 PM 着火燃烧。

技术路线综合对比分析



1. SCR 技术路线的优缺点

(1) 优点

提高发动机的燃油经济性。SCR 技术路线通过优化燃烧规律，可以使发动机的油耗降低 5%~10%，同时，尿素还原剂的价格比较低廉，大概是柴油价格的一半，扣除尿素溶液的费用后，SCR 技术方案可使整车经济性提高 3%~5%。

SCR 技术适用的排气温度范围较广。在 230℃~500℃的温度范围内，NO_x 的转化效率可以达到 40%~85%，而实际车辆的排温变化基本上处于这一范围内，可以获得较高的 NO_x 转化率。

催化器对燃油中硫不敏感。戴姆勒·克莱斯勒公司研究认为含硫量 350ppm 以下的欧III燃油都可以满足国IV要求，因此 SCR 系统在燃油质量差的国家和地区也可以使用。

在柴油机上应用 SCR 技术不需要改变柴油机的内部结构，只需在排气管中安装 SCR 催化器，其它 SCR 系统元器件可以根据现场空间安装在发动机的周围，故 SCR 系统安装简单，可以满足国IV以及以上标准的柴油机系统要求。

(2) 缺点

建立完善的尿素溶液供应站需要花费很长一段时间。

SCR 系统的初装成本较高(大约是新车成本的 3%~5%)，操作和保养费用高。为了防止氨泄漏造成的二次污染，对 SCR 系统的封装要求比较高。

SCR 系统中的催化剂在高温时容易老化，造成氨泄漏增加，催化剂的高温稳定性有待于进一步提高。

增加了车辆的额外载荷。使用 SCR 后车辆不但要增加 SCR 本身装置的重量约 150~300kg，还要增加一个尿素溶液箱和尿素溶液。按 100L 尿素溶液跑 7000km 计算，一辆汽车损失的有效载荷在 400kg 左右。

2. EGR+DPF 技术路线分析

(1) EGR+DPF 技术路线的优点

EGR+DPF 技术路线不需要尿素溶液供应，以 EGR 为基础的后处理技术对社会基础设施建设的依赖程度较低。

EGR+DPF 系统成本较低，与 SCR 系统装置相比，质量还减轻了许多。

(2)EGR+DPF 技术路线的缺点

DPF 系统中的催化剂对硫很敏感，很容易造成催化剂的硫中毒，因此在使用这种系统时，必须保证燃油质量不低于欧IV标准，要求含硫量低于 50ppm。然而，我国大部分地区的燃油硫含量为 500~2000ppm，要想大面积的采用 DPF，必须使用低硫燃油。而我国要在短期内实现批量生产国IV油，无论从设备上，还是工艺上都还不太成熟，国IV油开发成本较高，这个成本初期由石化企业承担，但是最终会转嫁到社会。

微粒捕集器需要持续再生。若沉积在过滤器上的微颗粒物不及时清除，过滤器就会被阻塞，引起发动机背压升高，油耗恶化。虽然微粒捕集器实现再生的方式有很多，但是所有的这些措施将会不同程度的导致燃油消耗量的增加。

采用以 EGR 为基础的后处理技术对发动机改动比较大。以 EGR 为基础的后处理技术，首先需要对原有的发动机进行强化，因为燃烧最高爆发压力超过 180bar，所以需要对原有的发动机进行强化，增加机械强度、提高喷油压力和中冷能力，采用 EGR 技术后，EGR 和增压系统的一些参数也要发生变化。

EGR 系统和内部冷却系统都需要安装在发动机上，这就引发了发动机的体积问题。EGR 冷却系统和散热器必须比普通的同类装置大得多，甚至大于 SCR 系统中的尿素罐的尺寸，这对于整车布置还存在不小的困难。

国IV重型柴油机技术路线实施建议

与 EGR+DPF 技术路线相比，采用 SCR 技术路线的国IV柴油机有更好的燃油经济性，我国石油资源比较匮乏，部分石油需要从国外进口，SCR 系统的节能优势有利于推进 SCR 技术路线的实施；我国燃油脱硫技术还不太成熟，在短时间

内提供达到国IV标准(50ppm)的低硫燃油还不太现实，这严重制约着 EGR+DPF 技术路线的实施，而尿素溶液相对来说获取比较容易，且成本比较低，这会促进 SCR 技术路线在我国的实施，同时也为我国燃油品质提高争取了时间。综合各方面因素，在目前一段时间内，SCR 技术路线还是比较适合我国国情的技术路线。国内几大重型柴油机生产企业几乎都采用了 SCR 技术路线，例如玉柴、潍柴、上柴、锡柴等，一部分柴油机机型已经安装在部分公交车以及客车上，并在北京等地示范运营。

为了保证 SCR 技术路线的顺利实施，建议采取以下措施：

建立完善的尿素溶液供应系统，保证尿素的正常供应。我们可以借鉴欧美的成功经验，例如，在服务区、车辆维修站、加油站以及汽车专卖店等地点供应尿素还原剂；可以利用便携式的尿素罐来供给尿素(常见如 5L、10L 和 18L)；也可以设置和加注燃料一样的尿素泵，供给尿素；对于卡车车队或者公交公司等，可以在本单位内部设置中小型的散装容器，储存尿素以备使用。

制定完善的尿素溶液标准。目前 SCR 系统中使用的尿素水溶液尿素含量为 32.5%，在这一个浓度下，尿素水溶液具有最低的凝结温度约 -11°C 。德国早在 2003 年 8 月就提出了 SCR 尿素水溶液的工业标准，我国也应该制定尿素溶液相关标准，以规范尿素溶液的制造与使用。

完善国家排放法规，加大执法力度，要求国IV车辆必须装备 OBD 系统并保证正常使用，同时增加在用车符合性监督程序，保证车辆 SCR 系统能够正常工作，防止装有 SCR 系统的国IV车辆在没有催化剂或 SCR 系统损坏的条件下行驶。

增强催化剂在低温时的活性以及催化剂的高温稳定性，提高 NO_x 的转化效率。同时鉴于我国燃油含硫量还比较高，要提高催化剂抗 SO_2 中毒的性能。

优化尿素喷射系统以及控制策略，保证足量、均匀的尿素溶液喷射到催化转化器中，提高 NO_x 的转化效率，防止氨气的泄露对环境造成的二次污染。在保证 SCR 系统正常工作的前提下，在 SCR 系统的上游安装预氧化催化器，在 SCR 系统后加装 NO_x 浓度传感器。安装预氧化催化器的目的是为了将一部分 NO 转化为 NO_2 ，增大 NO_x 中 NO_2 的比例，以得到最佳的 NO_x 催化转化效率。加装 NO_x 浓

度传感器的目的则是监测 SCR 系统下游的 NO_x 的浓度, 及时反映 NO_x 的转化情况并反馈给 SCR 的 ECU, 调节尿素溶液的喷射量, 实现对尿素喷射系统的闭环控制。

根据我国的实际情况, 建议采取渐进式实施方式。可在重点城市和地区率先实施重型柴油机的国 IV 标准, 然后在全国推广实施。例如, 北京在 2008 年就率先在全国实施了国 IV 排放标准, 并取得了不错的效果。

实施重型柴油机国IV标准, 达到对 NO_x 和 PM 的较低限值要求, 基本实现有二条路线: 其一是优化燃烧+SCR 方案, 其二是 EGR+DPF 方案。由于 SCR 方案燃油经济性较好和对硫含量相对不敏感, SCR 技术更适合中国市场的发展。国内主要柴油机厂商也已推出基于 SCR 方案的国IV产品, 并得到市场的认可。要应对国 V、国VI等更高标准, 可能需要通过闭环 SCR、甚至是 SCR、EGR、DPF 组合的技术方案。