

重型柴油机排放控制技术研究

□ 东风商用车有限公司 / 黄硕

随着我国汽车产业的不断发展，商用车保有量逐年上升，柴油机作为商用车的主要动力源，其需求量也越来越大。柴油发动机排量大，污染物排放恶劣，造成了一系列环境问题。我国于2015年开始在全国范围内对重型柴油机实施国Ⅳ阶段的排放标准。由于SCR路线的燃油经济性好，对柴油机本体改动小以及对硫不敏感，技术升级连续性好，所以国内大部分柴油机厂商对于满足国Ⅳ排放的柴油机研究都采用了欧洲路线即SCR路线。

缸内燃烧降颗粒研究

采用SCR技术路线达到欧Ⅳ排放控制的重点和难点是如何降低发动机缸内颗粒排放。研究工作围绕着GB17691-2005法规规定的测试工况展开，针对ESC循环和ETC循环达标，优化高压共轨系统电控参数，以实现在保证排放达到欧Ⅳ限值下，获得与欧Ⅲ发动机一致的动力性和更好的经济性，同时排温与爆压不超过设计限值。

1. 缸内燃烧过程仿真分析

以DCI11-30柴油机燃烧室为基础，建立缸内燃烧模型，利用CFD仿真软件FIRE，研究喷油器特性参数对缸内主要污染物SOOT、NO_x的影响。

DCI11-30原机选配835喷油器。选择不同油量、喷孔锥角、喷孔孔径以及喷孔出口面的高度锥角及原机喷油器，进行燃油喷射特性参数对缸内流场、主要污染物生成

影响的研究。

喷孔直径的减小，可以提高燃油雾化水平，喷射锥角的变化将改变油束与空气的混合状态。为研究该变化的影响，在喷油器选型之初应用CFD方法对缸内油、气混合状态进行分析，分析其对缸内主要污染物的影响，可以缩短开发时间，为以机内降颗粒为目的的发动机标定提供参考。

通过仿真对比原机喷油器835，及小流量喷孔474、475三种喷油器的特性参数仿真，验证了采用474、475喷油器作为达欧Ⅳ排放研究的可行性。

为验证燃烧室对不同喷油器的敏感性，以欧Ⅲ原机试验数据为边界条件，保持喷孔数、喷孔直径和流量不变。通过CFD软件仿真不同锥角的油束喷入燃烧室后，切分生成的上下两个涡团的大小、形状、位置不同，导致缸内流场、温度场、燃烧组分分布等不同，最终导

致NO_x生成区域、生成量的不同，对最终排放影响的关系，为喷油器选型、喷射参数（主要是喷射提前角）控制提供参考。

2. 喷油器选型研究

基于缸内燃烧过程的仿真研究，采用小流量喷油器具有降低缸内Soot排放的潜力，根据DCI11-30柴油机主要污染物PM-NO_x控制稳态ESC循环加权NO_x排放目标9g/kw·h，对喷油器组合进行稳态排放测试，对比原机喷油器，选择烟度小、经济性好的喷油器作为欧Ⅳ发动机配置。

根据试验结果，以ESC循环NO_x降颗粒为目标，小喷孔喷油器比原机喷油器具有更优良的烟度排放，其中474喷油器偶件的13个工况加权比油耗最低，475喷油器次之。为更好研究喷油器特性参数对发动机标定的影响，选用475喷油器同时开始后续标定试验研究。

3. ESC循环标定

按GB17691-2005要求, ESC循环共计13个工况点。其中怠速工况发动机主要排放物浓度较低, 主要针对其余12工况点进行标定研究。根据欧Ⅲ原机外特性曲线得到三个控制转速分别为: A转速1 270r/min, B转速1 650r/min, C转速1 950r/min。

(1) 主喷正时及轨压的标定。研究除怠速外各排放控制工况点的轨压、主喷正时与烟度、NO_x及比油耗的关系, 绘制各工况下主喷正时及轨压变化的关系曲线; 兼顾经济性优化, 爆压限值的要求, 确定主喷控制MAP。相对于欧Ⅲ数据, 欧Ⅳ数据的主喷正时整体较大, 变化平滑。主喷正时在排放区内中转速大致高2° CA, 高转速高3~4° CA。与欧Ⅲ数据对比, 欧Ⅳ数据的轨压整体上较高, 且一直从低转速逐渐平滑过渡到高转速高负荷的高轨压。

(2) 预喷标定研究。合适的预喷油量及时刻, 降低NO_x排放, 控制缸内压力升高率从而降低燃烧噪声, 但对颗粒排放有一定的影响。同样对除怠速工况的ESC所有工况点进行逐点循优控制, 通过改变预喷油量及时刻绘制压力升高率dp/dφ-NO_x比排放曲线、SOOT-NO_x曲线, 确定合适的预喷参数。

(3) 后喷标定。通过合适的后喷油量和时刻控制, 在后燃期氧化缸内碳烟成份降低PM排放。对ESC工况转速下除怠速、外特性点的9工况进行后喷循优控制, 研究经济性最优标定。

(4) 在研究主喷、预喷、后喷各特性参数对排放和经济性、爆

压、燃烧噪声等影响参数后, 综合考虑ESC循环工况各工况所占权重, 及发动机实际常用工作区, 对预喷、后喷的优化选择。表1为完成ESC循环标定后, 采用475喷油器欧Ⅲ标准柴油(含硫量350ppm)的ESC循环排放结果。

经过优化标定后, DCI11-40柴油机可以达到ESC稳态循环欧Ⅳ限值要求。

表1 ESC循环标定前后数据对比
(单位: g/kW·h)

排放物	标定前数据	标定后数据	标定后数据带SCR
PM	0.085	0.022	0.016
NO _x	4.5	9.01	3.34
CO	0.36	0.2	0.31
HC	0.17	0.12	0.02

4. ETC循环标定

ETC循环标定的主要难点是扭矩跟随性与降低烟度排放的协调, 解决进入缸内的空气量与燃油量的瞬态匹配问题(见图1)。若喷油滞后于增压空气的增加, 将导致缸内过量空气系数增加, 而造成发动机动力性不足; 若增压系统滞后发动机响应, 造成喷油量过大, 则容易产生碳烟, 增加PM排放。因此如何提高发动机瞬态响应性, 并在瞬态条件下使得油、气实现最佳匹配, 以获得在颗粒达标条件下的最

佳动力响应性, 是ETC循环标定研究的关键。

在发动机油量的控制方面, 根据电控系统通过在稳态控制参数上为满足瞬态响应性而提供参数补偿的特点。

5. ELR负荷特性修正

ELR负荷特性测试是在A、B、C三转速及任意一附加转速上进行自由加速烟度测试。测试循环是各转速10%运行(20±2)s, 转速稳定在±20r/min内, 扭矩保持±2%以内, 随后在(10±1)s内油门运行至最大处, 负荷加至100%, 要求最初3s转速稳定在±150r/min, 其余±20r/min。标定的关键是解决各转速下的扭矩跟随性与烟度限制的矛盾, 保证控制区无畸点, 过渡平滑。

机外降NO_x研究

1. 尿素喷射系统选型

尿素喷射系统选择空气辅助喷射DeNO_{x1}系统。该系统与发动机ECU通过CAN通讯, 与无空气助喷DeNO_{x2}系统相比具有雾化好、可靠性高的优点。选择该系统有利于利用其良好的雾化条件对SCR催化器的转化效率、后处理系统整车匹配、针对排放控制循环的标定等关

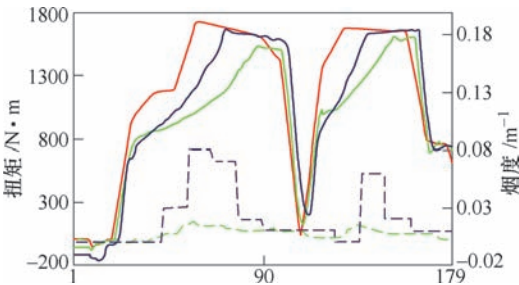


图1 烟度限值条件下扭矩跟随性比较

键匹配技术进行研究。

2. SCR催化剂选型

钒基SCR催化器具有成本低、催化效率高等特点。其转化效率一般能达到70%以上，正好适用使发动机从欧Ⅲ排放升级至欧Ⅳ排放的要求。但由于钒会在550℃以上挥发，从而降低催化器的活性，且钒作为有毒物质挥发后增加环境污染，因此必须合理布置催化器在发动机排气系统的位置，监控催化器温度。

3. DOC、POC的选择

为提高SCR催化器的反应速度，提高催化器在低温环境下的反应效率，通常在SCR催化器之前增加一个氧化型催化转化器（即DOC），减少氨的逃逸，并氧化部分干碳烟、CO等污染物，在其后又增加一个POC用于后氧化。图2为完整SCR后处理系统示意。

由于DOC、POC中含有的贵金属可以将柴油中的硫成份氧化成与排气中的水、柴油/机油添加剂离子组份化合生成硫酸盐，提高了发动机PM排放量。因此在目前我国柴油仍处于高硫含量的条件下，需要研究SCR后处理系统对机外PM排放的影响，并从降低后处理系统布置难度，降低成本研究采用单独的SCR催化器的可行性。

4. MAP标定影响因素

对于采用开环控制策略来控制SCR系统中的尿素喷射，因为没有后处理系统中的反馈调节，主要是通过试验标定好的脉谱图来查询计算最终的尿素喷射量，如何进行发动机的排气温度、排气流量、稳态及瞬态修正的转化效率MAP图的制定尤为重要，而催化器温度、空速、氨氮比等因素对NO_x催化还原反应的催化效率有着重要的影响，而转化效率的MAP图则又是直接关系着最终尿素喷射量。

（1）排气温度。SCR催化器的温度是关系到催化器转化效率的重要参数，关系到催化器在排气系统的安装位置，最终将影响尿素喷射系统的控制策略，为此将催化器布置在距离发动机排气口1.5m，研究发动机全工况范围内催化器转化效率随温度变化特性。催化器起燃温度约250℃，最大转化效率区域覆盖了发动机主要工作区。催化器的转化效率并非随温度增加而增大，温度在450℃以上转化效率反而降低。由此可见，催化器在整车上的布置应当使其工作温度范围控制在250~450℃之间为宜。

可以看出，钒基催化剂的对NO_x的催化还原与温度之间的关系，催化剂转化效率对温度非常的敏感，随着温度的逐渐上升，钒基催化剂的催化活性也随之增强。在

排气温度为200~300℃时，钒基催化剂对NO_x的转化效率不高，最高转化效率仍然低于85%，并且随着温度的降低，NO_x转化效率也开始下降，而且降幅明显。因而为了保证尿素溶液正常地还原尾气中的NO_x并且发挥高效的作用，只有检测到催化转化器入口温度高于200℃时，尿素溶液才开始喷射。在温度高于300℃后，催化效率有明显的提升，并且接近100%，一直到超过500℃后，NO_x转化效率才低于80%，钒基催化剂的活性窗口范围主要在300~500℃之间。

因此，在对尿素喷射的MAP图标定时，必须要考虑到钒基催化剂的这一特性，在高温的活性温度窗口内提高尿素还原剂的喷射量，发挥最大的转化效率，降低NO_x的浓度值满足排放要求。在非钒基的活性窗口区的温度范围内，适时减少尿素的量，防止造成尿素溶液的浪费和引起NH₃、HNCO异氰酸等气体对环境造成的二次污染。

（2）空速。空速是在温度为25℃和压力为100kPa的标准状态下，每小时进入催化转化器的气体容积与催化转化器的容积之比。空速主要取决于柴油发动机的排气流量，它反应了SCR后处理催化器在单位时间内处理的能力。选取柴油机工作在不同工况点时，测量空速变化时NO_x的转化效率关系如图3所示。

从图3可以看出，随着空速的变化，NO_x的转化效率在空速17 000~29 000/h范围出现了不是很明显的波动，基本上保持一个高效稳定的催化活性，此时空速对NO_x转化效率影响很小，因为此空速范

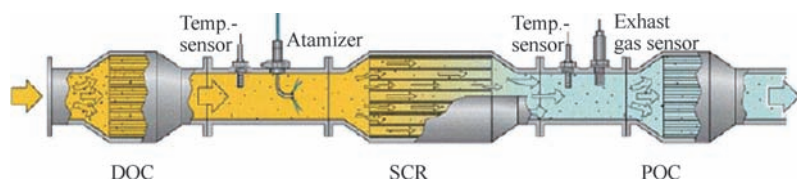
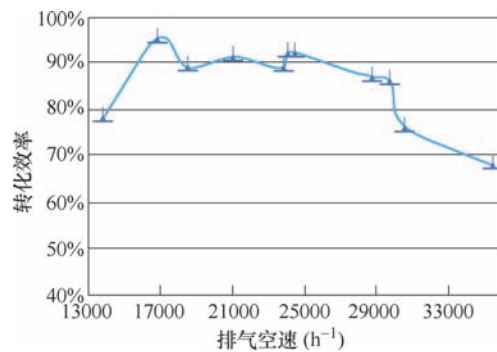


图2 完整的SCR后处理系统

图3 空速与NO_x转化效率关系

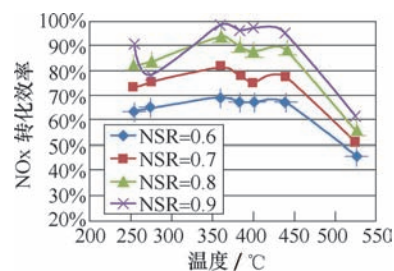
围内，刚好处于催化剂活性温度窗口，温度对NO_x转化效率的影响起着主要的作用。而随着空速的继续增大，NO_x转化效率出现了下降并且最低小于70%，此时由于排气的流速增大，NO_x在催化剂表面停留的时间变短，没有充足的反应时间，并且排气温度高于500℃，催化剂的催化活性降低，NH₃与NO_x的催化还原反应进行变缓，所以NO_x的转化效率降低，其中温度起主要作用。

相对于催化剂温度因素来说，空速对NO_x的转化效率影响并不明显，但是需要注意的是在空速较大的工况下，NH₃在催化器内部的载体表面及孔隙上难以停留和吸附，容易造成NH₃的滑失。因此对转化效率MAP图进行标定时，也需要考虑SCR催化器的空速特性，特别是空速较大的情况下防止NH₃的泄漏，在不同的催化效率下准确控制所需要的尿素喷射量。

(3) 氨氮比。氨氮比是指喷入SCR催化器中的所有尿素转化成的NH₃与总氮氧化物的摩尔比值，用符号NSR表示。根据尿素的水解和热解反应可以知道，1mol的尿素溶液可以释放出来2mol的NH₃量。

氨氮比表征着后处理催化器中喷入尿素生成的NH₃的摩尔量与尾气中的NO_x摩尔量之间关系。选取钨基催化剂的在不同的排气温度下的工况点，调整NSR的值为0.6~0.9，测得NO_x的转化效率关系如图4所示。

从图4可以看出，氨氮比NSR从0.6增大到0.9，在相同的温度条件下，NO_x的转化效率也逐渐增大。随着喷入尿素量的增多，NH₃的量也会相应的增加，有更多的NH₃参与NO_x催化还原反应，也就能够降低掉尾气中的NO_x的浓度值。但是NO_x的催化还原反应中还受到催化剂的活性温度窗口的影响，在高效催化活性区，随着尿素量的增大，De-NO_x反应中能够有大量的NH₃参加，NO_x转化效率也会随着NSR的值相应的升高。在催化

图4 NSR与NO_x转化效率的关系

剂活性窗口区以外的范围，此时催化剂对NO_x的催化效率不高，如果继续增加氨氮比值，氮氧化物的转化效率增加幅度较小，还有可能造成由于过量的尿素喷射导致了NH₃没有参与催化还原反应便直接排出到大气中造成环境的二次污染。因而转化效率的MAP标定中需要通过氨氮比NSR的调节，找到最佳的转化效率，充分发挥催化剂的温度窗口高效区来降低NO_x浓度，也要避免NH₃的滑失。

(4) 瞬态工况排温变化滞后。当排气温度高的工况向排气温度低的工况过渡时，此时发动机的排气温度依然很高，而切换到低负荷工况后，温度不能够立刻下降，有一个平缓的过程，而此时高温下催化器的活性依然很高，对NO_x的转化效率依然还很大，但是由于转换到低负荷工况，DCU会通过CAN总线与ECU通讯查询发动机的目前所在的运行工况，查表计算出该稳态工况下的尿素喷射量的值，由于处在低负荷下，尿素喷射量会根据动作迅速反应减少，而排气温度并没有马上降下来，所以此时仍然处在NO_x转化效率很高的区域，而尿素量的减少，容易引起催化器出口端的NO_x排放值超标。

5. SCR耐硫老化特性研究

为研究SCR催化器的性能与耐久性，将催化器搭载在执行1 000h磨损试验的发动机上，燃用市售柴油进行老化。在进行老化的同时，为研究催化器转化效率的变化规律，每隔250h，将催化器装在欧IV发动机上，按ESC稳态循环进行NO_x比排放测试。为确保转化效率

测试的一致性,保持每次试验的发动机工况(关系到经过催化器空速)、尿素喷射量、催化器安装位置不变。实验结果证明,SCR催化器在老化初期,由于硫的影响,转化效率有所升高,至1 000h老化结束,转化效率始终维持在80%以上,未见明显下降。说明SCR催化器能适用于我国高硫柴油的应用环境。

6. SCR技术应用研究

为使SCR技术成功应用于商用车,必须在保证发动机排放满足欧IV限值的前提下,使整车由于安装

SCR后处理装置所造成的动力性、经济性影响降至最低,使得发动机与催化器在整车上实现最佳匹配,即需要研究发动机排温随工况变化趋势及排气管上温度梯度,使催化器安装在距离合适的长度范围内,从而使之工作在合适的温度范围(250~650℃),始终维持合理的催化转化效率(60%~80%)。同时研究由SCR催化器引起的背压变化,对发动机性能的影响。

结语

项目采用SCR技术路线,使重型柴油机排放水平由欧Ⅲ升级到

欧IV,基础发动机不变,有利于Dci11-40发动机进一步商品化;项目选配的SCR催化器经1 000h耐久性试验,表明具有较强的抗老化能力,转化效率对硫不敏感,有利于发动机适应当前市场油品状况;开展后处理方案研究、耐硫老化性能研究等基础技术研究,确定了后处理方案,为今后整车布置SCR系统提供支持。通过本项研究,在机内降颗粒、SCR的匹配标定等方面积累了一定的经验,并形成了流程和规范,可以用于指导今后的SCR技术的应用和欧V排放的开发。

AUTO1950

(上接第36页)

超过100Hz,两者的曲线出现较大差异,且钢制后地板面板P15点处在180Hz左右出现了一个明显的峰值。按照等效动刚度计算方法,计算激励频率在0~200Hz范围内各测试点的等效动刚度,如图6所示。

可以看出,后地板面板中心点P4处的等效动刚度数值最小,即最易变形。钢制和玄武岩纤维增强复合材料后地板面板在该测试点的等效动刚度数值分别为68N/mm和61N/mm,需要对该区域进行局部结构优化或增强。钢制后地板面板P15点处在180Hz的模态峰值,导致该点的等效动刚度较弱,而相比之

下,复合材料后地板面板在弯折处的动刚度不弱。对比两种材料,钢制后地板面板局部动态性能略好,但玄武岩产品性能更为平均、方差较小。

结语

玄武岩目前主要填充在消声器里面,车身上的应用还处在研究阶段。为探索玄武岩纤维增强复合材料在车身上应用的可能性,本文采用四层玄武岩纤维复合材料制成后地板面板,并对其约束模态和动刚度进行测试,对比传统钢制后地板面板,可以得出以下结论:

(1) 两种材料的后地板面板

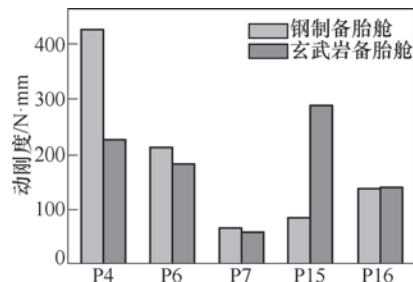


图 6

的约束模态前四阶的振型基本一致,均为中间弯曲、左右扭转、后端扭转和前端弯曲。

(2) 复合材料后地板面板的动刚度与钢制产品相差不大,但减重效果可达40%,导致约束模态数值较高。AUTO1950