

车用柴油机 SCR 混合段结构优化设计

方今朝¹, 刘会猛², 高超¹, 董昕¹, 张选国¹, 李光义¹

1. 万向通达股份公司 技术中心, 湖北 武汉 430056;

2. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074

摘要:为满足国六排放标准对 NO_x 转换效率的要求, 优化设计某车用柴油机的选择性催化还原 (selective catalytic reduction, SCR) 混合段结构, 仿真分析不同混合段结构的三维流场, 比较流场速度均匀性和氨均匀性; 按照国六车用柴油机排放控制要求的工况条件, 进行发动机台架试验, 测试尿素结晶和 NO_x 转化效率。仿真和试验结果表明: SCR 混合段增加混流板可显著提高气体流场速度均匀性和氨均匀性; 优化后, 带混流板 2 的 SCR 混合段结构抗结晶试验测得的尿素结晶不大于 1.0 g, 氨均匀性大于 0.985, 氨氮摩尔当量比为 1.2 时 NO_x 转化效率超过 99%, 满足产品排放控制性能要求。

关键词: 车用柴油机; 排放后处理; SCR; 混合段结构; 结构优化设计

中图分类号: TK424.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-6397(2022)04-0041-07

引用格式: 方今朝, 刘会猛, 高超, 等. 车用柴油机 SCR 混合段结构优化设计[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(4): 41-47.

FANG Jinzhao, LIU Huimeng, GAO Chao, et al. Structural optimization of SCR mixer for vehicle diesel engine[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4): 41-47.

0 引言

国六排放标准对车用柴油机 NO_x 排放限值要求更加严格, 降低 NO_x 排放是必须解决的主要问题之一。选择性催化还原 (selective catalytic reduction, SCR) 对发动机燃烧的影响小、结构布置容易、对发动机的动力性和经济性影响小, 是目前降低 NO_x 排放的主流技术。重型柴油车 NO_x 排放限值由国五排放标准要求的 $2 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 大幅降低至国六排放标准要求的 $0.46 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 相应地对 SCR 系统的性能要求也明显提高^[1-4]。

性能良好的 SCR 系统要求 NO_x 转化效率高、排气阻力损失小、结构紧凑、对发动机工况变化的响应速度快, 并且应避免产生尿素结晶。为此, SCR 混合段设计时应进行结构优化, 提高流场速度的均匀性和氨均匀性, 避免尿素液沉积, 控制尿素结晶, 降低排气阻力。后处理系统的很多研究结合尿素液喷雾混合过程, 采用模拟仿真和试验方法。Zhang 等^[5]对 NH_3 -SCR 系统三角翼流动混合器的混合特性进行了三维模拟, 分析了叶片混合器形状、位置、叶片数量对混合性能的影响, 发现叶片混合器安装在尿素喷嘴下游可以快速提高混合均匀性, 但尿素喷嘴距离载体较远时叶片混合器安装在尿素喷嘴上游更有利于提高混合均匀性; 叶片扭曲产生的旋流在尿素喷嘴距离载体较远时可以改善混合均匀性; 混合器叶片数量为 3 的混合效果比叶片数量为 6 时提高 8%, 压力损失减少 5.3~13.0 kPa。温苗苗^[6]运用三维模拟的方法, 分析了不同混合段结构的系统压降和速度场均匀性、氨均匀性, 研究发现转向型 SCR 系统结构压降小且流场均匀性最好; 在锥形 SCR 进口段中加装孔板混合结构会改善流场均匀性, 但导致

收稿日期: 2022-03-31

基金项目: 湖北省十堰市科学研究与开发计划项目 (19K09)

第一作者简介: 方今朝 (1965—), 男, 湖北十堰人, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为内燃机排气后处理, E-mail: fangjinzhao@tongdamail.com。

排气压降损失增加 1~3 kPa。赵彦光等^[7]设计了 2 种分别带 4 个叶片和 8 个叶片的混合器,叶片结构与文献[5]中的不同,不产生旋流运动,试验研究了 2 种混合器的压降损失和对 NO_x 转化效率的影响,表明 8 个叶片混合器的压力损失比 4 个叶片混合器的压力损失小,且混合器可使 SCR 系统 NO_x 转化效率最高提升 10%。

混合段设计中采用不同结构混合器的主要作用是:增强流场的湍流强度,改善混合;使排气气流产生偏转,从而可以在不增加排气管长度的情况下增加尿素液与排气气流的混合时间,以及尿素液的热解、水解时间,提高流场速度的均匀性和氨均匀性;使排气气流产生螺旋运动,在不增加排气管长度的情况下增加混合时间,并利用尿素液和排气的密度差强化混合过程。

近年来,随着排放标准要求的日益提高,柴油机排气后处理必须结合 SCR、柴油机氧化催化器(diesel oxidation catalyst,DOC)、柴油机颗粒捕集器(diesel particulate filter,DPF)等多项技术才能满足排放标准要求^[8-9]。为了节省安装空间,出现了各种紧凑型、集成式的排气后处理设计方案。Seo^[10]在设计重载车用柴油机的 DPF 和 SCR 封装装置时,发现将尿素喷嘴设置在连接弯管处时,尿素喷雾容易在弯管处沉积,形成湿壁现象,产生结晶;而将尿素喷嘴设置在 DPF 后处理装置末端,同时利用带孔隔板,形成气体扰流,可加速尿素喷雾与尾气间的换热,避免形成结晶。Alano 等^[11]为一台 1.6 L 的 4 缸柴油机设计了一款紧凑型螺旋式混合器 BlueBox,将混合距离由 400 mm 缩短至小于 75 mm,在维持压降不变的条件下使氨均匀性达 0.95 以上。Neusser 等^[12]在大众涡轮增压直接喷射欧 VI 柴油机开发过程中,采用带 SCR 涂层的颗粒过滤器,将 SCR 和颗粒过滤器集成起来,减小了后处理装置体积,与采用独立的 SCR 装置相比,在冷启动和低负荷下排气温度可提高 30 K,不需要在发动机上采取专门措施提高排温。Michelin 等^[13]为提高混合均匀性和减小后处理装置体积,设计了 U 型连接的 DOC-SCR/DPF 后处理装置结构,气流转向角度为 180°,计算流体动力学模拟结果表明,在排气质量流量为 450 kg/h 时,氨均匀性可达 0.96,发动机试验台架测试结果表明 NO_x 排放可满足欧 VI 标准。

不同发动机对 SCR 的要求一致,但混合段结构需要结合发动机的具体工作参数和空间布置进行设计。本文中针对某车用柴油机 SCR 系统进行混合段结构优化设计,着重解决尿素沉积结晶和流场均匀性问题,以满足国六排放标准的要求。

1 结构方案

车用柴油机的主要参数如表 1 所示。为满足国六排放标准要求,使用 DOC-DPF-SCR 等多种后处理技术组合方案,采用筒式结构封装,总体结构如图 1 所示。

表 1 柴油机主要参数

进气形式	缸径/mm	行程/mm	排量/L	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	最大扭矩/(N·m)	最大扭矩转速/(r·min ⁻¹)
增压中冷	113	140	8.4	257	2200	1400	1200~1700

为保证 NO_x 转化效率高,必须保证 SCR 催化反应段入口气体速度均匀性和氨体积均匀性(以下简称氨均匀性)符合要求。速度均匀性影响催化反应段的 NO_x 催化转化性能,氨均匀性能直接决定 NO_x 转化效率。氨氮摩尔比(以下简称氨氮比)基本不影响速度均匀性,但对氨均匀性影响明显。氨氮比越大,尿素液喷雾越难以混合均匀,水解、热解氨均匀性越低^[14]。在一定的氨氮比下,排气流量和排气温度是影响尿素结晶以及氨均匀性的主要因素。为满足国

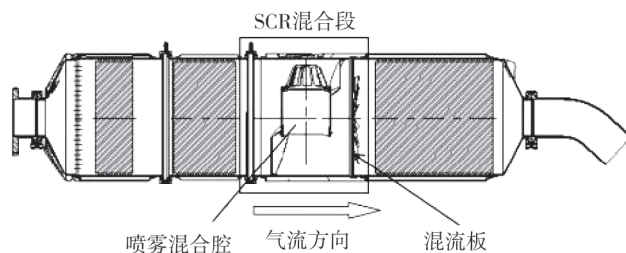


图 1 排气后处理总体结构

六排放标准限值要求,需提高氨氮比,由此带来结晶和氨均匀性问题,相比国五排放标准阶段更难以解决。采取以下分级的办法解决结晶和氨均匀性:1)喷雾混合腔进行初步混合,尽量避免结晶;2)为提高均匀性,可增加混流板。具体包括在混合段仅布置混合腔和在混合腔后再布置混流板2种方案。混流板结构有2种,如图2所示,其中混流板1为扇叶结构,混流板2为网孔板结构。

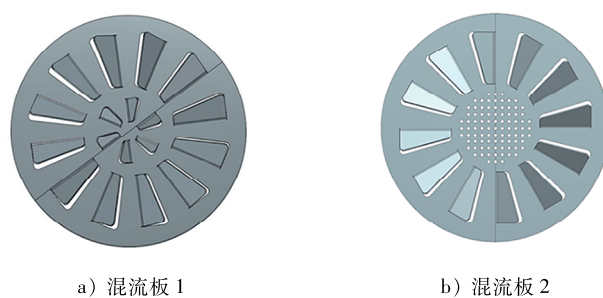


图2 混流板结构

2 仿真分析

为分析流场均匀性,应用 Fluent 软件对混合段进行了三维流场模拟分析,计算网格如图3所示,网格采用局部加密方式:特征线段至少设置4个节点,连结面限定节点最大距离为0.2 mm;节点数为1 084 331,网格单元数为5 123 242。

混合均匀性因数^[15]

$$C_{UI} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (|N_i/\bar{N} - 1| A_i)}{2 \sum_{i=1}^n A_i}, \quad (1)$$

式中: n 为测量单元数; A_i 为第 i 个单元的面积, mm^2 ; N_i 为第 i 个单元的某种参数; $\bar{N}$ 为参数在截面上的平均值。参数包括速度和氨摩尔浓度2种,2种参数的计算方法相同。

基于以上定义,当氨混合均匀、截面中任意方向的氨质量浓度梯度均为0或截面处气体的流速均一致时,均匀性因数最大,为1;当参数 N 集中于一点时均匀性因数最小,为0。

计算工况的排气质量流量、SCR入口排气温度和尿素液喷射质量流量等参数如表2所示,不同工况时基于体积的EGR混合器内气体速度场仿真计算结果如图4~6所示。

表2 计算工况主要参数

工况	排气质量流量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	SCR入口排气温度/ $^{\circ}\text{C}$	尿素液喷射质量流量/($\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	149	350	600.0
2	448	350	1 208.0
3	133	280	244.8

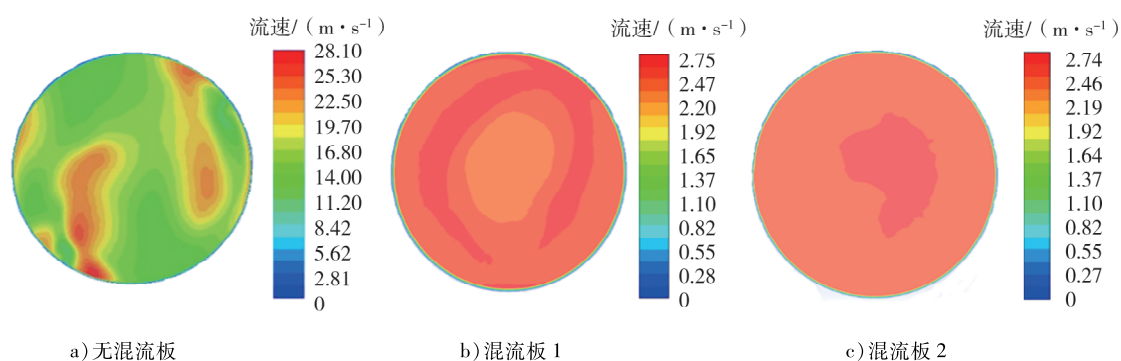


图4 工况1时不同混流板方案的速度场计算结果

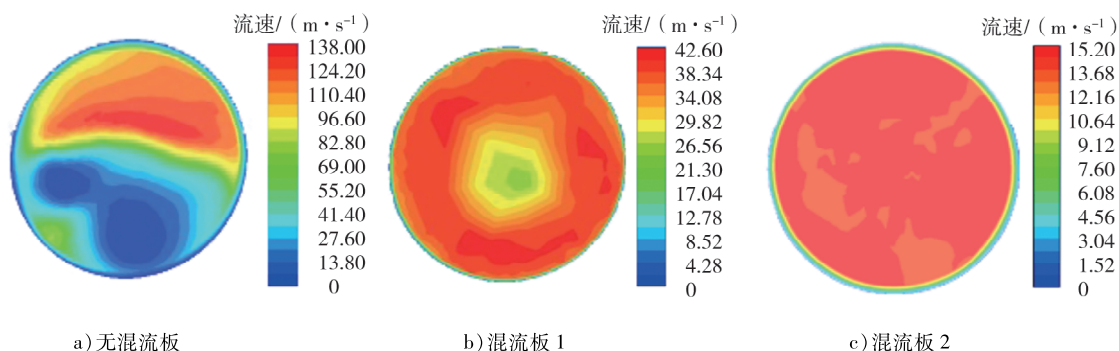


图 5 工况 2 时不同混流板方案的速度场计算结果

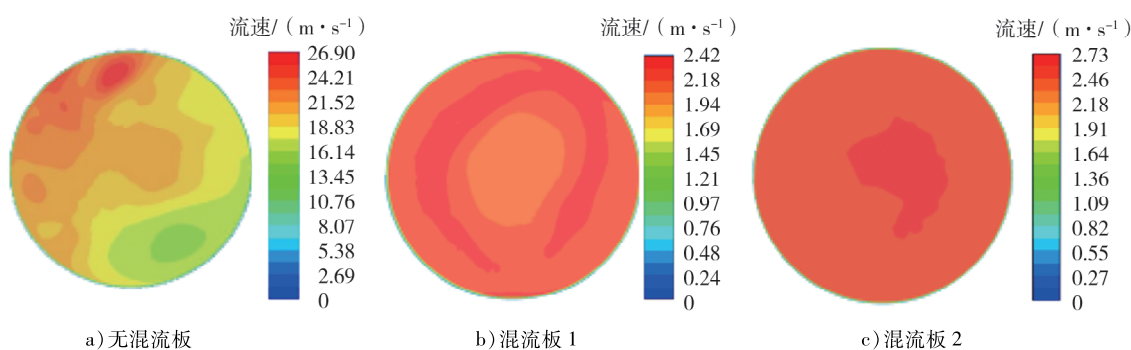


图 6 工况 3 时不同混流板方案的速度场计算结果

由图 4~6 和式(1)可知:1)工况 1 下,无混流板的 EGR 混合器内气体的速度均匀性为 0.945,混流板 1 为 0.965,混流板 2 为 0.991;2)工况 2 下,无混流板的 EGR 混合器内气体的速度均匀性为 0.925,混流板 1 为 0.955,混流板 2 为 0.988;3)工况 3 下,无混流板的 EGR 混合器内气体的速度均匀性为 0.951,混流板 1 为 0.972,混流板 2 为 0.993;4)3 种工况下没有混流板时,EGR 混合器内气体流速均匀性较差,带混流板 2 的流速均匀性最好。

基于体积算法(参与均匀性积分计算的单元是有限元单元格赋值乘以有限元单元格体积)的氨的摩尔分数仿真计算结果如图 7~9 所示。

由图 7~9 及式(1)可知:1)工况 1 下,无混流板的 EGR 混合器内气体中氨均匀性为 0.952,混流板 1 为 0.970,混流板 2 为 0.985;2)工况 2 下,无混流板的 EGR 混合器内气体的氨均匀性为 0.934,混流板 1 为 0.965,混流板 2 为 0.987;3)工况 3 下,无混流板的 EGR 混合器内气体的氨均匀性为 0.964,混流板 1 为 0.982,混流板 2 为 0.990;4)3 种工况下均以带混流板 2 的 EGR 混合器内气体的氨均匀性最好,均不低于 0.985。

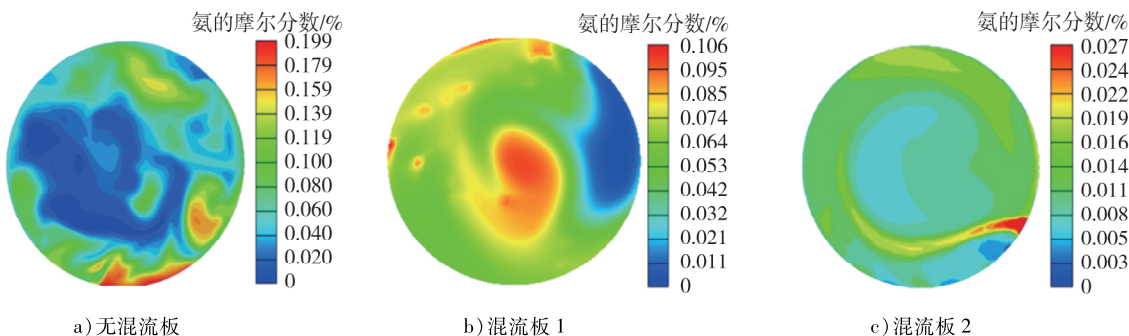


图 7 工况 1 时不同混流板方案的氨均匀性计算结果

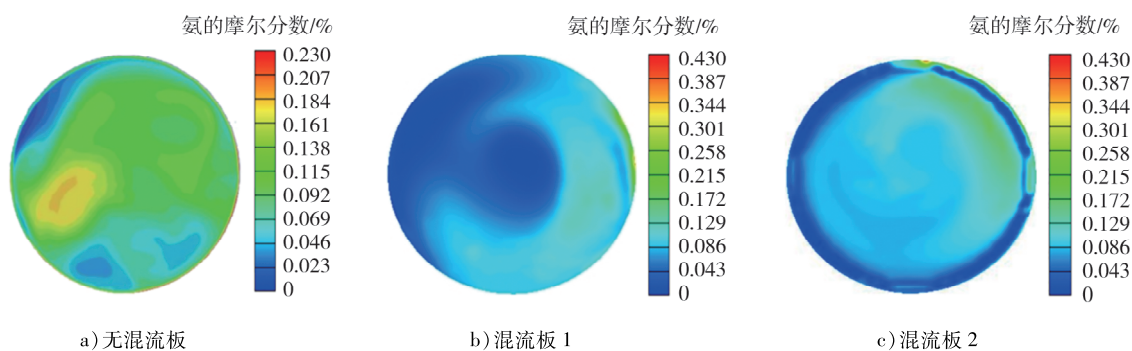


图8 工况2时不同混流板方案的氨的摩尔分数计算结果

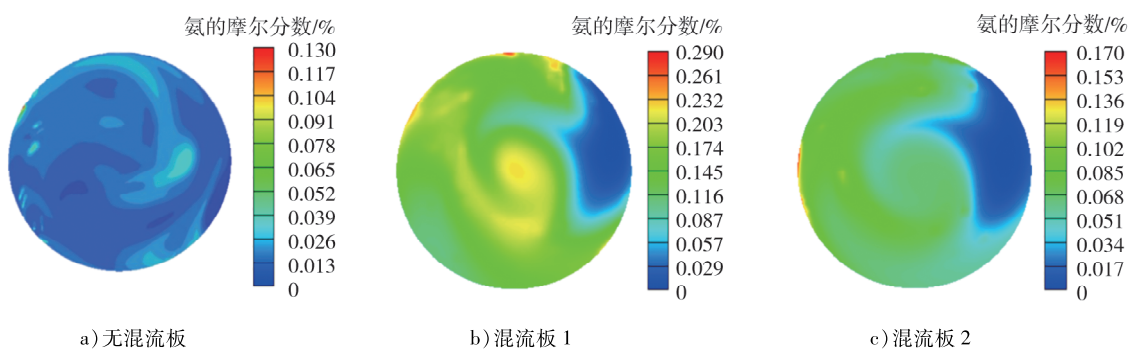


图9 工况3时不同混流板方案的氨的摩尔分数计算结果

3 试验考核

3.1 抗结晶试验

为考核混合段的实际效果,进行发动机台架试验。抗结晶试验工况如表3所示,主要测试设备及型号如表4所示。

表3 抗结晶试验工况

工况	混合腔进口温度/℃	排气质量流量/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	尿素喷射体积流量/($\text{mL} \cdot \text{h}^{-1}$)	时间/h
1	200	302.4	539.4	6
2	230	516.3	1 018.9	6
3	260	675.6	1 618.3	6

表4 主要试验设备及其型号

设备	电力测功机	油耗仪	冷却水系统	空气质量流量计	尿素喷射系统	电子计数器
型号或参数	AVL 2SD3-25	AVL 733S.18	ZL-2M	ABB 14241	洛特福(喷射压力为750 kPa)非气辅泵,喷嘴为K1000-1205580	ACS-20kg

根据发动机后处理系统匹配要求,按照表3中工况,对装配3种混合器的发动机进行抗结晶试验。运行18 h后,测量3种结构混合器的尿素结晶均不超过1.0 g。发动机生产企业要求运行18 h后,后处理器总质量增加小于2 g,符合匹配要求。

发动机台架试验结果表明:不带混流板时后处理器排气阻力为22 kPa;2种带混流板的后处理器排气阻力基本相同,均为24 kPa;与带混流板相比,不带混流板时后处理器的排气阻力小2 kPa。

3.2 均匀性试验

进行均匀性考核尤其是氨均匀性考核时,直接测量催化反应段入口的均匀性费用高、时间长。由于一定的排气成分、温度、流量下,氨氮比相同时,均匀性与 NO_x 转化效率正相关,转化效率越高,均匀性越好。因此,可以在发动机台架上直接测量 NO_x 的转化效率,用转化效率评估均匀性。均匀性试验包括3种工况:排气温度均为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,空速分别为 $20\,000$ 、 $40\,000$ 、 $60\,000\text{ h}^{-1}$ 。空速为 $60\,000\text{ h}^{-1}$ 时3种混合段结构下的 NO_x 转化效率测量结果如图10所示,带混流板2时3种空速下的 NO_x 转化效率如图11所示。

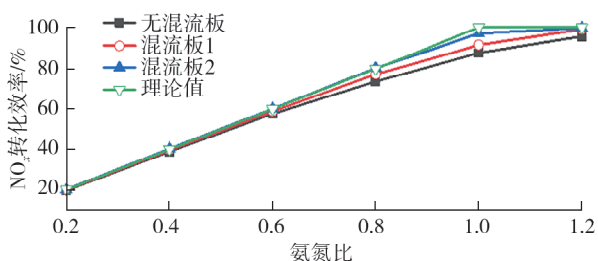


图10 空速为 $60\,000\text{ h}^{-1}$ 时3种结构的 NO_x 转化效率

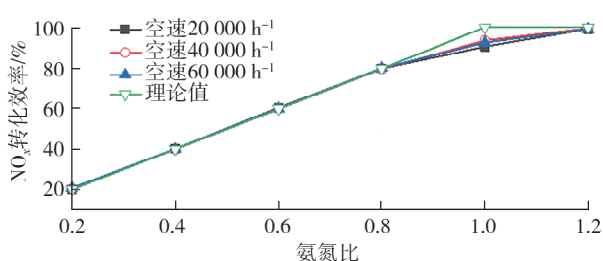


图11 3种空速下混流板2的 NO_x 转化效率

由图10可知: NO_x 转化效率随氨氮比的增加而增大,氨氮比较小时,不同工况下的转化效率差别不大,在氨氮比为1时,3种混合段结构中,无混流板的 NO_x 转化效率最低,带混流板2的转化效率最高,表明带混流板2的混合段均匀性最好,测试结果与模拟计算结果相吻合;随着氨氮比增大, NO_x 的转化效率上升,氨氮比达到化学当量比时,不能保证100%的 NO_x 转化率;氨氮比大于1.0可以提高 NO_x 转化效率。由图11可知:采用混流板2后,氨氮当量比为1.2时,不同空速下 NO_x 转化效率基本相同,均高于99%。

4 结论

- 1)不同氨氮比下, NO_x 的转化效率与SCR混合段的流场均匀性有比较好的一致性,转化效率越高,均匀性越好。
- 2)氨氮比达到化学当量比时不能保证 NO_x 转化效率为100%,氨氮当量比必须超过化学当量比,才能进一步提高转化效率。
- 3)SCR混合段增加混流板可显著提高均匀性,其中网孔板结构的混流板的 NO_x 转化效率优于扇叶结构混流板。

参考文献:

- [1] 国家环境保护总局. 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车排气污染物排放限值及测量方法(中国Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ阶段):GB 17691—2005[S]. 北京:中国环境出版社,2005.
- [2] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境科学出版社,2018.
- [3] 环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)GB 18352.5—2013[S]. 北京:中国环境科学出版社,2013.
- [4] 环境保护部. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段):GB 18352.6—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社,2016.
- [5] ZHANG X G, ROMZEK M, MORGAN C. 3-D Numerical study of mixing characteristics of NH_3 in front of SCR[C]//Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition. Detroit, USA:SAE International,2006:349-361.
- [6] 温苗苗. 尿素选择性催化还原系统的仿真与优化[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [7] 赵彦光,胡静,陈镇,等. 重型柴油机 NO_x 尿素SCR混合器的设计与试验研究[J]. 内燃机工程,2012,33(1):32-37.

- [8]楼狄明,王亚馨,孙瑜泽,等. 氧化型催化剂载体长度对柴油机排放性能的影响[J]. 同济大学学报,2019,47(4): 548-553.
- [9]董志辉,申立中,封其超,等. 基于 OBD II 尿素罐液位传感器故障诊断策略研究[J]. 农业装备与车辆工程,2018,56(5):11-14.
- [10]SEO J. Aftertreatment package design for SCR performance optimization[C]//SAE World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2011
- [11]ALANO E,JEAN E,PERROT Y,et al. Compact SCR for passenger cars[C]//SAE World Congress & Exhibition. Detroit, USA:SAE International,2011
- [12]NEUSSER H J, KAHRSTEDT D I J, DORENKAMP D I R,et al. The Euro 6 engines in the modular diesel engine system of Volkswagen[J]. Mtz Worldwide, 2013, 74(6):4-10.
- [13]MICHELIN J,NAPPEZ P,GUILBAUD F,et al. Advanced close coupled SCR compact mixer architecture[C]//SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit,USA:SAE International, 2015.
- [14]吴鑫. 车用柴油机非气助 SCR 系统喷雾混合过程研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
- [15]叶碧阳. 车用 SCR 系统氨存储与非气助喷雾混合特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2019.

Structural optimization of SCR mixer for vehicle diesel engine

FANG Jinzhao¹, LIU Huimeng², GAO Chao¹, DONG Xin¹, ZHANG Xuanguo¹, LI Guangyi¹

1. Technical Center, Wanxiang Tongda Co.,Ltd., Wuhan 430056, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

Abstract: In order to meet the NO_x conversion efficiency requirements of China VI emission regulations, the structural optimization design of SCR mixing section of a vehicle diesel engine is carried out. The 3D flow field characteristics in the mixing section of different structures is simulated and analyzed, focusing on the comparison of the velocity uniformity and ammonia uniformity of the flow field. The engine bench test is carried out, and the deposition mass and NO_x conversion efficiency are tested according to the working conditions required by the emission regulation of China VI vehicle diesel engine emission standards. The results show that adding a mixing plate in the SCR mixing section can significantly improve the velocity uniformity of the gas flow field and the ammonia uniformity. After optimization, the urea crystal of the SCR mixing section structure with the mixing plate 2 is no more than 1.0 g, the uniformity of ammonia is more than 0.985, and the NO_x removal efficiency exceeded 99% when the NH_3/NO_x molar equivalent ratio is 1.2. The optimized SCR mixing section structure with mixed flow plate 2 can meet the requirements of emission control.

Keywords: vehicle diesel engine; emission aftertreatment; SCR; mixing section structure; structural optimization

(责任编辑:刘丽君)