

# 利用STAR-CD对重型柴油机SCR系统进行布置优化

## Configuration Optimization of the SCR System for a Heavy Duty Diesel Engine Using STAR-CD

余皎

(潍柴动力技术中心)

**摘 要:** 尿素选择性催化还原系统 (SCR) 是未来降低重型柴油机的 NO<sub>x</sub> 排放的一种有效方式, SCR 系统在高催化效率下的正常运行是满足排放法规的关键因素, 在 SCR 系统设计中, 需要优化布置 SCR 载体入口前排气混和管的结构及尿素喷射装置的喷射位置和喷射角度等。利用计算流体力学软件 STAR-CD 来模拟混和管中尿素水溶液的喷雾情况, 对不同排气温度和排气流量下液滴的运动, 水溶液蒸发后水蒸气的浓度分布进行了计算, 优化排气管道形状以及优化喷射位置和喷射角度, 从而避免尿素水溶液撞壁出现沉积, 堵塞管路。同时对 SCR 载体内的流动性能进行计算, 保证排气在载体入口的速度、发应物浓度分布均匀, 实现高的催化效率。

**关键词:** 柴油机; STAR-CD; SCR; 混和管; 优化设计

**Abstract** The selective catalytic reduction (SCR) based on urea water- solution is an effective technique to reduce NO<sub>x</sub> emitted from diesel engines. However, there are two issues have to be resolved to ensure high NO<sub>x</sub> conversion efficiency with SCR. The first one is to have a uniform distribution on both the exhaust velocity and the ammonia concentration at the entrance of the SCR catalyst. And the second one is to minimize the urea deposition on the exhaust pipe wall caused by urea water impingement. Besides, the pressure loss across the catalyst is a practical concern/issue for feasibility that has to be addressed. In this paper, CFD code STAR-CD is applied to simulate the flow field inside the exhaust pipe. There are few physical models employed to account for the injection of the urea spray, which includes atomization, droplet breakup, droplet evaporation, liquid film formation and turbulent mixing. The SCR catalyst substrates and the perforated pipes used for this study are accounted for by a porous media model. The mixing is characterized by two parameters, velocity uniform index and the mass flux. And the objective of this study is to propose an optimized SCR system for a heavy duty engine.

**Key words:** Diesel engine, SCR System, Optimization, STAR-CD

## 1 简介

20 世纪 90 年代以来, 世界各国对发动机排放法规的不断严格, 大大推动了发动机技术的发展。我国 2008 年 7 月 1 日将要实施国 排放法规, 按照 GB17691-2005 的要求, 2010 年 1 月 1 日将要实施国 排放法规。在激烈的市场竞争中, 一些主要生产厂多已做好国 发动机的生产准备, 并已开始考虑国 发动机的改造或研制。国内的几家大型柴油机厂家大都选择采用利用机内净化降低碳烟然后利用 SCR 系统来降低 NO<sub>x</sub> 排放的方法来满足国 排放法规对碳烟和 NO<sub>x</sub> 的限制。



SCR 系统的基本工作原理：排气从涡轮出来后，进入排气混和管，在混和管上安装有尿素计量喷射装置，喷入尿素水溶液，尿素在高温下发生水解和热解反应后生成氨，在 SCR 系统催化剂表面利用氨还原  $\text{NO}_x$ ，排出  $\text{N}_2$ ，多余的氨也被还原为  $\text{N}_2$  防止氨泄漏。一般情况下，消耗 100L 燃油的同时会消耗 5L 液体尿素水溶液，尿素的分子式： $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ，在 SCR 中发生的化学反应<sup>[1-2]</sup>

尿素水解： $(\text{NH}_2)_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{CO}_2$

$\text{NO}_x$  还原： $\text{NO} + \text{NO}_2 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{N}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$

氨气氧化： $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

SCR 系统包括尿素水溶液储罐，输送装置，计量装置，喷射装置，催化器以及温度和排气传感器等。图 1 为 SCR 系统原理图。

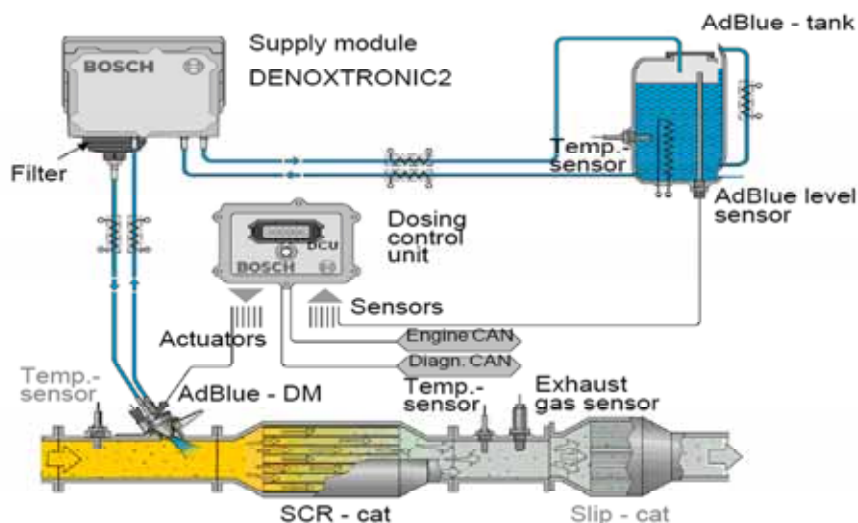


图 1 SCR 系统原理图

在 SCR 系统中发生复杂的物理和化学反应，其中包括尿素水溶液的喷射，雾化，蒸发以及尿素的水解和热解气相化学反应和  $\text{NO}_x$  在催化剂表面与氨气发生的催化表面化学反应<sup>[5-6]</sup>，利用数值模拟研究这些过程可以优化混合管路的设计，尿素喷射装置的布置以优化 SCR 系统的布置，从而预测催化效率，减少试验成本。

本文是针对一重型国 柴油机的开发过程中，利用 CFD 工具对管道的几何形状，尿素喷射装置的位置，喷射角度进行优化设计，从而保证在混和管路不出现粒子撞壁后的结晶，以及对 SCR 载体入口速度均匀性和整个载体的压力损失情况进行计算分析，保证载体入口速度分布均匀及整个系统较小的压力损失。

## 2 计算物理模型及边界条件

整个系统的网格特点和边界条件位置见图 2，其中管路采用六面体和 O-grid 网格，SCR 载体内部采用四面体网格，SCR 系统中的载体和插孔管利用多孔介质来模拟。

尿素水溶液喷雾模拟是一个复杂的过程，其中包括液滴的雾化，破碎，蒸发，液滴与气体能量动量交换，粒子撞壁过程，液膜形成等。一般采用 DDM 方法来描述离散液滴分布，它不考虑全部液滴，而只处理其中若干具有代表性的样本。每个样本都代表一定数目的大小和状态都完全相同的液滴。用拉格朗日方法跟踪这些液滴样本的运动，即求解描述其运动轨迹和传热传质过程的一组微分方程。Reitz/Diwakar 的破碎模型用来模拟破碎过程。尿素水溶液的特性我们按照 SAE 上提供的物理特性来设置<sup>[4]</sup>。本次计算没有考虑尿素水溶液的水解，热解等化学反应特性，以水蒸气的分布来代



图 3 在某一位置不同的喷射方向



### 3.1 位置 1 优化后粒子轨迹

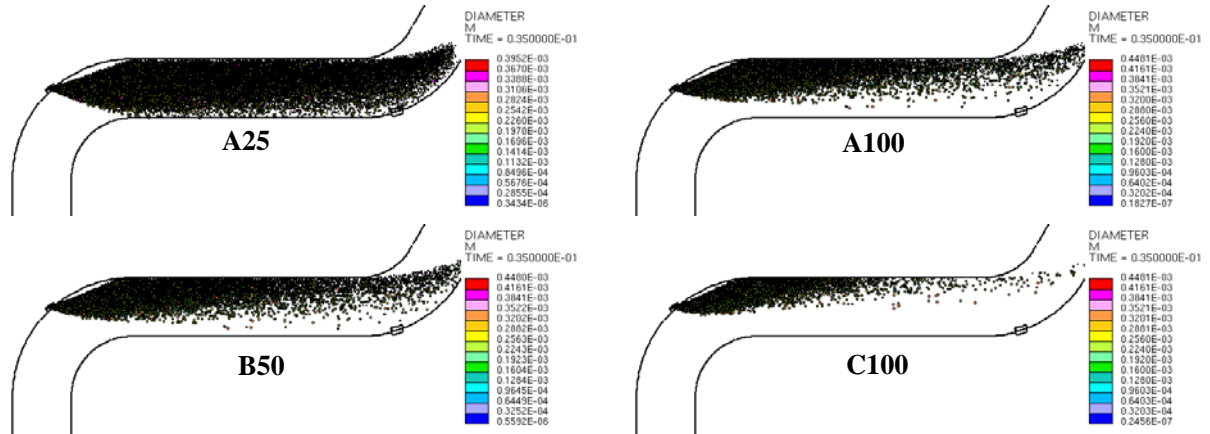


图 4 水平方向喷射粒子运动轨迹

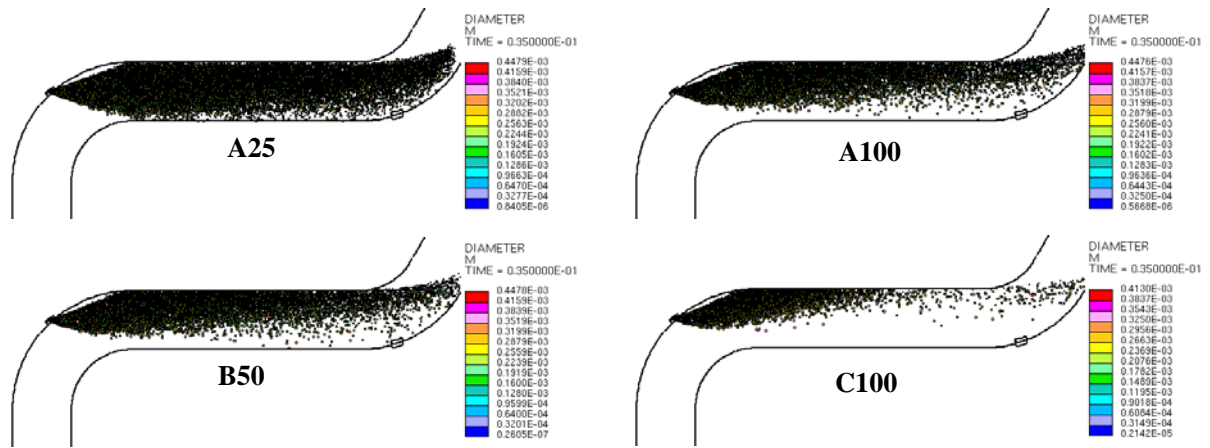


图 5 向下偏 5 度方向喷射粒子运动轨迹

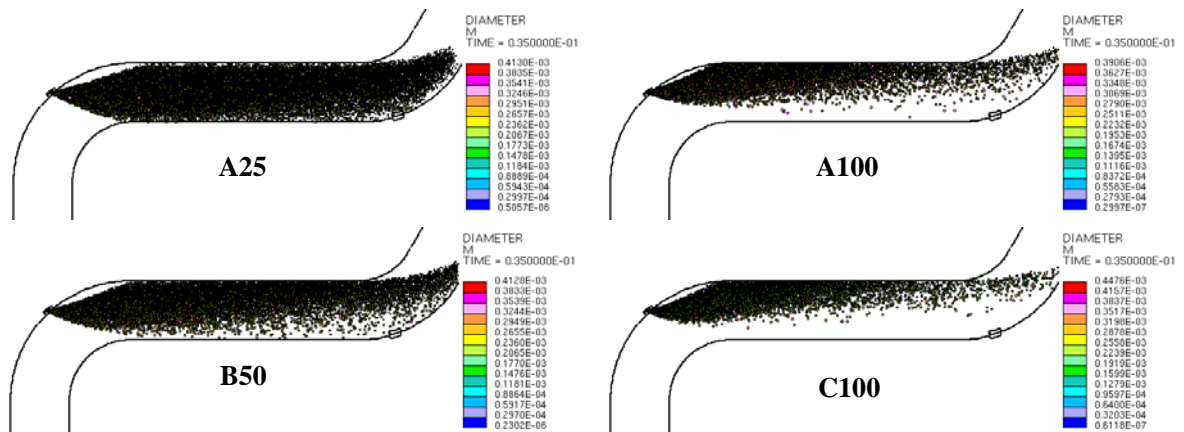


图 6 向下偏 10 度方向喷射粒子运动轨迹



### 3.2 位置 2 优化后粒子轨迹

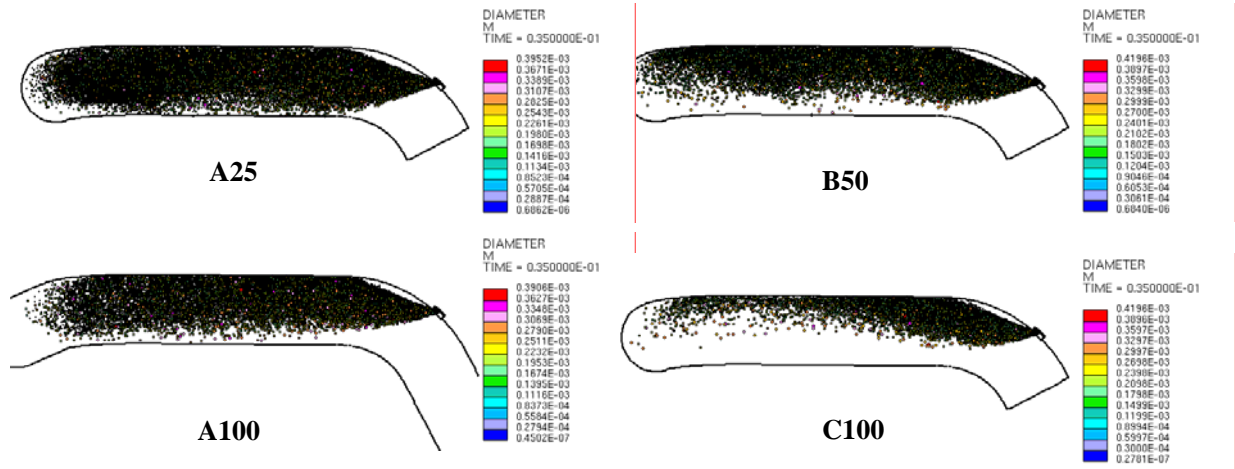


图 7 向下偏 5 度方向喷射粒子运动轨迹

不同位置不同试验工况下优化后的粒子轨迹见图 4 到图 7，计算表明在低负荷时，粒子轨迹受排气流的影响较小，粒子沿着喷射方向运动，与壁面碰撞的粒子数目少，但是在高负荷下，粒子受排气流的影响较大，粒子被吹向管道的一侧，容易在壁面形成液膜，由于在喷射的粒子中，粒子大小不一，体积较小的粒子最容易被吹偏。

出现结晶主要出现在小负荷的情况下，此时排气流量速度低，对粒子的运动轨迹影响小，如果安装角度偏差，粒子就会与管道壁面碰撞，出现结晶现象。而对于大负荷，虽然气流对粒子轨迹影响大，尤其是小直径的粒子，但是由于排气温度高，粒子溶液蒸发，就是碰撞道管道壁面，也会很快蒸发，而不会结晶。

高温管道壁面对粒子起到加速蒸发的过程。但是如果粒子沉积后降低了壁面温度，则壁面对粒子起到冷却的作用，更容易发生沉积结晶现象。

### 3.4 载体入口的速度均匀性及压力分布

催化载体入口的速度分布是否均匀直接影响催化剂的催化转化效率。流速不均匀会在载体中心区域产生过高的气流速度和温度，加剧催化剂的劣化速度，缩短其使用寿命。另外，流速分布不均匀还会导致载体径向温度梯度过大，产生较大的热应力梯度，产生热疲劳破坏。通常利用速度均匀性系数来评价入口的速度是否均匀。速度均匀系数由下面的公式计算<sup>[7]</sup>：

$$\gamma = 1 - \frac{u'}{2\bar{u}} = 1 - \frac{\sum A_i \sqrt{(u_i - \bar{u})^2}}{2 \sum A_i u_i} = 1 - \frac{\sum A_i \sqrt{(u_i - \bar{u})^2}}{2 A \bar{u}} \quad (1)$$

速度脉动定义：

$$u' = \sum \frac{A_i}{A} \sqrt{(u_i - \bar{u})^2} \quad (2)$$

通过以上公式计算得到的速度均匀系数越大，入口的速度越均匀，数值越小，速度分布越不均匀。通常需要速度均匀系数在 0.8 以上。图 8 为流过不同载体的气体流量分配，图 9 为速度均匀系数。



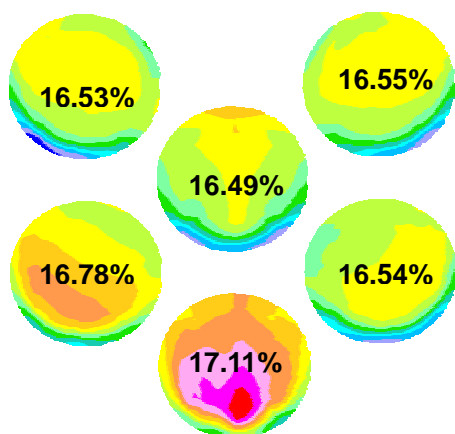


图8 质量流量百分比

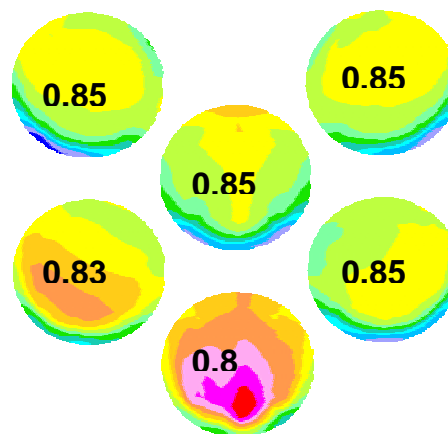


图9 速度均匀性系数

#### 4 结论

1. SCR系统混和管内要避免喷雾粒子在壁面结晶，混和管的几何形状和喷射位置对载体入口速度均匀性影响较大；喷射位置和安装角度对粒子轨迹影响较大，通过优化混合管路形状和喷射装置位置和喷射角度可以减小粒子与壁面碰撞，防止尿素在管路壁面结晶，从而堵塞管路。
2. 不同的工况下，由于排气温度和速度差别很大，在排气速度高和温度高的工况，粒子的轨迹都被吹向一侧，在在排气速度低和温度低的工况，粒子轨迹受气体影响不大，此时安装角度比较敏感，很容易由于安装角度的误差而导致粒子穿过气流，在管壁对面结晶。由于在高转速和高负荷时，排气温度较高，喷射粒子很快气化，不容易在壁面结晶，因此优化的工况主要是低转速和低负荷的情况。
3. 通过各个载体的气体流量基本相等，避免了局部过热和流速过高的情况，保证了载体的运行环境。

#### 参考文献

- [1] Johann C.Wurzenberger.Multi-scale SCR modeling,1D kinetic analysis and 3D system simulation,SAE paper 2005-01-0948,2005
- [2] Felix Birkhold, Ulrich Meingast, Peter Wassermann, et al. Analysis of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-Systems: modeling of two-phase flow and spray/wall-interaction, SAE paper 2006-01-0643, 2006
- [3] William R.Miller,John T.Klein.The development of Urea-SCR technology for US heavy duty trucks,SAE paper 2000-01-0190,2000
- [4] Lifeng Xu, William Watkins,etc.Laboratory and Engine Study of Urea-Related Deposits in Diesel Urea-SCR After-Treatment Systems.SAE paper2007-01-1582
- [5] Ming Chen,Shazam Williams.Modeling and optimization of SCR-Exhaust aftertreatment systems. SAE paper 2005-01-0968 , 2005
- [6] Reggie Zhan. Diesel Emission System Integration-SCR. Seminar of Vehicle Emission Control And Diesel Engine Aftertreatment Technologies. 2007.10
- [7] Herman Weltens, Harald Bressler, etc. Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction, SAE paper 930780