

双 SCR 系统中紧耦合 SCR 尿素结晶预测及应用

周海磊^{1,2}, 吕志华^{1,2}, 耿磊^{1,2*}, 王明达³

1. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061; 2. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061;

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘要:为匹配双级选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)装置中前级 SCR 混合器的设计要求, 基于 Fluent 平台, 根据化学动力学模型搭建 SCR 尿素结晶预测模型, 预测尿素结晶的质量、位置和成分, 通过发动机台架结晶试验验证模型的准确性, 重新设计前级 SCR 混合器并评估其性能。结果表明:低、中、高温工况尿素结晶质量的仿真准确度分别为 76%、79%、78%;仿真的结晶位置与试验结晶位置吻合度较好, 且结晶位置受排气温度和排气流量的影响;不同温度下的结晶成分与已有相关研究基本吻合;新设计混合器的各项性能指标均优于现有产品, 其中抗结晶能力提高约 68%;氨均匀性、速度均匀性与背压正相关, 氨均匀性与抗结晶能力负相关。

关键词:柴油机后处理系统;紧耦合混合器;SCR 结晶预测模型;Fluent

中图分类号:TK421.5

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)04-0034-11

引用格式:周海磊, 吕志华, 耿磊, 等. 双 SCR 系统中紧耦合 SCR 尿素结晶预测及应用[J]. 内燃机与动力装置, 2025, 42(4): 34-44.

ZHOU Hailei, LÜ Zhihua, GENG Lei, et al. Prediction and application of urea deposition in close-coupled dual SCR system[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(4): 34-44.

0 引言

随着我国双碳战略的深入推进, 柴油机国六排放标准已于 2023 年全面实施。正在制订中的柴油机国七排放标准将对污染物排放提出更严格要求, 其中 NO_x 排放限值将大幅降低。选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)技术是降低柴油车 NO_x 排放的主流措施, 其技术迭代将成为排放达标的关键。面对国七标准的技术挑战, 双 SCR 系统被认为下一代排放控制系统的关键技术路径之一。

尿素选择性催化还原(Urea-SCR)技术具有安全性高、结构简单、成本低等优点, 广泛应用于商用车领域^[1]。但是, 尿素水解反应需在为温度 160~500 °C 的环境下进行, 排气温度低于 160 °C 时, 未完全分解的尿素溶液因相变在排气管壁、喷嘴及混合器表面结晶沉积, 进而造成后处理系统背压升高、排气不畅、油耗增加, 以及车载自动诊断系统对下游 NO_x 的误判。尿素的化学和物理特性导致其结晶沉积不可避免, 尿素结晶沉积问题已成为目前柴油机后处理系统研究的难题之一。

SCR 混合器结构是影响尿素结晶沉积质量与位置的重要因素。在混合器设计方面:袁志玲等^[2]研究了混合器结构对下游 NO_x 测量准确度的影响, 胡广地等^[3]研究了混合器结构对压降、速度均匀性、 NH_3 混合均匀性的影响;但上述研究未涉及混合器结构对结晶位置的影响。在结晶预测方面:李江飞等^[4]建立了计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)仿真模型, 计算尿素轨迹和尿素碰壁位置, 对混

收稿日期: 2025-04-30

基金项目:泰山产业领军人才工程资助项目(高热效率柴油机关键技术研究)

第一作者简介:周海磊(1982—), 男, 山东潍坊人, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为柴油机排放控制, E-mail: zhouhl@weichai.com。

* 通信作者简介:耿磊(1986—), 男, 山东滕州人, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为柴油机排放控制, E-mail: gengl@weichai.com。

合器尿素结晶位置进行了预测,并通过试验验证了 CFD 分析的准确性;黄豪中等^[5]建立了柴油机后处理系统三维模型,计算尿素水溶液的蒸发和热解产物的形成过程,并利用结晶分布、SCR 入口均匀性等指标评价两个不同结构混合器的性能;但上述研究未涉及尿素质量计算。

本文中,基于 Birkhold 尿素热分解化学动力学模型^[6],结合文献[7]的尿素结晶建模研究,通过 Fluent 计算尿素沉积的质量和位置,建立混合器结晶评估指标体系,完善混合器结构设计流程,为 SCR 开发设计提供参考。

1 尿素结晶计算模型

在 Fluent 中定义尿素结晶化学反应模型,计算液膜质量、液膜质量传递速率及结晶起始温度。通过离线计算获取结晶质量随时间变化的过程数据,并将数据导入 Fluent 进行结晶过程仿真计算。

1.1 尿素蒸发分解模型

冯鹏飞^[8]、Kim 等^[9]通过试验验证了 Muti-compoent 模型对尿素喷雾蒸发预测的准确性。本文中基于该模型进行尿素水溶液的物理蒸发计算。

1.2 尿素热分解化学反应动力学模型

当尿素水溶液喷入排气管中时,因水的蒸发速率远大于尿素蒸发速率,尿素水溶液中尿素浓度越来越高,当达到一定浓度时尿素开始分解^[10]。

尿素热分解有蒸发法^[11]和直接热解法两种,Abu-Ramadan 等^[12]通过对比试验,发现蒸发法可更真实描述尿素热分解的过程。

SCR 系统中的尿素结晶的主要产物是固体尿素,同时含有缩二脲、三聚氰酸和三聚氰酸-酰胺等尿素分解副产物。本文中基于蒸发法和 Birkhold 模型^[6]搭建尿素热分解化学动力学模型,使用 FTIR-TGA 气体分析仪及 HPLC 高效液相色谱仪确定尿素结晶主要成分的反应速率、反应路径,热重分析结果验证了化学动力学参数具有良好吻合性。但 Birkhold 模型未考虑水的质量分数对尿素热分解的影响,也未考虑强烈的液膜动力学对尿素结晶沉积的阻碍作用。相关研究表明:当尿素质量分数大于 15%时,尿素开始分解;同时,仅考虑液膜流速低于 10 mm/s 的情形,能准确预测尿素结晶现象^[13]。

尿素热分解化学反应动力学模型如表 1 所示,表中:S 表示固体,M 表示熔融,L 表示液体,MA 表示固体基体;UREA-M 表示 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (尿素),CYA-S 表示 $\text{C}_3\text{N}_3(\text{OH})_3\text{NH}_2$ (三聚氰酸),BIURET 表示 $\text{C}_2\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_2$ (缩二脲),AMMELIDE-S 表示 $\text{C}_6\text{H}_9\text{N}_{11}\text{O}$ (三聚氰酸-酰胺),TRIURET-S 表示 $\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_4\text{O}_3$ (缩三脲);A 为化学反应前因子, E_A 为化学反应活化能。

表 1 尿素热分解化学反应动力学模型

序号	化学反应	A	$E_A/(\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1})$
1	$\text{CYA-S} \longrightarrow \text{HNCO} + \text{HNCO} + \text{HNCO}$	$1.001 \times 10^3 \text{ mol/s}$	118.42
2	$\text{BIURET-M} \longrightarrow \text{UREA-M} + \text{HNCO-L}$	$1.107 \times 10^{20} \text{ L/s}$	208.23
3	$\text{UREA-M} + \text{HNCO-L} \longrightarrow \text{BIURET-M}$	$3.517 \times 10^{11} \text{ mL}/(\text{mol}\cdot\text{s})$	75.45
4	$\text{UREA-M} \longrightarrow \text{HNCO-L} + \text{NH}_3$	$2.000 \times 10^{11} \text{ mol}^{0.7}/(\text{mL}^{0.7}\cdot\text{s})$	74.00
5	$2\text{BIURET-M} \longrightarrow \text{AMMELIDE-S} + \text{HNCO-L} + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$	$3.637 \times 10^{26} \text{ L/s}$	257.76
6	$\text{BIURET-M} + \text{HNCO-L} \longrightarrow \text{CYA-S} + \text{NH}_3$	$9.397 \times 10^{20} \text{ mL}/(\text{mol}\cdot\text{s})$	158.68
7	$\text{BIURET-M} + \text{HNCO-L} \longrightarrow \text{TRIURET-S}$	$1.091 \times 10^{15} \text{ mL}/(\text{mol}\cdot\text{s})$	116.97
8	$\text{TRIURET-S} \longrightarrow \text{CYA-S} + \text{NH}_3$	$1.238 \times 10^{18} \text{ L/s}$	194.94
9	$\text{UREA-M} + 2\text{HNCO-L} \longrightarrow \text{AMMELIDE-S} + \text{H}_2\text{O}$	$1.274 \times 10^{20} \text{ mL}^2/(\text{mol}\cdot\text{s})^2$	110.40
10	$\text{BIURET-M} \longrightarrow \text{BIURET-MA}$	$8.193 \times 10^{26} \text{ L/s}$	271.50
11	$\text{BIURET-MA} \longrightarrow \text{BIURET-M}$	$3.162 \times 10^9 \text{ L/s}$	122.00

表 1 (续)

序号	化学反应	A	$E_A/(kJ \cdot mol^{-1})$
12	$BIURET-MA \longrightarrow HNCO + HNCO + NH_3$	$5.264 \times 10^{24} \text{ L/s}$	266.38
13	$AMMELIDE-S \longrightarrow AMMELIDE$	$1.000 \times 10^{15} (T \cdot L)/s$	160.00
14	$HNCO-L \longrightarrow HNCO$	$1.000 \times 10^{14} \text{ mL}/(mol \cdot s)$	201.67

在 Fluent 中,为计算结晶中各种成分的质量,需为每种成分定义用户自定义标量并设置其传输方程。结晶成分自定义名称如表 2 所示。

表 2 结晶成分自定义名称

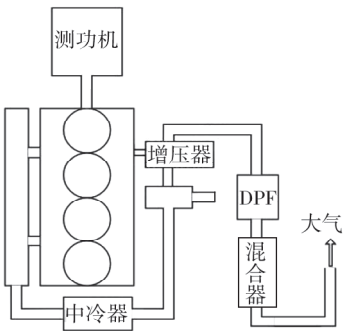
自定义名称	成分	自定义名称	成分
User Memory 1	CYA-S	User Memory 8	H ₂ O
User Memory 2	HNCO	User Memory 9	TRIURET-S
User Memory 3	BIURET-M	User Memory 10	BIURET-MA
User Memory 4	UREA-M	User Memory 11	AMMELIDE
User Memory 5	HNCO-L	User Memory 12	UREA-S
User Memory 6	NH ₃	User Memory 13	所有固体沉积物 (User Memory 1-3-7-9-10-12)
User Memory 7	AMMELIDE-S		

2 SCR 尿素结晶试验装置、工况及方法

为模拟预测前级 SCR 混合器抗结晶能力,对 SCR 尿素结晶沉积预测模型进行验证,确保柴油后处理系统结晶预测的适用性与准确性。

2.1 试验装置

结晶试验台架总体安装示意图与实物如图 1 所示。增压中冷 6 缸柴油机的主要参数如表 3 所示。



a) 台架安装示意图



b) 实物

图 1 台架安装示意图及实物

表 3 柴油机主要技术参数

总排量/L	额定功率/kW	怠速/(r·min ⁻¹)
12.54	405	600
额定转速/(r·min ⁻¹)		最大扭矩/(N·m)
1 900		2 500

试验用颗粒捕集器布置在涡轮后端,试验用喷嘴为某公司 DeNOx2.2 六孔喷嘴,试验用混合器如图 2 所示,图中 1~4 为 4 个叶片。

2.2 试验工况

结晶的形成与排气温度、排气流量、尿素喷射量、混合器结构密切相关。在排量为 13 L 的柴油机万有工况中筛选出结晶风险最高的 3 个工况点。

排气温度过低时,尿素不能水解,排气温度过高时大部分结晶完全分解,因此选择低温、中温、高温 3 个具有代表性的工况温度。低排气流量

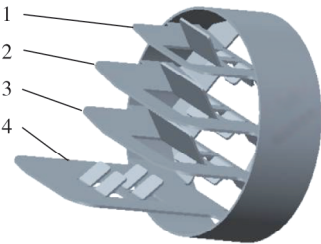


图 2 试验用混合器

的结晶风险高于高排气流量,因此选择柴油机万有工况的中、低排气流量。文献[14]瞬态测试循环要求平均氨氮质量比为 1.05~1.20,氨氮比高则结晶风险高,因此氨氮比选择 1.20^[15]。最终确定的试验工况如表 4 所示。各工况参数为 Fluent 计算边界条件。

表 4 发动机试验工况

工况	排温/℃	排气质量流量/(kg·h ⁻¹)	尿素喷射质量流量/(mg·s ⁻¹)	氨氮比
1	230	599	416	1.20
2	310	600	793	1.20
3	410	820	1 592	1.20

2.3 试验方法

1) 每次结晶试验前,清理结晶,时间为 3 min,确保试验开始前混合器中无结晶。

2) 进行结晶试验,时间为 1 h,记录试验数据。

3) 试验后,称量混合器中结晶的质量,电子秤精度为±0.01 g。

4) 在排气管外壁面粘贴 K 型温度传感器,测量并记录试验 1 h 后排气管壁面温度。外壁面温度采集点位置如图 3 所示。

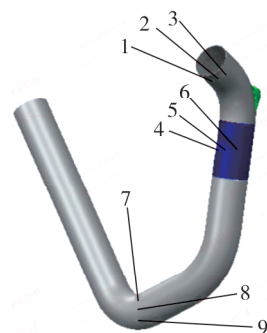


图 3 外壁面温度采集点位置

3 SCR 尿素结晶计算

3.1 排气管 3D 模型

建立图 2b) 所示排气管的 3D 几何模型,如图 4 所示。采用 ICEM 软件进行网格划分^[16]。

3.2 喷嘴参数

尿素喷嘴为锥形,尿素粒径分布选择 Rosin-Rammler 模型,极大粒径为 0.260 mm,极小粒径为 0.010 mm,平均粒径为 0.068 mm。喷嘴参数来自喷嘴制造商提供的测试报告。

3.3 工况 1(低温区间)结晶计算结果

3.3.1 结晶质量

经仿真计算,工况 1 混合器中固态结晶质量为 5.8 g,其中:UREA-M 质量为 5.4 g,CYA-S 质量为 0.2 g,BIURET-M 质量为 0.2 g。工况 1 结晶的主要成分为 UREA-M,占总结晶质量的 93%。

3.3.2 结晶位置

工况 1 混合器背面和弯管处仿真与试验结晶位置如图 5 所示。由图 5 可知:仿真与试验结晶位置基本吻合,结晶主要分布在叶片背面,叶片 1~4 的背面均存在结晶。主要原因为:背面位置的气流运动中存在气流扰流减速现象,气流减小导致尿素逐渐积累并形成结晶沉积。SCR 混合器气流速度矢量图如图 6 所示。



图 4 排气管几何模型

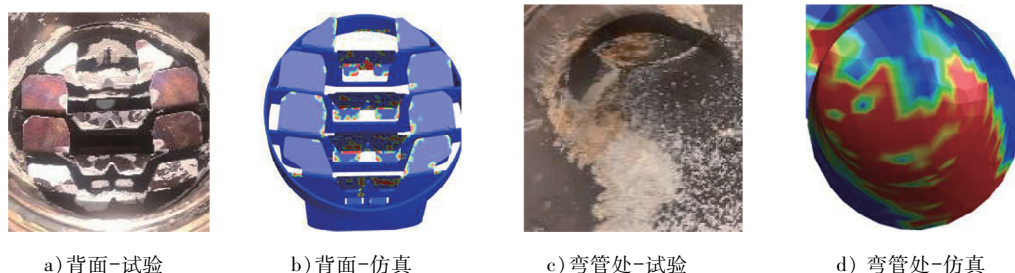


图 5 工况 1 混合器背面和弯管处仿真与试验结晶位置

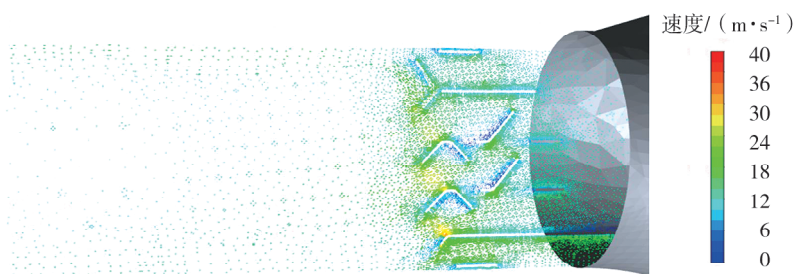


图 6 SCR 混合器气流速度矢量图

3.3.3 成分分布

工况 1 下, 3 种结晶成分分布如图 7 所示。由图 7 可知: UREA-M 分布面积较大, CYA-S 与 BIURET-M 分布区域基本相同。

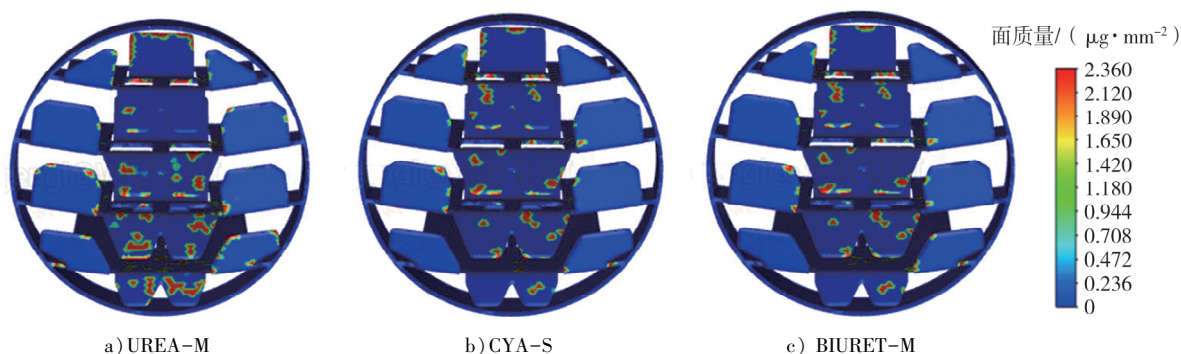


图 7 工况 1 结晶成分及其分布

3.4 工况 2(中温区间) 结晶计算结果

3.4.1 结晶质量

经仿真计算, 工况 2 混合器中固态结晶质量为 8.11 g, 其中: CYA-S 质量为 3.30 g, BIURET-M 质量为 2.39 g, AMMELIDE-S 质量为 1.55 g, UREA-S 质量为 0.60 g, TRIURET-S 质量为 0.27 g, BIURET-MA 质量为 0.09 g。工况 2 的主要结晶成分为 CYA-S、BIURET-M、AMMELIDE-S, 三者质量之和占总结晶质量的 89%。

3.4.2 结晶位置

工况 2 混合器背面和弯管处仿真与试验结晶位置如图 8 所示。由图 8 可知: 叶片 2~4 背面及叶片 4 顶部管壁的仿真结晶位置与试验吻合较好; 叶片 1 仿真结晶位于叶片背面中心, 结晶面积比试验结果稍小; 工况 2 仿真预测的结晶位置与试验结果基本相同。

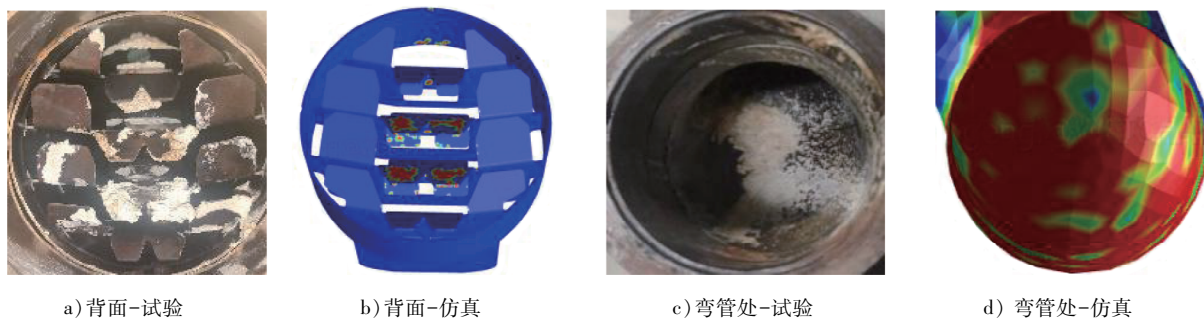


图 8 工况 2 混合器背面和弯管处仿真与试验结晶位置

3.4.3 成分分布

工况 2 混合器结晶成分及其分布如图 9 所示。由图 9 可知, 工况 2 主要结晶区域位于叶片 2、3 背面。

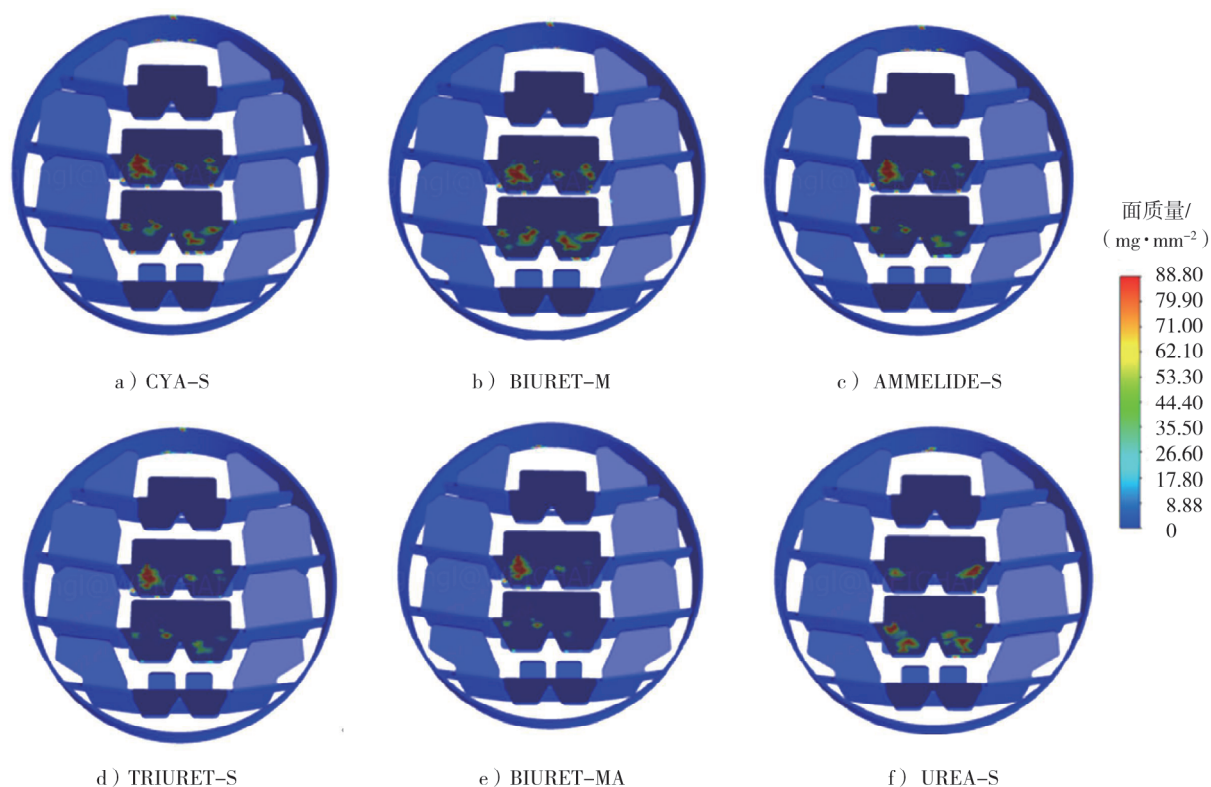


图9 工况2 结晶成分及其分布

3.5 工况3(高温区间)结晶计算结果

3.5.1 结晶质量

经仿真计算,工况3混合器中固态结晶质量为8.81 g,其中:CYA-S质量为3.70 g,AMMELIDE-S质量为4.80 g, BIURET-M质量为0.20 g, UREA-S质量为0.06 g, BIURET-MA质量为0.04 g, TRIURET-S质量为0.01 g。工况3主要的结晶成分为CYA-S、AMMELIDE-S,两者质量之和占总结晶质量的96%。

3.5.2 结晶位置

工况3混合器背面和弯管处仿真与试验结晶位置如图10所示。由图10可知:仿真分析的喷嘴附近管壁、叶片1附近管壁及背面的结晶位置与试验吻合较好;叶片2背面仿真结晶位置在试验中未能准确印证。工况3仿真预测的大部分结晶位置与试验结果相同。

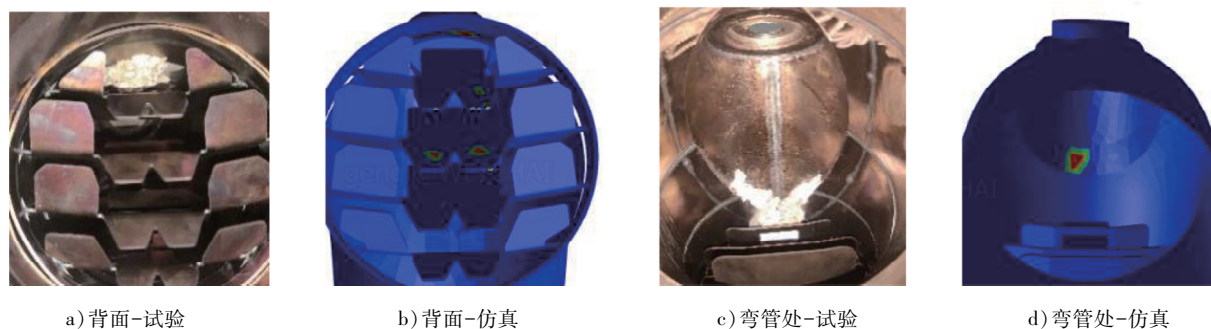


图10 工况3 混合器背面和弯管处仿真与试验结晶位置

3.5.3 成分分布

工况3结晶成分分布如图11所示。由图11可知:工况3主要结晶成分集中位于叶片1、2背面,以及叶片1附近管壁位置。

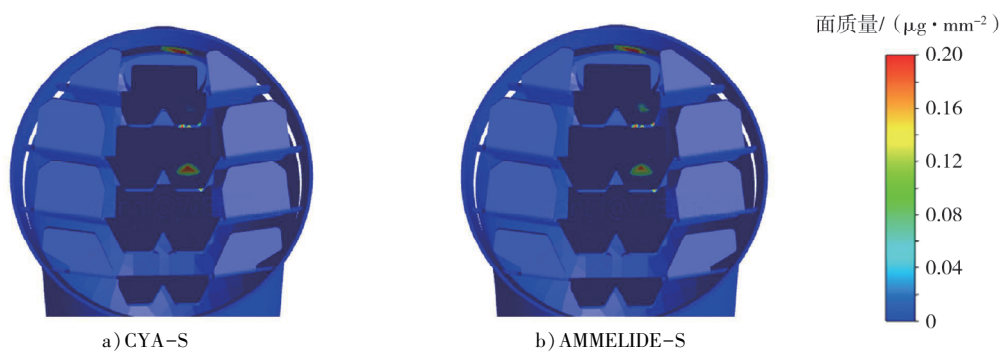


图 11 工况 3 结晶成分及其分布

4 结果分析

4.1 结晶质量分析

工况 1、2、3 下, 仿真分析的结晶质量分别为 5.80、8.11、8.81 g, 台架试验得到的结晶质量分别为 7.70、10.30、9.37 g。工况 1、2、3 仿真与试验吻合度分别为 76%、79%、78%, 表明吻合度较好, 仿真模型能比较准确地预测低、中、高温工况下的尿素结晶质量。

4.2 结晶位置分析

4.2.1 工况 1

工况 1 下, SCR 混合器仿真分析的结晶位置主要分布在叶片 1~4 背面, 基本与试验结果相吻合。仿真结果显示, 在混合器后面弯管拐弯处也有尿素结晶。

4.2.2 工况 2

工况 2 下, 叶片背面的结晶位置较工况 1 呈逐步上移趋势, 叶片 4 背面的结晶面积比叶片 1 小很多, 叶片 2、3 背面的结晶面积比工况 1 有所增大。原因为: 工况 2 的排气温度比工况 1 高 80 ℃, 因此工况 2 水的蒸发量大于工况 1; 当尿素粒子从喷嘴喷射后到达叶片 1 位置时, 其粒径比工况 1 小, 小粒径相比大粒径更不利于液膜的累积与尿素的沉积。工况 1、2 尿素粒子直径对比如图 12 所示。

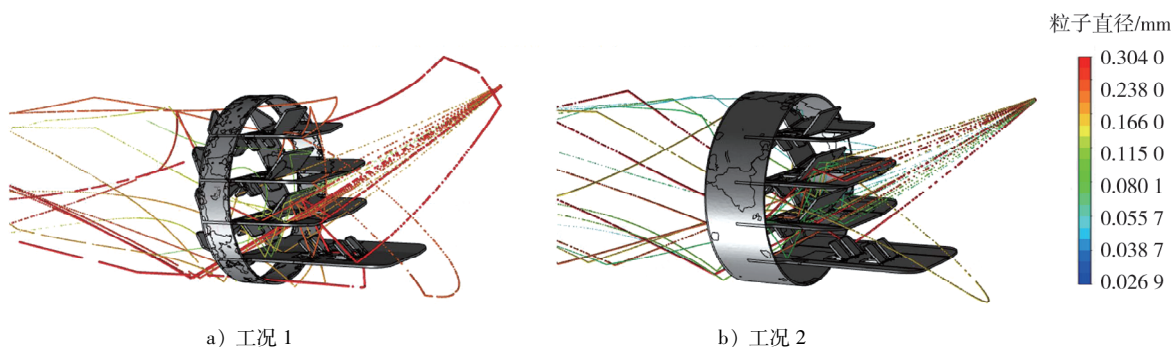


图 12 工况 1、2 尿素粒子直径对比

4.2.3 工况 3

相比工况 1、2, 工况 3 下混合器叶片背面结晶由叶片 3、4 背面逐步上移至叶片 1、2 背面, 甚至上移至叶片 1 附近的管壁位置。原因为: 1) 温度升高, 水的蒸发速度和质量增大, 工况 3 到达叶片上的粒子直径比工况 1、2 的直径小, 工况 3 尿素粒子直径如图 13 所示;

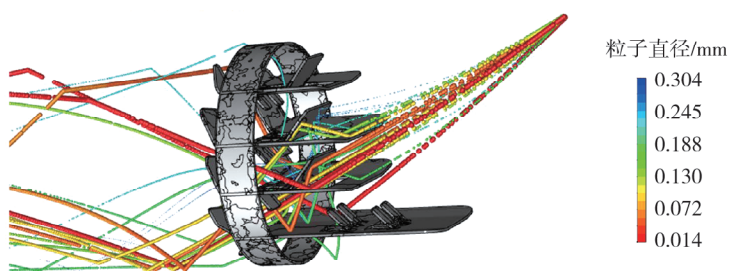


图 13 工况 3 尿素粒子直径

2) 喷射的尿素粒子到达混合器叶片时的速度约为 17~18 m/s, 而气流速度约为 20~25 m/s, 气流速度大于尿素粒子速度, 尿素粒子被气流引向叶片 1、2 的方向。工况 3 的气流速度和粒子速度如图 14 所示。

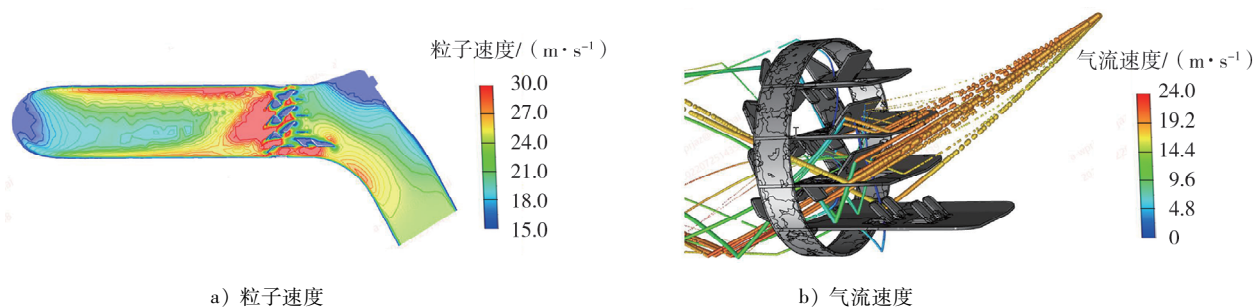


图 14 工况 3 的气流速度和粒子速度

4.3 结晶成分分析

文献[17]研究发现:尿素在温度约为 132.5 °C 时开始熔融, 152 °C 开始分解。图 3 中测点 5 的温度约为 135 °C, 刚刚达到尿素溶解温度, 且混合器安装在测点 5 附近, 因此, 工况 1 中的尿素沉积物主要为尿素固体, 与文献[17]结论相符。

文献[18]研究发现:结晶的组成与温度高度相关, 在温度为 150~225 °C 时, 结晶中 BIURET 的占比约为 30%。由结晶试验测得工况 2 排气管壁面最低温度为 172 °C, 根据 3.4.1 节仿真计算得到 BIURET 质量约占总结晶质量的 29%, 与文献[18]结论接近。

文献[19]通过红外光谱法、元素分析法研究高温下的尿素结晶成分, 发现当温度为 190~250 °C 时, 尿素结晶成分主要为 CYA 和 AMMELIDE。由结晶试验测得工况 3 主要结晶位置的温度(即最低温度)为 238 °C, 由 3.5.1 节可知 CYA、AMMELIDE 的质量和占总结晶质量的 96%, 与文献[19]结论基本相符。

综上, 结晶预测模型能够较好地预测结晶质量、位置和成分, 可以用于混合器设计和混合器抗结晶能力评估。另外, 在 SCR 混合器开发设计过程中, 通过仿真对尿素结晶进行预测, 可节省混合器样件制作和试验验证时间, 提高产品设计效率。

5 混合器设计改进

5.1 新混合器结构

原混合器结构如图 2 所示, 前级 SCR 前管路长度通常小于 1 m, 前级 SCR 入口位置如图 15 所示。

对原混合器结构进行改进设计, 提高紧耦合 SCR 入口处的氨均匀性、速度均匀性、混合器背压、抗结晶能力。新混合器结构如图 16 所示。新混合器为叶片式结构, 分为左右两部分, 左半部分主要作用为降低结晶, 右半部分主要作用为提高氨均匀性。

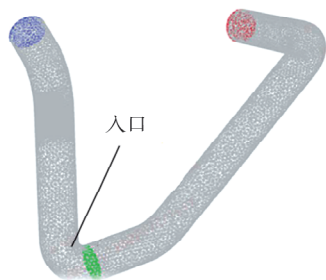


图 15 前级 SCR 入口位置示意图

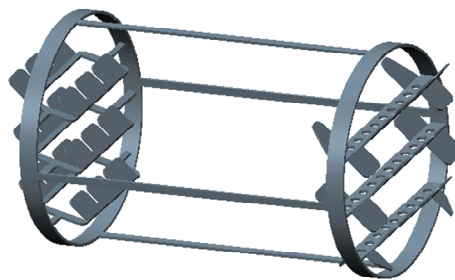


图 16 新混合器结构

5.2 新混合器性能指标仿真计算

选择柴油机常用工况中最大转矩点计算新混合器的性能指标, 结果如表 5 所示。

表 5 不同混合器性能指标计算结果

混合器类型	背压/kPa	氨均匀性	速度均匀性	结晶质量/g
原混合器	2.1	0.80	0.927	8.1
新混合器	2.0	0.83	0.940	2.6

由表 5 可知:与原混合器相比,新混合器的氨均匀性、速度均匀性提高约 2%,背压略低,结晶质量大幅降低,降幅约为 68%,新混合器各性能指标均优于现有混合器。

通过整理混合器仿真结果得到混合器的速度均匀性、氨均匀性与抗结晶能力和背压的关系,如图 17 所示。

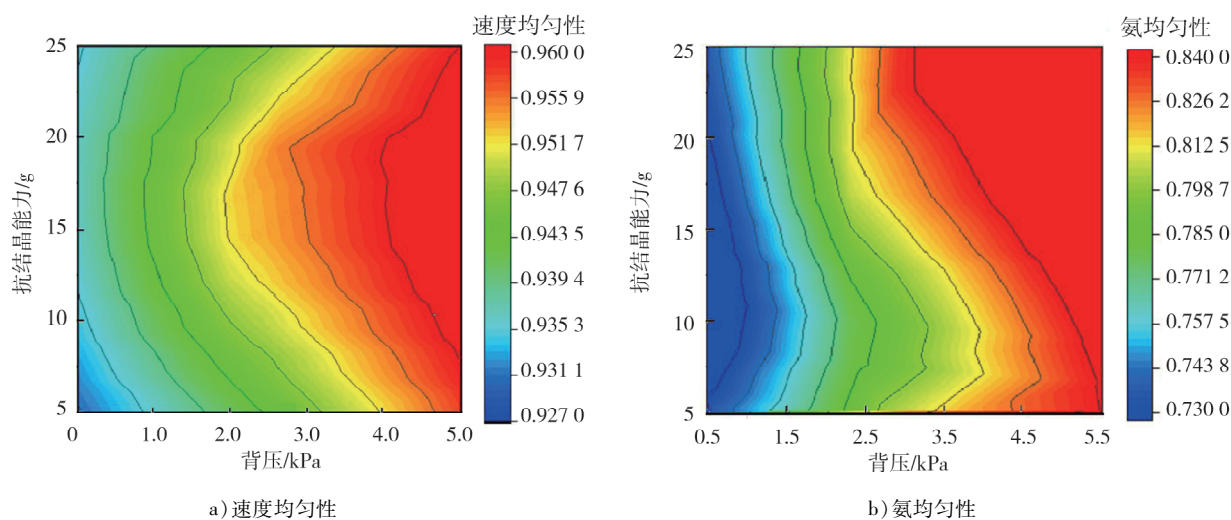


图 17 混合器的速度均匀性、氨均匀性与抗结晶能力和背压的关系

由图 17 可知:混合器的速度均匀性随背压增大而升高,在结晶量大、小区域的速度均匀性表现基本一致,表明速度均匀性与抗结晶能力相关性较弱;氨均匀性随背压增大逐步增大,随着结晶量的增加,氨均匀性增大。

综上所述,混合器的速度均匀性与背压正相关;氨均匀性与背压正相关,与抗结晶能力负相关。

5.3 新混合器结晶对比

仿真计算新混合器的结晶位置,如图 18 所示。对比图 18 和图 8b)可知:新混合器抗结晶能力显著提高,新混合器结晶位置主要为前级叶片背面,且位于气流的偏下部位;前级叶片、后级叶片中部和上部几乎没有结晶;原混合器后级叶片的上、中、下部位均存在大量结晶,新混合器显著减少了混合器后级叶片中部和上部位置的结晶。

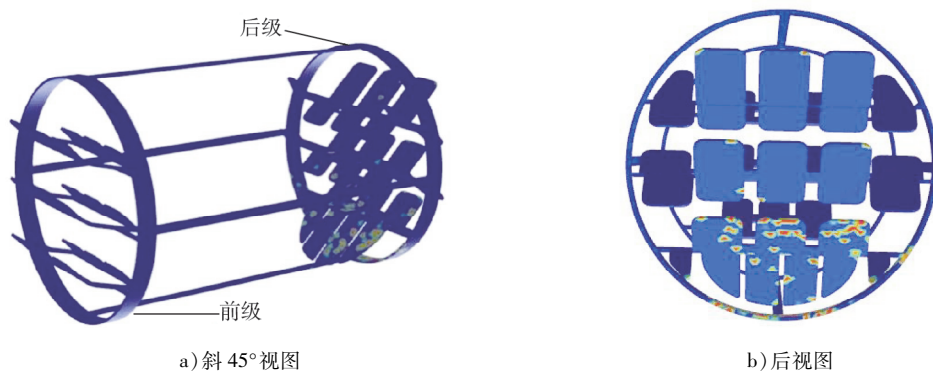


图 18 新混合器结晶位置

5.4 新混合器特点

1)大范围改变气流方向,增加气流路径,有利于延长尿素喷雾在混合器内停留时间,促进尿素混合,提高氨均匀性。

2)前级部分靠近上管壁位置的设计可减缓气流以引导尿素碰壁,推迟尿素碰壁时间,增加尿素分解时间,提高抗结晶能力;在下壁面位置,提高气体流速,防止尿素沉积。

新混合器各性能指标均优于现有混合器产品,目前已申请专利^[20]。

6 结论

1)在低、中、高温工况下,仿真计算的结晶质量与试验结果的吻合度分别为 76%、79%、78%。

2)仿真结晶位置与试验结果基本相同,结晶位置分布主要受排气温度、排气流量的影响。

3)低温工况结晶成分主要为尿素固体,占结晶总量的 93%;中温工况结晶成分主要为三聚氰酸、缩二脲、三聚氰酸-酰胺,三者质量之和占总结晶质量的 89%;高温工况结晶主要成分为三聚氰酸,三聚氰酸-酰胺,二者质量之和占总结晶质量的 96%,该结论与已有研究成果相吻合。

4)结晶预测模型能够较好地预测结晶质量、位置和成分,可用于混合器设计和混合器抗结晶性能的评估。

5)新混合器的各项性能指标均优于现有产品,其中抗结晶能力提高约 68%。

6)氨均匀性、速度均匀性与背压正相关,氨均匀性与抗结晶能力负相关。

参考文献:

- [1] 谭旭光,王天友,李志杰,等. 高效清洁高可靠重型柴油机开发关键技术研究[J]. 内燃机学报,2020,38(5):385-391.
- [2] 袁志玲,耿磊,张建华,等. 国 VI 排放后处理器下游 NO_x 测量准确度研究[J]. 内燃机学报,2021,39(2):186-191.
- [3] 胡广地,马卢平,刘丛志,等. 柴油机 DOC+SCR 系统数值仿真与结构优化[J]. 内燃机学报,2019,37(2):155-163.
- [4] 李江飞,牛雨飞,朱海艳,等. 混合器对国六柴油机选择性催化还原系统尿素结晶的影响[J]. 内燃机工程,2021,42(2):31-37.
- [5] 黄豪中,陈雅娟,林铁坚,等. 基于 CFD 耦合尿素分解机理的混合器性能评估[J]. 内燃机学报,2022,40(1):80-88.
- [6] BIRKHOLD F, MEINGAST U, WASSERMANN P, et al. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNO_x-systems[J]. Applied Catalysis B: Environmental,2007,70(1/2/3/4):119-127.
- [7] SMITH H, LAUER T, WINTER F. Modelling deposit formation in automotive SCR systems[D]. Vienna, Austria: Vienna University, 2016.
- [8] 冯鹏飞. 柴油机 SCR 系统尿素喷雾蒸发分解混合与结晶研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [9] KIM J Y, RYU S H, HA J S. Numerical prediction on the characteristics of spray-induced mixing and thermal decomposition of urea solution in SCR system[C]//Proceedings of ASME 2004 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Long Beach, USA: ASME,2004: 165-170.
- [10] 石代龙. 基于化学反应动力学的尿素结晶风险分析和预测[D]. 济南:山东大学,2019.
- [11] WANG T J, BAEK S W, LEE S Y, et al. Experimental investigation on evaporation of urea-water-solution droplet for SCR applications[J]. AIChE Journal, 2009, 55(12): 3267-3276.
- [12] ABU-RAMADAN E, SAHA K, LI X G. Modeling of the injection and decomposition processes of urea-water-solution spray in automotive SCR systems[C]//Proceedings of SAE World Congress 2011. Detroit, USA:SAE International, 2011.
- [13] BRACK W, HEINE B, BIRKHOLD F, et al. Kinetic modeling of urea decomposition based on systematic thermogravimetric analyses of urea and its most important by-products[J]. Chemical Engineering Science, 2014, 106:1-8.
- [14] 生态环境部. 重型柴油车污染物排放限值与测量方法(中国第六阶段):GB 17691—2018[S]. 北京:中国环境出版集团,2019.
- [15] 刘胜吉,曾瑾瑾,韩维维,等. 基于 CFD 及稳流试验的柴油机进/排气系统的性能[J]. 内燃机学报,2016,34(1):68-73.

- [16] 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2012.
- [17] WANG D H, DONG N, HUI S E, et al. Analysis of urea pyrolysis in 132.5–190 °C[J]. Fuel, 2019,242:62–67.
- [18] ZHENG G Y, FILA A, KOTRBA A, et al. Investigation of urea deposits in urea SCR systems for medium and heavy duty trucks[C]//Proceedings of SAE 2010 Commercial Vehicle Engineering Congress. Detroit, USA:SAE International, 2010: 3121–3126.
- [19] WEEKS C L, IBELING D R, HAN S, et al. Analytical investigation of urea deposits in SCR system[J]. SAE International Journal of Engines, 2015,8(3):1219–1239.
- [20] 潍柴动力股份有限公司. 一种混合效果好的混合器: CN218717072U[P]. 2023–03–24.

Prediction and application of urea deposition in close-coupled dual SCR system

ZHOU Hailei^{1,2}, LÜ Zhihua^{1,2}, GENG Lei^{1,2*}, WANG Mingda³

1. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China;

2. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

3. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China

Abstract: To meet the design requirements of the front-end selective catalytic reduction(SCR) mixer in a two-stage SCR device, a SCR urea crystallization prediction model is built in Fluent based on a chemical kinetics model to predict the quality, location, and composition distribution of urea crystals. The accuracy of the model is verified through engine bench crystallization tests. A new front-end SCR mixer is designed based on the crystallization prediction model to evaluate its performance. The results show that the simulation accuracy of crystal quality under low, medium, and high temperature conditions is 76%, 79%, and 78%, respectively. The simulated crystallization position matches well with the experimental crystallization position, and the crystallization position is affected by exhaust temperature and exhaust flow rate. The crystal composition at different temperatures is basically consistent with existing related studies. The performance indicators of the new mixer are superior to existing products, with an increase of about 68% in anticrystallization ability. Ammonia uniformity and velocity uniformity are positively correlated with back pressure, while ammonia uniformity is negatively correlated with anticrystallization ability.

Keywords: diesel engine after treatment system; close coupled mixer; SCR crystallization prediction model; Fluent

(责任编辑:臧发业)