DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202504042

柴油机后处理系统抗结晶能力评价方法

王天田[1,2,3]，李　骏[3]，丁俊岭[3]，秦　武[3]，肖　原[3]

（1. 湖北汽车工业学院汽车工程学院，十堰 442002；2. 汽车动力传动与电子控制湖北省重点实验室，十堰 442002；3. 华东交通大学机电与车辆工程学院，南昌 330013）

摘要：为有效评价柴油机后处理系统（ATS）的抗结晶能力，提出了一种结合氨（NH_3）分布均匀性测试及仿真结果、液膜温度仿真结果、稳态及瞬态结晶风险试验结果，同时考虑发动机排放和排气温度特征、尿素启喷温度标定及瞬态喷射控制参数标定特征的多维度抗结晶能力评价方法. 该方法不仅可以量化评价发动机后处理的整体抗结晶能力，还可以将系统的抗结晶能力受喷射系统性能、混合系统性能、后处理软件标定、发动机排放和排气温度特征等的影响程度进行量化评价，为提升 ATS 抗结晶能力指明具体的优化方向.

关键词：柴油机；后处理系统；抗结晶能力；评价

中图分类号：TK421.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）04-0366-09

Evaluation method of anti-deposition ability for aftertreatment system of diesel engine

Wang Tiantian[1,2,3], Li Jun[3], Ding Junling[3], Qin Wu[3], Xiao Yuan[3]

(1. School of Automotive Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China; 2. Key Laboratory of Automotive Power Train and Electronic Control, Shiyan 442002, China; 3. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to effectively evaluate the anti-deposition ability for aftertreatment system (ATS) of diesel engine, an evaluation method that is based on NH_3 distribution uniformity testing and simulation results, liquid film temperature simulation results, steady-state and transient-state deposition risk testing results was proposed. Several influences were also considered in the method including engine emissions and exhaust temperature characteristics, urea injection temperature calibration and transient injection control parameters calibration. This method can not only quantitatively evaluate the overall anti-deposition ability of ATS, but also quantifies the degree to which the overall anti-deposition ability is affected by urea injection system, mixing system, ATS software calibration, engine emissions and exhaust temperature characteristics, which indicating the specific optimization directions for improving the anti-deposition ability of ATS clearly.

Keywords: diesel engine; aftertreatment system; anti-deposition ability; evaluation

选择性催化还原（SCR）技术是目前柴油机满足欧Ⅵ/国Ⅵ及未来超低排放法规的 NO_x 转化（$DeNO_x$）技术[1]. 尿素选择性催化还原（urea-SCR）系统运行过程中的主要风险是尿素结晶，尿素结晶不仅预示着喷射的尿素溶液存在非排放控制用途的流失，并且会引起排气背压升高、催化剂工作效率降低，使得发动机经济性和排放特性变差[2]；严重时甚至会堵塞排气管，导致发动机无法正常工作，引发的能耗与排放双增严重制约了交通运输行业双碳目标的达成.

随着排放法规的加严，为提升系统热管理能力而出现的后处理系统（ATS）紧耦合趋势会使尿素雾化和混合空间进一步受限；为应对冷起动阶段排放而采

收稿日期：2024-12-22；**修回日期**：2025-03-02.

基金项目：国家自然科学基金资助项目（52466009）；中国博士后科学基金资助项目（2022M711353）；江西省自然科学基金资助项目（20232BAB204060）.

作者简介：王天田，博士，副教授，wtt31@126.com.

通信作者：王天田，博士，副教授，wtt31@126.com.

用更低的尿素启喷温度和更高的氨（NH_3）覆盖度控制目标均会导致结晶风险增加[3-4]，而目前未见一种可以全面评价发动机后处理系统抗结晶能力的有效方法[5-7]. 现有的评价手段一般基于仿真或试验独立展开，基于仿真的评价方式常通过仿真计算得到 NH_3 分布均匀性、流速分布均匀性、液膜厚度及液膜温度等信息[5]，或通过表征尿素结晶临界状态的特征参数[6]对设定入口条件下的结晶风险进行评价，以上方法难以对发动机后处理系统整个工况范围内的实际结晶发生时间或发生区域实现准确预测；基于试验的评价方式一般通过开展 NH_3 分布均匀性测试或结晶风险评估试验，基于 NH_3 分布均匀性系数或结晶观测结果对系统抗结晶能力进行评价[7]，该类方法得出的评价结果虽具备较高的参考价值，但试验测试及数据处理工作量大，且难以有效确认结晶风险产生的具体环节，不足以指明系统优化方向.

基于此，笔者设计一种柴油机后处理系统抗结晶能力的量化评价方法，将影响柴油机后处理系统抗结晶能力的各个环节影响因子进行量化，在对软、硬件设计参数形成独立量化评价的基础上对柴油机后处理系统抗结晶能力进行综合评价.

1　柴油机后处理系统抗结晶能力评价条件

1.1　抗结晶能力影响因素

造成尿素结晶的原因有硬件和软件原因. 硬件原因包括[2,5-6,8]：尿素喷射系统性能不佳导致喷射的尿素溶液雾化不充分；混合器设计不合理导致尿素难以和排气有效混合；尿素喷射管段流场设计欠缺导致尿素分布不均；尿素混合扩散空间不足导致尿素在到达催化剂前不能充分完成水解和热解反应；排气管未采取保温措施导致的壁面激冷，使得液膜难以快速蒸发等. 软件原因包括[3-4,7]：尿素喷射功能的开启温度设置过低导致水解和热解反应不能充分发生；冷起动过程常用的低速、高负荷工况的原机排放未有效控制，导致目标尿素喷射量过高，高蒸发吸热进一步降低排气温度，使得 NH_3 无法与 NO_x 迅速发生反应进而抑制了尿素分解反应等. 此外，车辆使用场景也会对实际抗结晶能力造成影响，后处理系统需经历从低温到高温的冷起动阶段，以短途运营场景为主的城市车辆在低温区间的运行频率尤其高，此时发动机 NO_x 排放稍有偏高或尿素启喷温度标定稍有偏低，则会使得结晶风险增加.

1.2　试验环境

笔者针对同一款柴油机分别匹配两款不同混合器的后处理系统，研究系统抗结晶能力受后处理系统硬件性能、软件标定、发动机排放和排温特征等的影响. 表 1 为发动机主要技术参数，图 1 为后处理系统结构及数据采集方案. 后处理系统由氧化催化器（DOC）、柴油颗粒捕集器（DPF）和 SCR 顺序组成，尿素混合器和尿素喷嘴位于 DPF 和 SCR 之间，排气尾管位于 SCR 出口端面的中心处. 所有催化器均采用陶瓷蜂窝载体. 通过读取电子控制单元（ECU）信号和台架测量信号，记录发动机转速、转矩、排气质量流量、SCR 上游 NO_x 体积分数、SCR 上、下游温度、尿素喷射量和氨氮比（ANR）等参数，作为工况点的特征参数. 表 2 为台架主要试验设备和技术指标.

表 3 为催化器几何尺寸信息，其中 SCR 催化器由两个相同尺寸的载体（SCR_1 和 SCR_2）串联组成，

表 1　发动机技术参数

Tab.1　Engine specifications

参数	数值
型式	6 缸直列，直喷，增压水冷
气缸数	6
排量/L	6.8
缸径/mm	105
活塞行程/mm	124
点火顺序	1—5—3—6—2—4
进气门数	2
排气门数	2
压缩比	17.7
涡轮增压器形式	VGT
最大转矩/（N · m）	1 000（1 200 ~ 1 900 r/min）
标定功率/kW	209（2 300 r/min）

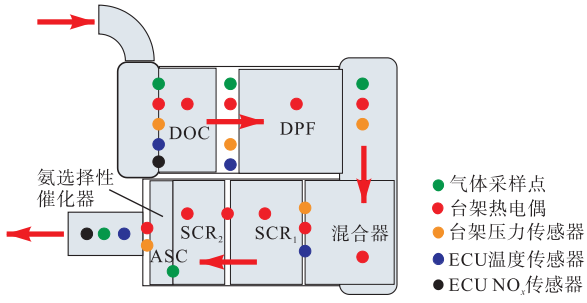


图 1　处理系统结构及信号采集方式

Fig.1　Structure of ATS and signal acquisition method

表 2　台架主要试验设备和技术指标

Tab.2　Main equipments and technical index of test bench

设备名称	技术指标
交流电力测功机	330 kW（8 000 r/min）
瞬态油耗仪	0 ~ 125 ± 0.001 kg/h
气体分析仪（AVL-AMA-i60）	0 ~ （9 999 ± 0.1）×10^{-6}
气体分析仪（FTIR）	0 ~ （9 999 ± 0.1）×10^{-6}
冷却液恒温系统	60 ~ 110 ± 2 ℃
机油恒温系统	80 ~ 150 ± 2 ℃
空气质量流量计	0 ~ 2 400 ± 0.1 kg/h
中冷恒温系统	25 ~ 60 ± 2 ℃

SCR_2 载体的后半部分涂覆氨逃逸催化剂(ASC)，涂覆长度为 50.8 mm. 尿素喷射系统参数如表 4 所示.

表 3 催化器尺寸信息

Tab.3 Geometric information of catalysts

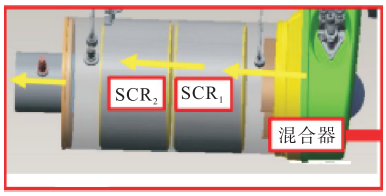
类型	直径/mm	长度/mm	孔密度/(个·cm^{-2})
DOC	266.7	101.6	62.0
DPF	266.7	203.2	46.5
SCR_1	266.7	152.4	93.0
SCR_2	266.7	152.4	93.0

表 4 尿素喷射系统技术参数

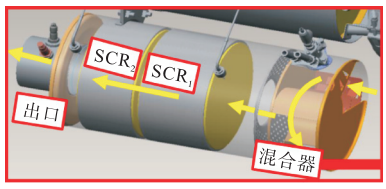
Tab.4 Technical parameters of urea injection system

参数	数值
喷孔数	3
喷孔直径/μm	190
喷孔分布直径/mm	1.9
喷孔分布夹角/(°)	120
喷射压力/MPa	0.9
喷射频率/Hz	1
静态质量流量/(kg·h^{-1})	7.2
液滴初始速度/(m·s^{-1})	32
空气辅助系统	—

图 2 为两种混合器设计方案对比. 方案 1 沿用国Ⅴ阶段后处理混合器设计，入口整流板可提升含尿素溶液排气的流速均匀性和液滴分布均匀性，两个旋转导流板在延长气流混合时间的同时将气流分为两条路径流入连通孔道，通过连通孔道后的气流在扩张段膨胀并进一步混合. 该方案中有部分气流将直接沿连通孔道的轴向流出混合器，弱化了整体混合效果. 针对不足，方案 2 通过在出口处设置大面积的锥面整流板，以改善进入 SCR 载体前气流在膨胀过程的二次混合与整流效果，同时，在入口部分扩大了导流流道，采用了孔洞尺寸更大的破碎格栅，使得液滴和气流与格栅的作用更强烈，并通过设置单一路径的旋转导流板，使得气流与尿素液滴具备更长的混合尺



(a) 方案 1



(b) 方案 2

图 2 两种尿素混合器结构

Fig.2 Structure of two urea mixers

度，以实现高效混合.

1.3 仿真环境

尿素结晶过程仿真可反映多种物理量在后处理系统中的分布，节约大量的传感器布置和数据测试时间，通过大量的试验结果对模型进行优化，当某些物理量的预测结果与试验结果一致性较好时，则认为对该物理/化学过程相关量的预测具有较高的可信度.

1.3.1 后处理系统网格模型

图 3 为后处理系统网格模型. 划分的网格包括六面体结构网格、四面体网格以及棱柱体网格，在气流变化较为剧烈的区域对网格进行局部加密，通过进行网格无关性验证将网格总数进一步压缩至 2.8×10^6，此时网格平均特征尺寸约为 3.5 mm.

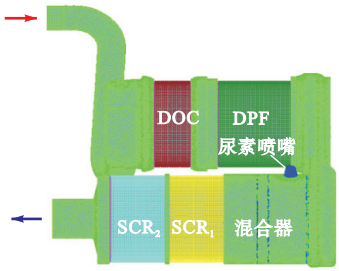


图 3 后处理系统网格模型

Fig.3 Mesh model of ATS

1.3.2 仿真计算模型

NH_3 分布均匀性及结晶生成主要受尿素溶液喷雾过程、液滴碰撞及液膜形成过程、液滴及液膜蒸发过程、尿素结晶及分解过程的影响[6, 8-9]，图 4 为后处理系统仿真模型.

喷雾模型采用离散项液滴模型[9](DPM)，其中尿素溶液液滴初始喷射速率、喷束的束间夹角和喷雾锥角等参数来自已验证的供应商原始参数；尿素液滴的碰撞模型[10]通过同步求解气/液相能量守恒、动量守恒和质量守恒方程建立，基于 DPM 并利用随机轨道模型描述液滴运动过程；液膜的形成模型基于以下过程：尿素溶液液滴和混合器叶片或排气管壁面碰撞后，有可能附着于壁面形成液膜，也有可能二次破碎成更小的液滴飞溅、反弹. 图 5 示出喷雾与混合器壁面相互作用，其中 T_b 为液滴沸点，T_w 为壁面温度，E 为液滴的冲击能量[9]，有

$$E^2=\frac{\rho v_r^2 d_p}{\sigma}\left[\min(h_0/d_p,1)+1/\sqrt{Re}\right]^{-1} \tag{1}$$

式中：ρ 为粒子密度；v_r 为粒子和壁面的相对速度；d_p 为粒子半径；Re 为雷诺数；σ 为液滴表面张力；h_0 为液膜厚度. 当碰撞液滴冲击能量超过临界能量 E_b 时，液滴发生二次破碎. 当液滴的冲击能量小于 E_b

时，若 T_w 小于 T_b，液滴附着于壁面表面形成液膜；反之，液滴被壁面反弹[9].

蒸发模型采用 Multi-component 双组分溶液[11]模型，该模型可精确描述各组分蒸发速率与其饱和蒸气压、有效蒸发面积、环境湿度、气流流速及气流温度等的关系；由于笔者建立的尿素分解反应模型仅用于 NH_3 分布均匀性预测，因而将尿素的热解和水解反应合并为一个反应[12]，尿素分解的反应速率 k 可表示为

$$k = AT^{y}\exp(-E_a / RT) \tag{2}$$

式中：A 为指前因子；E_a 为活化能；y 为温度指数；R 为理想气体常数；T 为排气温度.

尿素分解为气态 NH_3 后进入 SCR 催化器，在计算过程中可将其载体简化为多孔介质模型，其内部的流体流动基本满足 Darcy 定律[13]，孔道内部的 NH_3 分布均匀性受限于物理隔离而保持不变，仅需考虑 SCR_1 入口前的分布均匀性变化和 SCR_1 与 SCR_2 之间自由流动区域的分布均匀性变化.

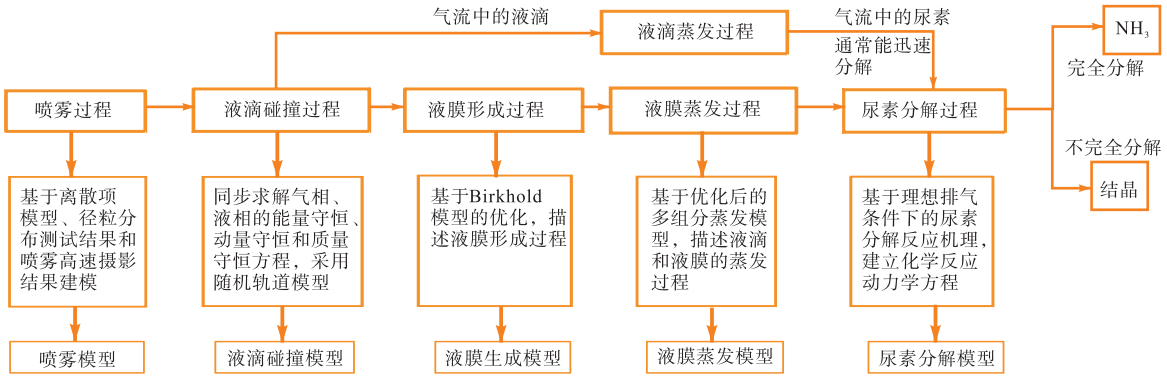


图 4　后处理系统仿真模型

Fig.4　Models used for simulation of ATS

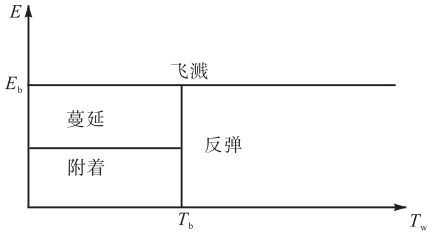


图 5　尿素液滴对壁面的影响

Fig.5　Effect of urea droplet on wall surface

1.3.3　模型可靠性验证

入口排气组分体积分数按照台架试验数据设置，入口边界条件选用质量流量入口，设排气为理想气体，出口设为标准大气压下的压力出口，进/出口湍动能按照湍流强度和水力半径设置. 催化剂载体、混合器和管壁的热物性参数通过供应商提供的材料参数查表获得，尿素溶液质量分数设为 32.5%，喷射量按 ANR = 1.05 设置，喷射前的尿素温度设为常温.

表 5 为仿真过程选用的主要模型，开展对液膜温度、NH_3 体积分数分布、气流速度分布和气体温度分布的仿真计算.

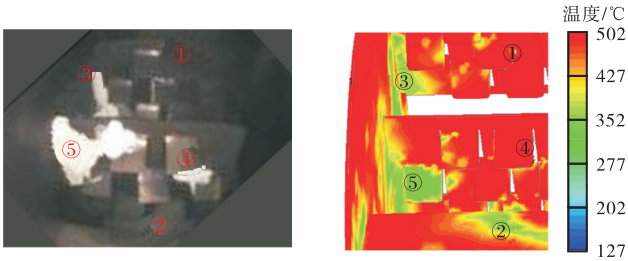
图 6 示出 SCR_1 入口温度为 300 ℃、排气质量流量为 368 kg/h 且喷射量为 204.4 mg/s 的稳定工况点结晶照片和对应的液膜温度分布仿真结果. 可知，液膜温度分布仿真结果和实际获得的结晶分布情况有较高的吻合度，仿真结果的 5 个主要低温区域（①～⑤）中有 3 个都出现了明显的尿素结晶现象（③、④和⑤），且实际结晶形状和仿真结果高度一致.

通过高温-低空速、高温-高空速、低温-低空速及低温-高空速共 4 种条件下的仿真模拟过程优化，均实现了与图 6 类似的仿真效果，因而认为模型对尿素溶液水解、蒸发过程的仿真精度可满足 NH_3 分布均匀性仿真需求.

表 5　数值仿真模型

Tab.5　Numerical simulation model

模型名称	数值
湍流模型	标准 k-ε 模型
排气参数	理想气体参数
液滴模型	DPM 模型
蒸发模型	Multi-component 模型



（a）试验结果　　（b）仿真结果

图 6　液膜温度分布的仿真结果和试验结果

Fig.6　Distribution of temperature of liquid film from simulation and experimental results

2 后处理系统硬件的抗结晶能力评价

稳态尿素结晶风险评估试验[8]可反映当前处理系统的硬件结构及性能状态下 SCR 入口温度和尿素喷射强度 β_i（尿素质量流量与排气质量流量之比）导致的尿素结晶风险程度变化.

2.1 后处理系统硬件抗结晶能力评价

基于目标发动机的排气温度和排放特性，参照文献[8]制定试验方案，表 6 为稳态结晶试验工况参数.

表 6 稳态结晶试验工况点参数

Tab.6 Operating points of steady-state deposit test

工况	转矩/(N · m)	SCR_1 入口温度/℃	排气质量流量/(kg · h^{-1})	β_i/10^{-3}	喷射量/(mg · s^{-1})	ANR
1	155	200	310	0.25	21.5	0.3
2	165	200	327	0.50	45.4	0.6
3	165	200	327	1.00	90.8	1.2
4	165	200	327	2.00	181.7	2.4
5	190	220	323	0.50	44.9	0.5
6	205	220	320	1.00	88.9	0.9
7	195	220	331	2.00	183.9	2.0
8	195	220	331	2.50	229.9	2.5
9	265	250	332	1.00	92.2	0.7
10	252	250	342	2.00	190.0	1.6
11	252	250	342	3.00	285.0	2.4
12	335	300	364	1.00	101.1	0.6
13	370	300	368	2.00	204.4	1.2
14	360	300	374	2.50	259.7	1.6
15	370	300	368	3.00	306.7	1.8
16	445	350	391	1.00	108.6	0.5
17	485	350	404	2.00	224.4	1.0
18	475	350	416	2.50	288.9	1.3
19	485	350	404	3.00	336.7	1.5
20	445	350	391	4.00	434.4	2.1
21	605	400	456	1.50	190.0	0.7
22	650	400	458	2.50	318.1	1.1
23	650	400	458	3.50	445.3	1.5
24	605	400	456	5.00	633.3	2.3

对每个工况点的尿素结晶风险进行评价后[8]，以每个工况点的 SCR_1 入口温度为横坐标，尿素喷射强度 β_i 为纵坐标确定点的位置，以该工况点的评价结果对应的颜色对该点着色，其中深红色表示高结晶风险点，深黄色表示中等结晶风险点，深绿色表示低结晶风险点，然后通过直线或折线将不同颜色的试验点划分到不同的色域，最终得到不同混合器应用方案下的结晶风险分布[8]，如图 7 所示.

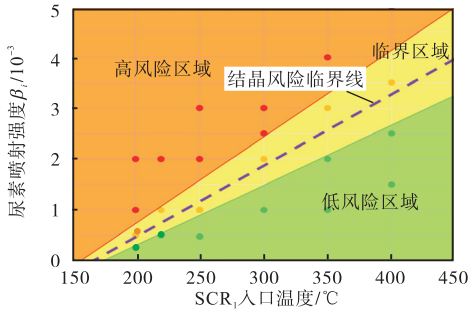
结晶风险临界线的曲线方程反映了 SCR_1 入口温度 T_{ci} 和 β_i 的函数关系，SCR_1 入口温度越高，排气中所允许的临界尿素喷射强度越高. 不同的后处理系统有不同的函数关系，且与发动机状态无关，通过对图 7 中结晶风险临界线进行线性拟合，可近似地得到 β_i 与 T_{ci} 的函数表达式，对于方案 2，其尿素喷射强度 β_2 对应的拟合曲线表达式为

$$\beta_2 = 0.016\,5\,T_{c2} - 2.813 \tag{3}$$

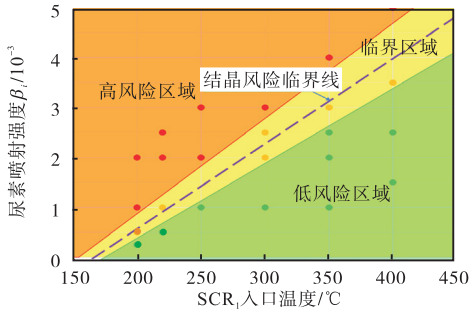
式中：T_{c2} 为方案 2 的 SCR_1 入口温度，当该温度在尿素水解和热解反应能够发生的最低温度以下时，理论的临界尿素喷射强度应为 0[14]，有

$$\beta_i = m_i(T_{ci} - T_{0,i}) \tag{4}$$

式中：$T_{0,i}$ 为后处理方案 i 尿素分解反应完全发生所需的最低排气温度；m_i 为后处理方案 i 的系统抗结晶能力，同一排气温度下更大的 m_i 预示着更高的临界尿素浓度，抗结晶能力越强.



（a）方案 1



（b）方案 2

图 7 不同方案的稳态结晶风险分布

Fig.7 Distribution of steady-state deposit risk with different schemes

依据稳态结晶试验结果和 NH_3 分布均匀性结果，混合系统方案 2 的抗结晶能力较为优异，而方案 1 难以满足分布均匀性的最低要求，且结晶风险较高. 将方案 2 的（$m_2 = 0.016\,5$）后处理系统硬件抗结晶能力定义为 80.0%，由于 m_i 对系统结晶风险的影响非常剧烈，定义 $m_i = 0.017\,0$ 状态下的后处理系统硬件抗结晶能力为 100.0%，并用 H_i 表示，假设 H_i 与 m_i 完全线性相关，则 H_i 可表示为

$$H_i = (400m_i - 5.8)\times 100\% \tag{5}$$

由图 7 (a) 拟合得到方案 1 的临界风险曲线函数为

$$\beta_1 = 0.015\,4(T_{c1} - 172) \tag{6}$$

由式(6)和式(4)可知，$m_1 = 0.015\,4$，代入式(5)可计算出方案 1 的硬件抗结晶能力 H_1 为 36.0%.

稳态尿素结晶风险评估试验可对后处理系统尤其是 SCR 系统硬件的抗结晶能力进行评价，为了确认风险是来自于喷射系统还是混合系统，需进一步对 SCR 催化器内部的 NH_3 分布均匀性进行评价.

2.2 NH_3 分布均匀性

2.2.1 NH_3 分布均匀性的定义

NH_3 分布均匀性表征了尿素喷雾在排气横截面的分布情况，可以反映尿素溶液喷雾在排气中的热质交互作用程度[7]，是尿素喷射混合系统抗结晶能力的重要评价指标之一. NH_3 分布均匀性系数 UI[7]可表示为

$$\mathrm{UI} = 1 - \sum_{i=1}^{n}\left[\left|S_i - \left|\overline{S}\right|\right| A_i\right] \Big/ \left(2\left|\overline{S}\right|\sum_{i=1}^{n} A_i\right) \tag{7}$$

式中 $\overline{S}$ 为被测截面的 NH_3 体积分数平均值，有

$$\overline{S} = 1 - \left(\sum_{i=1}^{n} S_i A_i\right) \Big/ \sum_{i=1}^{n} A_i \tag{8}$$

式中：n 为截面的微面元总数；A_i 为编号为 i 的微面元面积；S_i 为编号为 i 面元内的 NH_3 体积分数，有

$$S_i = V_{\mathrm{NO}_x,\mathrm{in}} - V_{\mathrm{NO}_x,\mathrm{out}} + V_{\mathrm{NH}_3,\mathrm{out}} \tag{9}$$

式中：$V_{\mathrm{NO}_x,\mathrm{in}}$ 为被测 SCR_1 载体入口的 NO_x 体积分数；$V_{\mathrm{NH}_3,\mathrm{out}}$ 为被测微面元处的 NH_3 体积分数；$V_{\mathrm{NO}_x,\mathrm{out}}$ 为被测微面元处的 NO_x 体积分数.

2.2.2 NH_3 分布均匀性试验测试方案及结果

图 8 为 SCR 载体某一横截面处不同微面元内的排气组分体积分数测量方案. 通过切换盒将目标采样管与气体分析仪连通，可获得采样管当前插入位置(图 8 中红色测点)的 NH_3 体积分数.

由于 NH_3 分布均匀性受排气温度和空速条件的影响较大，因而选择 4 种工况评估 NH_3 分布均匀性，表 7 为 4 种工况的转速 n、转矩 T_{tq}、排气质量流量 q、DOC 入口温度 T_1、原始 NO_x 排放 v_0、及喷射量 Q 等参数变化.

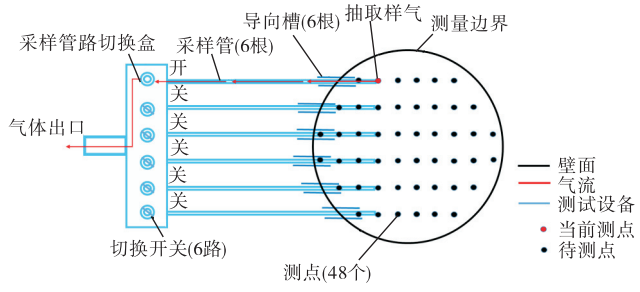


图 8　SCR 催化剂 NH_3 分布均匀性试验方案

Fig.8　Scheme of NH_3 uniformity test of SCR catalyst

表 8 为不同混合器系统在各工况的 ANR、最低体积分数与平均体积分数之比($R_{\mathrm{min}}/R_{\mathrm{m}}$)、最高体积分数与平均体积分数之比($R_{\mathrm{max}}/R_{\mathrm{m}}$)及 UI 试验值.

表 7　NH_3 分布均匀性试验工况

Tab.7　Operating conditions of NH_3 uniformity test

工况	n/(r·min^{-1})	T_{tq}/(N·m)	q/(kg·h^{-1})	T_1/℃	v_0/10^{-6}	Q/(mg·h^{-1})	ANR
1	1 150	975	470	500	665	344	1.05
2	2 300	867	953	528	618	611	1.05
3	1 150	300	200	250	346	106	1.05
4	2 300	250	450	250	229	176	1.05

表 8　不同混合系统在 4 个工况下的 NH_3 分布均匀性试验结果

Tab.8　NH_3 uniformity testing results of 4 operating conditions with different mixture system

工况	特征	方案	ANR	$R_{\mathrm{min}}/R_{\mathrm{m}}$	$R_{\mathrm{max}}/R_{\mathrm{m}}$	UI
1	低速、高转矩	1 号	1.05	0.56	2.11	0.906
		2 号	1.05	0.97	1.05	0.991
2	高速、高转矩	1 号	1.05	0.73	1.34	0.947
		2 号	1.05	0.94	1.3	0.979
3	低速、低转矩	1 号	1.05	0.52	1.67	0.897
		2 号	1.05	0.91	1.14	0.977
4	高速、低转矩	1 号	1.05	0.51	1.76	0.896
		2 号	1.05	0.95	1.07	0.990

2.2.3 NH_3 分布均匀性仿真结果

表 9 为 1 号和 2 号混合系统在各工况点的 ANR、$R_{\mathrm{min}}/R_{\mathrm{m}}$、$R_{\mathrm{max}}/R_{\mathrm{m}}$ 以及 UI 的仿真计算结果，其中 2 号方案的 UI 仿真结果分别为 0.993、0.996、0.990 与 0.994，和试验结果较为一致，表明 2 号混合系统具备较强的混合能力.

表 9　不同混合系统在 4 个工况下的 NH_3 分布均匀性仿真结果

Tab.9　NH_3 uniformity simulation results of 4 operating conditions with different mixture system

工况	特征	方案	ANR	$R_{\mathrm{min}}/R_{\mathrm{m}}$	$R_{\mathrm{max}}/R_{\mathrm{m}}$	UI
1	低速、高转矩	1 号	1.05	0.59	1.15	0.958
		2 号	1.05	0.95	1.02	0.993
2	高速、高转矩	1 号	1.05	0.57	1.13	0.957
		2 号	1.05	0.97	1.02	0.996
3	低速、低转矩	1 号	1.05	0.58	1.18	0.954
		2 号	1.05	0.96	1.35	0.990
4	高速、低转矩	1 号	1.05	0.56	1.18	0.956
		2 号	1.05	0.97	1.10	0.994

2.2.4 NH_3 分布均匀性的影响评价

多种后处理系统的台架结晶试验结果表明：当 NH_3 分布均匀性测试结果满足 UI≥0.950、$R_{\mathrm{max}}/R_{\mathrm{m}}$<1.50 且 $R_{\mathrm{min}}/R_{\mathrm{m}}$>0.50 时，此时系统混合能力基本不会对抗结晶能力造成明显的负面影响[8]，同时设定 UI≥0.990、$R_{\mathrm{min}}/R_{\mathrm{m}}$≥0.90 且 $R_{\mathrm{max}}/R_{\mathrm{m}}$≤1.10 时的修正

系数 f_{UI} 为 100.0%，笔者采用试验和仿真结果，通过表 10～表 11 所示的标准量表对 f_{UI} 进行计算.

表 10 UI 与修正值的对应关系

Tab.10 Corresponding relationship between correction coefficient f_{UI} and UI

UI	f_{UI} 修正值/%
<0.900	−10.0
[0.900,0.910)	−9.0
[0.910,0.920)	−8.0
⋮	⋮
[0.970,0.980)	−2.0
[0.980,0.990)	−1.0
≥0.990	0

表 11 R_{max}/R_m 及 R_{min}/R_m 与修正值的对应关系

Tab.11 Corresponding relationship between correction coefficient f_{UI} and R_{max}/R_m, R_{min}/R_m

R_{max}/R_m 与修正值对应关系		R_{min}/R_m 与修正值对应关系	
R_{max}/R_m	R_{max}/R_m 修正值/%	R_{min}/R_m	R_{min}/R_m 修正值/%
>2.00	−5.0	<0.25	−5.0
[2.00, 1.50)	−3.0	[0.25, 0.50)	−3.0
[1.50,1.20)	−1.5	[0.50,0.75)	−1.5
[1.20,1.10)	−0.5	[0.75,0.90)	−0.5
≤1.10	0	≥0.90	0

基于修正对应关系表，通过方案 1 的仿真、试验结果可得到 4 个工况的试验和仿真结果修正值，如表 12 所示. 可知方案 1 的 $f_{UI,1}$ = 39.0%，同理，计算出方案 2 的 $f_{UI,2}$ = 92.5%. NH_3 分布均匀性修正系数 f_{UI} 对发动机后处理系统抗结晶能力的影响已包含在后处理系统硬件的抗结晶能力中. 混合之前的尿素不完全分解不会对 NH_3 分布均匀性造成明显影响，因而优异的 NH_3 分布均匀性指标并不一定意味着优异的抗结晶能力，但 NH_3 分布均匀性指标偏低一定会对系统的抗结晶能力造成负面影响.

表 12 方案 1 的 NH_3 分布均匀性修正值

Tab.12 NH_3 uniformity correction factors with scheme 1

工况	特征	方法	R_{min}/R_m 修正值/%	R_{max}/R_m 修正值/%	f_{UI}/%
1	低速、高转矩	仿真	−1.5	−0.5	−4.0
		试验	−1.5	−5.0	−9.0
2	高速、高转矩	仿真	−1.5	−0.5	−4.0
		试验	−1.0	−1.5	−5.0
3	低速、低转矩	仿真	−1.5	−0.5	−4.0
		试验	−1.5	−3.0	−10.0
4	高速、低转矩	仿真	−1.5	−0.5	−4.0
		试验	−1.5	−3.0	−10.0

3 软件标定的抗结晶能力

3.1 尿素启喷温度标定影响评价

由式(3)和式(6)可知，方案 1 和方案 2 后处理系统对应的尿素分解反应所需最低排气温度分别为 172.0 ℃和 170.5 ℃. 对于方案 i，设低温工况下的 SCR_1 入口温度场仿真值或 SCR_1 入口截面的最低温度试验值与平均温度的温差为 ΔT_i（ΔT_i 为定值），则控制策略中所设定尿素启喷时的载体温度高于 $T_{0,i}+\Delta T_i$ 时，不会对系统抗结晶能力造成负面影响.

设方案 i 的尿素启喷温度标定值为 T_{si}，并假设 T_{si} 低于 $T_{0,i}+\Delta T_i$ 时，每降低 1.0 ℃，将导致系统的抗结晶能力下降 5%（也可通过低温尿素喷射试验标定不同温差导致的结晶风险增加程度，以获取更精确的温度修正关系），结合在 $\{T_{si}, T_{0,i}+\Delta T_i\}$ 温度区间工况点的运行概率分布，设某一温度点 T_i 的运行概率为 φ_{T_j}，同时定义 f_{ci} 为第 i 号方案的尿素启喷温度标定对系统抗结晶能力的影响系数，则 f_{ci} 可表示为

$$f_{ci}=\sum_{T_j=T_{si}}^{T_{0,i}+\Delta T_i}\varphi_{T_j}(T_{0,i}+\Delta T_i-T_j)\times 5\% \tag{10}$$

基于该计算结果可对系统当前尿素启喷温度标定所带来的结晶风险进行评价，f_{ci} 越低则系统的抗结晶能力越差. 笔者采用的尿素启喷温度标定值为 185 ℃，而 ΔT_i 不超过 10 ℃，因而对于方案 1 和 2，该尿素启喷温度的标定对结晶均无负面影响，f_{ci} = 100.0%.

3.2 瞬态控制参数标定影响评价

瞬态结晶风险试验包含城市循环（连续 120 次的瞬态测试循环（WHTC）前 900 s）和交通拥堵循环（以实车在拥堵道路的实际路谱，通过传动比和换挡策略反求出发动机工况特征）两部分，其试验流程与工况循环特征参见文献[8]，可分别评估一个 DPF 再生周期内的尿素结晶风险和交通拥堵情况下的结晶风险（低、中和高风险），表 13 为瞬态结晶风险评估试验结果.

表 13 瞬态结晶风险评估试验结果

Tab.13 Risk assessment of transient deposit tests results

名称	喷嘴	混合器入口	混合器中部	混合器出口	SCR_1 入口	载体表面	综合状态
城市循环	中	中	低	中	低	低	中
交通拥堵循环	低	中	低	中	低	低	中

当瞬态结晶风险试验结果明显差于稳态结晶风险试验结果时，需评估瞬态控制参数标定（瞬态标定）对系统抗结晶能力的影响. 笔者基于尿素喷射量超临界值的程度及发生概率，提出评价瞬态标定对系统抗结晶能力影响的方法. 图 9 为冷态城市循环的尿素喷射量.

冷起动后一段时间内，由于 SCR 催化器在低温条件下有较高的覆盖度需求，喷射初始阶段的尿素喷

射量会持续高于某一水平(图 9 所示的红色区域)，如果这一喷射水平超过了当前的临界喷射量，则会显著提升系统的结晶风险.

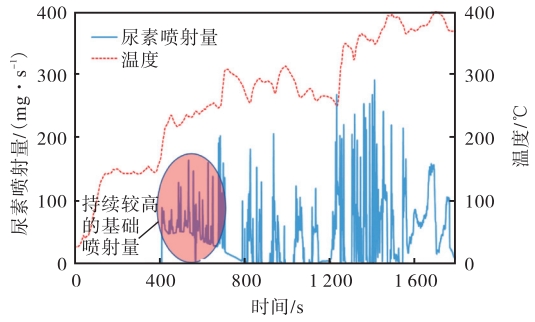


图 9　冷态 WHTC 的尿素喷射量

Fig.9　Urea injection rate in cold WHTC

假设从尿素开始喷射到储氨目标第 1 次达成的总时间为 T_t，其中喷射量超过临界值的总时间为 T_e，则 T_e/T_t 越高，表明储氨瞬态控制带来的结晶风险程度越高，同时设 T_e 内第 j 时刻的 β 值为 β_j，对应工况的 β 限值为 β_{cj}，则 β_j/β_{cj} 越大则喷射量超过结晶风险限值越多，此时结晶风险程度越高. 记录超过临界喷射量的 β_j 与 β_{cj}，计算第 i 种瞬态标定数据对系统抗结晶能力的影响系数 f_{ti}，有

$$f_{ti}=1-\left[\sum_{j=1}^{T_e}(\beta_j/\beta_{cj})/T_t\right]\times 100\% \tag{11}$$

f_{ti} 低于 1 时，认为对系统抗结晶能力有负面影响，当前瞬态标定可能存在工况温度变化时的目标储氨量变化率标定过大；基于目标储氨量的尿素喷射量补偿控制没有引入缓喷控制策略或存在缓喷控制参数设置不佳、最大喷射量的限值标定不合理的问题.

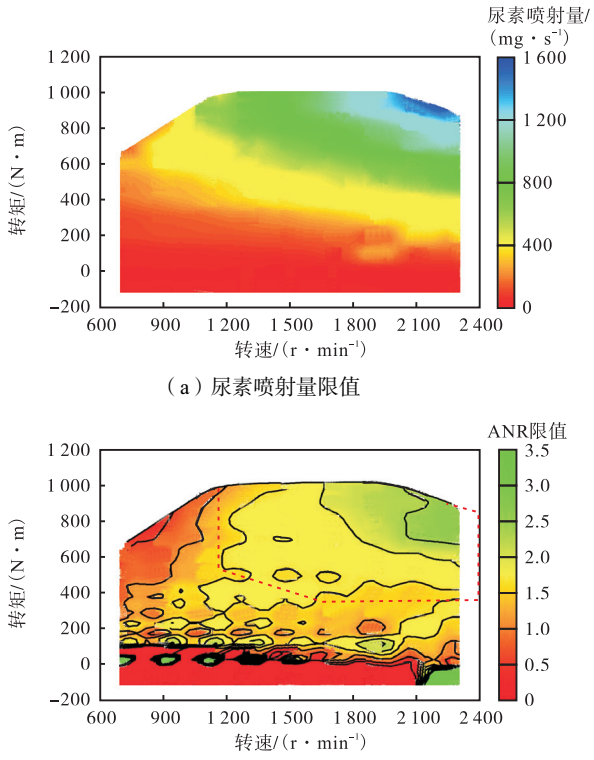
对于不同的混合器设计方案，由于使用的目标储氨量标定数据和尿素喷射量补偿控制参数均一致，因而方案 1 和方案 2 的瞬态标定对系统抗结晶能力的影响系数一致，有 $f_{ti}=93.4\%$.

4　发动机的抗结晶能力评价

发动机排气温度偏低会增加系统结晶风险[4-5]，而发动机 NO_x 排放过高将导致目标尿素喷射量过高，未完全蒸发尿素溶液比例上升的同时，蒸发吸热量增加也会降低排气温度，进一步加剧结晶风险.

依据台架试验测得的发动机排放、排气温度和排气质量流量的万有特性数据，通过式(4)可得出尿素喷射量限值和对应的 ANR 限值，结果如图 10 所示.

ANR 限值大于 1 说明结晶不会对 NO_x 排放控制造成影响，小于 1 则系统的正常尿素喷射需求将会带来尿素结晶风险，ANR 限值为 0 或负数则一旦喷射尿素便会带来结晶风险，负值越大，结晶越容易发生. 对某一工况点的抗结晶能力评估需兼顾以下因素：(1)结合车型实际路谱，确认该工况点(或工况区域)的使用频率，由此引入车辆使用场景对系统抗结晶能力的影响；(2)某一工况点的 ANR 限值越低，该点的抗结晶能力越弱，但对应于相同的 ANR 限值，工况点温度越高，抗结晶能力越强.



(a) 尿素喷射量限值

(b) ANR 限值

图 10　万有特性图上的尿素喷射量和 ANR 限值

Fig.10　Limitation of urea injection rate and ANR in engine-map

设第 j 个工况点的温度为 T_j，ANR 限值为 α_j，使用频率为 φ_j，则第 i 后处理系统所匹配的发动机排放和排温特征带来的抗结晶能力修正系数 f_{ei} 为

$$f_{ei}=\sum_{i=0}^{n}\varphi_j\alpha_j(T_j-T_{0,i})/(T_{t,i}-T_{0,i})\times 100\% \tag{12}$$

式中：$T_{0,i}$ 为第 i 时刻后处理方案尿素分解反应完全发生所需的最低排气温度(设为定值)，温度越低，则喷射的尿素水溶液越容易分解，结晶风险越低；$T_{t,i}$ 为第 i 时刻后处理方案的尿素结晶完全分解对应的催化剂载体温度(设为定值)，温度越低，则已形成的尿素结晶更易分解，结晶风险越低.

式(12)中，需首先计算 $\alpha_j(T_j-T_{0,i})/(T_{t,i}-T_{0,i})$，令其为 p，如果 p 大于 1，则令 p=1，再计算求和. 基于这一修正系数可筛选出对系统结晶风险存在负面影响的发动机排放及排气温度工况点，当系统结晶风险较

高时可以通过对上述工况点开展降低原始排放或提高排气温度等手段提升抗结晶能力. 对于不同的混合器设计方案，虽然发动机排放和排气温度特征一致，但临界结晶风险曲线略有差异，对于当前的两种混合器匹配方案，有 $f_{e1}=84.7\%$ 和 $f_{e2}=87.3\%$.

5 发动机后处理系统的综合抗结晶能力

用 P_i 表示发动机后处理系统的综合抗结晶能力，其受到后处理系统硬件性能、软件标定以及发动机性能对结晶过程的影响，可表示为

$$P_i = H_i \cdot f_{ci} \cdot f_{ti} \cdot f_{ei} \tag{13}$$

可知，P_i 越大则系统的抗结晶能力越强. 方案 1 和方案 2 各个环节的抗结晶能力影响因子和最终的 P_i 计算结果见表 14，由于方案 1 和方案 2 使用的是相同的发动机硬件和软件标定，所以其 f_{ci} 和 f_{ti} 一致，且 f_{ei} 的差异较小，综合抗结晶能力的主要差异来自尿素喷射混合系统的硬件性能差异，尤其是混合系统的设计.

表 14 发动机后处理系统的抗结晶能力计算值

Tab.14 Calculation results of ATS anti-deposition ability

方案	H_i/%	f_{UIi}/%	f_{ci}/%	f_{ti}/%	f_{ei}/%	P_i/%
1	36.0	39.0	100.0	93.4	84.7	28.5
2	80.0	92.5	100.0	93.4	87.3	65.2

6 结 论

（1）通过稳态结晶风险试验可获得不同后处理方案的结晶风险分布，对结晶风险临界线进行线性拟合可近似得到尿素喷射强度 β_i 与 SCR 催化器入口温度 $T_{c,i}$ 的函数表达式，二者的相关系数 m_i 决定了某一温度下系统结晶风险对尿素喷射强度的敏感程度.

（2）发动机后处理系统的综合抗结晶能力 P_i 主要受到后处理系统硬件抗结晶能力 H_i 的影响；在发动机性能和软件标定数据一致的情况下，方案 1 和方案 2 的发动机后处理系统综合抗结晶能力计算结果分别为 28.5% 和 65.2%.

（3）尿素启喷温度标定、瞬态标定、发动机排放和排气温度特征均会对发动机后处理系统综合抗结晶能力带来影响.

参考文献：

[1] 王志坚，王晓华，郭圣刚，等. 满足重型柴油机超低排放法规的后处理技术现状与展望[J]. 环境工程，2020，38(9)：159-167.

[2] 钱枫，吕林，杨栋. 柴油机 SCR 系统排气管壁沉积物影响因素仿真[J]. 内燃机学报，2018，36(2)：144-152.

[3] 刘世宇，王国仰，谭致，等. 满足超低 NO_x 排放标准的紧凑耦合 SCR 系统控制策略研究[J]. 汽车工程，2020，42(12)：1630-1637，1694.

[4] Gao J，Tian G，Sorniotti A，et al. Review of thermal management of catalytic converters to decrease engine emissions during cold start and warm up[J]. Applied Thermal Engineering，2019，147：177-187.

[5] Smith H，Lauer T，Schimik V，et al. Evaluation and prediction of deposit severity in SCR systems[J]. SAE International Journal of Engines，2016，9(3)：1735-1750.

[6] 朱明健，胡振奇，夏少华，等. SCR 尿素结晶风险的评估与预测[J]. 内燃机学报，2020，38(1)：90-95.

[7] 张东剑，马其华，任洪娟，等. 喷射参数对柴油机 SCR 内部 NH_3 均匀性影响分析[J]. 汽车工程学报，2017，7(4)：299-305.

[8] 王天田，胡杰，万川，等. 国Ⅵ柴油机 SCR 系统尿素结晶风险评估方法初探[J]. 内燃机学报，2022，40(6)：552-560.

[9] Kitano T，Nishio J，Kurose R，et al. Evaporation and combustion of multi-component fuel droplets[J]. Fuel，2014，136：219-225.

[10] Birkhold F，Meingast U，Wassermann P，et al. Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNO$_x$-systems：Modeling of two-phase flow and spray/wall-interaction[C]// SAE Paper. Detroit，Michigan，USA，2006，2006-01-0643.

[11] Gan X，Yao D，Wu F，et al. Modeling and simulation of urea-water-solution droplet evaporation and thermolysis processes for SCR systems[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering，2016，24(8)：1065-1073.

[12] Yims D，Kims J，Bik J，et al. Decomposition of urea into NH_3 for the SCR process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2004，43(16)：4856-4863.

[13] 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.

[14] Strots V，Santhanam S，Adelman B，et al. Deposit formation in urea-SCR system[J]. SAE International-Journal of Fuels and Lubricants，2010，2(2)：283-289.