本文运用 FTA 失效树分析法，对柴油机 SCR 系统原方案进行仿真分析，寻找导致锈蚀的详细原因，并提出优化措施，最后对优化方案进行仿真分析。为混合器锈蚀问题优化设计提供指导，缩短问题整改周期，减少开发费用。

安徽江淮汽车集团股份有限公司 张超 蒋茂玎 王军

柴油机 SCR 系统锈蚀原因分析及优化措施

选择性还原催化器（简称“SCR”）技术是在催化酶促进下，通过尿素水溶液热分解产生的 NH_3 来还原排气中存在的 NO_x，产生 N_2 和水等无危害气体。随着柴油机国 VI 排放法规的日益严格，SCR 已经成为目前柴油机机外净化领域中的主流技术。尿素选择性催化还原技术具备耐久性好、降低 NO_X 效果好等优点，随着技术的不断发展，SCR 后处理系统将朝着高可靠性、高性能和低成本等目标发展。但是 SCR 后处理系统在运行过程中，也存在一些问题，如混合器锈蚀、尿素结晶等问题。

本文针对某柴油机尿素混合器锈蚀问题，利用 FTA 分析法找出主要原因，并利用仿真软件分析导致锈蚀的详细原因。为混合器锈蚀问题优化设计提供指导，缩短问题整改周期，减少开发费用。

FTA 分析

1.FTA 失效树

为了找到该柴油机 SCR 系统筒体锈蚀的原因，本次运用 FTA 失效树分析法（图 1）。导致 SCR 系统筒体锈蚀的原因有两大类：一是材料不耐尿素腐蚀，二是混合气腐蚀能力强。材料不耐尿素腐蚀的原因包括材料本身耐腐蚀能力差和焊接高温导致材质耐蚀性降低。造成混合气腐蚀能力强的原因如下：①燃油中硫含量过高，燃烧产物可能产生酸性物质加速混合器的腐蚀；②尿素喷射量大，腐蚀性产物堆积，尿素在 120 ℃左右热解后会生成酸性腐蚀性产物异氰酸酯（HNCO），导致混合器腐蚀；③混合器结构不合理，腐蚀性产物堆积；④喷嘴雾化效果不好，腐蚀性产物堆积。

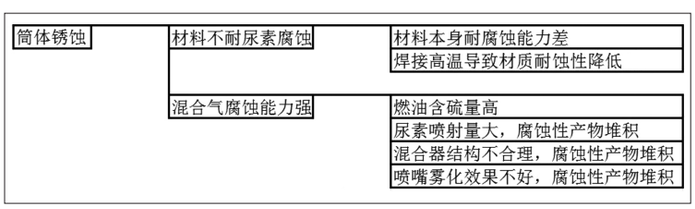


图 1 FTA 失效树

2. 材料不耐尿素腐蚀分析

（1）材料本身耐腐蚀能力差

出现锈蚀的筒体采用的是耐 HNCO 腐蚀性较好的 SUS441，对筒体材料进行检测，结果显示材料成分合格。检测结果见表 1。

（2）焊接高温导致材质耐腐蚀性降低

通过对比锈蚀图片，发现锈蚀严重的点不在焊缝周边，所以可以排除焊接高温导致材质耐腐蚀性降低。

3. 混合气腐蚀能力强

1）燃油含硫量高。进行燃油取样检测，实测

表 1 材料检测结果

序号	材料成分	SUS441 标准值（%）	测试结果（%）
1	C	≤ 0.03	0.002
2	Si	≤ 1.0	0.296
3	Mn	≤ 1.0	0.227
4	P	≤ 0.04	0.036
5	S	≤ 0.015	0.004
6	Cr	17.5 ～ 18.5	17.837
7	Ti	0.10 ～ 0.60	0.167
8	Nb	(3×C+0.3) ～ 1.00	0.478

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 44 2022/4/8 19:02:36

燃油含硫量 11.8 ×10^{-6}，基本满足国 VI 燃油标准。

2）尿素喷射量大，腐蚀性产物堆积。故障件发动机按排放测试循环持续进行 10 个循环测试，记录尿素喷射量和氨泄漏的情况，无氨泄漏发生，确认尿素没有多喷。

3）混合器结构不合理，腐蚀性产物堆积。混合器拆解后（图 2），锈蚀区域有被气流冲刷的痕迹，下文将重点针对这方面进行分析。

4）喷嘴雾化效果不好，腐蚀性产物堆积。对喷嘴进行了动作测试，尿素喷射状态正常，雾化状态良好。

原方案尿素喷射 CFD 分析

1. 锈蚀机理分析

柴油机排气时尿素水溶液经喷嘴喷入排气管内，尿素水溶液吸收排气中的热量，进行蒸发作用，尿素水溶液由液态变成固态。尿素（固）在高温废气中，尿素（固）吸热发生热解反应，生成 NH_3 和 HNCO（异氰酸）。HNCO 在催化剂的作用下与水发生水解化学反应，生成 NH_3 和 CO_2。其中，热解反应生成的 HNCO 具有腐蚀性。HNCO 在排气管路中，如果在管道某处长时间聚集，会导致管路结构锈蚀，严重的会导致锈穿。

2. 喷雾弹喷雾模型标定

（1）喷雾弹模型标定目的

对于柴油机 SCR 系统来说，尿素喷雾的质量直接影响 NH_3 浓度分布和 NO_X 的转换效率，这将非常直观反映尿素水溶液喷射过程计算的精确性。

图 2 混合器拆解图

喷雾弹喷雾模型标定就是利用已知的喷射器几何结构参数和测量结果，标定相应 CFD 模型中未知的性能结构参数、子模型参数的过程，喷雾弹喷雾模型标定的目的在于通过必要的参数修正，使得一定时间段内 CFD 模型计算得到的喷雾发展过程与实际情况相符，使该模型能够支持后续的尿素水溶液喷射过程 CFD 分析。

（2）模型搭建

建立的喷雾弹网格如图 3 所示。喷雾弹中实验条件如下：喷雾弹中的背压 1 bar（1 bar=100 kPa), 喷射弹中的温度为常温。该柴油机 SCR 系统使用的是 32.5% 的尿素水溶液，其成分见表 2。

（3）标定结果

表 2 尿素成分

液体成分	质量分数（%）
H_2O	67.500
HNCO	23.284
NH_3	9.216

本次喷雾弹喷雾标定的两个目标参数分别是 *D32* 和喷雾轮廓。*D32* 直径：假设某一区域内直径为 *D* 的粒子数目为 *N*，则该区域粒子的 *D32* 直径由以下公式计算得到，*D32* 计算结果见表 3。

$$D32=\frac{\int_{\min}^{\max}D^3dN}{\int_{\min}^{\max}D^2dN}$$

表 3 D32 计算结果

参数	输入值 / μm	模拟值 / μm	偏差率（%）
D32	100	100.96	<1

喷雾计算得到的粒子轮廓如图 4 所示，通过测量，其粒子轮廓与实际轮廓数据一致。

3. 尿素水溶液的喷射仿真

尿素水溶液喷射计算主要仿真内容如下：①对选择性催化转化器（SCR）的速度均匀性以及 NH_3 等物质的分布均匀性进行计算分析；②对尿素水溶液的喷射过程进行模拟和研究，包括热解、水解和液滴的蒸发过程；③对壁面液膜（尿素水溶液）的形成和

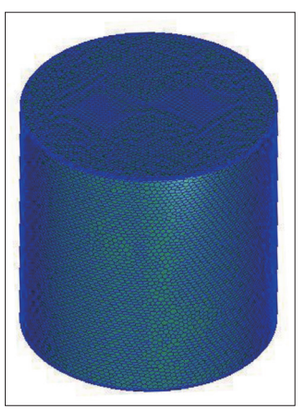
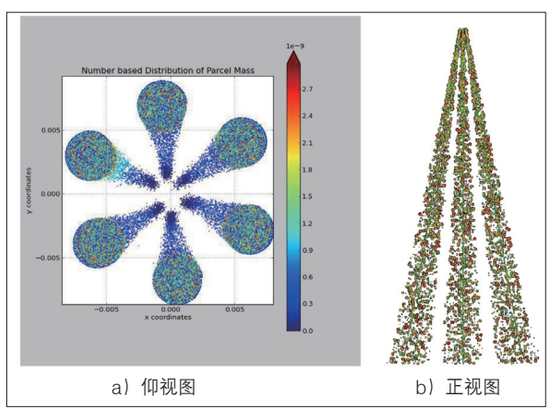


图 3 喷雾弹网格图



a）仰视图　　b）正视图

图 4 喷雾计算轮廓

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 45 2022/4/8 19:02:37

发展进行模拟和研究，包括液膜出现的位置、厚度，以及它与空气、壁面的传热过程和蒸发过程等；④对壁面异氰酸的形成和发展进行模拟研究。

（1）模型搭建

本次计算的模型如图 5a 所示，后处理系统为 DOC+DPF+SCR，尿素水溶液混合器位于 DPF 之后、SCR 之前，结构如图 5b 所示。

（2）HNCO 浓度分布结果

尿素喷入排气管路中，经蒸发热解生成 HNCO。在小流量、大流量两种工况下，在混合气壁面下侧均存在大量 HNCO 聚集，这与实物拆解后的结果一致。HNCO 在排气管路中，如果在管道某处长时间聚集，会导致管路结构锈蚀，严重的会导致锈穿。

优化方案尿素喷射 CFD 分析

为了降低 HNCO 对管道的锈蚀，需要对混合器结构进行优化。同时混合器优化要坚持两个原则：①由于混合器已经量产，结构上不易进行大的改变；②结构优化后，SCR 系统的结晶风险不能增加，气流速度均匀性和 NH_3 浓度均匀性不能降低较多。

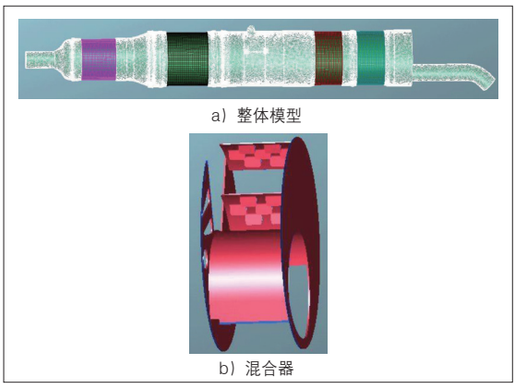


图 5 SCR 系统网格图

综合以上内容，在混合器下侧开槽，开槽的高度为 3 mm，范围为 50°，如图 6 所示。

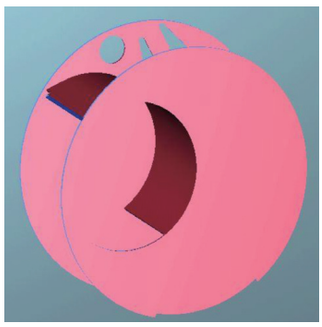


图 6 优化方案混合器结构

1.HNCO 浓度分布结果

对优化方案的后处理系统进行尿素水溶液 CFD 分析，计算结果中 HNCO 分布如图 7 所示。两种工况下在开槽处原来 HNCO 聚集浓度很高，开槽后 HNCO 从槽流出，没有聚集，槽的四周 HNCO 浓度也有所降低。另外，大流量下在混合器左侧 HNCO 浓度也大幅降低。由于 HNCO 是尿素转化为 NH_3 过程的中间产物，所以在混合器壁面上存在 HNCO 是正常现象，只要能够减小其聚集的浓度，后期没有发生锈蚀问题即可。通过优化方案的计算结果可以看出，已经达到了混合器壁面 HNCO 浓度降低的目的，说明优化方案初步结果是可行的。

2. 液膜分布结果

优化方案混合器液膜质量变化如图 8 所示。尿素水溶液仿真分析共进行 4 个喷射脉冲的计算。随着尿素第一次喷入排气系统中，部分喷雾粒子碰到混合器表面，其液膜质量不断增加，当第一个喷射脉冲结束后，由于液膜的不断蒸发，液膜质量不断减小，但是由于形成的液膜较多，蒸发速度较慢，在下一次喷射脉冲开始前混合器上仍然有液膜的存在，因此液膜出现不断累积的趋势。以此类推，到第 4 个喷射脉冲结束后，混合器表面累积了一定的液膜。两种工况下，混合器优化方案表面液膜质量小于混合器原方案表面液膜质量。说明混合器优化方案的尿素结晶风险减小。

3. 气流速度分布均匀性和 NH_3 浓度分布均匀性

混合器优化方案的气流速度均匀性和 NH_3 浓度均匀性不能大幅降低，否则会导致排放变差。经过对比，混合器优化方案 SCR 内部载体气流速度均匀性均稍大于混合器原方案 SCR 内部载体气流速度均匀性。这是因

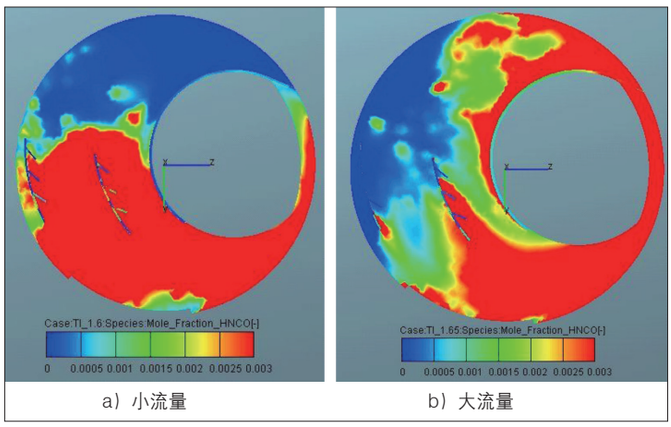


图 7 优化方案 HNCO 浓度分布

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 46 2022/4/8 19:02:37

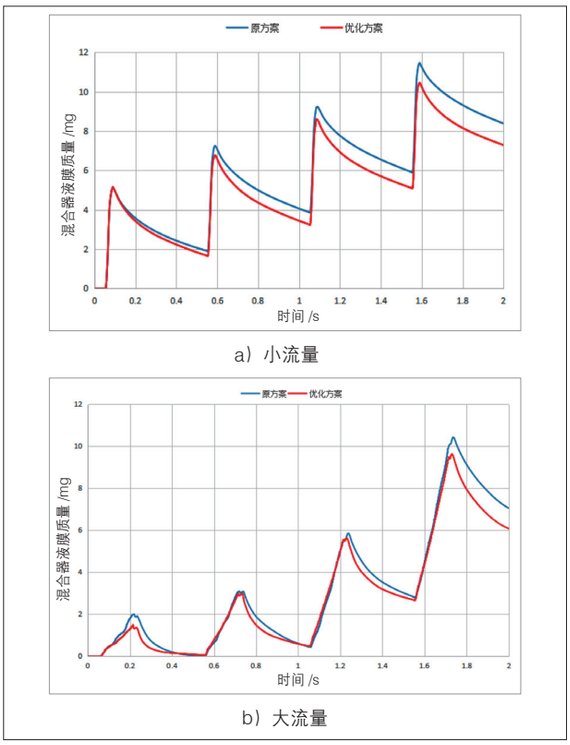


图 8 优化方案混合器液膜质量变化

为少部分废气经过槽流向 SCR 前，与混合器流出的废气交汇后，气流进入载体更均匀。

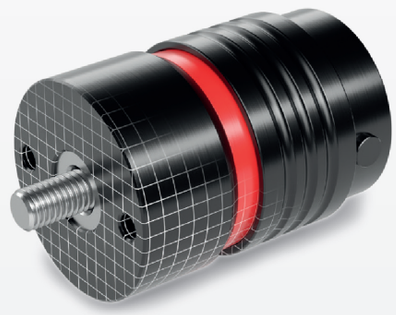
小流量工况下，混合器优化方案 SCR 内部载体 NH_3 浓度均匀性均稍小于混合器原方案 NH_3 浓度均匀性。这是由于 NH_3 在混合器内与废气混合均匀，而经槽流出的 NH_3，未与废气充分混合，导致 SCR 载体内部的 NH_3 浓度均匀性稍变差。大流量工况下，每个脉冲前半段，NH_3 浓度高，混合器优化方案 SCR 内部载体 NH_3 浓度均匀性均稍小于混合器原方案 NH_3 浓度均匀性。每个脉冲后半段，NH_3 浓度低，混合器优化方案 SCR 内部载体 NH_3 浓度均匀性均稍大于混合器原方案 NH_3 浓度均匀性。

结论

针对某柴油机 SCR 系统筒体锈蚀的原因，本文运用 FTA 失效树分析法，找出锈蚀的原因是柴油机 SCR 系统混合器结构不合理。对柴油机 SCR 系统进行仿真分析，提出优化措施并对优化方案进行仿真分析。得出以下结论：①原方案混合器壁面 HNCO 聚集是导致 SCR 系统筒体锈蚀的主要原因；②优化方案混合器壁面 HNCO 浓度有一定程度降低，并且优化方案的尿素结晶风险、SCR 载体内部气流速度均匀性、NH_3 浓度均匀性都没有明显变差；③为了验证仿真结果的准确性，下一步将对优化方案混合器开展耐久性试验。 AI

elesa+Ganter

快速联轴器
快速连接，精密准确



快速联轴器被经常用于需要快速安装和拆卸的舞台设备上。

- 只需轻轻一击，就能快速和安全地连接到机器或设备上。
- 减少安装设备和生产线所需的时间。
- 优质的材料和表面处理能有效地防止腐蚀。
- 轴向连接载荷可达35KN。其他材料和颜色的个性化组合也可以根据客户的要求进行定制。

附件：

GN 1050.1

GN 1050.2

电话：021-34635990
elesa-ganter.com.cn

ELESA+GANTER 是一家全球性的销售合资企业，为机械行业提供广泛的标准机械元件产品系列。ELESA+GANTER以独特的设计及精湛工艺确保产品质量可靠，功能完善。

DESIGNED
FOR ENGINEERING

广告

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 47 2022/4/8 19:02:38