

基于CONVERGE水套设计及尾气后处理的优化仿真分析

艾迪捷信息科技有限公司(上海)有限公司

CONVERGE小组

2018年7月

·所有的公司名称、产品名称、服务产品名称，都是相关公司的商标、注册商标或服务产品的标志。
·本资料含有保密信息，没有本公司许可，严禁使用、散发、复制本资料的纸质版或电子版信息。

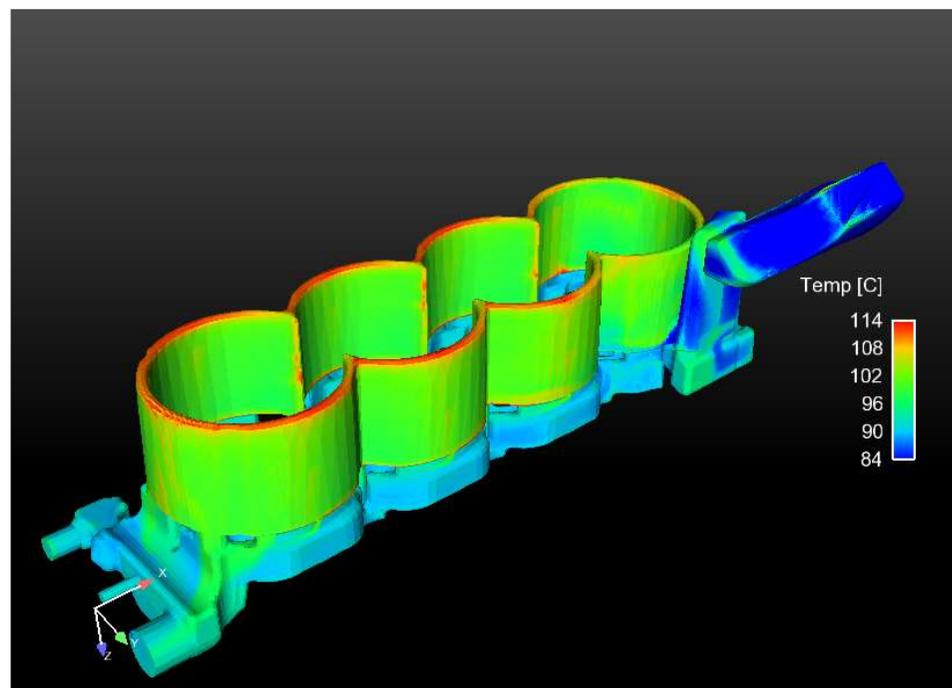


主题

- 水套设计分析
- 尾气后处理仿真分析
- 总结

水套设计分析

- 背景
- CONVERGE应对策略
 - 稳态求解器介绍
- 模型设定
- 结果展示



背景

- 为了保证发动机工作可靠性，降低其热负荷，主要依靠冷却系统来加强其冷却散热，保证自身工作过程中得到适度冷却，将发动机传出来的热及时散发到周围环境中去
- 完善的冷却系统可以使发动机在各种不同环境温度 and 运转工况下具有最佳的热状态，既不过热也不过冷
- 水冷式冷却系统是日前世界上使用最广泛的冷却系统，普遍用于汽车、农机和工程机械等

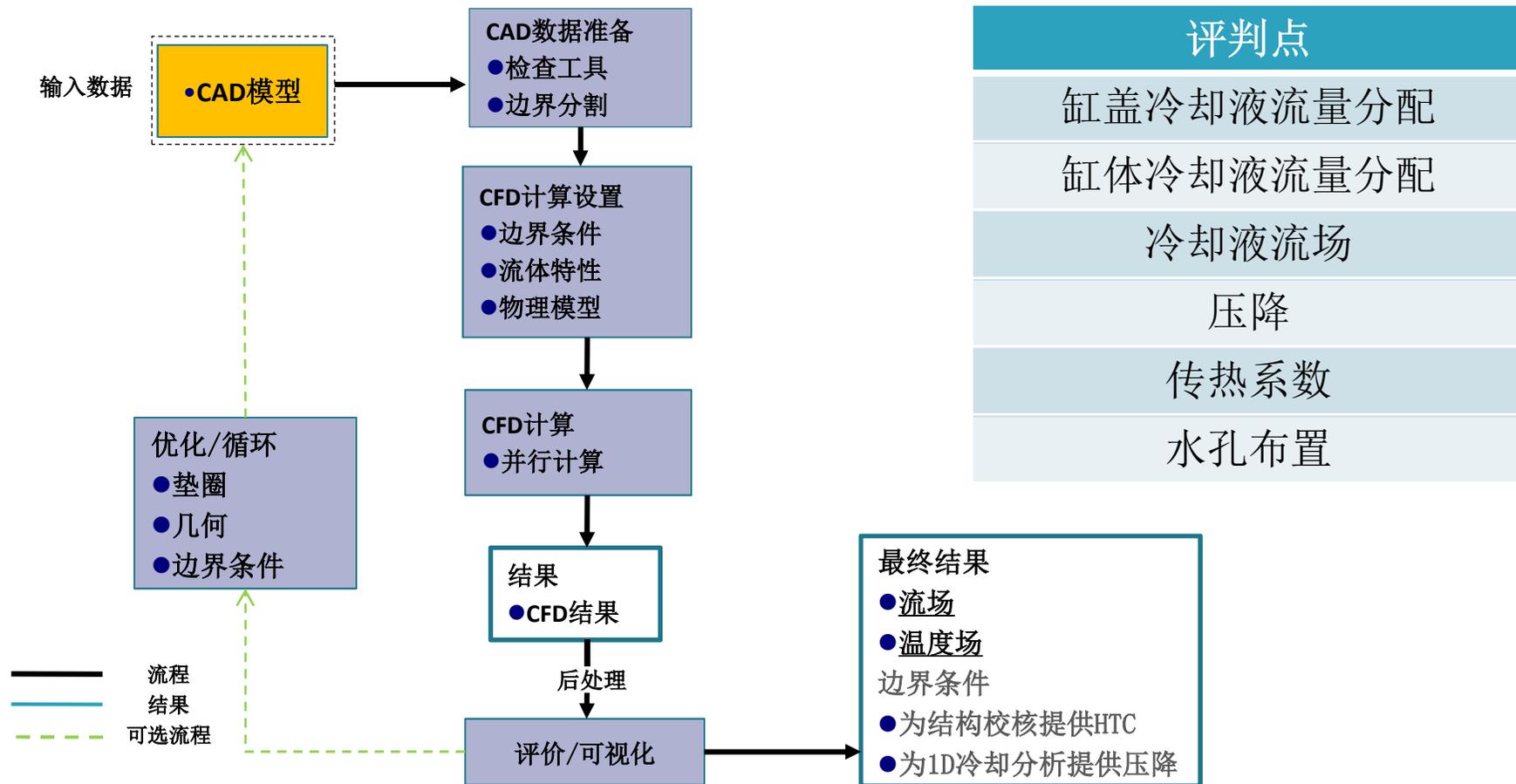
背景

- 水套的结构设计考虑对流动和传热的影响
 - 合理布置水道和组织冷却水流，避免流动死区
 - 加强局部高温区域的冷却
- 缸盖水套
 - 温度分布不均匀，传热方式因区域而有所不同
 - 加强对鼻梁区和喷油器等高温区域冷却
 - 降低整个缸盖的温度水平，均匀分布
- 缸体水套
 - 保证水流速度一致性，冷却均匀性
 - 保证上半部分热负荷较高区域的冷却

CFD技术相结合

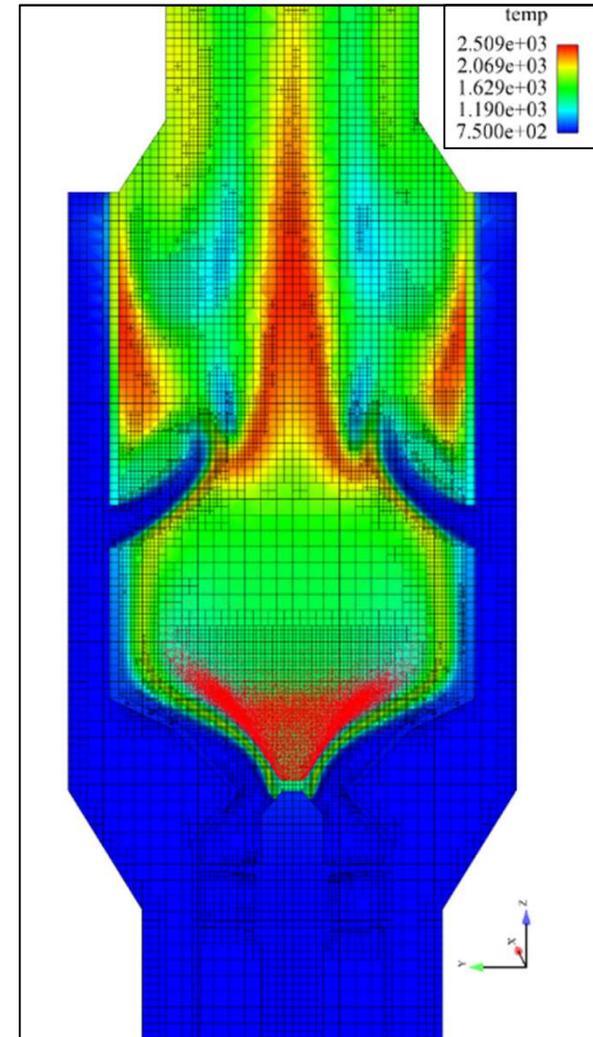
CONVERGE应对策略

■ CONVERGE仿真流程及评价手段



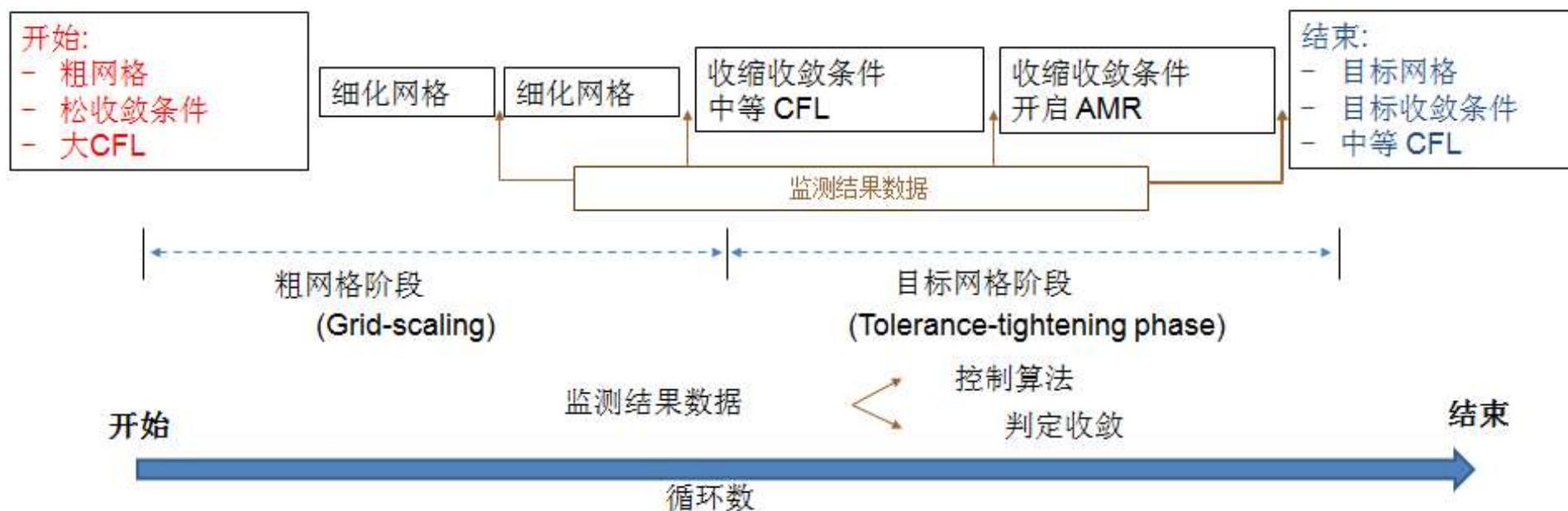
稳态求解器介绍

- 基于密度的求解器
- 采用大CFL数时间推进来获得稳态结果
 - non-reacting flows : 最大CFL= 20-40
 - reacting flows: 最大CFL = 10-20
- 同时配合关键结果参数监控辅助稳态收敛判断
- 自动控制求解参数设定
 - CFL number (用户指定最大值), Tolerances
- 自动控制 gridscaling 和AMR起始时间
- 计算精度:
 - 大多数case采用二阶精度计算;
 - 少数case结合一阶迎风差分
- 良好的计算稳健性和稳定性



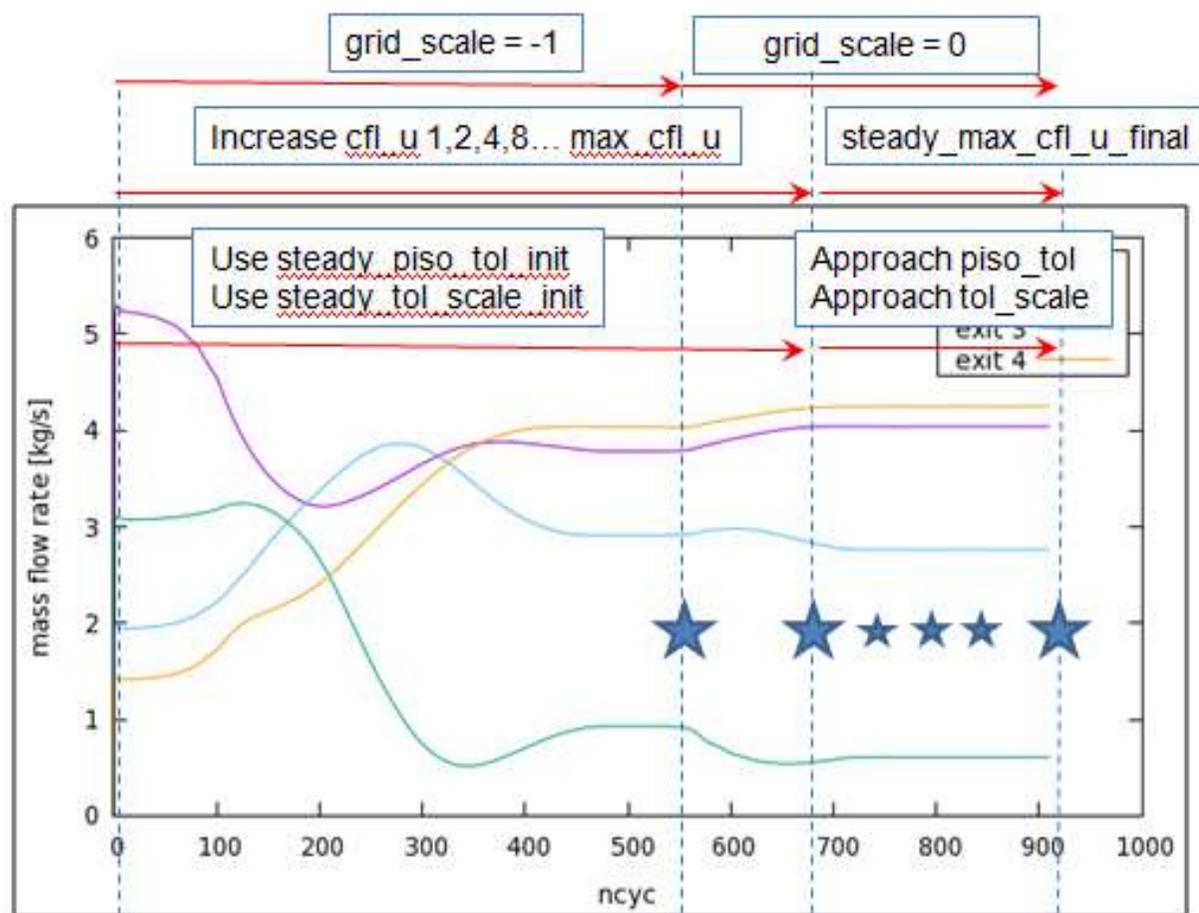
稳态求解器介绍

■ 稳态求解器逻辑



稳态求解器介绍

例子:



★
达到稳态 (由稳态监测
决定)

稳态求解器介绍：设定方法

■ Max_cfl:

瞬态计算典型设置

Simulation time parameters

General Misc.

Start time: -440.0 deg.

End time: from GT-SUITE 120.0 deg.

Time-step selection: Use variable time-step algorithm

Fixed time-step: 1e-06 s

Initial time-step: 5e-07 s

Minimum time-step: 1e-08 s Use file

Maximum time-step: 2.5e-05 s Use file

Maximum convection CFL limit: 1.0 Use file

Maximum diffusion CFL limit: 2.0 Use file

Maximum Mach CFL limit: 50.0 Use file

Droplet motion time-step control multiple: 1.5

Drop evaporation time-step control multiple: 9999.0

Chemical time-step control multiple: 0.5

Collision grid time-step multiple: 1.0

Moving boundary time-step multiple: 0.5

稳态计算典型设置

Simulation time parameters

General Misc.

Start time: 0.0 cyc.

End time: from GT-SUITE 10000.0 cyc.

Time-step selection: Use variable time-step algorithm

Fixed time-step: 1e-08 s

Initial time-step: 1e-05 s

Minimum time-step: 1e-06 s Use file

Maximum time-step: 0.001 s Use file

Maximum convection CFL limit: 20.0 Use file

Maximum diffusion CFL limit: 100.0 Use file

Maximum Mach CFL limit: 1000.0 Use file

Droplet motion time-step control multiple: 1.5

Drop evaporation time-step control multiple: 9999.0

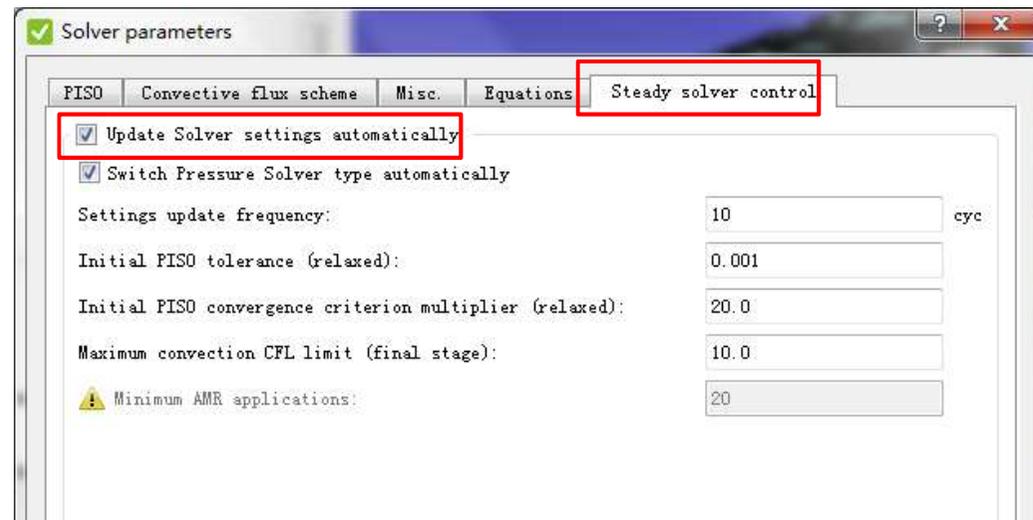
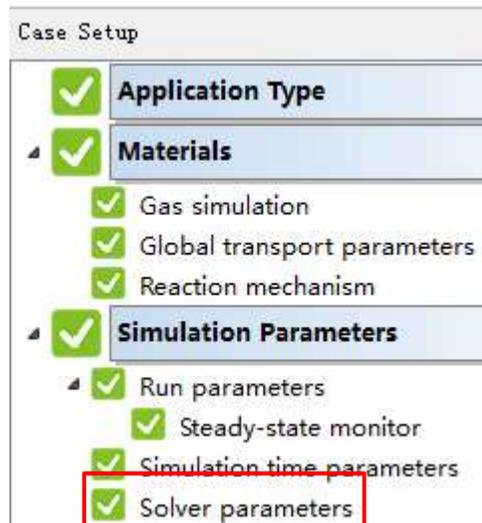
Chemical time-step control multiple: 0.5

Collision grid time-step multiple: 1.0

Moving boundary time-step multiple: 0.5

稳态求解器介绍：设定方法

- Steady solver control:
 - solver settings automatically = ON
 - 其它设定：一般可保持默认值



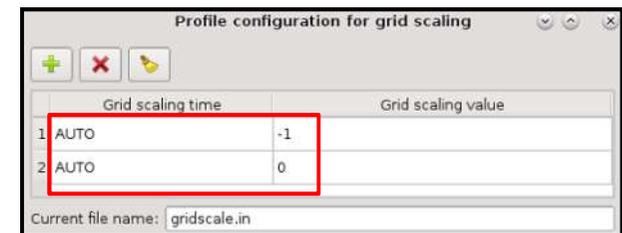
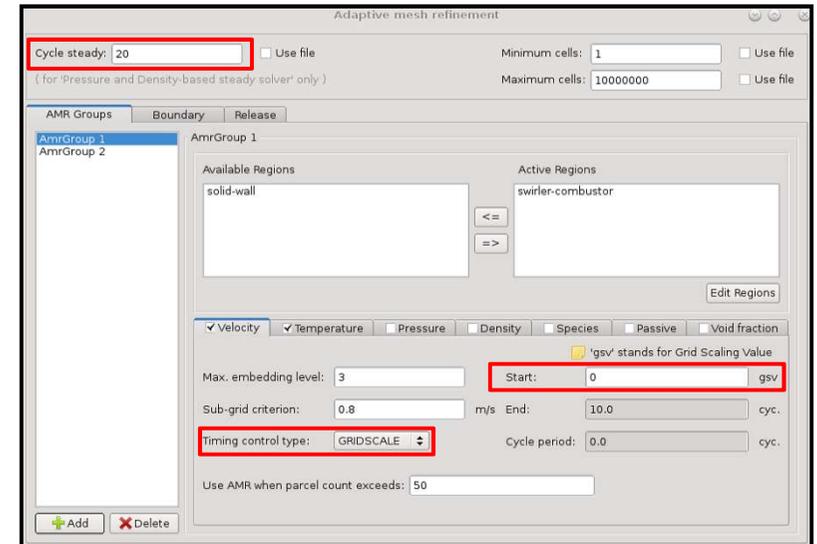
稳态求解器介绍：设定方法

■ AMR

- Cycle steady = 20-100
 - 有火焰传播时用小的值
 - 用小的值的时候，Steady solver control 中的Minimum AMR需要增加
- 当用户自定义gridscale值达到时，AMR自动开启
 - Timing control: GRIDSCALE
 - Start time的含义变为GSV (gridscale Value)
 - 应设为 0 GSV (或最终的grid-scale值)

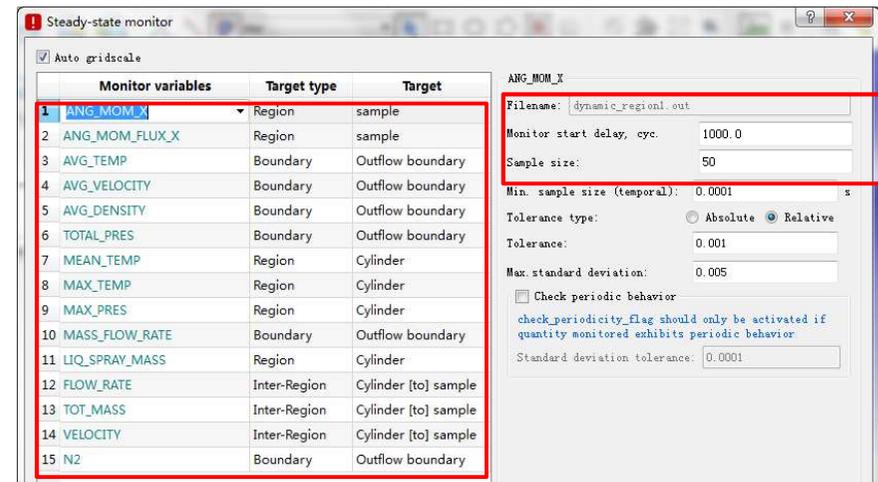
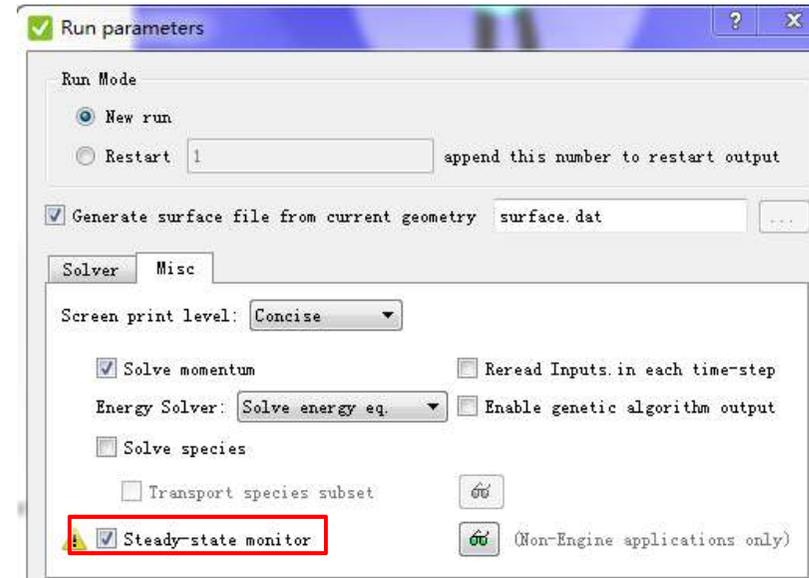
■ Gridscaling

- 从粗网格过渡到细网格
- 起始时间采用AUTO方式，由稳态监控决定启用时间



稳态求解器介绍：设定方法

- 关键参数监测
 - 压力，温度，速度，密度（平均值，最大值）
 - 流量，固体温度
 - 组分
 - 角动量
- 目标类型
 - Boundary, region, Inter-region
- Monitor start delay: 延迟采样步数
- Sample size: 数据段采样长度



稳态求解器介绍：设定方法

■ Tolerance type

■ Absolute

$$M_{diff}^{absolute} = |M_2 - M_1|$$

where, M_1, M_2 are arithmetic means

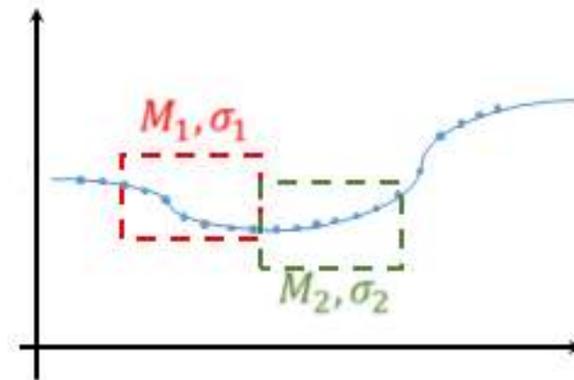
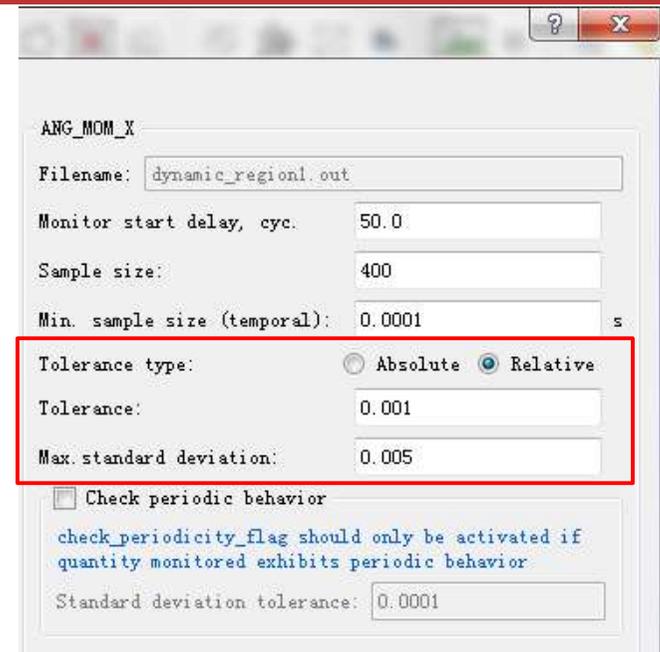
■ Relative

$$M_{diff}^{relative} = \frac{|M_2 - M_1|}{((M_1 + M_2)/2)}$$

■ Max. stand deviation: 判断第二组数据的方差

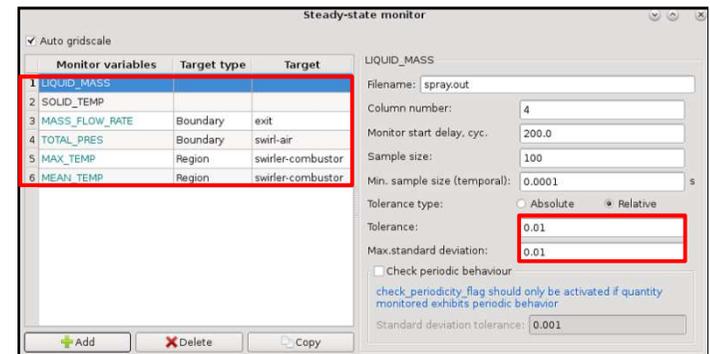
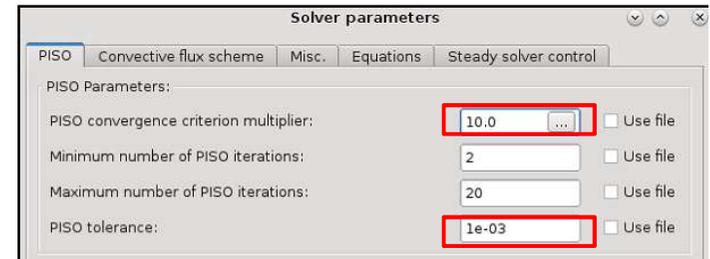
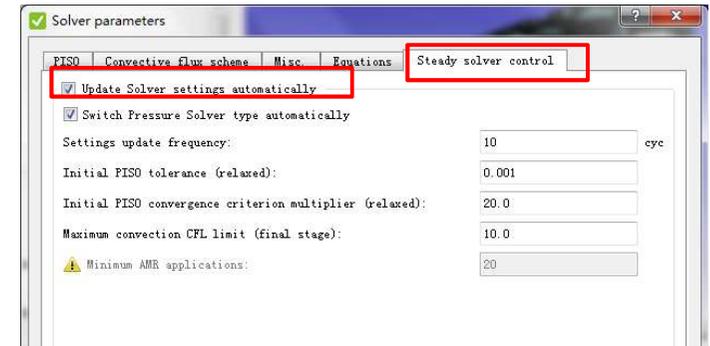
$$\sigma_2^{relative} = \frac{\sigma_2}{M_2}$$

■ 收敛条件：两者都小于用户定义值



稳态求解器介绍：收敛判据

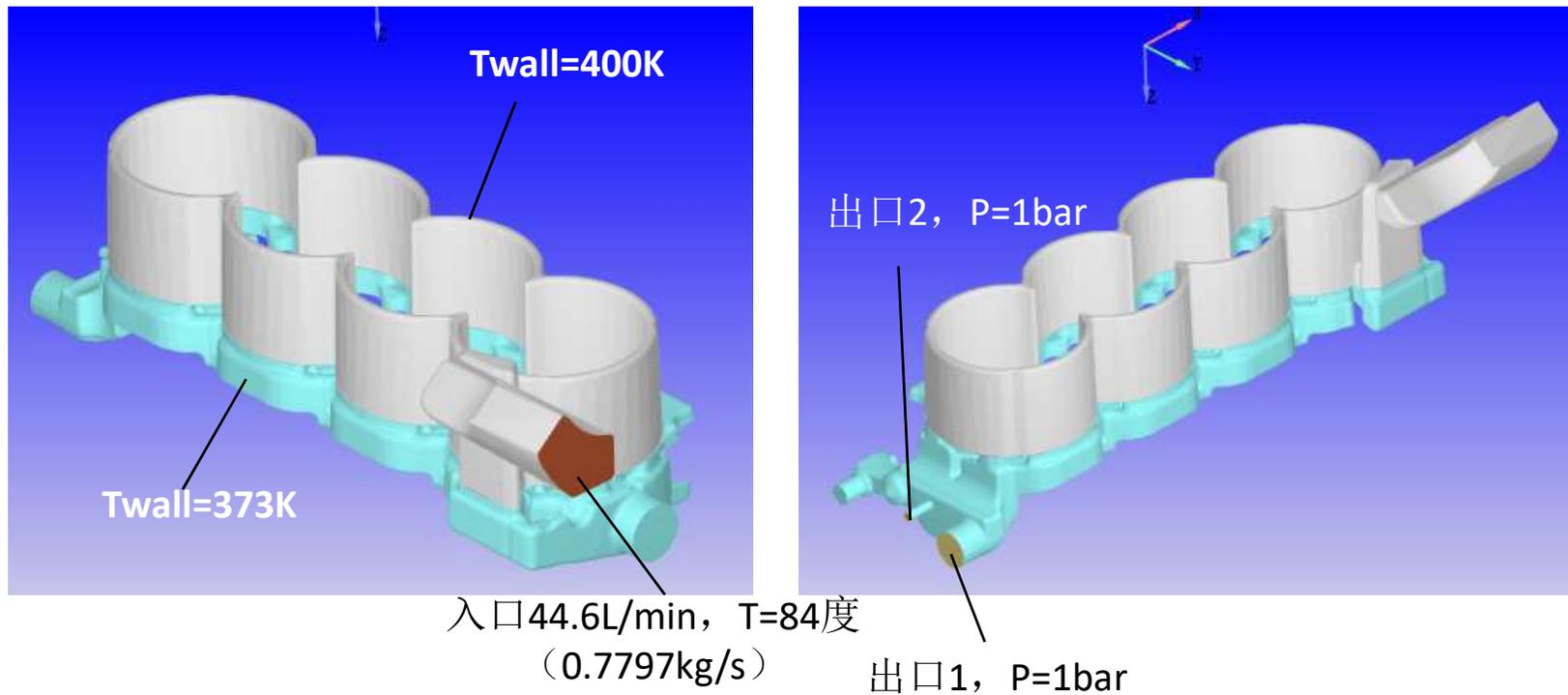
- 如果计算cycle数达到设定值，或以下条件都满足时认为计算收敛
 - “steady-state monitor” 中的所有判据均满足
 - solver.in 中的PISO目标值 (piso_tol and tol_scale) 达到
 - Gridscale 达到最终值
 - $\text{Max_cfl_u} = \text{steady_max_cfl_u_final}$
 - 如果使用AMR
 - 达到“Minimum AMR applications”
 - 从一个AMR阶段到下一个，网格数变化 < 10%



案例演示

模型设定

■ 某直列四缸机水套:



模型设定

- 材料: H2O_Water
- 求解参数控制:
 - Max_cfl_u=20
 - Max_cfl_nu=100
 - Max_cfl_mach=1000
 - 最大求解步数=10000
 - 最大时间步长: 0.01s
 - 自动更新稳态求解设定: 打开
 - Steady_max_cfl_u_final=10
- 流场参数监控
 - 出口1流量
 - 出口1温度
 - 入口压力
- 边界条件:
 - 入口: 0.7797kg/s, 357.15K(84C)
 - 出口: 101325Pa
 - 缸盖和管路: 373K
 - 缸壁: 400K

■ 网格设定:

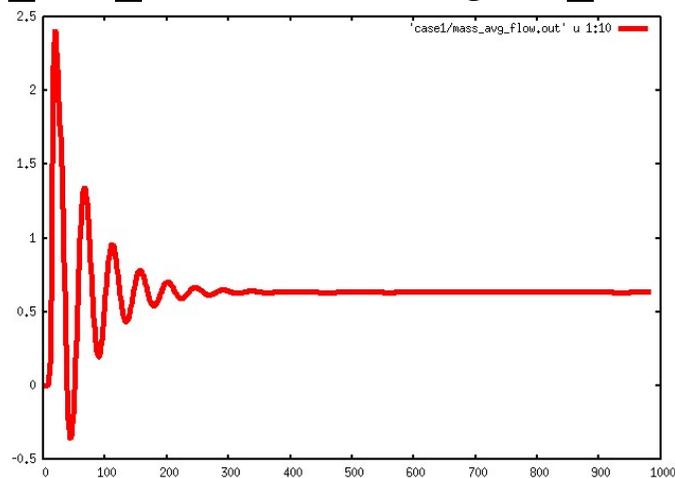
- Base size=0.004
- 所有壁面边界加密: 2级*2层
- Grid scale

	Grid scaling time	Grid scaling value
1	AUTO	-1
2	AUTO	0

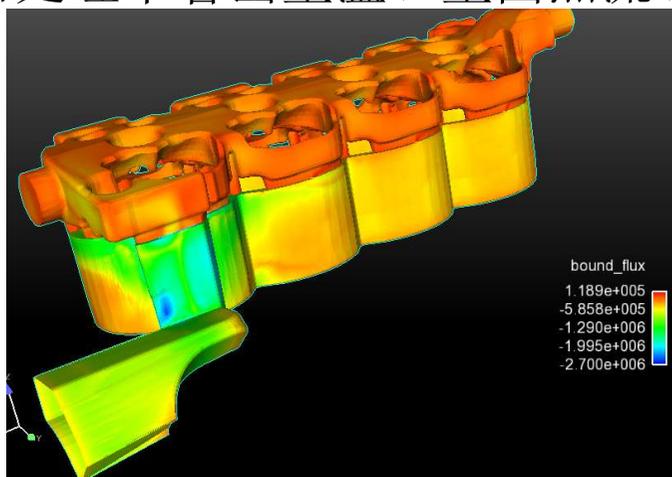
- AMR (可选): velocity, 3级, 时间控制: gridscale, 0 gsv, 最大网格数200~300万。

结果展示

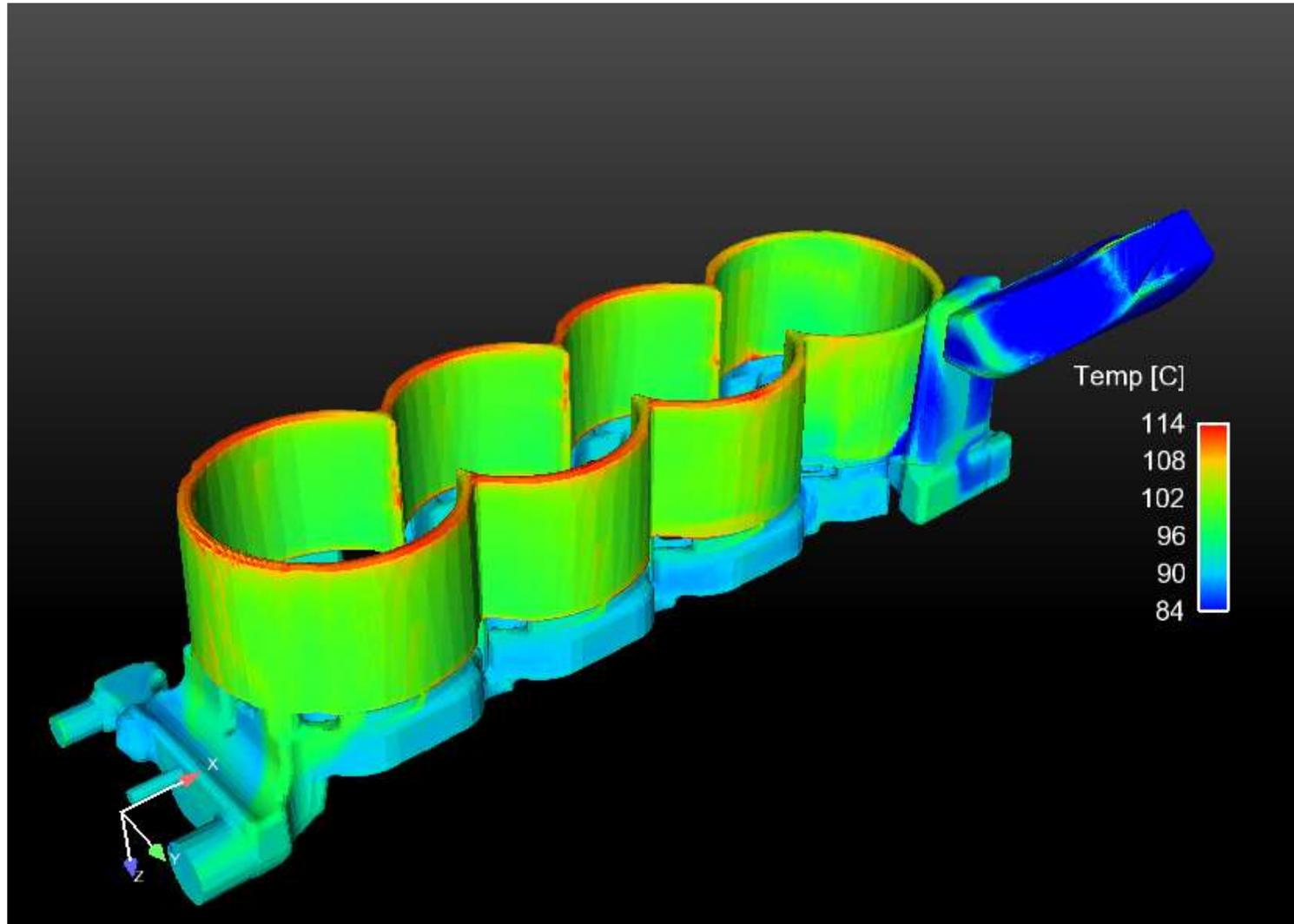
- 可以在mass_ave_flow.out, region_flow.out中得到各种流动参数。



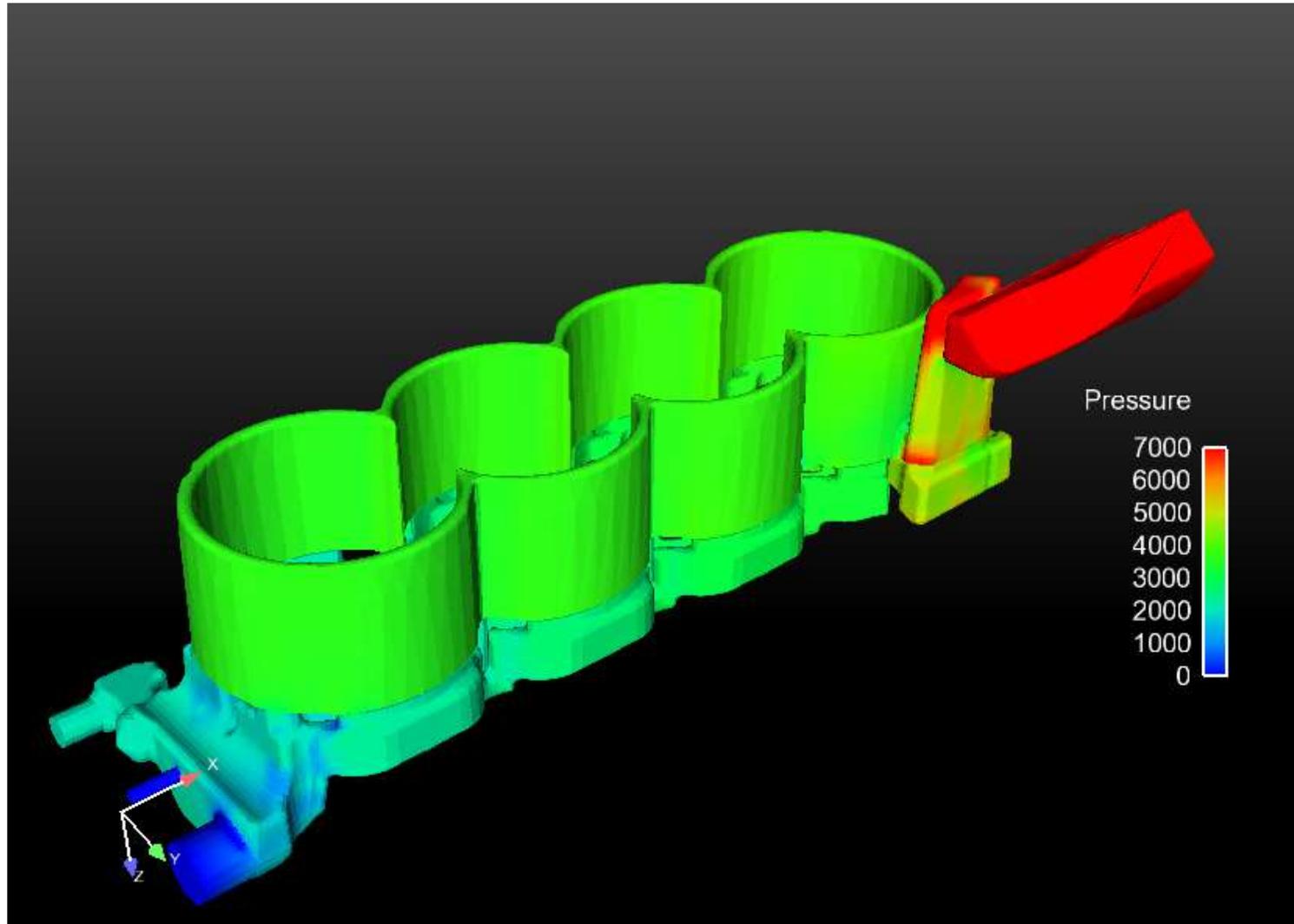
- 可以在3维后处理中看出壁温、壁面热流、HTC、压力等结果



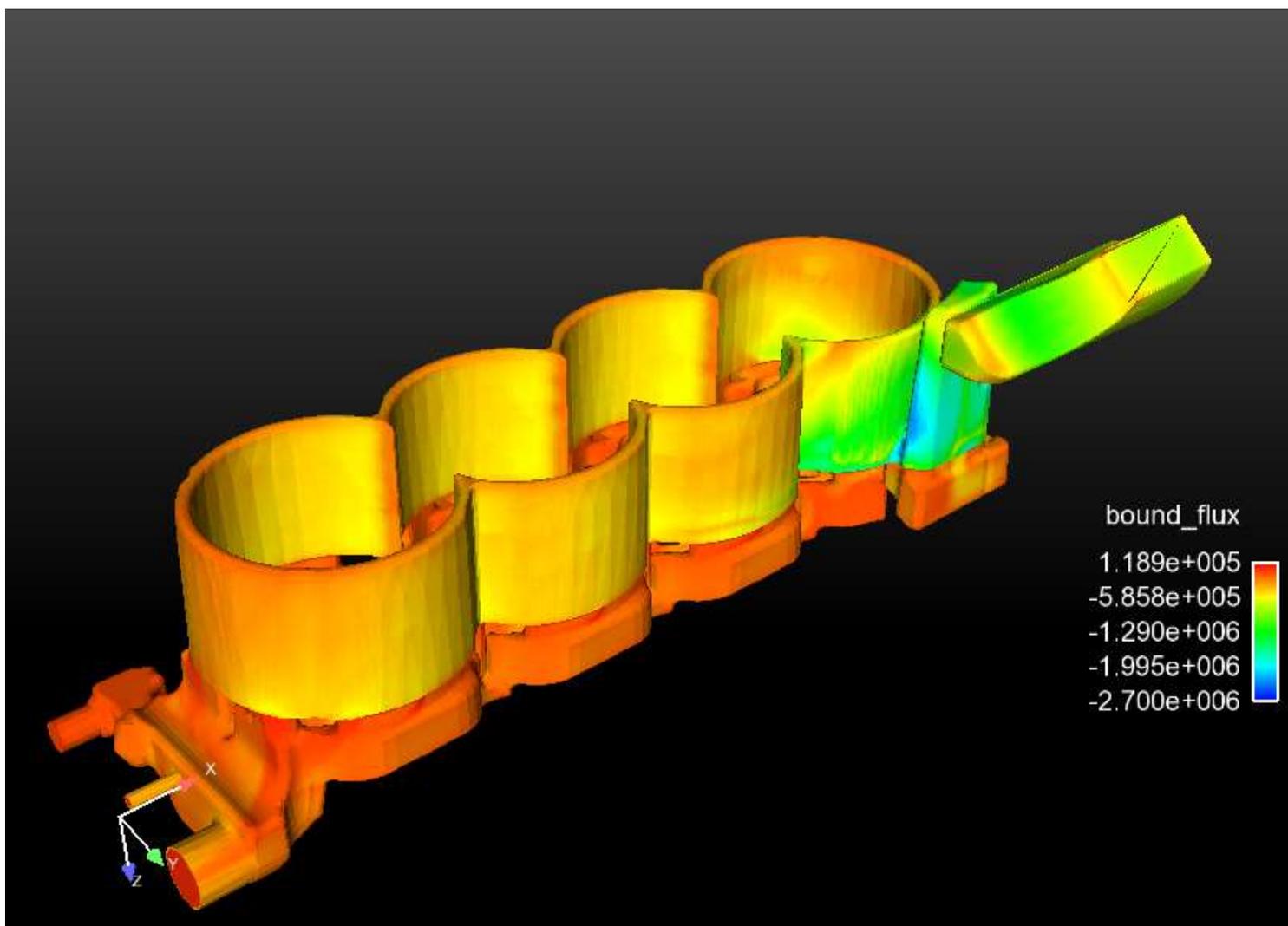
结果展示:温度



结果展示: 压力

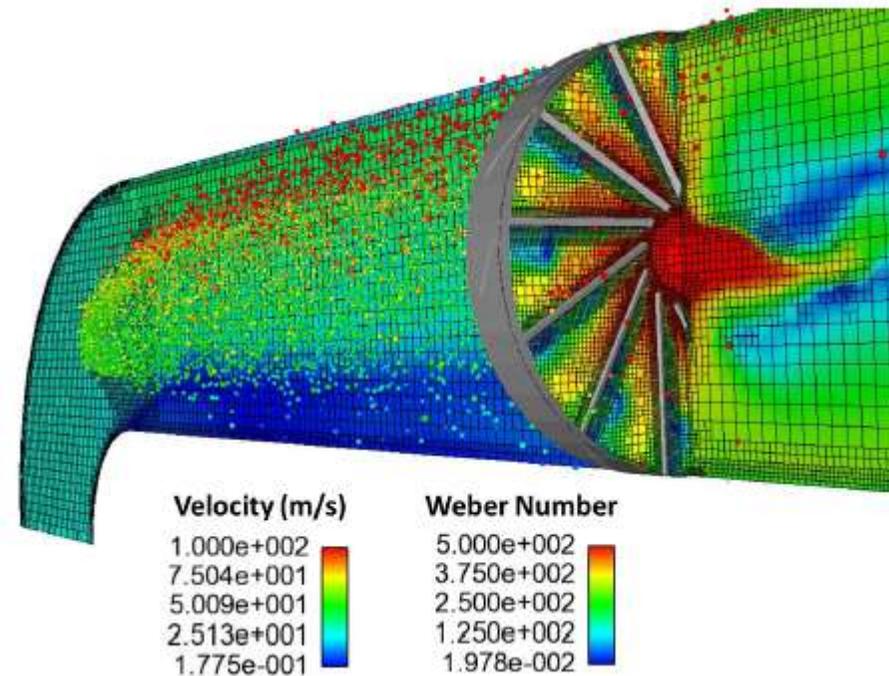


结果展示：热流



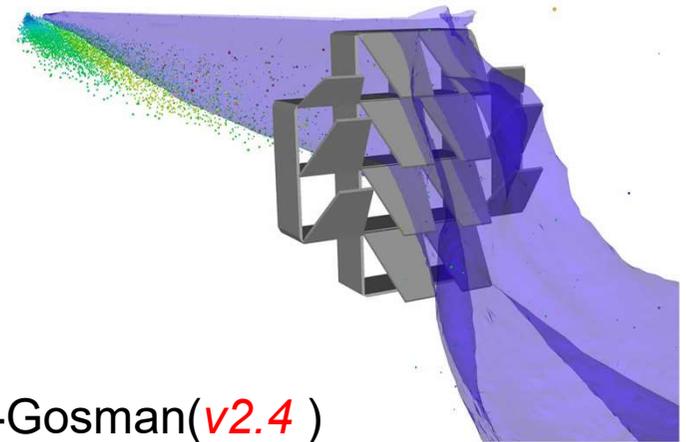
尾气后处理仿真分析

- SCR系统设计需求
- CONVERGE应对策略
- 案例介绍
- 模型演示
- 总结



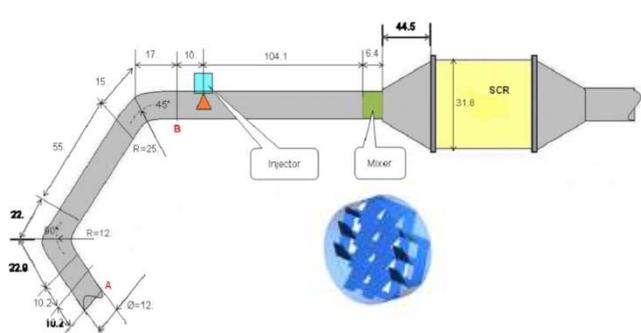
CONVERGE应对策略（总述）

- 复杂几何处理功能
 - Studio中的表面处理功能持续增强
- 求解速度显著提升
 - 瞬态大时间步长算法(high CFL)开发
 - 稳态求解器(v2.4)
- 瞬态喷雾和液膜功能增强
 - 新增撞壁模型: Kuhnke, Wruck(v2.4), Bai-Gosman(v2.4)
 - 结合supercycling的CHT可更准确计算壁面温度
- 新增表面化学反应计算功能(v2.4)
- 新增Molten solid尿素分解模型(v2.3)
- 新增尿素分解详细化学反应模型和尿素沉积计算功能(v2.4)

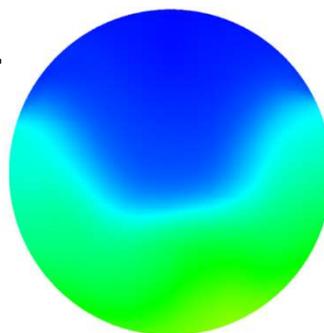


快速URANS算法 (*High CFL*)

- 快速URANS瞬态算法采用大时间步长推进 (High CFL)
 - 时间步长越大, 扩散效应越显著, 越接近稳态
 - 从 CONVERGE v2.3 起支持high CFL计算

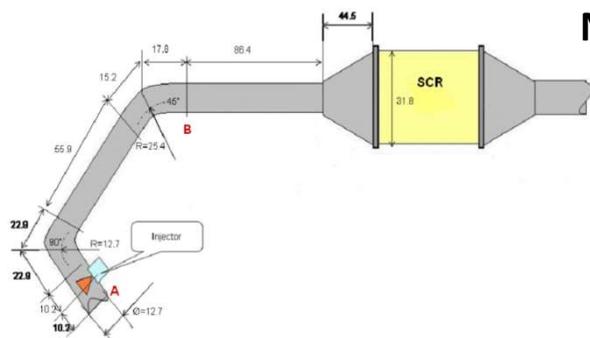


Mixer

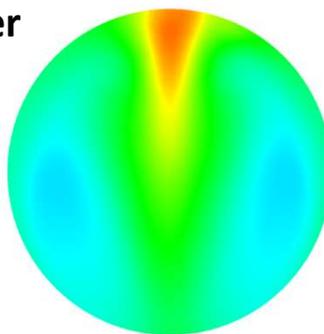


Uniformity Index (UI)

CFL = 1 CFL = 10
UI = 0.74 UI = 0.75



No-Mixer



CFL = 1 CFL=10
UI = 0.78 UI=0.79

快速URANS算法速度提高7倍, 但UI和NH3转换效率变化极小

Z. Abadin et al, "3D-Semi 1D Coupling for a Complete Simulation of an SCR System," SAE 13PFL-0137

表面化学反应

- 在CONVERGE 2.4引入
- 采用SAGE作为求解器
 - 具有良好的稳定性和精度
- 支持两种类型表面：
 - 多孔介质区壁面
 - 普通静止壁面
- 可采用多孔介质+表面化学反应模拟以下各种设备
 - SCR, LNT, DOC, AOC, TWC, ASC
 - 柴油机颗粒捕集器 (DFP 和 SDPF)
- 提供SCR NOx reduction Steady-State solver 案例

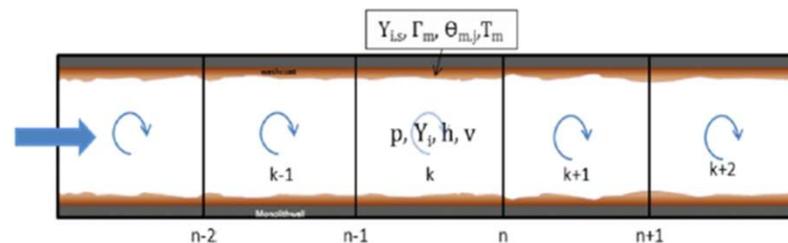


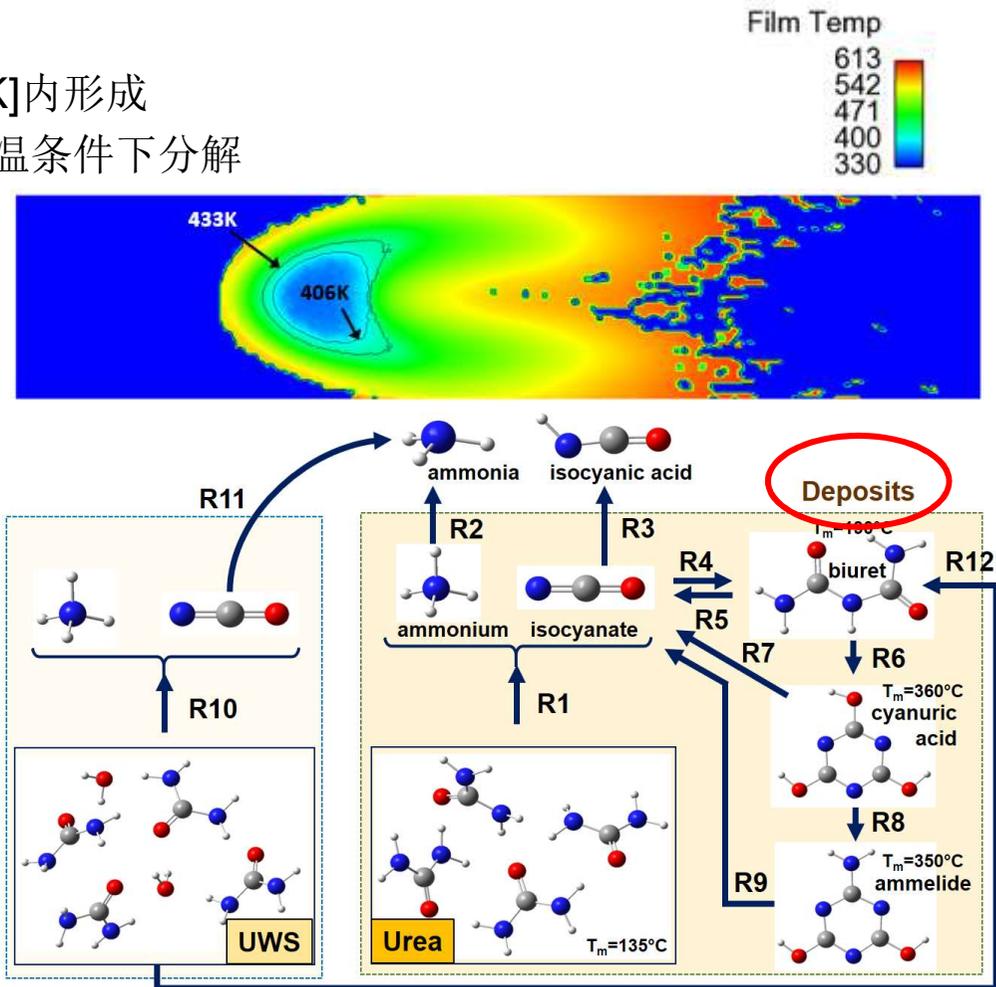
Figure 1. Illustration of channel model

尿素结晶模拟和详细分解反应机理

- 结晶沉积物为尿素分解的副产品
 - 仅在很窄的温度范围[406K,433K]内形成
 - **CYA** 和**Ammelide**(酰胺) 只在高温条件下分解
 - 需配合尿素详细反应模型计算

- 由**IFPEN**（法国石油与新能源研究院）与**CSI**联合开发
 - 借助**IFPEN**丰富的模型开发经验和模型验证资源
 - **IFPEN**和**CSI**共同完成模型开发和验证工作

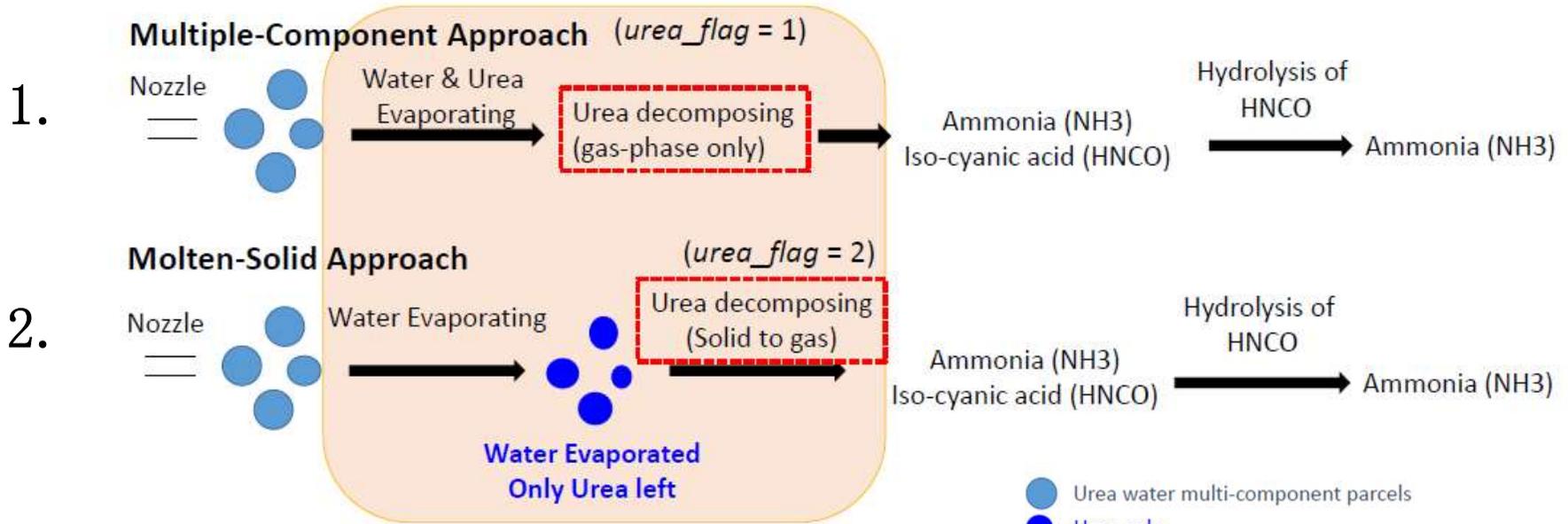
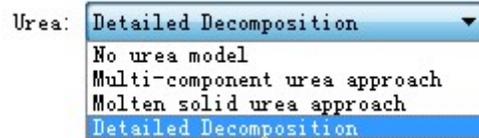
- 液膜温度的准确计算非常关键
 - **V2.4**改善了液滴撞壁模型
 - Kuhnke, Wruck, Bai-Gosman,
 - 壁温的准确计算可借助**CHT**
 - 液膜蒸发和传热模型也进行了改进



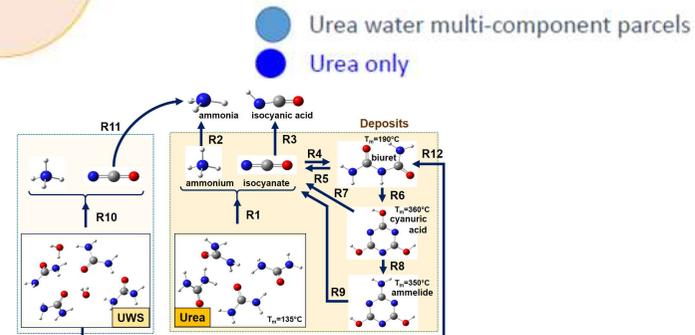
IFPEN 尿素详细分解机理骨干反应



CONVERGE中SCR三种模拟方法



3. Detailed Decomposition Approach



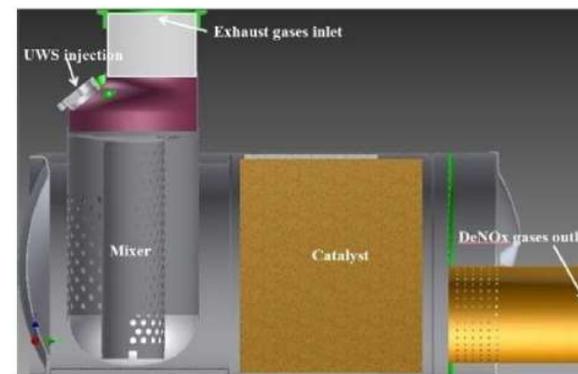
行业仿真案例



- 单位：潍柴动力
- 发表：SAE 2016-01-8077
- 分析内容：SCR系统尿素水溶液喷雾、蒸发、扩散及结晶部位预测
- 使用软件：CONVERGE2.3
- 物理模型：喷雾、蒸发、液膜，CHT
- 创新点：提出了一种基于液膜厚度和热流密度预测结晶概率的方法，并通过实验验证这这种方法的可靠性。



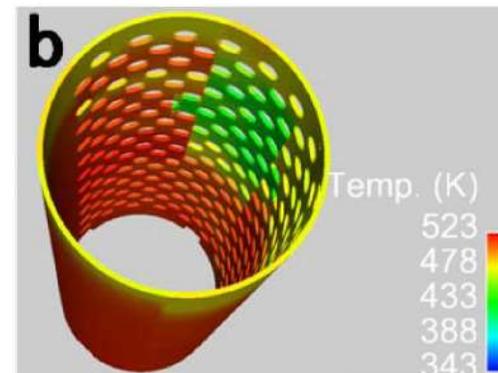
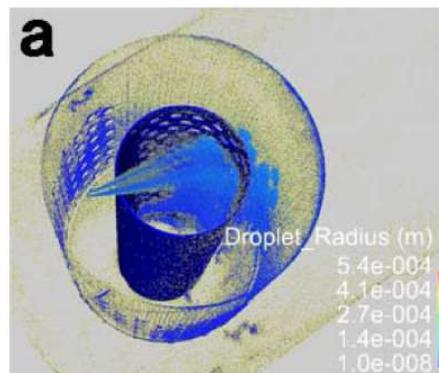
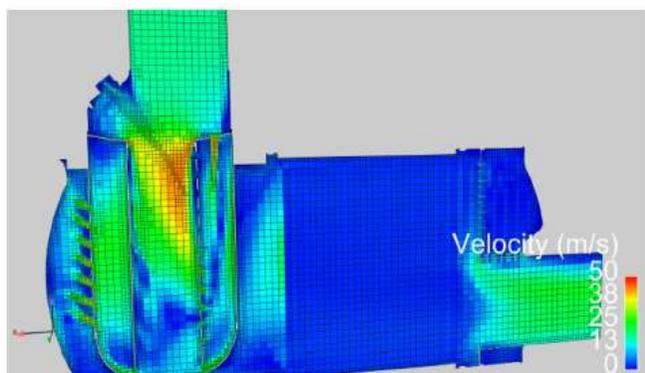
实验台架



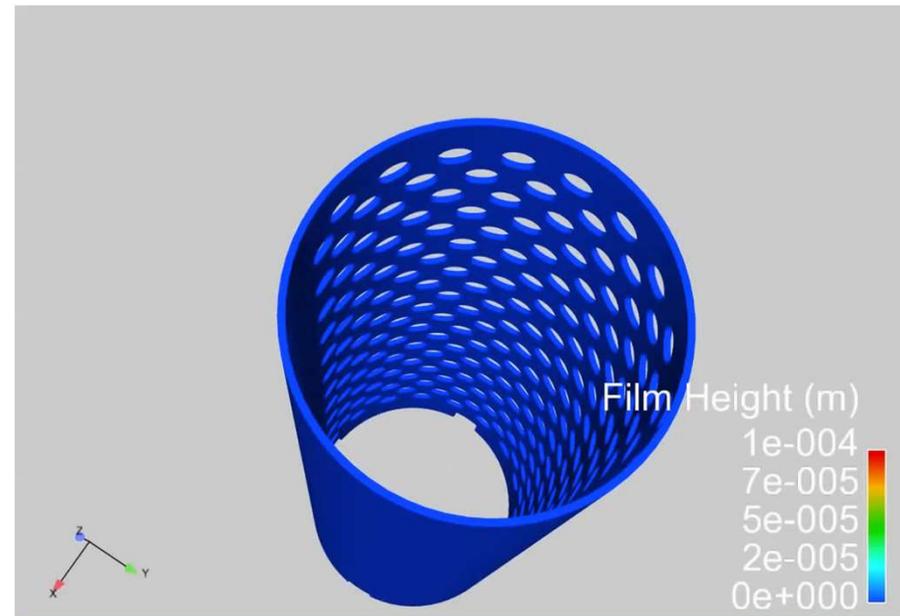
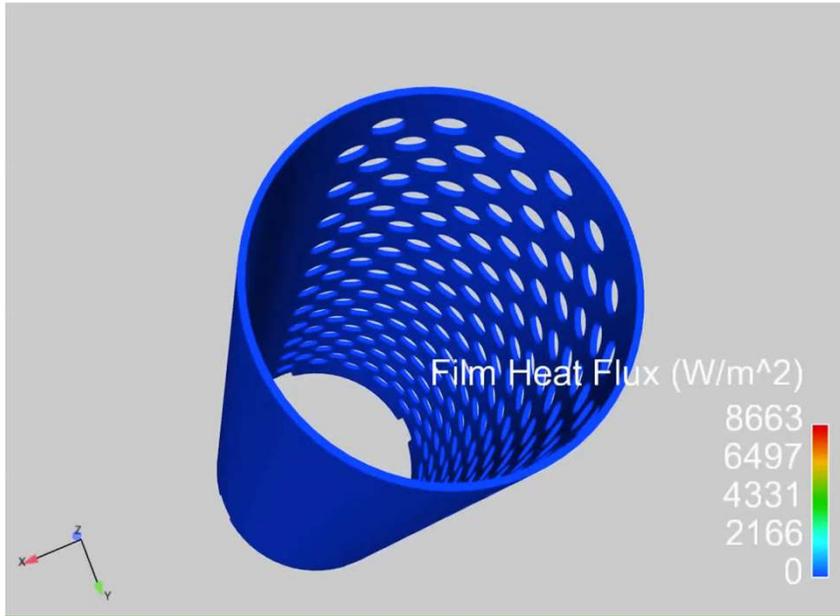
几何模型及边界条件

$$DFP = \alpha \frac{\text{film_height}}{\max(\text{film_height})} + (1 - \alpha) \frac{\max(\text{heat_flux})}{\text{heat_flux}}$$

DPF: Deposit Formation Possibility 结晶概率指数

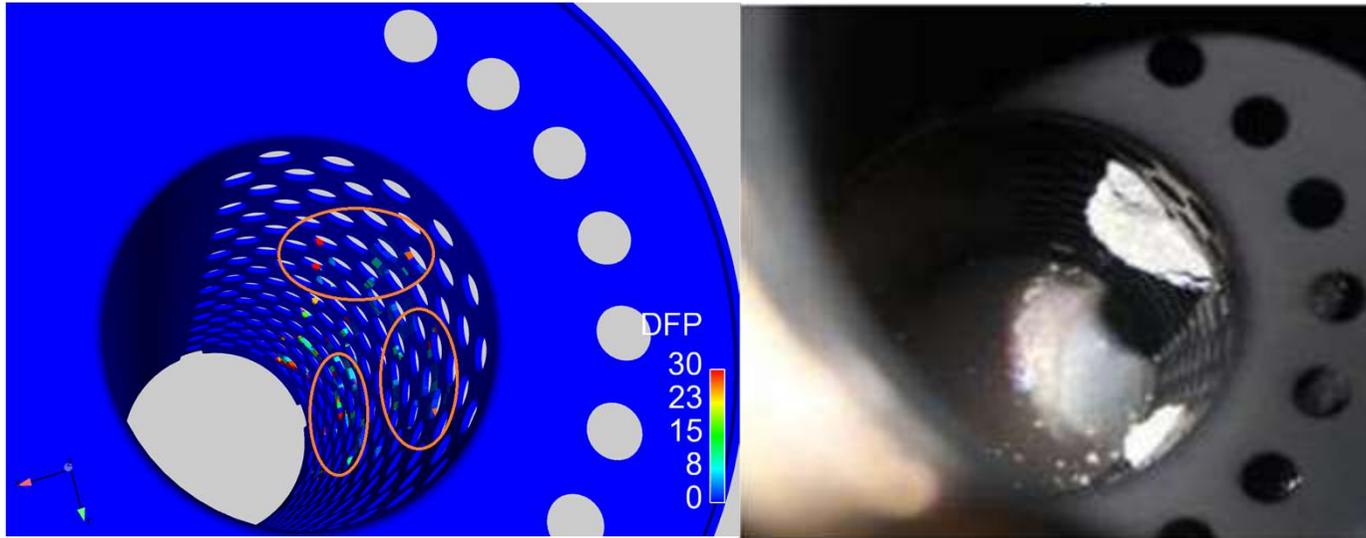


行业仿真案例



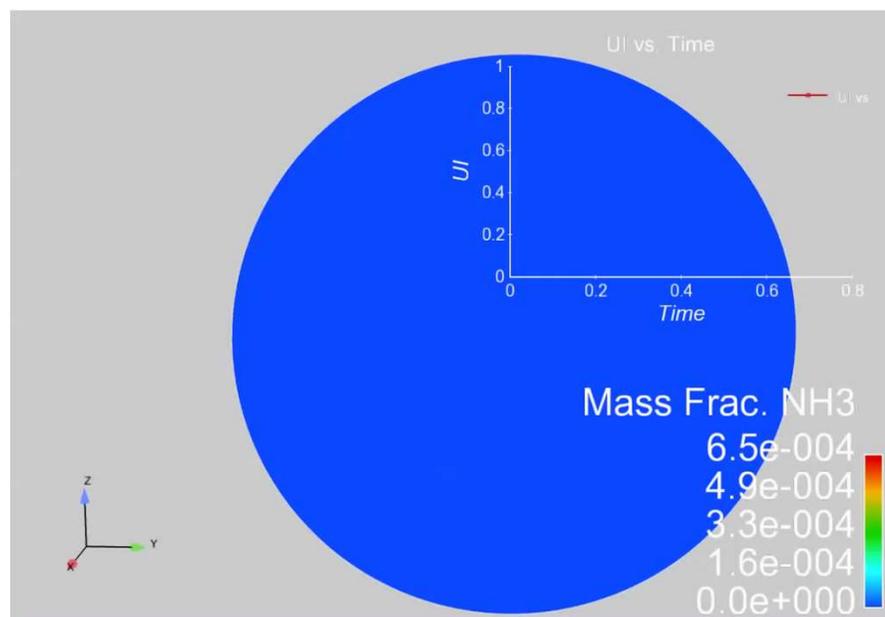
- 壁面向液膜热传导以促进其蒸发
- 热传导的区域基本对应液膜区域。但是，热传导最高的区域不一定对应液膜最厚的区域：还存在液膜与尾气的热对流
- 液膜越厚，或壁面向液膜热传导越小，越容易发生结晶。在预测结晶可能性时，需要一种方法将这两个独立的物理量整合起来

行业仿真案例



- 为了定量描述结晶的可能性，笔者定义了结晶可能性(Deposits Formation Possibility, DFP)参数
$$DFP = \alpha \frac{\text{film_height}}{\max(\text{film_height})} + (1 - \alpha) \frac{\max(\text{heat_flux})}{\text{heat_flux}}$$
- ECT循环10小时后拆解后所拍摄的结晶位置和较高DFP值位置完全一致：轴向在混合器上表面向下数第三排孔开始，径向在混合器上表面两侧开始第二孔附近
- DFP值区域面积较小很可能是因为模拟只从开始喷射进行到稳态，而实验是10小时测试
- 模拟中只考虑液-液和液-固（混合器）之间的撞击和传热，暂时无法考虑液滴-结晶的撞击和传热，后者也是试验中结晶的一个来源

行业仿真案例

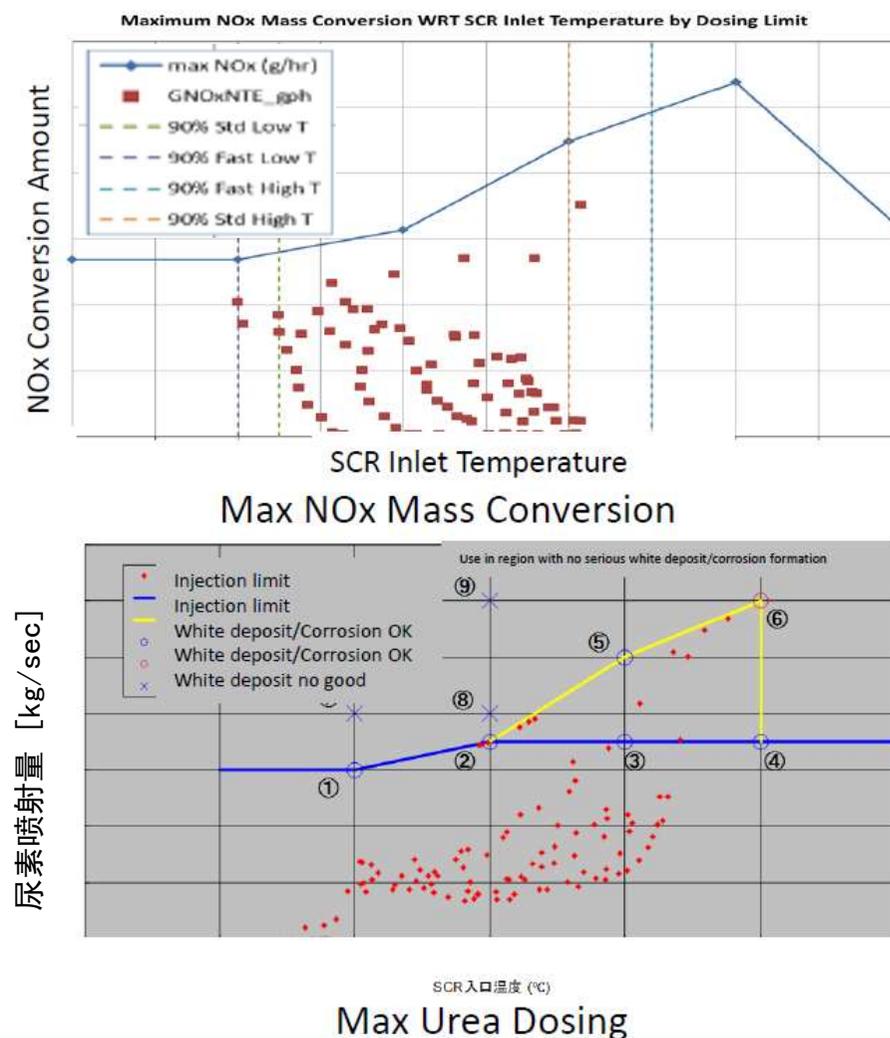


- 均匀性系数UI是SCR设计中至关重要的指标，直接决定NO_x的转化效率
- 其定义为：
$$UI = 1 - \frac{\sum |y_{NH3} - y_{NH3mean}|}{2 * n * y_{NH3mean}}$$
- 载体进口截面上UI在0.2 s达到稳态0.95，表示NH₃分布非常均匀——达到预期

行业仿真案例

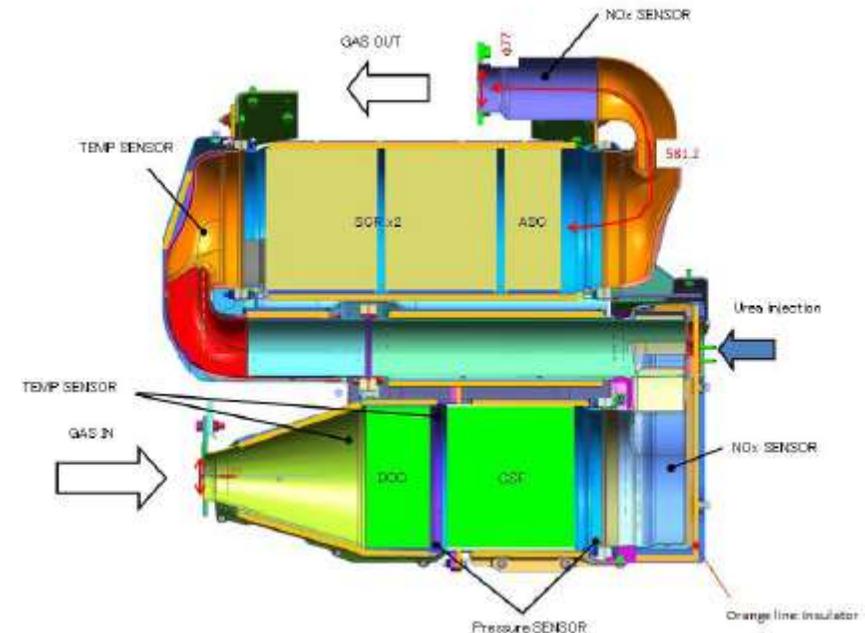
ISUZU

- 单位：五十铃（美国），Yong Sun
- 发表：2016 CSI User's Conference
- 背景：五十铃中型卡车中，由于尿素水溶液喷射量限制，导致Nox转换效率无法进一步提高。如果增加喷射量，担心影响后处理系统性能，重点关注以下两个方面：
 - SCR芯体前的NH3均匀性
 - 尿素结晶控制



■ ISUZU利用CONVERGE对后处理系统的整体效率进行优化

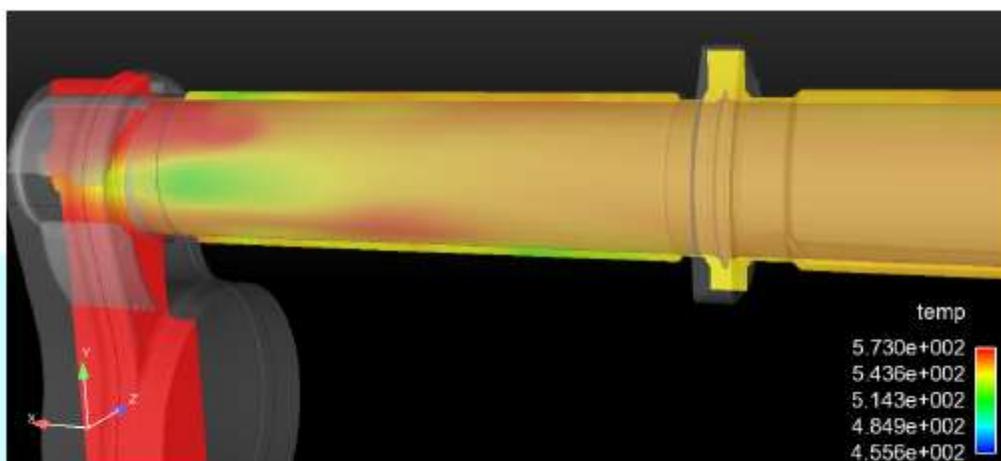
Stage 1	stage 2	Stage 3	Stage 4
			Detailed Deposit Simulation
	Urea Uniformity Analysis	Deposit Formation Risk Prediction	
	Urea Spray Analysis		
Flow Characteristics			



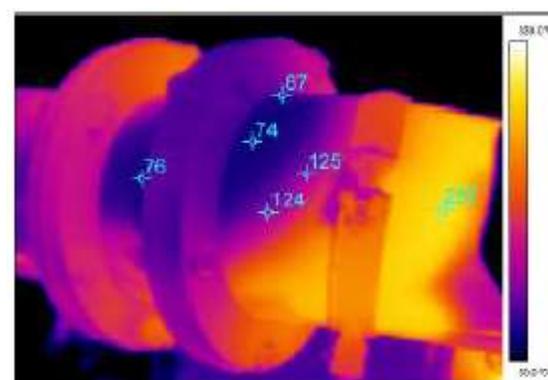
- 边界条件和结果验证来源于
 - 车辆耐久测试
 - 稳态台架测试
 - GT 1D详细动力学后处理模型
 - 红外温度测量

- ✓ DOC
- ✓ CSF
- ✓ SCR
- ✓ ASC

■ CHT分析进行更准确的壁面温度预测

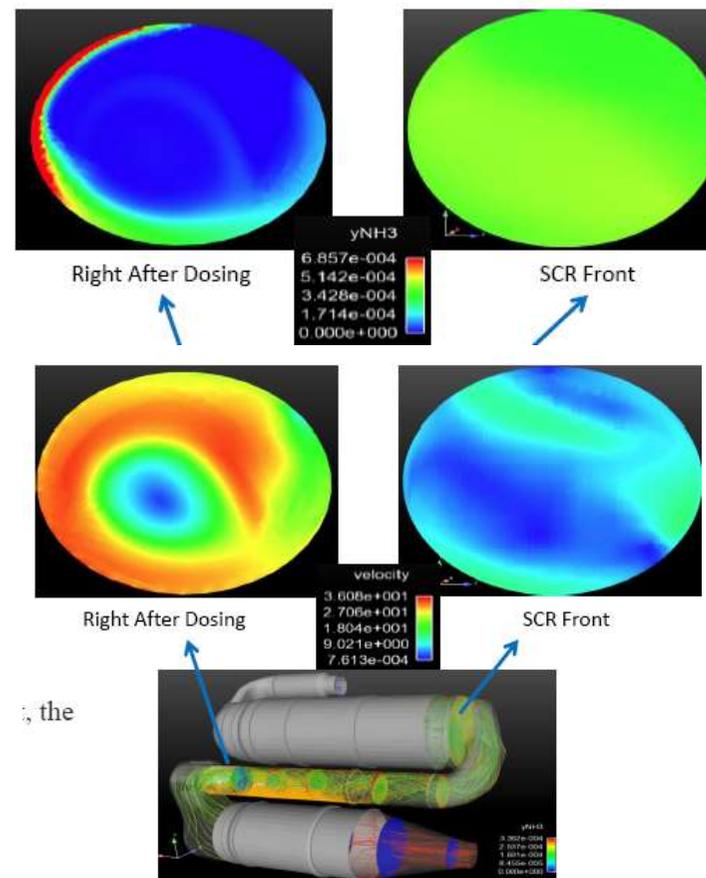
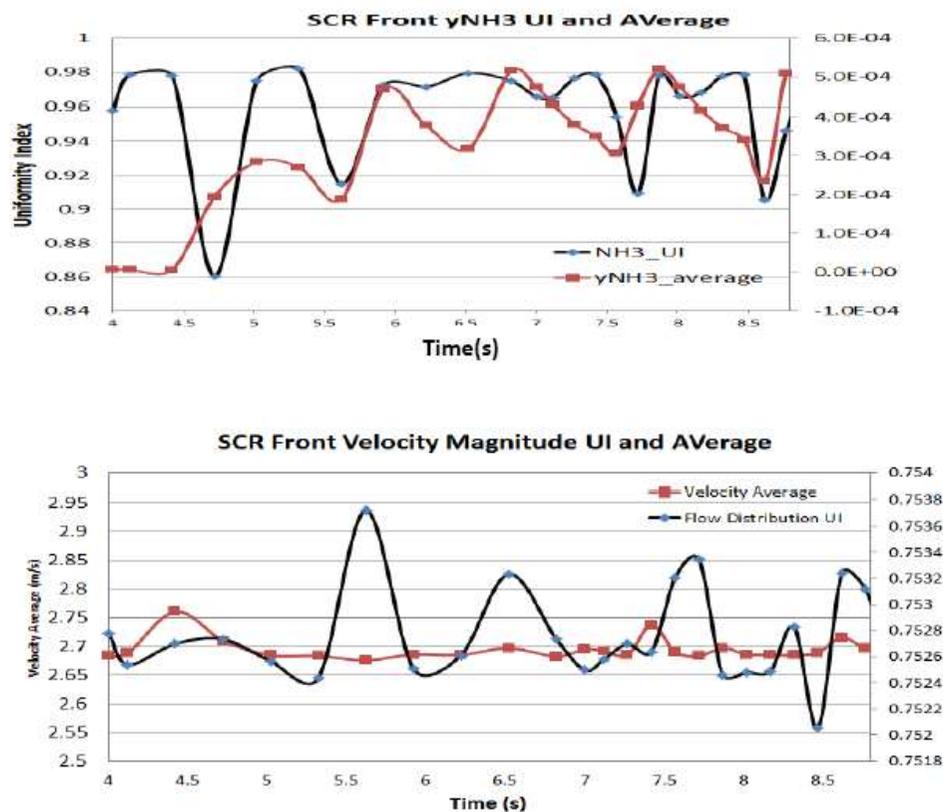


CHT results



Infrared Temperature
Measurement with Urea Spray

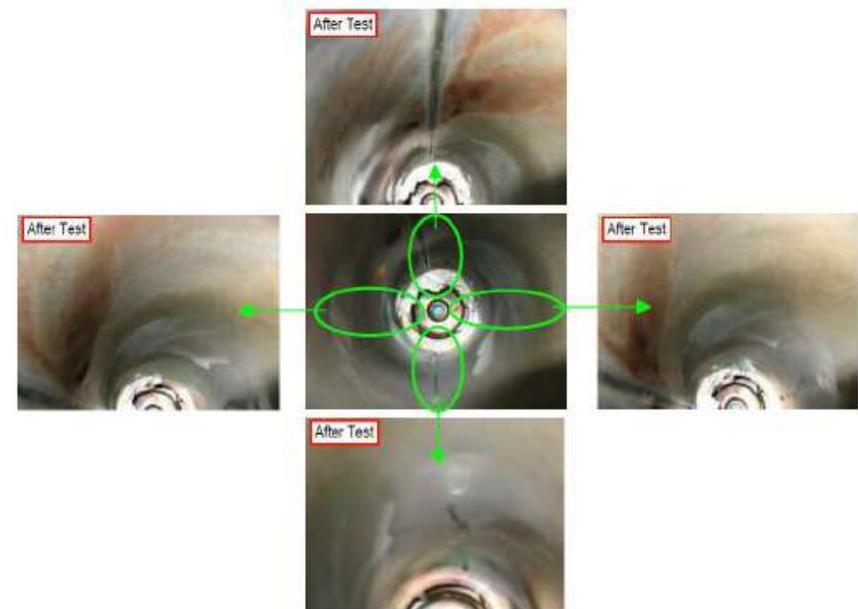
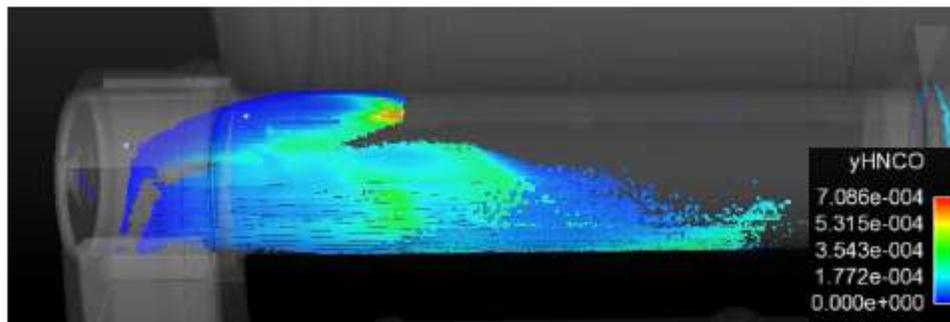
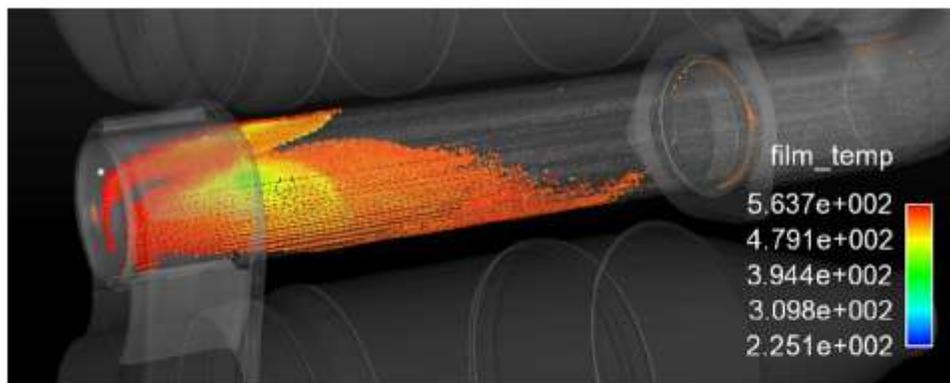
SCR速度均匀性和NH3均匀性分析



; the

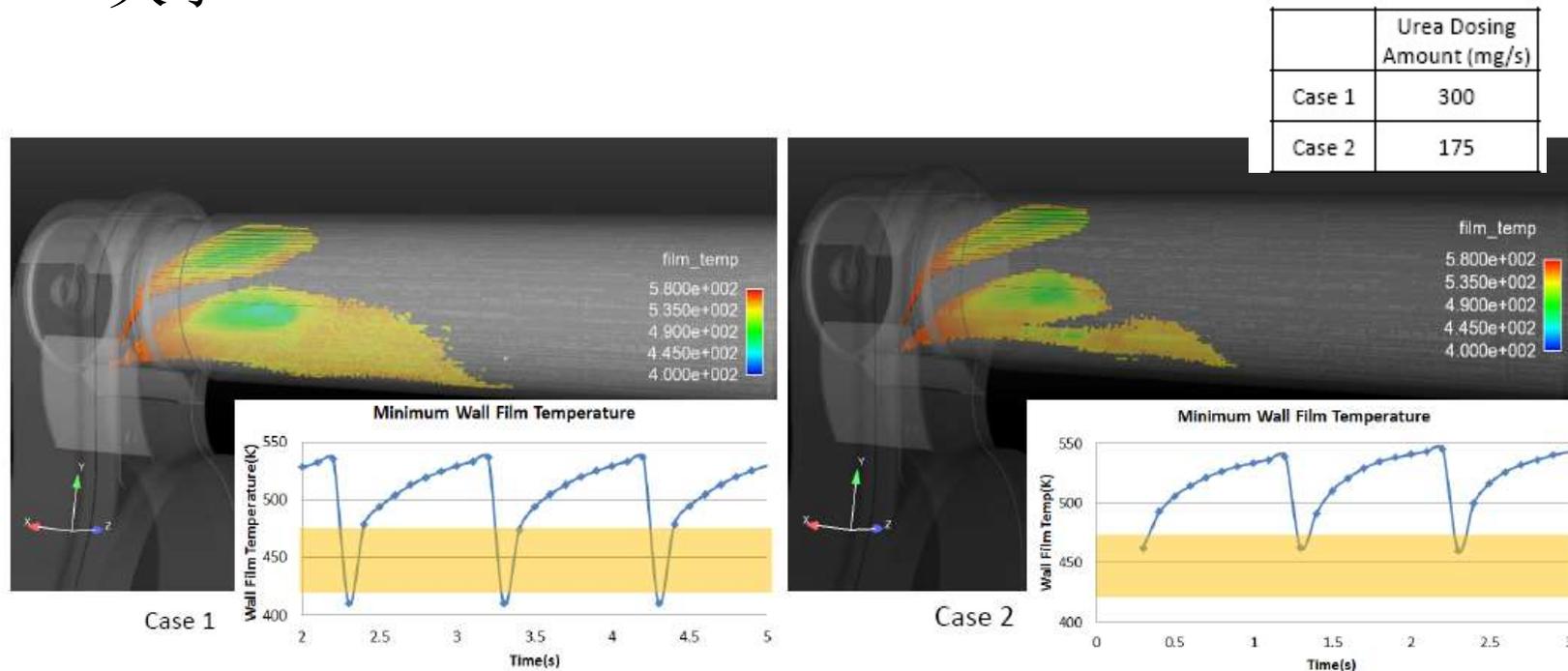
■ 尿素结晶分析

- 两个因素和尿素结晶相关：壁面液膜温度和异氰酸（HNCO）浓度



■ 尿素结晶分析

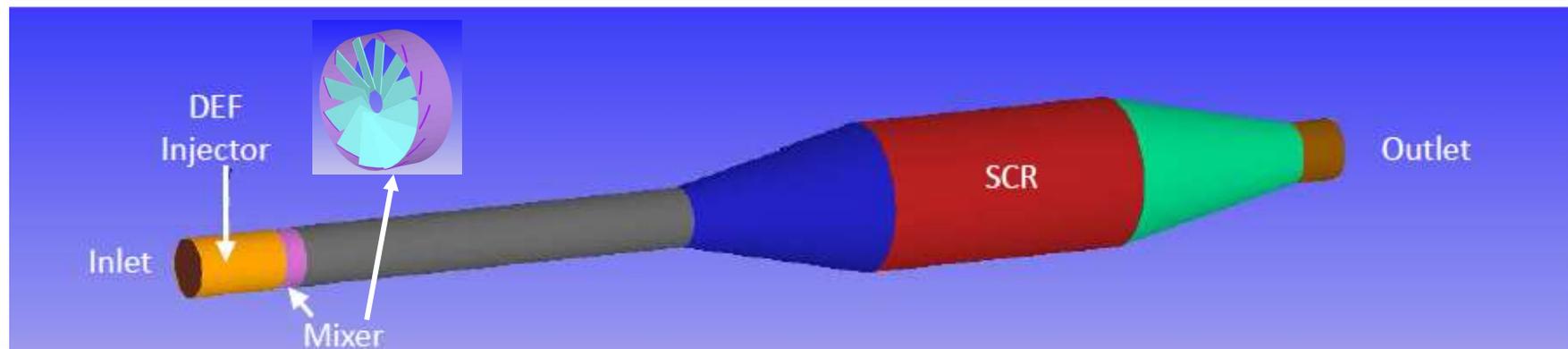
- 通过壁面液膜温度分析不同尿素喷射量的结晶可能性大小



案例演示

案例演示

- 边界条件:
 - 入口: 0.172625kg/s, 666K
 - 入口组分:
 - CO2 0.171404
 - N2 0.693513
 - O2 0.056376
 - H2O 0.078291
 - NO 0.000165
 - NO2 0.000252
 - 出口: 98630Pa
 - 壁面: convection,
Far field T=300K, HTC=7.5W/m² · K
- 尿素模拟方法
 - Molten solid urea approach
- 破碎模型:
 - Tab with Rosin-rammler分布
- 喷射流量: 8.1498e-05kg/s
- 喷孔直径: 6.25e-5m
- 初始SMD: 3.5e-5m
- 锥角:
 - Hollow cone, angle=70deg, thickness=20deg



总 结

- **Converge**目前在发动机相关部件的设计仿真分析上同样具备独特优势
 - 瞬态求解器High CFL加速算法
 - 稳态求解器
 - 表面化学反应
 - 尿素详细分解反应机理（含结晶分析）
 - 各种液滴撞壁和液膜相关模型
 - 基于supercycling的CHT计算功能
- 诸多学术和工程案例也充分验证了**CONVERGE**在气道、水套等稳态分析，**SCR**模拟方面的可靠性和工程价值

联系我们

如需了解更多详细信息,请联系我们:

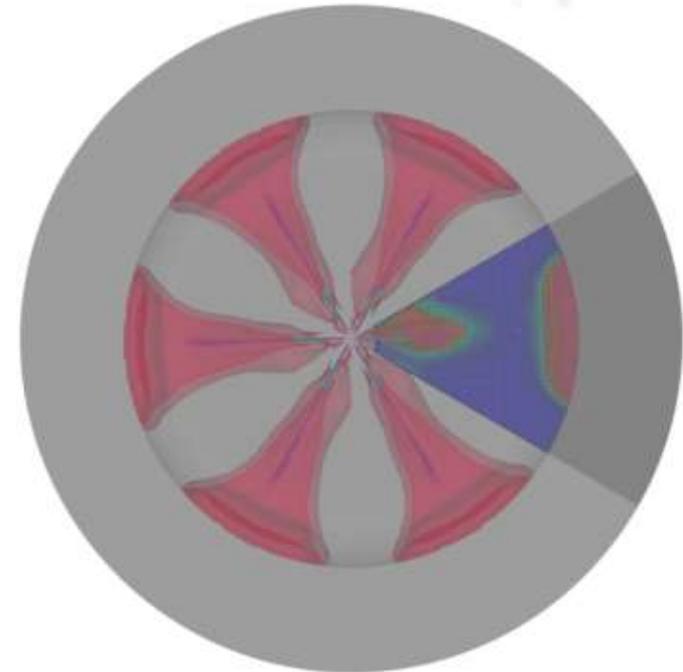
IDAJ-China

Tel: +86-10-65881497/8 (北京)

+86-10-50588290/1 (上海)

Email: support@idaj.cn;

网站地址: www.idaj.cn



Diesel Engine Analysis using CONVERGE