



Your True Partner for
CAE × CFD
ICSC2016



CONVERGE 在内燃机燃烧学国家重点实验室的应用简述



天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室

演讲人：周磊 副教授

2016年11月22日

Outline

SKLE简介

- ❖ SKLE先进发动机燃烧技术研发平台
- ❖ IDAJ中国-SKLE基于CONVERGE的合作
- ❖ 基于CONVERGE的发动机燃烧过程研究案例
 1. 小型化二冲程汽油机燃烧室设计及燃烧过程分析
 2. 多缸汽油机缸间不一致性的多循环仿真分析
 3. 重油喷雾燃烧及进气加湿和EGR对燃烧排放的影响
 4. 二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发
- ❖ 总结和展望

State Key Laboratory of Engines (SKLE) Tianjin University



■ 内燃机燃烧学国家重点实验室于1986年经国家计委批准开始建设，1989年建成并对外开放。是我国内燃机学科唯一的国家重点实验室。实验室以国家“能源、环境”发展战略为依据，以国家内燃动力工程的科技创新为导向，开展内燃动力工程中关键科学问题的基础理论研究、内燃动力工程新技术原理的创新研究和开展填补国家技术空白的集成创新研究。

■ 目前，实验室有教授19人、副教授17人、讲师3人、博士后4人，博士硕士共410人。

主要研究方向(内燃机)

- 内燃机燃烧过程及其优化控制
- 内燃机有害排放物的生成、对大气环境的影响及后处理
- 燃料与燃料燃烧基础理论
- 内燃机节能新技术与低碳动力装置
- 动力机械结构强度、振动、噪声及润滑技术
- 新能源技术



课题组研究方向

汽油机的早燃和爆震燃烧

汽油压燃发动机

低速二冲程船用发动机

先进的燃烧方式

先进的数值模拟方法

化学反应动力学

湍流燃烧

喷雾燃烧



自主开发模型与数值模拟工具

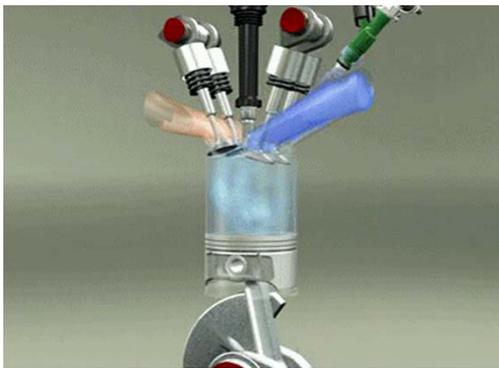
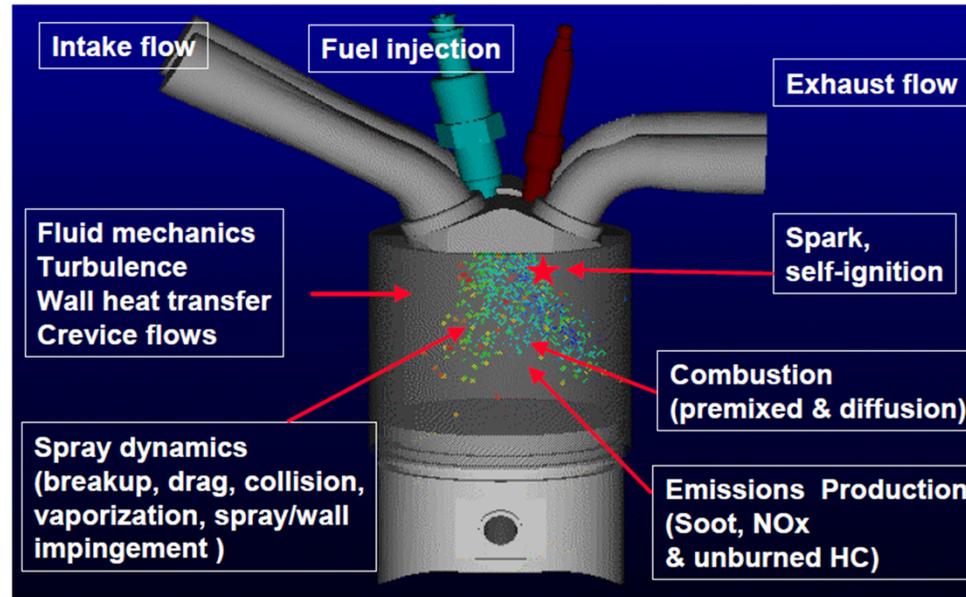
- 化学反应动力学高效计算程序包：ISAT/DAC/CA
- 标量小尺度混合模型程序包：LEM/ODT
- 一维可压缩，高精度计算程序包
- 三维LES/LEM并行计算程序
- 液体燃料喷雾燃烧程序

本人研究方向

大涡模拟-spray and CCV

- ◆ CCV
- ◆ Spray
- ◆ Combustion

3-D, unsteady, turbulent, 2-phase reactive flow



1. Combustion process simulations in ICE
2. Large eddy simulation (LES) for gasoline and diesel fuel spray
3. Combustion with detailed chemistry mechanisms (ISAT, DAC)
4. Multi-scale simulation coupling a Eulerian interface-tracking method and a Lagrangian particle tracking method
5. Turbulent combustion

Outline

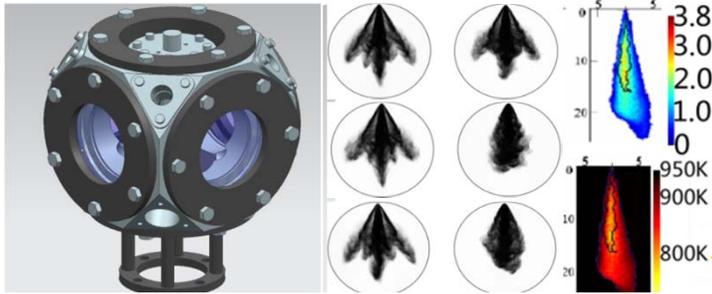
SKLE简介

- ❖ SKLE先进发动机燃烧技术研发平台
- ❖ IDAJ中国-SKLE基于CONVERGE的合作
- ❖ 基于CONVERGE的发动机燃烧过程研究案例
 1. 小型化二冲程汽油机燃烧室设计及燃烧过程分析
 2. 多缸汽油机缸间不一致性的多循环仿真分析
 3. 重油喷雾燃烧及进气加湿和EGR对燃烧排放的影响
 4. 二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发
- ❖ 总结和展望

R&D Platform @ State Key Laboratory of Engines

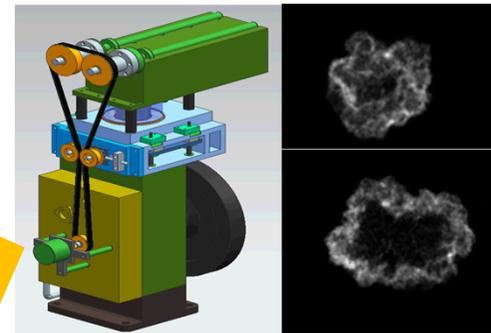
Numerical Simulation + Optical Measurement → Research of spray/combustion mechanisms
Single/Multi Cylinder Engine Experiment → Development of combustion systems

Spray and Laser diagnostics



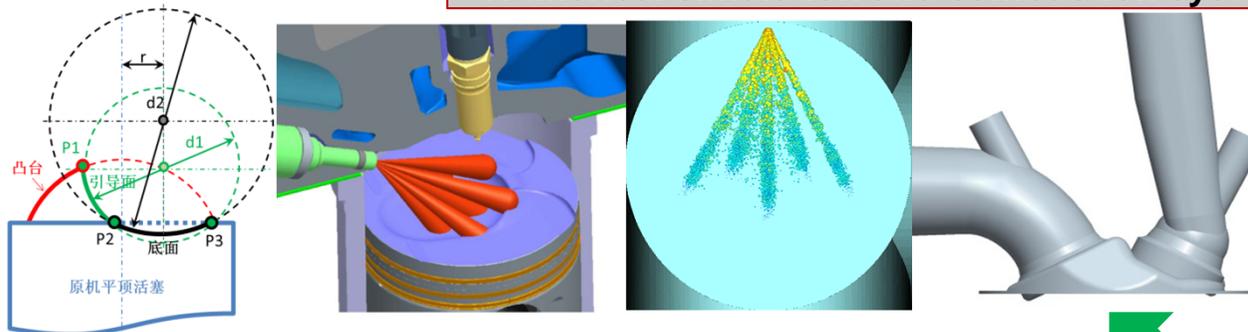
Atomization and breakup mechanisms

Optical Engines



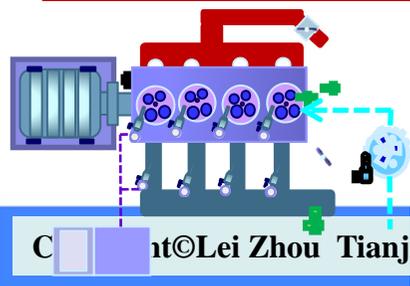
- 1 Evaporation
- 2 Stratification
- 3 Wall-wetting
- 4 Flow field analysis
- 5 Combustion

Numerical simulation and combustion system optimization



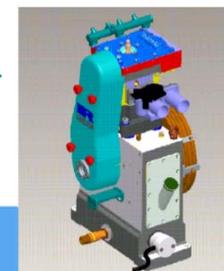
- 1 Spray and combustion models
- 2 Arrangement of fuel, flow and chamber
- 3 Optimization of intake systems and combustion chamber

Multi-cylinder engine test



- 1 Performance test and parameter optimization
- 2 Practical application of combustion control strategies
- 3 Emission control

Single-cylinder engine test



- 1 Performance and emission test
- 2 Combustion system design

Outline

SKLE简介

- ❖ SKLE先进发动机燃烧技术研发平台
- ❖ IDAJ中国-SKLE基于CONVERGE的合作
- ❖ 基于CONVERGE的发动机燃烧过程研究案例
 1. 小型化二冲程汽油机燃烧室设计及燃烧过程分析
 2. 多缸汽油机缸间不一致性的多循环仿真分析
 3. 重油喷雾燃烧及进气加湿和EGR对燃烧排放的影响
 4. 二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发
- ❖ 总结和展望

对CONVERGE的认识

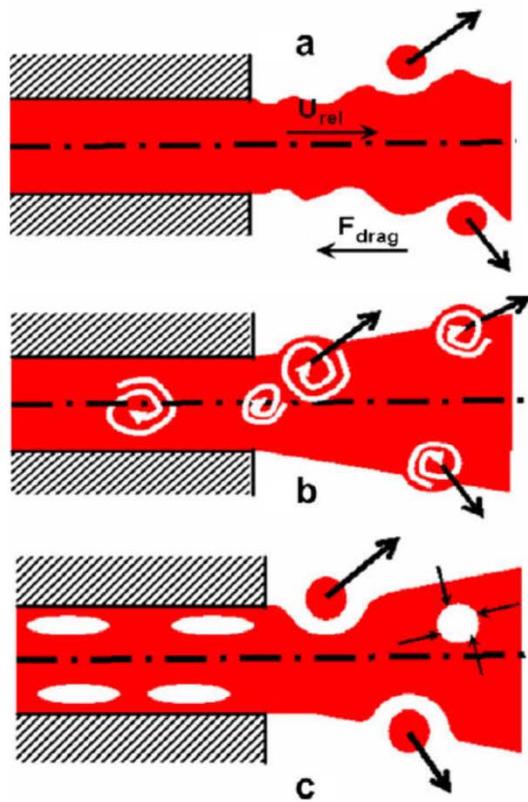
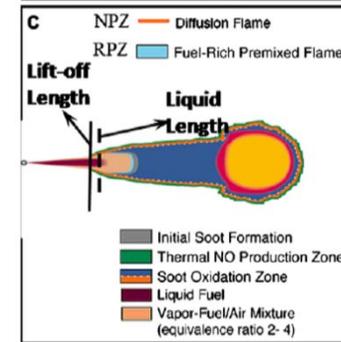
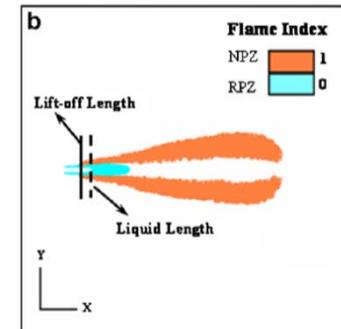
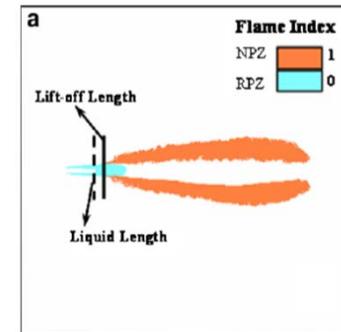
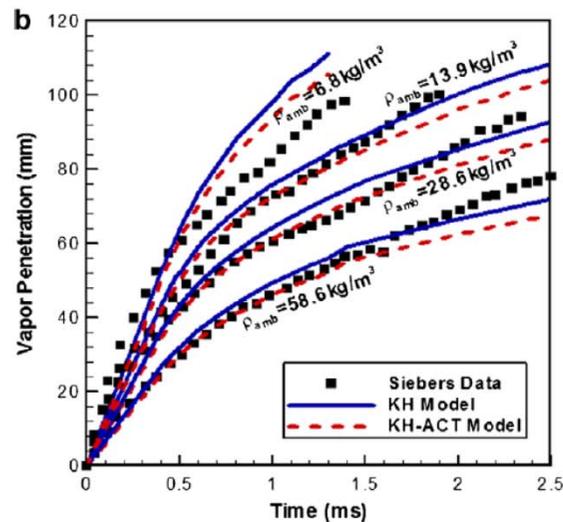
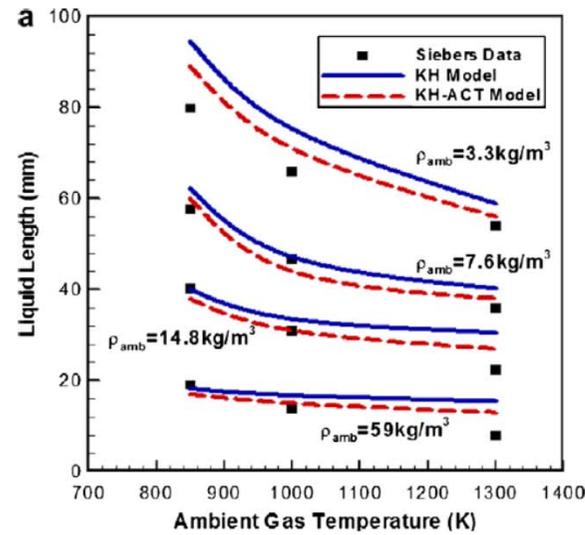


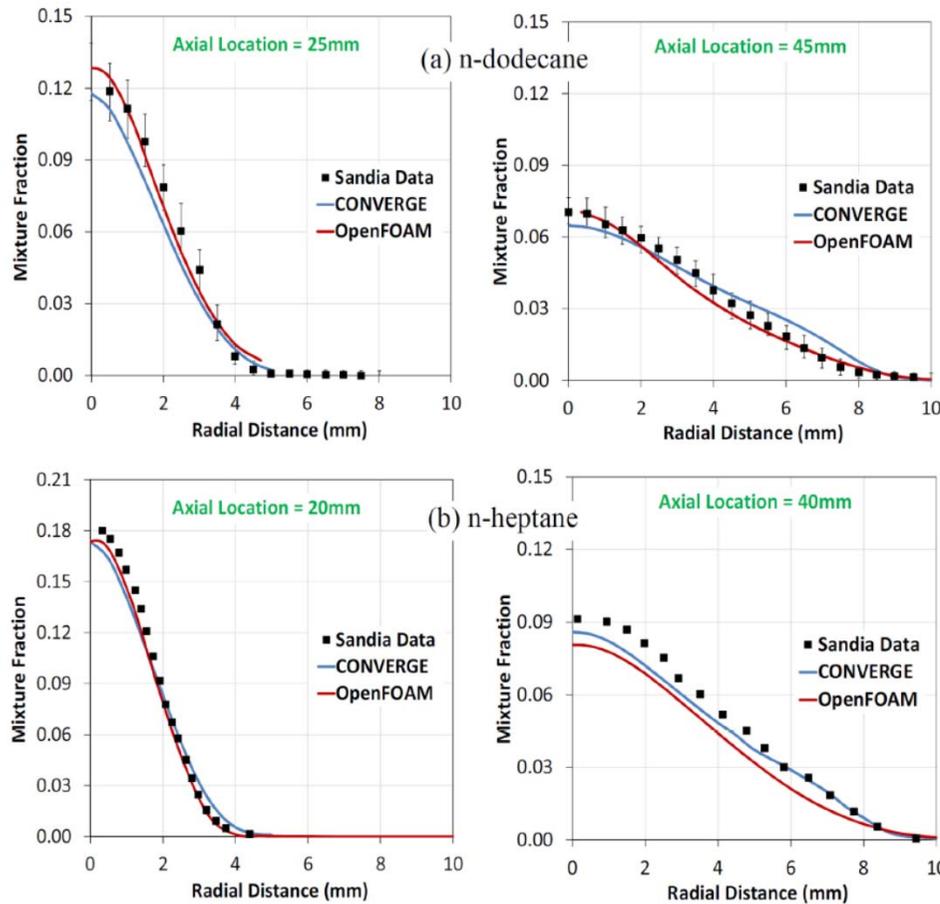
Fig. 3. Schematic representation of different primary breakup mechanisms (a) aerodynamically induced, (b) turbulence induced, and (c) cavitation induced.

S.Som, et al. CNE,2010

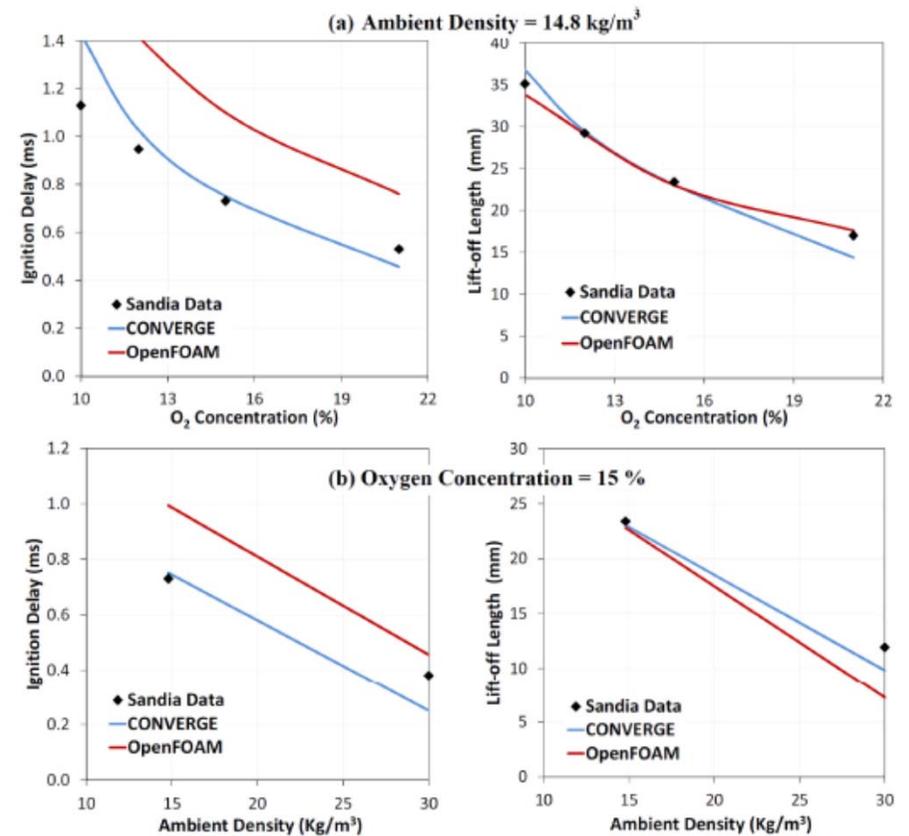


对CONVERGE的认识

Non-Reaction



Reaction

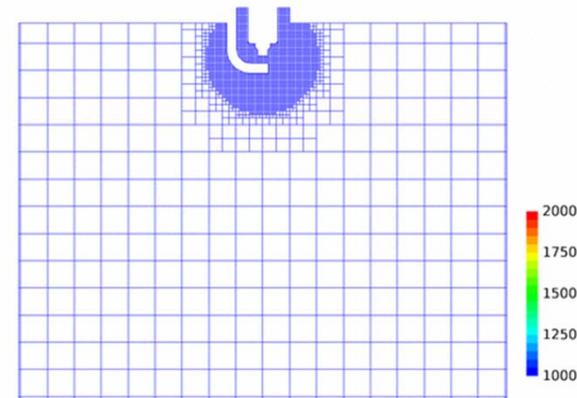
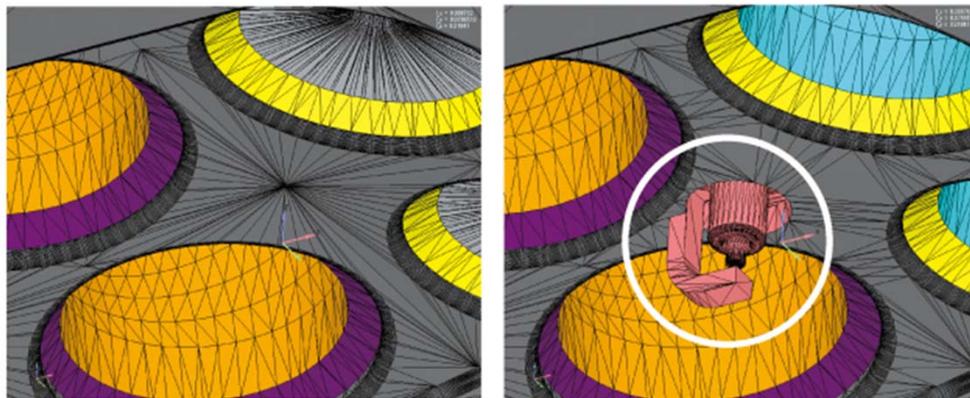
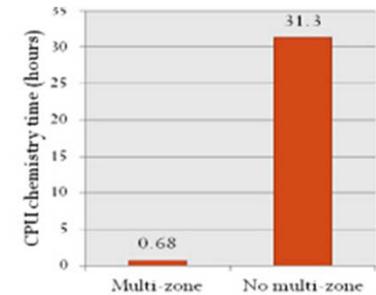
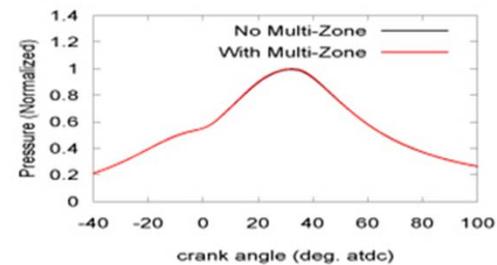


S.Som, et al. SAE 2012-01-1263

对CONVERGE的认识



- ❖ 网格技术（自动网格生成技术，AMR）
- ❖ 燃烧模型（SAGE）



研究背景

■ 内燃机：应用最为广泛的原动机

■ 内燃机在未来几十年仍将在移动式动力装置中占有支配地位。

——美国科学院能源报告，日本跨部委战略创新项目，中国工程院论坛（2009-2013）

消耗石油66%左右
原油对外依存度高(60%)

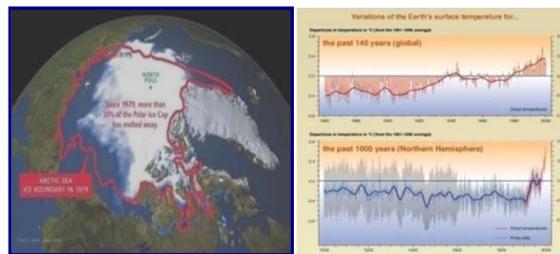
- CO₂约占总排放的25%
- 越来越严格排放法规

- 主要污染源
- PM2.5、CH、NO_x

石油供应安全



气候变暖



环境污染

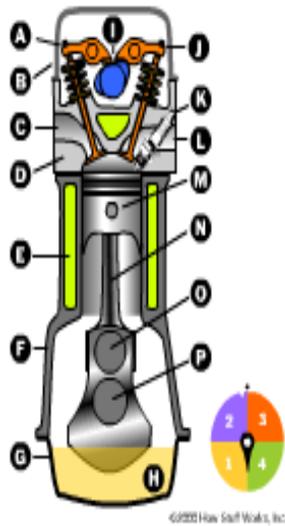


解决问题的核心：内燃机的高效（节能）清洁（减排）燃烧！

Highly-boosted 2-stroke engine

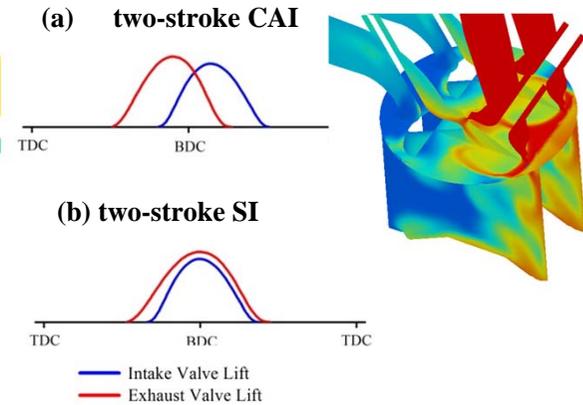
By using poppet valves equipped with VVAS, wide valve overlap, top-entry intake ports and stepped pent-roof, flexible control of the scavenging process can be obtained. Therefore, boosting of the intake charge is applicable for output increase.

Poppet-valved two stroke engine

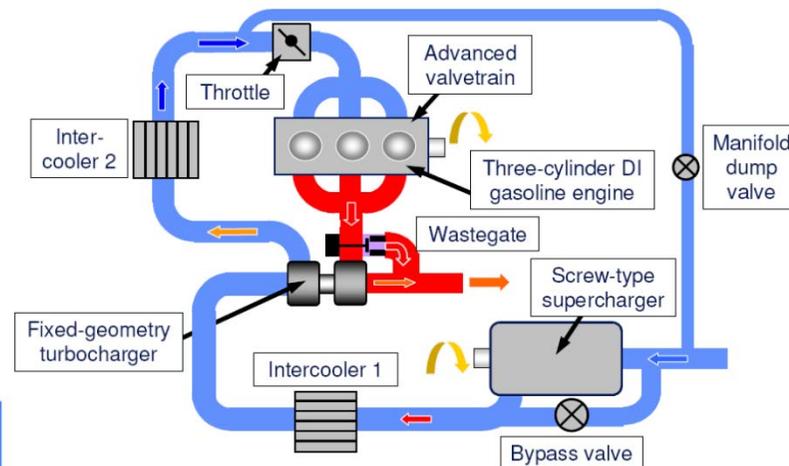


Theoretically, replacing a 1.6L 4-cylinder 4-stroke engine with a 0.7L 2-cylinder 2-stroke engine

Scavenging realized with wide valve overlap and reversed tumble



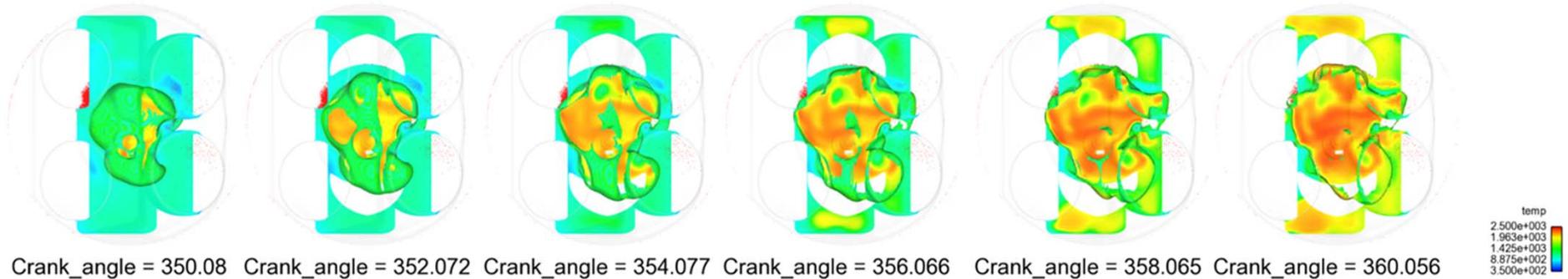
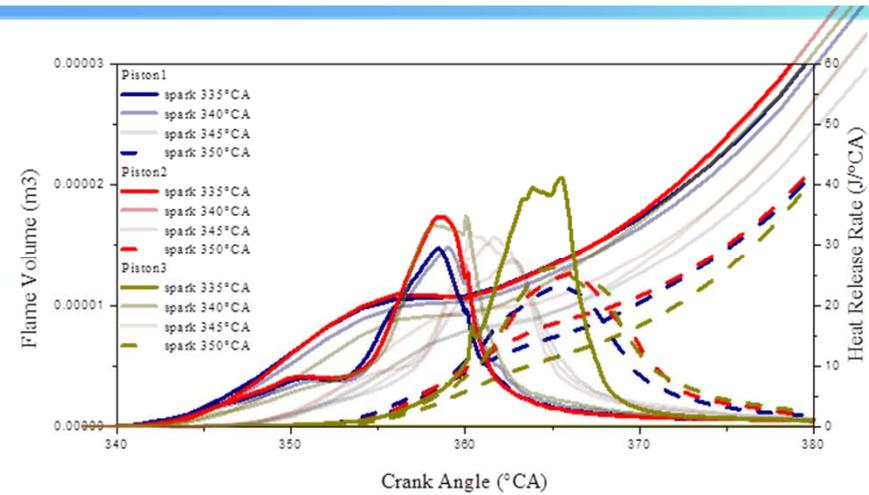
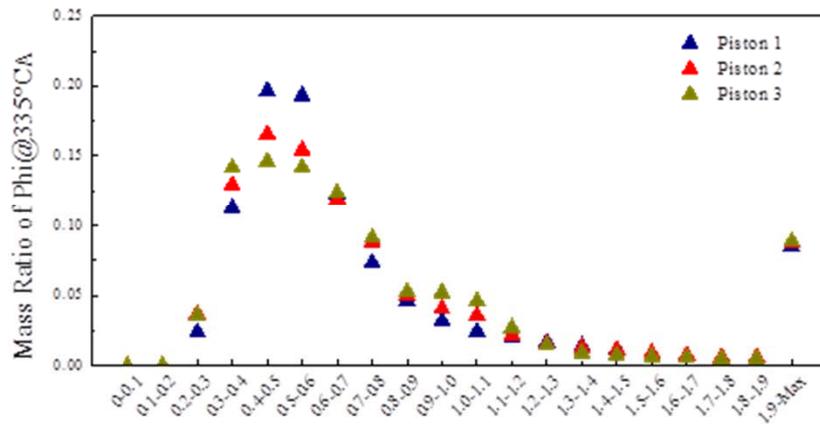
Turbo-charging and/or Super-charging



Spray-guide fueling realized with centered outwardly open injector



Fuel Stratification & Flame-Autoignition Interaction



汽油燃料SI-CAI混合燃烧过程中火焰与自燃的相互作用

Outline

SKLE简介

- ❖ SKLE先进发动机燃烧技术研发平台
- ❖ IDAJ中国-SKLE基于CONVERGE的合作
- ❖ 基于CONVERGE的发动机燃烧过程研究案例
 1. 小型化二冲程汽油机燃烧室设计及燃烧过程分析
 2. 多缸汽油机缸间不一致性的多循环仿真分析
 3. 重油喷雾燃烧及进气加湿和EGR对燃烧排放的影响
 4. 二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发
- ❖ 总结和展望

POD分析和循环变动 (LES)

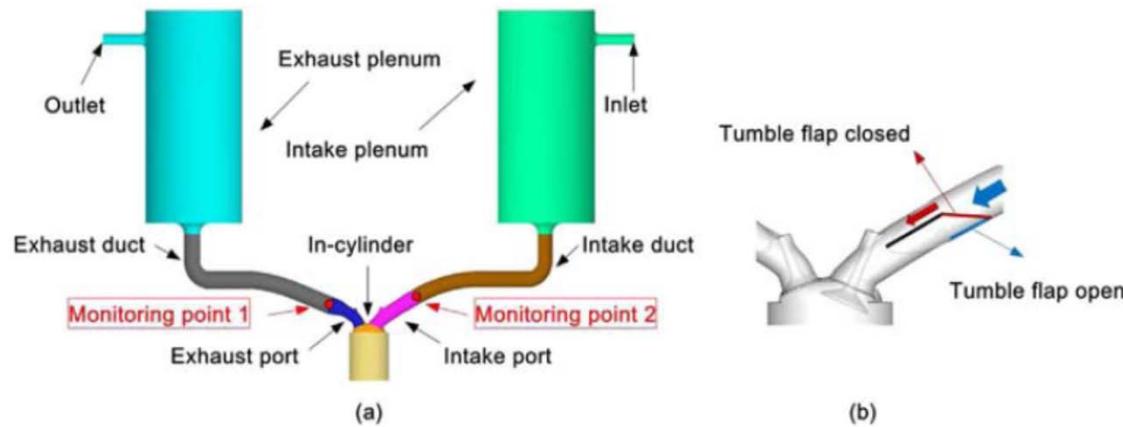


Fig. 1. Geometric configuration and schematic of charge motion control valve.

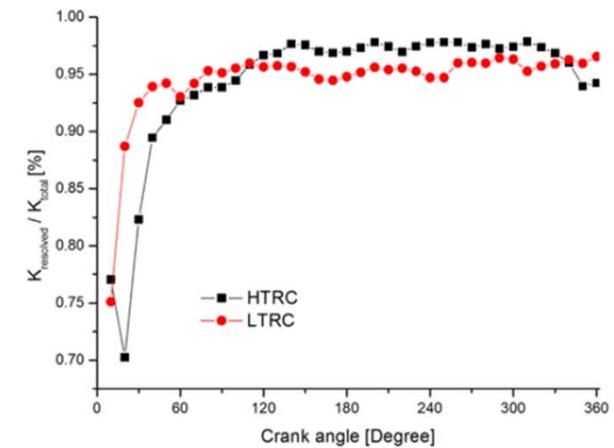


Fig. 6. Comparison of instantaneous evolutions of spatial averaged $k_{resolved}/k_{total}$ for the LES computation during the intake and compression strokes in both cases.

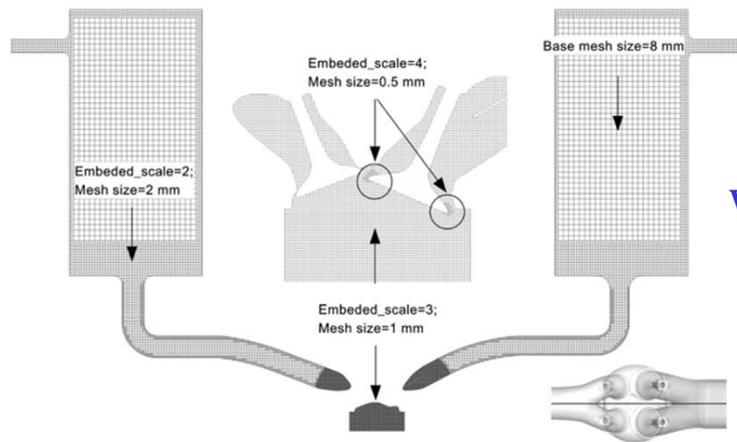
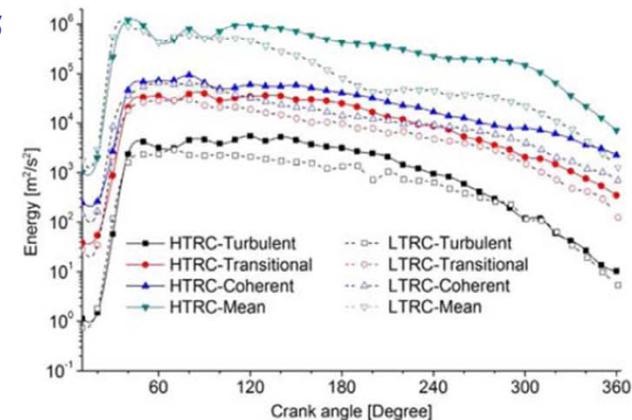


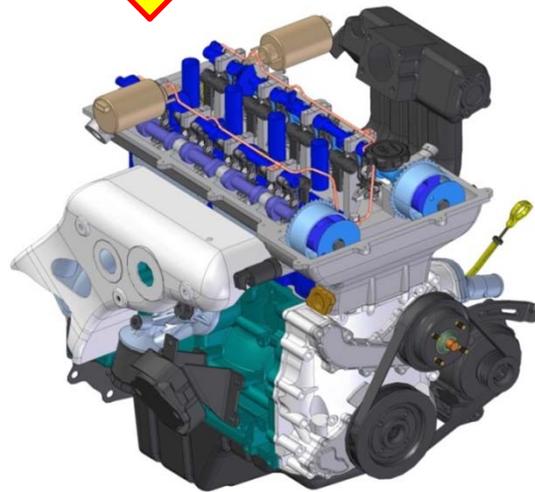
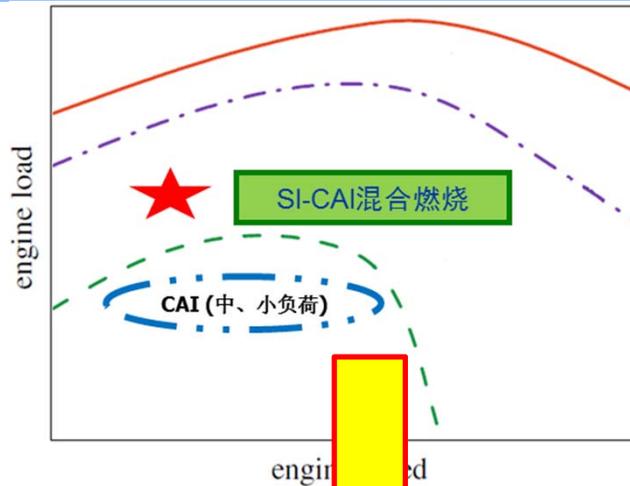
Fig. 2. Computational mesh.

Wang, et al. ATE, 2015

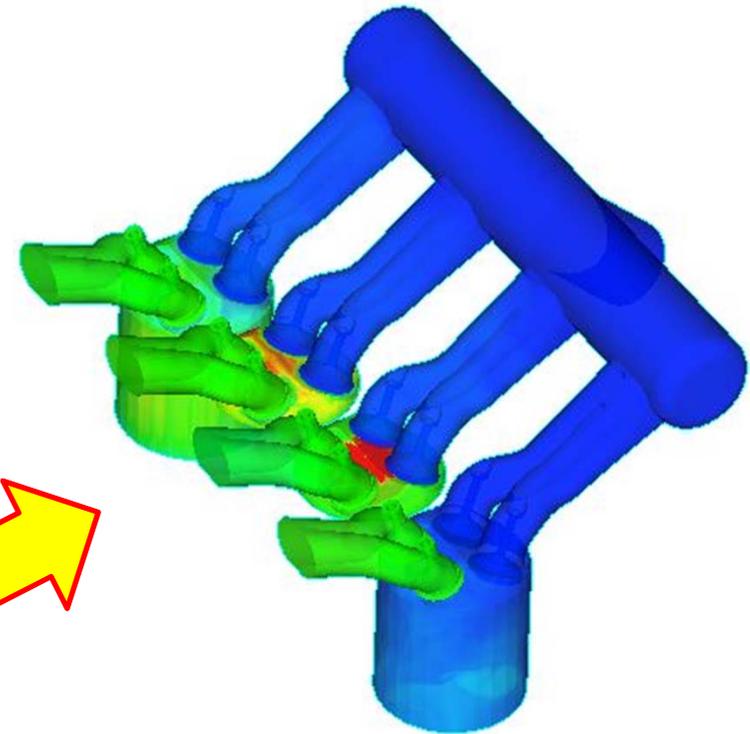
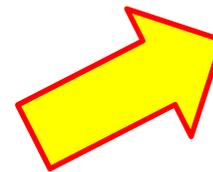
$$\begin{aligned}
 u(x, t) &= \underbrace{u^M(x, t)}_{\text{mean part}} + \underbrace{u^F(x, t)}_{\text{fluctuation part}} \\
 &= \underbrace{u^M(x, t)}_{\text{mean part}} + \underbrace{u^C(x, t)}_{\text{coherent part}} + \underbrace{u^{Tr}(x, t)}_{\text{transition part}} + \underbrace{u^{Tu}(x, t)}_{\text{turbulent part}}
 \end{aligned}$$



多缸汽油机缸间不一致性的多循环仿真分析

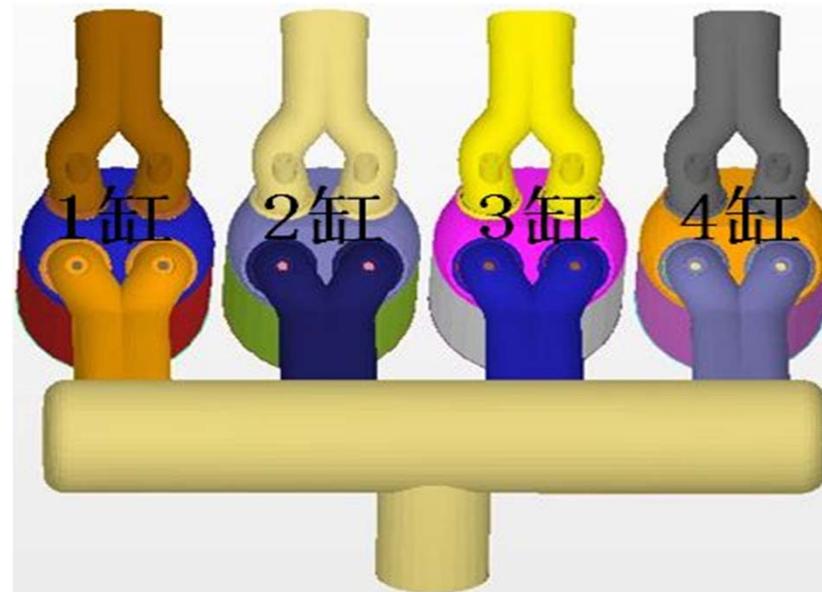


稀释条件下
SI-CAI混合燃烧
的不稳定问题，
被各缸之间的差
异放大



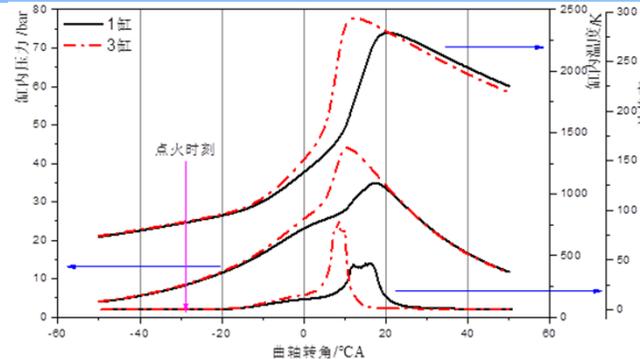
混合燃烧模式下，第一循
环各缸燃烧不一致性及其对第
二循环的影响

四缸汽油机仿真平台

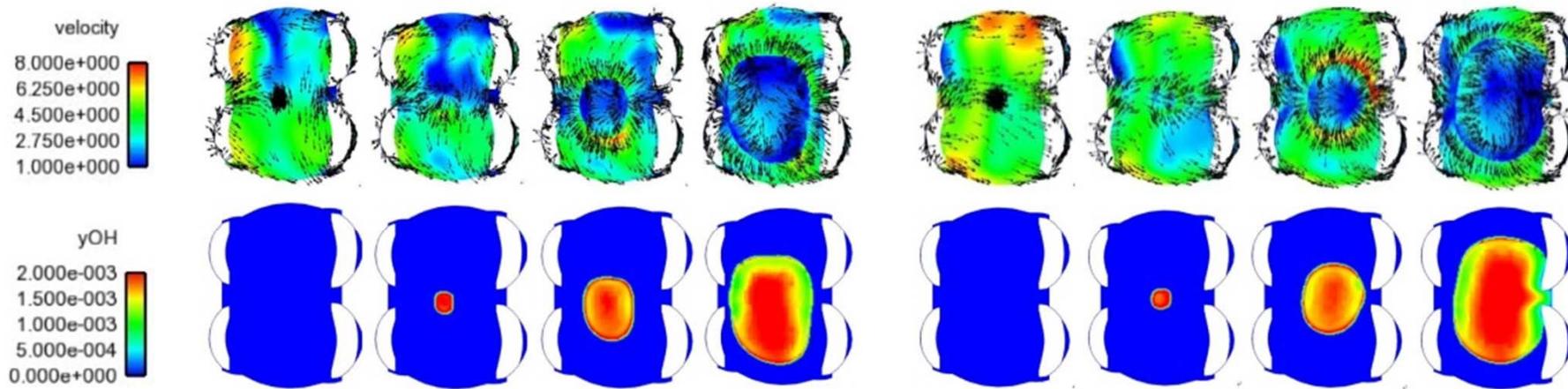


物理化学子模型	模型名称
湍流模型	RNG k-e 模型
燃烧模型	SAGE 模型+化学反应机理 (73 组分、296 反应)
壁面传热模型	0' Rourke 和 Ameden 温度壁面函数
点火模型	Source/Sink 能量注入模型

第一循环1缸&3缸燃烧不一致性分析



-30° CA -20° CA -10° CA 0° CA -30° CA -20° CA -10° CA 0° CA **BTDC**

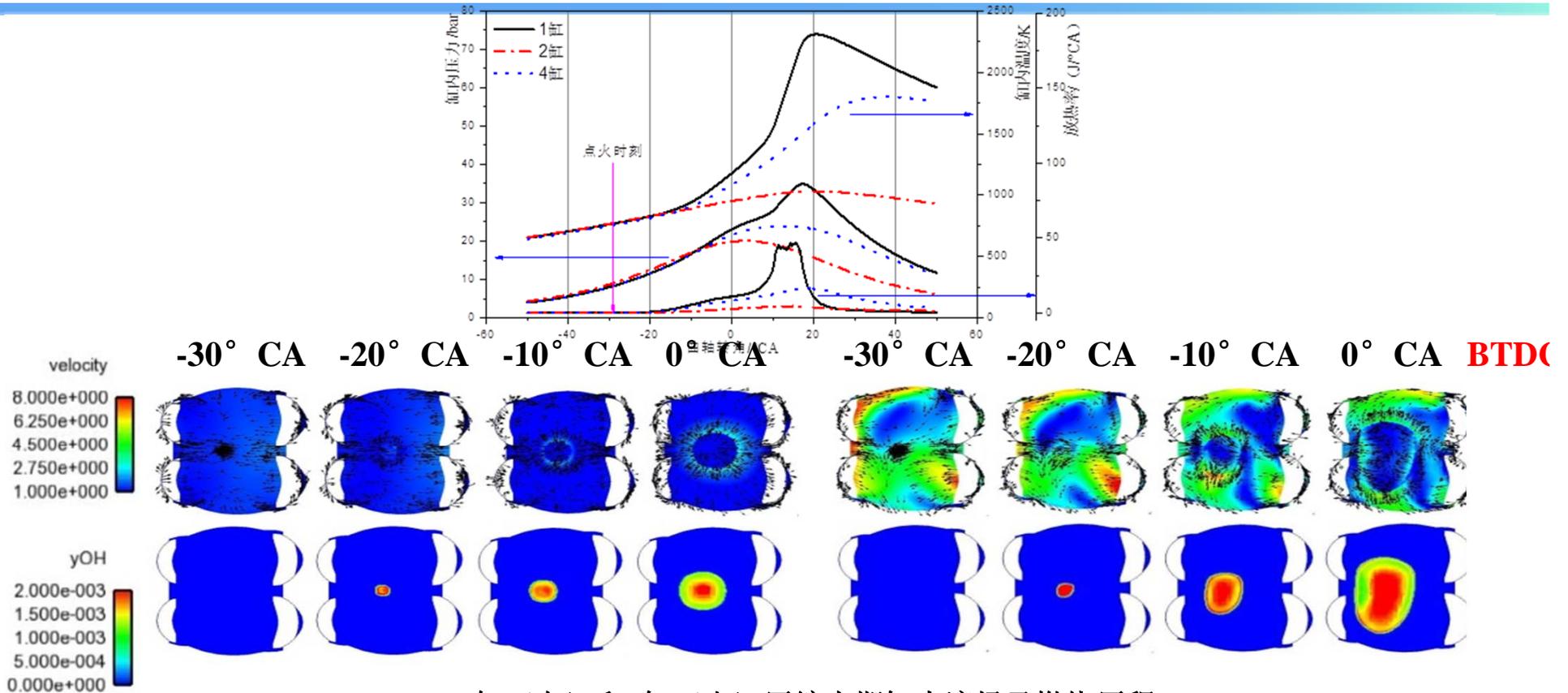


1缸（左）和3缸（右）压缩末期缸内流场及燃烧历程

Xie, et al. 2015

单循环仿真中，相邻顺序点火的两缸的燃烧差异主要来源于气缸-进气道相对位置异同导致的进气和缸内气体流动差异，可通过优化进气道布置的方法得到降低。

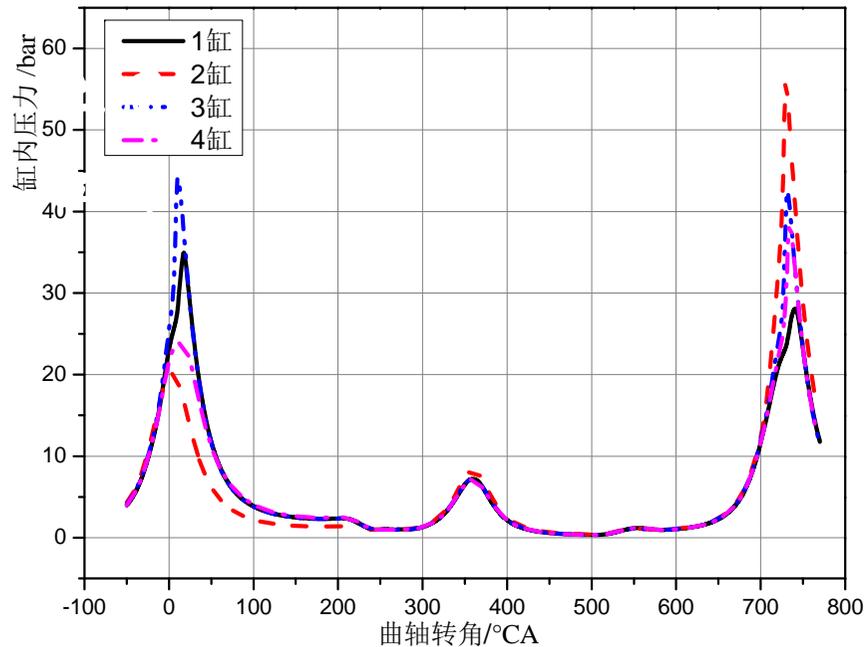
第一循环1缸&2缸&4缸燃烧不一致性分析



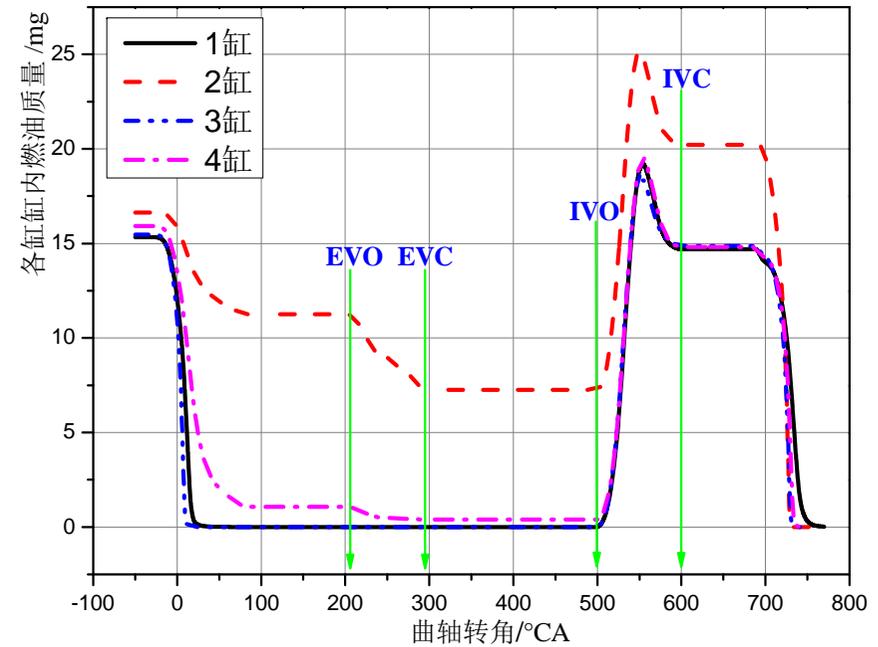
2缸（左）和4缸（右）压缩末期缸内流场及燃烧历程

单循环仿真中，点火顺序相差较远的气缸，燃烧差异很大源于各自计算初始条件设置的不合理，需要通过多循环仿真来改善。

单缸循环间组分的传递影响



四缸前两个循环各缸缸压历程



四缸前两个循环各缸缸内燃油质量历程

各缸第一循环仿真结果通过循环间组分的传递机制会对后续的循环产生影响，需要通过多循环仿真方法进一步研究。

Outline

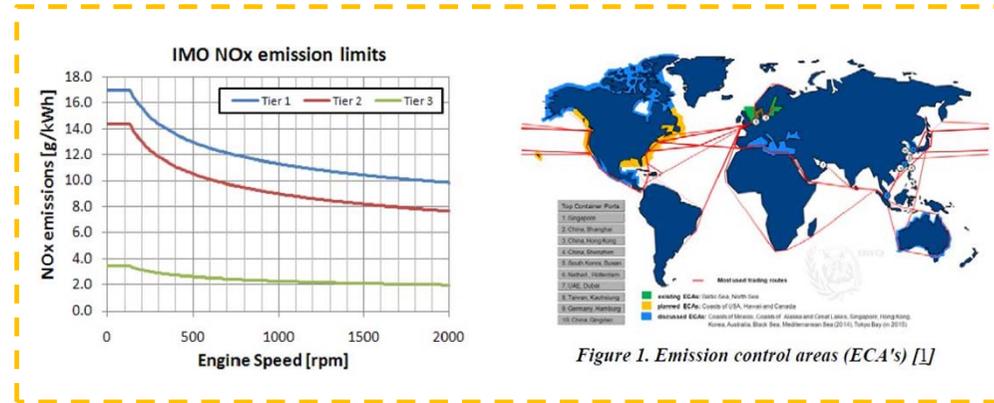
SKLE简介

- ❖ SKLE先进发动机燃烧技术研发平台
- ❖ IDAJ中国-SKLE基于CONVERGE的合作
- ❖ 基于CONVERGE的发动机燃烧过程研究案例
 1. 小型化二冲程汽油机燃烧室设计及燃烧过程分析
 2. 多缸汽油机缸间不一致性的多循环仿真分析
 3. 重油喷雾燃烧及进气加湿和EGR对燃烧排放的影响
 4. 二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发
- ❖ 总结和展望

背景介绍

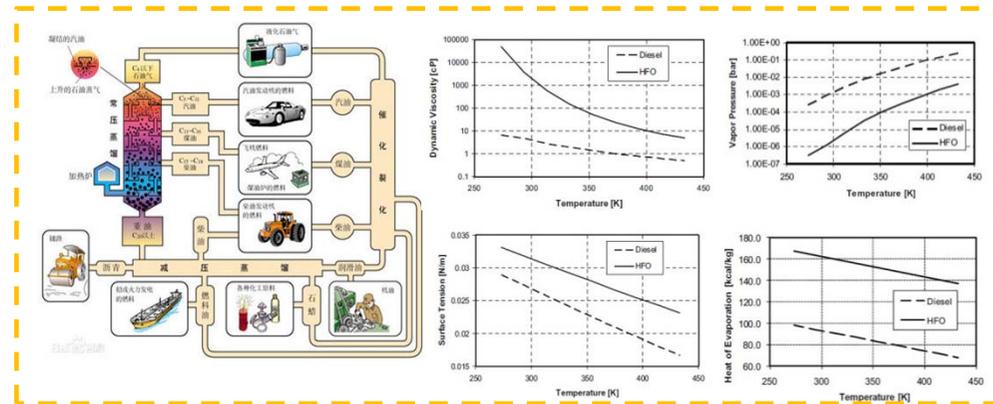
节能减排

国际海事组织IMO制定的排放法规日益严格
重要衡量指标—氮氧化物



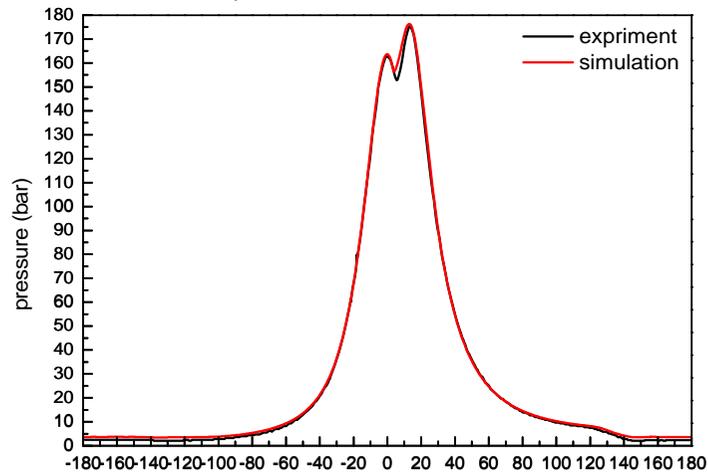
船机燃油

重油为主
储量 大, 价格 低; 组分 复杂, 缺少 深入 研究
柴油为辅 (近海岸)
排放 效果 好; 成本 高
低速 二冲程 船机 实验 成本 高, 采用 CFD 模拟 精度 相对 较高 且 成本 低

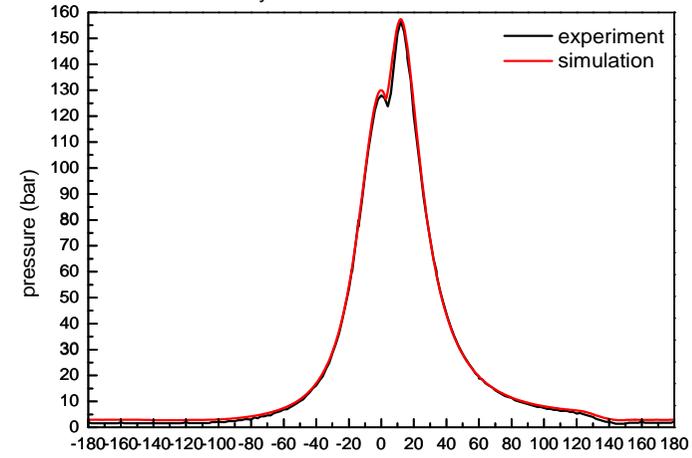


一维仿真与实验验证

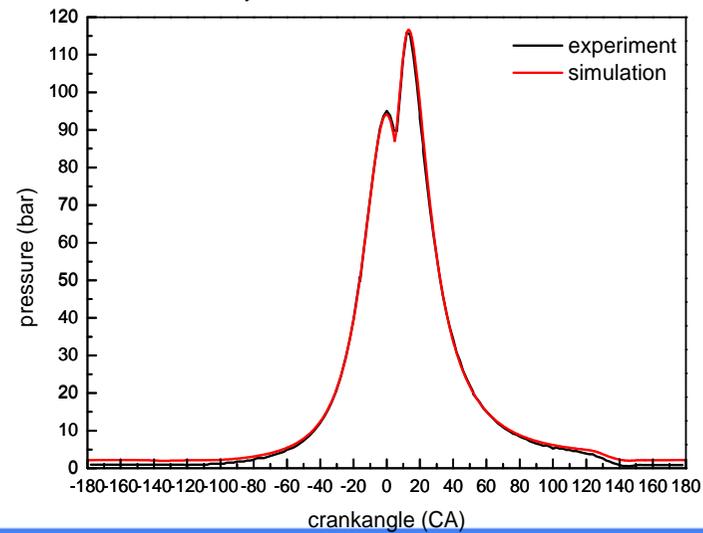
Cylinder Pressure of 100% loads



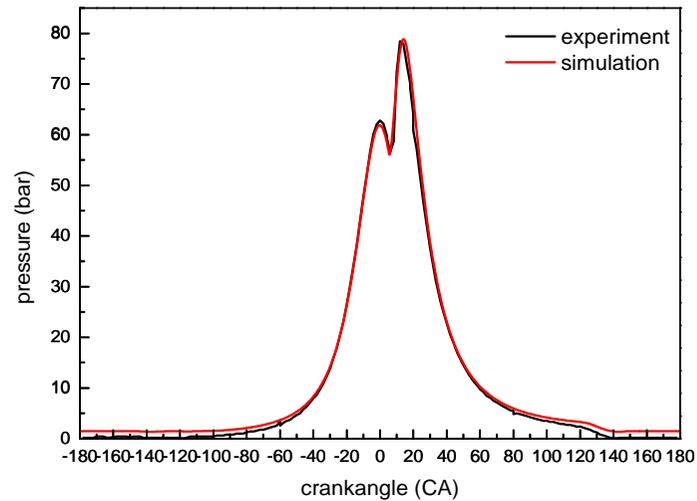
Cylinder Pressure of 75% loads



Cylinder Pressure of 50% loads

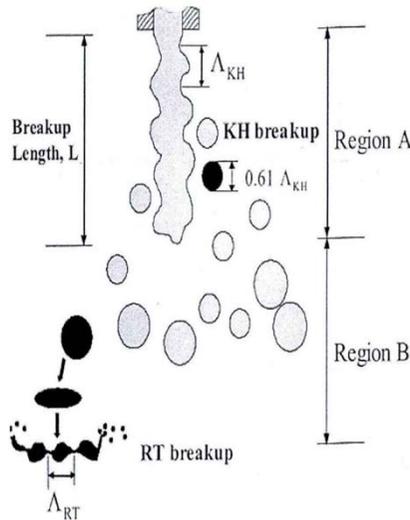


Cylinder Pressure of 25% loads



喷雾模型

本文采用KH-RT模型来模拟液滴破碎过程。其中，KH模型用于描述喷雾液核区(长度为L)的破碎现象。在喷雾气液混合区，液滴破碎取决于KH和RT这两种不稳定表面波的相互竞争，因此，该区的液滴破碎过程由KH模型和RT模型共同描述。



液滴碰壁模型	Rebound/slide
液滴碰撞模型	NTC
液滴蒸发模型	Frossling
液滴湍流扩散模型	O'Rourke

$$\frac{dr_0}{dt} = \frac{r_0 - r}{\tau_{KH}} \quad \tau_{KH} = \frac{3.726 B_1 r_0}{\Lambda_{KH} \Omega_{KH}}$$

τ_{KH} 是液滴破碎的KH破碎时间尺度, Λ_{KH} 和 Ω_{KH} 分别是增长最快的波的波长和增长速率, KH模型破碎时间常数 B_1 是一个与喷嘴内部的初始扰动有关的模型常数, 取决于喷嘴的结构和工作特性。

$$L = C_{bl} d_0 \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \quad \tau_{RT} = \frac{C_\tau}{K_{RT}} \quad r = \pi \frac{C_{RT}}{K_{RT}}$$

RT模型破碎长度常数 C_{bl} , RT模型破碎时间常数 C_τ 和RT模型尺寸常数 C_{RT} 均是可调模型参数。

燃烧模型

Shell模型

化学反应速率系数 f_4 表达式为：
$$f_4 = A_{f04} e^{\left(-\frac{E_{f4}}{R_u T}\right)} [O_2]^{x_4} [C_n H_{2m}]^{y_4}$$

其中滞燃期对常数 A_{f04} 最敏感，Shell模型的标定主要是改变 A_{f04} 使滞燃期与实验值匹配。

特征时间尺度燃烧（CTC）模型

层流反应时间尺度 τ_{chem} 和湍流混合时间尺度 τ_{turb} 分别表示为

$$\tau_{chem} = \frac{[C_n H_{2m}]^{0.75} e^{\left(\frac{E_{chem}}{R_u T_g}\right)}}{2A_{chem} [O_2]^{1.5}} \quad \tau_{turb} = C_{m2} \frac{k}{\varepsilon}$$

式中 A_{chem} 为化学时间尺度常数。 E_{chem} 为燃料活化能，本文中重油的活化能取为 95.7 kJ/mol ，柴油取为 77.4 kJ/mol 。 C_{m2} 为湍流时间尺度常数，通常其值越小则燃烧反应越剧烈。

排放模型

碳烟 (Soot) 模型

Hiroyasu-NSC模型认为在一个计算网格内的soot生产量 $M_s(g)$ 可以通过soot生成率和soot氧化率求得:

$$\frac{dM_s}{dt} = \dot{M}_{sf} - \dot{M}_{so} \quad \dot{M}_{sf} = A_{sf} P^{0.5} \exp(-E_{sf}/RT) \cdot M_{fv}$$

其中 A_{sf} 是Arrhenius系数, 本文中取 A_{sf} 为420。

氮氧化物 (NOx) 模型

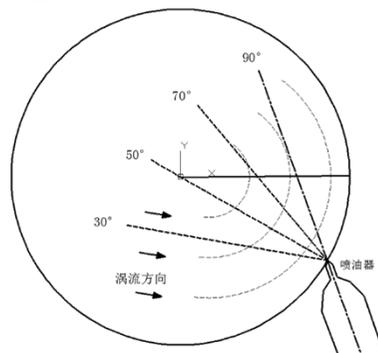
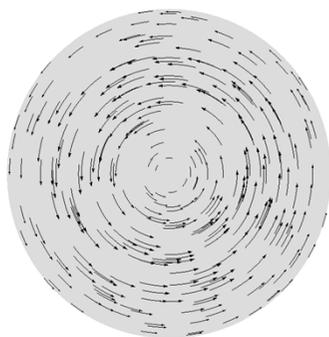
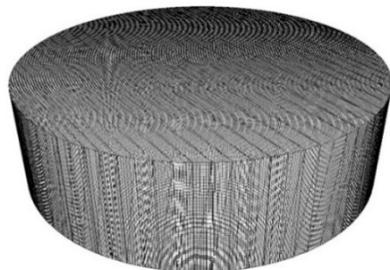
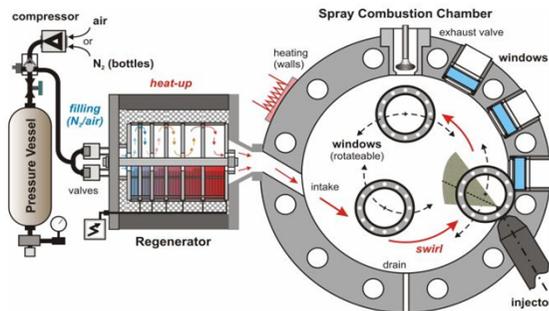
缸内NOx的生成机理选用扩展的Zeldovich模型, 该模型被Heywood提出用于计算NO的生成过程:

$$\frac{d[NO]}{dt} = \frac{2R_1 \left\{ 1 - \left(\frac{[NO]}{[NO]_e} \right)^2 \right\}}{1 + \left(\frac{[NO]}{[NO]_e} \right) \cdot R_1 / (R_2 + R_3)} \cdot \beta_{NO}$$

其中, R_1 , R_2 和 R_3 都是给定的系数。 β_{NO} 是将NO等效成NOx的常数。

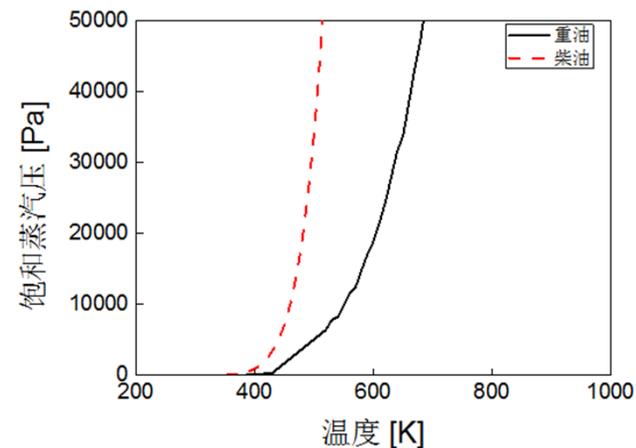
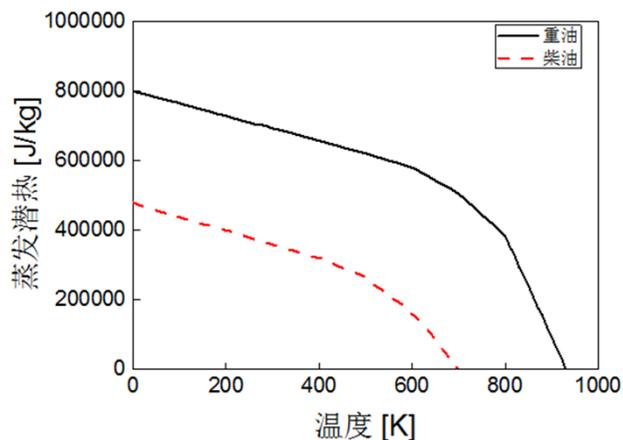
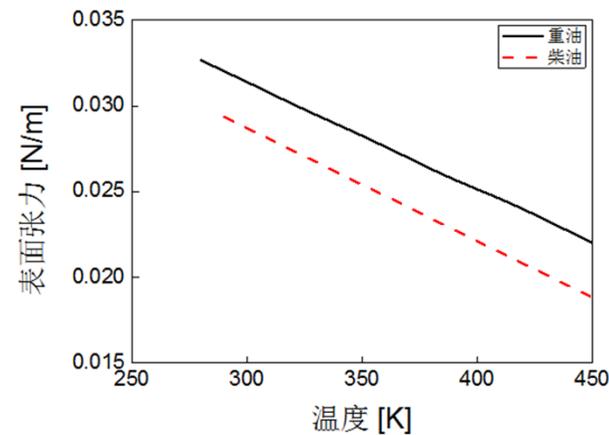
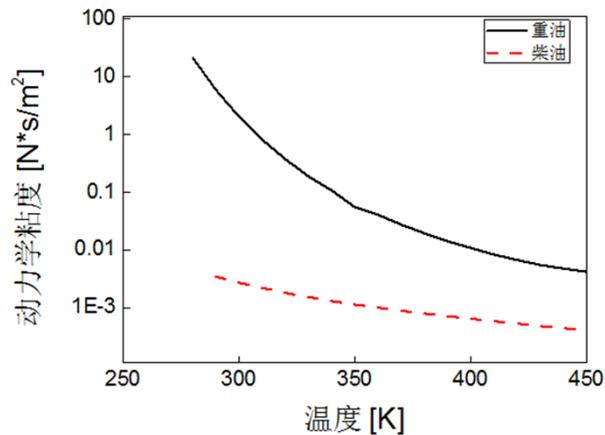
定容弹中冷态喷雾的研究

计算条件



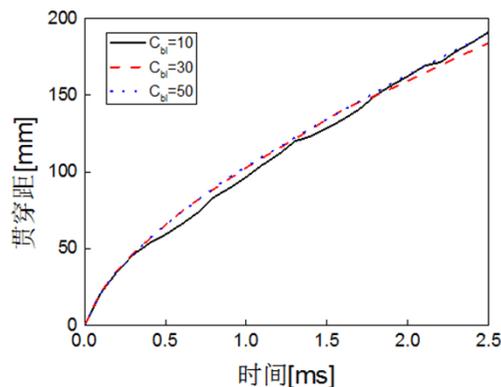
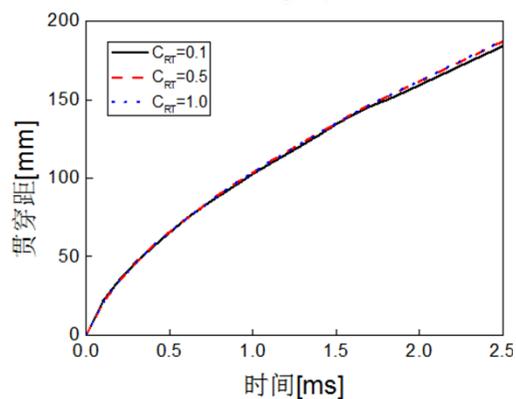
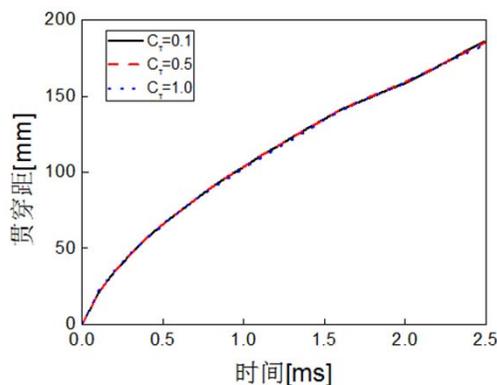
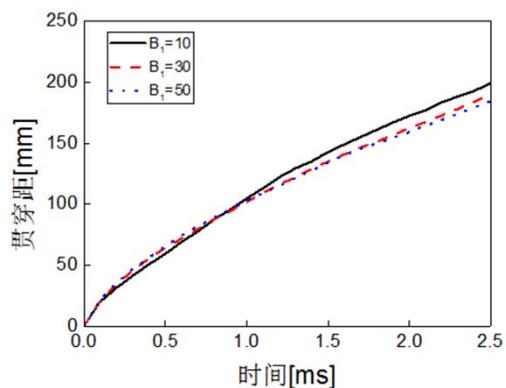
边界条件	旋流式定容弹
直径(mm)	500
高(mm)	150
环境气体压力(bar)	90/60/30
环境气体温度(K)	900
喷油压力(bar)	1000
喷油持续期(ms)	25
喷孔直径(mm)	0.875
涡流速度(m/s)	15~25
环境气体	N ₂

重油参数



- 重油和柴油的物理性质有很大的差异，因此会对喷雾破碎、蒸发和油气混合造成很大影响，进而影响燃烧和排放过程。

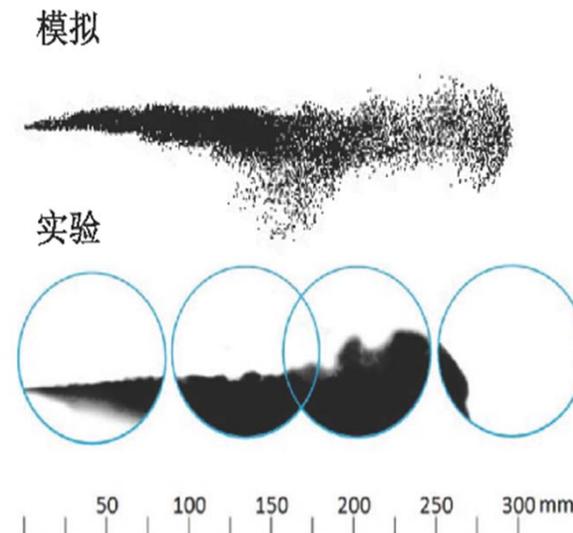
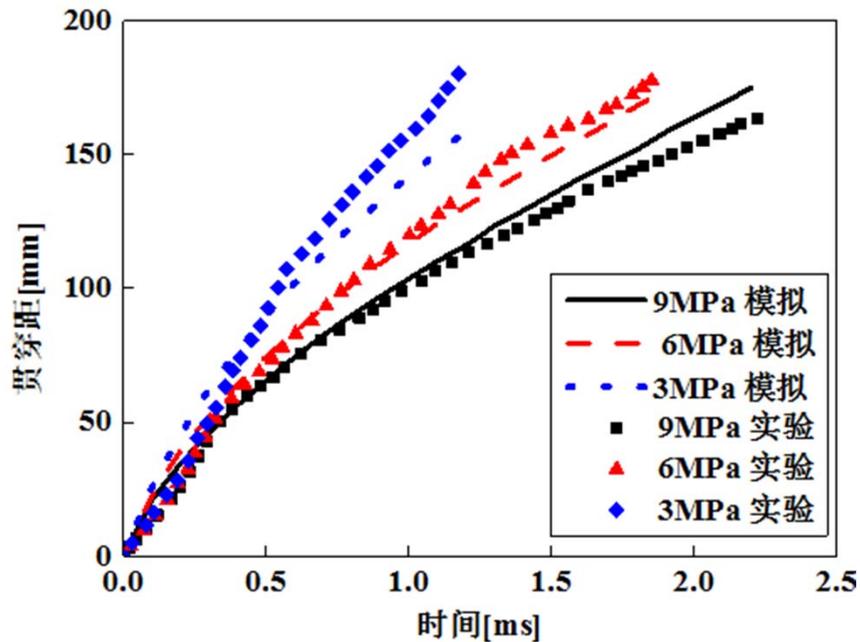
重油喷雾模型参数敏感性



- 随着 B_1 增大，重油喷雾贯穿距减小，但 B_1 从30到50变化对贯穿距影响很小。
- C_τ 的变化对重油喷雾贯穿距基本无影响。
- C_{RT} 的变化对重油喷雾贯穿距影响很小。
- 随着 C_{bl} 增大，重油喷雾贯穿距前期会略微增大，后期略微减小，总体影响很小。

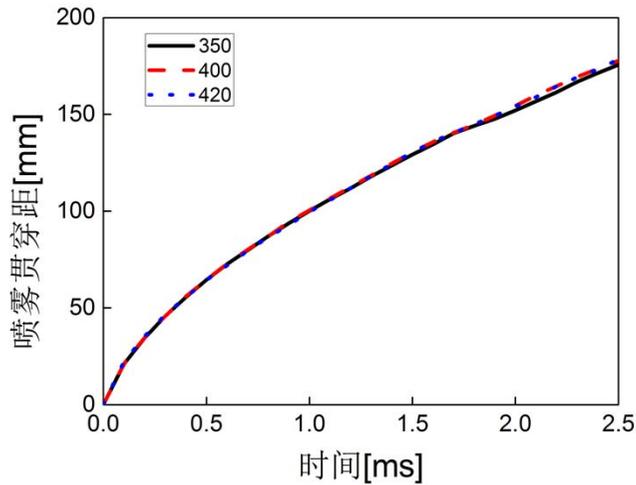
定容弹中冷态喷雾的研究

重油喷雾标定

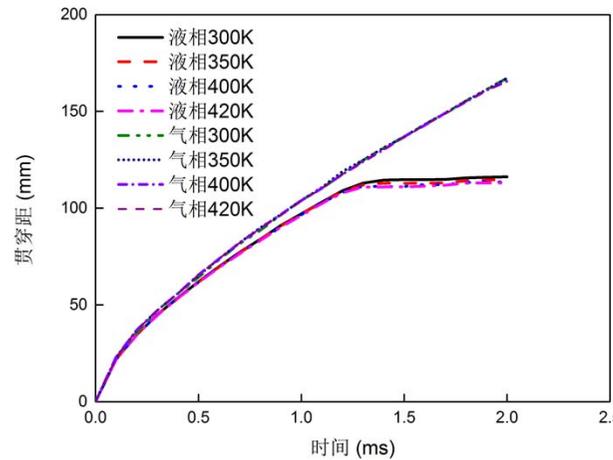


- 当前使用的燃油喷雾模型及重油物性参数得到的喷雾贯穿长度与实验吻合较好，随着环境压力减小，喷雾贯穿距逐渐增大。

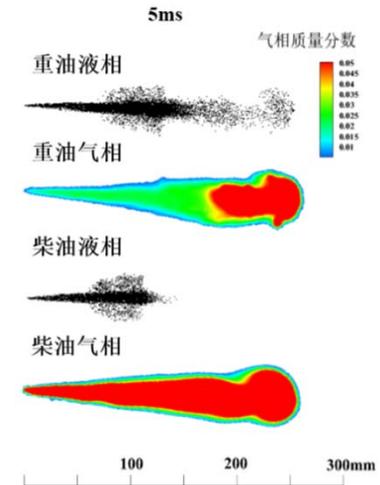
燃油性质对喷雾的影响



重油不同燃油温度贯穿距对比



柴油不同燃油温度贯穿距对比

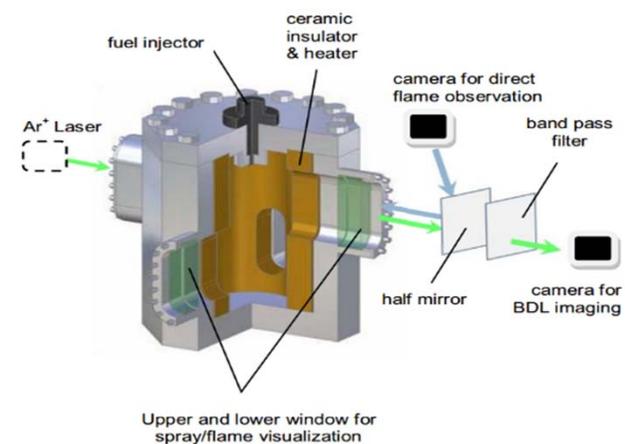
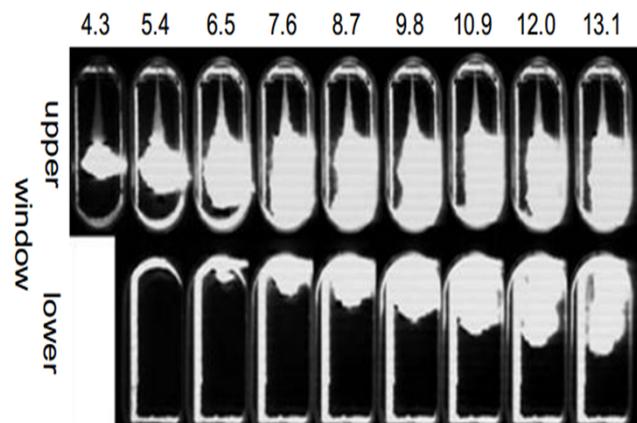
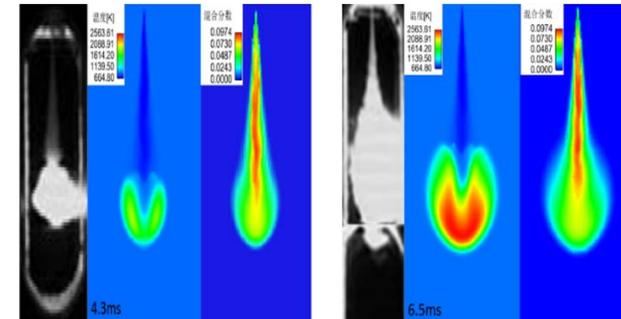


燃油温度400K
喷油开始后5ms

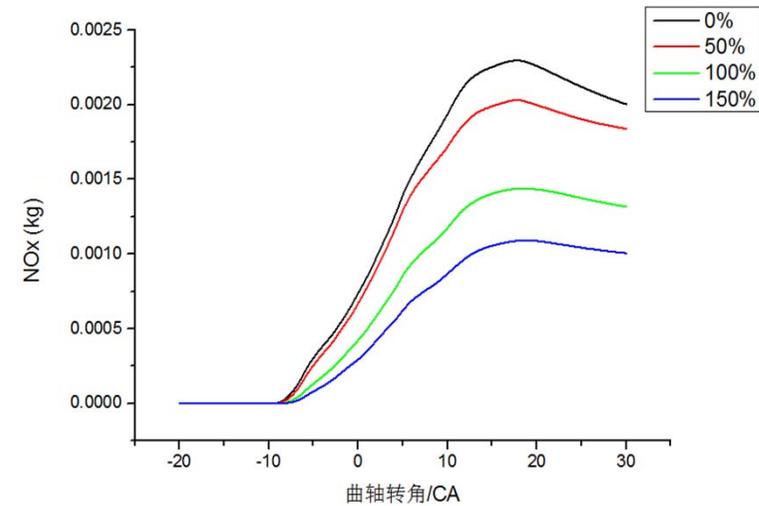
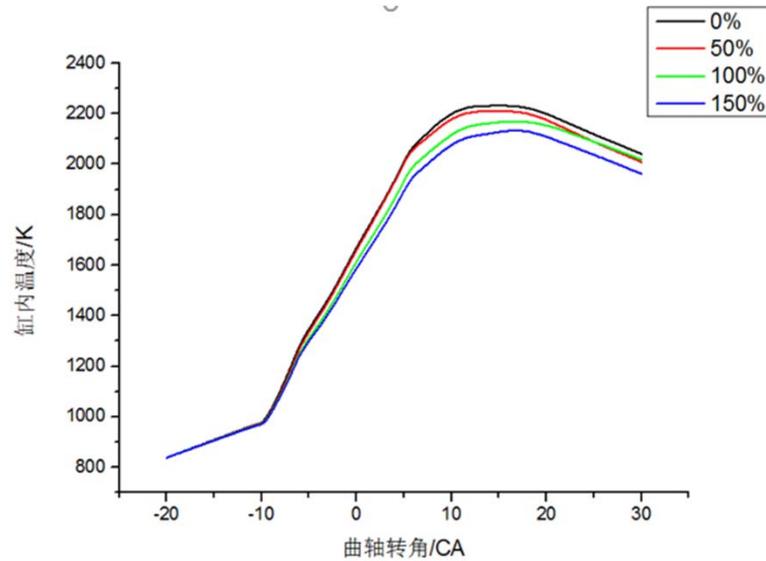
- 对于两种燃料，燃油温度对贯穿长度没有太大的影响，同时贯穿长度随时间一直增加。对于轻质柴油来说，其贯穿长度总体上比重油燃料要小，在2ms喷雾贯穿长度基本不受燃油温度的影响。由于重油和轻质柴油两者较大的雾化特性参数的不同，在当前工况下重油喷雾的液相长度并不能达到一个稳定的贯穿长度。轻质柴油的液相贯穿长度在高温高压的环境下会达到一个稳定的贯穿长度。

重油燃烧研究

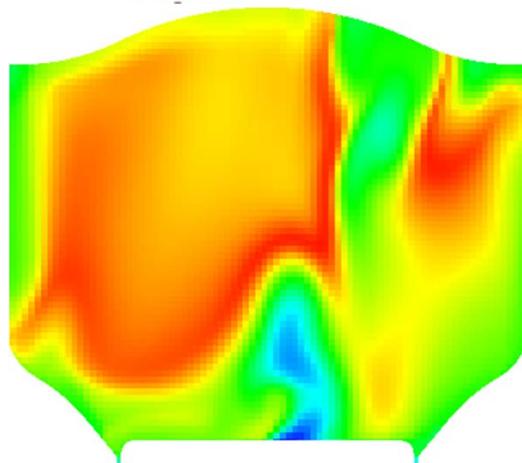
- 实验值来源：日本九州大学
- 模拟结果：从温度和混合分数的变化可以看出，喷雾顶部区域先着火，形成火核并向外发展。火焰长度发展情况模拟与实验整体拟合较好



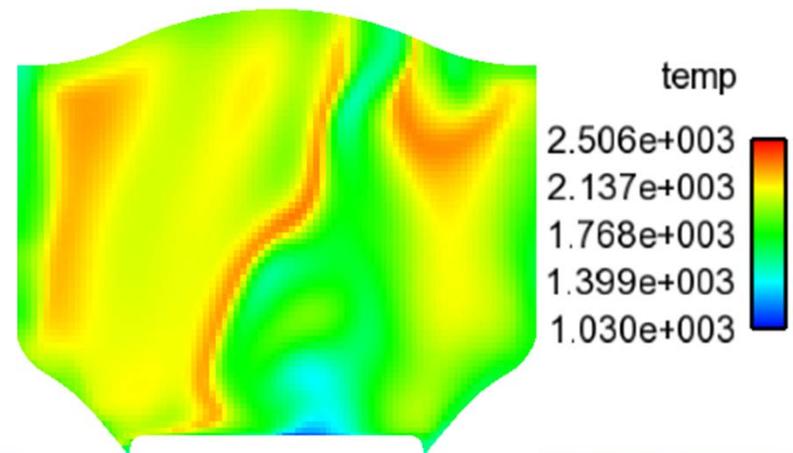
进气加湿量对燃烧温度和NOx的影响



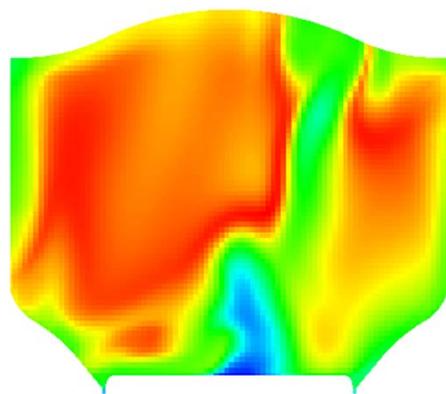
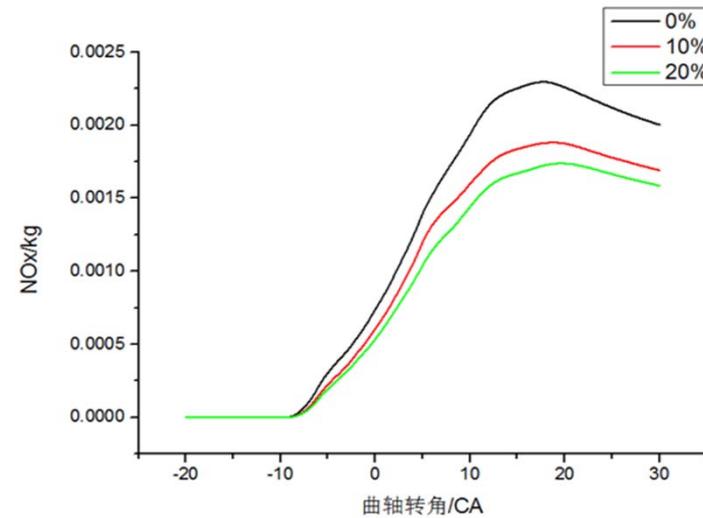
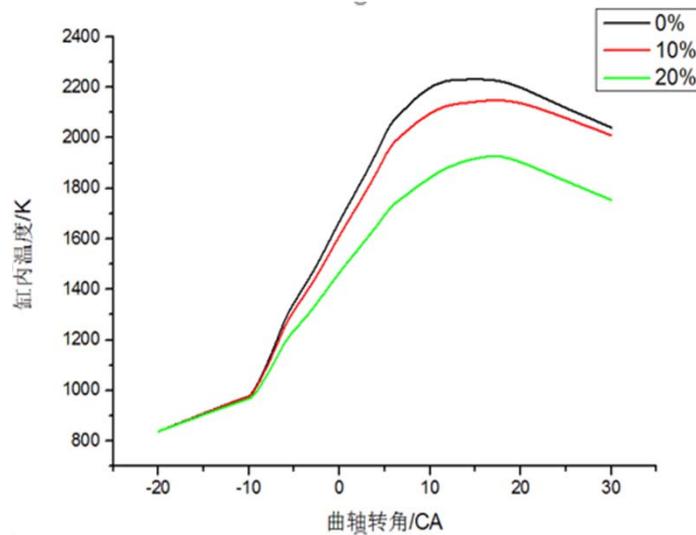
50%
进气
加湿
量



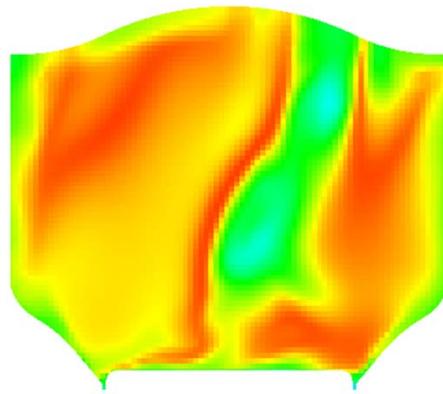
150%
进气
加湿
量



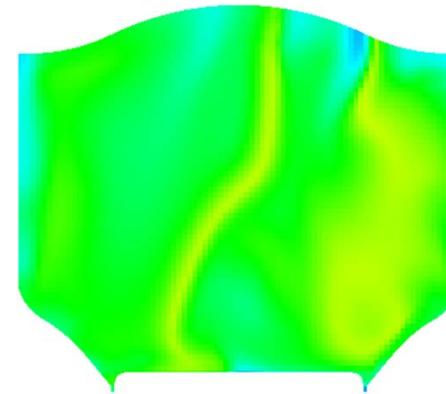
EGR对燃烧温度和NOx的影响



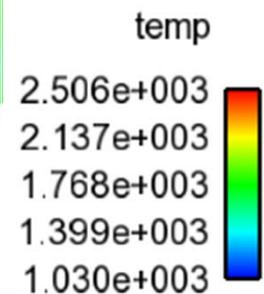
0%EGR率



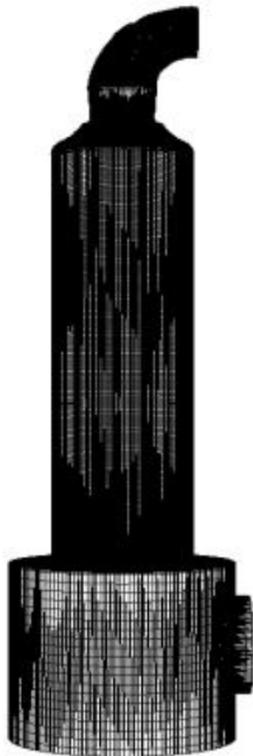
10%EGR率



20%EGR率



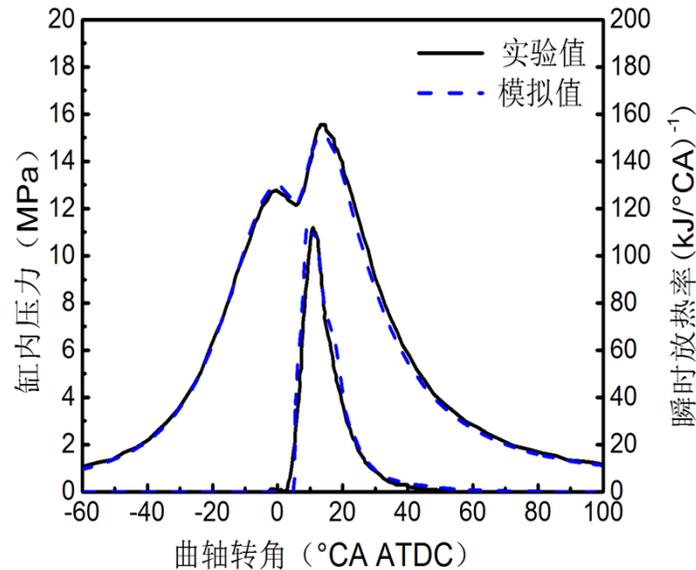
二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发



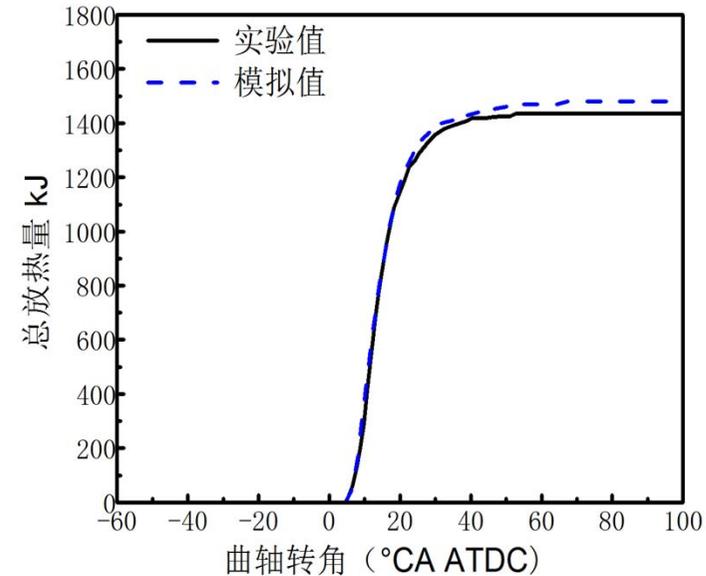
参数名称	参数值
缸径 x 行程 (mm)	500 x 2200
压缩比	18.2
转速 (r/min)	112
排气阀开关时刻 (° CA ATDC)	-97/106.5
扫气口开关时刻 (° CA ATDC)	143/217
喷油器个数	3
喷孔数	4

湍流模型	RNG $k-\epsilon$ 模型
喷雾破碎模型	KH-RT 模型
燃烧模型	CTC 特征时间燃烧模型
点火模型	Shell 自点火模型
NO _x 模型	Extended Zeldovich NO 排放模型

二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发



试验和模拟缸压放热率曲线对比



试验和模拟的总放热量比较

变量	模拟值	实验值	误差
功率/kw	5229.3	5331	1.9%
最大爆发压力/Mpa	15.66	15.6	0.35%
油耗/g · (kw · h) ⁻¹	169.2	174	2.8%
平均有效压力/Bar	16.5	16.25	1.5%
过量空气系数	2.43	2.45	0.82%
扫气箱压力/Mpa	0.337	0.332	1.5%
扫气箱温度/K	308	304	1.3%

Liu, et al. SAE 2016-01-2187

二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发

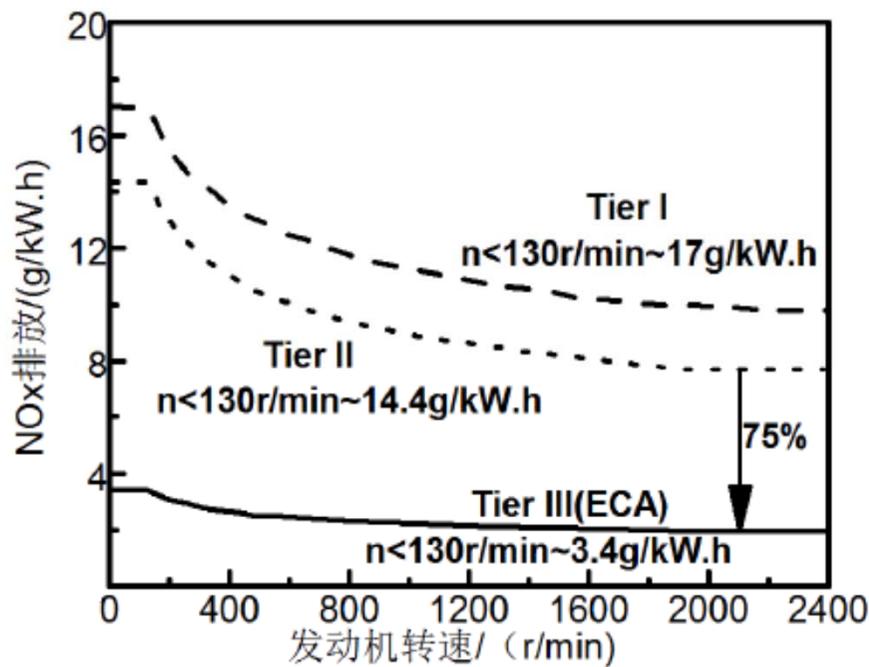
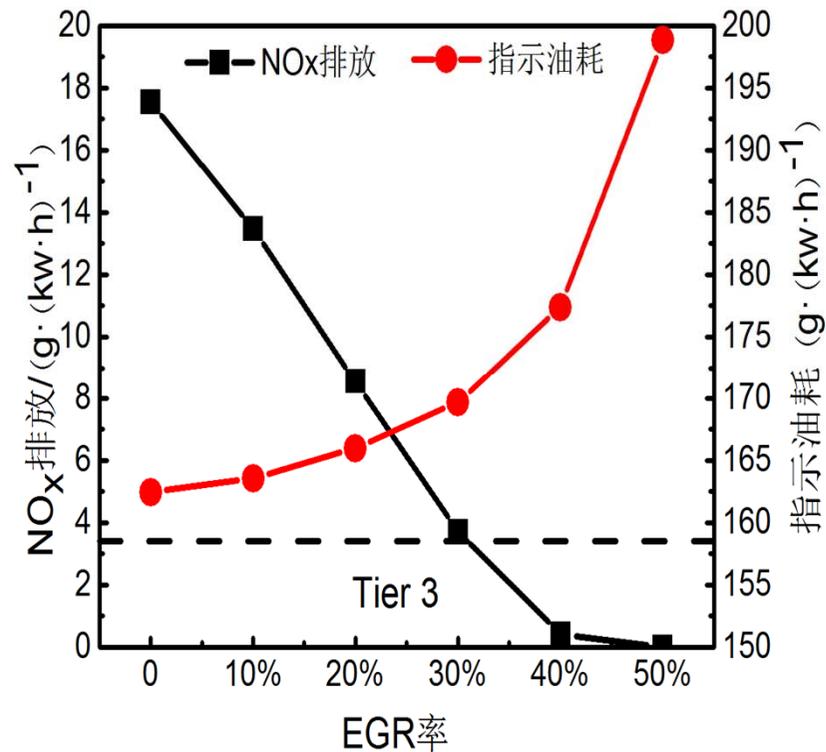
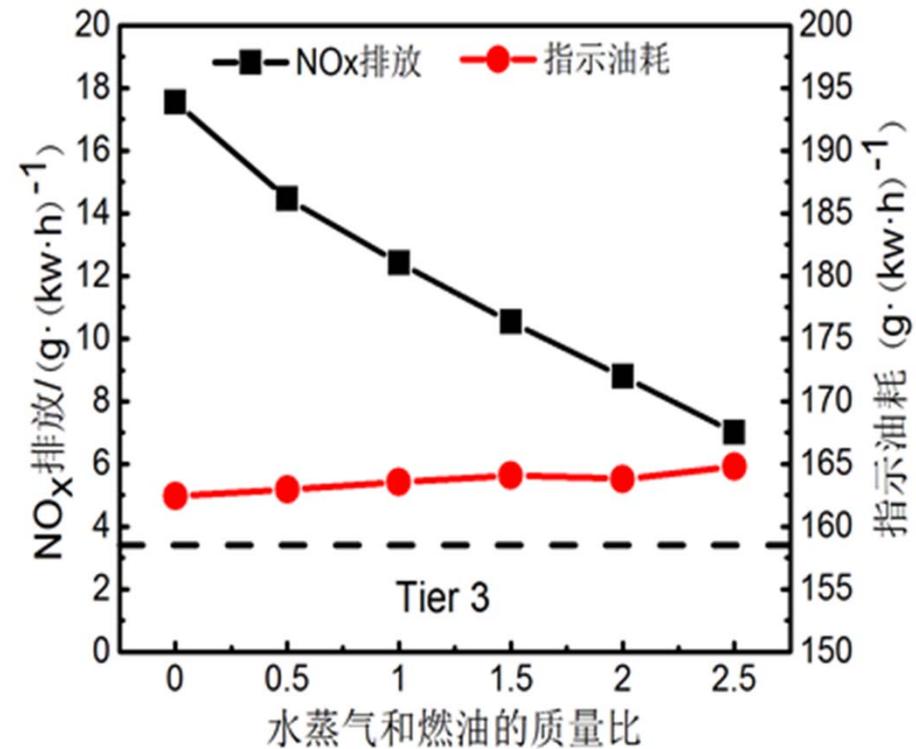
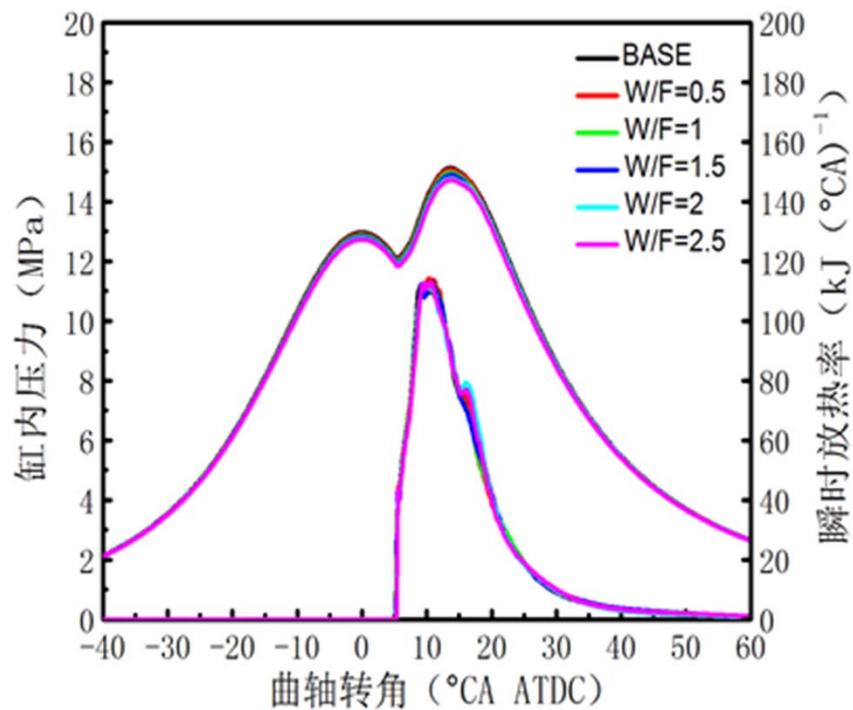


图 1 NOx 排放法规发展

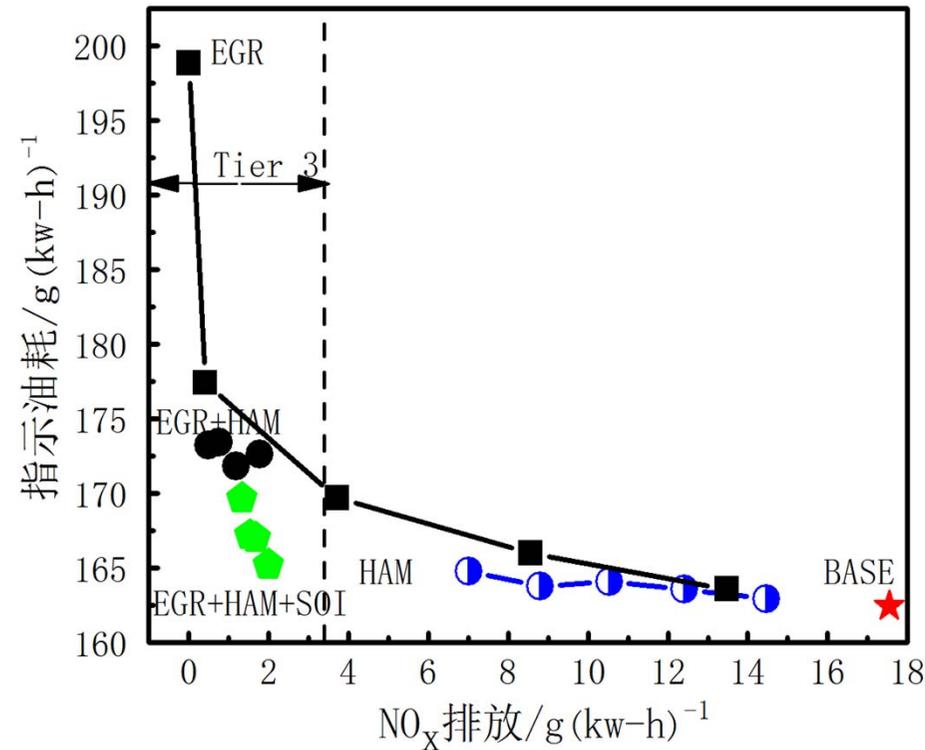


Liu, et al. SAE 2016-01-2187

二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发



二冲程船用柴油机喷雾燃烧系统开发



解决NO_x-ISFC的trade-off关系技术路线

Liu, et al. SAE 2016-01-2187

- 结合EGR和HAM各自优势，选用中等EGR率、中等进气加湿量，并结合提前喷油时刻，可以保证指示油耗较原机牺牲较小（1.7%）的前提下使NO_x排放满足Tier III排放法规的要求。

未来研究方向

1. Gas jet modeling;
2. In-nozzle flow modelling;
3. Supercritical spray and impingement modeling;
4. Knocking and Pre-ignition combustion simulation;
5. Interaction between flame propagation and auto-ignition in hybrid combustion;
6. Dual fuel combustion;
7. Principle of cyclic variation;
8. Multi-cylinder simulation;
9. Catalytic combustion phenomenon;
10. Soot modeling;

- 感谢IDAJ的支持
- 感谢内燃机燃烧学国家重点实验室的支持
- 感谢科技部创新工程项目的支持

感谢聆听！

周磊 Lei.zhou@tju.edu.cn

