

直喷汽油机的喷嘴选型匹配研究

张玉银

上海交通大学汽车工程研究院教授

yuyin.zhang@sjtu.edu.cn



1

喷嘴选型问题的提出

2

如何使模拟计算更准？

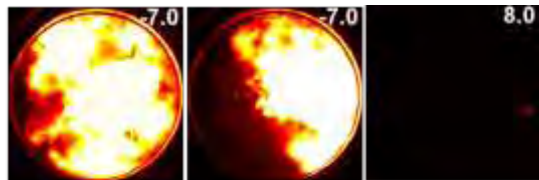
3

如何算得更快？

4

喷嘴选型实例

发动机燃烧循环波动性



正常燃烧

部分燃烧

失火

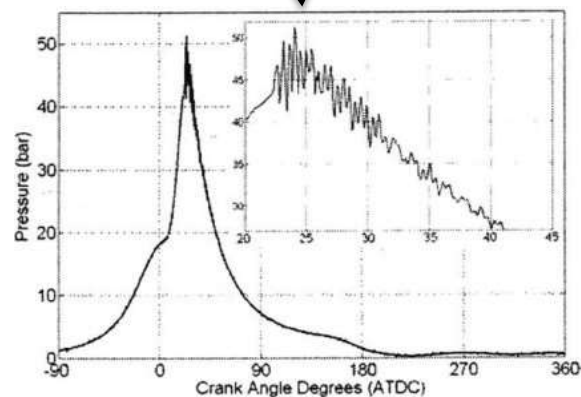


无积碳

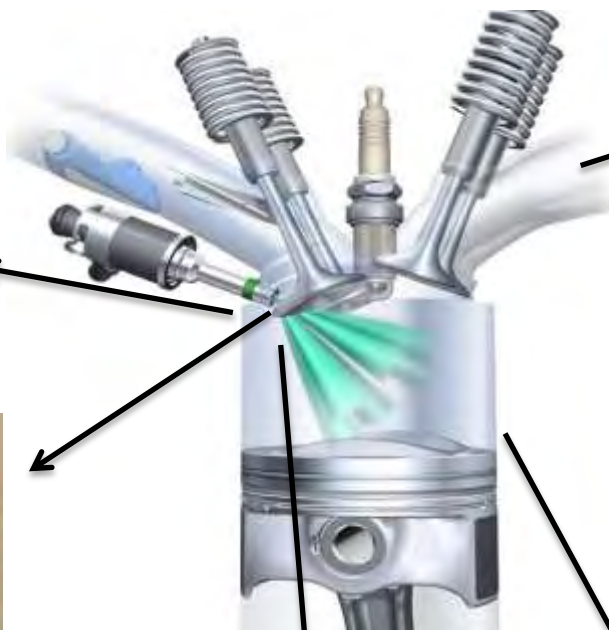


积碳

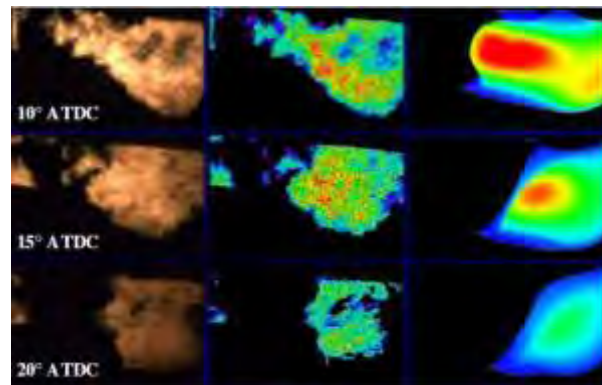
爆震



直喷汽油机燃烧系统优化是关键!!!

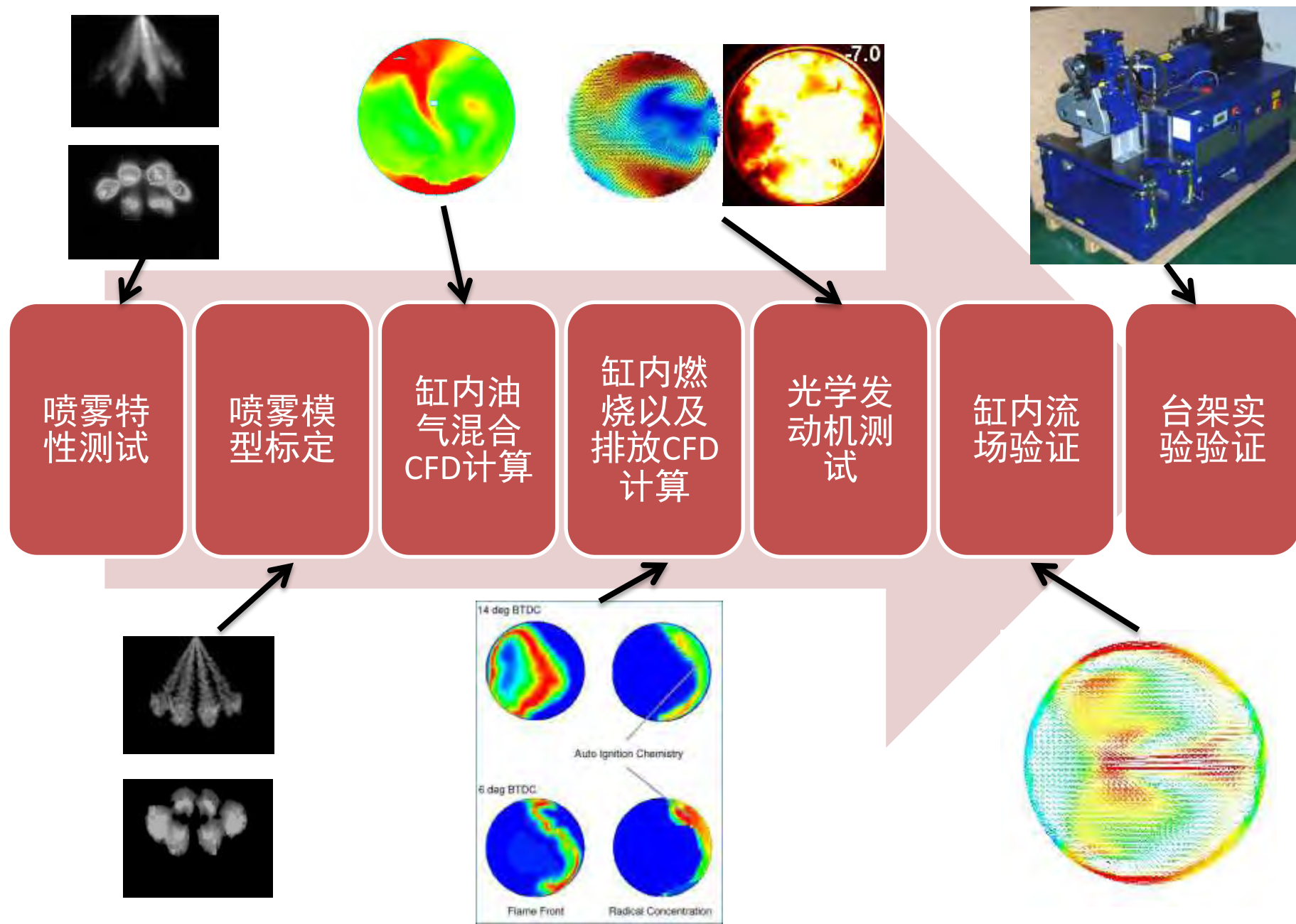


HC, soot排放



燃油碰壁→机油稀释

基于CFD的燃烧系统优化



1

喷嘴选型问题的提出

2

如何使模拟计算更准？

3

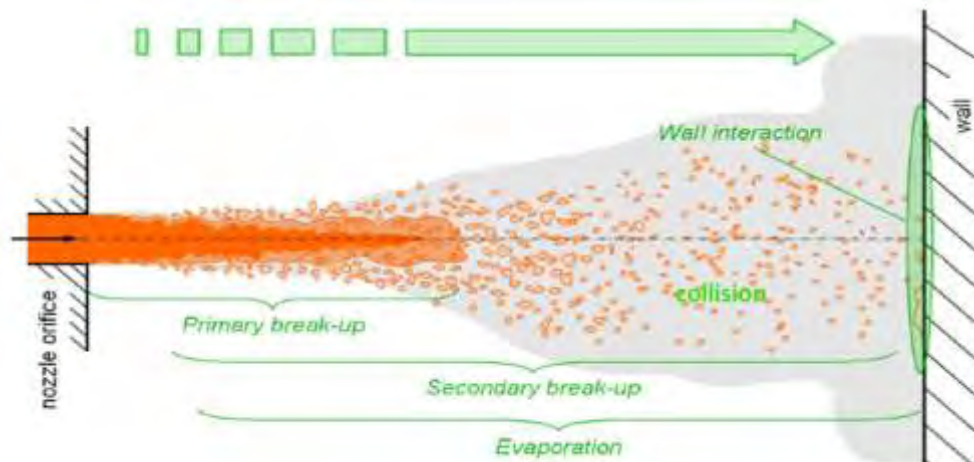
如何算得更快？

4

喷嘴选型实例



液体燃料的雾化、蒸发的相关模型

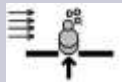
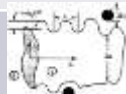
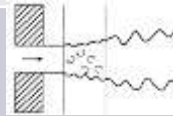
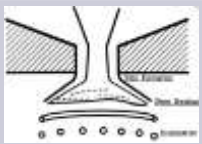


喷雾模型大多需要标定，其中以破碎模型标定最难、最为重要！

	作用	常见模型	是否需要标定
破碎模型	液滴初次、二次破碎的速度，时机以及子液滴的相关信息	TAB, WAVE, KH-RT Huh Gosman, LISA Cavitation Induced Atomization	是
蒸发模型	液滴与周围环境气体的物质与热量交换过程	Dukowicz Spalding Abramzon Frolov	是
湍流扩散模型	液滴在环境气体作用下的随机脉动	O'Rourke	否
液滴碰撞聚合模型	液滴碰撞或者聚合的判断方法以及之后的性质	O'Rourke Schmidt - O'Rourke Nordin	否
液滴壁面相互作用模型	液滴与壁面之间的碰壁行为方式以及子液滴、油膜的性质	Naber and Reitz Bai-Gosman Mundo Sommerfeld Amsden O'Rourke	是(仅用于缸内计算)



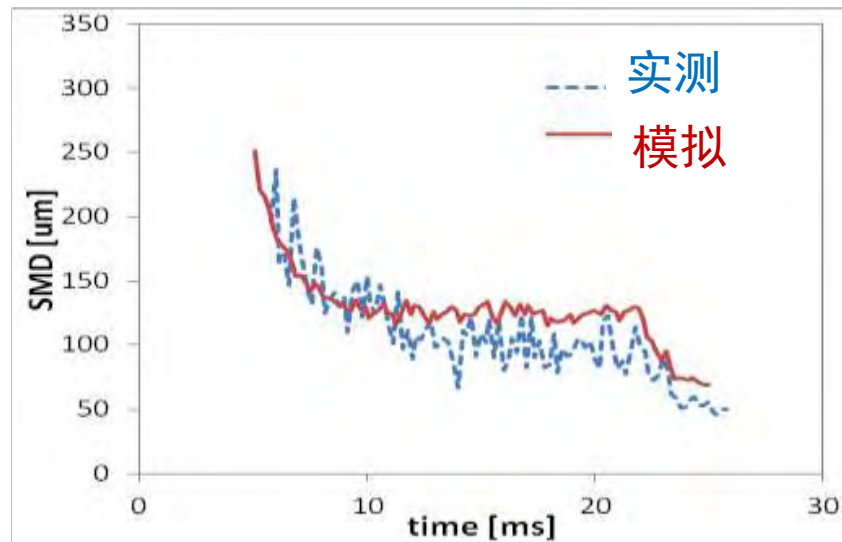
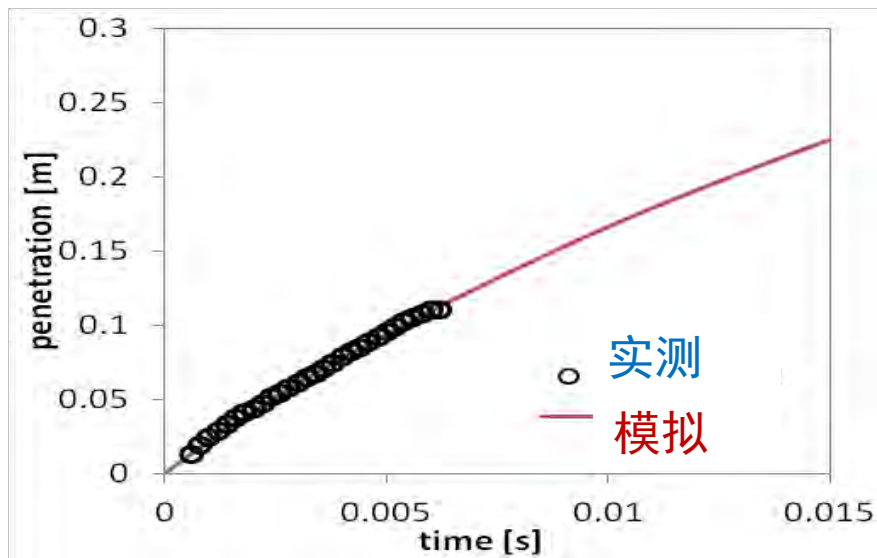
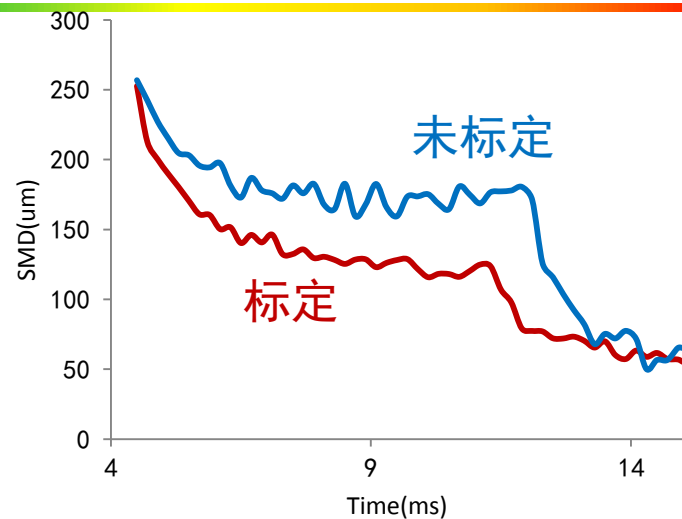
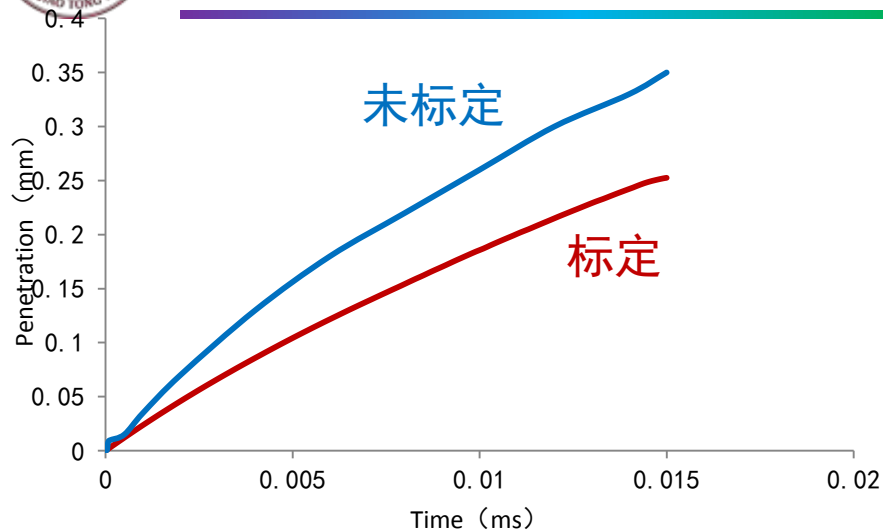
常用喷雾破碎模型

模型名称	发明者及时间	原理及基本假设	原理示意图	适用范围	模型公式	需要标定的经验参数
TAB	1987, O'Rourke and Amsden	弹性力学假设		二次破碎	$\frac{u}{y} = \frac{2}{3} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{(U + u - u_0)^2}{r^2} - \frac{8\sigma(T_d)}{\rho r^2 y} - \frac{5\rho_l(T_d)}{\rho r^2} y$ $u^2 = \frac{3}{2} + \frac{8}{3} \frac{\sigma(T_d)}{\rho_l u_0^2}$	$C_K C_D C_f$ C_b
ETAB	1997, Tanner F. X.	弹性力学假设+新的子液滴平均尺寸分布		二次破碎	$\frac{u}{y} = \frac{2}{3} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{(U + u - u_0)^2}{r^2} - \frac{8\sigma(T_d)}{\rho r^2 y} - \frac{5\rho_l(T_d)}{\rho r^2} y$ $u^2 = \frac{3}{2} + \frac{8}{3} \frac{\sigma(T_d)}{\rho_l u_0^2}$ $K_{per} = 4\pi\sigma r^2 + 5\pi C_D \rho_l r^3 U^2 / 18$	$C_K C_D C_f$ C_b
WAVE/KH	1987, Reitz and Diwakar	气液表面波KH不稳定分析		初次雾化	$\frac{A}{u} = 1.02 \frac{(1 + 0.42Z^2)(1 + 0.47Z^2)}{(1 + 0.87W_0^{1/2})^{1/2}}$ $\Omega \left(\frac{\rho_l a}{\sigma} \right)^{1/3} = \frac{0.34 + 0.38W_0^{1/2}}{(1 + Z)(1 + 1.47Z^2)}$	$C_1 C_2 C_D$ B_0
KH-RT	1998, M. A. Patterson, R. Reitz	气液表面波KH不稳定分析+RT波不稳定性增长		初次雾化及二次破碎	$\frac{A}{u} = 1.02 \frac{(1 + 0.42Z^2)(1 + 0.47Z^2)}{(1 + 0.87W_0^{1/2})^{1/2}}$ $\Omega \left(\frac{\rho_l a}{\sigma} \right)^{1/3} = \frac{0.34 + 0.38W_0^{1/2}}{(1 + Z)(1 + 1.47Z^2)}$ $A = \sqrt{\frac{2\sigma}{3}} \frac{\sqrt{\sigma \rho_l}}{\sigma \rho_l}$ $\Omega = \sqrt{\frac{2\sigma}{3}} \left(\frac{\sigma \rho_l}{3\sigma} \right)^{1/3}$	$C_1 C_2 C_D$ B_0
Huh Gosman	1998, K.Y. Huh	液体表面湍流脉动是液体分裂雾化动因		初次雾化	$L_A = C_1 L_t + C_2 L_w$ $\tau_A = C_3 \tau_t + C_4 \tau_w$ $\tau_{w,t} = \left[\frac{\rho_l \rho_g}{(\rho_l + \rho_g)^2} \left(\frac{U}{L_w} \right)^2 - \frac{\sigma}{(\rho_l + \rho_g) L_w^2} \right]^{-1/2}$ $L_t = C_5 \frac{k_0^{3/2}}{\varepsilon_0} \quad \tau_t = C_6 \frac{k_0}{\varepsilon_0}$	$C_1 C_2 C_3$ C_4
Cavitation Induced Atomization	1999, C. von K. Sarre	喷空内空化现象是液体分裂雾化动因		初次雾化	$\alpha_c = \alpha_1 \cdot n_2 \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$ $\frac{dR}{dt} = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\rho(R)}{\rho_l} \frac{p_c - p}{\rho_l} & \text{if } p(R) > p_c \\ -\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{p_c - p(R)}{\rho_l} & \text{if } p(R) < p_c \end{cases}$	$C_1 C_2 C_3$ C_d
LISA (The Linearized Instability Sheet Atomization)	1999, D.P. Schmidt	平薄液片或者圆锥形薄膜气液表面KH不稳定性分析		伞形喷嘴初次雾化	$L_{transp} = \frac{U}{\Omega} \ln \left[\frac{\eta_0}{\eta_0} \right] \quad d_D = \left[\frac{3\pi d_0^2}{K_L} \right]^{1/2}$ $d_t = \left[\frac{16h}{K_s} \right]^{1/2} \quad K_L = \frac{1}{d_L} \left[1 + \frac{3\rho_l}{2(\rho_l \sigma d_L)^{1/2}} \right]^{1/2}$	$K_V C_d$

破碎模型有多种，分别可预测不同喷雾，但全需标定！



喷雾模型标定与否直接影响CFD计算精度

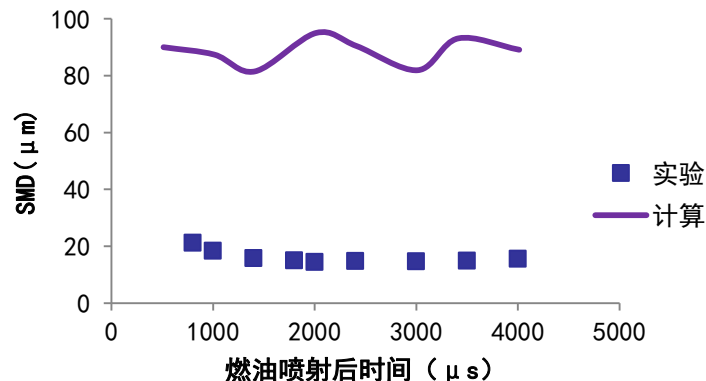
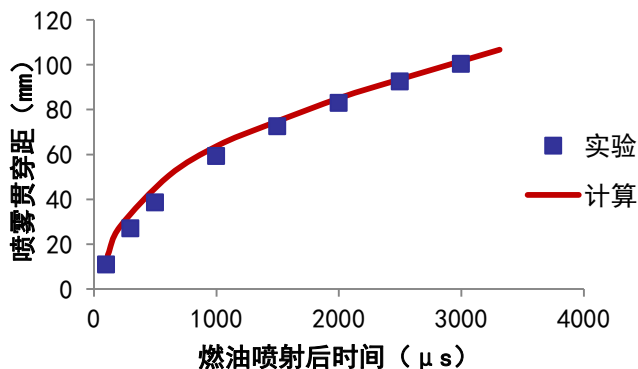


不同喷嘴可能具有完全不同的喷雾特性，目前尚无法根据孔内结构进行预测，需实测。



破碎模型仅用贯穿距标定是不够的！

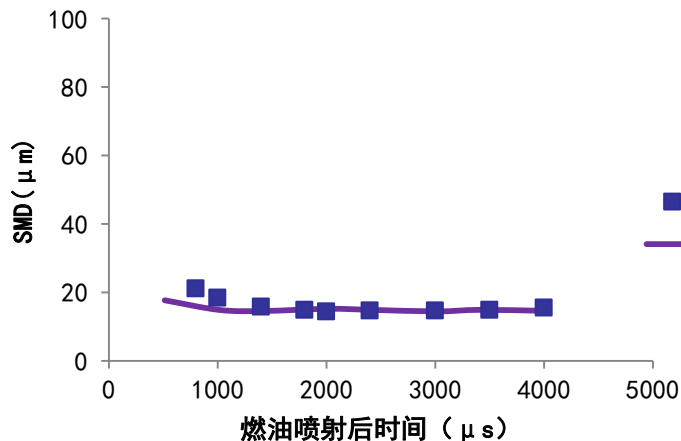
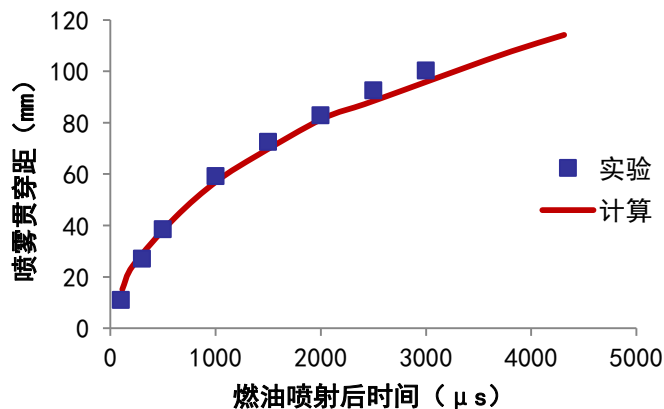
仅标定贯穿距



容易标定，但不准确

同时标定贯穿距与SMD

粒径大小是反映喷雾雾化程度的重要参数, 喷雾液滴直径越小, 蒸发速度越快, 油气混合过程就越快。为了提高喷雾仿真计算的准确性, 液滴SMD的标定是必不可少的环节。



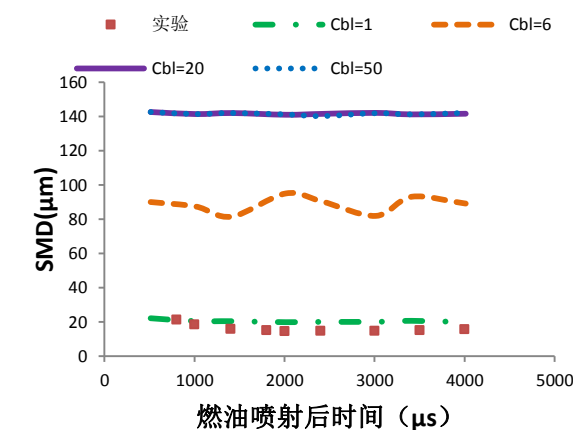
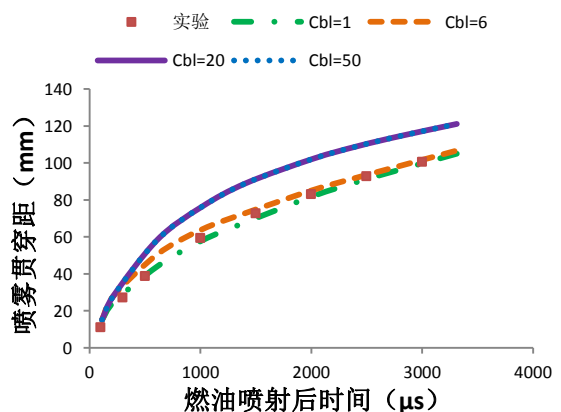
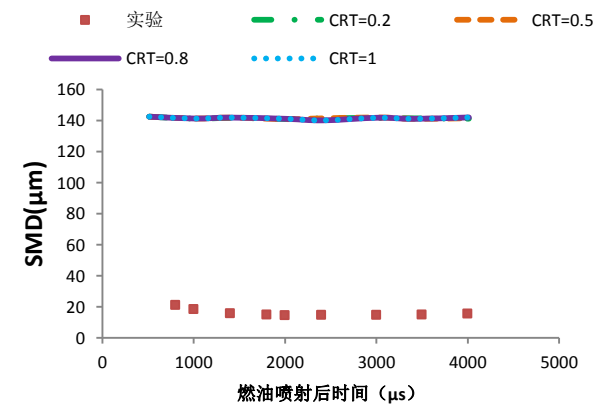
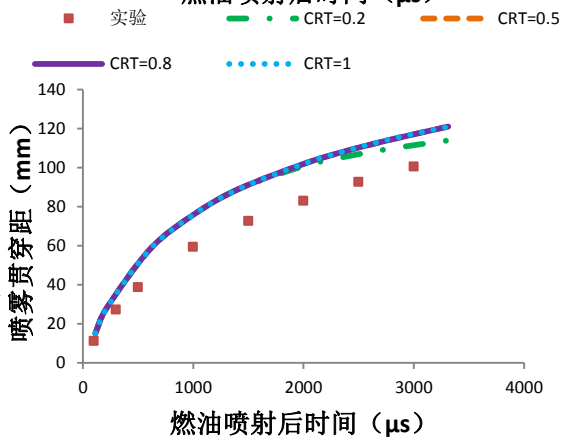
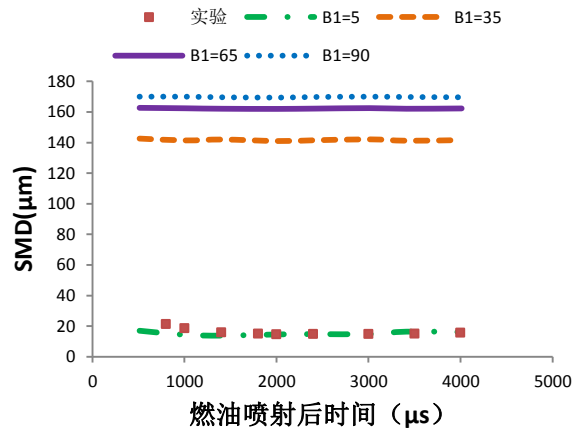
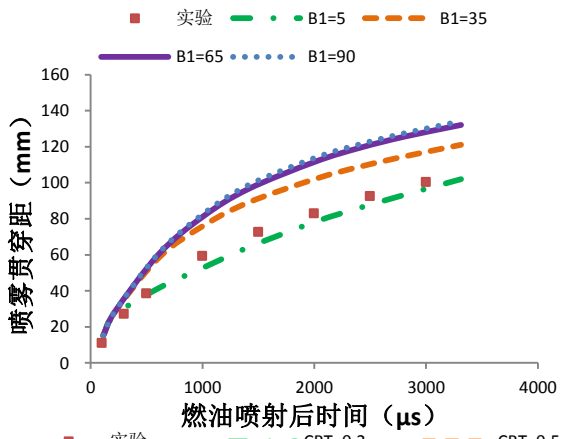
更加精确

模型参数敏感性分析 (KH-RT 破碎模型)

KH-RT: 该模型假设KH表面波的不稳定主要导致油束的初次破碎, 使得小液滴从液核区表面脱落; KH表面波和RT表面波的不稳定共同引起了第二次分裂雾化。

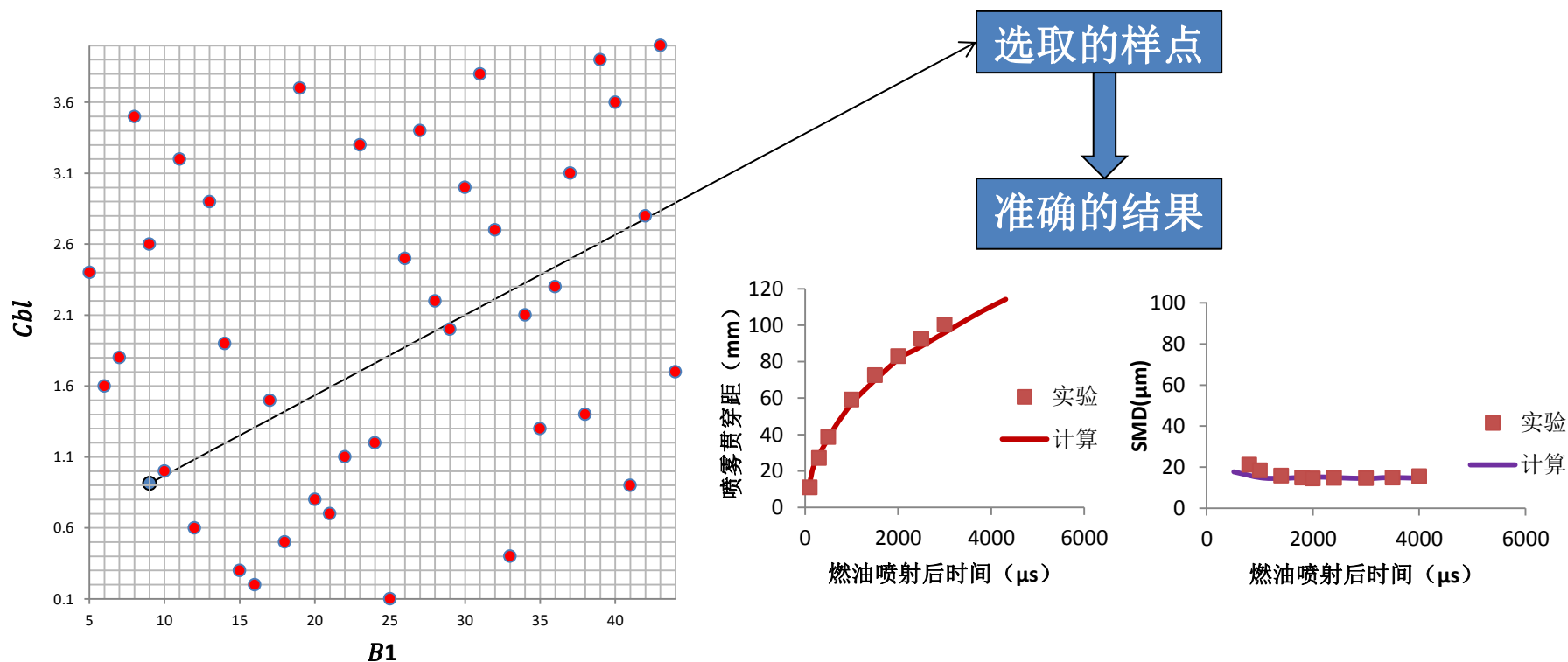
参数	可取范围
B0	0.61
C1	0.188
B1	5~100
C _t	1
C _{RT}	0.1~1.0
C _{bl}	0~50

敏感性分析



拉丁超立方（LHS）的实验设计（DOE）方法

从敏感性分析结果得知，B1和Cbl对计算结果影响较大，如果对他们进行随机抽样组合，会大大增加计算量，因此，为了减小计算量，同时保证合理的抽样，本文把它们作为设计变量进行LHS抽样。



计算结果与实测数据的吻合证明了模型标定的准确



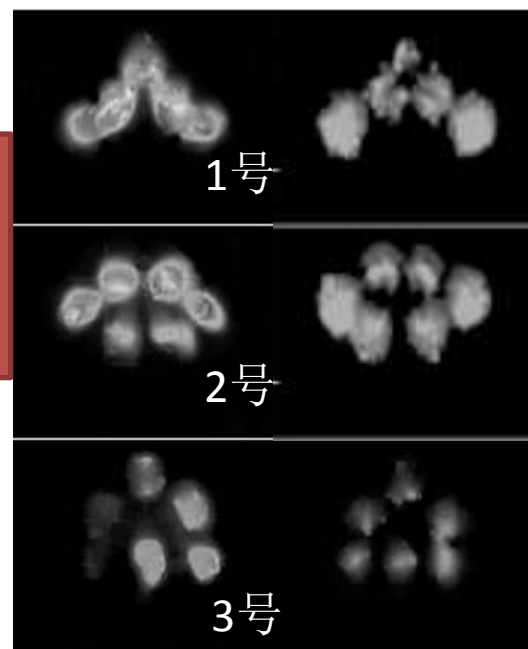
实测

计算

喷雾形态

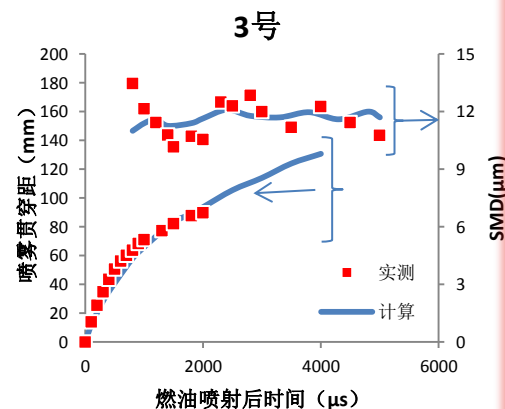
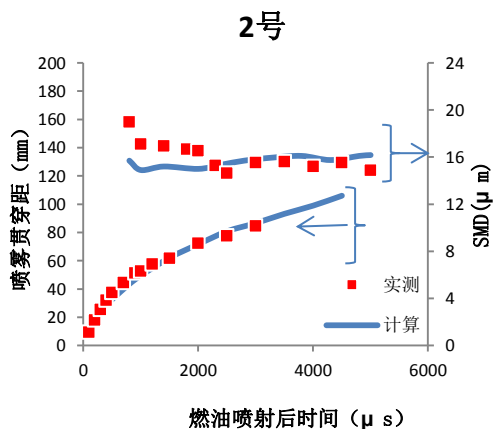
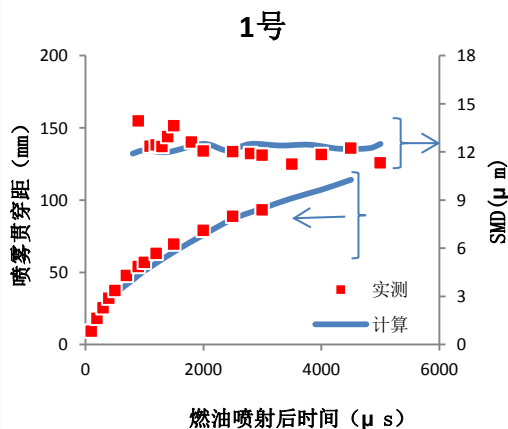
落点分布

贯穿距与
SMD



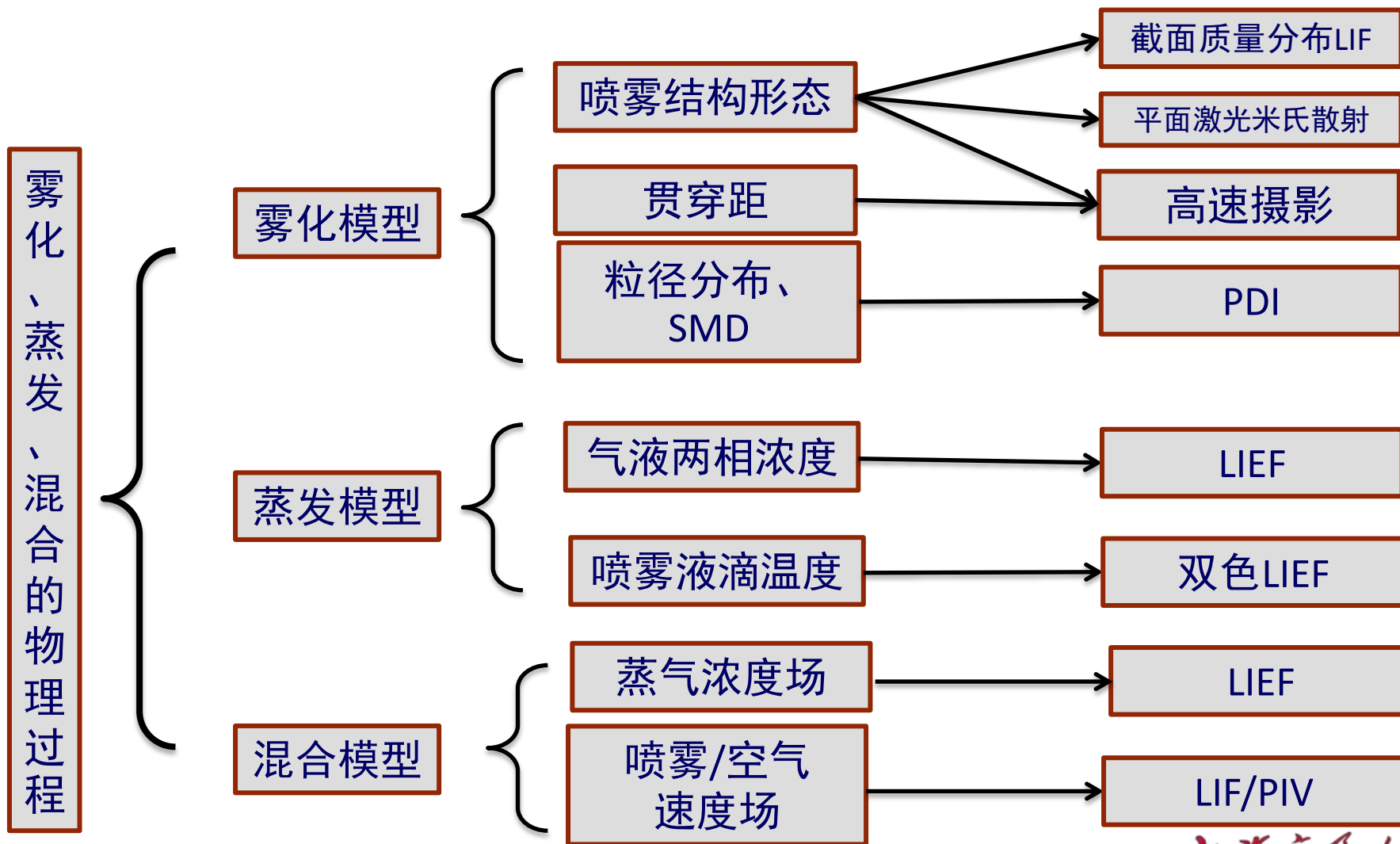
实测

计算





所需喷雾特性实验数据及常规测试方法



白光成像测试

落点分布测试

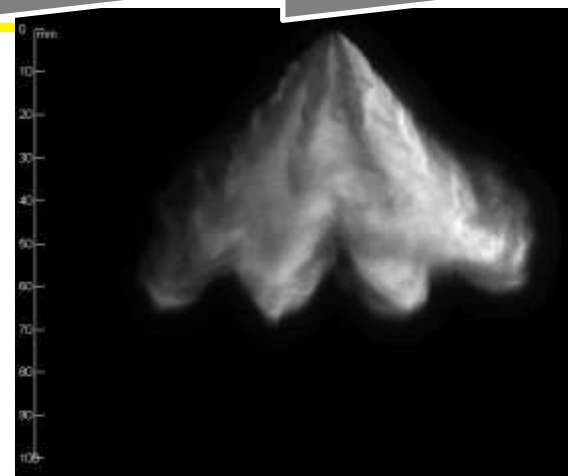
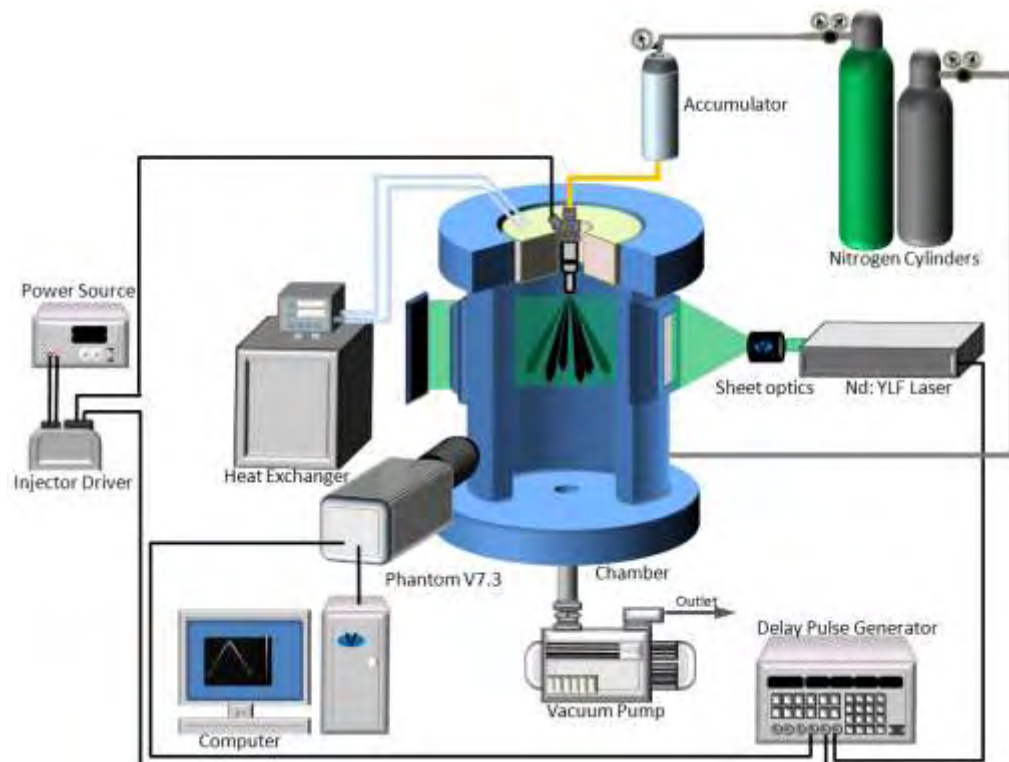
速度场测试

粒径测试

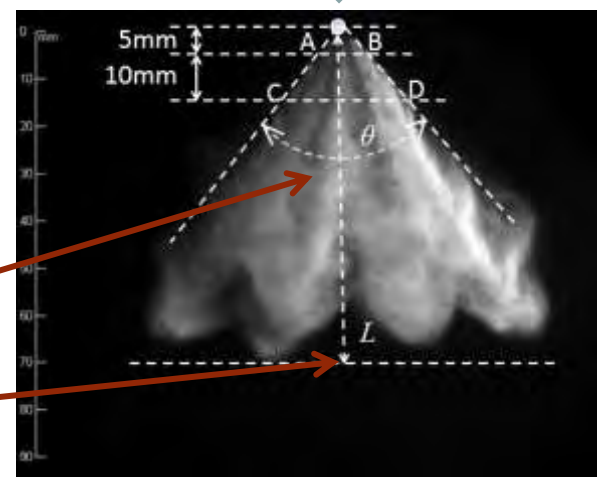
温度测试

浓度测试

喷雾宏观结构：高速摄影



图像处理



喷雾角

贯穿距

喷雾微观结构：高速显微摄影 (backlit microscopic images)



*Spray without promptly
phase transition*

5 mm



- Turbulence
- Interaction between liquid and air
- Depend on physical forces acting on liquid jet

*Spray with promptly phase
transition (flash-boiling)*

5 mm



- Bubble's formation, growth and burst
- Depend on fuel saturation property and thermodynamic state

白光成像测试

落点分布测试

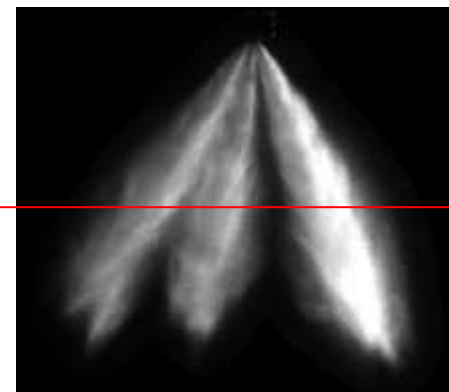
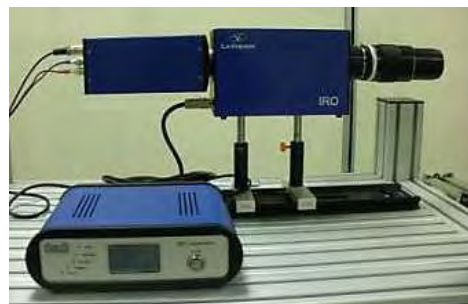
速度场测试

粒径测试

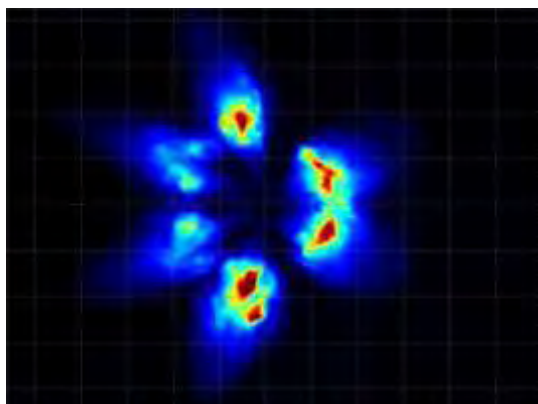
温度测试

浓度测试

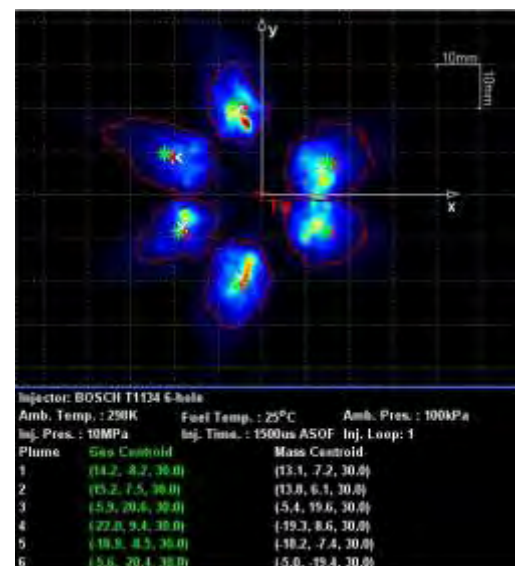
截面燃油质量分布测量：激光诱导荧光技术



Item	Model	Technical specification
Laser	Litron Nano PIV	Wavelength :532nm/266nm Repetition rate: 15Hz
Image Intensifier	LaVision IRO	Max intensification: 500



落点分布



白光成像测试

落点分布测试

速度场测试

粒径测试

温度测试

浓度测试



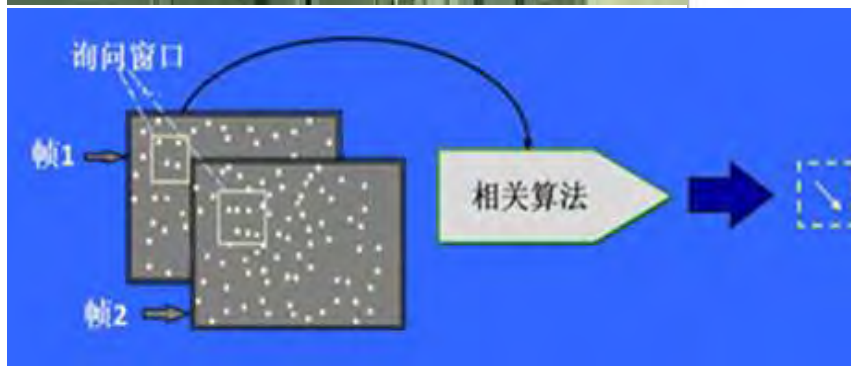
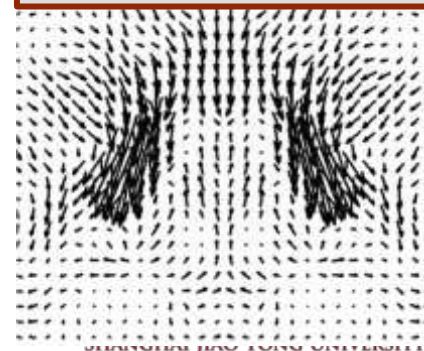
Item	Model	Technical specification
Laser	Litron LDY-300	Wavelength :527nm Max. output: 100W Pulse width: 160ns Repetition rate: 10,000Hz
Camera	Phantom V7.3	Full resolution: 800 X 600 Max. imaging rate @full res: 6,600



喷雾速度场

喷雾液滴与周围气体速度场同时测量：
高速LIF-PIV技术

环境气体速度场



白光成像测试

落点分布测试

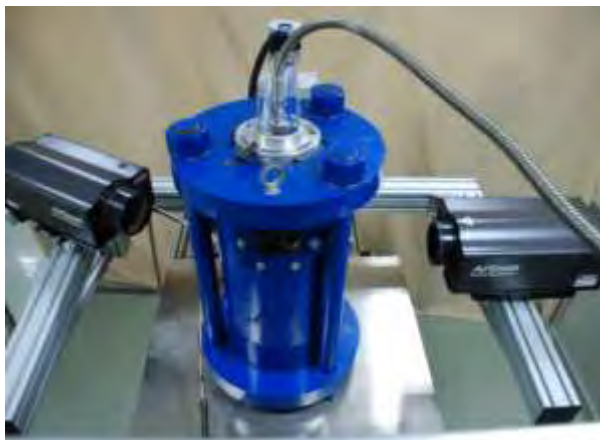
速度场测试

粒径测试

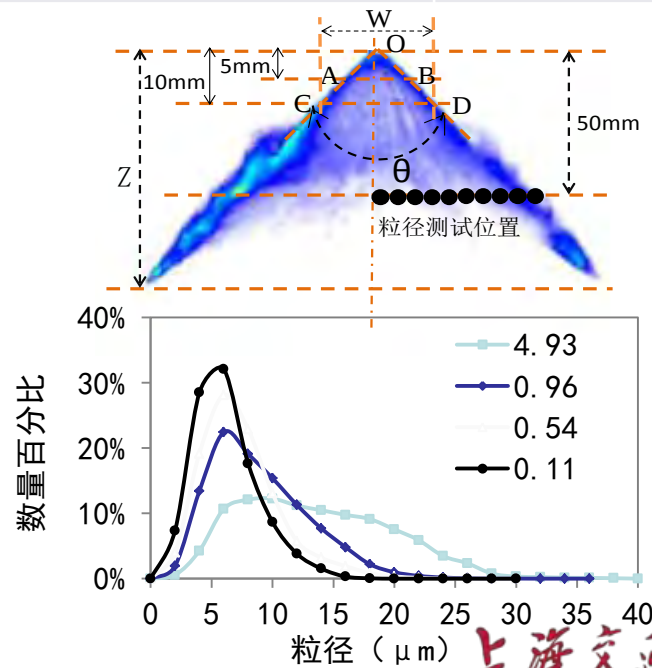
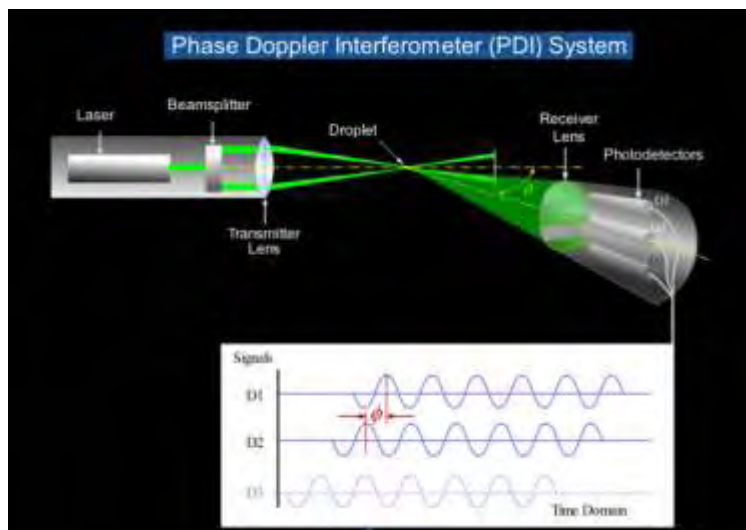
温度测试

浓度测试

粒径分布测量：相位多普勒干涉仪（PDI）



Item	Specification
Droplet size	0.5~2000 μ m
Droplet size accuracy	-/+ 0.5 μ m
Velocity	-100~300m/s
Velocity accuracy	-/+1%



白光成像测试

落点分布测试

速度场测试

粒径测试

温度测试

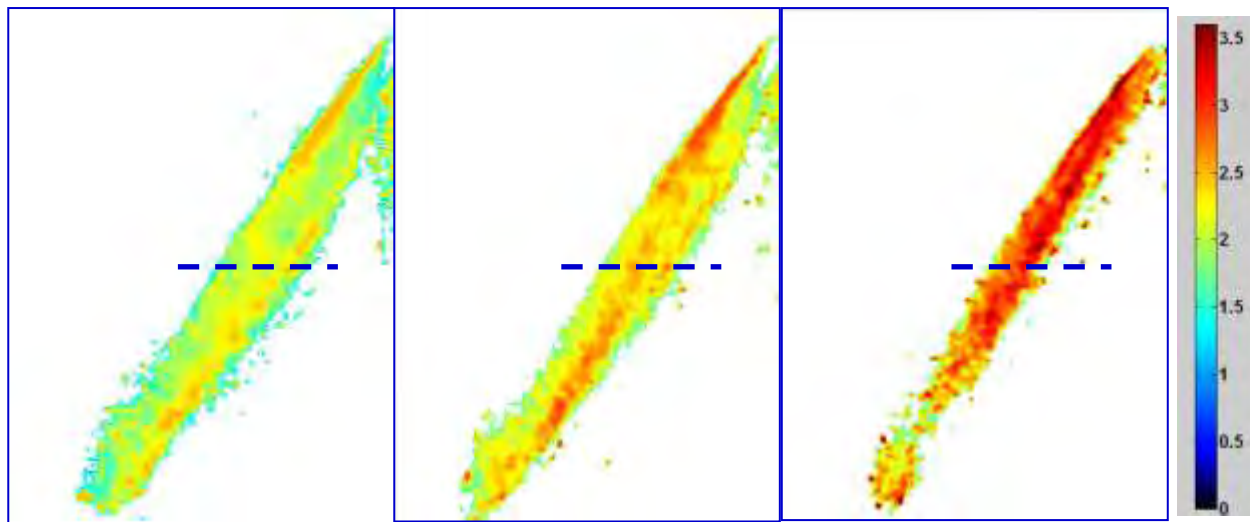
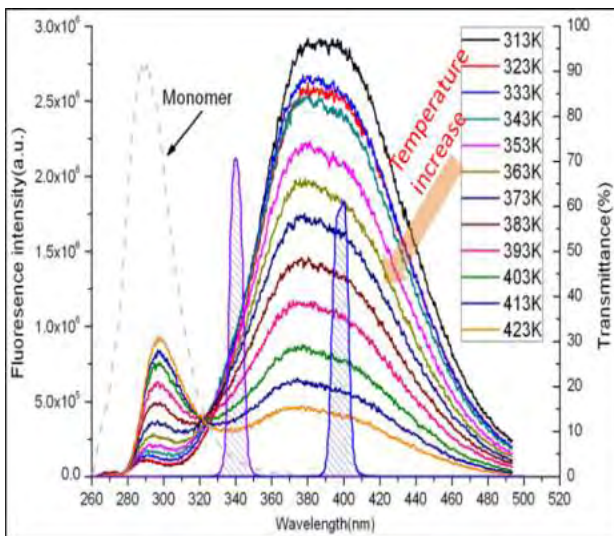
浓度测试

T_{fuel}

$T_{\text{fuel}}=30^{\circ}\text{C}$

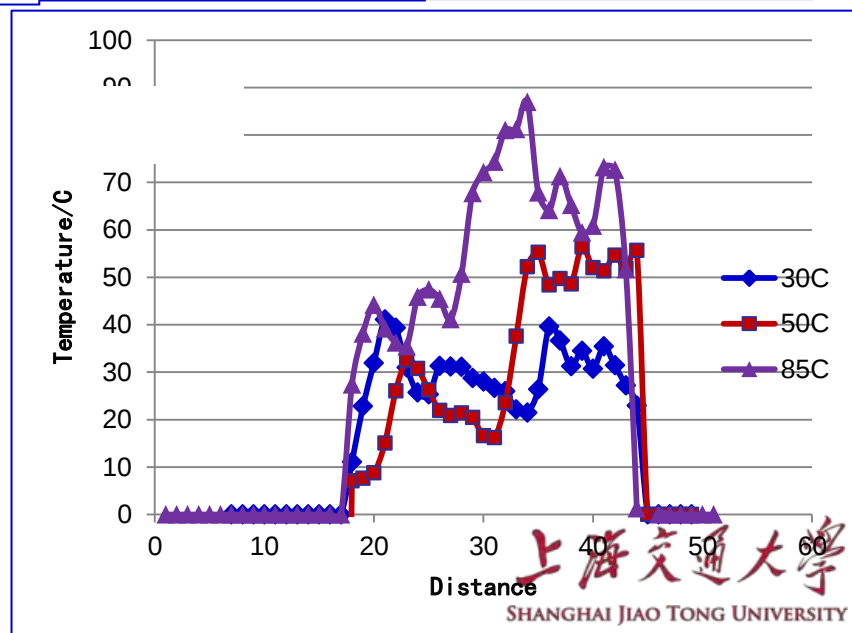
50°C

85°C



液滴温度分布：三波段LIEF

Experiment in Fluids, 2013 (已接受)



白光成像测试

落点分布测试

速度场测试

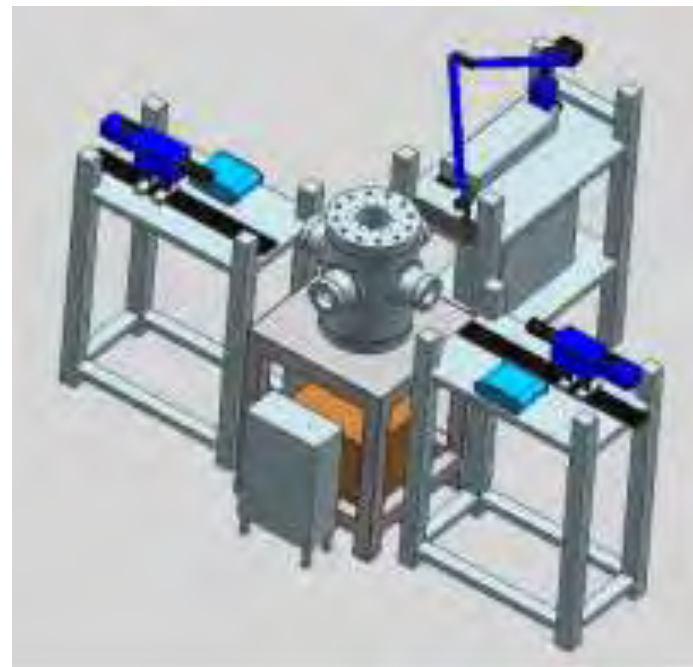
粒径测试

温度测试

浓度测试

气液两相浓度场测量：双相激光诱导荧光法（准定量）

Item	Model	Technical specification
Laser	Litron Nano PIV	Wavelength :532nm/266nm Repetition rate: 15Hz
Camera (with Image doubler)	LaVision Image Intense	Resolution: 1376 X 1040 Max. imaging rate: 15Hz
Image Intensifier	LaVision IRO	Max intensification: 500



液相

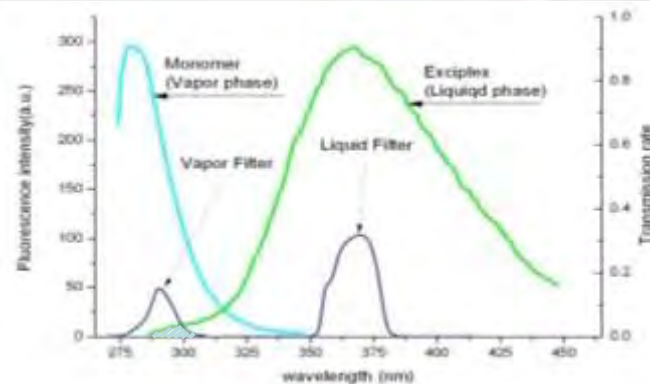
气相

油温

300K

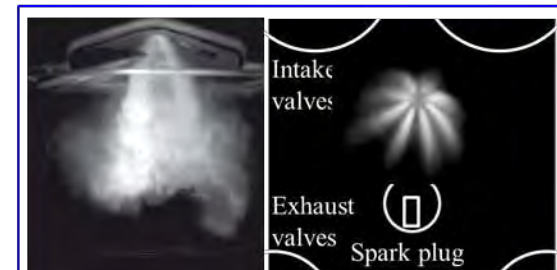
327K

357K





缸内物理场测试可以在可视化发动机上进行

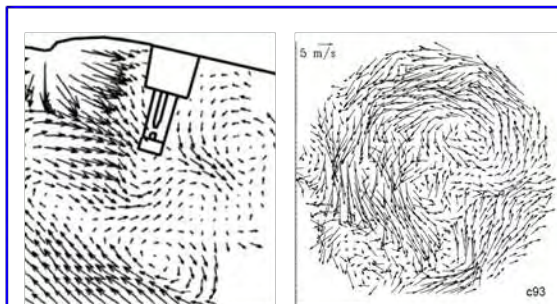


缸内燃油喷雾

- 白光
- 高速激光测量



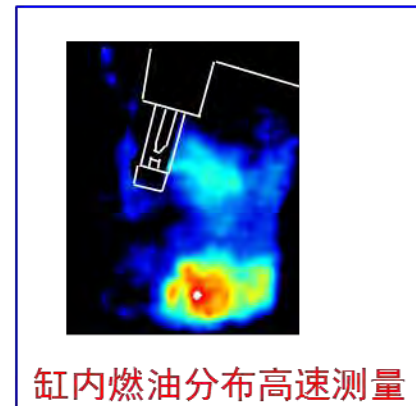
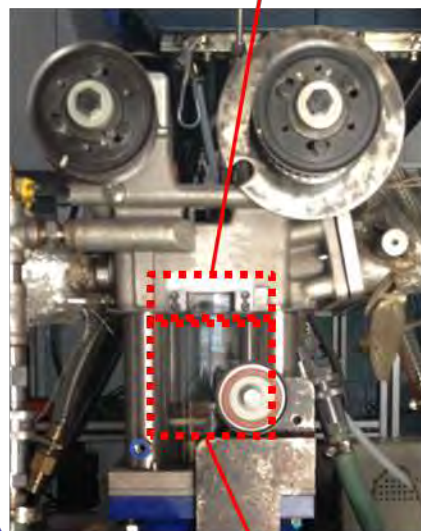
燃油湿壁
燃油碰活塞



缸内粒子测速



燃烧室顶部透明窗口



缸内燃油分布高速测量

PM 生成测试



缸内燃烧测量

全透明缸套
光学活塞



1

喷嘴选型问题的提出

2

如何使模拟计算更准？

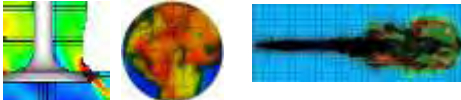
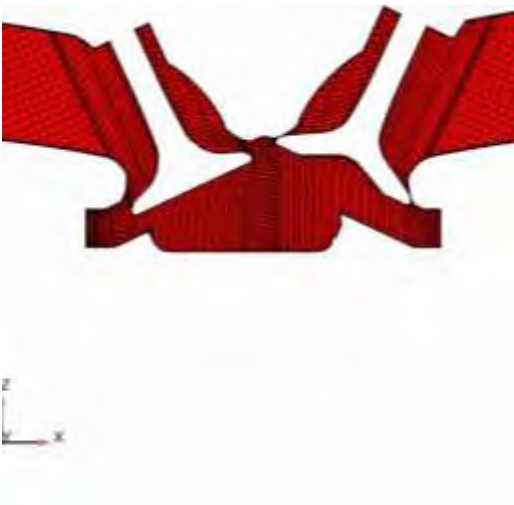
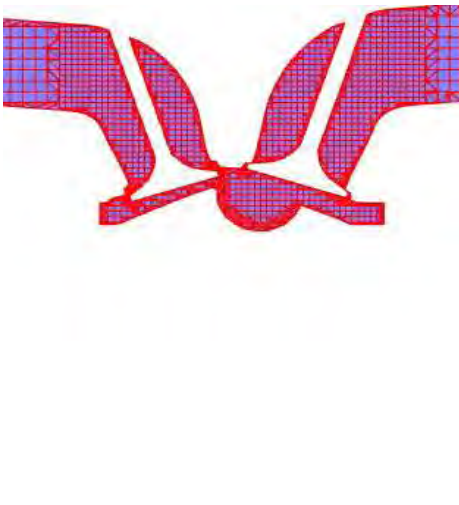
3

如何算得更快？

4

喷嘴选型实例

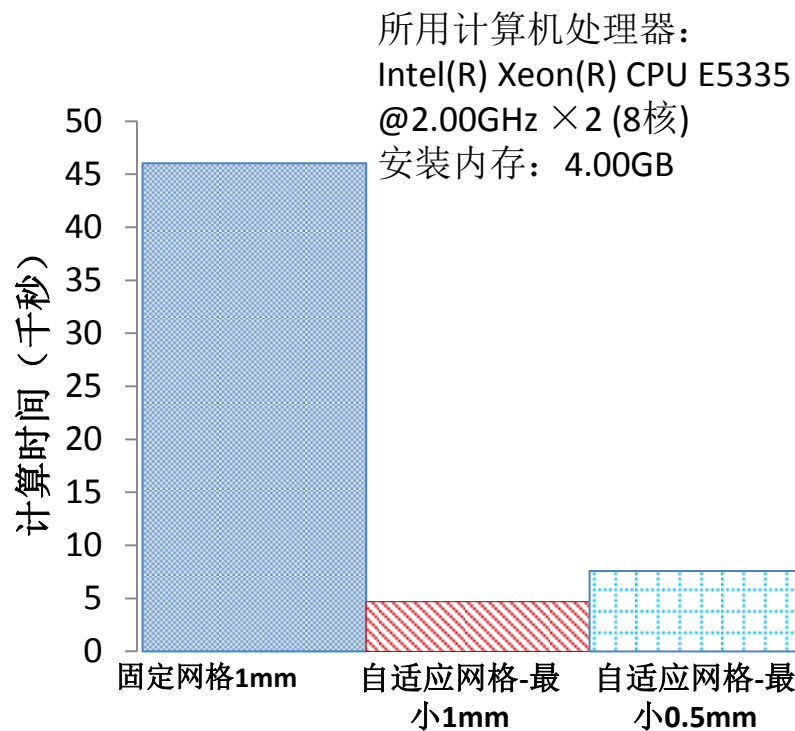
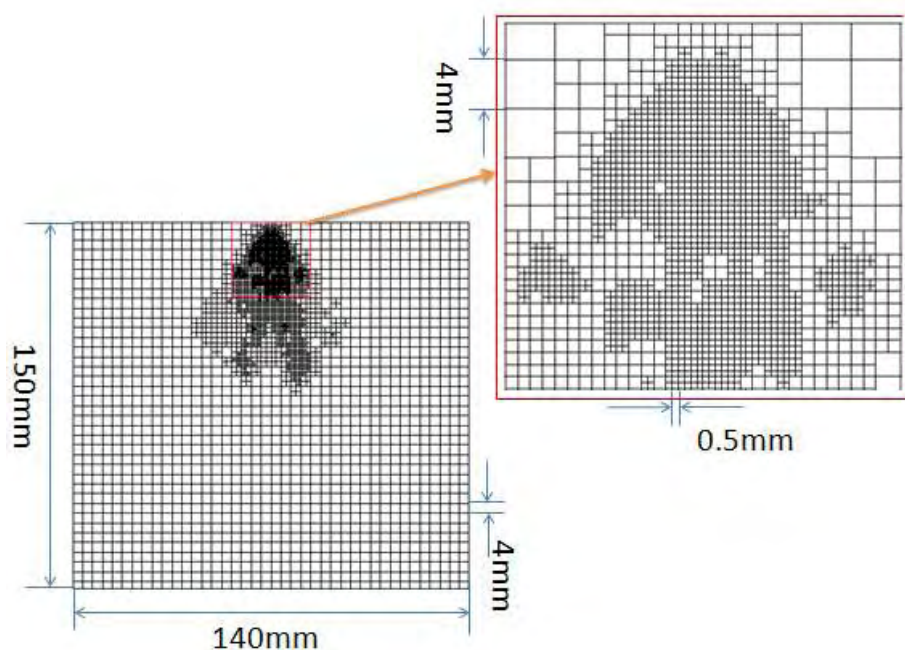
模型标定CFD软件的选择可以提高效率

	软件S	软件F	CONVERGE
文件结构	JAVA封装	JAVA封装	ASCII文件，极其灵活
网格模型计算效率	• 手动选择细化域 • 网格质量一般 • 费时 • 结构更改后需重新划分	• 手动选择细化域 • 网格质量较好 • 费时 • 结构更改后需重新划分	• 无需体网格 • 可控局部细化，分步细化 • 正交性极强 • 自适应 • 结构更改后，只需几分钟 • 集成SAGE详细机理 • 计算速度快
自适应	无 网格质量与物理量变化过程不相关	无 网格质量与物理量变化过程不相关	V, T, Yi, Y+, Passive 
动网格	 极不方便	 不很方便	 相当方便

以上仅代表个人观点

自适应网格功能大大提高计算效率

CONVERGE软件中的自适应网格功能在计算中得到了合理的应用，如左下图所示，网格基本尺寸为4mm，最小网格尺寸为0.5mm，在喷雾速度梯度变化区域，网格尺寸由大到小，过度均匀，提高了喷雾仿真的准确性与效率。



1

喷嘴选型问题的提出

2

如何使模拟计算更准？

3

如何算得更快？

4

喷嘴选型实例

喷嘴选型的缸内优化计算

优化参数

喷嘴结构位置

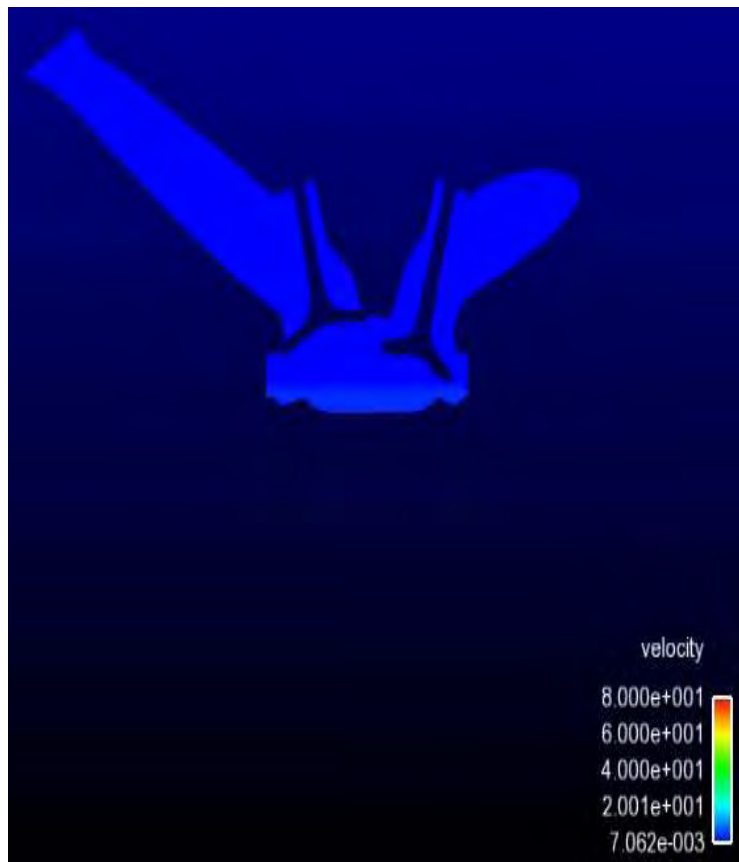
喷孔布置
喷孔大小
喷孔数目
喷嘴位置

喷油策略

喷油时刻
喷油压力
分段喷射

气流运动

进气涡流、
滚流



优化目标

湿壁量

混合气浓度

点火时刻火花
塞 附近当量
比

计算结果及分析

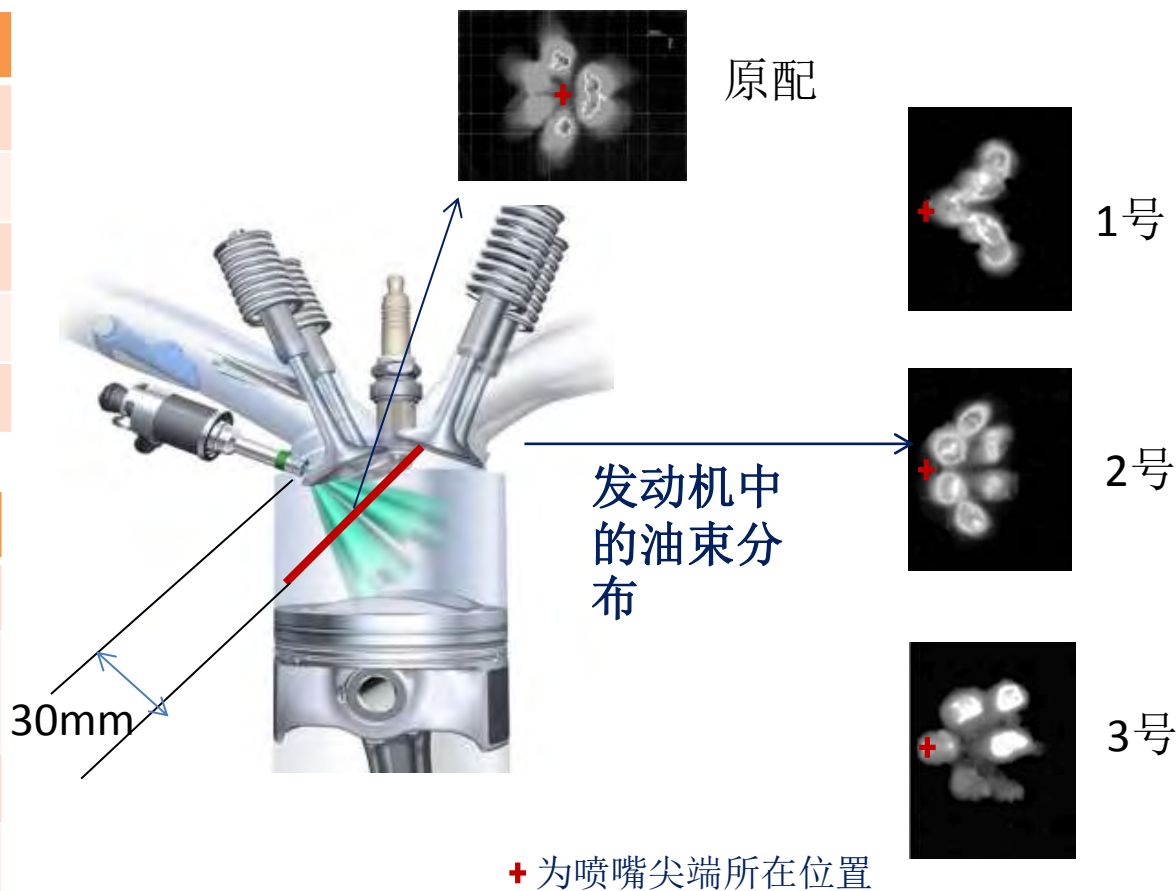
计算是以四款典型（原配、1号、2号、3号）的直喷喷嘴为例，分别进行喷雾宏观形态、横截面燃油落点分布以及表征喷雾雾化程度的液滴SMD(索特平均直径)等喷雾特性进行测试；在喷雾实测数据的基础上，利用CONVERGE软件运用自适应网格尺寸的方法对三款喷嘴的喷雾模型进行了准确标定；然后将标定好的喷雾模型应用到同一款发动机模型中，并与原配喷嘴比较，进行燃烧系统优化。

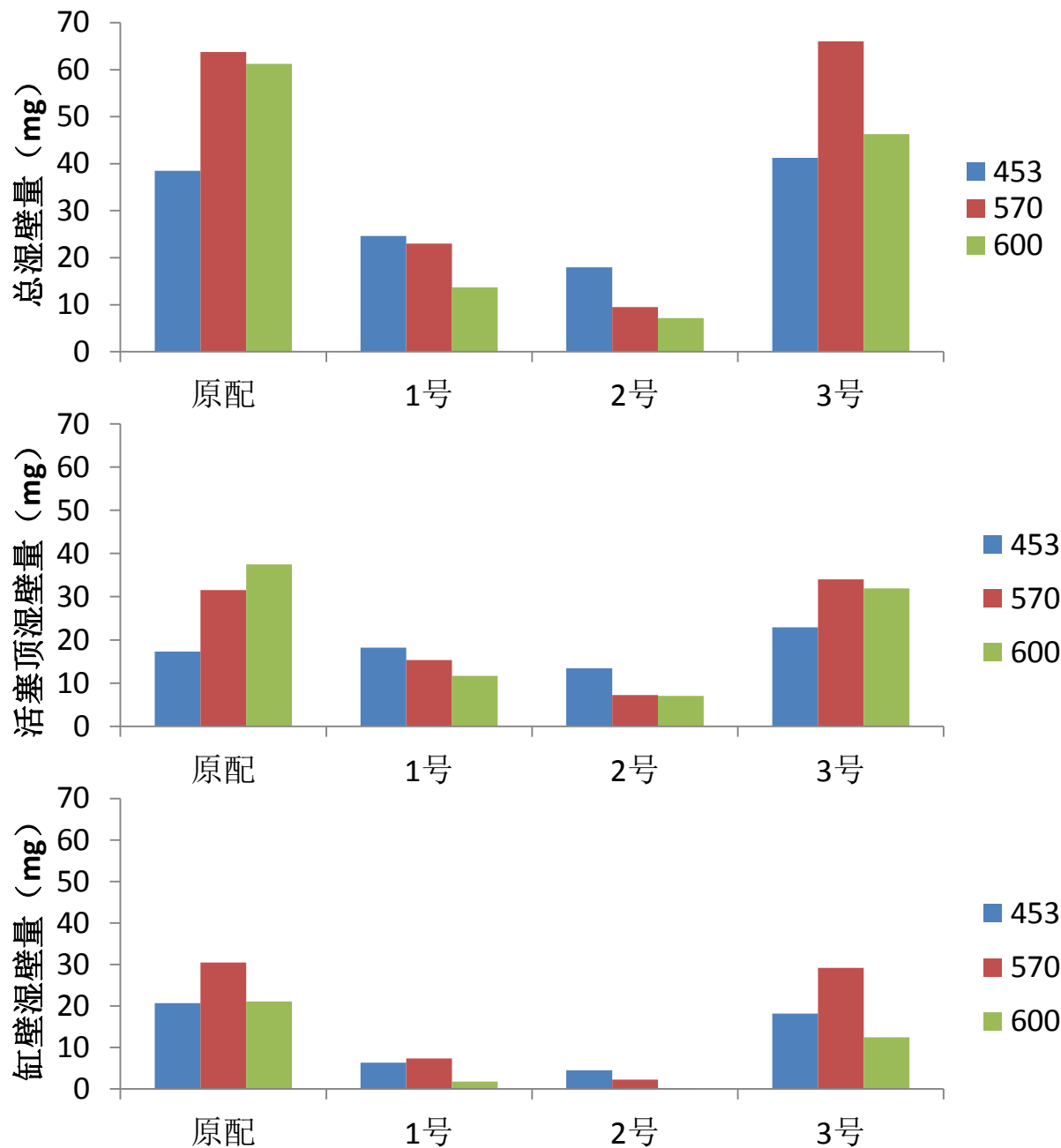
发动机主要结构参数

名称	参数
排量 (L)	2.0
汽缸数	4
缸径(mm)	88
冲程(mm)	82
压缩比	10.5

计算物理模型

名称	模型
湍流模型	LES
粒子相互作用模型	NTC
蒸发模型	Frossling
破碎模型	KH-RT



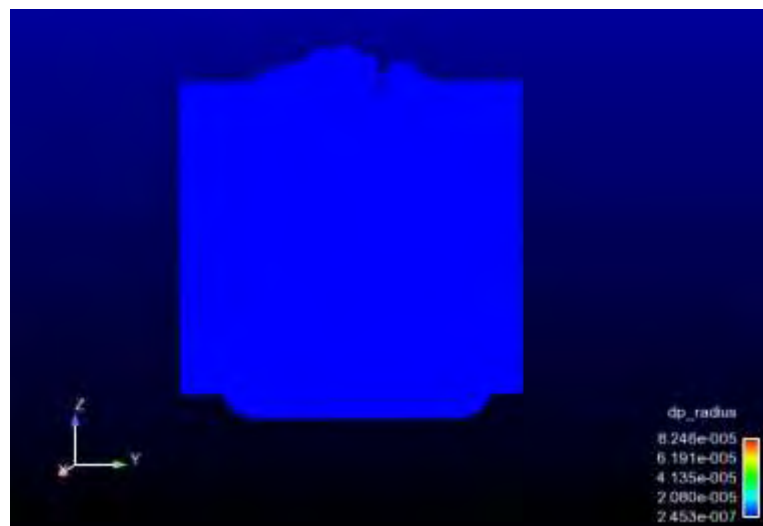


570° CA喷油时刻的湿壁现象

原配



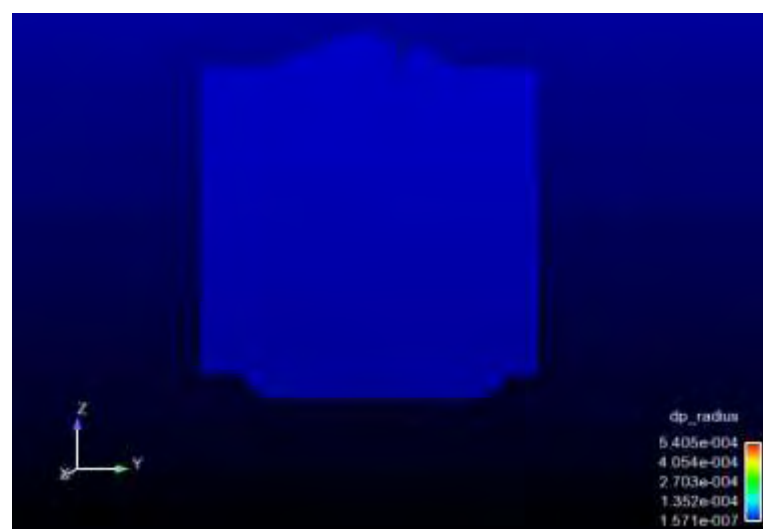
1号



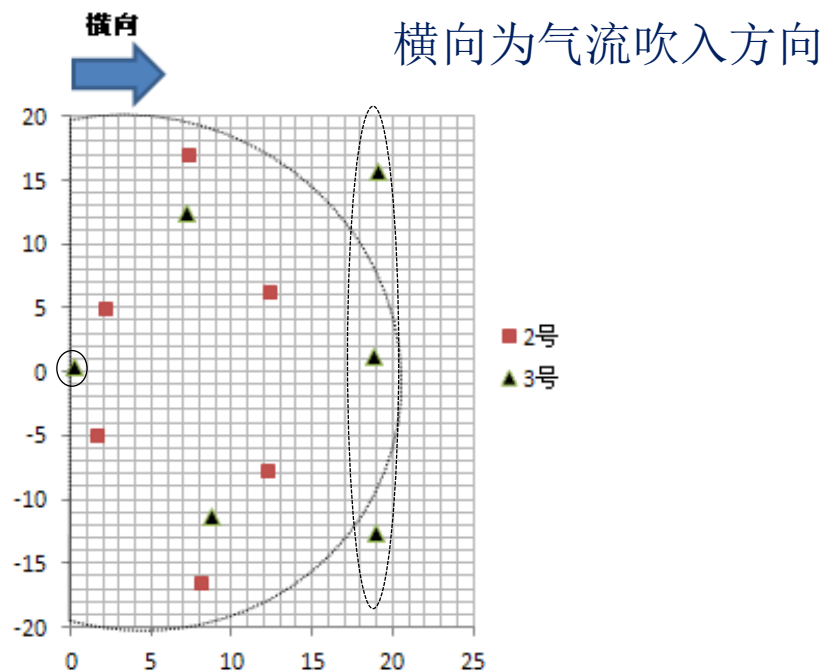
2号



3号

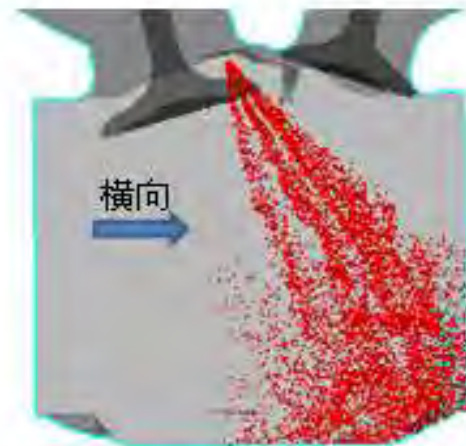


在570° CA喷油时刻，2、3号喷嘴 湿壁量分析

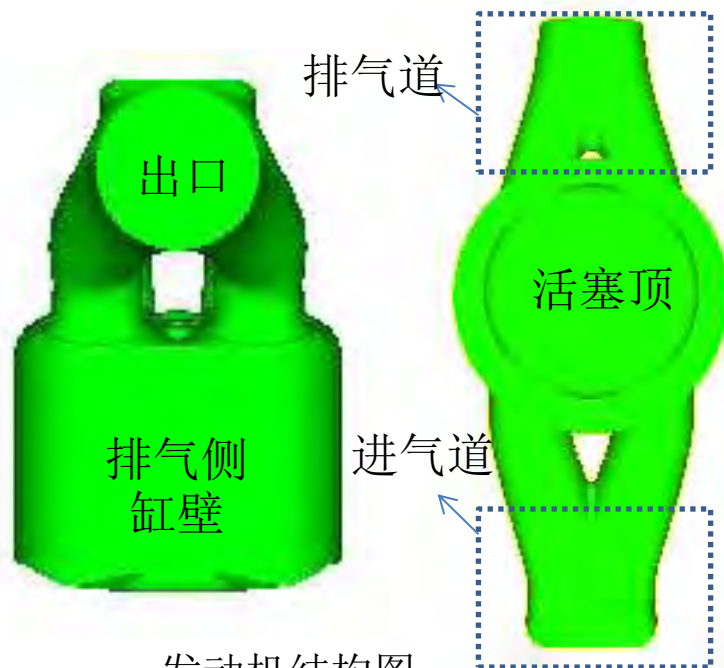


落点分布图

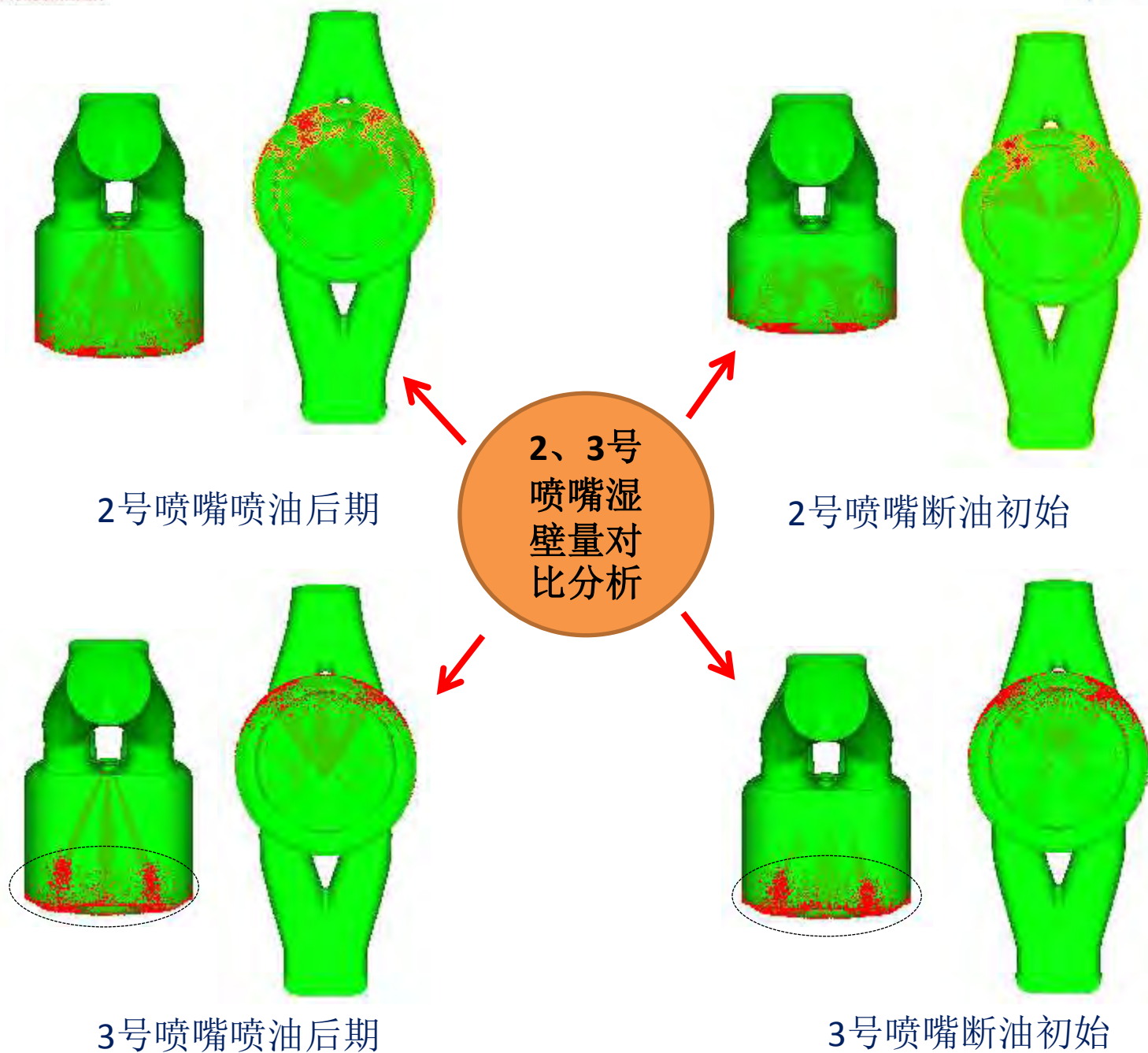
- ——— 为喷嘴尖端位置
- ——— 为靠近缸壁一侧的三束油的落点，其对缸壁侧的湿壁贡献最大



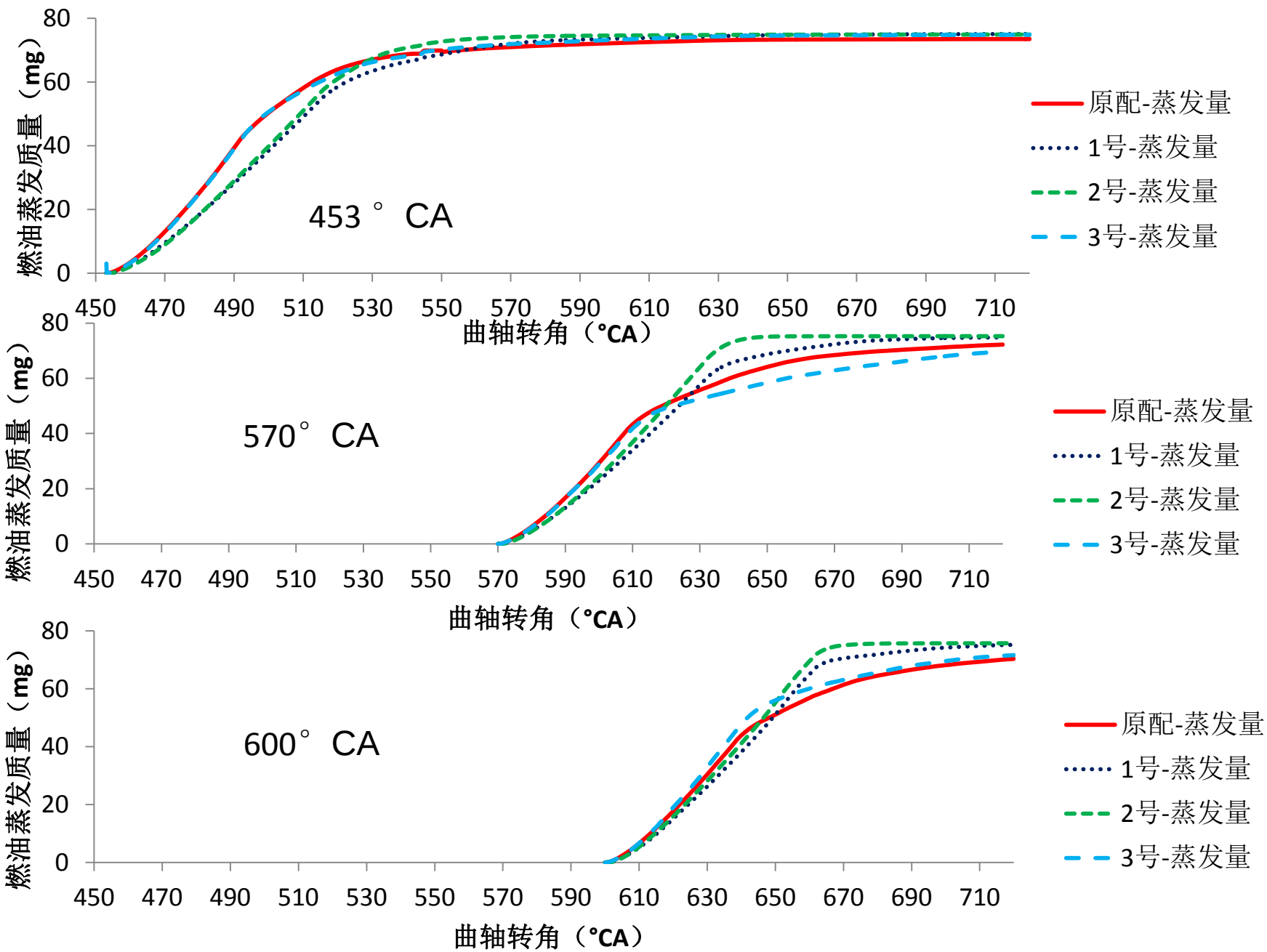
缸内液滴分布图



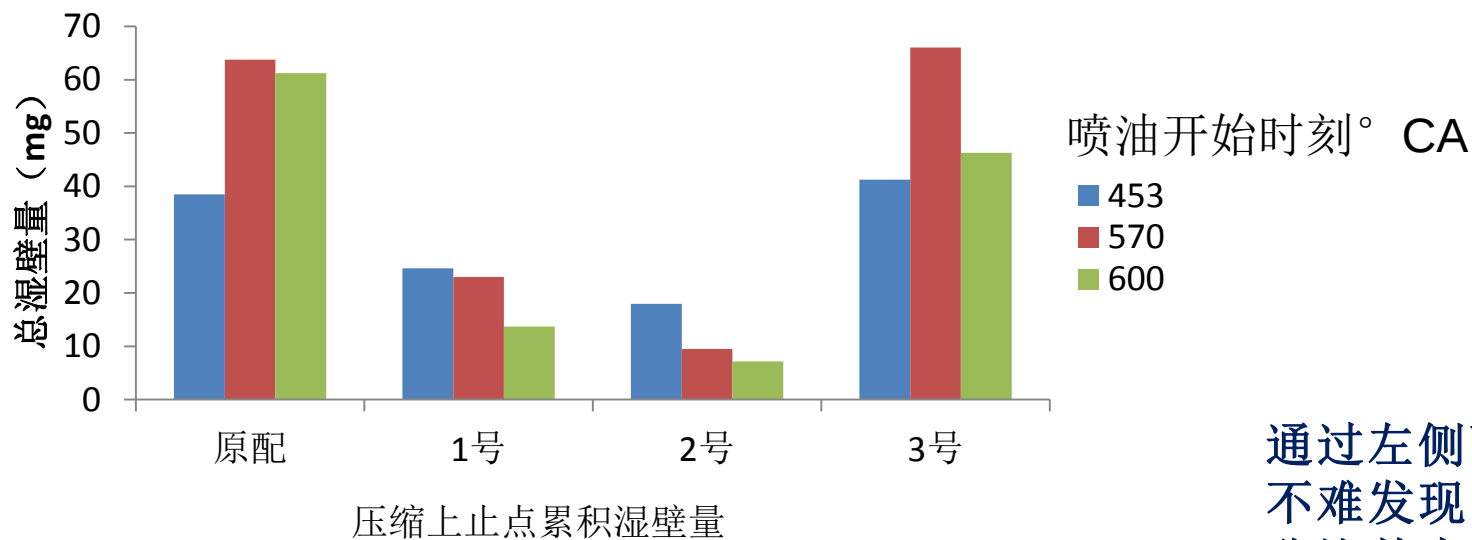
发动机结构图



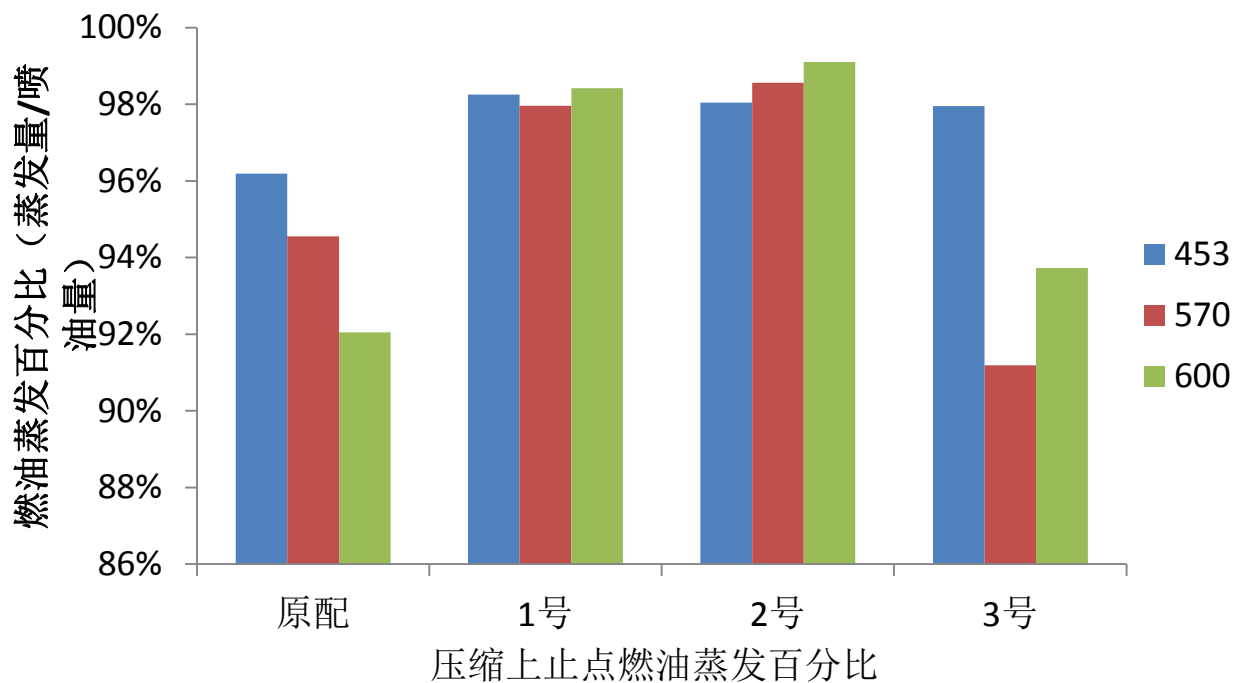
燃油蒸发质量随着曲轴转角的变化



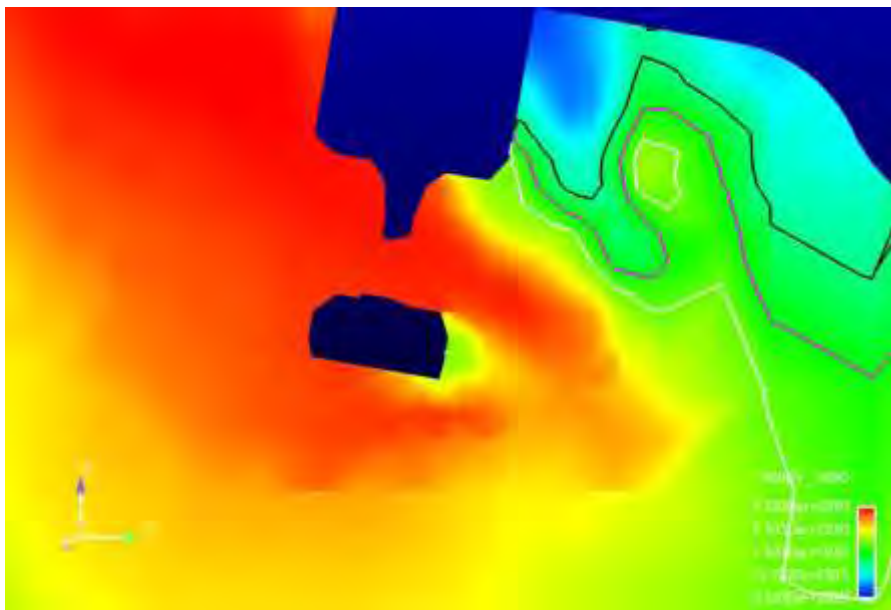
燃油蒸发、燃油湿壁量



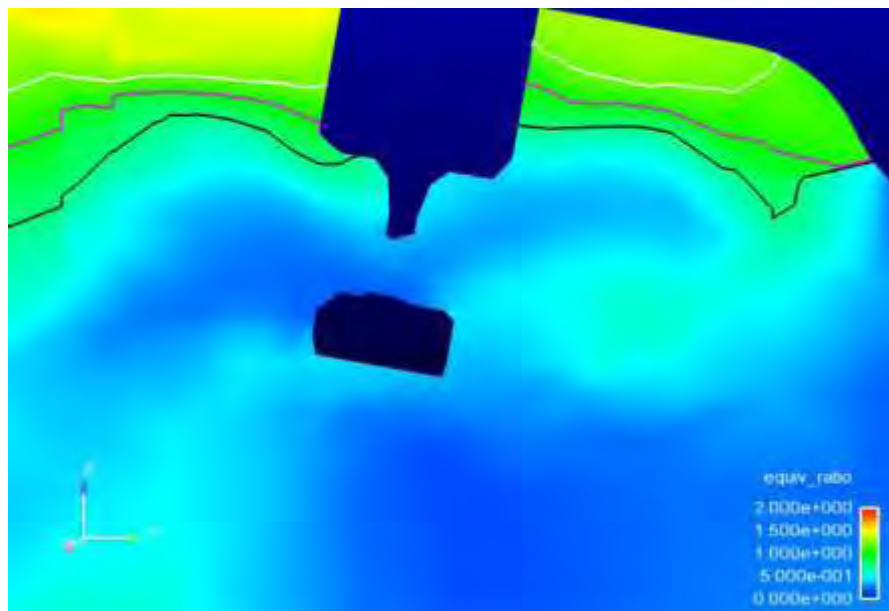
通过左侧两图的对比，不难发现，燃油蒸发百分比基本上是随着燃油湿壁量的减少而升高的



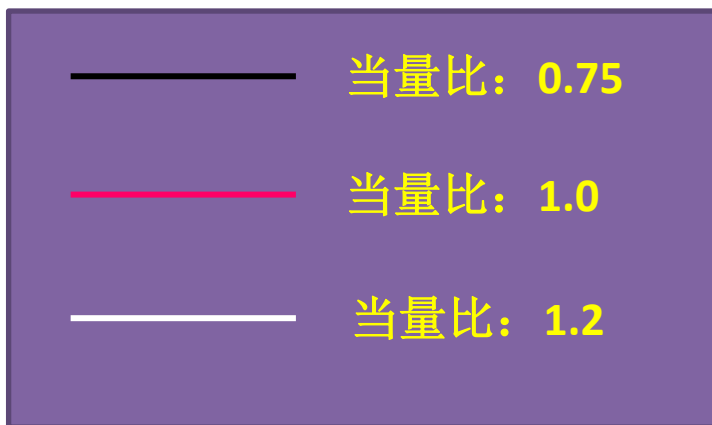
点火期（690° CA—720° CA）火花塞附近当量比变化



喷嘴#2：点火期点火可靠性较好



喷嘴#3：点火期点火可靠性较差



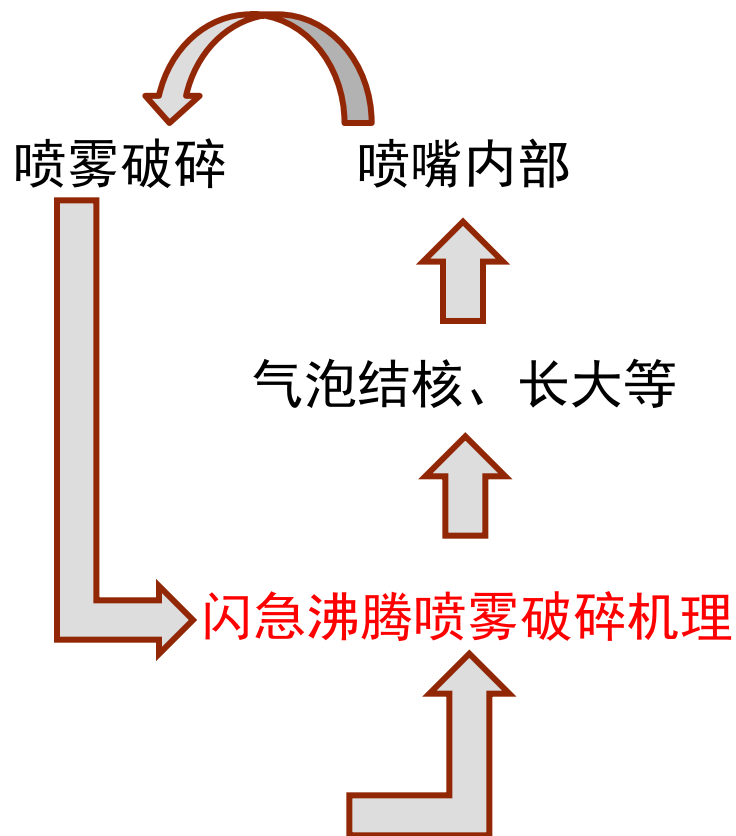
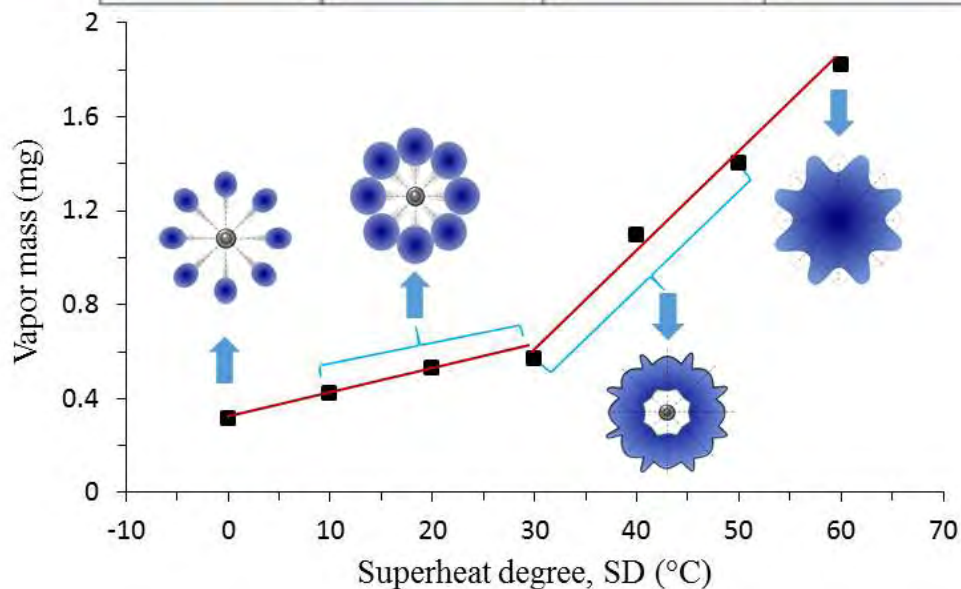
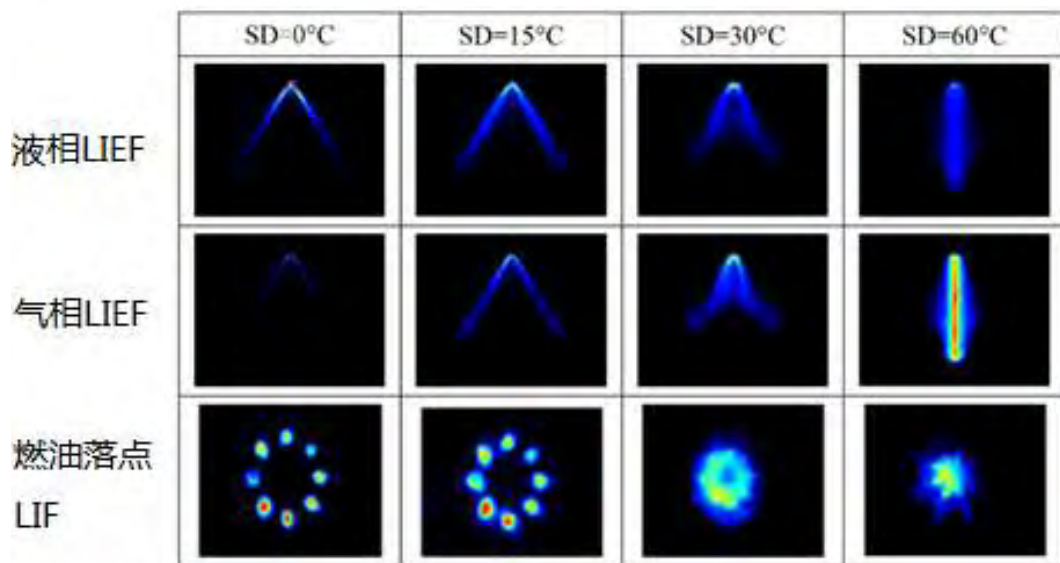


将来工作展望

- 构筑新模型
- 多目标多参数优化计算
- 多软件耦合计算



闪沸喷雾 (Flash Boiling Spray)



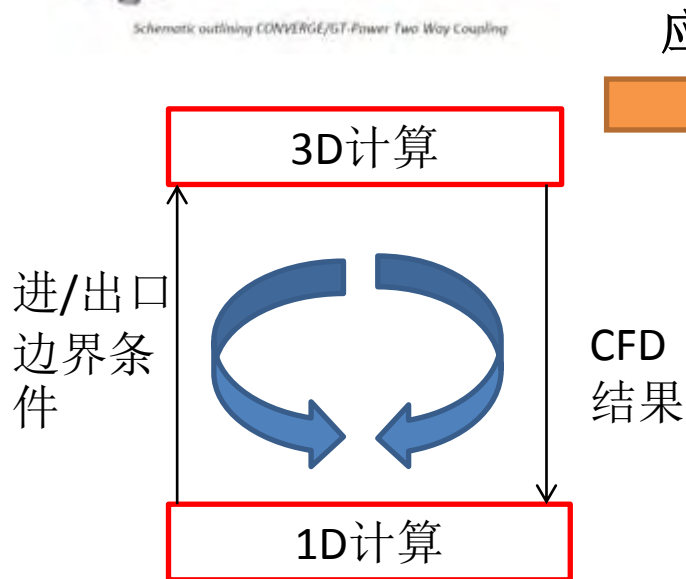
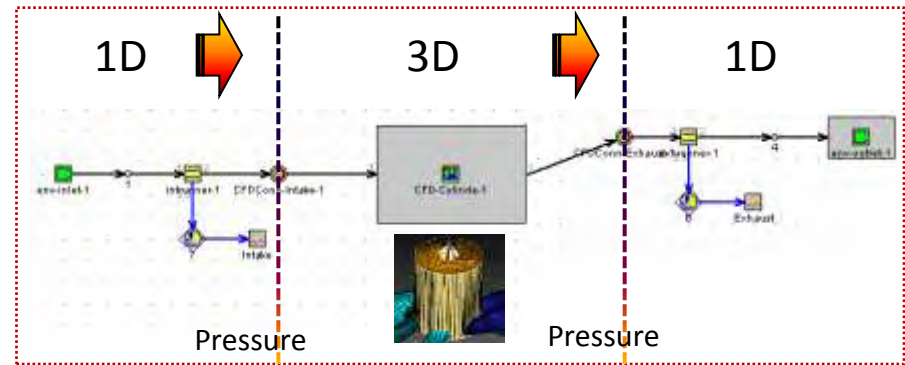
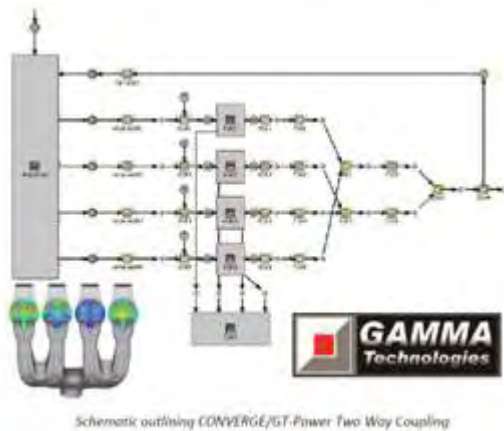


- 构筑新喷雾模型
- 多目标多参数优化计算
- 多软件耦合计算

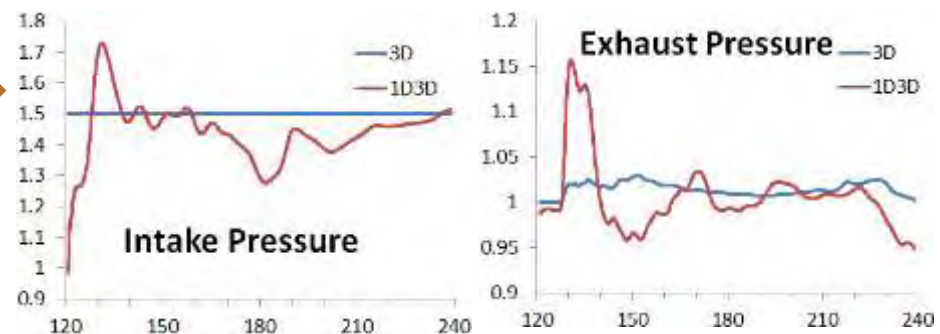


- 构筑新喷雾模型
- 多目标多参数优化计算
- 多软件耦合计算

发动机仿真中的3D&1D耦合 (Converge + GT Power)

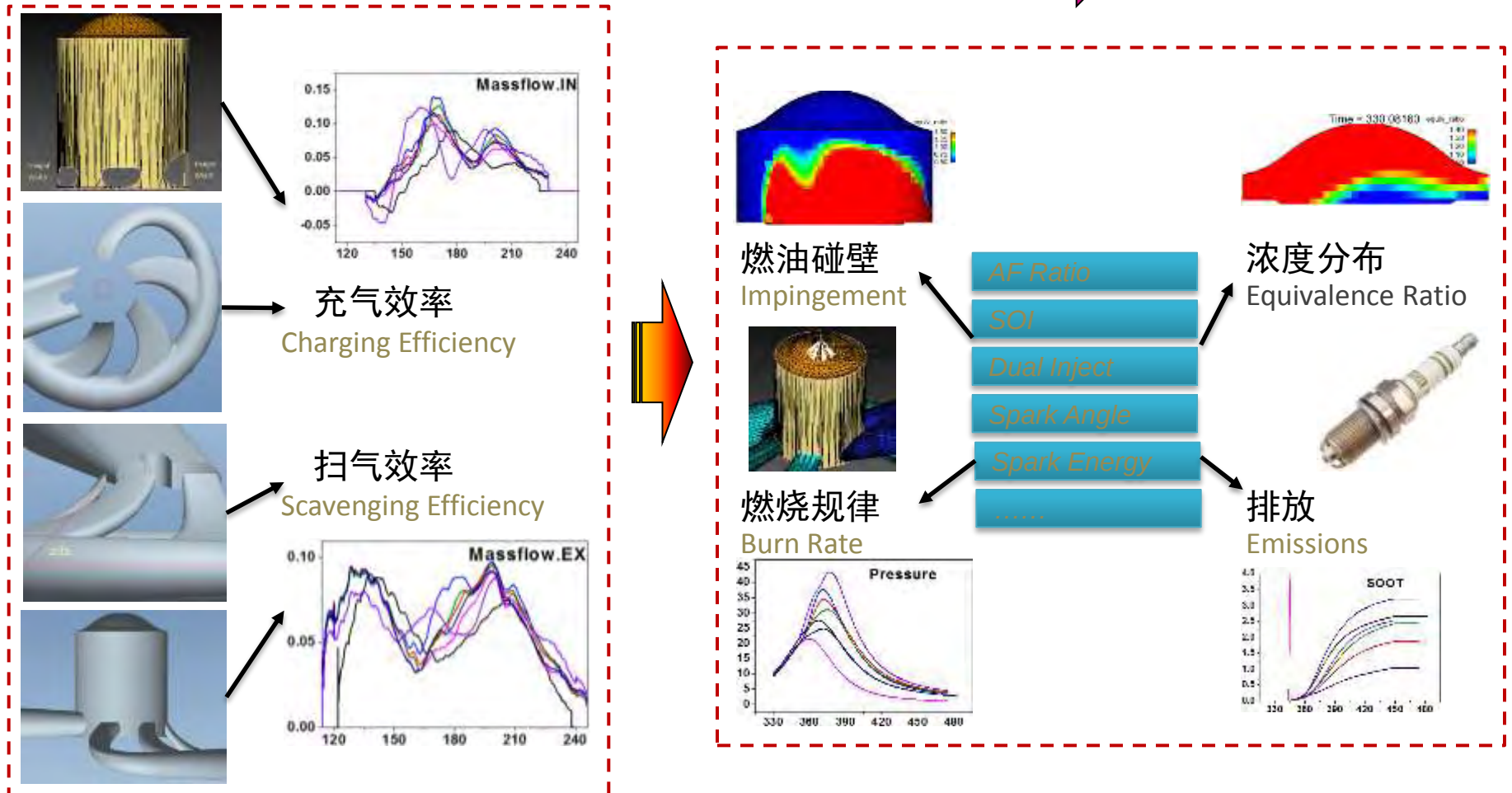


应用



1D&3D耦合提供准确的边界条件

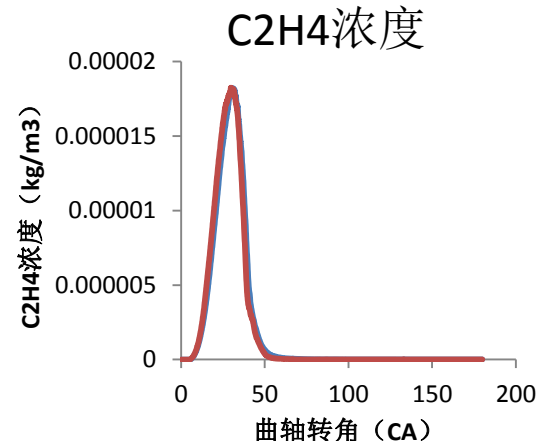
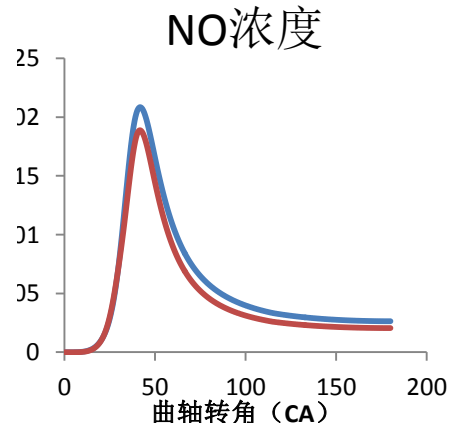
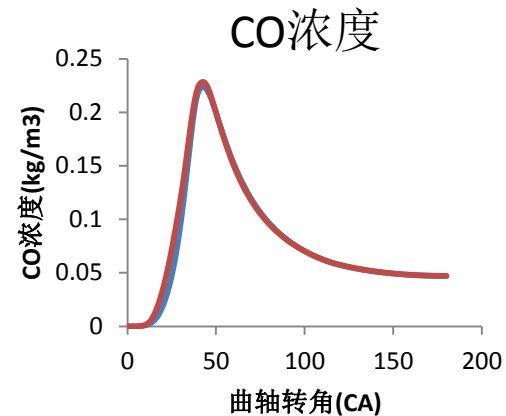
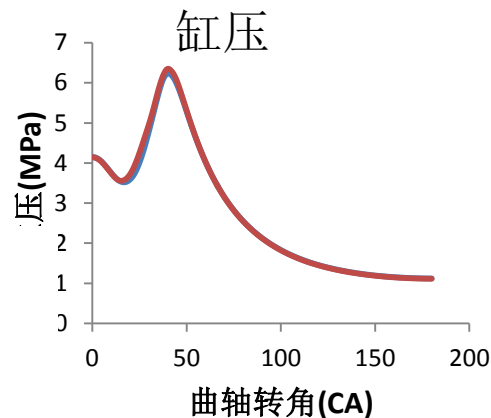
两冲程发动机CFD优化过程





**IC8H18: 41种物质，
59个化学反应式**

**C7H16: 49种物质,
197个化学反应式**



- NOX
- SOOT



Thanks for your attention