

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

柴油机粗暴燃烧大涡模拟研究

中国北方发动机研究所
工作过程研究室
李海鹰

提纲

- 研究背景
- 烧蚀故障复现试验
- 特征工况大涡模拟设定及结果分析
- 结论

提纲

- 研究背景
- 烧蚀故障复现试验
- 特征工况大涡模拟设定及结果分析
- 结论

研究背景



缸盖烧蚀与气门座圈脱落



气缸垫孔口烧蚀



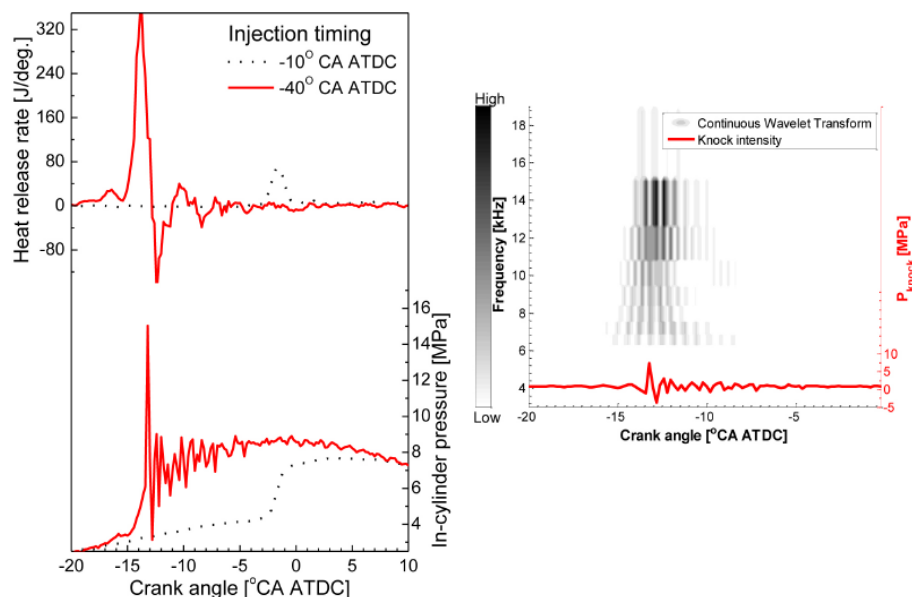
活塞火力岸与避阀坑烧蚀

研究背景

研究单位\机构	研究手段	结论
辉门	测温\光谱分析\电子扫描\金相分析	活塞高温、高机械应力状态受到激冷时，局部应力会超过活塞材料的强度极限，产生裂纹并扩张导致失效，指出大部分的零部件损坏源于燃烧的不稳定性或是材料的铸造缺陷。
天津大学	容弹\CAE	在缸内发生的爆震波波速可达2000m/s，类似于爆炸冲击波。在爆震波汇聚的地方可能会产生超压状况。
戴姆勒、普林斯顿	可视化\CAE	爆震始于活塞、缸套和第一道环之间的狭缝容积, 所形成的高温高压冲击波导致表面应力过大
北京理工大学	模拟实验\CAE	铝合金材料的烧蚀机制是熔化烧蚀和气流剥蚀两方面的共同作用。

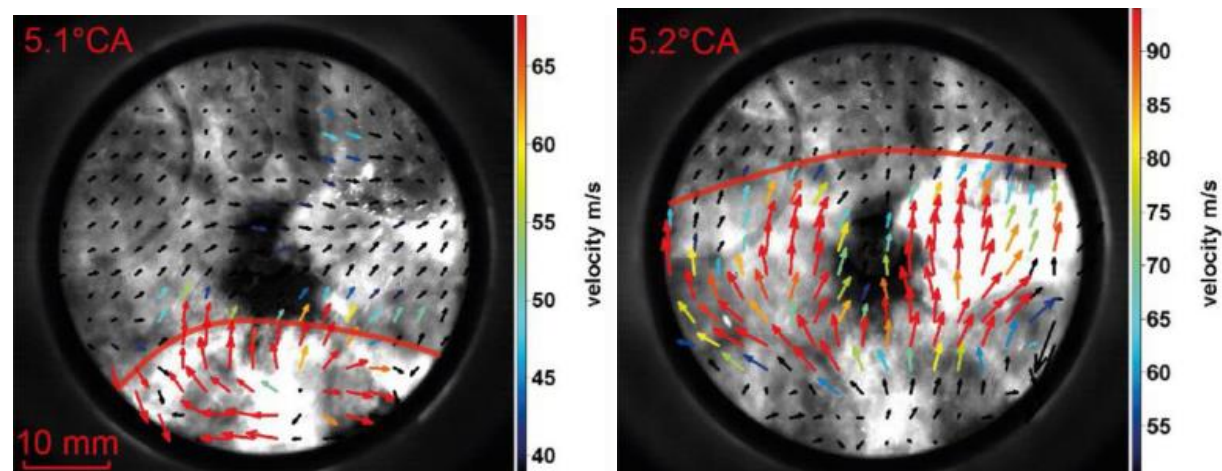
研究背景

韩国先进科技研究所基于光学发动机，捕捉到柴油粗暴燃烧。



Stephen, P., Yongjin, Jung. and Choongsik, Bae, “Diesel Knock Visualization and Frequency Analysis of Premixed Charge Compression Ignition Combustion with a Narrow Injection Angle”, SAE Technical Paper 2013-01-0906, 2013

德国Duisburg Essen大学基于光学发动机，利用PIV手段，捕捉到柴油粗暴燃烧冲击波传播过程。

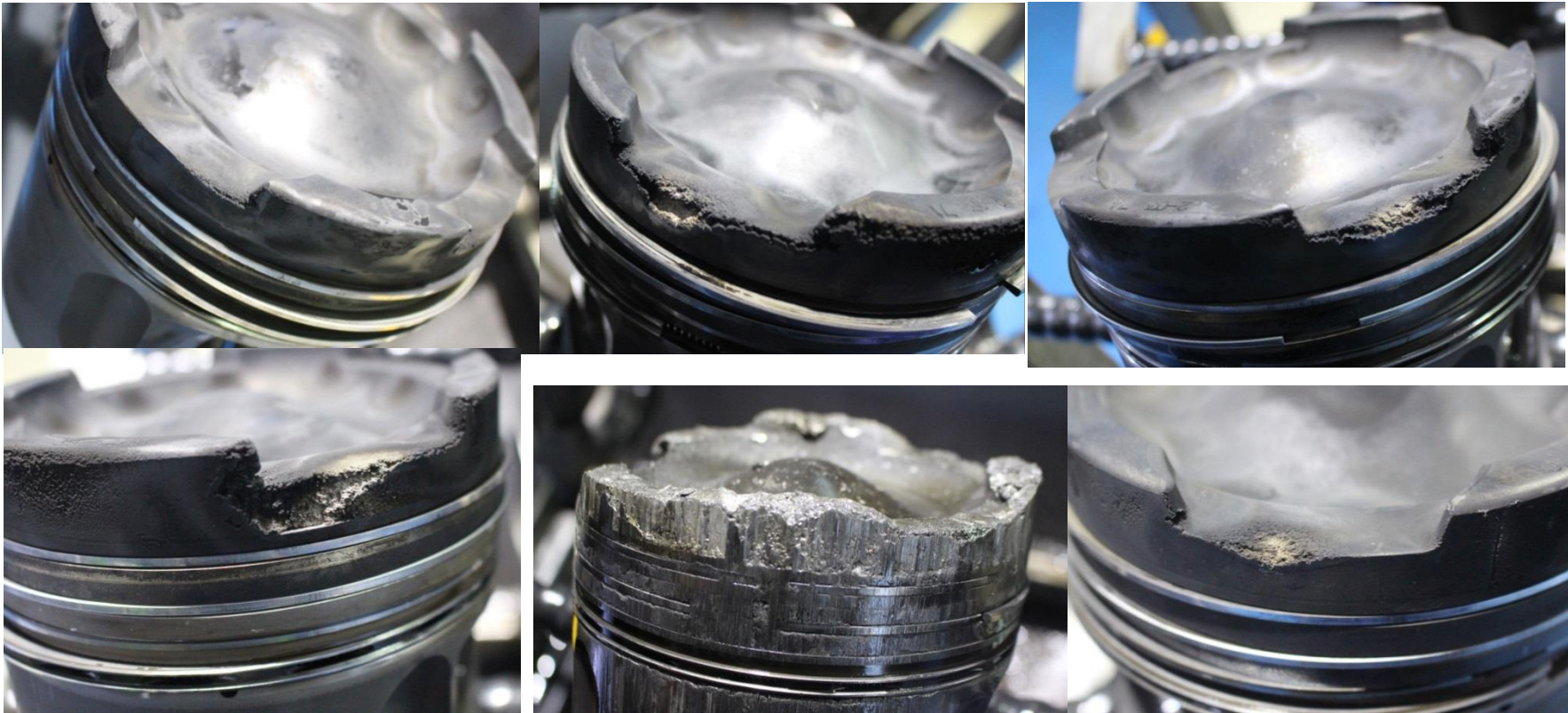


Zhao, M. and Kaiser, S., “Optical Diagnostics for Knock in Compression-Ignition Engines Via High-Speed Imaging,” SAE Technical Paper 2018-01-0631, 2018, doi:10.4271/2018-01-0631.

提纲

- 研究背景
- 烧蚀故障复现试验
- 特征工况大涡模拟设定及结果分析
- 结论

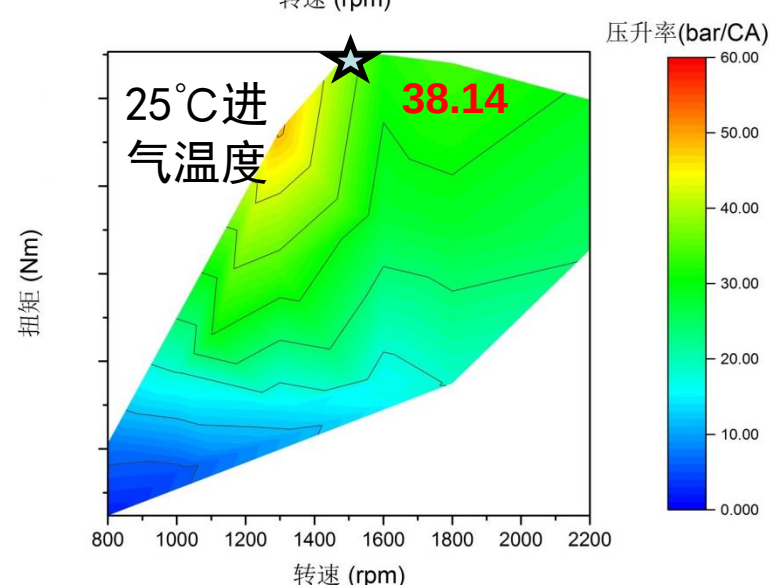
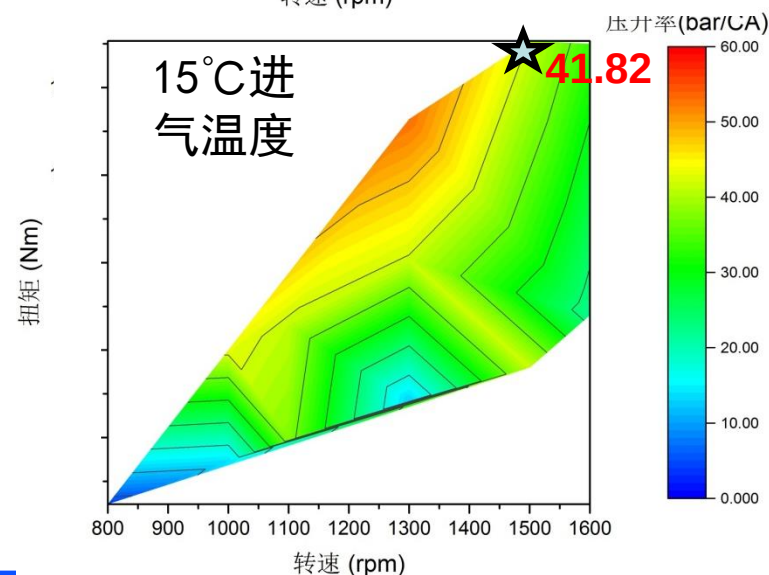
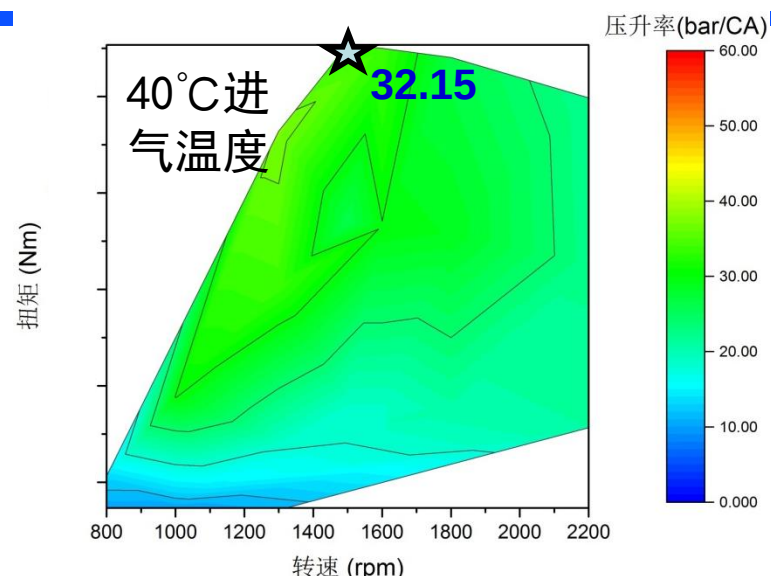
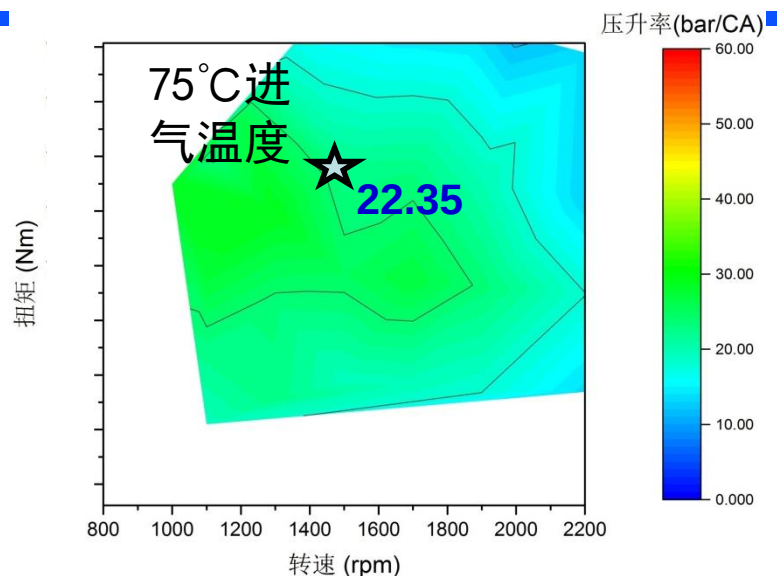
不同进气温度烧蚀整机试验复现



序号	转速 r/min	扭矩 N·m	时间 min	要 求
1		起 动		
2	800	空载	25	进气温度 XX℃±3℃
3	1000	空载	10	
4	1500	按外特 性的70%	25	
5		停 机		20min~30min

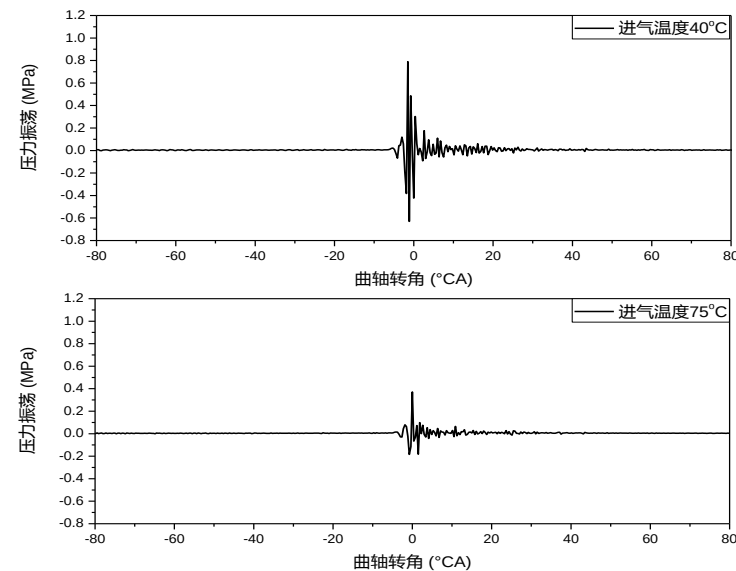
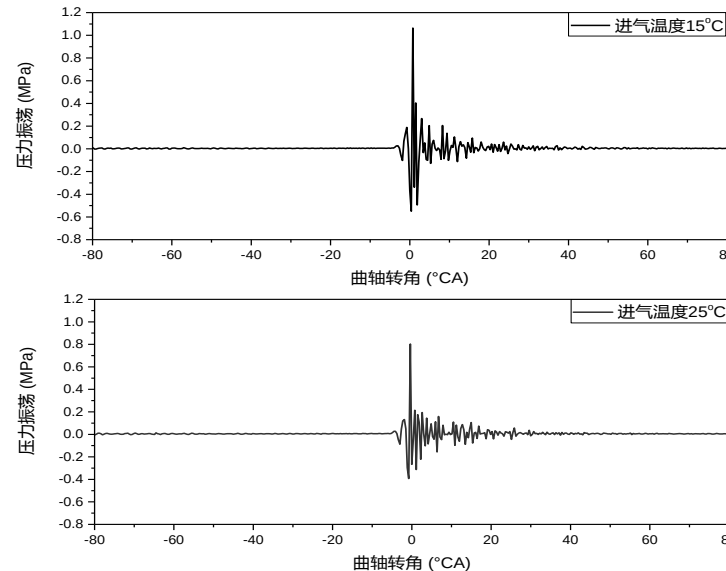
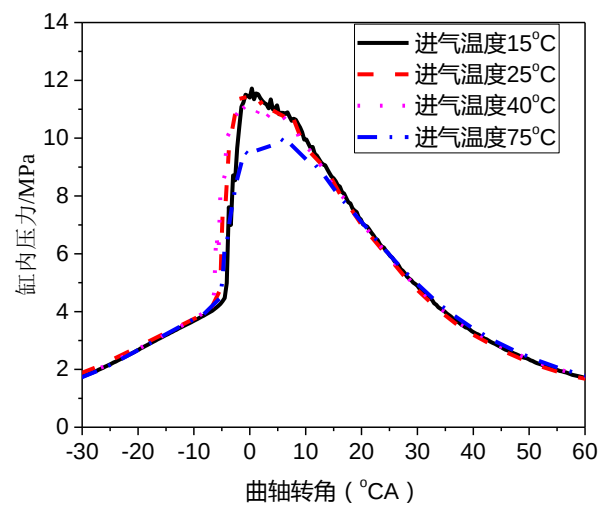
进气温度	烧蚀
55~75℃	否
40℃	否
30℃	部分-50#烧蚀
20~25℃	-50#烧蚀，其余未作
10~15℃	-10#否，-35#、-50# 烧蚀

不同进气温度负荷特性循环平均最大压力升高率



最高压升率随回水温度降低而增加，高压升率重叠区域位于1200~1400rpm 中高负荷！

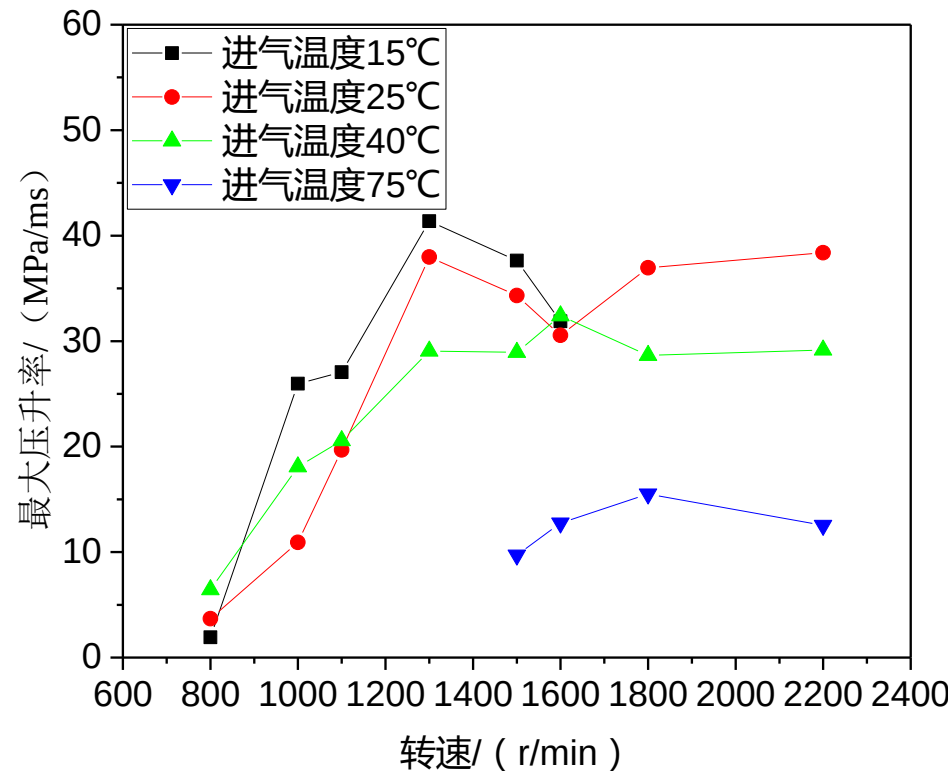
不同进气温度1500rpm 70%负荷缸压及压力振荡



进气75℃时最高燃烧压力约为10MPa，缸压曲线较为光顺；随着进气温度的降低最高燃烧压力逐渐增加，特别地，进气温度25℃和进气温度15℃时，最高燃烧压力接近12MPa。

缸压经过高通滤波后（滤波频率3kHz）的压力振荡曲线，进气温度为75℃时，压力振幅为0.55MPa，而进气温度低于40℃的工况，压力振幅均在1.2MPa以上，存在明显的压力振荡。

柴油粗暴燃烧对比分析



Park等在柴油爆燃可视化研究中发现，粗暴燃烧的最大压升率高达5MPa/°CA，相当于36MPa/ms。

Zhao等在光学柴油机上发现粗暴燃烧，最大压力升高率18.5MPa/°CA，相当于111MPa/ms

汽油爆震标准

研究机构	爆震标准	当量值 (dP/dt) _{max}
AVL	2bar/deg, 3000r/min	3. 6MPa/ms
Bunel	0. 5bar, 10% 的循环振荡	
Cosworth	6-8bar/deg, 1500r/min	5. 4- 7. 2MPa/ms
Lotus	6-8bar/deg, 2000r/min	7. 2- 9. 6MPa/ms
Lund	12bar/deg, 1000r/min	7. 2MPa/ms
GM	Ringing index of 2MW/m²	3MPa/ms
Sloan automotive Lab	--	5MPa/ms

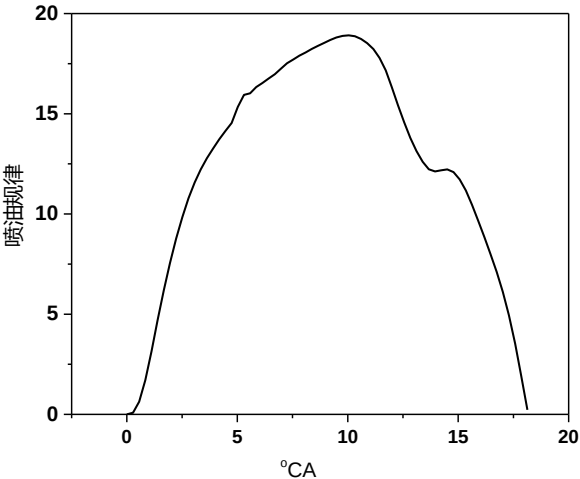
提纲

- 研究背景
- 烧蚀故障复现试验
- 特征工况大涡模拟设定及结果分析
- 结论

发动机参数及大涡模拟参数设定

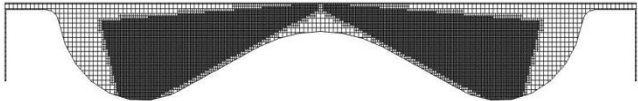
发动机技术参数

参数	数值
排量/L	2.8
压缩比	13.5
燃烧室	ω型
进气方式	增压中冷
燃油喷射系统	直列泵
喷油器喷孔数	10
喷孔直径/mm	0.32



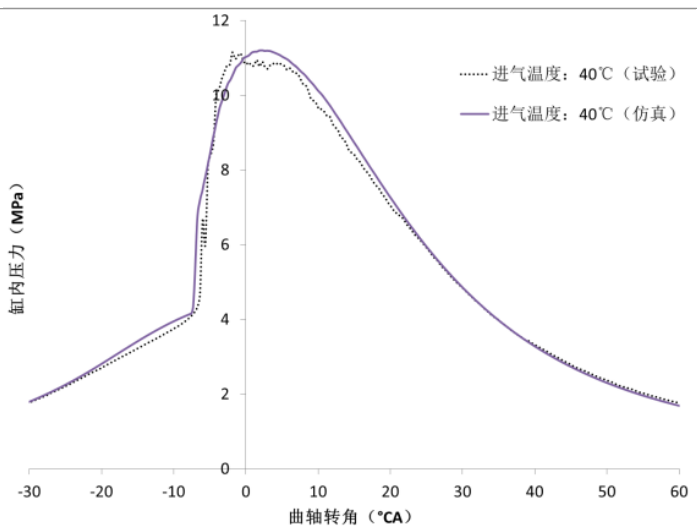
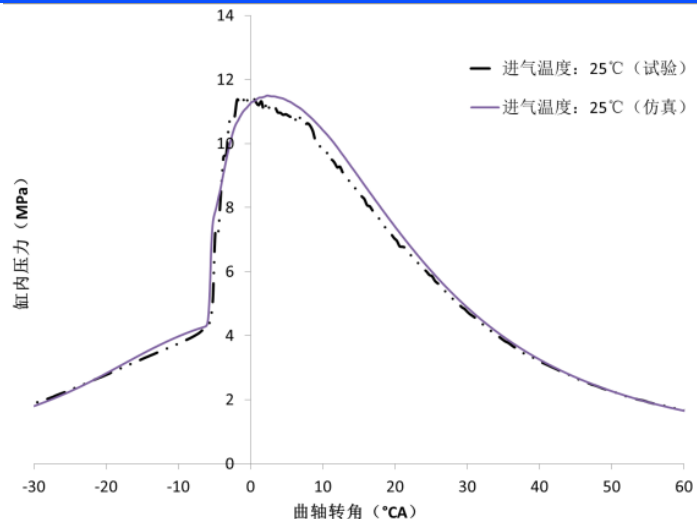
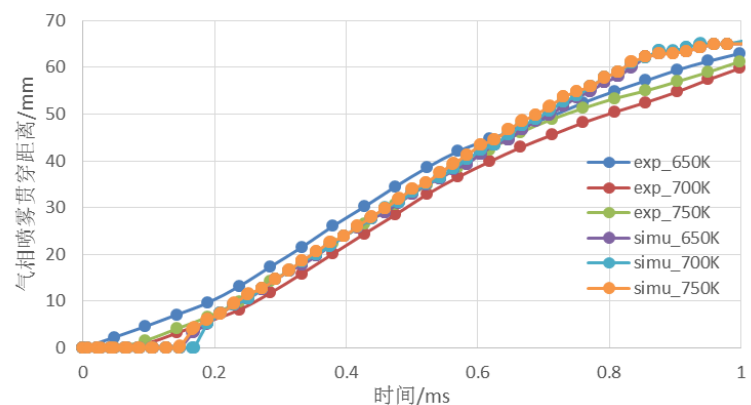
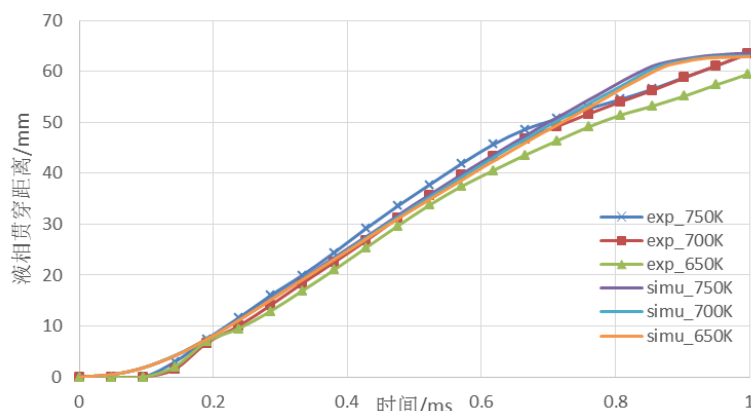
仿真模型

湍流	LES
蒸发	Frossling
破碎	KH
喷雾与壁面相互作用	O'Rourke
液滴碰撞	No Time Counter (NTC)
燃烧	CTC

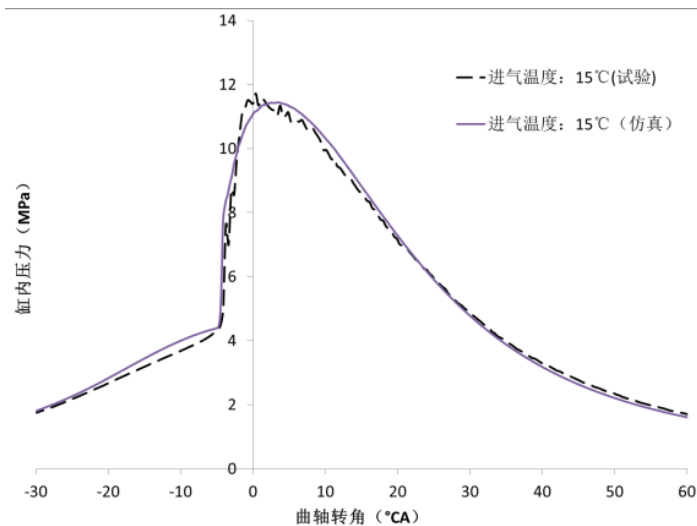


自适应加密，对应网格数量444万
从IVC（-126CA）到EVO（100CA）
初始时间步长为1x10⁻⁹s

模型标定



进气温度为25°C时，二者从燃烧放热缸压脱离纯压缩线相位、急燃阶段以及膨胀阶段基本吻合。在进气温度为15°C和40°C时，仿真结果同样与试验数据取得了较好的一致性。



大涡模拟还原燃烧压力振荡过程

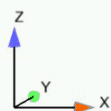
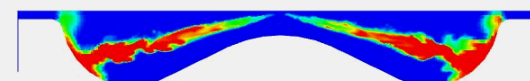
Crank_angle = -7.9888

pressure
1.200e+007
1.000e+007
8.000e+006
6.000e+006
4.000e+006



Crank_angle = -7.9888

equiv_ratio
2.000e+000
1.500e+000
1.000e+000
5.000e-001
0.000e+000



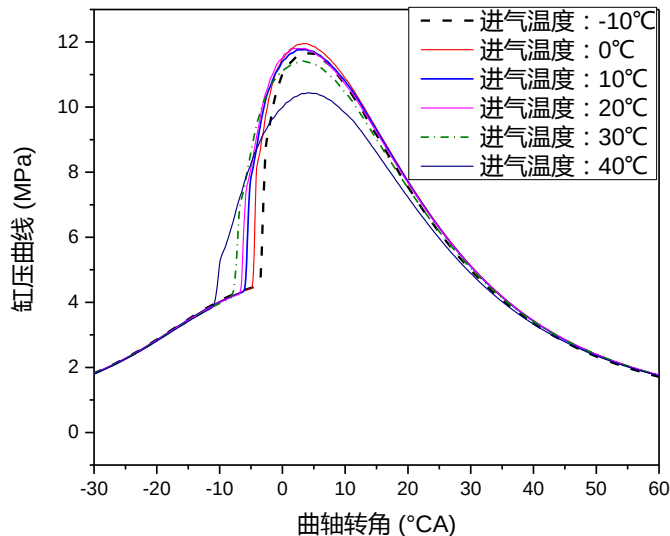
压力波从末端经气缸中心向另一端传播

Crank_angle = -7.9888

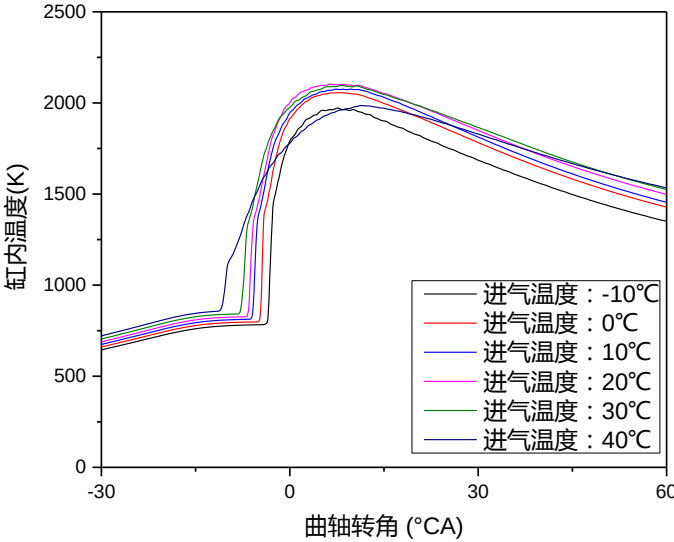
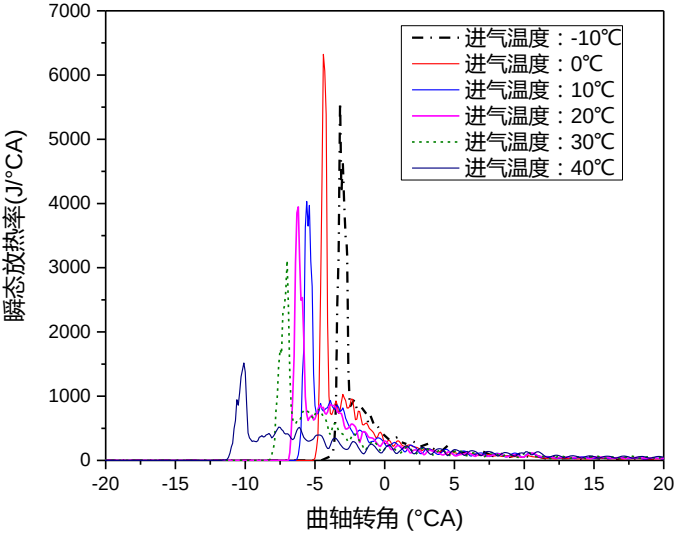
temp
2.400e+003
2.000e+003
1.600e+003
1.200e+003
8.000e+002



不同进气温度燃烧宏观参数对比

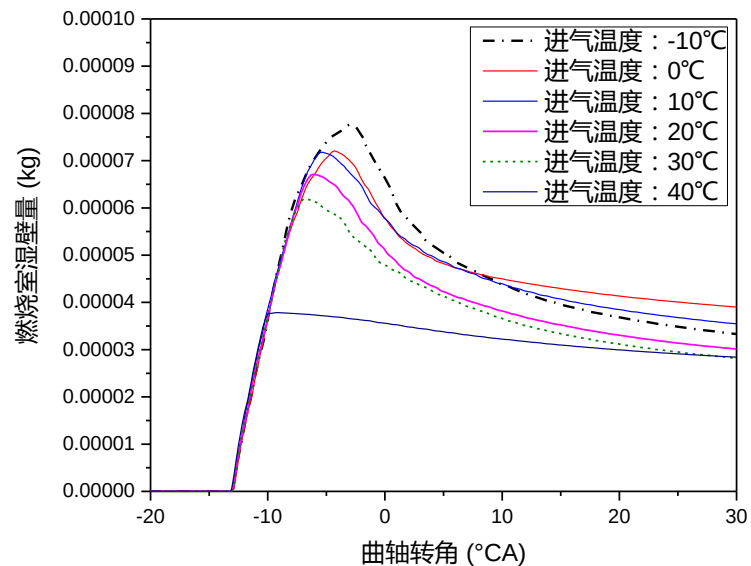
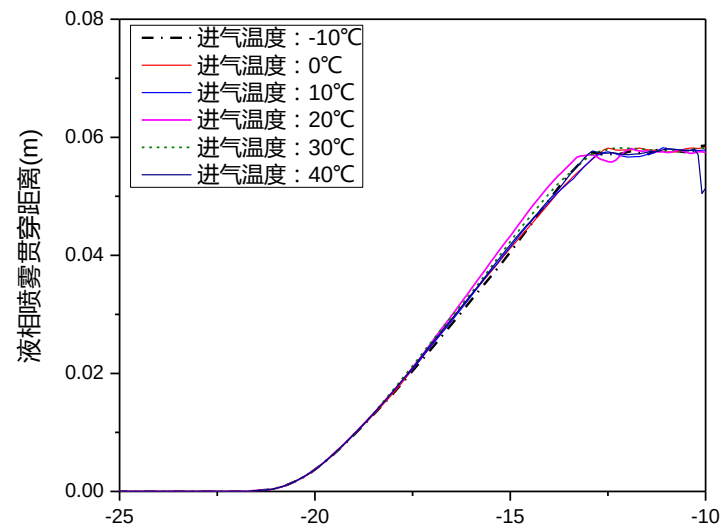


进气温度	烧蚀	正常
55~75℃	否	
40℃	否	
30℃	部分-50#烧蚀	烧蚀
20~25℃	-50#烧蚀，其余未作	
10~15℃	-10#否，-35#、-50#烧蚀	

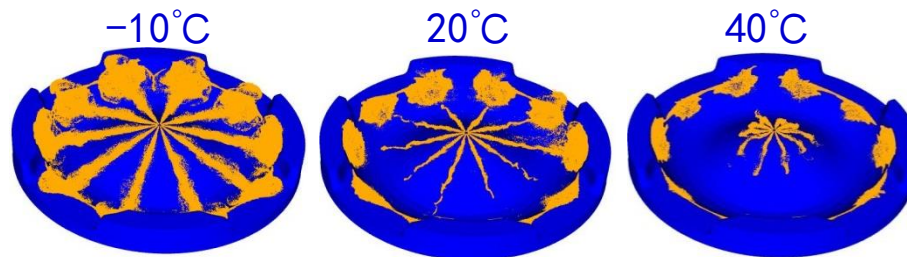
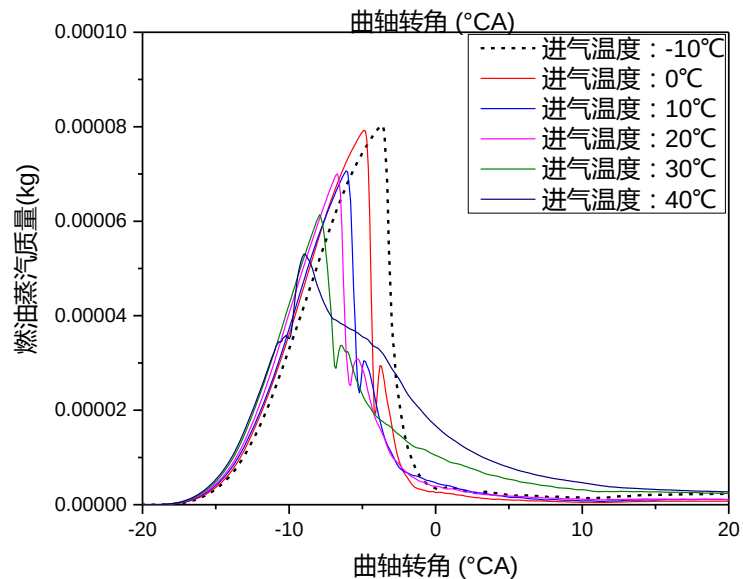


进气温度↓ 滞燃期↑ 预混放热比例↑ 最高燃烧压力和温度先↑后↓

不同进气温度对燃油附壁的影响

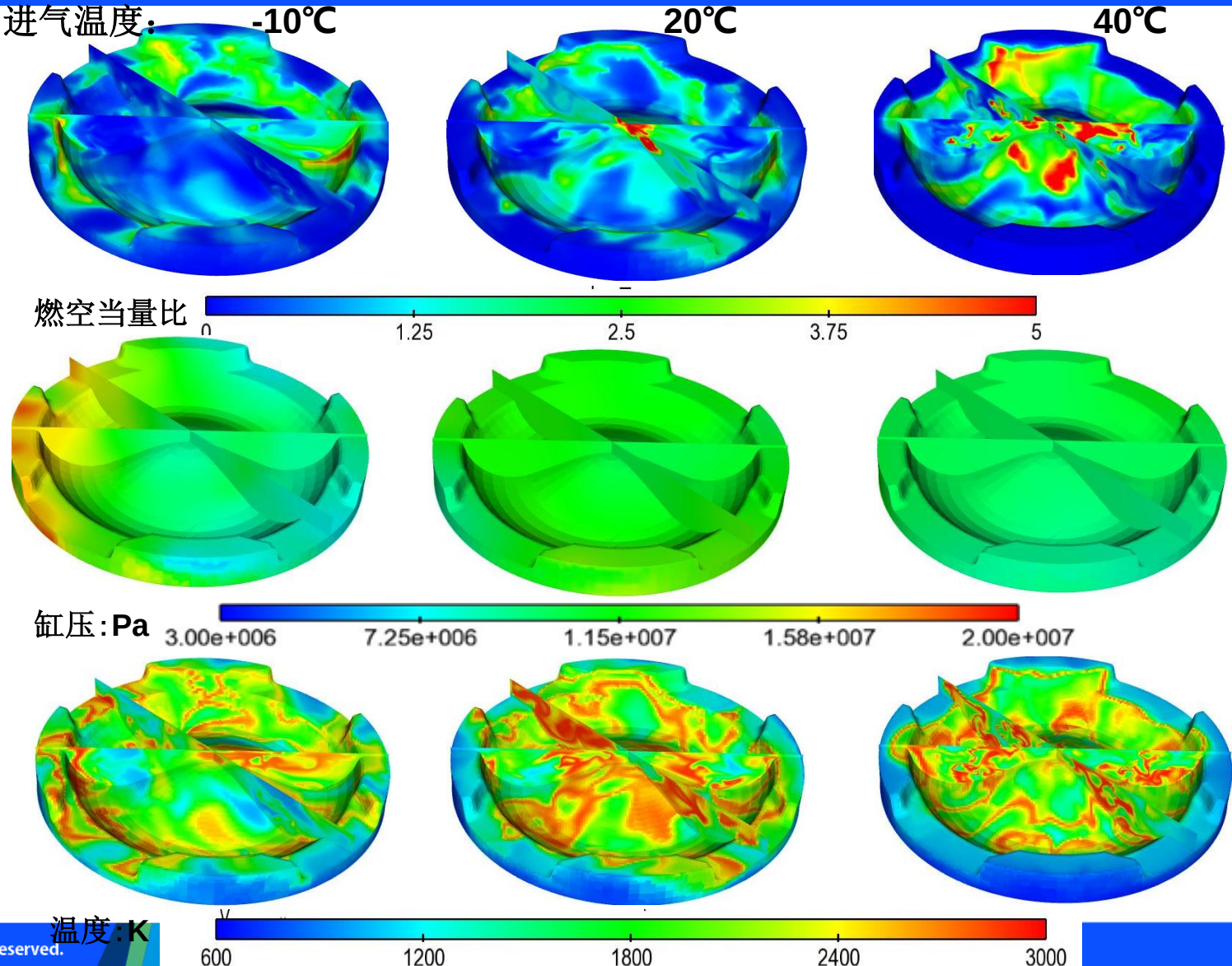


进气温度↓ 湿壁量↑ 燃油蒸发速度↓↓



上止点前6°CA油滴分布

不同进气温度对燃油附壁的影响



进气温度 ↓ 活塞顶外沿及避阀坑高压高温区域 ↑

低进气温度的方案，活塞外沿和避阀坑高温区域，与试验中烧蚀区域基本贴合。

提纲

- 研究背景
- 烧蚀故障复现试验
- 特征工况大涡模拟设定及结果分析
- 结论

结论

- 当进气温度低于40°C以后，在1500r/min转速 70%负荷工况点燃烧过程缸压出现剧烈的振荡，压力升高率显著增加，超过4MPa/°CA。
- 大涡模拟还原了烧蚀特征工况缸内压力波的传播过程。
- 进气温度低于40°C时，燃油湿壁量显著增加，附壁后蒸发速度变缓，导致喷油过程油气分布不均匀、温度上升缓慢，导致滞燃期延长。
- 随着进气温度进一步下降，着火滞燃期增加，预混放热比例增加，最高燃烧压力和温度逐渐增加；当进气温度低于-10°C时，由于着火延迟过长，最高燃烧压力和温度开始下降。
- 从空间分布来看，进气温度40°C时，高温区集中在燃烧室凹坑内；当进气温度下降，受到燃油附壁的影响，活塞顶外沿及避阀坑位置逐渐出现高温高压区域，与试验中烧蚀区域基本贴合。

感谢您的聆听！