

ICSC 2019

Core Competence Enhanced by MBD



IDAJ CAE Solution Conference

带预燃室的双燃料低速船机燃烧过程的三维模拟研究

**天津大学
刘宗宽**

目录

PART ONE

研究背景及内容

PART TWO

数值模型及验证

PART THREE

天然气当量比的影响

PART FOUR

引燃油喷射量的影响

PART FIVE

引燃油量对失火工况的影响

PART SIX

总结

PART ONE

研究背景及内容

船用低速机

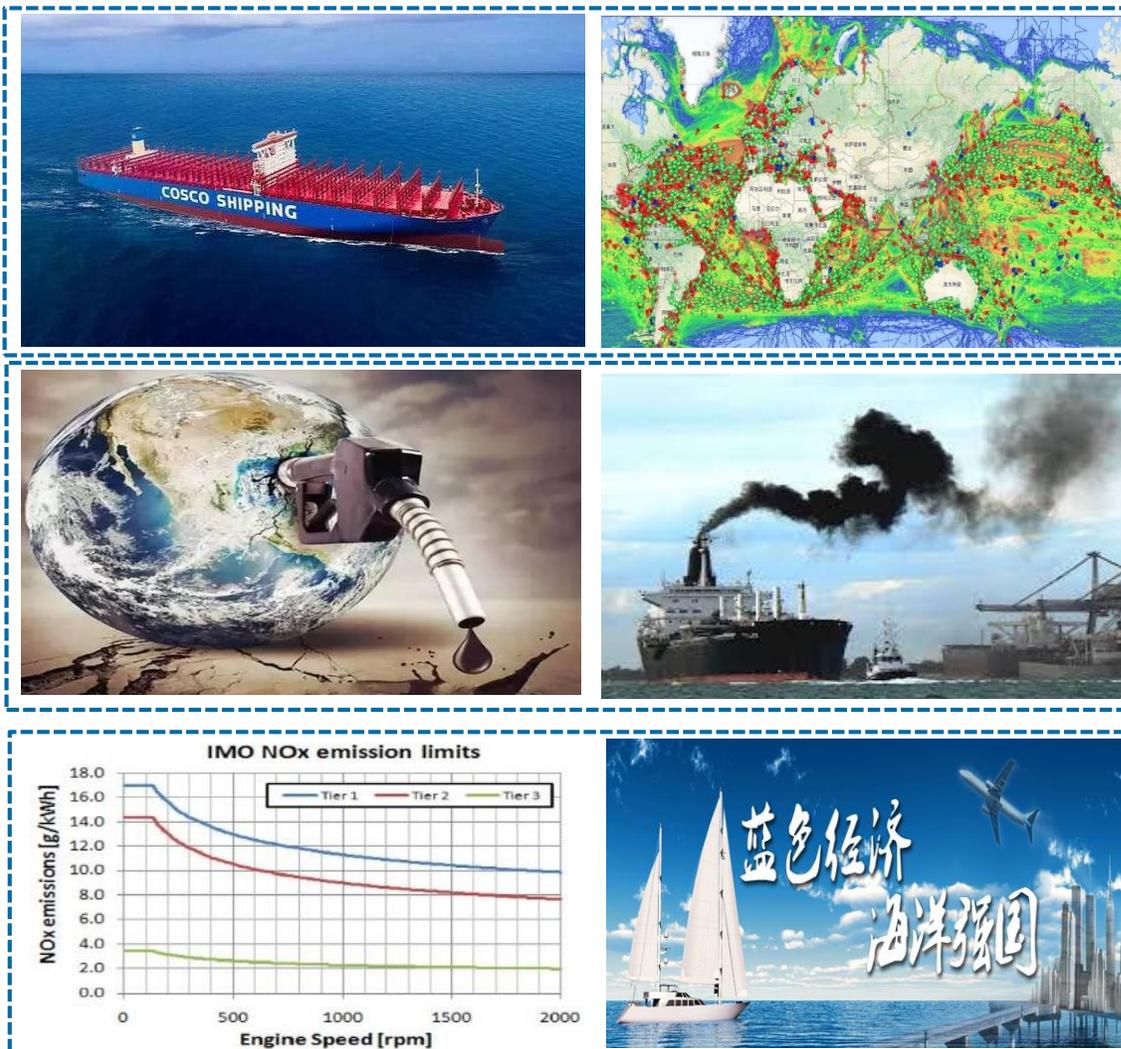
- 全球货运总量的**90%**由低速机驱动；
- 低速机是**经济发展**的主要推动力；

社会背景

- 化石能源消耗，**环境污染**加剧；
- **IMO**排放法规更加**严格**；
- 我国“**海洋强国**”战略对相关**装备制造技术**提出了更高的要求；
- “**清洁**”、“**高效**”的低速机成为焦点；

天然气

- 燃烧**清洁**，储量**丰富**，价格**低**；
- **天然气**在发动机中的应用成为**热点**！



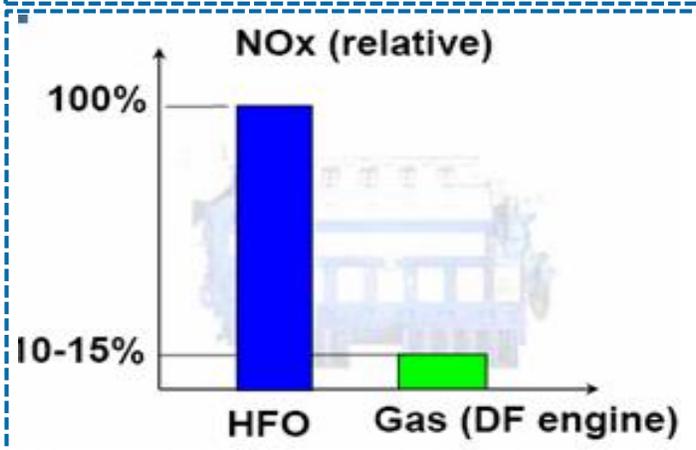
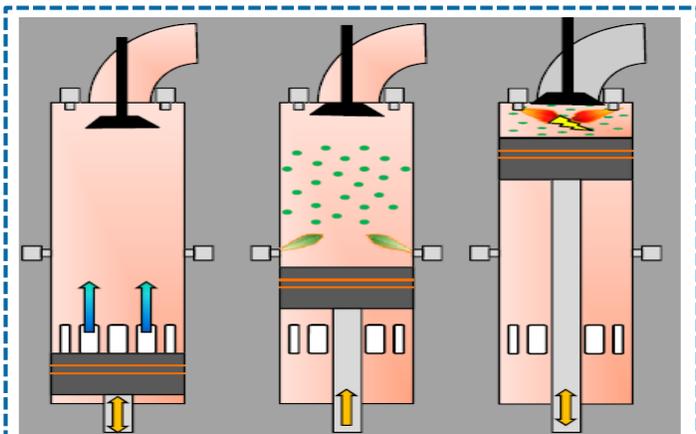
The collage consists of six panels:

- Top-left: A large blue and red COSCO SHIPPING container ship at sea.
- Top-right: A world map showing global shipping routes and ports.
- Middle-left: A globe with a fuel nozzle inserted into it, symbolizing energy and environmental impact.
- Middle-right: A ship at a port emitting thick black smoke into the sky.
- Bottom-left: A line graph titled "IMO NOx emission limits" showing NOx emissions (g/kWh) on the y-axis (0.0 to 18.0) versus Engine Speed (rpm) on the x-axis (0 to 2000). Three lines represent Tier 1 (blue), Tier 2 (red), and Tier 3 (green), all showing a decrease in emissions as engine speed increases.
- Bottom-right: A promotional image with the text "蓝色经济 海洋强国" (Blue Economy, Maritime Power) over a scene with a sailboat, a modern city skyline, and an airplane.

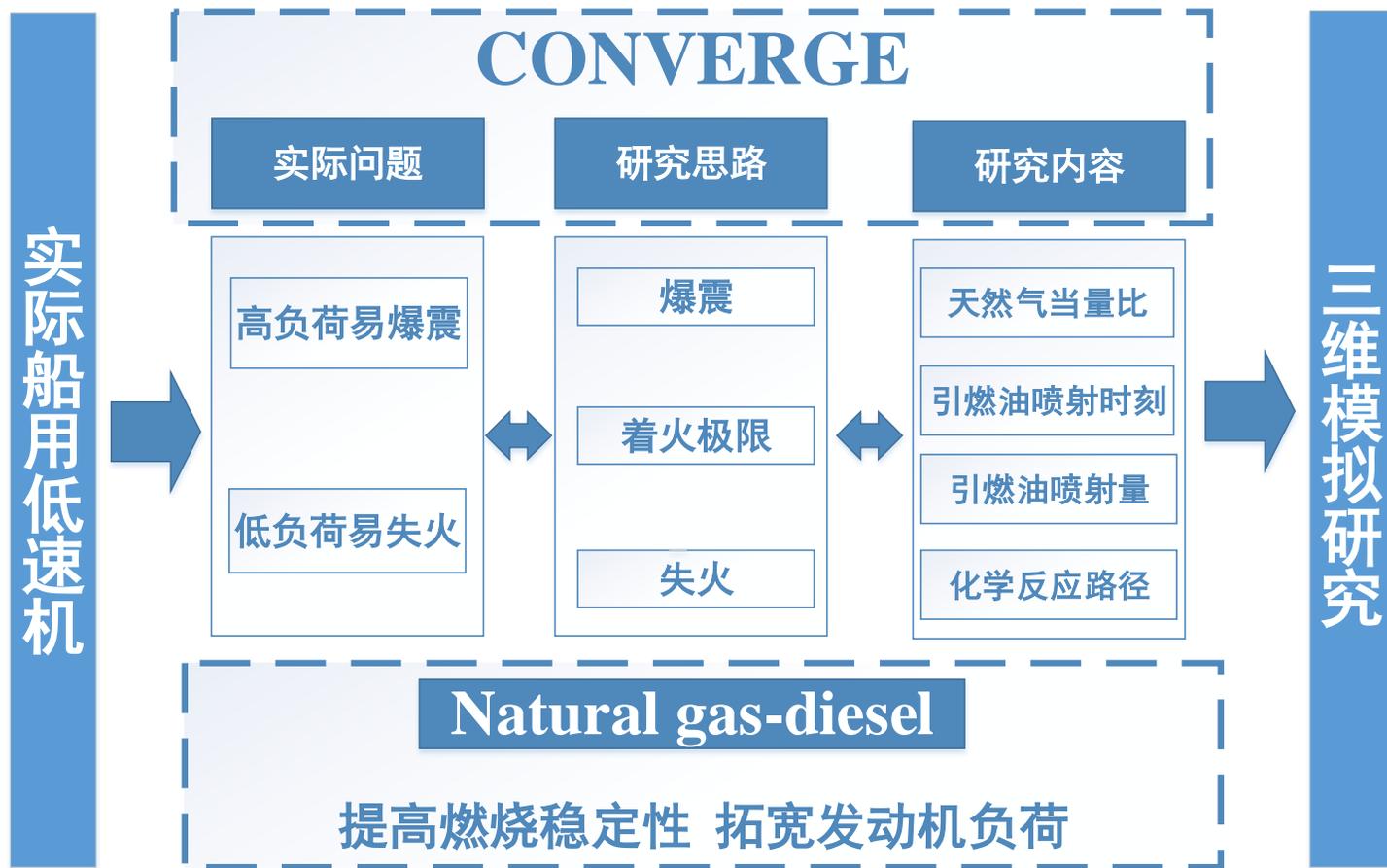
PART ONE

研究背景及内容

双燃料低速机



研究思路



目录

PART ONE

研究背景及内容

PART TWO

数值模型及验证

PART THREE

天然气当量比的影响

PART FOUR

引燃油喷射量的影响

PART FIVE

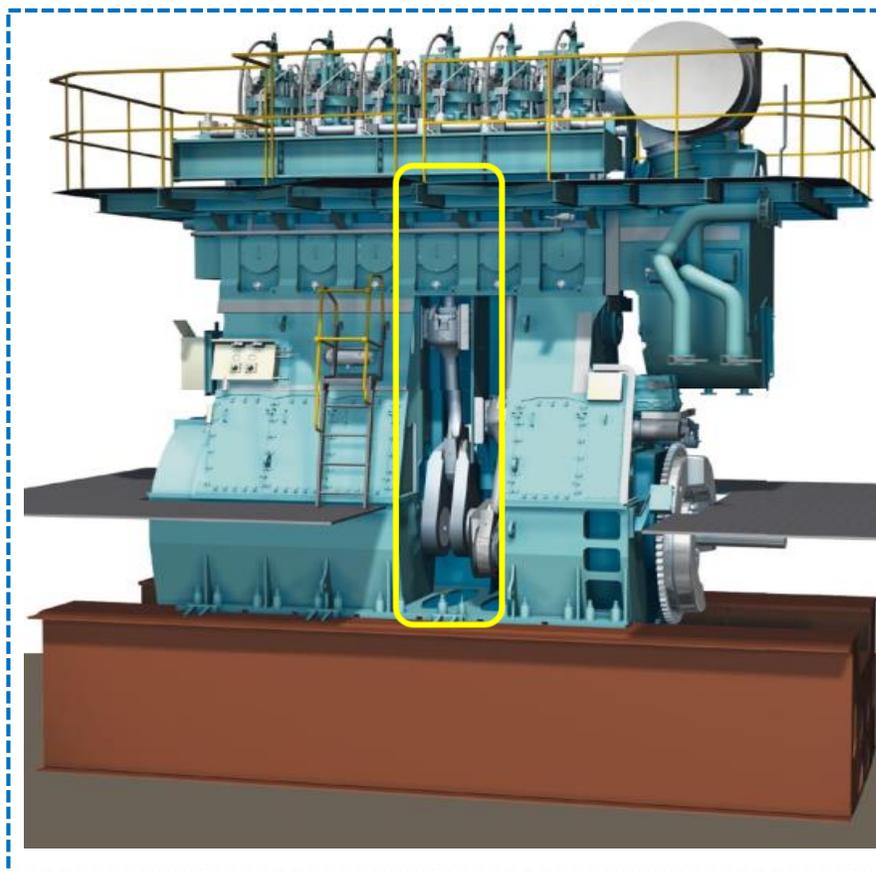
引燃油量对失火工况的影响

PART SIX

总结

数值模型及验证

■ 几何模型

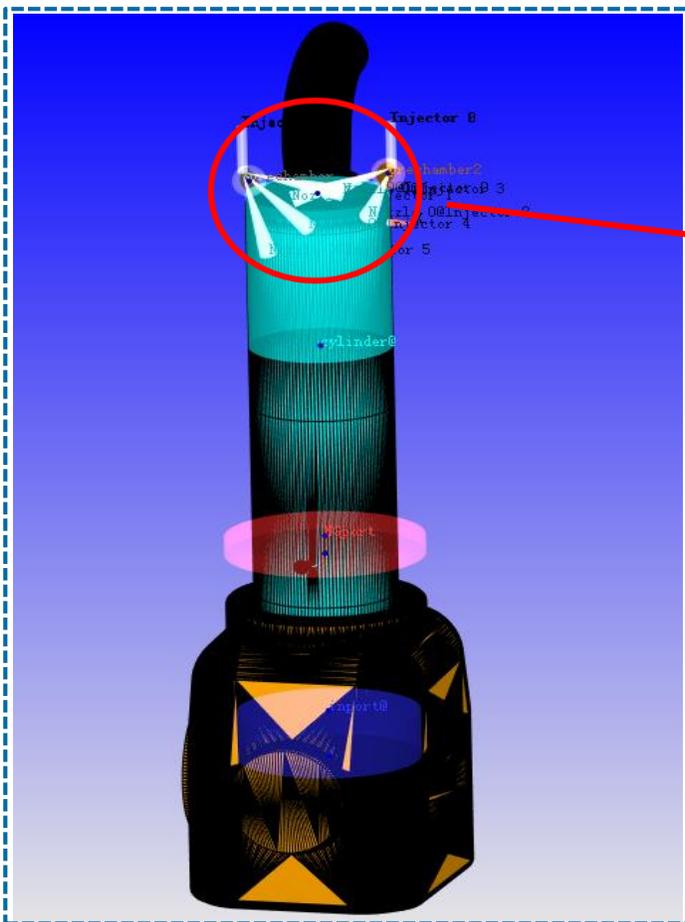


参数名称	参数值
机型	Wärtsilä 6RT-flex50B
气缸数	6
冲程数	2
缸径×冲程/mm	500×2050
转速/rpm	102
SOI/deg	-8.5
引燃油比例	0.97%
燃料	天然气/柴油

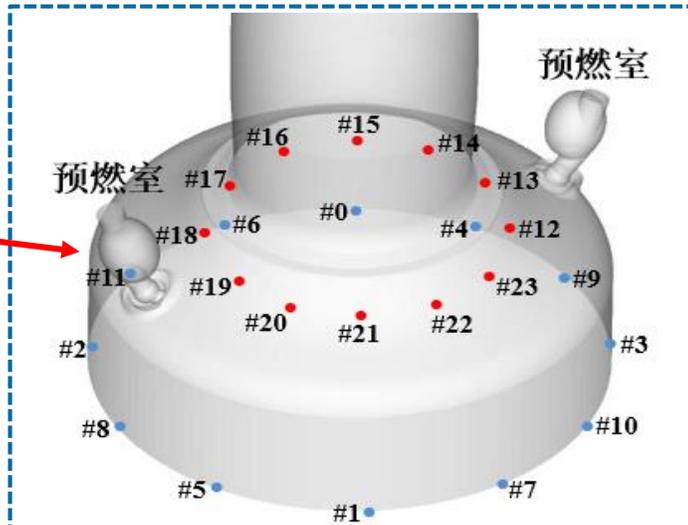
PART TWO

数值模型及验证

■ 三维模型

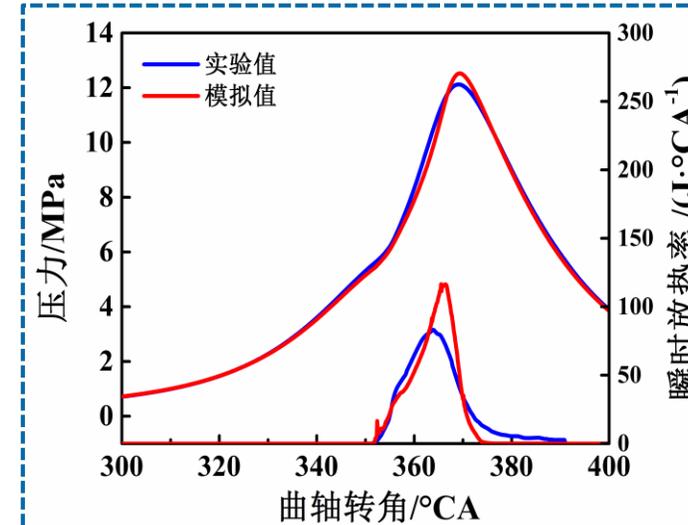


■ 监测点及子模型



基本控制方程	气相/液相方程组
燃烧模型	SAGE
湍流模型	RNG k-ε
喷雾破碎模型	KH-RT

■ 模型验证



参数	实验	模拟
总放热量/kJ	1138.3	1106.8
爆压/MPa	12.12	12.53
爆压角/deg	369.0	369.4

目录

PART ONE

研究背景及内容

PART TWO

数值模型及验证

PART THREE

天然气当量比的影响

PART FOUR

引燃油喷射量的影响

PART FIVE

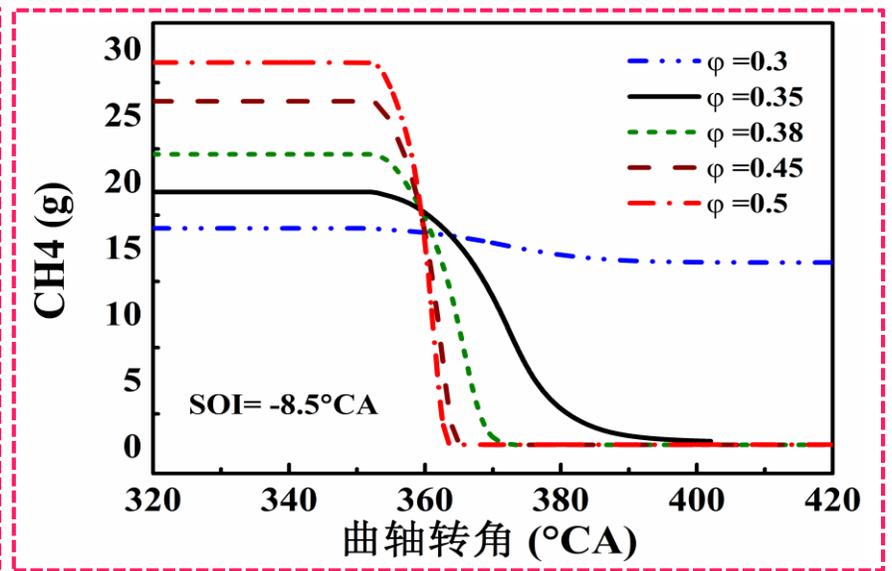
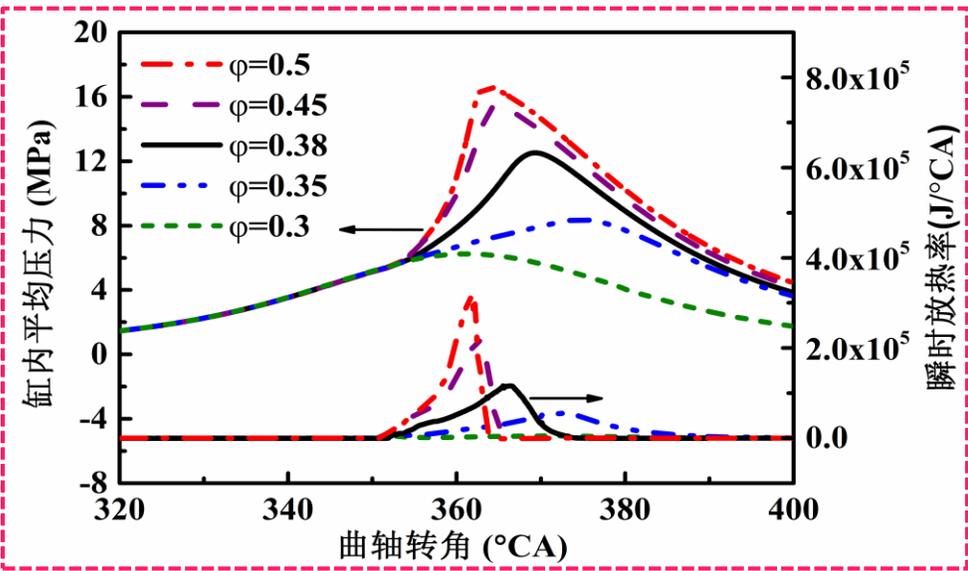
引燃油量对失火工况的影响

PART SIX

总结

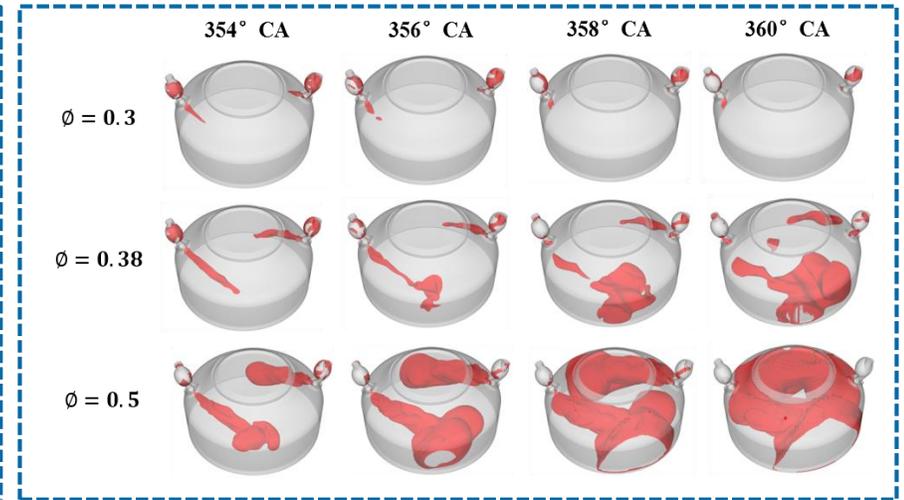
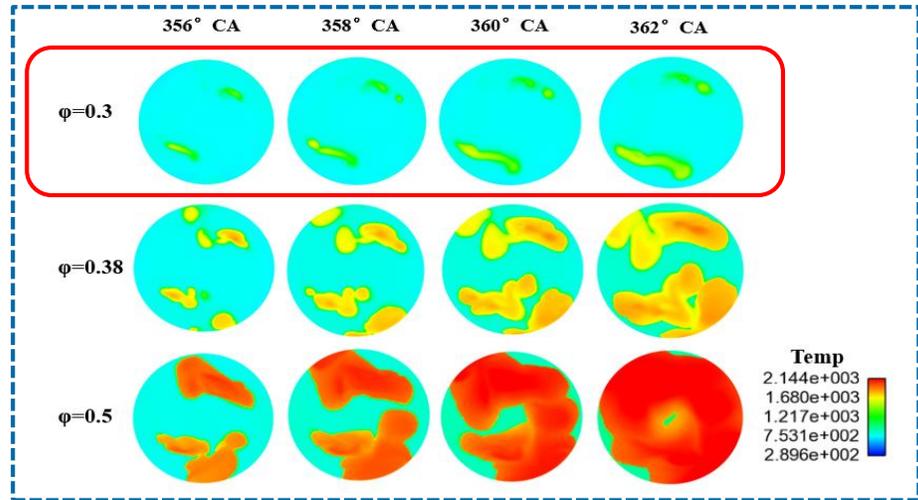
PART THREE

天然气当量比的影响



- 随着甲烷的初始当量比减小，缸内压力和放热率峰值均减小，甲烷消耗速率降低；
- 当量比为0.3的工况，缸内出现大量未燃甲烷，说明混合气的燃烧过程严重恶化，出现失火现象；

- 当量比为0.3的工况，缸内平均温度始终较低，几乎无高温区域出现；
- 根据三维的1800K温度等值面可知，缸内火焰面的范围随当量比降低而减小，当量比为0.3的工况，缸内无大范围火焰面。

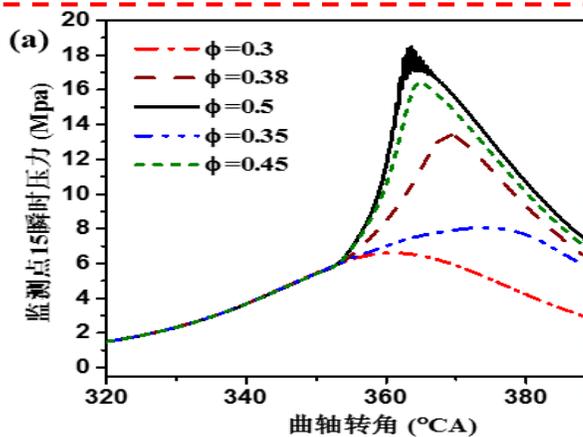


PART THREE

天然气当量比的影响

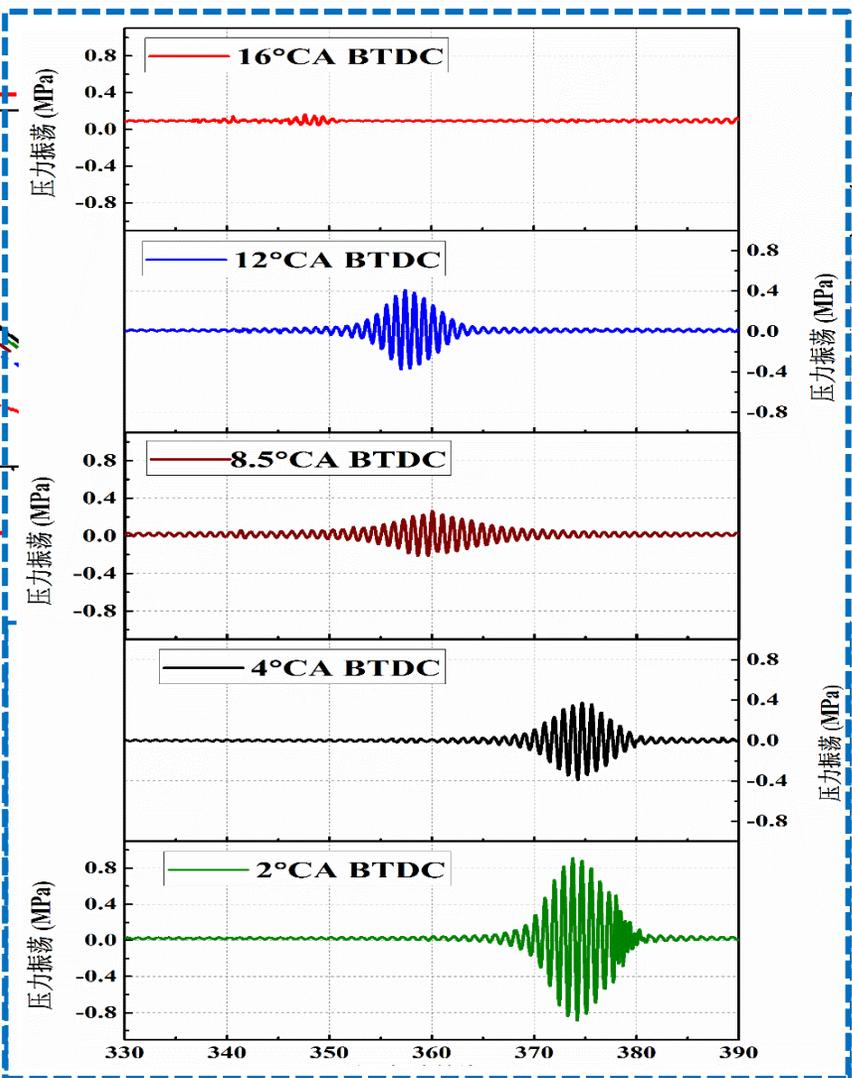
缸内瞬时压力的变化

- 随着当量比增加，缸内压力增加； $\phi=0.5$ 工况，监测点出现压力振荡，幅值的最大值约为0.7 MPa；



$\phi=0.5$ ，不同喷射时刻下缸压的变化

- 当量比0.5的工况，在喷射时刻为 8.5° CA的基础上，提前引燃油喷射时刻可降低压力振荡的强度，而推迟喷射时刻会使压力振荡加剧；
- 结论：实际双燃料发动机中，可通过适当早喷引燃油来降低压力振荡的强度，从而抑制爆震发生的趋势。



目录

PART ONE

研究背景及内容

PART TWO

数值模型及验证

PART THREE

天然气当量比的影响

PART FOUR

引燃油喷射量的影响

PART FIVE

引燃油量对失火工况的影响

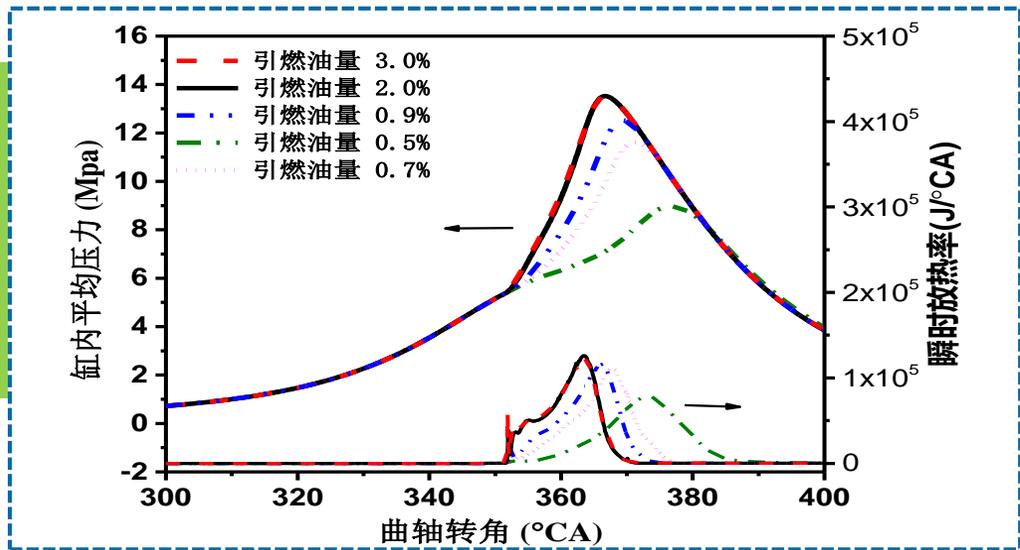
PART SIX

总结

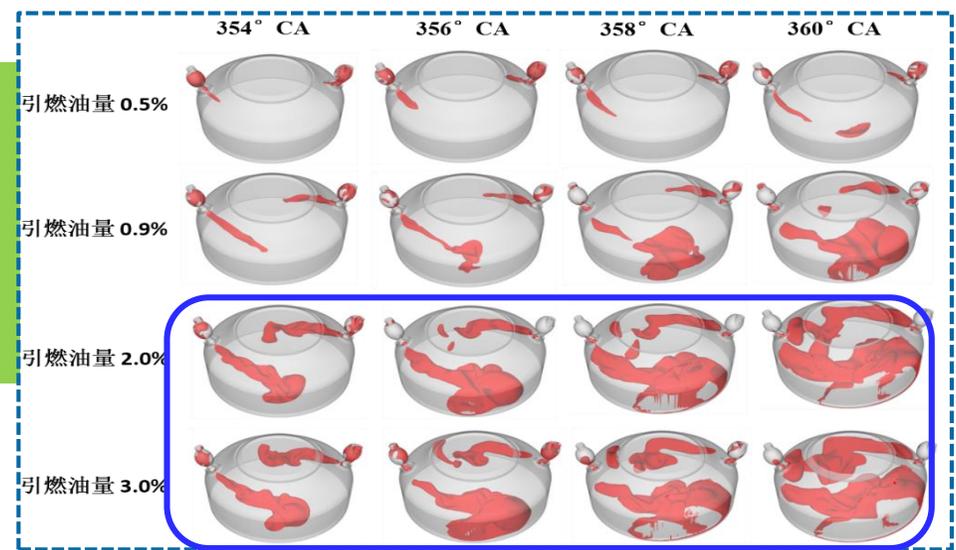
PART FOUR

引燃油喷射量的影响

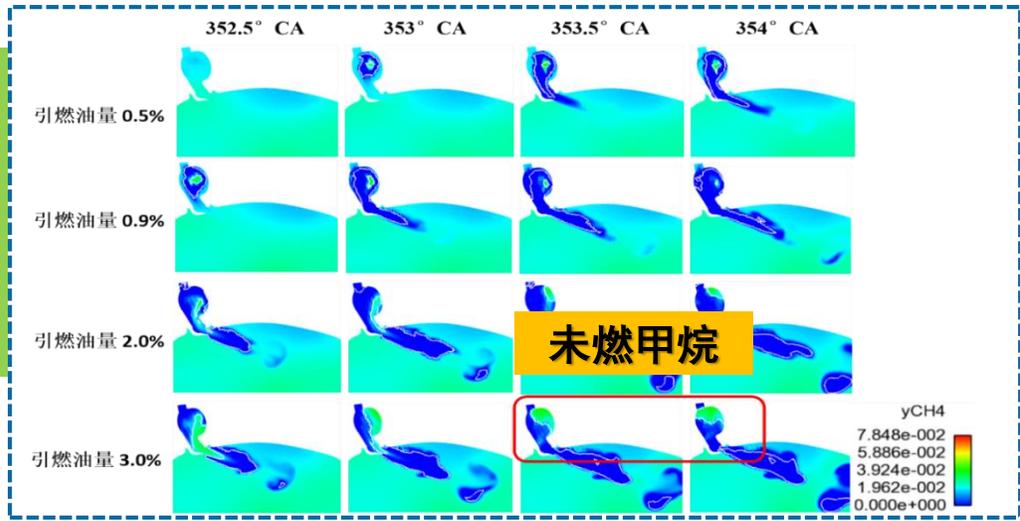
平均压力



火焰发展



甲烷分布



- 引燃油比例增加，缸内压力和放热率峰值增加；
- 引燃油比例高于2.0%时，继续增大引燃油量对缸压和放热率的影响不再明显；
- 引燃油比例增大，预燃室出口附近射流火焰的强度增加；
- 引燃油比例为3.0%的工况，喷油后预燃室内出现较多的未燃甲烷。

目 录

PART ONE

研究背景及内容

PART TWO

数值模型及验证

PART THREE

天然气当量比的影响

PART FOUR

引燃油喷射量的影响

PART FIVE

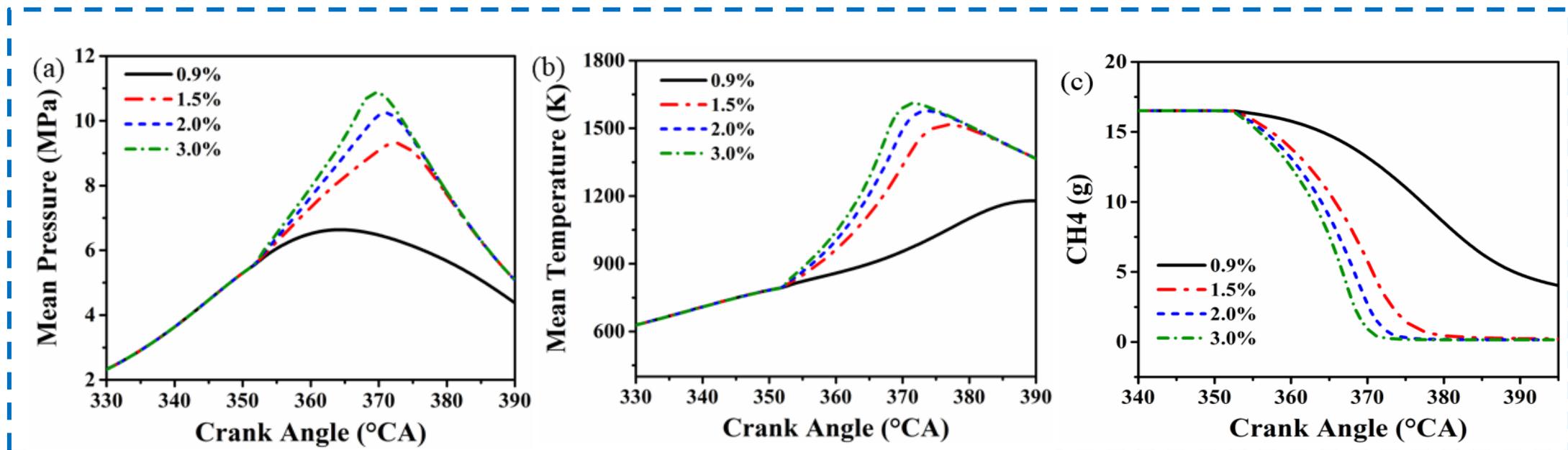
引燃油量对失火工况的影响

PART SIX

总结

引燃油量对失火工况的影响

➤ 缸内压力和温度及甲烷含量的变化（甲烷当量比0.3）

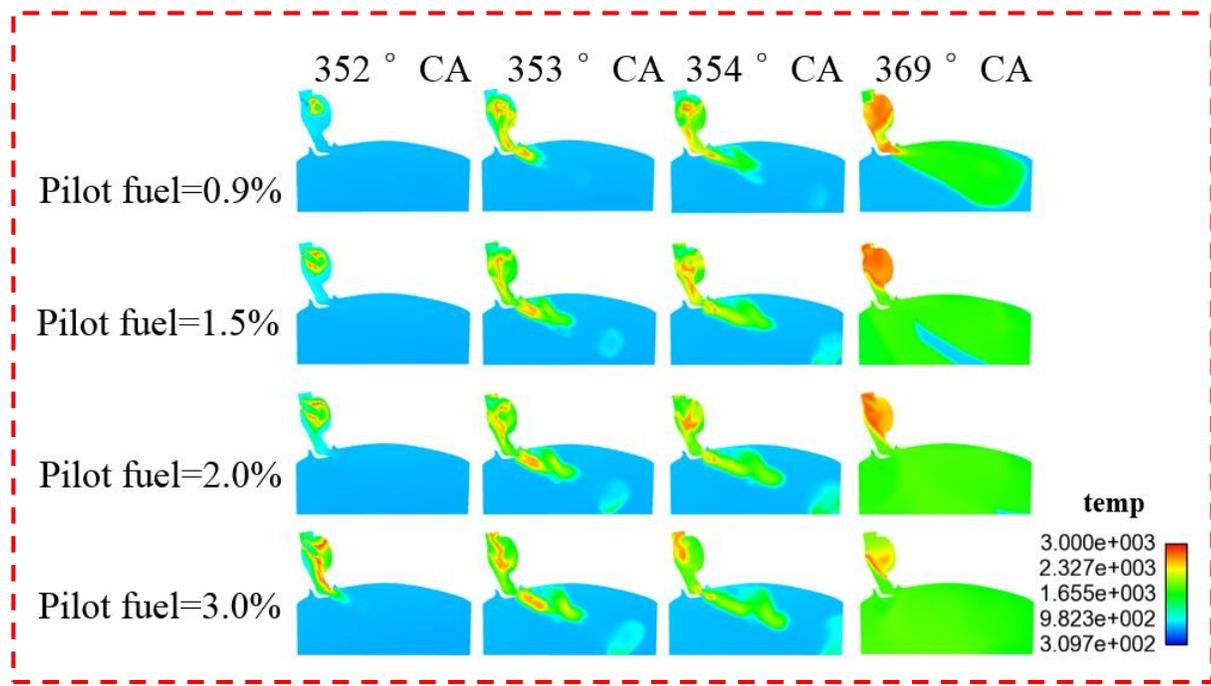


- ◆ 失火工况（0.9%），引燃油比例增加，缸内平均温度和压力增加，甲烷的消耗速率加快；
- ◆ 引燃油比例超过1.5%时，缸内甲烷完全消耗，失火现象消失，发动机经历了从“失火”到“完全着火”的转变！
- ◆ 结论：失火发生时，增加引燃油量，可有效促进缸内混合气的燃烧过程，提高燃烧稳定性。

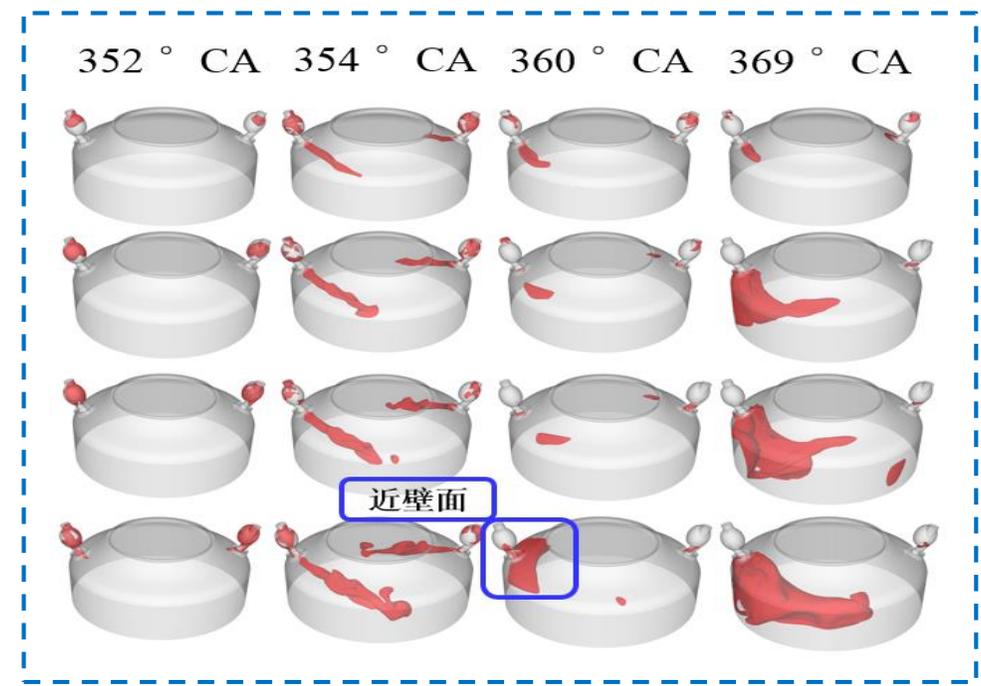
PART FIVE

引燃油量对失火工况的影响

➤ 温度分布状况



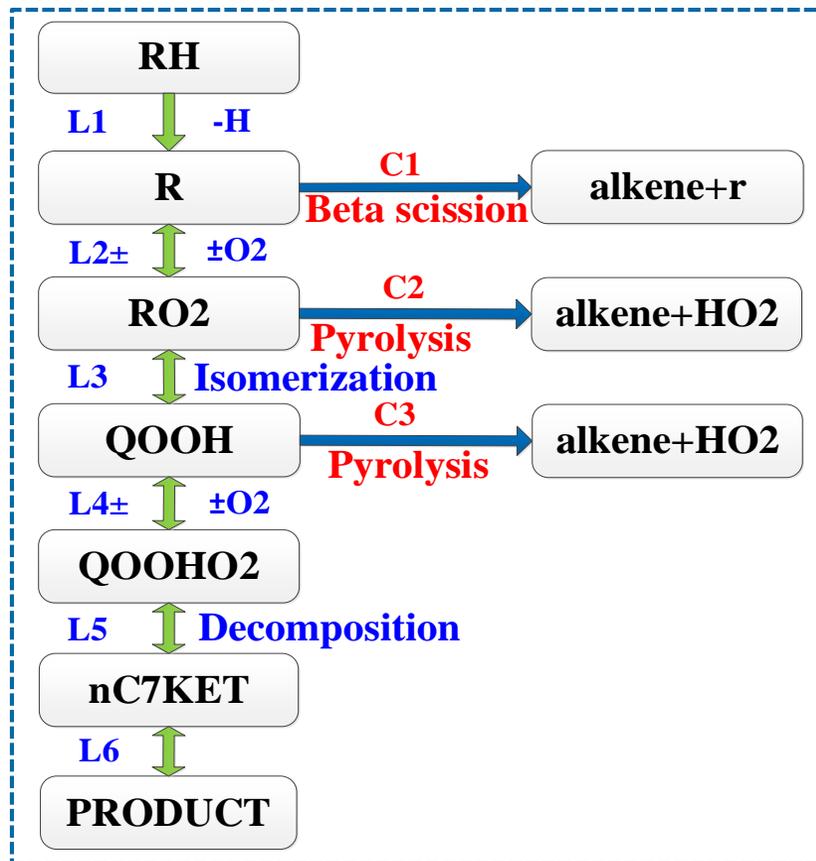
➤ 火焰发展状况



- ① 引燃油比例增加，喷油（352 ° CA）后预燃室内的火焰发展较快，温度较高；且预燃室出口附近射流火焰变强，引燃油比为3.0%的工况，上止点时近壁面处火焰发展较快；
 - ② 在369 ° CA时刻，引燃油比例高于1.5%的工况，主燃烧室内火焰面分布较广，说明缸内燃烧剧烈。
- 结论：引燃油量增加，射流火焰更强，缸内热点更多，会促进甲烷燃烧，避免失火发生。

引燃油量对失火工况的影响

➤ 正庚烷化学反应路径

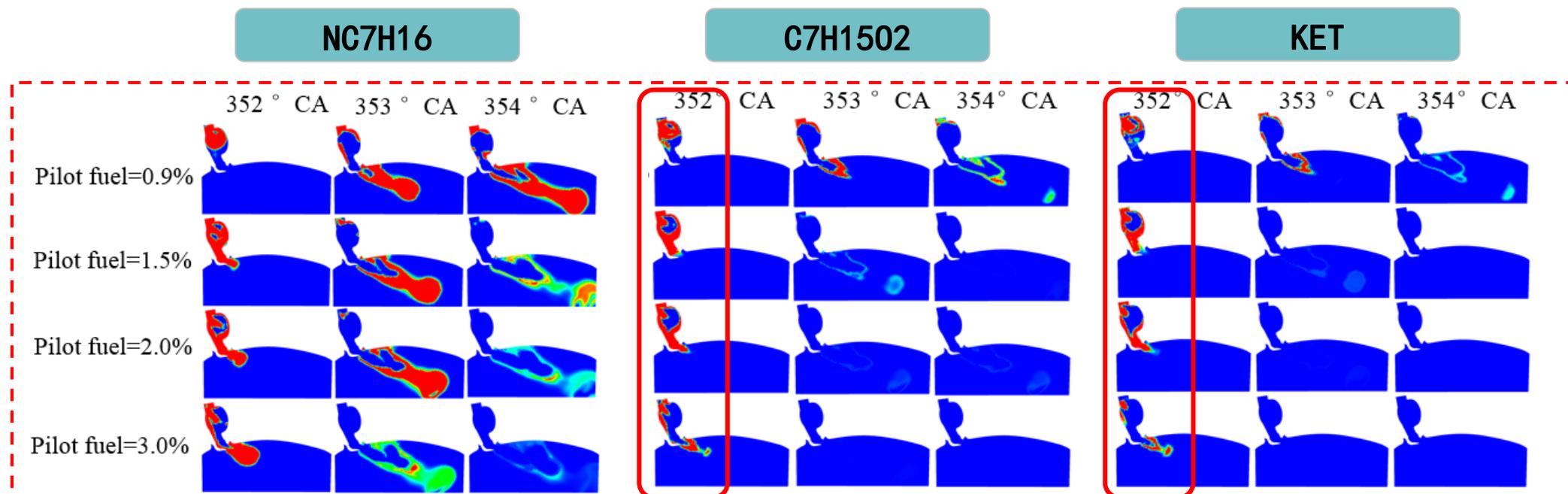


- 低温反应：通过放热反应提高系统温度，并形成始发的自由基群（radical pool），引起链锁分支； $R+O_2 \rightleftharpoons RO_2$ 为低温反应中最重要的反应，其平衡常数具有强烈的温度依赖性；
- 中温反应：随着温度升高，低温反应通道强度减弱， β 裂解反应、C1、C2反应增强，低温区链分支反应被中温区链传递反应取代，后者只能维持却不能增加具有强反应活性的自由基数目，导致NTC现象出现；
- 高温反应：随着温度继续升高，正庚烷基（R）高温裂解反应和过氧化氢分解反应（ $H_2O_2 \rightleftharpoons OH+OH$ ）占主导地位，OH数目明显增加，系统反应最为剧烈。

PART FIVE

引燃油量对失火工况的影响

➤ 引燃油（正庚烷）低温反应路径关键组分的变化



- ① 引燃油量增加，缸内正庚烷消耗加快，说明引燃油的燃烧反应更加剧烈；
- ② 此外，预燃室和主燃烧室内C7H15O2和KET的含量减少，说明正庚烷低温反应减弱，高温反应占主导地位，燃烧反应剧烈。
- ③ 结论：引燃油量增加，使其本身反应较为剧烈，引燃作用更强！

目录

PART ONE

研究背景及内容

PART TWO

数值模型及验证

PART THREE

天然气当量比的影响

PART FOUR

引燃油喷射量的影响

PART FIVE

引燃油量对失火工况的影响

PART SIX

总结

压力振荡

- ✓ 当量比**增大**，缸内压力**增大**，爆压相位提前；当量比增加至**0.5**时，上止点附近缸内压力出现了明显的波动，振荡幅度约为**0.7MPa**；
- ✓ 基于 **$\phi=0.5$** 工况，适当早喷引燃油可使压力振荡**强度降低**，抑制爆震发生。

着火特性

- ✓ 当量比**减小**，缸内**甲烷燃烧反应缓慢**，缸内压力**降低**；当量比**降低至0.3**时，缸内出现**失火现象**；
- ✓ 引燃油量从**0.5%**增加至**2.0%**，压力峰值**增大**，爆压相位**提前**，瞬时放热率峰值**增大并随之提前**；
- ✓ 引燃油比例**大于2.0%**时，引燃油量的多少对引燃效果**基本没有影响**。

失火现象

- ✓ 失火工况下，引燃油量增加使喷雾**射流火焰变强**，缸内**热点增多**，可有效促进缸内混合气的燃烧过程，**避免失火发生**；
- ✓ 引燃油比例**超过1.5%**时，**甲烷完全消耗**，失火现象消失，发动机经历从“**失火**”到“**完全着火**”的转变！

感谢您的聆听！