



第十届内燃机可靠性技术国际研讨会 2021年4月23日, 济南
The 10th International Conference of Reliability Technology



内燃机燃烧定向调控方法与技术

Target Combustion Regulation Methods and Technology for Internal Combustion Engines

黄佐华 Huang Zuohua

西安交通大学 Xi'an Jiaotong Univ.

动力工程多相流国家重点实验室

State Key Lab Multiphase Flow in Power Engineering

Email: zhhuang@mail.xjtu.edu.cn

一、内燃机地位和作用

Position & role of ICE

二、内燃机先进燃烧技术

Advanced combustion technologies in ICEs

三、低碳燃料互补燃烧调控方法

Complementation combustion regulation methods for low carbon fuels

四、内燃机技术突破方向

Main approaches for ICEs

交通运输 Transportation	乘用车 商用车 公交车 载重车 船舶
非道路机械 Non-road vehicles	工程机械 建筑机械 农业机械
发电机组 Generator set	内燃机发电机组
国防装备 Non-civil equipment	坦克 装甲车辆 舰船 航空飞行器 无人机

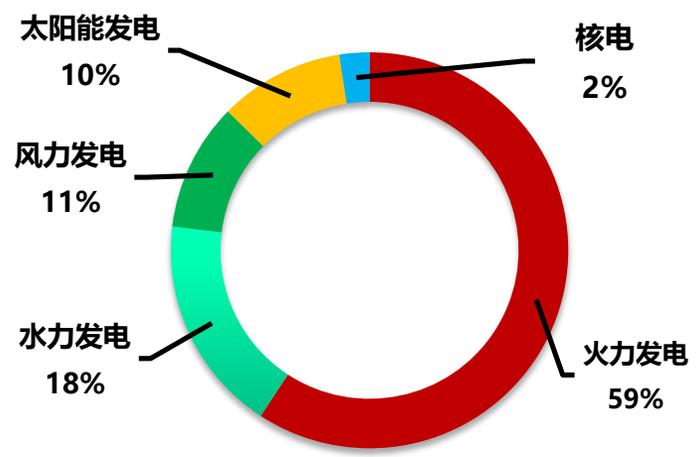


内燃机是动力主体在经济社会和国防建设中起支撑作用
ICES play key role in transportation and power supply

2019年中国发电装机容量 China total power capacity

20.11亿千瓦 2.011 billion kW (国家统计局)

装机容量比例%



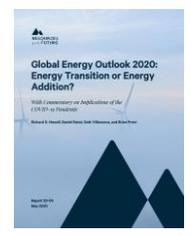
■ 火力发电 ■ 水力发电 ■ 风力发电
■ 太阳能发电 ■ 核电

2019年内燃机产量8100万台 81 million, 保有量5.5亿台 550 million
 年产总功率26.6亿千瓦, 是我国发电装机容量总和的1.32倍
 ICE is 1.32 times of power capacity

内燃机在能源动力中的主导作用

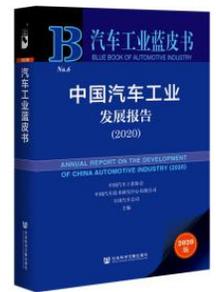
ICEs plays dominant role in power

• 国际能源署报告 (IEA)



2030年全球汽车保有量15亿辆
 内燃机动力源汽车
 90%-95%

• 中国汽车工业协会报告 (CAAM)



2050年70%车用动力是内燃机, 重型车辆主要是内燃机
 70% transportation power
 内燃机消耗了全世界65%以上石油资源
 美国75%, 中国70% 65% oil consumption
 内燃机尾气排放是城市大气污染主要来源
 NO_x: 50-55%, HC/CO: 60-70%
 PM: 25-30% major air pollutants
 CO₂: 占全国总量的9.8%

内燃机燃料
 Fuels

体积能耗密度高, 续航里程长, 最适合作为汽车燃料

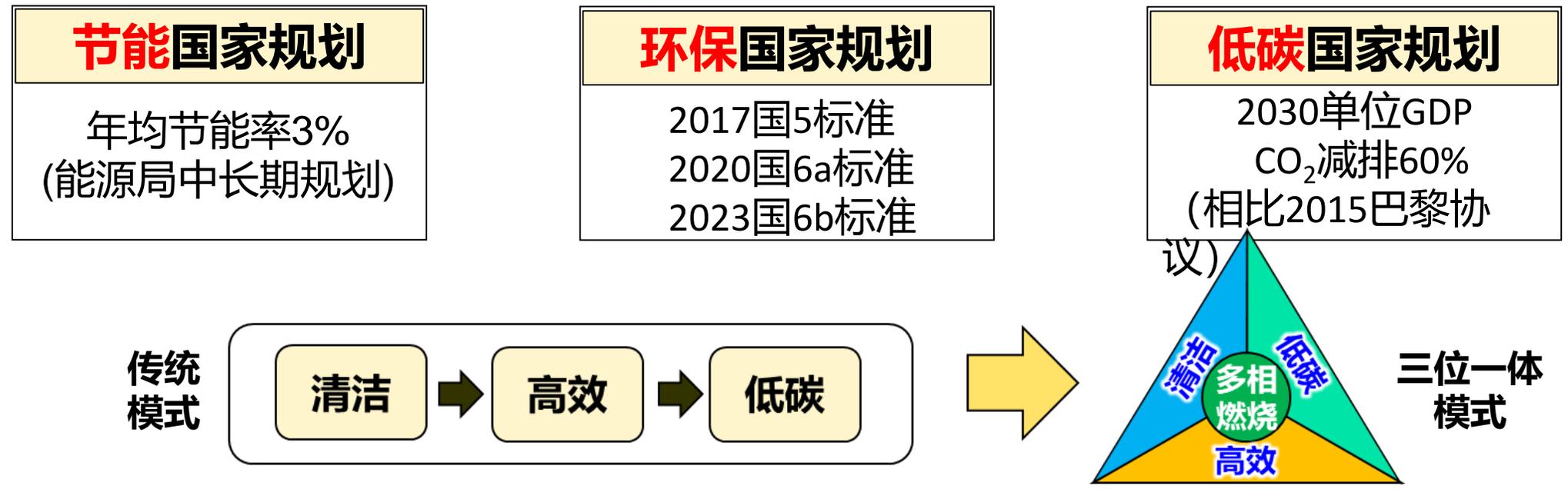
High density, long mileage, suitable for vehicle

节能 Energy saving: 内燃机节能是国家节能减排重要部分 (高效 high efficiency)

环保 Environ protection: 雾霾是政府和社会关注的焦点问题 (清洁 Clean)

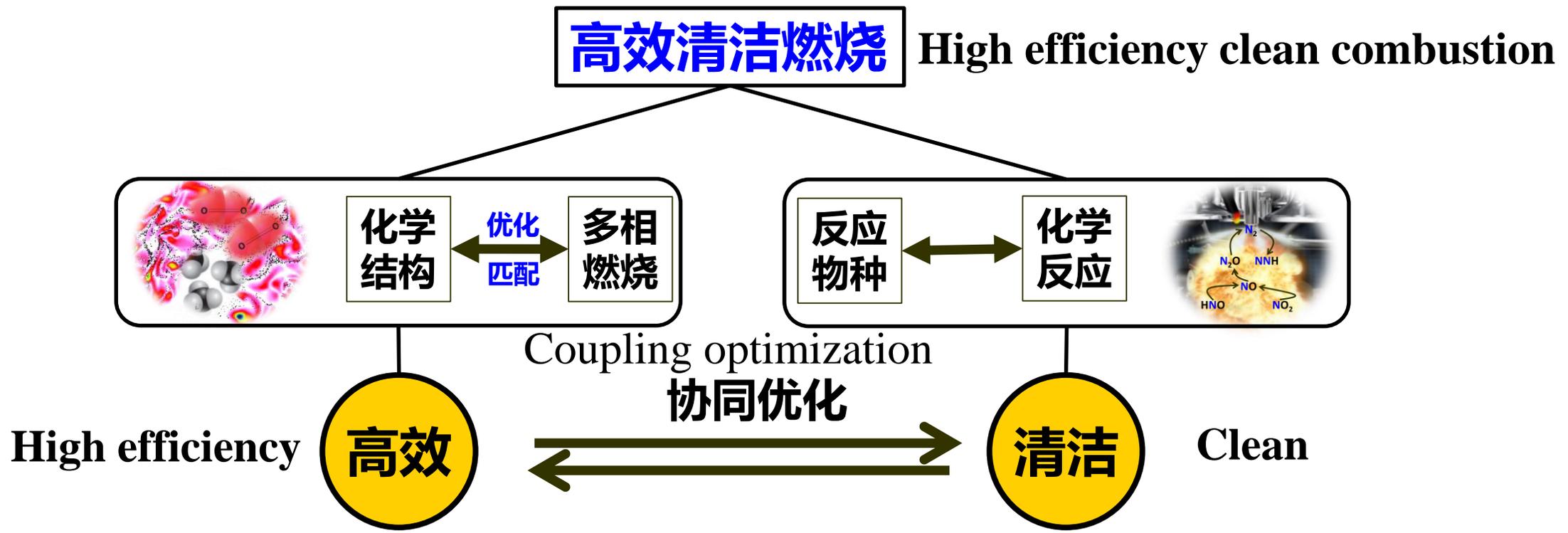
低碳 Low carbon: 内燃机燃料低碳化是发展趋势 (低碳)

National plans in energy saving, environmental protection and low carbon



内燃机高效清洁低碳燃烧是解决上述问题的重要手段

High efficiency/clean/low carbon ICEs is key route



形成突破热效率的关键技术，实现近零排放 Key Technologies

重大挑战

- 如何实现**燃料化学结构与多相燃烧过程优化匹配**，最大程度地减少发动机输入端和释放端间能量损失 (**高效**) High efficiency
- 如何实现**反应物种在多相化学反应流中的定向迁移**，形成多维度污染物协同消除 (**清洁**) Clean

一、内燃机地位和作用

Position & role of ICE

二、内燃机先进燃烧技术

Advanced combustion technologies in ICEs

三、低碳燃料互补燃烧调控方法

Complementation combustion regulation methods for low carbon fuels

四、内燃机技术突破方向

Main approaches for ICEs

热效率的不断提升是内燃机不断进步的**原动力**
High efficiency is power to push ICEs **progress**

柴油机动力

Compression ignition engine

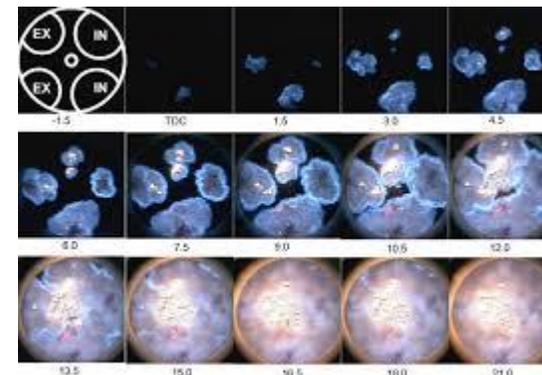
- **当前热效率**current
45-48%
- **目标热效率**target
50-55%



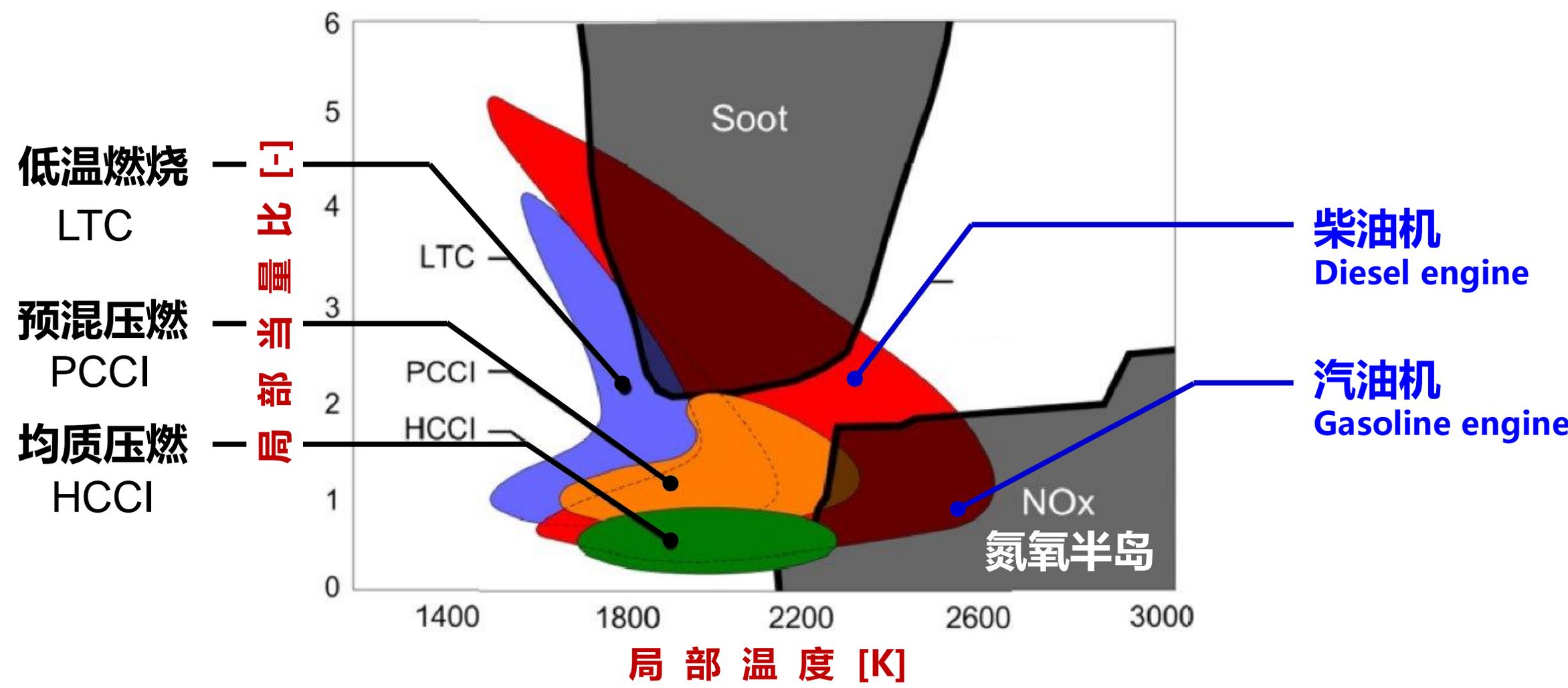
汽油机/气体机动力

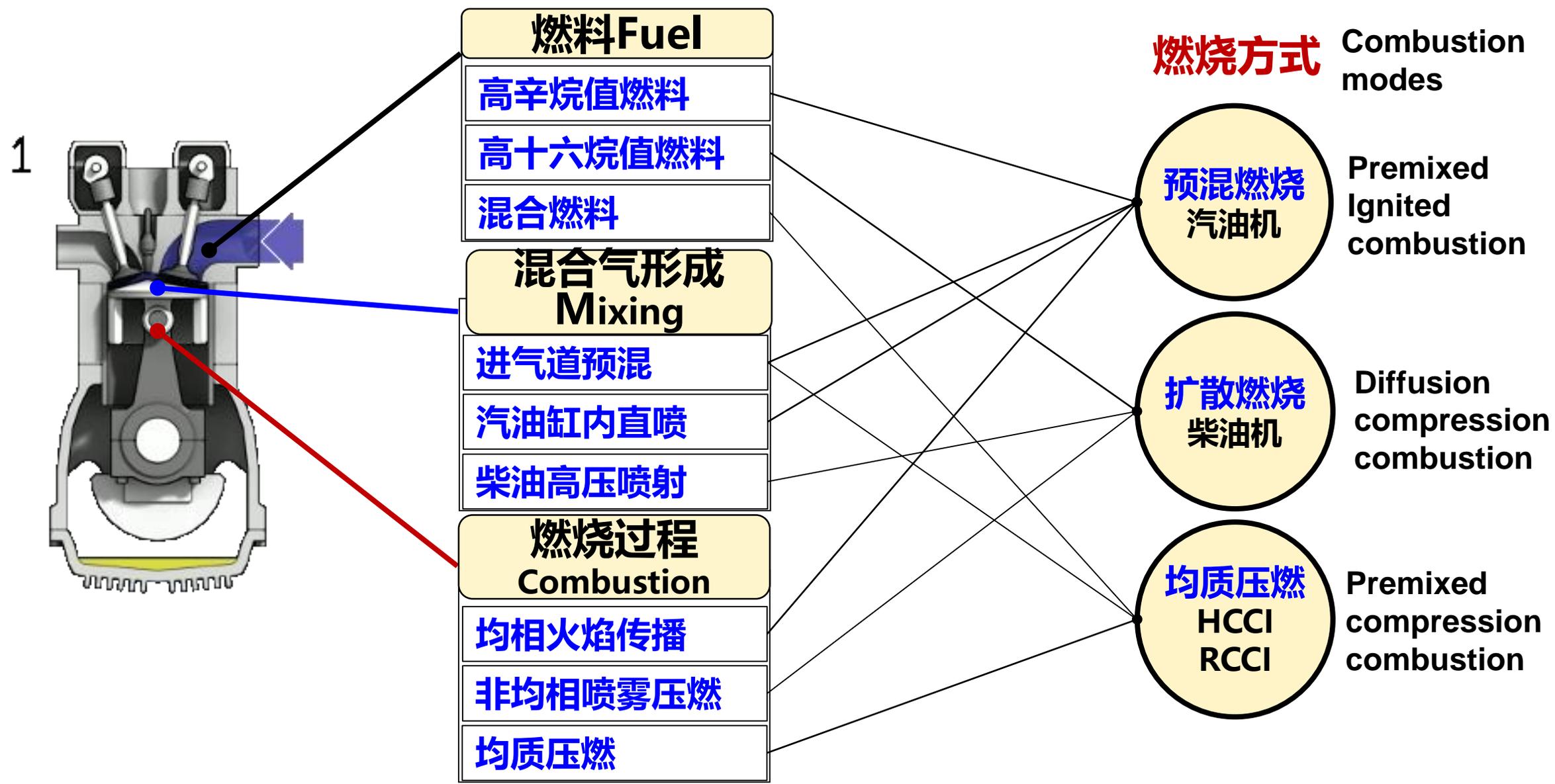
Spark ignition engines

- **当前热效率**current
 - **汽油机: 38-42%**
 - **气体机: 36-40%**
- **目标热效率**target
 - **汽油机: 45-50%**
 - **气体机: 42-45%**

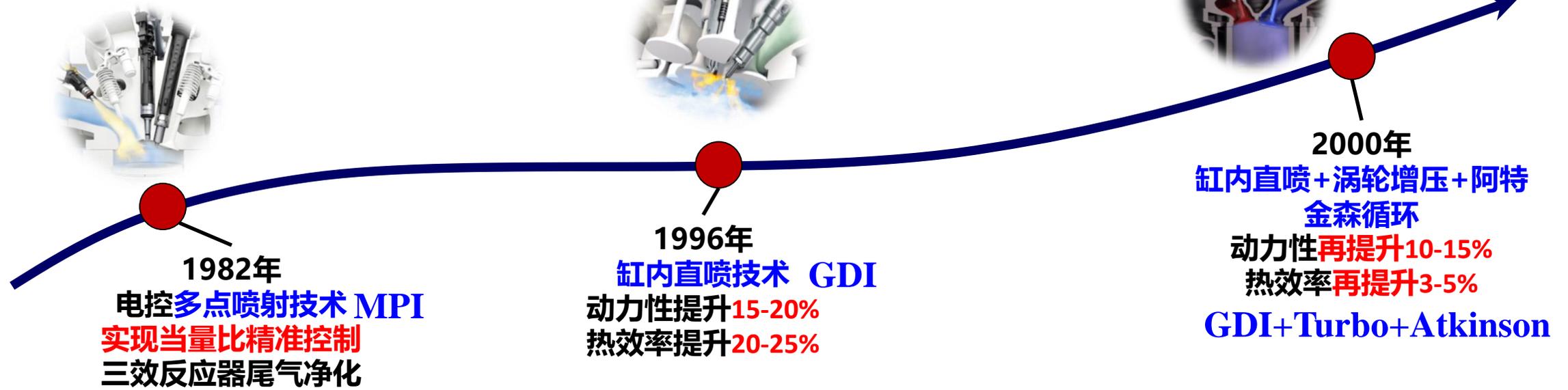


特点：低温燃烧、当量比/稀燃、均质燃烧；目的：避开 NO_x 和Soot半岛区





汽油机技术发展 SI engine progress

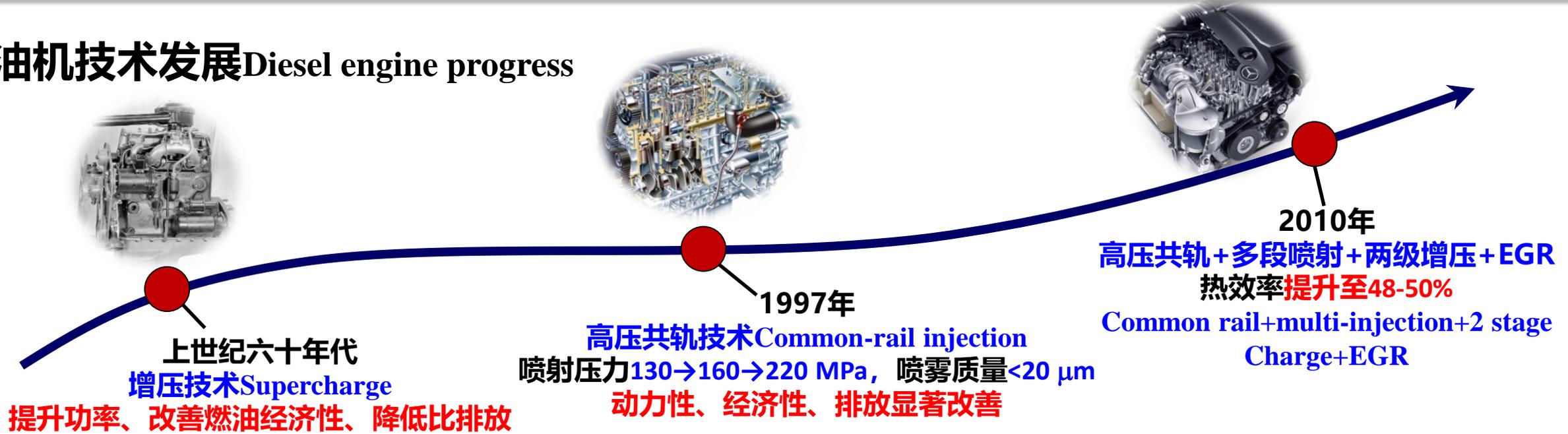


缸内直喷压缩比提升遇到爆震瓶颈
Knocking limits the compression ratio

提出新的科学问题：高参数热物理场中的着火、火焰传播机制、反应动力学 Ignition, propagation, kinetics
火焰湍流相互作用机制、爆震形成机制与控制方法 flame-turbulence, knocking mech

缸内直喷+强湍流+稀薄燃烧技术 (热效率42-45%)
缸内喷水技术 (形成水蒸气隔热层, 降低散热损失) 热效率50%

柴油机技术发展 Diesel engine progress



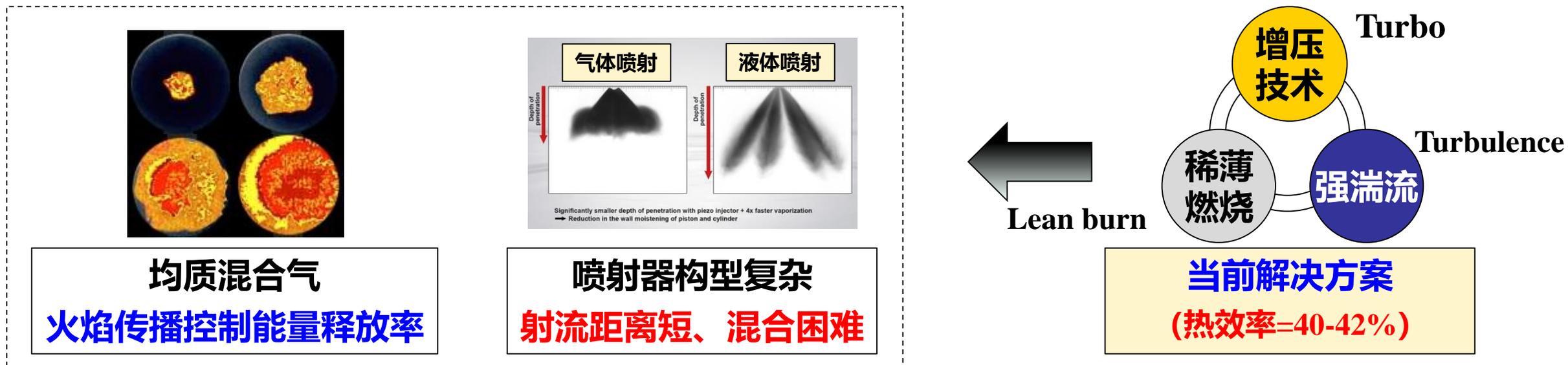
柴油机性能提升遇到**燃烧物理/化学尺度协同的瓶颈**

Physical/chemical coupling for further performance improvement

提出新的科学问题：**多段喷射雾化演变、燃油/空气时空分布与着火（化学/物理）**
高密度充量低温燃烧、浓度温度分层燃烧释热与污染物生成及演化
活性组分介入的可控燃烧

高压共轨+多段喷射+两级增压+两级EGR+余热回收，热效率50-53%

气体燃料内燃机 (CNG) —— 点燃式内燃机是成熟技术



性能提升的技术瓶颈： 火焰传播速度低、燃料反应活性低、热力循环定容度差、稀燃能力差

Bottleneck for
Performance improvement

天然气掺氢内燃机新方式的提出 HCNG combustion

提升燃料反应活性 提升火焰传播速率 提升稀燃极限 燃料低碳化
氢燃料近期在内燃机上最有效使用方式

- 天然气掺氢+EGR的低温低污染燃烧新途径 HCNG+EGR (提升热效率 降低排放)
- 天然气掺氢缸内直喷燃烧方式 DI HCNG (提升充量 分层燃烧)

一、内燃机地位和作用

Position & role of ICE

二、内燃机先进燃烧技术

Advanced combustion technologies in ICEs

三、低碳燃料互补燃烧调控方法

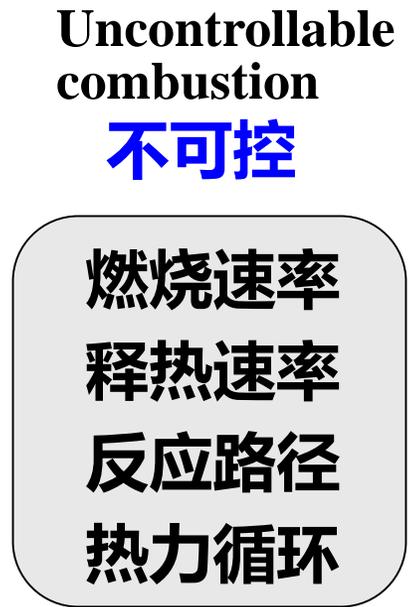
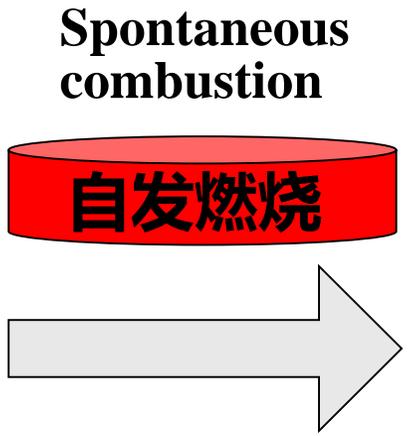
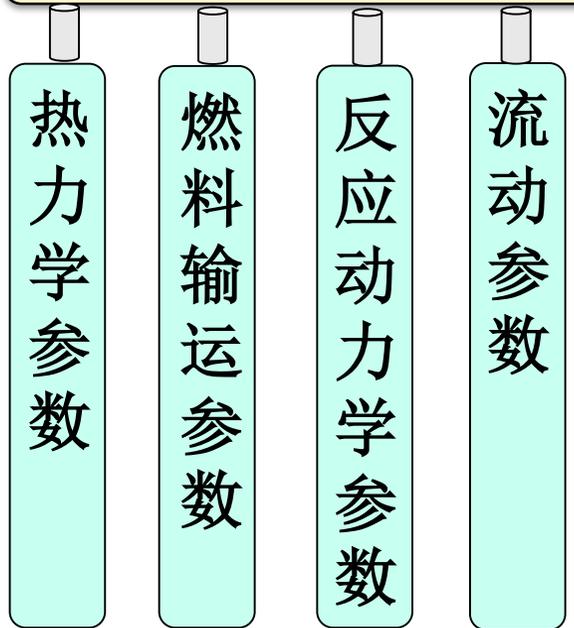
Complementation combustion regulation methods for low carbon fuels

四、内燃机技术突破方向

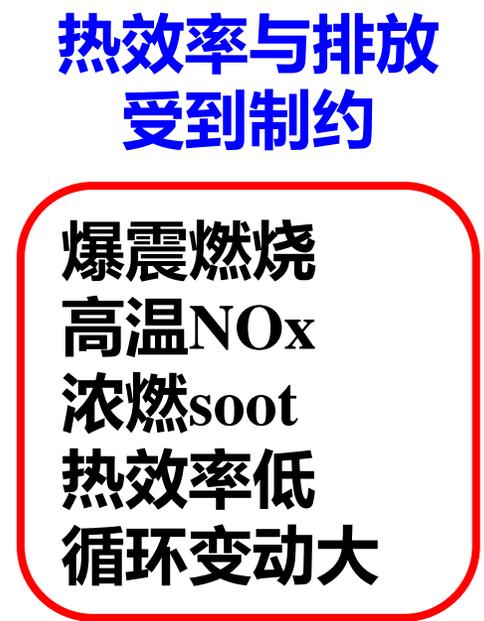
Main approaches for ICEs

Traditional ICEs combustion

内燃机传统燃烧方式



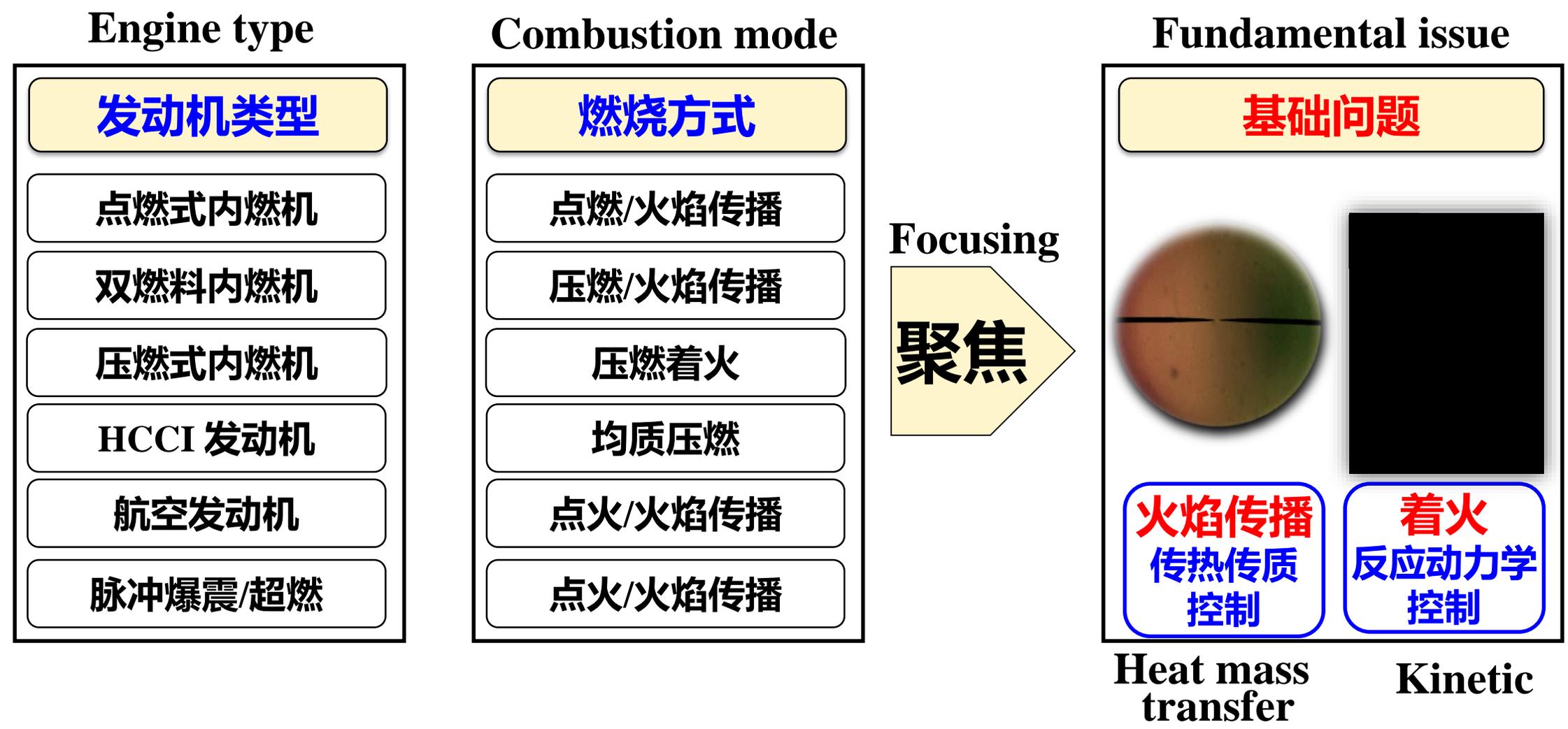
Restriction in efficiency/emissions



内燃机燃烧定向调控
Targeted combustion regulation

Controllable combustion



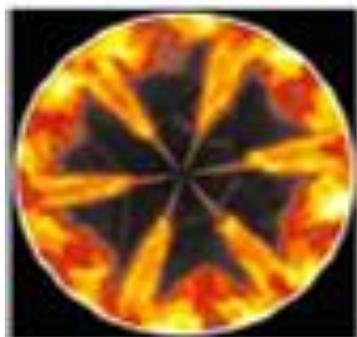


燃料着火、火焰传播和化学反应流：发动机燃烧的共性和关键基础科学问题
Ignition, flame propagation and chemical reaction flow are key issues

Ignition

着火

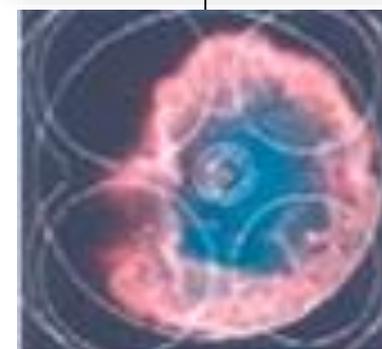
- 燃烧相位
- 释热速率
- 爆发压力
- 压力升高率
- 燃烧效率
- 热效率
- 熄火
- 排放



Flame propagation

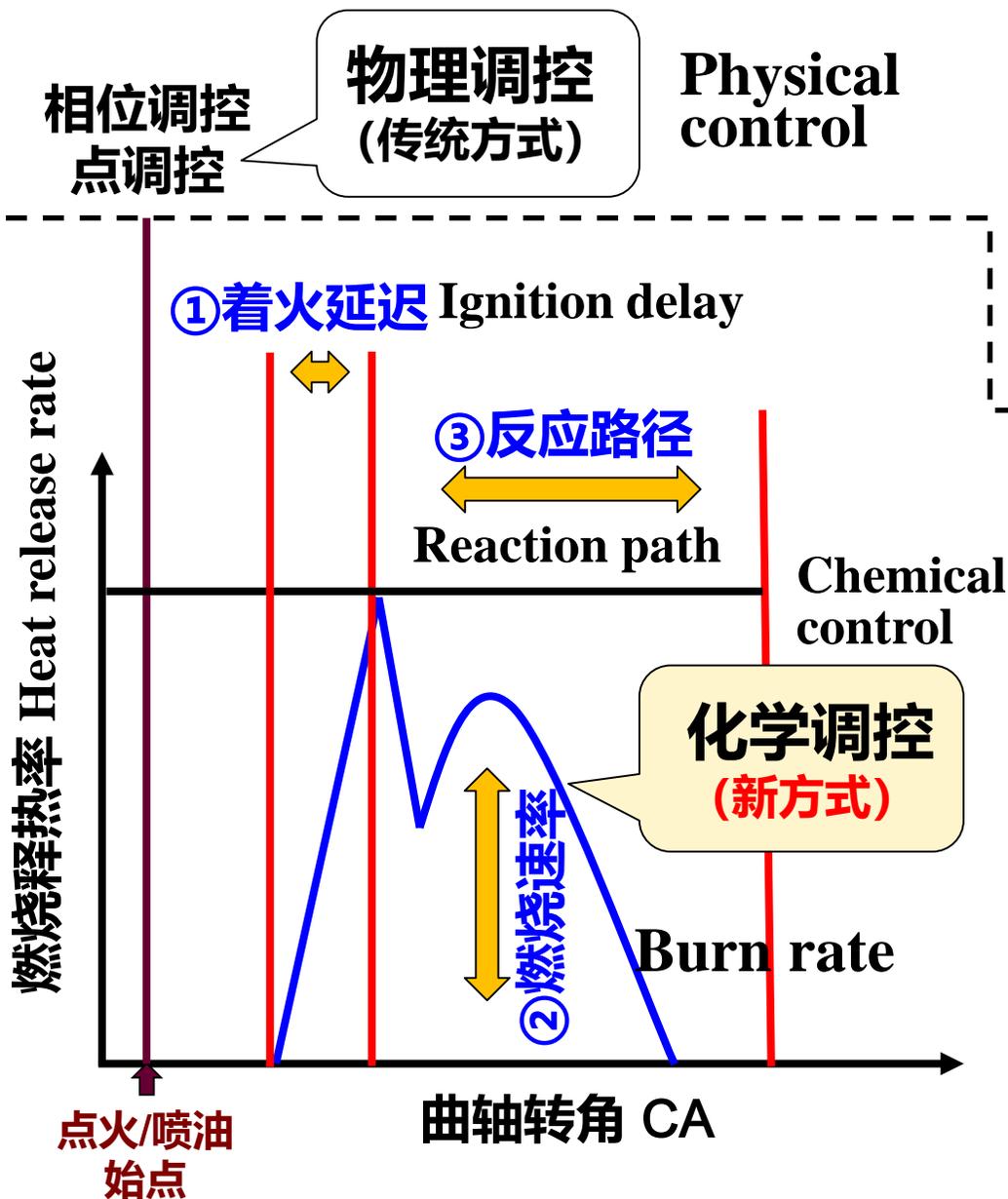
火焰传播

- 释热速率
- 燃烧定容性
- 热效率
- 循环变动
- 燃烧效率
- 火焰淬熄
- 排放



着火和火焰传播直接影响到发动机**动力性能、经济性能、工作稳定性和排放**

Ignition and flame propagation affect engine power, fuel economy and emissions



传统内燃机燃烧控制方法

燃烧相位点控制

- 放热率、燃烧产物不可控
- 混合气浓度要求严格, 后处理成本高

Fuel complementation combustion regulation

互补燃烧定向调控方法

燃烧过程多维度控制 (反应活性调控/微观化学调控)

- ① 着火化学调控 \Rightarrow 相位 Phase (活性组分介入燃烧方式)
- ② 燃烧速率调控 \Rightarrow 释热率 Heat release (燃料掺氢燃烧方式)
- ③ 反应路径调控 \Rightarrow 燃烧产物 Products (燃料补氧燃烧方式)



着火/火焰传播规律
(醇、醚、呋喃、低碳烃)

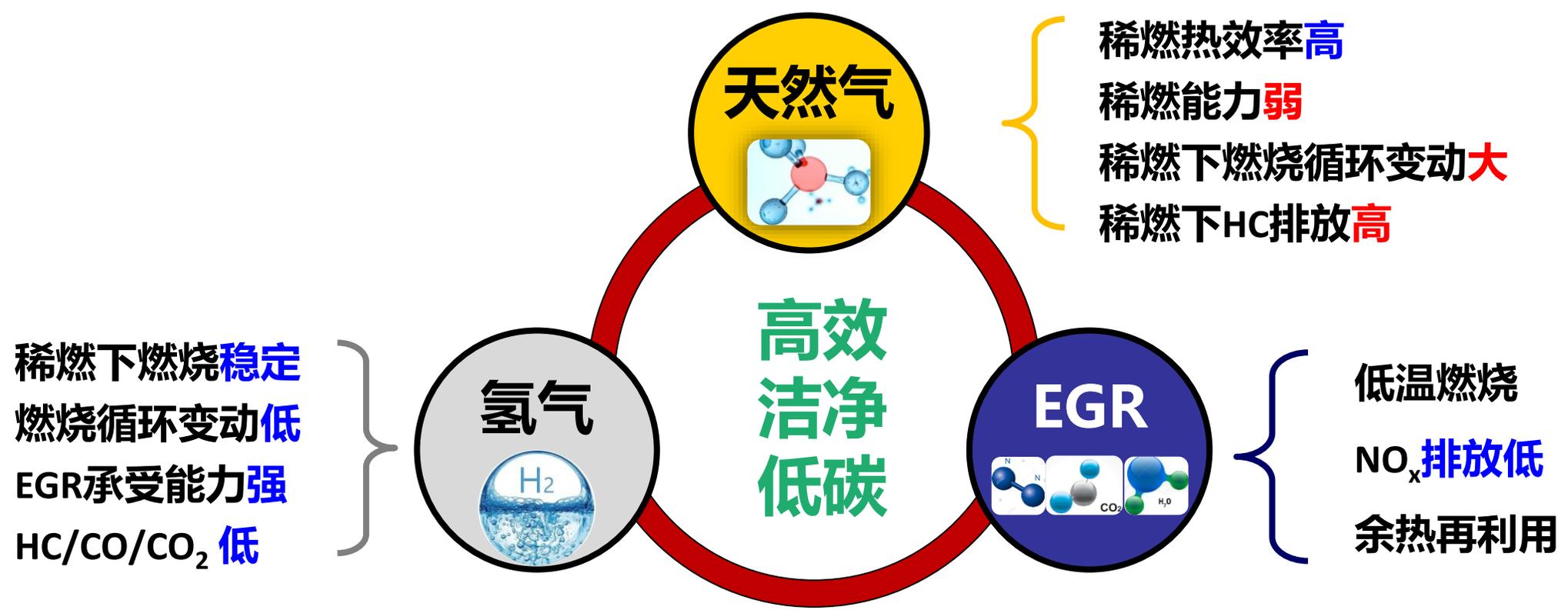
发现

互补燃烧定向调控理论
(建立、发展)

提出

内燃机燃烧定向调控方法
(着火、燃烧速率、反应路径)

发展



天然气掺氢气体燃料发动机新型燃烧方式

- 低碳化显著
- 燃烧速度快
- 热力循环优
- 热效率高
- 全部排放低
- 氢能利用佳

HCNG 天然气掺氢内燃机 (新燃烧方式)

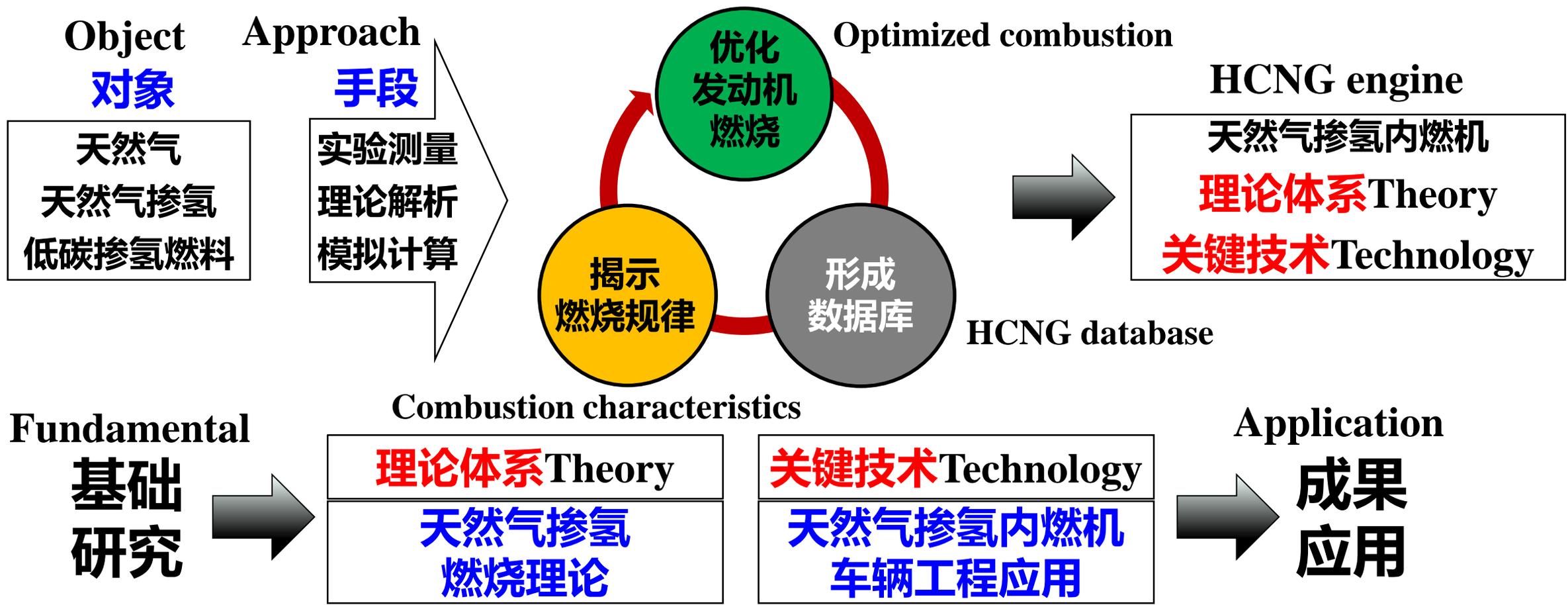
低温燃烧		高温燃烧
高	热效率	高
低	NO _x	高
低	CO/CO ₂	低
低	HC	低
低	变动	低
稀燃	当量比	化学计量比

CNG 天然气内燃机 (传统燃烧方式)

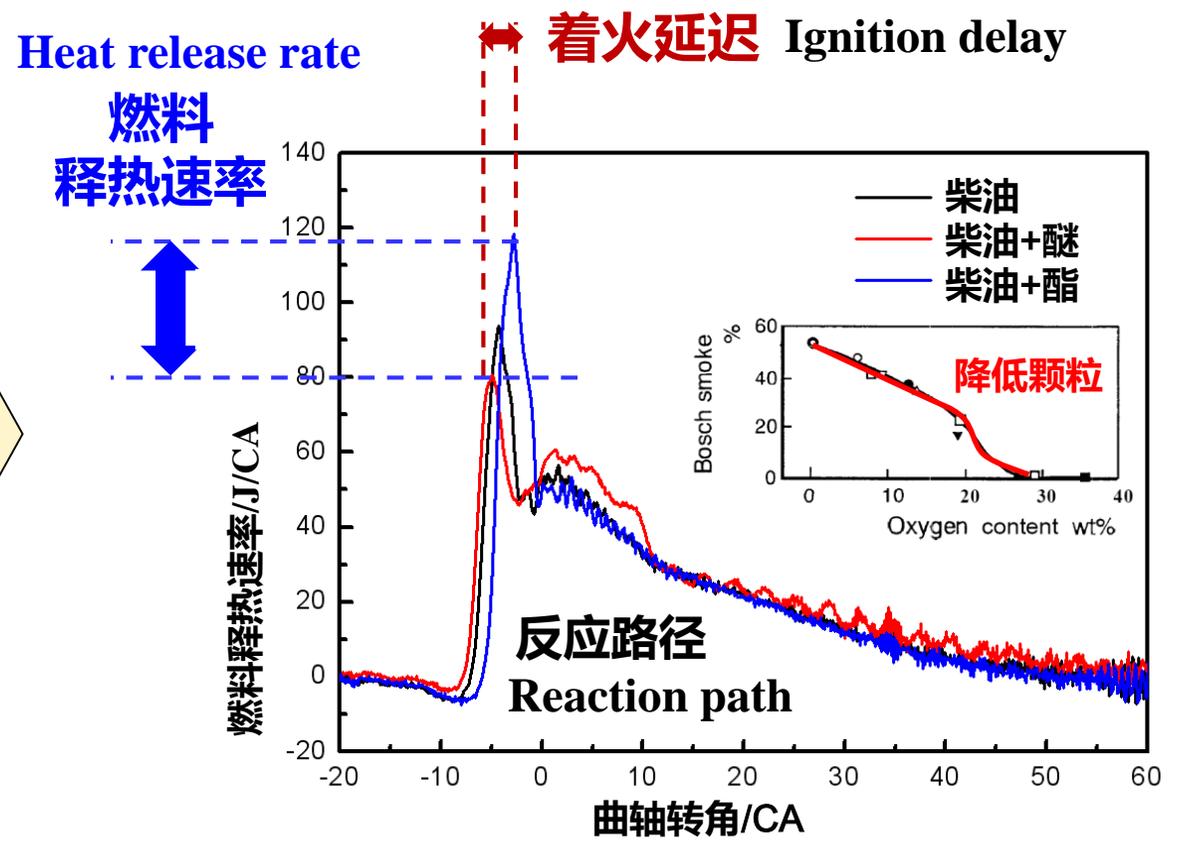
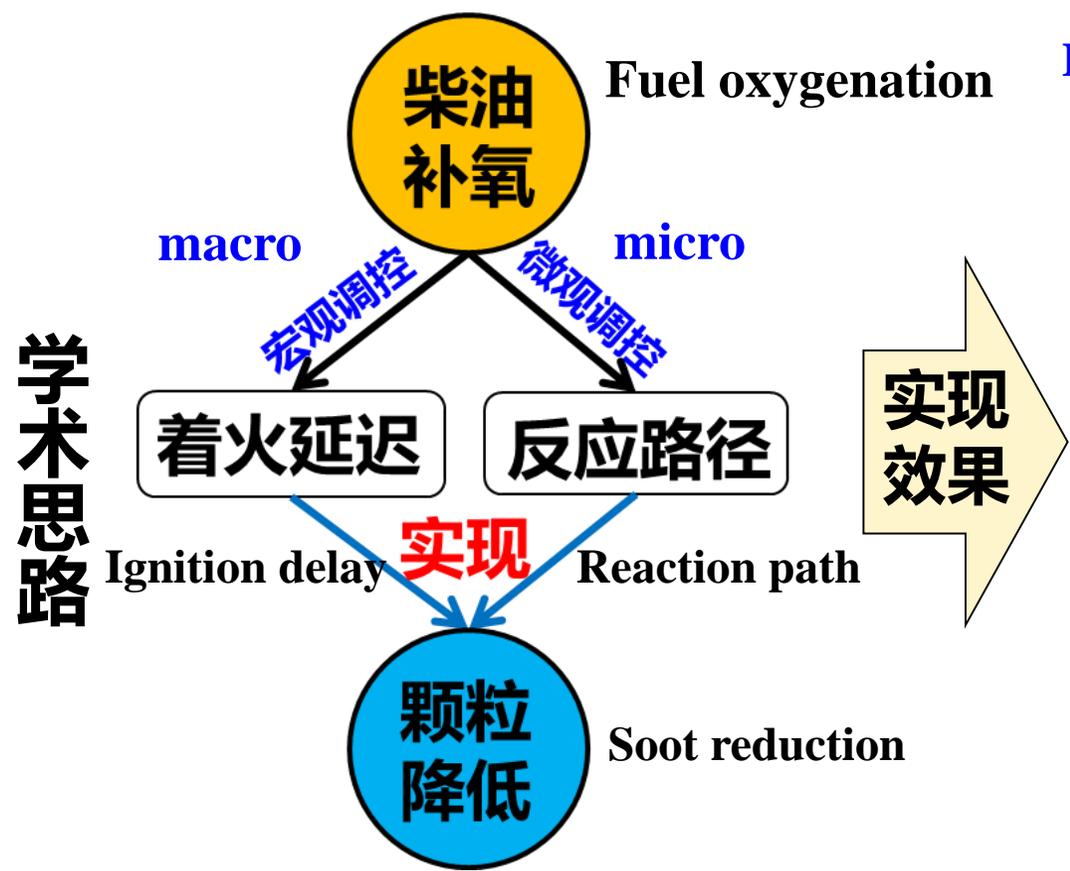
低温燃烧		高温燃烧
低	热效率	高
低	NO _x	高
高	CO/CO ₂	高
高	HC	低
高	变动	低
稀燃	当量比	化学计量比

天然气掺氢内燃机实现高效清洁低碳燃烧
HCNG engine high efficiency clean low carbon

掺氢 低碳 **掺氢调控**火焰传播速率、着火延迟期和燃烧反应路径
掺氢结合EGR稀薄低温燃烧实现高效清洁低碳内燃机



发现新机制：反应过程活性基OH、O浓度调控，增强链传播反应和氧化反应

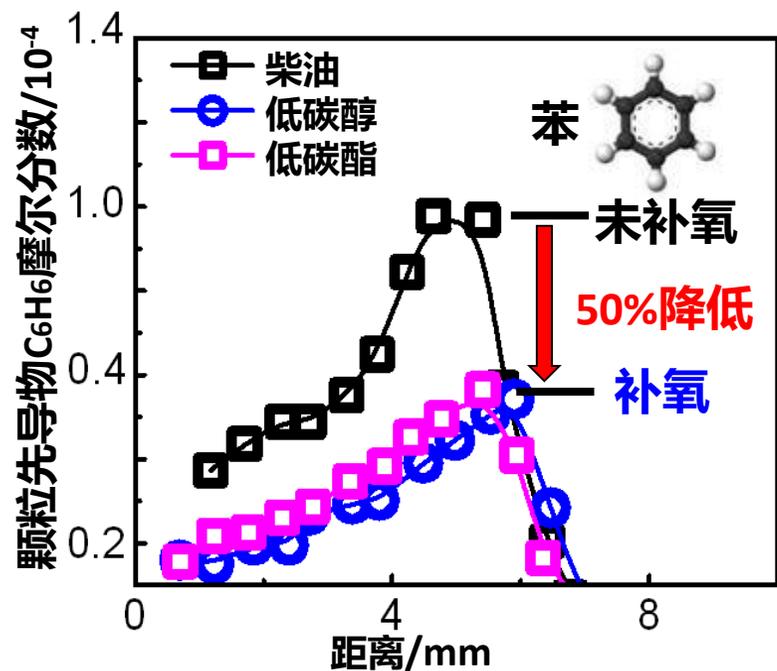


着火延迟和反应路径宏观微观定向调控实现释热率控制和污染物降低的目标

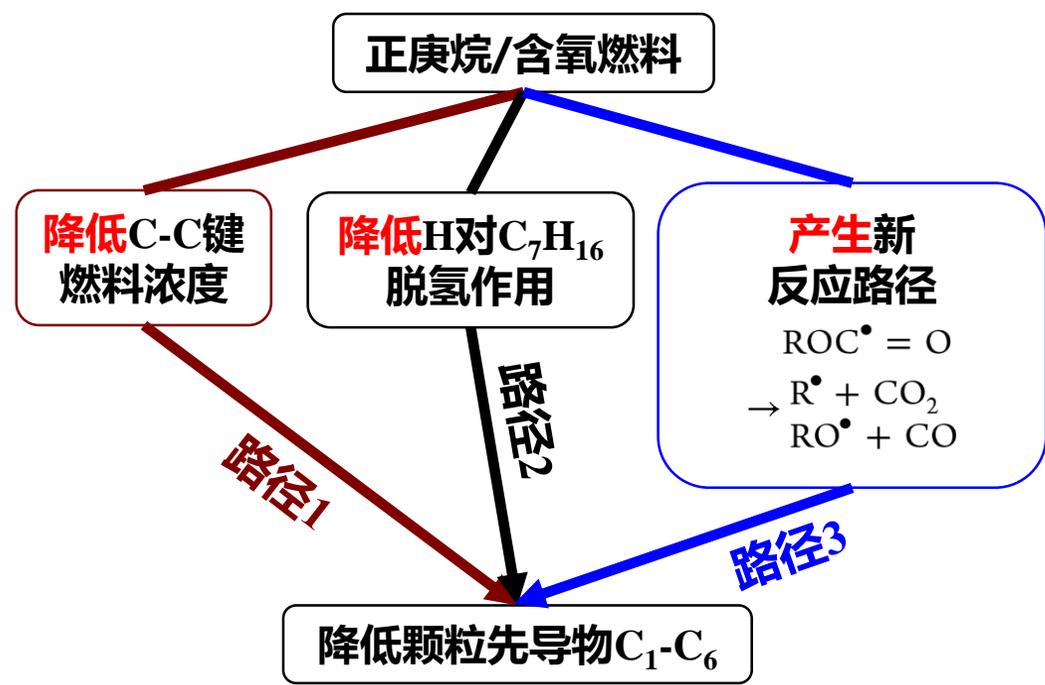
Target combustion regulation in ignition delay and reaction path lead to heat release and emissions control

发现燃料补氧反应路径调控可显著降低颗粒前导体形成并揭示机理

火焰中原位测量结果证实了
燃料补氧对燃烧颗粒先导物显著降低的现象



阐明了燃料补氧
对燃烧颗粒先导物降低的化学动力学机制

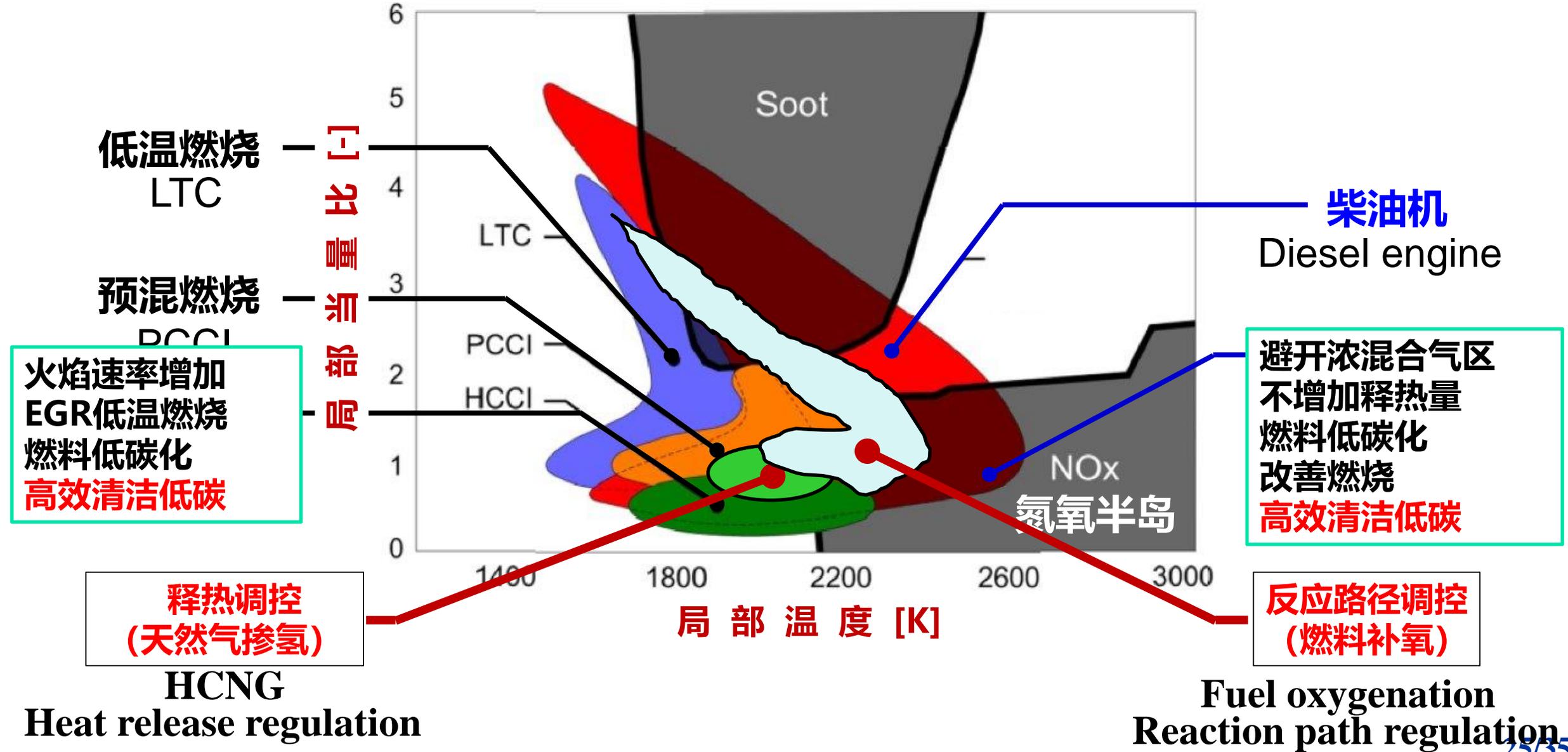


基于上述发现提出了反应路径互补的燃烧定向调控新途径
Reaction path complementation

互补燃料燃烧定向调控实现高效清洁低碳燃烧

燃烧定向调控

Fuel complementation Target regulation realizes high efficient, low carbon clean combustion



一、内燃机地位和作用

Position & role of ICE

二、内燃机先进燃烧技术

Advanced combustion technologies in ICEs

三、低碳燃料互补燃烧调控方法

Complementation combustion regulation methods for low carbon fuels

四、内燃机技术突破方向

Main approaches for ICEs

一、颠覆性创新内燃机高效清洁燃烧技术

Novel combustion technology

二、基于热效率排放协同的燃烧调控技术

Combustion regulation in coupling efficiency and emissions

三、低摩擦磨损技术和先进润滑技术

Low friction/wear and advanced lubricating technology

四、能量回收技术

Energy recovery

五、碳中性燃料和氢能利用技术

Carbon neutral fuel and hydrogen

六、一体化智能控制技术

Integrated intelligent control