

“氢燃料电池及氢发动机成果转移转化能力”高级研修班

氢内燃机的研发进展与挑战分析

讲解人：孙柏刚（北京理工大学）

2024-09-23（杭州）

报告内容

1

绿色氢能与氢能动力比较

2

氢气与化石燃料属性对比

3

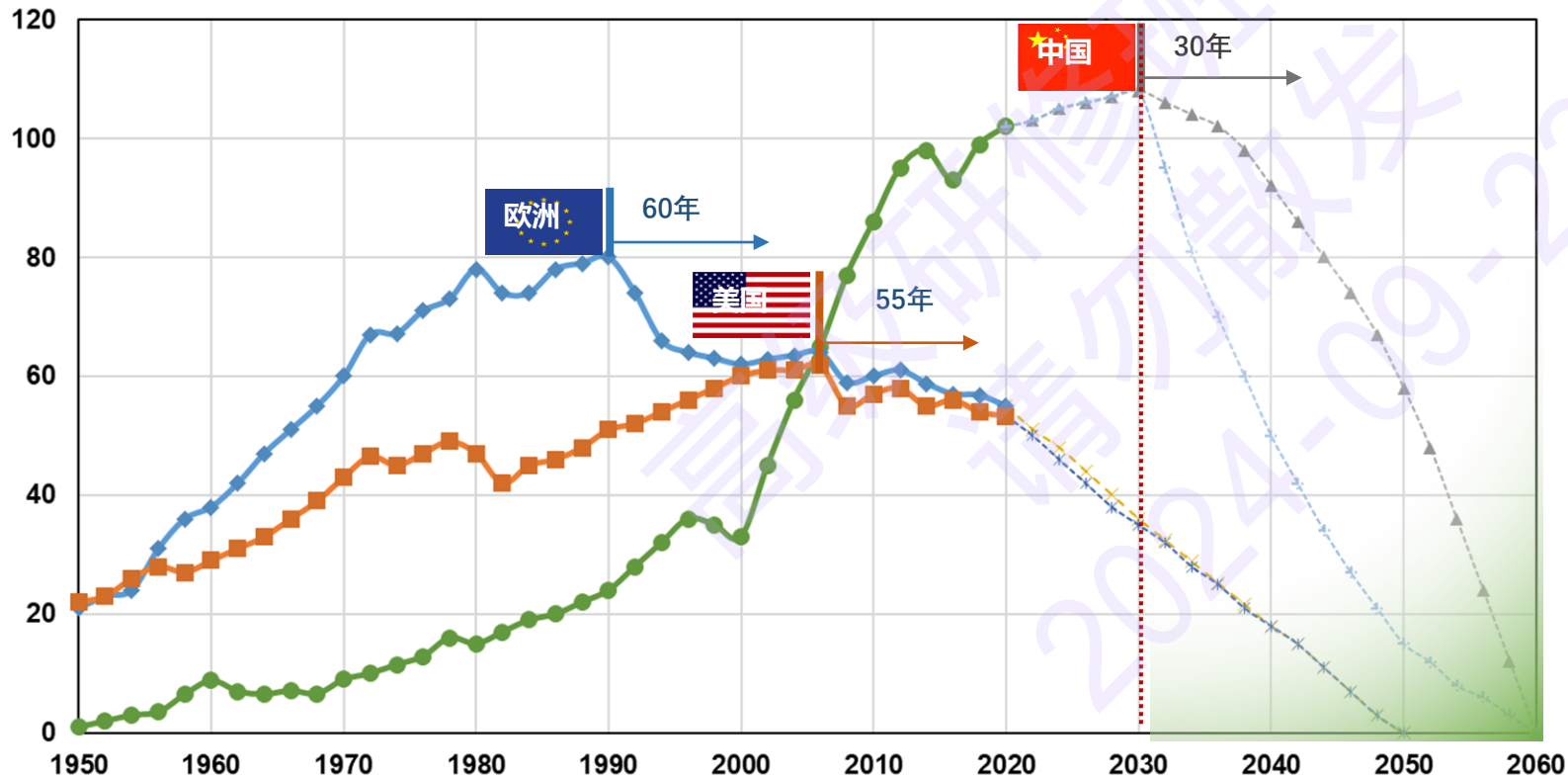
氢气存储与氢内燃机应用

4

氢内燃机关键技术与挑战

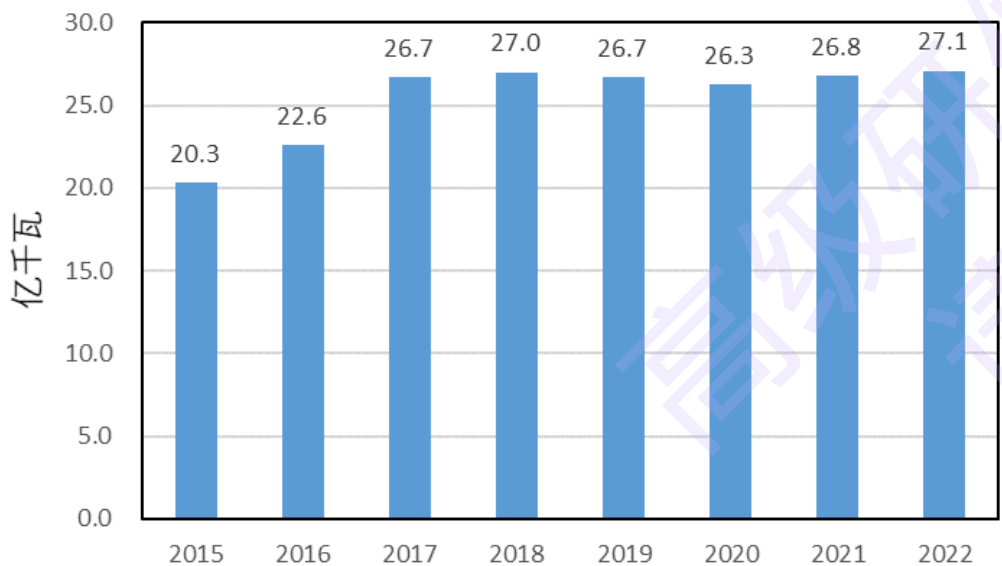
碳中和在竞赛，CBAM再加持

- 2023年碳排放总量约106亿吨，缓步增加，2030年达到峰值，预测应低于110亿吨
- CBAM**：2023年10月1日进入过渡期，并将于2026年正式实施
- 新型能源体系构建是中国能源转型的必然要求



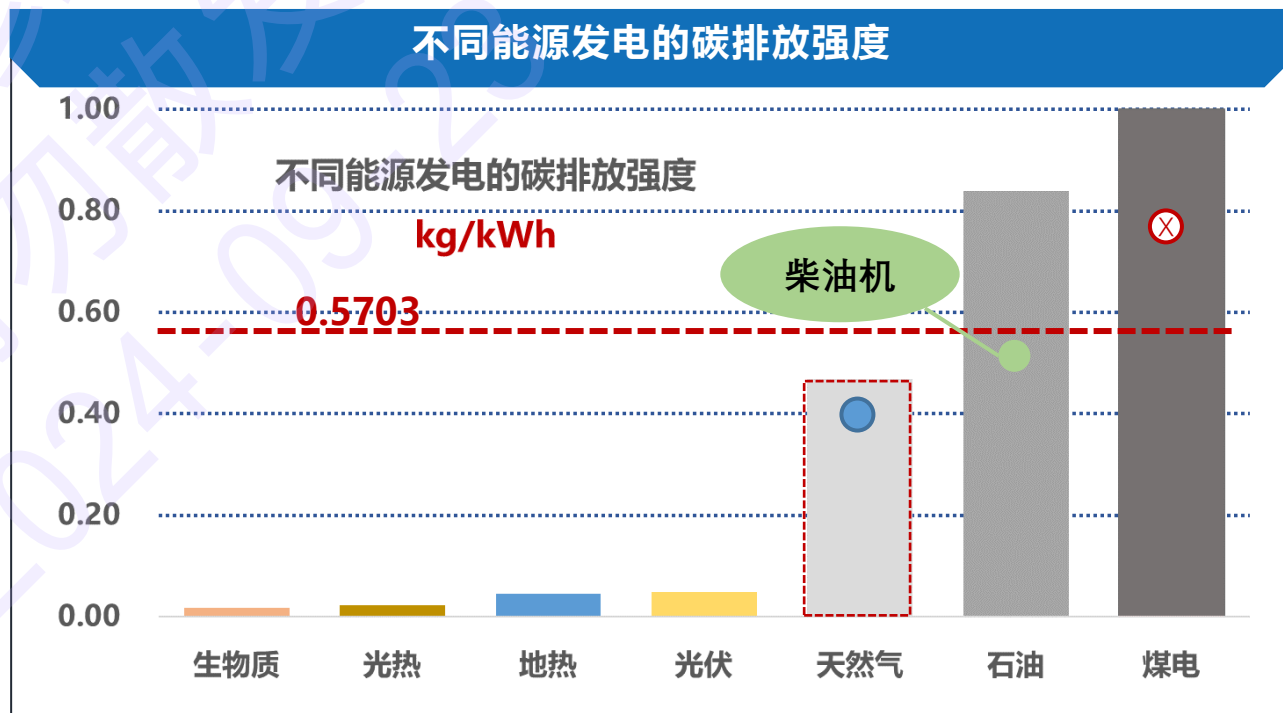
禁燃不现实，也不合理

- 2022年，全国内燃机产销7350万台，27.1亿千瓦总功率
- 截止到2023年底，全国内燃机总保有量6亿台，总功率300亿千瓦以上（全国发电容量28.2亿千瓦）
- 电动化解决不了根本问题！（全国电网平均排放因子 $\sim 0.5703 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ ）



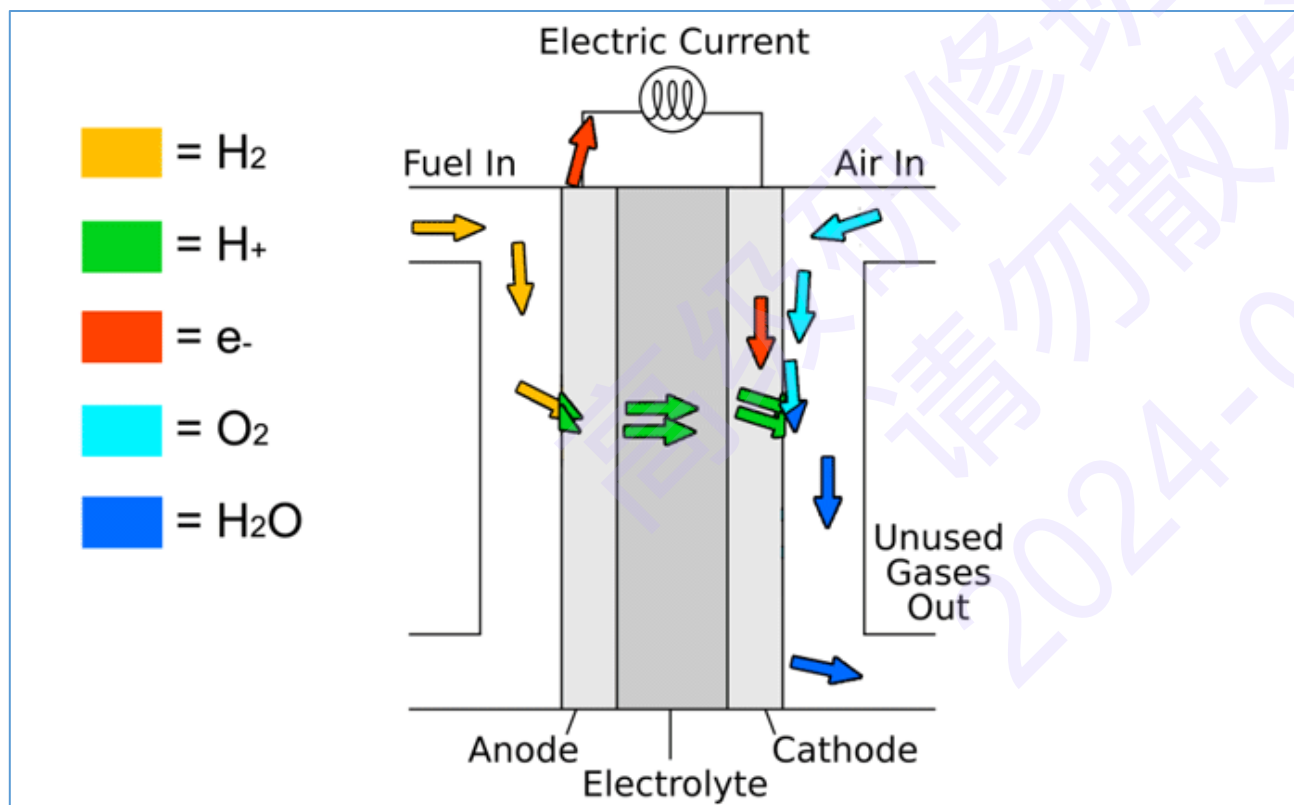
内燃机年度生产总功率变化

资料来源：国家统计局，华经产业研究院整理



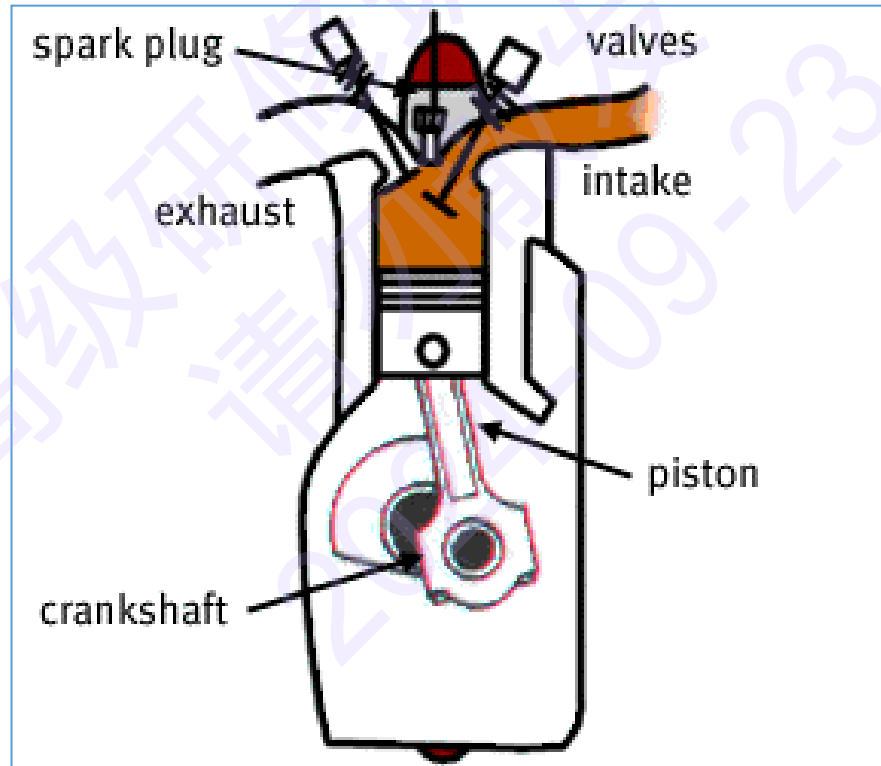
氢气利用方式的比较分析

- 氢能利用中，一直存在燃料电池与氢内燃机两种技术路线
- 电化学原理：**零排放、噪声低、效率高**

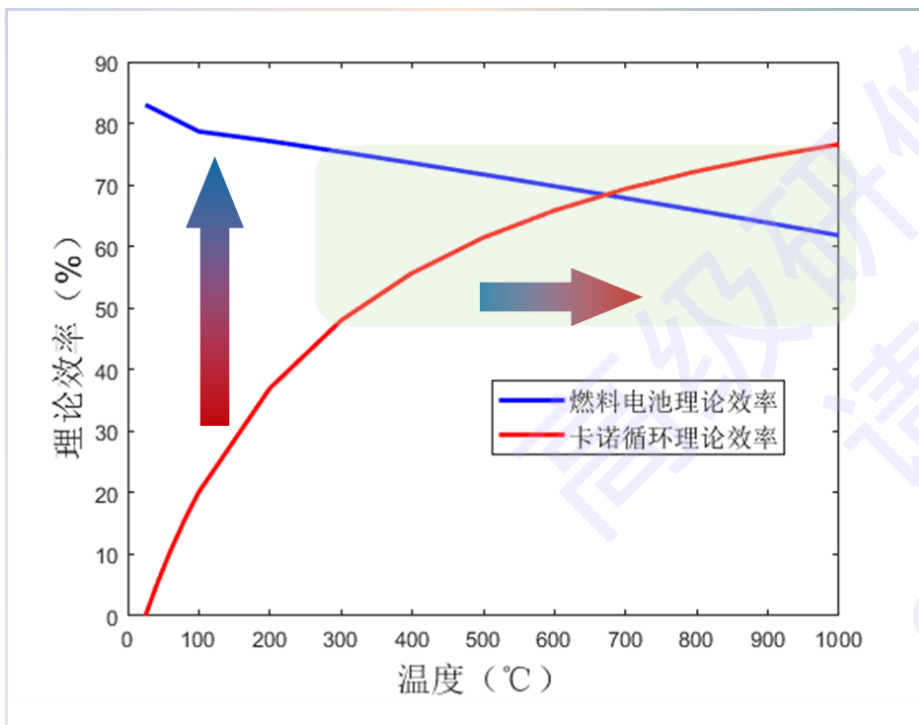


氢气利用方式的比较分析

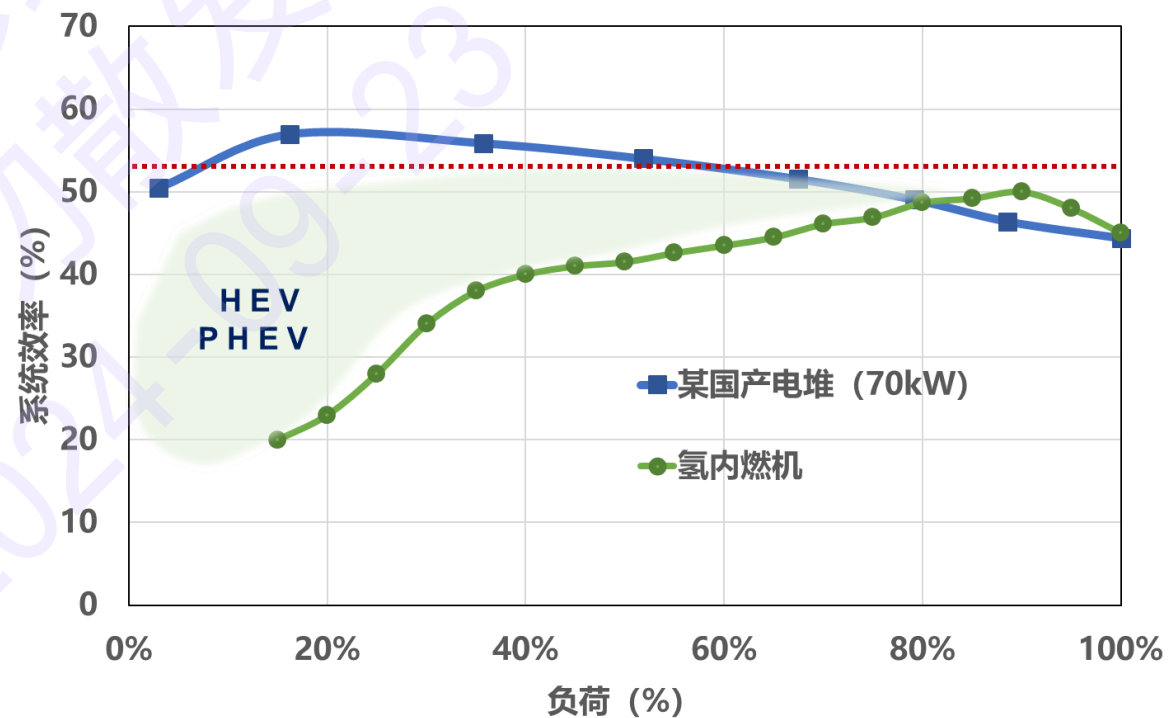
- 氢能利用中，一直存在燃料电池与氢内燃机两种技术路线
- 燃烧热功转化：**成本低、功率密度高、燃料适应性好**



绿色氢能与氢能动力比较



(衣宝廉院士：并不是所有温度范围内，燃料电池的效率都比热机高)



氢气利用方式的比较分析

性能	燃料电池	氢内燃机
热效率	35%~60%	31~52%
排放	零排放	接近零排放
比功率(W/kg)	300~450	760~1500
价格(USD/kW)	150~1150	20~75
寿命(h)	<5000	>10000
工作噪声	电堆安静, 气动噪音大	适中
燃料需求	>99.97%或以上	无要求 (吃粗粮)

氢内燃机兼有传统内燃机和燃料电池的优点, 在比功率、热效率、成本、可靠性等方面具有综合优势!

绿色氢能与氢能动力比较



Hybustion

国内外车企及发动机企业开始纷纷布局氢内燃机，但氢内燃机的设计、试验测试、关键零部件及整机等工程技术还处于起步阶段！



KEYOU:

- 直列6缸，四冲程，水冷
- 排量：7.8L
- 喷射方式：进气道氢气喷射
- 喷嘴：HOERBIGER
- 进气：涡轮增压
- 火花点火，稀薄燃烧
- EGR+H₂-SCR
- 48V轻度混合动力系统
- 输出功率：180kW + 35kW
- 35MPa气瓶，27kg H₂



Deutz TCD 7.8L

机型与案例



CUMMINS-X15H

- 直列6缸，四冲程，水冷
- 喷射方式：氢气缸内直喷
- 输出功率：395kW

CUMMINS-B6.7H

- 直列4缸，四冲程，水冷
- 喷射方式：氢气缸内直喷
- 输出功率：216kW
- 70MPa气瓶+辅助储氢罐
- 500km续航



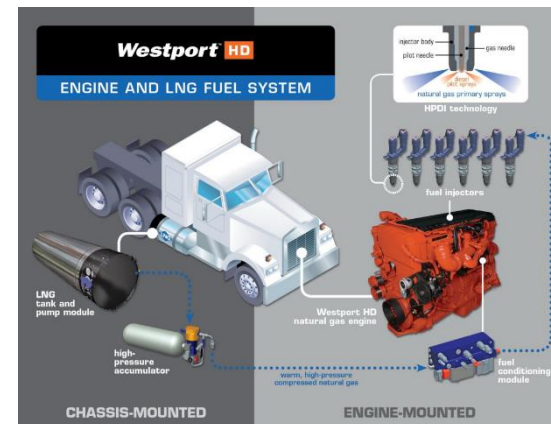
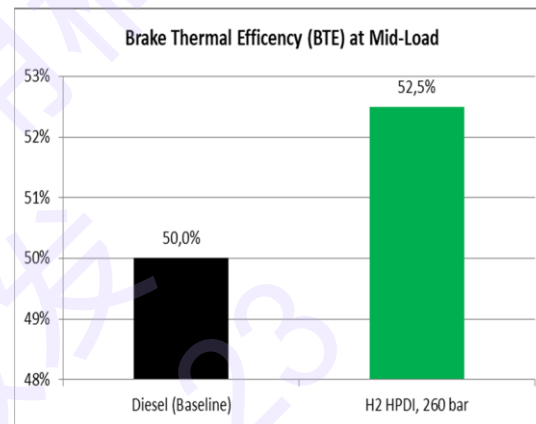
Cummins X15H



Cummins B6.7H

Westport & Scania

- 直列6缸, 13L
- 采用柴油压缩引燃
- 喷射压力260-290bar
- 80kg储氢-800km续航
- 后处理系统与柴油机一样



H₂ HPDI - Technical Specs

Engine displacement	Suitable for compression ignition engine applications in a broad range of mobile applications
Fuel type	Hydrogen, with renewable pilot
Peak power/torque	Up to 30% higher than diesel demonstrated
Fuel tank size / Range	80 kg H ₂ storage will give approx. 800 km range on a long haulage truck
Efficiency	Up to 5% improvement over the base Diesel engine
CO ₂ Emissions	94% on the WHTC cycle
Aftertreatment	Same as Diesel



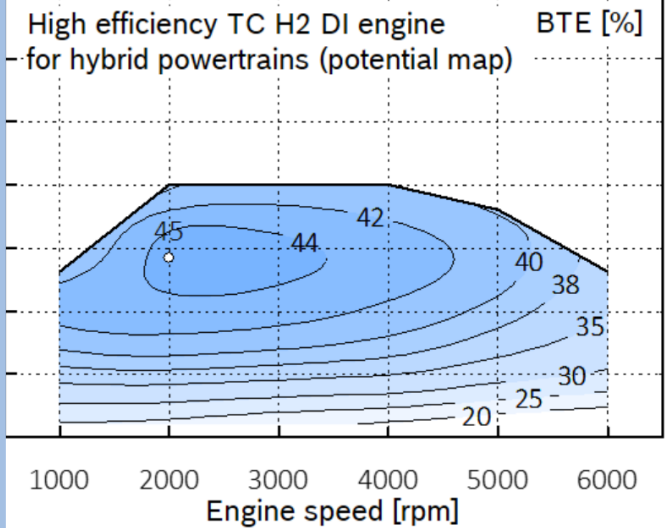
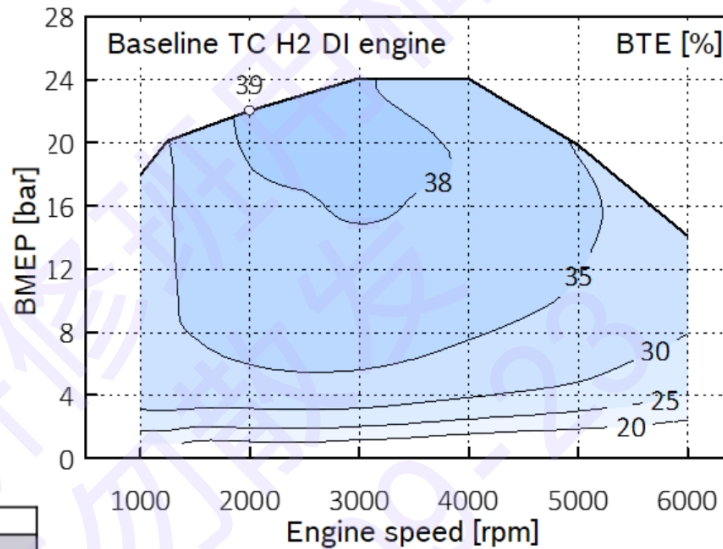
机型与案例



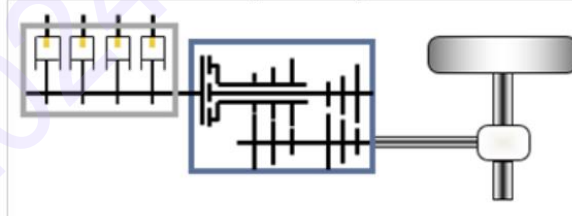
BOSCH:

- 直列四缸
- 排量2.0L
- 混联式混合动力系统
- 输出功率: 120kW
- 混动系统热效率: 45%

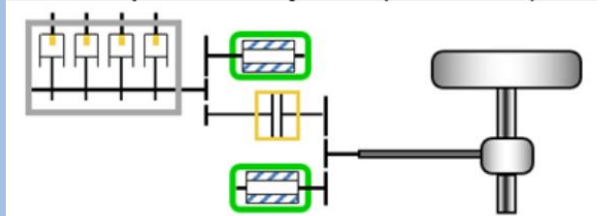
Parameters	Conventional	Serial Parallel Hybrid
Vehicle frontal area [m ²]	2.23	2.23
Air drag coefficient [-]	0.268	0.268
Rolling resistance coefficient [-]	0.009	0.009
Tire Radius [mm]	335	335
H ₂ ICE variant	2L I4 TC H ₂ DI Baseline engine	2L I4 TC H ₂ DI High efficiency engine
Transmission	7 speed DCT	Serial parallel hybrid concept w/ 1 gear for ICE
Generator power [kW]	-	120
Electric traction motor [kW]	-	150
Battery capacity [kWh]	-	2
Hybrid operating strategy	-	NOx emission optimised
H ₂ consumption NEDC [kg/100km]	1.56	0.97
H ₂ consumption WLTC [kg/100km]	1.58	1.07
H ₂ consumption RTS95 [kg/100km]	2.14	1.31
Engine out NOx NEDC [mg/km]	9.9	10.4
Engine out NOx WLTC [mg/km]	14.6	11.9
Engine out NOx RTS95 [mg/km]	130.3	14.3



Conventional (7DCT)



Serial parallel Hybrid (SP HEV)





机型与案例

- 2006年北京理工大学氢内燃机团队建立了国内第一个氢内燃机研究开发平台
- 为国内企业设计开发了十余台氢内燃机，开发出中国第一辆氢内燃机轿车，技术实力雄厚
- 突破了制约氢内燃机动力性、经济性与排放的若干项关键技术，**被央视誉为中国氢内燃机的摇篮**
- 探索了氢内燃机面向车辆、通用航空、发电、轨道交通、船舶、航天等应用领域



氢气与化石燃料的属性对比

	汽油	柴油	天然气	氢气
分子式	C _n H _m	C _n H _m	CH ₄	H ₂
密度 / (kg/L)	0.7 ~ 0.75	0.8 ~ 0.86	0.42	0.071
相对分子量	95 ~ 120	180 ~ 360	16	2.016
沸点 / °C	20 ~ 215	180 ~ 360	-162	-253
运动粘度 (20°C) / mm ² /s	0.65 ~ 0.85	1.8 ~ 8.0	-	-
自燃温度 / °C	300 ~ 400	250	650	585
十六烷值	5 ~ 25	40 ~ 55	-	-
辛烷值 (RON)	90 ~ 106	20 ~ 30	130	130
化学计量空燃比	14.8	14.3	17.4	34.2
空气中层流燃烧速度 / (m/s)	0.37 ~ 0.43	0.37 ~ 0.43	0.38	1.85
空气中最小点火能量 / mJ	0.24	0.24	0.29	0.02
淬熄距离 / mm	~ 2	-	2.1	0.64
绝热火焰温度 / K	2 580	~ 2 300	2 214	2480
汽化潜热 / (kJ/kg)	310 ~ 320	251 ~ 270	510	450
燃料低热值 / (MJ/kg)	44	42.5	45	120
化学计量比混合气热值 / (kJ/m ³)	3810	3789	3400	3180



内燃机采用氢燃料的优势

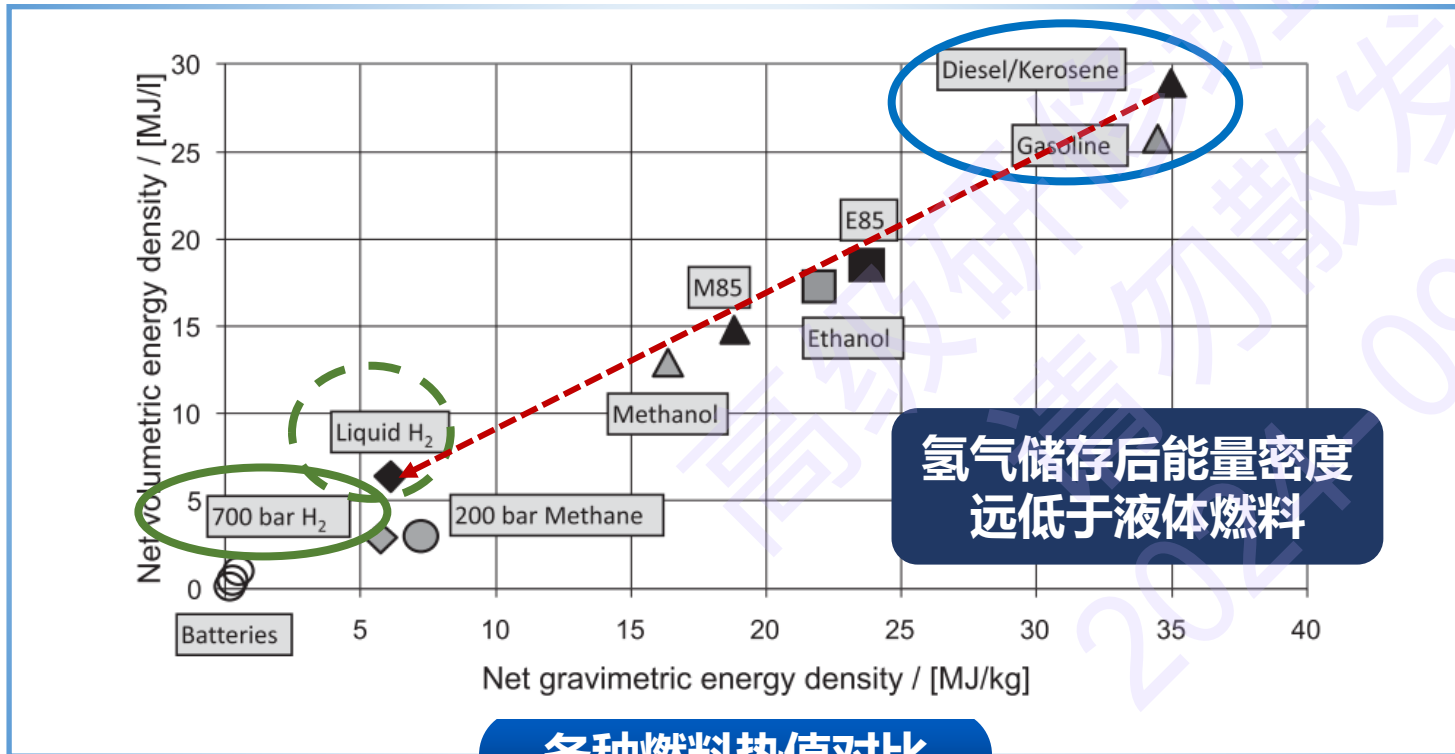
- ✿ 质量热值高，液氢存储携带能量多
- ✿ 气态无相变，基本不存在雾化问题
- ✿ 燃烧速度快，循环等容度高，可以提高转速，增加比功率
- ✿ 可燃范围广，浓稀混合气都容易点燃
- ✿ 压燃温度高，使用压缩比高增压，提高效率

为开发高比功率、高效率活塞式氢内燃机提供了一种新的可能性！



2. 氢气与化石燃料属性对比

- 氢气储存后质量密度和体积密度**显著低于**液体燃料
- 各种储氢、运氢技术不断突破，加速氢能车辆大规模应用



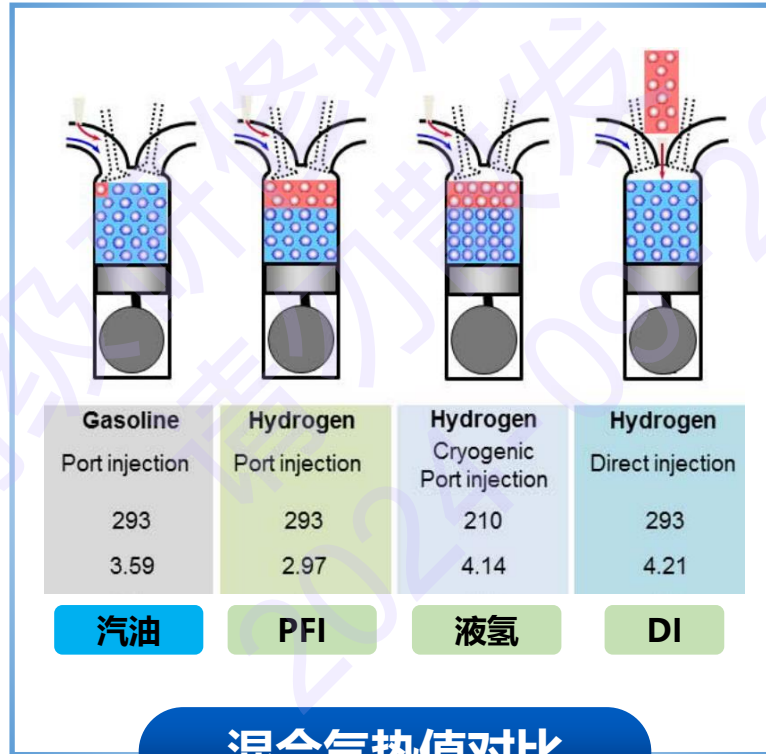
2. 氢气与化石燃料属性对比

🌿 PFI氢气占据气缸容积，动力**低于**同排量汽油机17%

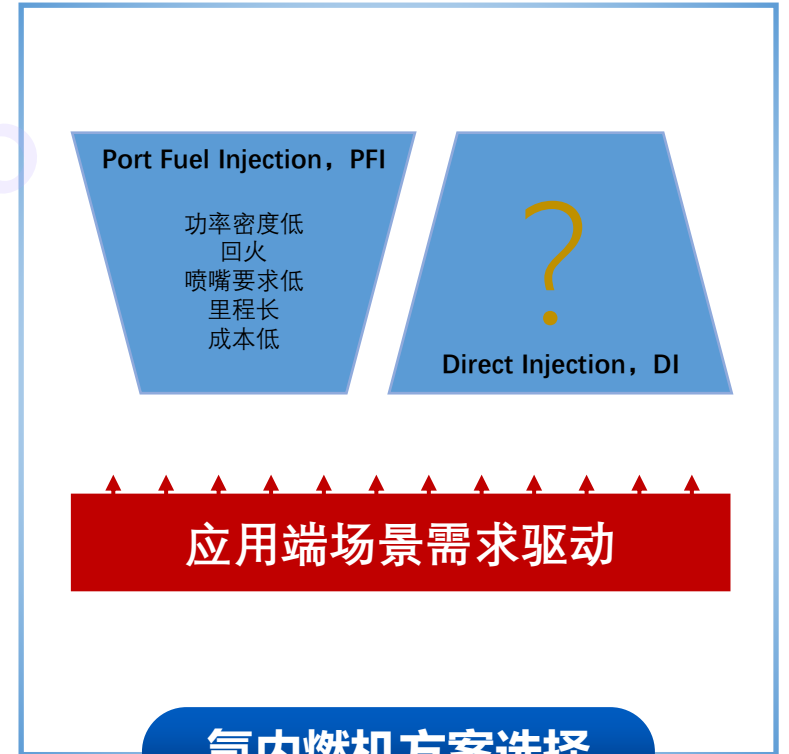
🌿 DI氢气**混合气热值高**，动力**高于**同排量汽油机17%



氢气喷射：PFI&DI



混合气热值对比

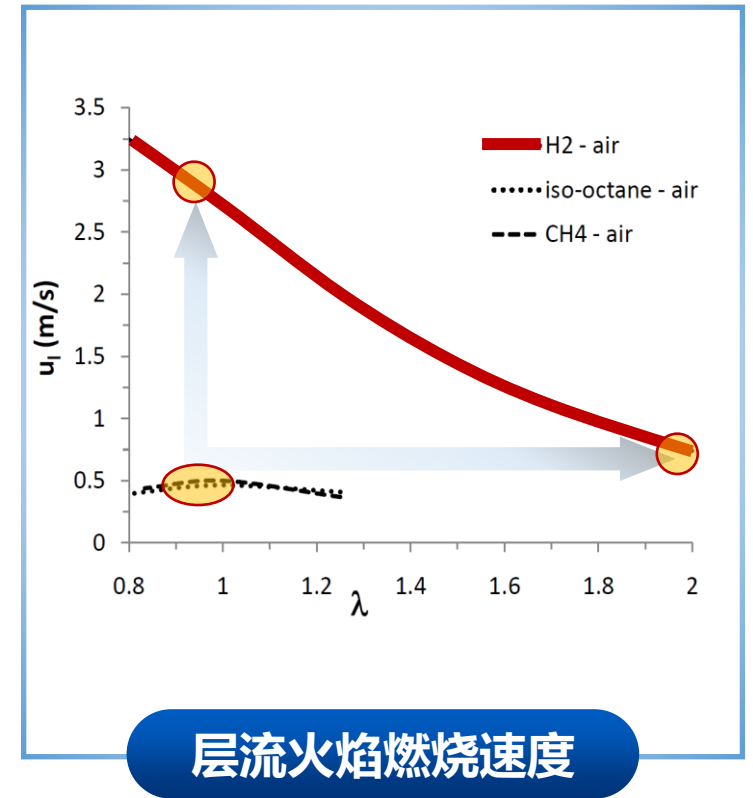
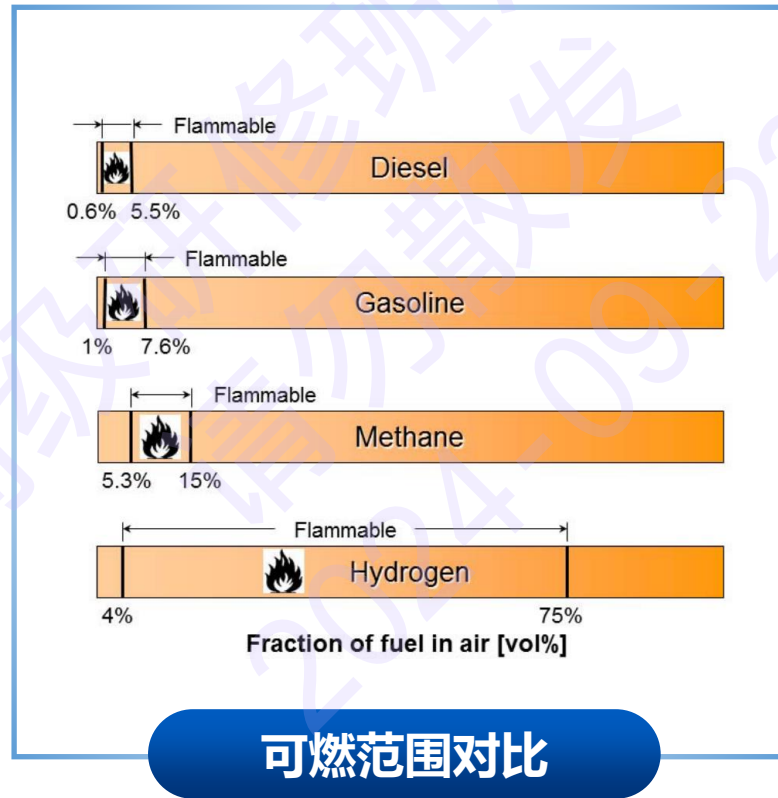
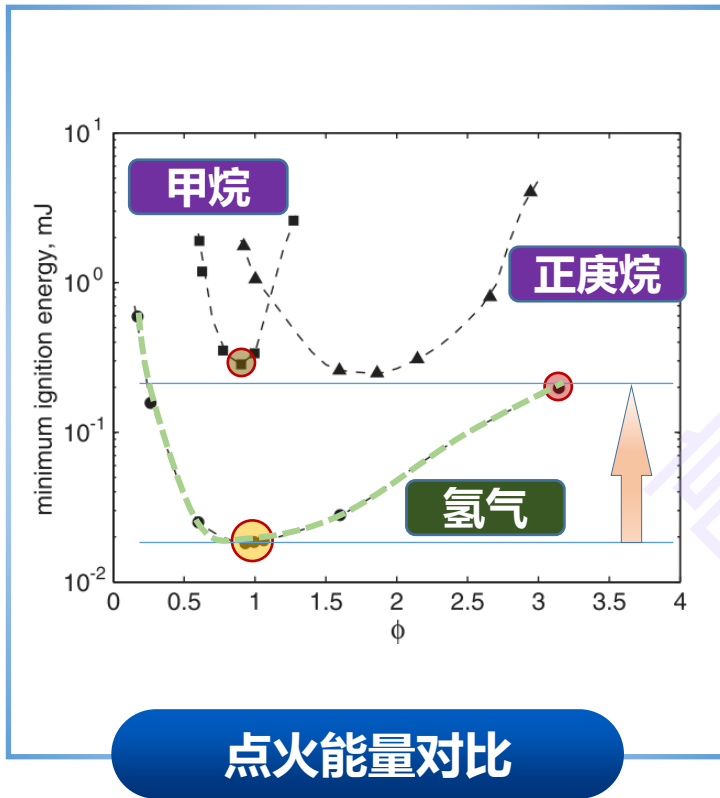


氢内燃机方案选择



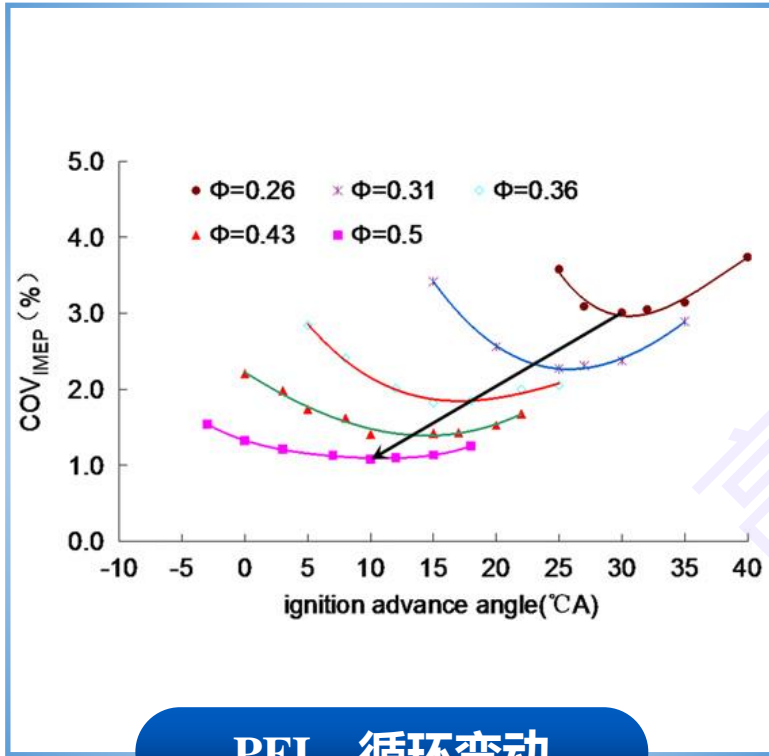
2. 氢气与化石燃料属性对比

- ❁ 氢气点火能量**低于**其他燃料，易于发生异常燃烧（回火、早燃、爆震）
- ❁ 着火范围宽广，火焰速度快

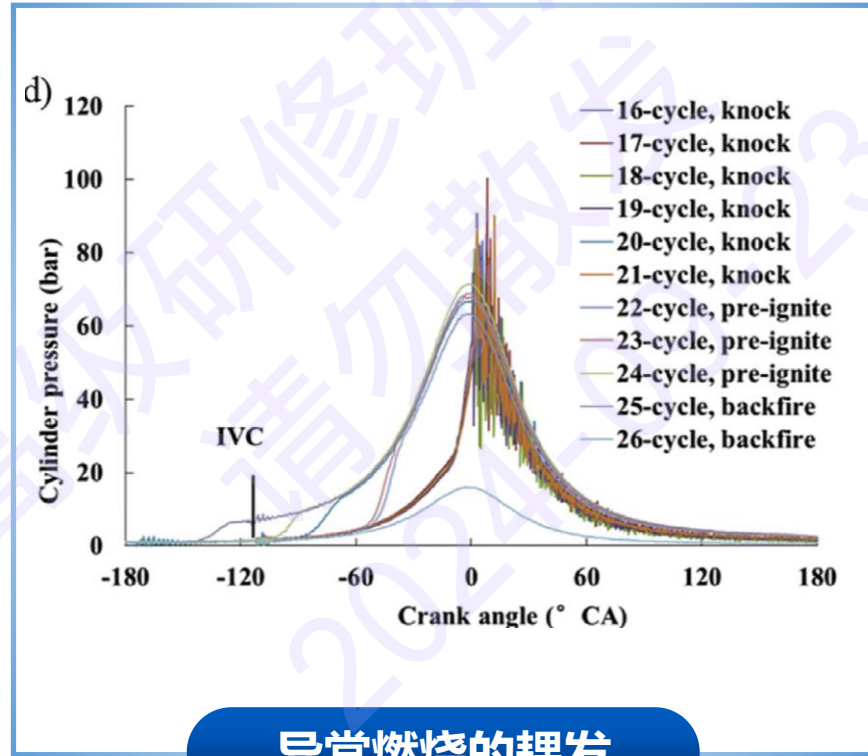


2. 氢气与化石燃料属性对比

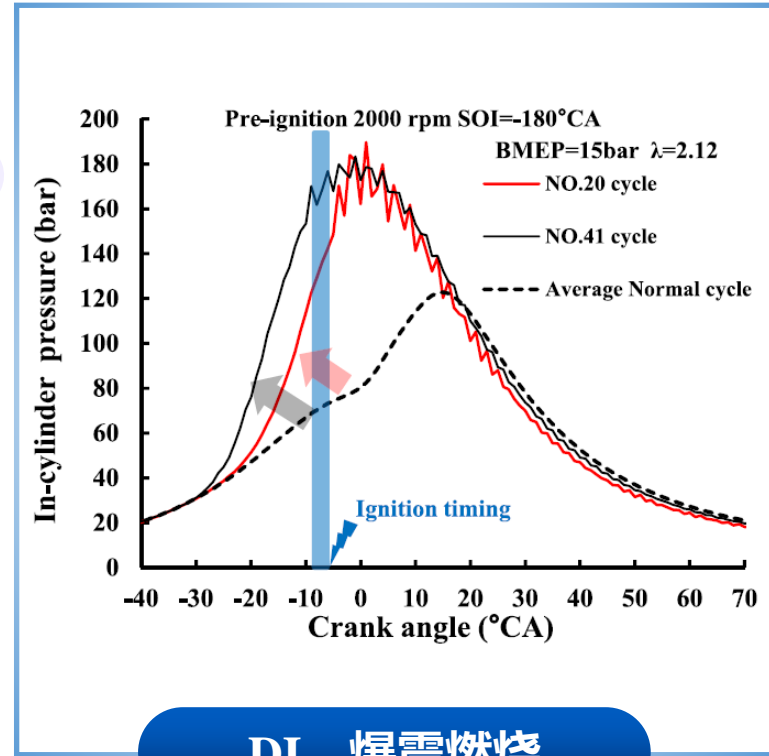
- ❁ 氢气点火能量**低于**其他燃料，易于发生异常燃烧（回火、早燃、爆震）
- ❁ 着火范围宽广，火焰速度快



PFI, 循环变动



异常燃烧的耦合

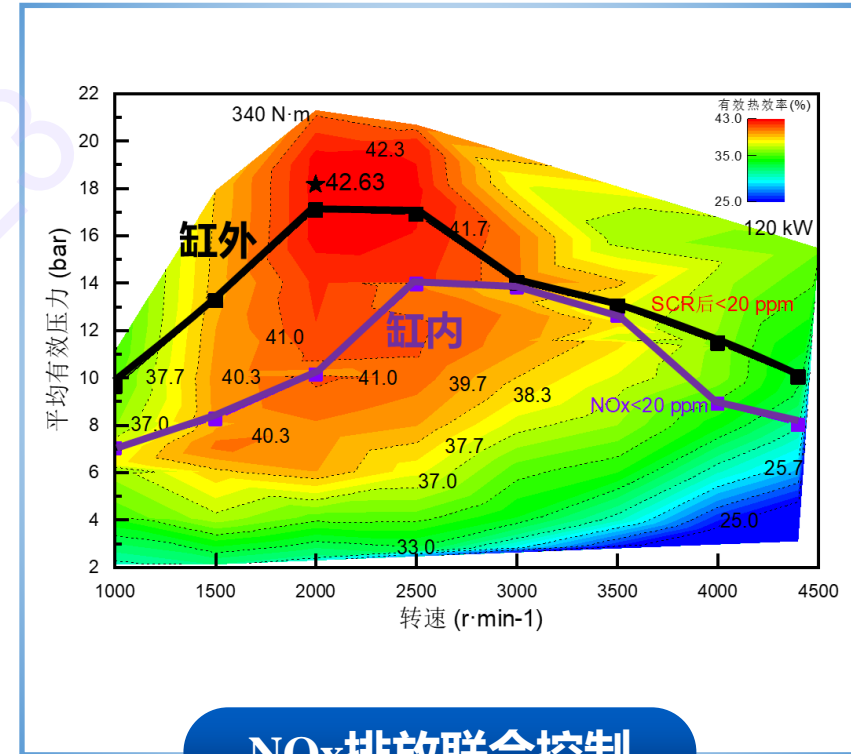
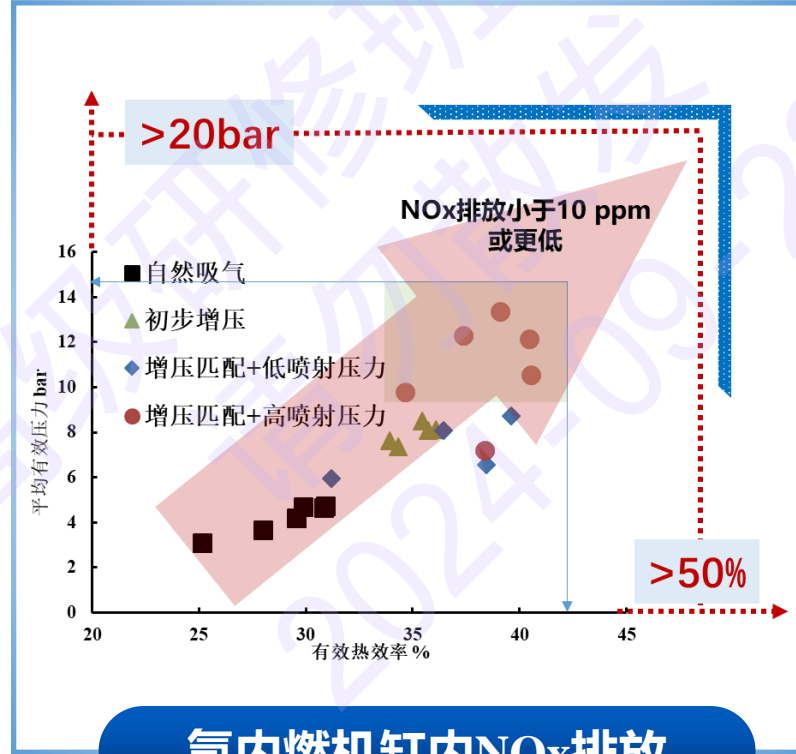
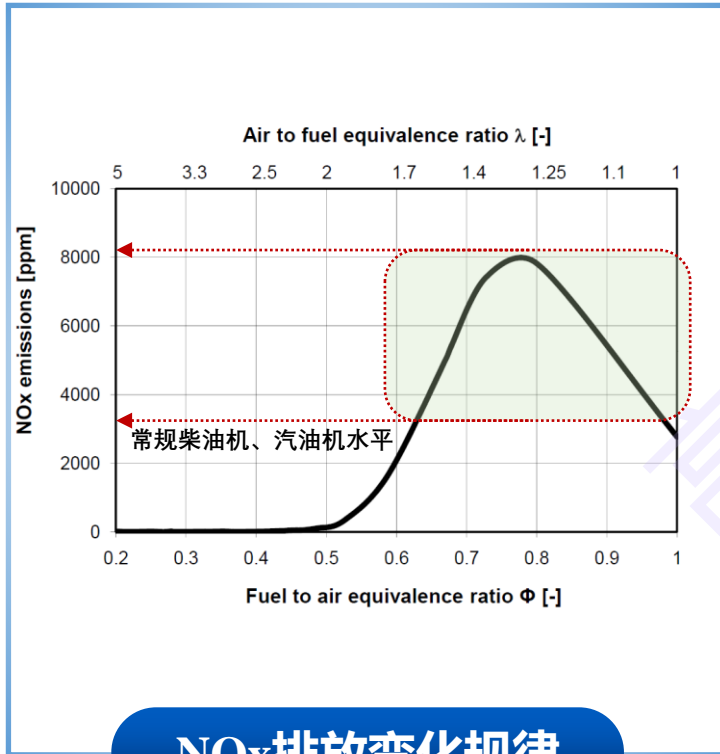


DI, 爆震燃烧



2. 氢气与化石燃料属性对比

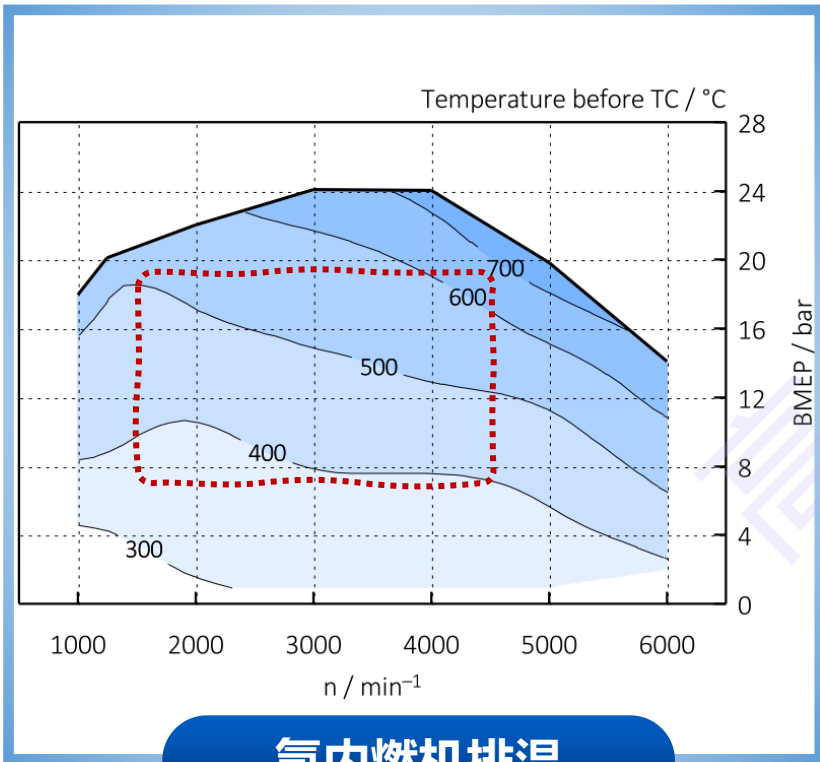
- NOx排放对浓度十分敏感，推荐采用稀薄燃烧技术
- 大负荷NOx排放高于汽油机，通过缸内控制和缸外后处理抑制NOx排放



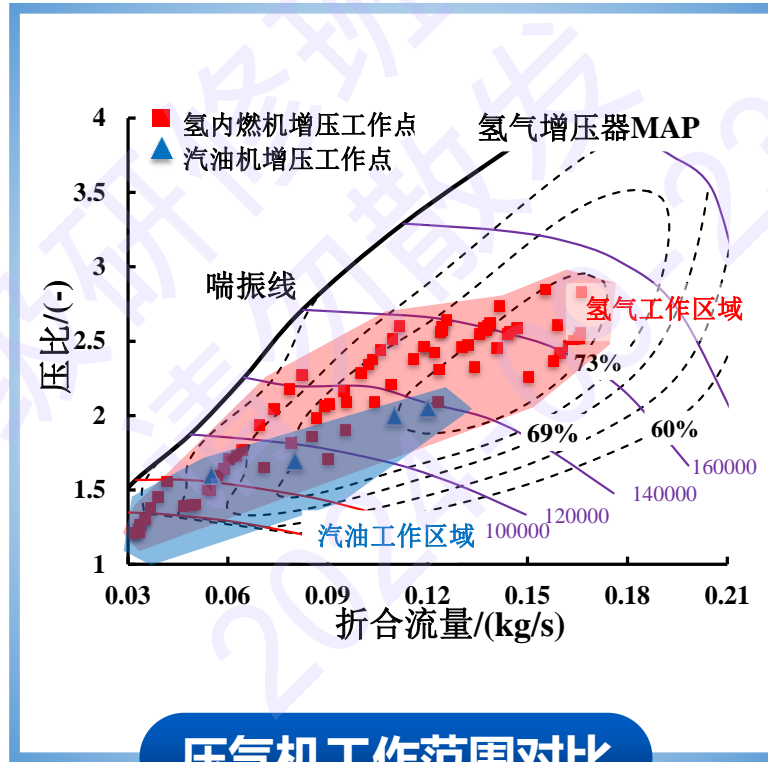
2. 氢气与化石燃料属性对比

🌿 传热损失高，排气温度低，涡轮要求高

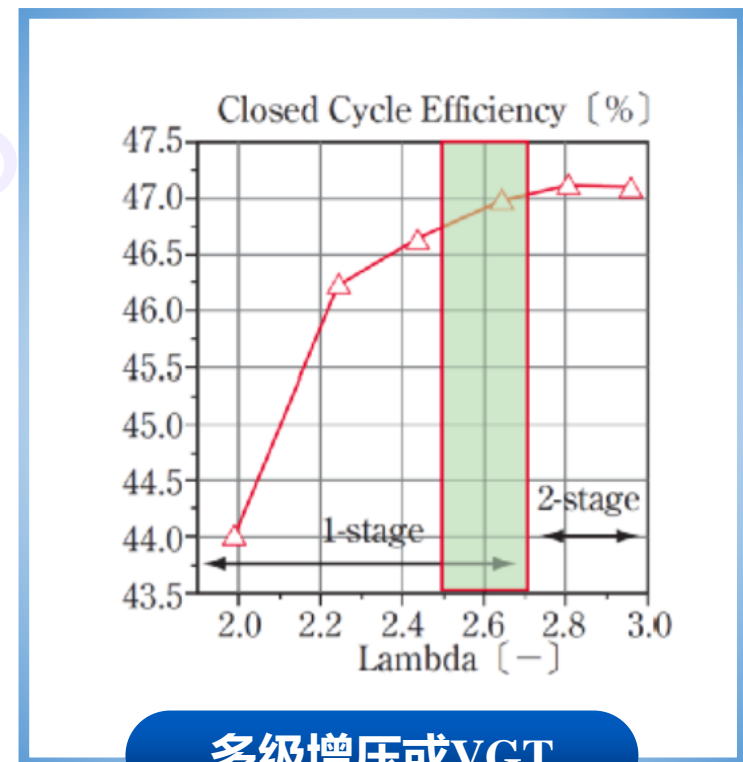
🌿 稀燃+高空燃比 氢内燃机空气量需求高，空气变化范围大，压气机要求高



氢内燃机排温



压气机工作范围对比



多级增压或VGT

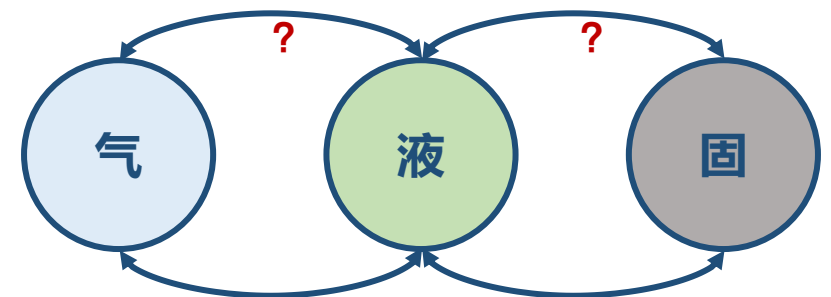


为什么氢气储存难？

- 分子量小，密度小， 0.0899 kg/m^3 (密度条件： 101.325 kPa , 0°C)，比锂电池储能密度高，但比汽油低很多
- 物质的三种形态：液化需要 -253°C ，接近绝对零度，可以液化，但存储需要低温环境
- 原子小，渗透性强，**封不住或密封难**，还存**在金属材料的高压氢脆风险**
- 氢气的比热容大， $14.4 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，天然气： $2.156 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，空气： $1.003 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- 气体性质活泼，泄漏有危险



	质量密度(MJ/kg)	体积密度(MJ/L)
锂电池	0.5~0.9	0.9~1.9
液氢	120	8.71
汽油	43.9	32.05



DOE车载储氢系统的要求

- ❁ 氢气存储方式的变革直接影响氢内燃机研究开发
- ❁ 氢气的储存、输送是当前氢能推广的主要瓶颈

技术指标	2025年	最终目标
体积储氢密度 / kg/m^3	40	70
质量储氢密度(wt) / %	5.5	6.5
最低/最高工作温度 / $^{\circ}\text{C}$	-40/85	-40/85
吸氢时间 / min	3.3	2.5
使用寿命 / 次数	1500	1500



氢气存储的主要形式

- 🌿 **气态高压**: 35MPa, 70MPa, 4个类型气瓶, 压缩性
- 🌿 **氢气液化**: 液化耗能, 蒸发, 成本
- 🌿 **金属氢化物**: 吸放氢特性, 金属类型
- 🌿 **有机溶液**: 环烃类
- 🌿 **含氢化合物**: 碱类、醇、氨, 化学反应, 在线制氢
- 🌿 **其他储氢方式**: 岩穴 (天然氢)
- 🌿 ...





气态高压存储 (cH_2)

□ 理想气体状态方程: $p V = m R T$

成立条件: **压力不太高、温度不太低**

□ Vander Waals方程:

考虑了分子体积及作用力

$$\left(p + a \frac{n^2}{v^2}\right) (V - nb) = nRT$$

□ 源于气体是可压缩的 (相对于存储空间来说, 分子比较小)

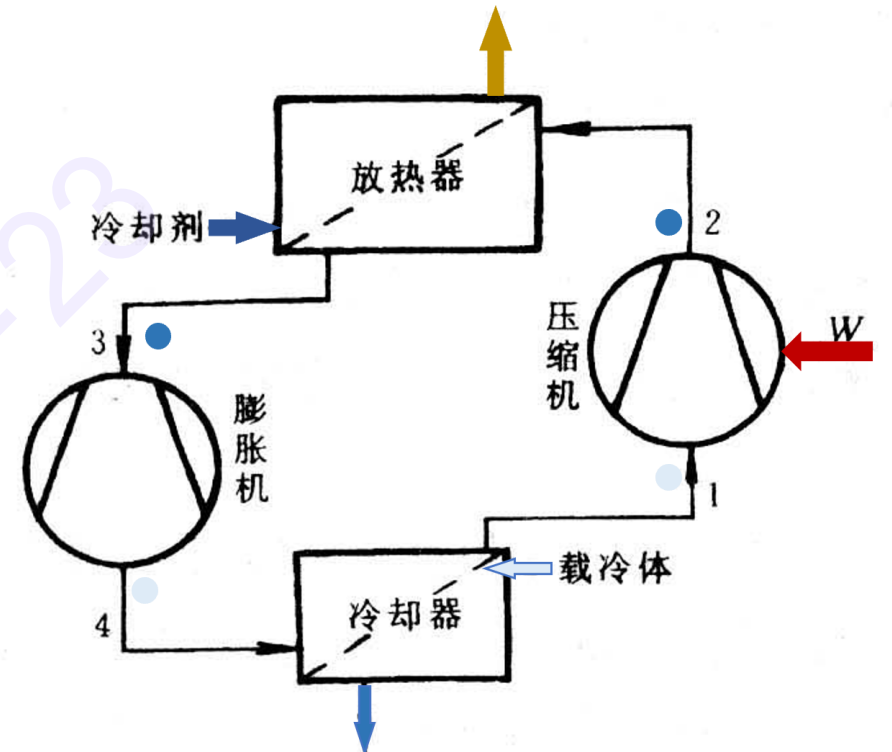
□ 一般采用**压缩因子**的方式来修正: $Z = \frac{pV}{nRT} = \frac{pV_{m(real)}}{RT}$

并不是压力增加一倍, 储氢量就能够增加一倍



氢气液化存储 (LH₂)

- **基本原理**: 焦耳-汤姆逊效应, 或节流效应
- 节流膨胀后温度下降, 产生制冷效应
- $H_1 = H_2$ (能量守恒)
 $U_1 + P_1V_1 = U_2 + P_2V_2$
- 体积膨胀, 分子间距变大, 动能下降, 所以温度下降
- **温度**: -253°C
- **液氢瓶**, 保温 + 耐压 + 控制



气体膨胀制冷的原理流程

金属氢化物 (Metal Hydrides)



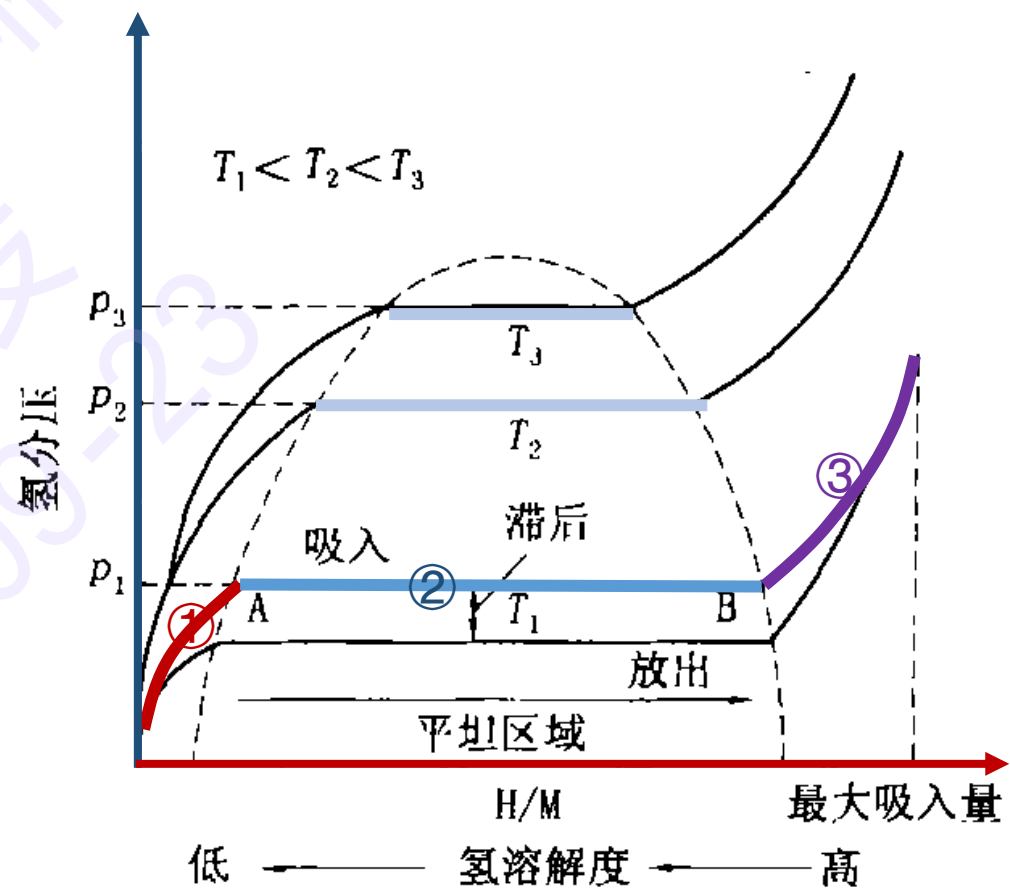
热力学原理:

□ 在一定温度和压力下, 氢与金属或合金生成**金属氢化物**



□ 与材料活性、温度、压力、反应率、反应热热导率等密切相关

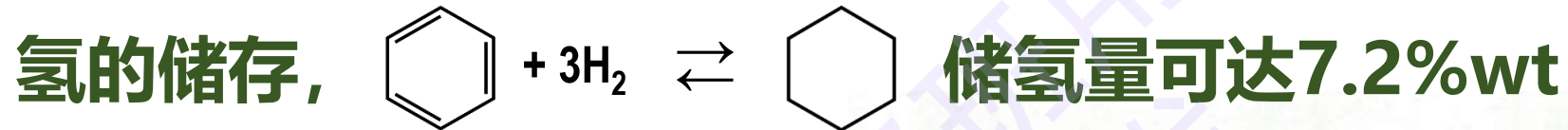
□ **吸氢放热、放氢吸热**



典型储氢合金吸放氢PCT曲线

有机溶液储氢 (LOHC)

□ 基本原理：不饱和有机物与氢气进行可逆加氢和脱氢反应，实现



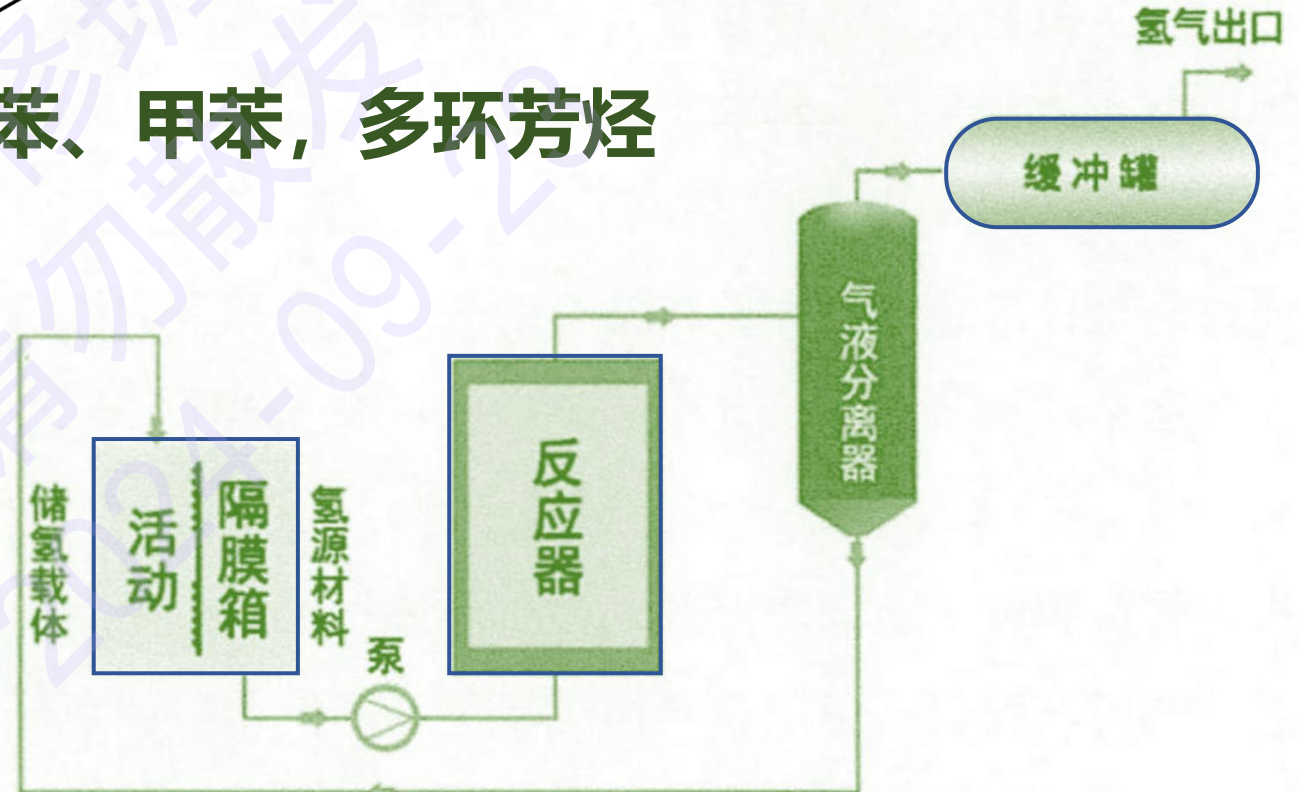
□ 主要材料：N-乙基吡啶，苯、甲苯，多环芳烃

□ 包括三个过程：

加氢：催化剂+放热

运输：常规运输

放氢：催化剂+吸热



LOHC, Liquid Organic Hydrogen Carriers

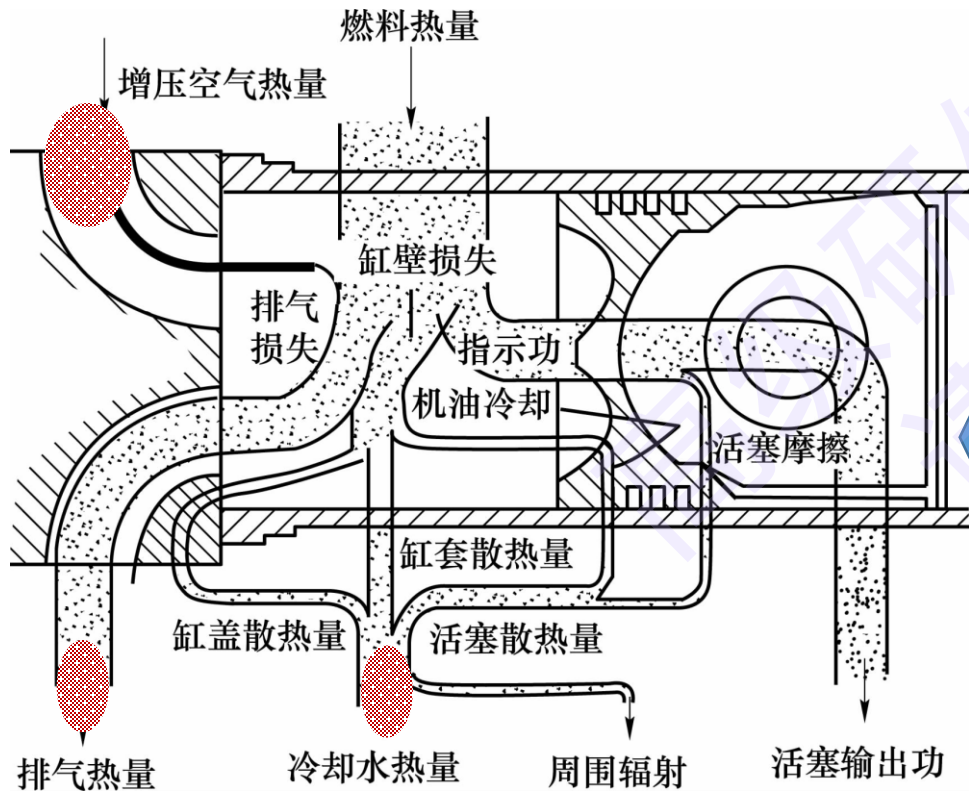
储氢方式的比较

储氢技术		优点	缺点	目前主要应用
气态储氢	高压气态储氢	技术成熟，结构简单，充放氢速度快，成本及能耗低	体积储氢密度地，安全性能较差	普通钢瓶，少量存储，轻质高压储氢罐，多用于氢燃料电池车
	低温液态储氢	储氢密度高，运输简单，安全性高	转化过程能耗较高，储氢装置要求较高，装置投入较大，经济型较低	主要用于航天工程领域，如火箭低温推进剂
液态储氢	有机液态储氢	储氢量大，能量密度高，储存设备简单	成本高，能耗大，操作条件苛刻	尚未得到广泛应用
固态储氢	物理吸附储氢	可利用的材料较多，选择多样性	常温或高温储氢性能差，储氢不牢固	实验研究阶段
	化学氢化物储氢	单位体积储氢密度大，能耗低，安全性好	温度要求较高，技术不成熟	实验研究阶段



与氢内燃机的结合

- 吸氢放氢特性，存在热量的传递与交换
- 氢内燃机尾气余热，冷却系统、增压中冷、机油散热

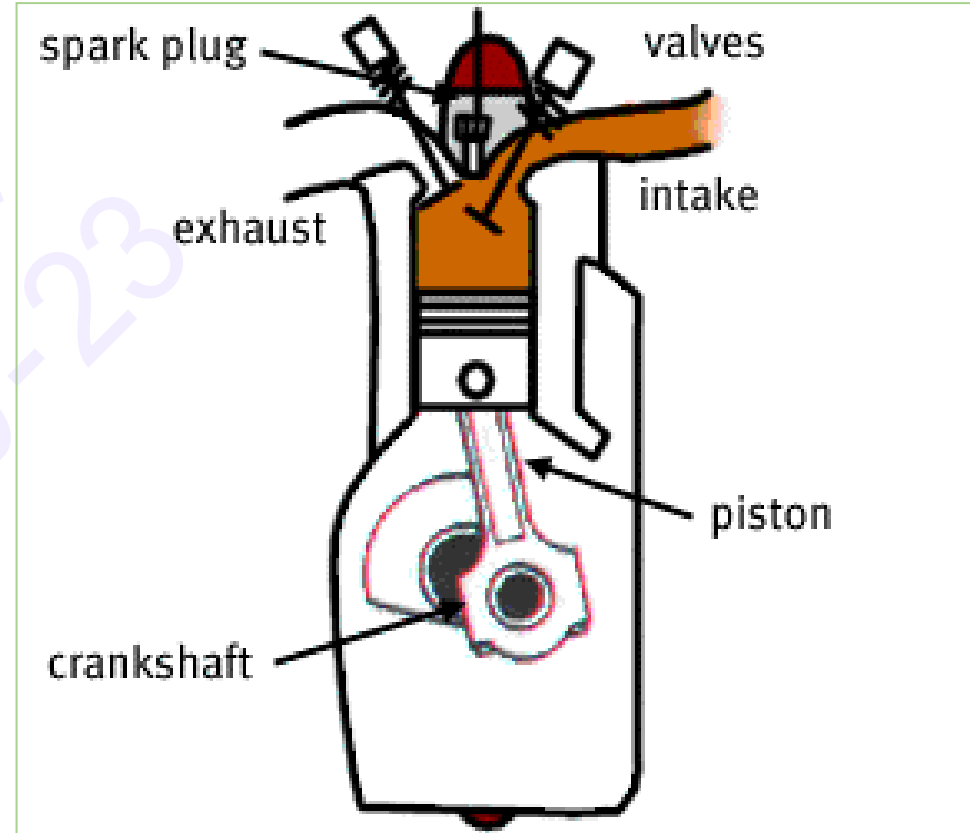


高效
热管理
参数匹配

<p>CH_2</p>	<p>LH_2</p>
<p>MH_2</p> <p>高容量 (7.6 wt%)</p> <p>可逆储氢</p> <p>低成本，环境友好</p>	<p>LOHC</p>



4. 氢内燃机关键技术与挑战



4. 氢内燃机关键技术与挑战

大功率高效氢内燃机性能开发

- 中低压DI&高压PFI, **新型空气系统与增压匹配**
- 火花点火或其他引燃方式
- 高效率、低排放样机

高可靠性氢内燃机开发

- 压缩比提高、稀燃、大流量EGR
- 氢气对机油的破坏机理, **机油乳化**
- 500h以上可靠性考核, 引导关键部件设计、材料改进

氢内燃机混合动力系统

- 基于HEV方案的氢内燃机设计体系重构, **或氢气+汽油双燃料**
- 氢内燃机混合动力系统的能量管理优化
- 策略优化与自主控制器



4. 氢内燃机关键技术与挑战

氢-空气混合与燃烧过程控制

- **爆震燃烧新机理或评价方法**
- 燃烧匹配优化与NVH

关键零部件引导性开发

- 新型废气涡轮增压器，基于氢内燃机增压匹配特点
- **动态排放**，后处理器：H₂-SCR, H₂-TWC, H₂-SCR&TWC
- 适度探索各类材料的氢脆问题（目前被高估）
- **新型智能化控制系统**

新型高密度车载储氢与氢气供应系统

- 基于低温技术的气态高压氢气存储系统
- 液氢、固态储氢、有机溶液储氢、高压微管储氢技术
- 甲醇/氨储氢及灵活比例甲醇/氨-氢燃料内燃机，在线氢燃料制备





共同推动氢能动力新时代!

Thank you for your attention!

北京市海淀区中关村南大街5号, 100081

北京理工大学, 机械与车辆学院 孙柏刚

18810338503, sunbg@bit.edu.cn



- 北京氢燃科技有限公司是经北京理工大学正式批准设立的**学科性公司**，公司2022年3月注册，位于北京市**房山区燕山东流水路26号**。
- 2022年12月，获得中关村高新技术企业称号
- 2023年5月，设立院士专家工作站
- 网址：www.hybustion.com
- 沧州子公司，沧州全场景应用示范工程

