



第二届世界内燃机大会



上汽技术中心

直面挑战，乘用车高效内燃机技术研究

平银生 博士

上汽集团技术中心副总工程师

2021.4.22 中国·济南

- 1 传统动力在乘用车上的挑战**
- 2 乘用车动力系统的发展趋势
- 3 未来高效内燃机开发的思考
- 4 小结

全球变暖、能源安全、环境问题是内燃机绕不开的几大命题，这些命题共同构成了内燃机发展中的重大挑战。

全球变暖&巴黎协定



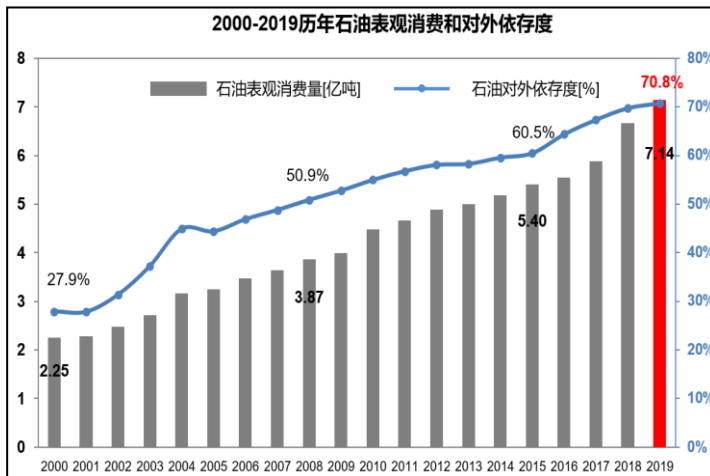
协定目标

将全球平均气温升幅控制在较工业化前 2°C 之内，并把温升控制在 1.5°C 之内。

中国承诺

2030年单位GDP的 CO_2 排放将比2005年下降**60~65%**。
 CO_2 排放于2030年前达到峰值，2060年前实现**碳中和**。

能源安全



石油对外依存度

中国的石油对外依存度连年上升，2018、2019年连续两年超过**70%**。

交通用油占比

交通领域的石油占比超过**50%**，提高燃油经济性是降低石油消耗的重要手段。

环境污染



生态环境

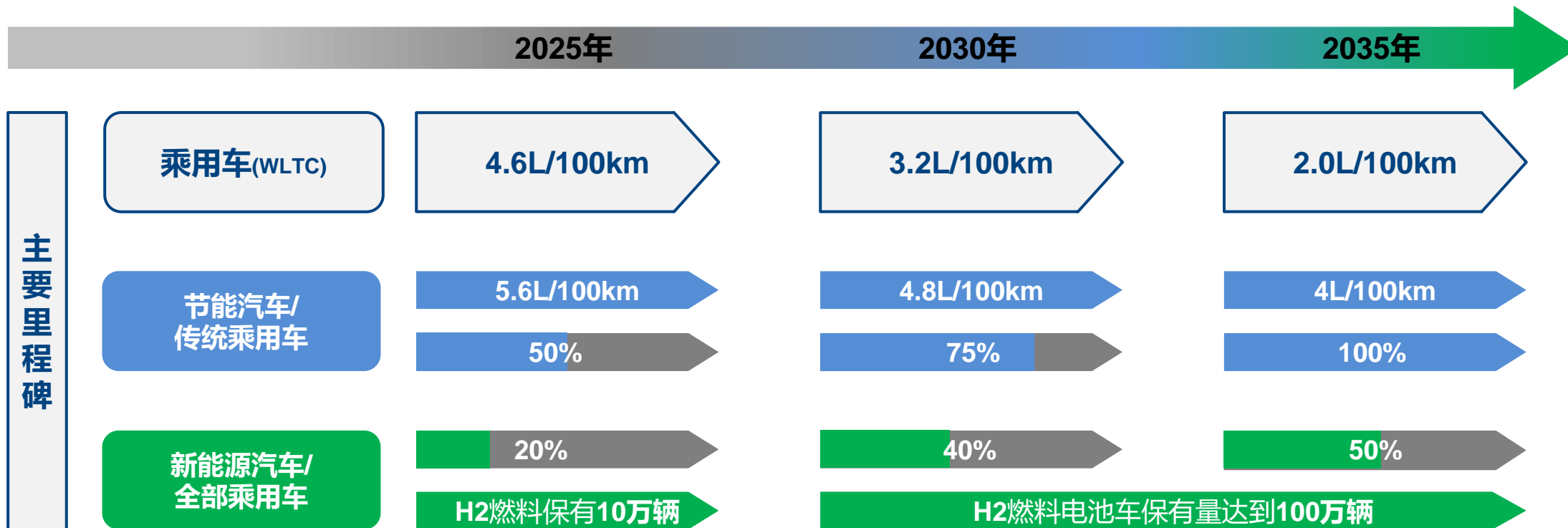
优美的生态环境是人民对新时代美好生活的重要期待，从根本上解决生态环境问题要靠技术创新。

法规加严

CN7、EU7等近**“零影响”**排放法规正在商讨、制定中，给未来乘用车内燃机的清洁排放提出了更高的要求。

技术路线图2.0

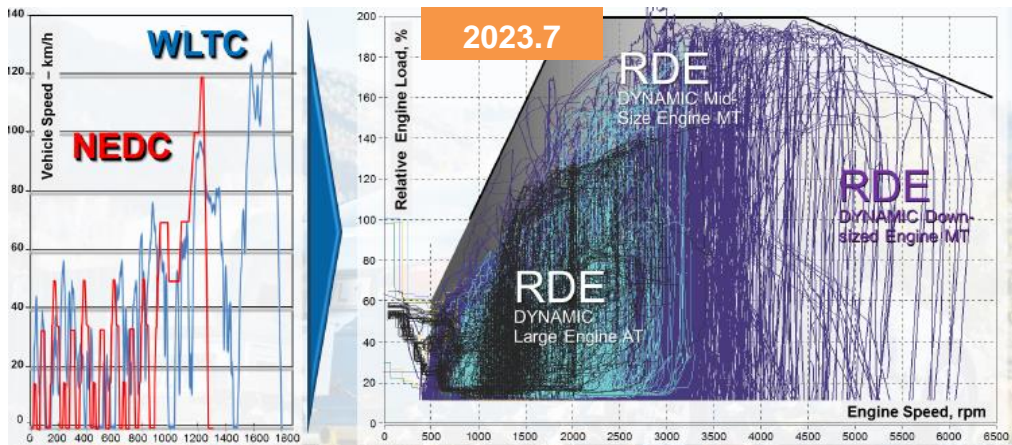
2020年11月中国汽车工程学会发布了“**节能与新能源汽车技术路线图2.0**”，提出了我国汽车产业面向2035年发展的六大目标，第一条就是汽车产业**碳排放于2028年先于国家碳减排承诺提前达峰**，**2035年**碳排放总量较峰值**下降20%以上**。



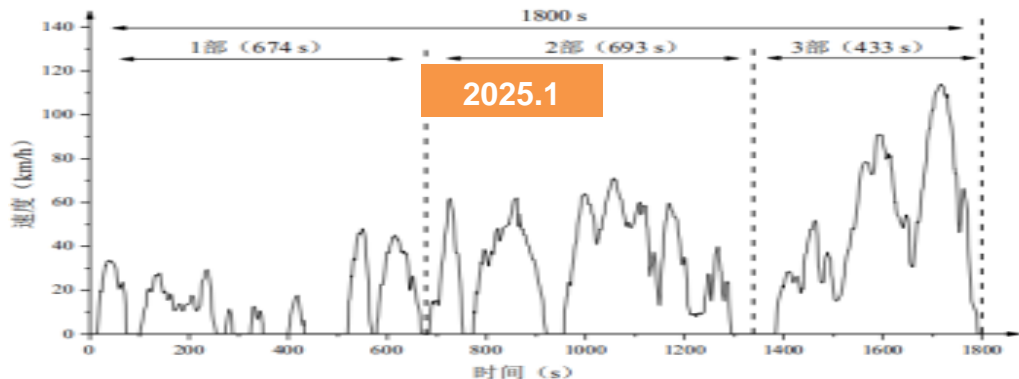
“技术路线图2.0”明确**混合动力是有效的节能汽车技术**，纯电动与节能汽车应该并举发展，到2035年节能汽车与新能源汽车大致各**占50%**。

近年来，中国对于汽车排放的限制正在提速，从国六排放起，中国法规逐步成为全球最严苛的法规之一。

测试循环覆盖面不断扩大



动态性增强，贴近真实驾驶习惯

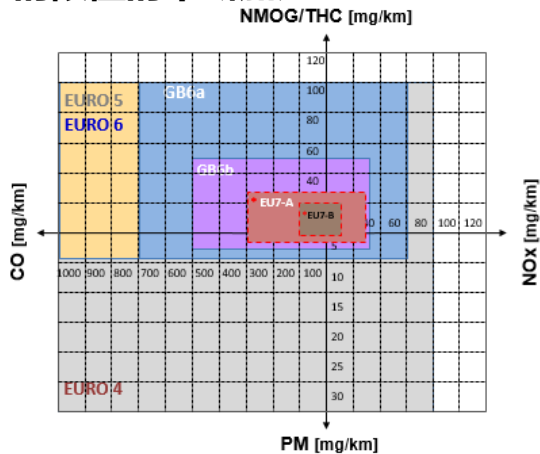


中国乘用车工况 (CLTC-P)

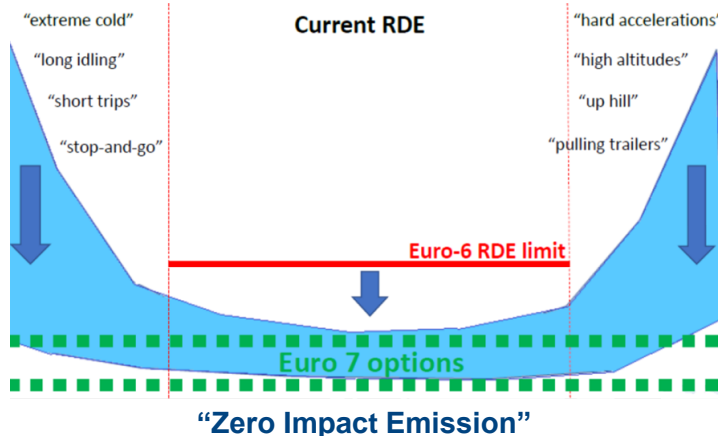
排放物的限值的不断加严

NH3
温室气体

*EU7的限值正在讨论中。



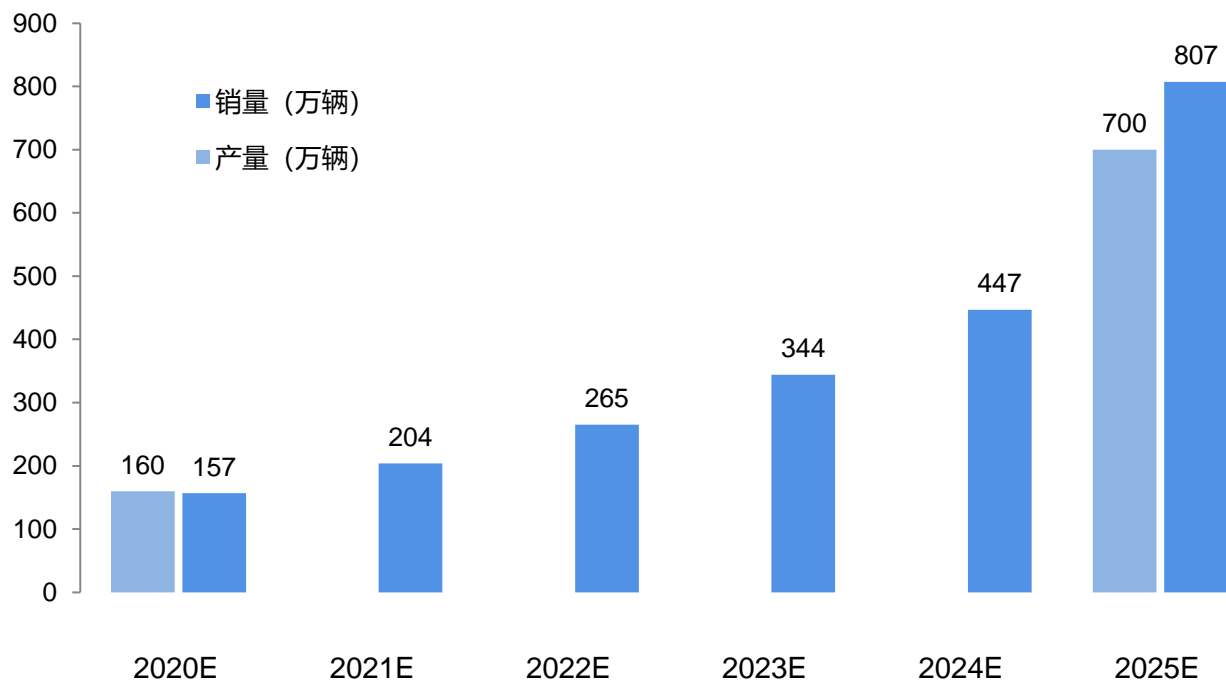
RDE考核的区域继续扩大



尽管当前乘用车市场总体增长乏力，但新能源仍然保持了高速增长，其增长的动力离不开中国政府的政策支持和产业技术的不断发展。同时物料成本逐年下降，基础设施持续改善，客户的接受度提升也促成了这一趋势。

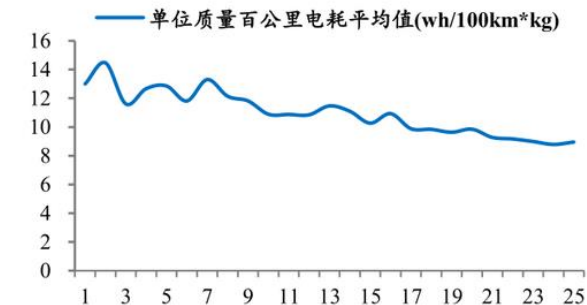
2020-2025年中国新能源汽车行业产销量市场预测

(单位: 万辆)



资料来源: 前瞻产业研究院整理 @前瞻经济学人

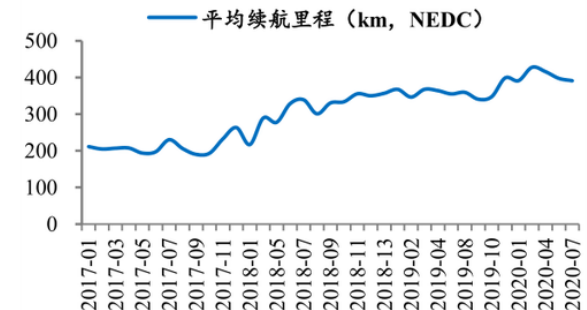
图表: 免征目录各批次纯电动乘用车平均电耗



资料来源: 工信部, 恒大研究院

海平宏观

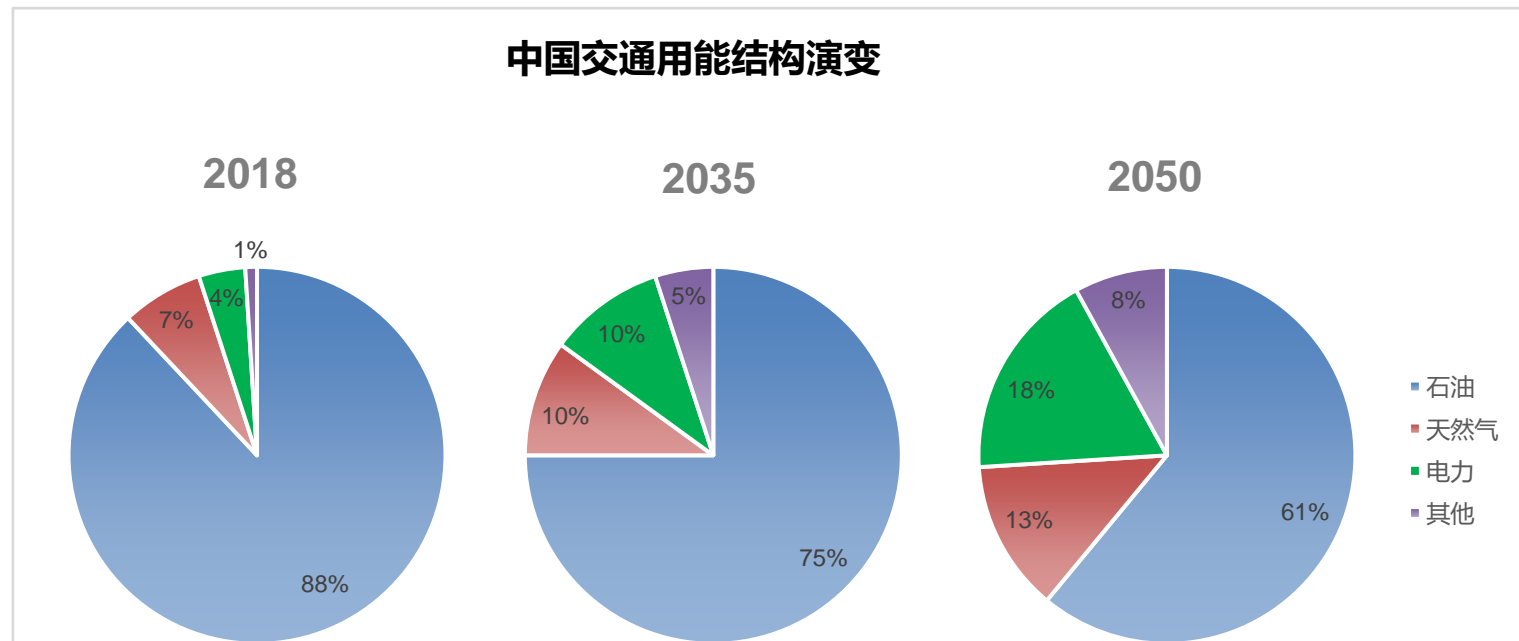
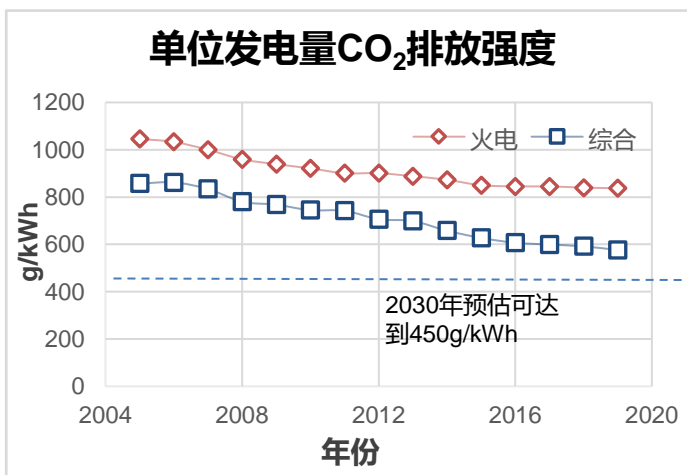
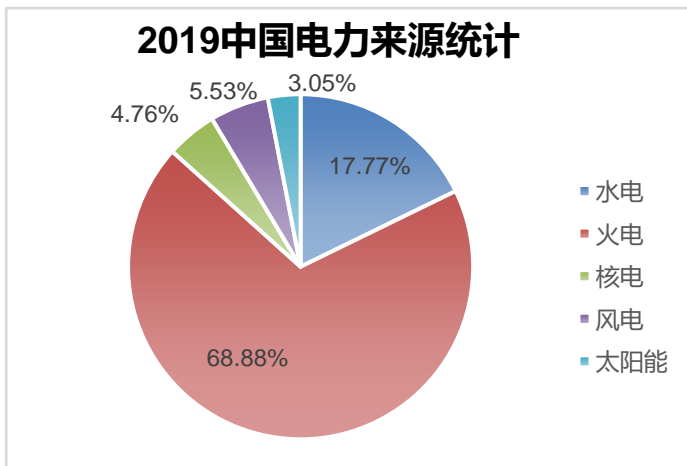
图表: 推荐目录各批次纯电动乘用车平均续航



资料来源: 工信部, 恒大研究院

- 1 传统动力在乘用车上的挑战
- 2 乘用车动力系统的发展趋势**
- 3 未来高效内燃机开发的思考
- 4 小结

尽管我国新能源汽车的增长较为乐观，但我国电力能源结构中约**70%为火电**，单位发电量CO₂排放强度较高，BEV大量应用不利于碳达峰的目标达成。此外，根据BP预估，中国**2050年**可用于交通的电能占比仅为**18.5%**。



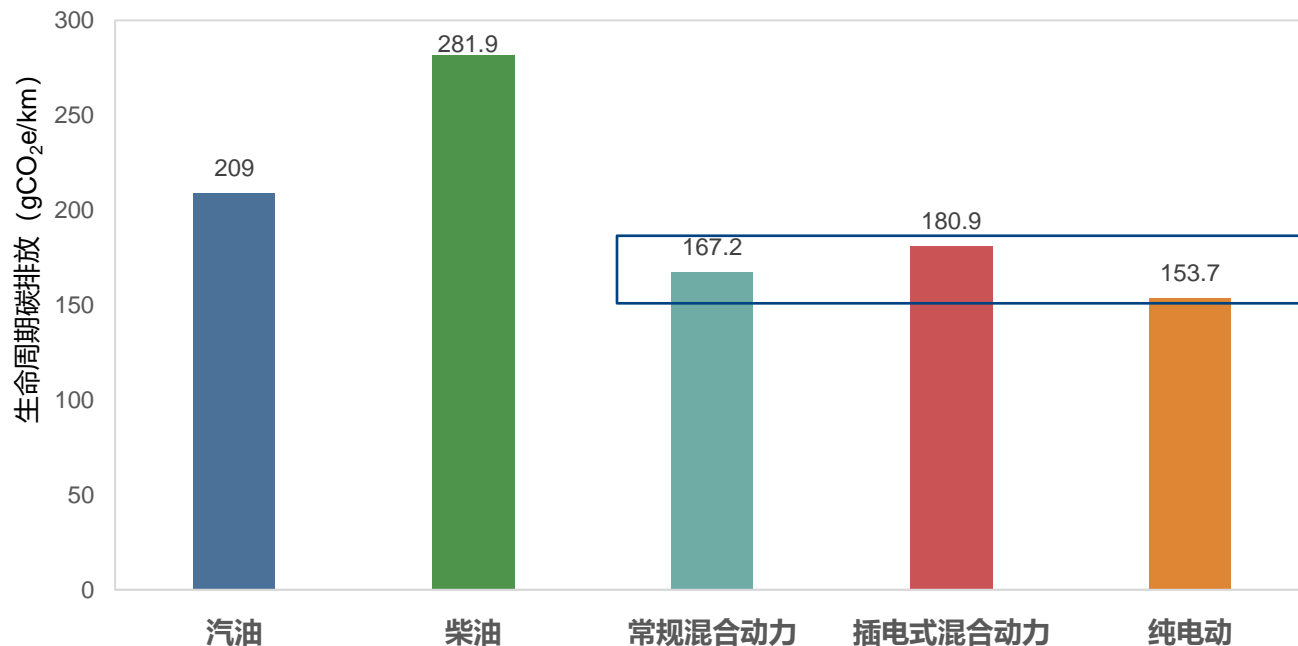
据BP公司世界能源展望预测，2050年电力提供的交通用能只占**18.5%**，石油仍占我国移动动力能源**61%**，石油和天然气交通用能超过**70%**。

Source: 中国石油经济技术研究院《2050年世界与中国能源展望》，2019)

内燃机LCA下的CO₂排放潜力

从全生命周期CO₂排放来看，混动驱动系统有较大的潜力达到与BEV一致的水平，e-fuel可以进一步降低碳排放。因传统内燃机的占比较高，e-fuel的应用可以有利于加速2030年前实现碳达峰。

2019年不同燃料类型平均单位行驶里程碳排放（全行业）



能源结构：2017年能源结构

行驶里程：150000km

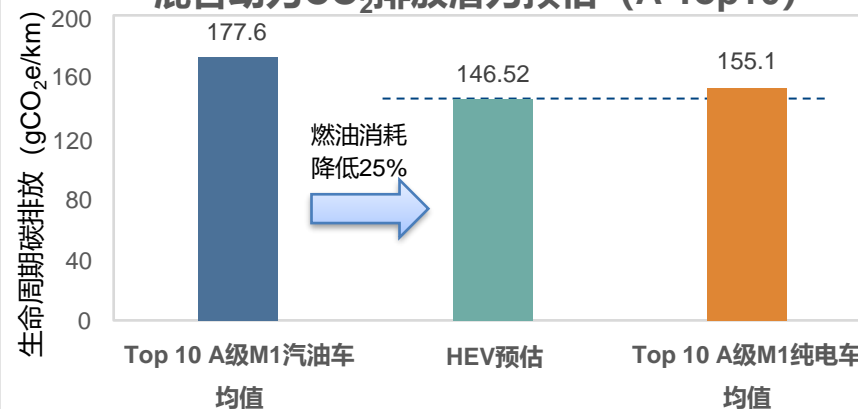
核算工况：NEDC

燃料-碳转换系数

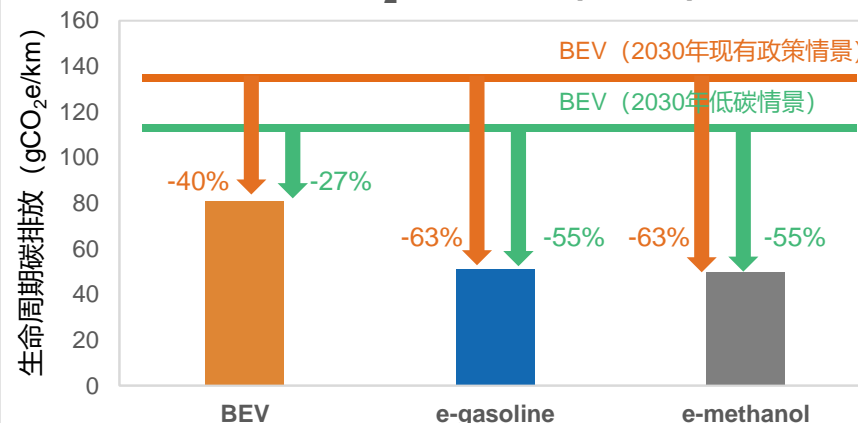
汽油：2.37kgCO₂/L

柴油：2.60kgCO₂/L

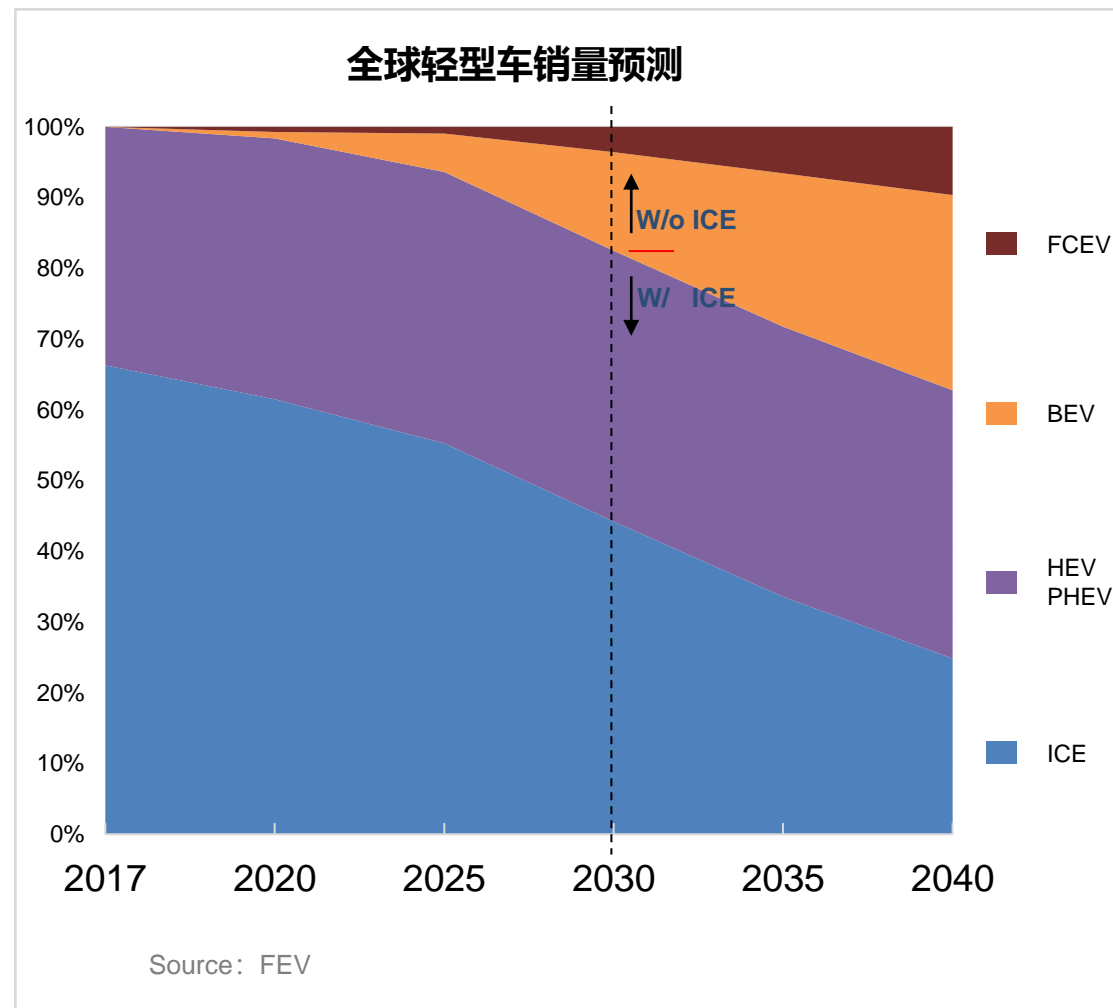
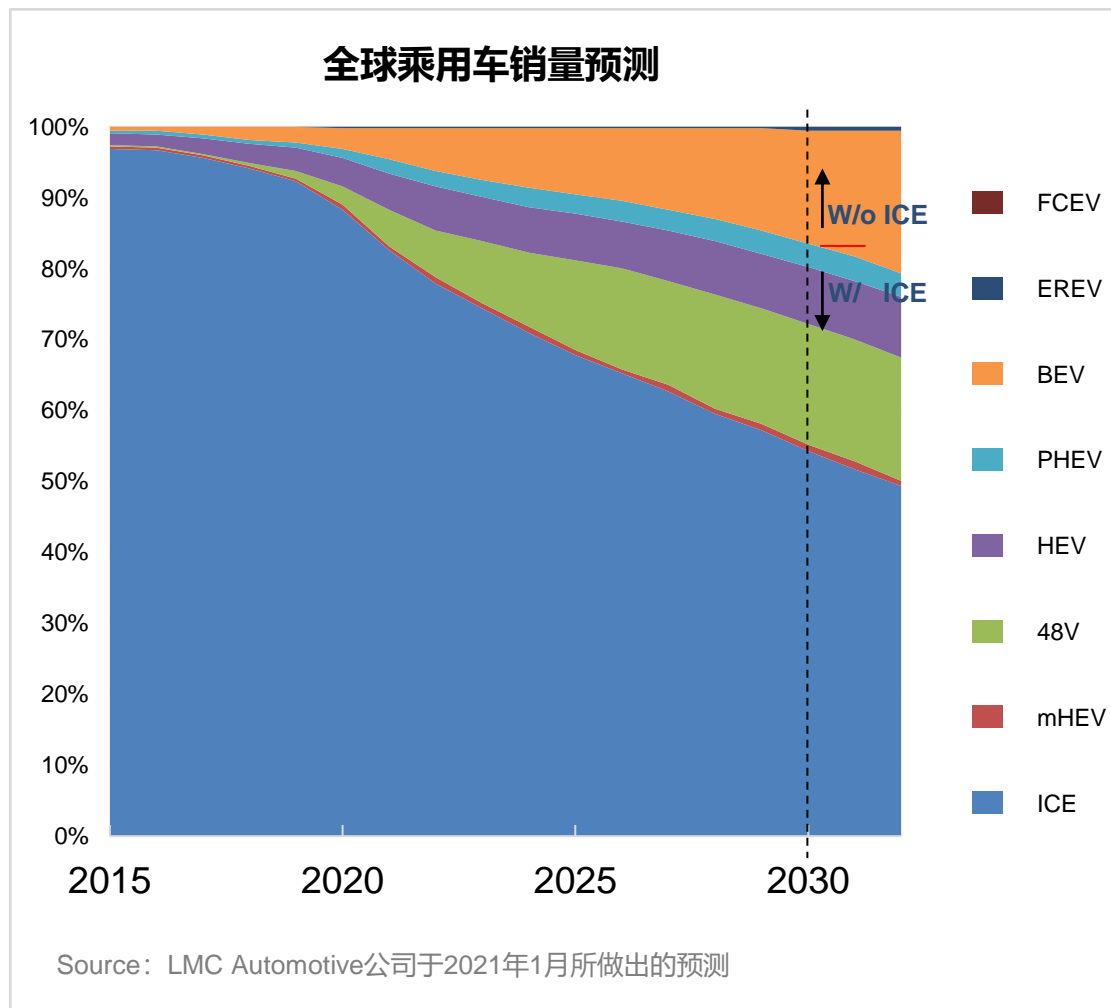
混合动力CO₂排放潜力预估（A-Top10）



2030年CO₂降排前景（e-fuel）



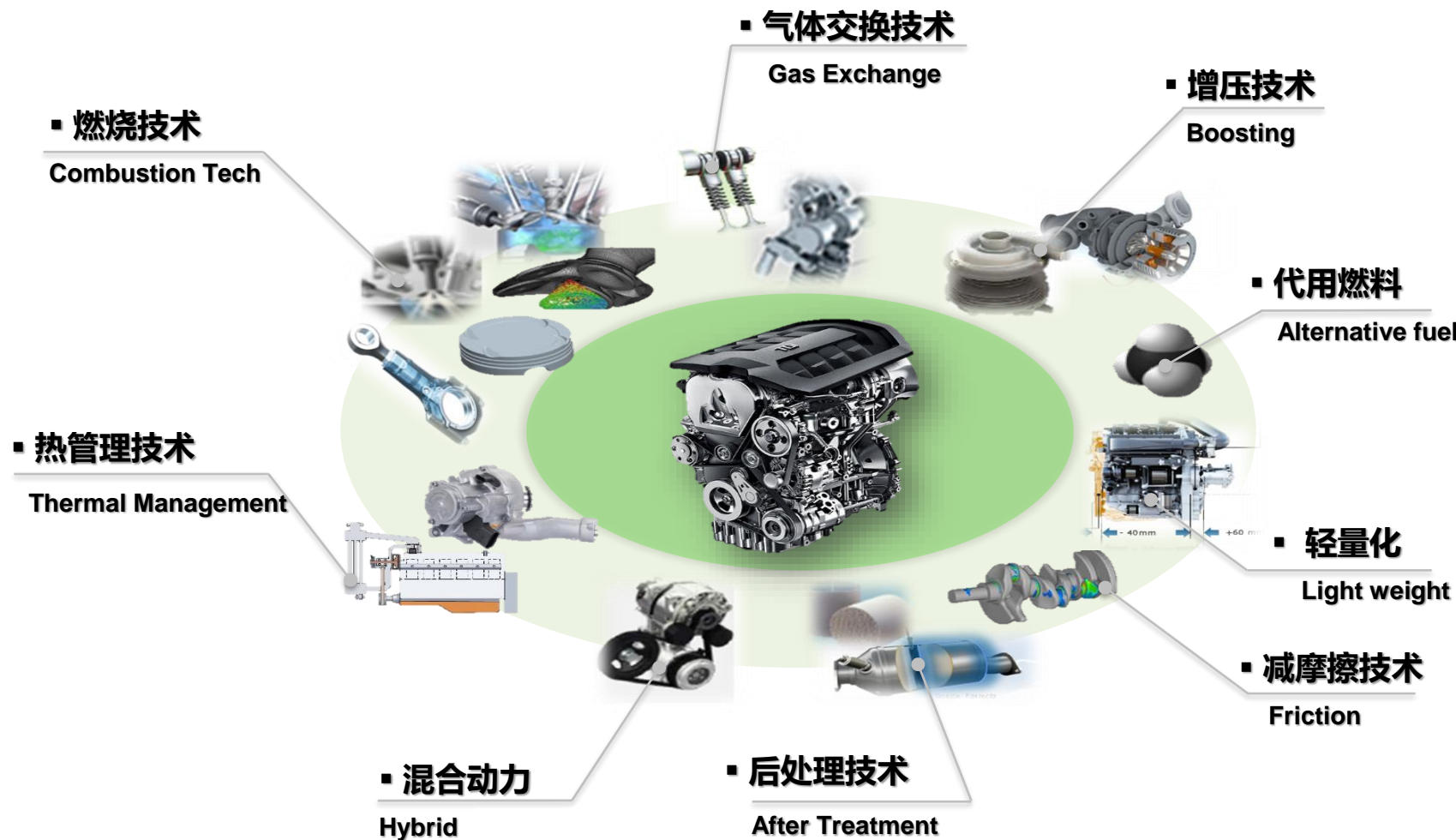
面向未来，“**驱动系统多样化**”是业内主流观点，大多数机构预估到**2030年**，含内燃机驱动系统占比在**80%左右**。



- 1 传统动力在乘用车上的挑战
- 2 乘用车动力系统的发展趋势
- 3 未来高效内燃机开发的思考**
- 4 小结

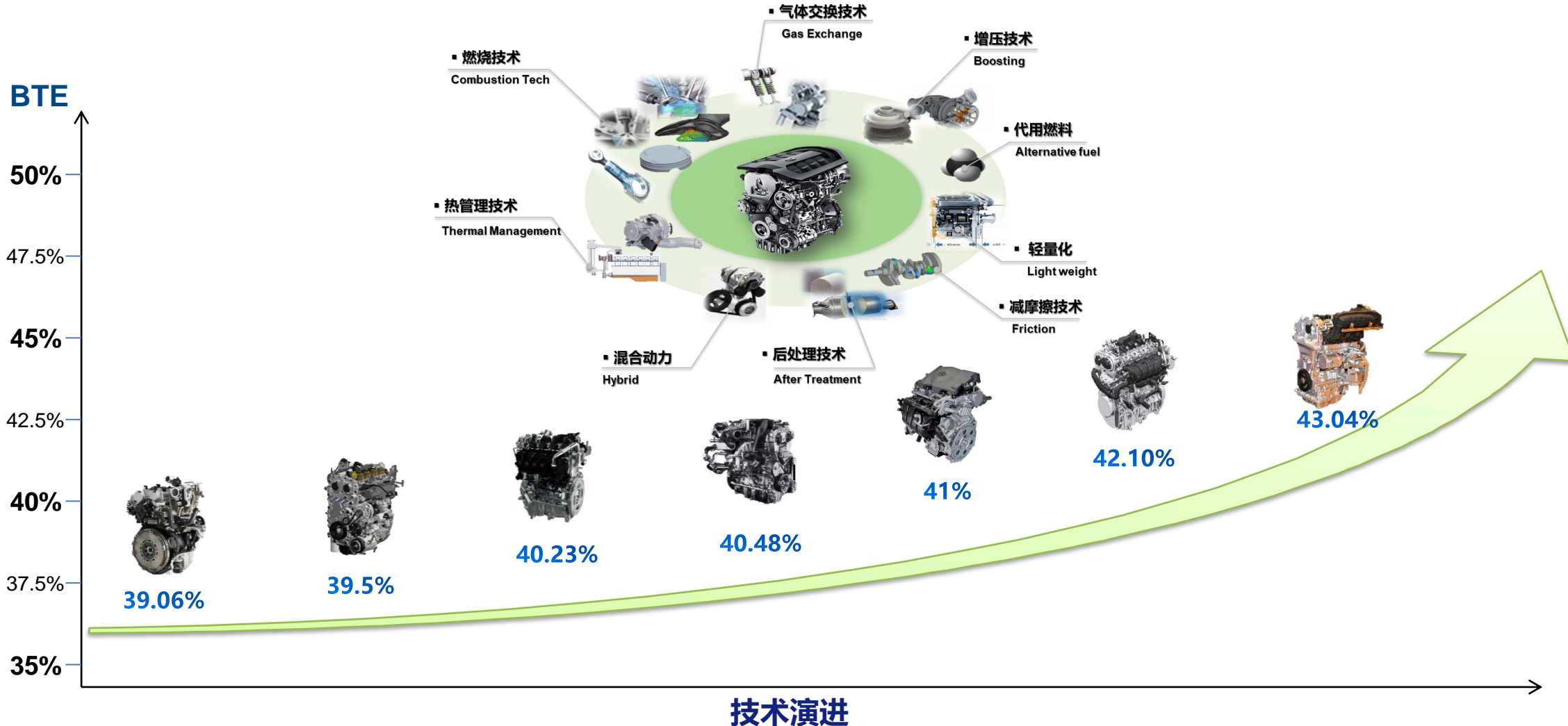
内燃机技术演进仍处于最活跃的时期——技术研究多样

面对内燃机发展的多重挑战，国内外的企业展开了新一轮的技术研究，探索了各细分技术领域的技术潜力。



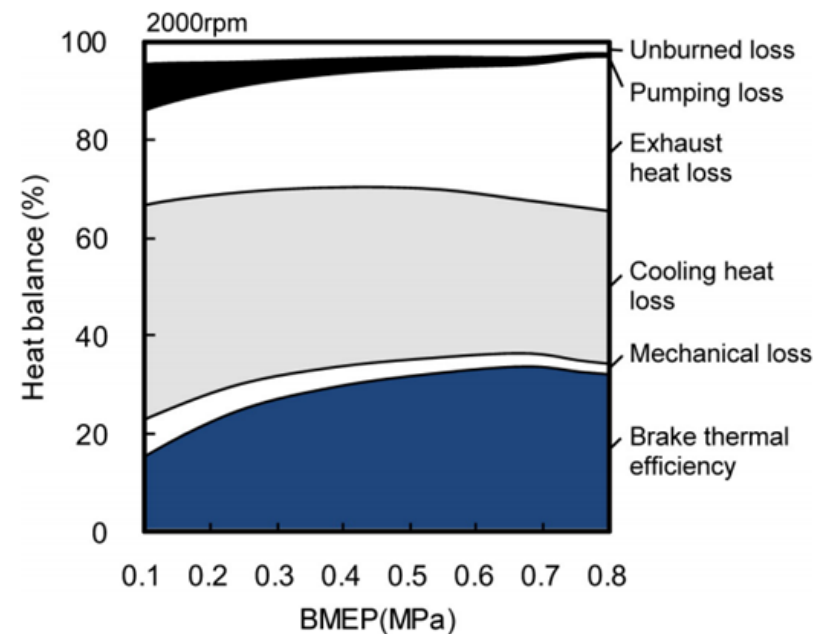
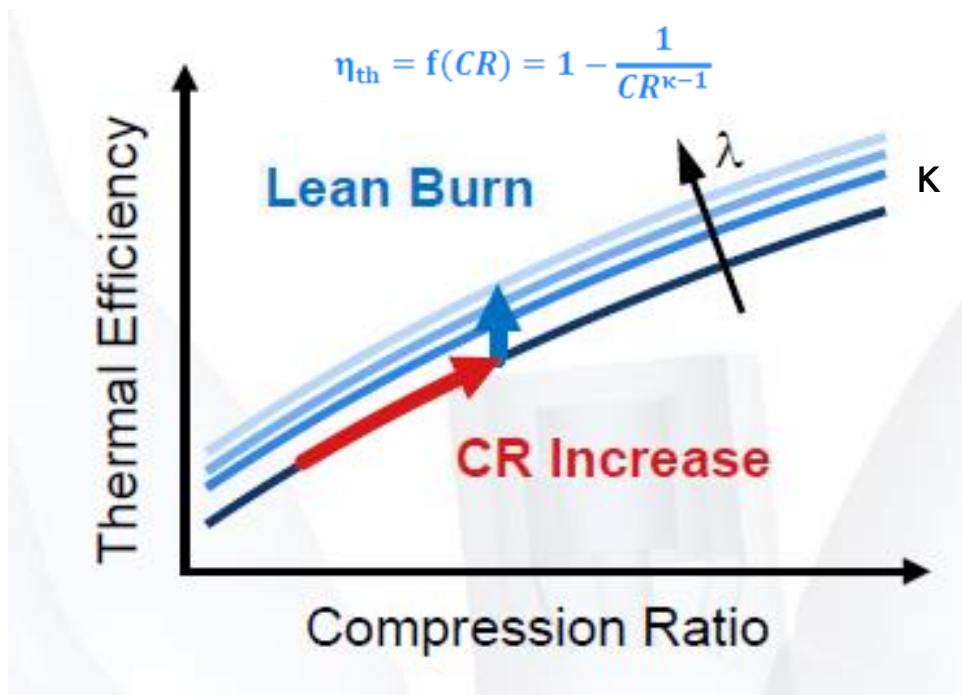
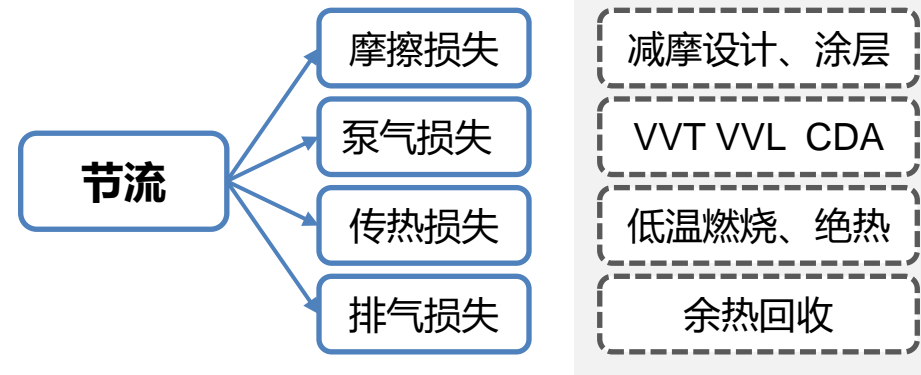
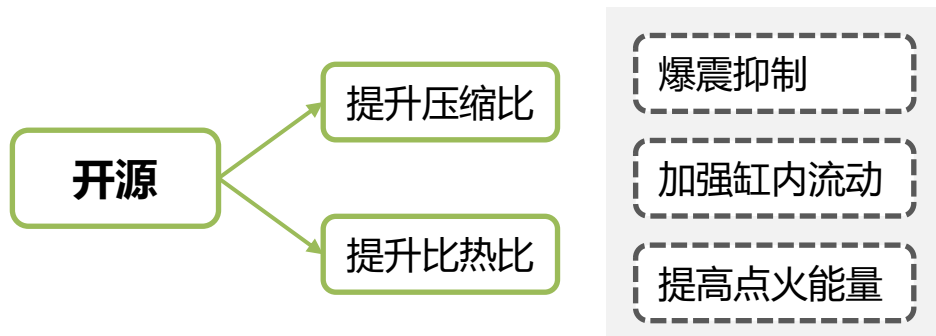
内燃机技术演进仍处于最活跃的时期——产品应用丰富

在技术探索的同时推出了大量高效率的内燃机产品，为动力系统电气化打下坚实的基础。

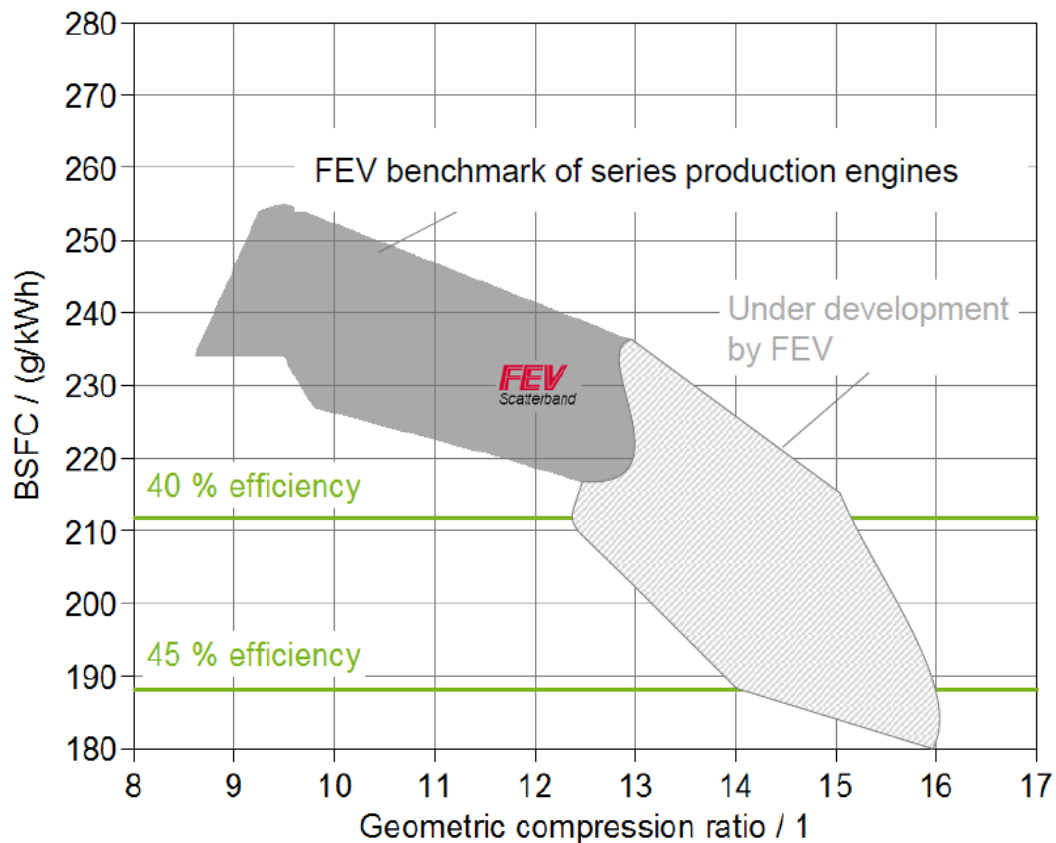


提升热效率的技术路径

提升内燃机热效率的两大主要路径为“**开源**”和“**节流**”。

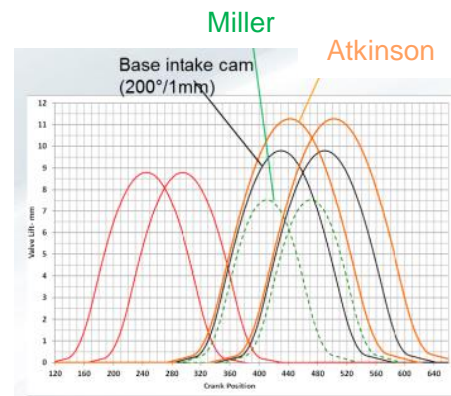


高压压缩比与BTE趋势

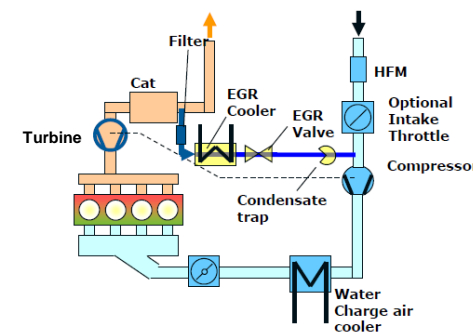


为获得更高的热效率，提高压缩比是必经之路，从现有的数据来看，压缩比有加速提升的趋势。

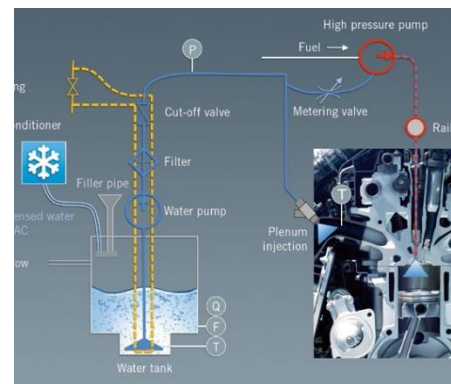
爆震抑制技术



Miller/Atkinson



cEGR

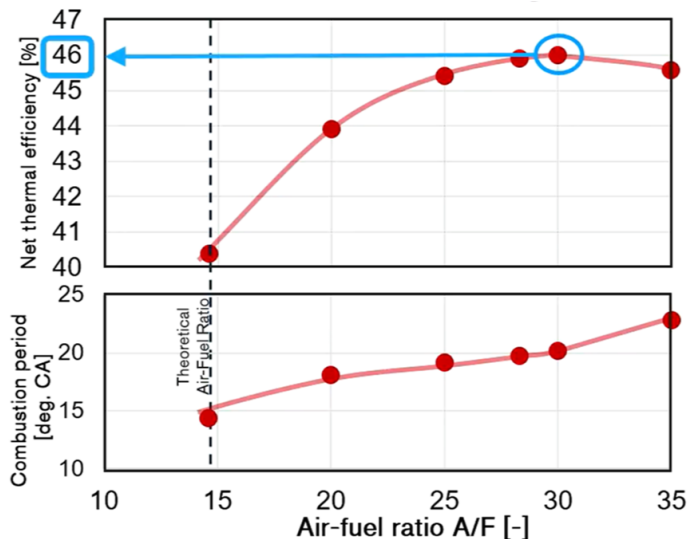
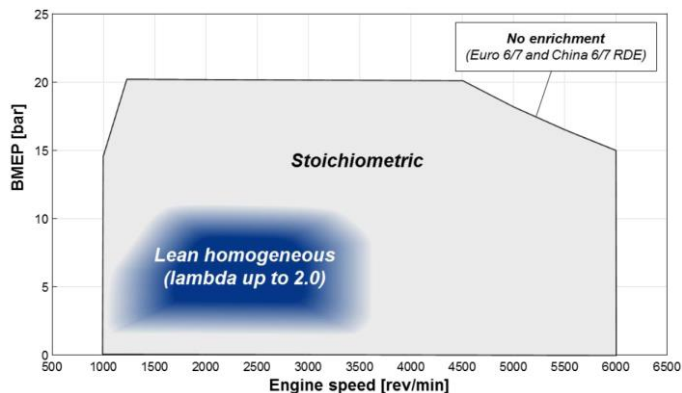


Water Injection

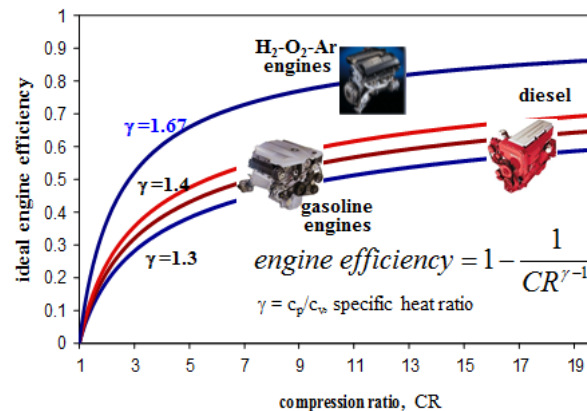


Ultra High Injection Pressure

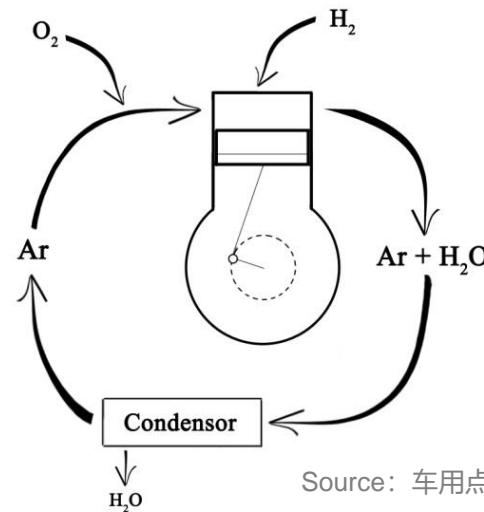
提高比热比 (Lean)



提高比热比 (Argon)

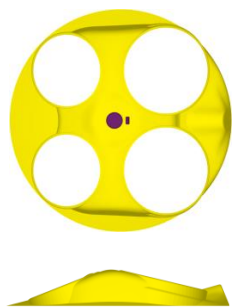
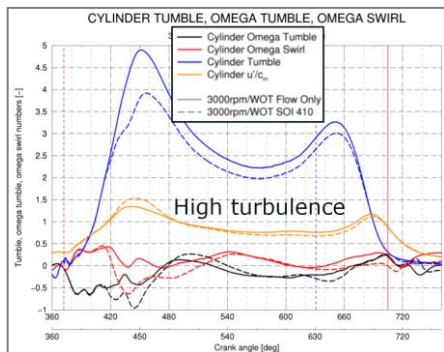
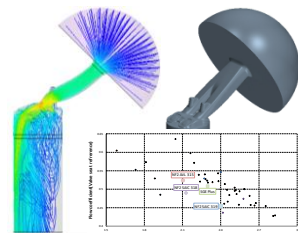


氩气作为一种单原子分子，具有三个方向的自由度， $n = 3$ ，其比热比 $\gamma=1.67$ ，明显高于空气（约1.4），有更高的理论循环热效率。

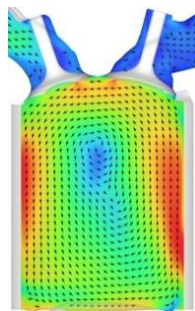


Source: 车用点燃式内燃机实现50%以上效率途径分析 ——李理光

加强缸内流动



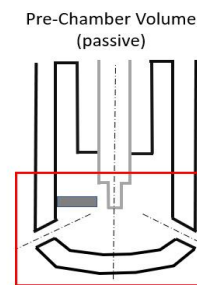
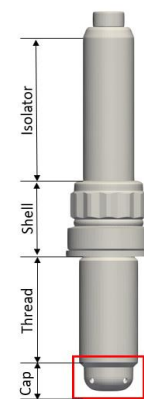
- 气道型面的优化设计
- 燃烧室型面优化设计
- 提高缸内气流强度仿真计算



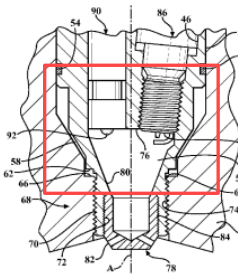
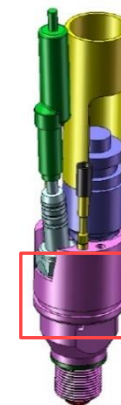
提升点火能量



高能点火

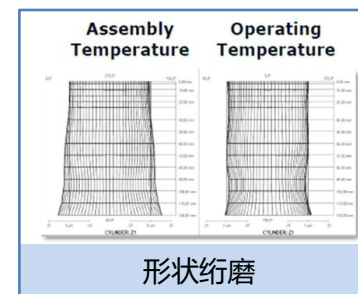
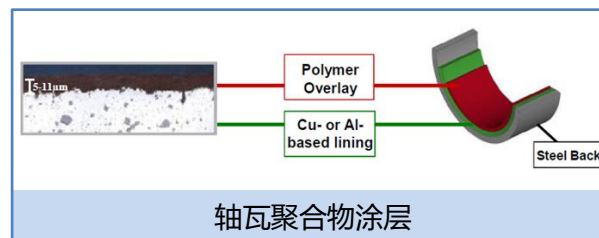
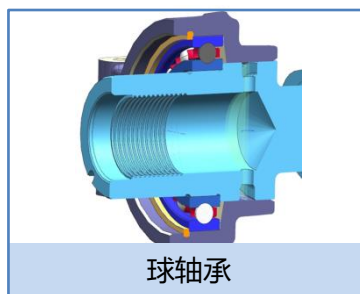
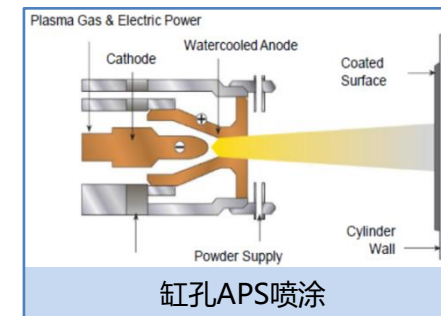
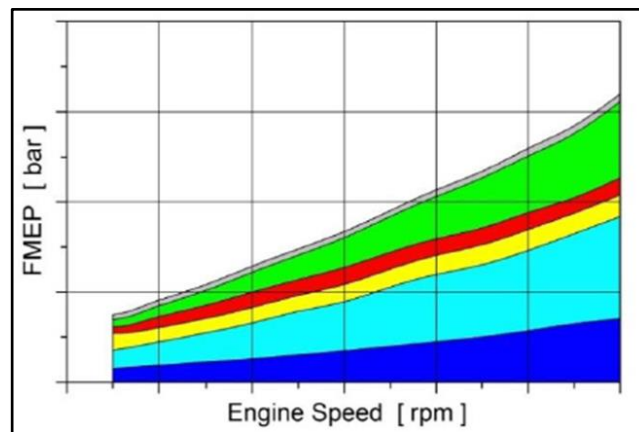
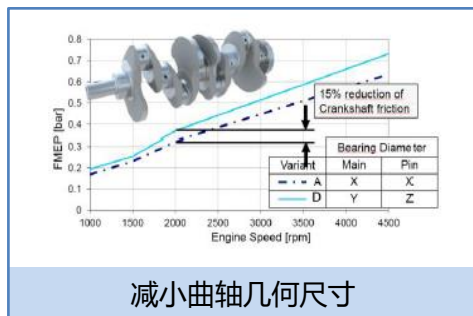
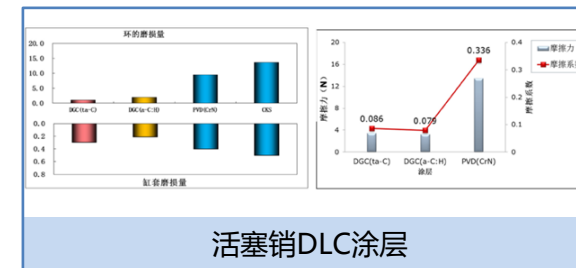
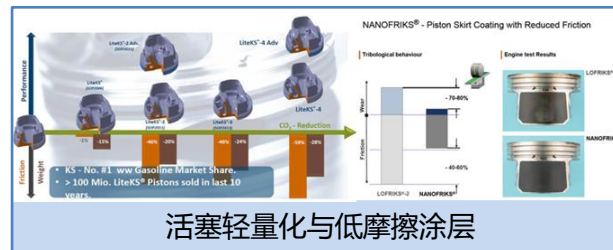
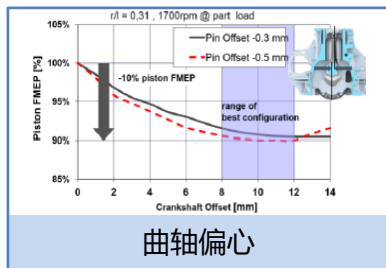


被动式预燃室

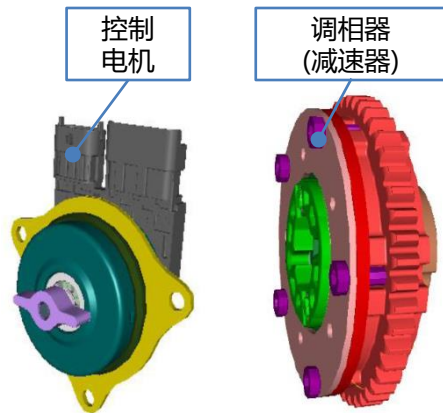


主动式预燃室

减摩设计



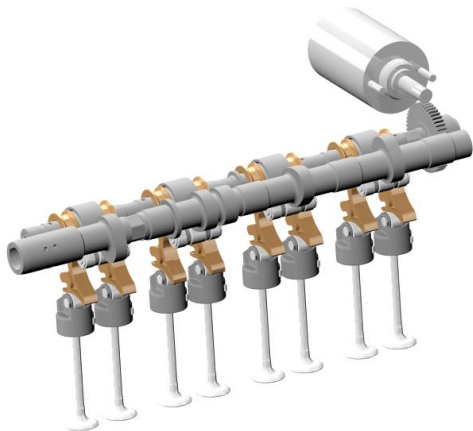
降泵气损失



E-VVT

- 不依赖机油压力，低转速低油温下的快速调节，点火前即可调节相位
- 减小频繁启停工况下发动机的振动
- 更早的排气开启可以推动涡轮，提高整机动态响应

CVVL



- 控制轴集成式设计
- 实现8.5~0.1mm气门升程连续可调
- BLCD无刷直流电机驱动
- 独立Hall角度传感器位置反馈



DSF

- 动态停缸技术可以有效降低泵气损失，减少CO2排放
- 采用特定的标定策略可以避开系统共振频率

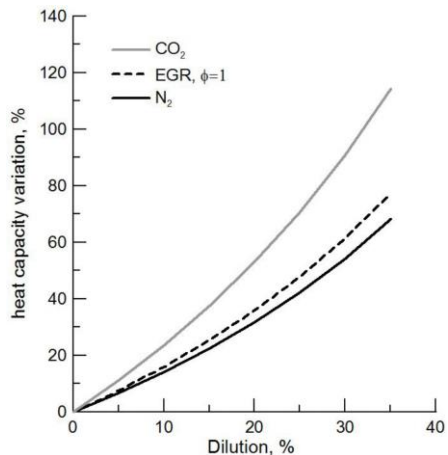


Camless

- 简化传统的配气机构，控制更加柔性，减少节气门，且可以实现停缸；
- 对使用条件的要求极为苛刻敏感，可靠性是该机构潜在的一大问题；



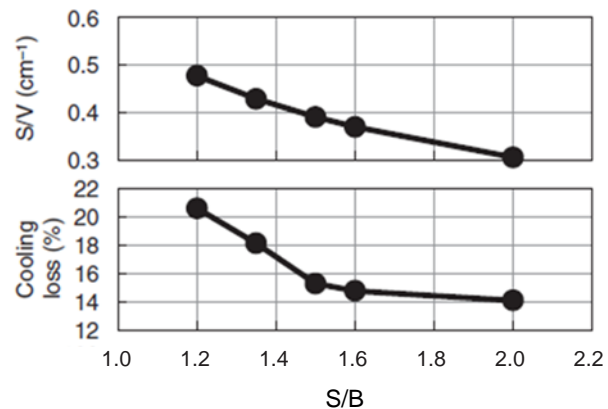
降低传热损失



稀释燃烧

- 采用EGR或者空气等气体进行的稀释燃烧，降低缸内温度从而减少传热损失。

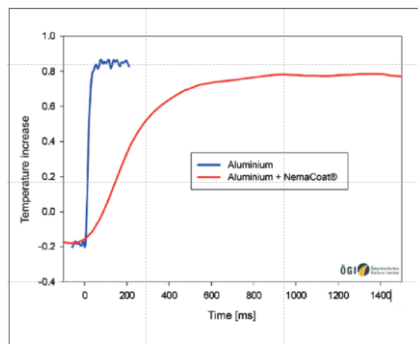
长冲程



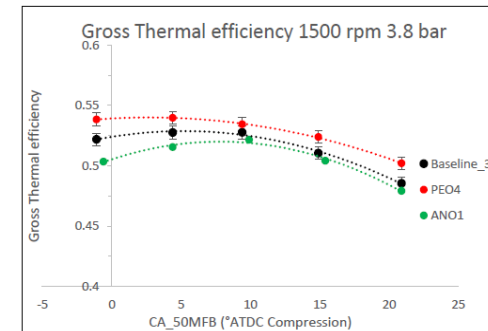
- 降低压缩终了面容比，从而降低传热损失。



绝热



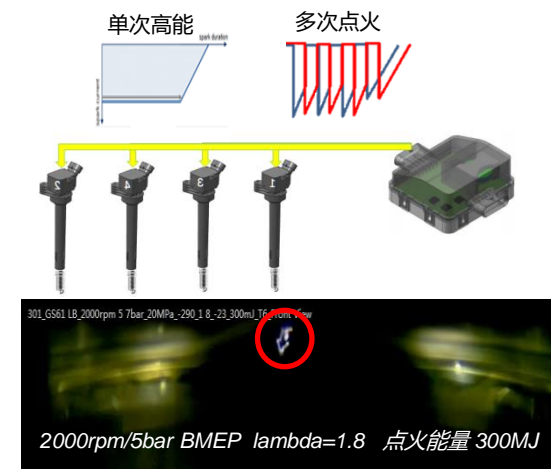
Thermal Swing



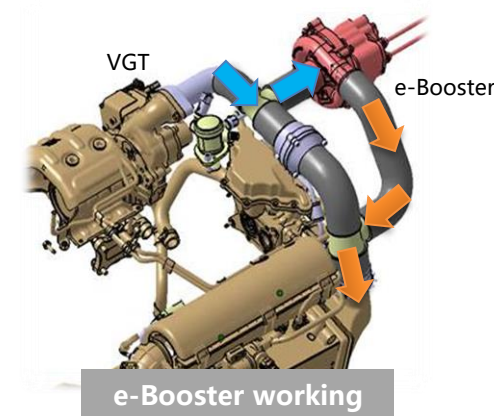
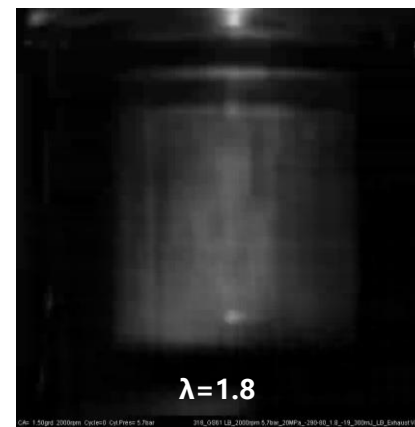
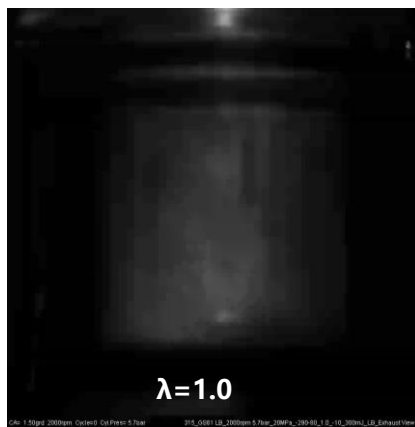
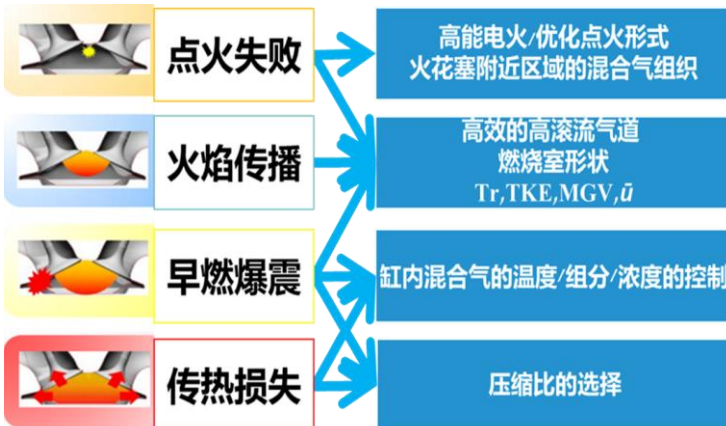
稀燃研究:

稀薄燃烧是当前提高内燃机效率的重要路径。SAIC在全新的1.5T发动机平台上，通过燃烧系统等多系统优化，尤其是高能点火及双增压系统开发，实现 $\lambda=1.8$ 稀薄状态下的稳定燃烧。

稀燃收益

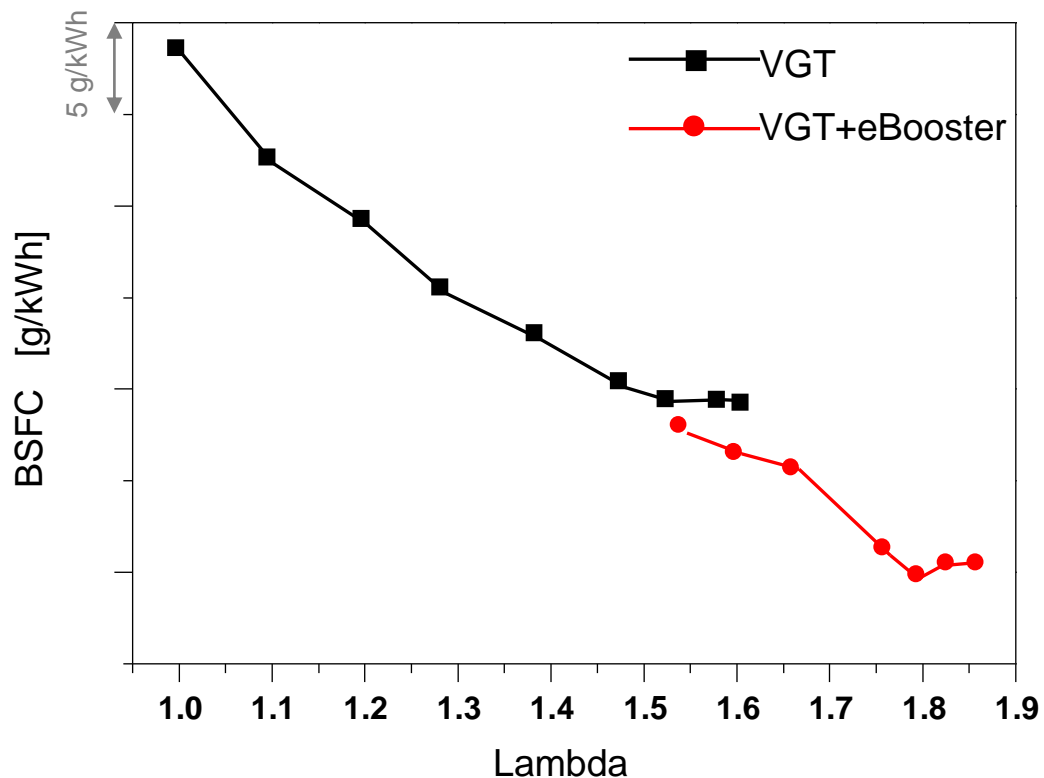


关键问题和技术难点:

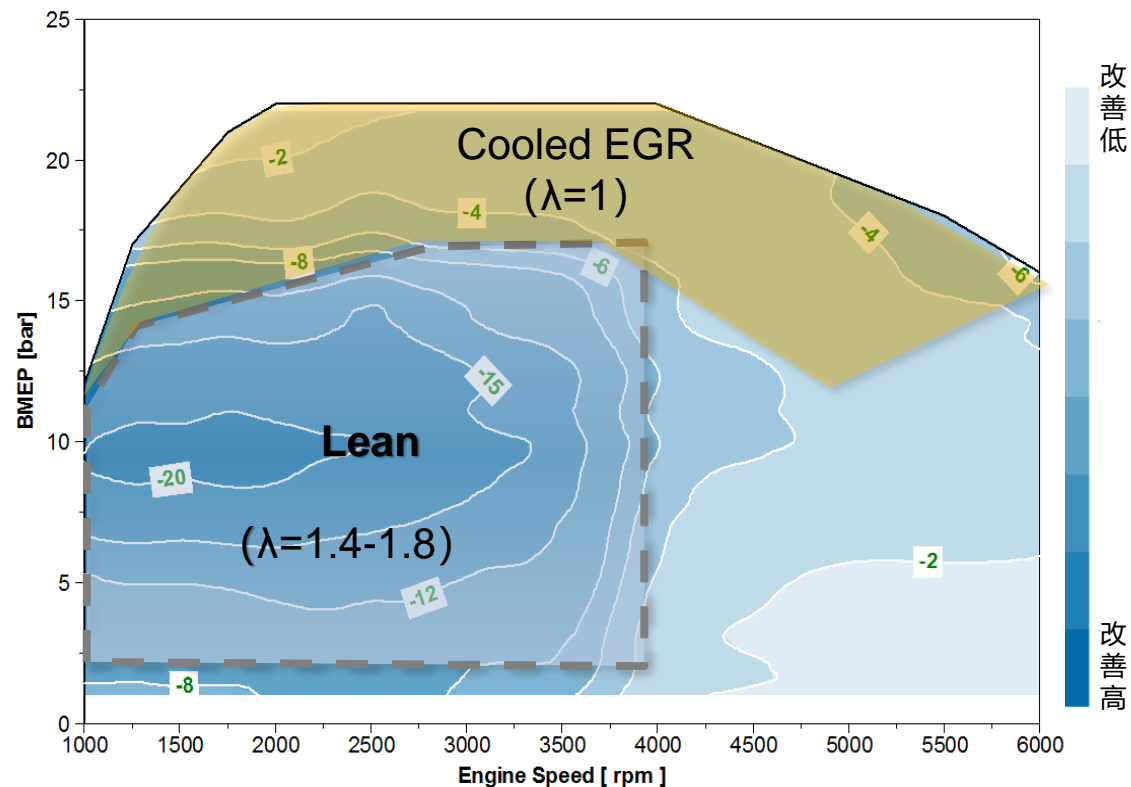


稀燃研究:

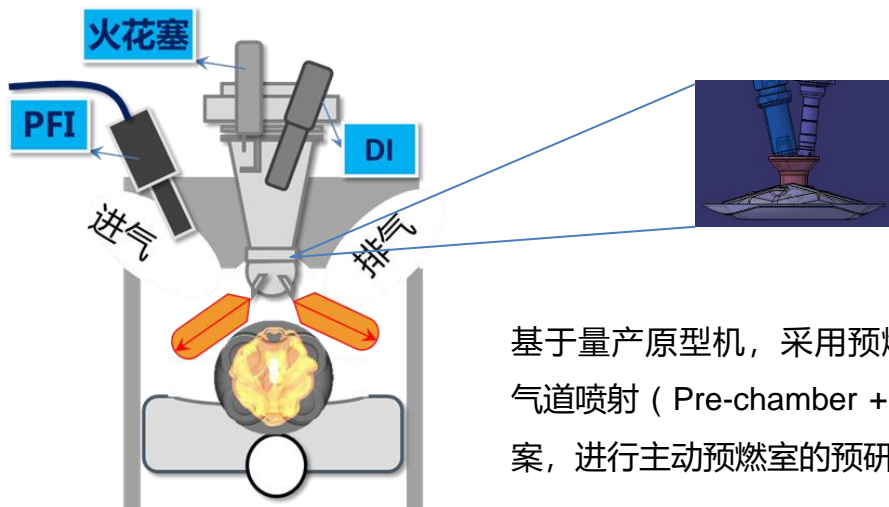
- 稀薄燃烧区域油耗改善明显, 高效率区域范围扩大;
- 2500rpm/11bar工况点, 在 $\lambda=1.8$, 复合增压模式下, 最佳热效率达到 **44.4%**



1260kg Sedan		
	NEDC	WLTC
Base Engine	-	-
Lean Engine	12.3% ↓	14.2% ↓



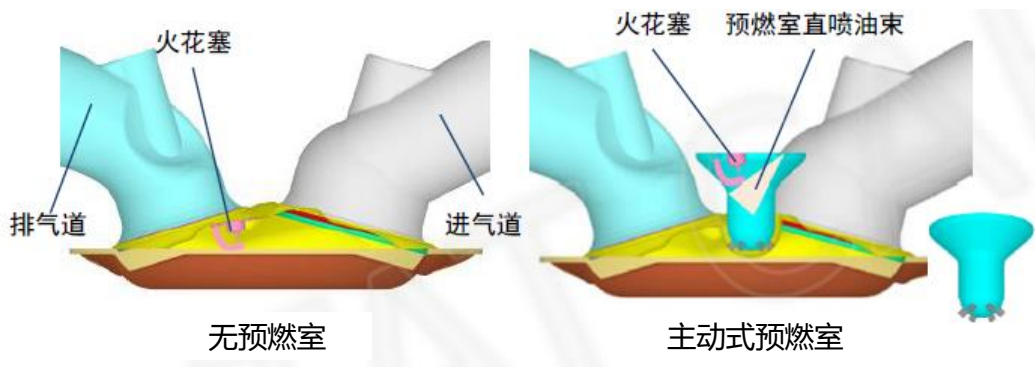
预燃室研究：



主动式预燃室系统图

基于量产原型机，采用预燃室直喷+气道喷射 (Pre-chamber + PFI) 的方案，进行主动预燃室的预研工作。

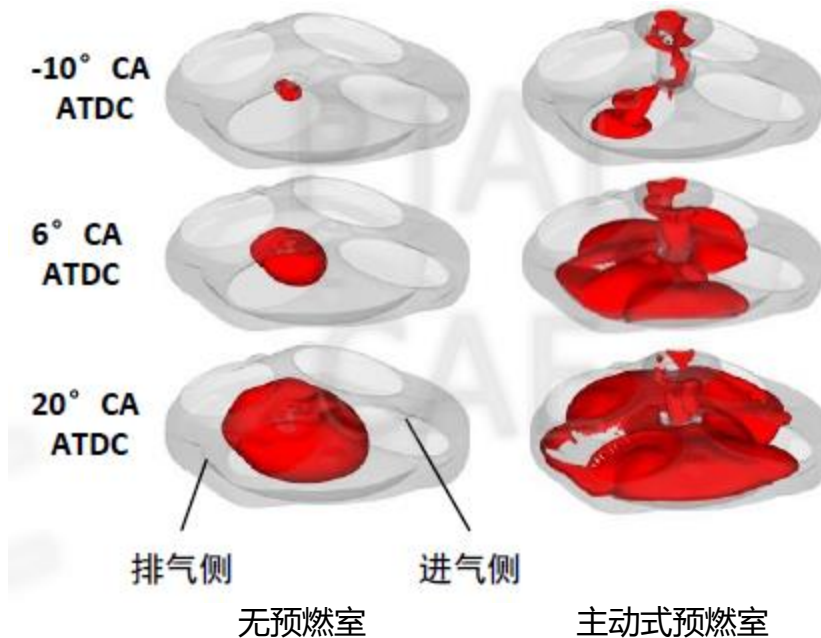
原型机与主动式预燃室对比图



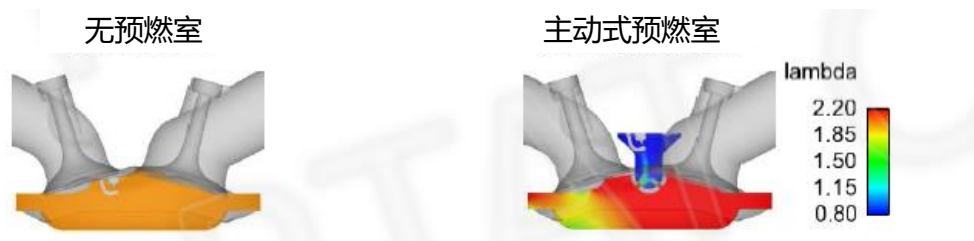
无预燃室

主动式预燃室

火焰传播过程对比



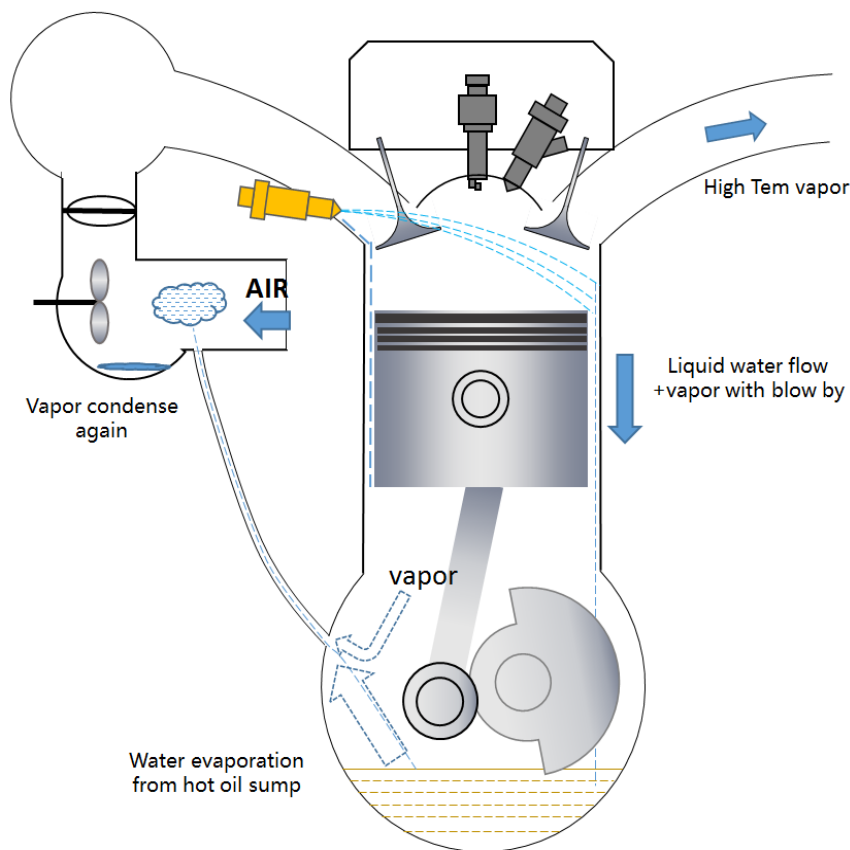
点火时刻附近(-25°CA ATDC) Lambda分布对比



当前主动式预燃室设计方案可实现射流火焰点火；相比于无预燃室，火焰传播速度更快，可提高稀燃的燃烧速率。

喷水研究： 发动机喷水技术是通过向进气道或缸内喷水，利用水蒸发吸热降低缸内温度来改善燃烧的技术，研究表明该技术可显著降低油耗，并提升发动机动力，同时降低氮氧化物排放。

水循环系统图



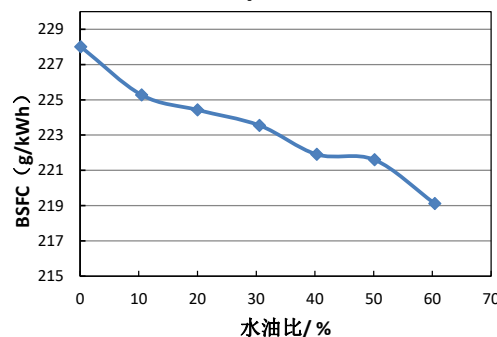
方案1



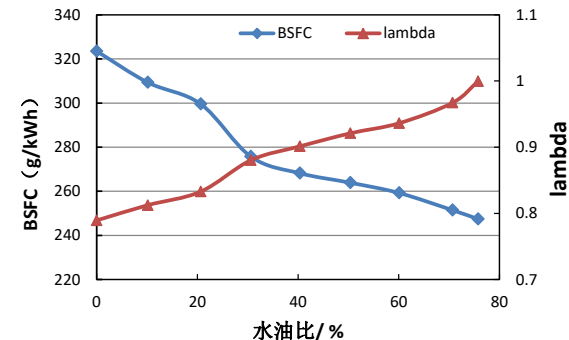
方案2



3000rpm@14bar

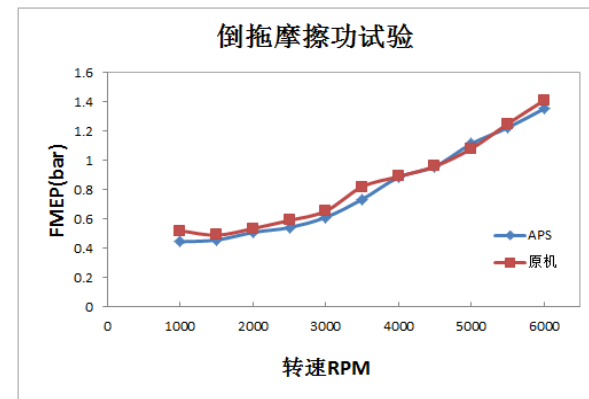
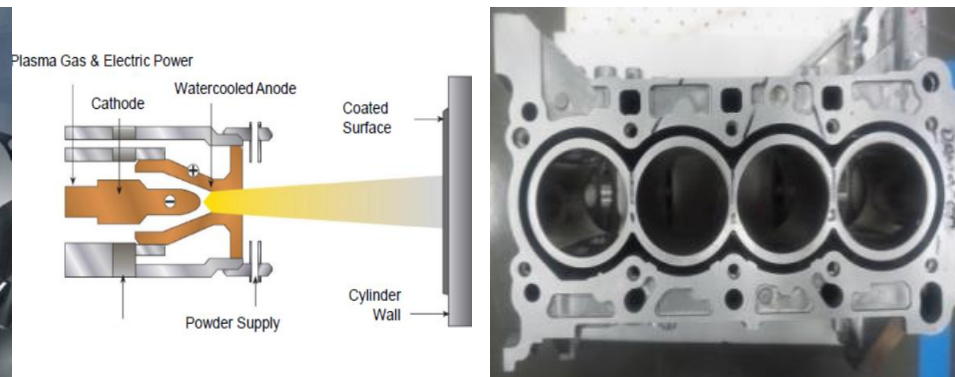
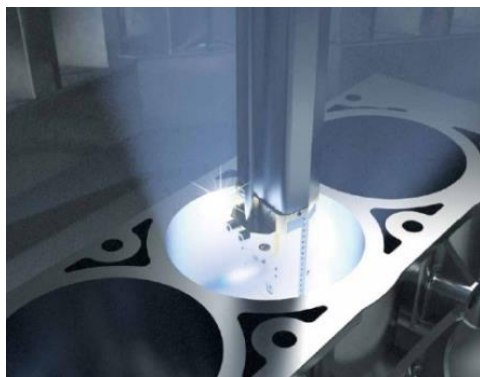


5500WOT



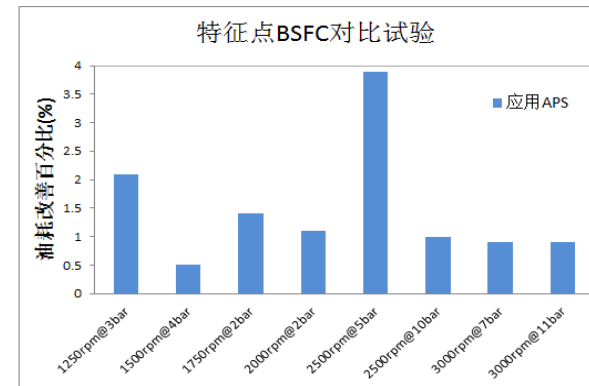
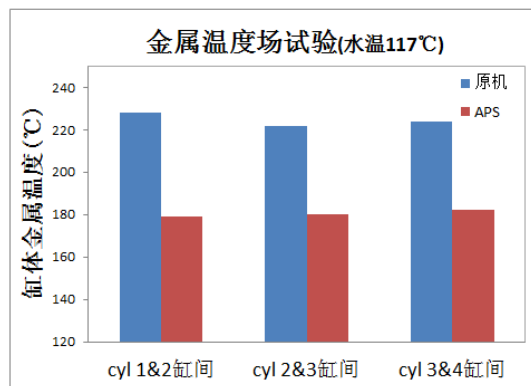
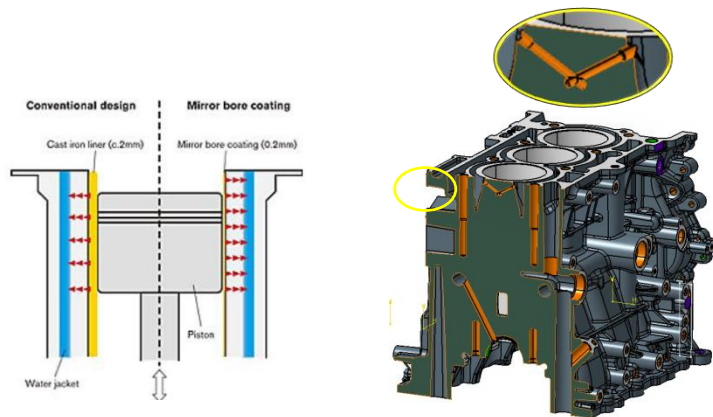
- BTE点3000rpm@14bar工况，喷水30%节油4.5g/kWh(≈2%);
- WOT可以取消燃油加浓，5500WOT，75%WFR，节油23.6%。

喷涂研究： 采用热喷涂工艺在铝合金缸体的气缸孔表面喷涂一层0.15-0.2mm涂层，替代传统气缸套，降低摩擦，降低缸体金属温度、改善燃烧，降低燃油消耗。



■ SAIC1.5T汽油机，采用缸孔等离子喷涂APS，降低缸体重量1.5Kg左右；

■ 低速区间，应用APS时FMEP较低；

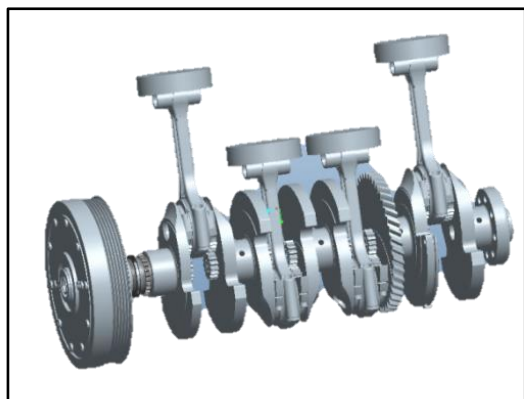


■ 缸孔APS+缸间斜水孔，缸体最高金属温度降低45°C左右；

■ 缸孔APS，特征点油耗平均改善1.5%；

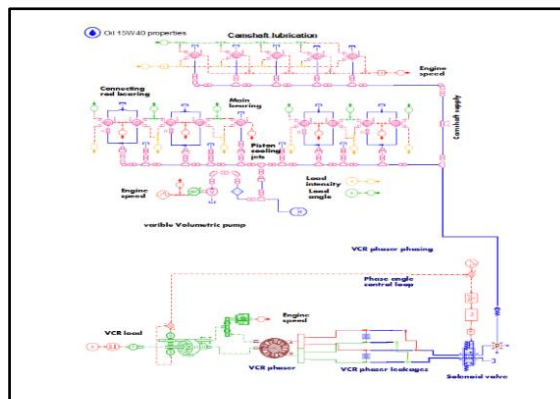
可变压缩比研究：自主开发了连续可变压缩比机构，试验样机已完成了功能开发及机构可靠性验证。

系统设计



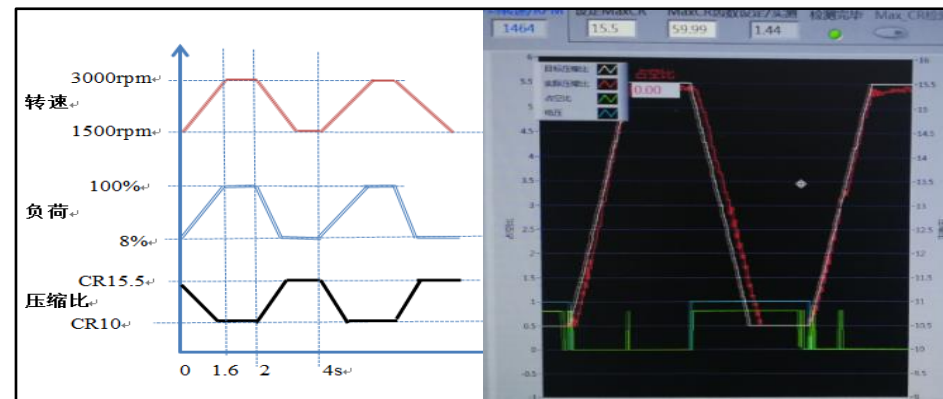
连续可变压缩比C-VCR机构

CAE分析



系统机电液耦合仿真

可变压缩比发动机试验验证



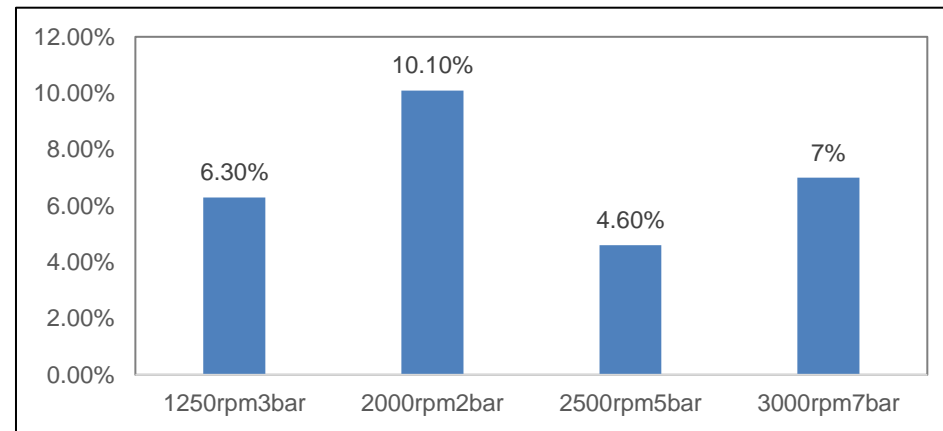
机构可靠性交变试验



C-VCR样机

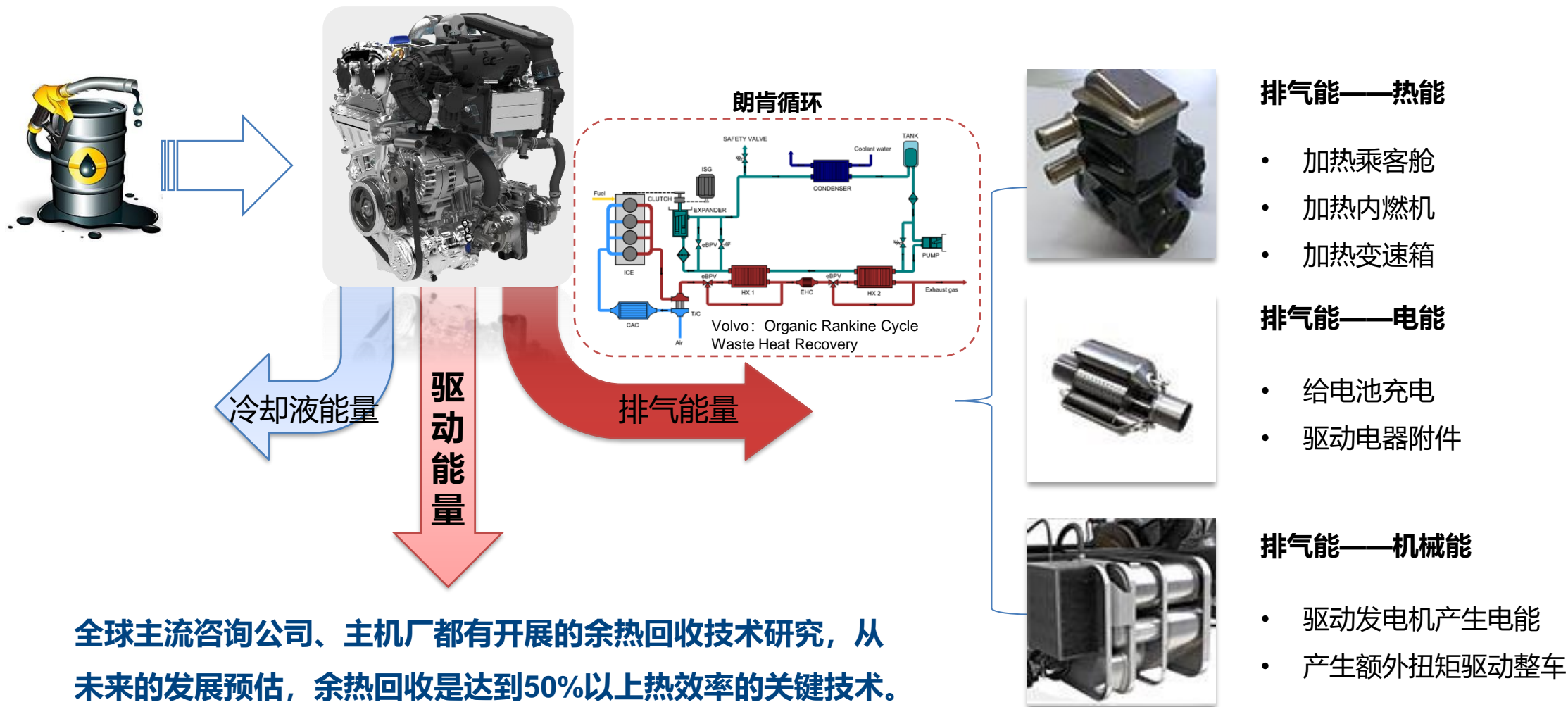


零部件结构有限元分析



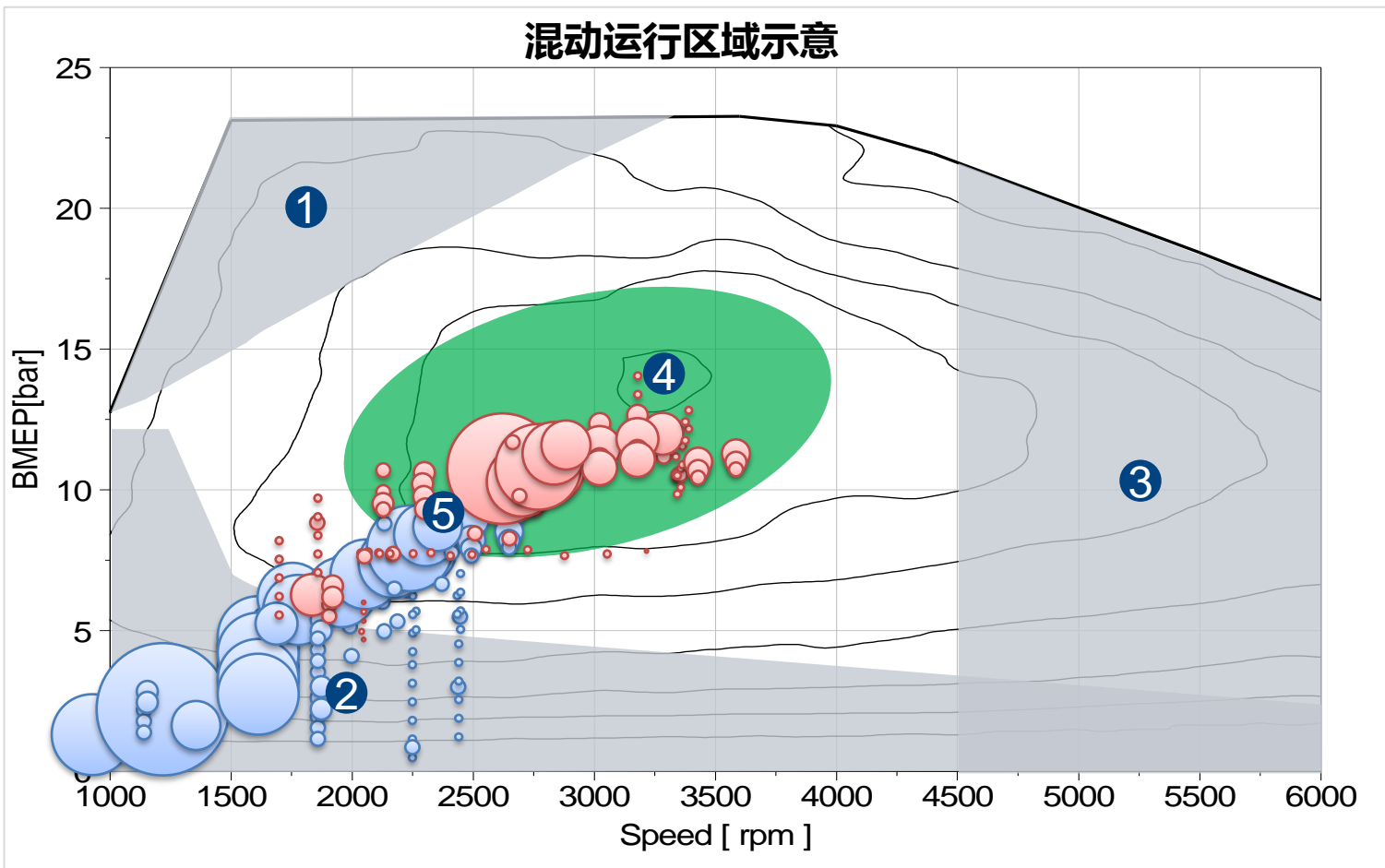
油耗收益验证

废热回收：内燃机固有特性所限，大量能量随着冷却液和排气散逸，废热回收是提高效率的关键潜在措施。



全球主流咨询公司、主机厂都有开展的余热回收技术研究，从未来的发展预估，余热回收是达到50%以上热效率的关键技术。

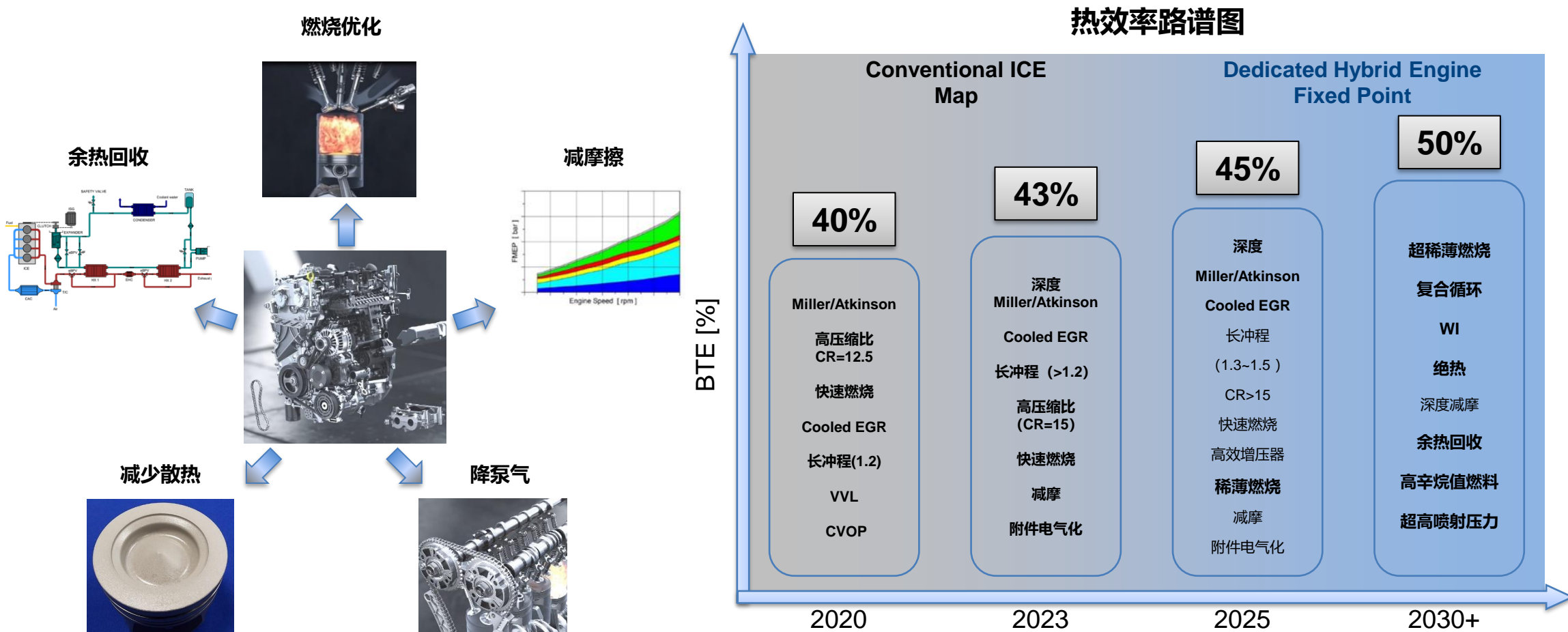
混动专用发动机：与传统内燃机开发兼顾动力性经济性不同，混动应用下的高效发动机可以轻松前行：



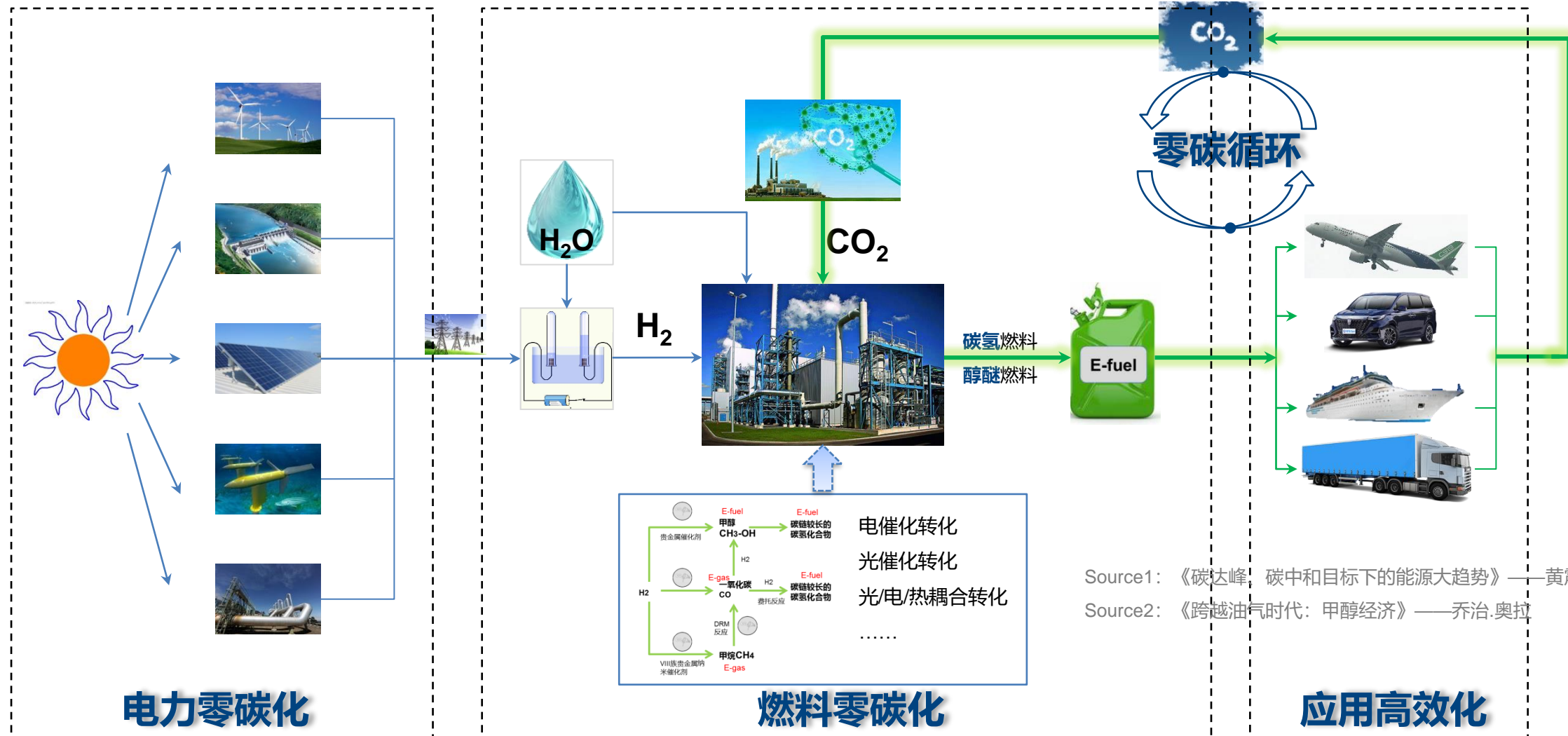
- 1 提高压缩比**
低速扭矩要求降低，爆震倾向降低，可以提高压缩比；
- 2 避开低效区、减少怠速油耗**
避开低负荷低效率区域，同时减少怠速，从而降低整车CO2排放
- 3 减重、减摩**
发动机转速需求降低，可以降低气门机构、旋转件质量，降低摩擦功
- 4 提高整机热效率、拓展高效区**
发动机常用区域为中间的高效区，针对此区域匹配高效增压器，提高整机效率。
- 5 优化策略，发动机运行在高效区**
通过混动策略优化，提高发动机在高效区的运行占比。

运行区域的简化为DHE的开发“减负”，与DHT的结合，既可提高系统综合效率，又能改善驾驶性。

- 进一步提升内燃机热效率的手段主要包括燃烧优化、深度减摩、绝热、余热回收等。
- 当前主流的三类燃烧技术 “高EGR率+当量比燃烧”、“稀薄燃烧+新型点火系统”、“汽油压燃”。



未来，随着低碳、零碳燃料的逐步成熟，作为能量转换装置，高效内燃机将为碳中和做出更大的贡献。



- 1 传统动力在乘用车上的挑战
- 2 乘用车动力系统的发展趋势
- 3 未来高效内燃机开发的思考
- 4 小结**

1

当前挑战

内燃机的发展面临着CO₂排放、能源安全、环保要求等诸多挑战，但电气化为内燃机的进一步发展提供了新的思路。

2

首要任务

对内燃机来讲，首要任务是提高热效率；在混动应用中需要优化硬件匹配和控制策略才能最大限度减少整车的CO₂排放水平。

3

未来出路

长期来看，在“碳中和”推进过程中，低碳、零碳燃料将逐步成熟，作为能量转换装置，高效的内燃机依旧会为CO₂减排做出重要的贡献。

4

持续创新

内燃机的发展是一个持续的、长期的工作，是对国计民生有重大贡献的事业，坚持创新是保证健康发展的必经之路。

感谢倾听!

Thanks for your attention!



联系方式

CONTACT US

☎ +86 021 6138 8359

✉ pingyinsheng@saicmotor.com

📍 上海市嘉定区安亭镇安研路201号