

氢发动机开发动向 —日本和欧洲企业的举措

文 | 全球汽车信息平台

氢发动机具备现有发动机技术与生产维修体系的适配性，现已投入实际应用，有望对脱碳产生立竿见影的效果。欧洲正致力于通过改装在用车辆的发动机等方式来尽早扩大氢能在卡车和建机领域的应用，而日本则在推进技术开发，旨在通过超越实用范畴的极限性能引领世界。

欧洲市场正在扩大实际应用领域的氢气使用量，以促进基础设施建设。2024年底IAA展会上亮相的GCW 40t商用车预定于2026年初由柴改氢大型厂商KEYOU开始量产（18t车型已量产），并计划交付给德国化工相关物流公司。KEYOU还试制了一款由100%氢发动机驱动的92t（载重量）自卸卡车，其联合开发合作伙伴小松目前正在日本进行路试。

日本以极限性能方面领先技术为目标，针对超越实用范畴的摩托车及赛车运动领域，确定异常燃烧对策以及氢能零部件开发等相关难点。代表性的案例是HySE（日本氢动力小型车发动机技术研究协会），其最新成果是在2025年达喀尔拉力赛中获得同级别第二名。HySE的赛车参加Mission 1000 ACT 2级别的比赛，该级别参赛车型包括纯电动车、氢能源车及其混合动力车。2025年参赛的五辆该级别赛车全部完赛，第一名是一辆经过专家改装成氢混合动力发动机的曼恩6×6卡车，第三至第五名则由赛格威电动越野摩托车夺得。

本篇报告介绍氢燃烧技术的各种开发方向，重点关注2025年日本汽车工程学会上的学术会议，该会议汇聚了来自日本和欧洲企业的多个演讲。

自日本和欧洲企业的多个演讲。

氢发动机发展历程及最新技术趋势

氢内燃机技术已进入实用化阶段，在商用车领域也被寄望先于燃料电池实现社会部署。这些动向和氢气的基本燃烧特性已经在以下报告中进行了介绍，并附有2023年日本汽车工程学会的学术演讲内容。

在欧洲可以看到旨在扩大氢发动机利用的政策，部分原因是出于发展基础设施的目的，首先从单车油耗远高于乘用车的重型商用车开始部署。三菱扶桑和日野合并的目的之一就是背靠戴姆勒卡车和丰田推动氢能技术开发。

近年来，日本汽车工程学会的学术会议上出现了许多来自日本和欧洲关于



HySE 氢动力赛车（出处：丰田）



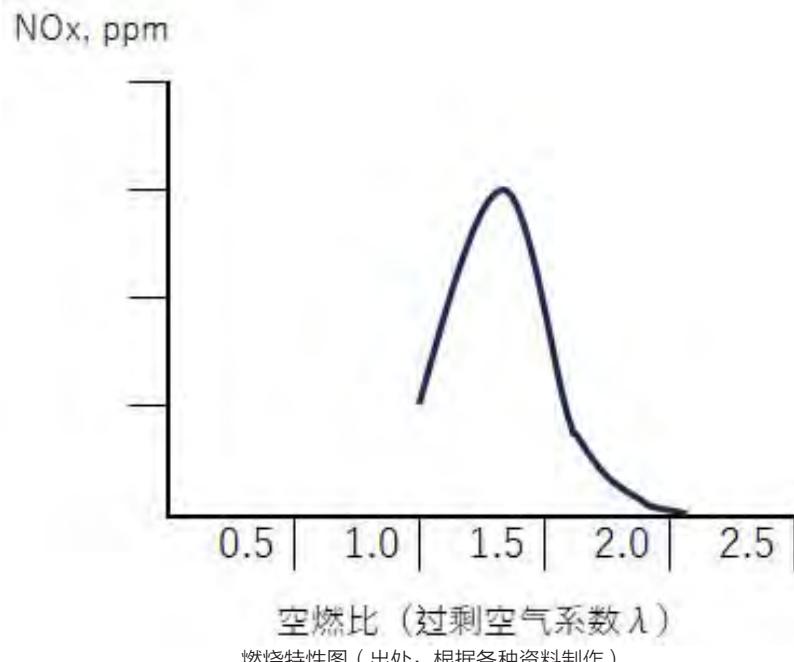
改装氢能的 GCW 40t 商用车（出处：KEYOU）

氢能应用的演讲，2025 年发动机领域的演讲数量增加一倍。此外，除了活跃于摩托车和赛车运动领域的 HySE（日本氢动力小型车发动机技术研究协会）及其会员企业丰田和铃木等公司外，日本和欧洲都在进行柴油替代用途的实验研究。

与汽车发动机性能相关的演讲展现了该研究领域的一些共性。后续章节将根据每个具备共性的领域，汇总介绍研究动向。

2024 年以后的演讲名称已在报告的“日本汽车工程学会氢能应用相关演讲”一章中列出，本报告提及的演讲编号以括号 [] 标注。

文中所使用的缩略语如下表所示。



燃烧特性图（出处：根据各种资料制作）

过剩空气系数 λ 的选择

由于氢气的基本燃烧特性，过剩空气系数一般根据氮氧化物生成特性选择为 $\lambda=1$ 或 2 以上，且一般避开 $\lambda=1.2$ 左右的峰值。

过去销售的宝马汽车采用了 λ 在 1~2 之间切换的系统，而丰田汽车也自 2025 年起在赛车运动中尝试采用同样的系统。另一方面，几乎所有其他测试研究都集中在 $\lambda \geq 2$ 的稀薄燃烧范

围，但在这种情况下，相对于输出功率而言，发动机尺寸和涡轮增压器等部件都很大。

也有研究试图摒弃该情况而选择 $\lambda=1$ ，2025 年就发布了一例 [006]。从图示来看热效率相当， $\lambda=1$ 的低泵损失（增压推动功）和稀薄燃烧的高比热容比相互抵消。 $\lambda=1$ 时存在相应的氮氧化物排放，因此本例中引入低压 EGR 延长燃烧时间以降低氮氧化物，

同时采用直接喷射防止回火。

稀薄燃烧情况下也考虑改装柴油发动机，但在这种前提下零部件及其布局位置会受到限制。编号 [181] 的演讲资料显示，在这种限制条件下，即使 $\lambda=2$ ，也有可能实现超越柴油的性能。通过提高输出功率的方法，包括优化喷孔，低压直接喷射，采用不伸入燃烧室的环形接地极的火花塞并结合 EGR，图示平均有效压力提高到了 23bar。

缩写	概念含义
λ	过剩空气系数，表示燃烧混合物中的氧气 / 燃料比与理论值的接近程度。如果超过 1，则燃料不足（稀薄）。如果 $\lambda=1$ ，则 EGR 不计算在内，因其不含有残留氧气。
ϕ	当量比， λ 的倒数，表示燃烧混合物中燃料 / 氧气比与理论混合比的比例。如果小于 1，则为稀薄。
Di	将燃料直接喷射到燃烧室（直喷）。
Pi	燃料被喷射到进气管（进气道喷射）。
IMEP	(如图所示) 平均有效压力，将其乘以活塞面积即可得出循环周期内的发动机爆发压力平均值。
MBT	最佳扭矩的点火提前角。
低压 EGR	EGR 系统将涡轮增压器的涡轮出口低压废气返回到同样低压的鼓风机入口。

异常燃烧检查

上文提到的稀薄燃烧示例 [181] 中，火花塞的 J 形接地极被认定为异常燃烧源头并得到了解决，但也有另外两个示例报告称异常燃烧是由点火系统引起。

[153] 文献检索确定了可能的潜在原因，基于汽油发动机测试和 CFD（计算流体力学）将原因缩小到了接地极温度。

[157] 研究发现，无论液化石油气发动机的转速或负载如何，发生回火的原因都是由异常放电和电极周围可燃浓度氢气意外积聚引起。

下表显示了 [153] 中如何识别异常燃烧常见原因的示例，该研究使用的方法是评估每一项因素并将其与解决对策联系起来。

此外，还有实验研究 [007] 重点关注延迟预点火对功率输出的限制效应，这种效应在连续使用的发动机中较为明显（在新发动机中每 100 次循环发生不足 1 次），并将其归因于燃烧室内的机油。模拟二手发动机状态，在进气管内注入发动机机油进行测试后发现，预点火的频率因机油品牌（比较了 32 种类型）的不同而存在很大差异，如果能够分辨这些化学差异，就有可能降低预点火的风险。另一方面，测试结果还需要在实际应用情况下进行评估，并在各种运行条件下进行进一步的测试。

燃料供应方式（Pi/Di 选项或喷水）研究

在燃料供应方式方面，Pi（进气道喷射）具有很大的优势，其混合气均匀，

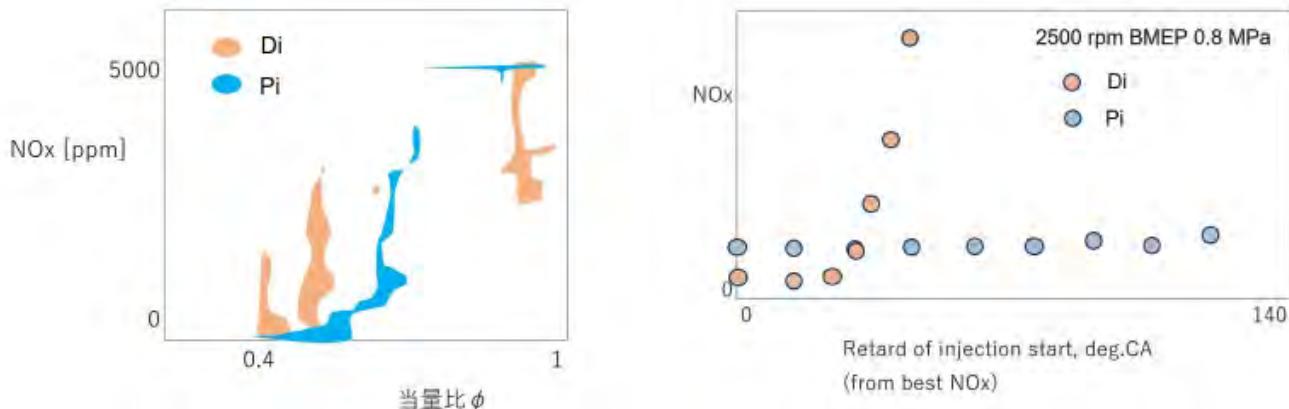
确保稳定燃烧，并且对现有发动机改装相对容易。另外，在示例 [002] 中，对 Pi 和 Di 各空燃比（图示为当量比）的氮氧化物排放量进行了比较，发现 Di（直喷）的燃烧不稳定性更为明显（左下图）。

另一方面，也有实验研究表明 Di 具有较大的优势，但高压喷射技术还不成熟，因此采用低压喷射。此外，通常可以通过实现像 Pi 这样的均匀混合气分布来避免异常燃烧。就 Di 而言，性能和废气成分对喷射系统非常敏感，因此喷射系统的选择至关重要。然而，也有资料 [010] 表明，通过研究并提高喷油器的喷射速率以提前完成喷射，可以显著提高热效率。

演讲 No.002 的氮氧化物测量结

Main factor	Sub-factor	Points to check
Hot-spot	Spark-plug	<ul style="list-style-type: none"> · Cooling design · Heat capacity of component · Surface materials · Structure (shape and position) of component
	In/ex. valves	
	Cylinder, Piston, Head Piston crevice	
	Oil deposits	High temperature & accumulated oil as combustibles
Hot residual gas	Variable Valve Timing	Contact between fresh mixture & residual gas
	Spark-plug crevice	Auto ignition of trapped hot gas
	Piston crevice	
Fuel injection strategy (Di)	Early start of injection	Contact between fresh mixture & residual gas
	Late end of injection	Insufficient mixing of hydrogen and air
	Induction in ignition cable Residual energy in ignition circuit	Insulation property of H ₂ gas tends to keep charge in circuit. Adoption of CDI or voltage release device recommended.
Abnormal electric discharge	Di spray & air motion characteristics	Distribution of local air/fuel ratio
Mixture distribution (Di)		

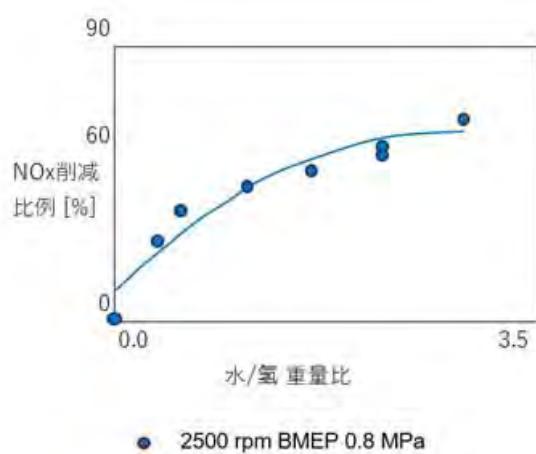
(出处：根据 No.153 演讲资料制作)



演讲 No.002 的氮氧化物测量结果, DI(橙色) 方式中, 即使空燃比(当量比 ϕ)相同, 氮氧化物排放量也有很大差异, 但 PI(浅蓝色) 方式中, 氮氧化物生成量与 ϕ 值之间存在很强的相关性。PI 在随时间变化的鲁棒性方面具有优势。

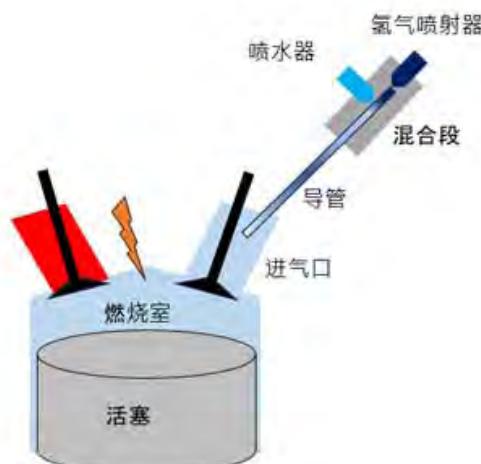
在演讲 No.006 中, 实际测量了氮氧化物对燃油喷射正时的敏感性, DI 受到的影响较大。虽然本次演讲主题是 $\lambda=1$ 时的实验研究, 但上图显示的是稀薄 (λ 未知) 时

(出处: 根据演讲内容插图制作)



根据 OPmobility 进行的实证测试, 即使考虑到氢气的轻质, 喷入的水量也是其两倍多, 氮氧化物的减排效果在 60% 左右就达到上限, 继续增加喷水量也不会再有效果, 因此无法取消 SCR 等氮氧化物后处理工序。(出处: 根据 No.008 演讲资料制作)

enable 与同志社大学联合开发的气液两相流喷射装置的概念图, 氢气和水混合后供给至进气口。如果氢气喷射压力过高, 经过混合段时喷水器中会发生回流, 因此需要足够高的水压来克服这个问题。(出处: 根据 No.009 演讲资料制作)



果, DI(橙色) 方式中, 即使空燃比(当量比 ϕ)相同, 氮氧化物排放量也有很大差异, 但 PI(浅蓝色) 方式中, 氮氧化物生成量与 ϕ 值之间存在很强的相关性。PI 在随时间变化的鲁棒性方面具有优势。在演讲 No.006 中, 实际测量了氮氧化物对燃油喷射正时的

敏感性, DI 受到的影响较大。虽然本次演讲主题是 $\lambda=1$ 时的实验研究, 但上图显示的是稀薄 (λ 未知) 时的轨迹。

还有报告发现向燃烧室供水的好处。汽油发动机中, 喷水用于抑制高增压发动机的爆震, 而氢气燃烧中也可通过降低压缩端温度、惰性气体延缓燃烧

反应的作用来实现防止预点火或爆震的稳定燃烧。OPmobility (彼欧) 正在研究卡车、轻型商用车和乘用车中喷水的效果 [008], enable 和日本同志社大学正在联合开发一种独特的气液两相喷射阀作为喷水装置 [009]。

日本汽车工程学会氢能应用相关演讲

除表格内容外，还有几项关于空气中的氮气置换为氩气的进气燃烧研究，但由于距离实际应用非常远，因此未计入表格中。

MFC

2024 年春季大会

主题领域	主要发表机构	演讲资料 编号	内容概要	测试发动机
零部件检测方法	现代、韩国科学技术院	046	高压储罐累积损伤度检测方法开发	---
发动机性能	AVL	068	净热效率 50% 的商用发动机开发	柴油机 13 升
发动机性能	OPmobility	075	应用于混动车的性能和排放优化	柴油机 2.2 升
开发方法和工具	FEV	163	进气流和冷却的设计方法，以优化功率输出和油耗	---
发动机性能	IAV	208	中型发动机进气流道 / 排气后处理装置的优化	柴油机
可靠性	东京都市大学 /MOTORA	283	润滑油中的冷凝水含量和发动机运行条件	柴油机 0.6 升（单缸）
发动机性能	东京都市大学 /HEET/ 川崎重工	314	通过分析直喷发动机的混合气形成过程来提高性能	柴油机 1.1 升（单缸）
发动机性能	东京都市大学 /HEET/ 川崎重工	315	直喷发动机的喷射压力和喷射形状导致的性能差异	柴油机 1.1 升（单缸）
卡车路试	金泽工业大学等	317	中型卡车实际行驶条件下的油耗与性能分析和评估	柴油机 5.1 升
发动机性能	荷兰国家应用科学研究院 (TNO)	318	大型单缸直喷发动机的性能和氮氧化物排放优化	柴油机 1.8 升（单缸）

(参考) 燃料电池相关演讲数量: 5

2024 年秋季大会

主题领域	主要发表机构	演讲资料 编号	内容概要	测试发动机
可靠性	东京都市大学 / 金泽工业大学等	098	中型卡车实际行驶条件下的润滑油含水量测量	柴油机 5.1 升
发动机零部件	东京都市大学 / 理研	099	活塞环规格研究	柴油机 8 升
前沿研究	早稻田大学	100	利用快速压缩机和 CFD (计算流体力学) 方法研究 CH4-H2 燃料的燃烧特性	---

(参考) 燃料电池相关演讲数量: 6

2025 年春季大会

主题领域	主要发表机构	演讲资料 编号	内容概要	测试发动机
评估方法	HySE	001	摩托车增压直喷发动机的异常燃烧可视化	汽油机 1.0 升
发动机性能	HySE	002	摩托车发动机的 DI/Pi 比较，喷射正时造成的氮氧化物差异	汽油机 0.1 升（单缸）
模拟创建	川崎重工	003	喷流模型创建和混合气形成过程验证	---
评估方法	HySE	004	快速压缩机内的燃烧温度分析方法开发	---
评估方法	HySE 等	005	摩托车发动机缸壁上的局部热通量测量	汽油机 0.1 升（单缸）

2025 年春季大会

主题领域	主要发表机构	演讲资料 编号	内容概要	测试发动机
发动机性能 / 可靠性	铃木 / AVL	006	摩托车 $\lambda = 1$ 增压直喷技术开发	汽油机 1.4 升
发动机性能 / 可靠性	AVL / 格拉茨技术大学	007	方法论；尽早解决氢气使用时的耐久性问题	柴油机 12.8 升
发动机性能	OPmobility	008	卡车、轻型商用车和乘用车的喷水效果	柴油机 7.7 升
发动机零部件	同志社大学 / enable	009	利用氢气 / 水气液两相流喷射阀抑制异常燃烧	---
发动机性能	东京都市大学 / 川崎重工	010	喷油器喷射速率对热效率的影响	柴油机 1.1 升 (单缸)
工程机械测试	东京都市大学 / 金泽工业大学等	150	挖掘机的尾气排放、油耗测量	柴油机 5.2 升
工程机械测试	金泽工业大学 / 理研 / 堀场 / 日本碍子等	152	柴油机改装端口喷射系统在工程机械上的热效率评估	柴油机 5.2 升
发动机性能	铃木	153	精准识别异常燃烧的原因	汽油机 1.4 升
评估方法	铃木	154	异常燃烧区域可视化及解决对策确认	汽油机 1.4 升
发电机测试	荷兰国家应用科学研究院 / NPS Driven B.V.	156	柴油机改装增压端口喷射系统在发电机上的性能评估	柴油机 13 升
发动机性能 / 零部件	丰田自动织机 / DIAMOND&ZEBRA ELECTRIC 等	157	LPG 改装发动机的异常放电对策、曲轴箱内通风	LPG 3.7 升
模拟创建	丰田自动织机 / 丰田中央研究所	158	一维燃烧分析的爆震模型构建与验证	汽油机 3.7 升
发动机性能 / 可靠性	IAV	181	商用车燃烧相关零部件选型	柴油机 1.3 升 (单缸)
可靠性(耗油量)	道达尔能源等	264	机油化学成分、消耗量和排放之间的关系	柴油机 7.7 升
可靠性(油水混合)	东京都市大学	272	乳化油的水分蒸发特性研究	---
(注) HySE: 日本氢动力小型车发动机技术研究协会 (参考) 燃料电池相关演讲数量: 4				