

缸内直喷氢燃料内燃机技术发展及趋势

孙柏刚, 包凌志, 罗庆贺

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081, 中国)

摘要: 氢能是实现碳达峰与碳中和的最佳能源形式, 也被誉为 21 世纪的终极能源。氢内燃机具有零碳排放、高效率、高可靠性和低成本的显著优势, 成为氢能应用的重要方向之一。缸内直喷氢内燃机可有效抑制回火, 并显著提高功率密度, 是氢内燃机现阶段的发展热点, 引发了国内外汽车企业和研究机构的高度关注。该文系统总结了各类氢内燃机的优缺点以及相关直喷氢内燃机的技术途径及其达到的技术指标, 采用废气涡轮增压可使氢内燃机的功率密度达到 80 kW/L, 采用高压缩比、稀薄燃烧可使有效热效率提升至 42% ~ 45%, 采用废气再循环技术等可使氢内燃机的唯一污染物 NO_x 降低至 0.5 g/kWh, 并具有达到近零排放的潜力。该文也针对下一代缸内直喷氢内燃机所带来的新问题, 从混合气形成、燃烧特性、燃烧模式、有效热效率提升、NO_x 控制方法及后处理器等技术角度分析了开发现状及技术水平, 探讨了近零排放条件下有效热效率达到 50% 的未来技术发展趋势。

关键词: 氢内燃机; 直接喷射; NO_x 排放; 有效热效率; 稀薄燃烧; 后处理

中图分类号: U 464.9

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2021.03.001

Development and trends of direct injection hydrogen internal combustion engine technology

SUN Baigang, BAO Lingzhi, LUO Qinghe

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Hydrogen energy is the best energy carrier to achieve carbon peak and carbon neutrality, and is also regarded as the ultimate energy source in the 21st century. The hydrogen internal combustion engine has the significant advantages of zero carbon emission, high efficiency, high reliability and low cost, which makes it one of the important directions for hydrogen energy applications. The direct-injection hydrogen internal combustion engine, which can effectively suppress backfire and significantly increase power density, is a hot topic in the recent stage of development of hydrogen engine. It has attracted much attention from traditional automobile companies and research institutes at home and abroad. This paper systematically summarizes the advantages and disadvantages of various types of hydrogen internal combustion engines as well as the technical approaches and the details of the relevant hydrogen engines. The utilize of exhaust gas turbocharging can make the power density of hydrogen internal combustion engine reach 80 kW/L. High compression ratio and lean burn combustion can reach the brake thermal efficiency to 42% ~ 45%, and the exhaust gas recirculation

technology can reduce the NO_x pollutant of hydrogen engine less than 0.5 g/kWh. The paper also addresses the new issues posed by the next-generation direct-injection hydrogen engine, analyzing the current state of development and the technical details including mixture formation, combustion characteristics, combustion mode, effective thermal efficiency improvement, NO_x control methods and post-processors. We also discuss the future technological development trend of reaching 50% brake thermal efficiency under near-zero emission working conditions.

Key words: hydrogen internal combustion engine; direct injection; brake thermal efficiency; lean-burn combustion; exhaust post-processing

中国已提出二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和, 这就必然要求优化调整产业结构、能源结构, 加快构建过渡到清洁可再生能源为主的能源发展新格局。氢能因为来源多样、清洁低碳、灵活高效、应用场景丰富等众多优点, 被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源。氢能已成为全球新一轮碳减排和碳中和的首选方向, 被多个国家纳入能源战略部署中。中国政府站在能源安全和可持续发展的战略高度, 把氢能列为中国重点发展的战略性新兴产业, 也作为培育发展新动能、引领发展方式转变的未来重要产业。

氢能的利用方式主要有燃料电池和氢内燃机 2 种。燃料电池具有效率高、零排放的优点, 但其技术难度

大、成本高、对配套体系建设依赖强。氢内燃机保留了传统内燃机的主要结构和系统, 可以利用工业副产氢气, 通过燃烧方式转化能量达到与燃料电池相近的热效率, 并具有低成本的显著优势。在汽油机或柴油机的基础上, 仅需更换氢气供应及喷射系统、氢气专用冷型火花塞、匹配新涡轮增压器、对润滑和曲轴箱通风进行相应的适应性设计, 就可以实现氢内燃机应用^[1]。因此, 氢内燃机是推动传统内燃机各种应用领域转型升级、助力碳达峰和碳中和的重要技术方向。

1 氢内燃机

1.1 氢气物理性质

表 1 氢气和其他燃料物理特性比较

特性	氢气	甲烷	汽油	柴油
碳含量, $w / \%$	0	75	84	86
低热值 / ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	119.7	45.8	44.8	42.5
密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.089	0.72	730~780	830
体积能量密度 / ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	10.7	33.0	33×10^3	35×10^3
自燃温度 / K	858	813	~623	~523
辛烷值	130	130	92~98	25
空气中最小点火能量 / mJ	0.02	0.29	0.24	0.24
当量空燃比	34.5	17.2	14.7	14.5
当量比下体积分数, φ	0.2953	0.0948	~0.02	-
淬熄距离 / mm	0.64	2.1	~2	-
空气中层流燃烧速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.85	0.38	0.37~0.43	0.37~0.43
空气中扩散系数 / ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	8.5×10^{-6}	1.9×10^{-6}	-	-
空气中燃烧极限, $\varphi_a / \%$	4~76	5.3~15	1~7.6	0.6~5.5
燃烧极限 (过量空气系数)	0.2~10	0.7~21	0.4~1.4	0.5~1.3
绝热火焰温度 / K	2 480	2 214	2 580	~2 300

氢气具有质量热值高、燃烧速度快、扩散性好、可燃浓度范围广等优点, 是非常合适的内燃机替代燃

料。相比于汽油机, 氢气燃烧速度快, 更类似于定容燃烧, 因此燃烧效率高。氢气自燃温度为 858 K, 不易

被压燃, 点燃式就成为氢内燃机最简单、最可控的燃烧方式。氢气的辛烷值为 130, 燃料抗爆性好, 因此氢内燃机可以采用比汽油机更高的压缩比来提高热效率。然而氢气密度小, 在有限的空间内需要采用液氢或 35、70 MPa 的高压进行储存, 燃料携带不够方便。

1.2 直喷氢内燃机优势

直喷氢内燃机按喷射压力可划分为高压直喷和低压直喷, 低压直喷的喷射压力通常在 1.5 ~ 6 MPa, 而高压直喷一般大于 10 MPa。

缸内直喷消除了氢气占用气缸容积的问题, 大幅提升了氢内燃机的动力性^[2], 氢内燃机化学当量比混合气热值由 2.98 MJ/m³ 提高到 4.23 MJ/m³, 而汽油机只有 3.81 MJ/m³, 如图 1 所示, 直喷氢内燃机理论上相比于同排量的汽油机可以提高 17% 的动力性。

相比于进气道喷射, 直喷氢内燃机可以在进气门关闭后再喷射, 避免氢气回流进入进气道导致回火。在相同工况下, 直喷氢内燃机可以采用更稀薄的燃烧方式, 从而降低了泵气损失, 提升热效率。进气道喷射

与缸内直喷的比较见表 2。

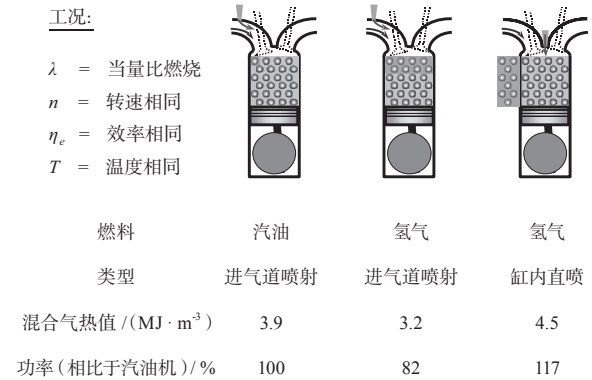


图 1 直喷氢内燃机动力性比较^[3]

1.3 直喷氢内燃机研究成果

表 3 为近年来国内外研究机构开发的直喷氢内燃机机型和性能排放参数。从表 3 中可以看出, 直喷氢内燃机总体热效率都大于 35%, 在稀燃条件下的热效率大于 40%。

表 2 不同氢气喷射方式内燃机特点比较

氢气喷射方式	进气道单点喷射	进气道多点喷射	低压缸内直喷	高压缸内直喷
喷射时刻	进气冲程初段	排气冲程末段或进气冲程初段	压缩冲程初段	压缩冲程初段至接近压缩上止点
喷射压力/MPa	0.5~3.0	0.5~3.0	1.5~6.0	> 10.0
能量密度变化	损失 30%	损失 30%	提升 20%	提升 20%
异常燃烧	高风险回火	低风险回火	无回火	无回火
混合气形成	易形成不均匀混合气	易形成均匀混合气	混合气基本均匀	混合气均匀或分层, 可调控
特点	升功率低、异常燃烧风险大	升功率低、有异常燃烧风险	升功率低	升功率高、效率高、喷嘴要求高

表 3 直喷氢内燃机样机参数及性能指标

序号	研究机构	年份	参数	典型性能指标	技术	氮氧排放
1	宝马汽车公司 ^[4]	2004	单缸 0.5 L	当量比燃烧负荷可达 1.4 MPa, 有效热效率 30%	合适点火、压缩比 12	外特性点原始排放可达 600 ppm
2	丰田汽车公司 ^[2]	2006	单缸 0.85 L	0.95 MPa@1 200 r/min, 最高有效热效率 38.9%	优化喷射相位	热效率点排放为 400 ppm
3	日本武藏工业大学 ^[5]	2009	六缸 7.68 L	3 000 r/min, 147 kW	压缩比 13 + EGR + 后处理系统	日本 JP05 循环排放小于 0.5 g/kWh
4	丰田汽车公司 ^[6]	2010	四缸 2.2 L	0.8 MPa @2 000 r/min 有效热效率 43.8%	分层扩散燃烧 + EGR	效率点排放 0.35 g/kWh, 满足欧六排放标准
5	日本东京城市大学 ^[6]	2010	单缸 1.0 L	0.85 MPa@1 000 r/min 指示热效率 41%	合适的燃烧策略 + 压缩比 13 + EGR	热效率点 NO _x 0.7 g/kWh

续表

序号	研究机构	年份	参数	典型性能指标	技术	氮氧排放
6	美国阿贡国家实验室 ^[7]	2012	单缸 0.66 L	1.41 MPa@2 000 r/min 最高有效热效率 45%	喷嘴 CFD 优化 + 压缩比 12.9 + 机械增压	2 000 r/min, 1.0 MPa, 3 000 r/min, 0.6 MPa 以下的工况排放小于 0.1 g/kWh
7	日本东京城市大学 ^[8]	2018	四缸 4.7 L	400 Nm@1 500 r/min 最大扭矩 0.8 MPa@1 600 r/min 有效热效率 40%	可变频压缩比 12.7 ~ 18.0 + 冷 EGR + 后处 理系统	日本 JP05 循环排放 小于 0.2 g/kWh
8	日本可持续能源研究中心 ^[9]	2019	单缸 1.3 L	150 Nm@1 000 r/min 指示热效率 50%	EGR + 压缩比 12.9 + 机械增压	功率点排放小于 0.36 g/kWh
9	博世公司 ^[10]	2020	四缸 2.0 L	升功率 83 kW/L, 升扭矩 191 Nm/L, 有效热效率 39%	涡轮增压 + 稀薄燃烧	1.2 MPa 以下的工 况, NO _x 排放小于 0.1 g/kWh

注: ppm = 10⁻⁶; EGR: exhaust gas recirculation, 废气再循环。

1.4 直喷带来的新问题

1) 直喷后最高燃烧压力增加, 燃烧速度加快, 内燃机承受高机械负荷和热负荷的能力受到考验^[4]。

2) 考虑到直喷氢内燃机工作的过量空气系数范围广, 燃烧和氮氧排放都对过量空气系数的变化敏感, 因此, 工作过程中热效率和排放存在着强烈的相互制约关系。

3) 氢气缸内直喷喷嘴对流量、密封和耐久特性要求高。

4) 直喷氢内燃机混合时间短, 影响排放、效率和燃烧的稳定性。

5) 直喷氢内燃机中的控制策略复杂, 若喷射相位不合适, 排气中的未燃氢会增加 6 倍, 热效率也会随之下降^[11]。如图 2 所示, 直喷氢内燃机在不同负荷下都对对应着不同的喷射和点火策略, 因此喷射压力、相位、喷嘴结构都会影响混合气的形成进而影响燃烧排放。

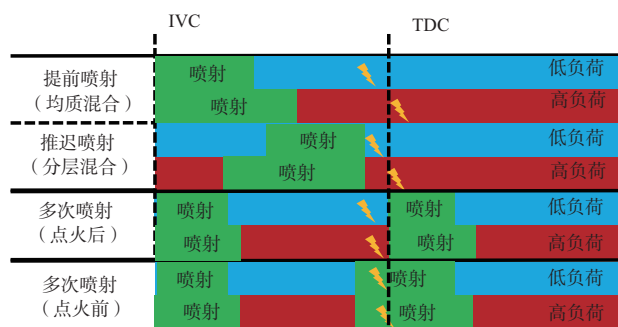


图 2 直喷氢内燃机喷射及点火策略^[12]

2 混合气形成研究

直喷氢内燃机的工作过程是一个多参数耦合的问

题, 首先喷射压力和喷嘴结构决定喷雾形状和喷射速率; 喷射相位和缸内气体流动主导缸内混合气形成及分布; 火焰形成取决于点火的位置、点火时刻和火花塞附近混合气的分布; 燃烧品质和浓度直接影响 NO_x 排放。因此, 混合气形成过程需要从氢气喷嘴、喷雾和缸内氢-空气作用多角度分析。

2.1 直喷喷嘴研究

直喷喷嘴的设计应使足够量的氢气喷入气缸, 并与空气充分混合。按超临界流体力学方程推算, 只有当喷射压力超过背压的 0.53 倍, 喷射流量才与背景压力无关。

$$\frac{p_k}{p_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

其中: p_k 为喷射压力, p_0 为背景压力, γ 为氢气的绝热指数。

直喷氢内燃机的氢气喷射通常发生在进气门关闭后, 此时喷射的背景压力会随着气缸容积的变化呈指数升高, 因此, 为保证喷嘴的流量并减少氢气储罐内剩余氢气量, 延长车辆续航里程, 直接喷射氢气的压力范围通常为 1.5 ~ 30 MPa^[4, 13]。

高压氢气喷射研发的关键技术难点主要有以下 7 点^[14-15]:

1) 氢气密度小, 喷射压力高, 喷射需求的流量大, 需要针阀开启能力强、针阀行程大;

2) 氢气气体分子小, 扩散性强, 能渗透一些压电晶体喷嘴使用的环氧材料, 并致其脱落, 从而存在密封问题;

- 3) 氢气会腐蚀一些表面涂层材料;
- 4) 氢气无法润滑喷嘴, 对摩擦设计提出更高要求;
- 5) 氢气流体粘度低, 喷嘴内部运动部件阻尼低, 针阀接触阀座时振动幅度大、冲击力强, 易发生共振, 会导致装配失效、零件磨损;
- 6) 氢气燃烧会生成大量水分, 喷嘴头部材料需要进行防锈防水处理;
- 7) 氢气多次喷射需要喷嘴具有快速的动态响应和强抗干扰能力。

按出口截面形状划分, 缸内直喷氢气喷嘴有多孔式、开环式和混合式 3 种^[16]; 按驱动方式划分, 有电子液压驱动、电磁阀驱动和压电晶体驱动 3 种^[13]。若采用现有的商用汽油或天然气喷嘴直接喷射氢气, 不仅流量达不到功率要求, 且喷嘴的密封性和耐久性能也很差^[17]。

纽伦堡大学研制的商用低压氢气直喷喷嘴, 喷射压力仅为 0.85 MPa, 采用电磁阀驱动, 氢气流量可达 1 mg/ms, 泄漏速率为 0.2 ml/min^[18]。由于喷射压力低, 其喷射窗口受缸内压缩压力的影响, 单只喷嘴仅提供 7.5 kW 的功率输出。此款喷嘴采用了耐氢的类金刚石碳涂层, 经历了 1 000 万次喷射的耐久性考核, 发现金刚石碳涂层在氢气环境下表现出很好的耐磨特性, 其流量和密封特性均无明显变化。贺尔碧格公司采用的电磁阀驱动直喷喷嘴, 最高喷射压力可达 30 MPa, 最大氢气流量为 2 mg/ms, 其喷孔数量和喷孔直径均可变。

丰田公司开发的液压电磁阀喷嘴, 最高喷射压力可达 30 MPa, 对与氢气接触的阀座和密封圈都进行了高精度加工及硬化处理, 每循环可喷入 300 ml 的氢气^[6]。东京城市大学自主研发的五孔高压氢气喷嘴, 采用电子液压驱动的方式, 与电磁阀相比, 具有更快速的响应能力, 最高喷射压力为 20 MPa, 最大喷射流量折合计算可达 21 mg/ms^[15, 19-20]。喷嘴的泄漏速率小于 100 ml/min。该喷嘴还进行了 700 h 的耐久性考核试验, 结果发现阀座的密封能力在 700 h 内没有明显变化。但是该喷嘴还需要利用一个高压共轨系统控制驱动油压, 当喷射压力为 20 MPa 时, 驱动油压需要达到 120 MPa, 因此外围系统比较复杂。

西港公司^[14]专门开发了一款直喷氢气喷嘴, 采用压电晶体驱动方式, 驱动电压为 1 kV, 最大喷射流量在 10 MPa 的供氢压力下为 6 mg/ms。测试发现执行器的环氧涂层材料因长时间接触氢气而磨损, 不过压电晶体的陶瓷材料则没有变化, 其喷嘴寿命能达到 200 h。博世新推出了一款基于汽油喷嘴改进的高压外开环式氢

气喷嘴, 采用压电晶体的驱动方式, 驱动电压为 200 V, 为保证氢气流量, 扩展了喷嘴截面的面积, 其最高氢气喷射压力可达 25 MPa, 10 MPa 时喷射流量可达 1.8 mg/ms^[21]。

综上, 电磁阀驱动喷嘴改造难度最简单, 但相对流量较小; 电子液压驱动氢气喷嘴流量大, 针阀行程大, 但开关响应慢; 压电晶体驱动喷嘴响应最快, 且相对流量大, 可承受更高的喷射压力, 但成本较高。

2.2 直喷喷嘴喷雾特性

直喷喷嘴喷雾特性的测试方法主要有: 纹影法、粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 和激光诱导荧光法 (laser induce fluorescence, LIF)。纹影法可以测试喷雾形状、贯穿距和喷雾锥角; PIV 用于测试喷雾场的流速; LIF 则可以测量喷雾的形状和局部空燃比。

研究发现, 不同于天然气喷射, 外开环式的高压氢气喷射结构在近场为锥状, 在远场则变为球状。在同样的喷射压力和脉宽下, 孔式的高压氢气喷射贯穿距离也比天然气长, 流速也更快^[22-23]。此外氢气的贯穿距对喷孔直径更加敏感, 而与喷射压力无关。T. Wallner 比较了 13 孔、喷孔直径 0.38 mm、60° 锥角与 5 孔、喷孔直径 0.62 mm、100° 锥角的 2 种喷嘴喷雾形态的差距。2 种喷嘴的总喷孔面积相同, 理论上 5 孔喷嘴的贯穿距离更大, 但是由于锥角增加后与壁面作用增强, 导致贯穿距离减少^[24]。T. Shudo 研究了多次喷射后氢气喷雾的变化, 采用分段喷射后^[25], 当多次喷射的燃料占比为 7:3 时, 喷雾有向更宽区域扩散的趋势; 当燃料比为 3:7 时, 多次喷射则同时减弱其径向扩散和轴向贯穿, 可以利用多次喷射控制缸内氢气的空间分布。

2.3 混合气形成过程研究

直喷氢内燃机中, 采用激光诱导荧光 (LIF)、粒子图像测速 (PIV)、和火花引入激光诱导击穿光谱法 (spark-induced breakdown spectroscopy, SIBS) 技术可以测试不同曲轴转角下混合气的形成情况, 测量火花塞周围的浓度分布。考虑到氢气特殊的物理化学特性, 这些测试方法还需要进行修正。

氢气是双原子分子, 结构稳定, 难以被激发出荧光, 使用平面激光诱导荧光技术时, 需要在氢气中掺入示踪粒子如丙酮、三甲胺和三乙胺^[26], 其中最常用的是丙酮, 主要因为其饱和蒸气压高, 在 10 MPa 的氢气中可掺混 0.33% 浓度的丙酮, 发出的荧光效率对温度的依赖性适中, 且发射光谱部分在可见光区。测量丙酮的荧光信号并经过温度修正可得到混合气浓度

分布的结果^[27], 考虑到混合不均匀等不确定因素, 这种测量方法得到的过量空气系数的误差最高为 25%^[28]。利用 PIV 测量缸内速度场的分布时, 为保证与氢气的流动跟随性, 选用公称直径为 1.8 μm 的 SiO_2 粒子作为示踪粒子, 并借助 Nd:YAG 532 nm 的激光激发^[29]。SIBS 利用紫外石英光纤传输激光, 并在点火时刻激发等离子体, 形成火花。由于可以借助原有的火花塞作为光源和光纤通道, 不需要对内燃机进行任何改动就可以直接测量点火时刻火花塞周围的局部空燃比, 且测试范围广, 可以量化氢气的分层现象^[30]。但是这种测量方法对点火时刻的缸内压力变化十分敏感, 不同工况下都需要依据缸压从新修正。

研究发现, 缸内氢-空的混合状态与喷射相位、喷嘴位置(侧置/中置)、喷嘴孔数、喷嘴结构和喷射压力直接相关, 并受到缸内湍流的影响。

S. Kaiser 在一台 0.5 L 的光学发动机上比较了 1 200 r/min 总体过量空气系数 1.8 工况下, 喷射相位(start of injection, SOI) 分别为 CA -112° 、CA -90° 和 CA -77.5° 的点火时刻时缸内浓度的分布^[29]。如图 3 所示, 喷嘴安装于视窗位置的正上方, 比较可以发现, 当喷射相位为 CA -112° 时, 缸内的混合气形成的十分均匀。而稍微推迟即采取中段喷射喷射时: 缸内混合气一部分呈现过量空气系数 $\lambda = 2.5$ 混合浓度, 一部分出现在 $\lambda = 1$ 的浓度, 同时中喷可以使氢气的主要分布分布离开壁面, 从而减少传热, 提高效率。推迟喷射时: 点火时刻处尚处在混合的阶段, 缸内大部分还是为 $\lambda = 3$ 的区域, 而靠近喷嘴出口区域的 λ 达到了 0.5。

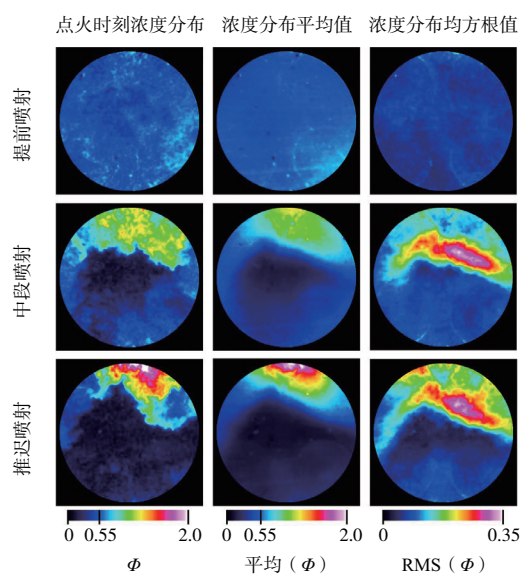


图 3 不同喷射相位下点火时刻时缸内混合情况^[29]

提前喷射的策略能保证缸内气体均匀混合, H.

Rottengruber 发现确定提前的时间主要与喷射压力有关。采用 15 MPa 单孔喷嘴在上止点前 CA 40° 喷射, 到点火时刻上止点时已经可以形成非常均匀的混合气^[4]。此外提高喷射压力后, 缸内的湍动能增加, 贯穿距加长, 高压氢气射流与上行活塞作用, 若为多孔喷嘴, 气流与气流之间还会相互作用^[31], 这样有利于氢气的扩散。因此高喷射压力也有利于均质混合气的形成。

V. Salazar 发现若混合气出现不均匀现象时混合气浓区和稀区之间存在着明显的浓度变化梯度, 在速度场分布中表现为湍流峰^[32]。而这个湍流峰会中心出现一个回流的区域, 抑制氢气的流动。研究还发现存在缸内滚流和喷射干涉现象, 同样会抑制氢气射流的贯穿, 使得喷嘴附近的浓度很高。

利用纹影和 LIF 测试的结果可以对喷雾和混合的数值模拟进行修正。R. Scarcelli 测试了从活塞顶部到斜屋顶燃烧室共 5 个平面的混合气分布, 试验结果可用于校核仿真模型, 标定湍流系数, 并测量火花塞附近浓度, 评估喷射策略的优劣^[33]。T. Wallner 发现仿真多孔喷嘴时, 由于射流之间会存在干扰, 因此其仿真精度最差。高文治利用仿真研究发现, 混合气形成不均匀度在喷射相位(SOI) 早于 CA -88° 时变化很小, 此时缸内有充足的时间形成均质混合气, 而喷射时刻晚于 CA -88° 时, 缸内分布迅速呈现分层现象^[34]。A. Hamzehloo 利用仿真比较了长时间喷射, 可以增加缸内湍动能, 可以在更稀燃的条件下, 燃烧的更充分。早喷预混好, 但是火花塞附近湍流度很低; 晚喷压缩压力高, 火花塞附近的湍动能大, 有利于燃烧, 但易在喷嘴附近形成过浓混合气导致排放过高^[35]。

综上, 直喷氢内燃机缸内最理想的混合气形成情况应该高湍流度的缸内均质混合气, 高喷射压力和合理的多次喷射可以促进理想混合气形成。

3 直喷氢内燃机燃烧特性

3.1 燃烧测试方法

氢内燃机燃烧光学测试方法主要有阴影法、纹影法、光学发动机直拍、紫外光内窥镜、和激光诱导荧光(LIF), 这些方法可用于测试缸内火焰发展速度和形态、分析氢气燃烧过程及燃烧产物的分布。

M. K. Roy 等利用光学发动机直拍研究了分层喷射的火焰燃烧情况^[36]。氢内燃机火焰最开始呈现白蓝色, 火核初期呈球形, 随着火焰的发展, 火核出现褶皱现象。此外缸内一些额外的亮点, 主要是由烧机油导致的。火焰面积和二次导数变化还能直接反应火核的发

展及火焰传播。与汽油相比, 氢的火焰形状更接近球形, 氢气的燃烧速度更快, 火焰受到缸内流动的影响较小, 因此氢内燃机缸内循环变动也更小。S. Tanno 利用缸内内窥镜和电荷耦合器件 (charge coupled device, CCD) 相机对不同喷射压力的直喷氢内燃机进行了燃烧可视化测试, 直拍图像中的亮点来自于燃烧产物水的热辐射, 而图像整体的亮度则与缸内温度直接相关^[6]。研究还发现, 直拍图像的亮度可以直接反应燃烧放热率的变化。

不同于碳氢燃料, 氢内燃机中燃烧唯一生成的可测试产物为 OH*。水蒸气也可以在可见和红外波长范围释放光子, 但只有燃烧完全结束才有水生成。利用化学荧光法可在反应进行中观测 OH* 荧光强度, 利用缸压和缸内温度修正, 映射燃烧反应的剧烈程度。紫外内窥镜法不需要像光学发动机进行很大的改动, 利用带有像增强功能的 CCD 相机 (intensified CCD, ICCD) 观察 OH* 变化, 荧光强度还与 NO_x 排放与很好的关联性。经过证明, 荧光强度的分布也与缸内混合气的分布相同, 因此可用荧光强度概率密度分布函数近似表示混合浓度分布, 从而进行定性分析^[27]。

P. G. Aleiferis 利用 LIF 测量了直喷氢内燃机中的火焰传播速度, 相比于湍流容弹测量的 4 m/s 的结果, 在转速 1 000 r/min, $\lambda = 2$ 工况下, 光学发动机中的燃烧速度达到 10 m/s。比较汽油机可以发现, 在 $\lambda = 1.0 \sim 1.2$ 的范围内, 火焰燃烧速度为 8 ~ 12 m/s, 进气道喷射为 10 ~ 20 m/s, 而直喷内燃机在 $\lambda = 1.2 \sim 1.5$ 的稀燃条件下, 火焰传播速度峰值就达到了 35 m/s, 主要因为高压氢气喷射会影响缸内的流动, 加速缸内湍流从而提高了燃烧速度^[37]。

3.2 高效燃烧模式

氢气的可燃范围广, 直喷氢内燃机在 $\lambda = 0.7 \sim 4.0$ 的范围内都能正常平稳的工作^[16], 利用这个性质。早期的研究主要注重标定喷射相位和喷射脉宽, 即通过提高整体浓度, 加快火焰传播速度, 改善燃烧的定容度, 但是这种方法也会带来氮氧排放的增加。之后, 研究者开始优化喷嘴参数, 试图通过不同的喷射、混合和点火策略探索高效的燃烧方式。随着光学研究和数值模拟的介入, 研究者对直喷氢内燃机的均质稀薄燃烧和分层燃烧等高效燃烧模式有了新的理解。

直喷氢内燃机的燃烧对喷嘴结构和喷射压力十分敏感。T. Wallner 发现, 在平均有效压力 0.25 MPa 小负荷时, 改变不同喷孔位置, 相比于背对火花塞喷射时 29% 的热效率, 朝向火花塞喷射时热效率可以提升至

35%^[38]。采用不同的喷射参数, 在不同转速下, 热效率可变化 8%。H. Rottengruber 研究了在转速 2 000 r/min 平均指示压力 1.5 MPa 下, 将喷射压力从 15 MPa 降低至 4.5 MPa, 平均指示压力只减少 5%, 热效率却损失了 5%^[4]。

喷射相位直接影响混合气的形成, 从而影响燃烧。A. Wimmer 比较了喷射相位 CA -140°、CA -120° 和 CA -105° 燃烧放热率及缸压的变化, 推迟喷射后, 火花塞附近形成的混合气稀, 从而导致燃烧相位滞后, 燃烧的爆发压力和瞬时放热率峰值也相对较低^[3]。M. K. Roy 等发现推迟喷射燃烧快, 瞬时放热率高, 燃烧更加稳定。湍流度小, 越靠近上止点喷射, 喷雾发展快, 喷射会降低燃烧时缸内的湍流度^[3]。此外, 他还发现最晚喷射工况的火焰发展最快, 面积最大, 燃烧也最稳定。研究发现在 10 MPa 喷射压力下, SOI 在 CA 120° 和 CA 40° BTDC, 早喷火花塞处 $\lambda = 1.32$, 而晚喷 $\lambda = 0.66$, 从而导致放热率峰值是其 2.5 倍。研究发现, 推迟喷射后, OH* 荧光区域在点火后更早明亮, 且强度更高。证明此时由于分层, 火花塞附近氢气浓度高, 着火延迟期变短^[24]。此外, 提高喷射压力, 在燃烧开始时, 缸内中心会形成 OH* 亮点, 证明此区域为相对浓区, 并且燃烧剧烈。而采用低喷射压力时, 仅在喷嘴汇集少量氢气, 并相对靠后开始燃烧。

A. Wimmer^[39] 等发现, 当 SOI 从 CA 120° BTDC 推迟至 CA 65° BTDC 时, 缸内混合气的分布出现分层现象, 形成局部过浓区域, 从而加速了火焰的传播, 缩短了燃烧持续期, 同时氢气在压缩末段喷入, 活塞上行时压缩功减少。尽管此时燃烧温度增加, 缸内气体流速加快后导致传热损失增加, 但直喷氢内燃机总体效率增加 3%。而在定容弹中, 如图 4 所示^[40], 对比 $\lambda = 1.5$ 分层混合气和 $\lambda = 1.0$ 的均质混合气, 火焰前锋面发展情况一致, 火焰传播速度一致, 且放热速率相近。但分层后靠近壁面的气体过量空气系数高, 燃烧温度低,

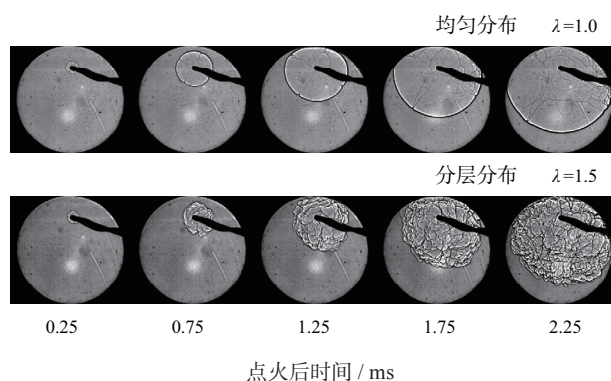


图 4 均质和分层燃烧火焰发展情况^[40]

因此传热损失大大减少。因此,分层燃烧的目的是使火花塞附近形成微浓的混合气,保证稳定的火焰发展和传播;在靠近壁面区域形成较稀的混合气,从而减少传热损失,实现高效燃烧^[13]。

提前喷射均质燃烧和推迟喷射分层燃烧分别适用于不同的工况,应根据氢内燃机工作特性需要的工况进行优化。其中低速小负荷工况采用提前喷射,可以有利于稀燃混合气的形成,保证内燃机工作的稳定性。在大负荷工况,采用推迟喷射并适当提高废气再循环(EGR)率可以实现高效燃烧。不过这种策略也有特殊情况。Y. Takagi 等发现,在小负荷稀燃($\lambda = 3$)的情况下相比于提前喷射形成均匀混合气,采用推迟喷射相位可以有效降低缸内未燃氢的浓度,让更多的氢气参与燃烧,从而提升内燃机有效热效率^[41]。

实现分层燃烧的另一种方式即多次喷射,采用多次喷射可以降低氢气的扩散速度,从而更好地实现分层燃烧。T. Wallner^[42] 等研究了多次喷射中喷孔的位置和喷射点火策略对燃烧和性能的影响。结果发现喷射射流往火花塞方向喷射需要留有 CA 20° 的余量,否则火焰可能会被喷射出的高速气体熄灭。多次喷射后,随着二次喷射比例的逐渐增加,混合气形成不均匀,局部表现为稀燃,最佳点火角应该提前。因此多次喷射的燃烧持续期更长,燃烧放热率变化更加缓慢。

相比于单独点燃式的单火核传播,采用扩散燃烧模式,火焰传播速度更快,并利用高压压缩比,热效率更高。但由于氢气自燃温度为 858 K,压燃难度大,需要通过预燃室火花点火的方式实现。R. Heindl 提出了二次喷射的策略,第1次喷入少量氢气点燃后,对缸内进行预热,第2次喷入的氢气扩散燃烧,从而避免爆震,可以达到 44% 的指示热效率^[43]。为实现更高自由度的分层燃烧模式,Y. Takagi 等在稀燃工况下,将喷射和点火紧密耦合,在临近上止点,喷射结束时刻立即点火,抑制氢气喷射的羽流扩散,实现火花塞附近局部浓燃。这种羽流燃烧方式可减少未燃氢比例,在小负荷下的指示热效率达到 48%,相比之下,喷氢相位推迟至 CA -135° 时,指示热效率降低至 44%^[5, 19, 30, 41, 44]。由于氢燃料不含碳,因此不用担心碳烟的生成。S. Tanno 探索了 30 MPa 喷射压力下,压缩比设置为 15.8,利用火花点火辅助扩散燃烧,在点火时刻喷氢,通过高压大贯穿射流在缸内形成分层,可在实现高定容燃烧的同时降低传热损失,热效率相比于均质混合燃烧可以提升 3%,达到 43.8%。采用这种燃烧方式的好处是:高强度的射流可以加快燃烧和反应的速度,提高燃烧的定容性,从而提高燃烧效率、降低传热损失^[6]。

M. F. Rosati 在光学发动机中探索了氢气直喷均质混合压燃(homogeneous charge compression ignition, HCCI)燃烧模式,并通过增加压缩比(17 压缩比)调节进气加热温度(20 ~ 400°C)和热 EGR 率来控制燃烧。不同于碳氢燃料的多核燃烧,氢气的均质充量压缩燃烧(HCCI)只观测到单核火焰传递,因此,可以通过耦合火花点火方式加快燃烧,提高热效率^[45]。采用 HCCI 燃烧模式后, $\lambda = 3$ 时热效率可以达到 45%^[46]。但是进气加温后,进气量受限,因此, HCCI 模式下氢内燃机的负荷受限,且燃烧可调控的范围小。

3.3 异常燃烧控制

若喷氢时刻早于进气门关闭时刻,可能有少部分氢气扩散并残留在进气歧管内,在下一循环被进气道内热点或在气门重叠时刻被高温排气点燃从而引发回火,因此,直喷氢内燃机也存在回火问题^[47]。当喷氢发生在进气门关闭后,直喷氢内燃机可以避免回火问题^[4]。

直喷氢内燃机中,由于混合气分布不均匀,在高转速大负荷工况,过早点火会引发早燃及爆震^[9]。S. Verhelst 强调了辛烷值是混合气浓度的函数,在当量比为 0.4 的混合气时,有效辛烷值约为 140。随着压缩比增加,爆震发生的区域逐渐增加,其中混合气浓度对爆震区域更加敏感,范围更大。高文志研究喷氢开启角对直喷氢内燃机爆震的影响规律时发现,喷氢相位从上止点前 CA -128° 到 CA -48° 变化过程中,混合气的不均性增强,火焰传播速度逐渐爆震强度呈现增大的趋势;同时,爆震强度随着未燃混合气质量分数的增大而增大,和混合气的浓度息息相关^[48]。

因此直喷氢内燃机抑制爆震的方法主要有:

- 1) 燃烧室结构优化,避免诸如 ω 燃烧室^[48] 等易产生或残留热点的燃烧室结构,优化喷嘴布置位置,避免出现狭小缝隙空间。
- 2) 优化喷射策略,适当提前喷射有利于增加混合均匀度,降低爆震风险。但过于提前可能会导致氢气扩散积聚在喷嘴或火花塞狭缝内,从而容易引发爆震。
- 3) 采用 EGR 和喷水降低缸内燃烧温度抑制爆震。
- 4) 利用增压技术,在相同负荷下采用稀薄燃烧,提升爆震边界。

3.4 有效热效率研究

直喷氢内燃机有效热效率计算公式为

$$\text{BTE} = \eta_{\text{IRC}} - \eta_{\Delta\text{IC}} - \eta_{\Delta\text{RC}} - \eta_{\Delta\text{ICS}} - \eta_{\Delta\text{WH}} - \eta_{\Delta\text{GE}} - \eta_{\Delta\text{F}}$$

其中: BTE 为有效热效率; η_{IRC} 为理想循环热效率; $\eta_{\Delta\text{IC}}$

为不完全燃烧导致的效率损失; $\eta_{\Delta RC}$ 为实际燃烧效率损失; $\eta_{\Delta ICS}$ 为喷射导致的效率损失; $\eta_{\Delta WH}$ 为壁面传热效率损失; $\eta_{\Delta GE}$ 为换气效率损失; $\eta_{\Delta F}$ 为摩擦效率损失。

其中前两项损失与燃烧调控直接相关, 而为了达到更高的有效热效率, 不仅需要探索高效燃烧模式, 还需对其他方面的能量分布进行计算和优化。

在压缩阶段喷入大量的氢气会导致压缩能量的损失, 相比于稀燃 ($\lambda = 2.5$) 工况, 当量比下的喷射由于氢气喷射量提升, 整体能量会损失 0.5%^[39]。此外, 推迟喷射有利于降低压缩损失^[49], SOI 从 CA -150° 推迟到 CA -75°, 压缩能量损失降低了 0.5%。因此在不影响燃烧质量的前提下, 提高喷射压力, 推迟喷射从理论上可以提升效率。

由于氢气燃烧速度快、绝热火焰温度高、火焰淬熄距离短、火焰前锋面距壁面近, 相比于同排量的汽油机, 氢内燃机的传热损失大约是其 2.5 倍。T. Shudo 提出, 提高直喷氢内燃机效率的首要条件就是降低缸壁的传热, 且传热量与缸内燃烧温度直接相关。在直喷条件下, 除了燃料特性和 λ , 混合气分层分布也会对传热损失造成影响^[25]。T. Wallner 发现在 2 000 r/min 下, 负荷从 0.17 MPa 提高到 1.35 MPa, 每循环传热量从 33 J 提高到 101 J, 但是传热占比从 11% 下降至 5%^[7]。S. Tanno 还发现, 降低喷射压力也可以减少传热损失, 在 2 000 r/min 小负荷 (< 0.6 MPa 下), 喷射压力从 20 MPa 降低到 10 MPa, 冷却损失从 25% 降低至 12%, 热效率提升了 5%^[6]。主要因为, 当喷射量较小时, 采用低喷射压力可以延长喷射脉宽, 缩小贯穿距, 从而降低爆发压力和瞬时放热率, 降低缸内最高燃烧温度, 减少传热损失。

氢气燃烧范围广, 在中小负荷下可以采用稀薄燃烧的控制策略, 保证节气门全开降低换气损失^[13], 利用低摩擦技术可以进一步降低摩擦损失, 从而实现直喷氢内燃机高效运转。如图 5 所示, 采用高压直喷的策略可以将效率提升至 42%, 若进一步降低传热损失, 采用增压和 Atkinson 循环后, 直喷氢内燃机的效率有望突破 50%^[15]。

4 直喷氢内燃机氮氧排放控制

氢内燃机的排放从理论上未燃 H_2 、HC、CO、 CO_2 、 NO_x 等 5 种, 其中排气中未燃 H_2 的含量主要与混合气的浓度有关^[9, 41], 试验证明: 当混合气 $\lambda > 3$ 时, 由于燃烧不充分, 导致未燃氢的体积浓度上升至 1.2%; $\lambda = 4$ 时, 未燃氢的占比最高可达 1.5%; 在 $\lambda < 3$ 的工况, 未燃氢的体积浓度均小于 0.2%。HC、CO、 CO_2 这 3

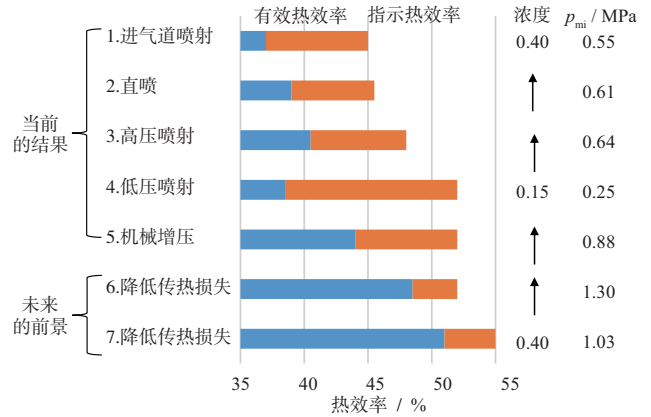


图 5 不同技术下直喷氢内燃机效率^[15]

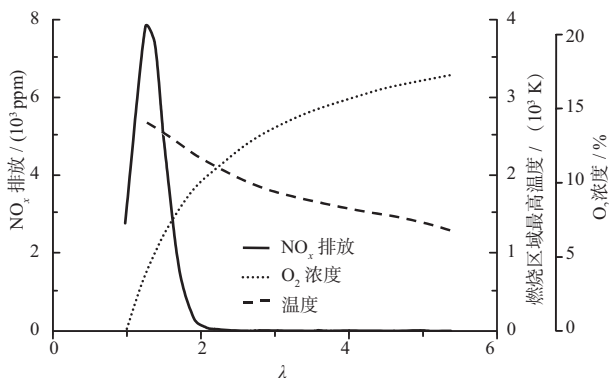
种污染物主要是少量机油参与燃烧导致的, 这 3 种排放物浓度都小于 20 ppm ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$)。

NO_x 作为氢内燃机的主要排放产物, 是氮气和氧气在缸内高温环境下通过 5 步反应形成的^[50]。相比于汽油, 氢气燃烧温度高, 直喷氢内燃机的 NO_x 排放最高可达 10^{-2} ^[38, 51], 必须加以控制。内燃机的经济性和排放性通常存在 trade-off 关系, 这里主要讨论直喷内燃机中在不过多牺牲效率的前提下, 降低排放的手段以获得经济性和排放性之间的权衡,

4.1 浓度控制

直喷氢内燃机的 NO_x 排放与混合气的 λ 密切相关^[39]。如图 6 所示, 当 $\lambda > 2.5$ 时, NO_x 排放几乎为零, 随着 λ 逐渐减少, NO_x 排放先快速增加后逐渐降低。因此, 控制 NO_x 排放最简单的手段就是采用 $\lambda > 2.5$ 的稀薄燃烧。为保证燃烧的可控性和燃烧的稳定性, 即使氢气的稀燃极限 λ 可以达到 10, 一般取 $\lambda < 3.3$, 即 λ 在 2.5 ~ 3.3 区间内, 直喷氢内燃机可以实现原始氮氧排放近似为 0。基于此, 宝马汽车公司提出在小负荷段采用 λ 大于 2 的稀燃工况, 而在中 - 大负荷段直接采用 λ 小于 1 的浓燃工况, 此时可以利用氢气在三元催化剂中还原 NO_x , 其转化效率高达 99.5%, 这种方法避开了 NO_x 超高排放的 λ 段 (1.1 ~ 1.5)^[3]。美国阿贡国家实验室也采用了小负荷稀燃, 大负荷下当量比燃烧的控制策略^[51], 并在 1 台搭载 6.0 L 直喷氢内燃机的轻型卡车上进行了验证。路测结果显示, 其平均 NO_x 排放仅为 0.5 mg/km, 比美国国家环境保护局规定的超低车辆排放标准还低 4%。

为保证稀燃后的动力性, 通过机械增压或涡轮增压提高进气压力, 即可保证直喷氢内燃机在中小负荷始终工作在 $\lambda > 2.5$ 的工况, 此时 NO_x 排放通常小于 0.1 g/kWh, 即为近零排放^[10]。博世通过匹配 1 台可变截

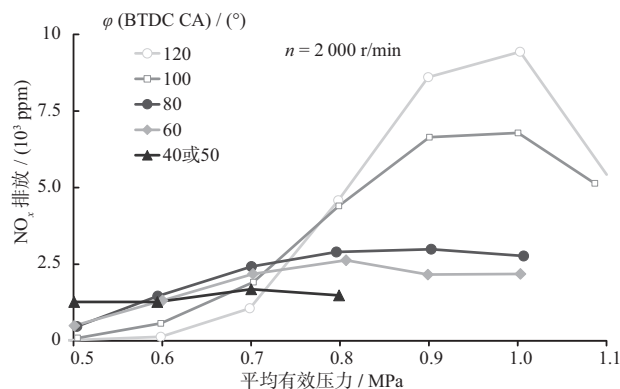
图6 氢内燃机 NO_x 排放随 λ 变化曲线^[3]

面涡轮增压器实现了在平均有效压力小于1.2 MPa的边界内的近零排放。但是，不同于传统的汽油机和柴油机，直喷氢内燃机排气温度较低（排气温度通常在500℃左右，稀燃小负荷时仅有300℃^[10]），空气流量大，因此，现有针对汽油或柴油机设计的涡轮增压器仅能适配低转速（3000 r/min以下）或高转速（3000 r/min以上）的单一需求^[51]。此外采用涡轮增压后排气背压增加，缸内残余废气增多，燃烧不充分，相同负荷下相比于自然吸气状态未燃氢含量增加1%^[52]，因此，直喷氢内燃机的增压匹配极为关键。

4.2 优化喷射参数

喷射相位直接影响混合气中 λ 的分布，进而影响排放。T. Wanner等在1台0.5 L的单缸直喷氢内燃机上开展了不同SOI下NO_x排放随平均有效压力变化的研究^[39]。如图7所示，在部分负荷区域，增加SOI，喷射越提前，NO_x排放越低，而大负荷工况下则恰好相反，推迟喷射会导致排放升高。这主要是因为部分负荷工况整体稀燃，提前喷射，混合时间长，缸内易形成低浓度的均匀混合气，排放较低；在大负荷工况下 λ 降低，推迟喷射可以使缸内混合气出现分层，过浓和过稀区域的燃烧都可以避开所示的高排放段，因此NO_x排放降低。

A. Kawamura发现推迟喷射可以降低NO_x，但其循环变动系数会相应增加，燃烧不稳定性加剧，效率降低^[53]。受到以上启发，若将喷氢过程分为2段，第1段较早喷射，在缸内形成均质的稀燃混合气；第2段较晚喷射，混合时间短，在火花塞附近形成一团较浓的混合气，就可以在保证高效率的同时实现低NO_x排放。这样就能利用多次喷射避开NO_x排放生成高的 λ 区域。T. Wallner利用试验验证了在部分负荷工况下，随着2次喷射氢气比例的增加，燃烧持续期增加，排

图7 不同喷射相位下 NO_x 排放变化曲线^[3]

放也逐渐降低，2次喷射占50%时，NO_x相比单次喷射降低了85%^[42]。丰田汽车公司提出^[14]甚至还可以采用3次喷射的方法，利用燃烧后喷出的氢气，在缸内还原NO_x，进一步降低排放。

此外喷嘴结构和喷射压力也会对排放有所影响，小负荷下，六孔喷嘴的排放较低而大负荷下相反^[1]。在小负荷下，增大喷射压力可以增强空气和氢气的混合过程从而降低NO_x排放，但由于喷雾贯穿距离变长，喷雾撞壁后会增加气缸的传热损失从而降低热效率。当喷射压力从5 MPa降低至3 MPa，在1000 r/min、 $\lambda = 2.5$ 的工况下，NO_x排放从400 ppm上升至大约1200 ppm。

4.3 EGR 技术

直喷氢内燃机的废气主要由水和氮气组成，通过废气再循环技术，可以提高进气的比热，降低燃烧的速率和温度^[54]，从而降低NO_x排放。

直喷氢内燃机中EGR的计算方法主要有4种^[55-56]：1) 定容积法，假设容积效率不变，测量使用EGR前后空气流量、温度；2) 进排气氧浓度计算法；3) 进排气湿度计算法；4) 测量EGR和空气流量计算法。前3种方法随着EGR率的逐渐增加，误差都逐渐增大。其中依据氧浓度计算的误差量最小，且氧浓度传感器布置方便，精度更高。最后1种方法主要取决于流量计测量湿空气的精度，适用于试验台架。

C. Blechmore比较了冷热EGR对直喷氢内燃机的影响，在化学当量比的浓度下，氢内燃机的NO_x排放分别降低了87%和93%^[47]。M. Antonelli同样指出，在自然吸气全负荷的情况下，当EGR率达到15%~20%时，NO_x可以降低70%~80%，指示热效率分别达到40%和38%。冷EGR在进气过程中会损失一部分传热的能量。但使用EGR后，平均有效压力的循环变动系数从1.7%上升至2.6%，燃烧稳定性会受到影

响^[17]。同样的结论在文献 [53, 57] 也被证明。

4.4 喷水技术

喷水的原理和 EGR 类似, 但是相比于 EGR, 喷水不会大幅影响直喷氢内燃机的动力性, 且喷水可以更精准的调控燃烧工质、控制燃烧温度。

喷水技术按喷射方式划分也可以有进气道喷水和缸内直喷 2 种。采用进气道喷水方式时, 喷射相位可选为排气冲程, 进气道的水蒸发后在下一循环吸入缸内, 而采用缸内直喷喷水方式时, 喷射相位选择在进气和压缩冲程, 从而降低混合气温度, 降低缸内燃烧压力, 抑制 NO_x 的生成^[58-59]。取得最佳热效率时, 喷水相位应设置在压缩冲程前段, 而最低排放点的喷水时刻应尽量选择在压缩冲程末期, 这主要考虑到前期喷水的冷却作用可以降低压缩功耗, 而后期喷水可以降低燃烧温度^[60]。A. M. Nande 等在 1 台 0.5 L 的单缸直喷氢内燃机上开展了进气道喷水试验(喷水压力 0.345 MPa)。结果显示, 小负荷下(平均有效压力 4 MPa), SOI 为最高效率时, 喷水相比于调整推迟点火角可以多降低 27% 的 NO_x 排放, 喷水的热效率损失小于 1% 而推荐点火则达到 2.4%。在平均有效压力为 8 MPa 的大负荷下, 喷水相比于调整点火角可以多降低 12% 的 NO_x 排放, 此时热效率损失 0.8%, 而调整点火角热效率损失将达到 6%。因此喷水技术更适用于小负荷高效率或大负荷工况^[61]。A. H. Gadallah 基于神经网络算法学习预测了直喷氢发动机在不同当量比、平均有效压力、点火提前角、喷水量和喷水相位下指示热效率和 NO_x 的变化。通过不同算法的比较, 如常用的梯度算法, Lagrangian 算法等, 采用 Lagrangian 算法可以使 NO_x 排放的预测与试验误差小于 2%。只有在当量比为 0.4 ~ 0.9 内, 喷水才可以提高热效率, 在其他浓度下, 缸内温度低, 导致喷入的水无法完全蒸发, 反而增加了压缩的功耗。而 NO_x 在所有浓度下都会降低。A. H. Gadallah^[62] 发现, 随着喷水量的增加和喷水时刻的优化, NO_x 都会逐渐下降, 当喷水速率为每循环 14 mg, 喷水相位设置为 CA-60° 时, NO_x 排放最高可以降低 71%。M. Youkins^[63] 研究了多次喷射和喷水耦合的影响, 两者可以共同降低排放, 最高可达到 96%, 但此时热效率相应损失 12%。但喷水后的收集处理和使用过程需要携带大量水的问题还未能解决。

4.5 后处理技术

利用上述缸内手段降低 NO_x 排放后, 还需要缸外手段进一步降低 NO_x 排放, 使其满足更严格的排放法规要求。东京城市大学提出了一种两段式的氮氧化物

储存还原系统(NO_x storage/reduction, NSR)和氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)的组合系统^[53]。其中利用未燃氢气或在后处理系统中喷入低压氢气在 NSR 还原 NO_x , 而 DOC 则负责氧化未反应的氢气和还原过程生成的氨气。试验结果显示 NO_x 净化率可达 98%, 氢气消耗只增加了 0.2% ~ 0.5%, 但过量喷射会导致 NH_3 和 N_2O 的生成^[5]。这套后处理设备在整车上运行的结果更为可观^[57], 使用 NSR 的 DOC 系统后, 日本 JE05 循环的排放从 1.07 g/kWh 降低至 0.08 g/kWh。

若氢内燃机仅在稀燃工况运行, A. Kufferath^[64] 提出由氧化催化剂处理未燃氢和少量因机油燃烧生成的 HC 和 CO; 利用颗粒过滤器捕集机油消耗产生的颗粒物; 利用选择性还原(selective catalytic reduction, SCR)降低 NO_x , 利用氨气催化滑移装置吸收多余的 NH_3 。如图 8 所示, 其中: OC: 氧化催化器; PF: 颗粒补集器; SCR: 选择性催化还原; ASC: 氨逃逸催化器; TWC: 三元催化器。若氢内燃机运行在当量比工况, 此时排气中的三元催化器可以还原 NO_x , 氧化氢气、HC 和 CO。利用 NO_x 储存催化器处理多余的 NO_x 排放。在后处理管路中还加入了氢气浓度传感器、温度传感器和 NO_x 传感器等, 用于测量不同催化器的转化效率。采用串联混动的氢内燃机 NO_x 排放可低至 10 ~ 14 mg/km, 若加入此后处理系统且转化效率达到 90%, 预计直喷氢内燃机汽车的 NO_x 排放仅为 1 ~ 2 mg/km。

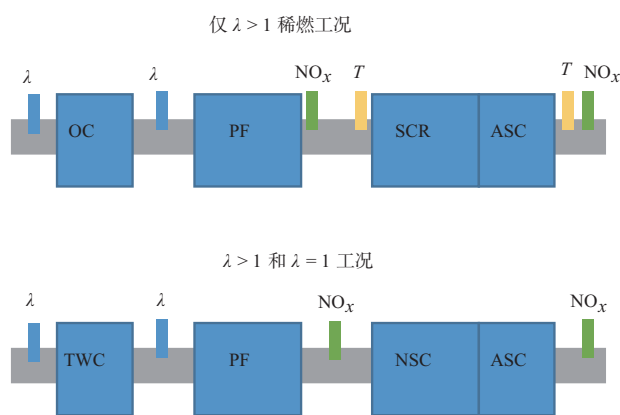


图 8 后处理系统^[64]

5 总结

1) 典型机型的氢内燃机的有效热效率可以达到 35% ~ 45%, 热效率的提升得益于氢燃料自身的优良理化特性; 进气道喷射式氢内燃机的升功率比缸内直喷高 20%;

2) 氢内燃机的主要污染物是 NO_x , 可以采用废气再循环、进气管喷水、稀薄燃烧等多种途径降低 NO_x 排放, 过量空气系数大于 2 的稀薄燃烧表现出降低 NO_x 的更好潜力; 为进一步降低 NO_x , 需要采用后处理技术, 氧化催化器 (DOC) + 选择性还原 (SCR) 是比较好的后处理组合方式;

3) 氢气喷嘴是制约氢内燃机各项性能提升的关键, 低压、大流量喷嘴设计开发是下一阶段氢内燃机走向技术应用的卡脖子环节;

4) 由于燃料属性的差异, 氢内燃机也明显不同于柴油机、汽油机, 更应从燃料特性出发来开发新型氢内燃机, 也需要建立一个从燃料喷射到排气后处理的新设计技术体系。

参考文献 (References)

- [1] Rana K K, Natarajan S, Jilakara S. Potential of hydrogen fuelled IC engine to achieve the future performance and emission norms [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2015*, Michigan USA, 2015-26-0050, 2015.
- [2] Mohammadi A, Shioji M, Nakai Y, et al. Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2007, **32**(2): 296-304.
- [3] Wimmer A, Wallner T, Ringler J, et al. H_2 -direct injection—a highly promising combustion concept [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2005*, Michigan USA, 2005-01-0108, 2005.
- [4] Rottengruber H, Berckmüller M, Elsässer G, et al. Direct-injection hydrogen SI-engine - operation strategy and power density potentials [C]// *Powertrain & Fluid Systems Conference and Exhibition Tampa 2004*, Florida USA, 2004: 2001-2004.
- [5] Kawamura A, Yanai T, Sato Y, et al. Summary and progress of the hydrogen ice truck development project [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(1): 110-117.
- [6] Tanno S, Ito Y, Michikawauchi R, et al. High-efficiency and low- NO_x hydrogen combustion by high pressure direct injection [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2010, **3**(2): 259-268.
- [7] Matthias N S, Wallner T, Scarcelli R. A hydrogen direct injection engine concept that exceeds U.S. DOE light-duty efficiency targets [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2012, **5**(3): 838-849.
- [8] Yamane K. Hydrogen fueled ICE, successfully overcoming challenges through high pressure direct injection technologies: 40 years of japanese hydrogen ICE research and development [C] // *SAE 2018 World Congress & Exhibition 2015*, Michigan USA, 2018-01-1145, 2018.
- [9] Tsujimura T, Suzuki Y. Development of a large-sized direct injection hydrogen engine for a stationary power generator [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2019, **44**(22): 11355-11369.
- [10] Eichlseder H. H_2 ICE for future passenger cars and light commercial vehicles [C]// *2019 International Vienna Motor Symposium*, Vienna Austria, 2019.
- [11] Wallner T, Nande A M, Naber J. Evaluation of injector location and nozzle design in a direct-injection hydrogen research engine [C]// *SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Congress 2008*, Shanghai China, 2008: 2001-2008.
- [12] Verhelst S, Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines [J]. *Prog Energ Combust*, 2009, **35**(6): 490-527.
- [13] Verhelst S, Demuynck J, Sierens R, et al. Update on the Progress of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines [M]. Belgium, 2013, 381-400.
- [14] Welch A, Mumford D, Munshi S, et al. Challenges in developing hydrogen direct injection technology for internal combustion engines [C]// *Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting 2008*, Illinois USA, 2008: 2001-2008
- [15] Verhelst S, Sierens R, Verstraeten S. A critical review of experimental research on hydrogen fueled SI engines [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2006*, Michigan USA, 2006-01-0430, 2006.
- [16] Kim J M, Kim Y T, Lee J T, et al. Performance characteristics of hydrogen fueled engine with the direct injection and spark ignition system [C]// *SAE Fuels & Lubricants Meeting & Exposition 1995*, Toronto Canada, 1995: 952498.
- [17] Antonelli M, Martorano L. Realization and testing of a low pressure hydrogen direct injection engine using commercial injectors [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2012*, Michigan USA, 2012-01-0652, 2012.
- [18] Schumacher M, Wensing M. Investigations on an injector for a low pressure hydrogen direct injection [C]// *SAE 2014 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting 2014*, Illinois USA, 2014-01-2699, 2014.
- [19] Takagi Y, Oikawa M, Sato R, et al. Near-zero emissions with high thermal efficiency realized by optimizing jet plume location relative to combustion chamber wall, jet geometry and injection timing in a direct-injection hydrogen engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2019, **44**(18): 9456-9465.
- [20] Yamane K, Nogami M, Umemura Y, et al. Development of high pressure H_2 gas injectors, capable of injection at large injection rate and high response using a common-rail type actuating system for a 4-cylinder, 4.7-liter total displacement, spark ignition hydrogen engine [C]// *SAE 2011 International Powertrain, Fuels & Lubricants Meeting 2011*, Illinois USA, 2011-01-2005, 2011.
- [21] WANG Xi, SUN Bai-gang, et al. Visualization research on hydrogen jet characteristics of an outward-opening injector for direct injection hydrogen engines [J]. *Fuel*, 2020, **280**: 118710.
- [22] Yip H L, Srna A, Yuen A C Y, et al. A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: towards carbon-free combustion [J]. *Appl Sci*, 2019, **9**(22): 4842.
- [23] Konagaya R, Naitoh K, Tsuru K, et al. Unsteady three-dimensional computations of the penetration length and mixing process of various single high-speed gas jets for engines [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2017*,

- Michigan USA, 2017-01-0817, 2017.
- [24] Wallner T, Ciatti S, Bihari B. Investigation of injection parameters in a hydrogen di engine using an endoscopic access to the combustion chamber [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2007*, Michigan USA, 2007-01-1464, 2007.
- [25] Shudo T, Oba S. Mixture distribution measurement using laser induced breakdown spectroscopy in hydrogen direct injection stratified charge [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2009, **34**(5): 2488-2493.
- [26] Verhelst S. Recent progress in the use of hydrogen as a fuel for internal combustion engines[J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2014, **39**(2): 1071-1085.
- [27] White C M. A Qualitative evaluation of mixture formation in a direct-injection hydrogen-fuelled engine [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2007*, Michigan USA, 2007-01-1467, 2007.
- [28] Scarcelli R, Wallner T, Matthias N, et al. Mixture formation in direct injection hydrogen engines: CFD and optical analysis of single- and multi-hole nozzles [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2011, **4**(2): 2361-2375.
- [29] Kaiser S, White C M. PIV and PLIF to evaluate mixture formation in a direct-injection hydrogen-fuelled engine [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2008, **1**(1): 657-668.
- [30] Rahman K M, Kawahara N, Matsunaga D, et al. Local fuel concentration measurement through spark-induced breakdown spectroscopy in a direct-injection hydrogen spark-ignition engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2016, **41**(32): 14283-14292.
- [31] Salazar V M, Kaiser S A. An optical study of mixture preparation in a hydrogen-fueled engine with direct injection using different nozzle designs [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(2): 119-131.
- [32] Salazar V, Kaiser S. Interaction of intake-induced flow and injection jet in a direct-injection hydrogen-fueled engine measured by PIV [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2011*, Michigan USA, 2011-01-0673, 2011.
- [33] Scarcelli R, Wallner T, Salazar V M, et al. Modeling and Experiments on mixture formation in a hydrogen direct-injection research engine [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(2): 530-541.
- [34] LI Yong, GAO Wenzhi, ZHANG Pan, et al. Effects study of injection strategies on hydrogen-air formation and performance of hydrogen direct injection internal combustion engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2019, **44**(47): 26000-26011.
- [35] Hamzehloo A, Aleiferis P. Numerical modelling of mixture formation and combustion in DISI hydrogen engines with various injection strategies [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2014*, Michigan USA, 2014-01-2577, 2014.
- [36] Roy M K, Kawahara N, Tomita E, et al. Jet-guided combustion characteristics and local fuel concentration measurements in a hydrogen direct-injection spark-ignition engine [J]. *P Combust Inst*, 2013, **34**(2): 2977-2984.
- [37] Aleiferis P G, Rosati M F. Flame chemiluminescence and OH LIF imaging in a hydrogen-fuelled spark-ignition engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2012, **37**(2): 1797-1812.
- [38] Wallner T, Nande A M, Naber J. Study of basic injection configurations using a direct-injection hydrogen research engine [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(1): 1221-1230.
- [39] Wimmer A, Messner D, et al Application and Validation of the 3D CFD Method for a Hydrogen Fueled IC Engine with Internal Mixture Formation [C]// *SAE World Congress & Exhibition 2006*, Michigan USA, 2006-04-03, 2006.
- [40] Shudo T, Cheng W K, Kuninaga T, et al. Reduction of cooling loss in hydrogen combustion by direct injection stratified charge [C]// *Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition Pittsburgh 2003*, Pennsylvania USA, 2003-01-3094, 2003.
- [41] Takagi Y, Mori H, Mihara Y, et al. Improvement of thermal efficiency and reduction of NO_x emissions by burning a controlled jet plume in high-pressure direct-injection hydrogen engines [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2017, **42**(41): 26114-26122.
- [42] Wallner T, Scarcelli R, Nande A M, et al. Assessment of multiple injection strategies in a direct-injection hydrogen research engine [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(1): 1701-1709.
- [43] Heindl R, Eichlseder H, Spuller C, et al. New and innovative combustion systems for the h₂-ice: compression ignition and combined processes [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(1): 1231-1250.
- [44] Oikawa M, Takagi Y, Mihara Y, et al. Attainment of high thermal efficiency and near-zero emissions by optimizing injected spray configuration in direct injection hydrogen engines [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2019*, Michigan USA, 2019-01-2306, 2019.
- [45] Rosati M F, Aleiferis P G. Hydrogen SI and HCCI combustion in a direct-injection optical engine [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2009, **2**(1): 1710-1736.
- [46] Gomesantunes J, Mikalsen R, Roskilly A. An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine performance and operation [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2008, **33**(20): 5823-5828.
- [47] Bleechmore C, Brewster S. Dilution strategies for load and NO_x management in a hydrogen fuelled direct injection engine [C]// *SAE Powertrain & Fluid Systems Conference & Exhibition Rosemont 2007*, Illinois USA, 2007-01-4097, 2017.
- [48] YE Yixaing, GAO Wenzhi, LI Yong, et al. Numerical study of the effect of injection timing on the knock combustion in a direct-injection hydrogen engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2020, **45**(51):27904-19.
- [49] Wallner T, Matthias N S, Scarcelli R. Influence of injection strategy in a high-efficiency hydrogen direct injection engine [J]. *SAE Int'l J Engines*, 2011, **5**(1): 289-300.
- [50] Abinash P, Vssut B. Formation, Kinetics and control strategies of NO_x emission in hydrogen fueled IC engine [J]. *Int'l J Engi Res Tech*, 2020, **9**(1): 91-108.
- [51] Wallner T. Efficiency and emissions potential of hydrogen internal combustion engine vehicles [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2011*, Michigan USA, 2011-01-19,

- 2011.
- [52] Rahman M M, Kamil M, Bakar R A. Engine performance and optimum injection timing for 4-cylinder direct injection hydrogen fueled engine [J]. *Simu Mode Pract Theo*, 2011, **19**(2): 734-751.
- [53] Nakagawa K, Yamane K, Ohira T. Potential of large output power, high thermal efficiency, near-zero NO_x emission, supercharged, lean-burn, hydrogen-fuelled, direct injection engines [J]. *Energy*, 2012, **29**: 455-462.
- [54] Kawamura A, Sato Y, Naganuma K, et al. Development project of a multi-cylinder DISI hydrogen ICE system for heavy duty vehicles [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2010*, Michigan USA, 2010-10-25, 2010.
- [55] BAO Lingzhi, SUN Baigang, LUO Qinghe, et al. Simulation and experimental study of the NO_x reduction by unburned H₂ in TWC for a hydrogen engine [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2020, **45**(39): 20491-20500.
- [56] Verhelst S, Vancoillie J, Naganuma K, et al. Setting a best practice for determining the EGR rate in hydrogen internal combustion engines [J]. *Int'l J Hydro Energ*, 2013, **38**(5): 2490-2503.
- [57] Thomas K D, Sousa A, Bertram D. H₂-Engine operation with EGR achieving high power and high efficiency emission-free combustion [C] // *2019 SAE Powertrains, Fuels and Lubricants*, Michigan USA, 2019-12-19, 2019.
- [58] Naganuma K, Takagi Y, Kawamura A, et al. Study of NO_x emissions reduction strategy for a naturally aspirated 4-cylinder direct injection hydrogen ICE [C] // *SAE 2015 World Congress & Exhibition 2015*, Michigan USA, 2015: 2011-2015.
- [59] Younkins M, Wooldridge M, Boyer B. Direct in-cylinder injection of water into a PI hydrogen engine [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2010*, Michigan USA, 2010-10-25, 2010.
- [60] XU Puyan, JI Cangwei, WANG Shuofeng, et al. Effects of direct water injection on engine performance in engine fueled with hydrogen at varied excess air ratios and spark timing [J]. *Fuel*, 2020, **269**: 117209.
- [61] Nande A M, Wallner T, Naber J. Influence of water injection on performance and emissions of a direct-injection hydrogen research engine [C] // *SAE World Congress & Exhibition 2015*, Michigan USA, 2015: 2011-2015.
- [62] Gadallah A H, Elshenawy E A, Elzahaby A M, et al. Application of neural networks for prediction and optimization of emissions and performance in a hydrogen fuelled direct injection engine equipped with in cylinder water injection [C] // *SAE 2009 Powertrains Fuels and Lubricants Meeting*, Michigan USA, 2009-11-02, 2009.
- [63] Younkins M, Wooldridge M S, Boyer B A. Port injection of water into a DI hydrogen engine [C] // *SAE 2015 World Congress & Exhibition 2015*, Michigan USA, 2015: 2011-2015.
- [64] Kufferath A, Schünemann E. H₂ ICE powertrains for future on-road mobility [C] // *2021 International Vienna Motor Symposium*, Vienna Austria, 2021-25, 2021.

孙柏刚 教授

北京理工大学教授，博士生导师，能源与动力工程系主任。主要从事氢燃料内燃机与燃料电池方面的研究开发工作。主持承担国家自然科学基金、863、科技部国际合作及总装备部、国防科工局等项目 20 余项，发表学术论文 60 余篇，出版学术著作 3 部。获中国汽车工业技术奖 1 项，国防科技进步二等奖 1 项。主持建立了中国国内首套氢燃料内燃机技术开发平台，开发了第 1 辆氢内燃机样车，在氢能应用领域进行了开创性的工程实践探索，在氢气存储、氢气供应与喷射、氢能安全、氢内燃机整机及整车开发方面具有丰富的应用与开发经验。

Prof. SUN Baigang

He is a professor and a doctoral supervisor of the *Beijing Institute of Technology*, the Head of *Department of Energy and Power Engineering*, mainly engaged in the research and development of hydrogen-fueled internal combustion engine and fuel cell. He is responsible for more than 20 projects of *National Natural Science Foundation of China*, *863*, *International Cooperation of Ministry of Science and Technology*, *Ministry of General Armaments*, *National Defense Bureau of Science and Industry*, etc. He has published more than 60 academic papers and 3 academic books. He was awarded the *Technology Award of China Automobile Industry* and the *Second Prize of National Defense Science and Technology Progress*. He presided over the establishment of the first hydrogen fuel internal combustion engine technology development platform in China, developed the first hydrogen internal combustion engine prototype, and carried out pioneering engineering practice exploration in the field of hydrogen energy application, with rich application and development experience in hydrogen storage, hydrogen supply and injection, hydrogen energy safety, hydrogen internal combustion engine and vehicle development.