为满足日趋严苛的油耗及排放法规要求，基于某 2.0 L 自然吸气汽油发动机，通过采用高压缩比、阿特金森循环等技术，开展提升发动机热效率的研究，实现整机热效率 42.2%，从而降低混合动力汽车的油耗水平，满足节能汽车的要求。

□ 安徽江淮汽车集团股份有限公司 田国庆 韩丹

高效混动专用发动机开发

为改善我们赖以生存的环境，国家提出：“二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的发展目标。2020 年 10 月 27 日，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》，按照规划明确了传统燃油车深度电混的目标，即到 2025 年混合新车占传统能源乘用车的 50% 以上。

面向未来的混动产品，需具备 DHE（混动专用发动机）、DHT（混动专用变速器）及电控系统三项技术，电机、电池需结合纯电产品一并考虑。基于混动多动力源带来的灵活性，发动机使用场景发生变化。为了满足节能汽车要求，发动机开发需聚焦高热效率、混动专用。

本文基于某 2.0 L 自然吸气汽油发动机，提高压缩比、使用阿特金森循环、外部冷却 EGR 、降摩擦损失、功能零部件电气化等技术，开发 2.0 L 高效混动专用发动机，实现高热效率，满足行业清洁、高效、电气化的发展理念。

总体介绍

2.0 L 高效混动专用发动机以提升热效率为核心，从改善燃烧及排放、提高充气效率、能量管理系统及低摩擦技术等四个维度进行设计优化（图 1），主要技术特征如下：采用超高压缩比、阿特金森循环、外部冷却 EGR、降低摩擦损失、功能零部件电气化等技术，开展提升发动机热效率的研究。

发动机性能参数见表 1，与上一代 2.0 L 自然吸气发动机相比，采用更长行程和压缩比，燃油消耗率降低 13%，通过模块化、轻量化设计，整机质量降低 30 kg。

提升热效率的方法

提升热效率最直接因素是提升压缩比。热效率提升到一定程度后，仅提升压缩比还不够，还需要进一步提升比热比。优化燃烧提升发动机热效率，还要充分降低自身的阻力（摩擦损失、泵气损失），进一步提升发动机热效率。

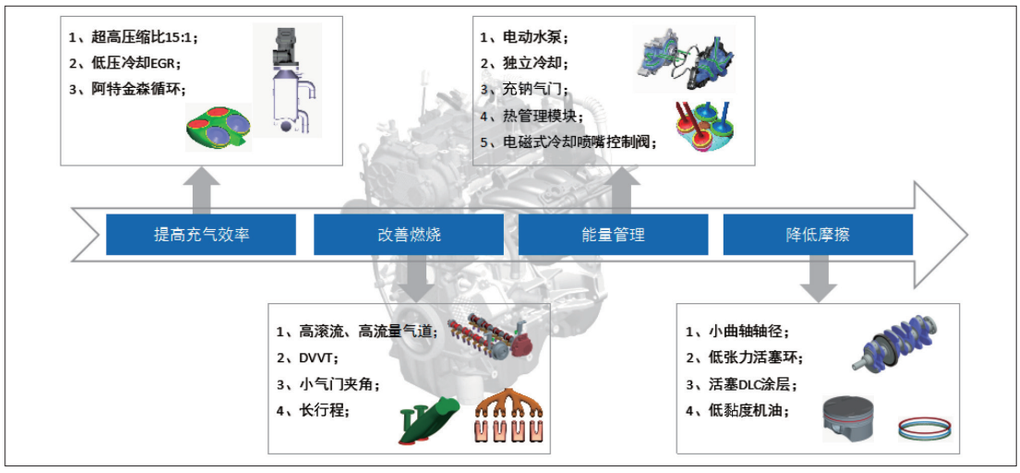

图 1 发动机技术路线

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 48 2022/4/8 19:02:38

表 1 发动机关键参数

项目	2.0 L 混动发动机	上一代机型
类型	直列四缸	←
排量 /cm³	1995	1997
缸径 /mm	80.5	85
行程 /mm	98	88
压缩比	15	10
额定功率 /(kW@r/min)	110@6000	110@6000
最大净转矩 /（N · m@r/min）	175（3 000 ～ 4 500）	196（3 000 ～ 4 500）
低端转矩 /（N · m@r/min）	135@1 000	145@1 000
外特性燃油消耗率（g/kW.h）	⩽ 205	⩽ 240

1. 超高压缩比

对于传统发动机而言，其压缩比一般为 10∶1 左右，没有超过 11∶1 以上压缩比的产品应用，关键受爆燃因素的影响，压缩比无法提升。

混合动力汽车使发动机的使用场景发生变化，发动机与混合动力系统相结合，达到整车对节油和动力的双重要求，同时允许发动机使用更高的压缩比。

为了抑制爆燃，采用了阿特金森循环（图 2），设计特殊的凸轮型线，配合可变气门正时 VVT，发动机进气门晚关，使气体在压缩行程重新被压回到进气管中，实现做功的行程大于压缩行程，即压缩比 < 膨胀比，允许发动机使用更高的压缩比。

2. 提高比热比

提高比热比的典型方法有两种，一是采用稀薄燃烧，二是降低燃烧温度。根据目前行业的发展形势，汽油机稀薄燃烧技术还不成熟，故采用外部冷却 EGR 技术（图 3），降低缸内燃烧温度。外部冷却 EGR 技术是将发动机产生废气的一小部分，导入进气侧再度参与燃烧，因废气具有惰性，将会延缓燃烧速度，可有效降低燃烧的温度，改善大压缩比下发动机的爆燃。

3. 降低摩擦损失及附件损失

提高了压缩比和采用了外部冷却 EGR 技术之后，还可以通过降低摩擦损失来降低燃油消耗率，即提升发动机热效率。发动机的机械损失主要来自活塞和活塞环的摩擦损失、气门机构的驱动损失、曲柄机构的摩擦损失、附件机构的驱动损失。针对发动机的机械损失，制定如下技术方案：

1）活塞裙部采用 FSR 涂层技术，活塞环、活塞销采用 DLC 涂层技术。

2）气门杆部抛光处理，正时系统动、定轨采用低摩擦材料。

3）精益化设计运动件结构尺寸，主轴颈设计 50 mm，连杆颈设计 45 mm，主轴瓦、连杆瓦采用低摩擦涂层。

4）应用智能可变附件（变排量机油泵）、智能热管理（分区温控）及附件的电动化（电动空调、电动水泵），降低附件功耗。

5）采用 5W/20 低黏度机油，改善运动系统的润滑，降低摩擦损失；2 000 r/min（冷却液温度 90 ℃、油温 90 ℃）的整机摩擦功预计从 0.96 bar（1 bar=100 kPa），降低到 0.55 bar。

热力学分析

热力学分析是根据设计输入的压缩比、进排气门包角和相位等参数，预测发动机的外特性及最低燃油消耗率，并根据计算的结果，对设计输出的参数进行优化，直至满足设计指标。根据管路结构及尺寸，搭建热力学模型（图 4）。

经过计算，选择压缩比 15:1，进气凸轮轴保持气门升程 11.8 mm，包角 230 °，排气凸轮轴保持气门升程 9.8 mm，包角 190 °，可以实现额定功率

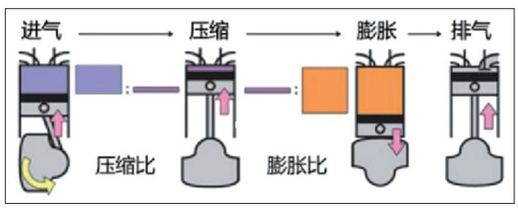

图 2 阿特金森循环示意图

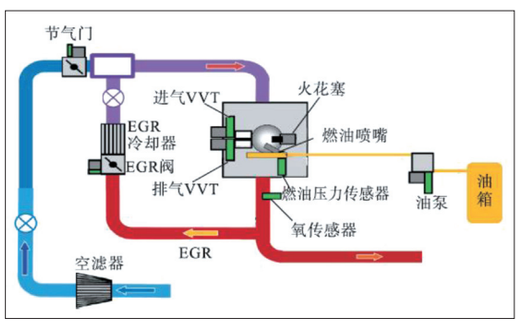

图 3 外部冷却 EGR

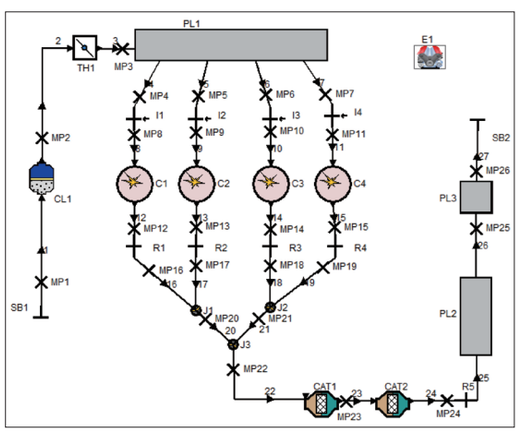

图 4 热力学模型

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 49 2022/4/8 19:02:39

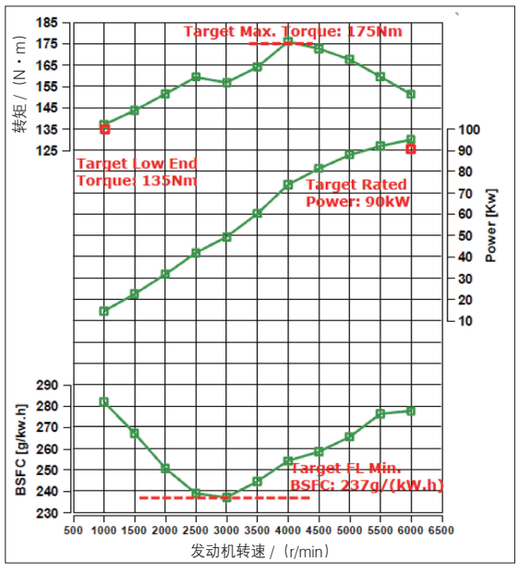

图 5 外特性仿真结果

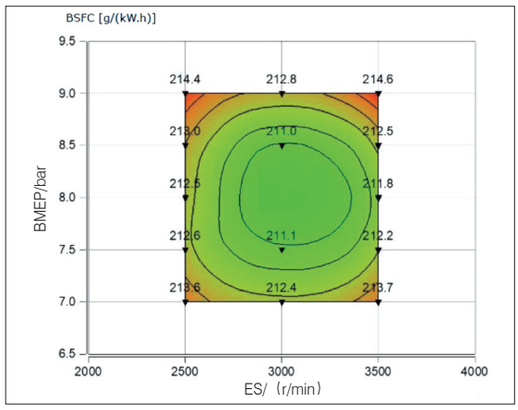

图 6 最低燃油消耗率仿真结果

100 kW，最大转矩 175 N·m，最低油耗≤ 205 g/kW·h，确保仿真结果（图 5、图 6），满足整机设计指标要求。

燃烧系统设计

设计超高压缩比，采用阿特金森循环，可以有效提升发动机的热效率。同时也会带来一些负面影响，其负面影响如下：在中小负荷下，进气系统的充气效率降低，气流流动速度减慢，尤其是缸内燃烧的湍动能降低，从而导致燃烧的持续期变长，影响燃烧效率。再加上外部冷却 EGR，燃烧进一步恶化。单纯靠提前点火可能无法维持正常燃烧速率。即使燃烧正常，但是燃烧相位过于提前，压缩负功增加反而不利于燃油消耗。所以要充分发挥高压缩比阿特金森循环和外部 EGR 的作用。

综上所述，要充分发挥超高压缩比、外部冷却 EGR、阿特金森循环的节油效果，还需要围绕优化燃烧系统开展相关工作。

1. 优化气道设计

根据设计经验，设定初步的气道模型，制作芯盒样件，在气道试验台上进行测试。根据测试结果，进行修正，直至满足设计指标流量系数设定 0.28，滚流比设定 2.8。

全新设计气道模型，保证流量系数的前提，提高滚流比，有利于油气的混合。设计高湍动能快速燃烧保持系统，缸内湍动能一直维持在较高数值范围内，并且火花塞位于湍流中心位置。

2. 优化燃烧室模型

优化燃烧室模型，使活塞顶部形状与缸盖燃烧室形状相结合，在活塞达到压缩上止点附近时对气流进行挤压，维持较强的湍动能效应（图 7），并能在整个燃烧持续期内得以较好地保持，这样更有利于提高 EGR 容易度，有利于降低燃油消耗率。

燃烧系统的设计主要通过三维模拟计算来确定燃烧室模型，通过仿真，火焰在进气侧和排气侧传播速度基本相同（图 8），火焰向四周基本是均匀发展。

3. 提高点火能量

适当提高点火能量。国内外大量的研究表明，提升点火能量有利于火核形成、稳定燃烧。该产品设定点火能量 90 MJ，一般在增压直喷发动机上使用，处于较高的水平。

试验结果

1. 整机试验数据

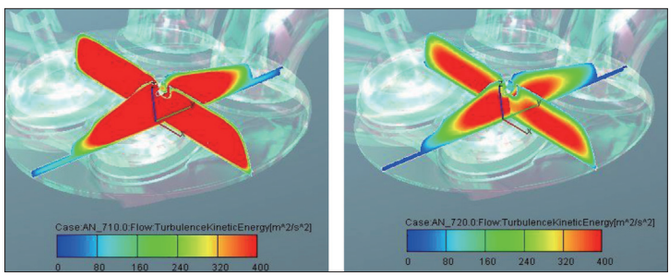

图 7 缸内截面湍动能分布

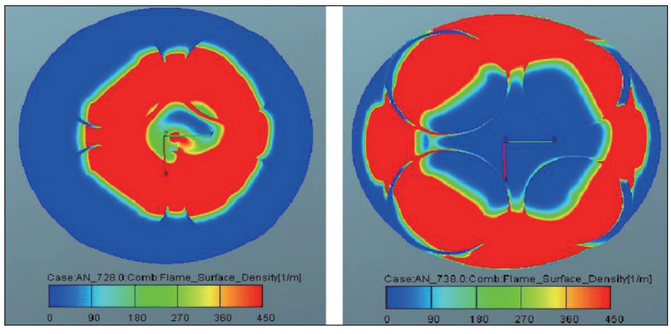

图 8 点火后 16° 和 26° 火焰传播情况

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 50 2022/4/8 19:02:40

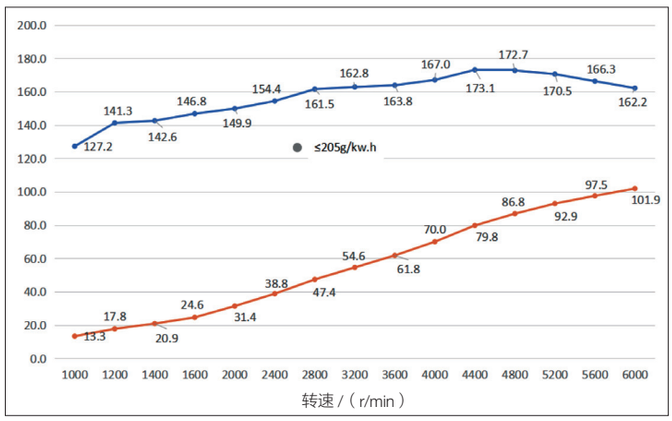

图 9 性能试验结果

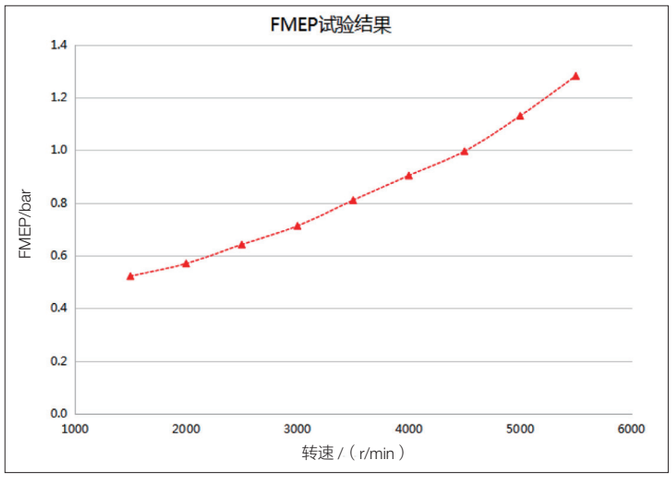

图 10 摩擦功测试结果

经过燃烧开发及台架标定，某 2.0 L 混动发动机实现，最大功率 101.9 kW，最大净转矩 172.7 N·m，低端转矩 127.2 N·m，最大有效热效率 42.2%（图 9）。

2. 摩擦功测试

对发动机开展摩擦功测试，试验结果显示，整机摩擦功达到设计指标，即 2 000 r/min（冷却液温度 90 ℃、油温 90 ℃）的整机摩擦功 0.57 bar（图 10）。

总结

在某款 2.0 L 气道喷射自然吸气发动机的基础上，开展提升发动机热效率的研究。研究经历了技术方案的制定、一维性能模拟计算、气道和燃烧室三维模拟计算及专业台架测试四个阶段，在研究过程中形成以下结论：

1）提高压缩比（15:1）、采用阿特金森循环、采用外部冷却 EGR 技术，可以有效降低燃烧消耗率，同时阿特金森循环和外部冷却 EGR 技术有利于抑制爆燃，能够更好地发挥高压缩比的效果。

2）设计高滚流比气道、强湍动能燃烧室，可以有效减少发动机爆燃倾向，是性能指标达成的核心。

3）降低摩擦损失及附件功耗是开发高效混动发动机的关键环节，目前摩擦功还处于较高水平，还有节油潜力可以挖掘。AI

auto.vogel.com.cn
中国汽车人的全媒体传播平台
多元路径打造品牌新增长实力
行业网站
在线会议
展会现场
公关服务
短视频 / 直播
自制视频
线下论坛
微信微博
期刊快讯
AI《汽车制造业》是德国弗戈传播集团与中国机械工业信息研究院通过版权合作共同出版的汽车行业专业媒体，通过网站、微信、微博、视频、杂志、快讯、会议活动及第三方平台，传播汽车及零部件的设计与开发、工艺与装备、测试与试验全流程中的先进技术和实用案例，服务于中国汽车及零部件行业用户。
广告
中国汽车人的全媒体传播平台
AI汽车制造业
VOGEL机工弗戈

44-56 发动机节能减排 4.6.indd 51 2022/4/8 19:02:41