

浅谈航空重油活塞式发动机

Discussion on the Aviation Heavy Fuel Piston Engines

■ 胡强 / 海军装备部装备项目管理中心 余双 史开源 / 中国人民解放军92728部队 王士奇 / 中国航发研究院

在通用航空领域，特别是低（空）、慢（速）、小（型）的飞行器，活塞式发动机依然占据主导地位，其中的绝大部分（>95%）是以航空汽油为燃料的火花塞点燃活塞式发动机。但从2000年左右开始，航空界又重新掀起了以航空重油为燃料的活塞式发动机的研发和生产的热潮。

顾名思义，航空重油活塞式发动机是指采用航空重油作为燃料的活塞式发动机，其中重油专指煤油和柴油燃料，与重油相对应的是汽油燃料。与汽油相比，重油的闪点更高、更不易蒸发，因此安全性更高且易于存储和油料统一管理，并且其单位体积热值更高，更易于节省飞机油箱的空间。同时，重油更高的黏度使其在汽缸中能起到润滑的作用，大大降低润滑油的损耗。

航空重油活塞式发动机的特点

与使用航空汽油燃料的传统活塞式发动机、使用航空煤油燃料的燃气涡轮发动机相比，航空重油发动机的基本特点可以通过分析其理想热力学循环参数来做出基本的判断。理论上，不同的燃油类型和热力学循环可以任意组合。

现代燃气涡轮发动机，特别是输出轴功率的涡轴/涡桨发动机，采用的是布雷顿循环（Brayton Cycle），其显著特点就是单次点火后连续做功，压缩部件与燃烧、做功部件分离，因此其单体功率质量比高，燃料适应性强，且高空高速性能好。同时，提高燃气涡轮发动机的压比可以增加其循

环效率。但对于输出功率500kW以下的小型涡轴/涡桨发动机，由于尺寸效应的存在，以及产品成本的限制，其压比普遍在8:1以下，要求的尺寸越小，输出功率越小、转速越高（>30000r/min），并且压比越低，其热效率也就越低，普遍在20%以下。同时，为了保证输出轴转速，所需的变速箱结构就越复杂，逐渐抵消燃气涡轮发动机本体功率质量比高的优势。因此，在输出功率200kW以下的航空发动机市场，活塞式依然占绝对主导地位。

活塞式发动机的近似理想热力学循环主要有奥托循环（Otto Cycle）和狄塞尔循环（Diesel Cycle）。在奥托循环发动机的进气过程中，同时喷入燃料，形成油气混合物，接着再进入压缩过程。压缩过程中的温度升高容易在汽缸内引起早燃和爆震现象，因此需要在燃料中加入添加剂以提高燃料的抗爆性，即提高燃料的辛烷值。由于等熵压缩过程结束后的气体温度并没有达到燃油混合气的着火点，因此需要专门的点火装置来辅助点燃汽缸中的混合油气，一般由火花塞产生的高强度电火花来完成。以上的过程就需要燃料的自燃点较高，在压缩过程中

不易产生爆震，同时还要求燃料的燃点较低，易于实现成功点火。正是由于这个原因，奥托循环一般采用汽油作为燃料，奥托循环发动机也被等同于汽油活塞式发动机。奥托循环发动机的压缩比一般在6~12:1，有效热效率25%~30%。虽然增大压缩比可以提高奥托循环的热效率，但是点燃过程引起的爆震问题又限制了其压缩比不能太高，因此其效率提升的空间有限。

与奥托循环不同，狄塞尔循环发动机是在空气压缩过程结束后，利用高压喷油嘴将高压燃油直接喷入汽缸中，形成油雾。由于高压比使得空气温度超过了油雾的自燃点，因此不需要点火装置，油雾就会和热空气边混合边燃烧，同时也不易产生早燃和爆震现象。此过程需要燃料的自燃温度越低越好，因此适于采用柴油等重油燃料，一般狄塞尔循环发动机也被等同于重油活塞式发动机。重油活塞式发动机的压缩比一般在15~24:1之间，最高爆发压力可达25MPa，有效热效率可达36%~46%。与奥托循环相比，狄塞尔循环具有更高的压缩压力、更高的燃烧压力，以及更高的燃气压力，但为了应对一些更高的压力，

包括缸体、曲轴系统、活塞系统在内的所有发动机结构都要进行加强，这就导致了狄塞尔循环发动机比奥托循环发动机更重，这也是效率和输出功率提升的代价。表1列出并对比了几种循环发动机各自的优缺点。

航空重油活塞式发动机的早期发展和复兴

在航空活塞式发动机发展的早期，重油活塞式发动机就是指采用狄塞尔循环的柴油发动机。

在20世纪20和30年代，许多制造商制造了航空柴油发动机，但只有德国容克斯公司的Jumo 205系列获得了成功，并成为了半个世纪以来唯一成功的航空柴油发动机。Jumo 205曾作为早期的容克斯Ju-86轰炸机的动力装置，但在战斗机常见的最大功率状态下，发动机经常失效，因此不适合作为战斗机的动力。其最成功的应用还是作为客机和飞艇等非战斗应用场景的动力装置，如布洛姆-福斯（Blohm & Voss）公司的Ha 139客机和BV-138/BV-222海上巡逻飞艇。在同一时期，德国的其他公司，如戴姆勒-奔驰公司，

以及英国、法国、苏联也都进行了航空柴油机产品的研发和实验，但在这一阶段，作为主要用户的各国军方对发动机的主要要求是高功率、轻质量，而在当时技术水平条件下，采用汽油燃料的奥托循环发动机无疑是最佳的选择，因此各国发展的重点都放在了汽油活塞式发动机上。

二战结束后，燃气涡轮发动机吸引了世界各国的关注，由于功率质量比极高，且燃料的价格便宜，因此世界各国的研究重点都集中在高速客机的涡桨发动机和涡喷发动机，航空柴油动力更加无人问津。到了20世纪90年代，由于通用航空市场不景气，更没有任何新型柴油发动机的开发计划。

进入21世纪后，以上的情况发生了重大改变：通用航空市场开始复苏，出现了许多开发新型通用航空飞机的制造商；航空汽油的价格不断上涨，且欧美国家相继出台禁止使用含铅燃料的法规；在很多地方（特别是偏远地区），航空汽油比柴油更难获得；汽车柴油发动机技术得到了极大的改进，提供了更高的功率质量比，更适合飞机应用。

随着时代的发展，消费者对燃料安全性、环境友好性、使用成本、燃料易得性的要求越来越高，同时小型无人机以及运动型飞行器市场的快速发展，使得人们重新考虑克服传统航空汽油发动机缺点的替代方案，包括研发无铅航空汽油添加剂、研发小型燃气涡轮发动机、点燃式和压燃式航空重油发动机等。但是，无铅航空汽油的研发迟迟没有进展，而小型燃气涡轮发动机的效率问题短期内也无法解决，因此行业内又把重点放在了采用奥托循环的点燃式重油活塞式发动机，以及采用狄塞尔循环的压燃式重油活塞式发动机的研发上。

航空重油活塞式发动机的发展现状

点燃式与压燃式航空重油发动机的比较

点燃式与压燃式重油活塞式发动机的优缺点基本与其对应的热力学循环（奥托循环和狄塞尔循环）的优缺点一致。与压燃式相比，点燃式重油航空活塞发动机的显著优点在于其较高的功率质量比，以及紧凑的结构和较小的体积。同时，二者的功率覆盖范围也有较大差异，点燃式的功率一般在100 kW以下，而压燃式的功率一般在100 kW及以上。同时，点燃式重油发动机易于在传统航空汽油发动机的基础上进行改进研发，主要技术难点在于如何使闪点高、黏度大的重油实现良好的雾化混合，以保证火花塞能够在低温等恶劣条件下将重油点燃，并且解决压缩混合气过程中的爆震问题。然而，点燃式重油活塞发动机与传统航空汽油活塞发动机相比，

表1 几种航空发动机典型热力学循环的特点比较

| 发动机类型 | 特点 | 优势 | 劣势 |
|-----------------|--------------------|---------------------------------|---|
| 燃气涡轮发动机（布雷顿循环） | 连续做功、单次点火 | 单体功率质量比高、燃料适应性强、大功率下效率高、高空高速性能好 | 尺寸效应明显、小功率下压比低，效率低、小尺寸下转速高，减速器质量大、制造成本高 |
| 汽油活塞式发动机（奥托循环） | 压比8~12:1、点燃式、往复式做功 | 技术成熟、整体功率质量比高 | 热效率较低、可靠性低、高空性能差 |
| 重油活塞式发动机（狄塞尔循环） | 压比<25:1、压燃式、往复式做功 | 效率高、可靠性高、抗电磁干扰、转速低、扭矩大、减速器质量轻 | 功率质量比低、振动/噪声高 |

只解决了使用油料问题的同时还带来了效率下降等其他问题，所以在航空汽油没有被完全禁止使用之前，其应用场景被局限在对油料使用有特殊要求的场景，比如安全消防、舰艇环境等。而压燃式重油活塞式发动机的热效率高、耗油率低、可靠性高、高度特性好、转速低/扭矩大、减速器质量轻，虽然依然存在功率质量比低、振动/噪声较大等问题，但是与传统航空汽油活塞式发动机相比，同时解决了使用油料、

提升效率及可靠性的问题，因此在通用航空的应用场景更为广阔。

通过适航认证的压燃式航空重油发动机

鉴于压燃式航空重油活塞发动机的多重优势，目前国际范围内已有多款发动机研发成功并通过适航认证，其中比较典型的是大陆发动机公司旗下Technify Motors公司的Centurion系列发动机、钻石飞机公司旗下Austro Engine公司的AE300系列发动机、赛峰集团旗下SMA公

司的SR305系列发动机等。除目前已经获得欧洲航空安全局（EASA）或美国联邦航空局（FAA）适航认证的压燃式重油活塞式发动机（主要参数见表2）外，还有多款产品正处于研发或取证阶段。

以上几款通过认证的发动机，除了RED A03之外，均是在现有车用发动机的基础上改进，或者是与车用发动机生产商合作研发的产品。如Centurion 2.0和AE 300/330发动机均是在梅赛德斯-奔驰OME640车用柴油发动机的基础上研发的直列四缸四冲程液冷压燃式活塞式发动机。SMA公司的前身是由法国雷诺汽车赛车部（Renault Sport）与法国DAHER集团飞机部SOCATA公司成立的一个合资公司。DieselJet公司的产品也是在菲亚特汽车公司研发中心、意大利博洛尼大学的合作下研发出来的。无一例外，目前通过适航认证的压燃式活塞式发动机都来自欧洲大陆。相比之下，美国的三角鹰（DeltaHawk）公司研发的DH系列压燃式重油活塞式发动机历时近20年，依然尚未通过适航认证。这与欧洲普遍使用的车用柴油发动机技术高度发达关系重大，相比之下，美国汽车普遍使用汽油发动机。这导致欧洲厂商在车用柴油发动机的基础上研发航空重油发动机上具有天然优势：利用车用发动机的大规模生产线，能够有效降低设计开发的初始成本；利用已有车用发动机的大量可靠性数据，可以有效评估衍生发动机的安全性；将高压共轨直喷等新技术转移到航空发动机上，可以从汽车工业快速持续的技术发展中不断获得改进。

与传统航空汽油、涡轴发动机

表2 目前已经获得适航认证的压燃式重油活塞式发动机

| 制造商 | 国家 | 型号 | 最大功率/kW | 输出转速/(r/min) | 质量/kg | 功率质量比/(kW/kg) | 配套飞机平台 |
|-----------------|-----|---------------------------------------|---------|--------------|-------|---------------|------------------------------------|
| Technify Motors | 德国 | TAE 125-01/Centurion 1.7 | 99 | 2300 | 134 | — | 钻石DA40/DA42、赛斯纳C172、派珀PA28、罗宾DR400 |
| | | TAE 125-02-99/CD-135/Centurion 2.0 | 99 | 2300 | 134 | — | |
| | | TAE 125-02-114/CD-155/Centurion 2.0 S | 114 | 2300 | 134 | 0.85 | |
| | | TAE 125-02-114P/CD-155P | 114 | 2300 | 153 | — | |
| | | CD-300/Centurion 3.0 | 221 | 2300 | 265 | 0.83 | |
| | | Centurion 4.0 | 257 | 2300 | 286 | 0.9 | 西锐SR-22、赛斯纳206 |
| Austro Engine | 奥地利 | E4P/AE300 | 123.5 | 2300 | 186 | 0.66 | 钻石DA40/DA42/DA50/DA52 |
| | | AE330 | 132 | 2300 | 186 | 0.71 | 钻石DA62 |
| SMA Engine | 法国 | SR305-230 | 169 | 2200 | 195 | 0.87 | 赛斯纳182 |
| | | SR305-230E | 169 | 2200 | 207 | 0.82 | |
| | | SR305-260E | 194 | 2200 | 206 | 0.94 | 钻石DA50 |
| DieselJet | 意大利 | TDA CR 1.9 8V | 118 | 2450 | 205 | 0.58 | — |
| | | TDA CR 2.0 16V | 142 | 2306 | 219 | 0.65 | — |
| Red Aircraft | 德国 | RED A03 | 368 | 2127 | 363 | 1.01 | 雅克-152教练机 |

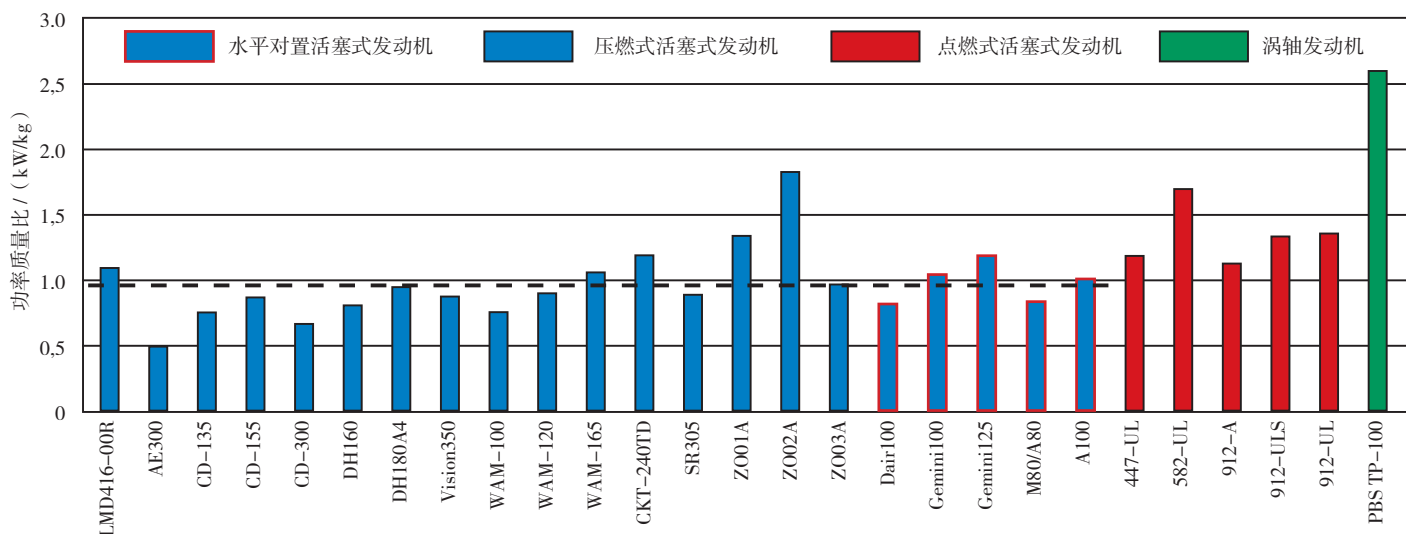


图1 几种典型发动机功率质量比的比较

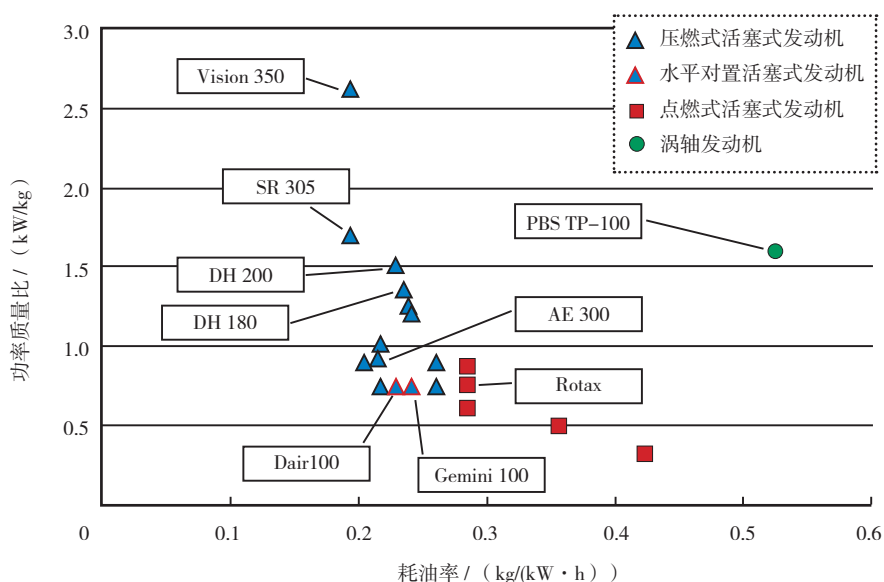


图2 几种典型发动机的功率和耗油率的分布

的参数比较

通过统计40余款已认证或正在研发的压燃式活塞式发动机的功率质量比、耗油率、压缩比、汽缸布置形式、汽缸数量和排量、汽缸行程/缸径等参数，并与奥地利Rotax公司的系列航空汽油活塞式发动机，以及捷克PBS公司TP-100涡轴发动机的相关参数进行比较(如图1和图2所示)，可以看出各类发动机的优势和劣势基

本与前文分析一致，压燃式重油活塞式发动机的耗油率基本都在0.25 kg/(kW·h)以下，显著优于汽油活塞发动机和涡轴发动机，而其功率质量比普遍在1以下，与另外两类发动机差距明显。

结束语

通用航空动力一直向着更安全、更高效、更清洁的方向持续发展，重

油活塞式发动机无疑是这一发展方向的典型代表。点燃式重油活塞发动机由于其高功率质量比、结构紧凑、与传统航空汽油机技术继承性强的特点，在微小型无人机市场迅猛发展的背景下得到了快速的发展；压燃式重油活塞式发动机在车用柴油发动机高压共轨等技术的转移，以及轻量化材料的加持下，逐渐摆脱了笨重的枷锁，其高效、可靠的天然优势凸显，在长航时飞行任务中具有无可比拟的优势，在通航飞机中的应用逐渐扩大。然而，面对这一巨大的新生市场，国内重油活塞式发动机的发展却面临诸多的困难：目前国内的通航动力基本上被国外传统航空汽油发动机所垄断；短期内不太可能出台禁用航空汽油的法令；传统航空汽油发动机的技术积累有限；轻量化车用柴油发动机并未广泛应用。如何突破如此困境，值得国内从业者和政策制定者深思。

航空动力

(胡强，海军装备部装备项目管理中心，工程师，主要从事动力装备项目管理工)