

# 航空发动机润滑油发展浅析

## Development of Aero Engine Oil

■ 陈捷 / 壳牌公司

为保障航空发动机的可靠、安全、高效运行，同时降低维护成本，发动机的润滑系统及润滑油也在应对各种挑战的过程中得到长足发展。

航空发动机的润滑系统及润滑油主要为发动机的轴承、附件齿轮箱等部件提供润滑、散热、清洁、防腐保护作用，同时还能够对发动机的振动起到阻尼作用。发动机的轴承支撑着压气机、涡轮，附件齿轮箱驱动液压泵、燃油泵、起动发电机，都是对飞机非常重要的系统，可见润滑油对飞机和发动机的重要性。

### 发展历史

润滑油一直是航空发动机不可或缺的组成部分。

由于早期发动机对工作温度和载荷的要求相对较低，对润滑油主要要求的是低温起动性能，因此，当时的润滑油以运动黏度低（2~9 mm<sup>2</sup>/s，活塞式发动机用润滑油普遍为20~25 mm<sup>2</sup>/s）且易于炼制的矿物油最为普遍。

20世纪50年代，燃气涡轮发动机迅猛发展，更大推力、更高涵道比的涡扇发动机开始进入应用阶段。基于矿物基础油的润滑油暴露出在较高的温度下易挥发和热降解的问题，因此天然有机物合成的润滑油得到应用。合成油表现出优异的性能，非常适合作为基础油，但其黏度一般只有3 mm<sup>2</sup>/s，缺乏足够的承载能力。合成油在添加了增稠

剂（复合酯）之后，可在100°C下将黏度提高到约7.5 mm<sup>2</sup>/s，从而提供了所需的承载能力。另外，与矿物油不同，合成油必须依靠添加剂来提高抗氧化性和抗热降解性，这对于保证发动机长期运行后的清洁度有至关重要的作用。与此同时，美国军标MIL-L-7808（后改为MIL-PRF-7808）和英国国防部标准DERD 2487（后改为DEF STAN 91-98）应运而生，分别对应3 mm<sup>2</sup>/s和7.5 mm<sup>2</sup>/s这两种当时主流的黏度要求润滑油。其中，3 mm<sup>2</sup>/s的黏度标准至今仍有应用，如波音787的辅助动力装置（APU）仅批准使用3 mm<sup>2</sup>/s的润滑油，因为3 mm<sup>2</sup>/s润滑油具有低温流动特性，有助于APU在低温情况下的起动。

20世纪60年代，发动机尺寸和功率输出的不断增加，对润滑油的热稳定性和高承载能力提出了需求，美国针对以“受阻酯”为基础、黏度为5 mm<sup>2</sup>/s的第二代润滑油制定了美国军标MIL-L-23699（后改为MIL-PRF-23699）。第二代润滑油在美国发动机中率先使用，随后在英国、加拿大和法国得发动机中得到广泛应用。

此后，随着发动机性能不断提高（更低的油耗、更高的工作温度和压力），维护方式不断进步（更长的大修间隔），客观造成润滑油工作

条件更加严苛，第二代润滑油已无法满足要求，取而代之的是热稳定性更好的“第三代”或“高热稳定性型”（HTS）的润滑油。

尽管美国军标MIL-PRF-23699自20世纪60年代以来一直被发动机和辅助动力装置（APU）厂家所遵循，作为其批准使用的前提条件，但是随着民用发动机对推进效率和更长的大修间隔的进一步追求，其已不足以定义现代商用发动机所需要的润滑油类型。因此，美国汽车工程师学会（SAE）E-34发动机润滑油委员会应运而生，制定了应用于民用航空发动机得润滑油规范，并于2000年发布了SAE AS5780。在军标方面，美国2014年发布的MIL-PRF-23699的G版本加入了增强酯级别（Enhanced Ester Class）要求，反映美军对润滑油更好的弹性密封件兼容性和负载能力的需求（主要针对F-35飞机）。

### 工作特点

航空燃气涡轮发动机润滑油系统的工作过程如图1所示。润滑油贮存在滑油箱中，在发动机运转过程中，滑油泵提供持续压力，将润滑油通过供油管路泵至各轴承腔和附件齿轮箱及其传动装置中。中大型航空发动机通常

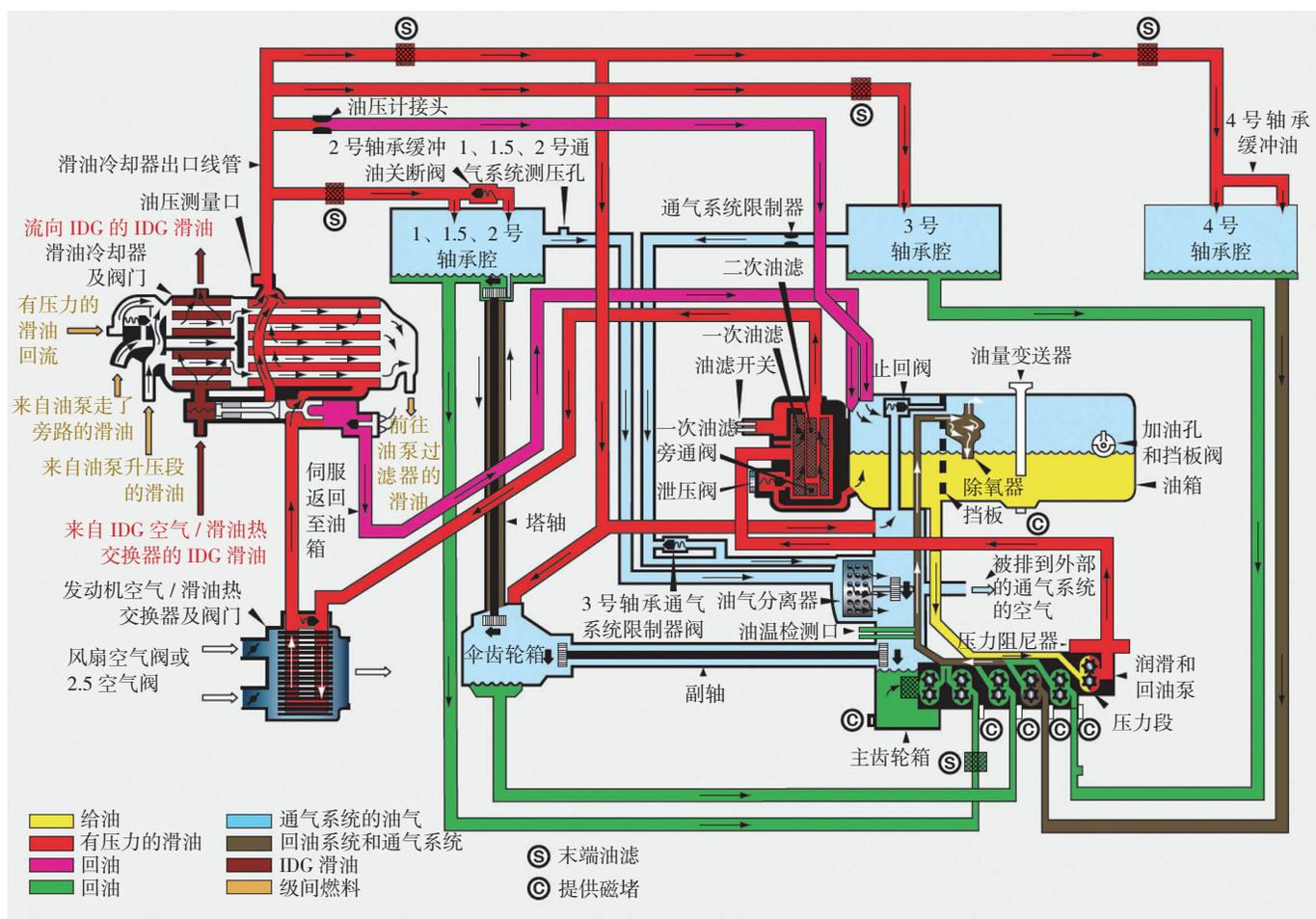


图1 典型的航空发动机润滑系统示意

采用气动封严来密封轴承腔，因此从轴承腔的回油管排出的通常是润滑油和空气的雾状混合物。燃烧室前的转子轴承温度（压气机部分）比燃烧室之后的转子轴承（涡轮部分）温度低，因此润滑油在这些轴承腔里的工作温度差异最高可达100℃。完成润滑任务之后的油气混合物和从附件齿轮箱排出的润滑油被泵至热交换设备冷却，然后进行油气分离，最后回到滑油箱，进入下一个循环。润滑油系统每分钟最多可完成3次循环。发动机停车后，滑油泵停止工作，润滑油中的热量不能主动散发，而是要经过自然冷却的过程，从而增加了氧化和炭化的可能性。

由上可以看到航空发动机润滑油的工作具有以下特点：润滑不同类型的部件（既有轴承，也有齿轮）；在管路循环中润滑油温度不断变化；大部分时间与热空气并存；接触不同类型的材质（包括金属和弹性密封件等）。这些特点对润滑油热稳定性、抗氧化能力、相容性和负载能力都有比较高的要求。

### 发展方向

为了使飞机能够不间断飞行的时间更长、距离更远，发动机的推进效率和热效率必须提高，这就导致现在的发动机比20世纪60年代的运行温度高得多。除了在更高温度下工

作外，润滑油在发动机大修之前一般不会彻底更换，而目前发动机在翼时间进一步延长，这意味着润滑油需要在更长的大修间隔时间内保持正常工作。因此，避免润滑油结焦和提高与弹性密封件的相容性的重要性就更加凸显。

### 避免结焦

结焦是指发动机运行中不必要的积炭。当发动机润滑油暴露于高温环境中时，积炭就会逐渐形成。发动机在运行一段时间后，常见的几种结焦现象（如图2所示）：一是薄膜状结焦，积炭层附着在光滑的金属表面，会卷曲或脱落，此类结焦通常发生在发动机循环过程中；二是气相结

焦，可见于在发动机较热部位的余油口或通风口，这些部位通常是光滑的哑光表面，加之空气与滑油混合比高，结焦之后表面会看起来粗糙；三是结块或坑状积炭，可见于润滑油聚集的地方，积炭会形成厚团块，此类结焦可能与发动机正常停车有关，停车时滑油停止流动，滑油无法通过热交换器散热，热量反而被滑油吸收造成氧化；四是动态结焦，积炭在滑油管路内形成不规则流动区域，此类结焦是导致供油管和回油管的阻塞的可能机理之一。

目前仍有飞机运营商认为，结焦是发动机润滑油在高温环境工作的正常现象。但如果对润滑油结焦的现象不采取预防措施，会造成额外的发动机维护成本以及潜在的安全影响。例如，结焦会堵塞滑油滤和润滑油系统回油管、排气管和供油管，从而造成润滑油流量和压力不足，或迫使润滑油进入不应该进入的发动机区域，更甚者会导致轴承故障，或可能发生发动机起火。

实际上，使用热稳定性更强的润滑油可以改善结焦状况、有效减少或避免发动机大修时清洁积炭或更换污染的发动机部件的额外工作，是提高发动机维护效率、降低维护成本和提升安全的有效途径之一。例如，普惠加拿大公司生产的PT6A-66D发动机，在使用了1种高热稳定性型润滑油的情况下，发动机制造商允许的发动机大修间隔（TBO）从3000h延长到3500h（增加17%）。

### 提高与弹性密封件的相容性

发动机及其部件里常用的密封件的材料为氟橡胶A/B/E，为了使密封有效，密封件会吸收一部分润滑油使其膨胀，从而起到密封作用。根据经验，最佳的润滑油吸收量应使密封件产生12%~20%的膨胀。如果润滑油与密封件之间的相容性不理想，则会造成密封件劣化，导致密封件过度膨胀或收缩开裂，进而造成润滑油渗漏或其他外来物污染润滑油系统。

通常发动机润滑油主要采用以

醇和脂肪酸为基本原料的合成多元醇酯作为基础油，而非矿物的基础油，与矿物基础油相比，酯对弹性密封件更具攻击性。润滑油的其他成分主要是提供所需性能要求的添加剂成分，包括保持发动机清洁的分散剂、减少金属和金属接触磨损的表面活性添加剂（包含耐磨成分）、缓蚀剂，以及有助于保护基础油免受热降解和结焦的抗氧化剂，但部分高热稳定性型润滑油中的抗氧化剂会导致弹性密封件劣化，造成故障性漏油。例如，CFM国际公司的CFM56和GE公司的CF34发动机均曾出现过使用添加不当抗氧化剂的高热稳定性型润滑油导致弹性密封件劣化的情况，迫使航空公司进行额外的定期检查或不得不改装相应的密封件来避免漏油。

如何在保持高热稳定性的同时，使润滑油与弹性密封件更相容，从而节省成本和提高安全裕度，是目前航空发动机润滑油发展的重要方向。

## 结束语

经过数十年发展和积累，以美国军标MIL-PRF-23699G和SAE AS5780D为代表的高热稳定性规范和高性能等级规范，以应对润滑油结焦和提高弹性密封件相容性。通过提高发动机润滑油的以上两种能力，发动机能够更加安全、高效地运行，避免不必要的维护，降低运营成本，因此，用户转向高热稳定性型或高性能等级的润滑油无疑是未来的必然趋势。

**航空动力**

（陈捷，壳牌公司航空润滑事业部，亚太及中东地区OEM和行业经理，从事航空润滑产品研究及业务发展与合作交流）

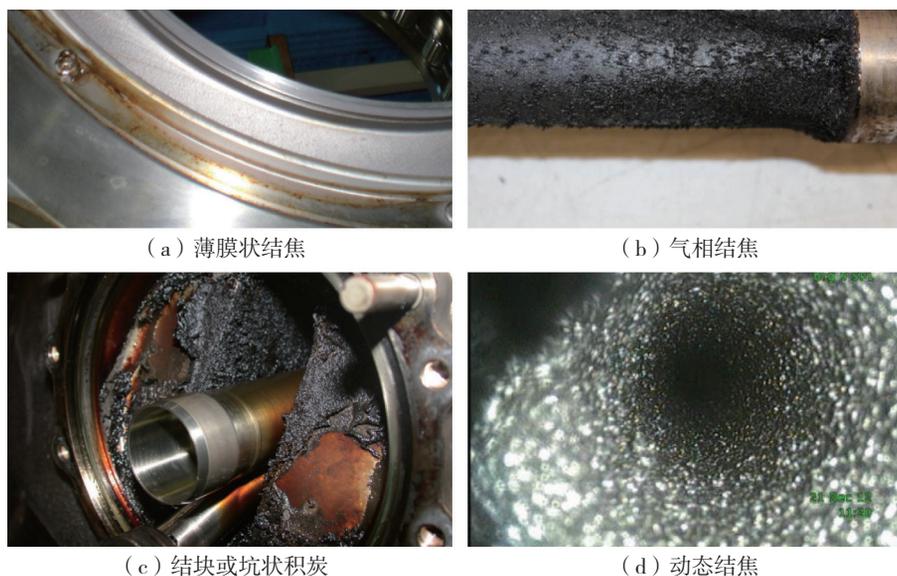


图2 几种润滑油结焦形态