

滑油自燃引发的故障

Failures Caused by Oil Spontaneous Combustion

■ 陈光/北京航空航天大学

发动机滑油的自燃现象时有发生，成为飞行安全的重大隐患。因此，对滑油腔的封严装置以及滑油腔的连接导管等在设计、制造、使用、维修中都要格外注意，绝不可掉以轻心。

发 动机的滑油在超过250℃且条件适合时会自行燃烧，这种现象称为滑油自燃。滑油自燃后温度骤升，对相邻的零组件会造成损伤，例如，零组件材料会在燃烧的高温下失去应有的强度而损坏，有的零组件会被烧熔。

JT8D发动机4号、5号轴承间滑油腔的滑油自燃引发的故障

JT8D发动机是20世纪60—80年代西方国家生产最多的小涵道比涡扇发动机，截至1991年有近13000台用于军用或民用飞机上，累计飞行达2370万小时/1480万循环。在1969—1990年，JT8D发动机共发生过28

起滑油自燃，造成高压涡轮轴或连轴器损坏甚至断轴故障，仅1984—1988年就发生过10起，其中5起是非包容的断轴故障。由于发动机数量多，积累的工作小时多，因而由它引起的故障率（每千小时故障次数）较低，但后果却非常严重。

JT8D发动机由1级风扇、6级低压压气机、7级高压压气机、环管形燃烧室、1级高压涡轮与3级低压涡轮组成。4号轴承（并列2个滚珠轴承）在高压压气机后，5号轴承在高压涡轮前，燃烧室机匣内装有隔热套筒，隔热套筒与高压涡轮轴间形成滑油腔，如图1所示。5号轴承后装有端面石墨密封组件，如图2所示。

据分析，在1984—1988年发生

的滑油自燃的原因是：隔热套筒后端的波纹套管的拐弯处疲劳断裂，形成缺口，高温空气由此窜入（3起）；端面石墨密封处滑油结焦，使石墨封严端面与封严环不能密合，出现大的缝隙，高温空气由此窜入（1起）；石墨封严端面与封严环间不能密合，出现大的缝隙，滑油由此缝隙流到高压涡轮轮盘前端，与高温空气混合引发滑油自燃，燃烧的火焰将端面石墨封严件的隔热罩烧穿形成缺口，高温空气由此缺口流入滑油腔（6起）。

针对上述问题，普惠公司采取了相应的改进措施，取得了较好的效果。为了更好地发现滑油自燃隐患，普惠公司在4号、5号轴承间滑油腔的回油导管上采用了示温漆显

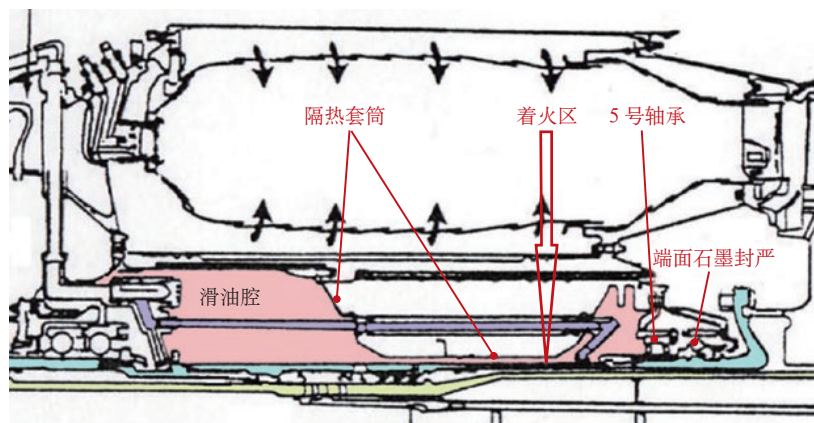


图1 JT8D 4号、5号轴承间的滑油腔

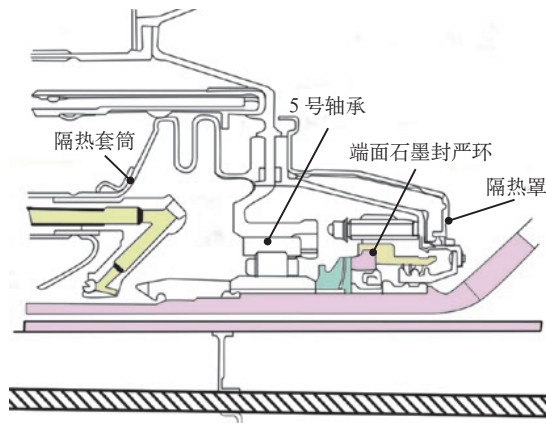


图2 JT8D 5号轴承与封严件

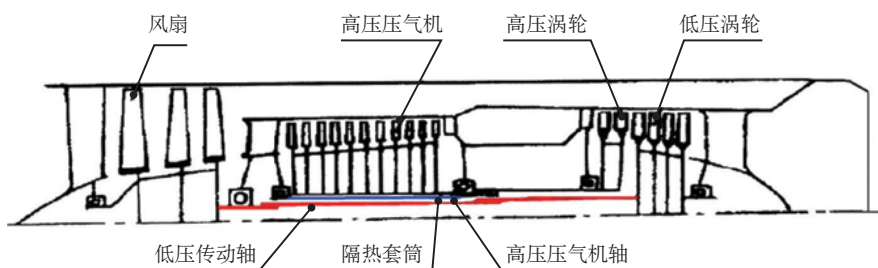


图3 D-30KU-154发动机

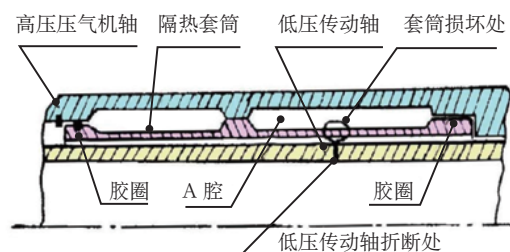


图4 隔热套筒在高压压气机轴内的配置

示温度的方法来监测回油的温度。即在回油管上涂有黄色与红色方块各一处，方块中心留有一淡灰色的小圆作标识。当滑油温度超过 190°C 时，黄色方块中的圆变为黑色。正常情况下，每工作65h或65循环须检查一次温度指示器，如果黄方块中心已变色，还可继续工作，但不能超过25h或25循环，否则要采取排故措施；如果红色方块中心变黑，则须立即转场到基地进行排故。据称，安装这套温度指示系统后，曾发现过5台发动机指示器变黑，在立即采取排故措施后，避免了故障的发生。

D-30KU-154发动机隔热套筒的滑油自燃引发低压涡轮转子非包容破裂故障

D-30KU-154为小涵道比涡扇发动机，是图-154的动力装置。1988年5月30日晚，一架中国民航的图-154M客机在广州起飞后约10min，装于机尾的发动机发生了严重的断轴故障，4级低压涡轮全部被甩出机体，在约 300° 的扇形区域中将飞机尾部蒙皮（除顶端外）击穿，蒙皮呈碎片状向四周伸出。

发生故障的D-30KU-154发动机于1985年9月28日出厂，已使用

4582h/2437循环。如图3所示，该发动机由3级风扇、11级高压压气机、2级高压涡轮与4级低压涡轮组成。在高压压气机转子内装有一个钛合金制成的隔热套筒，隔热套筒与低压传动轴之间为滑油腔。

如图4所示，隔热套筒前、后均装有封严胶圈与高压压气机轴内孔相接触，使隔热套筒与高压压气机轴之间形成环形的死腔A（在发动机内不允许有死腔，这是设计错误，后来苏方进行了修改）。发动机长期工作后，封严胶圈老化失效，滑油由失效的封严胶圈处漏入A腔，滑油在高温作用下自燃，燃烧时使A腔内压力增大，隔热套筒在外压作用下失稳向内变形形成一个凹陷处，凹陷处呈菱形，如图5所示。凹陷处的最尖处与低压传动轴相接触，在相对转速 $5700\text{r}/\text{min}$ 作用下，将低压传动轴磨出深槽，低压传动轴折断，造成4级低压涡轮转子失去负荷而超

转直至飞转，转子在极大的离心力作用下爆裂，碎块甩出发动机，幸运的是受损的发动机处于飞机后机体上端，甩出发动机的断块未打到飞机机体。

遑达900发动机滑油自燃引发中压涡轮转子非包容故障

装有4台遑达900大涵道比涡扇发动机的A380飞机于2007年10月投入航线运营，在2010年11月4日由新加坡起飞执行QF32航班任务时，起飞15min后2号发动机（位于左机翼内侧）中压涡轮盘突然爆裂，碎块以很大的离心力击穿涡轮机匣与发动机短舱，打坏飞机多处结构，包括操纵与液压系统，如图6所示。在驾驶员沉着冷静的操作下，终于将损坏严重、难以控制的飞机安全降落，机上包括机组人员共466人，无1人伤亡。

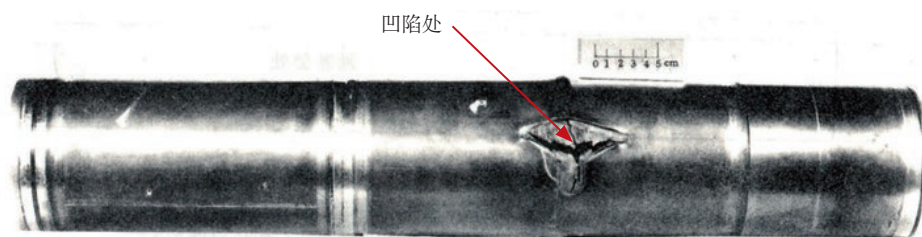


图5 钛合金的隔热套筒损坏情况

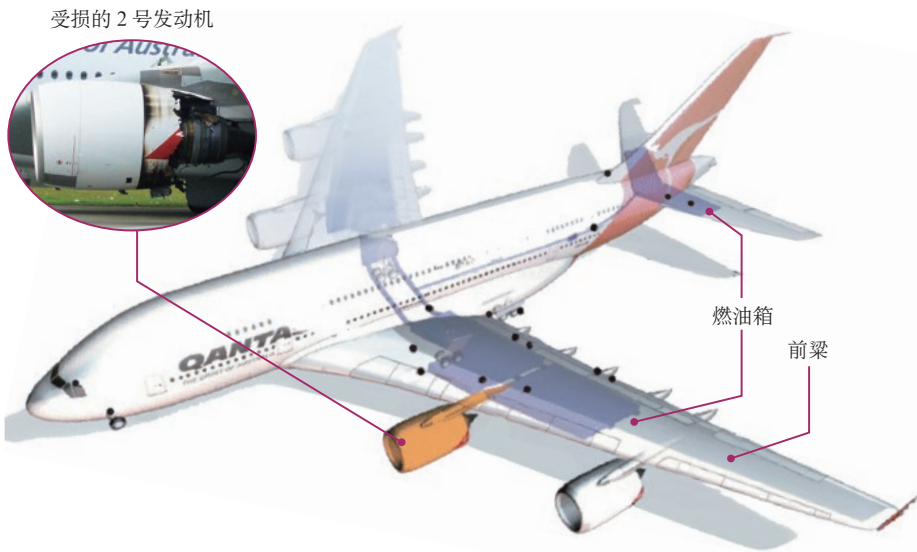


图6 A380飞机受损部位

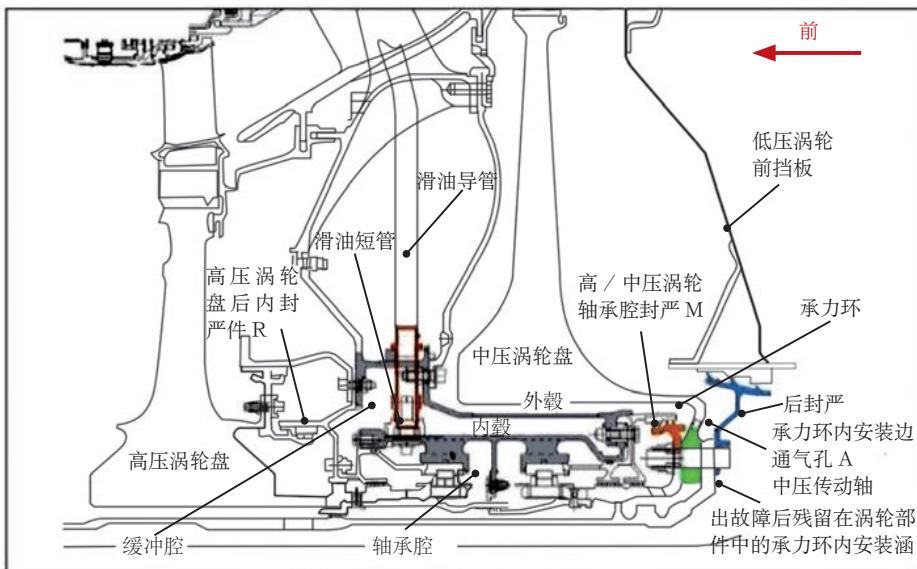


图7 遛达900高、中压涡轮间承力框架

遛达900发动机由1级风扇，8级中压压气机、6级高压压气机、各1级高中压涡轮与5级低压涡轮组成。图7所示为高中压涡轮间承力框架以及中压涡轮与中压传动轴连接结构。

输送滑油到轴承腔的导管最下端的滑油短管沿圆周壁厚不一致，最厚处为1.42mm，最薄处仅为0.35mm，比设计值小0.56mm。发动机工作677循环后，滑油短管最薄处出现疲劳裂缝，滑油由此裂缝中呈雾状喷出（见图8），与高温空气混合，滑油自燃。由于滑油是连续不断地向外喷出，因此火焰不断地向前、向后延伸（见图9），最终造成中压涡轮轮盘后承力环在与中压传动轴连接处断开，中压涡轮盘失去负荷而飞转，在极大的离心力作用下爆裂，碎块被甩出发动机，造成震惊世界的QF32客机严重受损的重大事件。

PW1000G 高、低压涡轮间承力框架中滑油自燃将1级低压涡轮盘烧熔

PW1000G是普惠公司于2007年开始研发的大涵道比齿轮传动涡轮发动机，它由1级风扇、1套减速器、3级

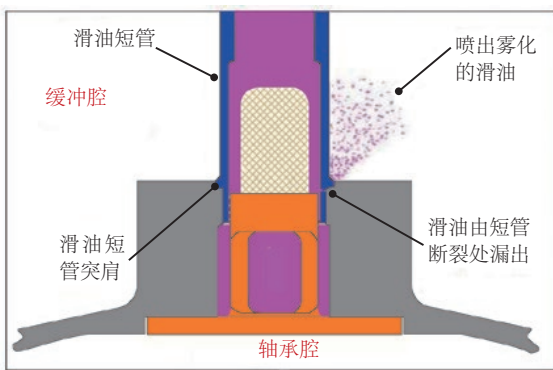


图8 滑油油雾从断裂处外喷

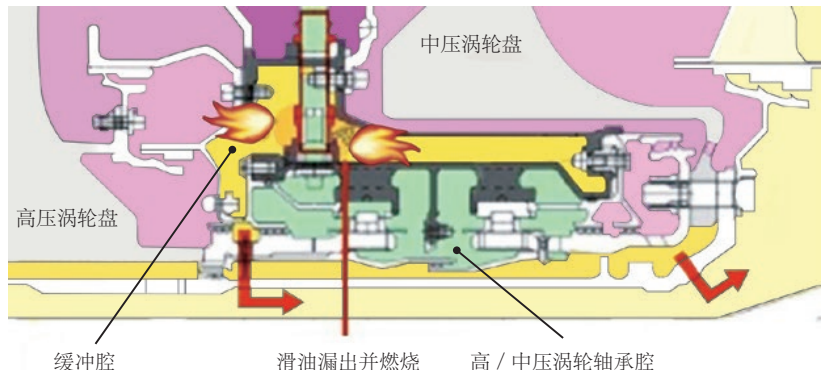


图9 漏出的滑油自燃火焰向前、后漫延

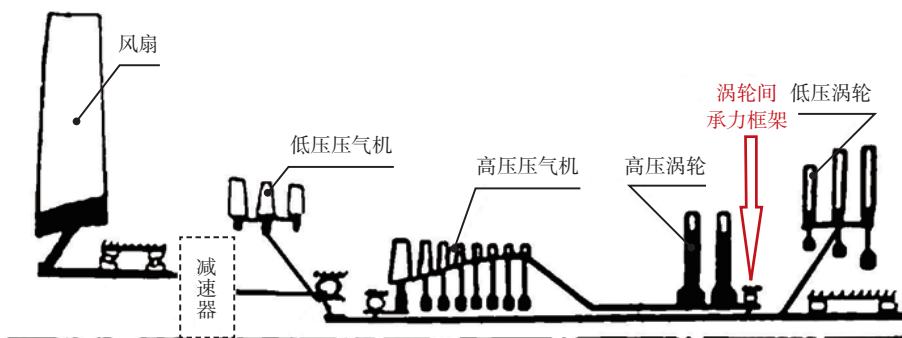


图10 PW1000G转子支承

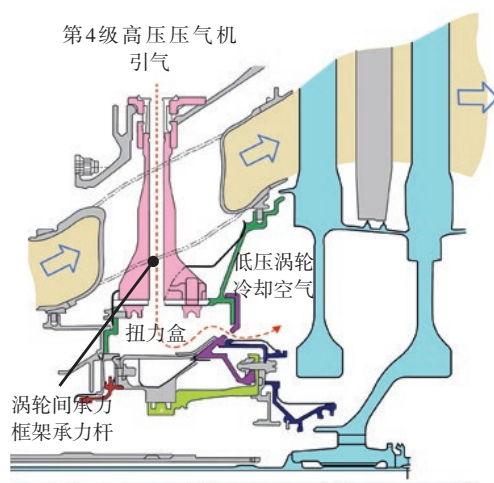


图12 冷却轮盘的空气由承力杆中流入扭力盒

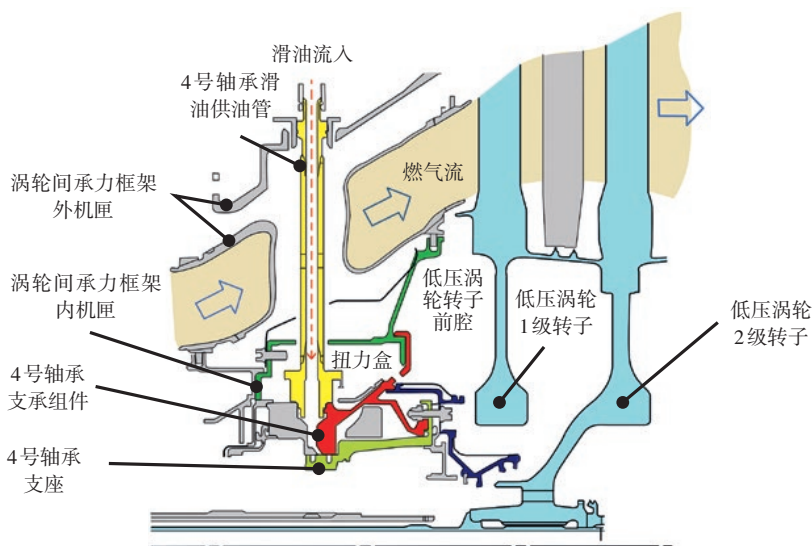


图11 滑油导管插在扭力盒上的结构

低压压气机、8级高压压气机、2级高压涡轮与3级低压涡轮组成，如图10所示。PW1000G已被A320neo、MRJ（SpaceJet）、C系列（A220）、E190-E2及MC-21等5款客机选用。

2014年5月29日，PW1500G安装在CS100上进行地面检验性试车时，左发1级低压涡轮盘爆裂甩出发动机，造成了一起严重的非包容事故。

在高、低压涡轮间承力框架中，流入轴承腔中的滑油是通过装在空心低压涡轮导向叶片中的滑油导管输入的，滑油导管最下端穿过扭力

盒插到轴承支座的油孔中，如图11所示。在供油管与油孔接触处，在导管端头装有特氟龙C封严圈。1级低压涡轮轮盘前端的冷却空气引自第4级高压压气机出口处，是通过装在空心的1级低压涡轮导向叶片中的承力杆流入扭力盒，再由扭力盒后端的冷却孔喷向低压涡轮轮盘前端面，对低压涡轮轮盘进行冷却，如图12所示。

由于试车台的技术人员操作失误，使特氟龙C封严圈的温度达到190℃，超过它允许的工作温度（大于162℃时变形，大于180℃时永久

变形），封严圈失效，滑油向外泄漏。不断外泄的滑油流到扭力盒中，与不断流入扭力盒中用于冷却低压涡轮轮盘的、来自第4级高压压气机的高温空气混合，滑油自燃，形成不断的燃烧，高温燃烧的气体由冷却空气孔喷向涡轮轮盘轮辐。连续不断地由冷却孔喷出的灼热的燃烧气体，像喷火枪一样喷出的火焰射向高速旋转的轮盘，将轮盘幅板烧出一个环形缺口，带叶片的轮缘部分在离心力作用下裂成几块，断块击穿机匣甩出发动机，形成了严重的非包容性的轮盘破裂事故；中心部分形成面包圈似的环形件残留在发动机内。

结束语

在发动机中，滑油腔均是围绕着传动轴的，一旦滑油自燃，必然伤及传动轴，如上述的几个事例，会造成严重后果。因此对滑油腔的封严装置和连接的导管在设计、制造、使用、维修时绝不能掉以轻心。

航空动力

（陈光，北京航空航天大学退休教授，著名航空发动机专家）