

飞机复杂内型面燃油箱三相流场清洗技术

Three-Phase Flow Field Cleaning Technology of Aircraft Fuel Tank in Complex Surface

中航工业成都飞机工业(集团)有限责任公司 李绍江

[摘要] 现代飞机发动机、燃油系统部件极精密,如果被燃油中的固体颗粒污染,会导致动力系统或燃油系统故障,危及飞行安全。传统的清洗方法,难以将现代飞机复杂内型面油箱清洗合格。利用溶解在煤油中的氮气在一定条件下聚集析出产生的流体动力特性,局部控制流场,使固相固体污染物、液相煤油、气相氮气三相共存交互作用,实现燃油箱的高效清洗。

关键词: 三相流场 流场控制 燃油充氮 紊流 氮气抑爆

[ABSTRACT] Modern aircraft engine, fuel system components are very precise. If these parts are jammed by particles in fuel, the aircraft power system, fuel system can lead to failure. It will endanger flight safety. The traditional method is difficult to clean qualified of modern aircraft within the complex surface fuel tank. Using method of local flow field controlling and fluid dynamic characteristic produced when nitrogen dissolved and gathered precipitation in kerosene in certain condition, it actualizes three phase coexist interaction, solid particle pollutions& liquid kerosene& gas nitrogen, to realize fuel tank cleaning efficiently.

Keywords: Three-phase flow field Flow control Fuel nitrogen filled Turbulent Nitrogen explosion suppression

现代军、民用先进飞机一般都配装了结构复杂、控制精度高的先进发动机。这些发动机的燃油控制部件极为精密、复杂,且内部有众多微小孔、腔体、活门、细管状的控制部件,一旦被堵塞,其控制逻辑和精度将受到严重影响,导致发动机工作异常,出现转速悬挂、转速摆动、发动机控制规律异常甚至空停,严重危及飞机飞行安全。现代飞机复杂的燃油系统中众多成品也具有类似于小孔、异形腔体、精密配合面的结构,一旦飞机燃油中的固体颗粒、纤维等污染物沉积在燃油成品的这些部位,会导致燃油系统成品工作异常,可能出现飞机耗油逻辑异常、飞机重心燃油调节超过规定范围、发动机供油异常等故障,威胁飞机飞行安全。

要避免飞行器的动力系统、燃油系统部件受到燃油

介质中固体颗粒、纤维等的污染,就必须确保飞机燃油箱固体颗粒污染度满足使用要求。首先,要保证飞机燃油箱清洗合格,满足污染度指标要求;其次,要保证加入飞机燃油箱的燃油污染度合格。

1 现代飞机燃油箱清洗难点

在飞机生产过程中,飞机燃油系统零组件安装、油箱内壁涂胶等工序中会产生细小的金属屑、胶末等固体颗粒污染物、纤维;在漫长的生产、停放过程中,空气中悬浮的灰尘等也会沉积附着在燃油系统内。现代先进飞机大多采用整体油箱,这些油箱内型面极其复杂,油箱内导管、隔框、肋板、成品众多,油箱开敞性极差,空间狭窄,难以直接擦洗或吸除油箱内各处的固体颗粒污染物、纤维。

清洗飞机燃油系统的传统方法是采用加放油冲洗的方式对飞机油箱进行浸泡、清洗。但是,由于现代飞机一般有多个结构复杂、内型面各异的燃油箱,各油箱多采用油泵输油的方式实现飞机燃油系统按特定顺序向发动机系统、热负载系统供油并实现飞机重心动态配平控制,因此并非每个燃油箱最底部都设置有足够大的排油口,油箱底部往往是安装的各式油泵。飞机燃油箱内的燃油在自身重力的作用下,从飞机油箱的排油口排出飞机,流动的燃油能将一部分靠近油箱排油口的固体杂质排出飞机而无排油口油箱内和离排油口较远的燃油仅靠自身重力作用流动,在油箱框、肋、管道的流阻影响下流速较低、流体动能较弱,因此加放油冲洗的方式对燃油箱壁面、导管表面附着的多余物剥离作用较弱,大量的固体颗粒杂质、纤维容易沉积在流阻较大的框、肋、管道等死角处,难以随油流排出飞机外。采用这种方法清洗飞机油箱,需要消耗大量的清洁燃油,清洗时间较长、成本较高,对体积或者质量较大的多余物清洗效果较差,油箱难以清洗合格。加放油冲洗的清洗方法已经不能满足先进飞机大批量生产的需要。在新飞机生产的环节中,飞机燃油箱清洗工序常常严重制约飞机的生产进度。

2 三相流场清洗技术原理

现代飞机燃油箱一般由多个内部结构形态各异的

整体油箱组成,油箱内安装的各种油泵、控制活门、传感器等成品和导管形成了使燃油箱内的燃油在流动阻力极大的区域。在进行油箱冲洗时这些流动区域油液流速逐渐降低,由紊流逐渐变为层流,流体中各质点间作用力由惯性力占主导地位逐渐转化为粘性力占主导地位,由固体杂质和燃油组成的两相油液中携带的较大固体杂质,在油箱、导管壁面油液粘性底层流体质点间粘性力对油流质点粘滞吸附作用和重力作用下会逐渐沉积,附着到油箱、导管壁面粘性底层内,形成难以清洗的“死角区”^[1]。油液中的纤维,在流经油箱“死角区”的时候,会有更大机率缠绕、附着在这些部位。纤维会加速固体颗粒杂质在“死角区”的沉积、聚集速度。

要解决飞机燃油箱的“死角区”现象,就要解决这些区域的清洗介质流速低、粘性底层影响严重的问题。因此,提高油箱各处固体杂质和燃油组成的两相油液相对于油箱壁面的流动速度,提高流体雷诺数,形成紊流,尽可能减小油箱、导管壁面油液粘性底层厚度从而减小粘性底层对两相油液流动的粘性力限制作用,提高流体微团惯性动能等,都可以提高油液对固体颗粒的悬浮携带能力。

氮气不易溶于水,但是在航空煤油中有一定溶解度,且氮气溶解度随着压力增大而增大。李继梅等人用试验法测得了一定压力、温度下氮气在煤油中的溶解度曲线,如图1所示^[2]。如果向有一定压力的清洗用航空煤油流内充入适当比例氮气,部分氮气溶解在煤油中,

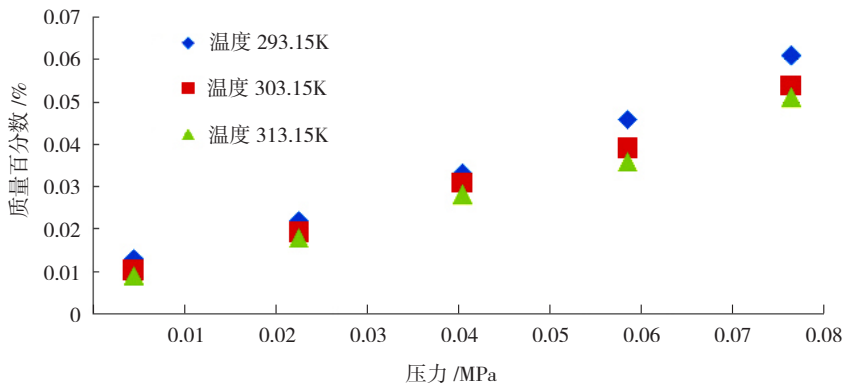


图1 氮气溶解质量百分数 a 与煤油压力、温度的变化关系

Fig.1 Variation relation of mass percentage of dissolved nitrogen and kerosene pressure,temperature

部分氮气以游离态的形式与煤油形成气液两相共存不稳定的流体,游离态氮气逐步聚集析出。当溶解有氮气的饱和煤油从喷头流入飞机燃油箱后,煤油压强变低,溶解度下降,部分氮气从煤油中析出。如果使溶解有氮气的饱和煤油产生一定频率的压强脉动变化,交替变化的压强会在煤油中形成正负压力区,进一步改变煤油溶

解度,在负压区氮气溶解度大大降低,煤油呈过饱和状态,氮气分子会加速从煤油中析出聚结。

游离态氮气逐步聚集析出的过程中,从油液底部析出的氮气泡在上升过程中受到液体的压强逐渐变小,气泡体积逐渐变大,受到的浮力逐步增大,加速上升运动。上升过程中,气泡尾部周围的油液形成负压区受到指向液面的法向剪切应力,相邻流体质点在剪切应力作用下运动形成许多涡,克服流体分子的粘性抑制作用,局部形成紊流,提高了流体质点微团的惯性能量。这种紊流增强了流体质点微团对固体颗粒的惯性作用力,由此提高流体质点微团对油箱、导管壁面附着的固体颗粒的冲刷剥离能力和惯性移动携带固体颗粒的能力。

利用氮气在航空煤油中大量分离析出形成油液流体局部强烈涡流扰动,将油箱“死角区”内粘性力占主导地位的流体转变为大雷诺数的紊流,提高流体质点微团的惯性能量,实现对固体颗粒的冲刷剥离和移动,并将这些悬浮有固体颗粒的“固、液、气”三相共存的不稳定燃油流按一定流动方式排出飞机燃油箱外,达到燃油箱清洗的目的。20世纪末,国外率先在飞机油箱清洗工艺中提出了将氮气溶解在煤油中,利用氮气从煤油中析出使煤油局部形成强烈紊流,利用紊流煤油微团动能将其附近固体颗粒冲刷、携带至预定位置,从而实现飞机油箱清洗的工程方案。

根据飞机油箱的几何形状可以设置较有利的清洗煤油进油、排油点,实现清洗煤油中悬浮的固体颗粒按尽可能短的流动路线流动,最大程度避免固体颗粒滞止回流,实现最高效的清洗。

氮气是具有对煤油阻燃抑爆的惰性气体^[3],如果向清洗燃油中充入氮气,将使油箱内的氧气通过油箱排气系统排出油箱,降低油箱内氧气含量,可以大大降低油箱内燃油的燃爆危险性,使油箱清洗过程更加安全。且其价格低廉、使用方便、无二次污染,对飞机油箱内导管、成品等无不利影响。充分利用氮气在煤油中可以形成“固、液、气”三相共存的不稳定燃油流的优点可以实现飞机油箱高效清洗,并且避免了添加其他清洗剂常有的二次污染问题。煤油在用作清洗剂后,经过沉淀、过滤处理,还能继续使用,具有良好的经济性。

3 三相流场清洗技术在工程上的实现方法

现代飞机的燃油箱多为铝质整体结构油箱或复合材料油箱,耐压能力差,不宜采用高压清洗。

由于飞机油箱结构的限制,工程上一般采用两种方式对清洗煤油充氮,形成三相流场:一种方式为,当清洗煤油进入飞机燃油箱前,在清洗设备管路中利用渗氮掺混器将洁净的常温工业氮气按适当容积比掺混进常温、一定压力的清洗煤油流中。部分氮气溶解在煤油中,部分氮气以不稳定的气液共存的气液共存的弹状流动或乳状流动态随煤油流入飞机油箱内各角落,另一种方式时,利用飞机油箱放油口等最低点直接充入一定流量的氮气,进一步强化氮气气泡对油箱底部煤油的扰动紊流效应。这两种方式互为补充,能较好的将油箱内固体颗粒污染物扰动悬浮起来,增加固体颗粒污染物的悬浮时间,增大其流动距离,大大提高固体颗粒污染物在清洗过程中排出油箱的概率。

溶解有氮气的饱和煤油流从清洗设备的管路流经喷头喷入飞机燃油箱,压力剧降,煤油中的氮气溶解度降低,过饱和的氮气从煤油中逐渐析出聚集,加剧扰动煤油油液微团,局部形成紊流。

为了进一步使溶解于煤油中的氮气分离析出,达到能在一定时间段内持续扰动周围油液微团形成紊流的目的,工程上一般在充氮煤油进入飞机燃油箱的时刻在喷头处形成一定频率和幅度的脉冲油流,即油流流量交替变化、油压交替变化。充氮煤油流在交变压强下会加快析出聚集,扰动周围油液微团,从而实现了对固体颗粒的冲刷剥离和移动,形成三相流场。

如果将喷入飞机燃油箱的充氮清洗燃油进行压力、流量和运动方向控制,并将油箱内的排油点进行位置及其排油负压区设定,就可以实现油流在油箱内的流场控制,使携带固态杂质的三相流体按流场控制要求排出飞机燃油箱,从而实现对飞机燃油箱的高效清洗。工程中根据飞机各油箱及关联油箱间的结构特点选取适当的进油点,采用不同喷射方向、角度、及旋转运动轨迹函数的多种喷头组件,可以实现对喷入飞机油箱的燃油流进行流量、压力、喷射范围、油流的旋转流动轨迹进行整流流动控制。呈螺旋型旋转流动的油液可以进一步强化三相流体的紊流作用,对延长固态杂质悬浮在清洗油流中的时间、破坏油箱壁面油液粘性底层削弱粘性底层对油液流动的限制作用都起到良好效果,进而提高固态杂质悬浮随油流排出飞机外的概率。在油箱的底部较低点采用负压吸油的方式将悬浮有固态杂质的清洗油流吸出飞机外,可以使油箱内的三相流体在流场势能差的作用下流向吸油点快速排出飞机外,而不至于三相流体中的固态颗粒在飞机油箱中因流程过长、流阻过大而沉积入壁面油液粘性底层形成难以排出飞机油箱的杂质。合理的负压吸油区域设置可以进一步增加固态杂质悬浮随油流排出飞机外的概率。

4 三相流场清洗技术在工程上的应用效果

如果将煤油加压、充氮、压力流量脉动及喷头整流技术、煤油过滤技术等综合集成在一台设备上,就可以研制出用于飞机燃油箱的高效、方便的清洗设备,能推广应用至军民飞机新机生产和飞机定期维护。

针对不同飞机燃油箱的特点,利用三相流场清洗技术经过大量的工程试验,已成功研制出能适用于多种先进飞机的油箱清洗设备。利用该设备能成倍提高清洗效率,完成同样的清洗工作工时只需传统清洗方式的10%~15%。该设备自带的煤油自循环过滤处理系统可使清洗煤油实时净化,用于循环清洗,大大节约了煤油消耗量,自循环过滤处理系统维护成本和煤油消耗成本的总和尚不到传统清洗成本的10%。

与传统清洗技术相比,三相流场清洗技术的应用,可以将同一架飞机燃油箱清洗的污染度等级提高约2级,大大改善了飞机燃油系统和发动机系统油液品质,提高了飞机燃油系统和发动机系统工作可靠性。利用三相流场清洗技术可以从油箱内清洗出多种固体杂质,如图2所示。



图2 飞机油箱中清洗出来的杂质

Fig.2 Impurities cleaned out from aircraft fuel tank

5 结论

大量的工程试验表明,三相流场清洗技术在现代飞机燃油箱清洗中有较强的实用价值,且安全、经济、无二次污染,能解决传统方法对飞机整机状态下大型复杂型面油箱难以清洗合格的难题,大大提高飞机燃油箱清洗效率。三相流场清洗技术还可以为其他工业领域的清洗提供借鉴。

参考文献

- [1] 邢宗文. 流体力学基础(第2版). 西安:西北工业大学出版社, 1992.
- [2] 李继梅, 张小翠, 牛奕, 等. 低压环境对 N_2 和 O_2 在航空煤油中溶解度的影响. 火灾科学, 2012(1): 1-5.
- [3] 刘小芳. 飞机供氧和燃油箱惰化技术概况. 北华航天工业学院学报, 2008, 8(3): 4-7.

(责编 亿霖)