

浅谈机翼整体油箱设计方法

李 耀 赵树军

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

【摘要】：主要从总体布局、位置选取、结构选材要求、密封防腐要求、维护性能要求、燃油安全性要求、破损安全要求等方面研究了大型亚音速飞机机翼整体油箱的结构设计要求；而后在满足结构设计要求的前提下开展了结构设计方法研究，主要研究了主承力结构设计、次承力结构设计、分离面设计、结构开口及口盖设计、结构连接设计、密封设计及验证、防腐设计、防雷击设计、试验及验证、维护及修理等方面的内容，并对设计方法进行了总结。同时，指明了后续结构设计的方向。

【关键词】：整体油箱；设计方法；细节设计；验证及维护

Design Method of the Overall Fuel Tank of the Wing

Yao Li, Shujun Zhao

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co. Ltd. Shaanxi Xi'an 710089

Abstract: This paper mainly studies the structural design requirements of large subsonic aircraft wing integral fuel tanks from the aspects of overall layout, location selection, structural material selection requirements, sealing and anti-corrosion requirements, maintenance performance requirements, fuel safety requirements, and damage safety requirements. Then, on the premise of meeting the structural design requirements, the research on the structural design method was carried out, mainly studying the design of the main bearing structure, the design of the secondary bearing structure, the design of the separation surface, the design of the structural opening and cover, the design of the structural connection, the design of the seal and the verification, anti-corrosion design, lightning protection design, test and verification, maintenance and repair, etc.; and the design method is summarized; at the same time, the direction of subsequent structural design is pointed out.

Keywords: Integral fuel tank; Design method; Detailed design; Verification and maintenance

1 引言

随着基础科学研究的深化、制造手段的进步，航空器作为一种交通工具，越来越展现出便捷性、时效性的优势。如何使航空器结构更加轻盈，如何更加充分利用结构内部空间装载更多的燃油，如何在保证结构安全性的同时保证燃油安全，如何对密封结构进行验证试验及维护修理是值得不断研究的课题。实际上，自70年代以来，整体油箱（或称为结构油箱）技术率先实现于战斗机，而后推广于追求经济效益的民航客机，并广泛应用于各类军事用途航空器上。

2 简介

整体油箱（结构油箱）是直接使用飞机结构部分内部空腔盛放燃油的一种功能结构。对于不同类型的飞机，整体油箱的位置也不尽相同：对于亚音速大型民用飞机或军事用途的运输机来说，整体油箱一般布置在机翼中外翼至外翼、前梁至后梁、上翼面至下翼面之间，原因是此类飞机翼型较厚，机翼面积很大，其内部空腔体积可以满足燃油装载要求；而机身内部则要容纳乘员或大尺寸货物，难以布置大尺寸整体油箱。整体油箱一般由主承力结构、次要承力结构组成；在初始设计阶段就应当考虑结构分离面设计、结构开口及口盖设计、结构连接设计、密封防腐设计、防雷击设计、油箱试验与验证等各项要求。

3 整体油箱结构分析

整体油箱结构作为机体结构的一部分，应当满足机体结构的一切要求；作为燃油的容纳空间，还应当满足包纳燃油的功能要求。因此，整体油箱设计有其一般性结构设计要求，例如选材要求、密封防腐要求等；也有其特殊的结构设计要求，例如燃油安全性设计要求、破损安全设计要求等。由于战斗机整体油箱与大型亚音速飞机整体油箱设计思路存在较大差异，在探讨整体油箱设计思路时，以大型亚音速飞机为基准。

(1) 总体布局：对于大型亚音速飞机来说，机身内部难以布置大尺寸整体油箱，而机翼内部空间较大，适宜于布置油箱结构。整体油箱的布置不应影响前缘增升装置、翼面减速板的作动，不应影响加温系统的正常工作，不应影响后缘襟翼、副翼正常工作；同时，整体油箱结构应当尽可能借用结构梁、框、肋、蒙皮类零件围成的空腔，对其中某些舱段或部位进行可靠的密封和改造。机翼整体油箱的布置应当使结构重心尽量靠近全机重心，以保证在飞行过程中无需做大规模的燃油配平即可维持重心位置。

(2) 位置选取：在位置选取阶段，可以根据燃油体积，适当调整油箱在机翼内部的位置，调整位置的目的是避开结构大型分离面，避开复杂管路、线路通过区域，避开重要检修通道，以保证飞机维护性要求。

(3) 结构选材：现代大型飞机广泛应用复合材料作为结构材料。因此结构选材应当以高性能铝合金材料、钛合金材料、高强度材料、现代复合材料为主。金属材料适宜用于主承力梁、大型结构分离面、各类舵面悬挂接头、作动筒支座等受力较大、形状复杂的部位；复合材料适用于蒙皮、壁板、前缘、舵面等形状简单、尺寸较大的薄壁零组件或形状规整的结构小部件；值得指出的是，镁合金类材料或镀锌金属材料一般不应当用于油箱内部，以免造成电化学腐蚀；翼盒内部肋一般采用铝合金整体机加件，因为大型机翼一般采用厚壁板薄肋的结构形式，即使采用复合材料制造普通肋，对重量的减少也微乎其微，反而提高了装配困难。

(4) 密封防腐：作为飞机燃油的容器，整体油箱应当在全寿命周期内满足绝对密封要求，在飞机飞行包线内的任何高度、速度下均不应发生可能导致密封失效的变形；为满足该要求，设计人员选取的密封剂应当在飞机使用温度范围内始终保持良好的弹性和密封性，至少在飞机大修期内不发生老化失效（理想状态是油箱密封剂在飞机全寿命周期内均能保持性能，这样可以极大减少大修期内的密封剂维护工作）。油箱结构在使用、维护过程中不但要承受来自外界的环境影响，还要承受内部燃油中微生物、水等腐蚀性杂质的侵蚀；在使用维护过程中，油箱内部结构腐蚀难以发现和处理，这就给油箱防腐提出了更高的要求。

(5) 维护性能设计：油箱结构应当具备良好的维护性：结构开口应当尺寸合适，既不隔断主传力路径，又能满足装配人员和操作工具进出的要求；油箱维护口盖周围所选用标准件应统一为同一规格，以保证口盖拆装方便快捷；内部隔框排列间距应当在燃油晃动时不引起重心失稳，隔框腹板上的开孔应当满足人员及工具通过要求；结构连接应当稳妥可靠，标准件选用应当充分考虑安装维护需求、密封要求、修理要求，标准件尽量采用单面拆装标准件；装配时密封剂涂覆应当简单可靠，易于施工，尽可能避免封闭狭窄的难以施工的闭角区域。

(6) 燃油安全性：油箱结构内表面与燃油直接接触的金属、复合材料、标准件、密封剂不应当与燃油发生反应，以保证燃油的清洁。用于减轻燃油晃动的隔框或隔板应当固定连接于结构内部，在燃油晃动时不发生永久变形或掉落。油箱外部适当位置应当布置放电设备（如放电刷或导通线路），避免油箱内部电荷聚集，难以释放，产生尖端放电。油箱内部应当适当布置几道密封，将位于同一位置的整体油箱分隔为几个相互独立的密封油箱舱，这样可以在个别舱室密封失效时保证其他舱室燃油的安全。为保证燃油安全，防止爆燃，还可以采取在内部空腔布置防爆塑料泡沫或充入惰性气体的方法。

(7) 破损安全设计：破损安全性设计应当至少包含两方面的内容。一是正常状态下的轻微损伤不会造成严重的燃油泄漏；二是重大灾难性事故尽量避免油箱殉爆。要满足第一方面

的内容，应当为次要承力部件、蒙皮壁板类零件留有一定程度的安全裕度，同时合理设计密封连接缝，使应力集中区域避开密封对缝区域。要满足第二方面的内容，油箱结构应当距离发动机、APU 舱等振动影响区域和外部挂架等受力集中区域一定的距离。

4 结构设计方法

根据结构设计要求，可以将整体油箱根据零组件特征划分为主承力结构、次承力结构、开口及口盖区域、连接区域、分离面区域等部分，不同部分设计思路有一定差异。同时，在设计时还应当考虑到密封设计、防腐设计、防雷击设计、试验及验证方法、维护与修理等方面内容。

4.1 主承力结构设计

整体油箱的主承力结构一般是指机翼前后梁、分离面的加强对接件、承力壁板。在设计主承力结构时，应当充分考虑强度刚度匹配原则，相邻零件之间强度刚度应当相近或呈现一定梯度，这样可以有效避免结构变形不协调带来的密封失效。主承力零件之间的连接应当简单、直接，避免传力路径复杂化；同时，所有主传力路径零件的连接对缝应当全部位于可视、可达、可检部位，以便零件缝隙密封的施工、检查、维护及修理。

4.2 次承力结构设计

次要承力结构一般是指前后梁之间的普通肋、防止燃油晃动的隔板、翼尖或翼根的整流结构、用于连接前后缘的薄壁类结构。在设计次要承力结构时，应当重点考虑其连接位置的布置。如无必要，不要将次要承力结构的连接件一端布置在油箱内部，一端布置在油箱外部，此举可能会增加燃油泄漏的风险。稳妥的做法是在主要承力部件上增加连接缘条、立筋，用以连接次要承力结构。总之，次要承力结构在设计时应当尽量避免伤害或影响主要承力结构密封性。

4.3 结构开口及口盖设计

原则上结构开口不应当布置在主传力路径上，但大型飞机厚壁板一般具有主传力作用，必要时可在机翼壁板上布置结构开口，但不能破坏主要受力骨架；需要注意的是开口周围应当进行适当加强，以补偿开口后的结构削弱问题，结构开口的形状应尽量减小应力集中。为满足装配及维护性要求，每个独立的油箱舱段都应当布置至少一个结构开口。整体油箱口盖有正常式和反装式两种安装方式；正常式口盖拆装简单，但在油压作用下易发生不利于密封的变形；反装式口盖与此相反。在设计时尽可能保证整体刚度，避免在载荷作用下产生可能导致密封失效的变形，因为口盖一般要参加总体受力并传递局部载荷。

4.4 分离面设计

正确布置、设计结构分离面可以提高装配效率、简化装配

流程、增加密封可靠性。一般来说,中央翼盒段、中外翼盒段、外翼盒段之间的分离面宜选用平面对接,这样可以避免复杂形状带来的贴合偏差问题。任何一个油箱密封舱不应当横跨分离面,以免增加大型盒段拆装的难度。油箱舱之间的燃油管路、电气液压管路、操纵系统线路一般不要布置在翼型截面的前后梁之间,而应当集中或分类布置在分离面的适当位置,以保证盒段拆装、检修时管路、线路连接施工的可达性和便捷性。

4.5 结构连接设计

在设计主要承力结构及次要承力结构时,应当充分考虑结构构件之间的连接缝隙位置。油箱的连接缝隙应尽可能布置在主承力件之间,连接缝隙应当短而平直;尽量避免将缝隙布置在闭角区域,避免三条密封缝隙同时对接于一点。油箱边缘的铆钉一般不能采用单排形式;凡是横穿油箱内外的连接件必须选取密封标准件或采取可靠的封严措施,事实上很多油箱泄露都是由标准件的安装缝隙造成的。完全位于油箱内部的连接件可以不进行密封,但应当保证全寿命周期的连接可靠性,避免由于连接件脱落造成的油路故障。

4.6 密封设计及验证

整体油箱结构内腔的零件连接一般采用搭接形式,应当避免主承力部件在油箱内部直接对接。搭接缝隙一般采用缝外密封或同时采用缝内缝外密封形式;不能单独采用缝内密封形式,因为缝内密封失效后极难检查和修复。应尽量避免使用密封胶堵孔、堵缝,此类结构小孔或缝隙在油箱内外存在压差时极易发生漏油故障。油箱密封方案应当在设计之初就开展试验进行充分验证,至少应当开展充压试验、充压加载联合试验、振动试验、温度试验。生产过程中,装配密封施工完成后还应当进行油箱密封性试验方能允许交付。

4.7 防腐蚀设计

油箱内部腐蚀的最根本原因是燃油被油箱内微生物分解产生水及有机酸类腐蚀性介质,易发生在油箱内部的腐蚀形式主要有剥落腐蚀、晶间腐蚀、坑状腐蚀三类。因此油箱内部防腐蚀的主要思路是:改善燃油成分,在燃油中添加微生物生长抑制剂;使用具有抑制、阻止霉菌类微生物生长的表面涂层;及时清理油箱水分,严格控制燃油含水量、及时排出油箱底部

积水、增加自动排水系统。

4.8 防雷击设计

机翼翼尖部位一般属于雷击初始附着概率高的区域,雷击可能会造成电流击中部位的内部或外部结构损伤,产生电弧、火花、高温点和烧穿,严重威胁油箱安全。油箱的防雷击设计应当尽量使翼尖结构部件具有相同或相近的电极电位;尽量导通表面零件,形成电路的良好通路,避免具备电荷聚集;避免油箱内部金属尖端的放电效应;同时,结构应当留有一定安全裕度,防止雷击损伤造成的严重结构损伤。

4.9 试验与验证

油箱试验的重点是密封性能试验。所有连接的接缝处都有分离变形和剪切变形两种不同类型的变形形式,结构变形是造成密封失效的重要因素之一。因此密封性能试验的载荷谱应当至少包含飞机一个完整的飞行剖面,包括起飞、巡航、机动飞行、着陆及停机等状态。

4.10 维护及修理

整体油箱只使用过程中应当注意观察各个连接部位的渗漏情况,可以采用高压吹气法、渗漏剂检查法、残留漏油检查法、气泡检查法或荧光检查法等手段找出渗漏点,根据浸润面积判断渗漏属于微渗、轻渗、渗漏或流淌,并据此给出修理时机和修理方法。

5 设计方法总结

整体油箱结构设计的核心技术难点在于如何保证内腔长效、持久、可靠的密封。合理设计承力结构和口框口盖、恰当布置结构分离面和连接位置、准确选择防腐防雷手段是确保整体油箱设计成功的关键要素;精心设计密封方式是保证制造可行性的必要前提;充分开展试验验证,正确的维护和修理是保障整体油箱全寿命周期安全性的必要手段。

6 后续展望

根据整体油箱的总体布局和各方面设计要求,探索了结构初步设计的思路。后续可根据不同结构类型的设计思路,参考其他同类飞机成功或失败的工程经验,完成产品的设计和试验。

参考文献:

- [1] 陆峰.航空材料环境试验及表面防护技术[M].北京:国防工业出版社,2012.
- [2] 程普强编.先进复合材料飞机结构设计与应用》[M].北京:航空工业出版社,2019.
- [3] 《飞机设计手册》总编委会.飞机设计手册.第10册,结构设计[M].北京:航空工业出版社,2000.