

# 面向先进飞机结构综合性能需求，航空材料持续发展

徐东翔

2023年4月，空客公司宣布在其新型宽体货机A350F中，使用铝锂合金代替碳纤维复合材料制造中央翼盒顶盖。中央翼盒是连接飞机左右机翼的关键部件，翼盒顶盖负责承受来自机身地板的压力（下单翼），在A350客机中使用碳纤维复合材料制造。空客公司为了提高A350F的货运能力，在该部位选用了强度更高的新型铝锂合金，使其最大载货量提高至109吨，比其主要竞争对手波音777F货机多7吨。A350F的选材变更表明，飞机的选材始终以需求为出发点，先进材料的选用往往对飞机产品的最终性能和市场竞争力起到至关重要的作用。

## 结构减重是飞机设计的首要目标，贯穿整个设计过程

结构减重意味着更长的航程、更低的油耗、更高的承载能力，节省出的重量和空间可以用来搭载更多的机载设备和武器，提升飞机的综合性能。正因如此，“为减轻每一克重量而奋斗”成为历代飞机设计师严格恪守的理念。为评价飞机结构的减重效果，设计师通常用“结构重量系数”这一指标，也就是结构重量占飞机总重的比值。现代战斗机结构重量系数从三代机的33%，下降到四代机的31%，再到五代机的29%，未来还将继续下降。

在实现结构减重的因素中，材料的贡献程度最高，约70%的减重效果由材料技术的进步而产生，其余30%则通过设计优化产生，因此飞机材料的轻量化对于结构减重尤为重要。近年来，复合材料的兴起正是由于其具有的低密度优势而广受飞机设计师青睐。复合材料的密度是钛合金的1/3，钢的1/5，具有良好的减重效果。在新型航空装备中，军用飞机应用复合材料的比例接近40%，大型客机应用比例接近50%，一些通用飞机应用比例甚至接近100%。然而，需要特别指出，结构减重并不意味着使用的材料越轻越好，必须以满足结构的基本强度需求为准则。波音777和空客A380等大型客机中，复合材料主要用于尾翼、襟翼、扰流板、雷达罩等次承力或非



承力结构，波音787和空客A350的复合材料用量虽明显增长，但增长部分主要集中在机身、机翼、蒙皮等受力模式比较简单的结构。对于机身框架等受力较大且受力方式复杂的结构，复合材料尚不能完全满足装备需求，金属仍是首选材料。在众多轻质高强金属材料中，近年来以铝锂合金的应用最为先进和广泛，在需要高强度的飞机结构部位中发挥着不可替代的作用。

铝锂合金是指含有金属元素锂的铝合金，据业界统计，铝合金中锂含量每添加1%，密度可降低3%，模量可增加6%，是性能更为优异的新一代航空铝合金材料，强度更高、结构减重效果更好。如空客A380上层客舱地板梁使用复合材料，下层客舱地板梁则采用铝锂合金，原因就在于下层地板需要承受比上层地板更多的载荷，因此需要使用强度更高的铝锂合金。曾有国外航空公司将空客A380改装成货机的案例，上层货舱复合材料地板梁必须进行加强才能装载重型货物，而下层货舱铝锂合金地板梁则无需加强，印证了上述观点。

空客在其新型宽体运输机空客A350F中，使用铝锂合金替代复合材料制造中央翼盒顶盖，也是因为铝锂合金具有更高的承载能力，选材的变更使空客飞机的最大承载量得到有效提升，超越波音公司同类产品。

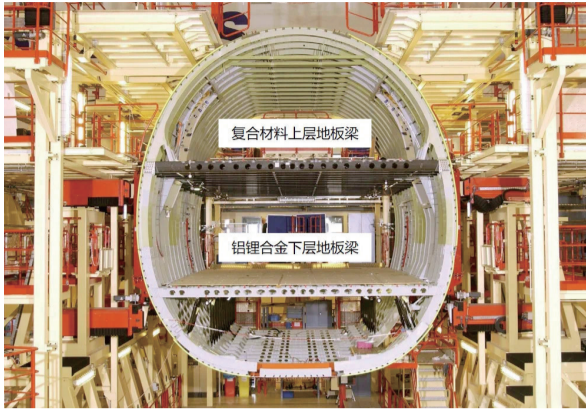
## 除结构减重外，现代航空平台需求日益多元化

首先，一型飞机的成功不仅在于其先进性，还要具有经济性。“不仅要

造得起，还要能用得起。”F-22后续生产计划之所以被取消，成本高昂是重要原因。民用客机亦是如此——全生命周期成本的压力正在进一步扩大。其次，随着飞行任务的愈发频繁，安全性和耐用性越来越受关注。民航客机的飞行设计寿命提高到6~8万小时，飞机在长期服役过程中是否能够始终保持稳定可靠变得至关重要。此外，随着全球碳排放运动的持续进行，航空装备的绿色发展成为重要课题。

将航空装备的发展需求转化为选材需求，那就是要求航空材料必须具有轻质高强、耐腐蚀、耐疲劳、低成本、易加工等特点。相比于其他材料，铝锂合金不仅能够满足先进飞机结构在强度上的需求，在其他选材需求方面也表现出优异的性能特点。

经济性方面来看，选材的经济性是飞机的经济性服务的，飞机的经济性不仅关注制造成本，还关注运行、维护等成本，将这些因素综合起来，也就是所谓的飞机全生命周期成本。选材的原则与之相同，不仅考虑制造成本，也要考虑运行、维护等成本，将其作为一个整体进行考量。复合材料之所以受到欢迎，是因为其结构件比传统铝合金结构件轻10%~20%，能够通过减重降低油耗降低飞机的运行成本。数据显示，铝锂合金结构件比传统铝合金结构件轻8%~15%，与复合材料的差距正在逐渐缩小。与此同时，铝锂合金在制造、维护等方面的成本都表现出明显优势。复合材料制造成本约为20000~30000美元/吨，而铝锂合金则为1000~2000美元/



吨，仅为前者的5%~15%。此外，复合材料结构件的破损容易隐藏在材料内部，因此必须使用价格高昂的X射线或超声波等无损检测手段，而铝锂合金等金属材料在使用过程中产生的缺陷普遍暴露在材料表面，因此可以使用成本相对低廉的检测手段。

耐用性方面来看，飞机在起降过程中受到机翼上下压差、客舱内外压差、大气冷热冲击的反复作用，容易发生疲劳断裂，在潮湿、高热、烟雾环境下飞行容易发生腐蚀断裂，因此机体结构材料需要具有良好的耐疲劳耐腐蚀性能。相比宽体客机，这一点对于班次更多、起降更频繁的窄体客机而言更为重要。铝锂合金在疲劳和耐腐蚀性能上对比传统铝合金均有较大提升，与2系铝合金相比，2195铝锂合金比2219铝合金应力腐蚀性能提高20%，2198铝锂合金比2024铝合金疲劳性能提高22%；与7系铝合金相比，在拉伸强度保持优势的同时，2050铝锂合金比7050铝合金疲劳性能提高25%，2065铝锂合金比7150铝合金腐蚀性能提高50%。复合材料耐腐蚀性能虽然更好，但对表面完整性的要求也更高，否则水分容易进入复合材料的表面缺陷而造成分层，尤其是紧固件连接处等开孔部位，因此从耐用性角度来看，铝锂合金的性能更为稳定，复合材料的长期稳定性仍有待时间检验。

从安全性方面考虑，飞机在运行过程中受到撞击损伤是难以避免的，根据国际航空协会统计，自1912年以来，仅鸟撞导致的民用飞机失事就有60余起。除此之外，人员上下机、

行李装卸等日常操作过程中对机身产生的意外撞击更是数不胜数。复合材料虽然强度高、刚度大，但是抗冲击性能差，受到撞击后，碳纤维容易从树脂中分离出来，造成结构失效，而一旦因此引起起火，碳纤维还会燃烧产生有毒气体，对人员造成二次伤害。铝锂合金具有更好的抗冲击性能，在材料破损前能够吸收更多的撞击能量，从而降低结构失效风险。

还有在环保性方面，在国家“双碳”战略发展目标引领下，航空选材向绿色可持续发展方向是大势所趋。目前国外先进国家普遍使用碳足迹这一指标来衡量材料的碳排放水平，碳足迹是指产品在全生命周期内直接和间接排放的温室气体总和，一吨复合材料的平均碳足迹约为50~60吨，而一吨铝锂合金的平均碳足迹则为10~12吨，是前者的20%。在材料的循环利用方面，铝锂合金也显示出明显优势，已经形成一套完善的回收技术，回收效率达到95%以上，而复合材料的回收技术仍有很大的发展空间，回收效率处于较低水平。

## 新一代铝锂合金正在得到高度重视

目前，国外铝锂合金已发展到第三代，在先进飞机中获得广泛应用并取得良好效果。在民用飞机方面，第三代铝锂合金应用于波音787、空客A380等机型的机身框架、蒙皮等部位。

与此同时，面向新一代飞机结构选材需求的第四代铝锂合金已经开启研制流程。2009年空客公司材料和加工集成部负责人在一次国际会议上提出了第四代铝锂合金的概念，同时表示美铝和肯联公司正在开展相关研究。相比于第三代，其特点是在保持弹性模量、疲劳性能和裂纹扩展速率基本相同的情况下，具有更低的锂含量，以及更高的静强度和断裂韧性，在取代传统材料方面更具优势。

除了用于机体结构，用于发动机的耐热型铝锂合金也在开发中，有望打开发动机选材新局面。奥科宁克公司在2014年为普惠公司的齿轮传动系列发动机开发了首个风扇叶片铝锂合金锻件，重量与成本显著降低，证明了铝锂合金在发动机选材中的可行

性，目前PW1000G发动机已用于空客A320neo、空客A220等飞机。

在注重改进铝锂合金性能的同时，配套基础工业能力的创新与关键技术的突破同样至关重要。从现实选材案例可以看出，一种材料的成功应用不仅在于其材料性能本身的先进性，材料的成熟性、经济性、可制造性对选材的影响同样重要。可以说，关键技术的进步对航空选材具有决定性影响，材料的发展是无止境的，铝锂合金同样如此。

在设计研发方面，计算技术正在对铝锂合金的开发产生深远影响。集成计算材料工程是材料技术与计算技术的交叉学科，通过将计算获取的材料信息与工程产品性能分析和制造过程模拟进行整合，可以有效缩短开发周期、降低开发成本、提高制造良率。在生产制备方面，铝锂合金的冶炼技术正在不断取得突破。近年来，国外加大了超声波在铝锂合金精炼中的应用研究，通过高速振动加快气体杂质的溢出，可以使铝锂合金致密度更高，针孔率显著下降，美国Southwire公司、HANS TECH公司均申请了相关技术专利。直冷铸造技术也在持续发展，该技术可以有效降低合金生产的微偏析问题，保证材料性能稳定一致，如美国Almex公司在2018年和2020年获批两项针对铝锂合金的直冷铸造工艺与设备专利，美铝、肯联等铝锂合金生产公司则主要关注直冷铸造模具的研发。

在应用技术方面，一些先进技术的发展直接影响了铝锂合金的应用范围与效果，如超塑成形技术用于生产复杂金属部件，目前已开发出多种基于轧制、挤压、锻造的超塑成形技术，波音公司生产的2195铝锂合金超塑成形部件已应用于超轻型外部油箱；搅拌摩擦焊技术用于对接接头的焊接，已应用于焊接洛马公司大型低温贮箱2195铝锂合金面板，以及“猎鹰”9号第一、二级舱体2198铝锂合金面板；激光焊接技术用于制造飞机机身面板，近年来空客公司正在研究2196和2198合金的激光焊接技术，奥科宁克也在研究将其用于铝锂合金机身面板的可能性。（作者单位系航空工业发展研究中心）

## 我国跨境航班班次正有序恢复



据央视新闻客户端消息，广交会期间一直是国际航线需求旺季，针对目前国际航班的恢复情况，多部门的有关负责人在日前的国新办发布会上表示，当前跨境航班的班次正在有序恢复，广交会期间，将多措并举确保往来顺畅。

暑期过后，全国每周实际执行的国际客运航班量稳定在疫情前的50%左右。通航国家61个，至英国、

意大利、马尔代夫等16个国家的航班量已超过疫情前水平。广州机场的上周实际国际客运航班量，恢复至疫情前的约57.3%，高于平均水平。

此外，广交会期间，开通琶洲港澳客运码头，往返香港国际机场和香港尖沙咀中港城客运码头航线。旅客可以在码头直接完成落地签证、出入境联检、办理国际航空公司航班值机和行李直挂。（陈茜 高媛）

## 美联航确认订购110架客机

据路透社消息，美联航宣布向波音和空客订购110架飞机，将于2028年开始交付，以扩大其国际网络。

根据美联航宣布确认此前与波音签署的选择权订单，该公司将购买50架波音787-9，这批飞机将于2028-2031年间交付。同时美联航

也将行使与空客签署的购买选择权，确认购买60架空客A321neo，将于2028至2030年期间交付。此外，美联航与波音和空客分别签署了50架波音787和40架空客A321neo的购买选择权。

美联航首席商务官安德鲁·诺塞拉(Andrew Nocella)表示，该公司预计十年内，利润增长的很大一部分是来自全球长途飞行。

据悉，去年12月，美联航公布了100架波音787梦想飞机和100架737MAX的巨额订单。（王明）



## 卡塔尔航空与厦航建立全新代码共享合作伙伴关系

本报记者 钟旖

综合多家媒体消息，9月卡塔尔航空宣布，将携手厦门航空（下文简称厦航）建立全新代码共享合作伙伴关系。厦航将成为首家开通中国内地往返卡塔尔直飞客运航线的中国航空公司。

根据合作协议，厦航将开通北京大兴国际机场往返多哈哈马德国际机场的每日航班。全新开通的直飞航线将由波音787-9机型执飞，该机型采用两舱布局，可容纳287名乘客，其中设有30个商务舱座位与257个经济舱座位。该航线将于2023年10月20日开通，首航航班于当地时间22时45分抵达多哈，并于次日2时飞往北京大兴国际机场。

除北京出发的航班外，厦航还将开通每周两班从厦门往返多哈的航班。该航线将于2023年10月31日开通，首航航班于当地时间5时自厦门抵达多哈，并于当晚19时30分由多哈起飞返回厦门。这一航线则由波音787-8机型执飞，该机型可容纳237名乘客，采用三舱布局，包括4个头等舱座位、18个商务舱座位，以及215个经济舱座位。

卡塔尔航空将携手厦航在这两条新增航线上开启代码共享合作，进一步提升卡塔尔航空在中国内地市场的运营规模。

宣布合作后，距离开通北京大兴/厦门-多哈航线一个月之际，厦航董事长赵东于当地时间9月20日在洛杉矶会见了卡塔尔航空集团首席执行官阿克巴·巴克（Akbar Al Baker）。

赵东表示，今年是中卡两国建交35周年，也是“一带一路”倡议提出的10周年，厦航即将开通直飞卡塔尔多哈的定期航线，并与同样获得“世界级航空”的卡塔尔航空开展合作，意义非凡。目前，厦航

成更高水平的航空联盟。希望双方积极发挥各自的优势与特色，在服务体系与文化交流上携手共进，创造性地提升旅客体验，更好地服务来自阿拉伯国家和中国的旅客。

巴克表示，很高兴能够在厦航即将开通中国北京和厦门两个城市直达卡塔尔多哈航线之际，与厦航的赵东董事长见面。对于赵东邀请他前往中国访问厦航，巴克欣然同意。目前卡航已与厦航达成全面战略合作，其中的代码共享合作是卡航在中国开通的首个代码共享合作。他相信，厦航的航线将与卡航的全球航线网络完美相连，为双方的旅客提供更加丰富的航班选择与无缝出行体验。同时也希望未来双方能在市场经营、旅客服务以及人才培养等方面进一步拓宽合作，实现共赢。

卡塔尔航空成立于1993年，是中东地区最大的航空公司之一，航线网络覆盖五大洲约180个目的地，也是全球获奖最多的航司之一。在2022/23财年，卡航的总收入及客运收入均打破其历史最高纪录。

厦航航空成立于1984年，目前共拥有飞机209架，运营国内外航线400余条，年旅客运输量近4000万人次。



与卡航已开展了全方位的联运合作，并针对服务产品与服务标准进行了深入交流。未来，希望双方能够深化“常旅客”、休息室等领域的合作，并探索“直连互售”的新突破，促

## 马耳他举办第27届马耳他国际航空展

据新华网消息，为期两天的第27届马耳他国际航空展日前落下帷幕。来自马耳他、英国、瑞士、意大利、法国、德国、土耳其、波兰等国的大约60架飞机参展。

本届航展既有在马耳他国际机场举办的各种不同型号的飞机展览，也有在马耳他本岛北部圣保罗附近举行的飞行表演，吸引了大量观众观看。但原定

于9月24日下午举行的第二场飞行表演受天气状况影响被迫取消。马耳他航空爱好者邓肯·米卡莱夫说，他参加了几乎每一届马耳他国际航空展，这是他非常期待的一项活动。

马耳他国际航空展由马耳他航空协会于1993年首次举办，通常每年一届，受资金短缺或新冠疫情等因素影响曾有几年停办。（陈文仙）



## 大韩航空将进一步织密中日航线网络

据民航资源网消息，大韩航空10月4日表示，将通过冬季航班计划进一步织密通往中国、日本、东南亚、美洲和大洋洲的航线网络。

大韩航空计划从冬季赛季开始，将降至疫前85%水平的旅客吞吐量提升至90%以上。具体来看，大韩航空11月26日将开通仁川至越南富国岛的航线，每周执飞7趟班次。受疫情影响停航的中日6座城市的航线将时隔3年零7个月复航。釜山至上海、仁川至厦门航线将于10月29日复航，每天1班；仁川至昆明航线将于11月19日复航，每周4班。仁川至鹿儿岛、仁川至冈山航线将于10月29日复航，每周3班；仁川至新潟航线将于10月31日复航，每周3班。

需求旺盛的航线还将实现增班。仁川至北京航线将增至每周18班；济州至北京航线将增至每周4班；仁川至深圳、仁川至西安航线将增至每周7班。此外，曼谷（泰国）、马尼拉（菲律宾）、德里（印度）、加德满都（尼泊尔）、清迈（泰国）、奥克兰（新西兰）、布里斯班（澳大利亚）、拉斯维加斯（美国）航线也将增班。

冬季航季的始末时间分别为10月29日和2024年3月30日。大韩航空表示，随着中国放开赴韩跟团游，预计中国游客将大幅增加。今后将灵活应对航班需求，不断提升客户满意度。（郭暨）