

国产大飞机系列报告之二：大飞机应用材料解析

国防军工

国产大飞机 C919 即将实现交付运营。我们将围绕国产大飞机的机体结构与制造流程、应用材料、机载设备、航空发动机和市场空间等问题发布系列研究报告。本篇报告在综合上市公司公告和重要文献的基础上重点探讨大飞机的材料应用情况。

► C919 选材兼具成熟性和先进性，先进材料应用比例高于对标机型波音 737、空客 320。

“一代飞机、一代材料”，先进材料的应用是航空技术发展和进步的最重要推动力之一，同时，航空技术的发展需求又极大地引领和促进航空材料的发展。从国外大型客机材料应用情况来看，复合材料和钛合金的在飞机上的占比迅速提升，成为衡量先进飞机的重要指标。C919 选材兼具成熟性和先进性：在中央翼、机翼、机身等主承力部段上使用了经 ARJ21 飞机成功验证的铝合金等成熟材料，在尾翼、后机身和襟缝翼上使用了复合材料，特别是在尾翼盒段和后机身前段上使用了国外先进的第三代中模高强碳纤维复合材料，在机身蒙皮和长桁结构中使用第三代铝锂合金。C919 先进材料应用比例高于对标机型波音 737、空客 320，绝大部分性能指标与其持平。预计随着后续 C919 的批量交付，先进材料国产化进程将再提速。

► C919 采用第三代先进铝锂合金，综合减重 7%。

铝材是民机制造最重要的关键材料之一，C919 前机身、中机身、中后机身、机头与机翼结构件几乎全是用铝材制造的，铝材占全机结构总重的比例为 65%，其中第三代先进铝锂合金占比达到 8.8%。铝锂合金具有低密度、高弹性模量、高比强度和高比模量的优点，减重成效显著，已成为当前各国争相发展的重要航空材料。采用铝锂合金可使飞机铝合金零部件的质量减轻 14%~30%，进而使得每架飞机每年的飞行费用下降 2.2% 以上。国内铝锂合金研发已取得重大突破，建立了具有自主知识产权的合金牌号，如 2A97、X2A66，但产业化刚刚起步，目前仍依赖进口。不过，C919 机身所使用的其余高端铝材或即将实现 100% 国产化，主要由西南铝业和南山铝业提供。

► 钛合金广泛用于飞机机体和发动机，是 C919 上国产化最多的先进材料。

评级及分析师信息

行业评级：推荐

行业走势图



分析师：陆洲

邮箱：luzhou@hx168.com.cn

SAC NO: S1120520110001

与铝、镍等主要航空用金属相比，钛是唯一一种广泛用于飞机机身及发动机的材料，强度、耐热性、耐蚀性、抗弹性和成形加工性良好。并且，由于钛与碳纤维复合材料的电极电位相近，使得它又成为复合材料唯一的连接材料，在航空紧固件中得到大量使用。C919 飞机的前机身压板、机头蒙皮、吊挂、中央翼缘条、尾翼接头、机翼滑轨等部位均使用了钛合金，总用量达到机身结构重量的 9.3%。C919 飞机选择了 6 个钛合金牌号，包括低强度高塑性、中强中韧、中强高韧、高强高韧及系统用材，产品形式涵盖了锻件、厚板、薄板、型材、管材、丝材等。

同时，钛合金是 C919 上国产化最多的先进材料，宝钛集团和宝钢股份都已有材料在大飞机上使用，西部超导 Ti-6Al-4V 钛合金也已通过商飞资质认证。C919 钛材用量约为 3.92 吨/架，假设未来 20 年可制造 1200 架 C919，在不考虑损耗率的情况下预计带来 4700 吨航空钛材需求量，市场空间广阔。

► T800 碳纤维复合材料首次在国内民机上使用，国产化指日可待。

复合材料在 C919 上的应用达到 12%，绝大部分为碳纤维/环氧树脂复合材料；应用部位包括水平尾翼、垂直尾翼、翼梢小翼、后机身、雷达罩、副翼、扰流板和翼身整流罩等。这是国内首次在国内民机上采用如此大规模的复合材料，此前 ARJ21 支线客机复合材料用量为 8% 左右；这也是国内首次在国内民机上使用 T800 级高强碳纤维复合材料，T800 级碳纤维的拉伸强度和拉伸模量较 T300 提高 50% 左右，性能优越。

国内企业现已具备航空用 T300 级和 T700 级碳纤维的技术和批生产能力，且已在军用航空复合材料上批量应用；T800 级碳纤维完成了工程化试制，正在进行装机验证。为响应航空航天高需求，头部厂家近几年纷纷扩产。目前，C919 取证机所用的复合材料绝大多数都是进口的，预计在取证完成后将开启国产替代。国内碳纤维厂商光威复材、恒神股份、中复神鹰均在不同程度上与商飞和下游零部件厂商展开合作。光威复材参与 C919 的 PCD 适航认证，并获得预批准。针对 CRJ929 的应用目前材料准备在进行中；中航高科入选中国商飞 CRJ929 前机身工作包唯一供应商。预计 C919 将带来年均 300 吨复合材料需求量，其中，对国产 T800 级碳纤维的需求将达到年均 100 吨。

投资建议

C919 大飞机的研制极大地推动了我国先进材料技术整体研发能力的提升和产业化发展，预计随着 C919 的批量交付以及未来 CRJ929 的加速研制，国内先进材料供应商将迎来重大发展机遇，相关受益公司为：

1、**宝钛股份**：钛材行业龙头，大飞机钛合金板材主要供应商，为首架 C919 飞机提供了多种规格的钛合金棒材、厚板和薄板材料。

2、西部超导：国内高端钛合金棒丝材、锻坯主要生产基地之一，已通过商飞 Ti6Al4V 钛合金材料资质认证。

3、光威复材：碳纤维龙头企业之一，T300 级碳纤维已在军用飞机上大量使用。参与 C919 的 PCD 适航认证，并获得预批准。针对 CRJ929 的应用目前材料准备在进行中。

4、中航高科：入选商飞 CRJ929 前机身工作包唯一供应商，完成商用航空发动机复合材料风扇叶片、流道板、叶栅等产品的研制任务，1 种内饰蜂窝入选了中国商飞 QPL 目录。

5、博云新材：与霍尼韦尔合资，为 C919 供应碳/碳复合材料机轮刹车系统。

风险提示

C919 适航取证速度、交付进度不及预期的风险；受新冠疫情影响，民航市场需求不及预期的风险；产能建设不及预期的风险。

正文目录

1. 开篇：一代飞机，一代材料.....	6
1.1. 材料与飞机相互推动，不断发展.....	6
1.2. 商用飞机材料要求高，C919选材兼具成熟性和先进性.....	8
2. 铝合金.....	10
2.1. 铝合金目前占据航空材料的主导地位.....	10
2.2. 铝锂合金是航空航天最理想的结构材料.....	12
3. 钛合金.....	16
3.1. 钛合金广泛用于飞机机身及发动机.....	16
3.2. C919大飞机钛用量占9.3%，国产化率最高.....	21
4. 复合材料.....	23
4.1. 复合材料用量快速提升，成为衡量先进飞机的重要指标.....	23
4.2. 碳纤维复合材料是应用最为广泛的先进复材.....	25
4.3. C919复合材料用量占12%，首次使用T800碳纤维复合材料.....	30
4.4. 国内高性能碳纤维复合材料发展现状.....	32
5. 投资建议.....	37
6. 风险提示.....	38
参考文献.....	39

图表目录

图1 现代飞机用材料的发展状况.....	7
图2 先进发动机用材料发展趋势.....	7
图3 C919飞机选材方案简明示意图.....	9
图4 铝合金7075.....	10
图5 ARJ21客机铝材选用方案示意图.....	10
图6 西南铝业7050铝合金预拉伸厚板生产线.....	12
图7 传统铝合金与第三代铝锂合金应力腐蚀门槛值对比.....	13
图8 传统铝合金与第三代铝锂合金的剥落腐蚀情况对比（在海洋环境中）.....	13
图9 机身蒙皮材料牌号、性能变化趋势.....	13
图10 机翼上壁板用铝合金材料牌号、性能变化趋势.....	13
图11 第二代铝锂合金（1420）的典型组织.....	15
图12 第三代铝锂合金的组织结构模式.....	15
图13 C919铝锂合金使用情况.....	15
图14 C919客机铝锂合金制中后机身.....	15
图15 铝锂合金在A380上的应用.....	16
图16 铝锂合金在A350XWB外翼上的应用（翼肋）.....	16
图17 钛合金在飞机上的应用.....	17
图18 波音777飞机机身使用材料示意图.....	19
图19 C919飞机钛合金主要应用部位及制品形式.....	21
图20 C919大型整体钛合金承力构件.....	22
图21 C919钛合金中央翼缘条.....	22
图22 民用飞机结构复合材料用量的变化.....	23
图23 商用飞机发动机中复合材料的用量.....	24
图24 波音787的复合材料用量.....	25
图25 碳纤维原丝横截面图.....	26
图26 碳纤维产品图.....	26
图27 碳纤维复合材料分类示意.....	27
图28 碳纤维复合材料作为结构件应用.....	27
图29 国外航空碳纤维复合材料发展体系现状.....	28

图 30 C919 的复合材料用量.....	30
图 31 C919 复合材料机翼研制攻关项目典型盒段静力和损伤容限试验.....	31
图 32 中航工业特种研究所研制的 C919 雷达罩.....	31
图 33 国产桥式自动铺带机和铺丝机及机械臂式自动铺丝机.....	33
图 34 国产桥式自动铺带机和铺丝机及机械臂式自动铺丝机.....	34
图 35 中国液体成型航空复合材料在航空的典型应用.....	34
图 36 航空工业复材环氧树脂及预浸料产品.....	36
图 37 航空工业复材承担的 CRJ929 复合材料前机身.....	36
图 38 博云新材典型航空产品.....	36
图 39 CRJ929 飞机前机身攻关复合材料全尺寸筒段.....	37
表 1 飞机各发展阶段机体材料的变化.....	6
表 2 国外部分民用飞机各类结构材料占比 (%).....	7
表 3 飞行器结构减重的直接经济效益.....	8
表 4 商用飞机选材要求.....	8
表 5 铝合金制造的 C919 飞机零部件.....	10
表 6 铝锂合金研究历程及在航空航天领域使用简要情况.....	13
表 7 各国钛合金牌号对照.....	17
表 8 一般飞机使用的钛合金.....	18
表 9 各国航空发动机用钛合金.....	20
表 10 C919 大飞机使用的钛合金.....	21
表 11 复合材料应用历程.....	23
表 12 复合材料的成型工艺对比特点.....	26
表 13 高强中模碳纤维的主要牌号及性能.....	28
表 14 复合材料的成型工艺对比特点.....	29
表 15 C919 大飞机用的复合材料.....	31
表 16 国内典型航空高韧性环氧树脂复合材料.....	32
表 17 国内碳纤维企业扩产情况.....	35

1. 开篇：一代飞机，一代材料

1.1. 材料与飞机相互推动，不断发展

“一代飞机、一代材料”，材料与飞机一直在相互推动下不断发展。首先，先进材料的应用是航空技术发展和进步的最重要推动力之一。航空材料是航空产品的技术性能、生存能力、延长寿命和提高经济可承受能力的基础，属于优先发展、重点突破的关键技术。成本方面，材料是飞机制造的物质基础，一定程度上决定了飞机机体结构的制造成本。供应链方面，材料是商用飞机“供应链保障”上的一个重要环节。可以说，航空材料的发展对航空技术起到强有力的支撑和保障作用；反过来，航空技术的发展需求又极大地引领和促进航空材料的发展。

民用飞机的材料发展经历了五次跨时代的发展。由于工业水平有限，以莱特兄弟为代表的**第一代飞机**采用木制的梁条、翼肋、机翼包裹帆布，利用钢索固定维持机身的刚度，例如第一次世界大战的绝大部分飞机。随着工业发展及结构设计方法认知，结构设计仅以材料静强度试验为准则，**第二代飞机**采用**铝合金、钢材**等作为主结构。为了减轻机体重量并提升飞机性能，**第三代飞机**机体结构除了铝合金、钢材等材料外，**新增了钛合金**；而**第四代飞机**机体主结构采用了轻质铝合金、钛合金作为主承力材料，非主承力结构上**选取少量的复合材料**；**第五代飞机**采用了更为先进的**复合材料、钛合金及部分铝合金**。

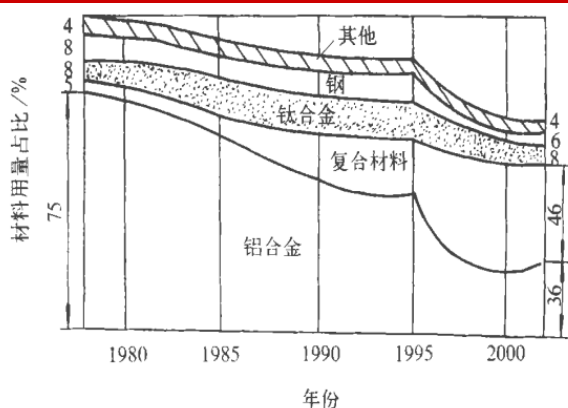
表 1 飞机各发展阶段机体材料的变化

发展阶段	年代	机体材料
第 1 阶段	1903~20 世纪 10 年代	木、布
第 2 阶段	20 世纪 20 年代~40 年代	铝、钢
第 3 阶段	20 世纪 50 年代~70 年代	铝、钛、钢
第 4 阶段	20 世纪 80 年代~21 世纪初	铝、钛、钢、复合材料（铝为主）
第 5 阶段	21 世纪初~	复合材料、铝、钛、钢（复合材料为主）

资料来源：《一代材料技术，一代大型飞机》，华西证券研究所

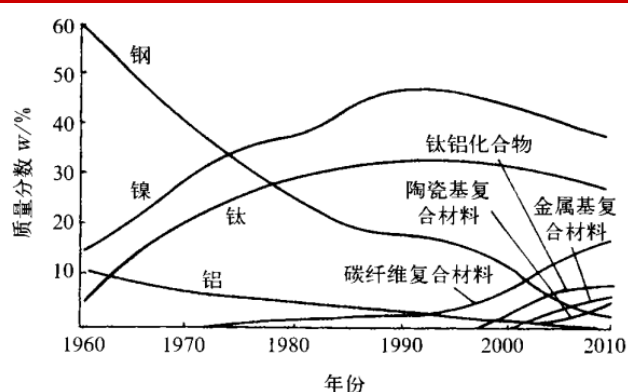
从国外大型客机材料应用的具体情况来看，传统的铝合金及结构钢在飞机上的用量逐渐减少，而复合材料和钛合金的占比快速提升。根据《一代材料技术，一代大型飞机》，从波音 787 开始，50%用量的复合材料成为未来飞机的起点，继波音 787 之后，空客 A350 改进型(A350XWB)的复合材料用量从原来的 37%提高至 52%。同时，钛合金用量与日俱增，一方面是因为它在减轻结构重量上的优势，另一方面则是因为钛与碳纤维复合材料的电极电位相近，钛合金又成为复合材料唯一的连接材料。

图 1 现代飞机用材料的发展状况



资料来源：《航空材料技术的发展现状与展望》，华西证券研究所

图 2 先进发动机用材料发展趋势



资料来源：《航空材料技术的发展现状与展望》，华西证券研究所

表 2 国外部分民用飞机各类结构材料占比 (%)

机型	首飞年份	铝合金	钢	钛合金	复合材料	其它
B737	1967	81	13	4	1	1
DC10	1970	78	14	5	1	2
B767	1981	80	14	2	3	1
B757	1982	78	12	6	3	1
A320	1987	76.5	13.5	4.5	5.5	
MD11	1990	76	9	5	8	2
A340	1991	75	8	6	8	3
B777	1994	70	11	7	11	1
A380	2005	61	14	10	22	6
B787	2009	20	10	15	50	5
A350	2013	19(原设计为 34% 含铝锂合金)	6	14(原设计为 9%)	53(原设计为 37%)	8

资料来源：《一代材料技术，一代大型飞机》，《航空材料技术的发展现状与展望》，华西证券研究所

飞机结构材料总体发展趋势是轻质化、高强度、高模量、耐高温、低成本。随着航空航天产业的快速发展，对飞行器重量、性能、能源消耗等要求地不断提高，对材料也提出了更严格的要求。其中，降低重量是最首要的目标。根据《航空航天材料发展现状及前景》，小型民机的结构重量每减 1 磅所获得的直接经济效益为 50 万美元/磅，而对战斗机来说，这个数值是 400 万美元/磅，商用运输机为 800 万美元/磅。

为降低重量、提高性能，通常采用减小飞行器部件尺寸的办法，但该方法会导致零件刚度降低和疲劳寿命减少。当前最有效的减重方法是发展低密度材料。

表 3 飞行器结构减重的直接经济效益

机种	减重经济效益（万美元/磅）
小型民机	50
直升机	300
战斗机	400
商用运输机	800
超声速运输机	3000
航天飞机	30000

资料来源：《航空航天材料发展现状及前景》，华西证券研究所

1.2. 商用飞机材料要求高，C919 选材兼具成熟性和先进性

商用飞机选材尤为严苛。总体而言，客机对材质的要求比军机对材质的要求更为苛刻，大型客机对材质的要求又比中小型客机对材质的要求高。在商用飞机发展目标围绕“更安全、更经济、更舒适、更环保”开展设计，提出了“减重、减阻、减排”的目标设计。对材料而言，也提出了“轻量化、高可靠、长寿命、高效能、绿色环保，飞机材料需要满足“性能优先原则”、“先进性原则”、“成熟型原则”、“经济性原则”和“环保性”原则五大原则。同时，综合考虑各方面需求，大飞机的材料也要满足适航当局、飞机设计制造商、航空公司等三方面的要求。

表 4 商用飞机选材要求

主体	原则&要求
基本原则	性能优先原则：满足材料规范要求和飞机设计要求
	先进性原则：材料更轻、更强、耐久性好
	成熟性原则：材料生产厂商需要具有民机使用经验，能够生产工艺固化并规模化生产，提供性能稳定、采购来源稳定的产品
	经济性原则：满足材料成本低、供货周期灵活
	环保性原则：满足环保要求，采用水性材料、不含重金属等绿色可回收要求
适航当局 (FAA/EASA/CAAC)	(a) 材料的选用建立在经验或试验的基础上
	(b) 材料要符合经批准的标准
	(c) 考虑服役中预期的环境条件，如温度和湿度的影响。用于民用飞机的材料

飞机设计和制造商 (OEM) (a) 飞机选材需满足竞争性要求

(b) 材料选择和生产制造技术要满足设计准则和设计方法开发, 满足降低飞机研制成本要求

航空公司

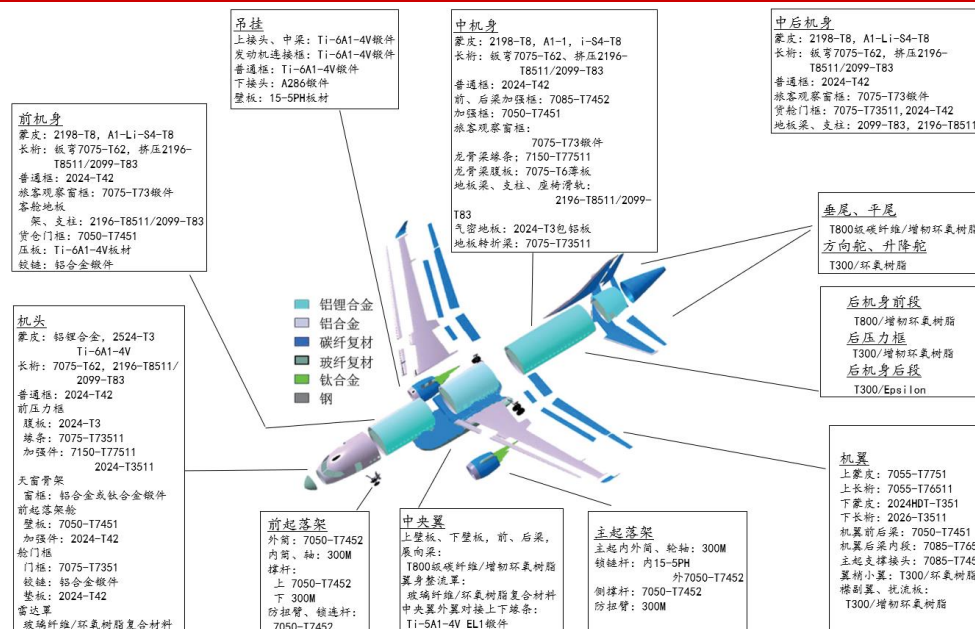
在前期设计的材料选择、新型技术应用、制造工艺的选择等方面, 必须要满足客户对飞机性能和经济性的要求, 满足航空公司运行成本最低和收益最大化

资料来源:《大飞机引领先进材料发展》, 华西证券研究所

中国商飞已具备基本的选材能力, C919 选材兼具成熟性和先进性。中国商飞已经基本建立起“在理解自己产品需求的基础上科学评价材料可用性”的技术能力。已经基本具有工程设计中材料选用权、材料及供应商的合格鉴定权、采购过程中的选择权。商飞为 ARJ21 和 C919 两款飞机共计选用金属材料 100 种、非金属材料 200 余种、标准件数千规格。同时, 选材中体现了成熟性和先进性的结合, 以 C919 大型客机为例, 在中央翼、机翼、机身等主承力部段上使用了经 ARJ21 飞机成功验证的铝合金等成熟材料, 在尾翼、后机身和襟缝翼上使用了复合材料, 特别是在尾翼盒段和后机身前段上使用了国外先进的第三代中模高强碳纤维复合材料, 在机身蒙皮和长桁结构中使用了第三代铝锂合金。

根据《C919 大型客机总装下线助推我国材料产业发展》, 以重量来划分, C919 机体结构中 65% 为铝合金 (其中铝锂合金为 8.8%)、12% 为复合材料、9% 为钛材、剩下为钢材和其他材料。作为对比, ARJ 机体结构中铝、复合材料、钛、钢占比分别为 75%、8%、2%、10%。C919 大客机的研制与生产, 极大地带动了我国钛合金、铝合金、复合材料等材料的发展, 使我国在材料领域获得了很多重要进展, 也带动了一批相关产业的发展。

图 3 C919 飞机选材方案简明示意图



资料来源:《铝基复合材料在某些中国飞机中的应用》,《大飞机引领先进材料发展》, 华西证券研究所

2. 铝合金

2.1. 铝合金目前占据航空材料的主导地位

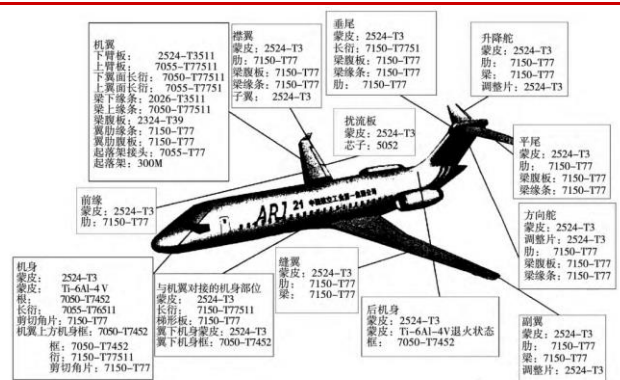
铝材是民机制造最重要的关键材料之一，也是应用最为广泛的材料。铝合金是混合型金属，包括铜、锌、锰等多种金属元素。一方面，铝合金的密度小，其密度大约是铁密度的三分之一，由于铝合金中含有丰富的混合金属元素，熔点在 60 摄氏度左右，可塑性较强，同时也兼有铜、锰等多种金属抗腐蚀性的特点，因此在航空领域得到广泛应用。

图 4 铝合金 7075



资料来源：百度百科，华西证券研究所

图 5 ARJ21 客机铝材选用方案示意图



资料来源：《铝材在国产大飞机上的应用》，华西证券研究所

C919 前机身、中机身、中后机身、机头与机翼结构件几乎全是用铝材制造的，铝材占全机结构总重的比例为 65%。上述主要零部件是用当今高端传统 2xxx 系与 7xxx 系铝合金制造的，一些重要结构件则是用铝-锂制造的，一些次要的零部件与功能零件，如空调系统、油路管、行李架、卫生设施等则是用其他铝合金制造的。C919 飞机是由一百多万个零部件连接组装而成，铝合金零件的连接与其他零件的连接如发动机与机翼的连接，在飞机的制造中起着非常重要的作用。

C919 大飞机所使用的铝材档次是最高的，符合它的要求的铝合金材料在其他航空器上也都可以使用。按生产工艺难度与价格高低可以将 C919 使用铝材分为如下的几类：1) 常用传统铝合金材料：7075-T62、7075-T73、7075-T73511、2024-T42、2024-T3511、2024-T3 等；2) 7050-T77 型与 7055-T77 合金；3) 近代发展起来的铝-锂合金：2196、2198、2099 等。第一类材料，我国已解决了“有无问题”，但竞争力问题尚未解决。因为材料的经济性是飞机公司选材的重要原则之一，国产铝材必须各项性能指标务必全面达到或超过制造原型取证机用的进口铝材的，以全面替代进口产品，同时价格合理，才具备国际市场竞争力；第二类材料仍需解决供应问题；第三类材料仍与国外有较大差距，研制一代新飞机所需要的全部新型铝材，即使在工业发达国家也需要六七年的时间。

表 5 铝合金制造的 C919 飞机零部件

部段	零部件	铝合金	部段	零部件	铝合金
前机身	蒙皮	2198-T8、Al-Li-Sc-T8	机头	蒙皮	Al-Li 合金, 2524-T3
	长桁	钣金 7075-T62, 挤压材		长桁	7075-T62, 2196-

		2196-T8511/2099-T83			T8501/2099-T83
普通框		2024-T42	普通框		2024-T42
旅客观察窗框		7075-T73 锻件	前压力框		
客舱地板梁与支柱		2196-T8511/2099-T83	腹板		2024-T3
货舱地板梁与支柱		2196-T8511/2099-T83	缘条		7075-T73511
货舱门框		7050-T7451	加强件		7150-T77511, 2024-T3511
铰链		铝合金锻件	天窗窗框		铝合金或钛合金锻件
中机身	蒙皮	2198-T8, Al-Li-Sc-T8	前起落架舱		
	长桁	钣金 7075-T62, 挤压材 2196-T8511/2099-T83	壁板		7050-T7451
普通框		2024-T42	加强件		7050-T7451
前后梁加强框		7085-T7452	舱门框		
加强框		7050-T7451	门框		7075-T7351
旅客观察窗框		7075-T73 锻件	门框		铝合金锻件
龙骨梁缘条		7450-T77511	垫板		2024-T42
龙骨梁腹板		7072-T6 薄板	前起落架	外筒	7050-T7452
地板梁、支柱、座椅滑轨		2196-T8511/2099-T83	上撑杆		7050-T7452
气密地板		2024-T3, 包铝的板材	防扭臂、锁连杆		7050-T7452
地板转折梁		7075-T73511	主起落架	外锁链杆	7050-T7452
中后机身	蒙皮	2198-T8, Al-Li-Sc-T8	侧撑杆		7050-T7452
	长桁	钣金 7075-T62, 2196-T8511/2099-T83 挤压材	机翼	上蒙皮	7055-T7751
普通框		2024-T42	上长桁		7055-T76511
旅客观察窗框		7072-T73 锻件	下蒙皮		2024HDT-T351
货舱门框		7075-T73511, 2024-T42	下长桁		2026-T3511
地板梁与支柱		2099-T83, 2196-T8511	机翼前后梁		7050-T7451
			机翼后梁内段		7085-T7651
			主起支撑接头		7085-T7452

资料来源：《铝材力推三大“国之重器”遨游蓝天》，华西证券研究所

C919 铝合金或即将实现 100%国产化，带动 90000t 高端铝材市场。根据《铝材力推三大“国之重器”遨游蓝天》，C919 原型机出于获取适航取证的需要，铝材均使用进口材料，从第二架飞机开始，国产铝材的用量逐渐增加，2022 年 C919 的铝材（不包括铝锂合金）国产化率可望达到 100%。根据《铝合金在中国民用航空器上的应用》，假设未来 20 年可制造 1200 架 C919，每架的投铝量按 75t 匡算，需采购铝材、铸件、锻件总计 90000t，每年平均 4500t/a，若铸件按 15%计算，则铝材及锻件的采购量为 3825t/a。

制造 C919 大飞机所需的国产铝材，主要由中国铝业集团有限公司提供的。例如其下属的西南铝业继为 C919 飞机提供了 30 个规格、600 余件铝合金锻件外，2017 年 11 月又试制成功旅客观察窗窗框和起落架轮毂精密模锻件。这些模锻件具有高强度、高韧性、抗疲劳性强与抗腐蚀性高的特点，是飞机的关键结构件，主要用在机翼、机翼活动面、机身中央翼、起落架等部位。2018 年，西南铝业 7050 铝合金厚板通过适航鉴定，获得中国商飞授权，进入 C919 飞机合格产品目录，打破国外技术垄断。此外，南山铝业也已具备民机关键铝材的研制能力，其板材、型材相关 5 项产品已列入 C919 飞机合格产品目录。

图 6 西南铝业 7050 铝合金预拉伸厚板生产线



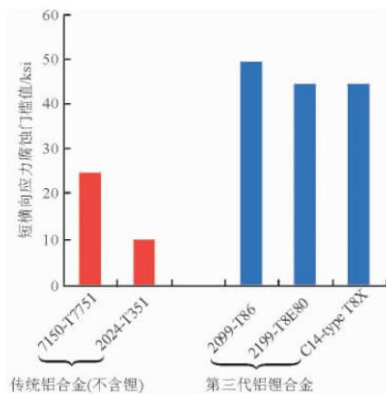
资料来源：搜狐网，华西证券研究所

2.2. 铝锂合金是航空航天最理想的结构材料

2.2.1. 铝锂合金性能优越，在航空航天领域得到良好应用

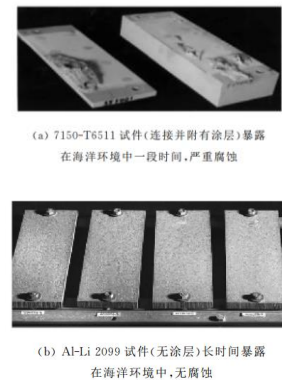
铝锂合金性能优越，是当前最具竞争力的先进材料。降低合金质量最简单的方法就是向其中添加轻原子量元素，以减小合金的密度。锂是世界上目前为止发现的最轻金属元素，锂在铝中的最大溶解度为 4.2%。前期研究发现向铝合金基体中每添加 1% 的 Li，可降低该合金密度 3%，弹性模量上升 5%~6%。铝锂合金相比于常规的 2XXX 系和 7XXX 系高强铝合金，不仅具有低密度、高弹性模量、高比强度和高比模量的优点，还兼具低的疲劳裂纹扩展速率、较好的高温及低温性能等特点，相比于复合材料，在抗冲击、塑性和修复性等方面也具有不可替代的优势。铝锂合金是现代航空航天器材设计中最具竞争力的材料之一。

图 7 传统铝合金与第三代铝锂合金应力腐蚀门槛值对比



资料来源:《先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用》, 华西证券研究所

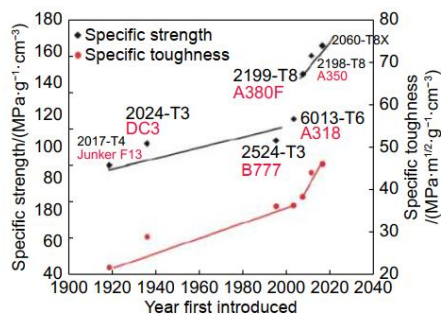
图 8 传统铝合金与第三代铝锂合金的剥落腐蚀情况对比 (在海洋环境中)



资料来源:《先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用》, 华西证券研究所

铝锂合金已在航空航天器材上得到广泛应用。铝锂合金已经在军用飞机、民用客机、直升飞机和航天器上使用,主要用于机身框架、襟翼翼肋、垂直安定面、整流罩、进气道唇口、舱门、燃油箱等。在新型飞机设计制造中,轻质和减重在航空领域常常“克克计较”,采用铝锂合金可使飞机铝合金零部件的质量减轻 14%~30%,减重的效果就是每架飞机每年的飞行费用会下降 2.2%以上,所以铝锂合金被认为是航空航天最理想的结构材料。

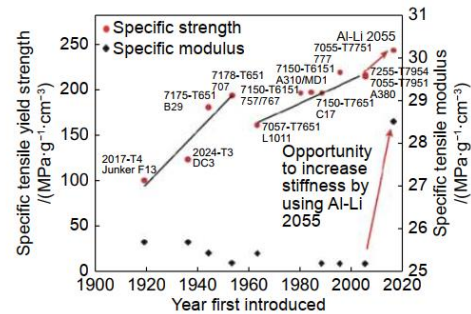
图 9 机身蒙皮材料牌号、性能变化趋势



Alloy: 2017→2024→2524→6013→2198→2199→2060 (Red is Al-Li alloy)

资料来源:《铝锂合金研究进展及发展趋势》, 华西证券研究所

图 10 机翼上壁板用铝合金材料牌号、性能变化趋势



Alloy: 2017→2024→7075→7178→7150→7055→7255→2055 (Red is Al-Li alloy)

资料来源:《铝锂合金研究进展及发展趋势》, 华西证券研究所

铝锂合金已发展到第三代,第四代高性能合金正在研制中。铝锂合金的研究和开发大致经历了 3 个阶段,第一代以 2020、BA D23 为代表;第二代以 1420、2090 为代表;当前已发展到第三代铝锂合金,其具有较好的综合性能,新近开发和改良的 1460、2198、2199、2050 等铝锂合金在先进大型客机和航天器上应用广泛。为满足航空航天工业的需要,世界上大型铝业公司和科研机构已经着手开发第四代铝锂合金,与第三代相比,新一代铝锂合金的锂含量将会降低,而强度、断裂韧性有所提升,伸长率有所降低,其他性能仍能达到甚至超越第三代铝锂合金的水平。

表 6 铝锂合金研究历程及在航空航天领域使用简要情况

时间	牌号	国家	主要应用	主要特点
第一代	Scleron	德国	未受重视	1. 断裂韧性低; 2. 缺口敏感

50年代~60年代	2020	美国	RA-5C 飞机垂直尾翼水平安定面	性高; 3. 加工生产困难; 4. 结构损伤容限; 5. 易产生疲劳裂纹
	BA Д 23	苏联	未能在航空航天器材上正式使用	
第二代 20世纪70年代~80年代	1420	苏联	米格-29 型机身、油箱	1. 各向异性严重; 2. 塑韧性水平低; 3. 热暴露后会严重损失韧性; 4. 大部分不可焊; 5. 强度较低; 6. 低腐蚀抗力; 7. 易产生加工缺陷
	1421	苏联	ЯК-36. 军舰	
	1423	苏联	米格-27	
	1441	苏联	Be-103 型水陆飞机机身蒙皮	
	2090	美国	1. 三角翼运载火箭 2. C17 运输机襟翼蒙皮、垂直尾翼 3. 波音 747 前起落架支柱牵引	
	8090	英国	1. EH101 直升机机身框架、蒙皮 2. “大力神” 运载火箭 3. F15 战斗机翼蒙皮 4. EAP 飞机机腹和襟副翼 5. 幻影式战斗机机身结构、桁条	
	1430	苏联	TU-204 客机椭圆形截面机身	
	1450	苏联	AH-70 运输机机身	
第三代 20世纪90年代~2009年	1460	俄罗斯	“能源号” 运载火箭贮箱	1. 密度小、模量高; 2. 良好的强韧性匹; 3. 耐损伤性能优良; 4. 各向异性小; 5. 热稳定性好; 6. 耐腐蚀; 7. 加工成形性好
	8091	英国	远程导弹弹头壳体	
	8093	英国	远程导弹弹头壳体	
	2050	美国	A350XWB 机翼肋板和纵梁	
	2060	美国	机身蒙皮	
	2195	美国	“奋进号” 航天飞机外贮箱	
	2196	加拿大	A380 飞机地板横梁、座椅导轨	
	2197	美国	1. F16 战斗机机身舱壁甲板 2. F22 战机后隔框	
	2198	加拿大	1. A350 客机蒙皮 2. 猎鹰 9 号运载火箭燃料贮箱	
	2199	英国	A380-F 机身蒙皮	
	2297	美国	F16 战斗机	
	Al-Li-S4	美国	C919 客机机身蒙皮	
	2097	美国	F16 战机后机身隔框、中机身大梁	
	2099	法国	A380 机身、地板横梁、机翼纵梁	
2009年至今	X2A66	中国	飞机整体壁板结构	1. Li 含量更低; 2. 更高的静强度; 3. 更高的断裂韧性
	C14E	“美国	研发中	

资料来源:《铝锂合金及其在航空航天领域成形技术的研究进展》, 华西证券研究所

与第二代铝锂合金相比，第三代铝锂合金具有较传统铝合金更为优异的强度、韧性、耐损伤性能等优点。如 2197 合金已在 F-16 战机的后机身舱壁和其他部件获得成熟应用，该合金用于替代 2124 合金，克服了疲劳寿命不足的缺陷，满足了服役 8000 小时的要求，同时还获得减重 5%、断裂韧性提高 7% 的效果。

图 11 第二代铝锂合金（1420）的典型组织

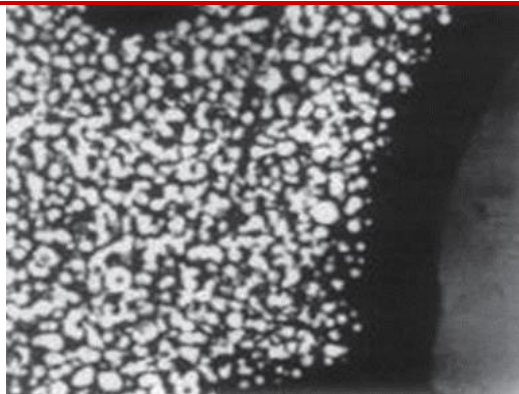
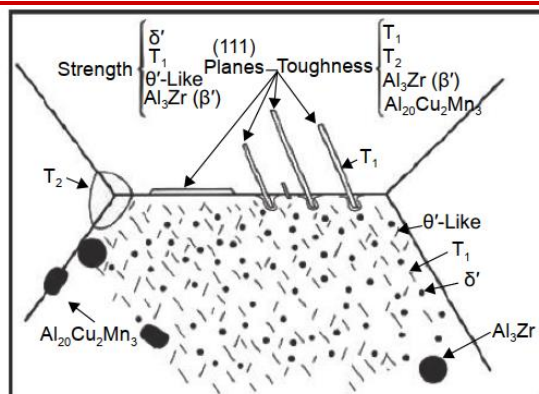


图 12 第三代铝锂合金的组织结构模式



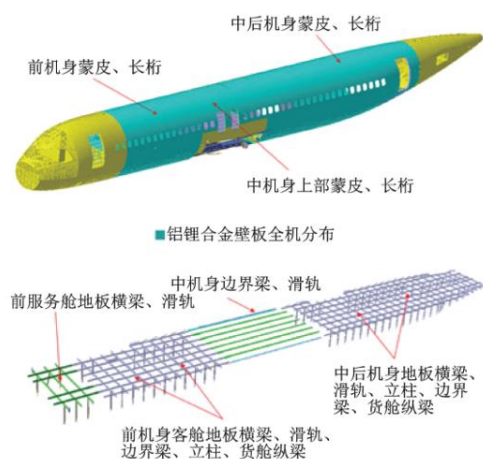
资料来源：《铝锂合金研究进展及发展趋势》，华西证券研究所

资料来源：《铝锂合金研究进展及发展趋势》，华西证券研究所

2.2.2. C919 选用第三代先进铝锂合金，但仍依赖进口

C919 选用第三代铝锂合金，占全机结构重量 8.8%，但目前仍依赖进口。C919 大飞机的机身蒙皮、长桁、地板梁、滑轨、边界梁、地板支撑结构等部件都使用了第三代铝锂合金。根据《我国航空航天对铝锂合金的需求》，全机铝锂合金材料占 8.8%，超过同级别的波音 737 和空客 320 飞机，用量达到 14t，助力 C919 综合减重 7%。由中航洪都制造的 C919 机身前部等直段部和中航西安制造的 C919 中机身和副翼大部件均大量采用了铝锂合金板，但 C919 大飞机采用的第三代铝锂合金均来自奥科宁克铝业公司。

图 13 C919 铝锂合金使用情况



资料来源：《大飞机引领先进材料发展》，华西证券研究所

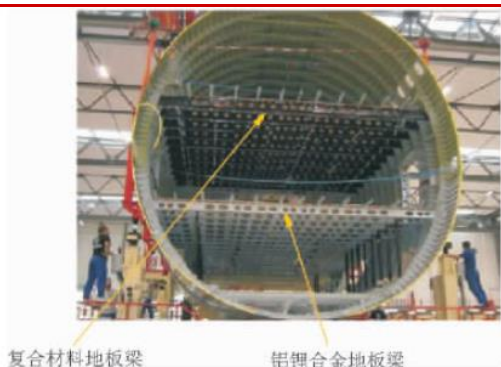
图 14 C919 客机铝锂合金制中后机身



资料来源：《我国航空航天业对铝锂合金的需求》，华西证券研究所

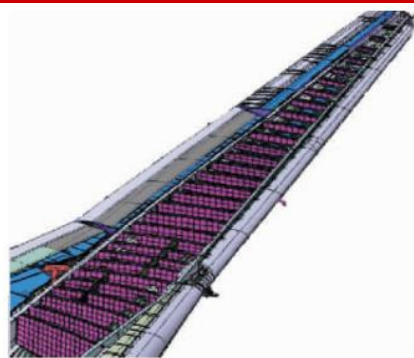
铝锂合金已成为当前各国争相发展的重要航空材料，美国占据大半市场。目前，国外有完整铝锂合金生产体系的国家主要分布在有限的美国、俄罗斯、英国、法国和意大利共5个发达地区，铝锂合金的生产能力总计约20万t/a。这些国家建立了熔炼—铸造—加工的完整体系，其中熔炼—铸造是生产铝锂合金材料的关键工序。美国在铝锂合金的研发、生产和应用上走在世界前列，其生产能力占到全球的50%左右，主要生产企业有奥科宁克铝业公司、肯联铝业公司、爱励铝业公司。奥科宁克铝业公司是全球最大的铝锂合金生产企业，产能约5.5万t/a，主要客户包括波音、空客、洛克希德马丁、湾流宇航、中国商飞等众多大型民用及军用飞机制造商。俄罗斯铝锂合金的研发、生产和应用始于前苏联，是仅次于美国的世界第二大研发、生产与应用大国；生产能力占到全球的25%左右；市场主要是面向俄罗斯国内的航空航天部门。

图 15 铝锂合金在 A380 上的应用



资料来源：《先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用》，华西证券研究所

图 16 铝锂合金在 A350XWB 外翼上的应用（翼肋）



资料来源：《先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用》，华西证券研究所

我国铝锂合金研制起步较晚，在工业生产及应用方面与美俄差距较大。我国直到20世纪80年代中期才正式启动铝锂合金的研发工作。中南大学、北京航空材料研究院、航天703所、北京有色院以及西南铝业公司等高校和单位依托国家相关课题项目，围绕铝锂合金的成分设计、组织调控以及性能生成等方面进行了深入系统的研究，已经能够产业化制备多种铝锂合金。并根据航空航天领域铝合金的应用背景和性能要求，开发出了综合性能良好的铝锂合金，建立了具有自主知识产权的合金牌号，如2A97、X2A66。其中，X2A66合金是我国铝锂合金研发工作的重大突破。但在铝锂合金基础研究与工业生产及应用方面，与美、俄仍存在较大差距，当前仅有西南铝业能够生产少量铝锂合金，年产量不足100t，远远不能满足国产大飞机的需求。

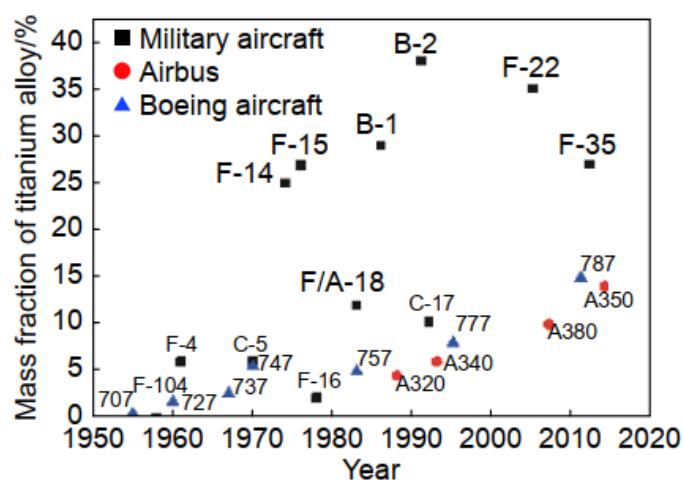
3. 钛合金

3.1. 钛合金广泛用于飞机机身及发动机

与铝、镍等主要航空用金属相比，钛是唯一一种广泛用于机身及发动机的材料。钛合金是20世纪50年代发展起来的一种重要的新型结构材料，钛比钢密度小40%，而钛的强度和钢的相当，这可以提高结构效率。同时，钛的耐热性、耐蚀性、抗弹性和成形加工性良好。由于钛具备上述特性，从一出现钛合金就应用于航空工业。钛是飞机的主要结构材料，也是航空发动机风扇、压气机轮盘和叶片等重要构件的首选材料，被誉为“太空金属”。钛合金在飞机和发动机中的使用量也是衡量其先进性的一个重要指标之一。飞机越先进，钛用量越多。根据《航空用钛合金研究进展》，美国F22

第四代机用钛含量为 41%(质量分数)，其 F119 发动机用钛含量为 39%，是目前用钛含量最高的飞机。

图 17 钛合金在飞机上的应用



资料来源：《钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展》，华西证券研究所

按相组成钛合金可分为密排六方结构(HCP)的 α 型钛合金(包括近 α 型合金)——即国内牌号 TA、两相混合的 $\alpha+\beta$ 型钛合金——即国内牌号 TC 和体心立方结构(BCC)的 β 型钛合金(包括近 β 型合金)——即国内牌号为 TB。 α 型钛合金主要含 Al、Sn 等元素具有良好的抗蠕变性能，强度、可焊性以及韧性，是高温下的首选合金，同时， α 型合金不存在冷脆性，它也适合在低温环境中使用，扩大了其应用范围。 $\alpha+\beta$ 型钛合金中同时加入 α 稳定元素和 β 稳定元素，使 α 和 β 相得到强化，具有优良的综合性能，如其室温强度高于 α 合金的，热加工工艺性能良好，可以进行热处理强化，因此适用于航空结构件，也可用于航空发动机压气机盘、旋转子和其他部件。 β 钛合金的双态组织具有良好的强度、塑性和韧性的匹配，因此得到广泛使用，同时， β 钛合金所具有的可热处理强化性和深淬透能力使得它逐渐代替 $\alpha+\beta$ 两相钛合金成为用于飞机机身和机翼的首选结构材料，在航空航天工业中发挥越来越重要的作用。

表 7 各国钛合金牌号对照

Alloy type	China (GB)	Soviet Union (TOCT)	United States (ASTM)	United Kingdom (IMI)	Germany (BWB)	France (NF)	Japan (JIS)
Pure titanium	TA0	-	-	-	-	-	-
	TA1	BT1-0	Ti-35A	IMI115	LW3.7024	T-35	KS50
	TA2	BT1-1	Ti-50A	IMI125	LW3.7034	T-40	KS60
	TA3	BT1-2	Ti-65A	IMI135			KS85
α	TA4	48-T2	-	-	-	-	-
	TA5	48-OT3	-	-	-	-	-
	TA6	BT5	-	-	-	-	-
	TA7	BT5-1	Ti-5Al-2.5Sn	-	-	-	ST-A90

	TA8	BT10	Ti-5Al-2.5Sn	IMI317	TA5E	-	AS
β	TB1	BT15	-	-	-	-	-
	TB2	-	-	-	-	-	-
	TB3	-	-	-	-	-	-
$\alpha+\beta$	TC1	OT4-1	-	-	-	-	ST-A90
	TC2	OT4-1	-	-	-	-	-
	TC3	BT6C	-	-	-	-	-
	TC4	BT6C	-	-	LW3.7164	-	-
	TC5	BT3	Ti-6Al-4V	-	-	T-A6V	-
	TC6	BT3-1	-	-	-	-	-
	TC7	AT6	-	IMI315	-	-	-
	TC8	BT8	-	-	-	-	-
	TC9	-	-	IMI318	-	T-A6V	-
	TC10	-	Ti-6Al-6V-2Sn	-	-	-	-

资料来源：《航空用钛合金研究进展》，华西证券研究所

3.1.1. 飞机机身用钛合金

飞机结构用钛合金主要应用在飞机骨架、舱门、液压管路及接头、起落架、蒙皮、铆钉、舱门、翼梁等。20 世纪 50 年代，美国首次将钛合金用在 F-84 轰炸机上作后机身隔热板、导风罩、机尾罩等非承力构件。60 年代开始，钛合金在军用飞机中的用量迅速增加，占到飞机结构重量的 20%~25%，使用部位从后机身移向中机身，部分地代替结构钢制造隔框、梁、襟翼滑轨等重要承力构件。70 年代起，民用飞机也开始大量使用钛合金，如波音 B747 客机的钛合金用量达 3640kg 以上。飞机结构用钛合金的使用温度一般不高于 350℃，其在比强度、韧性、抗疲劳性能、焊接工艺性能等方面有较高要求。在飞机机身中应用较广泛的钛合金有 β -21S(Ti-15Mo-3Al-2.7Nb-0.2Si)、Ti-10-2-3(Ti-10V-2Fe-3Al)、Ti-15-3(Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn) [67]、Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr 等。

表 8 一般飞机使用的钛合金

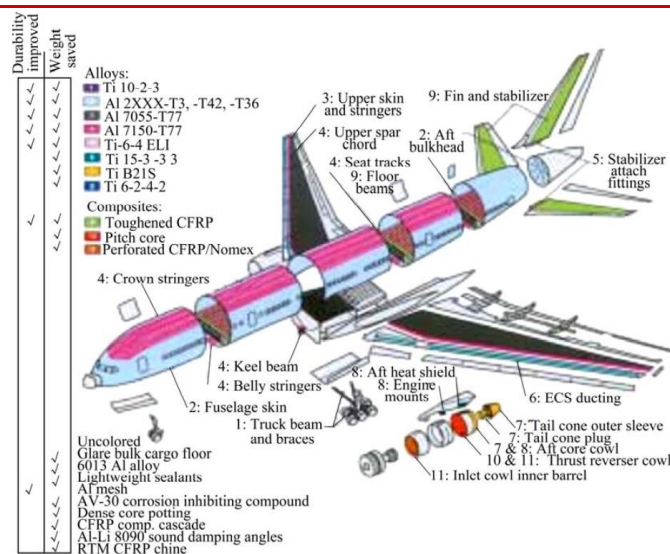
Alloy type	Chemical composition	Alloy type	Chemical composition
α	Pure titanium	β	Ti-13V-11Cr-3Al
	Ti-3Al-2.5V		Ti-10V-2Fe-3Al
	Ti-5Al-2.5Sn		Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn
	Ti-8Al-1Mo-1V		Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Sn(Timetel21S)

Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-Si(0.1-0.25)		Ti-3Al-8V-6Cr-4Mo-4Zr(β -C)
Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb-0.25Mo-0.3Si(IMI829)	$\alpha+\beta$	Ti-6Al-4V (four kinds of heat treatment were used)
Ti-5.5Al-4Sn-4Zr-0.3Mo-1Nb-0.5Si-0.006C(IMI834)		Ti-6Al-6V-2Sn
Ti-5.8Al-4Sn-3.5Zr-0.7Nb-0.5Mo-0.35Si-0.06C (IMI884)		Ti-6Al-2Sn-2Cr-2Mo-2Cr-Si
Ti-6Al-2.75Sn-4Zr-4Mo-0.45Si(Ti-1100)		Ti-6Al-2Sn-2Zr-6Mo
		Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr(Ti-17)

资料来源：《航空用钛合金研究进展》，华西证券研究所

采用钛合金做机身材料有以下5方面优势：1) 替代钢和镍基高温合金可大大降低飞机质量。高推重比让钛合金能够替代强度稍好的钢而用于飞机零部件中。2) 能够满足飞机强度要求。与铝合金相比，60%左右质量的钛合金即可达到相同的强度。在使用温度超过 130℃时，钛合金能取代铝合金，因为这一温度是传统铝合金的极限适用温度。3) 耐腐蚀性良好。大部分飞机支撑机构在厨房、厕所下面，很容易产生腐蚀，钛合金不需要表面防腐涂层或者镀膜。4) 与聚合物复合材料电化学相容性好。5) 空间的限制，替代钢和铝合金。

图 18 波音 777 飞机机身使用材料示意图



资料来源：《航空用钛合金研究进展》，华西证券研究所

3.1.2. 航空发动机用钛合金

发动机是飞机的心脏，钛合金用量占发动机总质量的 25%~40%。发动机的风扇、高压压气机盘件和叶片等转动部件，不仅要承受很大的应力，而且还要有一定的耐热性。这样的工况条件对铝来说温度太高；对钢来说密度太大。钛是最佳的选择，钛在 300~650℃温度下具有良好的抗高温强度、抗蠕变性和抗氧化性能。同时，发动机的一个重要性能指标是推重比，即发动机产生的推力与其质量之比。最早发动机的推重

比为 2~3，现在能够达到 10。推重比越高，发动机性能越好。使用钛合金替代原镍基高温合金可使发动机的质量降低，大大提高飞机发动机的推重比。钛在飞机发动机上的用量越来越多。在国外先进航空发动机中，高温钛合金用量已占发动机总质量的 25%~40%，如第 3 代发动机 F100 的钛合金用量为 25%，第 4 代发动机 F119 的钛合金用量为 40%

航空发动机部件要求钛合金在室温至较高的温度范围内具有很好的瞬时强度、耐热性能、持久强度、高温蠕变抗力、组织稳定性。 β 型和近 β 型钛合金尽管在室温至 300℃ 左右具有高的拉伸强度，但在更高的温度下，合金的蠕变抗力和耐热稳定性急剧下降，所以 β 型钛合金很少用于飞机发动机。 α 型和近 α 型钛合金具有良好的蠕变、持久性能和焊接性，适合于在高温环境下使用。 $\alpha+\beta$ 型钛合金不仅具有良好的热加工性能，而且在中高温环境下还具有良好的综合性能。因此， α 型、近 α 型和 $\alpha+\beta$ 型钛合金被广泛应用于航空发动机。

表 9 各国航空发动机用钛合金

Country	350 °C	400 °C	450 °C	500 °C	550 °C	600 °C	650 °C	Burn resistant titanium alloy
China	TC4	TC16 TC17	TA11	TC11 TA7 TA15	TA12	Ti60	TD3(Ti3Al) Ti2AlNb	Ti40
Russia	BT6 BT22	BT3-1	BTBM	BT9 BT20	BT25	BT18y BT36	-	BTT-1 BTT-3
Europe and USA	Ti-64	Ti-6246 IM1550 Ti-17	IM1679 Ti-811	IM1685 Ti-6242	Ti-6242S IM1829	IM1834 Ti-1100	Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo	Alloy-C

资料来源：《航空用钛合金研究进展》，华西证券研究所

3.1.3. 航空紧固件用钛合金

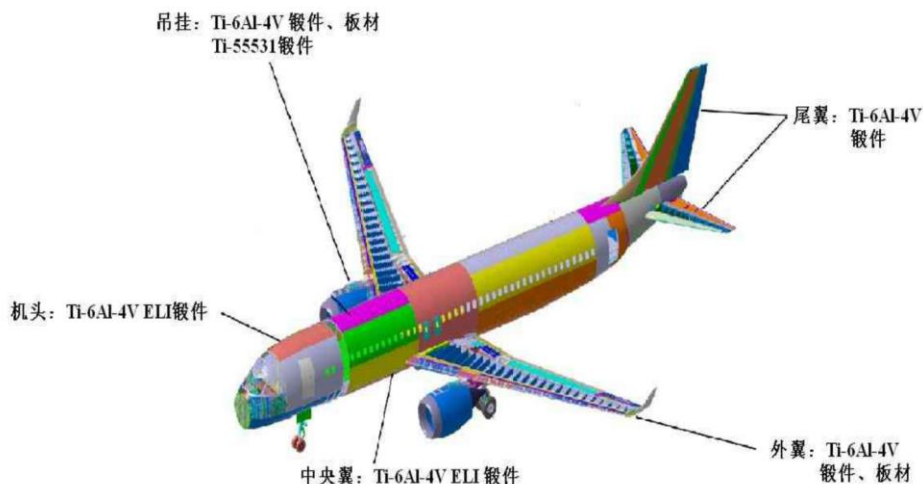
钛合金紧固件作为复合材料唯一连接材料，随复材用量增加而不断增加。不论军民用飞机还是航天器上，除了金属构件还有很多碳纤维复合材料。钛与碳纤维复合材料的电极电位相近，钛合金又成为复合材料惟一的连接材料。因此，随着先进军民用飞机钛合金和复合材料用量的不断增加，对钛合金紧固件的需求日益加大。钛合金用作航空紧固件，至少具备以下 4 点优势：1) 减重效果好。俄罗斯的一架伊尔-96 飞机用紧固件 14.2 万件，可减少质量近 600kg。我国航空航天系统钛合金紧固件的使用也有明显的减重效果。飞机和航天器减少质量后，可以提高推力、增加射程、节省燃料、减少发射费用等。2) 钛合金优异的耐腐蚀性能，尤其是它正电位与碳纤维复合材料匹配，可以有效防止紧固件发生电偶腐蚀。3) 在飞机结构中，紧固件部位因温度较高，不能采用铝合金，只能使用钛合金。4) 钛具有良好弹性和无磁，对于防止紧固螺栓的松动和防磁场干扰至关重要。

95%以上的钛合金紧固件都采用 Ti-6Al-4V (TC4) 材料。现代飞机采用多种钛合金紧固件主要有普通钛螺栓、干涉螺栓、特种紧固件等。美国、法国等航空发达国家，95%以上的钛合金紧固件都采用 Ti-6Al-4V (TC4) 材料制造。Ti-6Al-4V (TC4) 合金 β 稳定系数最低，为 0.27。它的优点是密度最低，强度和疲劳性能良好，合金成分简单，半成品成本最低。但由于室温塑性没有达到足够高，所以加工紧固件时需要采用感应加热进行热锻成形，以及真空固溶处理和时效处理加工成本较高。

3.2. C919 大飞机钛用量占 9.3%，国产化率最高

C919 大飞机钛合金用量占全机结构重量的 9.3%，超过同级别的波音 737 和空客 A320。为了降低飞机的质量，提升飞机的经济性，C919 大型客机广泛采用钛合金材料，前机身压板、机头蒙皮、吊挂、中央翼缘条、尾翼接头、机翼滑轨等部位均使用了钛合金，总用量达到机身结构重量的 9.3%。我国第一次在一款民用飞机上大量使用钛合金，而同级别的波音 737 和空客 A320 飞机钛合金用量分别为 4%、4.5%。

图 19 C919 飞机钛合金主要应用部位及制品形式



资料来源：《钛合金材料及其新技术在 C919 飞机上的应用》，华西证券研究所

C919 选用 6 个钛合金牌号，制品形态多样。根据《钛合金材料及其新技术在 C919 飞机上的应用》，综合考虑钛合金的产品性能、成本、交付周期等，C919 飞机选择了 6 个钛合金牌号，包括低强度高塑性、中强中韧、中强度高韧、高强度高韧及系统用材，产品形式涵盖了锻件（投影面积≤1.1 m²，要求的棒材直径≤450mm）、厚板（4.76-80mm）、薄板、型材、管材、丝材等。C919 选材严格，对于钛合金产品性能的评估要点包括静强度、疲劳、损伤容限、耐蚀性能、机加性能、表面处理、无损检测等。

表 10 C919 大飞机使用的钛合金

类别	牌号	规范	制品形式	应用部位	特点
低强度高塑性纯钛	CP-3	AMS4902	板材	机身蒙皮等	氧元素固溶于纯钛晶格，可提高纯钛强度；塑性好、焊接性能优良
中强中韧钛合金	Ti-6Al-4V	AMS4911; CMS-Ti-203; AMS4935	板材、锻件、型材	机身、机翼、吊挂、接头	综合力学性能优异，研究最充分
中强度高韧钛合金	Ti-6Al-4V ELI	AMS4905; CMS-Ti-202	厚板、锻件	机头、中央翼接头	ELI（低间隙元素）可提高低温性能；β 退火获得显片状显微组织，可提高断裂韧性，降低裂纹扩展速率，即提高材料损伤容限性能

高强高韧 钛合金	Ti-55531	CMS-Ti-301	锻件	吊挂、机翼接头	固溶时效：强度高，抗拉强度达到 1240MPa； β 退火：抗拉强度可达到 1080MPa，断裂韧性好
其它钛合金	Ti-3Al-2.5V	AMS4945	无缝管材	液压、燃油系统	控制轧制过程中的道次变形量，对管材的 CSR 有严格要求，可提高管材的疲劳性能
其它钛合金	Ti-38644	AMS4967	丝材	弹簧	弹性模量较低（该合金为 102GPa，Ti-6Al-4V 为 112GPa，适合制造弹性元件

资料来源：《钛合金材料及其新技术在 C919 飞机上的应用》，华西证券研究所

钛合金为 C919 上国产化最多的先进材料，宝钛集团和宝钢股份都已有材料在大飞机上使用。宝钛股份为国内钛材龙头企业，是国产大飞机机身钛材主要供应商，先后承担了国家 Ti-3Al-2.5V (TA18) 管材、 β 热处理的 Ti-6Al-4V 厚板、 β 处理的 Ti-6Al-4V 合金型材、TB5 板材工程化研制四个型号用材料研制任务，为首架 C919 飞机提供了多种规格的钛合金棒材、厚板和薄板材料。宝钢以飞机起落架用高强度、钛合金及大飞机发动机用材等作为重点研发方向，成功研制出 TC4、TC18、TA15 等 4 大牌号的大型钛合金棒材、等温锻件。

图 20 C919 大型整体钛合金承力构件



资料来源：《C919 大型客机总装下线助推我国材料产业发展》，华西证券研究所

图 21 C919 钛合金中央翼缘条



资料来源：《C919 大型客机总装下线助推我国材料产业发展》，华西证券研究所

西部超导 Ti-6Al-4V 钛合金通过商飞资质认证，即将共享大飞机广阔市场。西部超导主要从事高端钛合金材料和低温超导材料的研发与制造，是我国航空用钛合金棒丝材的主要研发生产基地，也是目前国际上唯一的铌钛 (NbTi) 铌棒及线材全流程生产企业。为满足 C919 大飞机用钛材需要，西部超导定增募资 10 亿元，用于航空用特种钛合金扩能技改项目等。根据公司 2021 年半年报，公司已经通过了商飞公司 Ti-6Al-4V 钛合金材料的资质认证，未来将逐步实现产品批量交付。

根据立鼎产业网数据，C919 钛材用量约为 3.92 吨/架，假设未来 20 年可制造 1200 架 C919，在不考虑损耗率的情况下预计带来 4700 吨航空钛材需求量。

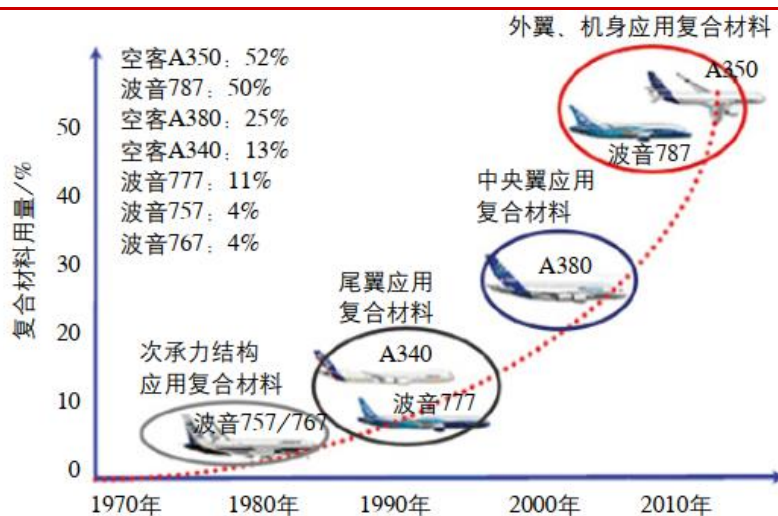
4. 复合材料

4.1. 复合材料用量快速提升，成为衡量先进飞机的重要指标

复合材料是除铝之外最重要的航空和航天材料。复合材料一般指由两种或两种以上异质、异型、异性材料（一种作为基体，其他作为增强体）复合而成的具有特殊功能和结构的新型材料。20 世纪 70 年代后期相继开发了一批如碳纤维、碳化硅纤维、氧化铝纤维、硼纤维、芳纶纤维、高密度聚乙烯纤维等高性能增强材料，并使用高性能树脂、金属与陶瓷为基体，制成先进复合材料。这种先进复合材料具有高比刚度、高比强度、性能可设计、抗疲劳性和耐腐蚀性等优点，越来越广泛地应用于各类航空航天飞行器，大大地促进了飞行器的轻量化、高性能化、结构功能一体化。

复合材料用量快速提升，其应用比例是是新一代大飞机安全性、经济性、舒适性和环保性的重要指标。根据《航空航天领域先进复合材料制造技术进展》，先进复合材料在航空航天领域的应用始于军用飞机，是为满足其对高机动性、超音速巡航及隐身等要求而不惜成本开始采用的。近年来由于结构轻量化的要求，民用飞机在复合材料用量方面也呈现增长的趋势。以 1990 年研制的波音 777 为例，在其机体结构中，复合材料仅占 11%，而且主要用于飞机辅件，如尾翼和操纵面等。到了 2009 年波音 787 首飞时，复合材料的使用出现了质的飞跃，其用量已占到结构重量的 50%，而空客 A350 的复合材料用量更是达到了 52%。

图 22 民用飞机结构复合材料用量的变化



资料来源：《航空航天领域先进复合材料制造技术进展》，华西证券研究所

大飞机的主承力结构件采用复合材料制造已成趋势。复合材料应用部位已由飞机的非承力部件及次承力部件发展到主承力部件，并向大型化、整体化趋势发展。复合材料在飞机上的应用经历了前缘 - 口盖 - 整流罩 - 扰流板 - 升降舵 - 方向舵 - 襟副翼 - 垂尾 - 平尾 - 机身和机翼等主承力结构应用的过程。复合材料是大型整体化结构的理想材料，与常规材料相比可使飞机减重 15%~30%，结构设计成本降低 15%~30%。

表 11 复合材料应用历程

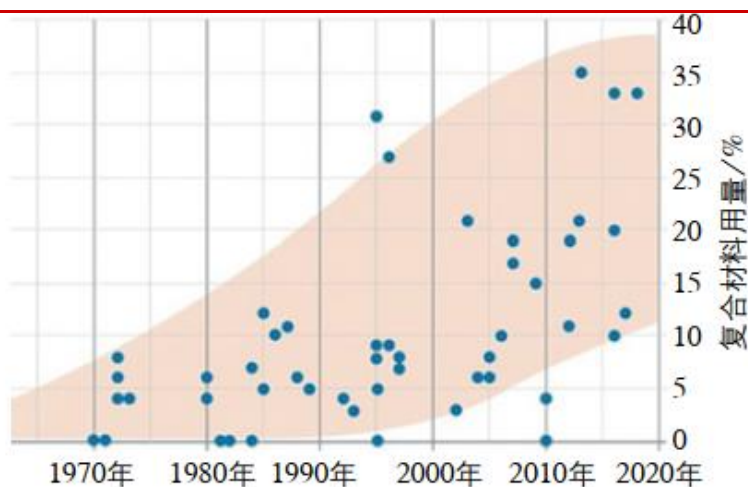
应用阶段	代表机型
------	------

第 1 阶段 (20 世纪 70 年代): 应用于次承力结构和受载不大的零部件	A300 客机: 扰流板、襟翼整流罩、垂尾前缘、垂尾后缘、平尾前缘、方向舵、升降舵; B757 客机: 起落架舱门、整流罩、副翼、方向舵、升降舵
第 2 阶段 (20 世纪 80 年代和 90 年代初): 应用于平尾和垂尾等主承力结构	A310 客机: 垂尾; A320 客机: 垂尾和平尾; B777 客机: 尾翼盒段
第 3 阶段 (20 世纪 90 年代至今): 应用于机身和机翼等主承力结构	A380 客机: 中央翼、后机身; B787 客机: 机身、机翼; A350XWB 客机: 机身、机翼; B777X 客机: 机翼

资料来源:《大飞机引领先进材料发展》, 华西证券研究所

复合材料在发动机机体结构上的应用晚于飞机结构, 近年来也得到了大量应用。航空发动机的冷却系统、发动机短舱和反推力装置的设备零件都有复合材料的应用。因为这些零件需要比强度高、隔噪声强和耐腐蚀性强等苛刻的要求, 而碳纤维复合材料这些方面都非常的出色, 因此被广泛使用。风扇段重量占发动机总重量的 30%~50%, 通过液体成型制备的风扇叶片和机匣, 对发动机的减重效果十分明显。同时, 欧美最新使用的预制体和 RTM 成型工艺的自动化水平较高, 叶片制造的全过程仅需 24h 即可完成, 预计能达到每 30min 生产 1 个叶片的生产效率。

图 23 商用飞机发动机中复合材料的用量



资料来源:《航空航天领域先进复合材料制造技术进展》, 华西证券研究所

受使用条件和自然环境的制约, 民用飞机对其经济性、舒适性、环保性等方面都有着十分严格的要求。复合材料能很好地满足民用飞机的设计要求, 对民机制造业产生了深远的影响。根据《复合材料在新一代大型民用飞机中的应用》, 以波音 787 为例, 复合材料的优势主要体现在:

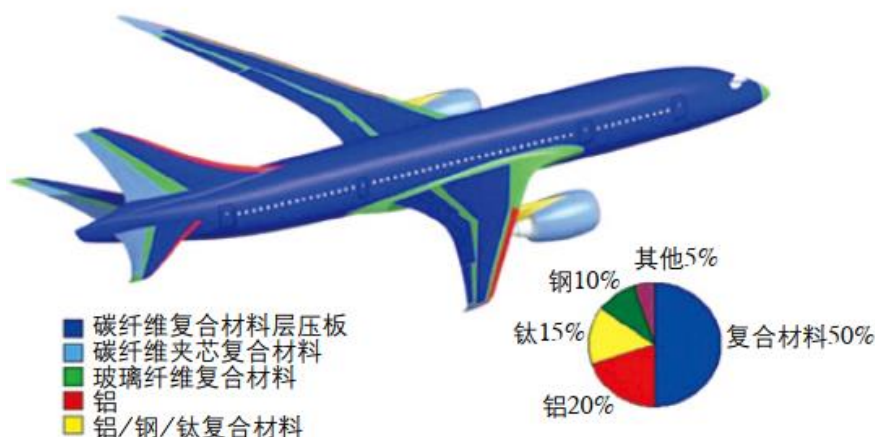
1) **提高了民用飞机的经济性:** 民用飞机的成本不仅仅是飞机的购买价格, 还要考虑油耗、维修成本、寿命等因素。虽然复合材料比铝合金贵得多, 但是它所带来的经济效益远远超过了它的负面效应。波音 787 复合材料整体机身省去了所有纵向

蒙皮拼接件，减少了1500块铝合金板和4~5万个连接件，使机体结构更加轻盈坚固，节省了油耗和维修成本。波音787的场外维修间隔时间从波音767的500h提高到1000h，维修费用比波音777降低了32%，都带来了可观的经济效益。

2) 提高了民用飞机的舒适性：目前大部分飞机的舱内气压相当于外界2400m高度处的压力，而波音787客舱内的气压约为1800m高度处的压力，为旅客提供了更加舒适的旅行享受。波音787舱压的提升仅仅使机身质量增加了70kg。而使用铝合金机身，要达到这一指标，其结构质量将增加1t。同时复合材料优异的抗疲劳特性为波音787客舱大尺寸舷窗设计提供了可能。波音787的舷窗尺寸达到280mm*480mm，比空客A330/A340的窗口面积增大了78%，使旅客可以拥有更大的视野。此外，整体成型的复合材料机身要比用铆钉连接的铝合金机身使用更少的紧固件，表面光洁度要好得多，有效地减少了机身表面的湍流噪声。

3) 提高了民用飞机的环保性：面对较高的燃油价格和越来越严格的污染物排放标准，复合材料飞机节能减排的优点显得尤为重要。轻便的复合材料结构件能够提高飞机的飞行效率，降低油耗。波音787与同类飞机相比可以节省20%的燃油，这其中8%是依靠应用复合材料而实现的。

图24 波音787的复合材料用量



资料来源：《航空航天领域先进复合材料制造技术进展》，华西证券研究所

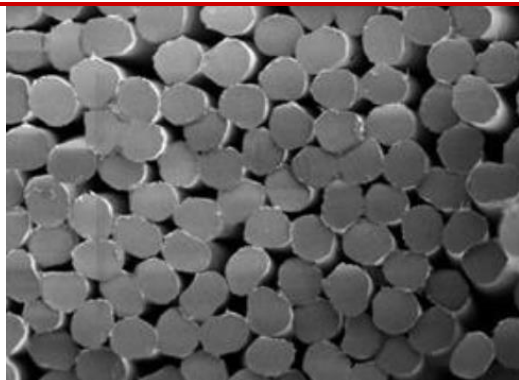
4.2. 碳纤维复合材料是应用最为广泛的先进复材

碳纤维复合材料是目前国际上航空领域应用最为广泛的复合材料。它是由碳纤维作为增强体，树脂、金属、陶瓷等作为基体复合而成。其中，飞机结构材料主要以环氧树脂基碳纤维复合材料为主，本节主要围绕该类复合材料展开讨论。

4.2.1. 碳纤维是含碳量在90%以上的高强度、高模量的新型纤维材料

碳纤维（Carbon Fiber）是一种丝状碳素材料，由有机纤维经碳化以及石墨化处理而得到的微晶石墨材料，直径5-10微米，含碳量高达90%以上。碳纤维力学性能优异，比重不到钢的1/4，碳纤维复合材料抗拉强度一般都在3500Mpa以上，是钢的7-9倍，同时具有轻质、高强度、高弹性模量、耐高低温、耐腐蚀、耐疲劳等优异特性，因此广泛应用于航空航天领域。

图 25 碳纤维原丝横截面图



资料来源：吉林碳谷招股书，华西证券研究所

图 26 碳纤维产品图



资料来源：搜狐网，华西证券研究所

碳纤维可以按纤维数量、拉伸模量、拉伸强度不同来进行分类。按纤维数量不同，碳纤维可分为小丝束和大丝束，小丝束一般指丝束数量小于24K的碳纤维（1K代表一束碳纤维中有1000根丝），主要用于国防军工、航空航天领域；大丝束指丝束数量大于等于48k的碳纤维，用于通用工业领域。按拉伸模量不同，碳纤维可分成标准模量、中等模量和高模量三类。而常见的T300、T400、T700、T800、T1000引自日本东丽公司碳纤维产品型号，主要以拉伸强度来划分。

表 12 复合材料的成型工艺对比特点

划分标准	类别	具体指标
纤维数量	小丝束	1~24K（含）
	大丝束	≥48K（东丽的定义为>40K）
	巨丝束	>100K
拉伸模量	标准模量	230~265GPa
	中等模量	270~315GPa
	高模量	>315GPa
拉伸强度(按照东丽产品标准)	T300	3530MPa
	T400	4410MPa
	T700	4900MPa
	T800	解捻拉伸强度 5490MPa，无捻拉伸强度 5880MPa
	T1000	6370MPa

资料来源：《2020 全球碳纤维复合材料市场报告》，搜狐网，华西证券研究所

4.2.2. 树脂基碳纤维复合材料在航空领域广泛应用

碳纤维复合材料是以碳纤维为增强材料，以树脂、金属、陶瓷等作为基体材料，经过复合成型制成的结构材料。与传统的金属材料相比，其具有密度小、比强度 / 比刚度高、耐腐蚀、抗疲劳、耐高温、便于设计、易于大面积整体成型加工等优点。按基体的不同，可分为树脂基复合材料（CFRP）、碳 / 碳复合材料（C / C）、金属基复合材料（CFRM）、陶瓷基复合材料（CFRC）及橡胶基复合材料（CFRR）等。CFRP 是碳纤维最主要的消费领域，其在全球碳纤维复合材料市场中的消费占比约为 80%。

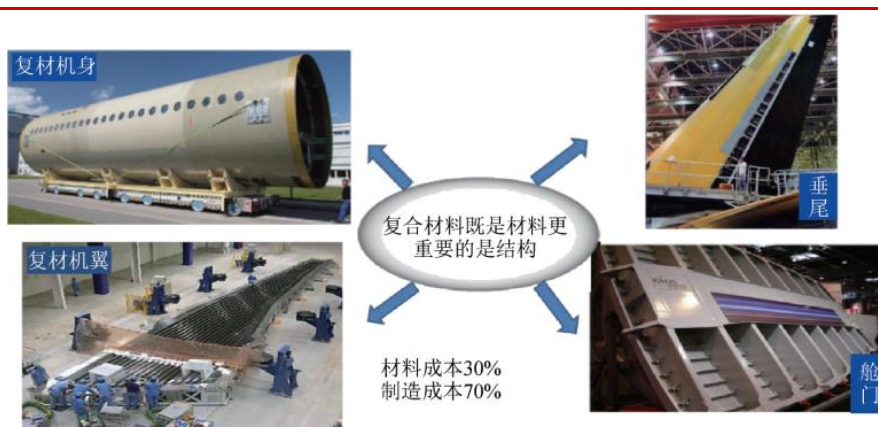
图 27 碳纤维复合材料分类示意



资料来源：《碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势》，华西证券研究所

碳纤维/环氧树脂复合材料（CFRP）是在飞机上应用最为广泛、应用量最大的先进复合材料。碳纤维和环氧树脂结合而成的复合材料，由于其比重小、刚性好和强度高而成为一种先进的航空航天材料，尤其是民用飞机碳纤维复合材料用量在近几十年的增长速度十分迅速。空客 A 380 飞机约 25%由复合材料制造，其中 22%为环氧基体碳纤维复合材料，再如波音 B777 飞机上采用碳纤维增强工程塑料量达 9.9 t，占结构总质量的 11%。

图 28 碳纤维复合材料作为结构件应用

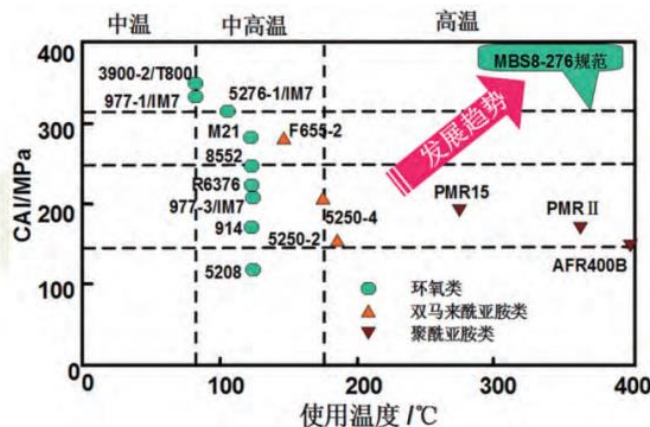


资料来源：《碳纤维及其复合材料》，华西证券研究所

碳纤维/环氧树脂复合材料（CFRP）是大型整体化结构的理想材料，可使飞机减重 20~40%，大幅降低成本。与其他航空航天金属合金相比，CFRP 有更高的比强度/模量，重量更轻，更好的耐腐蚀性和抗疲劳寿命性，更大的有效载荷（人员、航空电子设备、弹药等以及更长的航程和燃油节省，碳纤维复合材料的耐高温性非常好，机件在使用过程中能够承受高温带来的影响，减少不必要的损失，在高温条件下它的属性和性质

不会轻易地发生变化，为航空设备的平稳运行提供保障。更重要的是，CFRP 的良好成型性可以使结构设计成本和制造成本大幅度降低（零件和紧固件较少）。空客公司提出更多地用轻质高强材料使机身减重 30%，整个飞行成本可降低 40%。

图 29 国外航空碳纤维复合材料发展体系现状



资料来源：《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，华西证券研究所

4.2.3. 大飞机研制推动碳纤维复合材料行业发展

航空需求推动碳纤维工业的发展和先进复合材料技术日趋完善。根据《碳纤维复合材料在大飞机上的应用》，1981 年，波音公司提出需求高强度、大伸长的碳纤维，促进了高性能碳纤维的研发步伐。1984 年，日本东丽公司率先研制成功 T800；1986 年，又研发成 T1000。随后，日本东邦、三菱人造丝公司和美国 Hexcel 公司相继研制出同类高性能碳纤维，为制造大飞机提供了新型复合材料。

韧性 CFRP 是典型的用来制造大飞机一次和二次结构件的韧性复合材料。先进通用级 T300 碳纤维其 CFRP 可用来制造飞机的二次结构部件。例如，T300/5208 用来制造 B757、B767 和 B777 的二次结构部件。但因 T300 的抗拉强度仅为 3.53GPa，抗拉模量为 231GPa，特别是断后延长仅有 1.5%，满足不了制造一次结构件的要求。随后开发成功的高强中模碳纤维在上述 3 项质量指标有了大幅度提高，在配套韧性环氧树脂所制高性能韧性 CFRP 就可用来制造大飞机的一次结构件。韧性 CFRP（如 T800H/3900-2）是当前制造先进大飞机一次和二次结构件的典型材料。目前，日本东丽公司为 B787 客机研发了第三代增韧环氧复合材料 T800S/3900-2B，属于经改进的大丝束碳纤维，该材料的冲击后压缩强度值（CAI）达到了 315~345MPa。

表 13 高强中模碳纤维的主要牌号及性能

公司名称	碳纤维牌号	拉伸强度/GPa	拉伸模量/GPa	断后延长率/%	密度/g*cm ⁻³	直径 μm
东丽	T700SC	4.9	231	2.1	1.8	7
	T800H	5.51	296	1.9	1.81	5.1
东邦	IM400	4.51	295	1.5	1.74	5
	IM600	4.51	285	2	1.86	5

三菱人造丝	MR50	5.49	295	1.8	1.8	5
Hexcel	IM7	5.08	276	1.8	1.78	5
	IM7-500	5.53	276	2	1.78	5
	IM7-600	5.76	292	2	1.78	5

资料来源：《碳纤维复合材料在大飞机上的应用》，华西证券研究所

碳纤维复合材料成型技术主要包括预浸料-热压罐工艺、液体成型工艺、非热压罐工艺、模压、缠绕和拉挤成型工艺。预浸料-热压罐工艺是目前应用最为广泛、最为成熟的航空复合材料结构成型工艺。它主要是以预浸料为加工对象，通过热压罐来提供必要的压力环境，并在一定的温度下使预浸料叠层完成固化而得到复合材料零件的制造技术。多用于主承力结构，如机翼、中央翼盒、机身等。液体成型工艺（LCM）是将液态树脂（或加热融化预置的树脂膜）注入铺在模具上的纤维预成型体，树脂在流动的同时完成纤维的浸润并经固化成为制品，可以省略预浸料加工、预浸料低温储存和使用昂贵的热压罐3道工艺过程，是进入本世纪以来发展迅速的一种低成本工艺。而非热压罐（OOA）工艺是另一种低成本的新工艺，专指相对于传统预浸料+热压罐工艺，依然采用预浸料但不需要热压罐设备，仅在真空压力下固化的工艺技术，尚处于初步试用阶段。

液体成型技术将成为复材结构件制造技术的主要发展方向。复合材料主承力结构件具有大型化和整体化的特点，当前工艺技术已从预浸料手工铺贴和自动铺带转向纤维自动铺放技术。以复合材料液体成型技术为代表的非热压罐工艺以低设备投入、低能耗、低制造成本、易于复杂型面成型和整体化成型的优势逐渐得到了重视，将成为飞机主承力结构制造技术的主要发展方向。

表 14 复合材料的成型工艺对比特点

工艺	特点	代表性应用部件
热压罐	多用于主承力结构，产品的现为体积含量较高（57%~60%）	机翼、中央翼盒、机身
液体成型	树脂转移模塑（RTM） 树脂在压力下被注入对合模具；制件内外表面均有极好的光洁度；可得到较高的纤维体积含量（57%~60%）	叶片、机匣
	真空辅助 RTM（VARTM/VARI） 通常使用单面开放模具，抽真空使液态树脂渗入预制体，需采用低黏度树脂，与模具型面相贴的制件表面有极好的光洁度；相比于 RTM 工艺，模具较为便宜；得到的纤维体积含量通常较低（50%~55%）	机翼、襟/副翼、扰流板
	树脂膜渗透（RFI） 在模具底部或预制体层间放置树脂膜，通过热压罐的热压环境或烘箱熔融树脂并使其进入预制体；可用于生产高质量的部件	机身后压力框
OOA	采用预浸料在真空压力下制造复合材料部件	机身蒙皮
模压	生产效率高，产品尺寸精度高，重复性好，表面质量好	窗框、直升机桨叶

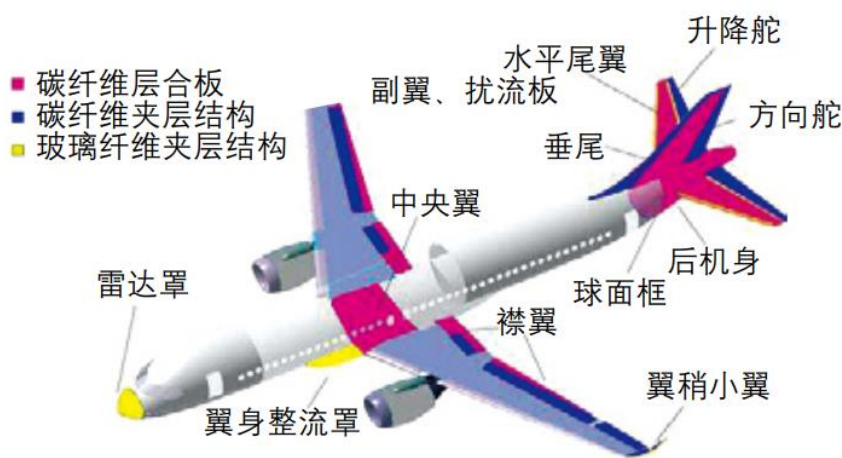
缠绕	将浸过树脂的连续纤维缠绕到芯模上成型，一般用于生产筒形部件；生产效率高，成本低	运载火箭筒体、雷达罩、机匣
拉挤	生产效率高，自动化程度高，材料浪费率低，成本低，重复性好	地板梁、座椅、内饰板

资料来源：《航空航天领域先进复合材料制造技术进展》，华西证券研究所

4.3. C919 复合材料用量占 12%，首次使用 T800 碳纤维复合材料

C919 的复合材料用量约为 12%（飞机结构重量），主要使用碳纤维复合材料。根据《C919 上用了哪些新材料》，复合材料应用部件包括水平尾翼、垂直尾翼、翼梢小翼、后机身（分为前段和后段）、雷达罩、副翼、扰流板和翼身整流罩等。如此大规模的采用碳纤维复合材料，国内尚属首次。此前 ARJ21 支线客机复合材料用量为 8% 左右，其方向舵和翼梢小翼采用了碳纤维/环氧树脂复合材料，翼身整流罩和机头雷达罩采用了玻璃纤维/环氧树脂复合材料。在 C919 复合材料结构件中，有大尺寸复合材料壁板结构（水平尾翼、垂直尾翼）、蜂窝三明治夹层结构（活动面）、大曲率变截面（后机身）等复杂结构，加之尺寸很大，使得制造难度增加。C919 客机中央翼盒原计划采用复合材料，但由于缺乏应用及验证经验，为了保证研制进度，最终改为了传统的金属结构。

图 30 C919 的复合材料用量



资料来源：《铝基复合材料在中国民用航空器上应用及生产概况》，华西证券研究所

C919 大型客机是国内首个使用 T800 级高强碳纤维复合材料的民机型号。相比 T300 级材料，T800 级材料强度、模量更高，韧性更强，具备更好的抗冲击性。因此，C919 上受力较大的部件，如后机身和平垂尾等都使用了 T800 级碳纤维复合材料。T300 属于第一代民机复合材料，其树脂基体为未增韧的脆性环氧树脂基体，增强纤维为 T300 碳纤维，拉伸强度约为 3.5GPa，拉伸模量约为 230GPa。T300 呈现脆性材料性能特征，对冲击载荷引起的分层损伤比较敏感，因此只能用于受力不大的次承力结构。C919 上使用的 T800 材料采用增韧环氧树脂基体，增强纤维为 T800 碳纤维，拉伸强度和拉伸模量较 T300 提高 50% 左右，也是目前国际上主流民机主承力结构应用最为广泛的复合材料。

表 15 C919 大飞机用的复合材料

部位	零部件名称	复合材料类型
机头	雷达罩	玻璃纤维/环氧树脂
中央翼	纵向梁、壁板、前后梁翼身整流罩	T800 级碳纤维/增韧环氧树脂玻璃纤维/环氧树脂
垂尾、平尾	-	T800 级碳纤维/增韧环氧树脂
方向舵、升降舵	-	T300/环氧树脂
后机身前段	-	T800 增韧环氧树脂
后压力框	-	T300 增韧环氧树脂
后机身后段	-	T300/埃拔西隆 (Epsilon)
机翼	翼梢小翼襟	T300/埃拔西隆 (Epsilon)
	副翼、扰流板	T300/增韧环氧树脂

资料来源：《铝基复合材料在中国民用航空器上应用及生产概况》，华西证券研究所

C919 飞机的雷达罩使用了玻璃纤维复合材料。相比碳纤维复合材料，玻璃纤维复合材料的力学性能稍低，但由于碳纤维介电常数较高，会影响雷达工作，因此雷达罩多选用玻璃纤维复合材料。另外一些受力较小的部件，如襟翼也使用了玻璃纤维复合材料。因为玻璃纤维复合材料成本比碳纤维复合材料低，在受力较小的部件上应用，既可以达到设计要求，又可以降低制造成本。

此外，C919 飞机舱门和客货舱地板使用了芳纶蜂窝材料。这是一种采用酚醛树脂浸渍的芳纶纸制成的轻质高强非金属仿生芯材制品。它模仿蜜蜂的蜂巢设计，具有稳定、轻质的结构和很高的比强度，与泡沫芯材相比，它具有更高的剪切强度，与金属蜂窝相比，它更加耐腐蚀。同时，芳纶蜂窝材料还具有高韧性、良好的抗疲劳性能和防火性能，是一种比较理想的民机复合材料。值得一提的是，C919 飞机确定了首家国内芳纶蜂窝材料供应商特一新材（未上市），率先实现国产化。

图 31 C919 复合材料机翼研制攻关项目典型盒段静力和损伤容限试验



资料来源：《复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势》，华西证券研究所

图 32 中航工业特种研究所研制的 C919 雷达罩



资料来源：搜狐网，华西证券研究所

4.4. 国内高性能碳纤维复合材料发展现状

总体而言，我国复合材料技术的研究水平和产业化水平与发达国家相比还有较大的差距。我国通过民机型号研制以及一系列民机预先研究，已初步建立了“设计-制造-装配-维修”的复合材料一体化概念和相配套的技术体系，但也面临着材料体系单一、材料规范不全、材料性能数据积累不足、供应链不完善等问题。先进复合材料作为我国的一项“卡脖子”技术，应以“自主可控”为目标，尽快实现其国产化。

4.4.1. 碳纤维方面

国内企业已具备 T300、T700 级碳纤维批量生产能力；T800 完成小规模试制，但在产品质量和稳定性方面与国外仍有差距。多年来，在政府对碳纤维行业的大力支持下，我国碳纤维行业得到较大发展：根据中航高科 2020 年年报，国内企业已具备航空用 T300 级和 T700 级碳纤维的技术和批生产能力，且已在军用航空复合材料上批量应用；T800 级碳纤维完成了工程化试制，正在进行装机验证。部分民企已具备航空复合材料树脂、预浸料和复合材料零件研制或生产能力。但是，由于前期国内碳纤维行业缺乏核心技术团队，多数企业依赖于进口生产设备、缺乏对其消化和吸收能力，生产技术和生产线自动化均较弱，导致生产工艺稳定性和过程控制的一致性较差，影响碳纤维的产品质量和稳定性，生产成本较高。未来需要实现“从有到优”，具体路径就是稳质降本，低成本生产技术是大小丝束共同需要的基础技术。

4.4.2. 高韧性树脂基复合材料方面

我国高韧性复合材料技术能力与国外差距较小。根据《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，当前，以 5228A 为代表的热塑性树脂共混增韧高温固化环氧树脂基体发展成第二代高韧性树脂基体，其复合材料的 CAI 为 250MPa 以上。结合国内 T800 级碳纤维的研制成功，航空工业复合材料技术中心研制了新一代高韧性环氧树脂基复合材料 AC531，冲击后压缩强度达到了 340MPa 以上，达到了第三代韧性复合材料的水平。从复合材料韧性水平来看，国内与国外的差距较小。

国产高韧性复合材料已经在军用飞机上得到应用，为民用飞机复合材料国产化铺平道路。根据《先进复合材料的应用拓展：航空航天和民用航空先进复合材料应用技术和市场预测》，国内研发的碳纤维织物增强 5224 环氧树脂基复合材料结构已经在直升机上得到了大量的使用，单向碳纤维增强的 NY9200 环氧树脂基复合材料结构在近 400 架飞机上应用，另外，在飞机结构上开始采用的 BA9916 和 5228 环氧树脂基体系，这些应用所沉淀的工程经验均可以为国内民用大飞机复合材料结构选材提供有益的参考和借鉴。

表 16 国内典型航空高韧性环氧树脂复合材料

材料	T _g /°C	冲击后压缩强度/Mpa	对应国外牌号
AC531/CCF800	230	343	M21EA
BA9918/T800	200	298	3900-2
5228A/CCF800	220	280	M21
5228A/CCF300	220	265	M21

9916/CCF300	200	257	M21
5224/CCF300	220	203	35016

资料来源：《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，华西证券研究所

4.4.3. 复合材料工艺方面

C919 研制项目推动复合材料自动化工艺技术发展。大飞机研制之前，国内各大飞机制造公司没有大型复合材料零件生产的自动化设备，如预浸料自动铺带机、热隔膜成型机、大型无损检测设备及标准、大型热压罐等等。复合材料的铺贴一般采用人工手铺，稍微大一点的零件即需要几个班组加班加点，制造效率低，产品重复性也差。面对这种情况，国内航空制造企业有计划地采购国外成熟的制造设备，为大型复合材料的研制提供保障。几年间诸如预浸料自动铺带机、自动铺丝机等先进设备陆续安装调试并投入使用。至此，中国具有了可以快速、稳定铺放大尺寸复合材料的国际顶尖的设备和能力。另外，复合材料热隔膜成型设备、复合材料超声波裁断机、大型水切割设备、大型 C 扫描等先进自动化设备也成为了国内复合材料零件供应商的生产装备。

图 33 国产桥式自动铺带机和铺丝机及机械臂式自动铺丝机



资料来源：《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，华西证券研究所

目前，国内复合材料自动化制造工艺应用程度仍很低。根据《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，自动铺带和铺丝工艺技术目前在国内航空装备中实现装机飞行考核和小批量生产，而且在大型民机机翼机身结构实现了工艺验证，但是复合材料自动化制造工艺在航空复合材料中的应用不足 5%，远远落后于发达国家。

图 34 国产桥式自动铺带机和铺丝机及机械臂式自动铺丝机



资料来源：《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，华西证券研究所

国内已掌握低成本液体成型工艺并实现工程应用。近年来国内已经开发了系列工艺性和力学及耐热性能优良的液态成型树脂体系，耐温涵盖了从 60~350℃ 的温度范围，这些液态成型材料体系突破了低黏度化等技术难题，并研发了与各树脂体系匹配的定型剂材料，建立了相应的材料和工艺标准，在多个型号中实现了工程应用，扩大了碳纤维复合材料的应用范围。

图 35 中国液体成型航空复合材料在航空的典型应用



资料来源：《航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势》，华西证券研究所

4.4.4. 供应链方面

碳纤维是国家加快发展的战略性新兴产业，高性能碳纤维研发及产业化项目受国家经费支持。为促进我国先进复合材料技术进步，推动我国先进复合材料技术整体研发能力的提升和产业化发展，满足 C919 客机的发展需要，我国将江苏航科复合材料科技有限公司的“大型民用客机关键零部件用 T800 级碳纤维的研发及其产业化项目”列入国家战略性新兴产业发展重大专项。受到国家扶植的相关项目还有：中简科技发展有限公司 T700/T800 级碳纤维及复合材料研发、产业化及在航空领域的应用示范项目，江苏恒神纤维材料有限公司千吨级(GQ4522 级)碳纤维复合材料在航空领域应用验证与产业化项目，湖南博云新材料股份有限公司年产 305t 高性能碳/碳复合材料研发与产业化项目等。

国内能够生产高性能碳纤维的厂家只有光威复材、中简科技、恒神股份和中复神鹰。近几年头部厂商纷纷扩产，响应航空航天高需求。

光威复材是国内碳纤维龙头，拥有从设备、原料、半成品到成品的全产业链布局，T700/T800 级碳纤维已实现小批量供应，T1100、40x 级已经突破关键技术。根据公司公告，公司与下游零部件客户一起参与 C919 国产化替代验证，T300 的碳纤维材料和预浸料 PCD 验证工作已经结束，有望率先受益大飞机复材国产化进程。

中简科技专注于国内航空航天领域，已经实现 ZT7 系列（高于 T700 级）高性能碳纤维产品在国家航空航天关键装备的稳定批量应用，暂时未有民用飞机业务布局。

恒神股份业务涉及从原丝、碳纤维、预浸料、碳纤维复合材料零件到航空复合材料结构件各环节，产品品类丰富。公司 2019 年参与到 C919 复合材料尾翼优化项目专业化零部件的研制生产中；2021 年年报披露公司开发的 EH918 高温中模预浸料已经完成自动化铺丝工艺验证，并完成后压力框复合材料部件交付。

中复神鹰是民用碳纤维领先企业，率先突破干喷湿纺关键技术，率先建成千吨级干喷湿纺碳纤维产业化生产线。公司招股说明书披露 SYT55S（T800 级）碳纤维已实现批量化生产，且正与中国商飞展开合作，并与 C919、ARJ21 碳刹车预制件的唯一供应商江苏天鸟达成战略合作。

表 17 国内碳纤维企业扩产情况

公司名称	募投时间	项目	计划投资总额	达产时间	新增产能	进展
光威复材	2019	大丝束碳纤维产业化	20.24 亿元	2025	10000 吨/年碳纤维产能	一期在建产能 4000 吨，预计 2022 年建成投产
中简科技	2019	1000 吨/年国产 T700 级碳纤维扩建项目	3.05 亿元	2021	1000 吨/年 T700 级碳纤维	已建设完成
	2021	高性能碳纤维及织物产品项目	18.67 亿元	2025	1500 吨（12K）/年高性能碳纤维，如选择投产 3K 产品，则产能预计为 400 吨	-
中复神鹰	2021	年产万吨高性能碳纤维及配套原丝项目	20.58 亿元	2022	10000 吨/年碳纤维产能	目前已建成并投产 6000 吨/年产能的生产线
	2021	航空航天高性能碳纤维及原丝试验线项目	2.33 亿元	2023	200 吨/年中高模碳纤维的产能	-
	2021	碳纤维航空应用研发及制造项目	3.62 亿元	2023	100 万平方米/年的航空预浸料，200 万平方米/年的高模预浸料	-

资料来源：各公司公告，华西证券研究所

中航高科卡位预浸料核心环节，深度参与国产大飞机研制过程。预浸料是制造复合材料及其制件的中间材料，构成了复合材料的基本单元，其质量的均匀性和稳定性，是保证复合材料及其制件质量和可靠性的重要环节。中航高科是国内航空碳纤维预浸料龙头企业，下属航空工业复材深度参与国产大飞机预浸料研制，2018 年年报披露其生产的 C919 用国产预浸料完成首批交付，实现了此领域国产材料零的突破；2020 年年报披露两种 C919 国产预浸料在新生产线验证中通过中国商飞 PCD 预批准，开展 C919 升降舵工艺验证试验，参与 C919 第三战线复合材料尾翼优化项目；2021 年完成 C919 某试验件的设计，并获得 CRJ929 飞机前机身工作包唯一入选供应商资格。公司已与制造院签署了《先进航空复合材料系列预浸料技术实施许可协议》，为国产 T800 级预浸料产业化发展创造了条件，随着后续 C919 批量交付，公司将直接受益。

图 36 航空工业复材环氧树脂及预浸料产品



资料来源：航空工业复材官网，华西证券研究所

图 37 航空工业复材承担的 CRJ929 复合材料前机身



资料来源：航空工业复材官网，华西证券研究所

博云新材与霍尼韦尔合资，为 C919 供应碳/碳复合材料机轮刹车系统。C919 大飞机的机轮刹车系统涉及碳/碳复合材料及高温合金的生产与制造。碳/碳复合材料是碳纤维及其织物增强的碳基体复合材料，具有低密度、高强度、高比模量、高导热性、低膨胀系数、摩擦性能好，以及抗热冲击性能好、尺寸稳定性高等优点，是如今在 1650°C 以上应用的少数备选材料，最高理论温度更高达 2600°C。用炭/炭复合材料制造的机轮刹车系统，耐高温，性能好，使用寿命是金属材料的 2~4 倍，质量只有其 1/4，对飞机性能的提升大有好处。2012 年，博云新材与中国商飞、霍尼韦尔国际等企业共同签订了《C919 飞机项目机轮刹车系统主合同》，约定由博云新材提供机轮刹车系统，协议期限覆盖 C919 全系列型号的生产及商用机服役期。2017 年 C919 成功首飞，搭载的就是博云新材的机轮刹车系统。

图 38 博云新材典型航空产品



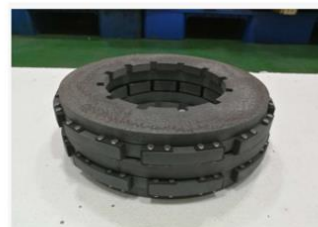
空客A320飞机刹车副



波音757飞机刹车副



ERJ190 1010319



MA60刹车副

资料来源：博云新材官网，华西证券研究所

4.4.5. 市场空间方面

C919 复材国产化进程或即将开启，预计带来年均 300 吨复合材料需求。C919 原型试飞验证机用的碳纤维复合材料都是进口的。目前，国内航空碳纤维树脂基复合材料技术体系基本建立，与国外复合材料性能的差距日渐缩小，高性能碳纤维在军用飞机上已有应用。预计在 C919 大飞机取得适航认证后，或将开启复合材料国产化替代进程。C919 碳纤维复合材料使用量为 12% 左右，每架空机重量 42 吨，则单架 C919 碳纤维复材用量约在 5 吨。假设未来 20 年可制造 1200 架 C919，在不考虑损耗率的情况下预计带来年均 300 吨复合材料需求量。根据中复神鹰招股说明书，C919 对国产 T800 级碳纤维的需求将达到年均 100 吨。

未来 CRJ929 对国产碳纤维需求量将跨越式增长。根据《复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势》，CRJ929 远程双通道宽体客机计划在机翼及机身结构上大面积使用复合材料，预计使用比例超过 50%。2018 年底，CRJ929 宽体客机复合材料前机身攻关全尺寸筒段顺利总装下线，该全尺寸筒段长约 15m，直径约 6m，环向壁板分为 4 块，由纵缝拼接而成，最大框弧长约 6m。该筒段的研制突破了壁板 AFP 工艺、全尺寸级长桁制造和装配等技术难题，是国内首次采用全复合材料设计理念开展的宽体客机机身大部段研制工作。预计未来 C919 批量交付和 CRJ929 研制加快将为碳纤维在民用航空领域的应用提供更大的发展机遇。

图 39 CRJ929 飞机前机身攻关复合材料全尺寸筒段



资料来源：《复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势》，华西证券研究所

5. 投资建议

C919 大飞机的研制极大地推动了我国先进材料技术整体研发能力的提升和产业化发展，预计随着 C919 的批量交付以及未来 CRJ929 的加速研制，国内先进材料供应商将迎来重大发展机遇，相关受益公司为：

- 1、宝钛股份：**钛材行业龙头，大飞机钛合金板材主要供应商，为首架 C919 飞机提供了多种规格的钛合金棒材、厚板和薄板材料。
- 2、西部超导：**国内高端钛合金棒丝材、锻坯主要生产基地之一，已通过商飞 Ti6Al4V 钛合金材料资质认证。
- 3、光威复材：**碳纤维龙头企业之一，T300 级碳纤维已在军用飞机上大量使用，参与 C919 复合材料国产化替代验证。

4、**恒神股份**：业务布局从原丝、碳纤维、预浸料、碳纤维复合材料零件到航空复材结构件各环节，已参与到 C919 复合材料尾翼优化项目专业化零部件的研制生产。

5、**中航高科**：国内航空预浸料龙头，两种 C919 国产预浸料通过中国商飞 PCD 预批准，也是 CRJ29 飞机前机身工作包唯一供应商。

6、**博云新材**：与霍尼韦尔合资，为 C919 供应碳/碳复合材料机轮刹车系统。

6. 风险提示

C919 适航取证速度、交付进度不及预期的风险；受新冠疫情影响，民航市场需求不及预期的风险；产能建设不及预期的风险。

参考文献

- [1] 包建文, 蒋诗才, 张代军. 航空碳纤维树脂基复合材料的发展现状和趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(19):12.
- [2] 曹春晓. 一代材料技术 一代大型飞机[J]. 航空学报, 2008, 29(3):6.
- [3] 陈雷, 赵曼, 王祝堂. 铝基复合材料在中国民用航空器上应用及生产概况[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(2):7.
- [4] 樊星. 碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势[J]. 化学工业, 2019, 37(4):6.
- [5] 冯朝辉, 于娟, 郝敏, 等. 铝锂合金研究进展及发展趋势[J]. 航空材料学报, 2020, 40(1):11.
- [6] 贺福, 孙微. 碳纤维复合材料在大飞机上的应用[J]. 高科技纤维与应用, 2007, 32(6):5.
- [7] 金和喜, 魏克湘, 李建明, 等. 航空用钛合金研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2):13.
- [8] 林刚. 碳纤维产业"聚"变发展--2020 全球碳纤维复合材料市场报告[J]. 纺织科学研究, 2021(5):23.
- [9] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天的应用和发展[J]. 航空材料学报, 2020, 40(3):18.
- [10] 刘振敏. C919 的探索与创新之路[J]. 大飞机, 2019(12):5.
- [11] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用 优先出版[J]. 复合材料学报, 2015.
- [12] 马振波, 王祝堂. 铝材力推三大"国之重器"遨游蓝天[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(12):5-9.
- [13] 马志阳, 高丽敏, 徐吉峰. 复合材料在大飞机主承力结构上的应用与发展趋势[J]. 航空制造技术, 2021, 64(11):7.
- [14] 孙洁琼, 张宝柱. 先进铝锂合金的特点及其在民用飞机上的应用[J]. 航空工程进展, 2013.
- [15] 谭昕. C919 研制进行时[J]. 大飞机, 2019(11):6.
- [16] 唐见茂. 航空航天材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013(2):7.
- [17] 王国军, 王祝堂. 铝合金在中国民用航空器上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(11):11.
- [18] 王军照. 碳纤维复合材料在航空领域中的应用现状及改进[J]. 今日制造与升级, 2020(8):2.
- [19] 王伟, 张蕾. 我国航空航天业对铝锂合金的需求[J]. 有色金属加工, 2019, 048(002):4-6, 3.
- [20] 王运锋, 何蕾, 郭薇. C919 大型客机总装下线助推我国材料产业发展[J]. 新材料产业, 2016(1):7.
- [21] 王祝堂. C919 大飞机钛用量占 9%[J]. 轻金属, 2019, No. 485(03):36-36.
- [22] 王祝堂. 铝材在国产大飞机上的应用[J]. 轻合金加工技术, 2016, 44(11):8.
- [23] 王祝堂. 铝基复合材料在某些中国飞机中的应用[C]// 2019 年中国铝加工产业年度大会暨中国(邹平)铝加工产业发展高峰论坛.
- [24] 吴光辉. 大飞机引领先进材料发展[J]. 现代交通与冶金材料.
- [25] 吴良义. 先进复合材料的应用扩展:航空、航天和民用航空先进复合材料应用技术和市场预测[J]. 化工新型材料, 2012, 40(1):7.
- [26] 徐进军, 江茫, 熊纯. 铝锂合金及其在航空航天领域成形技术的研究进展[J]. 热加工工艺, 2019(24):6.
- [27] 颜鸣皋. 航空材料技术的发展现状与展望[J]. 航空制造技术, 2003(12):7.
- [28] 喻媛. C919 上用了哪些新材料[J]. 大飞机, 2018(1):4.
- [29] 张璇, 沈真. 航空航天领域先进复合材料制造技术进展[J]. 纺织导报, 2018(S1):8

分析师与研究助理简介

陆洲：华西证券研究所军工行业首席分析师，北京大学硕士，11年军工行业研究经验。曾任光大证券、平安证券、国金证券研究所军工行业首席分析师，华商基金研究部工业品研究组组长，东兴证券研究所所长助理兼军工首席分析师。曾获2019年中国证券业分析师金牛奖军工行业第一名。

分析师承诺

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，通过合理判断并得出结论，力求客观、公正，结论不受任何第三方的授意、影响，特此声明。

评级说明

公司评级标准	投资 评级	说明
以报告发布日后的6个月内公司股价相对上证指数的涨跌幅为基准。	买入	分析师预测在此期间股价相对强于上证指数达到或超过15%
	增持	分析师预测在此期间股价相对强于上证指数在5%—15%之间
	中性	分析师预测在此期间股价相对上证指数在-5%—5%之间
	减持	分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数5%—15%之间
	卖出	分析师预测在此期间股价相对弱于上证指数达到或超过15%
行业评级标准		
以报告发布日后的6个月内行业指数的涨跌幅为基准。	推荐	分析师预测在此期间行业指数相对强于上证指数达到或超过10%
	中性	分析师预测在此期间行业指数相对上证指数在-10%—10%之间
	回避	分析师预测在此期间行业指数相对弱于上证指数达到或超过10%

华西证券研究所：

地址：北京市西城区太平桥大街丰汇园11号丰汇时代大厦南座5层

网址：<http://www.hx168.com.cn/hxzq/hxindex.html>

华西证券免责声明

华西证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具备证券投资咨询业务资格。本报告仅供本公司签约客户使用。本公司不会因接收人收到或者经由其他渠道转发收到本报告而直接视其为本公司客户。

本报告基于本公司研究所及其研究人员认为的已经公开的资料或者研究人员的实地调研资料，但本公司对该等信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本报告所载资料、意见以及推测仅于本报告发布当日的判断，且这种判断受到研究方法、研究依据等多方面的制约。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及预测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息始终保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者需自行关注相应更新或修改。

在任何情况下，本报告仅提供给签约客户参考使用，任何信息或所表述的意见绝不构成对任何人的投资建议。市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告视为做出投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在任何情况下，本报告均未考虑到个别客户的特殊投资目标、财务状况或需求，不能作为客户进行客户买卖、认购证券或者其他金融工具的保证或邀请。在任何情况下，本公司、本公司员工或者其他关联方均不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告而导致的任何可能损失负有任何责任。投资者因使用本公司研究报告做出的任何投资决策均是独立行为，与本公司、本公司员工及其他关联方无关。

本公司建立起信息隔离墙制度、跨墙制度来规范管理部门、跨关联机构之间的信息流动。务请投资者注意，在法律许可的前提下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的前提下，本公司的董事、高级职员或员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

所有报告版权均归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何机构或个人不得以任何形式复制、转发或公开传播本报告的全部或部分内容，如需引用、刊发或转载本报告，需注明出处为华西证券研究所，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。