

## 锻飞机之心，铸制造强国

### ——航空发动机系列专题报告之一

#### 核心观点：

- **为何必须重视航空发动机产业布局？** 1) **高战略价值**：核心技术和市场牢牢掌握在美英等国家的寡头企业手中，并对我国军用航空发动机实施禁运，我国实现技术突破和自我迭代迫在眉睫；2) **高经济性**：航空发动机价值量约占飞机总价值的 20-30%，其单位重量创造的相对价值是船舶的 1400 倍。一款成熟发动机型号产品通常能够延续 30 至 50 年，经济性非常高；3) **高难度&重积累**：航空发动机研制周期长达数十年，比如 F35 战机用 F135 发动机研制周期达 22 年，需要投入大量资金，持续不断的实施先进技术预先研究和验证计划。美国航空发动机研究和发展经费占 GDP 的比重分别达 0.08%、0.06%。
- **如何看我国航发市场空间？** 1) **军用有人机**：未来 10 年，我国军机发动机需求总量约为 2.78 万台，万亿市场可期，其中新增军机需求总量约 11781 台，国产替代发动机需求约 3390 台，维修与换发带动的发动机需求约 12606 台。2) **军用无人机**：到 2025 年，我国军用中大型无人机发动机市场规模约 30 至 45 亿元。3) **商用**：预计未来 20 年我国共需要 9284 架飞机，中国商飞将新增 5162 台商用发动机需求，市场空间近 3000 亿，国内发动机产业有望显著受益。
- **发动机价值链如何评估？** 航空发动机价值链由研发设计（价值占比 10%）、整机制造（占比 40%）和维修运营（占比 50%）三部分组成，其中制造阶段的原材料费用（占比 20%）、运营维护阶段中零备件航材费用（占比 25.5%）在航空发动机全生命周期成本中占比较高。钛合金、高温合金制品供应商以及控制系统供应商有望持续受益。
- **投资建议：航空发动机赛道“长坡厚雪”，正步入产业发展“红利初期”。** 我国航空发动机产业起步较晚，发展基础较为薄弱。随着 2015 年“两机”重大专项的启动，我国航空发动机产业正式步入发展红利期。2021 年以来，随着备战需求大幅提升，国内军用航空发动机规模放量，发动机制造端进入蓬勃发展期。未来，随着量产型号批量进入进厂翻修期，发动机维修运营业务将迎来井喷，发动机产业链有望持续受益。
  - **上游材料端**，高温合金用量占发动机总重量的 40%~60%以上，叠加国产化率提升预期，建议关注抚顺特钢（600399.SH）、西部超导（688122.SH）等。高端钛合金用量占发动机总重量的 25-40%，建议关注宝钛股份（600456）、西部超导（688122）、西部材料（002149）等。发动机隐身材料领域建议关注华秦科技（688281.SH）等。
  - **中游制造端**，建议关注中游锻件供应商中航重机（600765.SH）、航宇科技（688239.SH）、派克新材（605123.SH）以及中游铸件供应商航材股份（688563.SH）、钢研高纳（300034.SZ）、图南股份（300855.SZ）等；重点关注航空发动机控制系统供应商航发控制（000738.SZ）。
  - **下游整机制造与运维端**，总装环节进入壁垒极高，国内外皆成寡头垄断态势，后市场规模更加可观，建议重点关注航发动力（600893.SH）。
- **风险提示**：装备需求不达预期的风险；企业扩产不及预期的风险；产品价格大幅波动的风险。

#### 国防军工

推荐 (维持)

#### 分析师

李良

☎：010-80927657

✉：liliang\_yj@chinastock.com.cn

分析师登记编号：S0130515090001

胡浩淼

☎：010-80927657

✉：huhaomiao\_yj@chinastock.com.cn

分析师登记编号：S0130521100001

#### 相对沪深 300 表现图

2023-12-29



资料来源：中国银河证券研究院

#### 相关研究

【银河军工李良】行业深度报告\_2024 年度策略\_见证转折处，风云再起时\_202312

## 目录

<b>一、航空发动机：国之重器，皇冠明珠</b> .....	4
（一）航空发动机在整机价值量中占比 20%至 30%，是衡量飞机性能的关键指标之一.....	4
1、压气机：多级静子+转子构成，叶片可达 2000 片.....	5
2、燃烧室：发动机心脏，结构分为扩压器、外壳、内壁和旋流器.....	6
3、涡轮：航空发动机动力部件，涡轮叶片占整机叶片总体价值的 60%左右.....	7
4、其他结构.....	7
（二）航空发动机分类：涡扇发动机已成为军民用发动机主流.....	8
（三）评价指标：军民发动机性能评价指标有一定差别.....	10
1、军用发动机评价指标和趋势：追求推重比、单位推力、涡轮前燃气温度和加力状态耗油率.....	10
2、民用发动机评价指标和趋势：安全性、成本可承受性是最优先的考虑因素.....	12
<b>二、为何需重视航空发动机产业布局？</b> .....	14
（一）航空发动机：集高经济性、高战略价值、高难度、高紧迫性于一身.....	14
（二）世界竞争格局：寡头占据全球军民用航发主要市场.....	17
1、GE 航空：持续紧跟技术发展，拆分业务专注航空再出发.....	18
2、英国罗罗 Rolls-Royce：重组效果显现，复苏步伐加快.....	21
3、启示：持续技术突破，专注专业化分工.....	22
（三）中国航空发动机产业：与世界强国尚有差距，发展方兴未艾.....	23
1、历史沿革：国家积极布局+政策逐步加码+自研能力显著提升.....	23
2、中国航空发动机产业现状：军品产业布局基本形成，民品布局较为薄弱.....	25
<b>三、需求端：广阔天地，大有作为</b> .....	27
（一）军用航空发动机：需求增长、维修换装、国产替代三轮驱动.....	27
1、增量逻辑：战机数目持续增长叠加国产化渗透率提升.....	27
2、存量替代逻辑：未来 10 年存量换发带动的发动机总量约 12606 台.....	29
（二）无人机发动机：2025 年我国军用无人机发动机市场规模约 30 至 45 亿元.....	29
1、活塞发动机应用最广泛，未来主流仍是涡扇发动机.....	29
2、更强调技术成熟性、适用性以及较高的可靠性，核心是低成本.....	30
3、军用无人机发展空间广阔，2025 年我国军用无人机发动机市场规模约 30 至 45 亿元.....	30

(三) 商用航空发动机：国产化率较低，蓝海市场待掘金 .....	31
1、商用航空发动机价值构成 .....	31
2、商业航发蓝海市场待掘金：预计未来 20 年商飞将新增 5162 台商用发动机需求 .....	32
3、我国航发市占率率较低，中国商飞有望引领我国商用航发破局 .....	33
<b>四、航空发动机价值链与产业链分析 .....</b>	<b>35</b>
(一) 价值链分析 .....	36
1、研发设计：占全生命周期 10%，其中型号研制费用占比 50% .....	36
2、制造成本：占全生命周期成本的 40%，其中原材料价值占比 40-60% .....	38
3、维护成本：占全生命周期 50%，其中零备件航材价值占比 51% .....	39
(二) 产业链分析 .....	40
1、上游材料：冷端以钛为主、热端以镍基合金、钛合金和钢为主 .....	40
2、中游零部件制造：锻件重量占发动机结构总重量的 55%~65%，精密铸造技术要求高 .....	48
3、中游分系统：动力控制系统约占发动机整体价值的 10%-20% .....	52
4、下游整机制造&维修运营：整机壁垒最高，维修运营价值占全生命周期 50% .....	54
<b>五、投资建议：航空发动机赛道“长坡厚雪”，正步入产业发展“红利初期” .....</b>	<b>56</b>
<b>六、风险提示 .....</b>	<b>57</b>

## 一、航空发动机：国之重器，皇冠明珠

### （一）航空发动机在整机价值量中占比 20%至 30%，是衡量飞机性能的关键指标之一

航空发动机(aero-engine)，是一种高度复杂和精密的热力机械，作为飞机的心脏，被誉为“工业之花”。它直接影响飞机的性能、可靠性及经济性，是一个国家科技、工业和国防实力的重要体现。目前，世界上能够独立研制高性能航空发动机的国家只有美国、俄罗斯、英国、法国、中国等少数国家，技术门槛非常高。

因航空发动机的高技术门槛特征，其本身的价值量也较高。在飞机各分系统成本占比中，航空发动机约占整机成本的 20%至 30%，仅次于飞机机体结构，是飞机的重要组成部分。

图1：军用飞机各分系统成本占比

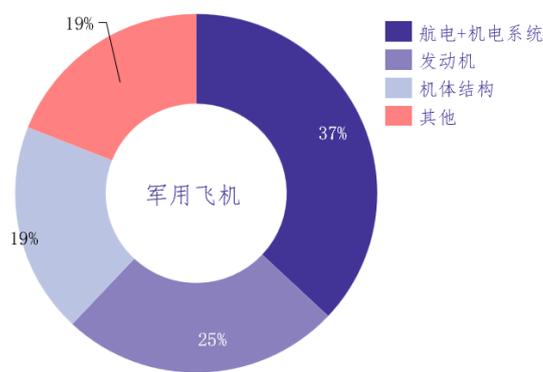
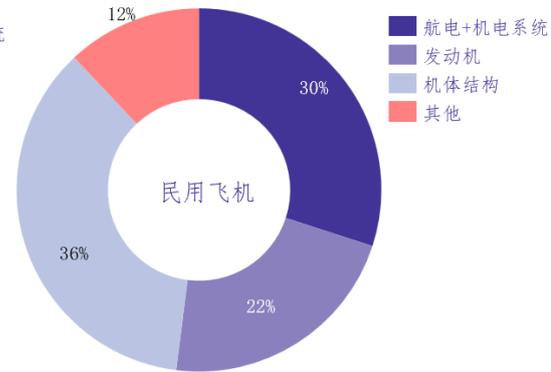


图2：民用客机各分系统成本占比



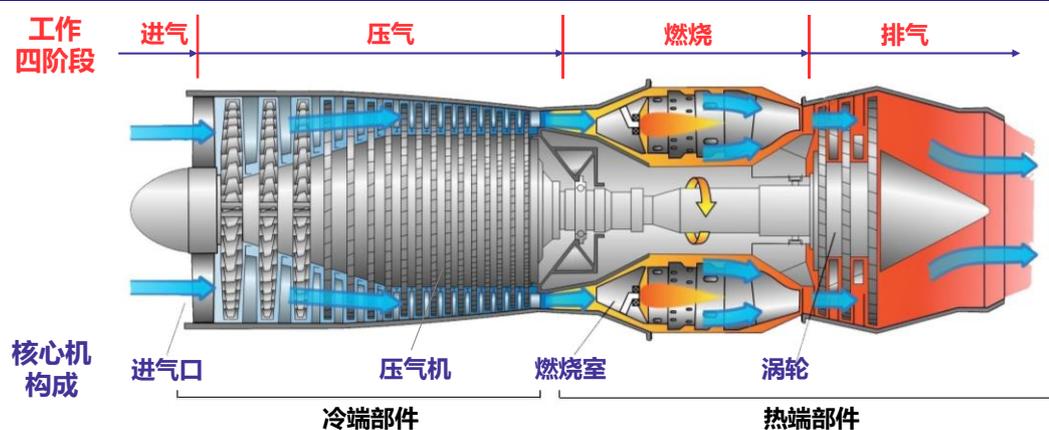
资料来源：前瞻经济学人，中国银河证券研究院

资料来源：前瞻经济学人，中国银河证券研究院

航空发动机产生推力基本分为四个阶段。喷气式发动机和活塞式发动机都需要经过进气、加压、燃烧和排气四个工作过程。空气首先进入的是发动机的进气道，经过压气机加压后进入燃烧室与燃料混合燃烧，燃烧室产生高温高压的能量气体传送给涡轮，涡轮做功经涡轮轴为发动机运行提供动力，从而推动飞机运行。

航空发动机结构比较复杂，主要由进气装置、压气机、燃烧室、涡轮、排气装置五大部分组成，其中压气机、燃烧室、涡轮是其三大核心部件，三者也被成为核心机的组成部分。核心机囊括了推进系统中温度最高、压力最大、转速最高的组件，发动机研制过程中 80%以上的技术问题都与核心机密切相关，是航空发动机研制难点较为集中的环节。

图3：航空发动机工作过程和核心机构成情况简图

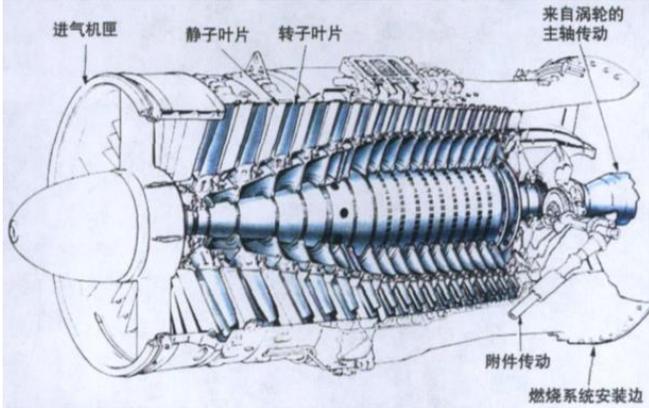


资料来源：《航空发动机核心部件技术研究概况与展望》，中国银河证券研究院

## 1、压气机：多级静子+转子构成，叶片可达 2000 片

压气机作为航空发动机的核心部件之一，具有压力大、转速高的特点。压气机在发动机中的主要作用是利用涡扇输入的机械功对气体进行压缩，将机械能转化为气体内能，让气流的压力和温度升高，从而满足航空发动机的热力循环要求。评价压气机性能的主要指标包括空气流量、增压比、效率、喘振裕度、外廓尺寸。

图4：航空发动机压气机结构图

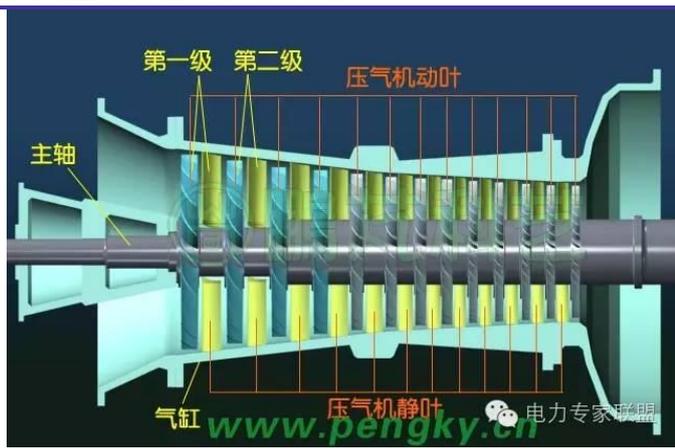


资料来源：《第四代大推力军用涡轮风扇发动机发展》，中国银河证券研究院

压气机由多级组成，每级分为静子和转子。静子在前，转子在后，交错排列。按照空气流的方向，压气机可以分为轴流式、离心式和混合式三类。轴流式压气机级数（即一圈转子叶片+一圈静子叶片）一般较多，占用轴向空间较长，单级增压比低，但总增压比较高，是现代民用客机和军用战斗机广泛采用的压气机结构。

- 静子（工作轮）：叶片、盘、轴
- 转子（导向器）：叶片、机匣

图5：航空发动机压气机叶片示意图



资料来源：电力专家联盟，中国银河证券研究院

- **压气机叶片**：空气从进气道进入发动机后流入压气机部分进行减速增压。压气机中的叶片根据不同功能可分为旋转叶片（动叶）和固定叶片（静叶）。旋转叶片旋转并将空气向后推，固定叶片减少空气旋转的动量，为空气施加压力，该过程重复多次实现空气的减速增压。压气机叶片级数较多，每台发动机压气机叶片数量一般在 2000 片左右。不同发动机型号设计的叶片级数均存在差异。

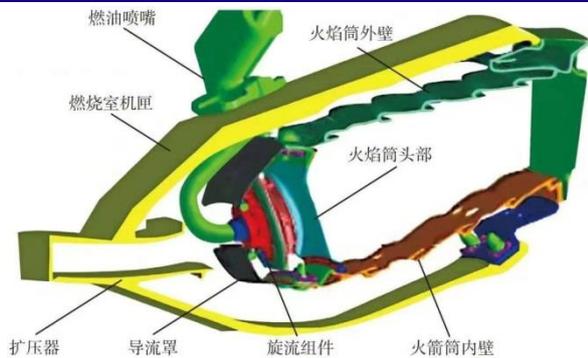
- **压气机轮盘：**压气机盘是航空发动机的转子部件，用于安装叶片以传递功率，承受高温、高压、高转速环境下的复杂载荷。根据用途，压气机盘可以分为风扇盘、低压压气机盘和高压压气机盘三种。随着技术的不断发展，发动机转子叶片和轮盘一体的“整体叶盘”被高推重比发动机广为使用。整体叶盘是将盘片一体化设计的复杂转动件，可使发动机重量减轻 20-30%、效率提高 5-10%、零件数量减少 50%以上。
- **压气机机匣：**目前，航空发动机广泛采用双转子轴流压气机，包含低压和高压两部分转子。由于低压和高压两部分压气机工作温度存在差异（低压 200-300℃，高压 300-500℃），不同压气机机匣使用的材料也有所不同。低压机匣一般采用钛合金制造，高压机匣一般采用合金钢制造。在机匣结构上，压气机机匣可分为分半式机匣和整环式机匣。分半式机匣结构简单易于安装，但机匣沿周向分布不均匀，容易影响压气机效率。整环式机匣刚性分布均匀，但不容易装配，维修性差。

## 2、燃烧室：发动机心脏，结构分为扩压器、外壳、内壁和旋流器

燃烧室是发动机的核心，主要功能是燃烧化石燃料形成高温高压的气体（化学能转化为热能），从燃烧室排出进入涡轮并带动涡轮转动（热能转化为机械能），进而带动发动机转动。燃烧室结构部件可分为扩压器（进气装置）、外壳、内壁和旋流器。

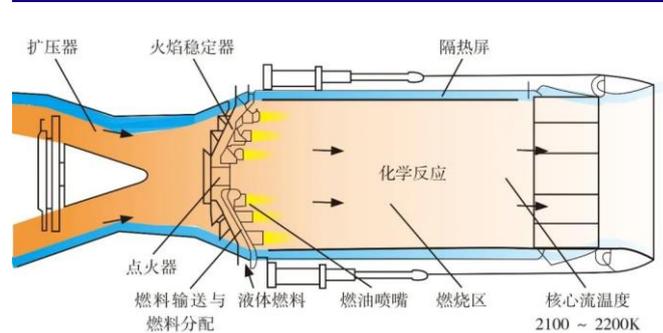
燃烧室研制过程具有难度大、周期长、花费高等特点，其燃烧释放的燃气温度大约是 1800-2000℃，不适宜直接进入涡轮导向器。因此，总空气流量中约 60%未用于燃烧的空气将被逐渐引入燃烧室，其中大约 1/3 的空气用于降低燃气温度，2/3 的空气用来冷却火焰筒的壁面。

图6：典型主燃烧室示意图



资料来源：《航空动力》，中国银河证券研究院

图7：加力燃烧室示意图



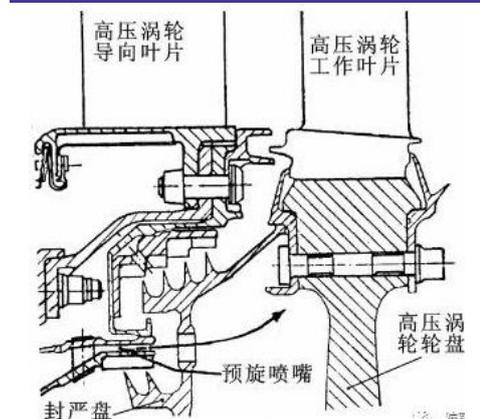
资料来源：《航空动力》，中国银河证券研究院

- **燃烧室扩压器：**空气经过压气机压缩后，首先经过扩压器，利用扩压器的喇叭形，在空气流动方向上增大横截面积，从而降低空气流速（通常从超音速降低为亚音速），将高速空气减慢到适合燃烧室的最好速度。
- **燃烧室外壳：**空气流经扩压器后会分成两部分，一部分空气流入燃烧室主体与燃料充分混合后参与燃烧，另一部分空气进入外壳与燃烧室内壁的空腔以用于冷却。
- **燃烧室内壁：**燃烧室内壁用于分离燃烧区域和空腔内空气，其上分布有大小不同的孔洞，使内壁和外壳之间的部分空气可以流入燃烧区域。由于燃烧室内壁需要接触高温燃烧气体，通常采用高温合金材料与冷却技术相结合的方式保证内壁正常循环使用。
- **燃烧室旋流器：**用于使空气产生旋流，一方面产生湍流，促进燃料和空气的混合，有助于燃料充分燃烧；另一方面在燃烧室中形成低压低速区域，以维持燃烧室的稳定燃烧。

### 3、涡轮：航空发动机动力部件，涡轮叶片占整机叶片总体价值的 60%左右

燃气涡轮是航空发动机的动力部件，在高温燃气的冲击下产生旋转，推动涡轮叶片带动涡轮盘旋转，从而经轴带动压气机工作，实现热力循环。涡轮部件作为发动机中承受的热负荷、气动负荷和机械负荷最大的组件，工作条件极其恶劣，面临高温、高压和高速等苛刻要求。

图8：CFM56 的高压涡轮



资料来源：航空之家，中国银河证券研究院

涡轮由不动的静子（导向器）与转动的转子所组成。静子包括涡轮导向叶片、外环和内环等部件，转子包括工作叶片、轮盘和轴等部件。一个导向器和一个涡轮转子组合成一个涡轮级，涡轮由一个或几个涡轮级组成，称为单级涡轮或多级涡轮。

- **涡轮叶片**：涡轮叶片是目前“两机”所有零部件中制造工序最多、周期最长、合格率最低的零部件之一。在航空发动机的叶片（风扇叶片、涡轮叶片和压气机叶片）中，**涡轮叶片占叶片总体价值的 60%左右**。
- **涡轮叶片可以分为涡轮导向叶片和涡轮工作叶片两类**。涡轮导向叶片主要用于调整燃烧室排出的燃气流向，材料工作温度最高可以达到 1,100℃ 以上。涡轮工作叶片虽然所承受的温度低于相应涡轮导向叶片 50-100℃，但在高速转动时，由于受到气动力和离心力的作用，叶身部分所受应力达 140MPa，叶根部分达 280-560MPa。
- **涡轮叶片一般采用高温合金或钛铝合金**，通过精密铸造加工而成。随着发动机性能的提升，高压涡轮叶片已逐步发展到定向结晶和单晶材料叶片。
- **涡轮盘**：涡轮盘是航空发动机上用于安装和固定涡轮叶片以传递功率的零部件，由轮缘、辅板、均压孔、中心孔组成，在高温、高转速等复杂环境下运作。为满足强度、寿命及可靠性的需要，涡轮盘材料既要追求高拉伸屈服强度，又要具备良好的蠕变抗力，同时还要充分考虑断裂韧度和疲劳裂纹的扩展速率，因此**涡轮盘一般采用高温合金材料锻造成型**。

### 4、其他结构

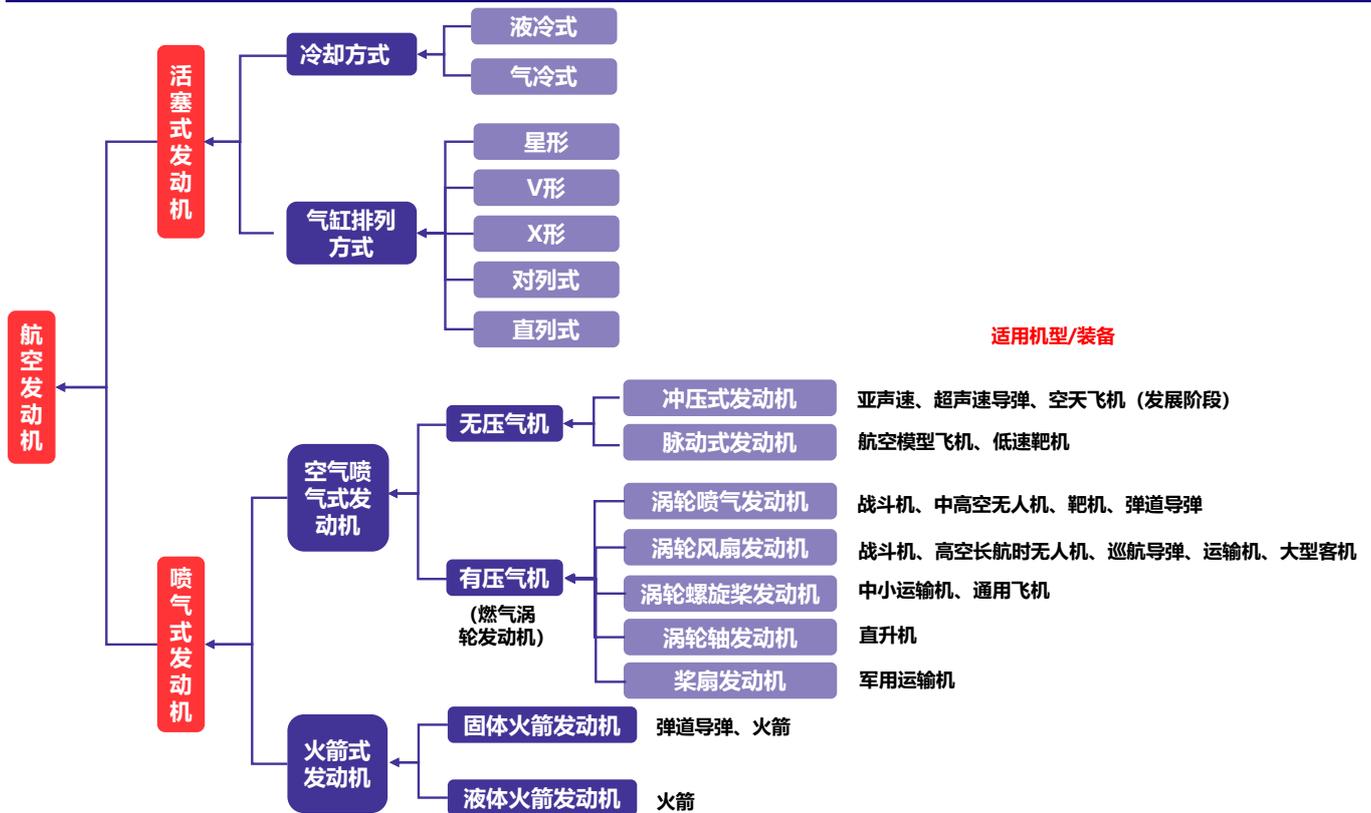
- **进气道**：航空发动机进气道的主要作用是将自由流空气吸入发动机中，并且对其进行“减速增压”操作。
- **喷口**：喷口主要作用是使发动机产生的燃气继续膨胀，将燃气的可用功转变为动能，并高速排出产生反作用力。此外，喷口喉道面积的调节可以改变燃气在涡轮和喷管中的膨胀比分配，即改变压气机和涡轮的共同工作点，实现对发动机工作状态的控制。

## （二）航空发动机分类：涡扇发动机已成为军民用发动机主流

按照产生推力的作用机理，航空发动机可分为活塞式发动机和喷气式发动机两类。活塞式发动机通过活塞承载燃气压力，在气缸中进行反复运动，并根据连杆将运动转变为曲轴的旋转活动，从而产生动力，与汽车用的活塞式发动机原理基本相同。由于飞行速度和工作原理限制等原因，活塞式发动机正逐步被喷气式发动机取代。

喷气式发动机依靠燃料燃烧时产生的气体向后高速喷射，通过反作用力推进飞机向前飞行，可分为火箭式发动机和空气喷气式发动机。空气喷气式发动机按照是否有压气机可分为冲压式发动机、脉冲式发动机和燃气涡轮发动机。

图9：航空发动机分类

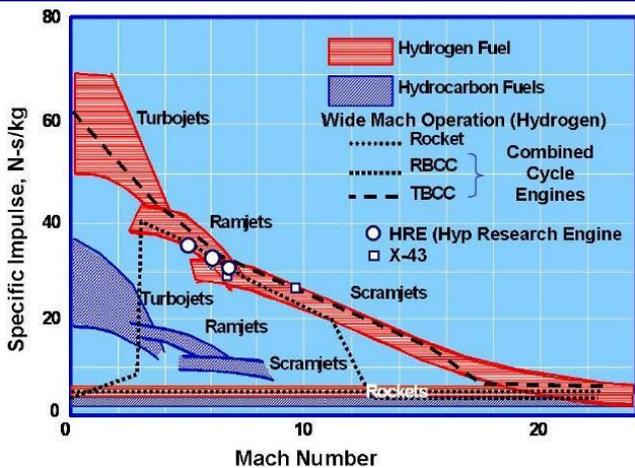


资料来源：《对我国军用航空发动机发展的思考》、《航空发动机——飞机的心脏》，中国银河证券研究院

各类发动机由于工作方式不同，都有自己最适合的飞行范围。图 10 表示各类发动机的比冲随飞行速度的变化，其中比冲表示推力与单位时间消耗的推进剂之比，反映推进剂利用的有效性。图中分别给出各类发动机采用碳氢燃料和氢燃料的比冲变化，由于氢的热值远高于碳氢燃料，所以其比冲也更高。

- 火箭发动机比燃气涡轮发动机在低速段的比冲低几个数量级，因此必需携带大量推进剂，使起飞重量增加。
- 燃气涡轮发动机具有优异的低速性能，但不适于高速（ $Ma > 3 \sim 4$ ）工作。其最大飞行速度约为  $2.5Ma$ ，飞行高度  $0 \sim 25$  km。

图10：各类发动机的比冲随飞行速度（Ma）的变化

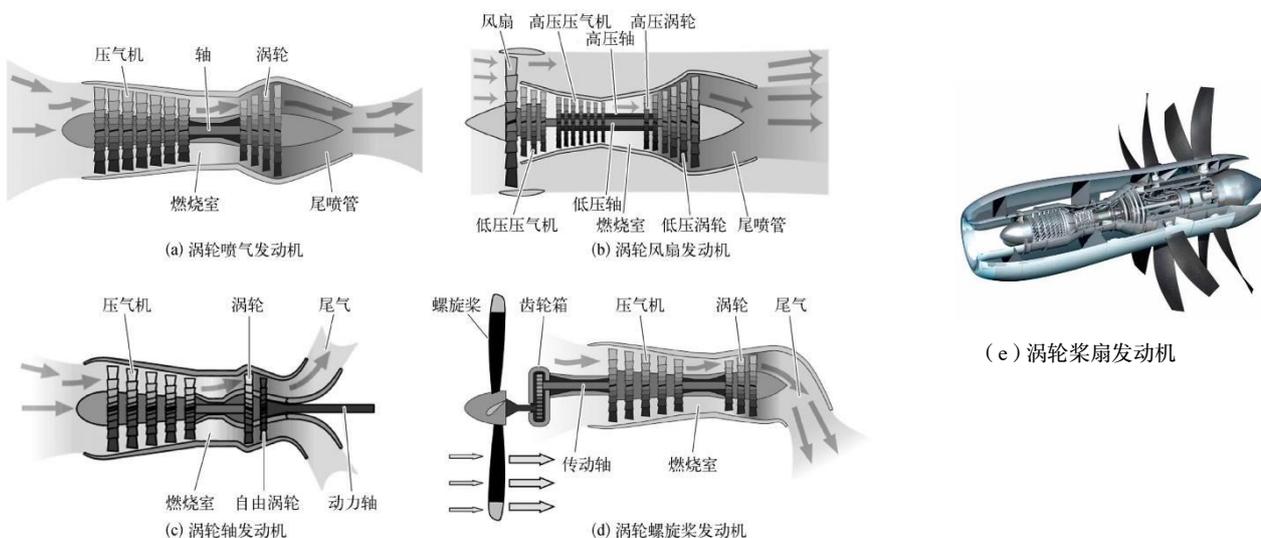


资料来源：《航空发动机科学技术的发展与创新》，中国银河证券研究院

燃气涡轮发动机可再细分为涡轮喷气（涡喷）发动机、涡轮风扇（涡扇）发动机、涡轮螺旋桨（涡桨）发动机和涡轮轴（涡轴）发动机。

- **涡喷发动机**将燃烧后的高速气体直接喷出，由于喷出气体的速度很快，能量未能完全利用，热效率较低。
- **涡扇发动机**改善了气体的排出方式，通过内涵道推动风扇转动，再由风扇转动的气体流经外涵道来推动飞机。
- **涡轴发动机**主要用于直升机，其工作原理与涡桨发动机类似，燃气流经驱动压气机的涡轮后再流经一个驱动减速器的自由涡轮，减速器的输出轴与传动直升机旋翼的主减速器相连，从而驱动旋翼旋转。
- **涡桨发动机**将“风扇”置于发动机整体的外部，桨扇和涡轮之间有减速器，相当于一个涵道比非常大的涡扇发动机，常用于中小型运输机和通用飞机。
- **桨扇发动机**类似于涡扇发动机，但没有风扇涵道，被称做无限高涵道比的涡扇发动机。风扇置于发动机短舱之外，桨扇和涡轮之间则无减速器，桨扇的螺旋桨转速非常高。

图11：四种常见喷气式发动机示意图



资料来源：《航空宇航推进理论》，中国银河证券研究院

对比来看，涡喷发动机具备大推力、重量轻等特点，但是耗油率较高；涡轴发动机因直升机旋翼的转速较低，通常需要比涡轮螺旋桨发动机更重、更大的减速系统，甚至占发动机总重量一半以上，且主要应用于旋翼类飞机，场景有限；涡桨发动机虽然耗油率低，但由于受到螺旋桨限制，功率不大；桨扇发动机虽然飞行经济性较好，耗油率低，但震动和噪音较大，安全性较差。而**涡扇发动机**具备喷气速度大、噪声低、耗油率低且大推力的优势，广泛应用于战斗机、运输机、客机、无人机，占比在95%以上，是目前最为广泛的航空发动机。

**表1：航空发动机性能对比**

性能指标	推力/功率	涵道比	是否加力	推重比/功重比	最大速度(马赫)	巡航速度(马赫)	耗油比	应用领域	优点	不足
活塞发动机	<2000kw	/	/	<1.43	0.6	0.16~0.25	0.19~0.2	军民	低油耗	低速
涡喷发动机	48~854kg	/	否	2.7~10.0	0.9	0.9	1.05~1.36	军	高速飞行、大推力、重量轻	耗油率高
	12250~17000kg	/	是	4.6~7.3	2.0~2.8	0.9	0.8~1.0	军		
涡扇发动机	400~6000kg	0.7~6.2	否	3~5.6	0.9	0.9	0.3~0.7	军民	噪声低、低油耗、大推力	迎风面大、喷气速度小，不宜超声速
	7500~19000kg	0.3~1.0	是	10.5~12	1.6~2.35	0.9~1.58	0.5~0.8	军		
	4234~43000kg	6.2~12.5	否	3.5~6.3	0.9	0.8	0.5~0.6	军民		
涡桨发动机	<4474kw	15~20	/	5~6	0.7	0.7	0.21~0.27	军民	耗油率低	功率不大
涡轴发动机	<7457kw	/	/	5~10	0.2~0.37	0.2~0.37	0.3~0.36	军民	应用于直升机，耗油率低，多用于非航动力	少用于民航
桨扇发动机	<10440kw	/	/	463	0.8~0.85	0.61~0.65	0.23	军	飞行经济性好，耗油低	震动和噪音较大，安全性较差

资料来源：西安交通大学《航空发动机试验和测试技术》和中国民航大学《飞机发动机分类和工作原理》教学讲义，中国银河证券研究院

### （三）评价指标：军民发动机性能评价指标有一定差别

在航空发动机性能评价方面，主要使用的指标包括：涵道比、推重比、总压比。

**表2：航空发动机主要性能评价指标**

性能指标	内容
涵道比	<ul style="list-style-type: none"> <li>涵道比指涡扇发动机<b>外涵道与内涵道空气流量的比值</b>。外涵道的空气只通过风扇，流速较慢，且温度较低；内涵道排出的是高温燃气。两种气体混合后降低了喷嘴的平均流速与温度，<b>较低的流速带来较高的推进效率，较低的温度带来较高的热力学效率。</b></li> <li>多数民用飞机发动机的涵道比较高（通常在5以上），涵道比高的涡扇发动机耗油较少，但由于截面积大从而阻力较大。战斗机使用低涵道比（通常低于1）发动机，在超音速状态下可降低阻力、提升效率。</li> </ul>
推重比	<ul style="list-style-type: none"> <li>发动机推重比指飞机发动机在海平面静止条件下于<b>最大状态</b>所产生的<b>推力与发动机结构重力之比</b>。</li> <li>通常战斗机的推重比较高，其他大型飞机的推重比较低。</li> </ul>
总压比	<ul style="list-style-type: none"> <li>总压比是衡量进入发动机的空气在压气机中压强的提高程度，计算方式为：<b>出口气流的压强与进口气流的压强之比</b>。</li> <li>一般而言，总压比越高，发动机的性能越好。</li> </ul>

资料来源：中国银河证券研究院

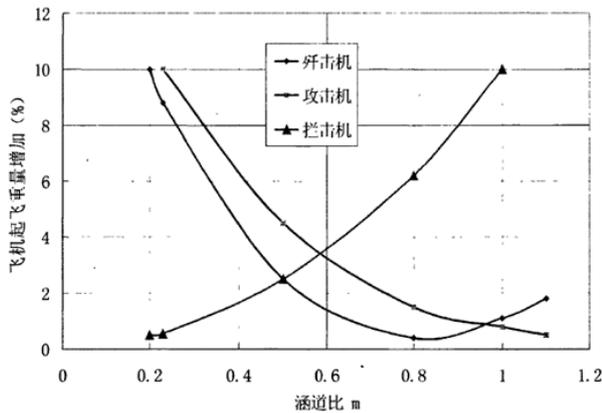
## 1、军用发动机评价指标和趋势：追求推重比、单位推力、涡轮前燃气温度和加力状态耗油率

军用发动机的发展趋势是由飞机对动力装置的要求和技术进步程度决定的。40~50年代，涡喷发动机得到了快速发展，但耗油率较高。为改善其经济性，60年代，战斗机追求高空高速，航空发动机进入涡扇发动机时代。七十年代中期开始强调中空格斗机动性和对地攻击能力，八十年代中期开始研制的第四代战斗机，要求具有过失速机动和超音速巡航的能力，并要求具有一定的隐身性能和降低全寿命成本，航空发动机进入新一代涡扇发动机时代。20世纪末期，先进战斗机对发动机提出了5S特性（隐身性、超声速巡航、短距起降、超机动性、高维修性），自此航空发动机进入**先进涡扇发动机**时期。

评价军用发动机的关键参数有：**推重比、单位推力、涡轮前燃气温度和加力状态耗油率**。军用发动机追求高的推重比，其单位推力和涡轮前燃气温度逐代提高，加力状态耗油率降低。但总增压比从七十年代起一直保持在 20~30 范围内，大多在 25 左右，涵道比呈减小的趋势。

- **为了保证战斗机高机动能力和加速性，须有高的飞机推重比。**目前战斗机推重比一般为 1~1.3(发动机最大状态所产生的推力与飞机结构重力之比)。发动机的重量一般占这类飞机总重量的 10~15%，因而发动机的推重比对飞机推重比有明显的影 响，推重比成为发动机最重要的综合指标。
- **提高涡轮前燃气温度是增大单位推力的主要途径。**为了提高发动机加力状态的推重比，发动机的单位推力以及决定单位推力的主要循环参数涡轮前燃气温度也相应地不断提高。单位推力从六十年代的至今约提高了 20%，由此可使推重比提高约 31%。
- **发动机涵道比的选择与飞机的用途有很大关系。**对于要求航程较远和飞行包线范围相对较窄的歼击机和攻击机用发动机，需要选较大的涵道比(0.5~1.0)，而对于拦击机用发动机，需要选较小的涵道比(0.2~0.6)。由于第四代战斗机要求具有超声速巡航能力，要求发动机有较大的不加力状态推力，需要选取较小的涵道比(0.2~0.3)。

图12：涵道比对战斗机重量的影响



资料来源：《航空发动机核心技术及发动机发展型谱研究》，中国银河证券研究院

- **军用发动机总增压比较为稳定。**随着涡轮前燃气温度的提高，无论从提高单位推力或从降低耗油率出发，都要求增大发动机的总增压比，但是总增压比的提高意味着风扇及压气机乃至涡轮级数的增加，间接影响推重比的提高，因此军用发动机的总增压比从七十年代起就保持在 25 左右，提升有限。
- **加力状态耗油率显著降低。**随着涡轮燃气温度的提高和涵道比的减少，以及部件效率的提高，军用航空发动机加力状态耗油率已显著降低，不加力状态耗油率没有明显的增加。

**第四代发动机具有高推重比、小涵道比、高总压比、高涡轮进口温度等特点。**为满足先进战斗机超声速巡航、良好隐身、高亚声速和超声速机动、远航程和短距起落、低全寿命期费用等要求，第四代航空发动机主要性能特点为：推重比 9.0~10.0，涵道比 0.2~0.4，总增压比 26~35，涡轮进口温度 1800~2000 K，耗油率降低 8%~10%，可靠性提高 1 倍，耐久性提高 2 倍。

**第五代军用航空发动机多为推重比 12~15 的小涵道比加力涡扇发动机。**2012 年 10 月，美国启动的 AETD 项目，主要瞄准下一代涡轮发动机技术，目的是验证能用于第五代战斗机、未来轰炸机和其它战术飞机的低油耗发动机技术。AETD 项目重点研究三外涵技术，除传统涡扇发动机的高压核心机和低压外涵道，还将在外圈增加可开合的第三外涵，以满足未来自适应发动机的要求。

**表3：军用航空发动机总体性能发展趋势**

	第三代（1970s-1990s）	第四代（1990s-2010s）	第五代（2010s-现在）
推重比	7~8	9~10	12~15
涡轮前温度/K	1 600~1 750	1 800~2 000	2 000~2 250
平均级增压比	1.3~1.4	1.45~1.50	2.0~2.5
涵道比	0.3~1.1	0.2~0.4	≤0.3
总压比	21~35	26~35	~40
冷却量	17%~18%	15%~17%	12%~15%

资料来源：《军用航空发动机特征分析》，中国银河证券研究院

**表4：国外第四代先进发动机主要性能参数**

型号	F119	F135	F136	EJ200	M88-2	AI-41F
加力推力 daN	15560	19135	18000	9000	7500	17500
中间推力 daN	9780	12460	11600	6000	5000	11390
加力耗油率 kg/daN/h	1.8~1.9			1.76	1.75	
中间耗油率 kg/daN/h	0.80~0.86	0.90		0.826	0.816	
空气流量 kg/s	≈120~130	139.6		75~77	65	140
总增压比	35	35	>35	25.6	24.5	
涡轮进口温度 K	1973			1803	1850	1900
涵道比	0.2~0.3	0.57	0.4~0.45	0.40	0.3	0.27
推重比	>10			9~10	8.5	
主要用途	F-22	F-35	F-35	EF2000	阵风	S-47

资料来源：《军用航空发动机特征分析》《航空发动机核心机技术及发动机发展型谱研究》，中国银河证券研究院

## 2、民用发动机评价指标和趋势：安全性、成本可承受性是最优先的考虑因素

民用航空发动机的研制有很高要求，多项参数将影响民用发动机的性能评价。对于民用发动机，发动机的安全性/可靠性、可承受性/成本和价格是其最重要、最优先的考虑因素。当前大涵道比涡扇发动机和各种改进型发动机占据民航动力的统治地位。由于军民飞机对发动机的要求不同，发动机在发展过程中呈现出不同的趋势，特别是涵道比和总增压比两个参数。

**表5：典型大涵道比涡扇发动机循环参数**

取证时间	典型发动机	涵道比	风扇压比	总增压比	涡轮前温度/K	巡航耗油率/[kg·(daN·h) <sup>-1</sup> ]
1977-1992	RB211、PW4000、CFM56、V2500、PW2037、JT9D 等	4~6	1.7	25~30	1500~1570	0.58~0.7
1992-2007	Trent800、PW4084、GE90、Trent900、GP7200 等	6~9	1.5~1.6	38~45	1570~1830	0.565~0.6
2008-至今	GENx、Trent1000、PW8000 等	10~15	1.3~1.4	50~60	>1900	0.5~0.55

资料来源：《航空发动机科学技术的发展与创新》，中国银河证券研究院

- 提高总增压比，在部件效率不过分降低的条件下，有利于提高热效率，所以不断提高总增压比是现代民机发展的基本趋势。

- 提高涵道比、相应降低风扇压比，有利于降低排气速度，降低离速损失，因而有利于提高推进效率，也有利于降低噪声（噪声水平正比于排气速度的 8 次方）。所以提高涵道比也是现代民机的发展趋势。
- 民用发动机的涡轮前燃气温度和军用发动机有相类似的发展趋势，同时要兼具更长的寿命(为军用发动机寿命的十倍以上)，因此，涡轮前燃气温度值一般比同代军用发动机低 100~200K。
- 民用飞机对涡扇发动机的要求通常是“最低的全寿命成本”，发动机耗油率成了民用发动机发展的特征性指标。

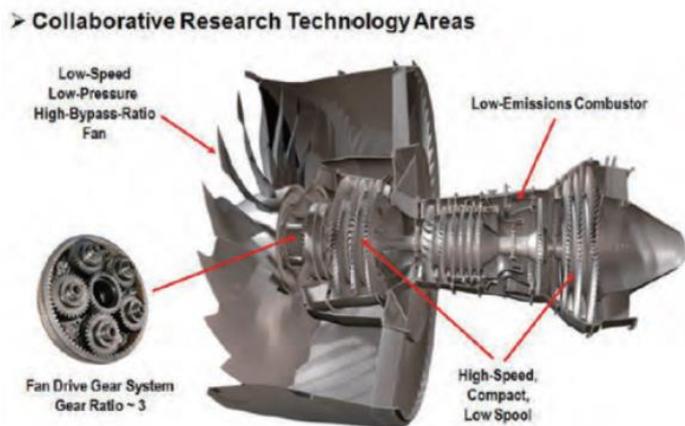
总结来看，代际越高的民用发动机，涵道比越高，涡轮前燃气温度越高，风扇压比越低，总增压比越高，巡航耗油率越低。

**民机发动机性能的提高与技术进步联系紧密。**经济性一直是民用航空发动机追求的目标之一，主要通过降低耗油率与全寿命费用来实现。根据《航空发动机科学技术的发展与创新》，美国 GE 公司与法国 SNECMA 公司于 1998—2003 年实施了 TECH56 研究计划，开发和验证了金属材料空心弯掠风扇叶片、高载荷高压压气机、高载荷高压涡轮、对转低压涡轮、对转差动轴承、带冷却的全功能发动机数字控制器等，实现了“与 1999 年的 CFM56 发动机相比，费用降低 15%~25%，耗油率降低 4%~7%，维护费用降低 15%~20%”的目标。英国罗罗公司则以 Advance2 和 Advance3 项目所发展的双转子或三转子发动机技术在 2020 年前达到成熟目标，实现发动机耗油率比遛达 700 发动机至少降低 20%。

**未来，民用航空发动机或将在多个方向实现进一步发展**，包括齿轮驱动风扇发动机（GTF）、开式转子发动机（Open Rotor）和间冷回热发动机（IRA）。此外，太阳能等新能源发动机也是重要的发展方向。

- 齿轮驱动风扇式的涡扇发动机（GTF）。现役的涡扇发动机是通过低压涡轮轴直接驱动风扇，而 GTF 是通过减速齿轮箱带动风扇，其优点是低压涡轮可采用更高转速，从而减少涡轮级数（例如由 7 级减至 3 级）。同时，风扇可采用更低的转速，得到更大的涵道比和更低的叶尖切线速度，从而降低耗油率和噪声。应用 GTF 技术的 PW1000G 系列发动机实现耗油率比在役发动机降低 11%~12%，噪声比第 3 阶段环保要求低 30 dB。

图13: 齿轮驱动风扇式的涡扇发动机（GTF）



资料来源:《航空发动机科学技术的发展与创新》, 中国银河证券研究院

- 开式转子发动机（open rotor）。所谓开式转子，就是桨扇发动机或无涵道风扇发动机，其主要优点是涵道比可大幅度加大，从而有效降低耗油率。但缺点也较为明显：增加飞机

重量；影响飞机气动外形，且使飞机结构做较大改变，抬高短仓以适应直径更大的浆扇；飞行速度降低；增大座舱噪声和环境噪声等。

图14：开式转子发动机



资料来源：《航空发动机科学技术的发展与创新》，中国银河证券研究院

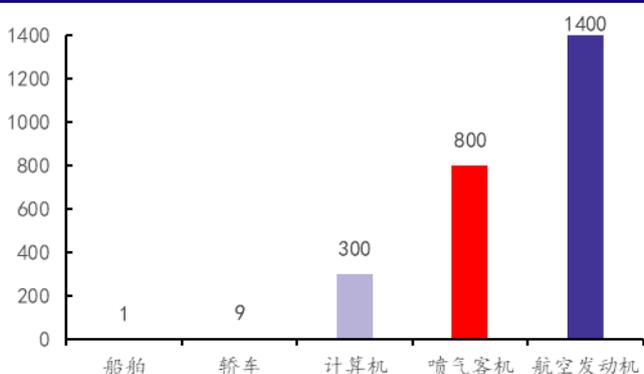
- **间冷回热发动机（IRA）。**间冷回热是在普通的涡轮发动机高压压气机和低压压气机之间设置一台中间冷却器，用于带走压气机之间的热量，降低高压压气机的进口温度，使其易于压缩；而在尾喷管排气中设置一台回热器，回热器将排气中的部分热量送回到燃烧室进口的高压排气中，使从压气机出来后的空气提高 200℃。间冷回热循环核心机热效率比常规循环大约可高出 14%~16%。

## 二、为何需重视航空发动机产业布局？

### （一）航空发动机：集高经济性、高战略价值、高难度、高紧迫性于一身

作为现代工业“皇冠上的明珠”，航空发动机附加值较高。航空发动机是关系国家国防安全、国民经济发展的重大装备。同时它也以先进性和复杂性成为一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。它的发展可广泛带动电子、材料、精密加工、冶金、化工等产业的繁荣，被誉为现代工业“皇冠上的明珠”。同时，航发也是典型的技术、知识密集型高科技产品，附加值较高，根据《航空发动机科学技术的发展与创新》，其单位重量创造的相对价值是船舶的 1400 倍。航空发动机产业因为技术极其高端，处于寡头垄断的环境中，一款成熟产品能够销售 30-50 年，面临的竞争威胁很小，几乎不必担心竞争和市场回报问题，壁垒和门槛是经济回报的有力保证。

图15：各产品单位重量创造的相对价值



资料来源：《航空发动机科学技术的发展与创新》，中国银河证券研究院

**航发产业链溢出效应明显，军民深度融合实现良性循环。**世界上主要航空发动机制造商，基本通过“业务互补”为航空发动机及设备研发提供资金支持。GE（通用电气）的产品线十分广阔，不仅研制航空发动机，还生产电梯、空调等等，用这些业务来保证发动机的持续研发。产业链垂直整合的优势，除了“低成本”和“快捷的材料供给”外，更重要的是掌握着可以随时跟进前沿科技创新、组合出优势产品的技术能力。航空发动机的产业链条非常长，将带动冶金、化工、电子、材料、高温涂料、电控系统等相关产业，中国航空工业在航空发动机研制的探索中，有望实现深度军民融合，通过发展更多赚钱的“业务组合”反哺航空工业的新技术投入，而新技术再“溢出”到民用领域，形成良性循环。

**然而，航空发动机研发、生产和制造难度都较高，需要长期的产业和人才积累，具有极高进入壁垒。**它的研发既需要坚实深厚的理论基础，又需要大量工程实践经验和坚实的工业基础能力。根据《航空知识》数据，研制一台中大型发动机大概需要 15 至 30 亿美元，同时需要比飞机机体多 5 年以上的研发周期，是一个国家科技水平、工业基础、综合国力的集中体现。

**表6：航空发动机研发制造难度**

壁垒	描述	数据和例子
极高技术要求和可靠性要求	学科涵盖工程热力学、气体动力学、燃烧学、传热学和现代控制理论等，技术几乎覆盖材料、制造、试验等所有现代技术门类，特别是高温材料和热工艺。	民用航空发动机的首翻期（机上平均寿命）已达 2 万小时，相当于一架 24 小时连续飞行 2 年以上而不大修。按照正常每天使用 6 小时计算，一台发动机应当可连续使用 9 年以上不拆下维修，对发动机的稳定性要求极高。
与国家基础工业水平高度关联	航空发动机的制造过程涉及众多技术领域，离不开国家基础工业的支撑。基础工业的支持程度直接决定了航空发动机的性能及可靠性等关键指标，对设备的稳定生产有至关重要的作用。	发动机的热部件需要定向凝固高温合金、单晶、金属间化合物、金属基复合材料和陶瓷基复合材料等先进特殊材料；发动机叶片需要钛合金、铝合金、高强度钢等材料，且需要不断改进以适应苛刻的性能和工作环境要求。
遵循独立和超前的发展规律	根据发动机研制的流程，发动机本身的研制难度高于平台、研制周期长于平台，需要提前谋划、超前发展。	航空发动机的研发周期一般比飞机机体长 5 年以上
需要国家资源的强力支持和保障		在航空研发的总投入中，航空发动机占比约为 1/4，研制一台中大型发动机大概需要 15-30 亿美元。
对试验和高性能设施的依赖	航空发动机的研制流程可划分为“研究-设计-试验-修改设计-再试验”，每一个试验的背后都需要高性能的试验手段和设施支持。	研制一台新型发动机一般需要 10 万小时的零部件试验、4 万小时的附件试验和 1 万小时的整机试验。

资料来源：《航空知识》，中国银河证券研究院

**航空发动机核心技术和市场牢牢掌握在美、英、法、德、日等国家的寡头企业中。**目前，仅有美国、俄罗斯、英国、法国等少数国家能够独立研制高水平的军/民用航空发动机，占据全球航空动力产业链的主导地位。制造方面，目前能自行制造第三代战斗机的国家/地区共有 12 个，能自行制造大推力军用涡扇发动机的国家有三个（美国、俄罗斯、中国），能自行制造大涵道大推力高性能民用涡扇发动机的国家只有两个（美国、英国）。世界大型民用航发产业的顶级企业是美国通用电气（GE）公司和普拉特惠特尼（PW）公司、英国的罗尔斯罗伊斯（RR），以及 GE 同法国赛峰集团（Safran）合资成立的 CFM 国际公司，GE 同 PW 合资成立的 EA 公司，PW、德国 MTU 等 5 家合资成立的 IAE 公司等。这些企业具有独立研制航发整机的能力，几乎控制了全球大型民用航发的核心技术研发、总装集成、销售及客户服务等全产业链。

**表7：世界主要航空发动机厂商**

类型	代表公司
世界大型民用航空发动机	美国通用电气（GE）、美国普拉特·惠特尼（P&W）、英国罗尔斯·罗伊斯（R-R）、斯奈克玛国际 CFM1（Safran/GE）、IAE（R-R/P&W）、EA（GE/P&W）
军用和小型航发	法国斯奈克玛（Snecma）、美国霍尼韦尔（Honeywell）、德国 MTU、意大利 Avio、俄罗斯土星、俄罗斯礼炮
供应商	日本三菱重工、日本川崎重工、IHI 公司、韩国三星

资料来源：《航空知识》，中国银河证券研究院

此外，世界航空推进技术正呈现出加速发展的态势，我国发展迫在眉睫。世界航空强国在重视教育、科技和工业技术发展的同时，对航空动力技术的预先研究和试验验证给予极大的重视，开展了一系列大型研究计划，为各种先进军、民用发动机提供了坚实的技术基础。

- 美国于 60 至 80 年代连续密集实施十多项发动机研究计划，且在 1988 年-2003 年期间，用 15 年左右的时间，在推重比、耗油率、成本等方面取得的技术进步，相当于过去 30-40 年所取得的成就。此后，美国政府和军方制定了多用途、经济可承受的先进涡轮发动机（VAATE）计划，在 2017 年左右使发动机经济可承受性（定义为能力与寿命期成本之比，其中能力为推重比与中间状态耗油率的函数）提高 10 倍。
- 以英国为主，意大利和德国参与共同实施了先进核心军用发动机计划的第二阶段（ACME-II），英国和法国又联合实施了先进军用发动机技术（AMET）计划，德国宇航研究院联合企业界独立实施了针对民机的 3E（环境、效率和经济性）发动机研究计划。
- 日本早已通过专利生产第三代发动机，并参与世界一流水平的大型民用涡扇发动机的国际合作研制，目前又正在与美、英合作研制飞行速度 5 倍于声速的 HYPR-90 组合循环发动机，力图在高超声速推进技术领域抢占领先地位。
- 印度的军用发动机在部分依靠与国外合作的条件下采取自主研制的途径，自行研制的推重比 8 一级 GTX-35VS 双转子涡扇发动机已经首飞，在推重比 10 以上涡扇发动机和高超声速组合动力关键技术研究方面取得进展。

**表8：美国部分航空发动机材料和制造技术发展计划**

计划	实施年代	备注
航空航天推进计划	1959-	推重比 6-8 发动机预研，材料为重要专项之一。
发动机部件改进（ECI）计划	1977-1981	推重比 8 发动机改进改型，对材料的使用可靠性进行了深入研究。
发动机热端部件技术（HOST）计划	1980-1987	F100、F110 发动机改进改型，重点研究了涡轮叶片材料特性和防护涂层。
综合高性能涡轮发动机技术（IHPTET）计划	1988-2005	新一代推重比 12-15 一级涡扇 / 功重比 11-12 一级涡轴发动机预研。
先进高温发动机材料技术计划（HITEMP）	1989-2005	对先进复合材料的可行性验证、结构分析模型的证实及试验方法的研究。包括金属间化合物、陶瓷、高分子复合材料等。
先期概念技术演示验证计划（ACTD）	1995-2005	F119 涡扇发动机 / PW207 涡轴发动机研制，侧重于材料与制造技术的工程化研究。
极高效的发动机技术（UEET）计划	2000-2005	面向 GENX 涡扇发动机、AE1107 涡轴发动机研制，材料为七个子课题之一。
先进航空发动机材料（ADAM）计划	2003-	研究下一代发动机用单晶合金、轻质量高温软磁材料、先进金属基复合材料、革新的粉末材料、先进的粘接技术
下一代制造技术计划（NGMTI）	2004-2008	金属加工制造和复合材料加工制造是其中两个重要研究领域。
通用经济可承受先进涡轮发动机（VAATE）	2006-2017	面向新一代推重比 15-20 一级涡扇 / 功重比 12-15 一级涡轴发动机预研，强调军民共用技术。材料作为四个研究计划的重点技术支持小组之一。

资料来源：《一代新材料，一代新型发动机：航空发动机的发展趋势及其对材料的需求》，中国银河证券研究院

航空强国长期以来一直将航空动力产业作为国家高技术战略产业进行扶持，将燃气涡轮发动机等动力装备视为保持国际竞争力的代表性产品。英国作为燃气涡轮发动机技术的发源地，始终坚持航空动力产业的独立自主发展，甚至立法限制航空发动机企业的股权对外转让。美国一直将航空航天动力技术视为国家、国防关键技术，持续通过国家级技术计划保持领先优势，同时以市场化形式驱动航空动力产业竞争力提升。

航空动力产品技术密集度高、应用融合性强、产业带动面宽，兼具经济价值和军事价值，因此发展航发产业势在必行。当前我国已在航发研制和生产中取得一定成就，但我国在全球产业链的参

与度还十分有限。同时，我国面临“百年之未有大变局”，核心产业链环节和生产要素的自主可控在当前时点显得尤为重要，我国航空发动机方兴未艾，未来发展有望进一步加速。

## （二）世界竞争格局：寡头占据全球军民用航发主要市场

**军用：**在世界军用航发市场中，美国 GE、美国 P&W、英国 R-R 和法国 Snecma S.A.为主要军用发动机制造商。此外，美国霍尼韦尔（Honeywell）、德国 MTU、意大利 Avio、俄罗斯土星、俄罗斯礼炮、中国航空发动机集团等公司也具备较完整的生产能力。世界上能够独立研制军用航空发动机的国家只有美国、英国、俄罗斯、法国、中国等少数几个国家。

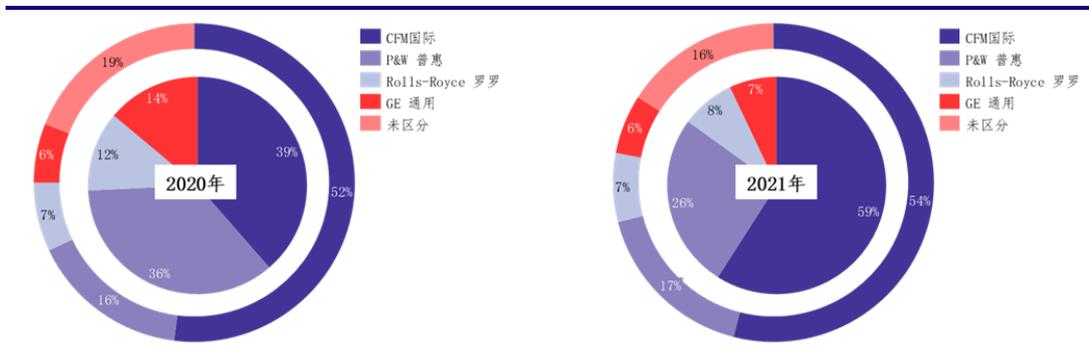
表9：全球军用航发生产企业

国家	企业名称	代表发动机	装配飞机	授用时间
美国	通用航空 GE	F110 系列	F-14 系列、F-15 系列、F-16 系列	1990
		F414 系列	F/A-18 系列	2001
	霍尼韦尔 Honeywell	TFE731 系列	霍克 125-800、C1010、隼 20	1972
		F100/F401 系列	F-15 系列、F-16 系列	1974
	普惠 P&W	F119	F-22	1997
F135 系列		F-35 系列	2010	
英国	罗罗 R-R	AE3007	全球鹰	2001
俄罗斯	联合发动机制造公司 UEC	AL-31 系列	苏-27/30/33/34 系列、歼-10 系列	1985
		AL-41 系列	苏-35、T-50	2010
		RD-33 系列	米格-29、幻影 3 型二代、幻影 F-1	-
法国	斯纳克玛 SNECMA	M88	阵风系列、KTX-2	1996
		M53	幻影 2000 系列	1980
		Larzac	阿尔法喷气机、MIG-AT	1975
中国	航发集团	WS-10	歼击机	2010

资料来源：《国外航空发动机简明手册》，中国银河证券研究院

**民用：**根据专注商业航空领域新闻网站《Simple Flying》，全球民用航空发动机领域中，美国通用电气 GE、英国罗罗 R-R 和美国普惠 P&W 占据全球 90% 以上市场。而根据《Commercial Engines 2021》数据，GE、R-R、P&W，以及由 Safran/GE 合资的 CFM 国际、R-R/P&W 合资的 International Aero Engines AG 国际航空发动机（简称 IAE）、GE/P&W 合资的 Engine Alliance 发动机联盟公司（简称 EA）共六家公司取得民航发动机超过 99% 的市占率，头部效应显著。

图16：全球民用发动机市占率分布情况（注：外圈表示已交付订单，内圈表示未交付订单）

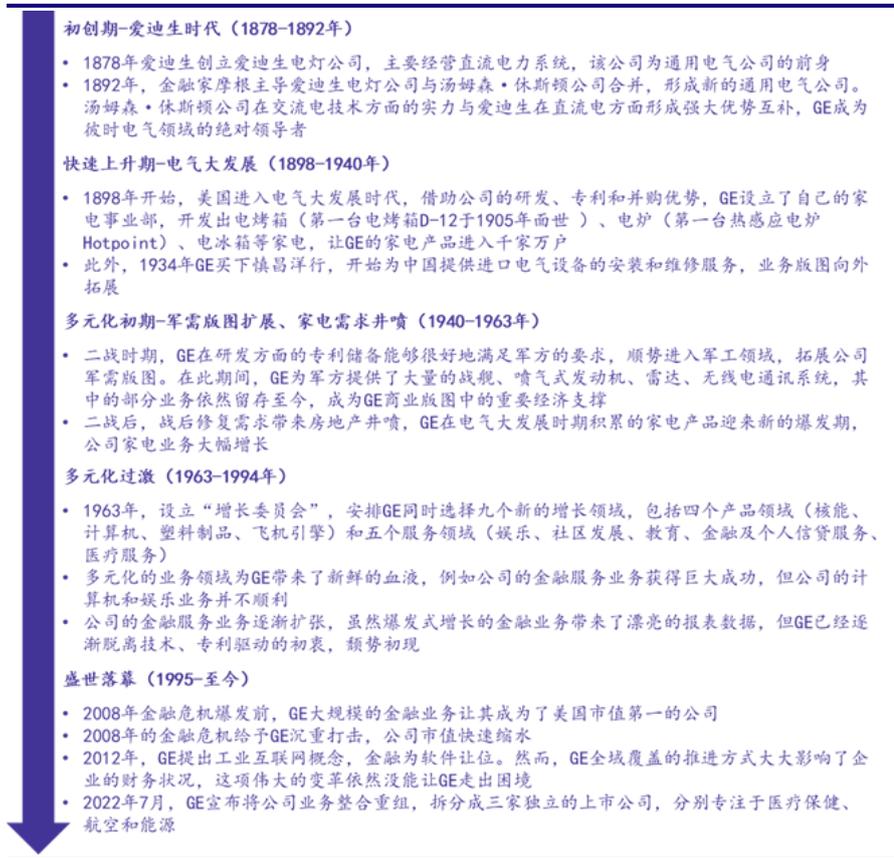


资料来源：《Commercial Engines》，中国银河证券研究院

## 1、GE 航空：持续紧跟技术发展，拆分业务专注航空再出发

通用电气（General Electric Company），简称 GE，是美国的跨国综合企业。公司从电气行业出发，在两次世界大战中扩大商业版图走向多元化，逐渐成为包括电子工业、能源、运输工业、航空航天、医疗与金融服务等业务的大型综合跨国企业。2022 年 7 月，GE 宣布将公司业务整合重组，拆分成三家独立的上市公司。

图17: GE 历史沿革



资料来源：GE 官网，中国经营报，中国银河证券研究院

**仿制起家，立足创新。**在 1941 年 4 月，GE 仿照惠特尔的设计研发的 GE1-A 第一次开车，标志着 GE 正式进入航空发动机之列。此后，GE 不断改进发动机技术，“I-40”（后正式命名 J33）成为 1944 年首飞的美国第一种喷气战斗机洛克希德 P-80 的动力来源；1946 年，通用电气开始研发 J47 发动机。J47 在美国空军中一直使用到 1978 年，产量超过 36500 台，为北美 F-86 战斗机、波音 B-47 和北美 B-45 轰炸机提供动力。

在明星发动机 J47 后，通用电气再接再厉，推出诸如历史上最可靠的喷气发动机 J79、至今还在使用的 T58 涡轴发动机、小尺寸高推重比的 J85 发动机、GE1 技术验证机等。通用电气作为“全频谱”厂家，覆盖从小推力（CF34）到中推力（LEAP）再到大推力（GENx 和 GEX）的航发品种。

**表10：通用电气航空发动机研发更迭情况**

研发时间	发动机型号	适用飞机型号	简介
1941年	GE1-A（后经改进，更名为J33）	第一种美国喷气战斗机P-80	承接英国技术，在惠特尔W.1X样机和W.2B图纸的基础上研发，标志GE进入航发之列，由通用汽车属下艾利逊生产
1943年	TG180涡喷（后更名为J35）	诺斯洛普F-89、共和F-84、北美FJ-1、波音XB-47、YB-49	第一种具有加力推力的量产喷气发动机，由通用汽车属下艾利逊生产
1946年	J47	北美F-86战斗机、波音B-47、北美B-45轰炸机、康维尔B-36、波音B-50	名牌发动机，产量超过36500台，在美国空军一直使用至1978年
1952年	QOL-1590技术验证机（后更名为J79）	康维尔B-58、洛克希德F-104、麦道F-4和外销的F-16/79	采用革命性的可调定子技术，解决发动机喘振甚至停车问题，被誉为历史上最可靠的喷气发动机
1956年	T58涡轴	贝尔UH-1F“休伊”、西科斯基SH-3“海王”、波音CH-46“海骑士”、卡曼SH-2“海妖”、特朗普“陆战队一号”	GE的第一台涡轴发动机，采用可调定子的轴流式压气机，在重量很小的同时实现超高马力，被美国军方大量订购
1957年	T64涡轴	西科斯基CH-53系列重型直升机、阿莱尼亚G222、德哈维兰DHC-5运输机	
1958年	CJ805（由J79改进）	康维尔800和900系列四发喷气客机	由J79改进而来，专为四发客机或者双发公务机市场推出的小涡扇发动机，在商业上比较失败
1959年	J85	诺斯洛普F-5战斗机和T-38教练机	小尺寸（直径0.46米、长度1.1米）、大推重比（8:1）
1962年	GE1		包含可调定子的压缩机、环形燃烧室、带气膜冷却的涡轮叶片和先进材料，被称为通用电气历史上最了不起但从未装上任何一架飞机的发动机
1965年	TF39	洛克希德C-5“银河”运输机	8:1的高涵道比相较于同时代的低涵道比涡扇降低油耗达25%，开创高涵道比涡扇的时代
1967年	T700涡轴	西科斯基UH-60“黑鹰”直升机、波音AH-64“阿帕奇”武直	单转子发动机，但用轴流-离心混合式压气机达到双转子的增压效果，不仅功率大，还保留了轻小紧凑、简单可靠的特点
1968年	CF6（以TF39为基础）	道格拉斯DC-10、空客A300、310、330、波音747、767、麦道MD-11	成功打入主流民航发动机市场，与普拉特-惠特尼和罗尔斯-罗伊斯三足鼎立；后发展出LM2500系列，是世界上最成功、应用最为广泛的船用燃气轮机
1970年	F101（后发展为F110）	洛克威尔B-1轰炸机	比同推力级的J79省油25%，这是通用电气的第一台加力涡扇，以后发展为F110
1971年	GE4	波音2707	世界最大的喷气发动机，尺寸与米格-15的机体相仿，加力推力达到220千牛，但由于经济性太差和大量技术难关，波音2707最终下马
1973年	UDF（无涵道涡扇）	波音727	UDF也称浆扇发动机，这是把涡扇的风扇尺寸加大，取消外涵道，因此等效为涵道比无穷大的涡扇，最大限度地发挥涡扇的优点
1974年	CFM56	A320、波音737NG、	F101的核心发动机与法国斯奈克马（现赛峰）的风扇结合，推出历史上最成功的民航喷气发动机；目前的LEAP发动机由CFM56发展而来
1975年/1991年	J101涡扇（1975年加大为F404、1991年发展为F414）	YF-17、F-18经典型、F-18E/F、F-117、诺斯洛普F-20、瑞典“鹰狮”、韩国KF-X、波音T-X、韩国T-50、欧洲Mako	最新的F414EPE推力进一步增加20%，推重比接近11:1，直逼普拉特-惠特尼F135的水平。F404/414成为最成功的中推，可能也是历史上应用最广泛的中推
80年代	CF34	中国的ARJ-21、B-52轰炸机	小推力涡扇，造就了民机世界波音-空客和庞巴迪-巴西航空工业的2+2局面，曾经风靡一时的涡桨客机被边缘化
2009年	LEAP	波音737MAX、空客A320NEO、中国商飞C919	与主流发动机CFM56系列相比，LEAP-X1C发动机这一先进的下一代飞机发动机燃油消耗可减少16%，二氧化碳排放量可减少16%，氮氧化物排放量不足其60%，且更为安静

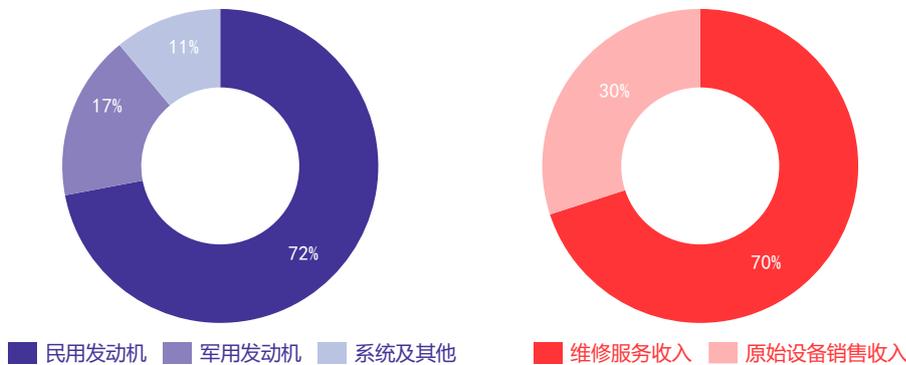
资料来源：《航空知识》，中国银河证券研究院

虽然未能成为美国 F22-F35 发动机供应商，GE 在下一代战斗机发动机技术竞争中具备先发优势和较强竞争力。在战斗机发动机方面，通用电气未能成为 F-22 和 F-35 的发动机供应商，但依据落选的 YF120 变循环发动机的经验，积极投入美国空军研究实验室主持的 ADVENT(现改为 AETD) 三涵道变循环发动机技术预研项目，这是比美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 更接近实用级的预研。普拉特-惠特尼 F119 代表了第四代战斗机发动机的水平，但下一代战斗机需要进一步降低超巡油耗，还要满足降低喷气红外特征、主动配合进气道控制、提供机载系统的散热能力等全新要求，不仅需要能在涡喷和涡扇之间无缝过渡的变循环，还需要在传统涡扇的内外涵道之外增加第三涵道。普拉特-惠特尼由于技术惯性，在一开始希望从 F119/135 这样双涵道涡扇渐进发展，继续深挖潜力，在美国空军明确要求变循环和三涵道之后，才积极投入变循环三涵道的科研。GE 在下一代战斗机发动机竞争中具备先发优势和较强技术储备。

**拆分后再出发，专注航空以及航发领域。**为摆脱债务困扰，强化优势业务经营，GE 公司一分为三。2022 年 7 月，GE 公司宣布了拆分业务后 3 个独立公司的新名字及业务架构。拆分后的航空业务由“GE Aviation”更名为“GE Aerospace”(GE 航空)，更名反映了公司的业务拓展计划，有意将业务重点扩展至发动机之外的飞机系统等领域。目前，GE 航空在役的民用发动机约为 41000 台，军用发动机约为 26000 台，共有员工约 45000 名。

GE 公司 2022 年实现收入 765 亿美元，同比增长 3%。而拆分后的 GE 航空 2022 年实现收入为 260 亿美元，同比增长 22%。其中，贡献最大的是民用设备维修保障服务收入，为 128 亿美元，同比增长 43%；民用发动机和军用发动机销售收入分别同比增长了 8%和 7%。GE 航空 2022 年实现利润 48 亿美元，同比增长 66%，恢复至 2019 年同期水平的 70%，利润率为 18.3%。2022 年，GE 公司共交付民用发动机 1663 台，军用发动机 632 台。

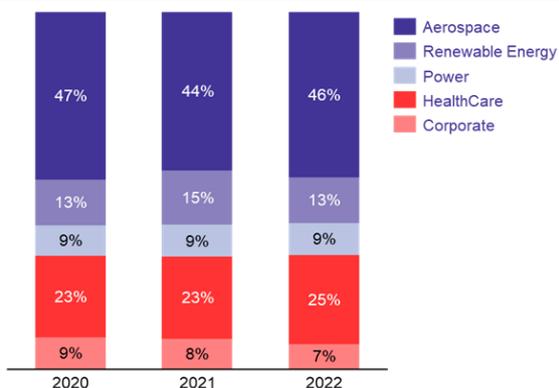
图18：2022 年 GE 业务结构



资料来源：《航空动力》，中国银河证券研究院

纵观 GE 发展史，在不同的历史时期，GE 在军、民航竞争中都曾暂时处于下风。但 GE 持续紧跟技术发展，保持较高研发投入（2020-2022 年 R&D 费用分别为 38.2/36.9/42.4 亿美元，航空为最大研发开支细项），仍能在技术革新、产业变更的窗口期抓住市场机遇并重新占据市场份额，因此至今仍在全球处于较强竞争地位。

图19：2020-2022 年 GE 公司研发费用细项占比

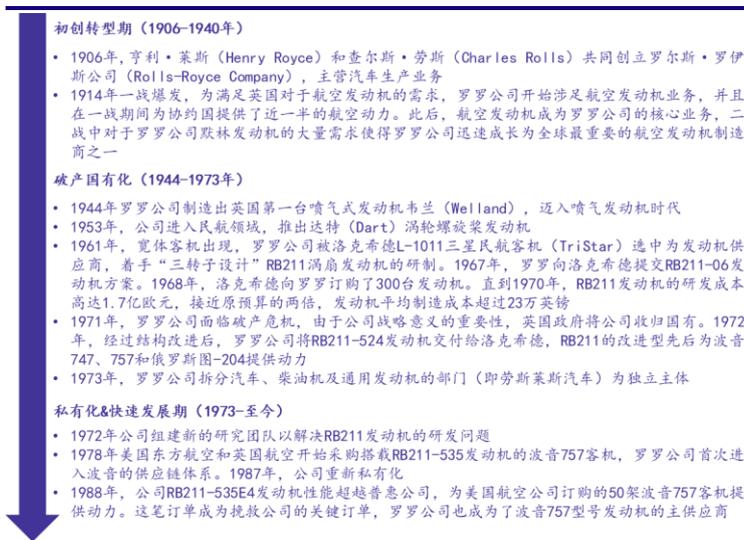


资料来源：GE 2022 年度报告，中国银河证券研究院

## 2、英国罗罗 Rolls-Royce：重组效果显现，复苏步伐加快

罗罗股份有限公司（Rolls-Royce Holdings plc）成立于 2011 年 2 月，前身是成立于 1906 年的 Rolls-Royce。罗罗公司是世界第二大飞行器发动机生产商，主要业务为生产航空业和其他行业动力系统，在船舶推进和能源领域也有重要业务。罗罗早在一战期间着手开始航空发动机的研发，并在二战后期开始涡扇发动机的技术研发工作，担任世界首台投入使用的民用涡扇发动机 RB.80“康威”的制造商。20 世纪 60 年代，罗罗公司先后兼并了布里斯托尔公司、布莱克本公司和纳皮尔公司，成为英国最大的航空发动机公司。

图20：罗罗公司历史沿革



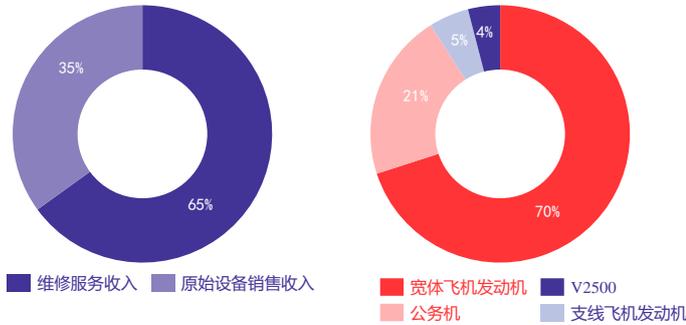
资料来源：罗罗公司官网，中国航空报，中国银河证券研究院

罗罗形成了较为完善的军用和民用发动机体系，有超过 50 款不同类型的飞机发动机应用在民用和国防领域。

受新冠疫情对全球航空市场的冲击，以及遛达 1000 发动机频频出现问题，在过去的 3 年中，罗罗公司一直在内忧外患里苦苦挣扎，股价自 2018 年以来的高点下跌超过 76%。为了降低运营成本，改善财务状况，罗罗公司逐步采取 20 亿英镑的资产处置计划，专注新能源和可持续发展项目以增加收入，增加研发投入以增强竞争力等措施进行自救。随着以上措施的实施以及市场的复苏，罗罗公司的财务状况有所好转。

2022 年罗罗公司实现收入 127 亿英镑，同比增长 16%；经营利润 6.5 亿英镑，同比增长 57%，经营利润率为 5.1%；自由现金流净流入为 5 亿英镑，同比大幅改善。目前，罗罗公司的核心业务部门包括民用航空、电力系统和国防市场。作为最主要的收入来源和利润支撑，罗罗公司民用航空业务 2022 年实现收入 57 亿英镑，同比增长 25%；经营利润为 1.4 亿英镑，经营利润率为 2.5%，成功实现扭亏为盈。

图21：2022 年罗罗业务结构



资料来源：《航空动力》，中国银河证券研究院

2022 年，罗罗公司共交付民用发动机 355 台，其中宽体机发动机 190 台，公务机发动机 165 台；大型发动机长期服务合同（LTSA）飞行时间为 1000 万小时，同比增长 35%，恢复至 2019 年同期水平的 65%。罗罗公司预计飞行时间于 2023 年下半年恢复至 2019 年同期水平的 80%~90%。

表11：罗罗发动机交付量

	2020 年	2021 年	2022 年
遛达 XWB-84/台	109	120	96
遛达 XWB-97/台	34	29	23
遛达 7000/台	22	31	63
BR700/台	112	70	77
“珍珠”系列/台	72	44	88

资料来源：罗罗年度报告，中国银河证券研究院

### 3、启示：持续技术突破，专注专业化分工

总结英美航空发动机龙头企业的发展历史，对中国航空发动机的发展有重要启示：

1) “拿来主义”起步的快速突破。虽然美国目前是航空发动机技术最先进的国家，但在二战爆发前，美国在航空发动机方面的布局与研发相当有限，彼时走在世界前列的国家是德国和英国。战时，美国从英国处获得了惠特尔离心式喷气发动机相关技术，据此，美国通用电气 GE 仿制生产 GE1-A 发动机。此后，美国又从英国处获得轴流式 Goblin 发动机，在此基础上开发出 XP-80“流星”喷气式飞机，从而快速积淀航空发动机技术基础。

2) 技术突破形成“护城河”。航空发动机作为技术密集型产业，保持技术领先是维持核心竞争力的关键，当前航发寡头在研发投入不遗余力。一直紧跟技术发展也使得 GE 航空虽然曾失去竞争优势，但能在技术革新、产业变更的窗口期抓住市场机遇并重新占据市场份额，至今仍在全球处于较强竞争地位。

**表12：通用电气、罗罗、普惠 2020-2023 年研发费用率**

	2020 年	2021 年	2022 年
通用电气	3.4%	3.4%	3.7%
罗罗公司	10.5%	6.9%	6.6%
普惠（雷神技术）	6.0%	5.5%	5.3%

计算方式：Research and development costs/Revenue (or Net sales)，仅计算 Self-funded R&amp;D 费用

资料来源：各公司年度报告，中国银河证券研究院

**3) 加强资本运作，合并同类项，专注专业化分工。**GE、雷神和罗罗都曾深陷经营不善危机，但通过并购重组、业务剥离等资本运作手段，专注优势业务、提质增效，都已取得较好效果。对于我国，我们认为应该持续打破原有军工体系的界限，推动军工产业结构由自成体系垄断封闭发展向基于专业化的分工竞争转变。在大系统、关键系统、关键基础等产业链层次不断合并同类项，形成具有国际竞争力的骨干供应商，将分散投资、分散生产转向集中投资、集中生产，形成规模化、集约化的科研生产格局。

### （三）中国航空发动机产业：与世界强国尚有差距，发展方兴未艾

#### 1、历史沿革：国家积极布局+政策逐步加码+自研能力显著提升

**航空发动机是我国航空装备战略重点，已经具备涡浆、涡喷、涡扇、涡轴等各类发动机的多产品体系。**我国航空发动机的研制始于上世纪六十年代，经历了 60-80 年代中期的仿制结合自主研发（代表型号：涡喷-6 和涡扇-9）、80 年代-90 年代末期的自主研发（代表型号：“昆仑”发动机<sup>1</sup>、“太行”发动机<sup>2</sup>）和 2000 年至今的多系列发动机自研生产三个阶段，已经具备涡浆、涡喷、涡扇、涡轴等各类发动机的多产品体系，向世界先进水平迈进。

**飞发分离加速航空发动机国产化进程。**2015 年“两会”期间，政府工作会议首次将“航空发动机、燃气轮机”列入中国国家战略新兴产业中，并启动国家航空发动机、燃气轮机重大科技专项（即“两机”重大专项），专项资金预期 1000 亿元，叠加社会配套资金预期达到 3000 亿人民币。2016 年 5 月中央批准成立中国航空发动机集团，同年 8 月航发集团正式挂牌成立。航发集团的成立打破了以往“一厂一所一型号”的旧航空工业模式，发动机的研发从此不再依附于整体飞机制造，“飞发分离”正式实现。“飞发分离”指将航空发动机作为独立的产品进行研发和生产，不再受制于飞机，也不会出现飞机下马，发动机也下马的情况。“飞发分离”有助于整个航空企业聚焦航空发动机最核心的研发、制造及生产任务，加速航空发动机国产化进程。

**表13：《中国制造 2025》航空发动机专项重点产品**

重点产品	主要产品	应用领域
大涵道比大型涡扇发动机	CJ-1000A 涡扇发动机	国产干线客机 C919
	宽体客机涡扇发动机	中俄联合研制的宽体客机
中/小型涡扇/涡喷发动机	7000-11000kgf 级齿轮传动涡扇发动机	喷气支线飞机
	5000kgf 级涡扇发动机	喷气支线飞机或公务机
	1000kgf 级小型涡扇发动机	7-8 座轻型公务机
中/大功率涡轴发动机	1000kW 级涡轴发动机	新型 5 吨级直升机
	8000kW 级大功率涡轴发动机	保障未来重型直升机需求
大功率涡浆发动机	5000kW 级涡浆发动机	未来涡浆支线客机及中小型运输机
航空活塞发动机	200kW 航空活塞发动机	轻型通用飞机和无人机

资料来源：《中国制造 2025》，中国银河证券研究院

<sup>1</sup> 我国自行研制的第一台具有全部知识产权的中等推力级加力涡轮喷气发动机

<sup>2</sup> 由中国航空研究院 606 所研制的国产第三代大型军用航空涡轮风扇发动机，也是中国第一台大推力涡轮风扇发动机

当前,我国对于航空发动机的研制生产重视依旧,对相关产业支持具备政策延续性。“十一五”指出发展先进发动机,“十二五”期间大型客机发动机完成初步设计阶段研制工作,“十三五”我国商用航发规划了长江 500(ARJ21)、长江 1000(C919,2018 年完成整机点火)和长江 2000(CR929,2020 年完成整机点火)三个产品系列,在我国商发领域实现重要突破。2015 年两会中,两机专项首次写入政府工作报告,同年国务院提出《中国制造 2025》,着重强调制造业高端装备创新工程,明确提出组织实施大型飞机、航空发动机及燃气轮机、民用航天等一批重大工程。“十四五”是我国国防和军队现代化建设的关键时期,政策逐步加码布局航空发动机,倾斜力度明显。

**表14: 航空发动机、燃气轮机重点发展政策**

发布部门	发布时间	政策法规	相关内容
国务院	2016 年 5 月	《中国制造 2025》	实施大型飞机、航空发动机及燃气轮机、民用航天等重大工程
国务院	2016 年 7 月	《“十三五”国家科技创新规划》	开展基础技术和交叉学科研究,力争在航发及燃气轮机方向率先突破
国务院	2016 年 11 月	《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》	依托航空发动机及燃气轮机专项,突破大涵道比大型涡扇发动机技术
科技部	2017 年 4 月	《“十三五”国家技术创新工程规划》	国家科技创新中心围绕重点领域布局,包括航空发动机及燃气轮机等
发改委 能源局	2017 年 5 月	《依托能源工程推进燃气轮机创新发展的若干意见》	加快突破压气机轮盘和叶片、燃烧室部件等高温合金材料
党内法规	2017 年 5 月	《国家创新驱动发展战略纲要》	坚持有所为有所不为,尽快启动航空发动机及燃气轮机重大项目
工信部	2017 年 10 月	《高端智能再制造行动计划(2018-2020 年)》	开展航空发动机与燃气轮机压气机转子叶片等关键技术产业化应用
科技部	2017 年 11 月	《国家技术创新中心建设工作指引》	面向重大需求发展,包括航空发动机及燃气轮机、大型飞机、核电等
民航局	2018 年 11 月	印发新时代民航强国建设行动纲要	聚焦航空发动机等产品适航审定能力建设,满足我国民航业发展要求
国务院	2019 年 3 月	2019 年政府工作报告	合理扩大有效投资、紧扣国家发展战略、加大通用航空投资力度
发改委	2019 年 10 月	《产业结构调整指导目录(2019 年本)》	鼓励类第十八项航空航天项下“1、干线、支线、通用飞机及零部件开发制造;2、航空发动机开发制造”
发改委	2020 年 5 月	《关于 2019 年国民经济和社会发展计划执行情况和 2020 年国民经济和社会发展计划草案的报告》	支持商业航天发展,延伸航天产业链条,扩展通信、导航、遥感等卫星应用

资料来源:各部门公告,中国银河证券研究院

从行业供应方面,军民深度融合有望对民营企业释放更多市场机遇。随着航空发动机技术难度的增大、复杂程度的增加,航空发动机发展的产业链进一步细化,主机厂更需要重视发挥核心技术优势,并在运营层面加强对全产业链的掌控。根据《航空发动机军民融合发展研究》提议,在确保掌控整机研发生产和核心分系统等核心能力的前提下,主机厂可以只生产其最终产品所有零部件中附加值最高的 30%,其余 70%的都转包出去,尽可能控制制造与采购总成本,使其全产业链控制能力大大增强。基础原材料、标准化零组件等非核心分系统和重要零部件等重要能力将逐步向社会开放。当前我国航发产业蓄势待发,产业建设已实现从 0 到 1,相关领域民营企业面临广阔的新增市场空间,有望充分受益于行业 β 的快速增长。

**图22: 国家部委军民融合政策体系构建**



资料来源:《航空发动机军民融合发展研究》,中国银河证券研究院

## 2、中国航空发动机产业现状：军品产业布局基本形成，民品布局较为薄弱

### I. 军用航发现状：我国已合计生产航空发动机逾7万台，初步具备航空发动机的研制保障能力

我国航空动力行业目前已取得长足进步，基本建立了配套齐全的工业体系，为国防安全和经济建设提供了重要支撑。前期，航空发动机因长期处于测绘仿制过程，技术研发水平相对落后，WS多个前序型号几经搁浅。进入新世纪，虽然我国研制周期在拉长，但自主研发能力正在不断提高。近年来，得益于国家支持和市场发展，航空动力研发体系能力获得快速提升。

图23：我国航空发动机图谱



资料来源：《第四代大推力军用涡轮风扇发动机发展》，中国银河证券研究院

我国已合计生产航空发动机逾7万台，各类型发动机已初步配备完善。根据《航空动力强国发展战略研究》数据，截至目前我国航空动力行业共生产航空发动机超过7万台，基本满足了各类装备制造与使用的需求。当前，我国已经建立了较为完整的航空发动机产业体系，具备了高性能军用航空发动机的研制保障能力。

表15：我国主要航空发动机型号研制生产情况

主机厂	发动机类型	型号	仿制对象	装备飞机	推力/功率	推重比	定型年份	
沈阳黎明	涡喷	WP-6	PA-9B	歼-6、强-5	3187kg	4.59	1961年	
		WP-7	P11-300	歼-7/8	5630kg	5.2	1970年	
		WP-14	自研	歼-8系列	6960kg	6.4	2002年	
	涡扇	WS-10	自研	歼-10/11/15/16/20	13200kg	7.1-9.1	2005年	
		WS-15	自研	歼-20	16000-18000kg	9.7-10.9	研制中	
西安航发	涡喷	WP-8	RD-3M-500	轰-6	9300kg	2.94	1967年	
	涡扇	WS-9	SpeyMK-202	歼轰-7		5.05	2006年	
		WS-20	自研	运-20	14000-16000kg	5	研制中	
贵州黎阳	涡喷	WP-13	R13-300	歼-7系列		5.39	1988年	
	涡扇	WS-13	RD-33	FC-1 枭龙、FC-31			2009年	
株洲南方	涡轴	WZ-8	ArrieL1C、1C1	直-9系列、直-11系列	560kw		1985年	
		WZ-9	自研	武直-10	1200kw		2009年	
		WZ-10	自研	直-20	2000kw		研制中	
		WZ-11	自研	直-8F				研制中
		WZ-16	中法合作	直-15系列	1200-1500kw			研制中
		WJ-6	AH-20M	运-8系列	3124kw			1976年
		WJ-9	自研	运-12	5000kw			1995年
成都航发	涡扇	WS-18	D-30KP-2	运-20	13200kg	5.01	研制中	
兰翔机械	涡轴	WZ-6	TM-C	直-8系列	1130kw		1988年	

资料来源：Wind，各公司公告，中国银河证券研究院

### 军用航发供应体系特点：

- **地域性明显。**军品销售主要为主机厂商提供配套，因此根据国内军品生产布局，行业围绕各主机厂所在地存在一定的区域性。
- **行业进入壁垒较高。**行业内企业从事航发领域的生产经营活动，必须具备武器装备科研生产单位保密资格认证、武器装备科研生产许可证、装备承制单位资格认证等相关资质，其次须是主机制造商、发动机制造商的合格供应商。由于军工产品的准入特点，使得进入军工企业供应商体系的企业较少，因此军工领域的行业竞争程度较低。
- **军工产品对安全性、稳定性和一致性要求较高，配套产品客户关系稳定。**军工产品在设计定型时设置备份供应商的同时会尽量将供应商选择范围控制在一定数量内，多数情况下只会指定 2-5 家供应商，以保持产品的安全性、稳定性和一致性。
- **采购具有一定阶段性。**军用航空制造具有离散型生产、多品种、小批量的特点，因此导致主机厂及发动机整机厂配套产品的采购具有阶段性特点。随着新一代航空发动机逐步定型、服役、量产、列装，相关企业收入规模不断增长。

## II. 民用航发现状：积极规划 CJ-1000、CJ-2000、CJ-500 产品系列布局

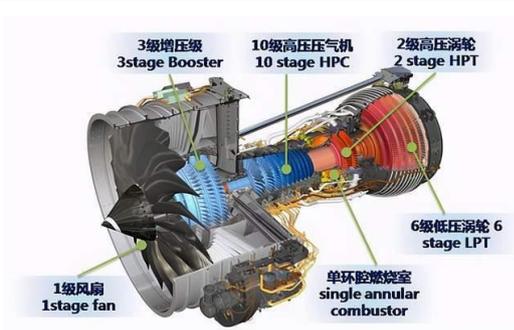
出于历史原因，我国对于航空发动机的研发长期以军用领域为主，民用领域较为薄弱。随着民机战略性凸显，我国也在积极布局民用/商用发动机市场。

- **在基础研究和技术研发方面，**我国突破了航空发动机多项核心技术，基本构建了具有自主知识产权的技术体系，通过持续推进成果应用来促进航空发动机重点产品的科研生产及质量提升。
- **在产品研制方面，**先进民用涡轴发动机、大型客机发动机研制取得重大进展，大功率涡桨发动机、宽体客机发动机的关键技术得到验证，为传统产品升级确立技术基础；中小型涡喷/涡扇发动机、活塞发动机研制也取得积极进展。高校、科研院所、民营企业广泛参与航空发动机的研制配套，为我国航空动力产品谱系提供了必要补充。

我国大涵道比涡扇发动机共规划有三个产品系列：1) 160 座窄体客机发动机 CJ-1000，配装 C919 大型客机；2) 280 座宽体科技发动机 CJ-2000，配装 CR929 宽体客机；3) 110-130 座新支线发动机 CJ-500，配装 ARJ21 支线客机改进型。

- **CJ-500：**CJ-500 发动机是一款推力 7 吨级别的大涵道比涡扇发动机，装配于国产支线客机 ARJ-21。CJ-500 的核心机基于 CJ-1000 核心机缩小改进而来，涡扇发动机推力较小，研制难度稍低。
- **CJ-1000：**CJ-1000A 发动机是 CJ-1000 发动机的第一个量产型号，是我国第一款商用发动机产品，也是国产 C919 大飞机的唯一国产配套动力。首台 CJ-1000A 于 2017 年 12 月 25 日完成整机总装，2018 年 5 月 17 日成功首次点火，2020 年 6 月完成鸟击测试。中国航发目标在 2025 年之前实现 CJ-1000A 的交付使用，作为 LEAP 发动机的国产备用机。
- **CJ-2000：**CJ-2000 是继 CJ-1000 后我国自主研制的第二款民用大涵道比涡扇发动机，设计推力达 35 吨，与波音 787、空客 A350 使用的遑达 1000、遑达 XWB、GEnx 发动机同属一个推力级别。根据中国商发的公告，2020 年 3 月国产 CJ-2000 发动机核心机 C2XC-101 点火成功。2020 年 7 月 CJ-2000AX 验证机完成整机装配。2020 年 8 月中国航发上海商用航空发动机公司已经展开 CJ-2000AX 验证机低压部件遥测系统硬件配置的招标工作，意味着 CJ-2000AX 发动机已经进入验证机试车阶段。按照目前进度推算，预计 CJ-2000 将在 2025 年前后研制成功。

图24: CJ-1000 发动机结构示意图



资料来源: 科技解析站, 中国银河证券研究院

图25: CJ-2000 发动机示意图



资料来源: 《航空知识》, 中国银河证券研究院

### 三、需求端：广阔天地，大有作为

#### (一) 军用航空发动机：需求增长、维修换装、国产替代三轮驱动

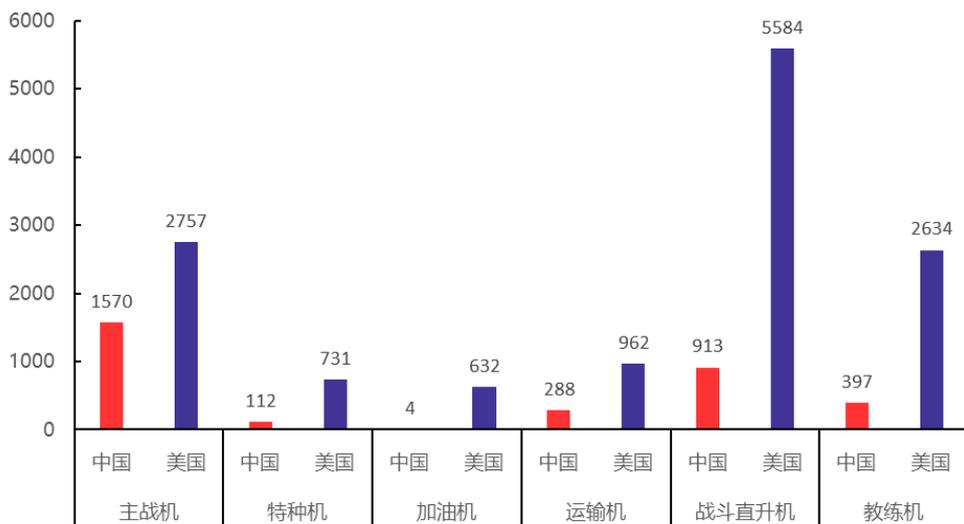
随着我国军用飞机现代化建设提速以及维修和换装市场的快速扩张，发动机的增量（新的需求+国产替代）和存量（维修+换发）市场需求空间广阔。

#### 1、增量逻辑：战机数目持续增长叠加国产化渗透率提升

##### I. 新增需求拉动：未来 10 年新增军机需要 11781 台发动机，万亿市场可期

据《World Air Force 2023》，我国 2022 年军用飞机数量达 3283 架，不足美国军机的四分之一。在飞机细分种类中，我国战斗机的数量仅为美国战斗机数量的 47.9%，而其他种类机型如战斗直升机、加油机、教练机等与美国差异更为明显，数量甚至低于美国数目的 20%。强国必强兵，作为全球重要经济体之一，我国有望加快军事力量装备步伐。

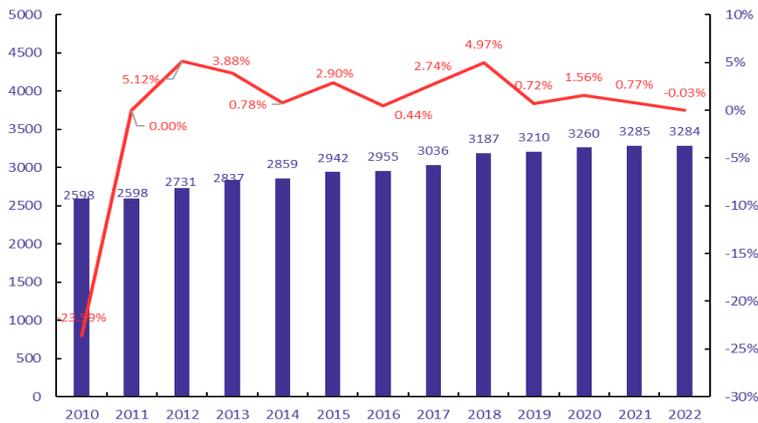
图26: 中美 2022 年军机数目对比



资料来源: 《World Air Force 2023》, 中国银河证券研究院

根据《World Air Force》的统计数据，我国军机“十二五”期间增加 344 架，“十三五”期间增加 318 架，年复合增速分别为 2.5% 和 2.1%。

图27：我国近年军机（固定翼+旋翼）数量及其增速



资料来源：《World Air Force》，中国银河证券研究院

根据以上分析，我们做以下假设和预测：

- 为实现 2027 年建军百年奋斗目标和 2035 年国防与军队现代化的伟大愿景，我国国防实力与经济实力有望同步提升，“十四五”和“十五五”期间军机列装将提速，假设 2023-2025 年复合增长率将达 10%，“十五五”期间复合增速为 8%，“十六五”期间复合增速约为 6%，预计未来 10 年我国将新增军用飞机数量达 3469 架，相当于再造一个中国空军。
- 由于新增军机中双台发动机和多台发动机机型占绝对比例，同时考虑新发动机的备用、维修因素，假设整体飞发比例为 1 比 3，则未来 10 年新增军机需要 11781 台发动机。

## II. 国产替代需求拉动：未来 10 年需国产替代发动机数量约 3390 台

美、俄占据全球军用发动机重要地位，我国军用发动机仍有国产化空间。美俄军用航空发动机除了满足其自身国防建设需要外，还大量出口。以全球现役装备数量前十的战斗机型号为例，其中 8 个战斗机型号配备美国或俄罗斯的发动机，而我国目前军用发动机尚未出口，且仍为国产为主、进口为辅的模式。近年来，美欧军机发动机禁运已成常态，我们预计国内二代机发动机国产化率接近 100%，另据隆达股份公告，我国三代、四代战机航空发动机国产化率约 70%。随着太行发动机的批量生产以及更多型号的研制，预计 2040 年军用飞机航空发动机的国产化率将提高到 95% 以上。

表16：现役装备数量前十的战斗机型号所配发动机

战斗机型号	现役数量（架）	发动机型号	发动机生产国	发动机制造商
F-16	2184	F100-PW F110-GE	美国	普惠、GE
SU-27/30/34/35	1187	AL-31F	俄罗斯	土星
F-15	961	F100-PW	美国	GE
F-18	828	YJ101-GE	美国	GE
Mig-29	822	RD-33	俄罗斯	克里莫夫
F-35	545	F135	美国	普惠
Eurofighter	522	EJ-200	英国	罗罗
Su-25	480	R-195	俄罗斯	土星
J-7	444	涡喷 13	中国	黎明
F-5	403	J85-GE	美国	GE

资料来源：《World Air Force 2023》，中国银河证券研究院

根据以上分析，我们做出以下假设和预测：

据《World Air Force 2023》，我国 2022 年军用飞机数量达 3283 架，其中二代机约 1300 架，三代机约 1983 架，考虑到歼 10 为单发动机，且数量可观。因此我们假设我国存量三四代军机的飞发比例为 1:1.9，则三、四代机总的存量发动机约 3767 台，其中非国产化发动机占比 30%，约 1130 台。假设 2040 年军用飞机航空发动机的国产化率将提高到 95%以上，结合备用、维修因素，则未来 10 年需国产替代发动机数量约 3390 台。

## 2、存量替代逻辑：未来 10 年存量换发带动的发动机总量约 12606 台

发动机存在消耗属性，未来随着实战化训练要求加大，单机飞行时间增长，发动机维修次数和换发需求也将大幅增长。据《大涵道比涡扇发动机总体性能与循环参数设计》统计，航空发动机使用阶段的综合保障费用约占全寿命周期成本的 50%，高于航空发动机本身的价值量。因此，维护与换发将从存量端助推需求放量。

根据以上分析，我们做出以下假设和预测：

根据《World Air Force 2023》，我国 2022 年军用飞机数量达 3283 架，考虑到有相当规模的歼 7、歼 8、歼 10 和教练机等单发军机，假设整体飞发比例 1:1.6，国产化率高于 80%，则存量发动机数量为 5253 台，其中国产发动机约 4202 台。另假设国产发动机寿命为 5 年，寿命期内不考虑飞机退役等因素，则未来 10 年存量换发带动的发动机总量约 12606 台。

综上，我们预计我国未来 10 年军机发动机需求合计约为 2.78 万台，其中新增军机需要 11781 台发动机，需国产替代发动机数量约 3390 台，维修与换发带动的发动机总量约 12606 台。

## （二）无人机发动机：2025 年我国军用无人机发动机市场规模约 30 至 45 亿元

与有人机比，无人机发动机推力要求不高，结构简单。无人机由于省去了有人军用航空器所必需的一套工作环境和生命安全保护设备，所以重量轻、尺寸小，因而其发动机的推力要求不高，相应的结构比较简单。如 F-137-AD-100/AE3007H 无加力燃烧室，高压涡轮为 2 级，低压涡轮为 3 级；TPE331-10GD 发动机控制系统为机械液压式，尾喷管为不锈钢固定面积喷管。因此，无人机的发动机多为货架产品。

## 1、活塞发动机应用最广泛，未来主流仍是涡扇发动机

无人机动力系统主要有涡扇发动机、涡喷发动机、活塞发动机、涡轴发动机及电动机五大类，根据特性应用于不同领域。其中，活塞发动机是最早的航空发动机，由于推力适中、低油耗、低成本、技术成熟，同时在性能方面又能满足绝大部分无人机需求，已成为使用最广泛的无人机动力装置。据航天彩虹公告，当前无人机市场（除高速无人机和微型无人机外），采用活塞发动机作为动力装置的无人机数量占比超过 60%。

**表17：五种常见军用无人机发动机概况**

型号	罗泰克斯 914F	TPE331-10GD	AR741	F-137-AD-100/ AE3007H	Model250-C20W
类型	活塞	涡桨	活塞	涡扇	涡轴
生产商	庞巴迪 -Rotax	霍尼韦尔	英国无人机发动机公司	罗·罗公司	罗·罗公司
额定功率 (kW)	73.5	671.1	28.3	-	-
最大功率 (kW)	84.5	756.9	28.3	-	313
推重比或功重比	-	-	4.26	4.44/5.04	4.24
总增压比	9.0	10.8	-	21	7.1
翻修间隔 (h)	1200	7000	250	无固定翻修间隔	3000
净质量 (kg)	64.0	175	10.7	719.4/745.7	73.9
价格 (万美元)	-	约 43.5	-	175/190	22.5
应用型号	MQ-1B、以色列航宇工业公司“苍鹭”、埃尔比特系统公司“赫尔墨斯” 1500	MQ-9	RQ-7A/B、埃尔比特系统公司“赫尔墨斯” 450、“狙击手”	RQ-4	MQ-8B

资料来源：《军用无人机发动机维修保障特点及发展趋势》 中国银河证券研究院

随着军用无人机任务范围的扩展，涡扇发动机逐步成为大型无人机动力装置。随着军用无人机任务范围的扩展，用户要求其具备更大的起飞重量以携带更多有效载荷，飞行速度更快、巡航时间更长，能够在距离地面站较远的范围和中高空活动，同时还要具备比较良好的隐身性能。在这样的背景下，各国新研制列装的军用无人机，尤其是大型无人机普遍采用涡扇发动机作为动力装置。如美国在 MQ-9 无人机基础上研制的 MQ-9C 无人机采用 1 台普惠公司的 PW-545B 涡扇发动机。

目前，我国无人机动力主要以活塞、涡桨和涡轮发动机为主，活塞发动机技术成熟、应用广泛，涡桨发动机也正成为国内察打一体无人机的主力发动机之一。作为未来主流，无人机动力所采用的涡扇发动机与国外差距明显，不能完全满足无人机对飞行速度、航时等指标的要求。根据航天彩虹 2021 年公告，公司已与国内发动机研发厂商合作，牵引国产发动机新产品测试和试用，新机型或装配国产涡扇发动机。

## 2、更强调技术成熟性、适用性以及较高的可靠性，核心是低成本

实战使用中，军用无人机一般不会与敌方航空器直接发生空战。同时，由于军用无人机系统在使用中的损失率较高。根据《军用无人机发动机维修保障特点及发展趋势》，从 1997 年到 2012 年，美军装备的 MQ-1B/MQ-9 无人机由于机械故障或通信故障等因素共损毁 85 架，按飞行小时计算的损失率为每十万飞行小时 6.71 架，是同期 F-16 战机的 2 倍以上。这就要求军用无人机系统具备较低的全寿命周期成本，并且更加强调技术的成熟性、可靠性和维护性，应用新技术、新材料较少。

## 3、军用无人机发展空间广阔，2025 年我国军用无人机发动机市场规模约 30 至 45 亿元

与美国相比较，我国军用无人机存量较少，且存在更新换代的结构需求。据国际战略研究院发表的《the MILITARY BALANCE 2022》，2021 年美军合计装备 1143 架中大型无人机。根据航天彩虹公告，中国中大型军用无人机装备数量较美国仍有 5-8 倍差距，未来发展空间广阔。

表18：2021 年美军装备无人机数量

军种	无人机类型	型号	数目	军种	无人机类型	型号	数目
陆军	重型查打一体	MQ-1C Gray Eagle	180	海军航空队	重型查打一体	MQ-9A Reaper	2
	中型侦察机	RQ-7B Shadow	236		中型侦察机	RQ-21A Blackjack	100
空军	重型查打一体	MQ-9A Reaper	234	海军	重型	MQ-4C Triton	5
	重型侦察	RQ-4B Global Hawk	30			MQ-8B Fire Scout	20
		RQ-170 Sentinel;	10			MQ-8C Fire Scout	34
		RQ-180	7			RQ-4A Global Hawk	4
特种作战司令部	重型查打一体	MQ-1C Gray Eagle	24	海军陆战队	中型	RQ-2B Pioneer	35
	中型侦察机	XPV-1 Tern	15		轻型	RQ-21A Blackjack	15
		XPV-2 Mako	14	中型侦察机	BQM-147 Exdrone	100	
	重型运输	CQ-10 Snowgoose	28	防空导弹	FIM-92 Stinger		
	重型查打一体	MQ-9 Reaper	50	合计			1143

资料来源：《THE MILITARY BALANCE 2022》，中国银河证券研究院

美国 2023 财年国防授权法案中详细披露了美军计划用于采购、研究开发与测试评估、使用与维护各型无人机与反无人机系统的预算费用。2023 年，美军与无人机相关项目的总预算金额约 39 亿美元，占国防预算的比例约 0.45%。

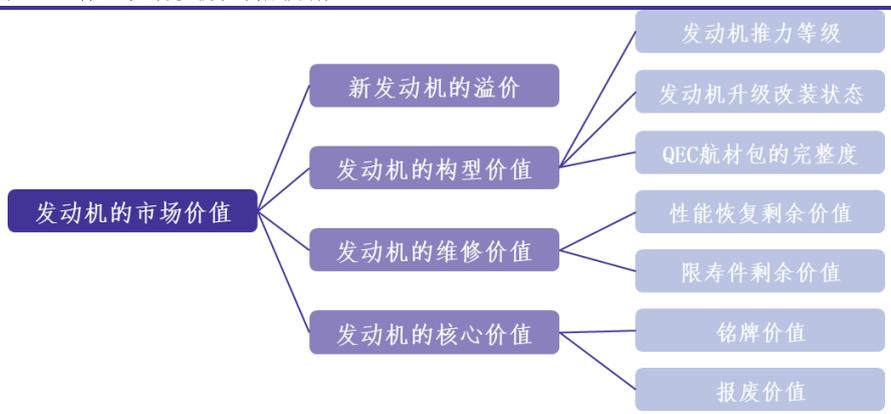
我们采用美国国防预算中无人机项目金额的比例来推算中国军用无人机内需的规模。因我国无人机装备基数较低，假设我国军用无人机每年采购额占军费比例为 0.6%，较同年美国略高，我国 2023 年军费 15537 亿元，则在无人机相关项目的市场规模约 90 亿元。另外，我们援引航天彩虹数据，预计到 2025 年军用无人机市场规模将达到 100 至 150 亿元。假设发动机占无人机价值量的比例略高于军用有人机（25%），约为 30%，则我国 2025 年军用无人机发动机市场规模约 30 至 45 亿元，宗申动力、航瑞动力（未上市）等主机企业有望受益。

### （三）商用航空发动机：国产化率较低，蓝海市场待掘金

#### 1、商用航空发动机价值构成

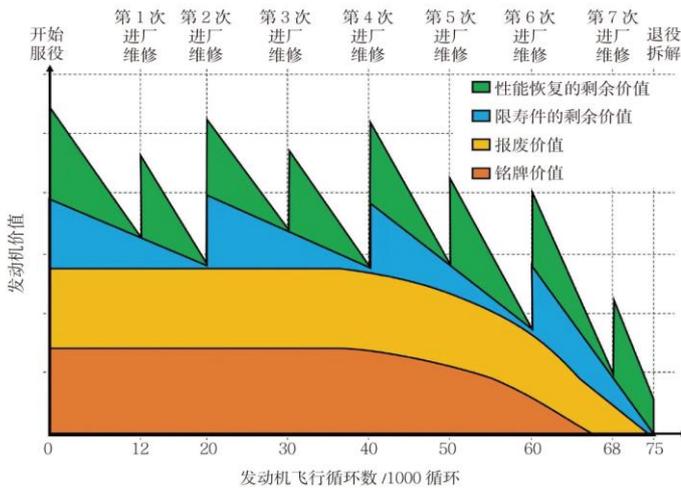
根据《大型民用飞机涡扇发动机采购成本研究》所述，民用飞机的推进系统包括发动机、发动机短舱等，发动机成本约占推进系统成本的 75%。因此，发动机采购价格在很大程度上影响民用飞机采购成本。商用发动机的使用规律决定了其随着使用时间的延长，性能会发生衰退，在经过维修后，性能又会得以恢复。基于此，发动机的市场价值可以分拆为四个部分，分别是新发动机溢价、构型价值、维修价值和核心价值，而后两者占据绝大部分。

图28： 航空发动机价值构成分解



资料来源：《商用航空发动机的价值构成分析》，中国银河证券研究院

图29：全生命周期商业航空发动机价值变化



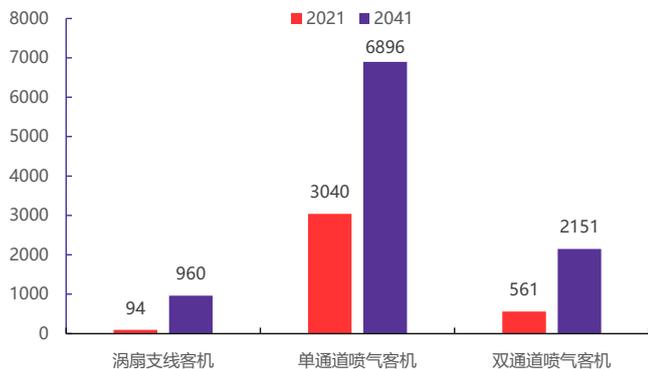
资料来源：《商用航空发动机的价值构成分析》，中国银河证券研究院

## 2、商业航发蓝海市场待掘金：预计未来 20 年商飞将新增 5162 台商用发动机需求

根据《中国商飞市场预测年报（2022-2041年）》，未来20年，预计将有9,284架飞机交付中国市场。其中，单通道喷气客机6,288架，占交付总量的67.7%，单通道喷气客机机队中79.3%为中型单通道客机；双通道喷气客机2,038架，占总交付量的22.0%；其余为喷气支线客机，二十年间将交付958架，占总交付量的10.3%。预计到2041年，中国航空市场将拥有10,007架客机，其中单通道喷气客机6,896架，双通道喷气客机2,151架，喷气支线客机960架。中国航空市场将成为全球最大单一航空市场，引领未来全球航空市场增长。

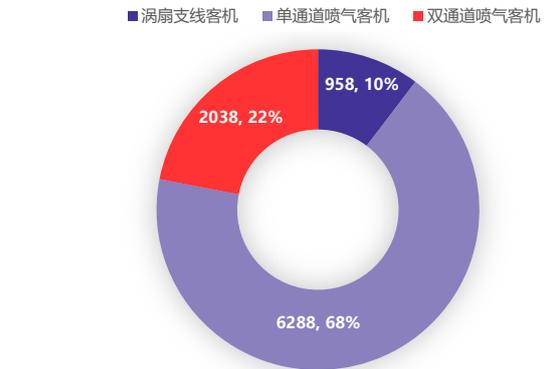
假设中国商飞在国内支线和单通道客机的市占率为30%，双通道客机的市占率为20%，预计未来20年商飞需要至少交付2581架飞机，则由商飞带来的商用发动机需求约为5162台。另假设未来20年所需国产商用发动机的平均价值量与C919发动机价值量相仿，按照C919目录价（0.99亿美元/架）的75%以及发动机22%的整机价值量占比，则国产商用发动机均价约为820万美元/台，未来20年国内商用发动机潜在市场规模达423亿美元，折合约3000亿元。

图30：中国历史（2021）和预测（2041）的各类型客机机队规模（架）



资料来源：《中国商飞市场预测年报（2022-2041年）》，中国银河证券研究院

图31：2022-2041年中国各类型客机交付量预测（架）



资料来源：《中国商飞市场预测年报》，中国银河证券研究院

### 3、我国航发市占率较低，中国商飞有望引领我国商用航发破局

#### I. 我国航发市占率较低，自主可控要求迫在眉睫

由于中国航空工业的基础相对薄弱，目前国内的民航客机发动机主要依靠进口，如美国 GE 航空、普惠、罗罗、赛峰等，国产发动机的市占率不到 1%，进口替代空间巨大。根据《民用航空发动机市场发展道路展望》，2020 年，中国国内在役商用涡扇发动机数量达到 8200 台以上。其中，CFM 国际公司占据了 60% 的市场份额。在中国窄体机发动机市场，CFM56 发动机份额占比 71%，V2500 占比 18%，LEAP-1A、PW1100G 分别占比 6% 和 5%。

图32：全球发动机市场份额

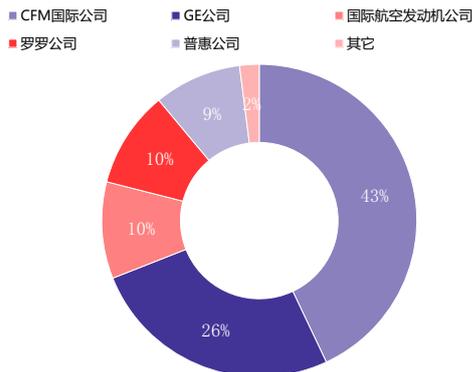
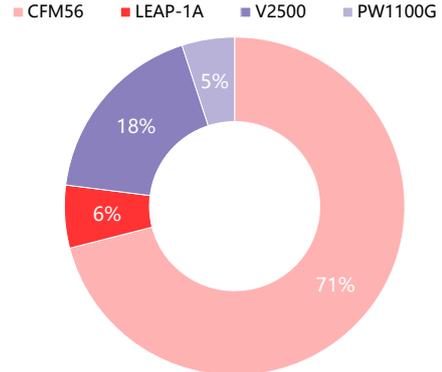


图33：中国窄体机发动机市场各型号分布



资料来源：《民用航空发动机市场发展道路展望》，中国银河证券研究院

资料来源：《民用航空发动机市场发展道路展望》，中国银河证券研究院

CFM56/LEAP 系列发动机在国内市占率超过 70%，航空发动机国产化提升空间巨大。目前，商用飞机市场呈现波音和空客双寡头格局，市场竞争并不充分。根据赛峰官网数据，超过 70% 在大中华区服役和订购的窄体飞机正在或即将使用 CFM56/ LEAP 系列发动机。当前 C919 国产化率约为 60%，40% 的外部配套率也基本符合国际惯例，但是外部局势和地缘政治日趋复杂，国内大飞机，尤其是国产发动机的发展需要更多的自主技术和产品来支撑，以便在未来国外配套可能受限的情况下，更加游刃有余。因此，我们认为面对既得利益大国或企业的阻力，国产大飞机夹缝中求生存，自主可控要求迫在眉睫。

图34：C919 国内外主要供应商情况



资料来源：东方网，商飞，中国银河证券研究院

## II. 国产大飞机商用化进度：C919 单笔最大订单落地，国产大飞机大规模商业采购将全面开启

2022 年 12 月 9 日，首架商飞 C919 正式交付给中国东方航空，而在交付仪式上，中国民航局正式向 C919 颁发适航许可证。C919 是中国首架自主研发并获得适航许可证的飞机，通过了所有适航审定，符合适航要求投入商业航班运作。

2023 年 9 月，中国东航再次与中国商飞签署购机协议，在 2021 年签订首批 5 架 C919 的基础上，再增订 100 架，这是 C919 大型客机迄今为止收获的最大单笔订单。继接 C919 投入商业化运营以来，中国东航已成为 C919 客机的全球最大用户，标志着国产大飞机大规模、大机队的商业采购、交付和运营全面开启。

图35：C919 商用化进程



资料来源：公司公告，中国银河证券研究院

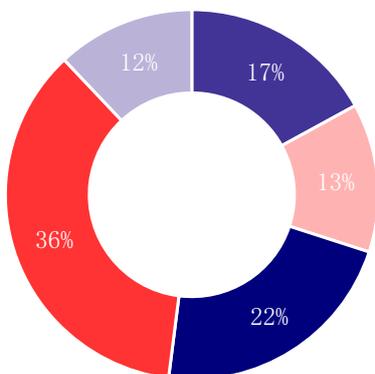
## III. 国产大飞机航发市场需求：C919 用航空发动机年市场需求约 176 亿元

9 月 10 日，中国商飞董事长称 C919 订单已达 1061 架。据统计，2020 年及以前，商飞已取得意向和确认订单合计 851 架，近年随着意向订单逐步转换为确认合同，C919 市场前景向好。在订单充足的背景下，我们认为中国商飞的交付能力有望快速增长。根据 2023 年 1 月 12 日澎湃新闻报道，中国商飞副总经理预计 C919 在 5 年内年产能规划将达到 150 架，若假设成交价为目录价的 75%，届时年产值有望达到 800 亿元，空间广阔。从航空产业总量上来看，四家航空主机厂 2022 年航空产品营收总额为 1050 亿元，按照此数据进行静态比较，C919 销量达到每年 150 架时，将为我国航空产业带来约 76% 的增量。

根据前瞻产业研究院的测算，民航飞机成本构成主要由机体、发动机、机电系统、航电系统和其它等部分构成，各部分价值占比约为 36%、22%、13%、17% 和 12%，我们假设 C919 的发动机占 C919 价值量的 22%，则国产大飞机带来的商用航空发动机年市场需求约 176 亿元，达到航发动力（600893.SH）2022 年航空产品营收的 51%，对国内航发产业链具有明显带动作用。

图36：客机各系统价值组成

■ 航电系统 ■ 机电系统 ■ 发动机 ■ 机体 ■ 其他



资料来源：前瞻产业研究院，中国银河证券研究院

目前，中国航发集团持有中国商发 49.37% 股权。CJ-1000 是中国商发专为 C919 研制的国产发动机，假设未来该发动机在 C919 的总需求中占比 50%，则 C919 的商业运营为国产发动机带来的年价值增量约为 88 亿元，行业提振作用明显。

表19：未来 C919 各系统价值量与现有公司业绩对比（单位：亿元）

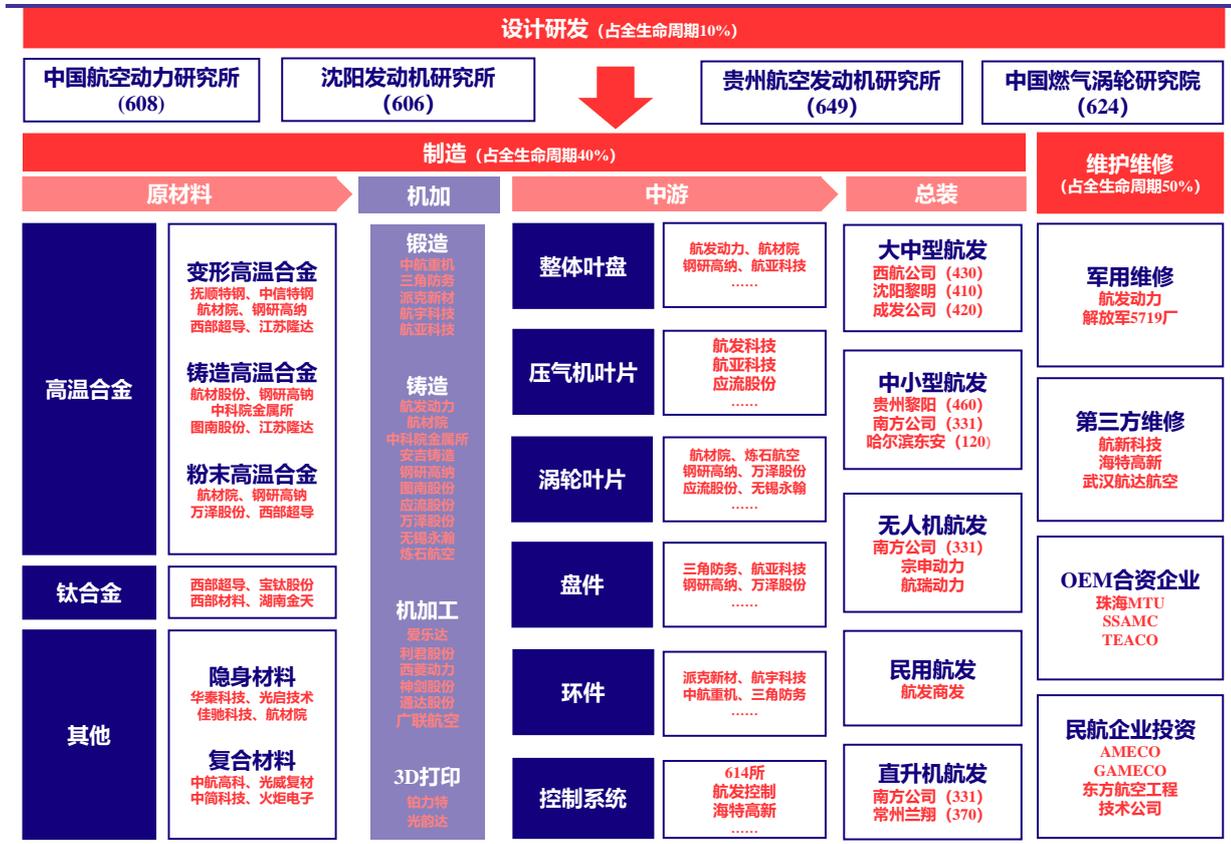
分系统	公司	2022 年			未来每年大飞机系统价值量	分系统价值量/2022 年航空产品营收
		营收	航空产品占比	航空产品营收		
机体	中航沈飞	416	99.17%	413	288	27%
	中航西飞	377	99.07%	373		
	洪都航空	73	99.37%	72		
	中直股份	195	98.45%	192		
发动机	航发动力	371	93.28%	346	176	51%
机电系统	原中航机电 (2021 年数据)	150	74.46%	112	104	93%
航电系统	中航电子 (现“中航机载”)	112	87.99%	98	136	138%

资料来源：Wind，中国银河证券研究院

## 四、航空发动机价值链与产业链分析

航空发动机产业链包含设计研发、加工制造(原材料、零部件、整机制造)、运营维修三个环节。我国目前已基本建立了完整的航空发动机研制和生产体系。

图37：航空发动机产业链情况



资料来源：中国银河证券研究院

### （一）价值链分析

按照成本占比拆分，研发设计占比约 10%，包括设计、试验和制造；整机制造占比约 40%，其中整机制造可根据生产流程拆分为上游原材料、中游零部件和控制系统、下游整机制造；维修运营占比约 50%，包括材料购置、零备件修理、周转件更换等。

表20：航空发动机成本构成分解情况

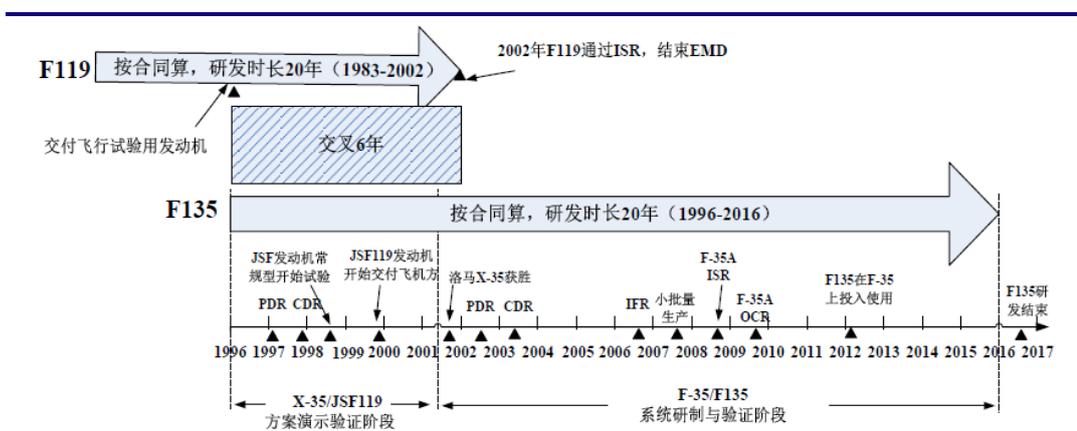
全寿命周期阶段	各阶段成本构成	目标成本占比（%）	全寿命周期成本占比（%）
研发阶段（10%）	应用基础	4	0.4
	先进部件	26	2.6
	技术验证机	10	1
	工程发展	10	1
	型号验证机	50	5
制造阶段（40%）	原材料费用	50	20
	劳动力费用	25	10
	其他	25	10
维护阶段（50%）	发动机管理	3	1.5
	外场更换转件	9	4.5
	备用发动机	5	2.5
	航线维修	10	5
	发动机维修	22	11
	零备件航材	51	25.5

资料来源：《大涵道比涡扇发动机总体性能与循环参数设计》，前瞻产业研究院，中国银河证券研究院

### 1、研发设计：占全生命周期 10%，其中型号研制费用占比 50%

航空发动机项目技术难度大、周期长、费用高、风险大。以 F135 为例，F135 发动机是 F-35 “闪电 II”的动力装置，该型发动机研制中以 F119 发动机的核心机为基础，发展同时满足空军、海军和海军陆战队三型飞机需求的发动机。1994 年，F135 发动机项目启动，2016 年 12 月，该型发动机研发结束，准备进入全面生产阶段，全研制周期长达 22 年。

图38：F135 发动机研制历程



资料来源：《美国军用航空发动机研制与采办程序演化规律及启示》，中国银河证券研究院

发达国家长期以来高度重视航空发动机技术的研究和发展，投入大量资金，通过连续不断的实施先进技术预先研究和验证计划，为其持续领先地位奠定基础。从投资规模来看，美国一直非常重视在航空发动机技术研究和发展的经费投入。美国航空发动机研究和发展的经费在国内生产总值中的比例分别为 0.08%、0.06%。美国军方每年在航空发动机研究和发展的投入大约为 15 亿美元。

请务必阅读正文最后的中国银河证券股份有限公司免责声明。

元。**政府投资中**，国防部面向军用航空发动机，其经费约占国防部全部航空经费的 20%以上。NASA 面向民用航空发动机，其经费约占 NASA 全部航空经费的 1/3。**民用公司投资中**，通用电气公司、普惠公司、罗罗公司和斯奈克玛公司每年在航空发动机研究和发展方面的投入在 10 亿美元左右。

**航空领域研究和发展经费一般分为基础研究、应用研究和型号发展三大类，不同国家会根据实际情况进行调整或者细分。**美国对研究和发展经费的分类和管理较为系统和成熟，将研究和发展经费细分为 7 类：其中，6.1 类~6.3 类不针对特定型号，属于技术基础工作（相当于我国的预研）；6.4 类、6.5 类、6.7 类针对特定型号，属于型号发展工作；6.6 类则贯穿采办的全寿命周期。美国不针对特定型号的发动机预研经费占全部发动机研究和发展费用的 30%~35%。据美国多年的航空发动机各类经费统计，其非特定型号每年经费的比例大致为 23%~28%，且常年比例较为稳定。针对型号发展费用比例随型号出台而有较大波动。

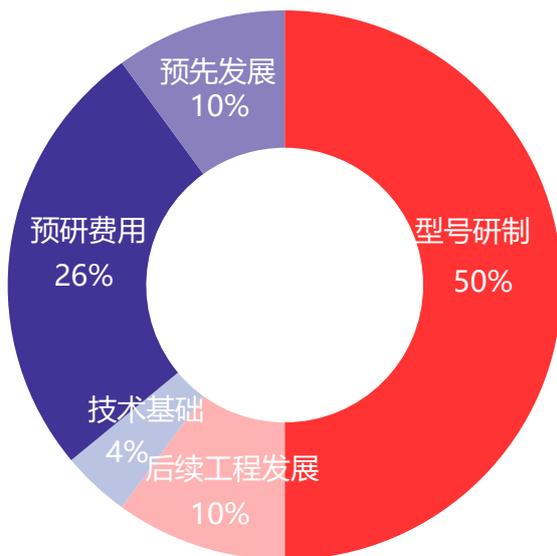
**表21：美国航空发动机研究和发展经费的分类及成本占比情况**

研究和发展经费细分	目标	研制周期成本占比（%）
6.1 基础研究（Basic Research）	不针对特定型号	3%~4%
6.2 应用研究（Applied Research）	不针对特定型号	10%~12%
6.3 先期技术开发（Advanced Technology Development）	不针对特定型号	10%~12%
6.4 先期部件开发和样机（Advanced Component Development and Prototype）	型号发展	10%~12%
6.5 系统研制与验证（System Development And Demonstration）	型号发展	30%
6.6 科研管理保障（Management Support）	贯穿采办的全寿命周期	1~7%
6.7 作战系统开发（Operational System Development）	型号发展	30%

资料来源：《航空发动机的研究和发展投资规律探讨》，中国银河证券研究院

**观之我国**，根据 1990 年编制的《中国航空工业技术政策》对航发研发阶段的方案分配。50% 的研发费用应为型号研制费用，预研费用 26%，技术基础 4%，预先发展 10%，后续工程发展 10%。可以看出，预研阶段（技术基础、预先发展、预研）的费用占比为 40%，而多数费用投入在型号阶段（型号研制、后续工程发展）中，占研发阶段的 60%。

**图39：航空发动机研发阶段成本拆分**

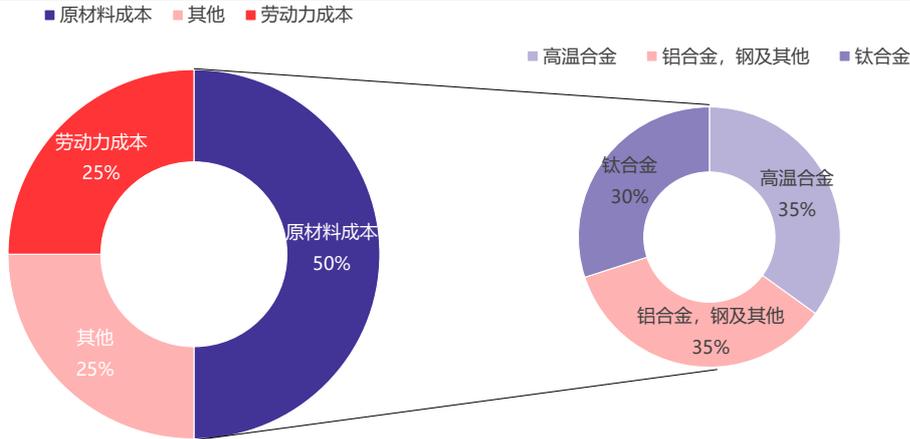


资料来源：《跨世纪航空发动机预研技术的发展（刘大响）》，中国银河证券研究院

## 2、制造成本：占全生命周期成本的40%，其中原材料价值占比40-60%

航空发动机制造成本（不含控制系统）主要由两部分组成：原材料成本、劳动力成本，分别占比在40%-60%，25%-35%。航空发动机使用的原材料主要是高温合金和钛合金制品，两者价值占比分别在35%、30%左右。高温合金涉及的主要材料是镍、钴金属，钛合金主要是钛。发动机应用的其他材料还包括铝合金、钢等。

图40：航空发动机制造成本拆分



资料来源：前瞻产业研究院，中国银河证券研究院

从零部件角度来看，对原材料加工的下一步即为零部件环节。航空发动机制造阶段，零部件成本主要集中在盘轴件、叶片、框架/油箱/油池三大类。根据不同发动机类型，零部件占比有所变化。

- 对于运输机的大型涡扇发动机，外涵道大，无加力燃烧室，除了上述三大类零部件外，机匣及其外部配件的价值占比也较高，控制系统占比较低，叶片的价值占比近30%；
- 对于直升机的涡轴发动机，除三大类零部件外，控制系统、减速机构的价值占比较高，在小型涡轴发动机中的占比甚至高达24%。
- 对于战斗机的加力式涡扇发动机，其外涵道较小，除三大类零部件外，加力喷管 and 控制系统占比较高，分别约为19%和10%。

表22：航空发动机零部件价值量占比（%）

零部件类别	大型涡扇（运输机）	小型涡轴（直升机）	加力式涡扇（战斗机）
盘轴件（压气机、涡轮）	16	18	16
叶片（压气机、涡轮）	29	17	14
框架、邮箱、油池	19	16	16
机匣及其外部配件	14	7	10
燃烧室	2	3	1
加力喷管	0	1	19
控制系统、附件传动装置	7	24	10
成型配件	3	4	4
其他组件、隔板、罩类零件	10	10	10
合计	100	100	100

资料来源：前瞻产业研究院，中国银河证券研究院

表23：典型航空发动机零部件价值量占比（%）

发动机部件及系统	J79-17	F100	F101	TF（运输机）	GE 发动机	T700（直升机）
风扇	无	6.3	7.9	19.4	14.6	无
压气机	29.0	18.7	9.8	10.9	4.7（低压） 11.8（高压）	3.8
燃烧室	2.8	3.1	4.3	3.3	4.4	8.1
高压涡轮	16.2	10.4	14.3	11.8	14.0	12.5
低压涡轮	无	5.1	7.5	23.2	16.7	9.8
加力燃烧室和喷管	13.4	26.0	22.7	无	无	无
机匣和外部结构	6.5	7.8	7.3	15.9	15.0	9.4
控制系统和附件	16.5	11.5	14.3	3.8	11.4	22.5
轴承和传动	5.9	3.1	2.6	5.2	3.5	8.3
其他和装配	9.7	8.0	9.3	16.5	2.8	25.6（含减速装置）
合计	100	100	100	100	100	100

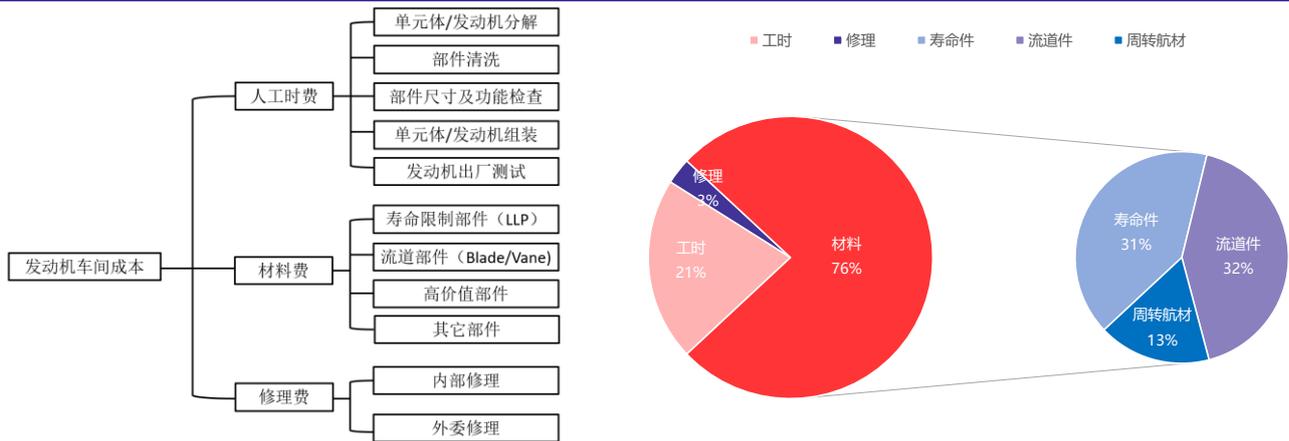
资料来源：前瞻产业研究院，中国银河证券研究院

### 3、维护成本：占全生命周期 50%，其中零备件航材价值占比 51%

从全生命周期角度，航空发动机维护阶段费用高于整机采购成本，约占全生命周期价值量的 50%，其中零备件航材价值占比 51%、发动机大修和零部件修理占比 22%、航线维修占比 10%、外场更换周转件占比 9%和其他占比 8%。

需要重点强调的是，发动机的维修（大修）成本就是车间成本，即与维修项目直接对应的成本，而不考虑折扣、增值税、索赔、封顶价格等商务因素。根据发动机维修厂商提供的大修流程，发动机的车间成本可以分成人工时费用、材料采购费用以及部附件修理费用三大类。其中，工时费用通常在大修的总成本中仅占 3%左右；材料费用在总成本中占比约为 76%，是发动机大修的最主要的组成部分；修理费用包含了内部修理和委外修理两部分，约占总成本的 20%-25%。

图41：发动机大修费用构成示意图以及成本示意图



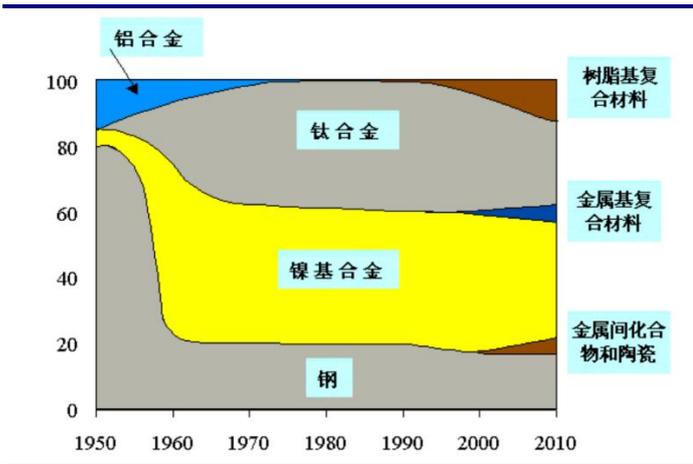
资料来源：《X 航空公司飞机发动机大修成本管理优化研究》，中国银河证券研究院

## (二) 产业链分析

### 1、上游材料：冷端以钛为主、热端以镍基合金、钛合金和钢为主

航空发动机设计和制造技术的先进性在很大程度上取决于所使用材料的水平。航空发动机的迭代路径首先是“动力先行”，即航空发动机以飞行器的发展需求为牵引，需提前 5-8 年发展；其次是“材料先行”，即研发一个新材料，制造成零件并装到航空发动机上大约需要 30 年，研发周期长，技术难度大，因此，航空发动机的先进性在一定程度上取决于所使用材料的水平。随着对新型航空发动机推重比要求的不断提高，航空发动机材料进入冷端以钛为主、热端以镍、钛、钢为主的时代。

图42：航空发动机材料结构的发展情况



资料来源：公司公告，中国银河证券研究院

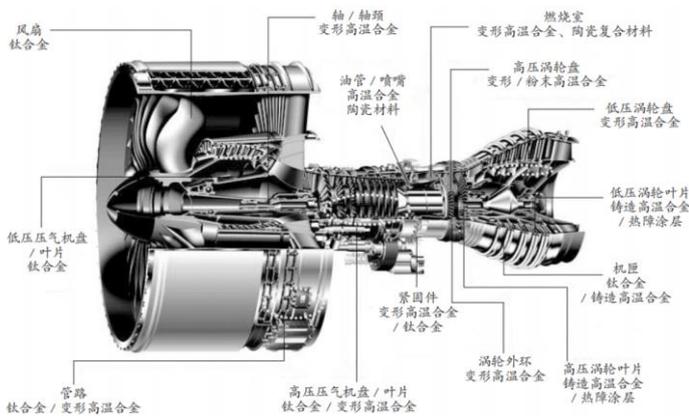
先进发动机除具有较高的性能指标外，还要全面满足可靠性、安全性、经济性、适航性、环保性等要求，对材料和工艺提出了新的发展需求。因航空发动机各个部位承受温度、压力等工作环境和工作任务皆不相同，因此不同结构可能用到多种复合材料和合金。如钛合金通常用作航空发动机的压气机叶片、机匣、发动机舱和隔热板等；铝合金通常用于发动机舱、舱体结构、承载壁板和燃料储箱等；热端部件多用高温合金。

表24：航空发动机主要使用材料及对应部件

材料类别	主要应用位置	
合金	铝合金	发动机舱、舱体结构、承载壁板、梁、仪器安装框架、燃料储箱等
	钛合金	航空发动机的压气机叶片、机匣、发动机舱和隔热板等
	超高强度钢	航天发动机壳体、发动机喷管、轴承和传动齿轮
	高温合金	适合用作发动机热端部件
	镁合金	航天发动机机匣、齿轮箱等
复合材料	碳碳复合材料	目前已有部分应用，例如美国的 F119 发动机上的加力燃烧室的尾喷管，F100 发动机的喷嘴及燃烧室喷管，F120 验证机燃烧室的部件零件已采用 C/C 基复合材料制造。
	陶瓷基复合材料	短期目标为尾喷管、火焰稳定器、涡轮罩环等；中期目标是应用在低压涡轮叶片、燃烧室、内锥体等；远期目标锁定在高压涡轮叶片、高压压气机和导向叶片等应用
	树脂基复合材料	航空发动机冷端部件(风扇机匣、压气机叶片、进气机匣等)和发动机短舱、反推力装置等部件上得到广泛应用
	金属基复合材料	适合用作发动机的中温段部件

资料来源：《一代新材料，一代新型发动机：航空发动机的发展趋势及其对材料的需求》，中国银河证券研究院

图43：航空发动机主要部件及对应材料

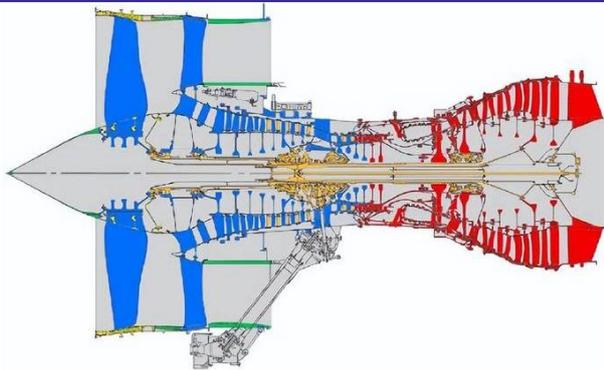


资料来源：航空产业网，中国银河证券研究院

**I. 高温合金：在新型航空发动机中，高温合金用量占发动机总重量的 40%~60%以上**

高温合金指能够在 600℃ 以上及一定应力条件下长期工作的一类金属材料，具有优异的高温强度、良好的抗氧化和抗热腐蚀性能，是军民航空发动机热端部件不可替代的关键材料。据《航空发动机材料结构的发展情况》，在新型的航空发动机中，高温合金用量占发动机总重量的 40%~60% 以上，其关键热端承力部件（红色部分）全部为高温合金。具体应用部件包括燃烧室、导向器、涡轮叶片和涡轮盘四大热端部件，此外还用于机匣、环件、加力燃烧室和尾喷口等部件。

图44：航空发动机中高温合金应用部位（红色部分）



资料来源：新材料在线，中国银河证券研究院

高温合金根据工艺不同，可分为变形高温合金、铸造高温合金和粉末高温合金 3 种不同类型。其中，变形高温合金占比超过 70%，铸造高温合金占比为 20%，粉末高温合金不到 10%。

变形高温合金具有良好的力学性能，仍然是航空发动机热端部件制造的主要材料之一，应用范围最广，主要用于制造航空发动机高压压气机后面级叶片、盘、机匣、燃烧室机匣等零部件。在我国，涡轮盘中变形高温合金 GH4169 合金用量最大、应用范围最广。

铸造高温合金具有较好的抗氧化和抗热腐蚀性能，主要用于制造高低压涡轮工作叶片和导向叶片等零部件。航空发动机叶片经历着等轴晶、第二代定向柱晶、第三代单晶的工艺升级过程，涡轮叶片的承温能力得到了大幅提升。我国的铸造高温合金紧随世界铸造高温合金的发展步伐，成体系地发展了从普通铸造高温合金到单晶高温合金的众多高温合金牌号。

表25：我国主要的铸造高温合金牌号及相应的研制单位

类型	合金牌号	主要研制单位
等轴晶合金	K401、K403、K405、K406、K406C、K419、K825、K477、K4022 K418、K418B、K423、K423A、K424、K480、K213、K4169 K417、K417G、K438、K438G、K441、K491、K417L K409、K640	北京航空材料研究院 冶金部钢铁研究总院 中国科学院金属研究所 上海钢铁研究所
定向柱晶合金	DZ4、DZ5、DZ22、DZ22B、DZ125 DZ17G、DZ40M、DZ38G、DZ125L	北京航空材料研究院 中国科学院金属研究所
单晶合金	DD3、DD4、DD6 DD402 DD8	北京航空材料研究院 冶金部钢铁研究总院 中国科学院金属研究所

资料来源：《航空发动机高温材料的研究现状及展望》，中国银河证券研究院

**粉末高温合金**是用粉末冶金工艺制备的高温合金，组织均匀、细小，提高合金的屈服和抗疲劳强度，主要用于制造航空发动机涡轮盘、压气机盘、鼓筒轴、封严盘、封严环、导风轮及涡轮盘高压挡板等高温承力转动部件。粉末冶金工艺解决了高合金化高温合金铸造偏析、热工艺性能差的缺点，使高合金化高温合金能够应用于工业生产，从而达到进一步提高航空发动机性能的目的。目前用于工业生产的粉末冶金高温合金牌号有 FGH95、FGH96、FGH97 等。

图45：高温合金在航空发动机上的应用



资料来源：图南股份招股书，中国银河证券研究院

目前，我国从事高温合金研发及制备的企业及研究所等单位共有十余家，已经形成了相对完整的高温合金生产体系。高温合金产业链由上游原材料及设备供应商、中游高温合金材料及制品生产商、下游应用终端组成。中游高温合金材料及制品生产商作为核心环节，主要包含三类参与者。第一类是兼具高温合金材料研发能力与生产能力的科研单位，包括钢研高纳、北京航材院、中科院金属所等；第二类是以抚顺特钢、宝钢特钢、长城特钢为代表的特钢厂；第三类是以西部超导、图南股份、隆达股份、应流股份等为代表的新兴冶金企业或金属加工企业，多数为民营背景。

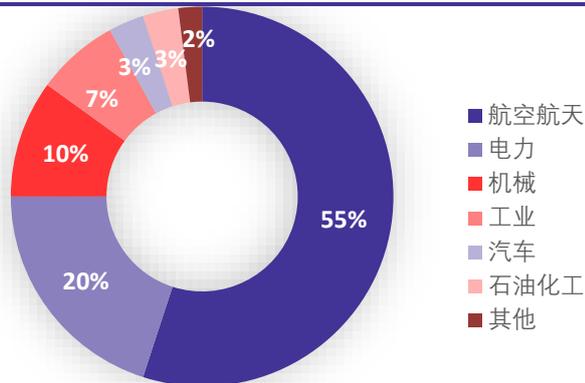
表26: 高温合金产业链

上游 供应商	原材料供应商			设备供应商						
	基体原材料	添加金属		真空感应熔炼炉、保护气氛电渣炉、真空自耗炉、电子束熔炉等						
	金川集团、上海炬上海炬嘉合金材料有限公司、中信锦州金属股份有限公司、丹阳航太再生资源有限公司等			ALD(德)、CONSARC(美)、RETECH(美)、INTECO(奥)、锦州航星真空设备有限公司、沈阳真空技术研究所、沈阳东大中乌冶金技术工程有限公司、宝鸡稀有金属装备设计研制所等						
中游 制造商	研发单位	变形高温合金			铸造高温合金			粉末高温合金		
		合金熔炼	精密锻造	精密机加工	母合金熔炼	精密铸造	精密机加工	母合金熔炼	制粉	精密机加工
	钢研所 621所 中科院金属所 北京科技大学 沈铸所	抚顺特钢 621所 钢研高纳 西部超导 江苏隆达	中航重机 二重万航 三角防务 图南股份 无锡透平	主机厂: 沈阳黎明 贵州黎明 西航公司 南方株洲 图南股份 江苏隆达	航材股份 钢研高纳 中科院金属所 图南股份 江苏隆达	主机厂: 沈阳黎明 贵州黎明 西航公司 南方株洲 贵航公司 其他: 621所 钢研高纳	主机厂: 沈阳黎明 贵州黎明 西航公司 南方株洲 其他: 应流股份	航材院 沈阳铸造研究所 钢研高纳 万泽股份	航材院 钢铁研究总院 西安欧中材料科技	航材院 钢研高纳 万泽股份
下游 应用	中国航空发动机研究院、株洲动力机械研究所、沈阳发动机设计研究所、贵阳发动机设计研究所、中国燃气涡轮研究所、沈阳黎明发动机制造公司、中国航发成都发动机有限公司、西安航空发动机集团有限公司、贵州黎明航空发动机有限责任公司、中国航发南方工业有限公司									

资料来源: wind、各公司公告与招股书, 中国银河证券研究院

**航空航天领域是高温合金最大应用场景。**目前, 高温合金主要应用于发动机领域, 包括航空发动机、航天火箭发动机和各种工业用燃气涡轮发动机。根据 Roskill 统计数据, 在高温合金的下游应用中, 按价值来分, 航空航天领域应用占比 55%, 其次是电力领域, 应用占比为 20%。随着新型高温合金材料的不断发展, 其下游应用场景和市场需求也在迅速扩张。

图46: 全球高温合金材料应用领域 (按价值分)



资料来源: Roskill, 中国银河证券研究院

根据我们此前发布的深度报告《最是春好处, 布局正当时》, 我们对高温合金主要应用领域的未来需求进行梳理统计, 预计未来每年我国高温合金需求约 5.82 万吨, 市场空间广阔。

**表27：我国高温合金在各领域主要需求预测（按重量统计）**

领域	主要假设	未来十年需求量	年均需求（吨）
军用航空发动机	假设发动机平均的高温合金需求均为 4.25 吨/台	未来 10 年需求 11.8 万吨	11805
商用航空发动机	假设未来 20 年我国共接收 9000 架飞机来算，其中 20% 国产 假设每台发动机高温部件 1.5 吨，成材率 30%	未来 20 年需求 2.54 万吨	1271
航天发动机	假设未来 10 年间维持每年至少 80 次航天发射 假设单枚火箭的高温合金部件质量占比 25%	未来 10 年需求达 7600 吨	760
工业发电用燃机	假设单台燃气轮机可发电 30 兆瓦； 假设每年新增装机 400 台	“十四五”期间需求达 12 万吨。	24000
管道增压用燃机	假设天然气管线每 100-200 公里设有一个压气站，每个压气站平均装备 2 台燃气轮机	“十四五”期间需求达 4.2 万吨	8400
军用舰船用燃机	假设平均每艘舰艇需 3 台燃气轮机 假设舰船的燃气轮机应用比例为 50%	-	1260
核电建设	假设一座 100 万千瓦的核电机组消耗 500 吨高温合金	2022-2025 年高温合金需求为 12096 吨；“十五五”期间高温合金需求量约为 20105 吨。	3024
汽车	假设未来汽车总产量维持 3% 增速，且新能源车渗透率不断提升	2022-2025 年，商用汽车高温合金需求量为 3.06 万吨，呈逐年递减态势。	7655
合计			58175

资料来源：银河军工《最是春好处，布局正当时》，中国银河证券研究院

**国内相关上市公司正积极进行扩产计划。**其中抚顺特钢将在 2022-2023 年度使用自有资金投资建设相关技术改造项目提升现有产能瓶颈，计划投资总额 10.76 亿元；隆达股份募投项目拟于 2022 年开始建设，2025 年建设完成，预计 2026 年新增产能 6,000 吨，2027 年和 2028 年分别增加 2,000 吨，公司将在 2028 年形成 18,000 吨高温合金产能（铸造高温母合金 5,000 吨，变形高温合金 13,000 吨）；中航上大拟募集资金建设年产 8,000 吨超纯净高性能高温合金。我们预计行业产能有望快速提升，供给能力将明显改善。

**总结来看，高温合金产业具有较高技术壁垒，前期投入大、认证周期长，新进入者很难在短期取得优势。**同时，军用高温合金应用端转换成本高，尤其是航空航天领域，一旦供应商确定，通常不会轻易更换，先发优势较为明显。因此，我们认为未来高温合金行业强者恒强，生产要素和产业机会将流向头部企业，具备技术优势的龙头公司有望获得更多的行业发展红利。建议关注抚顺特钢（600399.SH）、西部超导（688122.SH）、钢研高纳（300034.SZ）、图南股份（300855.SZ）。

## II. 钛合金：先进航空发动机中，高温钛合金用量占发动机总重量的 25-40%

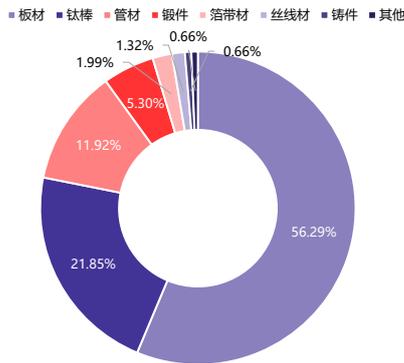
**钛合金指的是多种用钛与其他金属制成的合金金属。**早期制约钛合金运用的主要因素在于冶炼成本及加工成本长期居高不下，随着冶炼及锻造技术的进步，钛合金使用范围逐渐扩大。选用钛合金作为飞机结构件的优势如下：

- **结构减重。**钛在具备高强度的同时密度仅有  $4.54\text{g/cm}^3$ ，比强度高于其他多数金属结构材料。钛合金比同等强度的钢的密度低 40%，代替钢和镍基合金甚至高强度钢时，能够大量减重。
- **突破体积限制。**当结构载荷比较高、采用铝合金又受到结构空间限制时，强度较高的钛合金成为较理想的材料。波音飞机上采用大钛合金锻件以降低结构体积，比如起落架、框、梁。
- **耐高温。**较高的工作温度也是钛合金的一大优势。传统铝合金仅能适用于  $130\sim 150^\circ\text{C}$ ，在高温区域，采用钛合金更适宜，可以提高结构效率。
- **耐腐蚀。**钛在常温下会迅速形成致密氧化膜，具有优良的耐腐蚀性，使其在腐蚀严重区域得以大量应用。实际上钛合金在民用飞机运营环境中，几乎不会发生腐蚀现象。

根据基体组织的不同，钛合金可以分为三类，分别为  $\alpha$  合金、 $(\alpha + \beta)$  合金和  $\beta$  合金。 $\alpha$  型和近  $\alpha$  型钛合金具有良好的蠕变、持久性能和焊接性，适合在高温环境下使用。近  $\beta$  型和  $\beta$  型钛合金尽管在室温至 300℃ 具有高拉伸强度，但在更高温度下其蠕变抗力和持久性能急剧下降。 $\alpha + \beta$  型钛合金不仅具有良好的热加工性能，且在中温环境下具备良好的综合性能。按照发动机零件的使用环境和对材料的性能要求， **$\alpha$  型、近  $\alpha$  型和  $\alpha + \beta$  型钛合金更能满足发动机的工作要求，广泛用于发动机冷端部件。**

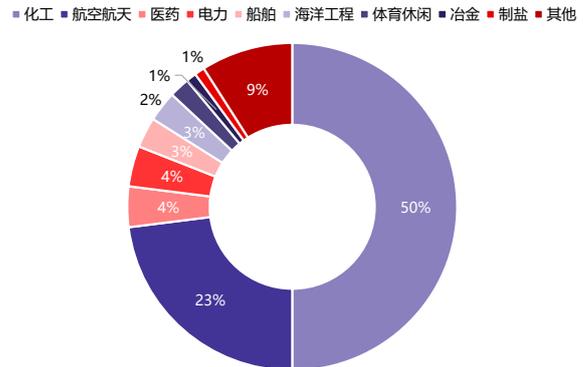
钛产业的直接上游为矿产开采和冶炼，产品主要为钛精矿和钛铁矿，中游钛材产品分为板材(市场结构占比 56.3%)、棒材(21.9%)、管材(11.9%)、锻件(5.3%)等，主要用于化工(市场结构占比 50%)、航空航天(23%)、医药(4%)等。

图47：2022 年我国钛材产品结构



资料来源：中国有色金属工业协会钛锆铅分会，中国银河证券研究院

图48：2022 年我国下游用量占比情况

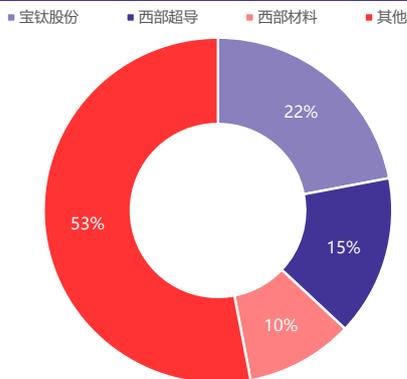


资料来源：中国有色金属工业协会钛锆铅分会，中国银河证券研究院

**中低端钛产品已实现自给自足，高端钛材仍依赖进口。**需求结构上，我国中低端钛产品已实现自给自足，盈余产能向国外释放。根据中国海关总署数据，2022 年我国各类钛材进口 7479 吨（5.52 亿美元），与 2021 年基本持平；出口 26,313 吨（7.59 亿美元），同比增长 22%。目前我国钛材产能已成为世界第一，但与美日俄在钛加工技术上仍有较大差距，10-15%的钛材需求依赖进口。

**在供给结构上，我国钛加工材产业集中度较高。**市场份额主要由宝钛股份（600456.SH）、西部超导（688122.SH）和西部材料（002149.SZ）占据。根据中商产业研究院数据，2021 年前三家企业市场份额达 47.0%，前十家企业市场占比达 78.7%，其中宝钛股份为我国最大的钛及钛加工材生产企业，占据我国 20%以上市场份额。

图49：钛加工行业市场竞争格局



资料来源：中商产业研究院，中国银河证券研究院

**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%，**如第三代发动机 F100 的钛合金用量为 25%、第四代发动机 F119 的钛合金用量为 40%。国内航空发动机钛合金用量较国外先进水平尚有差距，例如我国设计制造的 WP13 发动机用钛量为 13%、WP-14 提升至 15%，请务必阅读正文最后的中国银河证券股份有限公司免责声明。

国产第三代大推力涡扇发动机 WS-10 发动机钛合金用量约为 25%。2021 年中科院金属研究所研制的钛铝合金的发动机叶片首次应用于 CJ1000，助力国产大飞机打破进口依赖。

随着国内高端钛合金产业逐步成熟以及新机型（包括发动机）对钛合金需求的提升，行业相关上市公司将深度受益，建议关注宝钛股份(600456)、西部超导(688122)、西部材料(002149)等。

### III. 隐身材料：降低进/排气系统的红外和雷达特征实现发动机“隐身”

**发动机实现隐身，即降低进/排气系统的红外和雷达特征，是战斗机实现隐身的重要前提。**涡扇发动机是作战飞机的主要动力，其进/排气系统是重要的雷达散射源和红外辐射源。发动机雷达隐身技术就是通过对腔体结构的设计、材料的选择等措施来减小进/排气系统在雷达入射波方向上的反射波强度，从而降低飞机被敌方雷达发现的概率。

- **雷达散射源：**涡扇发动机进气系统腔体、排气系统腔体、各种缝隙和边缘是主要的雷达波散射源，其雷达特征与腔体、缝隙和边缘的形状、大小及材料的电磁特性有关。
- **红外辐射源。**发动机的进气系统腔体、排气系统腔体和尾喷流是重要的红外辐射源。发动机红外隐身技术就是通过各种措施尽量降低进/排气系统在威胁方向上的红外辐射特征，从而降低敌方红外探测系统发现的概率。

常用的进/排气系统雷达隐身技术主要有遮挡雷达散射源、边缘修形、雷达波吸收材料和结构吸收雷达波能量等。常用的进/排气系统红外隐身技术主要有遮挡红外辐射源、高温壁面的冷却和尾喷流的快速降温、合理的表面材料选择、合理设计降低红外特征。一般而言，雷达隐身和红外隐身技术都将导致进/排气流道的总压损失增加，从而导致发动机推力的下降和耗油率的升高。

**表28：常用的发动机进/排气系统隐身技术**

隐身	特征
雷达隐身技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 遮挡雷达散射源，使其避免或减少被雷达波直接照射的机会；</li> <li>• 进气口、喷口和缝隙等各种边缘修形，使雷达波的主要反射方向偏离威胁方接收机；</li> <li>• 在被雷达波直接照射和反射波照射的表面上采用雷达波吸收材料和结构吸收雷达波能量，减少雷达波的反射。</li> </ul>
红外隐身技术	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 遮挡红外辐射源，避免或减少其被红外探测器直接观测的机会；</li> <li>• 高温壁面的冷却和尾喷流的快速降温；</li> <li>• 合理的表面材料选择；</li> <li>• 通过发动机热力循环参数的合理设计降低红外特征。</li> </ul>
激光隐身材料	降低目标表面的反射系数，减小激光探测器的回波功率，降低激光探测器的性能
多频谱隐身材料	在多频段、多手段探测技术发展背景下出现的新型隐身材料，具有多重隐身功能或宽频段隐身功能，常见的有雷达/红外兼容隐身、可见光/红外兼容隐身材料

资料来源：《飞发一体化设计中的发动机隐身问题》，中国银河证券研究院

**国外隐身技术起步较早，已形成系统化解决方案。**世界军事强国的武器装备隐身化呈现出从部分隐身到全隐身、从单一功能隐身到多功能隐身、从少数武器装备隐身到实现多数主战兵器装备隐身的循序渐进的发展趋势，且隐身技术正向“多频谱、全方位、全天候、智能化”的方向发展。

表29：国外隐身材料发展情况

国家	隐身材料发展概况
美国	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要的隐身方式采用隐身涂层材料及结构隐身复合材料</li> <li>典型代表：F-117A 隐身攻击战斗机、F-22 战斗机、F-35 战斗机、B-2 隐身战略轰炸机</li> <li>以 F-22 战斗机为例，其重点部位（如进气道和机翼前后缘）采用了将隐身涂层涂覆于吸波结构材料表面的方法，高频雷达信号被表面吸波涂层吸收，低频雷达信号则被吸波结构材料吸收</li> </ul>
俄罗斯	<ul style="list-style-type: none"> <li>采用等离子体隐身技术，通过在飞机或导弹某些部位加等离子体发生器，在飞行器表面形成等离子云。等离子云团对电磁波在其中的传播影响很大，可以反射、折射或吸收在其中传播的电磁波能量，从而达到隐身目的</li> <li>3M25 “流星”高超音速战略巡航导弹采用等离子体发生装置隐身</li> </ul>
法国	<ul style="list-style-type: none"> <li>马特拉防御公司研制成功耐 1000℃ 高温陶瓷基隐身材料，可以用作亚音速导弹某些部位的面层，如喷管或进气道</li> <li>SiC/SiC 陶瓷基复合隐身材料已经成功应用 M88-2 发动机喷管外调节片和 F100 型发动机调节片</li> </ul>
日本	<ul style="list-style-type: none"> <li>日本三菱重工研制的空舰导弹 ASM-1 和地舰导弹 SSM-1 的弹翼等部位均采用了结构型吸波材料</li> </ul>

资料来源：华泰科技招股说明书，中国银河证券研究院

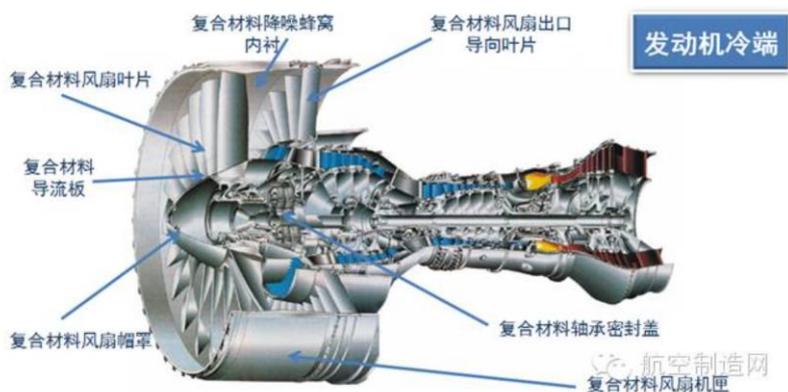
目前主流隐身材料依然以隐身涂层和结构隐身复合材料为主，但新的隐身机理和技术手段（如仿生技术隐身、等离子体隐身、微波传播指示隐身、有源隐身技术等）、新型隐身材料的研制（如手性材料、纳米隐形材料、导电高聚物材料、光子晶体、智能型隐形材料等）也在不断发展。国内隐身材料市场尚处于早期阶段，发展空间巨大，建议关注相关上市公司，包括华泰科技（688281.SH）、光启技术（002625.SZ）、佳驰科技（A22176.SH）、新劲刚（300629.SZ）等。

#### IV. 复合材料：未来航空发动机研制中，新材料对性能提高的贡献率为 50%-70%

开发和应用轻质、高强、耐高温的材料是提升航空发动机减重效率、推重比、燃油经济性的重要手段，也是航空发动机未来的发展趋势。一代材料、一代航空发动机，材料是决定航空发动机性能、耐久性、维修性和成本的重要因素。复合材料的发展为发动机性能的持续提升带来可能。航空发动机广泛使用的复合材料主要包括树脂基复合材料、陶瓷基复合材料和金属基复合材料。

- 树脂基复合材料：**以树脂材料为基体的纤维增强材料，通常使用玻璃纤维、碳纤维、玄武岩纤维或者芳纶等纤维增强体。目前广泛应用的树脂主要包括环氧树脂、双马树脂和聚酰亚胺树脂，增强纤维主要包括碳纤维、玻璃纤维。树脂基复合材料的服役温度一般不超过 350℃，因其良好的抗疲劳性、抗腐蚀性、减震性等优势，广泛用于航空发动机的进气道、风扇整流罩等关键冷端部件。

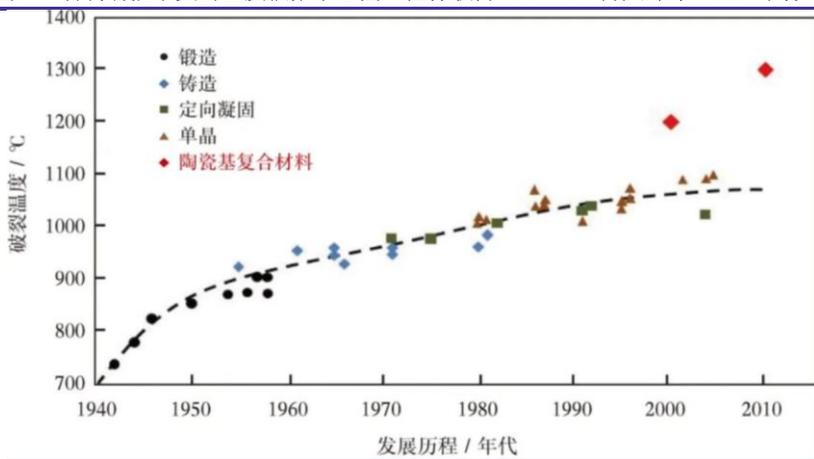
图50：树脂基复合材料在国外先进航空发动机冷端上的主要应用部位



资料来源：航空制造网，中国银河证券研究院

- 陶瓷基复合材料**：以陶瓷为基体与各种纤维复合的一类复合材料，因其具备低密度、耐高温、抗氧化等特性，成为航空发动机用高温材料的重要部分。目前高温合金的耐温极限维持在 1100℃ 附近，而陶瓷基复合材料的耐温能力可提升至 1200-1350℃。此外，陶瓷基复合材料构件质量通常为镍基高温合金构件质量的 1/4-1/3，可通过减轻质量提升燃油经济性。此外，陶瓷基复合材料的明显缺陷是脆性，应力状态时会产生裂纹甚至断裂。因此，具有优良韧性的纤维增强陶瓷基复合材料是提升陶瓷韧性和可靠性的有效方法。

图51：材料所能承受的温度极限示意图（拉伸载荷 137MPa、持久寿命 1000h 条件）



资料来源：航空动力，中国银河证券研究院

目前各大航空发动机制造商正积极推进连续纤维增强陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用。如法国斯奈克玛公司生产的连续纤维增强陶瓷基复合材料的调节片、封严片等部件已经装机使用。英国罗罗公司则计划在未来航空发动机涡轮盘、涡轮叶片、高压压气机叶片、机匣、燃烧室、尾喷管等部件均采用陶瓷基复合材料。

- 金属基复合材料**：以金属及其合金为基体，与一种或几种金属或非金属增强相人工结合成的复合材料，其增强材料大多为无机非金属，比如陶瓷、碳、石墨及硼等。金属基复合材料在的横向及剪切强度较高，与树脂基复合材料相比，其韧性及疲劳等综合力学性能较好，广泛用于航空发动机的涡轮风扇叶片、涡轮及压气机密封元件等承力组件。
- 高温涂层材料**：高温涂层材料主要作用是保护航空发动机热端部件不受高温燃气的氧化侵蚀，延长发动机的使用寿命。目前已使用的高温涂层材料主要有铝化物、MCrAlY 涂层以及热障涂层等。

根据《航空发动机结构及其关键材料技术分析》，未来航空发动机研制中，新材料对性能提高的贡献率为 50%-70%，材料和制造技术对减重的贡献率为 70%-80%。航空发动机的发展和迭代离不开新材料尤其是复合材料的不断优化与创新，建议关注国内从事航空发动机复合材料生产与研究的上市公司包括中航高科（600862.SH）、光威复材（300699.SZ）、中简科技（300777.SZ）等。

## 2、中游零部件制造：锻件重量占发动机结构总重量的 55%~65%，精密铸造技术要求高

航空发动机零部件行业产业链主要由上游的原材料供应商、中游的零部件供应商、单元体供应商、下游的发动机整机制造商构成。整机制造商主要分布于美国、法国、英国等，单元体制造商主要分布于日本、欧洲国家。

表30：航发中游制造参与企业

	代表厂商	特点
单元体/组件制造商	MTU、ITP、Avio、VolvoAero、MHI、IHI、SAB、TEI 等	<ul style="list-style-type: none"> <li>在航空发动机单元体的设计和制造方面具有自身独特优势，具备自主研发设计能力</li> <li>整机制造商采取风险收益共享机制（R·RSP）联合单元体制造商进行绑定，共享发动机开发、制造、交付使用期间的风险和收益</li> <li>集中于欧美、日本等工业发达国家</li> </ul>
成品零部件制造商	GKN、RLC、HANWHA、AIDC、LISI、ADindustries、航发科技、航亚科技、新研股份等	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要为整机厂商、单元体制造商提供发动机的零部件，遵循严格的供应商认证制度</li> <li>多分布于新兴市场</li> </ul>
铸锻件及毛坯件供应商	PCC、中航重机、三角防务、钢研高纳、图南股份等	<ul style="list-style-type: none"> <li>主要为单元体制造商、成品零部件制造商提供锻铸毛件及毛坯件</li> <li>遵循严格的供应商认证制度</li> </ul>

资料来源：公司公告，中国银河证券研究院

**按发动机不同部位来分。**航空发动机是由三万多个零部件构成的精密的、复杂的系统。它主要分为五大部件，按照气流流动方向，即进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管，其中发动机核心机包含中间三大部件。

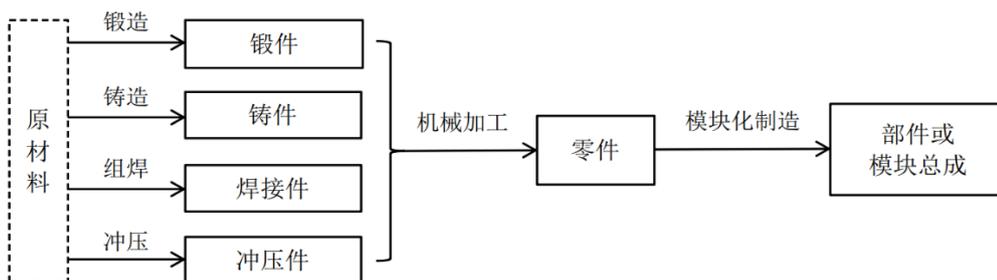
表31：发动机核心机主要部件及其生产工艺

核心机	部件	生产工艺	
压气机	静子（工作轮）	叶片	精密锻造
		叶盘	盘类锻件（高温钛合金）
		整体叶盘	精密铸造
	转子（导向器）	轴	锻造
		叶片	精密锻造（变形高温合金）
涡轮	工作叶片	机匣	环锻（高温钛合金）
		精密铸造（铸造母合金）	
	导向器（导向叶片）	精密铸造（铸造母合金）	
		涡轮盘	铸锻工艺/粉末冶金（变形高温合金、粉末高温合金）
燃烧室		部分型号使用盘类锻件（变形高温合金、不锈钢和结构钢）	

资料来源：公司公告，中国银河证券研究院

**按照不同成形工艺分。**发动机零部件的制造工艺过程从毛坯成形开始，零件毛坯按照不同的成形工艺，分为锻件、铸件、焊接结构件、冲压件等，经过热处理、精加工、模块化制造等工艺过程，成为符合特定要求的零部件或模块化总成。

图52：零部件产业链



资料来源：中为咨询网，中国银河证券研究院

### I. 锻造：先进航空发动机中高温合金和钛合金锻件重量占发动机总结构重量的 55%~65%

锻造是一种利用锻压机械对金属坯料施加压力，使其产生塑性变形以获得具有一定机械性能、一定形状和尺寸锻件的加工方法，是锻压（锻造与冲压）的两大组成部分之一。通过锻造能消除金属在冶炼过程中产生的铸态疏松等缺陷，优化微观组织结构，同时由于保存了完整的金属流线，锻件的机械性能一般优于同样材料的铸件。根据成形机理，锻造可分为自由锻、模锻、辗环。

表32: 锻造分类

工艺名称	工艺描述	特点
自由锻	指用简单的通用性工具,使坯料产生变形而获得所需几何形状及内部质量的锻件的加工方法。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 工具和设备简单,通用性好,成本低。锻件形状简单,操作灵活。</li> </ul>
模锻	模锻又分为开式模锻和闭式模锻。金属坯料在具有一定形状的锻模膛内受压变形而获得锻件。	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 由于有模膛引导金属的流动,锻件的形状可以比较复杂。</li> <li>• 锻造流线按锻件轮廓分布,从而提高了零件的力学性能和使用寿命。</li> <li>• 操作简单,易于实现机械化,生产率高</li> <li>• 与传统的模锻比较,其优点为:                             <ol style="list-style-type: none"> <li>1、由于是回转成形,接触面积小,故轧制压力减少,设备吨位小。。</li> <li>2、可以做大型环类零件。</li> <li>3、材料利用率高。没有模锻飞边与拔模斜度,尺寸精度高。</li> <li>4、内在质量好。碾环变形为径向压缩,周向延伸,金属纤维沿环件周围连续分布,有利于环形零件的承载与耐磨性能。</li> </ol> </li> </ul>
碾环	碾环是指通过专用设备碾环机生产不同直径的环形零件;通过轧制将带孔的坯料,厚度碾薄,直径扩大成环形零件。	

资料来源:公司公告,中国银河证券研究院

先进航空发动机中高温合金和钛合金锻件重量占发动机总结构重量的 55%~65%。随着高新技术武器装备向小型化、精确化、轻量化、高可靠、低成本方向发展,对结构件及其成形工艺的要求越来越高,促使塑性成形技术向精密、整体、复杂、高性能、高可靠、低成本方向发展。美国航空工业中的精密模锻件占零件品种的 80%以上,俄罗斯占到 70%~75%,日本占到 63.9%。

盘类锻件: 涡轮风扇式发动机的盘件主要包括风扇、压气机、涡轮及部分型号中的燃烧室。

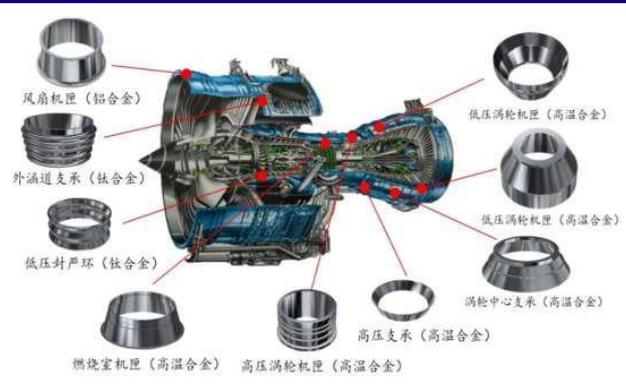
环形锻件: 主要为机匣和其他环锻件。按价值计算,航空发动机环形锻件约占航空发动机价值的 6%。

图53: 航空发动机盘类锻件



资料来源:三角防务招股书,中国银河证券研究院

图54: 航空发动机环类锻件



资料来源:航宇科技招股书,中国银河证券研究院

从国际市场来看,由于航空锻件与普通锻件在应用领域和技术工艺水平等方面存在差异,因此航空难变形金属材料环形锻件生产企业与普通环形锻件企业基本不会产生直接竞争。从航空锻造领域的竞争格局来看,美国和日本等发达国家走在世界前列,依托高端的生产设备及先进的加工工艺,能够生产出大尺寸、高精度、高性能的高品质环形锻件,占据着航空航天、燃气轮机、能源装备等主要高端应用市场。

从国内市场竞争格局来看,国内普通锻造企业较多,没有接触航空难变形材料,技术水平一般,市场竞争较为激烈。而在航空锻件领域,由于航空发动机对锻件质量要求极高,在技术、工艺、设备、资金、人员、认证资质方面均有很高的进入壁垒,只有少数企业能进入该行业,市场竞争程度相对较低。

军工锻件产品制造行业企业主要包括国有大型军工企业或其下属科研院所和民营军品生产企业。国有大型军工企业凭借其技术实力、资金实力、规模优势,成为军工产品的主要生产商,竞争优势显著,而少数具有军品生产资质的民营企业更多集中在产品配套域。

表33：国内锻造主要相关公司

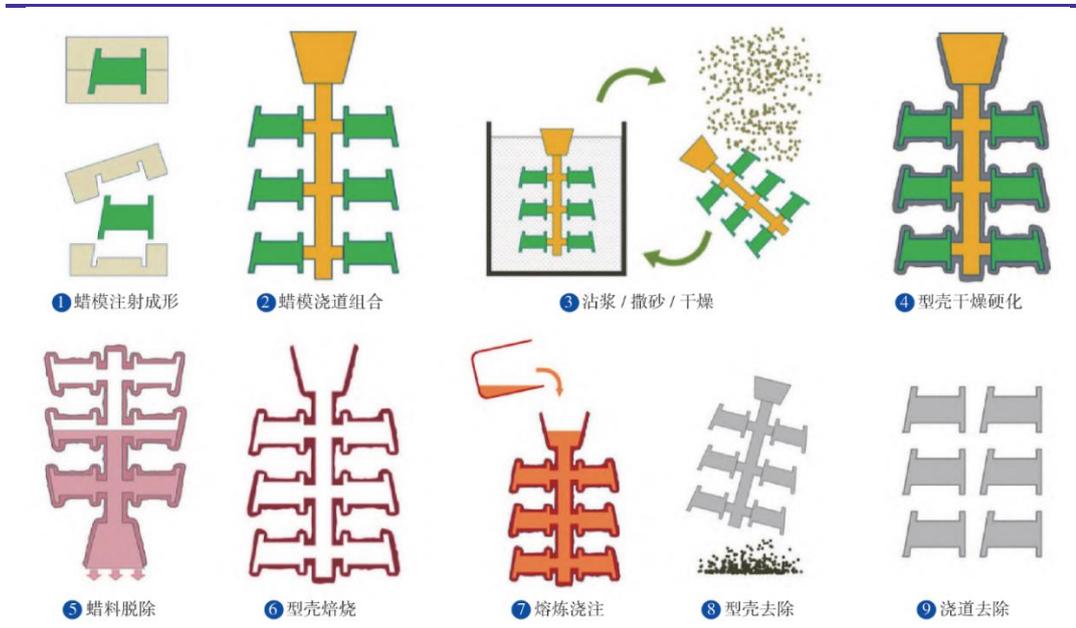
公司名称	简要介绍
中航重机	安大锻造 产品以航空环形锻件为主，同时从事一定规模的航空模锻件业务，产品主要应用于航空发动机、燃气轮机、大型机械产品。
	宏远锻造 产品以航空模锻件为主，同时从事一定规模的航空环形锻件业务，产品主要应用于飞机机身、航空发动机。
德阳万航模锻	是中国二重集团公司的全资子公司，装备有 800MN 模锻液压机，以研制生产航空锻件为主导产品。公司具备各类大型模锻件、大型模具的制造能力以及模锻件的粗加工和成套机械产品的生产能力。
派克新材	主营产品分军品、民品两大系列，涵盖辗制环轧锻件、自由锻件、精密模锻件等各类金属锻件，可应用于航空、航天、船舶、电力、石化以及其他各类机械等多个行业领域。
航宇科技	产品以航空发动机锻件为主，也为辅助动力装置、飞机短舱、飞机起落架等飞机部件提供航空锻件。
航亚科技	公司具备研发、生产及销售压气机叶片、整体叶盘、涡轮盘、盘环件等关键零部件，属于航空发动机关键零部件供应商。公司目前是国内具备以精密技术实现压气机叶片大规模量产并供货于国际领先发动机厂商的内资企业。

资料来源：公司公告，中国银河证券研究院

## II. 铸造：精密铸造工艺技术难度高，国内企业数量有限

精密铸造又称熔模精密铸造、失蜡铸造，通常指通过蜡料复制零件，然后在蜡料表面涂覆耐火材料形成型壳，再熔化脱除蜡料，最后向型壳中注入金属液形成铸件的工艺过程。

图55：精密铸造主要工艺过程



资料来源：《航空发动机异形构件精密铸造技术》，中国银河证券研究院

**航空发动机结构件精密铸造工艺具有相当高的技术难度。**一方面精密铸造工艺过程涉及的工序繁多，生产周期长，且各工序均存在不同程度上影响精铸件冶金质量和尺寸形状的技术因素；另一方面为保障航空发动机的服役安全，精铸件的质量检验项目多，并且各项技术条件十分严苛，任何化学成分、力学性能、晶粒度、显微组织、表面质量、内部冶金质量或尺寸外形等因素的不合格都将导致铸件报废。

高温合金精密铸件是应用于航空发动机、燃气轮机热端部分的关键部件，包括机匣类大型复杂薄壁结构件、涡轮转动及导向叶片、整体叶盘、导向器、扩压器等。

图56：部分航发铸造件



资料来源：《轻量化精密铸造成型技术在航空航天关键部件中的应用》，中国银河证券研究院

世界范围内，航空发动机和燃气轮机高温合金叶片等热端部件，仅有美国、英国等少数发达国家部分厂商处于明显领先优势，不能满足航空发动机和燃气轮机整机制造企业的需求。

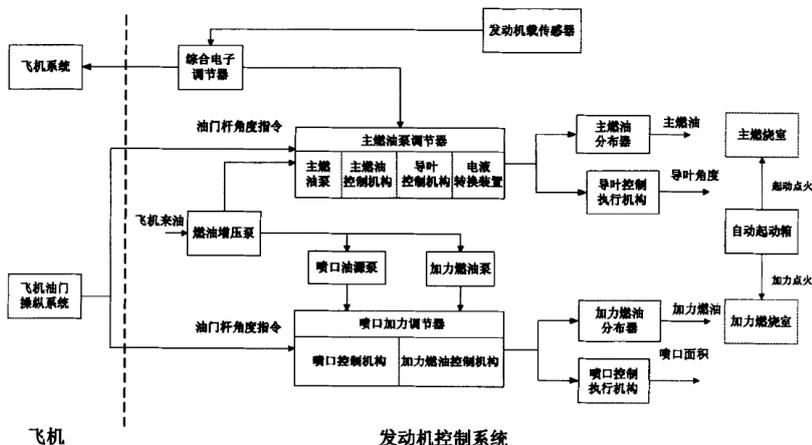
国内现从事高温合金材料及高温合金精密铸件生产的企业数量有限，主要是基于国家在计划经济时期规划的高温合金生产基地和研发基地，以及一些原航空工业配套高温合金铸件的专业铸造单位。以钢研总院、中科院金属所、北京航材院为代表的研究、生产基地，如航材股份、钢研高纳、中科三耐、安吉铸造等，以及图南股份、应流股份、万泽股份和炼石航空等民营配套企业。

### 3、中游分系统：动力控制系统约占发动机整体价值的 10%-20%

航空发动机的控制系统根据发动机状态和发动机外界环境变化控制发动机的各调节参数，保证发动机工作稳定，并提高发动机性能。目前，航空发动机控制系统主要可实现的控制包括：输出参数（推力或功率）控制、燃油流量控制、压气机可调静子叶片控制、可调放气活门控制、涡轮间隙自动控制、高压压气机、涡轮冷却空气流量控制、发动机滑油和燃油温度管理、发动机安全保护、启动和点火控制、反推控制等。动力控制系统是航空发动机的主要组件，在整个产业链条中属于必不可少的部分，约占发动机整体价值的 10%-20%。

根据被控用途来看，发动机机控制系统可以分为：主燃油控制系统、加力燃油控制系统、启动控制系统、导叶控制系统、喷口控制系统等子系统。

图57：控制系统框图

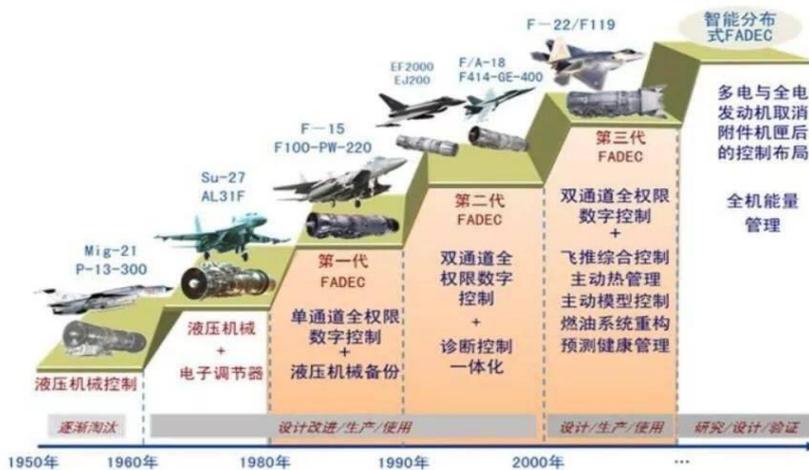


资料来源：《军用发动机控制系统技术分析及改进研究》，中国银河证券研究院

根据控制系统不同的实现方式，航空发动机的控制系统可以分为：机械液压式控制（或机械气动式控制）、监控型电子控制、全权限电子控制（FADEC）。目前，现代航空发动机基本采用 FADEC 系统。

- **机械液压式控制**：在最早期的航空发动机控制中，主调节器只有“燃油”控制变量，通过手动操纵油门开关控制发动机转速。此后，液压机械装置发展为功能更为完备的液压机械式调节器，引入“发动机转速”、“进口温度”和“压气机压力”等参数，利用杠杆、三维凸轮等复杂的计算结构实现发动机控制。
- **监控型电子控制**：随着电子技术的发展，液压机械控制系统上增加了模拟电子调节器，航空发动机控制系统的主要功能仍然由液压机械式控制器完成（如转速控制、启动、加速、减速控制等），发动机电子控制的主要作用是监控和限制，确保精确的推力控制，同时避免超出发动机工作限制范围。
- **全权限电子控制（FADEC）系统**：全权限电子控制系统包括发动机电子控制器（EEC）、液压机械装置（HMU）、传感器、作动器、活门等，能够提供比先前两种控制系统更多的控制参数。其中，EEC是控制的核心，所有的控制运算均在EEC内进行，此后通过电液伺服机构输出控制液压机械装置及各个活门、作动器等。此前的液压机械组件从最初的控制计算逐渐演变为单纯的执行功能。

图58：航空发动机控制技术发展历程



资料来源：《航空发动机控制系统发展概述》，中国银河证券研究院

数字电子控制是航空发动机控制技术发展的必然趋势。世界航空技术强国通过几十年的发展，已经取得了长足进步，开发出了技术先进、安全可靠的产品，并朝着分布式控制、飞发综合控制等方向发展。相比之下，我国在发动机控制领域，尤其是数字电子控制方面有较大差距。目前，我国高性能军用航空发动机的型号研制工作已结合国内型号研制和预研工作，开发符合中国国情的航空发动机数控系统，从而缩短与先进国家的技术差距。

目前，我国航发控制系统主要由上市公司航发控制（000738.SZ）和中国航发控制系统研究所（614所）供给，其中，上市公司航发控制主要负责机械液压部分的研发，614所主要负责电子部分的系统集成（电子硬件和软件），同时也是国内FADEC系统研制的主力军。

## 4、下游整机制造&维修运营：整机壁垒最高，维修运营价值占全生命周期 50%

### I. 整机制造：产业链壁垒最高，国内外皆成寡头垄断态势

航空发动机整机制造是整条产业链中壁垒最高、难度最高的环节，覆盖从所有零件、成附件到各级组件、单元体、主单元体直至整机的全部装配和分解过程，同时也涉及装配分解过程中的转子零部件平衡、检测、清洗等流程。

航空发动机主机厂将核心能力定位于设计、工程和系统集成，并研发、制造少数关键分系统和零部件，其余大量的分系统和部件均转包或分包给其他专业化公司。作为供应链系统的链长，主机厂通过对资源进行协同组织和管理来实现产品交付。

目前，我国航空发动机整机集成交付领域包括八大主机厂，均为中国航发集团下属企业，分别为上市公司航发动力旗下的西航公司、沈阳黎明、贵州黎阳、南方公司，上市公司航发科技旗下的成发公司，以及航发商发、哈尔滨东安和南京轻动。在航发动力下属的四大主机厂中，西航公司、沈阳黎明定位为中大型涡轮、涡喷发动机研制生产维保基地，贵州黎阳定位为中小推力航空发动机研制生产维保基地，南方工业定位为涡桨、涡轴发动机研制生产维保基地。

表34：我国航发整机生产商

公司	产品	产品型号	搭载飞机平台
西航公司（430）	军用大中航空发动机	WS-9/10/20、WP-8	Y-20、H-6
沈阳黎明（410）	军用大中推力航空发动机	WS-10/15； WP-5/6/7/13/14	J-10/11/15/16/20
贵州黎阳（460）	军用中小推力航空发动机	WS-13；WP-7/13	FC-1、FC-31
南方公司（331）	军用中小型涡轴和涡桨发动机	WS-11； WZ-8/9/10/11/16； WJ-5/6/9.10	K-8、L11、 Z-7/9/11/20；WZ-11 Y-7/8/12
成发公司（420）	军用航空发动机、燃气轮机	WS-18	Y-20、H-6K
航发商发	民用商发	CJ-500/1000/2000	ARJ21、C919、CRJ929
哈尔滨东安（120）	军用轻型航空发动机	WZ-16	Z-10/15
常州兰翔（370）	军用直升机发动机	WZ-6	Z-8

资料来源：公司公告，中国银河证券研究院

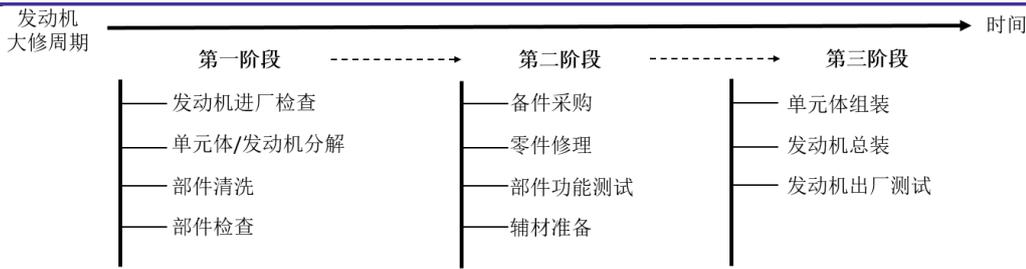
### II. 维修运营：后市场规模占全生命周期的 50%，价值亟待发现

#### 1) 维修内容和频次

航空发动机维护阶段的成本约占全生命周期价值量的 50%，而发动机维修价值量占 22%，成为除零备件航材（51%）之外，在维护阶段价值量最大的环节。根据维修深度的不同，发动机的维修工作通常划分航线维护（航线）、定期检修（定检）和进厂翻修（大修）三个级别。

- 航线维护指在航线上所进行的维修工作，通常包括在完成飞行前、在飞行中转时、飞行完成后对发动机所进行的维护，此类工作通常是在航站上实施的。
- 定期检修指航空公司按照生产厂家的维修大纲要求，对航空发动机进行定期的检查和维修。通过发动机的各个系统进行维护及测试，可以排除潜在的故障、提高发动机的可靠性。对于大型的航空公司，定期检修不需要送到发动机大修厂进行维修。
- 进厂翻修（大修）是在航空发动机在翼时间已经接近厂家规定的最终寿命或返修时限，或者发动机的性能已经大幅度下降时，进行全面的分解、检查和修理工作。航空公司和维修厂家会根据生产厂家的指导性文件以及发动机状态，制定一份详细的维修方案（即送修工作范围），将发动机恢复至性能状态的设计值。

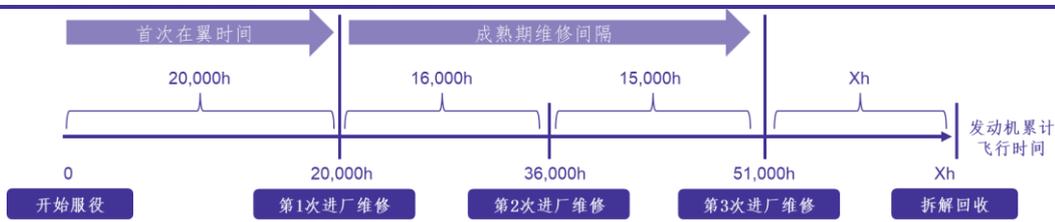
图59：航空发动机大修流程



资料来源：《X 航空公司飞机发动机大修成本管理优化研究》，中国银河证券研究院

以一台典型的窄体飞机发动机为例，在其经济性寿命内，通常会经历三次性能恢复级别的翻修，第一次发生在开始服役后的 20,000 发动机飞行小时左右，第二次发生在第一次性能恢复后的 16,000 发动机飞行小时左右，第三次发生在第二次性能恢复后的 15,000 发动机飞行小时左右。发动机首次翻修时间比成熟期翻修时间间隔长 25% 左右。

图60：典型窄体飞机发动机的返厂维修时间间隔



资料来源：《商用航空发动机的价值构成分析》，中国银河证券研究院

## 2) 行业参与者

航空维修领域，不同维修对象的业务之间不形成直接竞争航空维修领域项目多，不同项目在维修技术、维修设备、维修周期等方面差异较大，航线维护、发动机维修、机体维修、机载设备维修等对不同维修对象的服务之间并不形成竞争。

**军用航发维修方面**，目前大部分企业的航空发动机维修业务在企业内部属于批产的附属部分，未能形成独立的维修能力。特别是航空发动机零部件的深度修理还处于起步阶段，需要大力发展。中国人民解放军第五七一九工厂（隶属于空军装备部）是国家大型、军队一级企业，空、海军新型航空发动机修理基地。航发动力是国内大型航空发动机制造基地企业，国内唯一的生产制造涡喷、涡扇、涡轴、涡桨、活塞全种类军用航空发动机的企业。旗下黎明、南方等主机厂也从事发动机修理业务，同时公司间接 100% 控股的贵动公司、联营企业晋航公司主营发动机修理业务。

截止 2023H1，航发动力航发维修募投项目已竣工并投入生产，23H1 两项募投项目合计形成产值 4.3 亿元。

表35：航发动力航发维修相关募投项目进展

项目	投资金额 (亿元)	投资进度 (截止 23H1)	项目达到预定可使用状态日期	23H1 实现的效益	备注
航空发动机修理能力建设(本部)	6 (其中募集资金 2 亿)	100%	2022 年 12 月	形成产值 1.9 亿元	2023/8/18 竣工，针对涡扇发动机部件维修需求进行建设，维修能力为年维修航空发动机部件 1450 套。
涡轴航空发动机修理能力建设(南方公司)	1.2	100%	2018 年 12 月	形成产值 2.4 亿元	新建厂房、新增部分关键工艺设备和设施，年修理涡轴发动机 90 台。

资料来源：航发动力，中国银河证券研究院

民用航发维修方面，我国境内发动机维修、机体维修企业主要包括珠海保税区摩天宇航空发动机维修有限公司（珠海 MTU）、四川斯奈克玛航空发动机维修有限公司（SSAMC）、厦门太古飞机维修工程有限公司（TEACO）等 OEM 厂家合资企业，以及北京飞机维修工程有限公司（AMECO）、广州飞机维修工程有限公司（GAMECO）、中国东方航空工程技术公司等民航企业投资的维修企业。

表36：国内主要航空发动机维修企业

类型	公司名称	简要情况
军用维修	航发动力	公司是国内大型航空发动机制造基地企业，国内唯一的生产制造涡喷、涡扇、涡轴、涡桨、活塞全种类军用航空发动机的企业。
	解放军 5719 厂	国内首家将金属 3D 打印技术工程化应用于航空发动机涡轮叶片等关键零部件再制造的单位，也是全球第三家家民航客舱座椅电源制造商，还是 GE、普惠等公司的供应商。
第三方维修	海特高新	公司主要从事航空机载设备的检测、维护、修理及支线飞机、直升机及公务机中小型发动机的维修，航空技术及软件开发，航空机载设备及航空测试设备的研制和销售业务。
	武汉航达航空科技发展有限公司	目前已成为多款国产飞机的系统供应商，另开发了不少通航产品的大修能力，如：发动机、螺旋桨、发电机、作动器等关键部件，其中发动机、螺旋桨已得到原厂的认可和授权。
OEM 厂家合资企业	摩天宇航空发动机维修有限公司（珠海 MTU）	公司是 MTU 航空发动机股份公司与南方航空 50/50 合资企业，致力于 CFM56、LEAP、V2500 和 PW1100 等窄体飞机发动机的维修。
	四川国际航空发动机维修有限公司（SSAMC）	公司致力于 CFM56 系列发动机和 LEAP 系列发动机维护、修理和大修（MRO）
	厦门太古飞机维修工程有限公司（TEACO）	公司是亚太地区领先的飞机维修、修理及大修服务供应商，主要经营飞机发动机及其部件、飞机零部件的生产、制造或装配的筹备、进出口、批发、零售和租赁，以及仓储经营服务。
民航企业投资的维修企业	北京飞机维修工程有限公司（AMECO）	公司由中国国航和德国汉莎航空公司合资成立，主营业务包括对西制飞机机体、结构，飞机发动机及飞机附件的维修和大修，同时还提供全面的技术服务和培训。
	广州飞机维修工程有限公司（GAMECO）	公司由南方航空与和记黄埔飞机维修投资（香港）等合资成立。主要从事航线维护、飞机大修及改装、附件的维修与翻修、及工程技术支援、技术培训等其他服务。
	中国东方航空工程技术公司	公司是东方航空各维修单位整合后成立的东方航空二级单位。主要负责东方航空的航线维护、机体维修、部附件维修等业务。

资料来源：Wind，各公司公告，中国银河证券研究院

## 五、投资建议：航空发动机赛道“长坡厚雪”，正步入产业发展“红利初期”

### 为何必须重视航空发动机产业布局？

- **高战略价值和紧迫性：**核心技术和市场牢牢掌握在美英等国家的寡头企业中，并对我国军用航空发动机实施禁运，我国实现技术突破和自我迭代迫在眉睫。
- **高经济性：**航空发动机约占飞机成本的 20-30%，其单位重量创造的相对价值是船舶的 1400 倍。一款成熟产品通常能够销售 30-50 年，是经济回报的有力保证。
- **高难度&重积累：**航空发动机研制周期长达数十年，比如 F35 战机用 F135 发动机从项目启动到全面生产，研制周期长达 22 年，需要投入大量资金，持续不断的实施先进技术预先研究和验证计划，才能在大国竞争中占据优势。美国航空发动机研究和经费在国内生产总值中的比例分别达 0.08%、0.06%。

### 如何看待我国航发市场空间？

- **军用有人机发动机需求：**未来 10 年，我国军机用发动机需求约为 2.78 万台，万亿市场可期，其中新增军机需求 11781 台，国产替代发动机数量约 3390 台，维修与换发带动的发动机总量约 12606 台。
- **军用无人机发动机需求：**2025 年，我国中大型军用无人机航发市场规模约 30 至 45 亿元。
- **国内民用航空市场发动机需求：**未来 20 年我国共需要 9284 架飞机，根据我们测算，中国商飞将新增 5162 台商用发动机需求，市场空间近 3000 亿。

### 航空发动机价值链如何评估？

- **价值链分析：**航空发动机价值链由研发设计（10%）、整机制造（40%）和维修运营（50%）三部分组成，其中制造阶段的原材料费用（20%）、运营维护阶段中零备件航材费用（25.5%）在航发全生命周期成本中占比较高。钛合金、高温合金制品供应商以及控制系统供应商有望大幅受益。

**投资建议：航空发动机赛道“长坡厚雪”，正步入产业发展“红利初期”**

我国航空发动机产业起步较晚，中间历经波折，发展基础较为薄弱。随着我国综合国力的增长，尤其是2015年“两机”重大专项的启动，我国航空发动机产业开始步入发展红利期。2021年以来，随着备战需求大幅提升，国内军用航空发动机规模放量，发动机制造端进入蓬勃发展期。未来，随着量产型号批量进入进厂翻修期，发动机维修运营业务将迎来井喷，发动机产业链有望持续受益。

**上游材料端，**高温合金用量占发动机总重量的40%~60%以上，叠加国产化率提升，建议关注抚顺特钢（600399.SH）、西部超导（688122.SH）等。高温钛合金用量占发动机总重量的25-40%，建议关注宝钛股份（600456）、西部超导（688122）、西部材料（002149）等。发动机隐身材料领域建议关注华秦科技（688281.SH）等。

**中游制造端，**建议关注中游锻件制造上市公司中航重机（600765.SH）、航宇科技（688239.SH）、派克新材（605123.SH）以及中游铸件制造上市公司航材股份（688563.SH）、钢研高纳（300034.SZ）、图南股份（300855.SZ）等；重点关注动力控制系统供应商航发控制（000738.SZ）。

**下游整机制造与运维端，**总装环节进入壁垒极高，国内外皆成寡头垄断态势，后市场规模更加客观，建议重点关注航发动力（600893.SH）。

## 六、风险提示

装备需求不达预期的风险；企业扩产不及预期的风险；产品价格大幅波动的风险。

## 图表目录

图 1: 军用飞机各分系统成本占比 .....	4
图 2: 民用客机各分系统成本占比 .....	4
图 3: 航空发动机工作过程和核心机构情况简图 .....	4
图 4: 航空发动机压气机结构图 .....	5
图 5: 航空发动机压气机叶片示意图 .....	5
图 6: 典型主燃烧室示意图 .....	6
图 7: 加力燃烧室示意 .....	6
图 8: CFM56 的高压涡轮 .....	7
图 9: 航空发动机分类 .....	8
图 10: 各类发动机的比冲随飞行速度 (Ma) 的变化 .....	9
图 11: 四种常见喷气式发动机示意图 .....	9
图 12: 涵道比对战斗机重量的影响 .....	11
图 13: 齿轮驱动风扇式的涡扇发动机 (GTF) .....	13
图 14: 开式转子发动机 .....	14
图 15: 各产品单位重量创造的相对价值 .....	14
图 16: 全球民用发动机市占率分布情况 (注: 外圈表示已交付订单, 内圈表示未交付订单) .....	17
图 17: GE 历史沿革 .....	18
图 18: 2022 年 GE 业务结构 .....	20
图 19: 2020-2022 年 GE 公司研发费用细项占比 .....	21
图 20: 罗罗公司历史沿革 .....	21
图 21: 2022 年罗罗业务结构 .....	22
图 22: 国家部委军民融合政策体系构建 .....	24
图 23: 我国航空发动机图谱 .....	25
图 24: CJ-1000 发动机结构示意图 .....	27
图 25: CJ-2000 发动机示意图 .....	27
图 26: 中美 2022 年军机数目对比 .....	27
图 27: 我国近年军机 (固定翼+旋翼) 数量及其增速 .....	28
图 28: 航空发动机价值构成分解 .....	31
图 29: 全生命周期商业航空发动机价值变化 .....	32
图 30: 中国历史 (2021) 和预测 (2041) 的各类型客机机队规模 (架) .....	32
图 31: 2022-2041 年中国各类型客机交付量预测 (架) .....	32
图 32: 全球发动机市场份额 .....	33
图 33: 中国窄体机发动机市场各型号分布 .....	33
图 34: C919 国内外主要供应商情况 .....	33
图 35: C919 商用化进程 .....	34
图 36: 客机各系统价值组成 .....	34
图 37: F135 发动机研制历程 .....	36
图 38: 航空发动机研发阶段成本拆分 .....	37
图 39: 航空发动机制造成本拆分 .....	38
图 40: 发动机大修费用构成示意图以及成本示意图 .....	39
图 41: 航空发动机材料结构的发展情况 .....	40
图 42: 航空发动机主要部件及对应材料 .....	41
图 43: 航空发动机中高温合金应用部位 (红色部分) .....	41
图 44: 高温合金在航空发动机上的应用 .....	42
图 45: 全球高温合金材料应用领域 (按价值分) .....	43

图 46: 2022 年我国钛材产品结构 .....	45
图 47: 2022 年我国下游用量占比情况 .....	45
图 48: 钛加工行业市场竞争格局 .....	45
图 49: 树脂基复合材料在国外先进航空发动机冷端上的主要应用部位 .....	47
图 50: 材料所能承受的温度极限示意图（拉伸载荷 137MPa、持久寿命 1000h 条件） .....	48
图 51: 零部件产业链 .....	49
图 52: 航空发动机盘类锻件 .....	50
图 53: 航空发动机环类锻件 .....	50
图 54: 精密铸造主要工艺过程 .....	51
图 55: 部分航发铸造件 .....	52
图 56: 控制系统框图 .....	52
图 57: 航空发动机控制技术发展历程 .....	53
图 58: 航空发动机大修流程 .....	55
图 59: 典型窄体飞机发动机的返厂维修时间间隔 .....	55

## 表格目录

表 1: 航空发动机性能对比.....	10
表 2: 航空发动机主要性能评价指标.....	10
表 3: 军用航空发动机总体性能发展趋势.....	12
表 4: 国外第四代先进发动机主要性能参数.....	12
表 5: 典型大涵道比涡扇发动机循环参数.....	12
表 6: 航空发动机研发制造难度.....	15
表 7: 世界主要航空发动机厂商.....	15
表 8: 美国部分航空发动机材料和制造技术发展计划.....	16
表 9: 全球军用航发生产企业.....	17
表 10: 通用电气航空发动机研发更迭情况.....	19
表 11: 罗罗发动机交付量.....	22
表 12: 通用电气、罗罗、普惠 2020-2023 年研发费用率.....	23
表 13: 《中国制造 2025》航空发动机专项重点产品.....	23
表 14: 航空发动机、燃气轮机重点发展政策.....	24
表 15: 我国主要航空发动机型号研制生产情况.....	25
表 16: 现役装备数量前十的战斗机型号所配发动机.....	28
表 17: 五种常见军用无人机发动机概况.....	30
表 18: 2021 年美军装备无人机数量.....	31
表 19: 未来 C919 各系统价值量与现有公司业绩对比（单位：亿元）.....	35
表 20: 航空发动机成本构成分解情况.....	36
表 21: 美国航空发动机研究和发展经费的分类及成本占比情况.....	37
表 22: 航空发动机零部件价值量占比（%）.....	38
表 23: 典型航空发动机零部件价值量占比（%）.....	39
表 24: 航空发动机主要使用材料及对应部件.....	40
表 25: 我国主要的铸造高温合金牌号及相应的研制单位.....	42
表 26: 高温合金产业链.....	43
表 27: 我国高温合金在各领域主要需求预测（按重量统计）.....	44
表 28: 常用的发动机进/排气系统隐身技术.....	46
表 29: 国外隐身材料发展情况.....	47
表 30: 航发中游制造参与企业.....	49
表 31: 发动机核心机主要部件及其生产工艺.....	49
表 32: 锻造分类.....	50
表 33: 国内锻造主要相关公司.....	51
表 34: 我国航发整机生产商.....	54
表 35: 航发动力航发维修相关募投项目进展.....	55
表 36: 国内主要航空发动机维修企业.....	56

## 分析师承诺及简介

本人承诺以勤勉的执业态度，独立、客观地出具本报告，本报告清晰准确地反映本人的研究观点。本人薪酬的任何部分过去不曾与、现在不与、未来也将不会与本报告的具体推荐或观点直接或间接相关。

**李良：**制造组组长&军工行业首席分析师。证券从业9年，清华大学工商管理硕士，曾供职于中航证券，2015年加入银河证券。曾获2021EMIS&CEIC卓越影响力分析师，2019年新浪财经金麒麟军工行业新锐分析师第二名，2019年金融界《慧眼》国防军工行业第一名，2015年新财富军工团队第四名等荣誉。

**胡浩森：**军工行业分析师。证券从业4年，曾供职于长城证券和东兴证券，2021年加入银河证券。

## 评级标准

### 行业评级体系

未来6-12个月，行业指数相对于基准指数（沪深300指数）

推荐：预计超越基准指数平均回报20%及以上。

谨慎推荐：预计超越基准指数平均回报。

中性：预计与基准指数平均回报相当。

回避：预计低于基准指数。

### 公司评级体系

未来6-12个月，公司股价相对于基准指数（沪深300指数）

推荐：预计超越基准指数平均回报20%及以上。

谨慎推荐：预计超越基准指数平均回报。

中性：预计与基准指数平均回报相当。

回避：预计低于基准指数。

## 免责声明

本报告由中国银河证券股份有限公司（以下简称银河证券）向其客户提供。银河证券无需因接收人收到本报告而视其为客户。若您并非银河证券客户中的专业投资者，为保证服务质量、控制投资风险、应首先联系银河证券机构销售部门或客户经理，完成投资者适当性匹配，并充分了解该项服务的性质、特点、使用的注意事项以及若不当使用可能带来的风险或损失。

本报告所载的全部内容只提供给客户做参考之用，并不构成对客户的投资建议，并非作为买卖、认购证券或其它金融工具的邀请或保证。客户不应单纯依靠本报告而取代自我独立判断。银河证券认为本报告资料来源是可靠的，所载内容及观点客观公正，但不担保其准确性或完整性。本报告所载内容反映的是银河证券在最初发表本报告日期当日的判断，银河证券可发出其它与本报告所载内容不一致或有不同结论的报告，但银河证券没有义务和责任去及时更新本报告涉及的内容并通知客户。银河证券不对因客户使用本报告而导致的损失负任何责任。

本报告可能附带其它网站的地址或超级链接，对于可能涉及的银河证券网站以外的地址或超级链接，银河证券不对其内容负责。链接网站的内容不构成本报告的任何部分，客户需自行承担浏览这些网站的费用或风险。

银河证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的公司或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。银河证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

银河证券已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格。除非另有说明，所有本报告的版权属于银河证券。未经银河证券书面授权许可，任何机构或个人不得以任何形式转发、转载、翻版或传播本报告。特提醒公众投资者慎重使用未经授权刊载或者转发的本公司证券研究报告。

本报告版权归银河证券所有并保留最终解释权。

## 联系

### 中国银河证券股份有限公司研究院

深圳市福田区金田路3088号中洲大厦20层

上海浦东新区富城路99号震旦大厦31层

北京市丰台区西营街8号院1号楼青海金融大厦

公司网址：www.chinastock.com.cn

### 机构请致电：

深广地区：程曦 0755-83471683chengxi\_yj@chinastock.com.cn

苏一耘 0755-83479312suyiyun\_yj@chinastock.com.cn

上海地区：陆韵如 021-60387901luyunru\_yj@chinastock.com.cn

李洋洋 021-20252671liyongyang\_yj@chinastock.com.cn

北京地区：田薇 010-80927721tianwei@chinastock.com.cn

唐嫚玲 010-80927722tangmanling\_bj@chinastock.com.cn