

投资评级

买入

首次

航发产业链研究报告

投资要点:

- **航发技术全面成熟，产业提速衔枚疾进：**航空发动机代表一国航空工业的最高技术水平，一度成为制约我国空军战力提升的关键因素。2016 年航发集团成立，飞发分离明确航发独立地位，两机专项出台导入 2000 亿资金，推动航发产业提速发展。国产航发的扛鼎之作 WS10 及其改型从 2015 年开始大规模列装，顺利装配歼 10/歼 11/歼 16/歼 20 等战斗机型号，表明其性能可靠性已能取代俄制发动机。另一方面，航发协作体系开始向系统外供应商开放，外贸转包模式也越发成熟，种种积极因素刺激下民企供应商普遍在 2017 年后进入快速成长期。
- **锻件环节军品民品并重：**锻件占发动机价值量的 6%-9%，精加工公司普遍以环形锻件、机匣和压气机叶片为切入点，制造工艺大多来自于油气锻件、燃气轮机部件等成熟技术转移，在产业布局上选择国内国外、军品民品双线并进，甚至依靠承接 GE、赛峰的海外订单找到安身立命之本，未来进入 C919 商发供应链亦顺理成章。
- **单晶叶片为产业制高点：**先进涡扇发动机的涡轮叶片承温能力要求在 1100°C 以上，必须使用高温合金铸造的单晶叶片。单晶叶片少而精，单台航发用量 100-200 片，单价最高达到 10 万元，远高于压气机叶片数百元的单价。单晶叶片制造工艺复杂、产线设备昂贵、更被外国封锁技术，导致有效产能极为稀缺，国产合格率长期只有 20%-30%，物以稀为贵。
- **风险提示：**航发型号批产放量进度不确定

一、航发产业提速，投资故事精彩

1、航发产业代表航空工业最高技术水平

航空发动机是飞机的动力和心脏，行业素有“一代飞机，配一代航发”的说法，发动机的性能直接决定了飞机的运载能力、航程和机动性。航发长期在高速、高压、高载荷的环境下工作，满足工作寿命要求 2000 小时以上，具有典型的技术密集型特点。航发的设计复杂、研发周期长、耗费资金大，生产制造过程凝聚了一国航空工业的最高技术水平，被誉为“制造业皇冠上的明珠”。

放眼全球，目前有能力建造航空发动机的国家只有美、英、法、俄、中五个国家，入门门槛远高于飞机制造本身。近年来中国航空工业发展提速，现已具备第四代隐身重型战斗机歼 20 的批量生产能力，但发动机却成为明显短板，长期依赖于俄罗斯产品。国产发动机中性能最优的 WS10 改型款，仅相当于美国 90 年代交付的 F110 发动机中期水准，推力接近但寿命差距悬殊。从研发进度来说，国产航发落后美国 30 年，成为空军战力提升的一大掣肘。

2、飞发分离奠定发展基础，两机专项强力助推

2015 年《政府工作报告》首次将航空发动机、燃气轮机确定为未来主导产业。2016 年航发集团正式成立，整合了中航动力、中航动控、成发科技等 40 多家单位，囊括了国内所有航发相关研制单位，总资产 1100 亿元。飞发分离的正式落地，打破长期以来一型飞机配套研制一型发动机的历史，从顶层架构上为航发自主研发准备了条件。航发集团的独立运作，瞄准的是全球航发市场 4000 亿美元的蛋糕——根据制造强国战略咨询委员会预测，未来 10 年全球市场对航空发动机产品需求旺盛，其中涡扇、涡喷发动机全球需求总量超 7.36 万台，总价值超 4000 亿美元。

航发是资金渴求型产业，一款涡扇发动机研发周期为 10-20 年，研发费用高达 20 亿美元。飞发分离为对接专项资金提供了有利条件，十三五期间工信部推出国家第 20 个重大技术专项——航空发动机和燃气轮机两机重大专项，预计为行业投入资金规模超 2000 亿元。

3、宏大叙事背后，投资机会精彩

航空发动机价格不菲，三代战斗机发动机约为 300 万美元，四代机发动机约为 500 万美元，其他老机型发动机约为 200 万美元。民航发动机价值更高，2019 年 CFM 共收到 2148 台发动机订单，目录总价 307 亿美元，平均单台价格 1400 万美元。

在发动机部件的价值构成中，高低压涡轮的价值占比最高，占比一般在 20% 以上。运输机和战斗机发动机结构上有所差异，运输机航发为大涵道比涡扇，战斗机航发为加力涡扇，配置加力燃烧室。相应地运输机航发的风扇和机匣价值占比较高，战斗机发动机的燃烧室和控制系统占比较高。

表 1 航空发动机各部件价值占比

发动机部件	F100 (战斗机)	F101 (战斗机)	TF39 (运输机)	GE 发动机 (民用)
风扇	6.3	7.9	19.4	14.6
压气机	18.7	9.8	10.9	16.5
燃烧室	3.1	4.3	3.3	4.4
高压涡轮	10.4	14.3	11.8	14
低压涡轮	5.1	7.5	16.7	9.8
加力燃烧室和喷管	26	22.7	无	无
机匣和外部结构	7.8	7.3	15.9	15
控制系统和附件	11.5	14.3	3.8	11.4
轴承和传统	3.1	2.6	5.2	3.5
其他和装配	8	9.3	16.5	2.8
合计	100	100	100	100

航空发动机产品是一项复杂的系统性工程，从上游的合金原材料到中游的零部件、控制系统再到下游的发动机整机，制造流程长、细分品种多，围绕终端主机厂配套的企业多达数十家。航发产业链公司将分享两机行业重大发展机遇，并受益主机厂协作体系的开放，成长弹性较主机厂更为突出，投资机会众多。

二、多引擎驱动，嬗变临界点到来

2019 年年报初现端倪，航发产业链公司集体迎来业绩爆发潮，航发产业链的业绩爆发，至少可以归纳为三重驱动力，一是新型号的批产放量，二是协作体系的开放，三是外贸转包模式的成熟。

1、新型号批产放量

据《WorldAirForce2019》统计，中国战斗机主力品种以歼 10/歼 11/歼 15 等三代机为主体，同时仍有占比近 1/3 的老旧机型歼 7、歼 8，四代机领军机种歼 20 只有 10 架。2019 年之后歼 20 加速批产列装，空军 70 周年军媒宣称已建成“以三代机为主体、四代机为主干的作战体系结构”，结合目前歼 20 生产线已扩充至 3 条，每条生产线生产速度为月产 1 架，目前歼 20 入役数量在 60 架以上。

与战斗机的发展历程类似，航空发动机的发展同样经历了 4 代变化。目前欧美的主力机型是第三、第四代航发，均为加力涡扇型发动机。第三代航发最早发展于上世纪 70 年代，推重比达到 7-10，涡轮前温度达到 1650-1850K，典型型号 F100、F404、RD33、AL31F，装备战机 F15、F16、F18、米格 29 等。第四代航发进一步将推重比推高至 10.5-12 区间，典型型号 F139、F135，装备战机 F22、F35 等。

表 2 军用航发发展历程

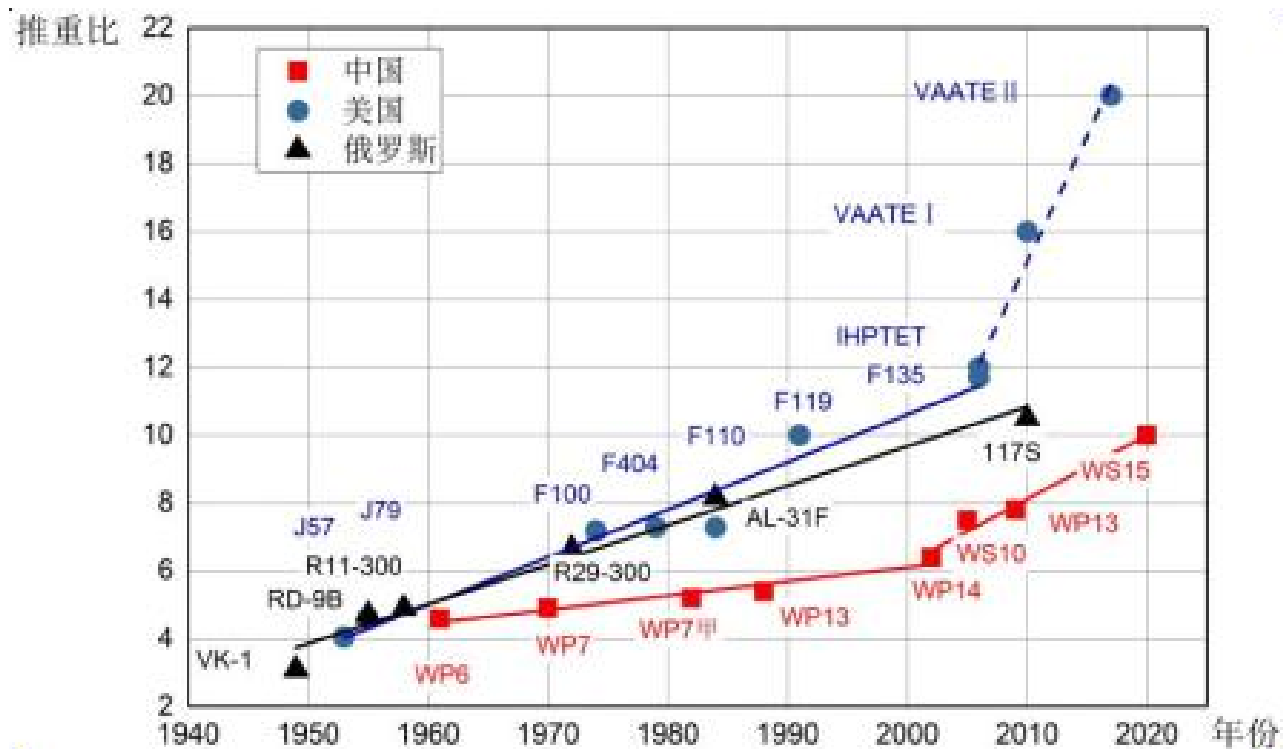
	第一代	第二代	第三代	第四代
划分标准	突破“声障”	突破“火障”	突破“视障”	突破“形障”
飞机特征	高速高空近程格斗	火控系统导弹格斗	超视距远程打击作战	隐身能力
最大飞行速度	Ma>1	2.8>Ma>2	2.35>Ma>1.78	2.5>Ma>1.6
发动机特征	轴流式、加力涡喷	英美：加力涡扇 其他：加力涡喷	加力涡扇	加力涡扇
推重比	3.5-4.7	4.6-7	7-10	10.5-12
涡轮前温度 (K)	1100-1150	1150-1440	1650-1850	1920-1980

欧美发展时间区间	1950-1960年	1960-1970年-	1970-2000年	2000年-
典型欧美飞机	F8、F100、米格 19	F104、F4、米格 21、米格 23、米格 25、幻影 YF4K	F15、F16、F18、米格 29、苏 27、苏 35、幻影 2000、阵风、台风、JAS39	F22、F35、T50
典型欧美发动机	J57、RD9B	J79、R11300、R13300、R29300、R15B300、斯贝 MK202	F100、F404、RD33、AL31F、M53、M88、EJ200、RM12	F119、F135、117S
中国发展时间区间	1950-1970年	1970-1990年	1990-2000年	2000-2020年
典型中国飞机	歼 6	歼 7、歼 8	歼 10、FC1 枭龙、歼 15	歼 20
典型中国发动机	涡喷 5、涡喷 6	涡喷 7、涡喷 13	涡扇 10、涡扇 13	涡扇 15 (研制中)

国内航发事业起步较晚，航发研发工作长期落后于战机，很长一段时间内空有四代战机没有四代航发。过去中国战斗机群使用的主力航发大多数为俄制型号，如歼 10/歼 16/歼 20 使用的为俄制 AL-31F，FC1 枭龙使用的为俄制 RD-33，运 20 使用的为俄制 D-30KP-2。直至 2011 年国产 WS10 发动机批产，才使国产发动机迈入第三代的行列。需求最大的发动机型号可能是 WS10、WS15、WS13、WS20。

WS10 是在美国 CFM56 (波音 737 引擎) 和国产 WS6 的基础上研发而成，主导单位沈阳黎明和西航公司，1978 年立项，2005 年定型，2011 年批产，早期型号推力达到 13.2 吨，推重比 7.5 吨，性能相当于俄制 AL-31F 和美制 F100，工作寿命 2000 小时以上，已能满足军方要求。

图 2 中美俄发动机型号发展史



经过几年时间的爬坡和改型，WS10 产线产能建设完成，军方开始大规模替换俄制发动机，目前已经大量装备歼 10B、歼 11B、歼 16B、歼 10C、歼 20 等战斗机，形成“一机托五发”的完备体系。WS10 的主要生产基地是航发动力旗下子公司黎明动力，其业绩表现在 2015 年之后开始稳步爬坡，营收规模从 2015 年的 88 亿元提升至 2020 年的 159 亿元，5 年复合增长率 13%。

成熟期的 WS10 已发展出 B/C/D 几个型号，推算年出货量超 300 台，支撑起航发动力上市公司产值的半壁江山，且其应用范围仍在不断扩大。在新一代先进发动机 WS15 定型量产之前，主力机型仍然是 WS10，除了 WS10 以外，短期内值得重点关注的航发型号是 WS13 和 WS18。WS10 的诞生解决了高推力发动机的有无问题，但国产中型推力发动机一直悬而未决，国内战斗机群使用的中推主要是俄罗斯的 RD93 涡扇发动机，WS13 是最具现实可行性的国产化中推方案。

表 4 涡扇发动机各型号现状

涡扇型号	厂家	技术来源	推力	推重比	装机对象	进度
WS9	西航公司	斯贝 MK202	9200kg	5.05	歼轰 7	2002 量产
WS10	沈阳黎明、西航公司	美制核心机改造	13200kg	7.5	J10/J11/J15/J16/J20	2006 量产
WS11	南方公司	乌克兰 AL-222-25	1600kg		K8	2002 量产
WS12	贵州黎阳	自行研制	9500kg		FC1、FC31	在研
WS13	贵州黎阳	俄 RD93 改型	8500kg	7.8	FC1、FC31	2021 量产
WS15	西航公司、成发公司	自行研制	18000kg	9.7-10.9	J20	
WS16	南方公司	乌克兰 AL-222-25	4300kg		猎鹰系列	在研
WS17	贵州黎阳	自行研制	3500kg		JL9、猎鹰系列	已量产
WS18	沈阳黎明	WS10 改造	12000kg	5.88	Y20、C919	量产
WS20	西航公司	自行研制	12000-15000kg		Y20	在研

2、协作体系的开放

系统外供应商产能和技术趋于稳定，为主机厂选择外部供应商提供了更大余地，航发产业链从封闭走向开放的格局，能够在产业中找到很多证据。

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，多数情况下只会制定 2-5 家供应商，以保持产品的安全性、稳定性和一致性。中航工业实行小核心、大协作政策，航发集团的战略是两头在内（设计和总装），中间在外（铸造零部件），关键在手（核心零部件），航发很多业务都会向外转移，拥有长期合作关系的厂商会有一定优势。

分工协作带来了明显的效率提升，航发系三大上市公司航发动力、航发科技、航发控制毛利率分别为 15%/11%/29%，净利率分别为 4%/1%/10%，盈利能力并不突出。体系外公司由于民企体制、专业化生产、激励到位、低基数效应等多种原因，往往拥有更强的盈利能力和成长性。

3、外贸转包模式的成熟

外贸业务一般针对民航发动机而言，采用航空转包的合作模式。全球航空飞机及发动机制造商采用“主制造商-供应商”的供应链合作模式，主机厂负责设计和总装，供应商负责具体部件的生产，主要零部件包括叶片、转动件、结构件、轴承、喷射管、护罩壳体等。航空转包模式是补偿贸易制度下的产物，该制度下飞机及发动机产品的输出方至少要向输入市场转包生产不低于 20% 的零部件转包生产份额。

我国目前并不具备民航发动机的生产能力，进口发动机来自于 CFM、GE、罗罗等国际巨头。2018 年国内航空转包市场规模为 18 亿美元，实际上根据飞机采购量计算的转包市场天花板规模在 35 亿美元以上。转包市场的主力供货商是航发集团，2019 年航发科技转包收入 15 亿元，航发动力转包收入 26 亿元。其他供货商如航亚科技整体营收 2.6 亿元，其中 1.6 亿元来自转包收入；航宇科技整体营收 5.8 亿元，其中转包收入 2.1 亿元。

在转包市场上，对下游客户的选择至关重要。CFM 公司是民航发动机市场的绝对霸主，该公司为赛峰与 GE 合资组建，2017 年全球民航发动机交付了 2958 架，CFM 一家占据了其中的 1714 台，市场份额达到 58%。主力型号是 CFM56 和 LEAP 系列发动机，LEAP 系列发动机成为波音、空客及 C919 的动力装置。其他竞争对手如罗罗一年的交付量只有 510 台，主供 CFM 的企业明显拥有更为广阔的市场空间。一批民企凭借转包的订单快速成长起来，虽然外贸订单的毛利率低于军品，看似盈利前景一般，但更为重要的是，转包模式跑通后可以承接国产大飞机的发动机 CJ1000 的订单，技术相通性强，设备人员可以无缝衔接，长远发展战略意义重大。

表 5 民航发动机交付数量

民航发动机公司	2017 交付量		积存量	
	引擎数量	份额	引擎数量	份额
CFM	1714	58%	13928	53%
GE	406	14%	1634	6%
罗罗	390	13%	2520	10%
IAE	278	9%	120	1%
普惠公司	150	5%	2950	11%
Engine Alliance	20	1%	16	0.1%
其他			5096	19%
总计	2958		26264	

三、航发关键部件：铸件及涡轮叶片

1、涡轮叶片必须使用铸造工艺

使用锻造工艺能够生产涡轮盘、叶盘、环形锻件、压气机叶片等，但锻件并不能满足航发热端部位的性能要求。航空发动机四大热端部位分别为燃烧室、涡轮导向叶片、涡轮工作叶片和涡轮盘，广泛使用高温合金铸造零部件。

所谓铸造工艺是将液体金属浇铸到与零件形状相适应的铸造空腔中，待其冷却凝固后获得零件或毛坯的方法。铸件能够比锻件实现更复杂的形状和更好的致密性，相应地技术门槛较高。高端铸件企业的技术门槛在于组织均匀性控制技术、近净成形精密模铸技术，前者需要精确的熔速和温度分部控制，后者需要利用计算机辅助开模、分体压注、组焊成型。国内技术发展长期处于冷强热弱局面，即锻造能力强，铸造能力弱。

航发铸件的复杂性和重要性在叶片环节体现得淋漓尽致。每一台涡扇发动机都拥有三种叶片，从前往后分别为风扇叶片、压气机叶片和涡轮叶片，工作温度和压力依次升高，制造技术和工艺难度依次增大。

风扇叶片只需满足 400 摄氏度的耐高温要求，首要任务是减重，因而采用钛合金或树脂叶片，目前 WS15 即采用实心钛合金的风扇叶片。压气机主要作用是利用高速旋转的叶片给空气做功以提高空气压力，高压级压气机叶片的工作环境已到达 750℃，接近钛合金的工作极限，因而在材料上引入了变形高温合金、钛铝合金，生产工艺采用精锻制坯、磨削成形，对叶片的精度和性能要求变得苛刻，国内具有量产技术的主要厂商是航发动力、无锡透平叶片和航亚科技。

涡轮叶片是发动机中温度最高、应力最复杂、环境最恶劣的部位，推重比 9-10 的第四代发动机涡轮最高温度达到 1700 摄氏度 (1800-2000K)，当发动机启动、停车时叶片会经受高温燃气冲刷，高转速下降承受巨大的离心力，必须具备很强的蠕变强度、热机械疲劳强度、抗硫化介质腐蚀特性等，风扇叶片和压气机叶片尚且可以使用锻造工艺，但涡轮叶片环节必须使用精密模具、镍基高温合金铸造成形，还要设计成空心气膜结构，表面覆盖绝热涂层。

毫不夸张地说，涡轮叶片的制造能力直接决定了航空发动机的性能表现。

表 3 航发叶片分类

叶片类别	分类	工作温度	发展特点	叶片材料结构	叶片工艺	整体叶盘成型技术
风扇叶片	民用	<100°C	大直径、单级、低压比； 降噪、减重	钛合金/钛基复材空心叶片	精密锻造，塑性成型/扩散连接	线性摩擦焊整体叶盘，钛基复材增强整体叶环
	军用	<400°C	小直径、多级、高压比； 提高单级压比、减少级数； 减重	树脂基复合材料实心叶片	3D 编织/RTM 成型	
压气机叶片	低压级	/	提高单级压比、减少级数； 减重	钛合金空心叶片	精密锻造，塑性成型/扩散连接	线性摩擦焊整体叶盘，钛基复材增强整体叶环
	高压级	<750°C		钛合金/变形高温合金/Ti-Al 合金实心叶片	精密锻造	
涡轮叶片	高压级	<1700°C	提高材料耐温能力；减少级数、 减重	镍基/镍铝基铸造高温合金空心叶片	单晶铸造、陶瓷涂层	热等静压扩散连接整体叶盘
	低压级	/		镍基铸造高温合金/Ti-Al 合金叶片，陶瓷基复材实心叶片	定向结晶铸造，陶瓷基复材预成形	

表 10 CFM56 引擎叶片构成

叶片类型	叶片名称	叶片数量	单价
钛合金空心叶片或复合材料叶片	风扇叶片	38	20-30 万元
	第二级低压压气机叶片	68	万元级别
	第三级低压压气机叶片	68	
	第四级低压压气机叶片	68	
精锻叶片	第一级高压压气机叶片	38	百元级至千元级，级数越高 价格越高
	第二级高压压气机叶片	53	
	第三级高压压气机叶片	60	
	第四级高压压气机叶片	68	
	第五级高压压气机叶片	75	
	第六级高压压气机叶片	82	
	第七级高压压气机叶片	82	
	第八级高压压气机叶片	80	
	第九级高压压气机叶片	76	
精铸叶片	高压涡轮导向器叶片	46	10 万元以上
	高压涡轮叶片	72	
	低压涡轮第一级导向器叶片	84	1 万元-10 万元，级数越高 价格越低
	低压涡轮第一级叶片	175	

低压涡轮第二级导向器叶片	115
低压涡轮第二级叶片	162
低压涡轮第三级导向器叶片	110
低压涡轮第三级叶片	157
低压涡轮第四级导向器叶片	115
低压涡轮第四级叶片	160

按照结晶工艺的不同，涡轮叶片又可以分为等轴晶、定向晶、单晶三种。等轴晶是多晶体分布，定向晶是条状定向结晶，单晶构造是指整块叶片仅由一个晶体构成，能够解决多晶体结构中晶界间承温能力不足的问题。对高温合金耐高温能力、抗蠕变性、耐久性等性能进行排序，单晶>定向晶>等轴晶，发动机推力的提升意味着燃料更充分的燃烧，必然会带来涡轮前温度的提高，构成对叶片等零部件的极大考验。叶片是航发技术的制高点，叶片所能承受的温度决定了航发设计推力的上限。

一言以蔽之，单晶无论叶片是所有航发零件中制造工序最多、周期最长、合格率最低、毛利率最高、国外封锁最严重的品种，拥有单晶叶片技术相当于占领叶片环节的制高点

2、单晶叶片制造存在资质、设备、工艺三大壁垒

一是军工资质较难获得，需要与主机厂同步研发数年才有后续获取订单的可能。工程研发包括同步设计和产品工艺设计两种，同步设计是指围绕发动机整机设计要求，从零部件材料、工程制造技术、性能测试等方面进行同步研发，也是对零部件设计特性要去、工艺完整性、稳定性、可靠性以及成本进行验证的过程。产品设计是围绕客户已成熟批产产品进行产业化。

零部件在型号设计和试制时已经同步展开，定型时确定供应商。一种新机型的推出需要锻件、部件、研究院、主机厂长时间的设计、研究、试验、原型机试飞、验证、改型，最后进入生产环节，所以前期如果没有参与共同设计，后期较难进入，一旦进入后保持长期稳定合作关系，会享有和整机批产同步的供货期。越早进入供应链，与主机厂关系越紧密，覆盖的型号可能越多，强调卡位优势。观察公司中大部分的订单突破起量都是出现在 2017 年前后。

二是制造工艺复杂、流程长、产成品合格率低。单晶叶片的一个完整制造过程包括型芯烧结—蜡模压注—壳型焙烧—叶片浇注—单晶凝固—初检—脱芯—打磨—精修叶片—终检等，每一个工序都存在不小难度，如单晶凝固过程需要先做好复杂模具，让单个晶粒通过，在选晶器内生长并凝固，凝固过程中既要精确控制固液界面前沿液相中的温度梯度，又要控制晶体生长速度，过冷过热、过快过慢都有可能产生枝晶，使单晶结构破坏。选晶法是罗罗使用的成熟工艺，目前国内生产的单晶铸件都是用选晶法生产，但实际生产中因一次结晶造成的报废率在 8%到 20%之间，因选晶失败而造成的单晶晶粒完整性破坏而造成的报废率达到 2%-3%。应流的解决办法是使用可精控三维晶体取向的籽晶法，成都航宇同样使用籽晶法。

在后道工序中，对叶片进行表面处理、气膜孔加工、喷涂涂层过程中非常容易产生外来应力，导致叶片在工作过程中出现再结晶，引起叶片裂纹。以上十几个工序中只要有一个环节出现差错就会导致整块叶片报废（高压涡轮叶片成本最高在 10 万元以上）。技术难度的直观体现指标就是产品良率，工艺最成熟的罗罗公司合格率也不到 70%，国内厂家合格率长期徘徊在 20%-30%左右。从单晶实心叶片到空心叶片、高效气冷空心叶片，技术难度跨度很大，一种单晶空心叶片从研制到进入发动机服役至少需要 5-10 年时间。

三是设备昂贵且依赖进口。复杂的工序需要配套多种专用设备，如烧结环节需要行星式球磨机、型芯烤瓷炉，焙烧环节所需要型壳焙烧炉，浇注环节需要重力浇注机、旋转式浇注机，单晶凝固环节需要单晶炉、定向凝固炉，以及热等静压处理机等。航空热处理炉在生产叶片时炉内温度在 1330℃，炉内任意两点温度差处于±3℃之内，精细控制难度极大，国内没有成熟设备可以使用。**叶片的生产设备价格高昂，且面临国外封锁。**

单晶叶片少而精，价值量占比较高。叶片占发动机价值的 35%，而涡轮叶片在叶片中占比超过 60%。从等轴晶向单晶升级技术难度依次提高，产品价格倍数级递增。**一台航发约需要 100-200 片单晶叶片，单晶叶片总重不超过 50 公斤，其中钛铝合金叶片单价 5000 元，等轴晶叶片价格约每片 5000 元，定向晶叶片价格约 1-2 万元，单晶叶片价格能够达到 5 万元。**反观压气机叶片，单机装配 1000-2000 片，但单片价格仅为 300-500 元/片。

表 11 涡轮叶片代际升级

航发代际	第二代	第三代	第四代	第五代
推重比	4-6	7-8	9-10	12-15
涡轮前温度	1300-1500K	1680-1750K	1850-1980K	2100-2200K
典型发动机	MK202	F100, F110	F119, EJ200	F135, F136
服役年代	20 世纪 60 年代	20 世纪 70 年代	20 世纪末	21 世纪初
叶片工艺	实心叶片	气膜冷却空心叶片	复合冷却空心叶片	双层壁超冷/铸冷叶片
叶片材料	定向合金和高温合金	第一代单晶和定向合金	第二代单晶合金	金属间化合物和第三代单晶合金