

中国航空工业第二集团公司  
洪都培训基地

## 航空金属结构材料

- |       |                |
|-------|----------------|
| 第 1 节 | 材料             |
| 第 2 节 | 航空材料的发展方向及应用趋势 |
| 第 3 节 | 我国航空金属结构材料的现状  |
| 第 4 节 | 成就、问题与对策       |
|       | 参考文献           |

(双向互动、讨论、交流)

中国一航离退休干部局

中国锻压协会航空材料成形委员会

曾凡昌

2005.12

# 第一章 航空金属结构材料

## 第1节 材料

**材料 materials** 可以用来制造有用的构件、器件或物品的物质。根据材料的组成与结构的特点,可分为金属材料,无机非金属材料,有机高分子材料和复合材料.随着科学技术的发展和进步,原来相对独立的材料,如金属、陶瓷、高分子材料等已经互相渗透、相互结合,发展成有更高使用价值的新型材料,如碳纤维增强金属基复合材料、玻璃纤维增强树脂基复合材料,等等。此外,根据材料的性能特征,又可将材料分为结构材料和功能材料两大类。结构材料(**Structure Materials**)是指以力学性能为主的工程材料的统称,而对那些要求具有电、光、声、磁、热等功能和效应的材料称其为功能材料。

**材料科学与工程**: 研究并揭示有关材料的组成(成分)与结构(组织)、性能、生产流程和使用效能以及它们之间的关系(图 1-1)。研究材料科学与工程学的出发点和归宿在于实现材料在特定工况条件下的使用价值(效果效能)最大化,并体现在广泛意义上的材料性能,也就是说材料既要“好用”又要“好做(加工制造)”。**材料性能**包括使用性能(使用效能)和工艺性能两方面:使用性能是指材料在使用条件下表现出的性能,如力学(机械)性能、物理性能和化学性能等。工艺性能则是材料在加工制造过程中表现出的性能,如切削加工性能、压力加工性能、铸造性能、焊接性能、热处理性能等。

**结构材料**是指工程上要求强度、硬度、韧性、塑性等以力学性能为主的材料,因为这类材料制成的零部件都在受力状态下工作,所以材料的力学性质是其主要性能指标。在许多使用条件下,还必需考虑环境的特殊要求,如高温、低温、腐蚀介质、放射性辐照等。结构件均有一定的形状配合和精度要求,因此结构材料还必需具有优良的可加工性能(工艺性能)。

在结构材料中,长期以来金属及合金一直占有突出的地位,但近几十年来作为结构材料使用的工程塑料、结构陶瓷材料和以树脂为基体的复合材料发展十分迅速。结构材料无论在金属、无机非金属、高分子和复合材料中,都是需求量最大、应用面最广的材料,是国民经济和国防建设中最为基础的材料。

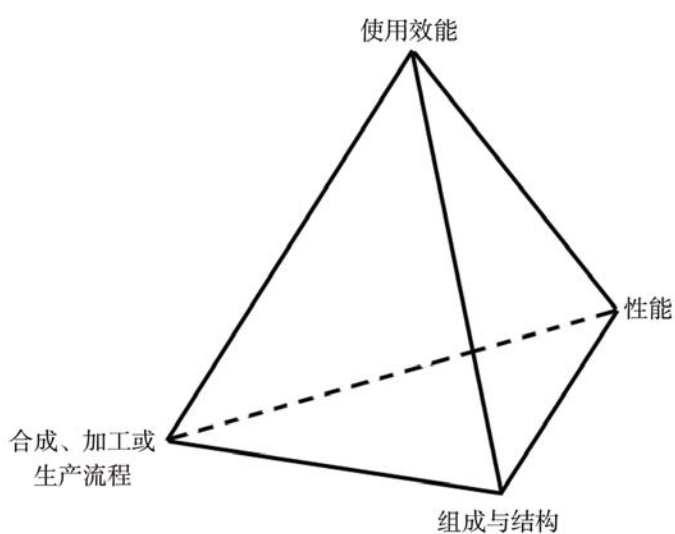


图 1-1 材料科学与工程的四要素及其间的关系<sup>[1]</sup>

航空材料是材料中的佼佼者，是推动材料科学与工程不断发展的主要动力之一。航空材料亦包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类，按其使用功能亦是分为结构材料和功能材料两大类。航空材料既是研制生产航空产品的物质保障，又是航空产品更新换代的技术基础。材料在航空工业及航空产品的发展中占有极其重要的地位和作用。

1951年4月17日中央军委和中央人民政府政务院发布《关于航空工业建设的决定》，从此揭开了新中国航空工业发展和壮大的新篇章。在当时的中央人民政府重工业部航空工业局下面设有冶金处，负责飞机发动机修理、零件制造中的材料冶金技术工作。在国家第一个五年计划期间，航空工业完成了由飞机修理到仿制制造的过渡，按照苏联模式建成了六大主机厂（112，122，320，410，120，331）和相应的原材料配套厂（101东轻、抚钢等）成立了航空材料研究所（1956年）和航空工艺（1957年）研究所，……。应当说，半个世纪以来，在我国建设航空工业和发展航空产品的历史进程中，国家对航空材料、冶金技术的发展和建设是重视的。从总体上看，我国目前已定型生产的航空材料有2000余个牌号（含类别、品种与规格），基本上能满足第二代航空产品批生产的要求。对正在研制或即将定型的第三代航空产品所需的关键材料，如高强铝合金、热强钛合金、超高强度结构钢、不锈钢、聚合物基复合材料以及定向和单晶高温合金等，从技术上看已具备试用或技术鉴定的条件。我国即将研制的新一代战斗机（第四代）及其配套的高推重比发动机，要求材料具有更高的比强度、比模量和耐高温性能及更优良的光、声、电、磁等特殊功能。迫切需要发展高性能、价格适中的聚合物基、金属基和陶瓷基复合材料、铝锂合金、高强高温和阻燃钛合金、新型超高强度钢、定向和单晶高温合金、粉末高温合金、金属间化合物等结构材料，以及隔热、抗氧化、耐磨、耐蚀、密封、润滑、高性能透明、吸波、微电子、光电子、传感器、信息与存储材料等功能材料。上述结构材料和功能材料，在“85”、

“95”、“105”材料预先研究计划中分别有所安排，在“115”材料预先研究计划中仍将继续择优安排攻关。

## 第2节 航空材料的发展方向及应用趋势

进入二十一世纪，航空材料正朝着高性能化、高功能化、多功能化、结构功能一体化、复合化、智能化、低成本化以及与环境相容化的方向发展<sup>[2]</sup>。现结合本期培训是以航空锻造技术为主，故侧重于讨论航空金属结构材料的发展方向及应用趋势问题。

近几十年来，尽管无机非金属材料、高分子材料和复合材料发展很快，并且在航空器上的应用不断扩大，但是，在飞机、发动机的结构用材中金属结构材料仍然占据着“难以撼动”的主导地位，见表 2-1~2-2。表 2-1 为二、三、四代战斗机结构材料用量比例（% wt.）。<sup>[3]</sup>

表 2-2 为民用客机结构材料用量比例（% wt.）。

表 2-1 二、三、四代战斗机机体结构材料用量比例（%wt）<sup>[2]</sup>

代 机 型 首 飞 年 代 材料类别 %wt	第二代	第三代		第四代
	中国 J8 系列 20 世纪 70 年代	俄 SU-27CK 1977	美 F/A-18 A/B 1978	美 F-22 生产型 1997
铝合金	55	63	49	15.3
钛合金	2	15	13	38.8
钢	24	10	17	7.8
树脂基复合材料	2	0.5	12	24.2
其他	余	余	余	余

表 2-2 民用客机结构材料用量比例（% wt.）<sup>[2]</sup>

飞 机 型 号 材 料	铝合金	钢	钛合金	复合材料	其他
B747	81	13	4	1	1
B757	78	12	6	3	1
B767	80	14	2	3	1
B777	70	11	7	11	1

DC10	78	14	5	1	2
DC11	76	9	5	8	2

无论是军用飞机或民用客机，机体结构用材的主要特点是大量选用高比强度和高比模量的轻质、高强、高模量材料，这是提高飞机结构效率，降低飞机结构重量，延长寿命和可靠性增长的关键措施，也是材料技术的发展方向和应用趋势。分析表 2-1 二、三、四代军用战斗机各类金属结构材料的用量变化可见，传统铝合金用量大幅度下降且为高纯、高强、高韧新型铝合金替代；钛合金用量大幅度上升至达到整机结构重量的 38.8%；而钢的用量同样呈现下降趋势。在军用直升机方面，金属结构材料用量在逐年下降，复合材料用量则大幅度上升。

航空发动机相当于飞机的心脏，是确保飞机使用性能、可靠性和经济性的决定性因素。随着发动机推重比（功重比）的不断提高，先进航空发动机对金属结构材料的要求更加严格，对高性能金属结构材料的依赖程度也愈来愈大。作为飞机动力装置的航空发动机，特别重要的是金属结构材料要具备轻质、高强、高韧、耐高温、抗氧化、耐腐蚀等性能，这几乎是结构材料中最高性能的要求。我国航空发动机自 1954 年 8 月 18 日南方公司(331 厂)仿制成功国内第一台 M-11 活塞式发动机（配装 320 厂于 1954 年 7 月 25 日试制成功国内第一架初教五-雅克 18 教练机）以来，至今已能生产包括涡喷、涡扇、涡轴、涡桨、活塞式等各种类型航空发动机。在相当长的一段时间内（~30 年）中国航空工业的发动机行业停留在推重比 5~6 第二代航空发动机的仿（试）制生产阶段，大量采用铝合金、镁合金、合金结构钢、不锈钢、铁基或镍基高温合金等结构材料。直到上世纪九十年代初研制高推重比涡扇发动机，高温合金、钛合金用量大幅度增加，定向凝固合金叶片和粉末高温合金涡轮盘亦开始应用。

图 2

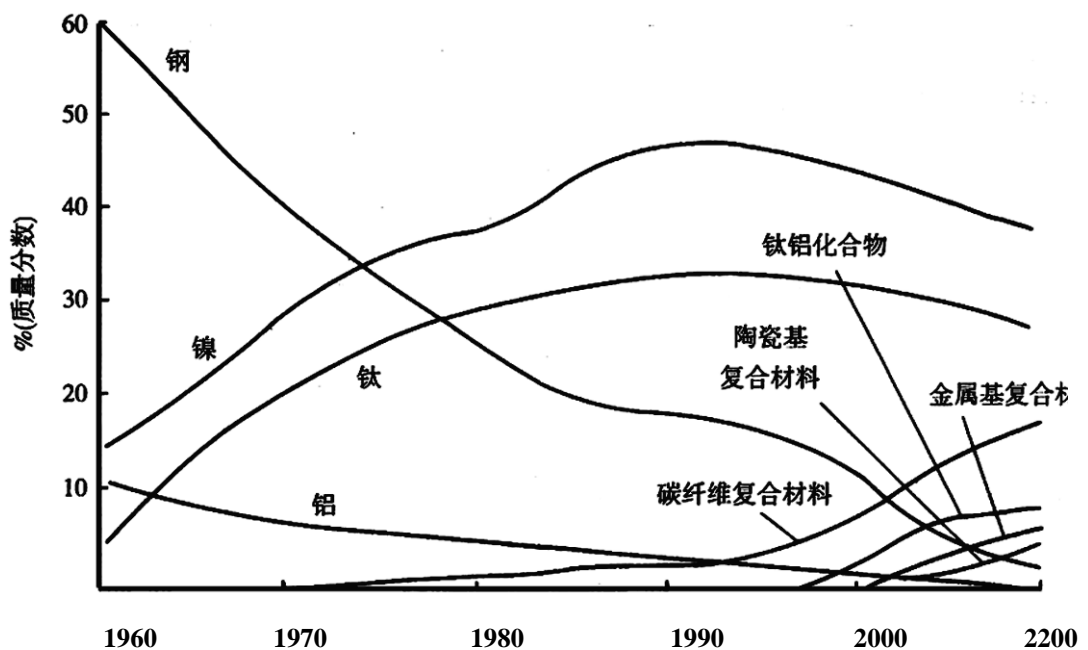


图 2-2 发动机用材的发展趋势 (英国 R·R 公司)

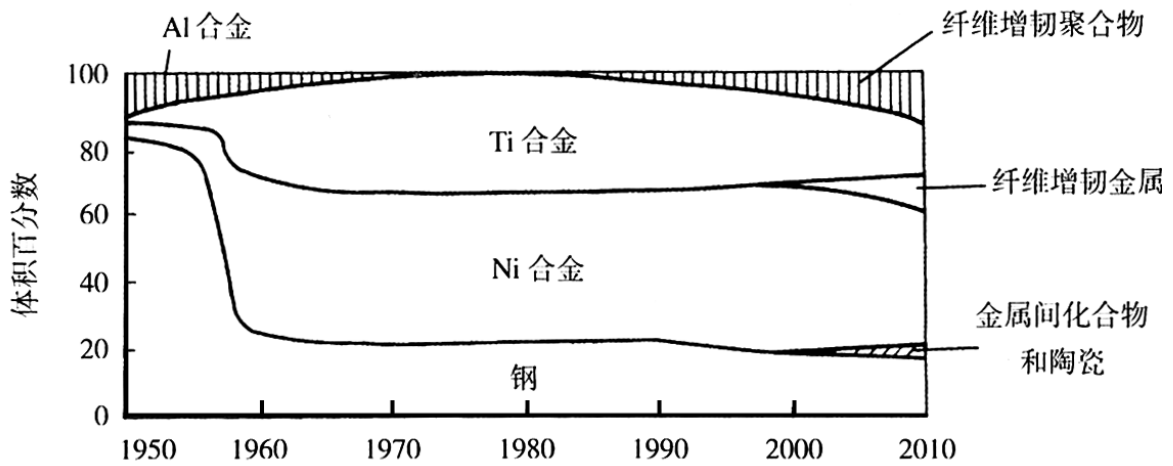


表 2-3 军用航空燃气涡轮发动机性能<sup>[4]</sup>

发动机型号	加力推力 (10N)	加力耗油率 (kg/daN.h)	涵道 比	总增 压比	涡轮前 温度(K)	推重 比	飞机型号
F404-GH-400	7120	1.65	0.340	25.00	1589	7.24	F/A18, 阵风 A, X29A
F110-GE-100	12268	2.04	2.870	30.40	1700	7.07	F16C/N, F15E, FS-X
F110-GE-129	12899	2.04	0.760	32.00	1728	7.28	F14, F16C/D, F15
F100-PW-200	10590	2.30	0.600	25.00	1672	7.70	F15, F16A/B/C
F100-PW-229	12890	2.00	0.400	32.00	1672	7.90	F15A/B/C/D/E, F16C/D
M53-P2	9500	2.12	0.360	9.80	1533	6.56	幻影 2000
АЛ-31Ф	12258	2.00	0.600	23.80	1665	8.17	苏 27
M88-2	7500	1.80	0.500	24.50	1850	9.00	阵风 D
M88-3	8450	1.77		26.00		9.40	阵风 D
EJ200	9000	1.70	0.400	26.00	1750	10.00	欧洲战斗机

F119-PW-100	13500		0.200	26.50	2050	10.00	F22
-------------	-------	--	-------	-------	------	-------	-----

需要特别指出的是，只有先进材料而缺乏使先进材料转化为航空零部件的工艺技术手段，再先进的材料也是没有实用价值的，这也是强调航空器结构设计选材、材料研制和材料应用研究三者之间必须紧密结合的主要原因。

**新型材料总是伴随新工艺、新技术的诞生和互动而成长和完善：**

例 1，TC4 (Ti-6Al-4V) 钛合金密度 ( $4.44\text{g/cm}^3$ ) 大约只有 30CrMnSiA 合金结构钢 ( $7.75\text{g/cm}^3$ ) 的 57%，其比强度  $\sigma_b/\rho$  (室温时) 是钢的 1.5 倍，在  $350^\circ\text{C}$  时是钢的 1.2 倍，可谓是轻质高强材料，是飞机、发动机理想的结构材料。上世纪 60 年代，航空材料工作者希望在 WP-6 发动机上以 TC4 钛合金替代 30CrMnSiA 合金结钢制造压气机盘，结果由于钛合金原材料饼坯冶金质量问题和锻造工艺问题等许多基础技术没有掌握好，以钛代钢的良好愿望没有实现。从“75”开始到“95”期间，国家对钛合金研制和应用研究加大了投入，从材料、冷热工艺、性能、检测等各个方面安排了科研课题，取得了一系列有实用价值的成果，使 FWP13 发动机 TC11 钛合金用量达到整机结构重量的 13%；实现了 TC4 钛合金飞机承力构件以钛代钢零的突破，在 J8 II 飞机上用钛量达到机体结构重量的 2%。在这一期间，有关钛合金方面的新工艺、新技术的重大科研成果有：以解决原材料（棒材）组织不均匀、影响无损检测 (NDT) 不可探的对坯料进行高低温锻造新工艺；模锻盘的近  $\beta$  锻造工艺（高温形变强韧化工艺）及  $\beta$  处理工艺；钛合金盘锤模锻、火药锤和高速锤模锻工艺；等温锻造工艺；建立钛合金高、低倍组织评级标准图谱；建立钛合金棒、饼坯、盘件超声波探伤方法标准，等。

例 2，航空金属结构材料——原材料，追求成分合格、材质洁净、组织均匀始终是材料冶金工作者永恒的奋斗目标，更是材料使用工作者坚定不移的技术要求。为使原材料达到成分合格、材质洁净、组织均匀，在材料的熔炼、加工和后续热处理以及试验检测等方面发展了一系列的新工艺、新技术、新设备、新方法：

合金结构钢不再使用转炉、平炉冶炼，代之以电弧炉、电渣炉、炉外精炼除气单联或双联工艺；超高强度高合金化钢（如 40CrNi<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>MoVA-300M）采用了真空感应加真空自耗重熔工艺生产。

钛合金必须采用两次以上真空自耗电弧炉熔炼，用于制造航空发动机转子零件的合金应经过三次真空自耗熔炼。规定自耗电弧的焊接严禁使用钨极氩弧焊，采用氩气保护

等离子焊接方法。

变形铝合金的熔炼与铸造工艺一般采用坩锅炉、反射炉熔炼，用半连续法铸造成适合于加工的各种形状和尺寸的铸锭。

化学成分、微量、痕量元素分析以及杂质分析方法及硬件的进步；NDT 技术与设备的发展，是发展新型材料和热工艺技术不可或缺的条件。

高温合金是推动航空发动机发展的最为关键的结构材料。军用航空发动机通常可以用其推重比（推力/重量）综合地评定发动机的水平。提高推重比最直接和最有效的技术措施是提高涡轮前的燃气温度。为此，除结构设计要有所创新外，选用耐高温、抗氧化、耐腐蚀的高性能轻质结构材料是关键因素。表 2-4 给出了 II~V 代发动机涡轮工作环境条件及对应的高温合金用材情况。

表 2-4 各代发动机的涡轮工作环境条件及用材情况<sup>[5]</sup>

	II	III	IV	V
推力重量比	5-6	7-8	9-10	15-20
涡轮前温度 K	1250-1400	1600-1750	1850-1950	2250-2350
压气机出口温度 K	650-700	800-900	850-900	950-1200
涡轮盘工作温度℃	<600	650	700	780-950
涡轮盘材料	Fe 基、Fe-Ni 基, Ni 基高温合金 WP6、WP7、WP8 WP13、WS9 GH2036、GH4133B GH2901	Ni 基变形高温合金, FWS10 (GH4169)FGH95 粉末盘	FGH96 (René 88 DT) 粉末盘; 纤维增强超合金; 变形高温合金	双性能粉末冶金; 纤维增强超合金; 0 相 TiAl; 陶瓷基复合材料

分析表 2-4 可见，航空发动机的水平（推重比）同高温结构材料的水平呈线性关系。而高温结构材料的进步又与材料科学与工程不断创新密切相关。WP6 发动机涡轮盘材料（GH2036- $\epsilon$  и 481）是一种 Fe 基高温合金，上世纪六、七十年代试制 WP6 发动机时，材料熔炼是用电弧炉或电弧炉加电渣炉，钢锭开坯是在自由锻锤上完成的，涡轮盘模锻件和所制成的零件，先后出现过夹杂、粗晶、榫齿（槽）裂纹等冶金缺陷，发动机首翻期寿命仅 50~100 小时（循环），表明我国当时的材料水平是低的，发动机的水平只相当于发达国家上世纪 50 年代的水平。高推重比发动机涡轮盘材料（GH4169）是一种高合金化 Ni 基高



温合金，合金的熔炼经过 VIM（真空感应）+VAR（真空自耗）+ESR（电渣重熔）三联工艺，钢锭经过高温（1180~1200℃）长时间（72h）扩散退火以消除或减少钢中 Nb 元素偏析，在新型快锻机上开坯成材。采用 GH4169 DA 工艺模锻成 I、II 级涡轮盘，盘晶粒度要求 10 级，发动机涡轮部件寿命要求不小于 2000h。该发动机相当于国外发达国家上世纪七、八十年代的水平。

比较 WP6 发动机 GH2036 涡轮盘和高推重比发动机 GH4169 涡轮盘两种不同档次发动机及不同档次盘用材料，一方面说明材料对提高发动机综合性能起到的关键作用，另一方面说明只有材料技术不断进步（包括硬件和软件），才能产生一代又一代的新型材料。

### 第3节 我国航空金属结构材料的现状

自 1956 年第一个五年计划中国试制成功第一个高温合金 GH3030（ЭИ435）用于制作 WP5 发动机火焰筒以来，随着从原苏联引进仿制 МИГ-17（J5，WP5）、МИГ-19（J6，WP6）、МИГ-21（J7，WP7）、TY16（H6，WP8）等机种，材料国产化工作被提到重要议事日程上。1960 年开始的中苏关系恶化以后，材料国产化更是被赋予政治任务，在“自力更生，发奋（愤）图强”方针指导下在我国全面开展起来。1975 年 12 月 13 日我国同英国签订了从 R·R 公司购买军用 SpeyMK202 发动机及其主要附件的生产专利合同（WS9），在此期间及之后又购买了法国超黄蜂直升机及选默 3C-6 发动机（Z8，WZ6），引进了法国海豚直升机及阿赫耶发动机（Z9，WZ8）。每引进一项航空产品就仿制一大批航空材料，形成了多国材料（原苏、俄、英、法、美）云集中国的复杂局面，我国材料牌号数量之多居世界首位，而每种材料牌号的使用数量及使用频率又位居世界之尾。如何科学有效地改变这种多国材料云集我国的复杂局面，需要从创新材料的管理机制，解决设计选材同材料研制和材料应用研究互相脱节，整顿和建立中国航空材料体系等方面坚持不懈地奋斗。

根据 2002 年 5 月《中国航空材料手册·第 2 版》给出的权威数据，航空材料共有 2188 个牌号，其中金属结构材料牌号共 327 个，具体情况见表 3-1~7<sup>[6]</sup>。

表 3 中国航空金属材料分类牌号数量表<sup>[5]</sup>

表 3-1 结构钢

优质碳素钢	渗碳、渗氮钢	调质高强度钢	超高强度钢	弹簧钢	防弹钢
6	10	10	6	5	2
轴承钢	铸钢				
2	5				

表 3-2 不锈钢

抗氧化钢	马氏体不锈钢	控制相转变不锈钢	双相钢	奥氏体不锈钢	高硬度不锈钢
7	8	3	2	10	3
铸造不锈钢					
6					

表 3-3 变形高温合金（高温合金新、老字号，主要用途和与国外相近牌号对照表见附录）

铁基变形高温合金	镍基变形高温合金	钴基变形高温合金
14	30	3

表 3-4 铸造高温合金

等轴晶铸造高温合金	定向凝固柱晶高温合金	单晶高温合金	金属间化合物基高温合金
26	9	5	3（IC6、IC6A、IC10）

表 3-5 铝合金 镁合金

变形铝合金	铸造铝合金	变形镁合金	铸造镁合金
32	18	6	8

表 3-6 钛合金\*1

$\alpha$ 和近 $\alpha$ 型钛合金 (TA)	$\alpha - \beta$ 型钛合金 (TC)	$\beta$ 和近 $\beta$ 型钛合金 (TB)	工业纯钛 *2
9	8	4	12

\*1 含变形及铸造钛合金。

\*2 含变形及铸造纯钛，工业纯钛系指几种具有不同的Fe、C、O<sub>2</sub>、N等杂质含量的非合金钛，它不能进行热处理强化，其成形性能优异，易于熔焊和钎焊，用于非承力构件， $\alpha$  相或针状  $\alpha$  相。

表 3-7 铜合金

高导电纯铜	高温高导电高铜合金	普通结构用铜和铜合金	高弹性铜合金
5	4	10	9
高强度热稳定铜合金	高耐腐蚀铜合金	高耐磨铜合金	
7	8	9	

此外，在粉末冶金材料（包括刹车材料、粉末高温合金、封严材料、电磁材料、结构材料如 W-Ni-Cu 系和 W-Ni-Fe 系重合金等），精密合金与功能材料（包括磁性合金、弹性合金、膨胀合金、热双金属带材、TiNi 形状记忆合金、具有精密、应变、热敏功能的电阻合金、低温超导材料、贵金属电接触材料等），与金属有关的材料还有数百个。需要稍做说明的是纳入粉末冶金材料的粉末高温合金。

纳入《中国航空材料手册·2 版》的粉末高温合金有 3 个牌号，简要介绍如下：

- FGH95 粉末高温合金（René95）是采用粉末冶金工艺制备的  $\gamma'$  相沉淀强化型镍基高温合金，用于高性能航空发动机涡轮盘，其制造工艺路线是采用真空感应（VIM）熔炼制取母合金，经雾化制取预合金粉末，以直接热等静压、热等静压+包套模锻、热等静压+等温模锻、热等静压+热挤压+真空或保护气氛下的等温锻造等工艺制成盘零件毛坯。粉末高温合金盘因其具有组织均匀（无偏析）纯净、晶粒细小、屈服强度高、疲劳性能好等优点，是高性能航空发动机涡轮盘的首选材料。采用直接热等静压成形的 FGH95 盘已在 WZ9（40#机）上试用。

- FGH96 合金（René88DT）是采用粉末冶金工艺制备的损伤容限型第二代粉末高温合金。与第一代粉末高温合金相比，适当降低了合金的强度水平，注重于提高合金的抗裂纹扩展性能（ $da/dn$ ），采用先进的制粉工艺和盘的成形工艺，可制得满足 750℃ 工作条件下的高推重比航空发动机涡轮盘的使用要求。

- 机械合金化材料 MGH754（MA754），是一种氧化物弥散型（ODS）高温合金，是采用机械合金化技术（MA）将超细的  $Y_2O_3$  粉末（ $\leq 50nm$ ）均匀分散到合金粉末中，经热挤压成形后得到的一种单相奥氏体镍基高温合金。由于  $Y_2O_3$  粉末具有较高的热稳定性和化学稳定性，所以其强化作用可以维持到接近合金的熔化温度。MGH754 合金的工作温度可达 1200℃~1250℃，可用作先进发动机的某些高温零件，如导向器篦齿环、导向叶片等。

以上三种粉末高温合金在我国尚处于研制和试应用之中。我国现有的航空材料保证了第二代航空产品的批量生产，支撑着第三代航空产品的研制，但远不能满足第四代航空产

品对材料的需求, 航空材料的研发任务仍然十分繁重。

#### **第4节 成就、问题与对策**

我国航空材料的研制与生产即将迎来 50 周年华诞（1956 年研制成功第一个高温合金 GH3030, 成立航空材料研究所），2000 多项国产航空材料支撑着中国的航空工业不断向前发展，有力地提升了中国在国际舞台上的地位和作用。航空材料的研制与生产涉及国内黑色冶金、有色冶金、石油化工、轻工、建材、纺织、电子、机械等基础工业以及中科院、有关高等院校和科研院所。在航空工业内部，新型材料的研究与发展主要由北京航空材料研究院、飞机发动机设计研究所和有关航空院校如西工大、北航、南航、昌航等单位承担，部分主机厂和辅机厂根据本单位型号发展的需要也开展了新型材料的研究发展工作如 172 厂、122 厂、320 厂在复合材料的树脂体系方面都有一些创新的成果。

我国第三代军用飞机（含发动机、辅机）所使用的材料已经国产化，表明我国在航空材料方面取得了举世瞩目的成就，形成了门类齐全的材料配套体系和从事材料研究、生产、应用的科技人才队伍。航空材料的研发工作开始步入生产一代、研制一代、预研一代和探索一代的良性循环阶段。材料作为发展航空工业的技术与物质基础，同航空研究、设计、试验和制造技术一起，支撑着我国航空工业从仿制、改进改型到自行设计研制航空产品的历史发展阶段，中国航空工业已经跻身于世界舞台并占有重要的地位。

在航空材料的研制、生产能力和规模方面，我国已成为继美、俄、英、法等国之后拥有庞大航空材料体系的国家之一。中国已经成为航空材料大国，但只是材料牌号、品种大国，还不是材料技术与质量强国。

#### **成绩伟大，问题不少**

总结五十年来我国航空材料的研发现状，我们总结出中国航空材料存在“五多五少”的现象，即：

低水平材料多，高水平材料少；

仿制材料多，创新材料少；

单一用途材料多，一材多用材料少；

争新材料立项任务多，对定型材料改进改性少；

研制材料成果多，工程应用材料少。

“五多五少”问题的存在，有其客观历史条件的制约，还有深层次因素的影响，主要是管理机制不完善，科学决策不力，计划经济时期形成的一套行政管理办法是造成航空材料“五多五少”问题的基本原因。

现在，党中央明确地提出了要以科学发展观统领经济建设和发展的全局，航空工业属于高技术产业，更应率先垂范，在建设航空工业的各项事业中贯彻科学发展观，实践科学发展观。航空锻压和航空铸造是航空产品制造链上的重要环节，上承金属原材料，下启零件机械加工，而在航空产品的使用效能（含经济性）方面，锻铸件的材料利用率、组织性能和冶金质量的可靠性对航空产品的使用效能（含经济性）则有着决定性的影响。航空工业材料冶金工作者在本职岗位上实践科学发展观是可以有所作为的。

表 4-1 列出我国早期几种航空发动机的材料利用率情况<sup>[7]</sup>。

表 4-1 我国早期几种航空发动机材料利用率<sup>[7]</sup>

发动机型号	全机材料消耗 (kg)	全机净重 (kg)	全机材料利用率 (%)	全机锻件重 (kg)	锻件制零件净重 (kg)	锻件材料利用率 (%)
WP-6	3756	645	17.2	2764.7	331.8	12.5
WP-7	5738	1069	18.5	4210.5	476.9	11.2
WP-5	2613.3	880.9	33.9	856.9	270.9	31.5

从表 4-1 可见，WP-6 发动机和 WP-7 发动机的材料利用率仅分别为 17.2% 和 18.5%，锻件在发动机材料消耗中占 74%，而锻件的材料利用率仅为 11.2%~11.5%！如此之低的金属材料利用率（形容锻件为“肥头大耳”），造成材料、工时、工具、机床和动力的巨大消耗，生产率低下，质量不高，浪费触目惊心，这种情况直至今天在我国飞机、发动机的研制生产中仍然未见根本改观。

航空锻压和航空铸造是金属材料的最大用户，特别是航空锻件占据金属材料消耗定额中的绝大部分。作为航空锻铸工程技术人员，有责任恪尽职守，以自己精湛的技术和协作精神去提升锻铸件的工艺水平，努力使航空锻、铸件的生产朝着“优质、精化、高效、低能耗、高环保”的目标前进。

实现“优质、精化、高效、低能耗、高环保”的目标需要从技术层面和技术管理层面上着手并采取相应的对策。

首先，用于锻铸件的金属原材料应当是纯洁的、均匀的，组织性能符合要求的材料。对材料的熔炼、加工及其与材料组织性能之间的规律性关系应当有透彻的认识，特别要掌握材料的工艺性能。工艺性能是指材料性能满足零件设计要求的前提条件下，其加工工艺性应满足零件成形和加工制造技术的要求。如可锻性（塑性图、再结晶图、加热温度—晶粒度、超塑性等）。可铸性（流动性、收缩性（线收缩率和体收缩率）、热裂倾向性等）。总之，航空锻、铸件的研制与生产必须建立在对金属材料有充分认识的基础之上，唯有充分掌握材料特性，把握材料与锻、铸件组织性能、冶金质量之间的规律性关系，并体现在锻压工艺和锻造工艺中，才能研制或生产出优质的航空锻、铸件。

航空零件的设计选材由型号总设计师系统负责，但在技术上必须会同材料冶金系统共同商定，材料冶金系统侧重于从材料的性能和工艺性等方面提出可行或不可行的意见，把握住选材工艺性审查这一环节，供设计系统决策并承担决策者的责任。

第二、使锻、铸件实现精化，大幅度地提高锻、铸件的材料利用率，是锻、铸工程技术人员的责任。发展锻、铸新工艺、新设备，改进提高现有工艺方法，从节省每一克金属材料入手，运用计算机数值模拟仿真技术，精心设计锻、铸件毛坯图和模具图，优化锻、铸工艺过程，采用先进的加热方式和润滑方法等，可以实现毛坯精化。除合金结构钢锻件外，铝合金、钛合金、高温合金推广精密锻造、等温锻造或热模（Hot die）锻造可以收到锻件精化的更好效果。

第三、大力倡导节能、降耗、绿色制造，在航空金属结构材料和锻、铸件的生产中具有特别重要的现实意义。航空用金属结构材料如高温合金、钛合金、特殊钢都属于战略物资，不仅价格昂贵，而且资源有限，有些合金元素如 Ni、Cr、Co 还十分稀缺。我国进口某些航空材料受到西方发达国家的制约。

某型发动机涡轮盘用 GH4169 合金制造，钢厂的材料收得率为 60%，锻件“肥头大耳”，材料利用率仅 23%，假设钢厂投料 1000kg、经 2-3 次熔炼，切头去尾剥皮、饼（棒）表面车光（NTD），锻成涡轮盘锻件直至加工成零件装机，实际有使用价值的 GH4169 材料仅 138kg，绝大部分的金属材料成为切屑。美国类似件的材料利用率高于我国三倍。

环形锻件在航空发动机上数量仅少于叶片，环形锻件目前的生产方法是整体轧制，锻件同样是“肥头大耳”，加工成环形零件后的材料利用率只在 10% 以内，绝大部分的高温

合金、钛合金材料也都成为切屑。

高温合金、钛合金棒料价格约 250~300 元/公斤。某型发动机 GH4169 合金涡轮盘锻件重 340kg，单价 13 万元；飞豹飞机主起落架 30CrMnSiNi2A 模锻件重 605kg，单价 6.8 万元；H6 飞机前梁接头 LD10 铝合金模锻件重 190kg，单价 5.5 万元。稀缺的材料，昂贵的价格，冶金工作者不能不考虑节能、降耗、绿色制造和制造成本等问题。

从技术层面上实现金属结构材料和锻、铸件达到“优质、精化、高效、低能耗、高环保”的目标，既要从开发软件方面下功夫，立足于技术、工艺自主创新；又要从建设硬件、加大技改力度等方面创造良好的科研生产条件。航空锻、铸行业目前的现状在软件硬件两方面离应当达到的水平还相去甚远。

在技术管理层面上，材料和热工艺的技术管理工作在新形势、新体制下遇到了新的挑战，其中一个突出问题是航空工业一分为二成为两个集团公司之后，材料冶金工作中的共性问题的管理有被削弱的危险，即使在同一集团之内，材料热工艺技术攻关工作亦分散在不同型号系统内各自独立运行，材料研制、热工艺攻关重复设题重复研究的现象越演越烈，集团之间、型号之间甚至院所院校之间互不沟通，成果信息互不共享。这种局面如不引起重视并寻求良策，材料冶金技术管理工作必将阻碍航空工业的发展。

我国航空工业历史上曾经召开过四次冶金技术工作会议，最近的一次会议是 1994 年，每次冶金技术工作会议都有其一定的历史背景，每次会议后都能形成若干统管材料冶金技术工作的规章制度，或行约行规，对促进航空工业材料冶金技术工作的发展和提高技术水平产生了积极的作用。在 1994 年航空工业冶金技术工作会议上，总结了 40 多年来材料冶金技术工作的经验与教训，特别是对材料冶金技术工作的地位和冶金质量问题的认识有了新的突破，体现在中航总公司文件航空规[1994]25 号“关于印发《航空工业材料及热工艺技术工作规定》等三项技术管理规章的通知”中。材料冶金称为“内科”，产品冶金缺陷质量问题称为“内科病”，其特点是：“隐患深，诊断难，危害大，涉及面广，处理周期长”。历史上由冶金质量问题造成等级事故、飞机发动机大面积停飞停产、延误新机研制和生产的事例举不胜举，必须引以为戒，寻求新体制下加强材料冶金技术管理工作的组织措施和技术措施。

针对我国航空材料发展进程中存在“五多五少”的问题，在总结我国航空材料 40 余

年技术管理经验与教训的基础上，围绕航空材料技术发展的政策和建议，提出了需要认真研究、正确把握的十个关系问题，这十个问题是：

对材料研制和材料应用研究相互关系的再认识；

研制新材料和改进改性定型材料的关系问题；

关于材料预先研究和型号研制材料技术攻关的关系问题；

关于对材料国产化一些问题的再认识；

在材料研制和应用研究中需强调热加工工艺研究和测试技术研究的问题；

关于民用飞机材料的适航认证问题；

关于在社会主义市场经济条件下，理顺航空材料管理体制问题的再认识；

关于航空材料扩大国际合作的问题；

关于航空材料所需的技术装备应当超前发展和安排的问题；

关于重视发展低成本材料技术和低成本制造技术的问题。

### 参考资料

[1]. 师昌绪主编，“材料大辞典”，化学工业出版社，1994年出版

[2]. 李成功，于翹，曾凡昌编著，“航空航天材料第一章”，国防工业出版社，2002年出版

[3]. 钟掘、李仁涵、曾凡昌执笔，“中国工程院—发展我国大型锻压装备研究咨询报告”，2004年

[4]. 中国一航，“FWS10 发动机材料工艺攻关技术文集第一分册”，2003年

[5]. 江和甫，“对涡轮盘材料的需求及展望”——“航空材料及其构件成形技术论文集”，中国锻压协会航空材料成形委员会，内部，2003年

[6]. 中国航空材料手册编委会，“中国航空材料手册第2版第1~5卷”，中国标准出版社，2002年

[7]. 曾凡昌，“WP-6 发动机 I、II 级涡轮盘、承力环和后轴颈模锻件精化工艺试验技术总结”，内部，1968年2月