

# 3D打印与高温合金白皮书1.0

White Paper of 3D Printing and High-Temperature Alloys 1.0

---



---

白皮书下载请加入3D科学谷QQ群: 529965687

随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号: cn\_3dsciencevalley

---

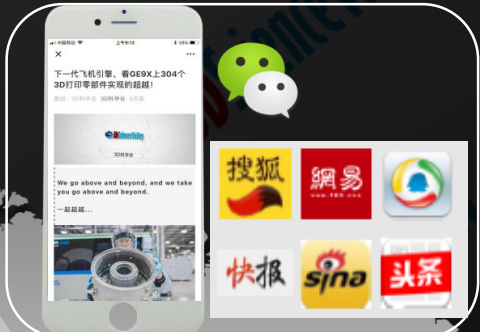


中文

English

2百万+点击量 (年)

**3D Science Valley**  
 市场研究白皮书系列、Insights行业洞见、AME卓越论坛、《3D打印与工业制造》，四大板块之间相互联动，3D科学谷立足上海与德国柏林，全球视野，精准洞察，(www.3dsciencevalley.com)，是国际上最有影响力的3D打印界的智囊平台。



10万+订阅用户; 4百万+阅读量

机械工人出版社发行，京东、当当有售



交汇

能量聚合

认知贯通

升级

AME卓越论坛聚焦3D打印改变产品的方式

多维

行业应用白皮书提升行业对3D打印的认知水平

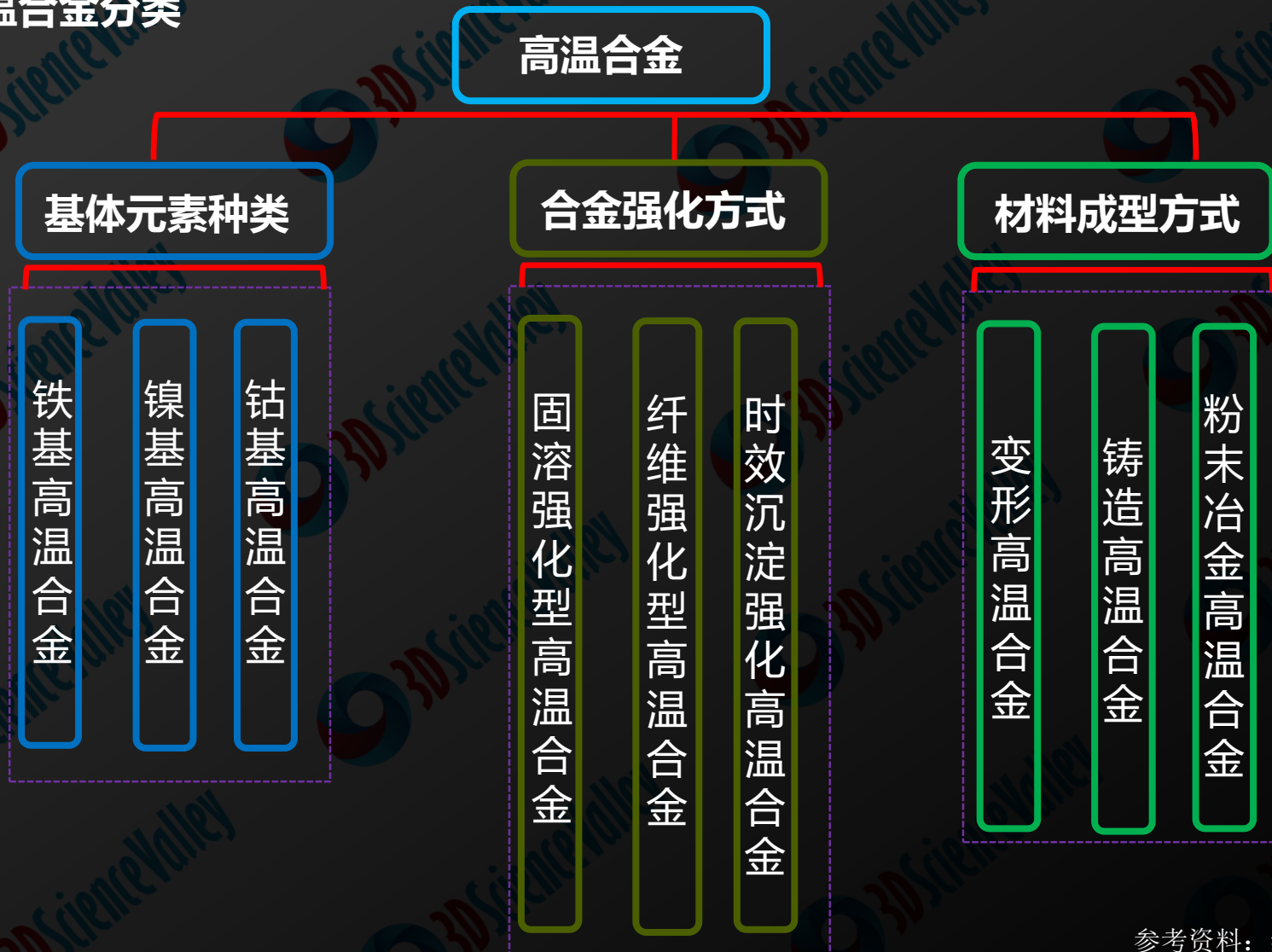


融合



# 高温合金 基本情况

# 高温合金分类

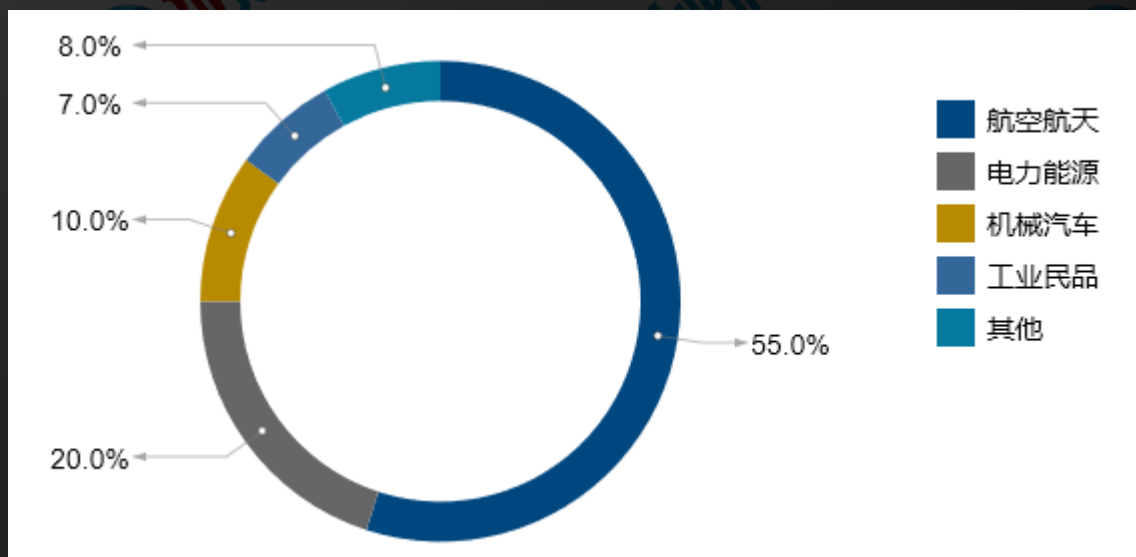




## 2 高温合金应用领域

高温合金是指以钛、镍、钴为基，能在600°C以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料。高温合金具有较高的强度、良好的抗疲劳断裂性能，较强的抗热腐蚀性以及出色的组织稳定性，应用领域包括航空发动机、航天发动机、能源、核工业、石油化工等领域。

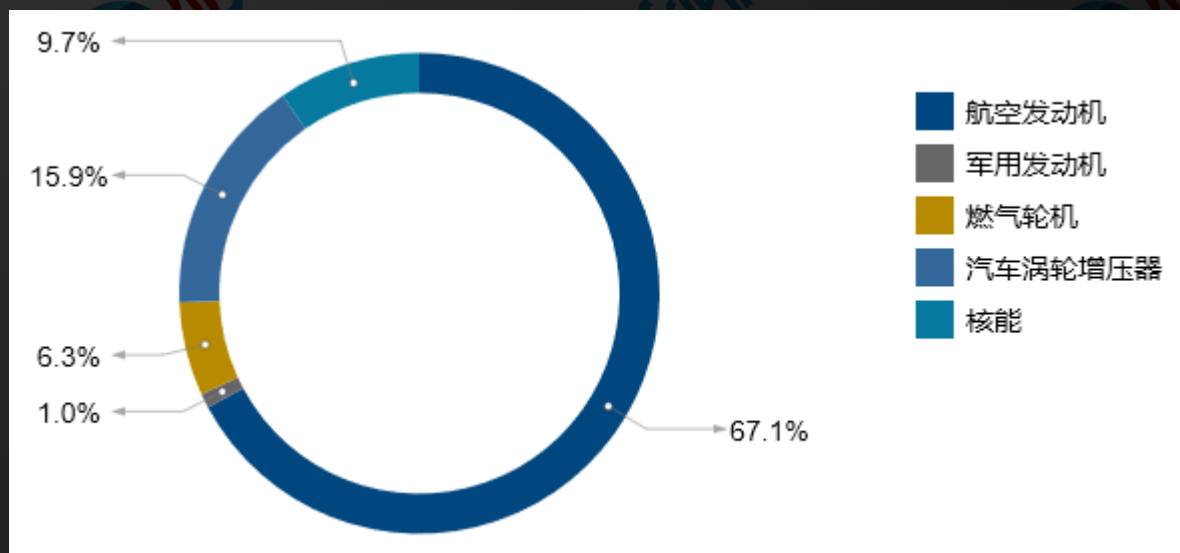
### 高温合金应用领域



### 3 中国高温合金应用市场

我国高温合金材料年产量约1万吨，每年需求量约2万吨，高中端需求约3000吨。

#### 中国高温合金应用市场



#### 中国高温合金应用市场年需求量 (吨)

航空发动机	16000
军用发动机	230
燃气轮机	1500
汽车涡轮增压器	3800
核能	2300

### 航空航天

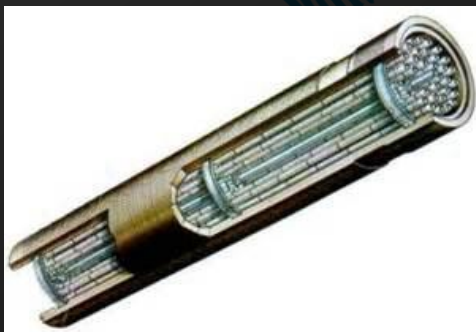


- 燃气室
- 导向器
- 涡轮叶片
- 涡轮盘

### 燃气轮机

- 涡轮叶片
- 叶轮

### 核电领域



- 燃料包壳
- 结构件
- 定位格架
- 气体炉热交换器



# 航空发动机分类





# 火箭发动机

## 火箭发动机

物理动力发动机

核火箭发动机

电火箭发动机

化学火箭发动机

液体火箭发动机

固体火箭发动机

混合推进剂火箭发动机

燃气轮机

轻型燃气轮机

重型燃气轮机

分类

工业发电

船舶动力

管线动力

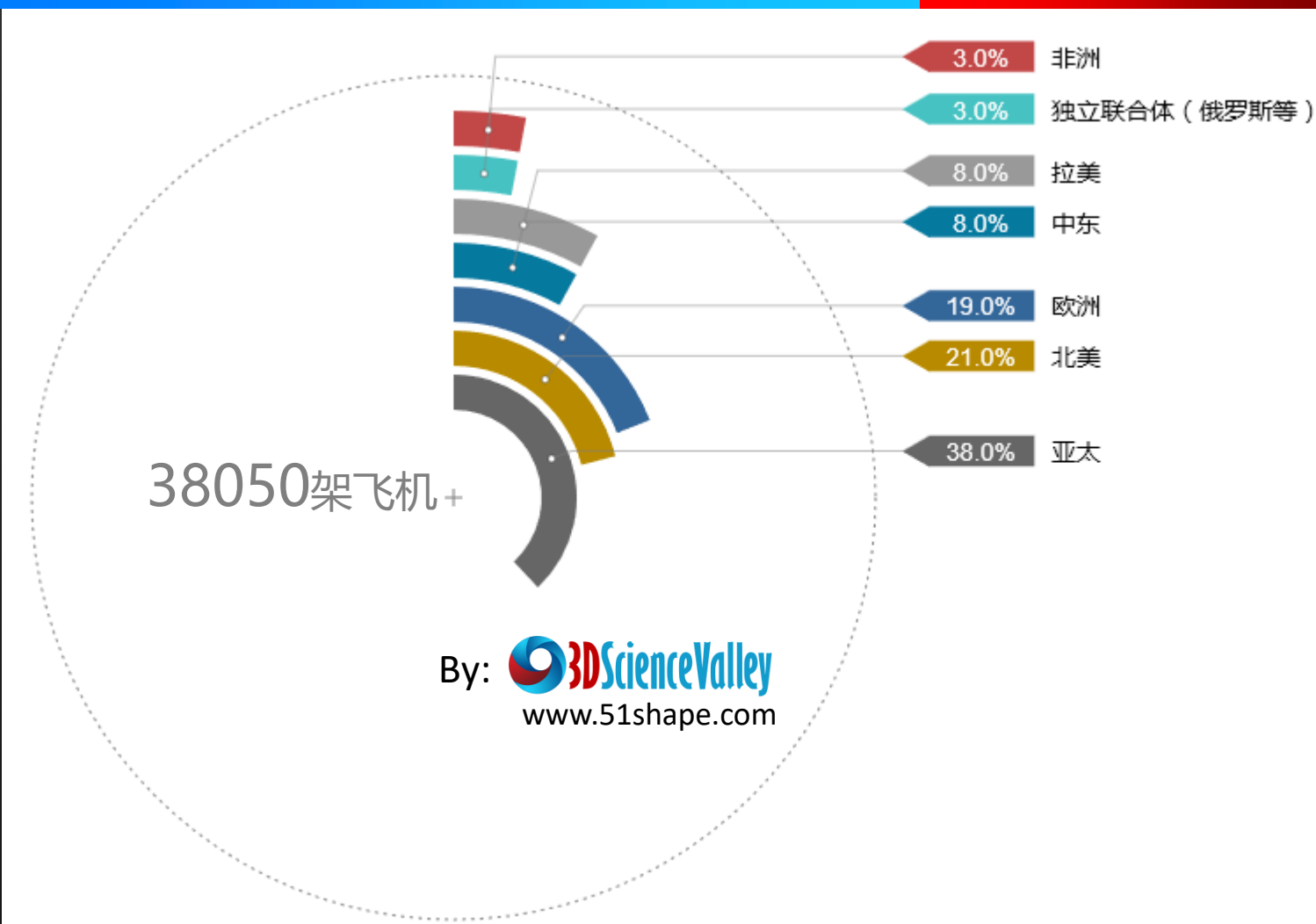
机车坦克

城市公用电网

用途

飞机未来20年需求量-按地区比例 (数据来源: 波音)

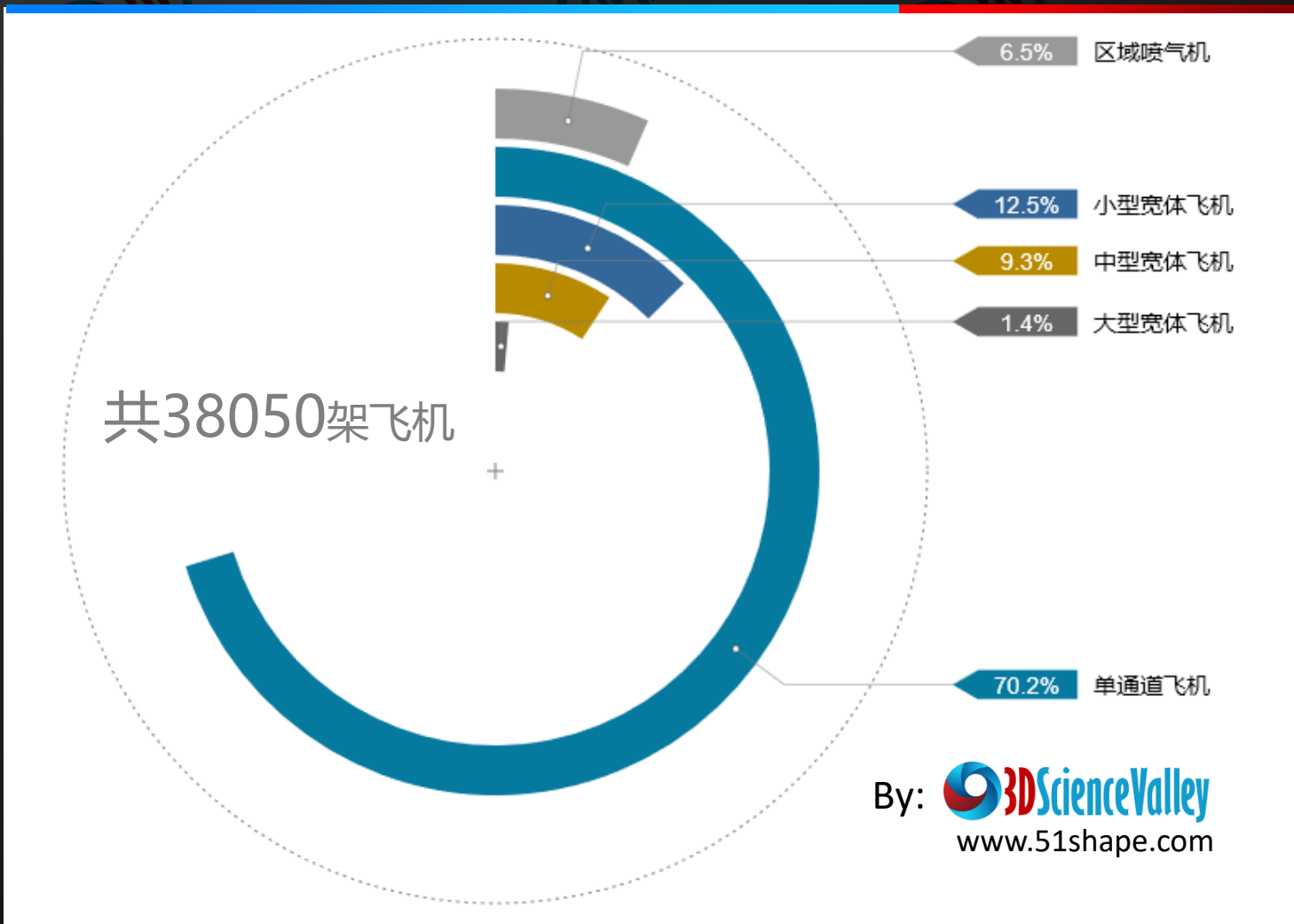
波音预测, 到2034年, 全球民用飞机的总需求量为38050架, 市场价值高达5.6万亿美元, 从2014年到2024年, 这期间需要交付的这38050架飞机中的58%是为了满足增长需求。



飞机未来20年需求量-按机型 (数据来源: 波音)

波音预测, 到2034年, 全球民用飞机的总需求量的38050架中:

大型宽体飞机: 540  
 中型宽体飞机: 3520  
 小型宽体飞机: 4770  
 单通道飞机: 26730  
 区域喷气机: 2490





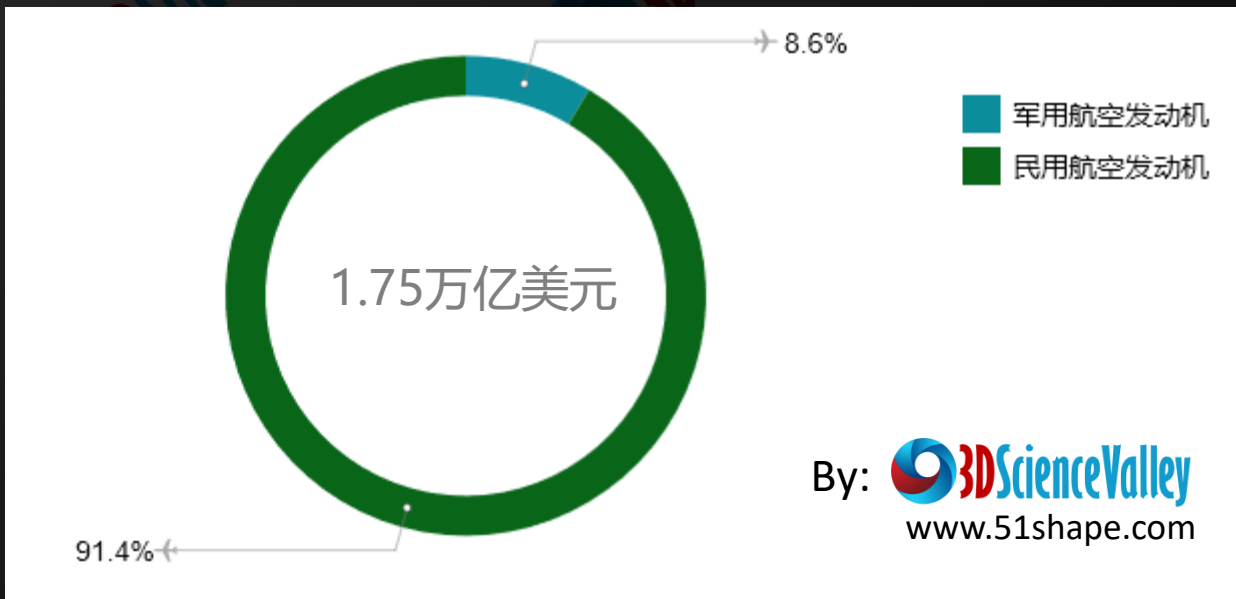
10 飞机发动机市场

未来20年全球民航航空发动机领域对高温合金的总需求大约为42.7万吨。

参考资料：长城证券

飞机发动机未来20年预测（数据来源：罗罗）

根据R&R公司2014年对军用航空市场预测，未来20年（2015-2035）全球军用航空发动机的市场需求有望达到1500亿美元。美国、欧洲和远东地区是三大主要市场。未来20年，民用航空发动机市场空间为1.60万亿美元。



By:   
www.51shape.com

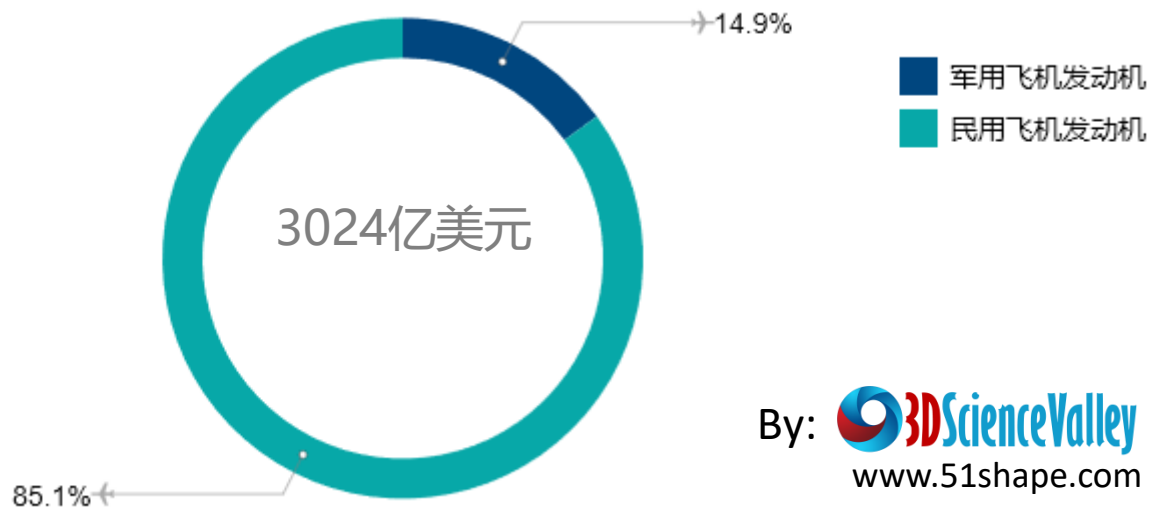
## 11 中国飞机发动机市场

根据中信建设研究发展部预测，未来20年，中国军用飞机发动机市场需求为452.1亿美元，民用飞机发动机市场整体需求为2572亿美元。整体市场需求为3024亿美元。

来自于单通道飞机和中型宽体飞机的巨大需求，带动对上游高温合金的需求。此外，中国军用飞机市场预计未来20年对高温合金市场需求超过5.7万吨。

参考资料：长城证券

## 中国飞机发动机未来20年预测（数据来源：中信）



# 高温合金的 3D打印特点

## 12 镍基高温合金

镍基高温合金一般具有良好的抗拉伸、抗疲劳和抗热疲劳性能。镍基合金，Inconel有两个最常见的型号是625和718。

### Inconel 625

在温度高达约815条件下依然提供优良的负载性能，此外，耐腐蚀性能，这种合金广泛应用于需要高的点蚀、缝隙腐蚀和耐高温的行业，例如航空航天，化工和电力工业中的应用。

### Inconel 713

具有优异的抗热疲劳性能，以及在927°C的特殊断裂强度，非常适合于喷气发动机燃气轮机叶片。

### Inconel 718

基于铁镍硬化的超合金，具有优异的耐腐蚀性以及良好的耐热和拉伸，疲劳，蠕变性能，Inconel 718适合各种高端应用包括飞机涡轮发动机和陆基涡轮机（叶片，环，套管，紧固件和仪表零件）。





## 13 镍基高温合金

使用镍基合金的选择通常取决于最大工作温度和强度要求的组合。这些镍基合金具有高合金含量，能够承受各种各样的严重腐蚀环境。即使在更严重的腐蚀环境中，镍和铬的组合可以耐氧化化学反应，钼的存在使这些合金抗点蚀和缝隙腐蚀，铌钽则在焊接过程中防止随后的晶间应力腐蚀开裂。

### Inconel 738

具有良好的高温蠕变断裂强度，结合抗热腐蚀性能，较低铬含量的高强度超合金。Inconel 738提供高达920 - 980°C联合承受长期暴露于高温腐蚀性的环境中的性能，适合用于飞机发动机、燃气轮机，具有良好的蠕变强度。

### Hastelloy X

这种合金的特点是在高温下具有高强度和抗氧化性，并且通常可用于高达1200度的环境，它也表现出良好的延展性。

应用在航空航天技术，燃气轮机部件和燃烧区组件如过渡管，燃烧器罐，喷杆，火焰稳定器，加力燃烧室，排气管和座舱加热器。

Hastelloy X还耐应力腐蚀开裂。应用于工业炉，石油化工应用和化学过程工业（催化剂支持网格，围巾，反驳道，炉管挡板和热解）



## 14 钴铬高温合金

钴铬高温合金具有高的强度，优良的耐腐蚀性和良好的生物相容性，无磁性的行为。

## Co28Cr6Mo

钴铬合金 (Co28Cr6Mo) 由于高耐磨性，良好的生物相容性，无镍 (镍含量 < 0.1%) 组成，使其常用于外科植入物包括合金人工关节，膝关节和髋关节。也可用于发动机部件，风力涡轮机和许多其他工业部件，以及时装行业，珠宝等。与Stellite21合金类似，这种合金具有较好的拉伸强度 (> 1100mpa) 具有高韧性、延性 (伸长率18-20%)，良好的耐腐蚀性，以及在高温下正常工作的性能。与大多数增材制造的金属一样，最终的性能可以根据具体的要求，通过精心选择的热处理周期来实现。



# 高温合金的 3D打印ASTM标准

## 15 粉末流动性表征试验方法标准进展

### 基于增材制造的粉末流动性表征试验方法标准-ASTM标准进展

ASTM WK55610 工作组目前正在开展针对于增材制造工艺性能相关的粉末性能表征及其测试方法的标准编制，期望给出可重复的、具有良好再现性的测试程序及方法，并且将这些性能的测试灵敏度及测试精度定量化。由于粉末性能的复杂性，大量的性能参数都会对粉末性能产生影响，在标准编制过程中，工作组目前初步将粉末性能大致分为四个方面：

- 1、粉末如何从静态转变为动态？
- 2、运动中的粉末行为是什么样的？
- 3、受到固结应力时粉末变化如何？
- 4、空气通过粉末床的松散粉末的难易程度如何？

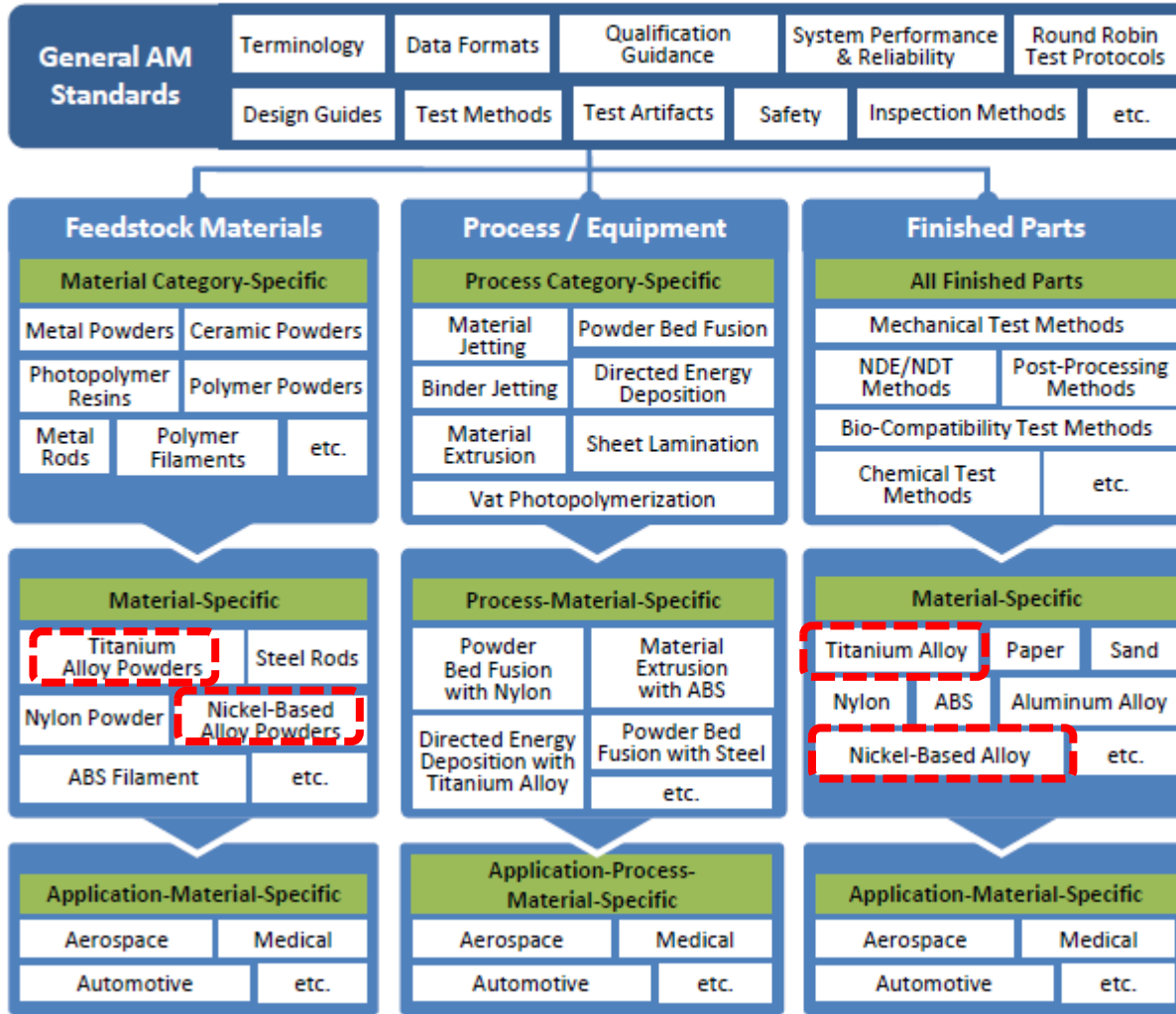
将这四方面的性能定量化，对于粉末生产方及使用方来讲，可以全面评价并给出在任意增材制造工艺环境下的粉末性能。这四方面的粉末性能可以通过下面的三组性能测试来进行表征：

- 1、剪切性能（表征粉末如何从静态转变为动态）；
- 2、动态流动性能（运动中的粉末行为）；
- 3、松散性能（固结载荷对于粉末的影响以及空气如何在粉末中通过）。

依据这三组性能的测试要求，该标准主要考虑剪切性能（粉末间及粉末与容器壁间）测试、动态流动性能测试、以及松散性能（松装密度、固结性、通气性）测试等几类测试方法以及相应推荐的仪器设备。



# Additive Manufacturing Standards Structure



## General Top-Level AM Standards

- General concepts
- Common requirements
- Generally applicable

## Category AM Standards

Specific to material category or process category

## Specialized AM Standards

Specific to material, process, or application



Existing Standards with Minimum Mechanical Properties for AM Parts

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM F42	F2924	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
	F3001	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion
	F3055	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion
	F3056	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion

关于Ti6Al4通过粉末床熔化技术制造的零件机械性能标准

关于Ti6Al4(extra low interstitial)通过粉末床熔化技术制造的零件机械性能标准

关于镍基合金(UNS NO7718)通过粉末床熔化技术制造的零件机械性能标准

关于镍基合金 (UNS NO6625)通过粉末床熔化技术的零件机械性能标准

关于钛合金通过激光直接能量沉积技术制造的零件机械性能标准

Committee	Test Standard Number	Title
SAE AMS-AM	AMS 4999A	Directed energy Titanium alloy laser deposited products

Existing Specifications Including Chemical Composition Requirements for AM Parts

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM F42	F2924	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
	F3001	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium ELI (Extra Low Interstitial) with Powder Bed Fusion
	F3055	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM F42	F3056	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion
	F3184	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion

## 19 正在开发的标准 | 3D打印零件化学成分标准

Specifications in Development Including Chemical Composition Requirements for AM Parts

Committee	Work Item Number	Title
ASTM F42	WK51329	Standard Specification for Additive Manufacturing Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy (UNS R30075) with Powder Bed Fusion
	WK53423	Standard Specification for Additive Manufacturing Aluminum AlSi-10Mg with Powder Bed Fusion
SAE AMS-AM	AMS7000 WIP	Additive Manufacture of Aerospace parts from Ni-base Superalloy 625 via the Laser Powder Bed Process

关于通过粉末床熔化技术制造Co-28Chromium-6零件的标准

关于通过粉末床熔化技术制造AlSi-10Mg零件的标准

关于通过粉末床熔化技术制造镍基超合金625航空零件的标准

金属零件制造标准

Committee	Work Item Number	Title
AWS D20	AWS D20.1/D20.1M:201X	Specification for Fabrication of Metal Components



## 20 正在开发的标准 | 3D打印零件化学成分标准

The following test standards are published for use with additively manufactured materials:

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM F42	ISO/ASTM 52900	Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology
ASTM F42	F2924	Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion
ASTM F42	F3055-14a	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N07718) with Powder Bed Fusion
ASTM F42	F3056-14e1	Standard Specification for Additive Manufacturing Nickel Alloy (UNS N06625) with Powder Bed Fusion

ASTM F42	F2971	Standard Practice for Reporting Data for Test Specimens Prepared by Additive Manufacturing
ASTM F42	F3122	Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
ASTM F42	F3184	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion
ASTM F42	F3187-16	Standard Guide for Directed Energy Deposition of Metals

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM F42	ISO/ASTM 52921	Standard Terminology for Additive Manufacturing-Coordinate Systems and Test Methodologies

The following test standards and specifications are in development for use with additively manufactured materials:

Committee	Test Standard Number	Title
SAE AMS-AM	AMS7000	Additive Manufacture of Aerospace parts from Ni-base Superalloy 625 via the Laser Powder Bed Process
SAE AMS-AM	AMS7001	Ni Base 625 Super Alloy Powder for use in Laser Powder Bed Add Mfg Machines
SAE AMS-AM	AMS7002	Process Requirements for Production of Powder Feedstock for use in Laser Powder Bed Additive Manufacturing of Aerospace parts
SAE AMS-AM	AMS7003	Laser Powder Bed Fusion Process
ASTM F42	WK49229	New Guide for Orientation and Location Dependence Mechanical Properties for Metal Additive Manufacturing
ASTM F42	WK55297	Additive Manufacturing – General Principles – Standard Test Artefacts for Additive Manufacturing

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM F42	WK51282	Additive Manufacturing, General Principles, Requirements for Purchased AM Parts
ASTM F42	WK51329	New Specification for Additive Manufacturing Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy (UNS R30075) with Powder Bed Fusion1
ASTM F42	WK53423	Additive Manufacturing AlSi10Mg with Powder Bed Fusion
ASTM F42	WK53878	Additive Manufacturing - Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials - Part 1: Feedstock materials
ASTM F42	WK53879	Additive Manufacturing - Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials - Part 2: Process-equipment
ASTM F42	WK53880	Additive Manufacturing - Material Extrusion Based Additive Manufacturing of Plastic Materials: Final Part Specification
ASTM F42	WK56649	Standard Practice/ Guide for Intentionally Seeding Flaws in Additively Manufactured (AM) Parts
AWS D20	D20.1	Standard for Fabrication of Metal Components using Additive Manufacturing

## 22 现存的标准 | 关于钛合金和铝合金的标准

Applicable standards and specifications include:

- ASTM E539, *Analysis of Titanium by XRF*
- ASTM E2371, *Analysis of Titanium by Direct Current Plasma and Inductively Coupled Plasma AES*
- ASTM E1941, *Determination of Carbon by Combustion*
- ASTM E1447, *Determination of Hydrogen in Titanium by Inert Gas Fusion Thermal Conductivity/Infrared Detection*
- ASTM E1409, *Determination of Oxygen and Nitrogen in Titanium by Inert Gas Fusion*

Test methods used to analyse the chemical composition of aluminum include the following:

- ASTM E34, *Test Methods for Chemical Analysis of Aluminum and Aluminum-Base Alloys*
- ASTM E1251, *Test Method for Analysis of Aluminum and Aluminum Alloys by Spark Atomic Emission Spectrometry*
- CEN EN 14242, *Aluminum and Aluminum Alloys - Chemical Analysis - Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectral Analysis*

合金粉末最常用的是钛合金 Ti6Al4V 或者叫 Ti64，这种合金令人难以置信的多才多艺，通常用于许多行业，由于其高强度，可比钢，但几乎是钢一半的重量，所以用途广泛，成为最流行的合金之一。这种合金实际上主要有两个档次，更常见的是 Grade 5 级，和超低间隙 Grade 23 级。后者有更严格的控制氧和氮含量的要求。

Existing Standards for Testing Mechanical Properties which can be Applied to AM Parts

Committee	Test Standard Number	Title
ASTM B07	ASTM B557	Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products
	ASTM B645	Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness Testing of Aluminum Alloys
	ASTM B646	Fracture Toughness Testing of Aluminum Alloys
ASTM E04	ASTM E384-16	Standard Test Methods for Microindentation Hardness of Materials
ASTM E08	ASTM E399-12e3	Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness $K_{Ic}$ of Metallic Materials
	ASTM E466-15	Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials
	ASTM E561-15a	Standard Test Method for KR Curve Determination
ASTM E28	ASTM E8/E8M-16a	Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
	ASTM E9-09	Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature
	ASTM E10-15a	Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials

Committee	Test Standard Number	Title
	ASTM E18-16	Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials
ASTM F42	ASTM F3122-14	Standard Guide for Evaluating Mechanical Properties of Metal Materials Made via Additive Manufacturing Processes
	ASTM F3184	Standard Specification for Additive Manufacturing Stainless Steel Alloy (UNS S31603) with Powder Bed Fusion



## 24 正在开发的标准 | 3D打印零件化学成分标准

### 增材制造零件采购要求的标准化

鉴于增材制造技术的特点，在其零件采购时，应主要考虑方面包括：零件几何外形；尺寸公差；表面形貌；零件构建取向；零件生产用原材料；零件修复；可接受缺陷或偏差；以及工艺质量控制信息等；

零件采购时，还应注明零件交付时的包装、运输、贮存等相关要求。另一方面，由于增材制造零件应用环境及条件不同，其采购要求也不尽相同。对于其他特殊的要求，可以通过采购单上的附加说明予以阐述。

同时，在增材制造零件验收时，应考虑零件不同使用环境要求、零件制造工艺技术特点、制造技术成熟度等方面，分为新工艺研发时所用的合格零件验收要求、批量生产时的首件鉴定验收要求以及用于持续生产质量控制的质量一致性验收要求。各阶段的验收均应有相应的验收文档，以保证后续质量溯源等相关使用。

目前，ISO TC261与ASTM F42正在联合开展相关标准的研究与制定工作，为增材制造零件产品采购及后续验收提供标准依据。

来源：中国航空综合技术研究所，栗晓飞博士



# 高温合金的 3D打印应用

航空发动机

镍基高温合金

由镍基合金X制成的喷嘴是Leonardo AW189型直升机的辅助动力装置(APU)的核心部件之一，已被欧洲航空安全局(EASA)认证。3D打印喷嘴安装在赛峰集团设计的eAPU60微型涡轮发动机上，以满足推重比高和结构紧凑的需求。e-APU60能够提供60kWe功率，能够保证发动机的电力起动（在地面或者空中停车状态）和座舱加热。e-APU60的典型特征包括：更优的功率重量比，出色的紧凑性，流线型结构和基于创新科技的高压力循环，高可靠性保证，低使用费用和出色的性能。



图片来源：赛峰集团

航空发动机

镍基高温合金

空客A350-1000用的是XWB-97发动机,XWB-97看起来非常像A350-900的XWB-84发动机,可产生97000磅的推力。提升的推力主要来自新型高温涡轮技术,结合了更新的发动机的核心技术以及更大风量的风扇来实现的。这一切的实现归根结底是使用了先进的空气动力学技术,以及3D打印零部件。3D打印的镍金属结构件是一件直径1.5米、厚0.5米的前轴承座,含有48个翼面。

## Trent XWB for the A350-1000

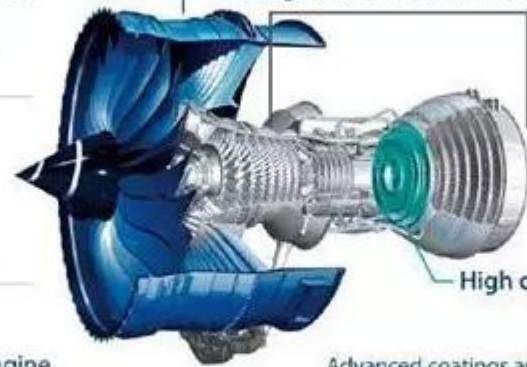
TRENT XWB

High flow fan system  
enabled with  
inflected annulus

Larger Core to increase flow

Increased  
mechanical  
capability for  
97,000lbs thrust

Maintain nacelle  
aerolines as 84k engine



High capability turbines  
Tip clearance control  
Upgraded materials  
Advanced coatings and cooling technology

Improved capability, without impact on specific fuel  
consumption or on-wing life

Rolls-Royce proprietary information



Rolls-Royce

图片来源: Rolls-Royce

## 宽体客机发动机 – 传感器壳体 GE

航空发动机

钴铬高温合金

GE 的T25传感器壳体得到了美国联邦航空局的认证，这是GE 航空首个3D打印的金属零部件。2015年4月T25传感器壳体首次用在飞机发动机中，目前已被安装在超过400个GE90-94B发动机中。该零部件处于飞机发动机高压压缩机的入口处，T25 传感器负责为发动机控制系统提供压力和温度的测量数据。GE90-94B发动机可以为波音777宽体飞机提供动力。

3D打印技术使得GE的工程师对传感器外壳的几何形状进行优化设计和生产，使外壳能够更好地保护传感器上的电子不受具有潜在破坏性的气流和结冰的影响。GE 航空GE90/GE9X项目的负责人曾表示，通常使用铸造等传统制造方式研发这样一个零部件需要几年的时间，而3D打印技术的使用让产品开发周期缩短了一年的时间。





## 28 窄体客机发动机 GE喷油嘴

2010年空客将GE生产的LEAP-1A发动机作为A320neo飞机的选配，LEAP发动机中带有3D打印的燃油喷嘴。2015年5月19日，A320neo飞机首飞成功。装有LEAP发动机的A320neo 获得欧洲航空安全局（EASA）的认证和美国联航空管理局（FAA）的认证。2017年，巴黎航展，GE称含3D打印零件的LEAP引擎为GE带来了310亿美金的订单。CFM国际公司是GE航空和赛峰飞机发动机公司的合资公司，正在生产先进的LEAP引擎，该引擎正在安装在空中客车公司和波音新型的窄体商用客机上。发动机上复杂的3D打印燃油喷嘴有助于LEAP燃料燃烧和排放减少15%。

EBM 加工技术

航空发动机

钴铬高温合金





## 涡浆发动机 霍尼韦尔

霍尼韦尔已准备让金属3D打印技术走出实验室，正式应用在航空制造中。目前，他们正在印度Bangalore的3D打印实验室中测试金属粉末，该粉末材料将用于打印1000个金属零部件。霍尼韦尔还将突破目前金属3D打印材料种类的限制，尝试将超过40种新型金属3D打印粉末材料应用在航空制造中。铝和镍的3D打印应用尤其受到重视，霍尼韦尔将用它们3D打印TPE331引擎中的7个零部件。

航空发动机

镍基高温合金



30

## 齿轮传动涡扇发动机 普惠、MTU

MTU在研发过程中，包括涡轮箔、燃料喷射器和其他零件往往都是3D打印的，并且设计师还可以通过3D打印的技术减少零件数量，并且降低零件重量，提高零件强度，3D打印已经被证明在这个过程中的可靠之处。

齿轮传动涡扇发动机目前的主要供给机型是Airbus A320neo，这是MTU航空发动机与普惠合作的项目。而Embraer, Bombardier, Erkut和Mitsubishi等公司也与MTU航空发动机签订了齿轮传动涡扇发动机的合同，另外，MTU还参与宽体飞机的发动机制造，包括与俄罗斯航空航天合作。

PBF 激光加工技术

航空发动机

镍基高温合金

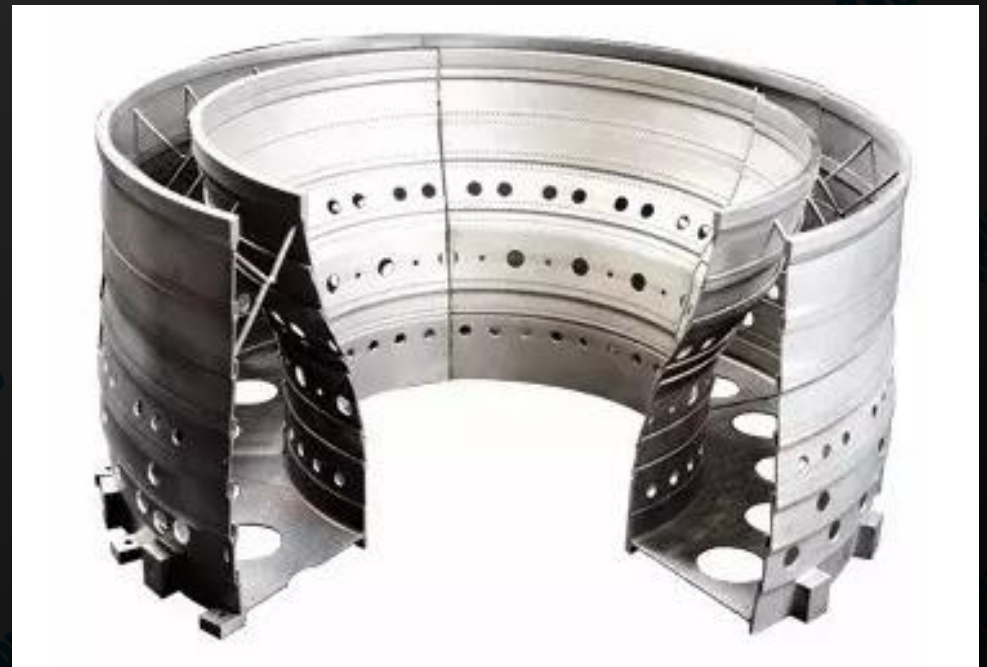


INTECH DMLS为印度斯坦航空公司(HAL)所交付的25KN发动机燃烧室机匣是一种复杂的薄壁零部件, 25KN发动机燃烧室机匣的制造材料为镍基高温合金, 此类零部件不仅具有大型复杂结构, 而且对结构完整性要求高。

传统工艺制造该零部件的周期为18-24个月, 而Intech DMLS研发和制造燃烧室机匣的周期为3-4个月, 使用的制造工艺包括镍基高温合金机匣的3D打印、热处理、机加工、表面处理, 以及对5个独立3D打印部件的激光焊接工艺。

航空发动机

镍基高温合金





航空发动机

镍基高温合金

2016年，金属合金开发商Arconic与空客签署了两个协议，为空客的商用飞机提供高温镍合金制造的3D打印部件和3D打印的钛金属机身部件。其中一个协议的内容是Arconic将为空客的A320系列飞机提供由高温镍超合金制成的3D打印管道部件。先进的镍超级合金让这些部件有卓越的耐热性，使热空气从发动机扩散到机身的其他部分。另一个协议是为A320系列飞机提供3D打印的钛机身支架。Arconic预计将在2017年第二季度根据这两个协议交付第一部分。

Arconic在传统金属制造技术和3D打印领域都有根基，并拥有航空航天工业中最大的HIP（热等静压）设备之一，该设备用于加强由钛和镍基超合金制成的3D打印和非打印部件的金属结构。此外，在2015年7月收购RTI国际金属公司后，Arconic加强了在钛和其他特种金属在航空航天等领域的制造能力。



## 迷你发动机 Aerojet Rocketdyne

2014年，航天军工领先制造商GenCorp下属的 Aerojet Rocketdyne宣布，他们用3D打印技术直接制造了一台完整的发动机并成功通过测试，而且由于制造技术的改变，这台发动机的零部件被合并至只有三个！

这是一台液氧/煤油发动机，在Aerojet Rocketdyne公司内部通常被称为“迷你型Banton”。因为这是该公司生产的几款动力并没那么强大的Banton发动机之一，迷你型Banton能够产生高达5000磅的推力。使用增材制造，Banton发动机的零部件数量急剧缩减到只有三个，其中包括喉部和喷嘴部分、喷油器和圆顶组件、燃烧室。

航天发动机

高温合金





AR1火箭发动机的单冲量 (single-element) 主喷油嘴是完全使用3D打印机制造的。AR1是一款正在开发中的50万磅推力级的液氧/煤油发动机，美国希望用它来替代俄罗斯的RD-180发动机。喷射器是用选择性激光熔化 (SLM) 技术制造的，3D打印被证明能够以与传统制造技术相比很低的成本快速制造出复杂的发动机零部件。仅在主喷射器一项，3D打印就把零部件的交货时间减少了9个月，并降低了70%的成本。

PBF 激光加工技术

航天发动机

高温合金

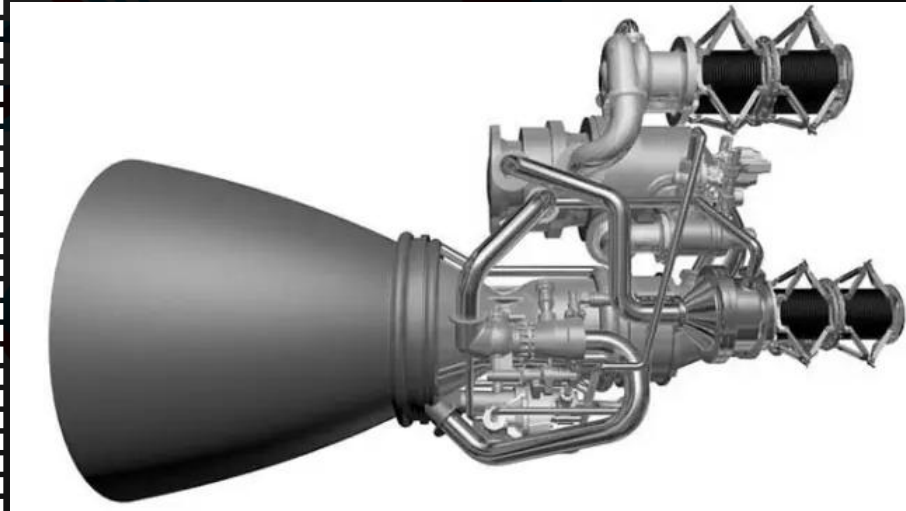


2015年3月，Aerojet Rocketdyne公司在其萨克拉门托测试中心成功完成了对其AR1增压发动机关键部件的热点火测试。AR1火箭发动机的单冲量（single-element）主喷油嘴是完全使用3D打印机制造的。

AR1是一款正在开发中的50万磅推力级的液氧/煤油发动机，美国希望用它来替代俄罗斯的RD-180发动机。根据2015年美国国防授权法案的要求，为了美国国家安全的考虑。到2019年之前美国制造的替代产品要完全取代俄罗斯的RD-180发动机，并可用于火箭发射。

航天发动机

高温合金



2017年，GKN航空航天公司宣布已经向法国的空中客车和赛峰集团提供了先进的Ariane 6号火箭喷嘴（SWAN）。

直径为2.5米，喷嘴采用创新技术制造而成，性能更高，交货时间更短，成本更低。通过激光焊接和激光能量沉积工艺对关键结构零部件进行加工，使得喷嘴的零部件数量减少了90%，从约1000个零部件减少到约100个零部件。并且降低了40%的成本，减少了30%的交货时间。

作为欧洲航天局Ariane研究与技术协会（ARTA）计划的一部分，该喷嘴已经在全面安装的发动机喷嘴测试中成功试用。现在，喷嘴将在法国安装到Vulcain 2.1发动机上并随后在德国进行测试。Ariane 6号火箭计划在2020年投入服务使用，这个项目是由欧洲航天局资助的，而GKN是空中客车和赛峰集团的主要合同承包商。

航天发动机

高温合金





航天发动机

镍基高温合金

SpaceX于2013年就成功通过EOS金属3D打印机制造SuperDraco火箭发动机推力室，使用了镍铬高温合金材料。与传统的发动机制造技术相比，使用增材制造不仅能够显著地缩短火箭发动机的交货期和并降低制造成本，而相比传统制造发动机的成本，而且可以实现“材料的高强度、延展性、抗断裂性和低可变性等”优良属性。这是一种非常复杂的发动机，其中所有的冷却通道、喷油头和节流系统都很难制造。EOS能够打印非常高强度的先进合金，是创造SuperDraco发动机的关键。



## 阀门、喷嘴、涡轮泵 Rocket Lab

Rocket Lab 含关键3D打印部件的氧/烃发动机重量23,000kg，有一系列的创新，包括3D打印技术的运用。其独特的电力推进系统，主要利用高性能无刷直流电动机和锂聚合物电池来驱动其涡轮泵。可以说是紧随美国宇航局NASA令业界轰动的3D打印涡轮泵之后。

引擎的关键部件是由瑞典Arcam（Arcam已被GE收购）的设备制造出来的，5000磅重的卢瑟福引擎的关键部件几乎全部由3D打印完成，发动机依赖于电力推进循环。推力室、阀门壳体、喷嘴、涡轮泵都是通过Arcam的电子束熔化钛合金打印技术。锂聚合物电池被用来驱动无刷直流电动机，然后将液态氧和煤油送到燃烧室。

EBM 加工技术

航天发动机

钛合金高温合金





## 39 盘类、环类、叶片、轴类和壳体部件 NASA

NASA通过美国俄勒冈州的Metal Technology (MTI) 公司为NASA旗下的Johnson太空中心生产Inconel 718合金部件。Inconel 718合金在650度以下的屈服强度居变形高温合金的首位,并具有良好的抗疲劳、抗辐射、抗氧化、耐腐蚀性能。

Inconel 718合金组织对热加工工艺特别敏感,加工者需要掌握合金中相析出和熔化规律及组织与工艺、性能间的相互关系,来开发出可行的工艺,才能制造出满足不同强度级别和使用要求的零件。Inconel 718合金的盘类、环类、叶片、轴类和壳体部件被用于下一代火箭发动机零部件。

航天发动机

镍基高温合金



## 涡轮、喷嘴、转子... Blue Origin

Blue Origin采用3D打印技术来打印BE-4火箭发动机的壳体、涡轮、喷嘴、转子。BE-4是以液化天然气为燃料的新一代火箭发动机。BE-4除了主泵提供的推力，还通过几个“升压”涡轮泵，混合液态氧和天然气从而提供500000磅的推力。3D打印在发动机的生产中发挥了关键作用，更令人大开眼界。Blue Origin的Ox Boost Pump增压泵（OBP）设计利用增材制造技术制造出许多关键部件，从单一的3D打印铝件，到镍合金液压涡轮。增材制造方法允许集成复杂的内部流道到设计中，这是难以通过传统制造技术制造出来的。涡轮喷嘴和转子也通过3D打印出来，仅仅需要很小的后期加工就可以满足精度要求。

除了Blue Origin新的格伦New Glenn火箭发射器，BE-4火箭发动机还可以被用在火神火箭发射器上，该火箭发射器是由联合发射联盟（ULA）开发的。

EBM 加工技术

航天发动机

镍基高温合金



## 氧化剂阀体 SpaceX

2017年1月，SpaceX在加州范登堡空军基地成功发射了一枚猎鹰9号火箭，猎鹰9号火箭上含有大量的3D打印零件，包括关键的氧化剂阀体，3D打印的阀体成功操作了高压液态氧在高震动情况下的正常运行。与传统铸造件相比，3D打印阀体具有优异的强度、延展性和抗断裂性。并且与典型铸件周期以月来计算相比，3D打印阀体在两天内就完成了。经过后加工处理的3D打印阀体经过广泛的测试程序—包括严格的发动机点火系列、部件级资格测试和材料测试才被纳入猎鹰9号火箭的标准零件。

航天发动机

高温合金





西门子Finspong工厂利用金属3D打印技术直接制造燃烧室中的复杂燃烧器零部件，并利用3D打印技术对燃烧器进行快速修复。

选择性激光熔化3D打印技术为燃烧器的设计优化提供了更广阔的空间，经过优化后的燃烧器拥有一个外壁和一个框架结构的内壁，这个复杂的双壁结构零部件最终通过金属3D打印设备一次性完成制造，不需要将几个单独的部件焊接在一起。Finspong工厂的测试表明，3D打印燃烧器可以均匀混入60%的氢气，显著高于传统燃烧器。

燃气轮机

高温合金





MAN Diesel & Turbo研发的金属3D打印导向叶片已被安装在MGT6100燃气轮机中进行测试，经过实际环境的验证，MAN Diesel & Turbo认为金属3D打印零件在实现涡轮机能源脱碳，节能环保等方面发挥了价值。

MAN Diesel & Turbo 投入了260万欧元，建立“MAN 增材制造中心”，该中心设立在MAN Diesel & Turbo位于德国的涡轮机工厂中。设计专家，材料专家和工程师将在增材制造中心共同工作，使用3D打印技术开发更多的复杂零部件，如压缩机叶轮和燃料喷嘴。

燃气轮机

高温合金



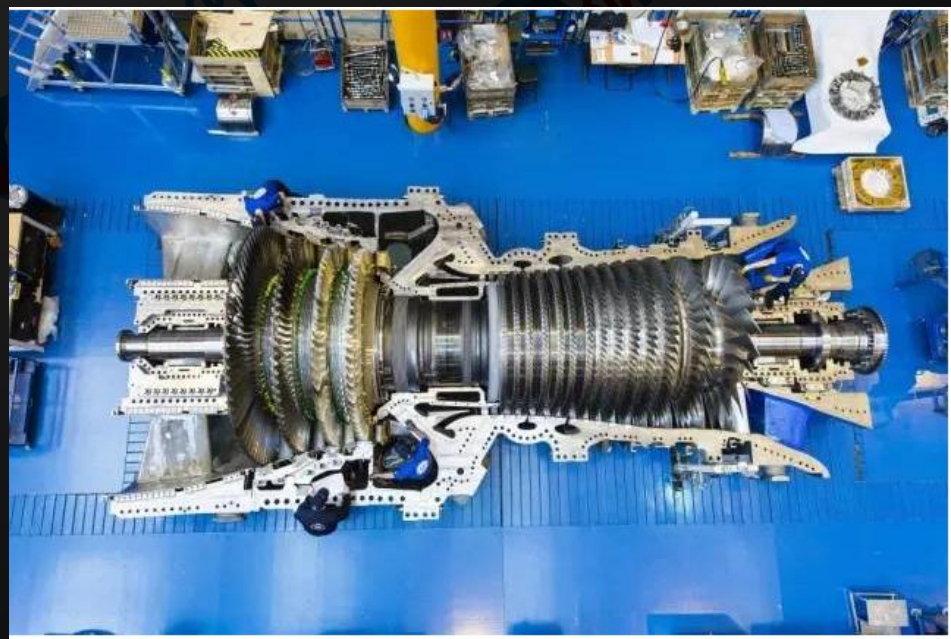
## 44 燃气轮机零件 GE

GE位于美国格林威尔的先进制造技术研究中心-“GE Store”孵化器是由GE电力投资7500万美元兴建的。它就在GE巨大的格林维尔制造园区旁边，格林维尔制造园区是个巨大的工厂，GE电力在那里制造世界最大的燃气轮机，燃气轮机重达数百吨但零件的精度却达到极其苛刻的程度。

GE还在其位于意大利塔拉莫纳的石油天然气工厂开设了一条增材制造零部件生产线。该生产线的主要任务是通过以激光为基础的增材制造技术制造燃气轮机燃烧室。

燃气轮机

高温合金



英国的核电站增材制造自动化单元由库卡承建，耗资1万欧元，占地10米x5米的增材制造单元由通过安装在一个三轴九米龙门的六轴机器人组成，在直径3.5米的转盘上装载着二轴机械手。机器人通过进行“TOPTIG”电弧焊的方式来完成增材制造，系统中集成了金属线送入焊枪，是由法国液化空气集团专门为机器人焊接应用开发的。

机器人按照计算机辅助设计模型的路径来焊接材料以创建三维几何形状。从而创造近净形零件，用于制造大型泵和阀的壳体或压力容器，有效降低初始成本和避免昂贵的锻件或铸件，并且有助于避免环境污染问题。

核电

高温合金





2016年中核集团利用3D打印技术的CAP1400自主化燃料原型组件下管座顺利完成，国内首次实现了3D打印技术在核燃料元件制造的应用。该技术如实现批量生产，有利于节约人力，提高核燃料元件的质量，并有望实现部分进口元件的国产化。

中核集团使用的3D设备为西安铂力特的SLM-S300激光成型设备，在铺粉精密成型方面具有优势。此外，中核集团旗下的中国核动力研究设计院和中国核电工程有限公司分别与南方增材科技有限公司签署了核电装备3D增材打印技术研发合作协议。

核电

高温合金





# 供应链



CARPENTER  
Specialty Alloys



ARCONIC



其他: Additive metal alloys, AMETEK, Argen Corporation, Ampall, ATI Specialty Materials, CVRM, Cooksen gold, Ecka Granuies, Equispheres, Eramet-Erasteel, Eutectix, Falcontech, Global Tungsten&Powders, H.C.Starck, Hoganas AB, NanoSteel, Osaka Titamnium, Praxiar Surface Technologies, Pyrogenesis, Legor Group, Questek Innovations, Tekna, TLS Technik, USD Powder, Valimet, VBN Components, Wolfmet Tungsten Alloys, and the major metal 3D Printers such as EOS, and Concept Laser...



西安铂力特、无锡飞尔康、中航迈特、宁波中物力拓超微材料、成都优材、浙江亚通焊材、上海材料所、广东省材料与加工研究所、深圳微纳增材技术、江苏天一超细金属粉末、河南黄河旋风...



### 山特维克 Osprey

Sandvik Osprey 山特维克 Osprey 的金属粉末在全球市场占有率最高，Osprey 开发了一系列适用于所有增材制造的气雾化金属粉末，包括：选择性激光烧结、熔渗、选择性激光熔融、电子束熔炼、直接金属沉积、激光工程化净成形。



### 美国卡彭特技术 *Carpenter Technology*

美国卡彭特技术公司成立于1889年，专业致力于特种合金的开发、制造和销售，至今已有120余年历史。卡彭特技术公司生产包括镍基、钴基、钛、铬、铁等合金。在增材制造领域，主要提供不锈钢、钛合金以及工具钢金属粉末。



### 吉凯恩 *Hoeganaes / GKN Hoeganaes*

吉凯恩旗下的 Hoeganaes 有限公司生产的金属粉末制品在北美地区所占的市场份额超过了50%，Hoeganaes 有限公司的产品在欧洲金属粉末制品市场的销售也呈快速增长。Hoeganaes 主要为增材制造行业提供钛合金金属粉末 AncorTi™。其标准满足 ASTM 要求。



### AP&C(属于Arcam公司)

AP&C生产金属粉末，粒径分布小，包括钛及其他活性金属以及镍基高温合金和铌等高熔点合金，专为增材制造以及其他粉末冶金技术（MIM，涂层，热等静压）定制。主要服务对象为生物医疗和航空航天工业。



### 英国LPW

LPW公司已开发出了全系列专门针对SLM、LMD和EBM工艺进行优化设计的粉末。他们还可以根据要求提供定制的合金材料。包括Al, Co, Fe, Ni, Ti合金等金属粉末。LWP为汽车、航空航天和医疗行业提供3D打印的金属粉末，粉末质量是产品的基础。所以LPW为其金属粉末提供全生命周期的服务：金属粉末、粉末分析、合金的开发、粉末管理。

ERASTEEL



### 法国Erasteel

法国Erasteel公司是全球领先的高速钢、工具钢、不锈钢和其他特殊合金粉末供应商。通过其投资的瑞典Söderfors的气雾化设备提供高纯度金属合金粉末。



H.C.Starck

**世泰科H.C.Starck**

H.C.Starck是德国拜耳集团的全资子公司，主要生产难熔金属的粉末及制品，包括Ta、Nb、Mo、W等，服务于电子、机械、充电电池等行业。H.C.Starck 生产用于P/M 的雾化合金及纯金属粉末超过800种，还生产烧结添加剂，如氮化物、碳化物及硫化物等。

Höganäs

**瑞典赫格纳斯Hoganas**

赫格纳斯铁粉在化学、冶金领域的应用非常广泛。比如塑料的生产、作为其他金属生产的强化剂等，也用于化工产品的循环利用以及农业和制药等行业。赫格纳斯高品质镍基、钴基和铁基表面热喷涂粉末，能改进高耐磨零件的性能并延长其使用寿命。

**印度普莱克斯PRAXAIR**

印度普莱克斯通过其气雾化钛金属粉末生产线上，为全世界的客户提供优质的3D打印用钛金属粉末材料。2015年第三季度开始，普莱克斯就将开始全规模生产航空级的优质球形钛金属粉末。除了供应这种粉末，普莱克斯会为3D打印产业提供伴生工业气体。这些钛金属粉末将被用于制造如航天支架和生物医用植入物等3D打印产品。

PRAXAIR  
SURFACE TECHNOLOGIES



### ***Nanosteel***

NanoSteel携手Connecticut先进技术中心手在其纳米工程合金钢粉末材料基础上进行优化和创新。NanoSteel专有的金属合金材料可支持实现以经济的成本通过粘接剂喷射3D打印技术生产出高质量零部件，将助于加速诸如耐磨零件、轴承、刀具等从减材制造到增材制造的转换。









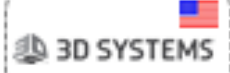


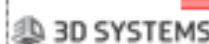






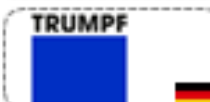




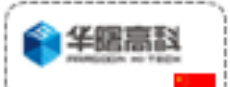




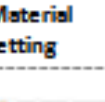











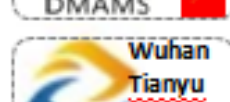

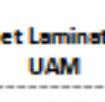










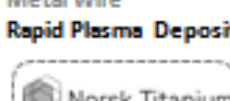






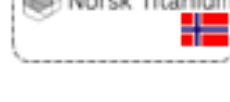

### **美国铝业Arconic**

2016年美国铝业将下游3D打印相关业务以Arconic公司的名义拆分出来，Arconic特别专注于金属3D打印，包括金属粉末的生产与加工，定制化金属粉末解决方案，金属3D打印服务以及后处理。Arconic的母公司是全球轻金属技术、工程与制造的领导者美铝公司。美铝开创了推动世界发展的多种材料解决方案，提供由钛、镍和铝制成的增值产品

### **其他**

美国的阿美特克AMETEK提供不锈钢、Ni基合金, Co基合金, 不锈钢粉末, 工具钢金属粉末; 美国的ArgenCorporation主要为牙科提供Au, Pt, Pg, Ag, Cu合金金属粉末; 意大利的LegorGroup提供金、银金属粉末, 以及Co基, Ni基合金金属粉末; 日本的大阪钛OsakaTitamium提供钛合金金属粉末; 美国的Pyrogenesis主要为国防部门提供Ti, Niobium, Nitinol, Al基合金; 除此之外, 增材制造设备厂商例如西安铂力特, Concept Laser, EOS, SLM Solutions, Renishaw, Exone等均提供金属粉末。

## 金属3D打印设备

<p><b>EBM</b></p>  	<p><b>SLM</b></p> 	<p><b>SLS</b></p> 	<p><b>Metal Wire</b> <b>Electron beam...</b></p> 	<p><b>Metal Powder</b></p> 	
<p><b>SLM</b></p>  		 		 	
 					<p><b>3DP</b></p> 
 			<p>AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute</p>		<p><b>Material Jetting</b></p> 
 					
 					<p><b>Sheet Lamination- UAM</b></p> 
 			<p><b>Metal Wire</b> <b>Rapid Plasma Deposition</b></p>		
 					
 					
<p>PBF-Powder Bed Fusion</p>		<p>DED-Direct Energy Deposition</p>		<p>Others</p>	



国家	品牌	主要技术
中国	铂力特	粉末床熔化-PBF,直接能量沉积-DED
中国	隆源	粉末床熔化-PBF,直接能量沉积-DED
中国	永年激光	粉末床熔化-PBF,直接能量沉积-DED
中国	易加三维	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF
中国	华曙高科	粉末床熔化-PBF, 选择性激光烧结-SLS
中国	恒通	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF
中国	华科三维	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF, 选择性激光烧结-SLS
中国	联泰科技	光固化工艺- VAT Photopolymerization
中国	太尔时代	材料挤出工艺- Material extrusion
中国	盈普光电	选择性激光烧结-SLS
中国	武汉滨湖	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF, 选择性激光烧结-SLS LOM层压技术
中国	中瑞科技	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF 选择性激光烧结-SLS
中国	先临三维	材料挤出工艺- Material extrusion, 生物打印
中国	闪铸科技	材料挤出工艺- Material extrusion
中国	武汉天昱	直接能量沉积-DED
中国	恒利	粘结剂喷射-binder jetting, 粉末床熔化-PBF, 选择性激光烧结-SLS
中国	珠海西通	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF
中国	智熔系统	粉末床熔化-PBF, 直接能量沉积-DED
中国	中科煜宸	粉末床熔化-PBF, 直接能量沉积-DED
中国	鑫精合	粉末床熔化-PBF, 直接能量沉积-DED
中国	汉邦科技	粉末床熔化-PBF
中国	广东信达雅	粉末床熔化-PBF
中国	大族激光	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF, 粘结剂喷射-binder jetting



国家	品牌	主要技术
日本	Aspect	粉末床熔化-PBF
日本	CMET	光固化工艺- VAT Photopolymerization
日本	D-MEC	光固化工艺- VAT Photopolymerization
日本	Matsuura	粉末床熔化-PBF+铣削
日本	Ricoh	粉末床熔化-PBF
日本	Sodick	粉末床熔化-PBF+铣削
韩国	Carima	光固化工艺- VAT Photopolymerization
韩国	InssTek	直接能量沉积- DED
韩国	Rokit	材料挤出工艺- Material extrusion
韩国	Sentrol	粉末床熔化-PBF, 粘结剂喷射-binder jetting
德国	Arburg	材料挤出工艺- Material extrusion
德国	Concept Laser	粉末床熔化-PBF
德国	Envisiontec	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 材料挤出工艺- Material extrusion, LOM层压技术
德国	EOS-易欧司	粉末床熔化-PBF, 选择性激光烧结-SLS (DMLS)
德国	Geman RepRap	材料挤出工艺- Material extrusion
德国	Apium(Indmatest)	材料挤出工艺- Material extrusion
德国	Nanoscribe	光固化工艺- VAT Photopolymerization
德国	OR Laser	粉末床熔化-PBF
德国	Rapid Shape	光固化工艺- VAT Photopolymerization
德国	Realizer	粉末床熔化-PBF
德国	DMGMORI-德马吉森精机	粉末床熔化-PBF
德国	SLM Solutions	粉末床熔化-PBF
德国	Trumpf-通快	粉末床熔化-PBF, 直接能量沉积- DED
德国	Voxeljet	粘结剂喷射-binder jetting, 高速激光烧结-HSS

国家	品牌	主要技术
美国	3D Systems	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 材料喷射-Material Jetting, 粉末床熔化-PBF, 粘结剂喷射-binder jetting
美国	Carbon	光固化工艺- VAT Photopolymerization
美国	Desktop Metal	材料挤出工艺- Material extrusion, 粘结剂喷射-binder jetting
美国	Exone	粘结剂喷射-binder jetting
美国	Fabrisonic	层压- Sheet Lamination
美国	Fromlabs	光固化工艺- VAT Photopolymerization
美国	HP-惠普	MJF-多射流融化
美国	Markforged	材料挤出工艺- Material extrusion
美国	Optomec	直接能量沉积- DED, 材料喷射-Material Jetting
美国	RPMI	直接能量沉积- DED
美国	Sciaky	直接能量沉积- DED
美国	Viridis 3D	粘结剂喷射-binder jetting
美国	Voxel 8	直接书写-DW
美国	GE	粉末床熔化-PBF
以色列	Massivit	材料挤出工艺- Material extrusion
以色列	Stratasys	材料挤出工艺-Material extrusion, 材料喷射-Material Jetting
以色列	SolidScape	材料喷射-Material Jetting
以色列	Nano Dimension	材料喷射-Material Jetting
意大利	DWS	光固化工艺- VAT Photopolymerization
意大利	Sharebot	材料挤出工艺- Material extrusion, 光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF
意大利	Sisma	粉末床熔化-PBF, 直接能量沉积- DED

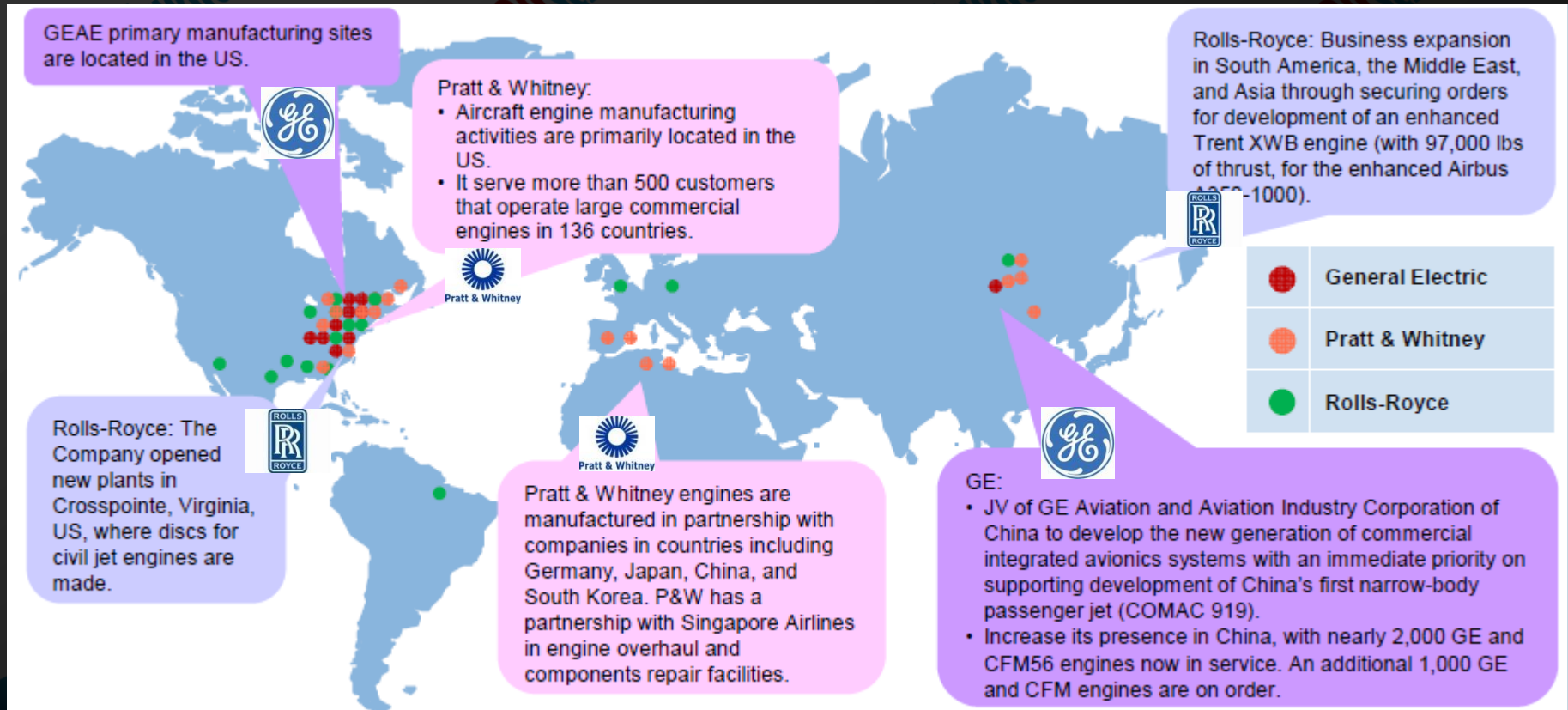
国家	品牌	主要技术
法国	3DCeram	光固化工艺- VAT Photopolymerization
法国	BeAM	直接能量沉积- DED
法国	Prodways	光固化工艺- VAT Photopolymerization, 粉末床熔化-PBF
荷兰	Additive Industries	直接能量沉积- DED
荷兰	Admatec	材料挤出工艺- Material extrusion
荷兰	Luxexcel	材料挤出工艺- Material extrusion
英国	Renishaw-雷尼绍	粉末床熔化-PBF
澳大利亚	Asiga	光固化工艺- VAT Photopolymerization
奥地利	Lithoz	光固化工艺- VAT Photopolymerization
波兰	Sinterit	粉末床熔化-PBF
新加坡	Structo	光固化工艺- VAT Photopolymerization
瑞典	Arcam	粉末床熔化-PBF
瑞士	Sintratec	粉末床熔化-PBF
台湾地区	Microjet Technology	粘结剂喷射-binder jetting

公司	软件	应用
3DSIM	exaSIM	金属打印仿真优化软件
Altair	SolidThinking Inspire	拓扑优化、仿真
Ansys	SpaceClaim	分析、修复、编辑、切片...
Autodesk	Meshmixer	STL编辑
	Netfab Standard, Premium, Ultimate	数据准备、切片、晶格、拓扑优化
	Shapeshifter	建模
	Winthin	创成式设计建模
	Fusion, Forge	CAD建模平台
Dassault	3DEXPERIENCE, Solidworks, CATIA	CAD建模平台
Materialise	Magics, 3-matic, Streamics, 3-stage	数据准备、切片编辑、打印管理...
Siemens	UG	CAD建模

...



## 涡扇发动机国际厂商



- CFM 国际是GE航空与赛峰集团旗下的Snecma合资的公司。
- IAE国际是美国普惠与德国MTU航空发动机合资的公司。
- Engine Alliance, 是GE和普惠合资的公司。

## 中国国产民用飞机配套发动机型号

### 中国商飞

C919

喷气式干线飞机

LEAP-X发动机

发动机制造商：CFM国际



### 西飞国际

MA60/600

涡浆式支线飞机

PW127J发动机

发动机制造商：普惠



### 中国商飞

ARJ21

喷气式支线飞机

CF34-10A发动机

发动机制造商：GE

### 哈飞集团

运12

小型涡浆式多用途运输飞机

PT6A-27发动机

发动机制造商：普惠加拿大



**CJ-1000A**  
2016年推出



**CJ-1000AX**  
2022年推出



**CJ-1000B ER**  
2026年推出



长江CJ-1000A发动机是中国第一款商用航空发动机产品，是装配国产大飞机的唯一国产动力。

中国大型客机发动机项目总承担单位和总设计师单位是中航商用飞机发动机有限责任公司。国产大飞机C919目前用的是CFM LeapX发动机，但长期来说，中国计划在C919上用自己生产的发动机。



中国航发商用航空发动机有限责任公司  
AECC COMMERCIAL AIRCRAFT ENGINE CO.,LTD

中国航发商用航空发动机有限责任公司（简称“中国航发商发”，AECC CAE，以下简称“商发公司”）成立于2009年1月18日，是由中国航空工业集团公司（注：2016年1月27日经国务院批准，中国航空工业集团公司所持公司股权换转至新成立的中国航空发动机集团有限公司）与上海烟草集团有限责任公司、上海电气（集团）总公司、上海国盛（集团）有限公司共同出资组建的股份多元化企业。主要从事商用飞机动力装置及其相关产品的设计、研制、生产、总装、试验、销售、维修、服务、技术开发和技术咨询等业务。商发公司下设研发中心、总装试车中心、大修中心、客户服务中心。





“昆仑”发动机



涡轴-16发动机



涡轴-8系列发动机



涡桨-9发动机



涡桨-6发动机



涡桨五系列航空发动机



民用大涵道比涡扇发动机

中国航空发动机集团（简称：中国航发，英文：Aero Engine Corporation of China，英文缩写：AECC）是中央直接管理的国有特大型企业，由国务院、北京市人民政府、中国航空工业集团公司、中国商用飞机有限责任公司共同出资组建。



中国航发下辖20余家直属企事业单位，拥有3家主板上市公司，现有职工近10万人。主要从事军民用飞行器动力装置、第二动力装置、燃气轮机、直升机传动系统、航空发动机技术衍生产品的设计、研制、生产、维修、营销和售后服务等业务；客户涉及航空、航天、船舶、兵器、能源及空天等多个领域。公司设计生产的涡喷、涡扇、涡轴、涡桨、活塞等航空发动机、燃气轮机和直升机传动系统等产品，广泛配装于各类军民飞机、直升机和大型舰艇、大型发电机组上。



## 中国燃气轮机研制与生产企业



中国航发南方工业有限公司



中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司



中国航发贵州黎阳航空发动机(集团)有限公司



中国航发哈尔滨东安发动机有限公司



中国航发动力所



中国航发常州兰翔机械有限责任公司



## 国际高温合金生产企业

全球每年对高温合金材料的消耗近28万吨，市场规模达100亿美元，其中主要企业包括美国：GE, P&W-普惠, 汉因斯-斯泰特, 佳能-穆斯克贡, 因科国际...英国: Nimocast, 罗罗...日本: IHI corporation, JFE, 新日铁, 神户制钢



Specialty Metals-冶联科技国际  
Precision Castparts-精密机件  
Canon-Muskegon-佳能-穆斯克贡  
Westinghouse-西屋  
Haynes Stellite-汉因斯-斯泰特  
Cabot-钴业  
Inco Alloys International 因科合金  
国际  
Martin Marietta 马丁马丽塔  
Standard Pressed Steel 标准压制  
General Electric 通用电气  
Whittaker 惠特克  
Special Metal 特殊金属  
Universal-Cyclops Steel  
Howmet 豪梅特  
Pratt & Whitney 普惠



Mond Nickel 国际镍



Mond Nickel 国际镍  
Rolls-Royce 罗罗



United Aircraft 联合飞机



IHI 株式会社  
JFE 日本钢铁工程  
NSSMC 新日铁住金株式会社  
KOBELCO 神户制钢

# 中国高温合金生产企业

## 炼石有色

用于单晶叶片的高温合金

## 北京航材院

铸造高温合金母合金锭的研究与制造

## 钢研高纳

以铸造高温合金、变形高温合金和新型高温合金为主

## 齐齐哈尔特钢

民用变形高温合金

## 抚顺特钢

以变形高温合金为主，在国内规模最大

## 长城特钢

以变形高温合金为主，锻材和轧材

## 沈阳金属所

侧重基础理论研究  
承担国家重大科研转项

## 沈阳中科三耐

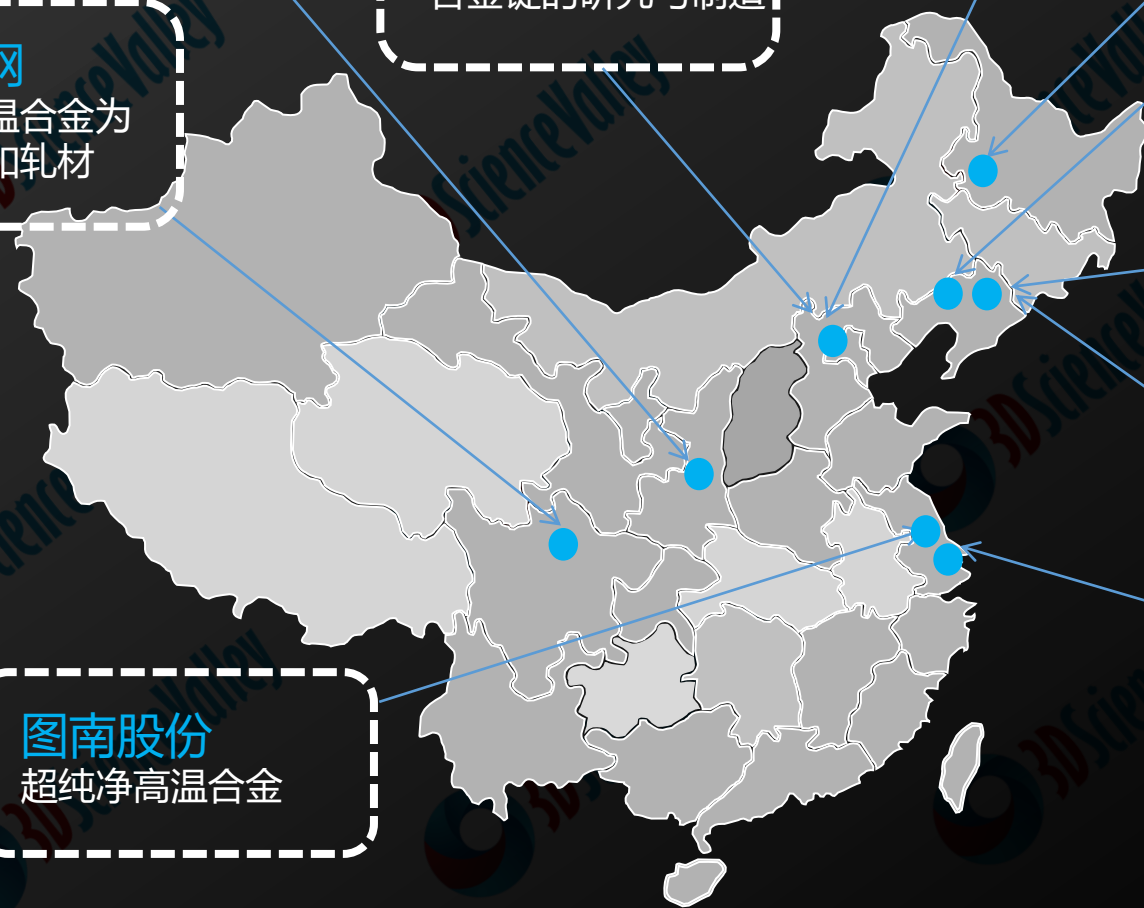
叶片铸造高温合金

## 图南股份

超纯净高温合金

## 宝钢特钢

变形高温合金及其盘锻件

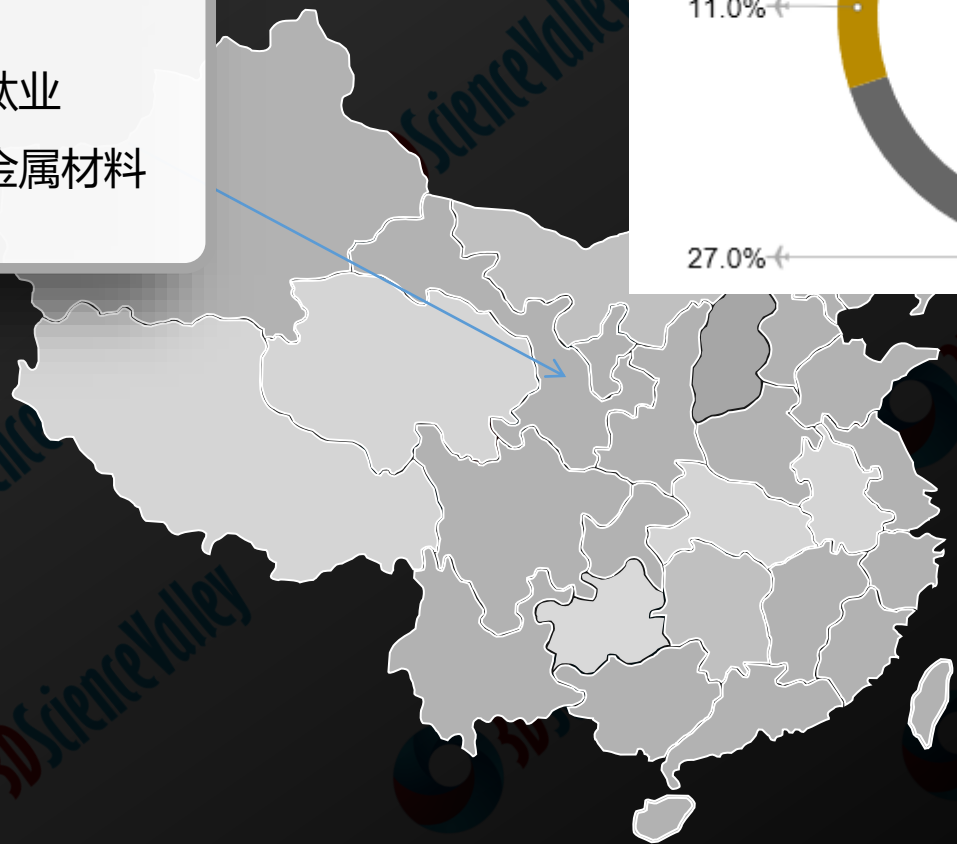
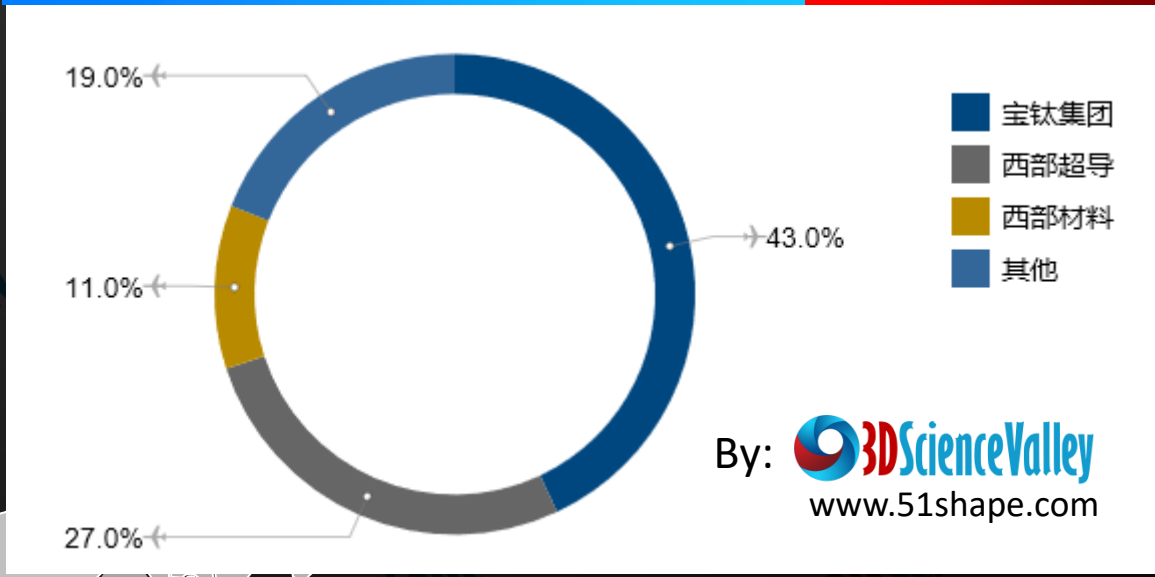


# 中国上游钛合金生产企业

## 陕西材料产业集群

- 宝鸡钛业股份
- 西部超导材料科技
- 西部材料
- 咸阳天成钛业
- 西安赛特金属材料
- .....

## 中国钛合金市场份额



By: 3D Science Valley  
www.51shape.com

来源：《钛工业进展》



# 加工安全、质量检测与后处理

以粉末床激光熔化金属3D打印设备及其打印材料为例，金属加工过程中的安全隐患包括：

**粉末和惰性气体使用中的风险：**粉末床激光熔化金属3D打印机使用的材料为金属粉末，粒径为10-70微米。这种类型的粉末材料存在引发火灾或爆炸的风险，此外，人体对粉末颗粒的长期接触和吸入也会给身体健康带来一定隐患。

**火灾和爆炸：**燃烧的风险随着粉末粒径的减小而增加，因此在风险控制工作中，应该注意金属粉末的属性。通常，铝合金、钛、钛合金，以及这些金属粉末所产生的烟雾都属于活性金属，它们引发火灾或爆炸的风险高于钢、铬镍铁合金、青铜、钴铬合金等非活性金属。

**粉尘吸入和接触：**金属3D打印粉末的粒径为10-70微米，这类粉末处于对人体的呼吸系统产生伤害的边缘。有学者在研究论文中表明，人体在吸入直径10-70微米的粉末颗粒之后，这些细微的粉末颗粒可以沉积在气管和支气管中，最终被人体吞咽和排出。

**惰性气体窒息：**粉末床激光熔化3D打印设备在工作状态下会用到氩气或氮气这样的惰性气体。惰性气体如果由于某些原因发生泄漏，则可能产生严重后果。由于这两种气体都不能被人体所察觉，受害者会在没有防备的情况下吸入含有这两种气体的空气。

**环境影响：**应注意处理和收集设备中不同部位“散落”的金属粉末。

**没有哪种技术可以对所有的3D打印零部件进行后处理：**3D打印零部件的表面质量受到打印机类型、打印技术和材料粒度多种因素的影响。后处理技术需要与打印材料、打印技术和零件几何形状相匹配，有时多种不同技术可以用于一种零件的后处理。

**在设计3D打印零件时要考虑的不仅仅是3D打印工艺：**例如，一个原本由5个部分组成的部件，可以被设计为一个整体的、集成式的零件，然后由3D打印设备及制造出来。但是在采用这种设计方案的时候应考虑到打印完成后的表面处理要求，有时传统的精加工技术可能并不适用于这种3D打印的零件，那么，这种情况下就需要重新调整设计方案，考虑将整体式的零件拆分为两个部分，打印完成之后进行组装。调整设计方案之后，既可以通过标准的精加工技术完成3D打印零件的表面处理要求，又能够保证高效的生产。

**在确定你需要的3D打印方式和进行零件设计之前，就确定对零件表面质量的要求：**即使是同一个3D打印零件，不同位置上的表面光洁度也会有所差异，比如在下图中，零件7个不同位置的表面光洁度差异很大，这与打印零件的成型方向和在打印基台的定位是相关的。因此，为了获得最佳的表面光洁度，需要针对选择的3D打印技术把握好零件关键面的成型方向。还有一个考虑的因素是打印速度，打印速度和表面光洁度是负相关的两个因素。另外，零件的表面光洁度关系到后处理时的材料去除量，一般来说打印零件的表面光洁度越低，在后处理时需要去除的材料就越多。



**充分了解后处理技术：**3D打印后处理的工艺有多种，例如水射流清洁和湿磨工艺等，很多后处理工艺都牵涉到一定程度的材料去除，因而在设计零件的几何形状时需要考虑到后处理工艺，并考虑如何补偿这些去除量。

**收集后处理的结果及数据，并用于下一轮的设计优化：**在对初次打印的零件进行后处理之后，评估尺寸公差，表面光洁度以及在后处理中损失的几何形状，将这些信息反馈给设计团队，在进行设计优化时，考虑是否需要增加加工余量，或者考虑是否需要将零件拆分为多个组件等。

**花时间理解和验证你所使用的任何一种后处理工艺：**条件允许的话，用不同的加工技术来制造的产品原型，然后进行表面处理，对结果进行分析，掌握每种工艺所存在的限制因素。



图：热等静压设备



X射线断层成像 (X-Ray Computed Tomography) 是一种影像诊断学的检查。这一技术曾被称为电脑轴切面断层影像 (Computed Axial Tomography)。X射线断层成像是一种利用数位几何处理后重建的三维放射线影像。

近几年来, 断层摄影也到了微米的等级, 如今, 国外将这一技术用到了金属3D打印产品的检测中。GE也将计算机X射线断层成像技术用于其著名的喷油嘴的检测中, 经过热等静压的后处理工艺, GE改进了产品的内部晶体结构, 并提高了产品的抗疲劳性能。

通过实现对复杂零件的检测, 当前的增材制造行业有望将过程中加工参数与模型结构以及零件机械性能建立有效的相关性分析, 随着材料特征数据库的建立, 以及对加工过程中几何形状特征与重要的工艺变量之间关系的理解。

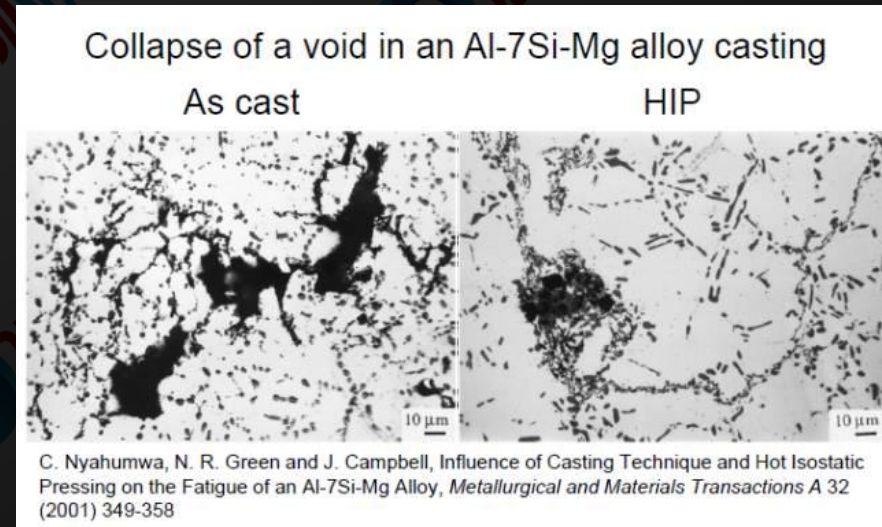


图: 计算机X射线断层成像用于热等静压后处理结果的检测, 来源: 宾州大学

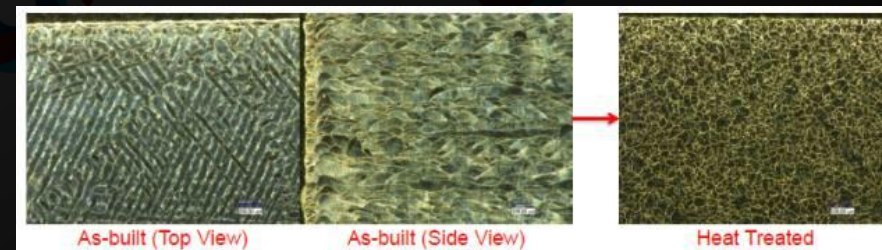


图: GE喷油嘴的检测, 来源: GE

敬请关注3D科学谷微信公众号，或参考3D科学谷出版物（京东、当当有售）



《3D打印与工业制造》  
京东售书链接



3D科学谷官方网站



3D科学谷微信公众号



3D科学谷三千人QQ群



3D科学谷系列白皮书



## 免责声明

- 本书中包含的数据、部分内容来源于网络或其他公开资料，版权归原作者所有。任何以盈利为目的使用，所产生的后果由使用者自己承担。
- 本书中所有引用的数据都已标明出处，如任何个人或单位认为内容存在侵权之处，请及时与我们联系，3D科学谷将及时给予处理。
- 3D科学谷力求内容的严谨性，但限于时间和人力因素，书中难免有不足之处，如存在失误、失实，敬请您不吝赐教、指正。我们热忱欢迎各界专业人士免费加入3D科学谷交流平台。
- 本书内容仅作交流学习之用，不构成任何投资建议，请读者仅供参考。