3DScienceValley.com

3D科学谷
白皮书系列
-Whitepaper -

白皮书赞助方：
Sponsors:

3D打印与航空发动机白皮书2.0

Whitepaper of 3D Printing and Aerospace Engine

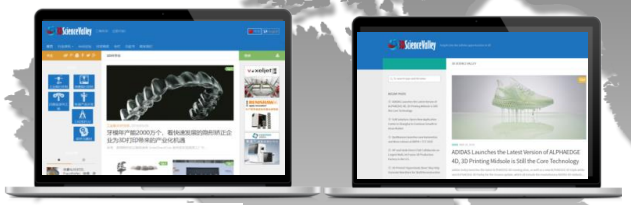
3DScienceValley

随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号: cn_3dsciencevalley

www.3dsciencevalley.com

Version ID:20191231

3D科学谷核心竞争力-整合力量与影响力
Core Strength – Integrative the Power and Influence



中文

English

网站
Websites

手机端
WeChat

convergence

能量聚合

global

multidimensional

books

Fusion

Upgrading

融会贯通

AME论坛深化认知
AME to fuse knowledge and insights

白皮书系列针对每个典型应用及细分市场
Whitepaper targeted to each application segment

航空发动机

1 航空发动机分类

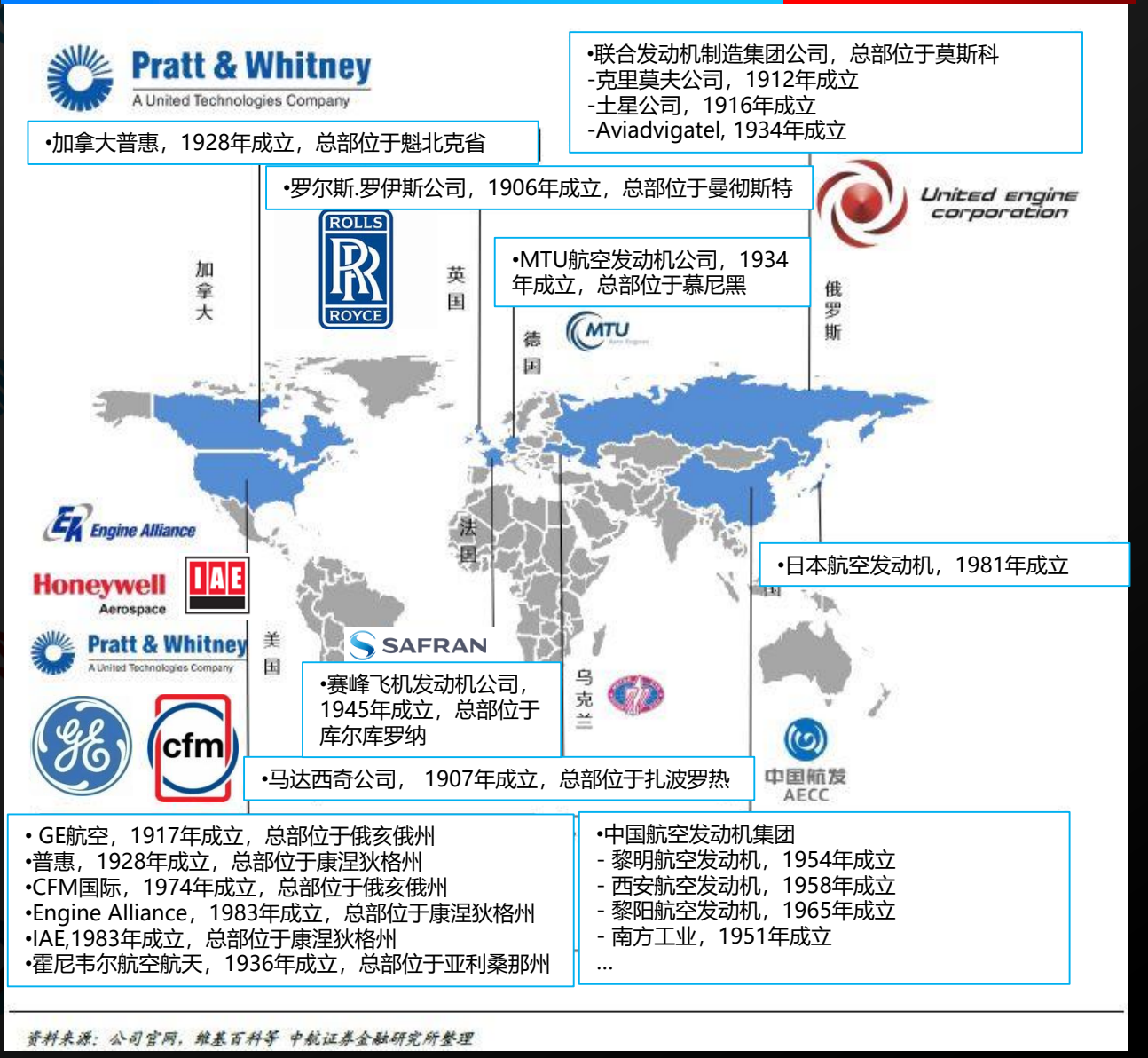
参考资料：《航空发动机》

2 航空发动机分类

航空发动机市场经过近百年的发展已经呈现出典型、明显的寡头垄断格局。美国**通用电气**、**普惠**、英国**罗尔斯•罗伊斯**以及由它们主导或合资组建的**CFM**国际与**IAE**国际航空发动机公司，占据着约**97%**全球商用航空发动机市场。军用航空发动机领域，加拿大**普惠**公司在军用航空发动机方面的能力尤为突出。

来源：航空制造网

全球主要航空发动机制造企业及地域分布



3 航空发动机分类

GE、普惠和罗罗拥有着先进技术和丰富的研制经验，每年在航空发动机研制过程中投入数十亿美元。2012年至2018年期间，罗罗年均研发投入10.95亿美元。

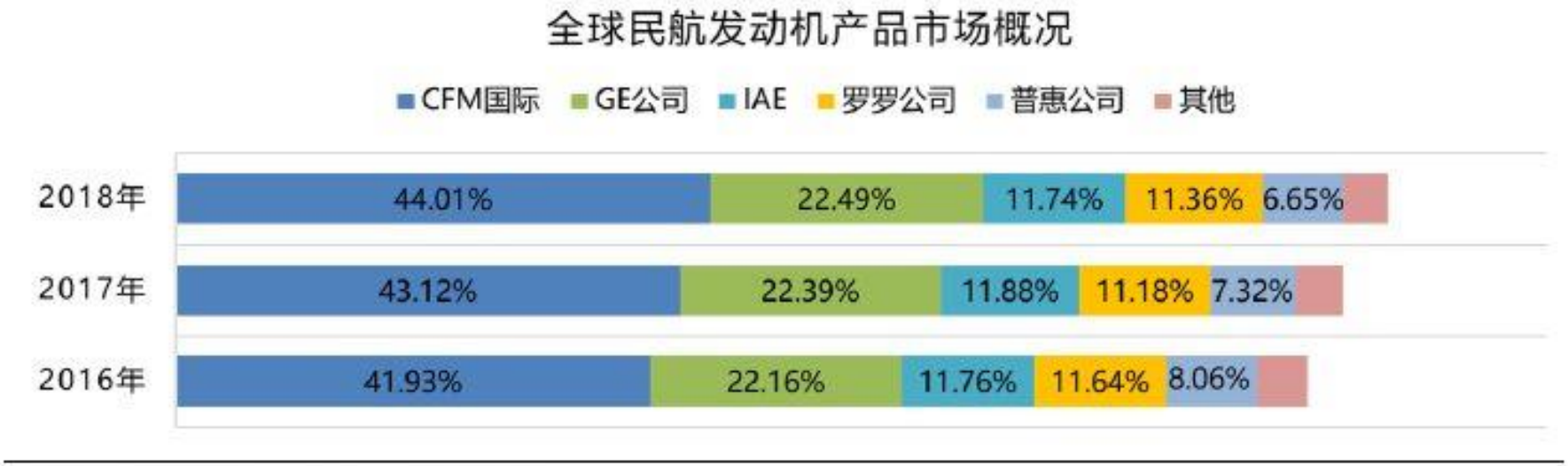
2012-2018年全球三大航空发动机集团总营业收入及研发投入数据（单位：亿美元）

资料来源：彭博 中行证券金融研究所

4 民用发动机市场

据Flight Global报告，2018年全球商用航空发动机存量市场规模是52107台，较2016年的48609台新增3498台。上述五家公司合计占据了该市场的份额高达96.26%，其中，CFM国际22934台、GE公司11718台、IAE公司6118台、罗罗公司5920台和普惠公司3466台。

商用发动机市场结构



资料来源：Flight Global 中航证券金融研究所整理 航空制造网

5 民用发动机市场

据Commercial Engines报告， CFM国际获得全球市场订单的57.13%,共计5792台；罗罗公司获得了30.80%，共计3122台，GE公司获得了11.20%，共计1135台，其中CFM国际的Leap系列和罗罗公司的PW1000G系列发动机将继续占据市场的较大份额，主要用于A320neo、737MAX、C919、A220等机型。

全球商用发动机订单情况

资料来源：Commercial Engines 2018 中航证券金融研究所整理 航空制造网

6 民用发动机市场

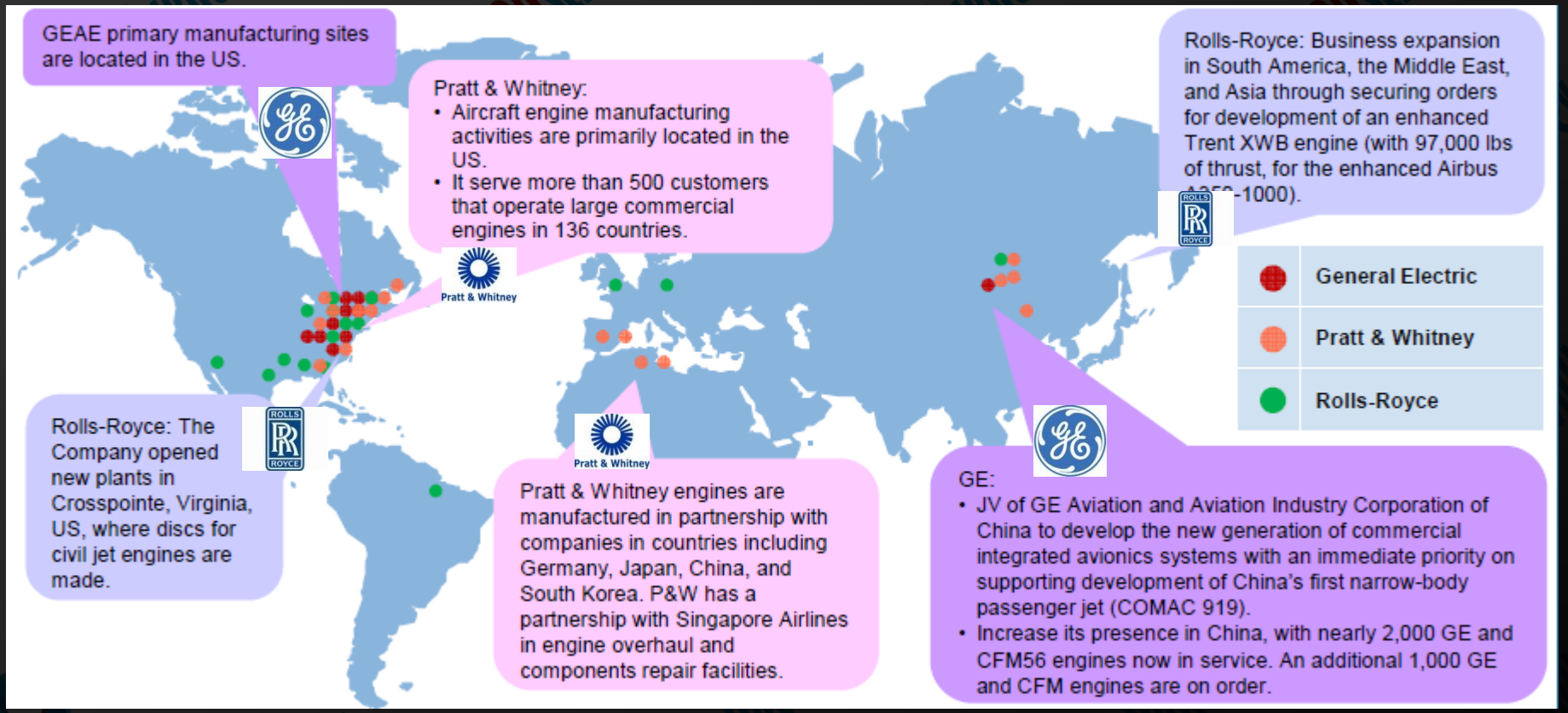
2019年至2022年入市的民用机型包括波音777X、MC-21、E-jet 175/195等，我国自主研制的C919已获得了近千架订单，其正式入市之后也将较大的影响着相关型号发动机市场的格局和发展。

新型号飞机及配套发动机

序号	飞机型号	航空发动机型号	航空发动机制造商	预计入市年份
1	Embraer E-Jet E195-E2	PW1900G	普惠	2019
2	Irkut MC-21	PW1400G	普惠	2020
3	Irkut MC-21	Aviadvigatel PD-14	联合发动机制造集团	2020
4	Mitsubishi MRJ	PW1200G	普惠	2020
5	Boeing 777X	GE9X	GE	2020
6	Embraer E-Jet E175-E2	PW1700G	普惠	2021
7	Comac C919	Leap-1C	CFM国际	2020-21
8	Comac C919	CJ-1000AX	ACAE	2022

资料来源：Commercial Engines 2018 中航证券金融研究所整理 航空制造网

7 发动机市场-涡扇发动机国际厂商

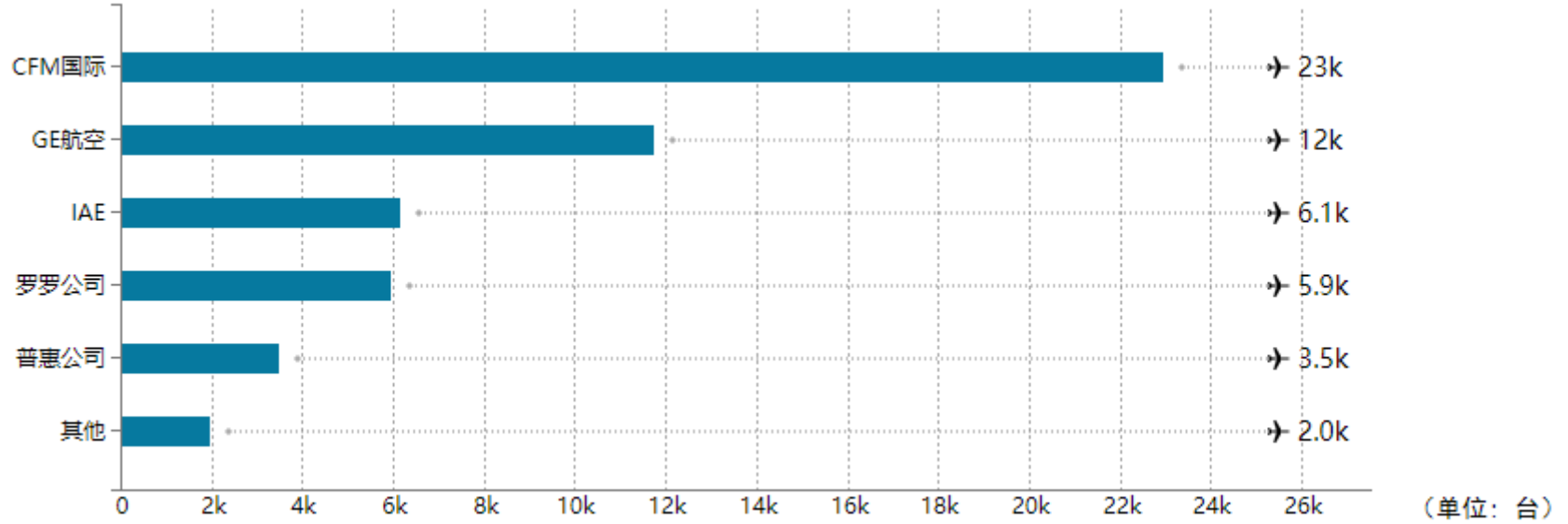


-CFM 国际是GE航空与赛峰集团旗下的Snecma合资的公司。
- IAE国际是美国普惠与德国MTU航空发动机合资的公司。
-Engine Alliance，是GE和普惠合资的公司。

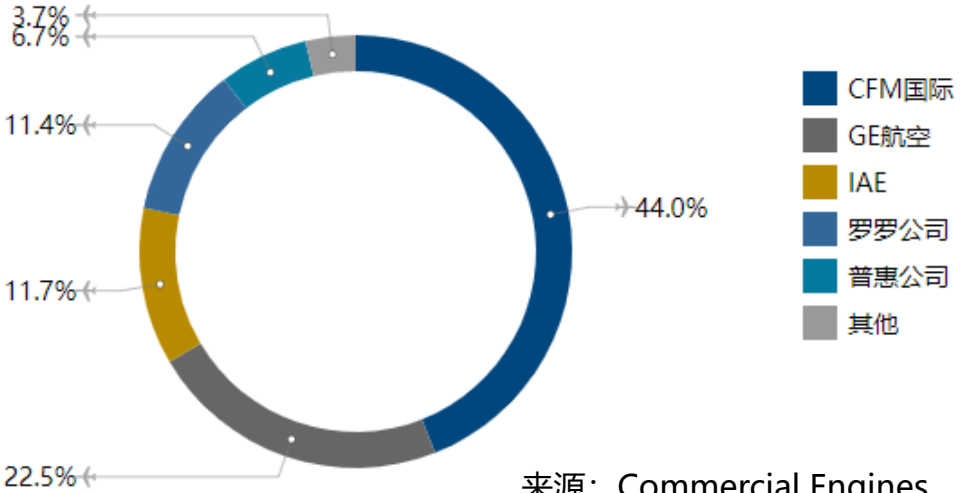
来源 Lucintel:global commercial aero turbofan engine market

8 发动机市场-涡扇发动机

2018年主要商用涡扇发动机产品及市场概况（单位：台）



在民用航空发动机领域，GE、普惠、罗罗位于该产业的核心位置。为了拓展民用市场和优势互补，这些公司直接主导或者与其他企业合资先后成立了CFM国际公司、国际航空发动机公司（简称“IAE”）和发动机联盟公司（简称“EA”）。目前，这六个航空发动机公司均具有独立研制大型民用航空发动机整机的能力，并且控制着民用飞机航空发动机的核心技术，包括结构设计、制造加工、总装集成等，垄断着全球各个细分市场的销售及客户服务市场，特别是CFM国际公司。

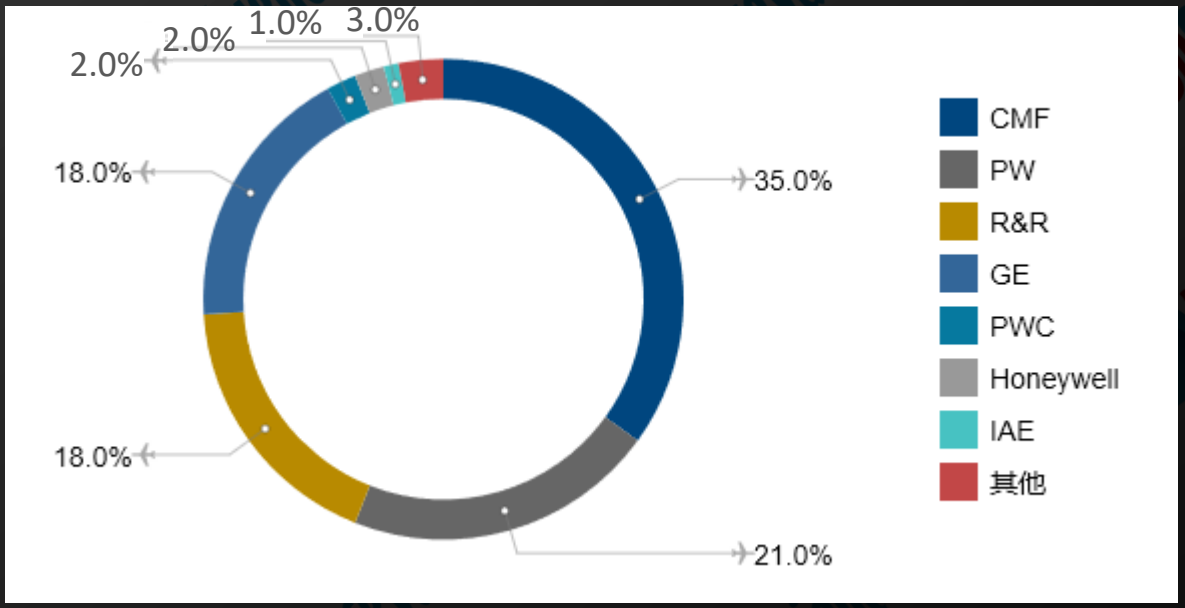


来源：Commercial Engines

9 发动机市场 – 涡扇发动机

涡扇发动机市场主要由GE、PW和R&R三大发动机巨头及其参与的合资公司所占据，斯奈克玛（属于赛峰集团）与GE合资CFM国际分享大型民用发动机市场。俄罗斯“土星”在军用航空发动机领域具备一定的竞争力。

涡扇发动机市场格局（2016-2030）

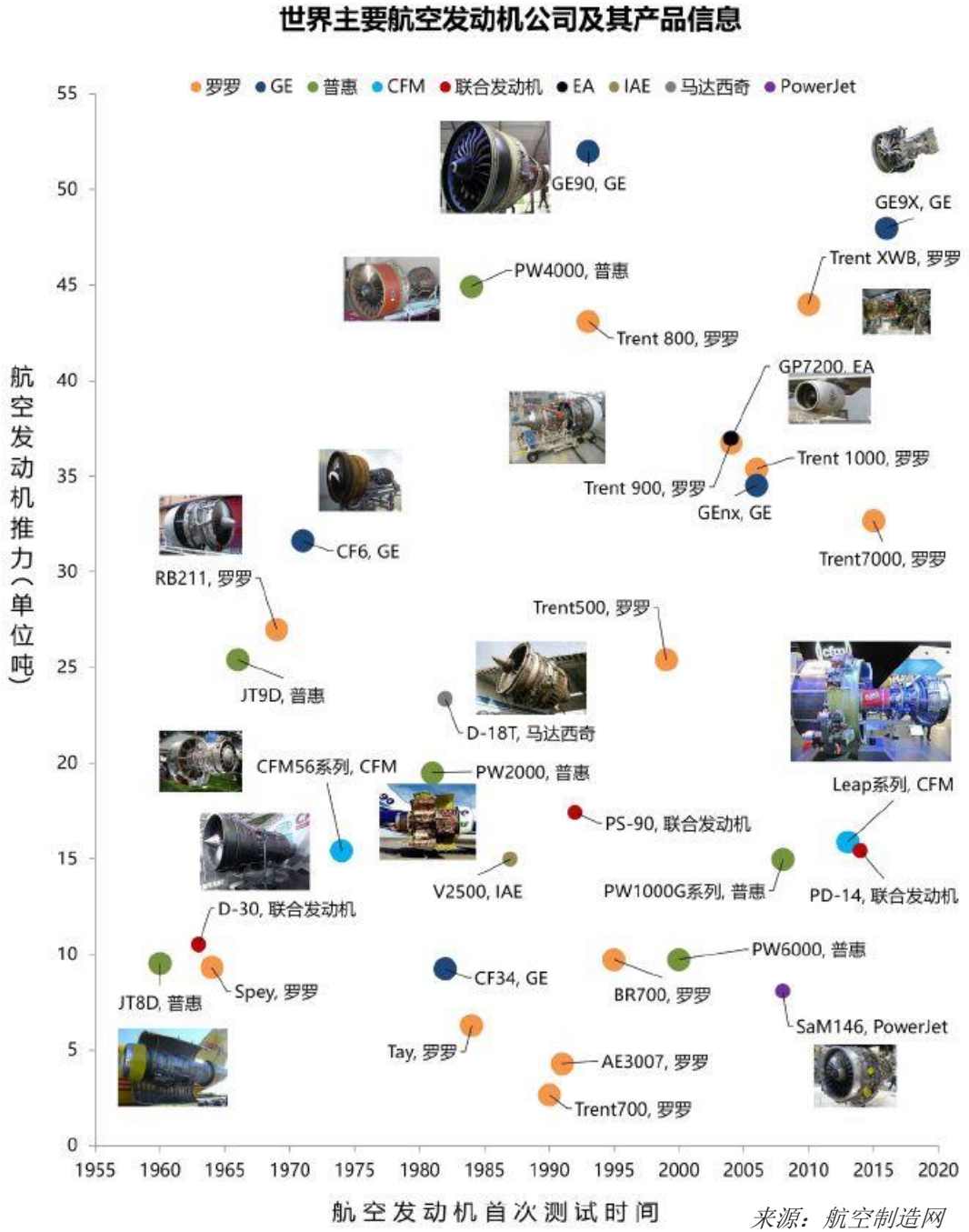


参考资料： Forecast International

10 发动机市场 – 涡扇发动机

航空发动机制造企业一直在不断地追求着更高的安全性、可靠性、经济性、环保性和低噪音等，主要通过改进气动设计、材料应用、低排放燃烧室、高效叶片冷却技术、智能化监测系统等方式，推力大小一直是评价航空发动机的核心技术指标之一。GE90型航空发动机是GE公司为波音777客机研制的一款高涵道比超大推力涡扇发动机，其1995年投入商业运营，至今已经衍生出两个子型号，即最大推力为94000磅的GE90-94B和最大推力115000磅GE90-115。目前，GE90-115仍然是世界上推力最大的民用航空发动机。

世界主要涡扇发动机及首次测试年份



来源：航空制造网

11 发动机市场 – 涡浆发动机

涡桨发动机市场主要由PWC(加拿大普惠）、GE、Honeywell和R&R四家公司占据。当前，加拿大普惠凭借PT6A和PW100在涡桨发动机市场占据主导地位。不过GE航空公司ATP计划设计师将855个独立部件减少到12个，结果，超过三分之一的引擎是由3D打印完成的，这款引擎计划2018年商业化。

普惠： PT6A、 PW100、 NGRT

GE： M601、CPX38

R&R： AE2100、T56、Model250、RR500

Honeywell： TPE331

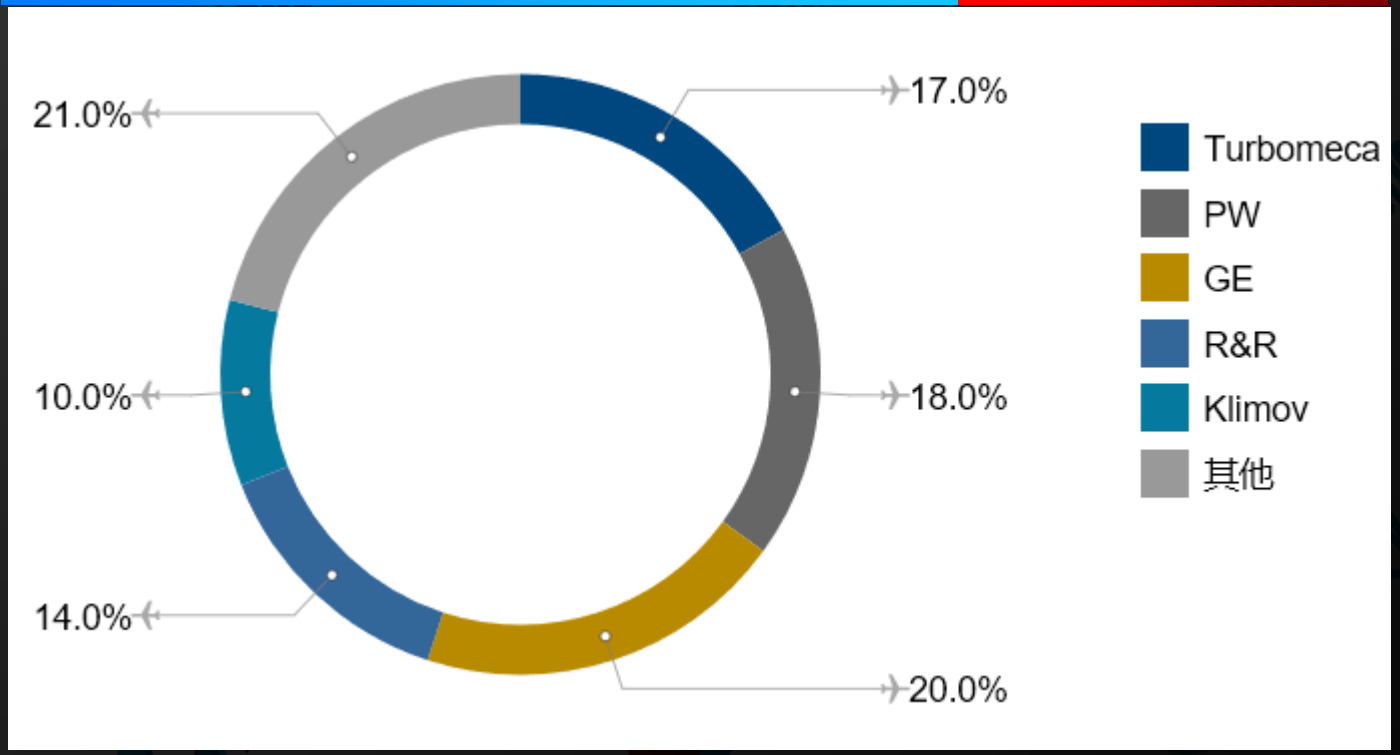
EPI： TP400-D6

参考资料： Forecast International

12 发动机市场 – 涡轴发动机

涡轴发动机市场主要由GE、R&R、Turbomeca-透博梅卡（被斯奈克玛属于赛峰集团）、PWC（加拿大普惠）、Klimov(克里莫夫）五家公司占据。

涡轴发动机市场格局（到2020年的销售金额预测）

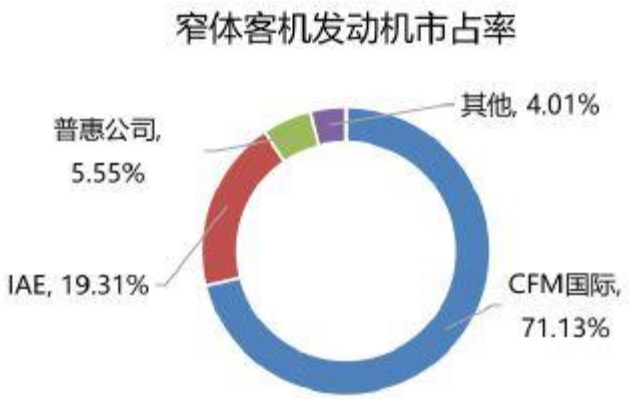


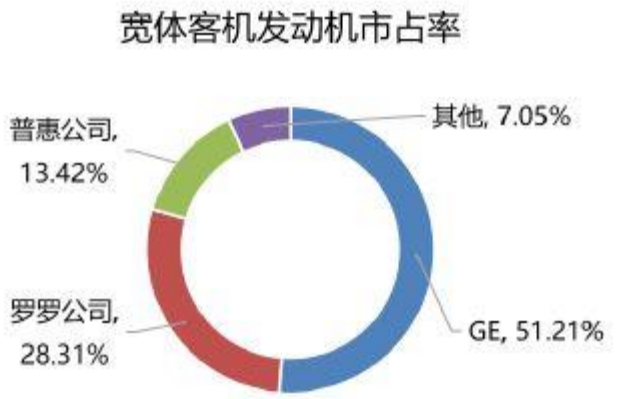
参考资料： Forecast International

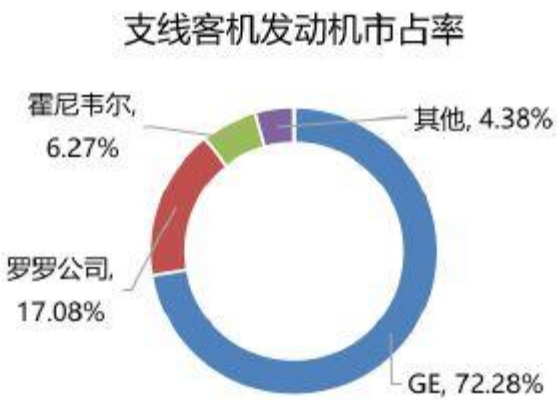
13 民用发动机市场-按飞机类型

根据Flight Global报告，窄体客机发动机市场CFM国际市占率为71.13%，IAE市占率19.31%，普惠市占率5.55%。这三家头部企业产品合计占据了市场总额95.99%，而且几乎所有在生产的窄体客机都选配了CFM国际的CFM56或LEAP系列发动机，包括中国商飞研制的C919客机。宽体客机发动机市场，GE市占率为51.21%，罗罗市占率为28.31%，普惠市占率为13.42%。目前，这三家头部企业产品合计占据了市场总额92.95%，在产的宽体客机主要选配了GE公司的GE90、GE9X和GEnx发动机，和罗罗公司的Trent系列发动机。支线客机发动机市场，GE市占率为72.28%，罗罗市占率为17.08%，霍尼韦尔市占率为6.27%。目前，这三家头部企业产品合计占据了市场总额95.62%

各类型发动机市场概况





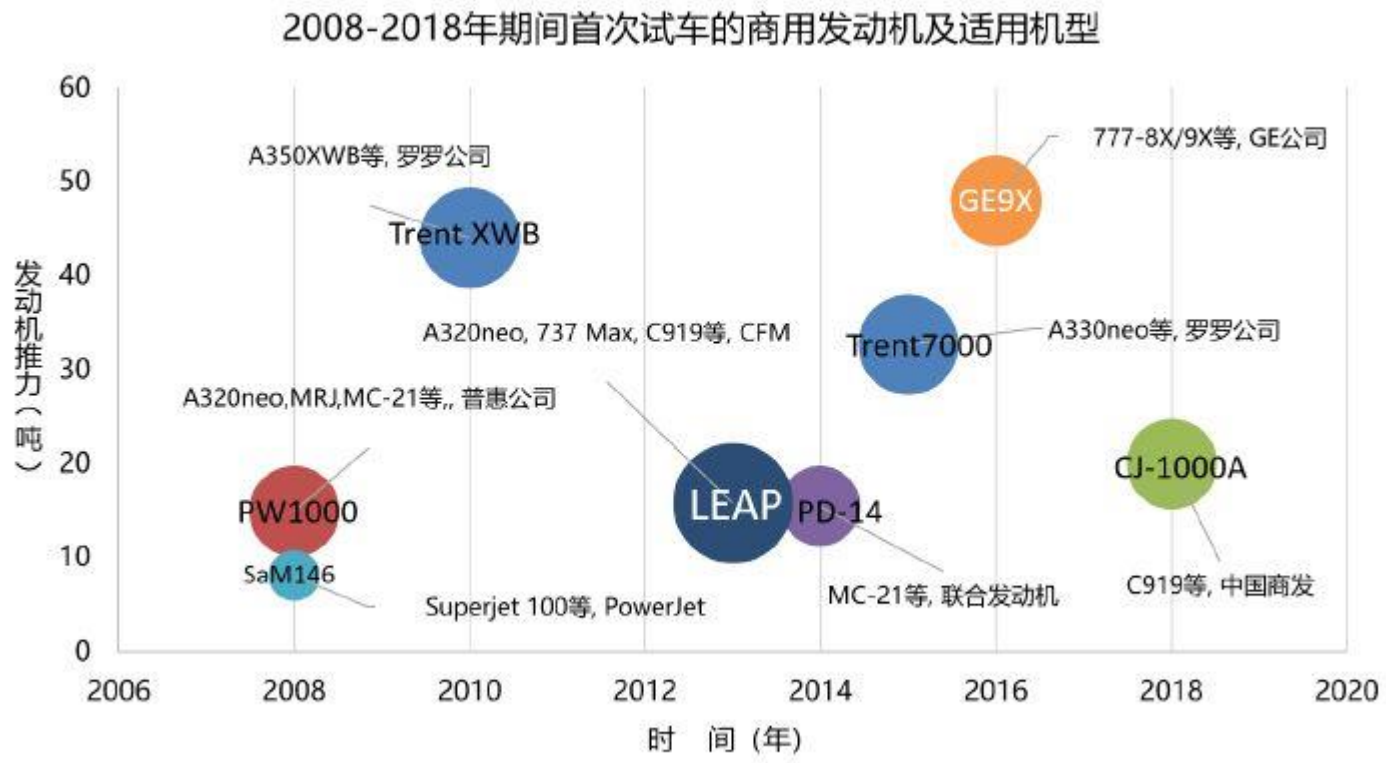


资料来源：Commercial Engines 2018 中航证券金融研究所整理

14 民用发动机市场-按飞机类型

各大航空发动机制造企业在过去十年已经先后启动了多款新型号产品的研制项目。据统计，2008年至2018年，有八款重要型号进行了首次试车，其中四款将用于窄体客机，三款用于宽体客机，一款将用于支线客机。

近十年首次试车的商用航空发动机及适用机型概况



资料来源：公司官网、维基百科等 中航证券金融研究所整理

航空制造网

15 发动机市场 – 宽体客机发动机

宽体客机发动机市场

CF6-80
GE90,
GEnx

GP7200
(GE与PW合资)

PW4000

Trent 700
Trent 800
Trent 900
Trent 1000
Trent XWB

空客A330
空客A350
空客A380
波音747
波音757
波音767
波音777
波音787
---

16 发动机市场 – 窄体客机发动机

窄体客机发动机市场

LEAP

V2500

PW1000G

空客A320
波音B737
商飞C919
庞巴迪C系列
日本三菱支线客机
俄罗斯伊尔库特MS-21
---

17 发动机市场 – 战斗机

战斗机的发动机市场主要由普惠、GE、土星、斯奈克玛（属于赛峰集团）以及欧洲喷气动力公司所占据。其中欧洲喷气动力公司是由英国R&R、德国MTU、意大利Avio和西班牙ITP合资组建。

GE的F110系列和普惠的eF100系列发动机基本平分了F-15和F-16的发动机市场，不过市场竞争的焦点已经开始向第四代战斗机F-35转移。普惠将作为F35的唯一动力供应商独享市场。

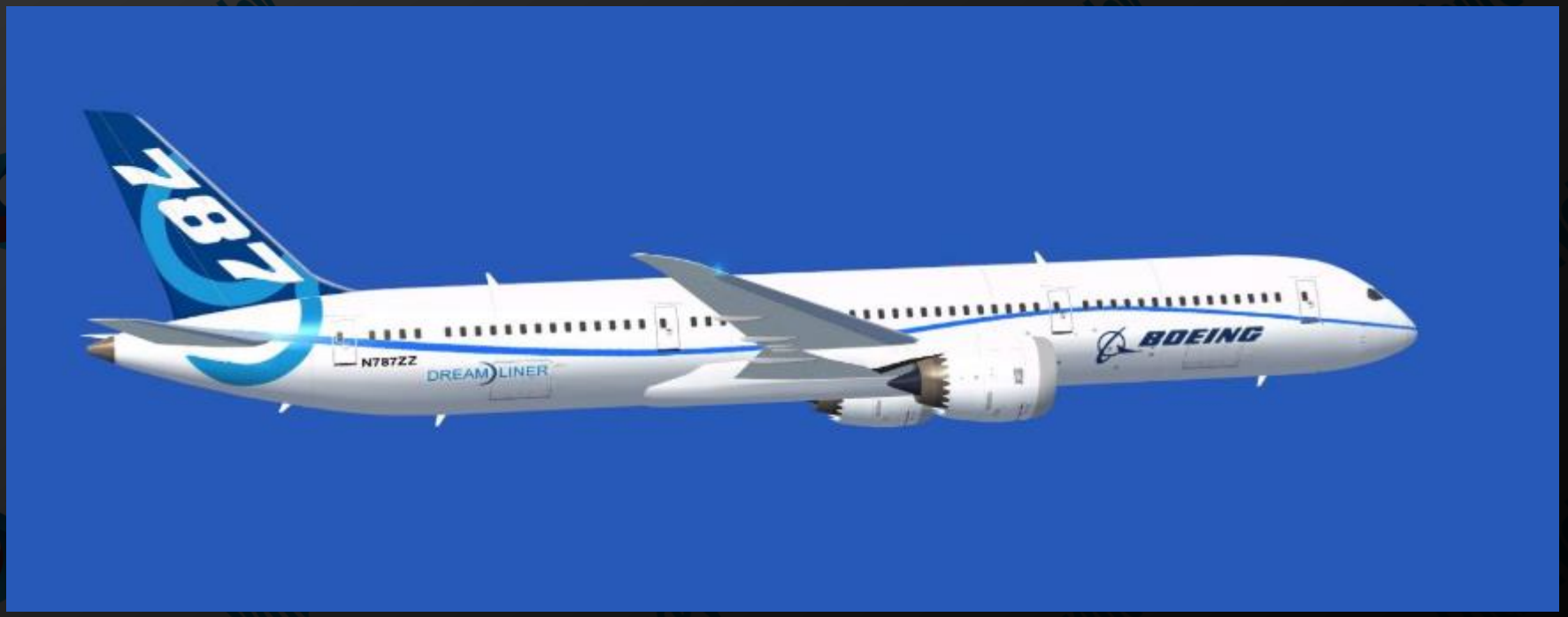
Pratt & Whitney

SATURN

SAFRAN

参考资料： Forecast International

飞机及发动机市场情况



18 民用客机市场

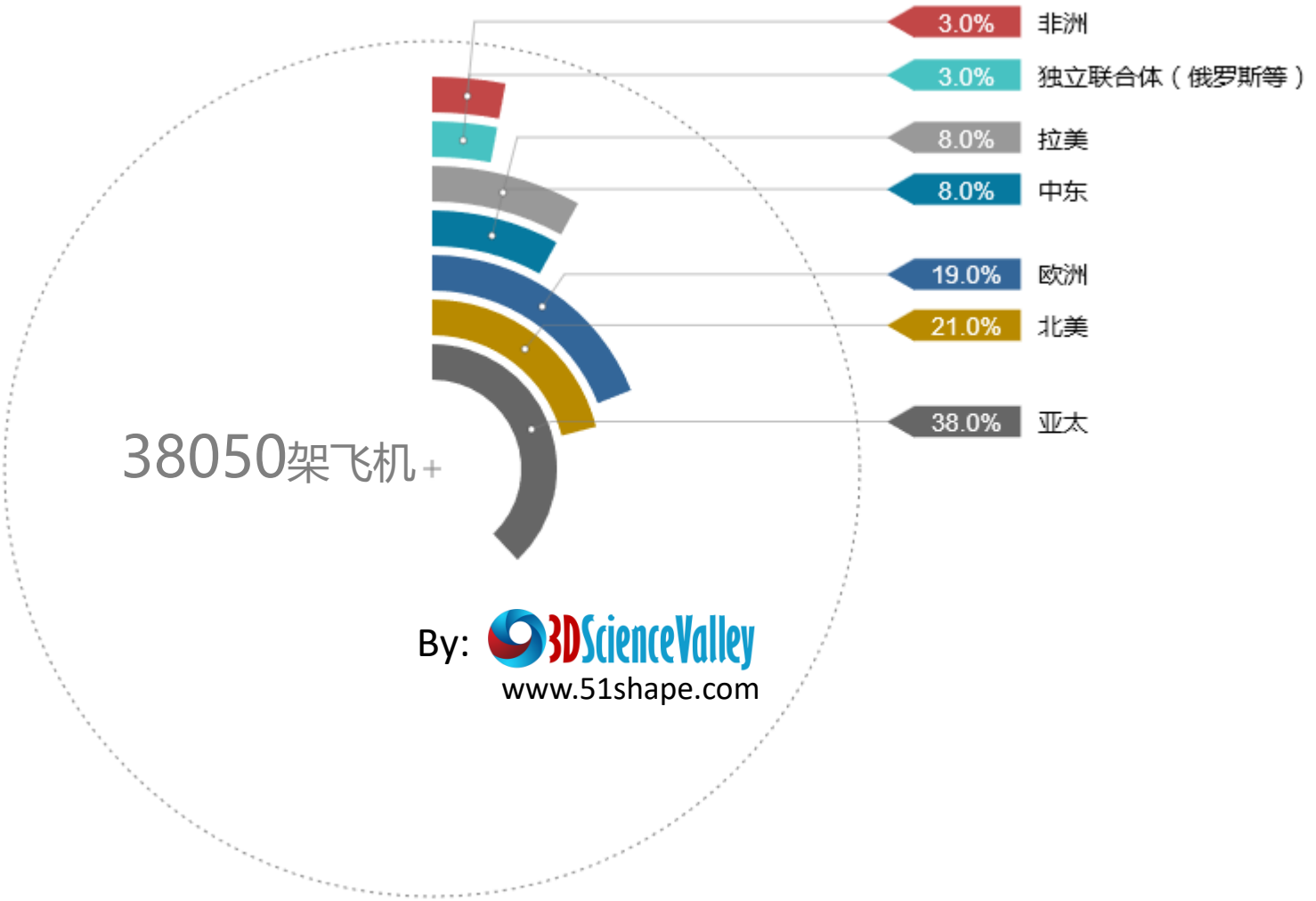
据商飞预测，未来二十年现有民用客机机的81%（18266架）将逐步退役。此外，民机市场还需要超过24436架的新增客机。因此，全球市场至2037年预计将有超过42702架新机交付，用于代替和支持民机市场的发展，其中，预计三分之二为单通道窄体客机。

资料来源：COMAC 中航证券金融研究所整理

19 飞机市场

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。



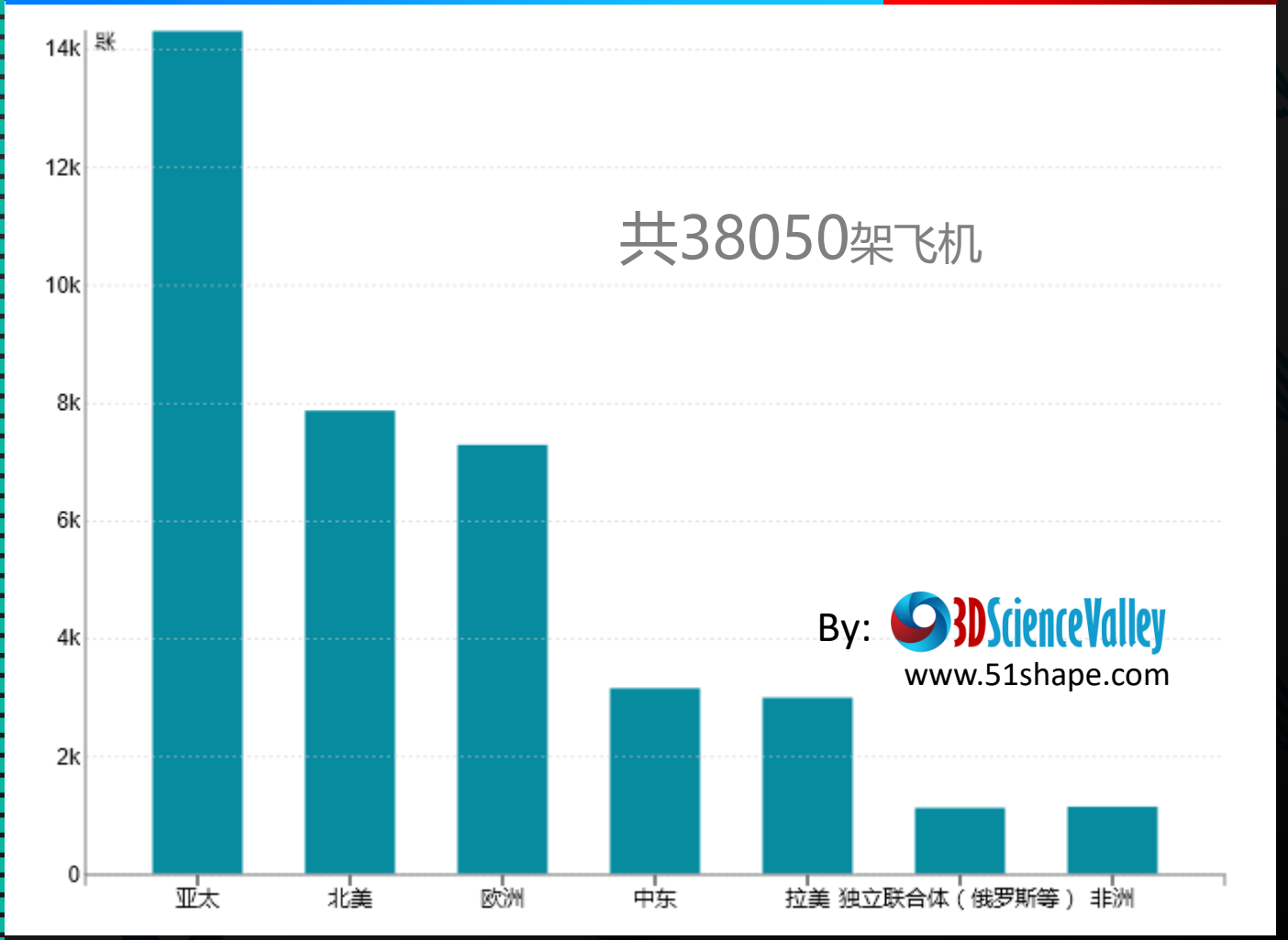
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

20 飞机市场

飞机未来20年需求量-按地区（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：

亚太	14330
北美	7890
欧洲	7310
中东	3180
拉美	3020
独立联合体	1150
非洲	1170



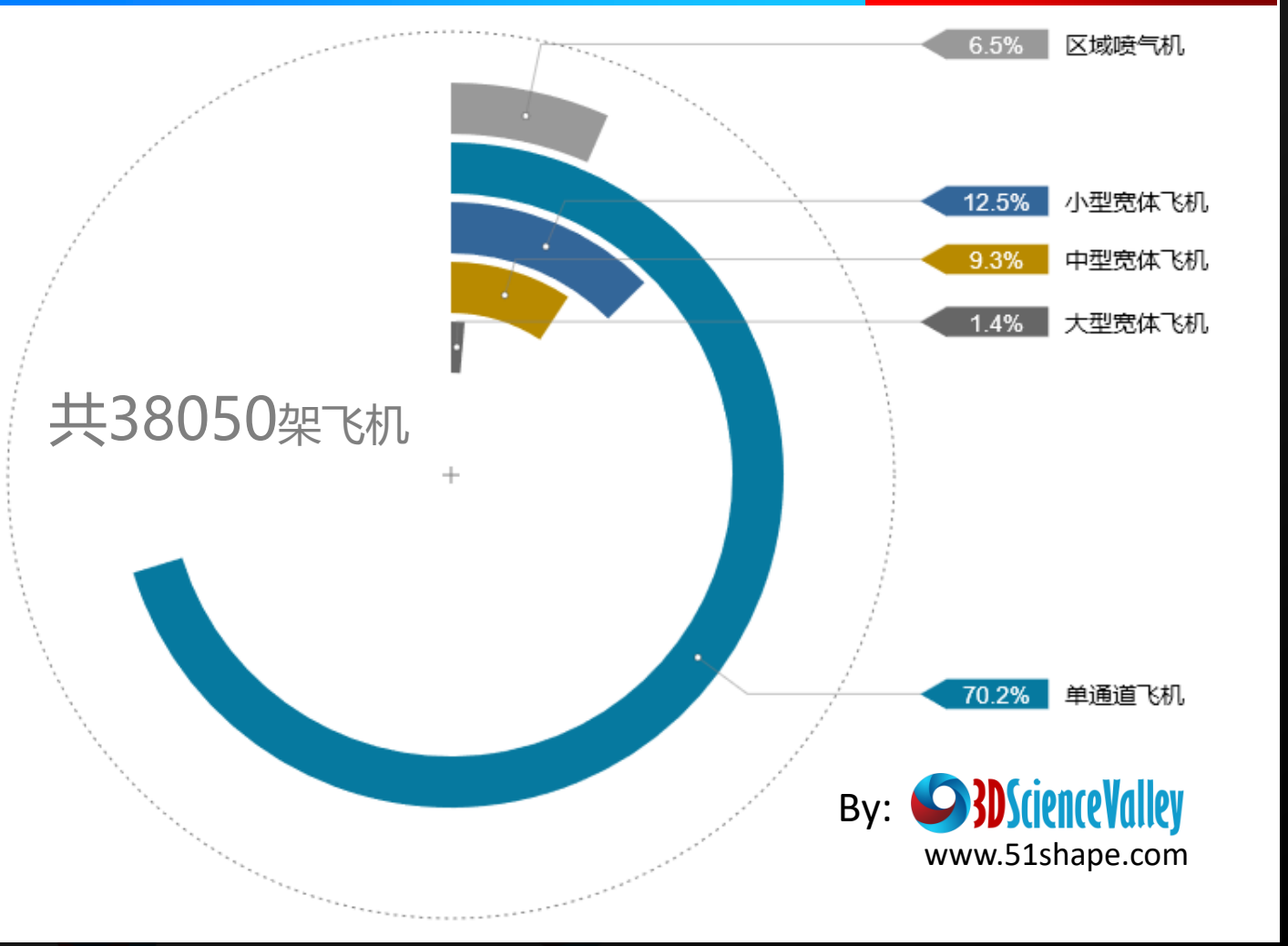
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

21 飞机市场

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

飞机未来20年需求量-按机型（数据来源：波音）



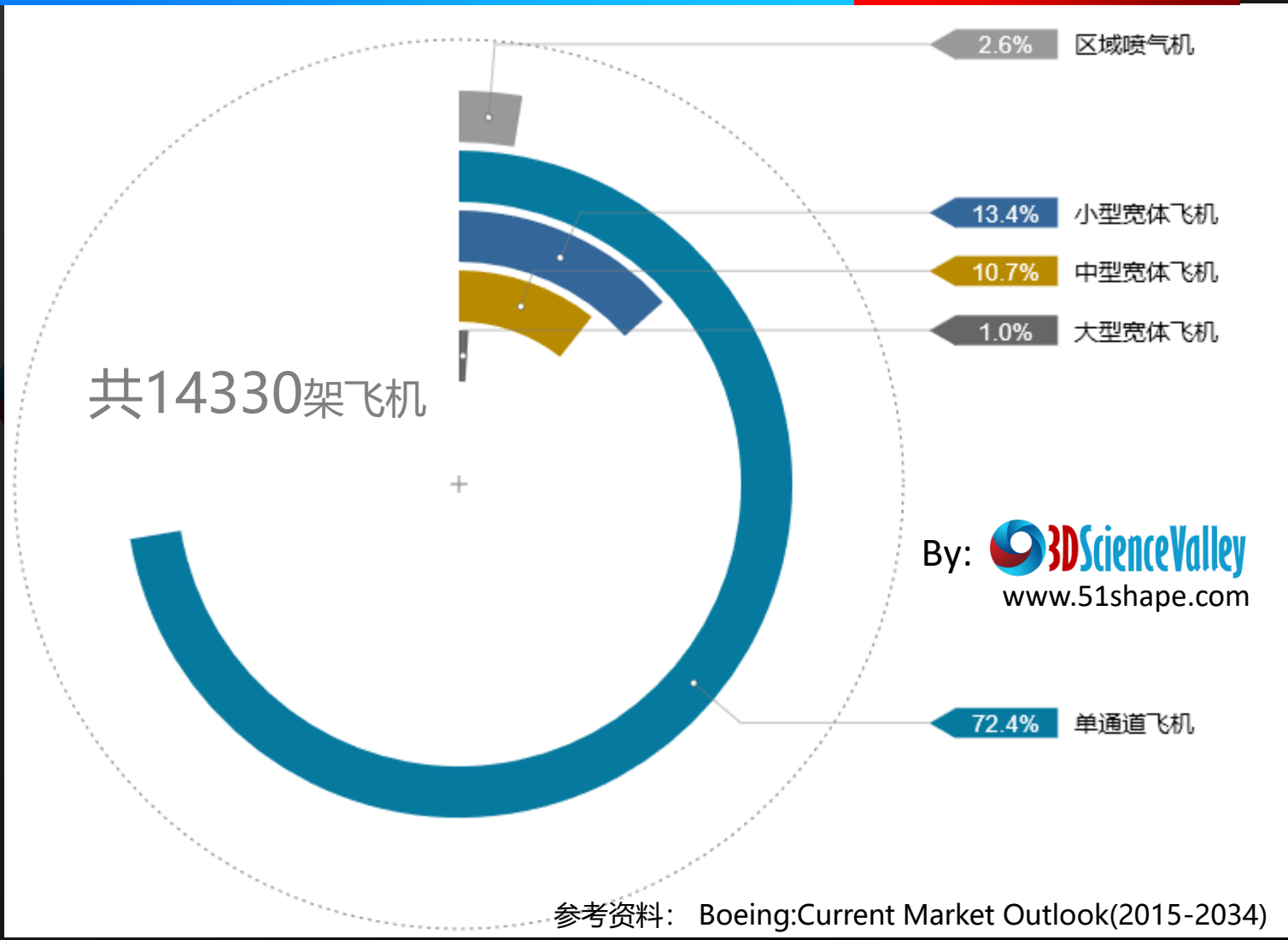
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

22 飞机市场

飞机未来20年需求量-亚太区域（数据来源：波音）

波音预测，到2034年，
亚太区域飞机
总需求量14330架中：

大型宽体飞机：140
中型宽体飞机：1530
小型宽体飞机：1920
单通道飞机：10370
区域喷气机：370



By: 3DScienceValley
www.51shape.com

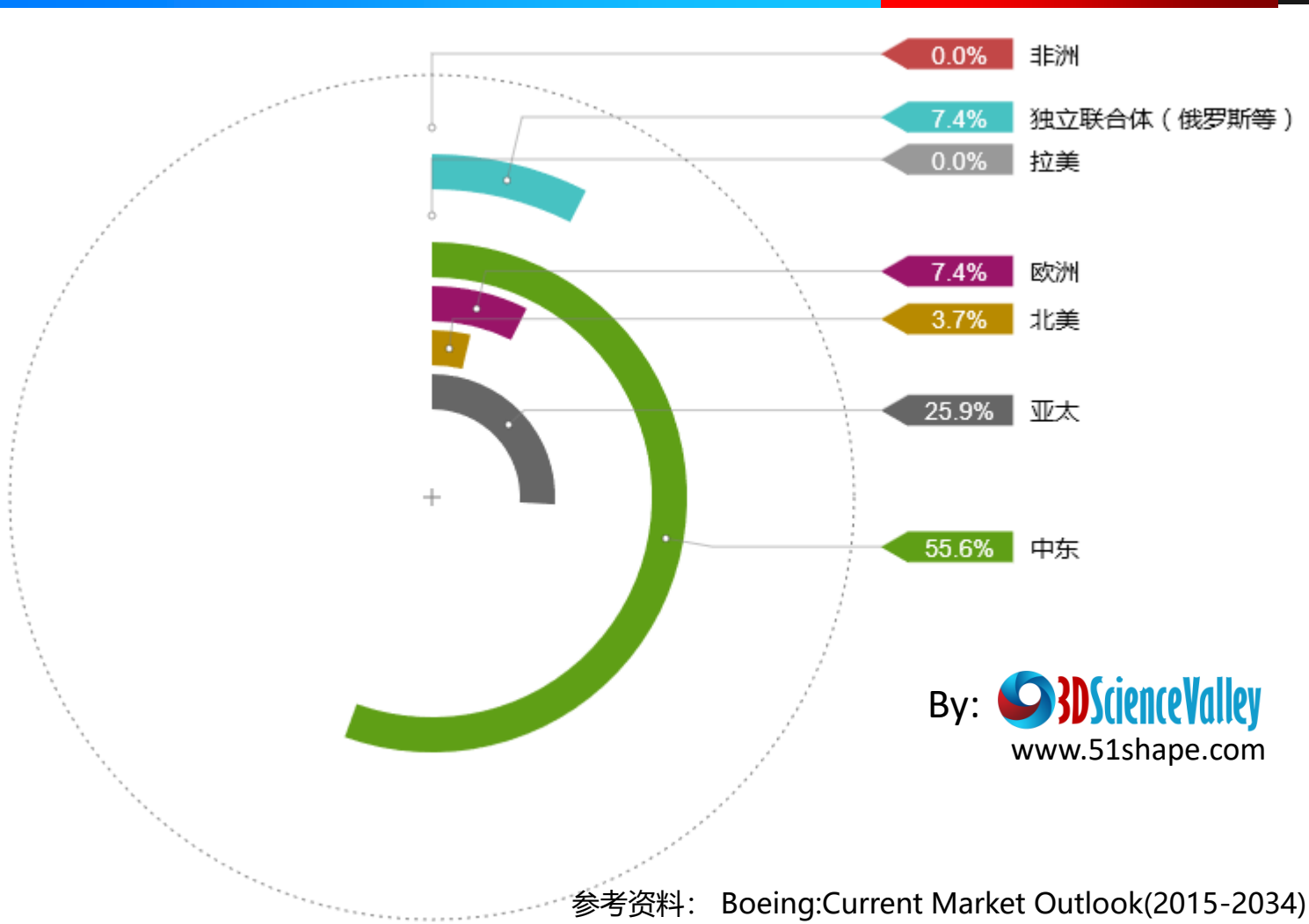
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

23 飞机市场

大型宽体飞机未来20年需求量（数据来源：波音）

波音预测，到2034年，
大型宽体飞机全球
总需求量540架中：

亚太：140
北美：20
欧洲：40
中东：300
拉美：0
独立联合体：40
非洲：0



By: 3DScienceValley
www.51shape.com

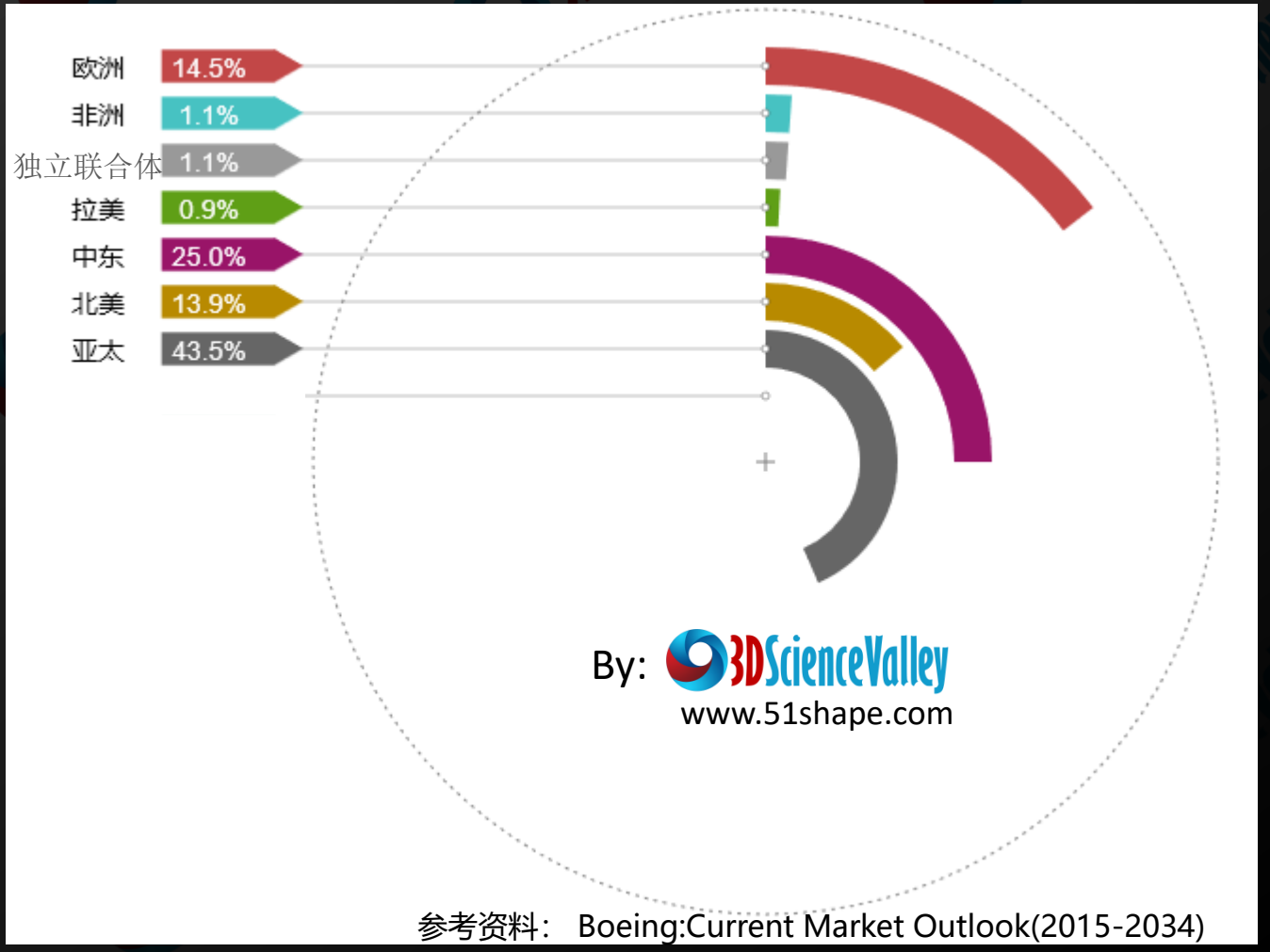
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

24 飞机市场

中型宽体飞机未来20年需求量（数据来源：波音）

波音预测，到2034年，
中型宽体飞机全球
总需求量3520架：

亚太：1530
北美：490
欧洲：510
中东：880
拉美：30
独立联合体：40
非洲：40



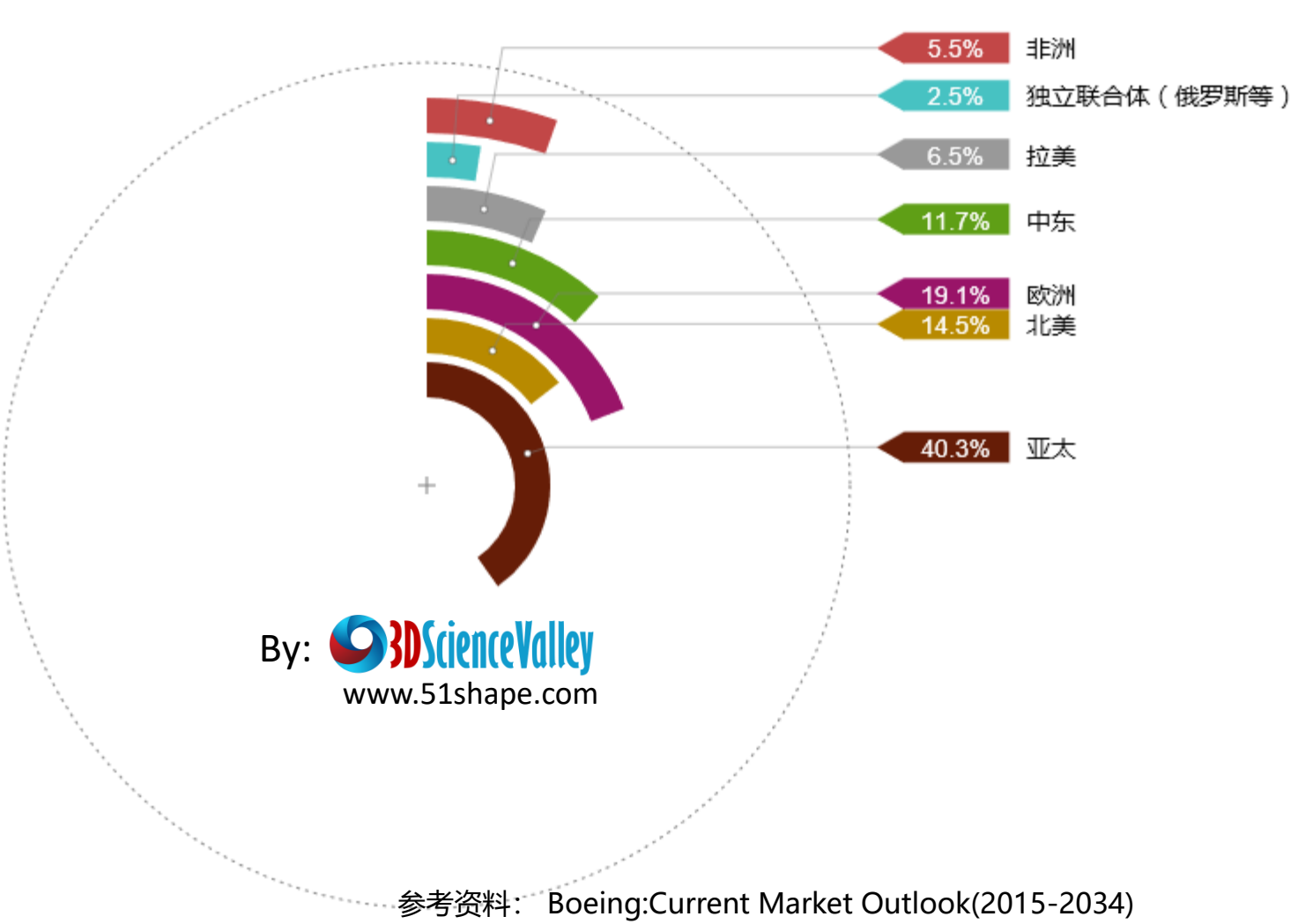
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

25 飞机市场

小型宽体飞机未来20年需求量（数据来源：波音）

波音预测，到2034年，小型宽体飞机全球总需求量4770架中：

亚太：1920
北美：690
欧洲：910
中东：560
拉美：310
独立联合体：120
非洲：260



By: 3DScienceValley
www.51shape.com

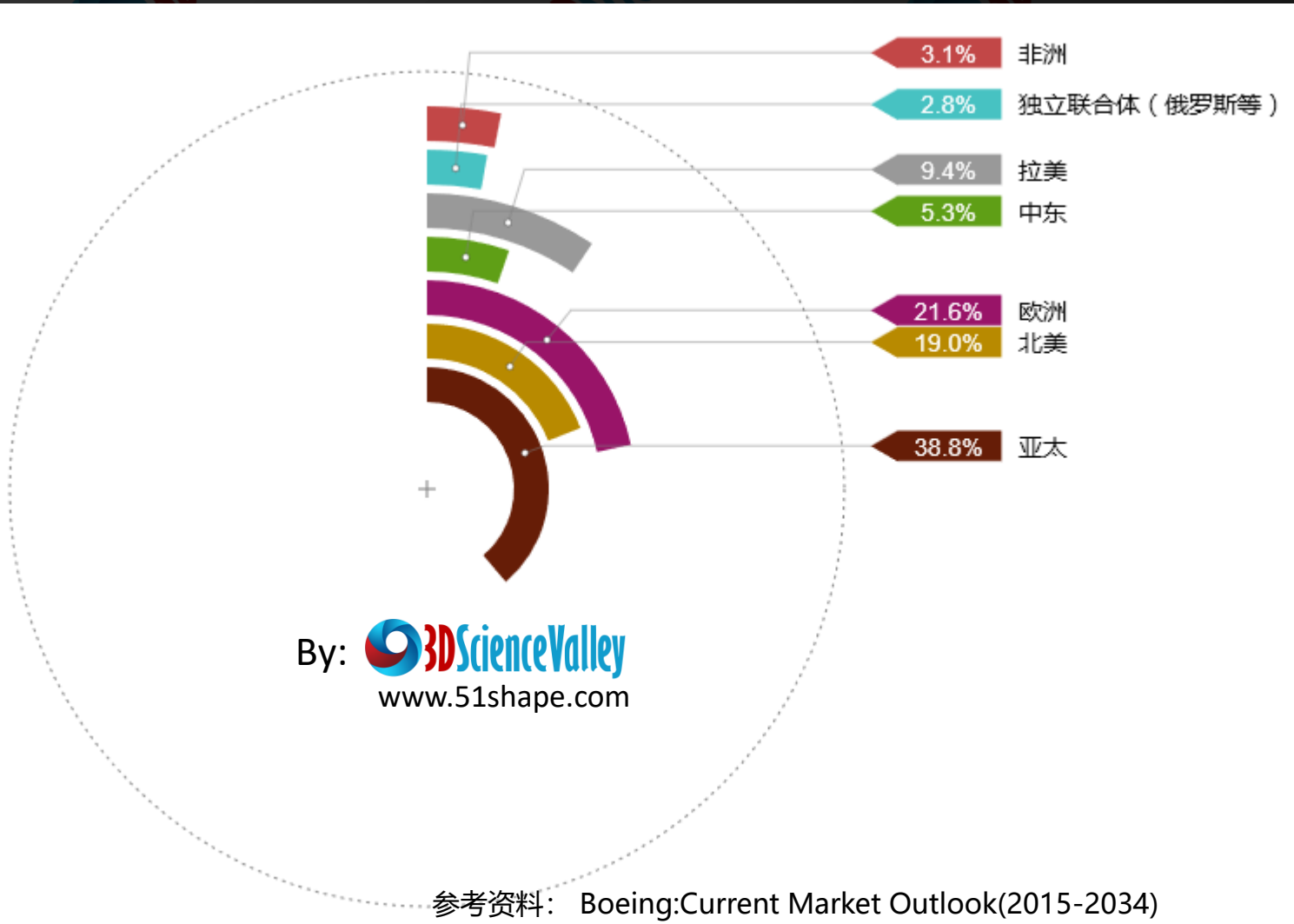
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

26 飞机市场

单通道飞机未来20年需求量（数据来源：波音）

波音预测，到2034年，单通道飞机全球总需求量26730架：

亚太：10370
北美：5070
欧洲：5770
中东：1410
拉美：2520
独立联合体：760
非洲：830



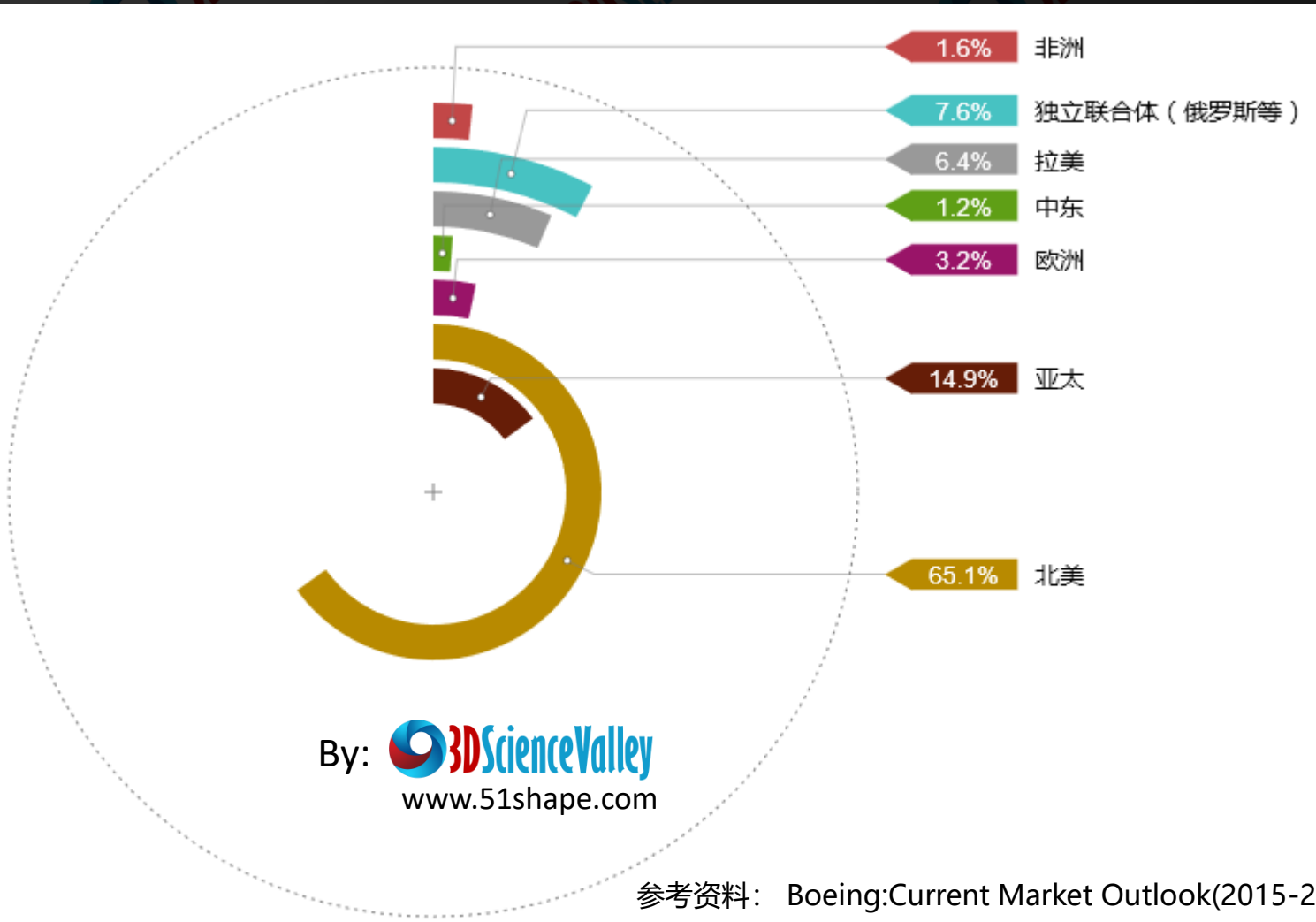
参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

27 飞机市场

区域喷气飞机未来20年需求量（数据来源：波音）

波音预测，到2034年，区域喷气飞机全球总需求量2490架：

亚太：370
北美：1620
欧洲：80
中东：30
拉美：160
独立联合体：190
非洲：40



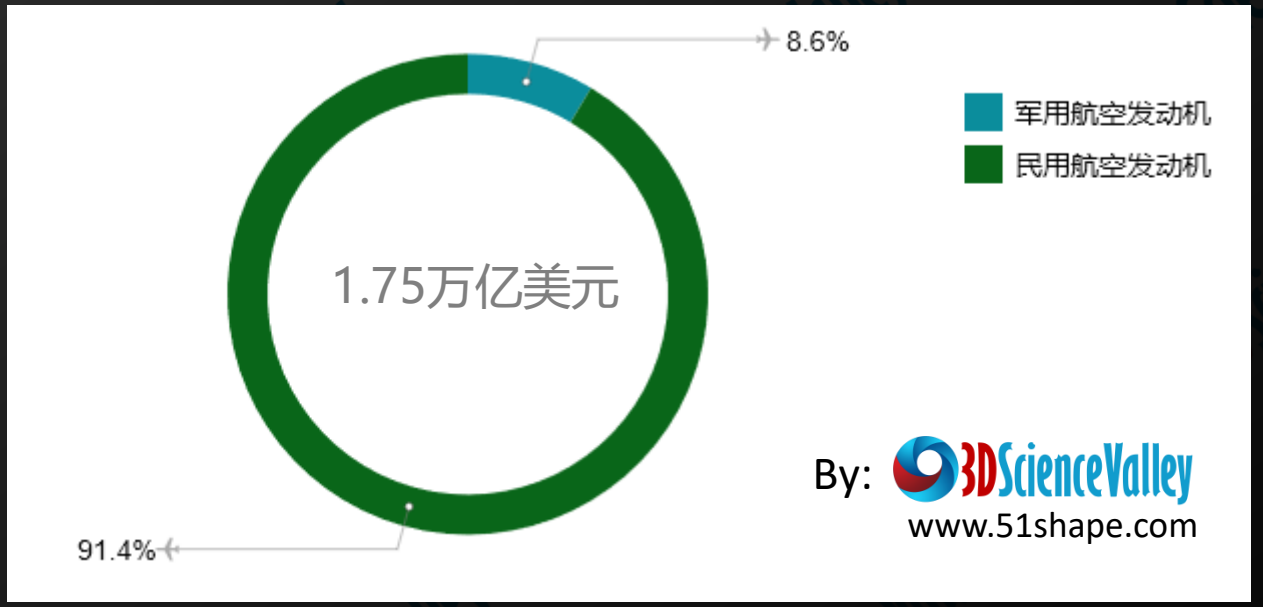
By: 3DScienceValley
www.51shape.com

参考资料： Boeing:Current Market Outlook(2015-2034)

28 飞机发动机市场 – 预测

根据R&R公司2014年对军用航空市场预测，未来20年（2015-2015）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。

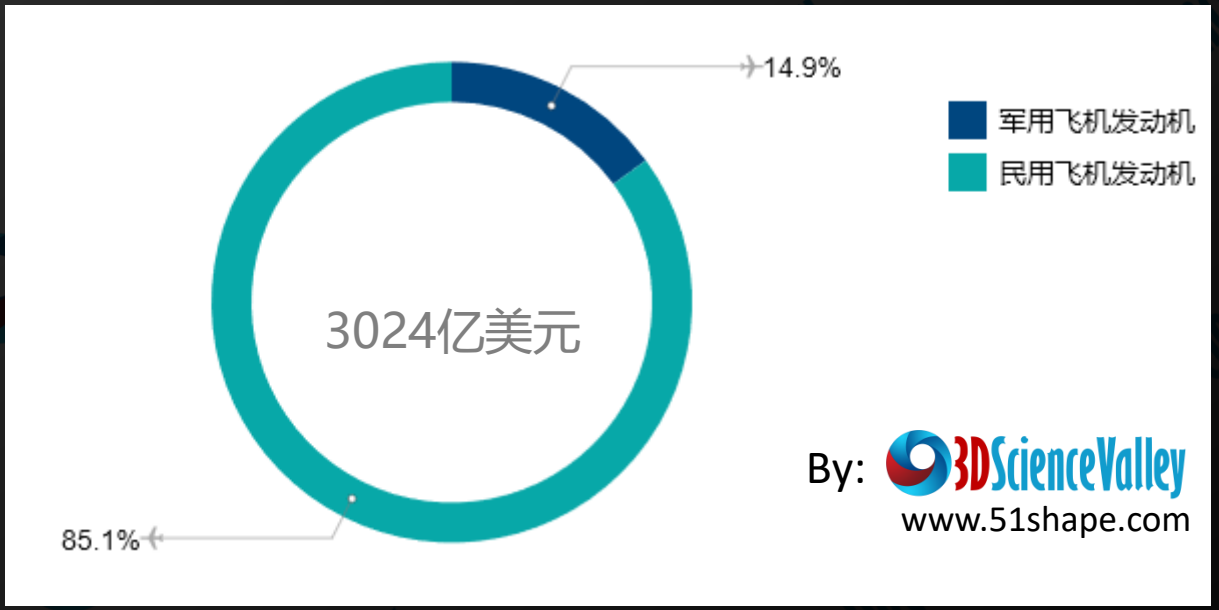
飞机发动机未来20年预测（数据来源：罗罗）



29 中国飞机发动机市场 – 预测

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。

中国飞机发动机未来20年预测（数据来源：中信）



3D打印飞机发动机的应用

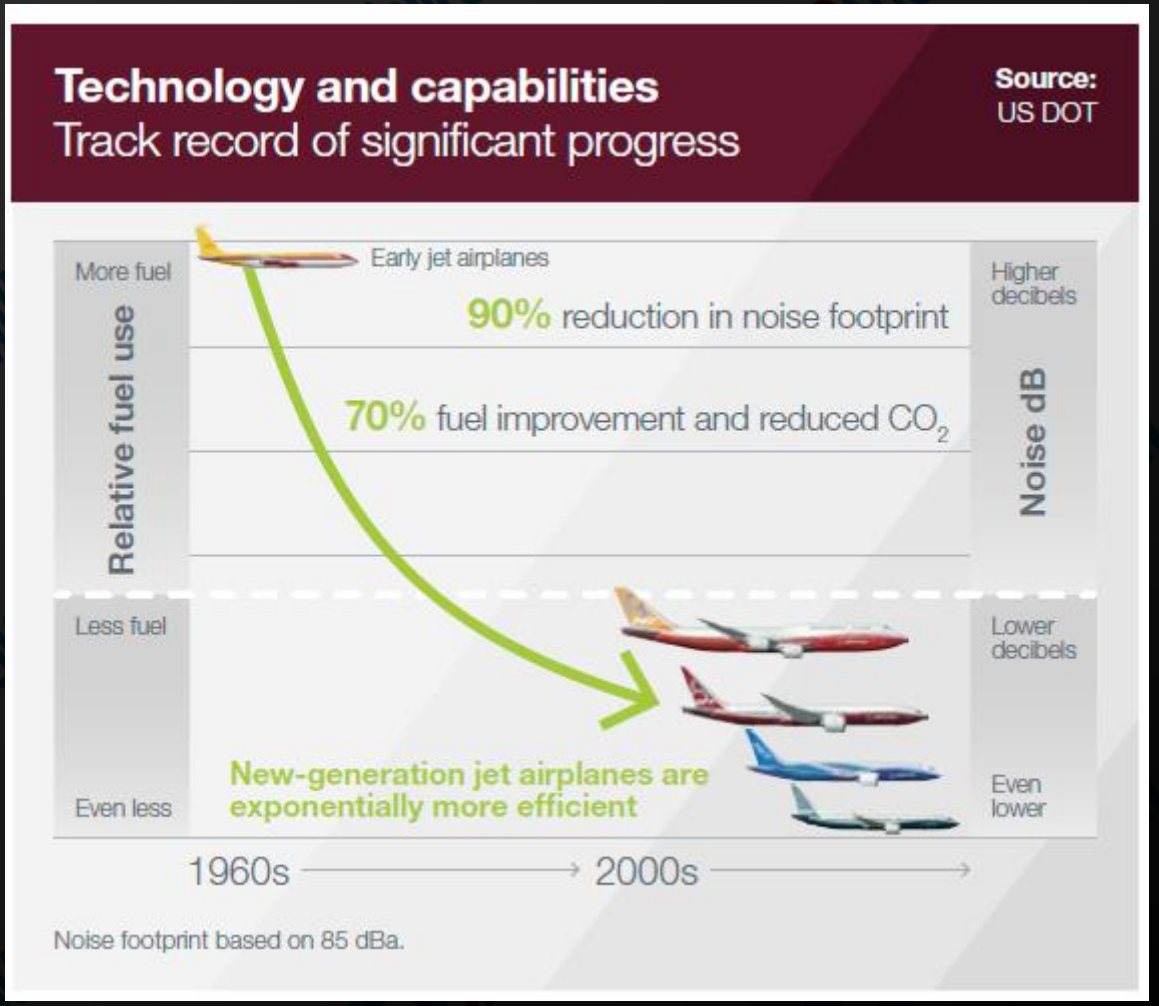
图片来源： GrabCAD

30 趋势

省油

降噪

图片来源：GE 喷油嘴



参考资料： Boeing current market outlook

31 GE的增材制造之路

技术层面 Technology

设施与组织 Infrastructure

2010

GE Aviation's additive team formed

GE航空成立增材制造团队

LEAP引擎喷油嘴设计

LEAP engine fuel nozzle designed

2012

Morris Technologies acquired

GE航空成立增材制造团队

第一个热交换器打印完成

1st Heat exchanger printed

2014

GE的3D打印T25传感器外壳通过FAA的认证

GE90 engine T25 Sensor certified

GE9X LPT叶片通过FAA的认证

GE9X LPT Blade certified

GE Power F-Class Flex Tip

GE能源打印伸缩头

喷油嘴通过FAA认证

Fuel nozzle certified

GE Aviation Additive Technology Center (ATC) opened

GE增材技术中心ATC落成

GE Oil & Gas Nova LT Swirler

GE打印旋流器

2016

GE增材技术先进中心(CATA)落成

Center for Additive Technology Advancement (CATA) opened

3D打印CT7演示机

a-CT7 demo engine

GE Catalyst engine prelim design

GE Catalyst发动机增材思维优化设计

GE Additive launched

GE成立增材事业部

收购Arcam Concept Laser

2017

Arcam AB & Concept Laser acquired

新设备

New machine production

CEC Munich CEC Pittsburgh opened

GE慕尼黑体验中心CEC落成

2018

Acquisition of GeonX

收购GeonX

GE9X engine – additive manufactured parts

GE9X拥有304个通过增材制造的零件，涵盖了七大类型的3D打印零部件：

- 燃油喷油嘴
- T25传感器外壳
- 热交换器
- 诱导器
- 第5阶段低压涡轮（LPT）叶片
- 第六阶段LPT叶片
- 燃烧器搅拌机

1 T25 SENSOR

1 HEAT EXCHANGER

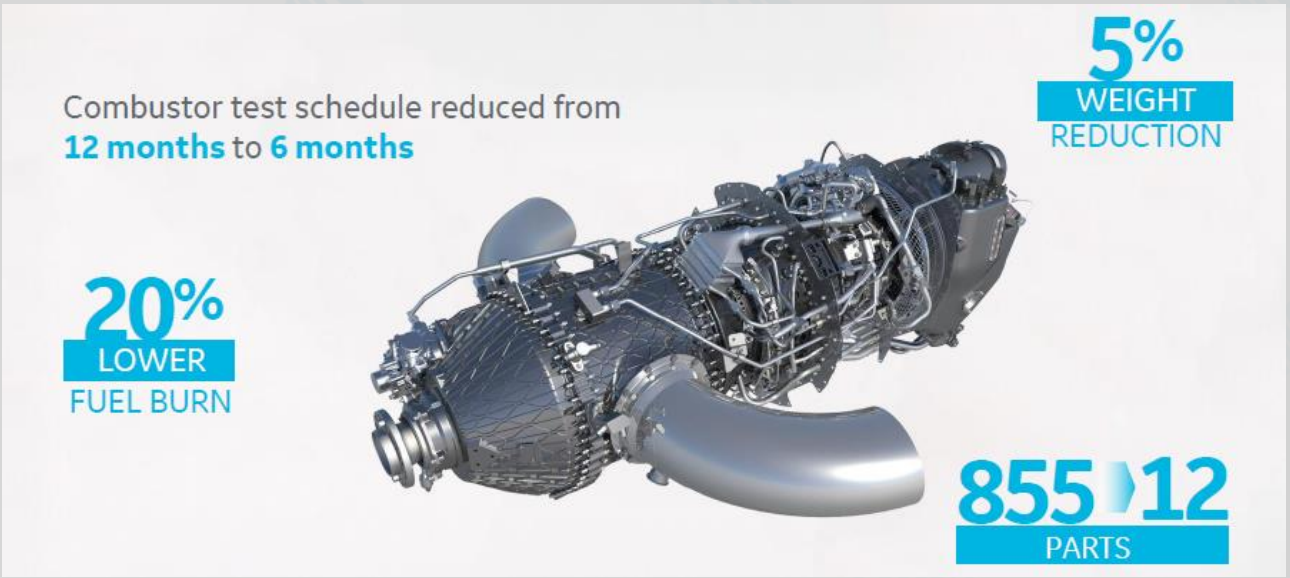
16 PARTICLE SEPARATORS

228 STAGE 5 & 6 LPT BLADES

28 FUEL NOZZLES & COMBUSTOR MIXERS

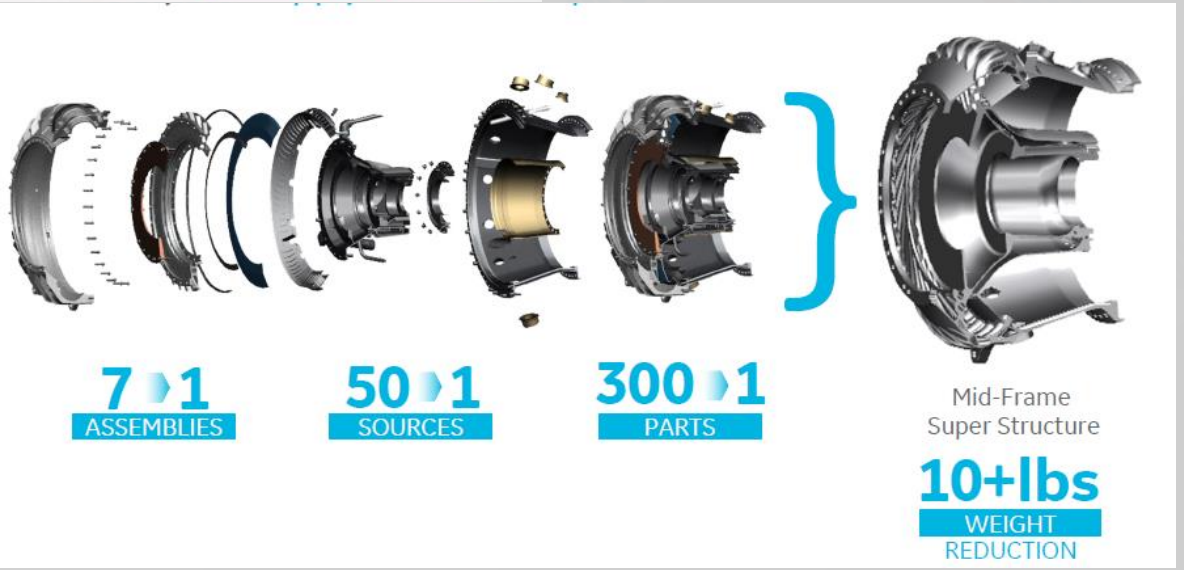
Source: GE Aviation

33 GE Catalyst发动机



Catalyst在设计的过程中充分利用数据，未来GE可以为Catalyst创造一个“数字双胞胎”，用于模拟、预防发动机可能出现的问题。通过对比其他发动机的信息，“数字双胞胎”可以精准狙击发动机性能的任何微小异样，甚至可以精确到是哪个供应商提供的部件，从而为同一批次的零部件研制出一套基于客户需求的、高度定制化的发动机维修计划，使维修更加高效、便捷。

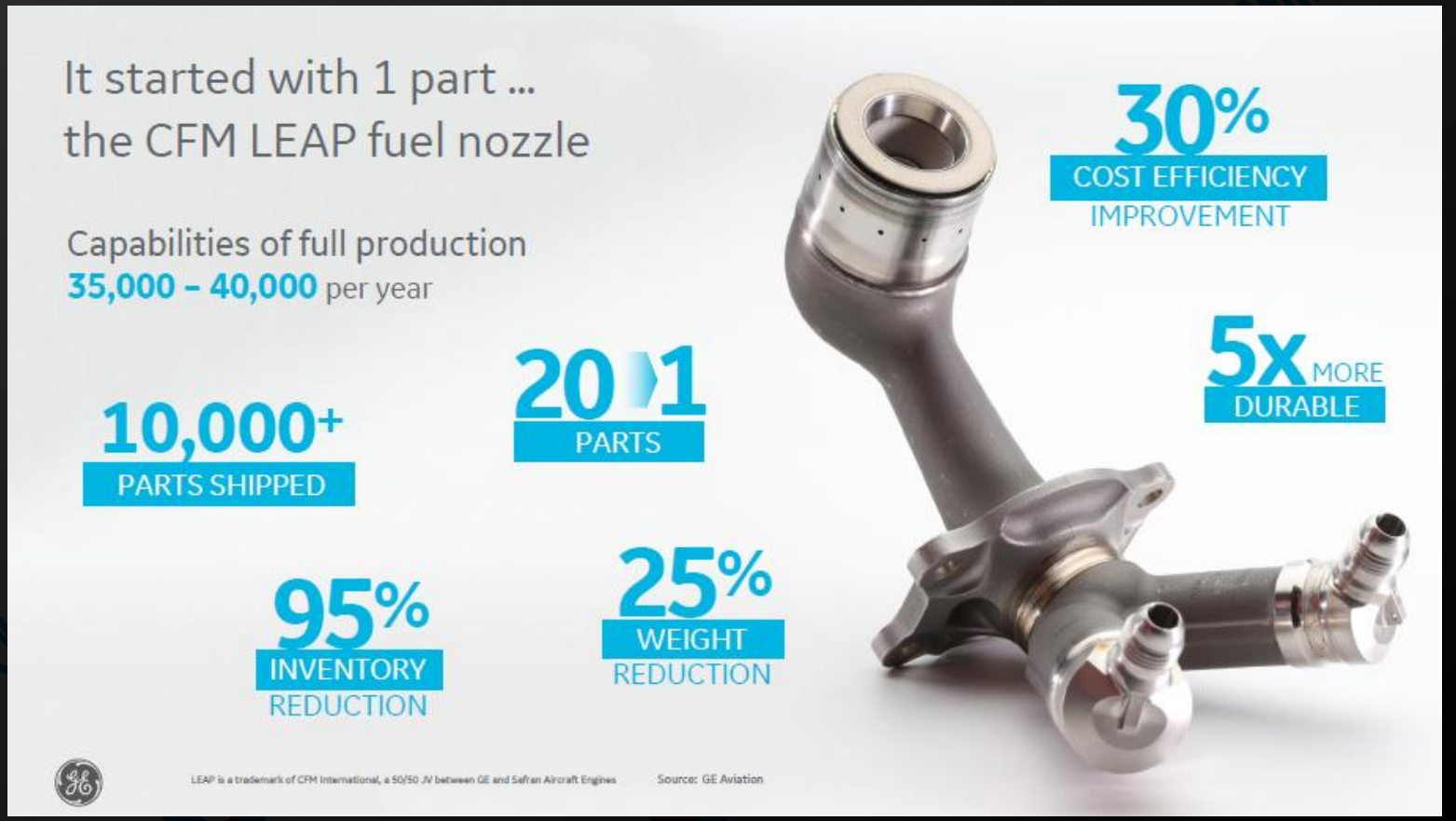
GE Catalyst将成为全世界第一款集成螺旋桨操作全权数字控制的涡桨发动机，该发动机超过三分之一的部件是通过3D打印技术生产制造的。在发动机中有855个单独的部件可以通过增材制造技术组合成12个部件，因此大幅提升了发动机研制速度，还帮助发动机成功“瘦身”100多磅。



34 GE 发动机喷油嘴零件

燃油喷嘴头内，迷宫一般复杂的流道将燃油与空气高效混合，可以帮助发动机实现优越的性能，GE的LEAP发动机的成败，很大程度上取决于燃油喷嘴的好坏。GE 3D打印的燃油喷嘴顶部结构只有核桃般大小，里面却有14条精密的流体通道。

3D打印的喷油嘴是一个精密的整体，原来20个部件成为一个零件被制造出来。新喷嘴重量比上一代轻25%，耐用度是上一代的5倍，成本效益比上一代高30%。GE奥本工厂凭借40多台3D打印机在2017年总共交付了8000个燃油喷嘴。截至2018年底，工厂完成的3D打印燃油喷嘴头总数已超过3.3万个。



35 军用涡轮发动机 – GE航空集团T901发动机

GE航空于2017年10月初宣布成功完成了T901-GE-900 涡轮轴发动机原型的测试。这款发动机属于美国陆军改进型涡轮发动机项目（Improved Turbine Engine Program,ITEP）的一部分。测试结果表明，GE T901发动机的性能达到甚至超过ITEP 项目的要求，已为发动机的制造做好准备。ITEP 项目具体的目标是使发动机的动力提高50%，燃油效率提升25%，并能够降低生命周期成本。GE航空集团在2018年6月提交了改进涡轮发动机计划（ITEP）技术提案，这是其向美国陆军提出的工程和制造开发（EMD）提案的第二个也是最后一个阶段。

T901 发动机使用了大量的3D打印零件，GE利用生产先进涡轮螺旋桨（ATP）等飞机发动机的工厂和增材设计方式去设计与制造这些3D打印零件。不仅如此，GE航空还在T901发动机中使用了在GE 成熟的喷气式发动机中使用过的先进制造技术和高温材料，例如：在非常畅销的LEAP和GE 9X 发动机制造中所使用的增材制造/3D打印技术。

GE Aviation's T901 Turboshaft engine for use inside the U.S. Army's Apache and Black Hawk helicopters. includes 3D printed parts. Image via GE Aviation

图片来源： GE

36 宽体客机发动机 – 传感器壳体
GE

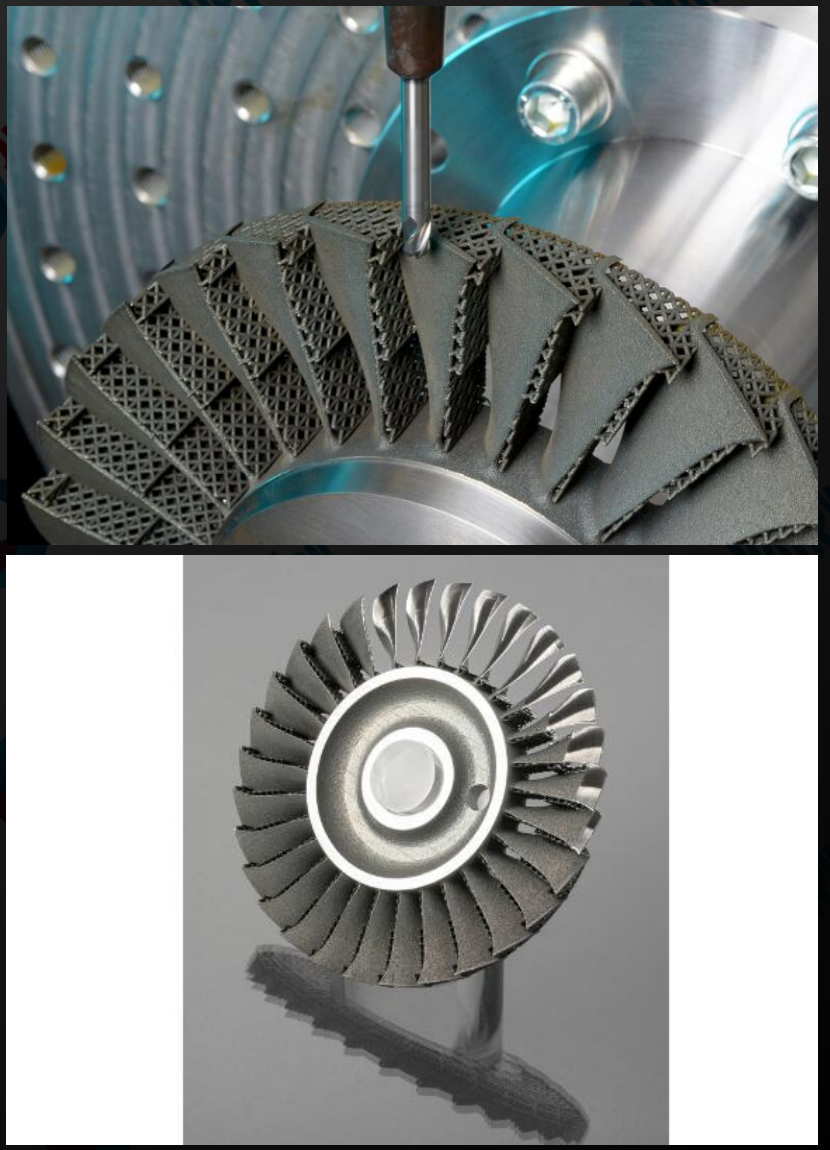
GE 的T25传感器壳体得到了美国联邦航空局的认证，这是GE 航空首个3D打印的金属零部件。2015年4月T25传感器壳体首次用在飞机发动机中，目前已被安装在超过400个GE90-94B发动机中。该零部件处于飞机发动机高压压缩机的入口处，T25 传感器负责为发动机控制系统提供压力和温度的测量数据。GE90-94B发动机可以为波音777宽体飞机提供动力。

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。

图片来源： GE

37 整体叶盘

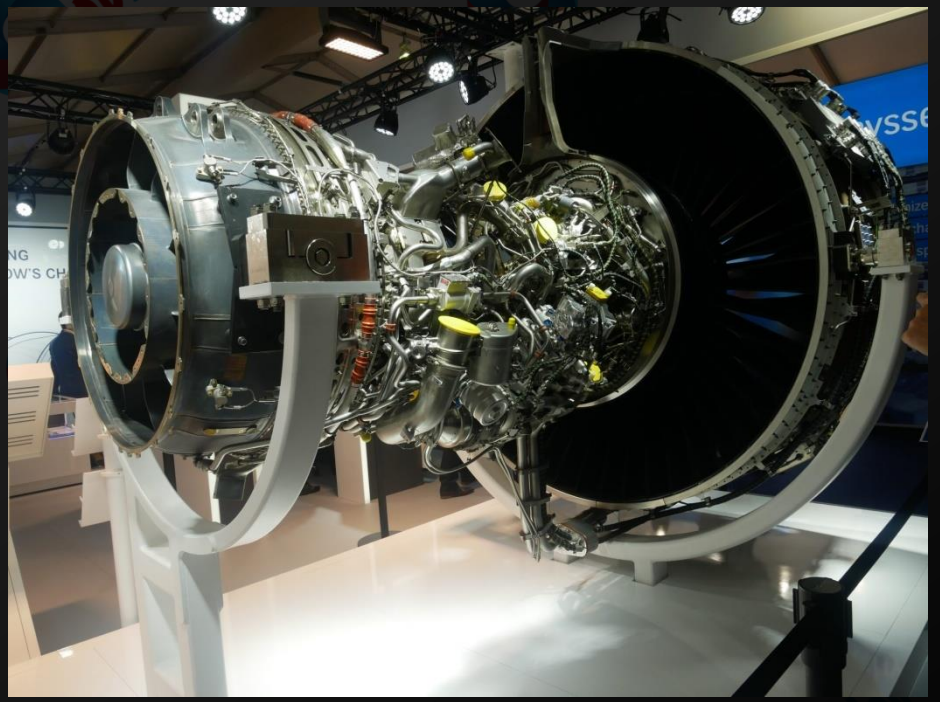
Norsk Titanium、Pratt＆Whitney - 普惠和TURBOCAM International通过3D打印整体叶盘（IBR），叶盘由TURBOCAM进行了质量评估。评估未发现增材制造常见的可能导致扭曲的残余应力集中的情况。此外，TURBOCAM证实了Norsk的RPD™技术所3D打印的整体叶盘非常适合通过传统的数控五轴铣削进行后期的精加工，与Ti6-4锻件的质量一样稳定。整个制造和测试工作一直由Pratt＆Whitney-普惠进行监督，普惠评估3D打印整体叶盘在未来发动机开发中的应用。利用Norsk快速等离子沉积工艺等增材制造技术，普惠可以缩短关键涡轮机械部件的制造和开发进度。



图片来源： Fraunhofer

38 整体叶盘

Norsk Titanium、Pratt＆Whitney - 普惠和TURBOCAM International通过3D打印整体叶盘（IBR），叶盘由TURBOCAM进行了质量评估。评估未发现增材制造常见的可能导致扭曲的残余应力集中的情况。此外，TURBOCAM证实了Norsk的RPD™技术所3D打印的整体叶盘非常适合通过传统的数控五轴铣削进行后期的精加工，与Ti6-4锻件的质量一样稳定。整个制造和测试工作一直由Pratt＆Whitney-普惠进行监督，普惠评估3D打印整体叶盘在未来发动机开发中的应用。利用Norsk快速等离子沉积工艺等增材制造技术，普惠可以缩短关键涡轮机械部件的制造和开发进度。



图片来源： Norsk

39 叶片修复

SLM Solutions作为联合组织RepAIR的一员，使用金属增材制造对航空叶片进行修复，在单次修复工作中可以实现41片航空叶片的统一修复。航空叶片使用与基板相连的固定装置进行固定及定位，首先通过铣削的方式将磨损处进行清理，保证各叶片的修缮面处于统一水平位置，将修复方案导入3D打印设备后即可将固定有叶片的基板安装到3D打印设备中进行铺设粉末及打印修缮。打印工作结束后对整个固定装置进行封闭式粉末清理，随后即可从固定装置上取下已修复好的航空叶片。

金属增材制造成功的解决了航空叶片修复难度高的瓶颈，且相对于传统的修复方案而言，使用增材制造不仅更加方便快捷，同时也能确保修复后的航空叶片具备稳定统一的零部件质量。

图片来源： SLM Solutions

40 微涡轮发动机喷嘴
赛峰集团

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

41

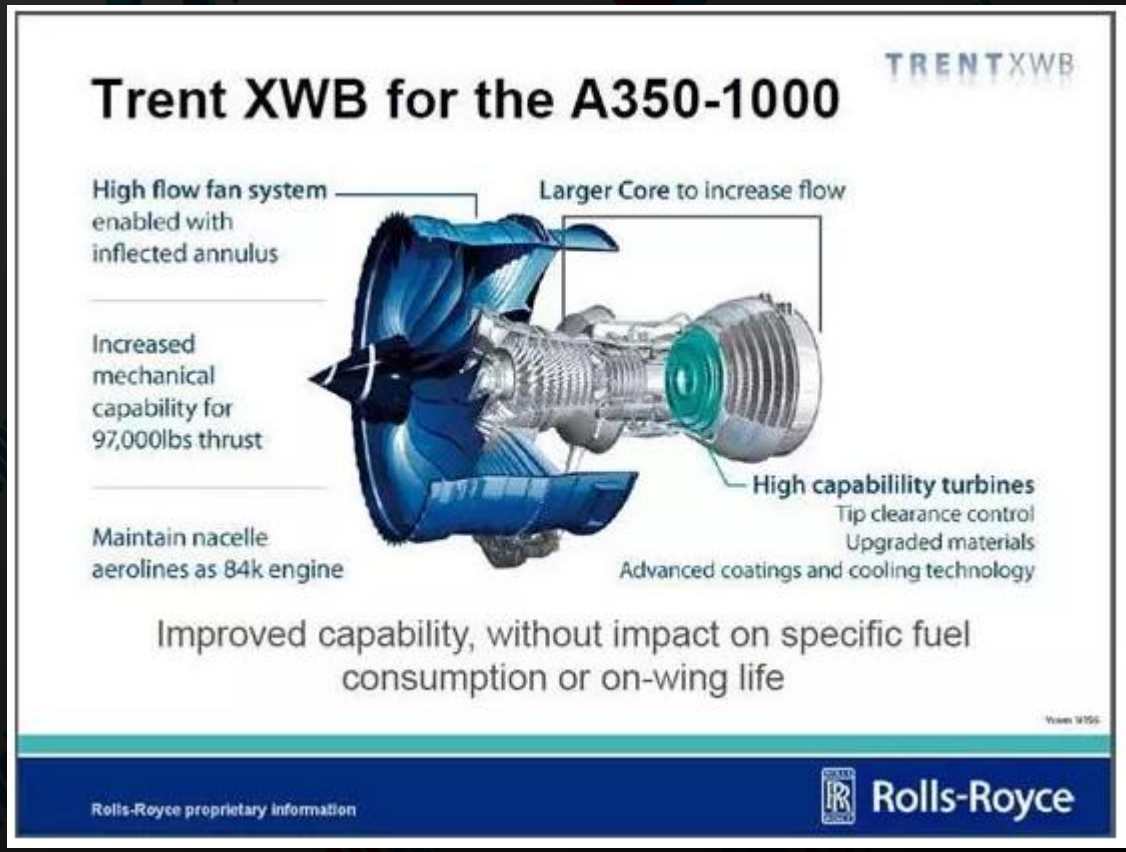
3D打印的LEAP发动机润滑装置
赛峰集团

2019年，赛峰航天推进器公司3D打印的LEAP发动机润滑装置已获得EASA1和FAA2适航当局的认证。赛峰航天推进器公司选择的3D打印工艺是粉末床选区激光熔化技术，通过3D打印的完整的润滑装置在测试过程中被安装在LEAP-1A发动机上，测试结果证明满足TRL 6技术成熟度。这台润滑装置将被安装在LEAP-1A系列发动机上，为空客A320neo提供动力。

图片来源： 赛峰集团

42 宽体客机发动机 罗罗

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。



图片来源： Rolls-Royce

43 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。

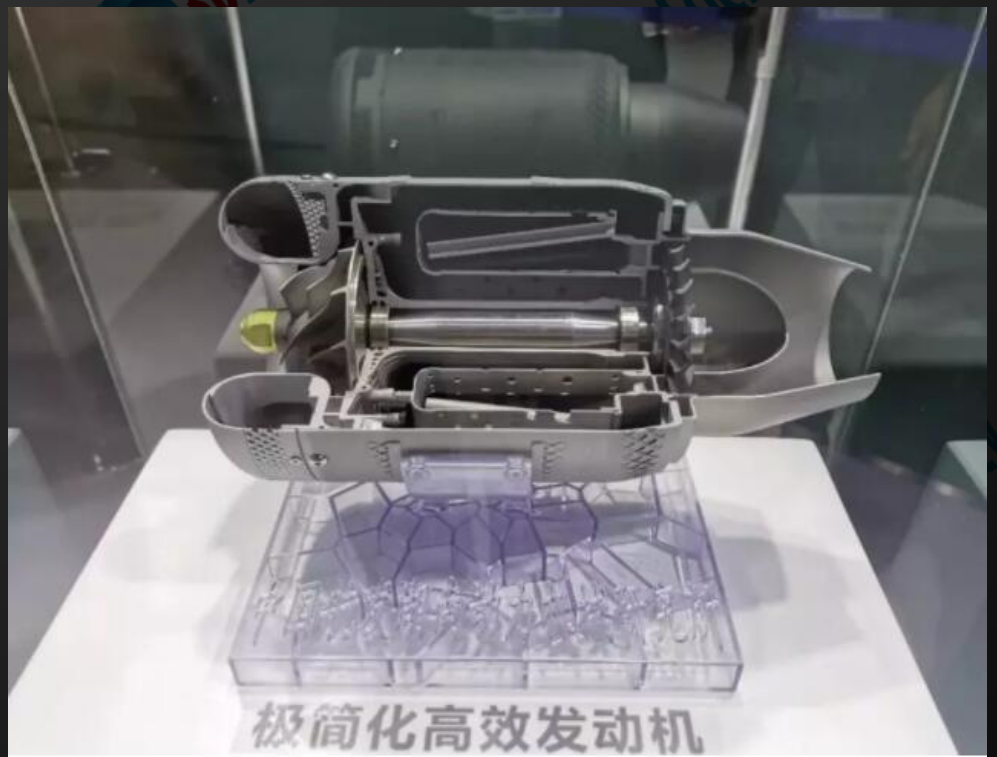
44 齿轮传动涡扇发动机 普惠、MTU

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Aibus A320neo，这是MTU航空发动机与普惠合作的项目。而Embraer,Bombardier, Erkut和Mitsuibishi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的合作。

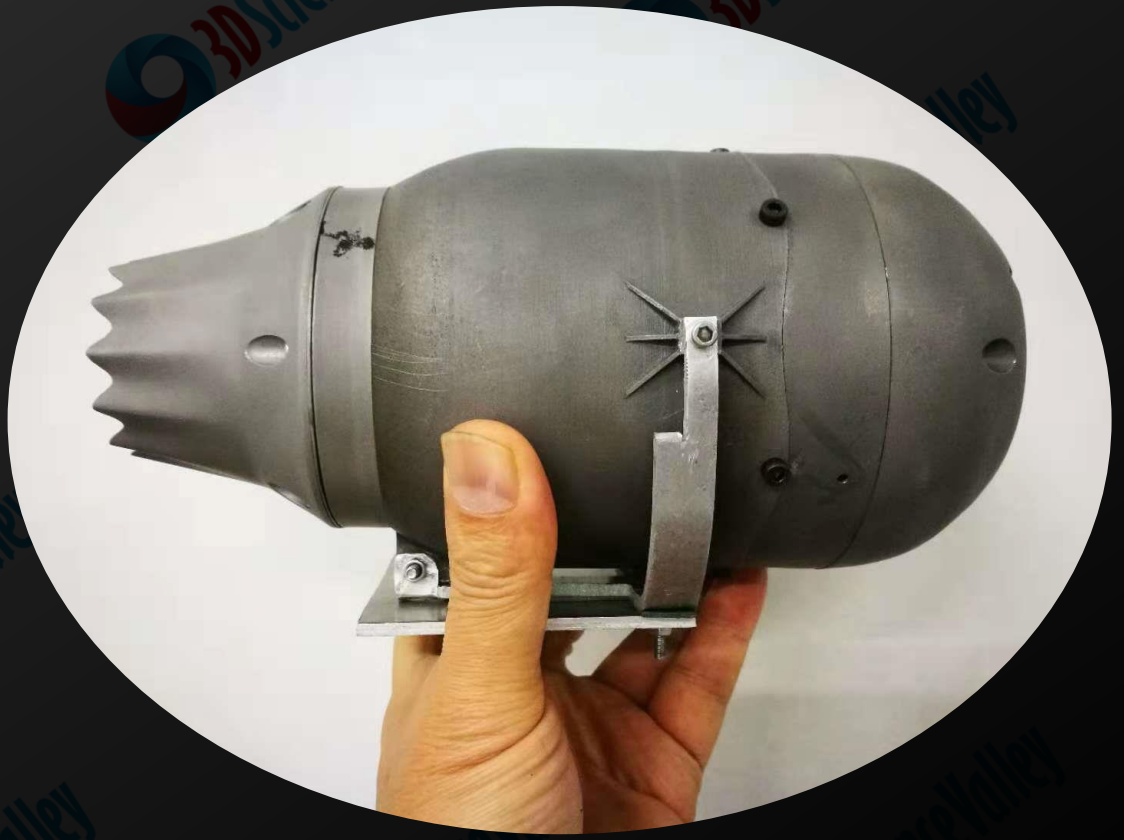
45 中国航空发动机集团

中国航发增材制造发动机项目中的增材制造发动机零部件由铂力特使用BLT-S310设备制造。项目主要有两个创新点：
- 建立了基于增材制造技术的发动机零件集成化设计技术，通过该集成化技术，研制了一型基于增材制造技术的高度集成化的小型涡喷发动机，零件集成率高达81%，降低发动机装配难度，提高发动机的可靠性和维修性；
- 建立面向增材制造和拓扑优化技术的零件轻量化设计技术，在创新结构空心离心叶轮、空心涡轮轴及空心涡轮盘等优化设计有了重大突破，并采用增材制造工艺实现了空心转子件的加工制备。



46 微型燃气涡轮发动机

国内南方科技大学教授，深圳3D打印创新中心增材制造研究院院长韩品连博士带领的团队开发了100% 增材制造的10kg推力和50kg推力微型燃气涡轮发动机。完全3D打印的微型燃气涡轮发动机完成了超温测试，其最高温度超过1200摄氏度，最大速度为97480 rpm，以满足设计规范的要求。



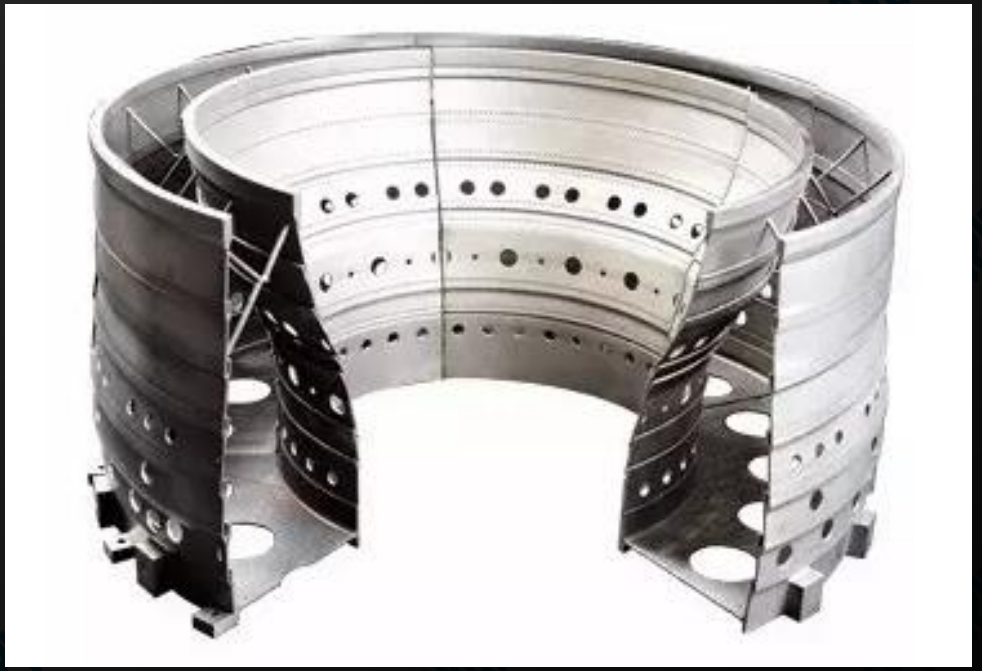
仿真提供方：安世亚太 PERA GLOBAL

47

其他
印度斯坦航空

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。



FAA

48 FAA在增材制造领域的规范

- **2015年6月3日**，FAA发布了AIR 100-15-130-GM39《增材制造认知》备忘录，提出由设计、制造和适航部门（AIR-100）组建了增材制造国家团队（AMNT），收集有关AM应用的信息，并作为正在开展的AM认证研究的技术资源。这些信息将有助于AMNT识别技术问题，并研发促进AM零件获得FAA认证的指南。

- **2016年7月7日**，FAA发布了AIR100-16-130-GM18《粉末床熔融增材制造零件的工程考虑》备忘录，该备忘录不提供AM部件认证的指导，而是从产品设计、原材料、成形过程、后处理、检测方法、工艺验证、材料设计值获取以及其他方面（包括技术文件、电子文档、过程控制、成形中断、异质污染物控制、可追溯性等）提出了疑问（考虑）。这些工程疑问（考虑）是为与申请人进行认证讨论提供良好的出发点，并在需要问题文件（IP）中进行记录，为后续的适航审查定与认证奠定基础。

- **2016年9月30日**，FAA发布了AIR 100-16-110-GM26《增材制造设施和过程的评估》备忘录，旨在帮助航空安全审查员（ASI）对AM设施及过程进行评估，协助审查员采集关键工艺参数，并从人员培训、场地设施、技术数据、原材料处理、设备、软件控制、制造过程有效性、制造过程监控、检测、冶金过程等方面进行全流程过程审核，并积累数据、更新迭代、并进行新的认证活动。随着增材制造工艺与流程的成熟及行业标准化的完善，增材制造国家团队（AMNT）预计会对该文档进行频繁修订。

- **2016年11月30日**，FAA发布了NOTICE 8900.391《飞机、发动机、螺旋桨中的增材制造维护、预防性维护及更换》，主要是为飞行标准服务（AFS）人员参与飞机、发动机及旋翼类飞行器的维护、预防性维修及更换时提供认证与监督的指导，同时对于FAA管理、运营及行政人员也可以参考这份文件进行相关的工作。该文件的实施有效期定为1年，并于2017年11月30日废止使用。

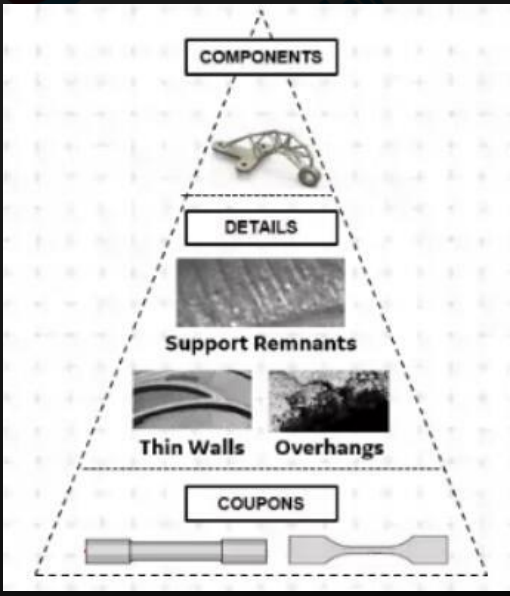
参考来源：融融军民

49 FAA在增材制造领域的规范

- 2018年，FAA发布了咨询通告AC 33.15-4《粉末床熔融增材制造成形涡轮发动机零件及修复指南》的征求意见稿。FAA的咨询通告（AC）是FAA向所有飞机型号申请人给出的一种适航符合性验证方法（非强制实行），用来表明对适航条款或专题的符合性，按此方法验证，FAA直接认可，原则上CAAC/EASA也是认可的。虽然这份文件不是FAA最终发布的文件，但对于如何保证增材制造（此处仅为粉末床熔融（PBF）方法）产品质量仍具有重要的参考价值与意义。下面将对AC 33.15-4中的规定进行简述。

AC 33.15-4给出的是一种可接受的方法，用于证明通过粉末床熔融（PBF）增材制造（AM）成形涡轮发动机零件及零件产品的维修与联邦法规 14 CFR §33.15的符合性，并对AM相关设计与制造等方面提供了指导。由于PBF AM成形的工艺依赖性强，其材料的设计值不仅与制造商采购原材料的变异性相关，而且还与用于制造生产零件和维修的制造工艺所引入的变异性相关。必须对全流程的参数变量有充分的理解，才能达到稳定和可重复生产零件所需的控制水平。因此，AC 33.15-4在材料设计值、设计、材料与成形、后处理、检测、工艺验证等6方面给出了指导。

在材料设计值方面，AC 33.15-4提出要建立规范的测试程序，采用典型、有代表性（考虑成形批次、成形位置、试样取向、原材料批次等）的测试样本的基本准则；应考虑有效工艺窗口、产品的实际情况（各向异性、孔隙率、熔合不良情况等）、测试实验室的资质等方面对试样测试进行保障；采用类似于复合材料的积木式验证方法，通过试样级、细节件级、构件级等多层级积木式验证来保证产品研制；在成品材料设计许用值方面，要考虑增材制造材料各向异性的表征、最小材料设计极限值的建立、零件功能裕度的补偿等方面，最终建立材料设计许用值。



图：多层级积木式验证

参考来源：融融军民

50 FAA在增材制造领域的规范

对于增材制造这一强设计相关的制造技术而言，从适航的考虑从零件设计就应该开始考虑。AC 33.15-4从零件设计、零件取向、尺寸控制、表面状态、支撑结构、粉末去除等几方面进行指导。零件设计时，应充分考虑各向异性、增材制造特有缺陷以及缺陷的最佳检测时机与方法；依据材料各向异性特性、残余应力的产生、自支撑及悬垂曲面的特点来考虑零件成形时的取向；考虑工艺及装备的成形能力、残余应力的产生于消除、后期热处理及热等静压等热循环的要求来控制制件产品的尺寸；考虑零件的表面光洁度要求、内表面处理、表面状态对于力学性能、可靠性的影响以及零件产品防护涂层的涂覆；考虑零件生产时支撑结构数量的减少以及支撑结构对于传热与保形的作用；考虑粉末去除，并制定相应的程序规范，验证潜在残余粉末对于零件预期功能的影响。

在材料与制造方面，主要从材料与工艺的研发以及材料与工艺控制等方面提供认证指导。在材料与工艺研发阶段，充分考虑变异性来源，并采取适当的控制措施，减少材料性能变化；通过原材料规范、熔融工艺规范、热处理规范、人员资格鉴定与认证、设备鉴定、维护与校准等方法，进行合格冶金工艺的鉴定，批准后能始终如一生产符合设计要求的零件；在材料与工艺控制方面，应考虑建立原材料规范、原材料再利用要求、工艺规范、零件材料规范等方面的标准化文件用于适航认证。

在成形后处理方面，必须规范并说明成形后工艺及程序，包括：残余粉末的去除、残余应力定义及解决方法、取件方法及顺序、支撑去除的方法及顺序、热处理与热等静压的过程参数及显微组织要求、防护涂层涂覆的技术规范及其对材料性能的潜在影响。

参考来源：融融军民

51 FAA在增材制造领域的规范

PBF AM是逐层沉积的过程，可能产生在成形方向上不具有显著高度的缺陷（例如，沿成形面形成的、仅有1-2层厚的熔合不良等平面缺陷）。此外，成形态表面粗糙，可能会掩盖表面缺陷，难以检测。所有常规无损检测（例如，X射线、荧光、超声、涡流）是适用于AM零件检验的，但可能需要以新的或组合的方式来检测AM过程产生的缺陷。因此，在检测AM零件时，应明确零件材料固有缺陷及缺陷阈值标准、确定检测时机、选择适合的检测方法与标准、保证表面状态符合NDI检测要求、通过CT等方法应对复杂几何形状及内部特征的检测。AC 33.15-4指出，CT是目前唯一被批准用于检查无法直接访问的内部特征的检查方法，但需要考虑其成本、时间、能力等。

为保证稳定、可再现地生产出符合设计要求的尺寸、性能及质量的零件，AC 33.15-4提出进行工艺验证，包括工艺验证方法、工艺定型鉴定、设备鉴定、多台设备鉴定以及关键工艺变更的相关要求。当工艺过程与参数发生变更时，必须提供可靠地试验数据及依据进行说明。

FAA对于AC 33.15-4的制定及未来发布表明增材制造在航空领域的应用已初步进入实际工程应用、批量生产阶段，其规定的要求都体现出从产品的设计研制到批生产各个环节与流程都需要系统化、规范化的技术文件支撑，才能保证产品生产的质量一致性及可重现性。

参考来源：融融军民

52 FAA出台增材制造领域路线图

美国联邦航空管理局（FAA）于2017年9月底提交审查文件，制定了“增材制造战略路线图”草案，路线图包含重要的监管信息，涵盖认证、机器和维护、研究和开发的问题和考虑，以及对增材制造方面教育和培训的双重努力需求。

在制定路线图之前，FAA对增材制造当前所面临的挑战进行了详细的研究，包括对可接受的关键制造参数的理解限制，对关键机械和材料缺陷的理解限制，工业数据库的缺乏，无损检测技术的开发，缺乏工业规范与标准等等。

撰写这样一个综合路线图的主要挑战之一是开发可以涵盖所有新流程的系统。包括技术分类都是一个挑战，工作组尝试通过不同的角度来进行分类，例如以原材料形状来分类：粉末、线材、液体等，也可以通过加工中使用的能量来分类，激光、电子束、等离子弧等。

仿真与数字孪生

53 仿真

航空发动机的仿真包含气动/燃烧/结构/强度/材料等学科领域、部件/子系统/系统等产品结构层次，以及设计/试验/制造/维修等领域

学科领域维仿真技术

流体仿真：计算流体力学(Computational Fluid Dynamic，CFD)是通过数值方法求解流体力学控制方程，并预测流体运动规律的学科。

燃烧仿真：计算燃烧学(Computational Combustion Dynamics，CCD)是对燃烧的基本现象和实际过程进行计算机模拟的一门科学，为深入认识航空发动机燃烧过程和燃烧装置的设计及研制提供了重要手段。

传热仿真：计算传热学(Computational Heat Transfer，CHT)又称数值传热学(Numerical Heat Transfer，NHT)是指对描写流动与传热问题的控制方程采用数值解法通过计算机予以求解的一门学科。

结构强度仿真：结构强度仿真是应用计算结构力学计算从零件到部件、组件、分系统和整台发动机的结构性能，包括应力、应变、振动频率、寿命、重量、可靠性等。

材料仿真：材料仿真是指通过模拟材料的组成、结构、性能及服役性能，研究材料从纳观、微观、介观到宏观的多个尺度范围内存在的各类现象与特征，从而预测材料的结构和物化性质，为进行材料设计、优化与实践的重要手段。

多学科设计优化仿真：多学科设计优化(Multidisciplinary Design Optimization，MDO)是一种通过探索并利用工程系统中各学科间相互作用的协调机制来设计复杂系统和子系统的方法。

54 仿真

产品结构层次维仿真技术

控制系统仿真： 航空发动机控制系统仿真包括发动机建模仿真和发动机控制系统仿真两项核心技术。

液压机械执行机构仿真： 液压机械执行机构作为控制系统的一个重要组成部分。
* 更多信息请参考3D科学谷与安世亚太联合发布的《3D打印与液压行业白皮书》）

燃烧室仿真

压气机、涡轮等机构仿真

生命周期维仿真技术

设计业务域： 在航空发动机设计中，仿真技术主要用于推进系统、整机、部件和系统的辅助设计和性能分析。

试验业务域： 航空发动机试验仿真能力已实现从常规的稳态和过渡态特性仿真到动态特性(如喘振、旋转失速和进口流场畸变等)仿真的发展。

制造/装配业务域： 目前航空发动机制造工艺全流程仿真技术研究比较成熟，取得了航空发动机零部件/系统级制造工艺流程仿真等软件成果。

维修业务域： 应用于故障的实时预测、性能变化趋势分析和关键件的使用寿命管理，可大大节省维修工时和备件数量，提高经济性和工作可靠性。

参考来源：飞行世界

55 数字孪生体技术

增材制造技术不仅易于将数字资产实体化，提高了各种优化应用的可行性；而且其全数字化的制造过程，也大大丰富了数字孪生体的数据资产，促进数字孪生体价值的发挥。这同时也是信息化（向数字化和智能化的更高阶段）和工业化（增材制造工艺突破）的深度融合，促进产业的服务化转型。

机器学习与物理建模相结合，不仅可帮助企业了解产品过去的性能表现，同时还能预测未来。通过数字孪生体技术非常详细地研究和测试复杂物理现象，将来金属3D打印设备可以作为自己的检查员，工业3D打印还可以整合人工智能和一定程度的自动化，从而进一步推动3D打印设备进入产业化，更深入地进入到最终生产用途的零件制造过程中。在生产所需要的更高速的构建率情况下，3D打印设备实现自我监测，并最终实现自动化的自我纠正/补偿，从而提高质量控制水平。

作为第四次工业革命的通用目的技术和核心技术体系之一，数字孪生体也是仿真技术应用的巅峰。关于数字孪生与产业的结合，请参考安世亚太设立的数字孪生体实验室发布的《数字孪生体技术白皮书2019》。

《数字孪生体技术白皮书（2019）》
是数字孪生体实验室对数字孪生体技术研究的重要成果

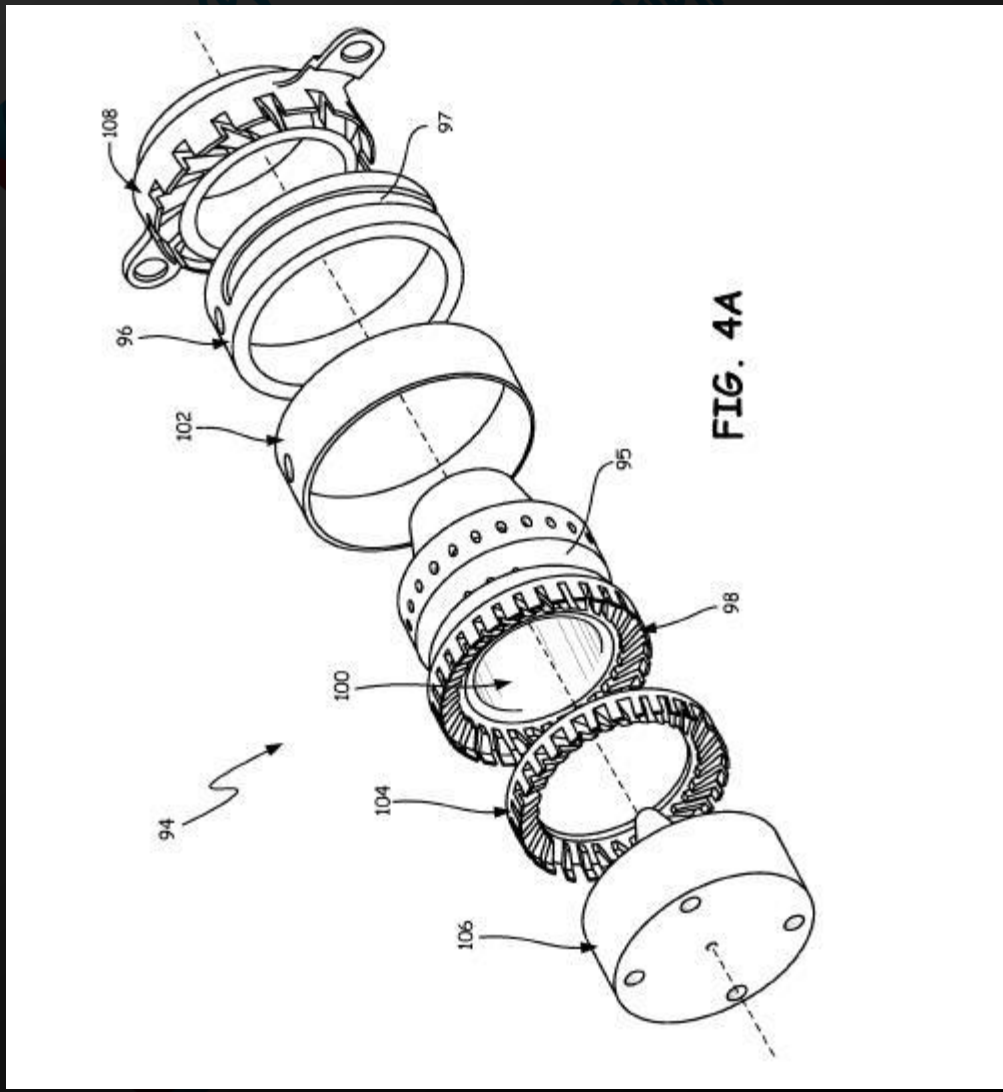
扫码关注数字孪生体实验室公众号
回复公众号：2019白皮书
即可获取共148页的完整版白皮书

专利研究

*注：本章节内容包括飞机发动机与燃气涡轮机交叉领域的应用专利

56 UTC通过3D打印开发带中空壁热屏蔽结构的燃料喷射器

通过基于粉末床的选择性金属熔融3D打印技术，美国联合技术公司可以构建喷射器的主体。将钛或镍基合金之类的粉末金属层层铺叠在粉末床上，并且基于STL文件使用激光来选择性地熔融金属粉末。根据3D科学谷的市场研究，美国联合技术公司每次添加约0.0005英寸（~0.0127mm）至约0.001英寸（~0.0254）厚的层。然后，有必要在部件完成制造之后去除残留在内部空隙或空间内的金属粉末。金属3D打印在制造具有内部空间的燃料喷射器部件过程中发挥了主要作用，而内部空间又通过多个孔或端口连接到部件的外部。为了将残留粉末去除，美国联合技术公司除振动和振动之外，还通过施加压缩或加压的空气来移除粉末材料。



具有中空壁热屏蔽的整体燃料歧管和径向空气旋流器的燃料喷射器中心体的分解图

57 GE通过3D打印改进燃气轮机中的燃料和空气的预混合

根据3D科学谷的市场研究，GE公司通过3D打印技术正在开发一种涡轮转子叶片，叶片的特殊设计包括由凹压侧外壁和凸吸入侧外壁限定的翼型，翼型沿前缘和后缘连接，并且在它们之间形成径向延伸的腔室，用于接收冷却剂的流动。

这种新型涡轮转子叶片的设计目的是提供有效的近壁冷却，采用某些弯曲或起泡或正弦或波浪形的内部肋（“波状肋”），这减轻了经常在涡轮叶片的翼型中发生的不平衡的热应力。这些结构降低了翼型25的内部结构的刚度，从而提供了目标柔性，通过该柔性，应力集中被分散并且应变卸载到能够更好地承受它的其他结构区域。以这种方式，可以避免寿命缩短的应力集中和应变。

注：此内容为燃气轮机应用
参考资料： US10119589B2

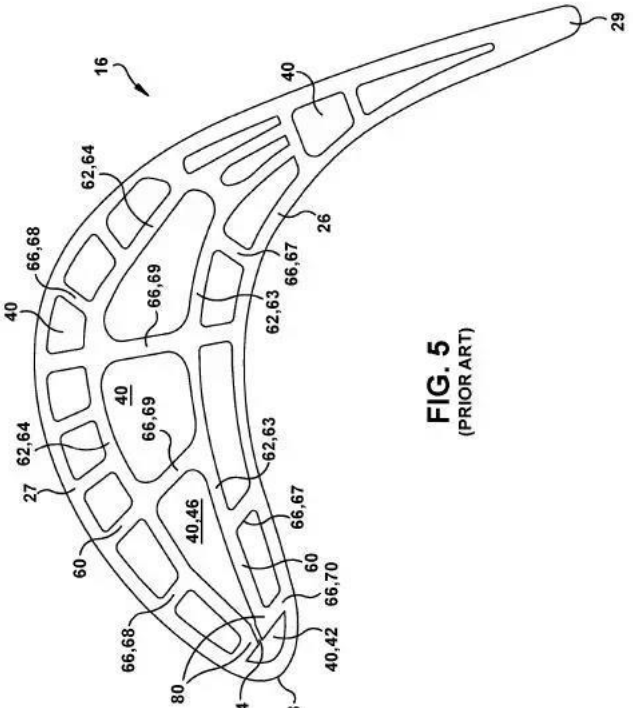


FIG. 5
(PRIOR ART)

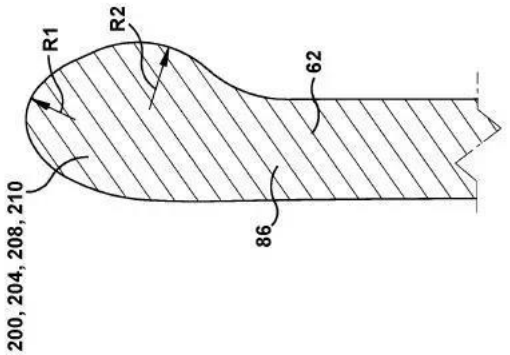


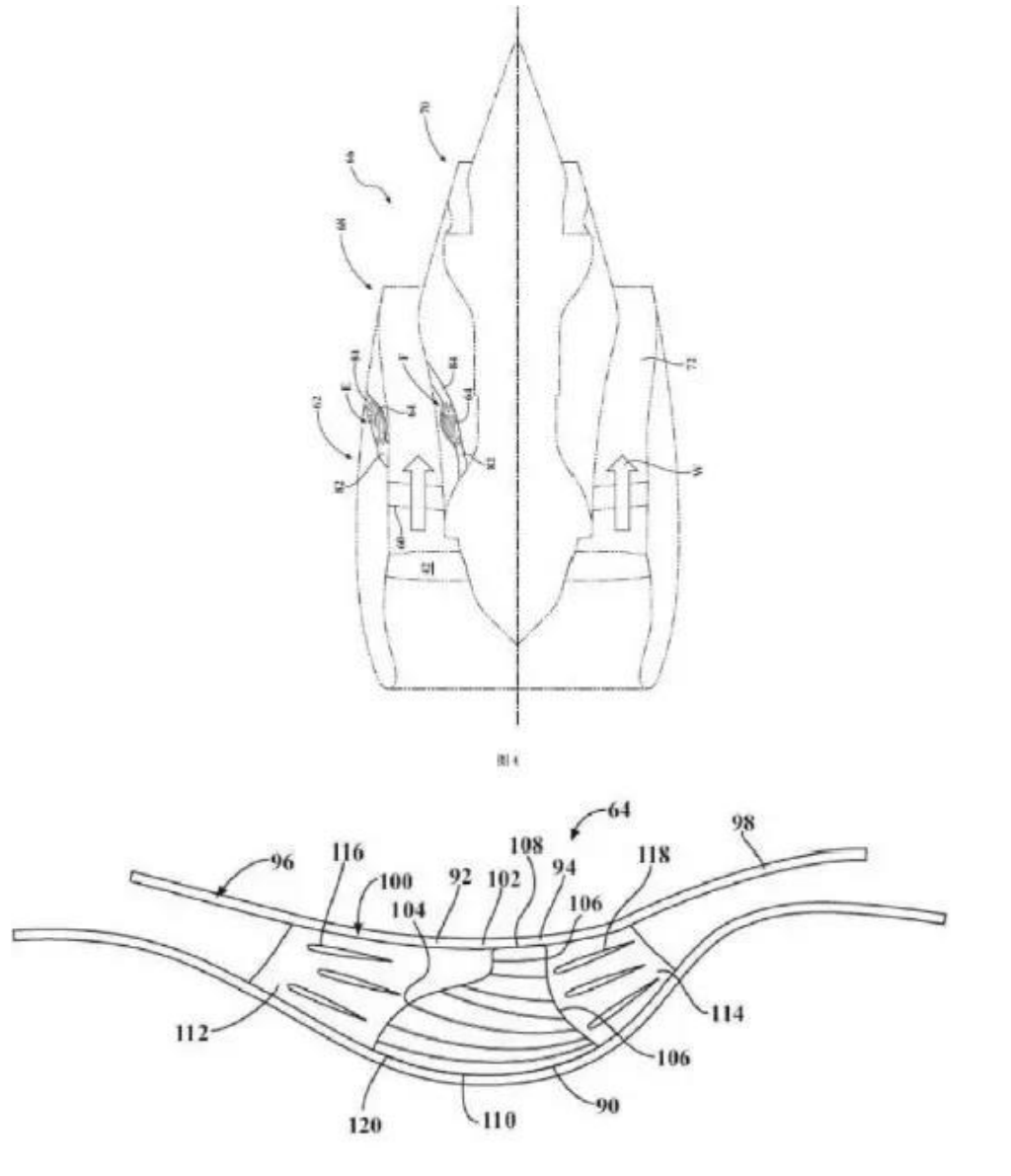
FIG. 14

58 UTC将3D打印用于管道式换热器系统

根据3D科学谷的市场研究，UTC联合技术公司开发出用于燃气涡轮发动机的管道式换热器系统的新型整流罩，其创新之处在于通过3D打印增材制造来完成异形复杂换热器结构的制造。

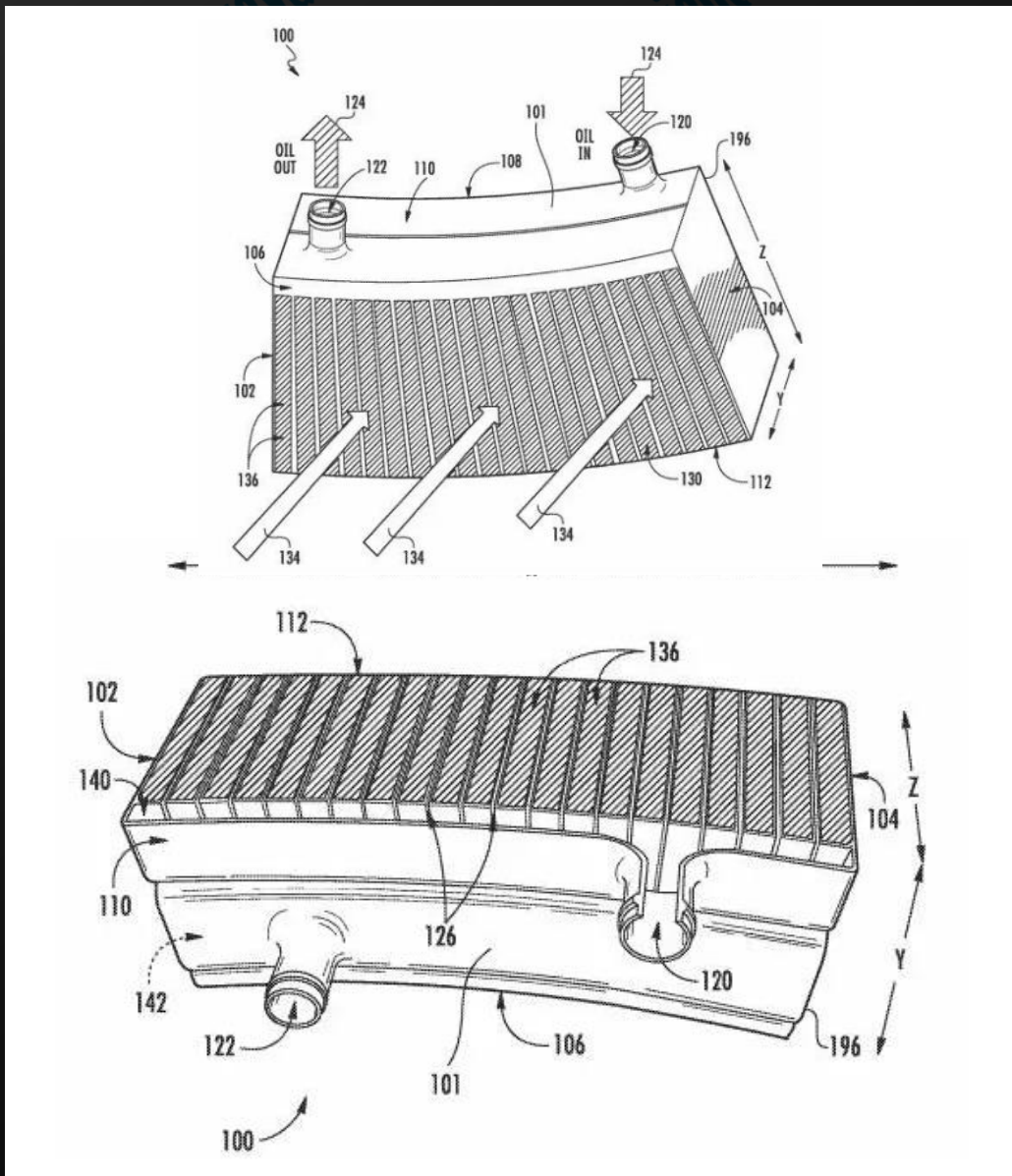
热疲劳通常是限制换热器寿命的主要方面，而3D打印-增材制造换热器具有低循环疲劳的特点。与基于典型波纹和钎焊组装技术需要不同材料的常规制造技术相比较，3D打印技术可以实现更加优化的材料组合，并且不需要焊接过程。UTC联合技术公司基于热传递需求设计了减少造成热疲劳的表面特征并且优化了几何结构，从而更加有效的管理热传递。

在某些案例中，与等同热容量的“砖”状结构设计的换热器相比较，3D打印的波状外形的外部几何结构体积减少约15-20%。结合波状外形的增材制造结构，可以实现理想的空气动力学，而无需像以前那样需要妥协于制造的局限性。



59 GE通过3D打印重新定义热交换器

特定的案例中，用于燃气涡轮发动机的一个特定热交换器包括250个部件，这些部件必须组装成单个不透流体的部件。与这种热交换器的组装相关的制造时间和成本非常高并且流体通道之间或来自热交换器的流体具有泄漏的可能性，这种可能性通常由于形成的接头的数量而增加。另外，传统制造工艺还限制了热交换器中的热交换特征的数量，尺寸和配置。GE通过3D打印重新定义了热交换器。例如，流体通道可以是曲线的，并且可以包括小于0.25mm厚的热交换翅片，并且形成为每厘米多于十二个热交换翅片的翅片密度。另外，热交换翅片可以相对于流体通道的壁成角度，并且相邻的翅片可以相对于彼此偏移。

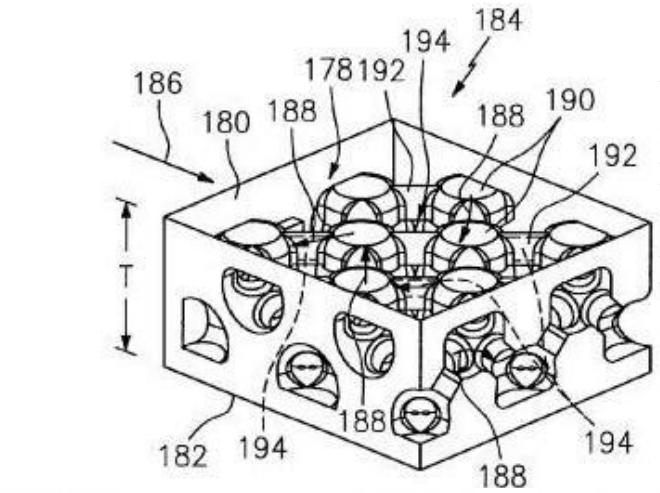


参考来源： US10175003B2

60 UTC联合技术3D打印VESL血管形状结构应用于燃料喷射器系统的冷却

根据3D科学谷的市场研究，UTC联合技术开发了一种新的燃气涡轮发动机的燃烧器区段的冷却燃料喷射器系统。将3D打印应用到复杂的VESL血管结构的制造。燃料喷射器系统部件内部包含了血管工程（VESL）结构，该VESL结构与第一冷却流体的源流体连通。VESL结构是中空血管结构，其中第一冷却流体在VESL结构的一个或多个节点和分支的中空通道内连通。系统还包括第二冷却流体源，第二冷却流体的温度低于靠近燃料喷射器系统的核心气流的温度。VESL结构设置在燃料喷射器系统部件的壁之间，并且VESL结构由空隙围绕，空隙被配置成用于使第二冷却流体围绕VESL结构的节点和分支通过。

参考来源：US10400674B2



VESL结构178通过选区金属激光熔化（DMLS）或电子束融化技术（EDM）增材制造工艺来制造。

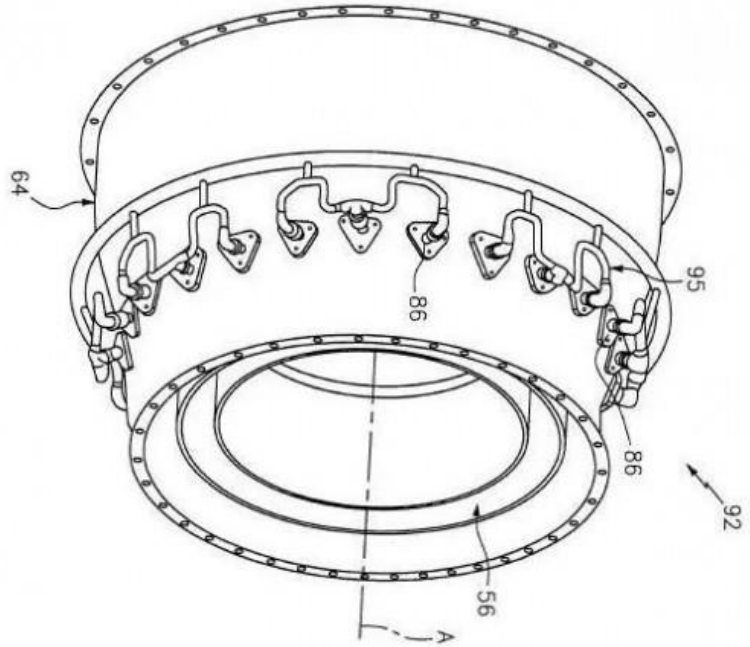


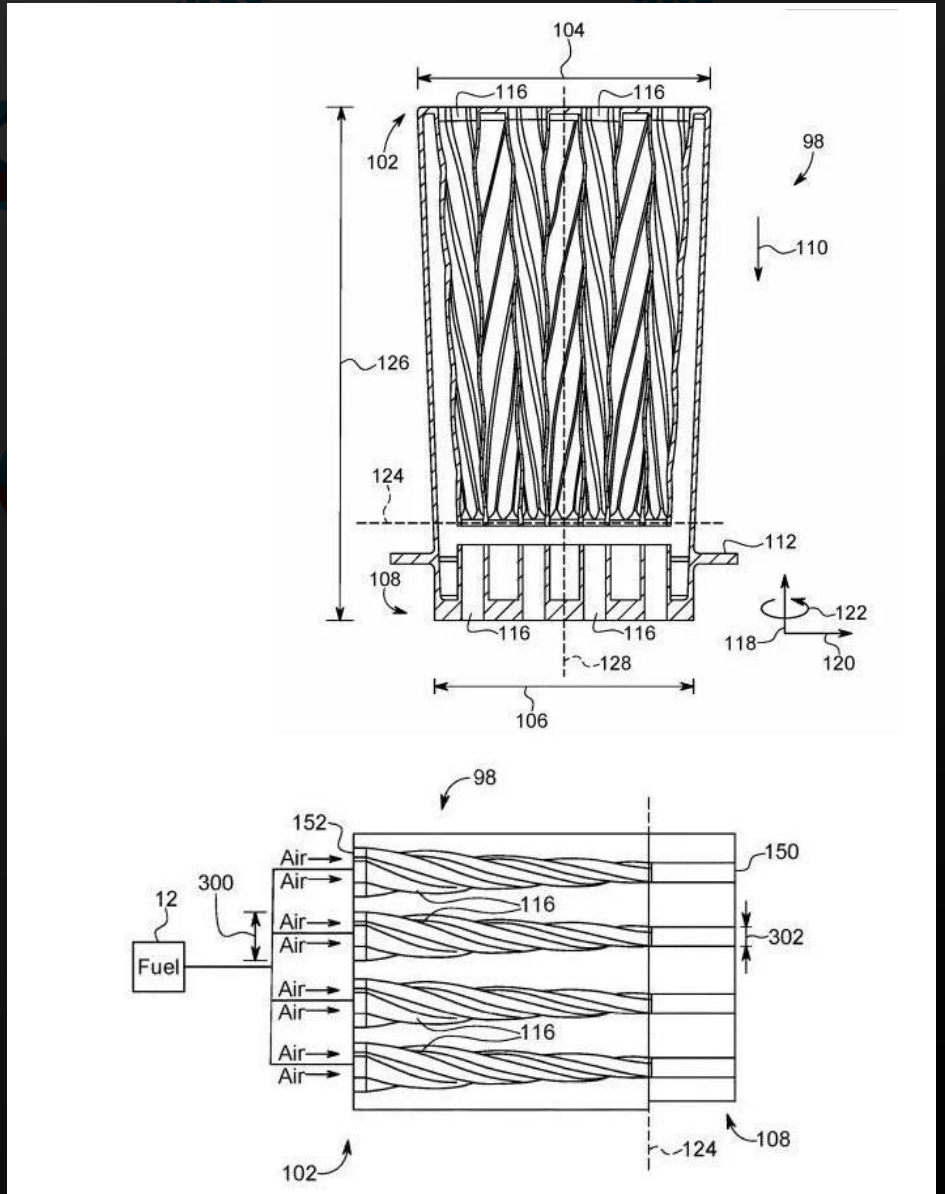
FIG. 3

61 GE通过3D打印改进燃气轮机中的燃料和空气的预混合

通过使压缩空气和燃料通过预混合器，预混合器制造涡旋运动，离开预混合器的燃料 – 空气混合物可以更彻底地混合。预混合器可包括多个流体流动路径，其中每个流动路径具有叶状横截面，横截面沿着流动路径的长度扭转，在流过流动路径的流体中引起涡旋运动，从而更彻底地混合燃料和压缩空气。而流动路径的横截面的尺寸可沿着流动路径的长度收缩，从而产生锥形流动路径。

3D打印技术使得制造复杂形状的预混合器成为现实，预混合器带来的旋涡运动有助于使液体燃料与空气雾化和混合，使得除了气体燃料之外还能够使用液体燃料。并且可以产生喷射稳定的火焰，带来较低的动态性和较高的火焰稳定裕度，而高出口速度可用于减少或消除火焰回火风险。

注：此内容为燃气轮机应用
参考资料： US10415833B2



62 UTC联合技术通过3D打印助力多种材料的燃气涡轮发动机转子开发

UTC开发的用于燃气涡轮发动机的转子的转子盘由一种材料制成，而叶片是由另外一种材料制成的。如图HPC转子60可以是混合双合金整体叶片转子（IBR），其中叶片64由一种类型的材料制成，转子盘66由不同的材料制成。双金属结构提供了分别满足不同温度要求的材料能力。叶片64可以由单晶镍合金制成，转子盘66由不同的材料制成，例如挤压的坯料镍合金。而叶片64通过线性摩擦焊接连接或通过增材制造技术连接到转子盘66上。此外，叶片可以经受第一类热处理而转子盘66经受不同的热处理。通过3D打印过程将两种材料分散熔合在一起，两种材料内部晶粒产生粘结，使得任何硬质过渡都被消除，从而零件不会在巨大的压力和温度梯度变化下发生断裂情况。这为不同材料制成的组件提供了很高的接头强度。

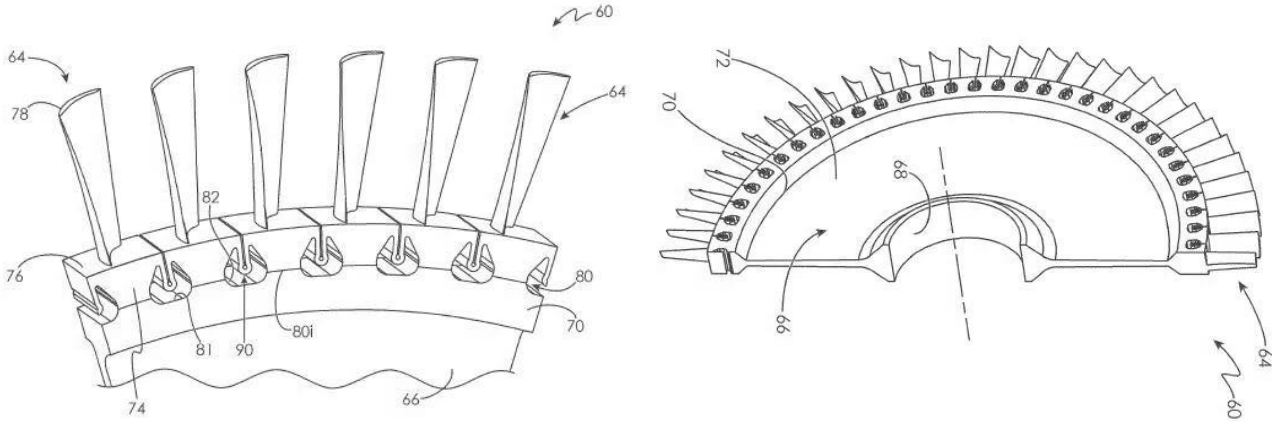


Fig. 4

参考资料：US10082034B2

63 带有点阵结构冷却方案的涡轮发动机部件

UTC联合技术正在将3D打印技术应用于燃气涡轮发动机部件的冷却方案，包括在燃气涡轮发动机部件的壁内部的点阵结构。通过点阵结构为燃气涡轮发动机部件提供有效的局部对流冷却，使得部件可以经受通过核心流动路径的热燃烧气体的高温。UTC联合技术所设计的点阵结构可以适应于任何给定的燃气涡轮发动机部件或部件的某个部分的特定冷却需求。换句话说，通过改变点阵结构（图中编号80）的设计和密度，可以调整以匹配外部热负荷和局部寿命要求。对于任何给定的点阵结构来说，实际设计可取决于部件的几何形状。还需要考虑各种要求，包括压力损失、局部冷却流量、冷却空气热量吸收、热效率、总体冷却效率、空气动力学混合和可生产性考虑，并且还需要考虑燃气涡轮发动机的特定参数。点阵结构（图中编号80）可以通过诸如粉末床金属熔融的增材制造工艺来生产，当然还可以通过电子束熔化（EBM）工艺来生产。

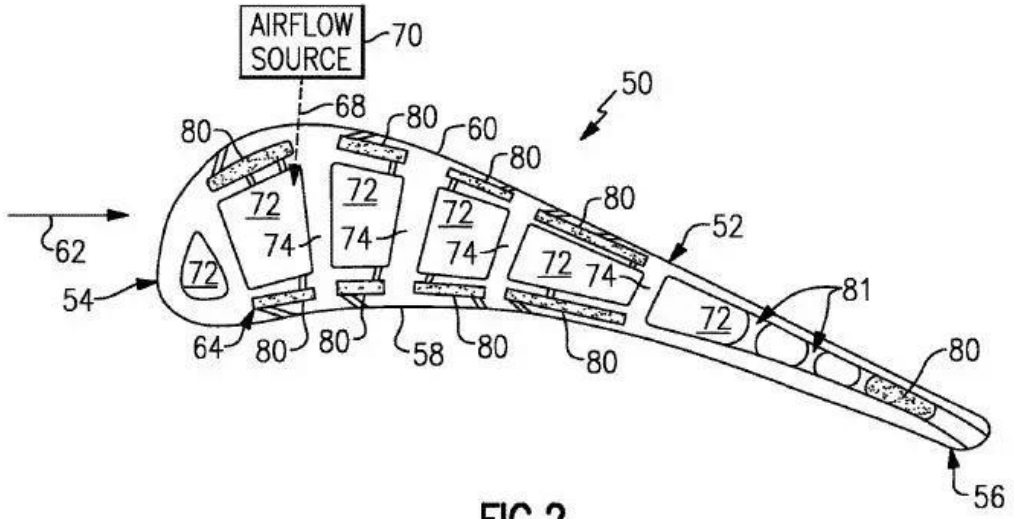


FIG.2

64 集成热交换器的齿轮箱

GE开发的集成热交换器的一体化齿轮箱不仅可以将齿轮箱和热交换器以整体结构制造出来，而且还可以实现非常薄的壁厚，至少一个热交换壁具有小于4毫米的厚度。这种设计理念可以类似地应用于各种变速箱，例如传动齿轮箱，动力齿轮箱，减速齿轮箱，或涡轮风扇的其他部件。可以应用到汽车、航空、海事等领域。

通过3D打印工艺，可以形成特定的表面光洁度和通道尺寸以改善通过通道的流体流动，改善通道内的热传递等。可以通过增加激光扫描速度或粉末层的厚度来实现更粗糙的光洁度，并且可以通过降低激光扫描速度或粉末层的厚度来实现更光滑的光洁度。还可以改变扫描路径或激光功率来改变特定区域的表面光洁度。

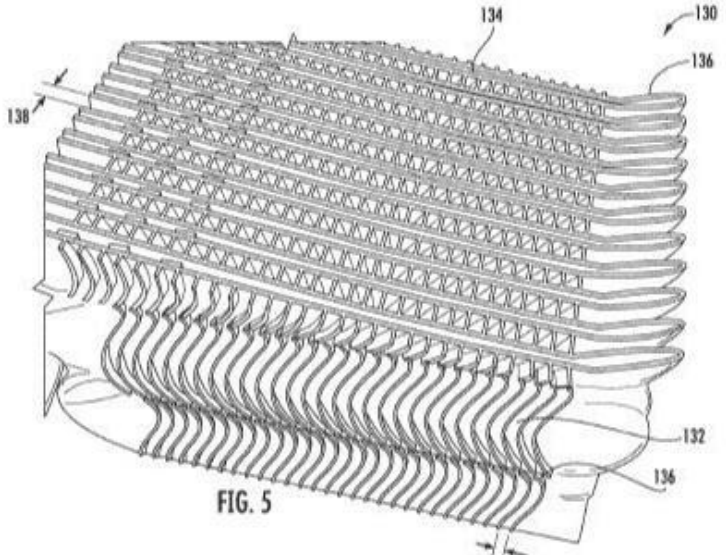


FIG. 5

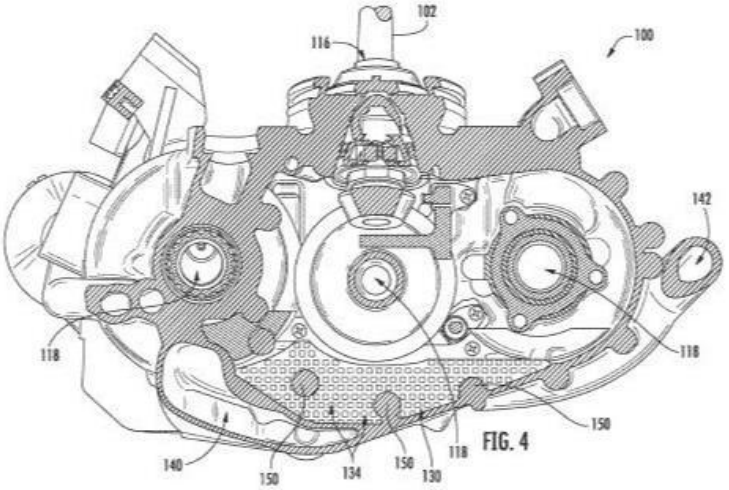
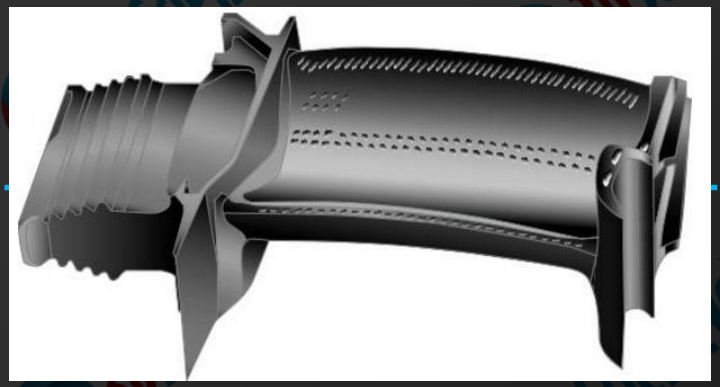


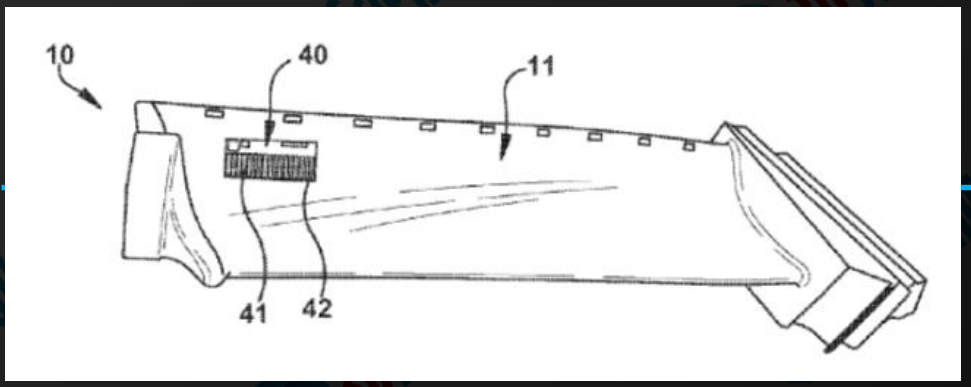
FIG. 4

图片来源： GE专利US 10247296 B2

65

叶片-3D打印电子应用 GE





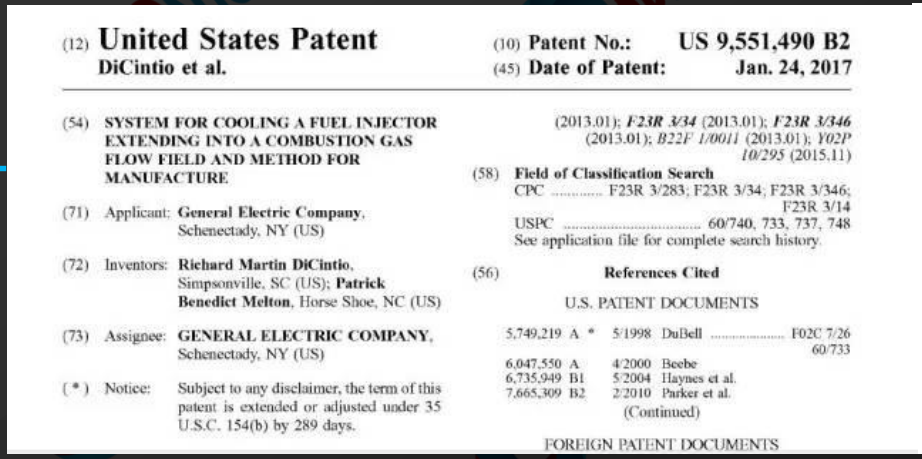
GE制造涡轮机部件上应变传感器的专利已获得批准。该专利技术包括涡轮部件的外部表面规划，和如何将陶瓷材料沉积到外部表面指定的位置上。应变传感器的陶瓷粉体通过自动化的3D打印增材制造工艺沉积到叶片表面上，陶瓷材料可以包括热障涂层如氧化钇及稳定的氧化锆。而一些特殊的涡轮部件位置上则不需要热障涂层。

完成应变传感器的制造则需要不同设备之间的配合，包括气溶胶喷射机（例如，Optomec的Aerosol Jet 3D打印机和透镜系统）、微喷机（如Ohcraft或nScrypt公司的微笔或3Dn），以及 MesoScribe Technologies技术公司的等离子喷涂设备MesoPlasma。

在GE公开专利之前，斯旺西大学的研究人员已通过Optomec气溶胶喷射技术直接打印应变和光学蠕变传感器，用在喷气发动机的压缩机叶片表面上。使用激光检测系统和光学测量的传感器，研究人员能够确定一个组件的蠕变程度在10纳米以内。

66

3D打印燃料喷射器和冷却系统专利
GE



(12) **United States Patent**
DiCintio et al.

(10) **Patent No.: US 9,551,490 B2**
(45) **Date of Patent: Jan. 24, 2017**

(54) **SYSTEM FOR COOLING A FUEL INJECTOR EXTENDING INTO A COMBUSTION GAS FLOW FIELD AND METHOD FOR MANUFACTURE**

(71) Applicant: **General Electric Company**, Schenectady, NY (US)

(72) Inventors: **Richard Martin DiCintio**, Simpsonville, SC (US); **Patrick Benedict Melton**, Horse Shoe, NC (US)

(73) Assignee: **GENERAL ELECTRIC COMPANY**, Schenectady, NY (US)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 289 days.

(2013.01); *F23R 3/34* (2013.01); *F23R 3/346* (2013.01); *B22F 1/0011* (2013.01); *Y02P 10/295* (2015.11)

(58) **Field of Classification Search**
CPC F23R 3/283; F23R 3/34; F23R 3/346; F23R 3/14
USPC 60/740, 733, 737, 748
See application file for complete search history.

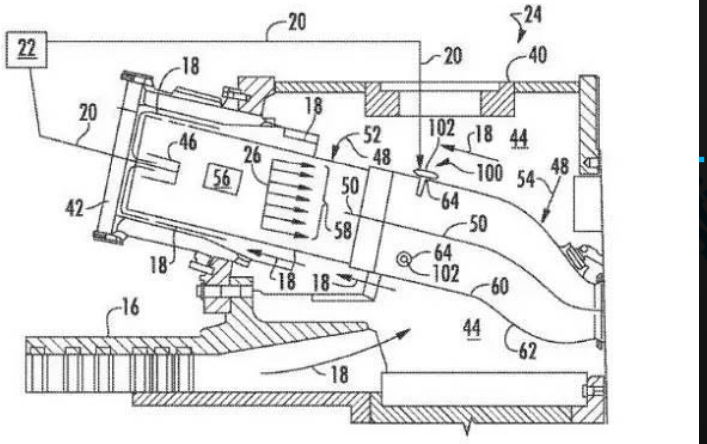
(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

5,749,219	A *	5/1998	DuBell	F02C 7/26 60/733
6,047,550	A	4/2000	Beebe	
6,735,949	B1	5/2004	Haynes et al.	
7,665,309	B2	2/2010	Parker et al.	

(Continued)

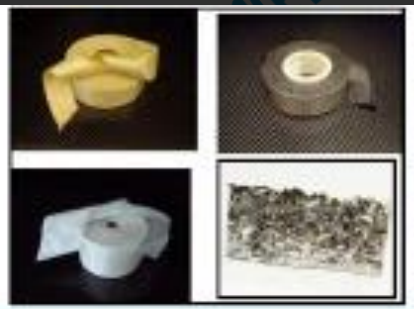
FOREIGN PATENT DOCUMENTS



通过3D打印技术，GE改进了用于将燃料喷射器延伸到燃烧气体流场中的冷却系统。

GE获批的专利还包括用于冷却延伸到燃烧气体流场的燃料喷射器的系统。根据3D科学谷的市场研究，该系统包括通过燃烧室限定燃烧气流路径的衬里、通过衬里延伸的燃料喷射器开口和燃料喷射器。通过激光融化技术，每层的尺寸在0.0005英寸到大约0.001英寸之间。GE在该专利中所使用的是（但不限于）EOSINT™ M 270，以及PHENIX PM250, 或者EOSINT™ M 250 。根据3D科学谷的市场研究，GE所采用的金属粉粉末成分中含有钴铬，例如（但不限于）HS1888和INCO625。金属粉末的粒径大约在10微米到74微米之间，最好是在大约15微米和大约30微米之间。

供应链



Raw Material Suppliers 材料

- Hexcel
- Alcoa
- Hadco
- RMI Titanium
- VSMPO
- ASM
- Allegheny Technologies
- Compos Flex, Inc.
- Others

Aero engine Component (Tier I & II) Suppliers 发动机零件

- Precision Castparts
- Alcoa Howmet
- Blades Technology Intl.
- Carmel Forge
- Aerospace Industrial Development Corp.
- Xian Aero Engine
- Turbocam International
- Twigg Corporation
- Barnes Aero
- SIFCO Industries
- Avio S.p.A.
- IHI
- KHI
- MHI
- Volvo Aero
- Others

Engine Manufacturer 发动机

- Rolls Royce
- Pratt & Whitney
- General Electric
- CFM International
- IAE
- Engine Alliance
- Others

Customers 用户

- Delta Airlines
- American Airlines
- China Southern Airlines
- Air China
- United Airlines
- Boeing
- Airbus
- Others

68 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

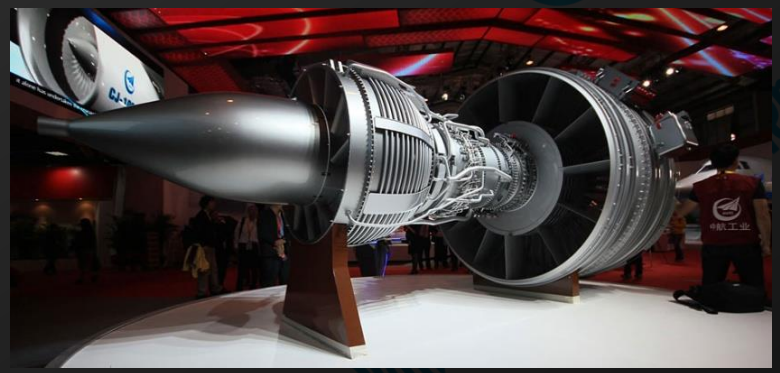
哈飞集团
运12
小型涡浆式多用途运输飞机
PT6A-27发动机
发动机制造商：普惠加拿大

69 中国发动机-长江系列

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惟一国产动力。

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。

70 材料发展趋势

金属材料

钛：以Metalysis为代表的专有技术有望将目前钛粉制造成本降低到3%的水平。

不锈钢：以GKN增材制造材料为代表，开发了一系列用于增材制造的低合金钢粉末；瑞典VBN Components 推出3D打印用耐磨钢材料；Fraunhofer ILT研究所开发了新型不锈钢合金避免裂缝和缺陷

铜合金：国际上NASA等企业3D打印铜合金推力室部件通过热火试验；日本岛津的BLUE IMPACT 蓝光冲击二极管激光器商业化；日本DaiHen开发了强度是目前两倍的3D打印用铜合金粉末。所有的因素有望催生3D打印在电动汽车（例如电动车的电机定子），散热器，电感应器的应用

铝合金：HRL，苏州倍丰，Aeromet International纷纷开发出价格更低，更强的铝合金，有望替代锻造铝合金。结合3D打印所释放的设计自由度，高强度铝合金将在包括压力容器、液压歧管、托架、高强度结构件领域开始颠覆产品制造方式。

塑料及复合材料

- DSM通过与e-Xstream Engineering的合作，设计和预测所需性能的可靠零件

-英格索尔推出龙门型热塑材料增材制造设备MasterPrint,结合五轴加工，可以快速、可靠、低成本的加工航空航天零件

- 惠普设备开始被用来制造牙科矫正器的模型

71 中国航空发动机集团

"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。

中国航空发动机集团
AERO ENGINE CORPORATION OF CHINA

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用飞机、直升机和大型舰艇、大型发电机组上。

72 金属材料

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...

73 中国上游高温合金生产企业

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

北京航材院
铸造高温合金母合金锭的研究与制造

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

宝钢特钢
变形高温合金及其盘锻件

74 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

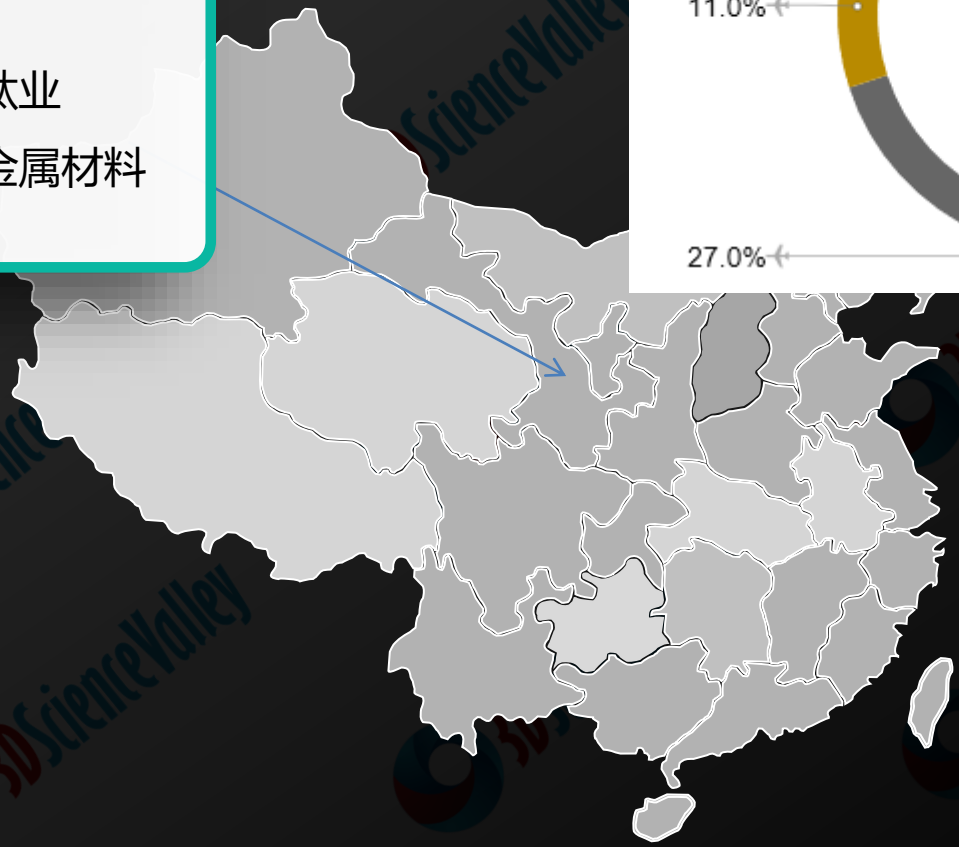
-西部超导材料科技

-西部材料

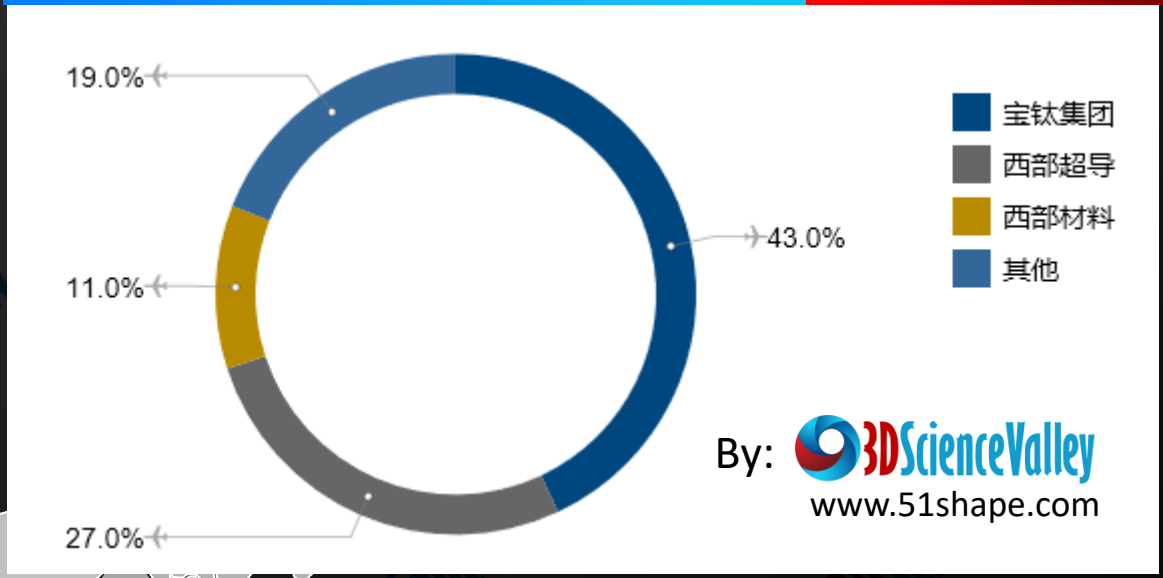
-咸阳天成钛业

-西安赛特金属材料

.....



中国钛合金市场份额



By: 3DScienceValley
www.51shape.com

来源：《钛工业进展》

特别感谢对本白皮书制作的赞助支持：

SLM SOLUTIONS

斯棱曼官方网站

+GF+

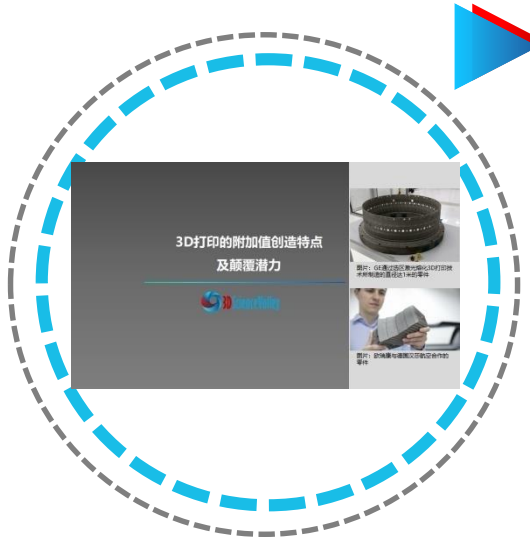
GF加工方案官方网站

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。

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
机工讲堂微课视频链接

3D科学谷微信公众号

3D科学谷系列白皮书
微信版本

3D科学谷系列白皮书
Pdf版本formnext网站下载

3D科学谷系列白皮书
3D科学谷QQ群下载