

# 铝金属3D打印白皮书1.0

Whitepaper of Copper 3D Printing



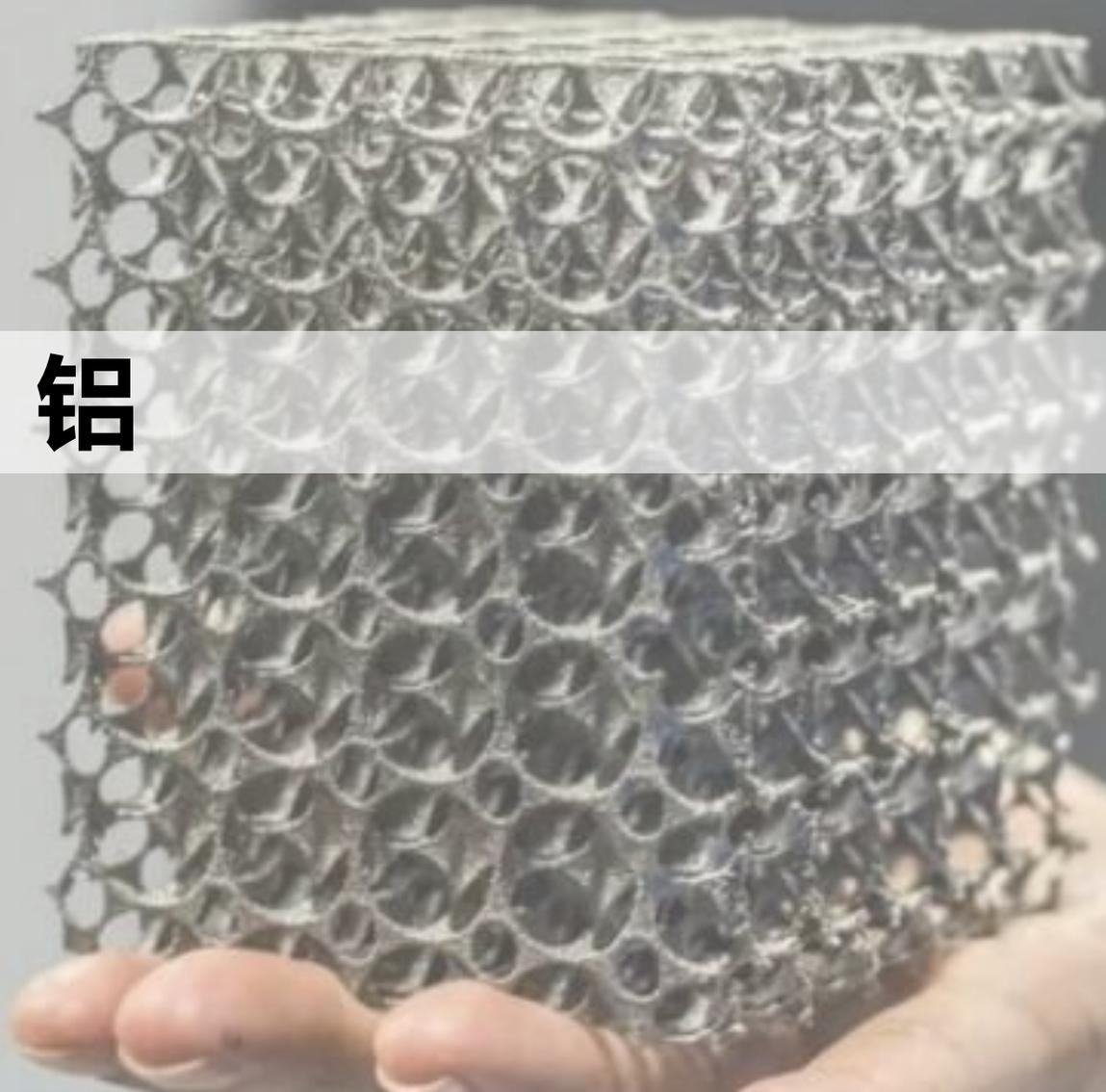
随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号: [cn\\_3dsciencevalley](https://www.cn_3dsciencevalley.com)

# 3D科学谷核心竞争力-整合力量与影响力

## Core Strength – Integrative the Power and Influence



铝

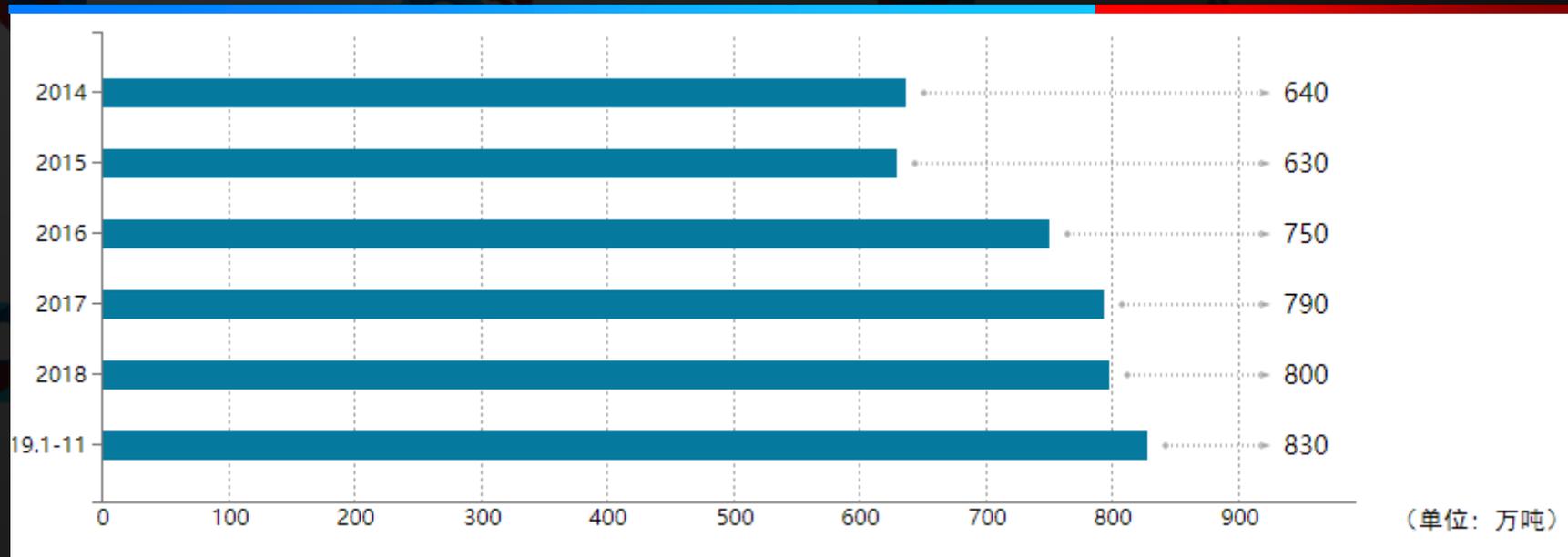


# 1 铝矿

铝元素在地壳中的含量仅次于氧和硅，居第三位，是地壳中含量最丰富的金属元素，航空、汽车、建筑的发展，推动了铝产业的发展。

铝的密度大约是钢的  $1/3$ ，是应用最为广泛的轻质材料。铝合金和钢铁材料相比，具有热导率高、耐腐蚀好、加工性能优良等优点，虽然强度不如高强钢，但是通过技术改进，完全可以使其满足汽车轻量化对强度的要求。

### 2014-2019年11月我国铝合金产量（万吨）



**铝合金企业**

佛山市南海中南铝车轮制造  
哈尔滨东方铝合金  
广东大明铝合金型材  
无锡红豆轻合金车轮  
三门峡天元铝业  
广东鸿图科技  
上海胜华电缆

**汽车铝合金零配件企业**

西南铝业  
丛林集团  
广东鸿图科技  
广东鸿特精密技术  
宁波拓普集团

**铝合金铸造**

河北欧瑞特铝合金有限公司  
苏州明志铸造有限公司  
沈阳铸造研究所  
浙江盛大汽摩部件工业有限公司  
重庆渝江压铸有限公司  
上海伊宏有色金属铸造有限公司

### 3 铝基中间合金重点生产企业

铝基中间合金是指铝钛硼合金、铝钛碳合金或铝钛合金中数以亿计的，尺寸不同、形状各异、形核能力不同及潜能不同的硼化钛颗粒团或碳化钛颗粒团以及铝钛化合物。这种晶核颗粒团一般以铝为载体，表现为铝钛硼合金、铝钛碳合金或铝钛合金的形式。

铝基中间合金中应用最广的为铝钛硼晶粒细化剂。根据数据，2010年至今，国内市场铝晶粒细化剂需求量年复合增长率约为7.82%，2021年有望达到11.26万吨。目前，国内市场年均铝晶粒细化剂需求量占全球的45-50%左右。因此，2019-2021年全球铝晶粒细化剂需求量预计为21.78、23.38、25.02万吨。按照平均20,000元/吨的市场销售价格，全球铝晶粒细化剂未来三年对应的市场空间分别为43.56、46.76、50.04亿元。

#### 全球铝晶粒细化剂市场规模预测 (万吨)



#### 国内铝基晶粒细化剂需求量 (万吨)



参考来源：产业信息

## 4 铝基中间合金重点生产企业

国内生产铝基中间合金的龙头企业主要有三家，分别是四通新材、云海金属、深圳新星，均为上市公司。从产能排名来看，四通新材目前拥有已建成产能69,000吨为三家之首。云海金属虽然拥有合计18万吨的总产能，但铝基中间合金板块的产能仅1.5万吨。从三家公司2018年产量占比全球需求量来看，三家产量合计占比全球需求量的52.76%、占比国内需求量的95.93%。

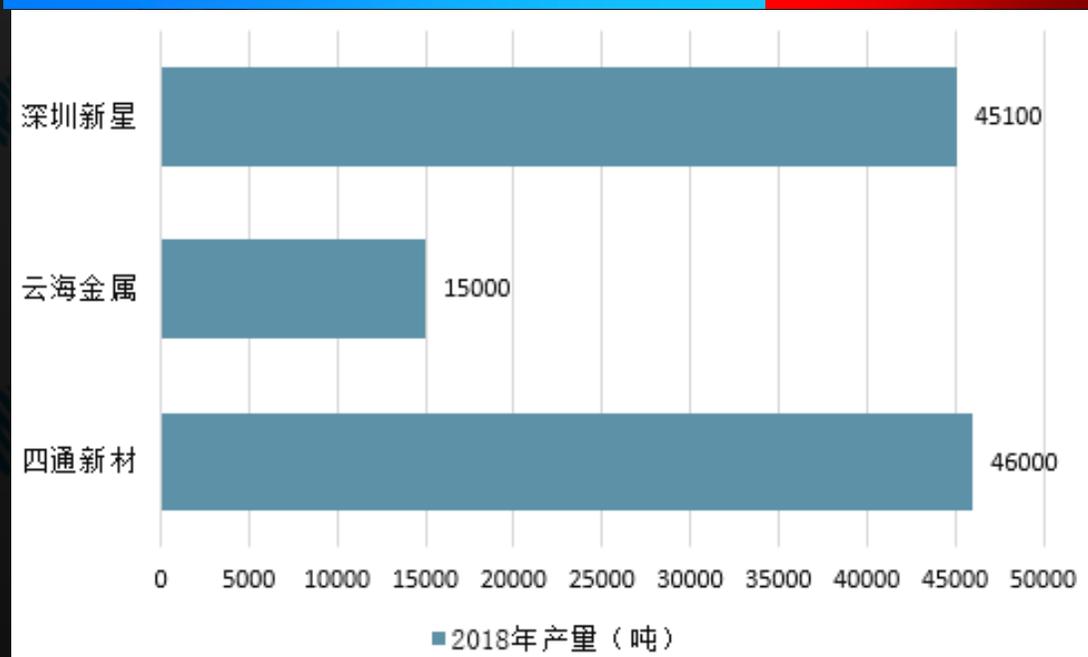
国内

深圳市新星轻合金材料  
江西永特合金  
南京云海金属  
湖南金联星特种材料  
河北四通新型金属材料

国外

AMG Aluminium  
LSM  
KBM

铝基中间合金行业主要企业2018年产量 (吨)



目前全球的铝合金结构件的生产消费主要集中在美国、日本、中国、德国、意大利等国家和地区，近年来汽车铝合金使用量增长迅速，市场渗透率不断增大。精密铝合金结构件在汽车零部件领域主要应用于冷却系统、减振系统、微型电机、动力系统等。基于铝合金材料在汽车轻量化推进过程中的重要角色，其在汽车中的应用范围也越来越广，应用范围已经从最初的发动机缸体、变速箱壳体、轮毂等扩展到了车体的各个重要零部件中。由于使用铝合金型材是在不减少汽车容积的情况下减轻汽车自重，因而使汽车更稳定，在受到冲击时铝合金型材结构能吸收更多的能量，更安全和舒适。

### 精密铝合金结构制造企业举例

苏州春兴精工  
广东鸿图科技  
广东鸿特精密技术  
长春一汽联合压铸  
思德泰克（苏州）电子

全球压铸件制造中心向中国转移，我国精密压铸件企业主要分布在广东、江苏、浙江、重庆等地，规模大、专业化的企业大部分集中在珠江三角洲和长江三角洲地区。铝合金材料具有轻质、可回收和易成型的特点，因此被广泛运用于汽车的车身及零部件上。理论上铝制汽车可以比钢制汽车减轻重量达30%-40%，其中铝质发动机可减重30%，铝散热器比铜的轻20%-40%，全铝车身比钢材减重40%以上，汽车铝轮毂可减重30%。因此，铝合金材料是汽车轻化的理想材质。

国内汽车压铸件生产规模较大的企业主要有两类，一类是汽车领域企业的配套企业，从属于下游行业的集团公司；另一类是独立的汽车精密压铸件生产企业，专门从事汽车精密压铸件的生产。

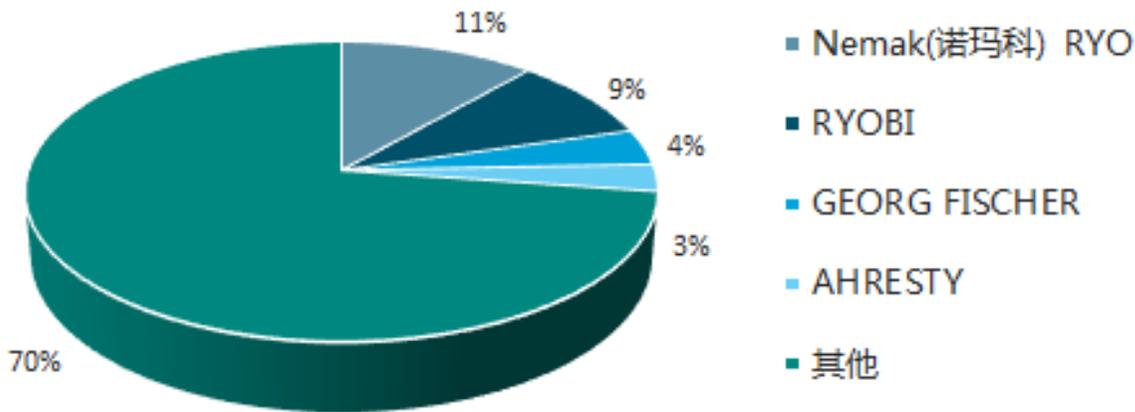
### 采用铝合金进行汽车轻量化的成本相对较低

采用铝合金进行汽车轻量化的成本相对较低						
材料	减重效果	最大减重幅度 (kg)	原材料参考价格 (kg/元)	100kg减重材料成本 (元)	100kg减重节省油成本	100kg减重节省锂电池成本
普通钢	—	—	4.2	—	—	—
高钢强度	0.2	200	6	900	441	885
铝合金	0.45	450	40	796		
镁合金	0.55	500	100	1742		
碳纤维	0.7	700	120	1654		

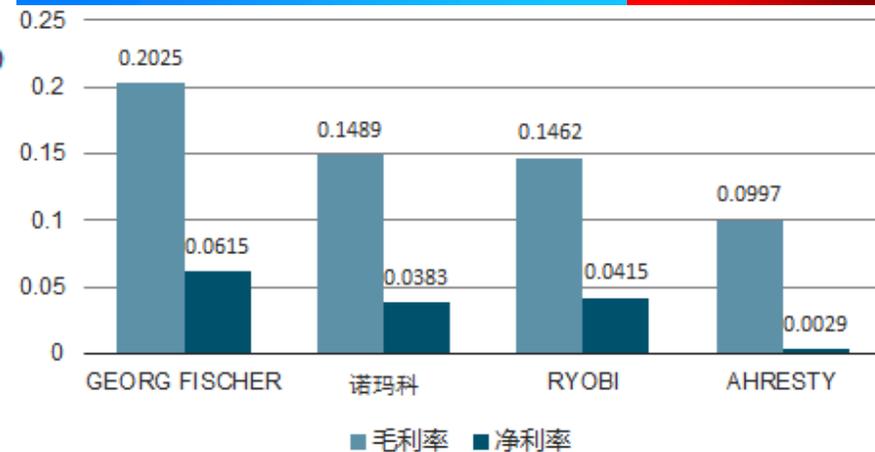
## 7 铝合金压铸

全球领先铝合金压铸企业主要集中在欧美日等汽车发达工业国家。国际上规模领先的企业包括有：墨西哥NEMAK，日本RYOBI，AHRESTY，瑞士GEORGFISHER，DSG，德国PIERBURG等公司。2018年NEMAK销售收入折合人民币314亿元，RYOBI销售收入折合人民币248亿元，GEORGFISHER压铸业务销售收入折合人民币106亿元，AHRESTY销售收入折合人民币80亿元。

### 2018年铝合金压铸市场全球占比测算



### 2018年国外同行毛利率与净利率



### 铝材料与压铸

全球铝合金压铸市场集中度较高，龙头企业的市场份额高于中国市场。2018年全球汽车用铝合金市场规模约2850亿人民币。NEMAK、RYOBI、GEORGFISHER、AHRESTY四家企业的市场份额分别为11.04%、8.71%、3.72%、2.81%。

### 铝压铸与汽车

2018年广东鸿图、爱柯迪、文灿股份、派生科技、旭升股份五家企业的营业收入分别为35.44亿元、25.07亿元、16.20亿元、14.75亿元、10.96亿元。2018年中国汽车用铝合金压铸市场规模约840亿人民币。广东鸿图、爱柯迪、文灿股份、派生科技、旭升股份五家企业的市场份额分别为4.21%、2.98%、1.93%、1.75%、1.30%。

### 全球汽车铝制压铸件市场容量测算

全球汽车铝制压铸件市场容量测算							
全球	2015	2016	2017	2018	2019	2020E	2021E
新车销量(万辆)	9505.59	9505.59	9505.59	9505.59	9505.59	9505.59	9505.59
单车铝用量(kg/辆)	120	130	140	150	160	170	180
总铝用量(万吨)	1140.67	1235.73	1330.78	1425.84	1520.89	1615.95	1711.01
铝合金产品单价(元/吨)	40000	40000	40000	40000	40000	40000	40000
汽车用铝合金市场容量(亿元)	4562.68	4942.91	5323.13	5703.36	6083.58	6463.8	6844.03
铝制压铸件占比	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
铝制压铸件市场容量(亿元)	2281.34	2471.45	2661.57	2851.68	3041.79	3231.9	3422.01

### 全球铝合金汽车板生产企业

美国铝业Alcoa  
Constellium  
Norsk Hydro  
Aleris  
Novelis  
Kobe Steel  
Furukawa-sky  
Sumitomo Light metal

### 中国铝合金汽车板生产企业

潍坊三源铝业  
东北轻合金  
西南铝业  
徐州财发铝热传输  
江苏常铝铝业

## 10 铝合金车轮

## 汽车铝轮毂优点：

与钢质汽车轮毂相比，铝轮毂的优点比较明显，包括密度小，约为钢的三分之一，这意味着采用相同提及的铝轮毂将比钢质轮毂轻2/3。统计表明，汽车整车质量减少10%，燃油效率可以提升6%~8%，因而推广铝轮毂对于节能减排、低碳生活具有重要意义。并且铝合金的热导率高，而钢的导热率低，因此同等条件下，铝轮毂的散热性能优于钢质轮毂。

将铝合金轮毂市场分为整车市场（OEM市场）和零售市场（AM）市场，按照铝合金轮毂装车率70%、每辆整车配备5只轮毂、AM市场轮毂更新率2%进行计算，2019-2021年国内铝合金轮毂需求量分别为1.11、1.14、1.16亿只。

## 中国铝合金轮毂需求量



## 11 铝合金车轮

### 铝合金车轮

中信戴卡  
万丰奥威  
立中股份  
昆山六丰  
江苏万阳轮毂  
台山富诚铝业

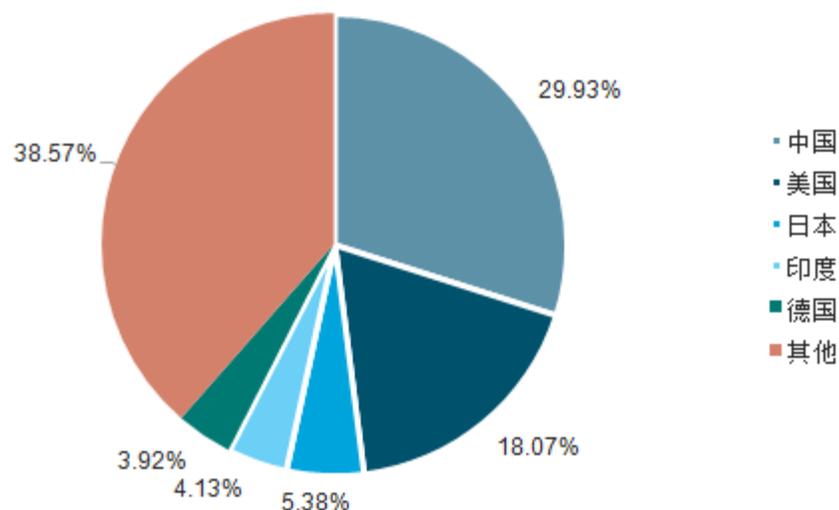
常州三昊  
浙江戴卡宏鑫  
北京金利通世  
台州路桥欧得发车轮  
开平市中铝实业

随着国内汽车铝轮毂行业的崛起，中国逐渐成长为全球汽车铝轮毂制造中心，本土企业在满足国内市场需求的同时，也开始加大对国际市场的布局，出口量及出口金额小幅增长。根据数据，2018年，中国汽车铝轮毂共计出口到173个国家和地区，出口金额约47亿美元。

### 2013-2018年中国汽车铝轮毂出口情况 (万吨, 亿美元)



### 2018全球铝合金轮毂供给结构



换热器与散热器对设备可以长效稳定运行起到了关键的作用，3D打印用于换热器和散热器的制造满足了产品趋向紧凑型、高效性、模块化、多材料的发展趋势。特别是用于异形、结构一体化、薄壁、薄型翅片、微通道、十分复杂的形状、点阵结构等加工，3D打印具有传统制造技术不具备的优势。

3D科学谷对国内外的3D打印热交换器、散热器的应用发展情况进行了跟踪研究，并发布《3D打印与换热器及散热器应用2.0》白皮书第二版。

**国内主要汽车钎焊铝合金散热器企业**

- 江苏超力散热器有限公司
- 山东同创汽车散热装置有限公司
- 青岛汽车散热器有限公司
- 贵航股份永红散热器
- 山东厚丰
- 上海贝洱热系统有限公司



3DScienceValley.com  
3D科学谷  
白皮书系列  
-Whitepaper-

白皮书赞助方：  
Sponsors:  铂力特  H3D 汉邦科技

\* **3D打印与换热器及散热器应用2.0**

合作单位：  
CHINA SAE 中国汽车工程学会 China Society of Automotive Engineers  安世亚太 PERA GLOBAL



pdf下载请加入3D科学谷QQ群：529965687

随时查看请关注“3D科学谷”微信公众号：www\_51shape\_com

# 铝的3D打印

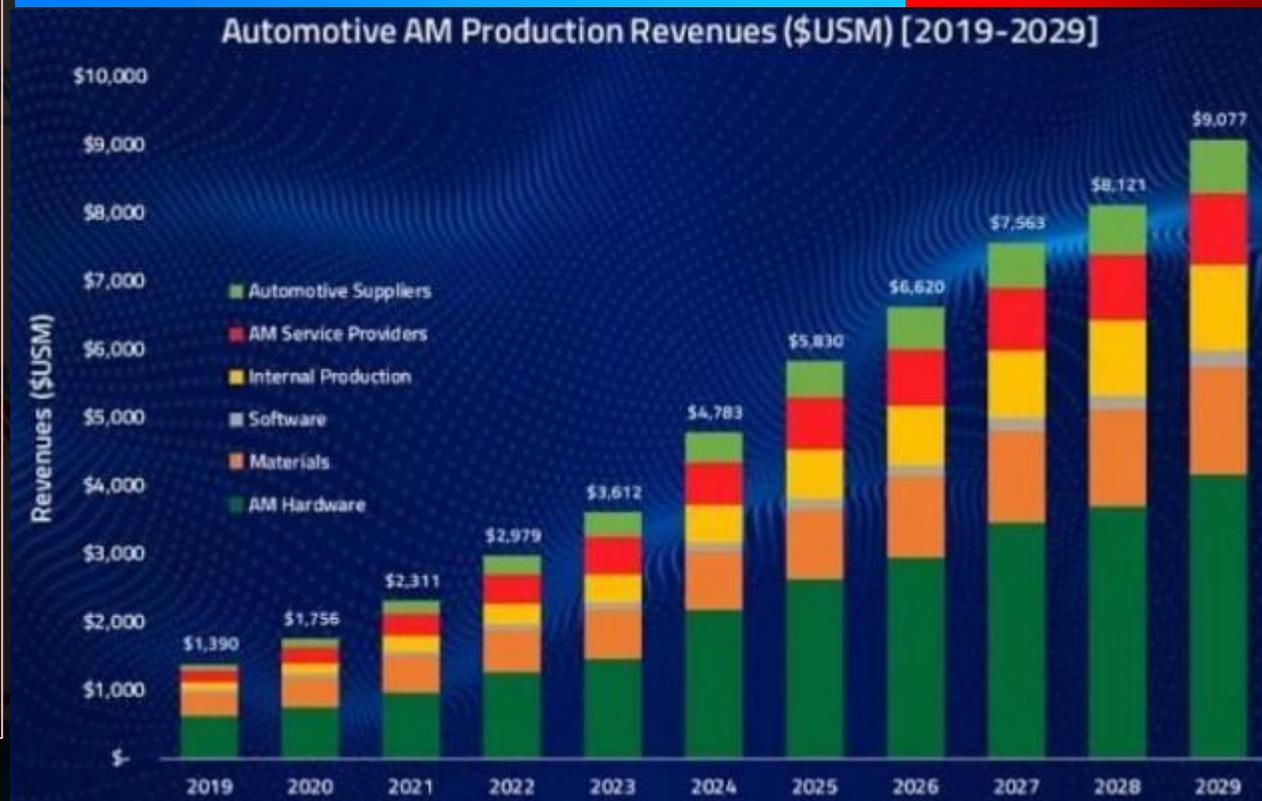


## 13 铝合金快速增长的市场趋势

针对铝合金在3D打印领域的市场发展情况，SmarTech2019年发布了一份关于铝合金3D打印市场机会的跟踪和预测报告，报告称铝合金3D打印正在快速增长，去年占3D打印金属总体市场近10%，从而使得增材制造领域铝粉出货量增长43%。

根据SmarTech，3D打印行业目前正在发生着两个显著的发展趋势，第一个是铝合金材料的全球供应链似乎已经“越过门槛”，成为支持增材制造技术的下一代机遇。铝合金的3D打印现在开始赶上镍，钢和钛。根据SmarTech的预测，铝合金占金属3D打印中所有金属粉末的消耗量（按体积计算）从2014年的5.1%逐渐提高到2026年的11.7%左右，铝合金在汽车行业的10年复合增长率在51.2%。

### 汽车市场3D打印发展的情况。来源：SmarTech



## 14 铝合金3D打印

铝合金的3D打印正在更多的“绑定”金属3D打印工艺，从而形成多样化的发展，并且带来了持续发展的机遇。当然，通过SLM金属3D打印工艺来制造铝合金产品还存在着很多工艺与材料技术方面的挑战，不过，这是个既定的趋势，SmarTech预计，随着技术的发展，在可预见的未来，铝合金3D打印将高度集中在粉末床熔化领域。

### 铝合金领域金属3D打印材料年增长预测。来源：SmarTech

根据SmarTech，铝合金产品的开发和商业化都在显著增加，为稳定及经济性的加工所打包的“流行锻造合金配方”（“popular wrought alloy formulations”）将继续发展，这是含有稀土元素的专用增材制造用特定合金，未来五年应该会看到这种材料更加多样化的3D打印市场机会。



## 15 铝合金3D 打印-用于车身结构件

Divergent 利用3D打印技术制造颠覆性的车辆零部件，例如此前开发的超级跑车，具有革命性的底盘结构，Divergent 通过金属3D打印制造铝制“节点”结构，将碳纤维管材与节点连在一起，通过软件快速实现客户自定义汽车的设计到现实的生产，该软件从空气动力学、材料 and 安全性等多个角度优化结构件的设计，并且充分考虑汽车的设计以及碳纤维杆和3D打印节点之间的连接。

随着多激光选区激光熔化3D打印技术的成熟，材料成本更低、速度更快的粘结剂喷射金属3D打印技术在汽车零部件生产中的应用，以及低成本、高强度铝合金等3D打印材料的推出，3D打印技术与实现汽车零部件量产的目标也越来越近。

Divergent Manufacturing Platform™ 是Divergent 获得专利的软件-硬件平台，该平台中的核心制造技术为粉末床激光熔化3D打印技术，Divergent 利用这一技术从根本上改变车辆结构的设计、工程制造和组装方式。



## 16 混合增材制造

增材制造 – 也称为3D打印 – 已成为赛车现代设计和原型制作过程的重要部分。这其中，德马吉森精机作为保时捷赛车的技术开发合作伙伴，不仅通过数控机床为保时捷开发关键零部件，几年前就已经开始使用其LASERTEC混合增材制造设备为保时捷赛车生产零部件。金属3D打印技术已经迅速成为德马吉森精机企业的一个核心部分。而且通过Sauer工厂，德马吉还在开发铝合金的金属3D打印工艺。



$\varnothing 30 \times 90 \text{ mm}$   
 电机外壳  
 DMU 60 eVo FD 加工  
 材质: 铝  
 加工时间: 105 分钟



$80 \times 70 \times 20 \text{ mm}$   
 泵外壳  
 DMU 60 eVo FD 加工  
 材质: 铝  
 加工时间: 58 分钟



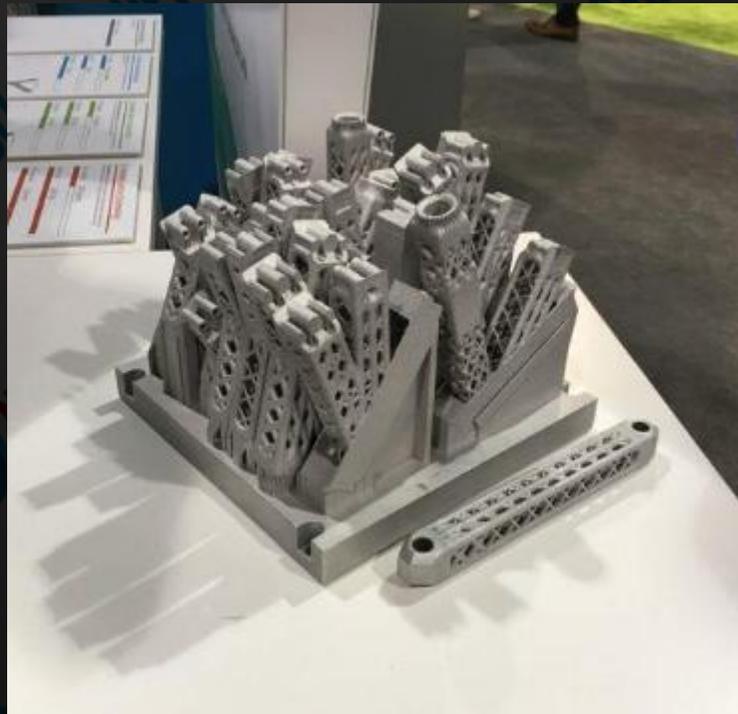
$36 \times 44 \times 10 \text{ mm}$   
 推杆  
 HSC 70 linear 加工  
 材质: 铝  
 加工时间: 28 分钟



## 17 仿生学隔离舱

早在2015年，空中客车（Airbus）就推出了首个通过创成式设计开发的轻量化零部件，即3D打印业界所熟知的轻量化仿生机舱隔离结构，该结构是采用Scalmalloy高强度轻质铝合金材料与粉末床激光熔化3D打印技术制造的，用于空客A320机舱中，起到分隔客舱与后部食品准备区的作用。

除了以上已进入生产阶段的仿生隔离结构，空客还在利用创成式设计及3D打印技术探索更多的飞机结构部件的重构方式，包括重新设计A320飞机的垂直尾翼（VTP）前缘。飞机VTP（或垂直稳定器）作用是提供方向稳定性，并减少由左右移动引起的空气动力学效率低下的现象。创成式设计软件能够提供数百种VTP设计方案供空客进行评估，这些设计方案都是满足刚度、稳定性和质量要求的。



## 18 铝合金液压元件

轻量化的铝合金，也许是最轻并具有良好的机械性能的材料，Aidro Hydraulics能够设计和打印像普通的传统歧管一样250 bar的液压歧管。此外，由于非常精确的设计，伴随着深入的有限元分析研究，Aidro Hydraulics成功地生产出可在更高压力下工作的液压元件解决方案。在传统的液压领域，铝合金不适用于高压，但是由于曾才制造和新的设计方法，Aidro Hydraulics取得了非常好的成果。

AidroHydraulics主要使用不锈钢和铝合金，特别是AlSi10Mg，这是3D打印中最常见的铝合金。另外，即将推出F357铝合金（AlSi7Mg0.6）不含铍。

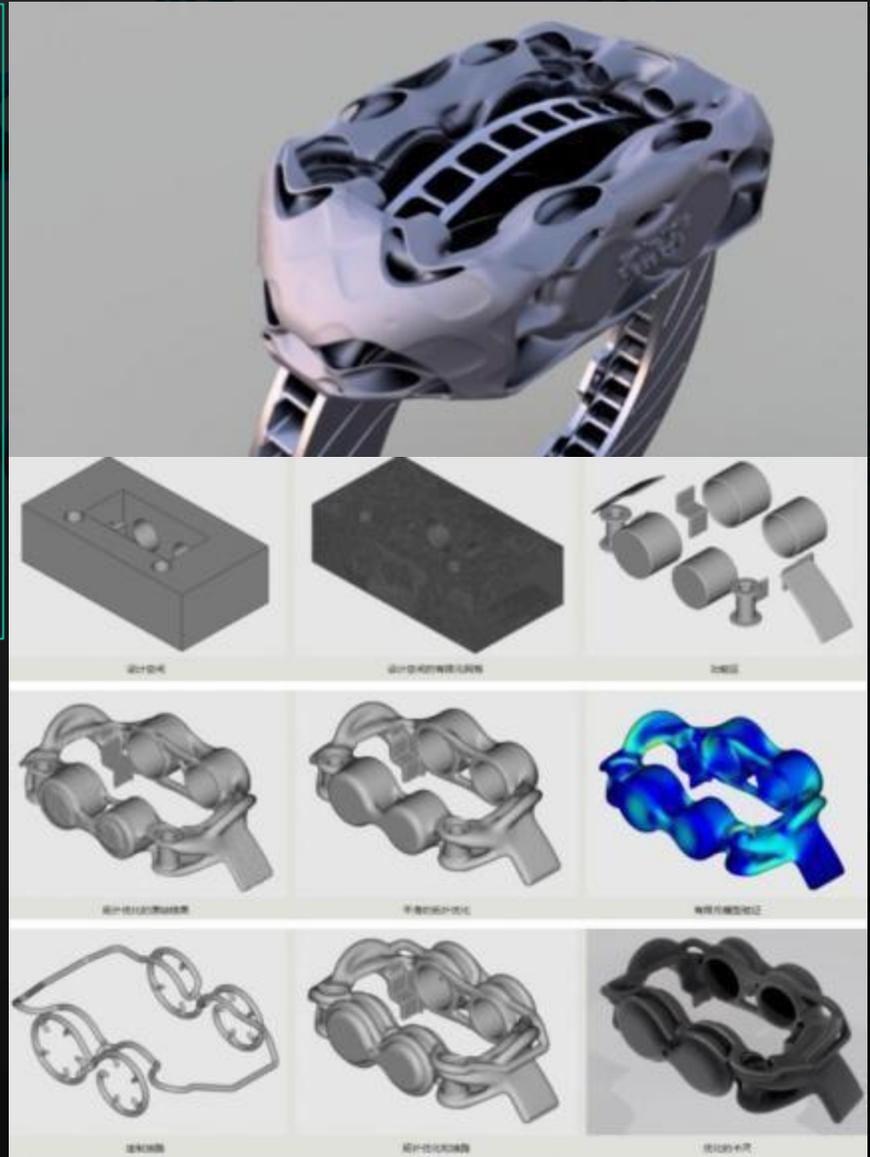
对于3D打印铝合金，AidroHydraulics专注于优化重量，例如，AidroHydraulics设计了一个用于手持设备应用的液压歧管，与传统歧管相比，实现了70%的重量减轻。



更多关于3D打印在液压领域的应用，请关注《3D打印与液压行业白皮书》随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号: cn\_3dsciencevalley

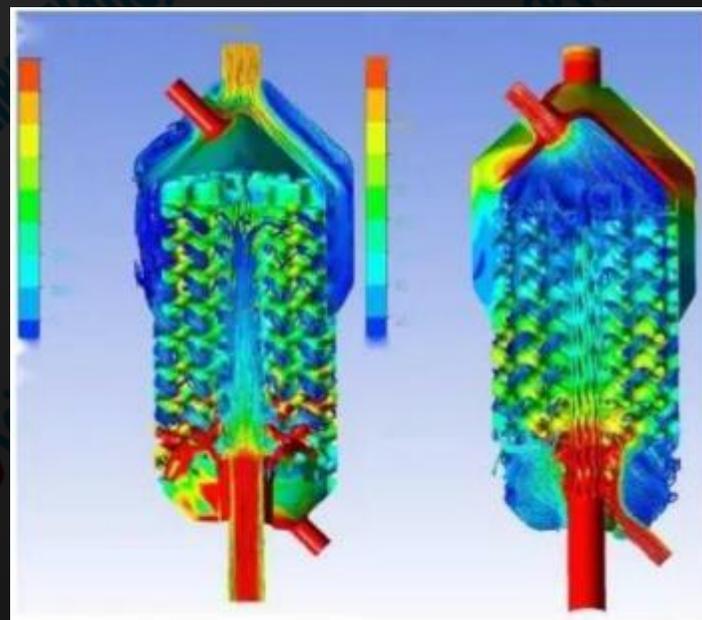
## 19 集成热交换结构的制动钳

日本山一特殊钢公司 (YAMAICHI Special Steel) 的增材制造部门对制动钳进行了重新设计。重新设计的制动钳所使用的制造工艺为选区激光熔化3D打印技术, 增材制造工艺释放了设计自由度, 重新设计的制动钳能够在实现减重的基础上集成热交换结构, 并且增加压力油路的供油方向。这一设计案例对汽车安全部件设计优化与创新具有一定参考意义。YAMAICHI在重新设计中应用了拓扑优化技术, 并在制动钳中集成了面向增材制造的TPMS 结构。此外, YAMAICHI 在设计中添加了优化的压力损失油路。考虑到制动钳在工作时可能遇到砾石撞击之类的环境因素, YAMAICHI 在制动钳下方增加了防止撞击损坏的防护面。



## 20 航空燃油滑油3D打印热交换器

三重周期最小表面 (TPMS), 既具有高强度重量比, 又具有非常高的表面积质量比。为实现最小壁厚, 设计师选择专为增材制造开发的高强度7000系列铝合金 (7A77.60L) 作为热交换器制造材料, 由此, FCOC 的壁厚得以最小化, 同时仍能满足飞机的临界爆破压力结构要求。7A77.60L 铝合金的屈服强度几乎是铸造级增材制造铝合金AlSi10Mg的两倍, 通过该材料制造的螺旋结构壁厚能够减少为原来设计的一半。



表面积增加146%, 而壁厚减少一半, 使得相同体积内的FCOC的总热量传递相比传统设计增加大约300%。ANSYS CFX 是一种先进的计算流体动力学求解器, 被用于评估FCOC的性能。在整个设计迭代阶段, 使用了多次CFD仿真对设计进行评估。设计师根据最初的仿真结果, 对能量在螺旋管内部的分配方式进行优化, 从而使总传热系数增加12%。从nTop平台到ICEM (用于网格细化和转换) 和 ANSYS CFX 是一个可重复的工作流程, 能够帮助设计师快速设计迭代。

## 21 铝合金热交换器

Betatype公司在增材制造设计领域有着很多案例积累，例如3D打印铝合金热交换器设计、3D打印点阵轻量化结构设计等。Betatype团队在设计夹层结构时，在夹层之间使用了超高密度点阵结构，夹层结构包括超过1000万个胞元结构。Betatype公司表示，应用Engine-Platform中的技术和多尺度方法，能够将扫描路径和曝光设置控制到夹层结构设计的每个元素，在这种情况下，粉末床激光熔融工艺超过其标准工艺，从而创造出所需的超高密度点阵结构。

Betatype Engine-Platform 软件中有开放的 Arch 格式，能够避免因创建网格结构而产生大量的数据，软件中抽象的算法，大大降低了CAD模型数据的复杂度，使得模型数据更容易管理。



更多关于3D打印在热交换器领域的应用，请关注《3D打印与液压行业白皮书》随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号: cn\_3dsciencevalley

## 22 铝合金3D打印刀具

3D打印/增材制造技术可以实现复杂几何形状，制造出带有复杂内部通道的机械加工刀具，特别是特殊的非标刀具。由于刀具形状的设计不受加工限制，在设计刀具时可以更多的考虑刀具的使用需求，从而提升刀具的性能和综合竞争力。

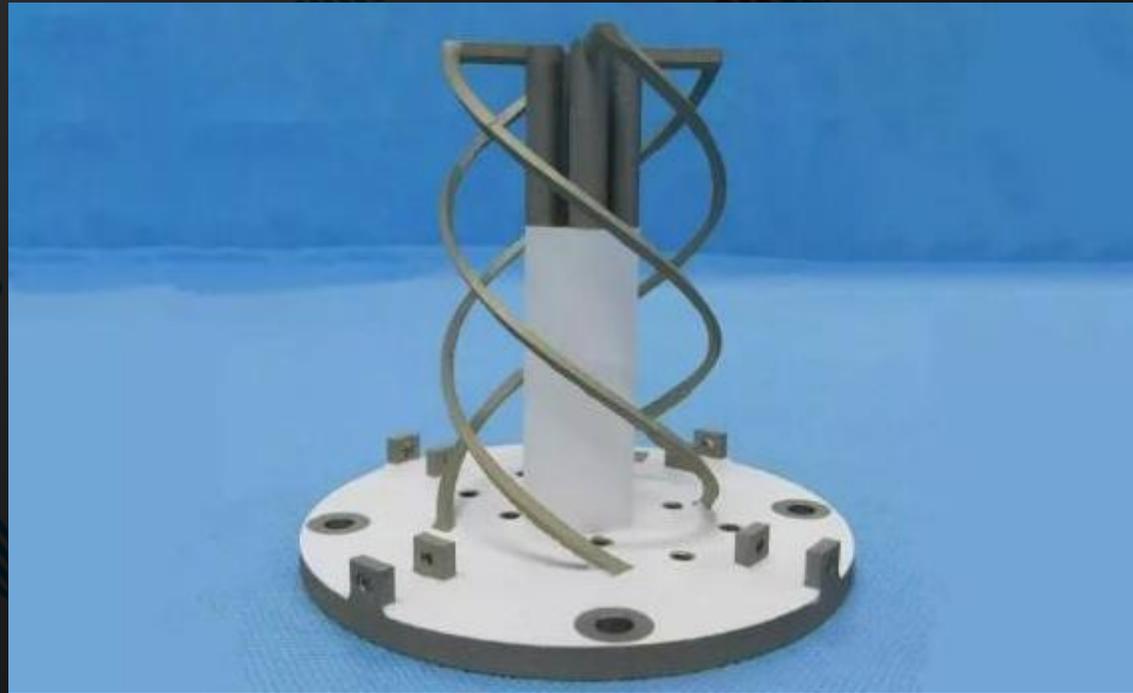
Horn使用的是粉末床选区激光熔化3D打印技术（SLM），该技术是将金属粉末分层地施加到可降低的平台上，然后通过激光将相关区域熔化，重复这一步骤直到达到所需的部件高度。目前Horn使用的金属3D打印设备最大构建区域为300 x 300 x 300 mm (11.811 x 11.811 x 11.811 ")，使用的金属粉末材料是AlSi10Mg铝合金和1.4404不锈钢。



更多关于3D打印在刀具领域的应用，请关注《3D打印与刀具白皮书》随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号：  
cn\_3dsciencevalley

## 23 铝合金天线

欧洲航天局（ESA）曾在官方网站上披露计划于2020年发射星上自主项目-3(PROBA-3)卫星，利用两颗米级小卫星开展世界首个精确编队飞行任务，并通过制造出持续时间长达数小时的人造日食开展日冕研究。PROBA-3卫星是PROBA系列卫星中的一颗，其首要任务是验证精确编队飞行技术。PROBA-3卫星的天线系统中包括一种3D打印铝合金螺旋式天线，该天线近日已由合同制造商完成交付，并通过了ESA PROBA-3卫星任务的飞行认可。3D打印铝合金螺旋式天线在实现功能的同时保持了射频和热机械性能。



根据3D科学谷市场研究，我国科研机构以及航空航天制造企业在铝合金卫星天线增材制造领域已取得了相关应用研究成果，例如清华大学针对面向低轨定位载荷的铝合金喇叭天线的增材制造方法开展了研究，包括天线脊和底部的网格化设计，天线谐振腔底部的开口设计，内脊底部的支柱设计，天线外脊的设计，以及激光成型与重熔工艺流程参数的设计，最后通过一种定制的3D打印流程克服铝合金难以打印的问题。通过增材制造工艺与设计方式实现的天线重量降低2/3，对于星载应用具有重要意义。

## 24 铝质支架

3D打印铝质支架用于Eurostar E3000卫星，这些新的3D打印部件无法使用常规的制造方法完成。这种3D打印的航空级铝合金支架，是用激光熔化金属3D打印技术一次制造完成的，其重量比以前的托架少了35%。它取代了四个独立部件的功能，其中包括44颗铆钉。相比较而言，3D打印的部件硬度提升了40%。



## 25 铝质支架

瑞典的RUAG Space公司，称为他们为卫星设备生产可靠的零件，包括微波电子，天线，分离系统，以及其他各种零件，这其中3D打印作为一种主要的生产方式，借助3D打印，可以从更快，更具成本效益的生产中获益。与传统工艺相比，3D打印具有许多优点，可以生产更轻的金属或塑料部件。而减重是航天工业的决定性因素，卫星越轻，成本越低。每减少一公斤就可以节省资金，因为将卫星送入轨道所需的能量更少。除了较轻的零件外，3D打印还释放了几何形状的自由度，可以生产更为复杂的结构一体化零件。

国内作为先进制造技术的重要发展方向之一，3D打印技术一直倍受529厂关注。该厂先后完成了铝合金、钛合金等材料选区激光熔化成型工艺鉴定，并顺利通过院级评审，突破了以激光选区熔化冶金质量控制与组织性能调控、复杂形状结构件尺寸精度与变形控制等为代表的多项关键技术，获得了激光选区熔化成型技术的上星许可。

SpaceIL的月球着陆器采用RUAG Space开发的3D打印铝结构支架。



## 26 铝质着陆器

软件公司Autodesk-欧特克和美国宇航局(NASA) 喷气推进实验室的工程师们设计出了一种全新的星际着陆器，未来预计将对木卫二和土卫二等遥远的卫星进行探索。它的重量大大小于美国宇航局送往其它行星和卫星的大多数着陆器。

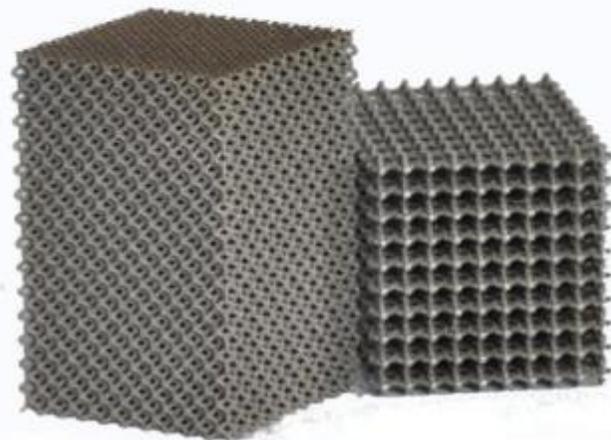
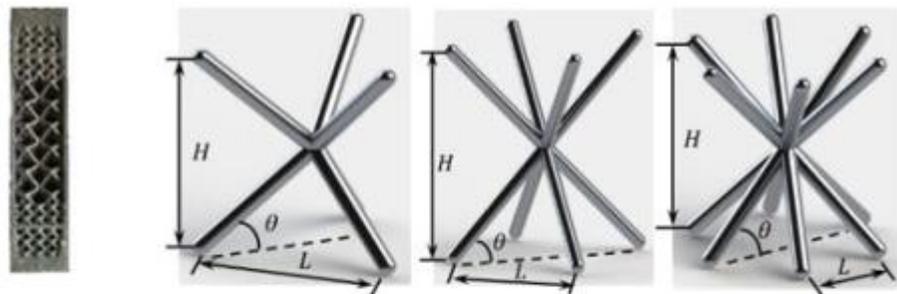
欧特克公司公布的这个全新的着陆器设计，外形酷似一只蜘蛛。通过欧特克的创成式设计软件，这个设计方法运用的是大自然的进化结果的仿生学计算公式。设计师和工程师们只需要将设计目标、材料、制造材料和成本限制等数据输入到设计软件中，设计软件就能够快速生成多种设计结果作为选项。

着陆器由三个主要部分构成：第一部分是结构部分。它是由3D打印铝材料而成，其中将安放研究仪器；第二部分就是为其提供结构支撑的底盘，这一部分是通过铸造铝材料而完成的；第三部分是铣削加工制造的铝质腿。整个着陆器的宽度约2.3米，高约0.9米。



2019年，国际首个3D打印全点阵整星结构成功入轨，千乘一号整星结构采用面向增材制造的轻量化三维点阵结构设计方法进行设计，整星结构通过铝合金增材制造技术一体化制备。传统微小卫星结构重量占比为20%左右，整星频率一般为70Hz左右。千乘一号微小卫星的整星结构重量占比降低至15%以内，整星频率提高至110Hz，整星结构零部件数量缩减为5件，设计及制备周期缩短至1个月。整星结构尺寸超过500mm×500mm×500mm包络尺寸，也是目前最大的增材制造一体成形卫星结构。

千乘一号小卫星结构由航天五院总体部机械系统事业部负责研制。航天五院总体部机械系统事业部是我国航天器空间机械产品研制的核心部门，近年来在面向3D打印的航天器轻量化结构设计与评价方面开展了大量的研究工作，突破了基于三维点阵材料的整体结构设计技术。



## 28 铝合金结构件

2019年1月“嫦娥四号”平稳降落在月球背面的南极艾特肯盆地预定目标。嫦娥四号中继星上面包含中国航天科技集团五院529厂采用3D打印技术研制的多个复杂形状铝合金结构件。这些3D打印产品全部采用拓扑优化构型，通过与轻量化设计技术的结合，零件重量大幅降低，承载比大幅提升，3D打印的技术优势得到了充分发挥。该厂先后完成了铝合金、钛合金等材料选区激光熔化成型工艺鉴定，并顺利通过院级评审，突破了以激光选区熔化冶金质量控制与组织性能调控、复杂形状结构件尺寸精度与变形控制等为代表的多项关键技术，获得了激光选区熔化成型技术的上星许可。



赛峰发动机润滑装置先前是在铸造厂生产的，赛峰航天推进器公司的研究和研发团队开发了一种新设计的润滑装置外壳，其设计针对增材制造进行了优化。目前赛峰航天推进器公司 (Safran Aero Boosters) 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。

由于LEAP®润滑装置是经过适航认证的部件，因此赛峰航天推进器公司必须使用相同的铝合金来通过增材制造技术生产新设计的零件，并保留相同的界面和功能。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。

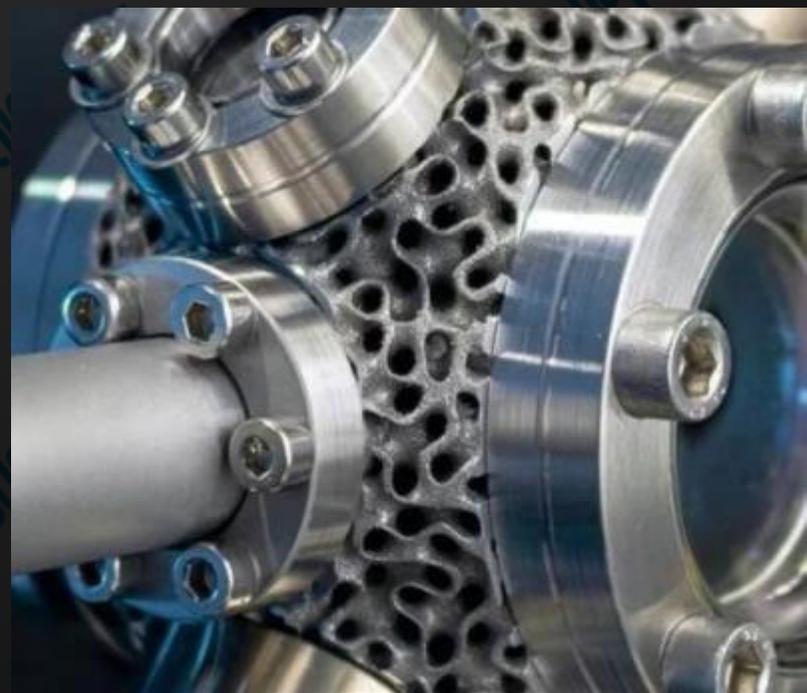


## 30 铝合金量子计算系统真空组件

2019年，英国的科学家通过3D打印制造了用于便携式量子计算系统的真空组件，Added Scientific与诺丁汉大学和英国苏塞克斯大学的量子技术研究小组的成员合作使得更小、更轻、更智能的量子系统走进现实。

3D打印的真空组件为量子技术应用提供了多种好处，通过3D打印可以实现结构一体化，不再需要原来的真空接头设计，功能集成并减小真空组件的尺寸，减轻重量，提高功率。

真空组件采用铝合金AlSi10Mg（增材制造中最常用的铝合金）生产，因为它具有高比强度3和低密度。除了典型的热处理，Added Scientific还采用了单独的“老化”热处理，从而增加材料的强度。真空组件的设计中含有点阵结构，这增加了腔室的外表面积与体积比，有助于散热。最终的腔室设计与标准的UHV超高真空设备兼容。除了腔室外，Added Scientific开发了一种带有内置水冷通道的磁性线圈成型插件，以探索增材制造更多的优势。



## 31 钛铝合金叶片

与传统的镍基合金相比，钛铝合金提供了非常优异的强度重量比。但这种优势是有代价的。正如电子束熔化是一种技术要求严格的工艺一样，TiAl是一种“臭名昭着”的难加工材料。之前，GE航空需要将TiAl叶片通过铸造先形成毛坯料，然后通过CNC机加工将其加工成最终形状。这一过程需要很长的交付时间来制造模具，而通过EBM工艺，GE可以缩短叶片加工的流程。此外，GE还对材料进行了定制，并探索出自己的加工工艺，通过调节层厚度和加工速度，以避免产生残余应力。

LPT叶片的增材制造生产之路充满神秘色彩，钛铝合金 (TiAl) 叶片通过意大利Cameri的Avio Aero 3D打印工厂进行制造。现代化的设施包括30台大型黑色Arcam 3D打印机，每台打印机配备3千瓦的电子束，可用于同时生产多达六个15.75英寸的叶片。到2019年年底，将有50台Arcam 3D打印机主要用于LPT叶片生产。

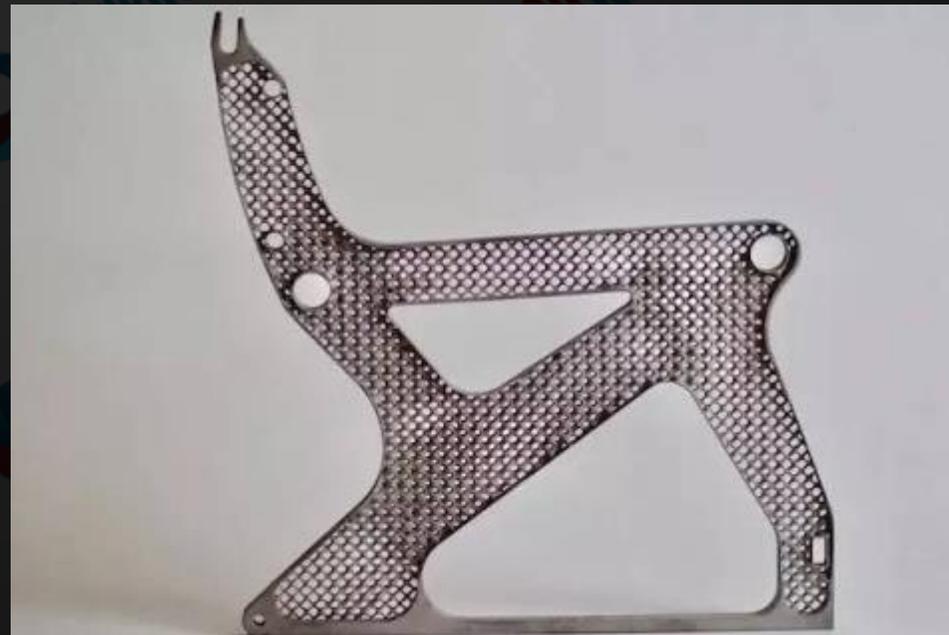


## 32 砂模3D打印+铝合金铸造

国内方面，2018年东风汽车公司通用铸锻厂联合其他三家单位建立战略合作。四方利用各自优势，建立产学研全面合作关系，共建汽车轻量化铝合金低压铸造研究中心，共同在汽车用铸造铝合金材料、铝合金铸件轻量化设计、铝合金铸造技术的开发与应用等方面开展全方位合作。

国际上，关于铸造在交通工具领域的轻量化应用，一个现实的例子是奥特克尝试通过voxeljet-维捷的设备3D打印熔模来铸造镁铝合金，从而实现飞机座椅的轻量化。这种座椅结构件适合任何标准的商用喷气式飞机，预计可以通过减重为航空公司节约数百万美元的成本。

晶格结构是通过奥特克的netfabb软件设计成的，奥特克的科学家发现，这种晶格结构通过金属打印的方式生产出来并不是当前最好的方法，他们结合了现代的3D打印PMMA精密铸造模具的制造方法与传统的铸造方法。



通过轻量化设计和3D打印已经将飞机座椅骨架实现了减重，而镁合金比铝轻35%，通过材料的选择，又进一步将座椅骨架减重。这对商业航空公司意味着什么？如果以100架A380飞机服役20年来计算，航空公司将节省2亿多美元的燃料费用。这好比8万辆汽车一年减少的126000吨的二氧化碳排放量。



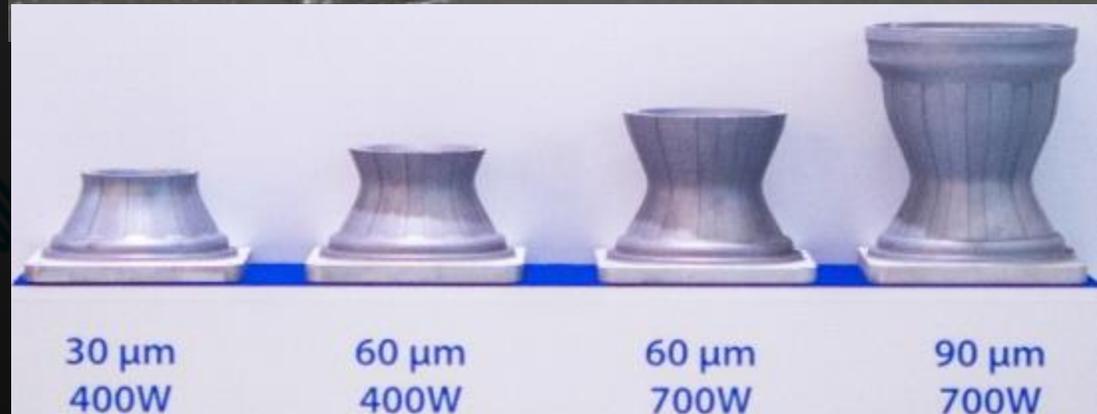
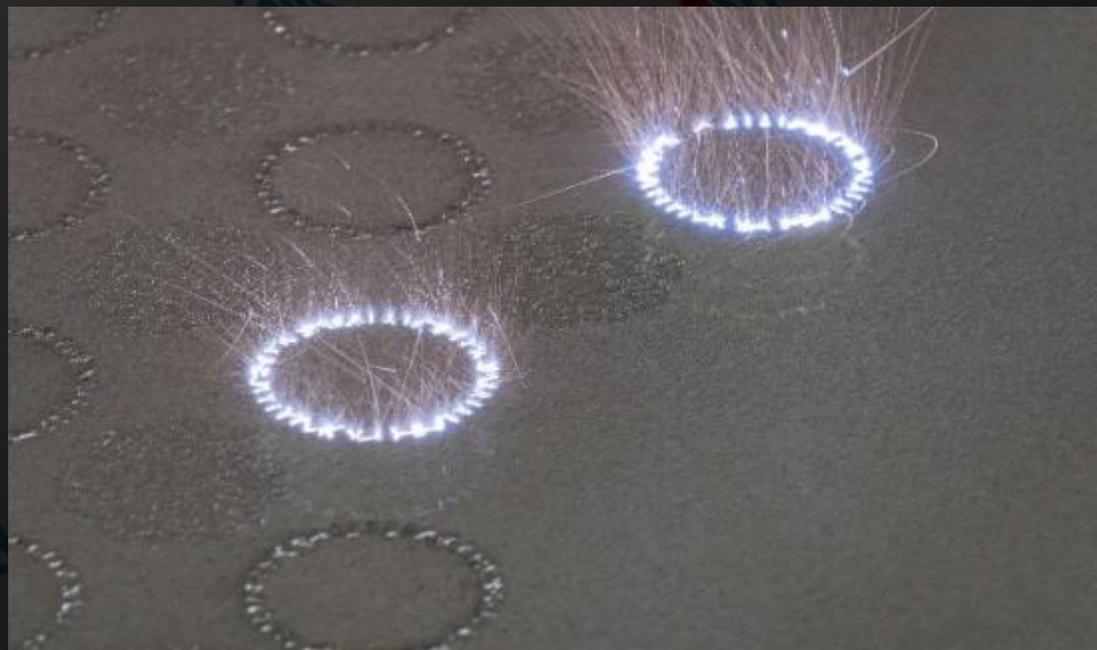
**打印工艺、建模、仿真、专利**

## 33 3D打印铝合金

来源：SLM Solutions

霍尼韦尔（中国）和SLM Solutions在高层厚度的铝制零件3D打印的开发合作中取得了重要的成功，与通过压铸生产的零件相比，铝合金F357（无铍的新版本AlSi7Mg0,6（A357））显着改善了材料性能。霍尼韦尔在四激光SLM®500选区激光熔化3D打印设备上以60 μm的层厚度和700 W激光为铝合金F357开发新的打印工艺，已经达到了重要的里程碑。与传统的压铸零件相比，材料的性能已大大提高，现在已经超过了公认的航空航天金属性能。

铝合金F357不仅重量轻，而且与常规铝合金相比，具有显着更好的耐腐蚀性和所需的机械性能，例如在宽温度范围内的高强度。它具有很高的焊接性，并且非常适合于后加工，如机械加工或电化学（如阳极氧化）。这些特性的组合使F357非常适合于航空航天或汽车行业中的薄壁和复杂结构。



## 34 3D打印铝合金

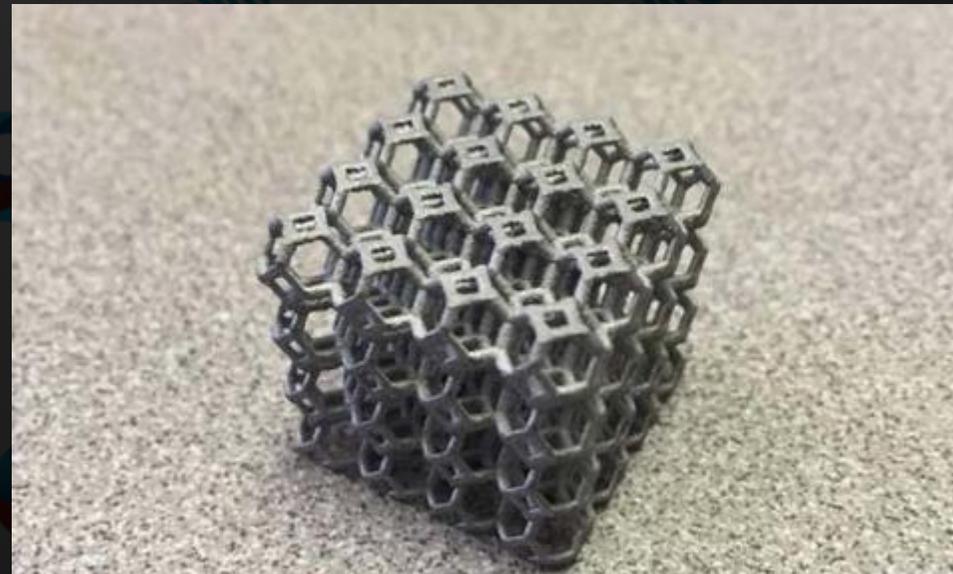
针对于铝合金的加工，Sintavia开发出了完整的端到端的参数体系，Sintavia通过专有工艺来打印F357铝粉末，从而满足航空航天和汽车行业对低密度、良好的加工性和热传导元件的需求。航空航天和汽车行业对于铝硅合金的需求正在上升，Sintavia的综合制造能力使得F357铝合金的制造更加快速，并且达到或超过行业的严格验证参数要求。

Sintavia独家的铝合金加工工艺是一整套的体系，不仅包括预构建材料分析，还包括后期热处理和压力消除，从而能够生产出高达125%的设计强度，精密度达100%。通过常温、高温强度验证，以及零度以下的温度验证，Sintavia能够快速生产出满足要求的铝件。

南京航空航天大学几年前开发出基于SLM成形的铝基纳米复合材料，用于激光增材技术领域，有效的解决铝基纳米复合材料在激光增材过程中工艺性能与力学性能不匹配、增强颗粒分布不均匀以及陶瓷相与基材相之间润湿性较差的问题，使得所获得的产品具备良好的界面结合以及优异的力学性能。

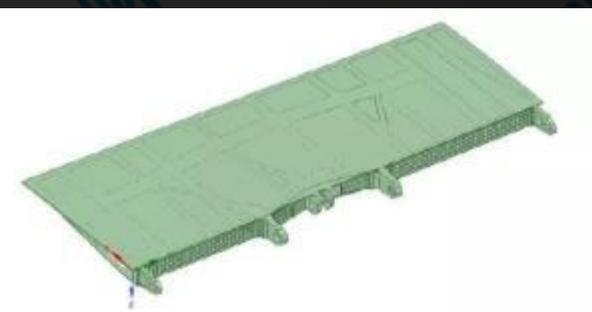
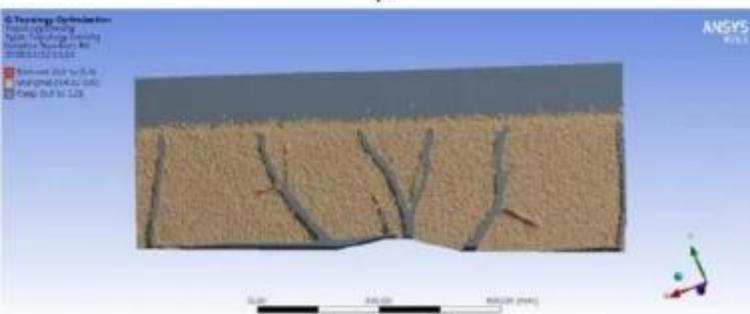
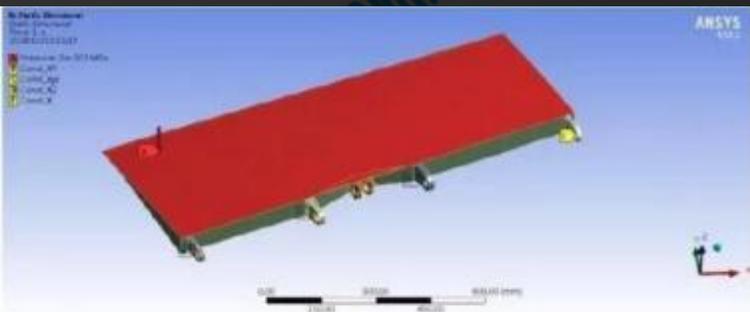
## 35 3D打印铝合金点阵结构

根据美国普渡大学 (Purdue University) 进行的关于晶格结构的概念验证, 用铝合金3D打印了一个点阵晶格结构的立方体。晶格结构能够增加强度, 同时减少材料的使用和重量。测试显示, 点阵晶格最大能够承受的重量达到几乎900磅 (408千克), 这个小小的立方体结构能够承受其自身104615倍的重量。由于重量轻、坚硬度高, 点阵晶格结构未来不仅仅能在医学领域得到应用而且在建筑、工程都具有较好的应用前景。考虑到铝制点阵晶格结构, 其轻量化的空间更加明显。

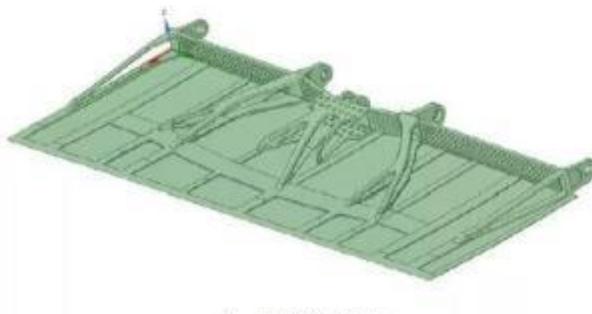


## 36 拓扑优化与仿真结合重新设计铝合金飞机控制面板

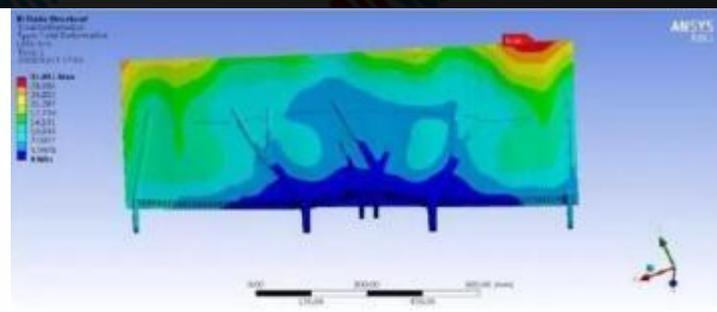
在面向增材制造的结构设计中，仿真优化是核心技术。从拓扑优化开始，遵循拓扑优化-后拓扑结构设计-详细设计优化-设计验证的流程完成了飞机控制面的结构轻量化设计。飞机控制面板材料为铝合金，采用了ANSYS Topology Optimization和ANSYS Mechanical分析软件，实现了满足力学性能要求的结构设计，其几何特征具有明显的树杈结构形态。



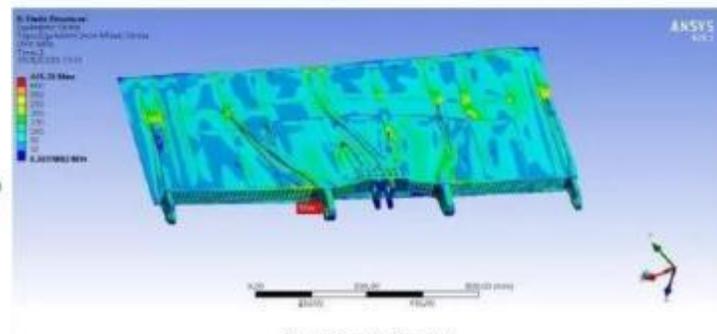
a) 树杈结构上部



b) 树杈结构底面



a) 位移结果云图



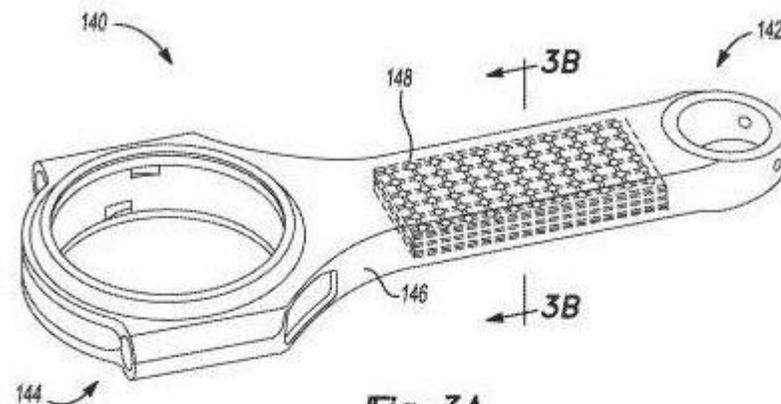
b) 应力分布云图

## 37 具有定制化刚度的轻巧连杆

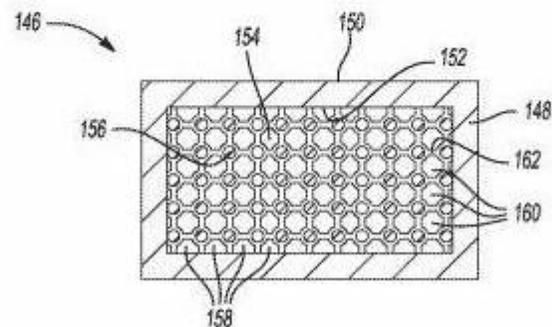
通用汽车开发的轻质连杆包括第一端，第二端和臂。第一端是可枢转地连接到活塞的构造，第二端是可枢转地连接到曲轴的构造。臂在第一端和第二端之间延伸。连杆的内部区域包括由点阵填充的轻量化空间。

材料方面臂可以由铝合金、钛合金及其金属材料组合制造。与使用钢相比，使用钛或铝可减少30%的质量，也可以使用金属基复合材料或非金属材料，例如碳纤维复合材料。

结合有点阵结构设计的连杆的优点在于，与实心连杆相比，它们可以设计成具有高强度和高刚度的零件同时却拥有较轻的重量。通过增材制造形成的连杆可以是整体成型的单件一体化的整体结构。增材制造工艺可以高度控制连杆内的局部刚度和挠曲度，通过优化点阵晶格结构设计，可以改善连杆的强度和刚度。



**Fig-3A**

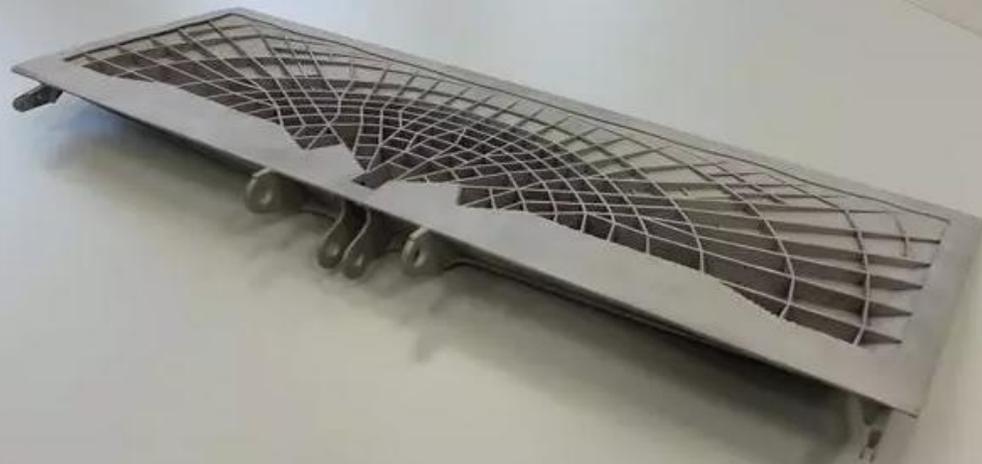
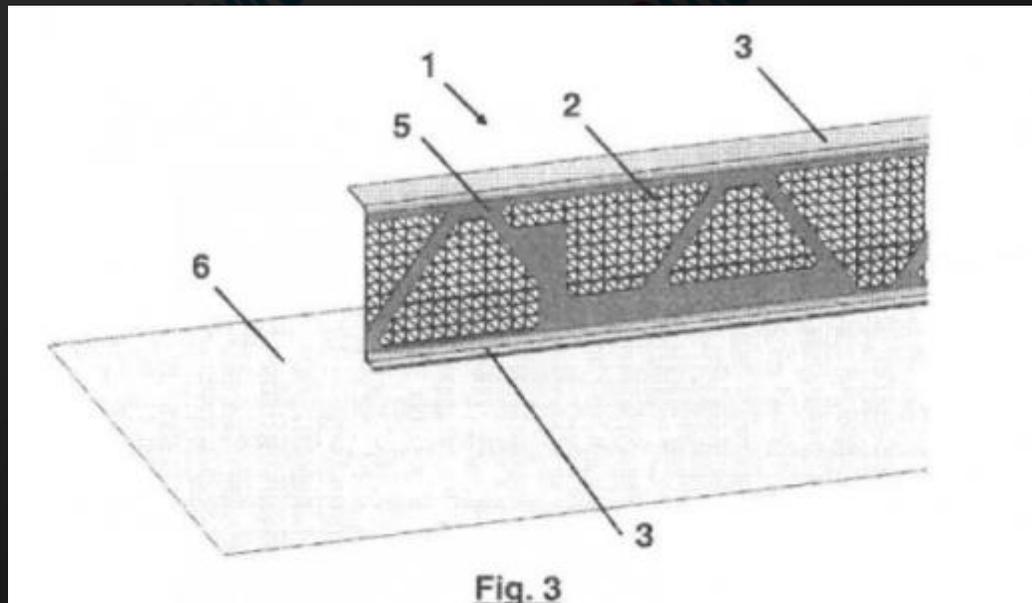


**Fig-3B**

## 38 机身外壳

现代飞机的机身外壳由刚性框架和蒙皮组成，刚性框架通常包括根据机身横截面的形状弯曲成圆周方向的一系列框架和连接到框架的多个纵向纵梁组成。而随着3D打印技术的发展，在优化这些刚性框架的重量与刚性方面有了新的探索空间。结构部件可以由金属整体形成，通过AM-增材制造工艺，可以以相对简单的方式生产高度复杂的二维或三维金属部件。

除了碳纤维增强复合材料，结构部件可以基本上由铝或钛形成。铝合金由于其耐用性和可靠性而广泛用于飞机制造中。钛或钛合金具有高耐温性和耐腐蚀性，并且与其他金属相比，尽管密度相对较低，但具有高强度。因此，在飞机或航天器的高应力部件的情况下使用钛或钛合金比较普遍。当然可以使用钛合金和铝合金的组合，例如实心部分可以由钛合金形成，而网状可以由便宜得多的铝合金制成。



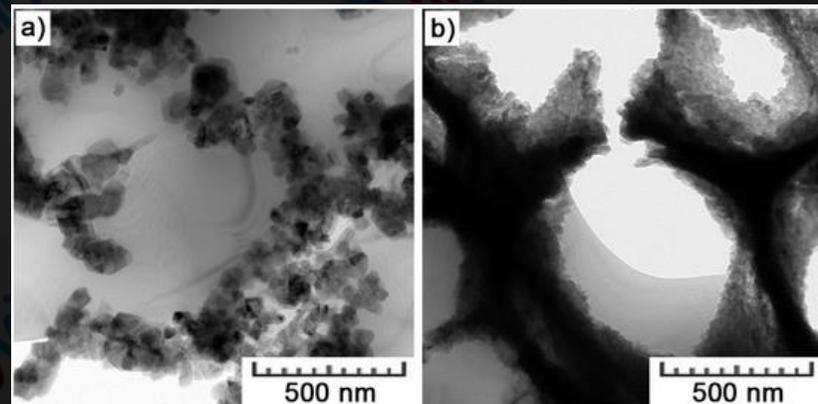
## 39 3D打印铝合金微观性能和机械性能

增材制造/3D打印技术在制造复杂轻量化结构、微观结构方面所特有的优势，而受到了工业领域及学术界的关注。

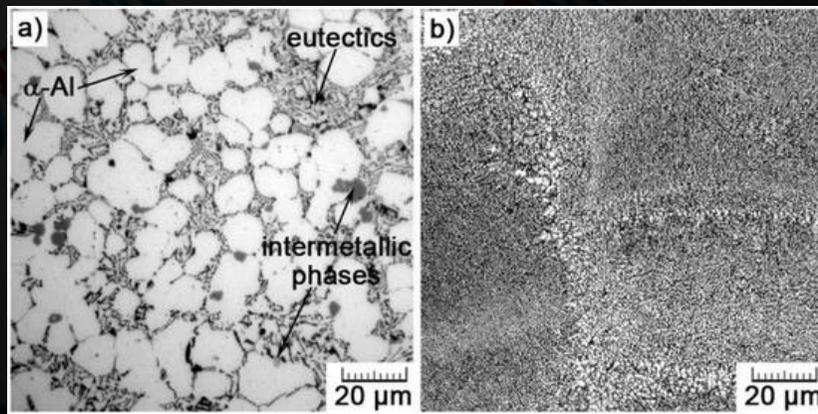
AlSi9Cu3Fe是一种铝合金材料，高压压铸加工存在着不足，比如它难以实现复杂多孔结构或制造极小尺寸的零件，并存在产生氧化膜、收缩腔、空气孔隙等无法消除的缺陷，这些缺陷会削弱铸件结构。

布拉格化学技术大学金属系的一个研究团队使用粉末床选区激光熔融金属3D打印技术与高压压铸两种技术分别加工

AlSi9Cu3Fe材料，随后对零件的微观特性和机械性能进行了比较。该团队经研究认为金属3D打印的AlSi9Cu3Fe零件在材料强度、塑性方面均有出色改善。研究人员表示，与由 $\alpha$ -Al枝晶和层状Al-Si共晶组成的铸态微观结构相比，选区激光熔融中产生等级异质微观结构。晶粒被排列在熔池中，表示在最高温度梯度方向上由单个激光轨道熔化和固化的材料。它们表现出非常细小的胞状晶，其中在Si和Cu中过饱和的 $\alpha$ -Al固溶体胞晶，被由纯Si的立方颗粒形成的共晶网络分离。



(a) 熔池边界和 (b) 熔池内部区域的TEM 图像

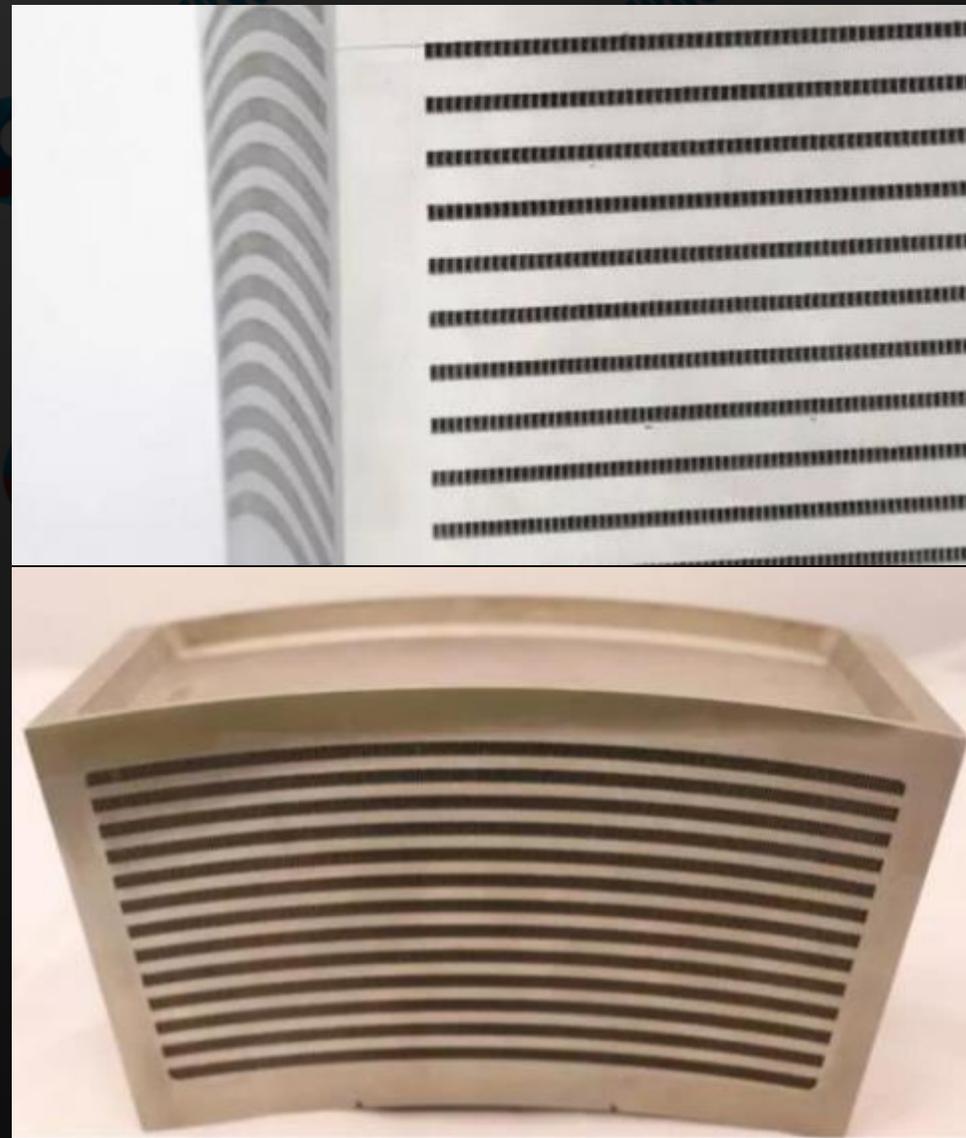


(a)高压压铸(HPDC)和(b)选区激光熔融微观结构比较

## 40 3D打印的共形管道换热器-专利

联合技术公司（UTC）增材制造专业技术中心（AMCoE）与美国国家增材制造创新中心-America Makes，美国国防部合作，通过增材制造技术（AM）来设计和制造更高效的热交换器，热交换器是以一体化的结构件形态制造完成，所以不会带有可能产生泄漏的接缝或接头，整体质量要高得多。通过选区粉末床熔化（PBF）技术，开发人员将热交换器层层构建出来，值得一提的是团队使用了光学和热成像技术进行缺陷预测和过程监控。

材料主要是镍基合金，如INCONEL®625和718以及一些先进的铝合金。团队最近开发的一些铝合金几乎与当今久经考验的航空合金一样好。



# 铝合金与高强度铝合金复合材料



SANDVIK

CARPENTER  
Specialty Alloys

ARCONIC



oerlikon

AP&C  
Advanced  
Powders &  
Coatings

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...

其他: Materialise, Additive metal alloys, AMETEK, Argen Corporation, Ampall, ATI Specialty Materials, CVRM, Cooksen gold, Ecka Granules, Equispheres, Eramet-Erasteel, Eutectix, Falcontech, Global Tungsten&Powders, H.C.Starck, Hoganas AB, NanoSteel, Osaka Titanium, Praxair Surface Technologies, Pyrogenesis, Legor Group, Questek Innovations, Tekna, TLS Technik, USD Powder, Valimet, VBN Components, Wolfmet Tungsten Alloys

北京**宝航新材料**有限公司自2016年就开始进入金属3D打印市场，进行铝合金3D打印材料的研发和生产。北京宝航新材料有限公司自2014年起一直从事军工用气雾化球形铝合金粉体材料的研发和生产，积累了丰富的铝合金气雾化制粉经验，现有3条超音速真空感应熔化气雾化制粉产线，具备年产100吨铝合金3D打印粉和200吨球形铝合金粉的产能。

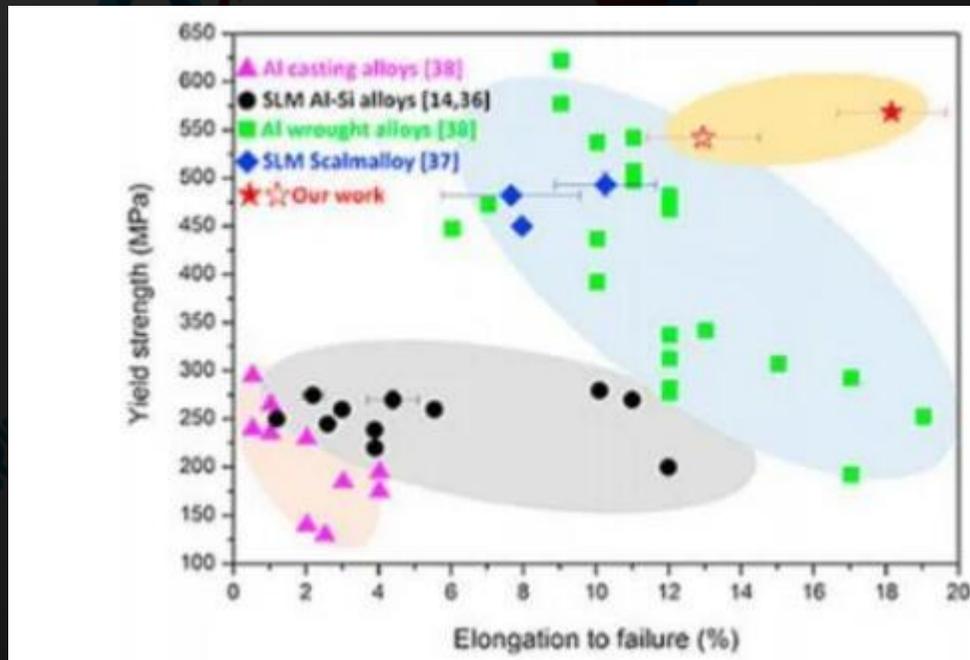
铝硅AlSi12-铝硅12是一种具有良好的热性能的轻质增材制造金属粉末。AlSi10Mg-硅/镁组合带来显著的强度和硬度的增加。这种铝合金适用于薄壁，复杂的几何形状的零件，是需要良好的热性能和低重量场合中理想的应用材料。零件组织致密，有铸造或锻造零件的相似性。典型的应用包括汽车，航空航天和航空工业级的原型及生产零部件，例如换热器这样的薄壁零件。

压铸合金AlSi10Mg类似美国合金360,虽然这并不是一个被广泛认可的高强度铸造合金，但它已被证明通过适当的热处理能够产生相当高的强度，3D科学谷了解到虽然这一事实也还备受争议。但从广义上讲，这种合金可以通过标准的热处理工艺，固溶处理后人工时效，称为T6周期。溶液处理500°C以上，4-12h，温度不应超过550°C，其次是水或聚合物熔体淬火。人工老化温度在155°C-165°C之间，时间6-24h，通过精确的时间和温度控制最终性能。抗拉强度可以从220MPa到340MPa之间，抗拉屈服强度在180MPa和280MPa之间。其他合金包括169 (A357) 和AlSi7Mg。

## 43 高强度铝合金材料

通过3D打印技术，新型的铝合金材料在呈现出快速上升的开发态势，更高的强度，替代中温钛合金的可能性，澳大利亚的Amaero HOT Al开辟了在性能方面一种独特的市场定位。

Amaero HOT Al新型铝合金可在3D打印后进行热处理和时效硬化，从而提高了强度和耐用性，使得这种铝合金在260°C左右的温度下长时间稳定。最初是由澳大利亚莫纳什大学的研究人员与Amaero合作开发的，Amaero现在拥有该合金的全球许可权。Amaero来源于莫纳什大学，这所大学在航空航天增材制造领域有着多年的经验积累，曾与法国宇航企业赛峰集团合作，开发了两台3D打印的喷气式发动机，目前该发动机已经进入到商业化阶段。



Amaero HOT Al实现的性能。来源：Amaero

## 44 适合汽车行业的轻型铝合金材料

EDAG与合作伙伴研究了包括粉末制造、仿真模拟、零件开发在内的完整铝合金增材制造工艺链。

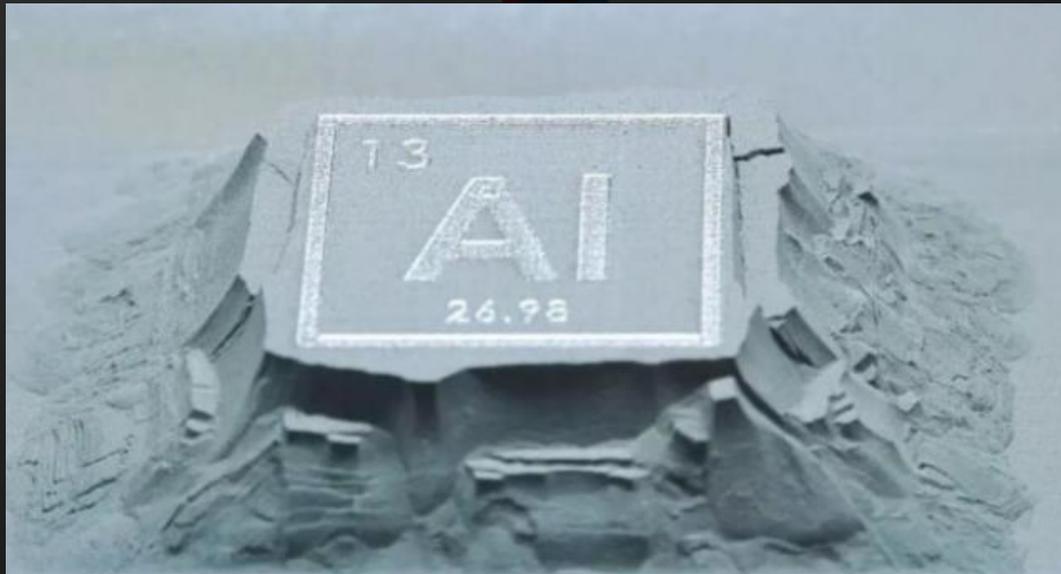
EDAG 选择了多种汽车零部件进行优化, 结果表明, 动态高负荷的轮架和轮拱区域中具有高刚度要求的复杂组件也能够实现有效的减重。其中部分组件减重达30%, 超出了预期。由于这些零部件的制造方式是金属3D打印技术, 可以灵活满足批量定制生产, 因此这些组件均可以根据不同车辆的负载水平要求进行设计。该材料商标为 CustAlloy®。

CustAlloy®在强度、延展性、防腐蚀性等方面满足汽车行业的要求, 并将成为一款适合汽车轻量化、防碰撞零部件批量生产的3D打印材料。



在八家合作伙伴中, Fraunhofer研究所 ( IAPT)、GE 增材制造 (GE Additive) 开展的工作是基于粉末床激光熔化 (LBM) 技术进行这种新型铝合金材料的增材制造工艺开发。Fraunhofer研究所 ( ITWM) 对增材制造过程中材料快速冷却进行了仿真模拟。汽车制造商梅赛德斯·奔驰和EDAG在仿真企业Altair的支持下, 开展了性能仿真。

高强度铝合金，专有的合金如**Scalmalloy**已经被用于空客的增材制造应用中，HRL实验室的研究人员根据晶体学信息选择了锆基纳米颗粒成核剂，并将它们组装到了7075和6061系列铝合金粉末中。在用成核剂进行功能化之后，这些先前与增材制造不相容的高强度铝合金可以使用粉末床选择性激光熔化设备进行成功的加工。成型后的材料无裂纹，等轴（即，其长度，宽度和高度上的晶粒大致相等），实现了细晶粒微观结构，并与锻造材料具有相当的材料强度。



HRL实验室的研究人员根据晶体学信息选择了锆基纳米颗粒成核剂，并将它们组装到了7075和6061系列铝合金粉末中。在用成核剂进行功能化之后，这些先前与增材制造不相容的高强度铝合金可以使用粉末床选择性激光熔化设备进行成功的加工。成型后的材料无裂纹，等轴（即，其长度，宽度和高度上的晶粒大致相等），实现了细晶粒微观结构，并与锻造材料具有相当的材料强度。

2019年，HRL在美国铝业协会注册了用于增材制造合金的铝粉，HRL的注册号为7A77.50，合金的注册号为**7A77.60L**。

## 46 高强度铝合金材料

苏州倍丰创始人、澳大利亚工程院吴鑫华院士领导莫纳什大学研究团队成功开发出了牌号为Al250C的高强高韧增材制造专用铝合金材料，为3D打印铝合金材料再添一名明星成员。Al250C是研究团队专门为3D打印设计的材料，已经达到了批产和商业化使用阶段。Al250C材料强度达到目前可用于3D打印的铝合金材料中最高水平，屈服强度可达580MPa，抗拉强度590MPa以上，延伸率可达11%，制备构件通过了250°C高温下持续5000小时的稳定试验，相当于发动机常规服役25年的要求。



3D打印Al250C材料所制造的零件  
来源：中国日报

总部位于英国的铸造专家Aeromet International专利的用于增材制造的铝合金粉末A20X所制造的零件已经超过500MPa的极限拉伸强度（UTS）。Aeromet称，这一成就使的该铝合金材料成为“市售的用于增材制造的最强铝合金粉末之一”。A20X是一种铝-铜合金材料，具有精细的微观结构，与其他合金相比，具有“高的强度，抗疲劳和优化的热性能。”目前已获得金属材料特性开发和标准化（MMPDS）和航空航天材料标准（AMS）的批准，该材料已被全球领先的航空铸造供应商采用。



## 47 高强度铝合金材料

2020年初，高性能材料制造商QuesTek宣布与德国航空航天中心（DLR）合作开发新型3D打印机原料。两家公司的新材料铝合金将在200至300°C的高温下表现出高强度。以这种性能水平，该材料将能够在某些应用中替代钛，从而使部件和设备比以前更轻。

DLR材料研究所认为这种材料是“非凡打印合金”。“这可以进一步使得增材制造成为一种能够生产在高温工作条件下的零部件的生产技术。”

QuesTek从事集成计算材料工程（ICME）领域的工作，以比传统的反复试验更快的速度和更低的成本设计超高性能材料而为核心竞争力。基于目前的内部测试结果，QuesTek看到这种高强度铝材料在航空，卫星，汽车和高性能赛车的制造组件中的广泛应用前景。

## QuesTek Innovations, LLC



EVANSTON

IL

IMPACT

\$52M

IN SALES AND PHASE III REVENUE

QUESTEK INNOVATIONS, LLC

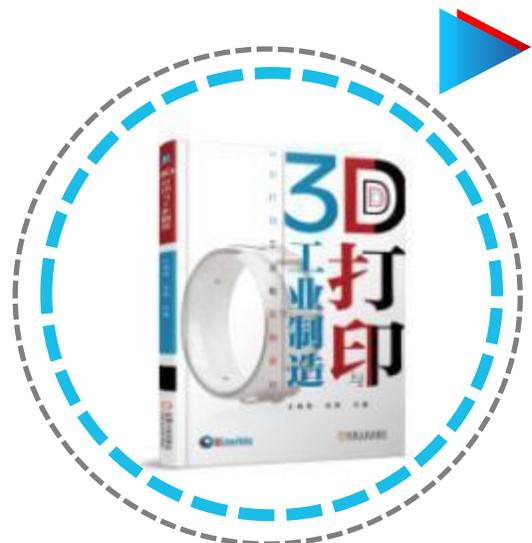
1820 Ridge Ave.  
Evanston, IL 60201  
www.questek.com

安徽相邦复合材料与上海交通大学(拥有两台工业级铂力特BLT500增材制造设备, 1台ProX200)共同研发生产的陶铝粉末, 能够改善粉末流动性, 提高激光吸收率, 细化晶粒组织, 尤其适用于3D打印, 已制定陶铝合金粉末国家标准, 将陶铝粉末应用于3D打印, 真正实现了高性能材料和复杂结构件相结合, 在航空航天、国防军工等领域具有非常广阔的应用前景。

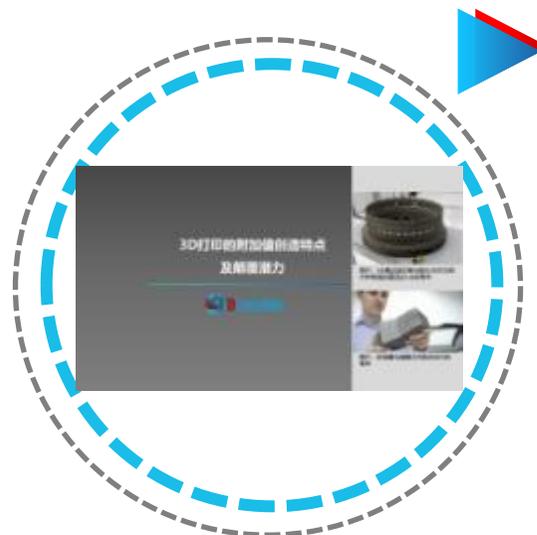
牌号	热处理前			热处理后			弹性模量 GPa
	拉伸强度 MPa	屈服强度 MPa	延伸率 %	拉伸强度 MPa	屈服强度 MPa	延伸率 %	
FCA101X-1	400~450	260~310	≥12	430~480	320~370	≥10	70
FCA101X-2	450~500	310~360	≥9	480~530	370~420	≥7	72
FCA101X-6	460~510	320~370	≥7	490~540	380~430	≥5	75
FCA101X-10	470~520	330~380	≥5	500~550	390~440	≥3	80
FCA101Y-1	420~460	290~330	≥10	430~480	320~360	≥8	72
FCA101Y-2	460~500	300~340	≥8	480~520	330~370	≥6	74
FCA101Y-6	480~520	310~350	≥6	500~540	340~380	≥4	78
FCA101Y-10	500~550	320~360	≥4	520~560	350~390	≥3	82

表内所示为激光选区熔化 (SLM) 工艺打印的力学性能。来源: 安徽相邦复合材料

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



- 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。
- 本书内容仅作为交流学习之用，不构成任何投资建议，请读者仅供参考。