

白皮书赞助方：
Sponsors:



铜金属3D打印白皮书第二版

Whitepaper of Copper 3D Printing V2



白皮书下载请前往3D科学谷QQ群：106477771
随时查看白皮书请关注“3D科学谷”微信公众号：cn_3dsciencevalley

3D科学谷白皮书系列ID:3DSV 20210707



三维科学 · 无限可能

“为行业提供深具国际影响力的增材制造咨询及媒体内容营销服务平台。”

3D科学谷

Provide the industry AM consulting service and content marketing service with international influence.

3D Science Valley

前言

下一代导热、导电零部件正在来临

随着3D打印从航空航天和医疗领域走向更广阔的民用市场，铝合金、不锈钢、铜合金将逐渐占主导。其中根据3D科学谷全球战略合作伙伴AMPower预测，铜合金的年增长率将达到46.6%。

纯铜及铜合金由于极好的导电、导热、耐腐蚀性及韧性等特点，被广泛应用于电力、散热、管道、装饰等领域，有的铜合金材料因具有良好的导电、导热性和较高强度，被广泛应用于制造航空、航天发动机燃烧室部件。但是随着应用端对于复杂结构零部件的需求增多，传统加工工艺已逐渐无法满足需求。3D打印技术具有可成形复杂结构零部件，材料利用率高，无需模具等优点，该技术在制备复杂功能集成的纯铜或铜合金散热器与热交换器、尾喷管、电机绕组等零部件方面具有巨大的应用潜力。

根据3D科学谷的市场观察，纯铜粉末床激光增材制造工艺中存在的挑战正在被逐渐克服。除了粉末床工艺，基于材料挤出、光聚合与粘结剂喷射工艺的铜3D打印工艺也实现了商业化。多条增材制造技术路线齐头并进，必将为下一代导热、导电零部件的制造带来更多样化的解决方案。

本白皮书从铜金属宏观市场、铜金属增材制造技术、铜金属3D打印应用、研究成果与专利、供应链，五个方面透视铜金属3D打印技术的发展趋势及潜力。希望本白皮书能够推动铜金属3D打印技术在我国的应用发展。

感谢合作伙伴对本白皮书的支持，更多信息请访问：www.3dsciencevalley.com

3D科学谷市场研究团队.2021年

铜金属宏观市场



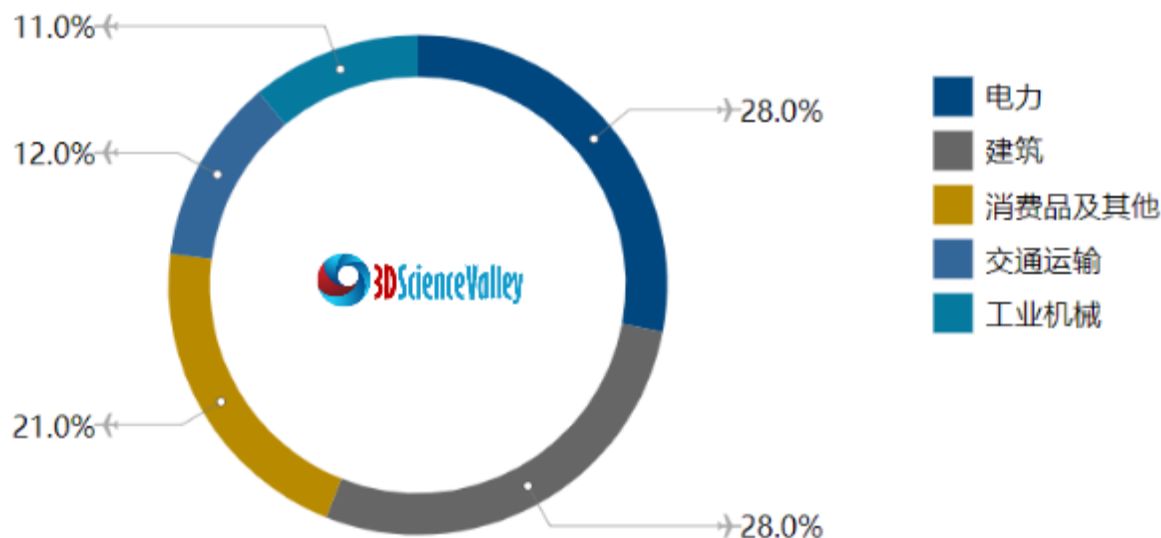
www.3dsciencevalley.com

1 铜金属宏观市场概况

铜和铝是市场需求最大的两种有色金属，下游分布广泛，需求和经济运行正相关。随着各国货币、财政政策发力以及疫苗接种带来的经济复苏，全球经济度过难关，进入复苏日趋明朗。中国2021年一季度GDP同比增长18.3%。尽管印度疫情再起，全球主要经济体4月PMI维持较高水平，其中美国和欧盟PMI高于60，全球经济复苏的态势未变，铜、铝均需求前景良好。

铜材是铜消费的主要产品形态，能较大程度反映铜铝需求。全球最大的铜产销国中国，2021年一季度铜材产量同比大幅增长14.8%，已高于疫情前水平，显示铜铝需求较为旺盛。

全球铜消费结构

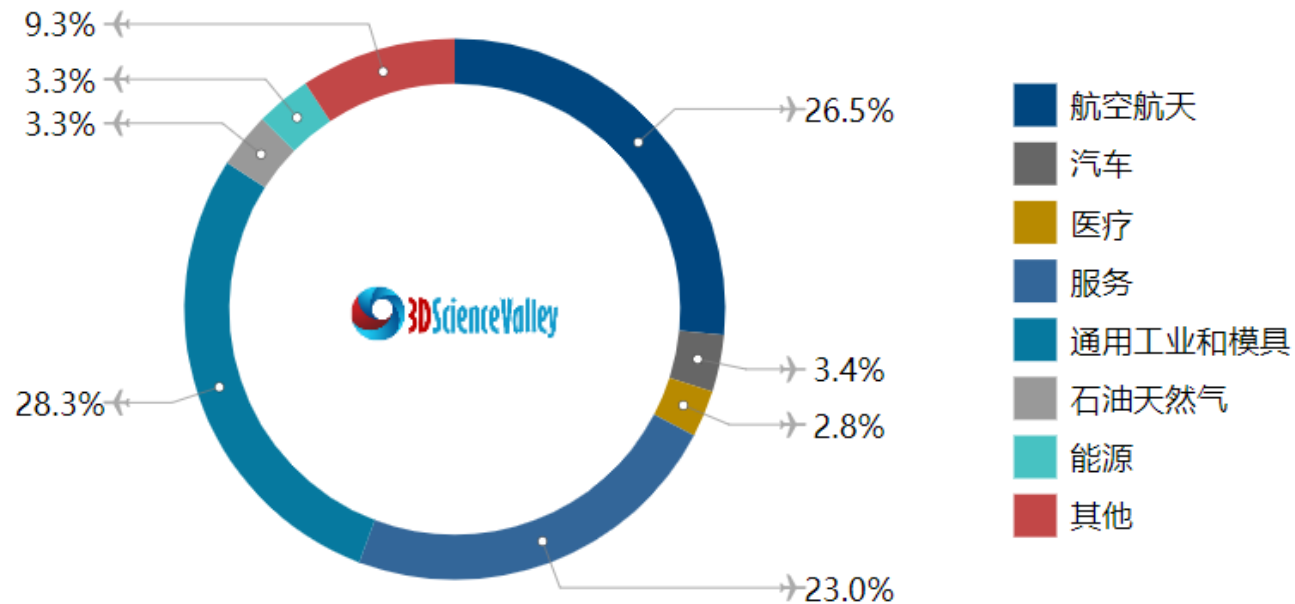


2 铜金属增材制造市场发展趋势

根据3D科学谷全球战略合作伙伴AMPOWER的市场研究，2020年增材制造铜和青铜原材料消费量为73吨，预计2025年增长至495吨。目前，电动机及其系统以及热导体中都考虑使用增材制造铜组件。此外，增材制造铜金属组件还被用于制造航天发动机中的散热部件。

纯铜及铜合金增材制造应用还涉及到医疗、模具、油气、能源等其他领域。

2020年增材制造铜粉应用领域



铜金属增材制造技术



www.3dsciencevalley.com

铜、铜合金增材制造工艺

直接打印工艺

工艺

材料



粉末床工艺

选区激光熔化、电子束熔融

Cu1、Cu2、CuCrZr、CuNiSi、CuSn10等粉末



定向能量沉积

LENS

纯铜、CuNi、GRCop-84等铜、铜合金粉末



超声波增材制造

UAM

纯铜、紫铜片材（可与铝等金属焊接在一起）

间接打印工艺



材料挤出工艺

FFF、FDM

纯铜丝材



光固化工艺

数字光处理-DLP

纯铜粉与树脂混合浆料



粘结剂喷射工艺

纯铜粉末

+

对3D打印生胚进行脱脂和烧结*

*粘结剂喷射纯铜3D打印零件或将需要热等静压才能满足致密度要求。

左侧图片来源（上-下）1. 通快；2. Optomec；3. Fabrisonic；4. Markforged 5. HOLO 6. Digital Metal。

4

激光增材制造纯铜加工难点

铜金属的优点

- 高导电性
- 高导热性
- 高反射性
- 耐腐蚀性
- 高表面光洁度
- 无磁性
- 良好的延展性
-



铜激光增材制造的难点

- 激光吸收率低 (1064nm波长下铜的吸收率只有为2-3%, 激光束能量的97-98%被反射了) 损害设备元器件
- 常规粉末床激光设备无法使其完全熔化
- 无法形成平整表面



解决方案

设备

- 高激光功率克服激光吸收率低的问题, 优化惰性气体并改造设备。
- 515nm的连续激光器 (绿光激光器), 提高激光吸收率。
- 波长450nm的光纤耦合高亮蓝激光器。

材料

- 合金化
- 表面改性-金属颗粒表面镀一层几百纳米的低反射率金属

❄️ 铜金属的加工

亚琛增材制造中心ACAM的增材领域研发伙伴之一Fraunhofer ILT弗劳恩霍夫激光研究所推出了“SLM绿色”解决方案。该方案中的激光器波长为515nm，这意味着更少的激光功率输出。此外，激光束可以更精确地聚焦，使其能够使用新的选区激光熔化增材制造工艺制造更加精细的部件。

Fraunhofer IWS 研究所通过绿光3D打印技术制造复杂纯铜3D打印零件，其先前的实验反复表明，功率高达500瓦的红外激光束不足以完全熔化铜，所使用的能量中只有30%到达铜材料—其余的能量被金属反射，而最大功率为500瓦的新型绿色激光器提供了独辟蹊径的解决方案：铜粉吸收了70%以上的能量并完全熔化，从而使其可用于增材制造。



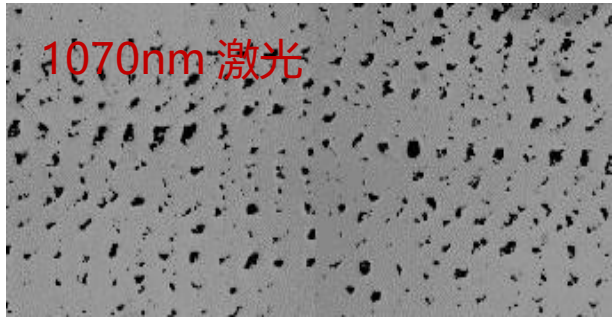
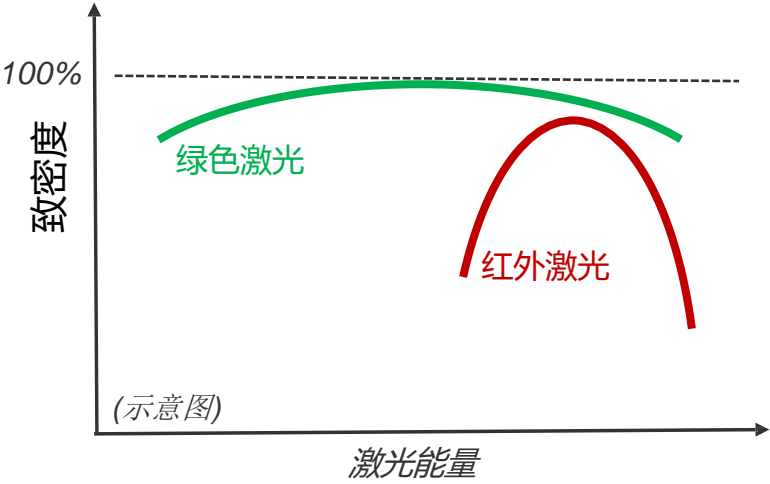
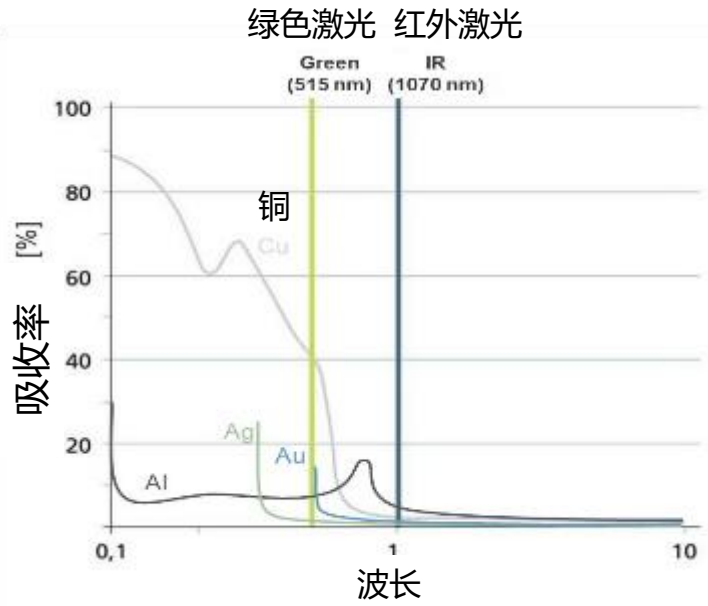
3D打印复杂设计的铜组件©Fraunhofer IWS

6 绿色激光纯铜打印工艺

515nm 激光
致密度 > 99.95%

绿色激光纯铜打印的可能性

- 515nm 高吸收率
- 生产率提高
- 纯铜、贵金属和有色金属材料加工的质量可重复性
- 高致密度



红外激光纯铜打印的挑战

- 1070nm 纯铜难加工—生产力有限
- 铜合金作为常见替代性材料但导电性和导热性受限
- 小工艺窗口质量有限且过程稳健性低

以上数据由德国通快 (TRUMPF) 提供

❄️ 铜金属的加工

2018 年，岛津公司拟（日本）实现了其 BLUE IMPACT 蓝光冲击二极管激光器的商业化，这种激光器可以在高亮度下产生 100 瓦的功率。这款产品是岛津公司与日本大阪大学合作开发的，是日本国家项目的一部分。

BLUE IMPACT 激光器结合了日亚化学公司（日本）的许多氮化镓 (GaN) 蓝色激光二极管，自 2006 年以来效率提高了一倍，输出功率提高了一个数量级。岛津 450 纳米蓝色二极管激光器的一个关键应用是铜材料的 3D 打印。

铜对蓝色激光的吸收率很高，背反射的减少可以使加工过程变快，而这对传统的红外激光器是一个严峻的挑战。

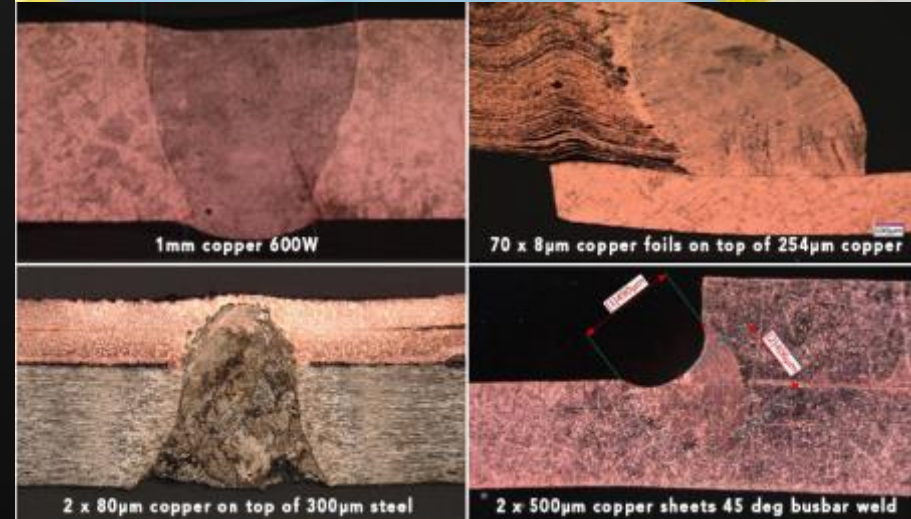


“蓝色”激光增材制造应用

NUBURU 以高功率蓝色激光技术为核心的企业，该公司已融资2000万美元，用于发展工业生产线并开拓能量存贮、电动车和3D打印市场。

激光熔覆和激光金属沉积 (LMD) 是将原材料加热到其熔点并粘附到表面的两种应用。根据 NUBURU，蓝色激光的优势允许将铜熔覆到不锈钢上（反之亦然）。

工业蓝色激光可以将铜金属进行逐层熔覆，这一优势延伸到激光金属沉积增材制造工艺 (LMD)，对于金、铜、铝和其他反射金属而言，蓝色激光的构建速度比红外线激光快 10 倍，并带来更高质量。



9 增材制造铜、铜合金粉末技术要求

国标委制定了一系列的相关增材制造材料标准，《增材制造用铜及铜合金粉》标准便是该系列标准中一项。增材制造用铜及铜合金粉检测的关键指标大概有五个，分别为化学成分、粒度、松装密度、振实密度、流动性。

I化学成分 《增材制造用铜及铜合金粉》标准规定牌号主要有Cu1、Cu2、CuCrZr、CuNiSi。化学成分检测元素主要为、铜含量、铬含量、钴含量、镍含量、硅含量、磷含量、锡含量、钡含量、铅含量、砷含量、铁含量、铈含量、铝含量、硫含量、锰含量、锌含量、氧含量以及杂质总和。这里主要参考的是GB/T5231规定的T2、T3、TCr1-0.15、TNi2.4-0.6-0.5化学成分要求。不过也增加了粉末氧含量要求，Cu1粉氧含量要求为 $\leq 0.05\%$ ，Cu2、CuCrZr、CuNiSi粉的氧含量要求为 $\leq 0.1\%$ 。CuSn10粉末成分接近GB/T 1176标准中铜合金ZCuSn10P1，该合金中P元素主要是提高金属溶液流动性和合金耐磨性，结合CuSn10粉末产品成分将P元素含量要求从0.8~1.1%放宽至 $\leq 1.1\%$ ，并增加了氧含量要求 $\leq 0.1\%$ ，其他成分也可参考依据GB/T 1176检测。

I粒度 标准中粉末适用于粉末床熔融（选7区激光熔融）增材制造领域，粒度范围为15~53 μm ；II类适用于粉末床熔融（电子束熔化）增材制造领域，粒度范围为45~106 μm 。粒度检测可按照GB/T 1480《金属粉末粒度组成的测定 干筛分法》和GB/T 19077《粒度分布 激光衍射法》的规定执行。

I松装密度 铜及铜合金粉的松装密度检测要求为应不小于4.20g/cm³。

I振实密度 铜及铜合金粉的振实密度检测要求为应不小于4.50g/cm³。

I流动性 铜及铜合金粉的流动性检测要求应不大于25.0s/50g。

铜金属3D打印应用



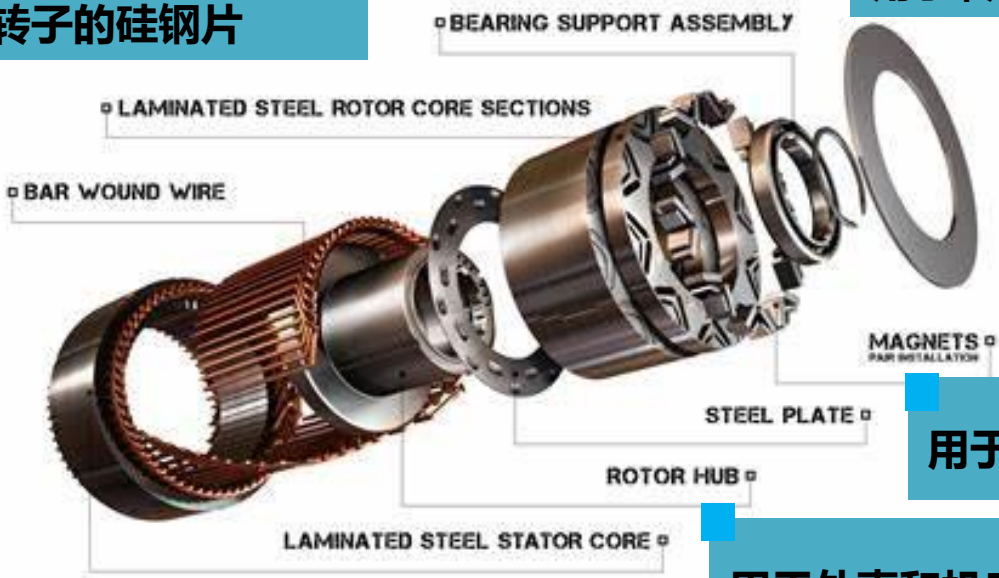
www.3dsciencevalley.com

驱动电机零件与材料组成

用于制造定转子的硅钢片

用于转轴和轴承制造的钢材

用于绕组的铜



用于制造定转子的硅钢片

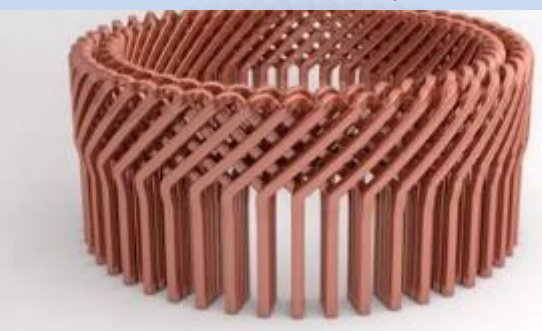
用于外壳和机座等部分的铸铁

Image: GM

3D打印绕组

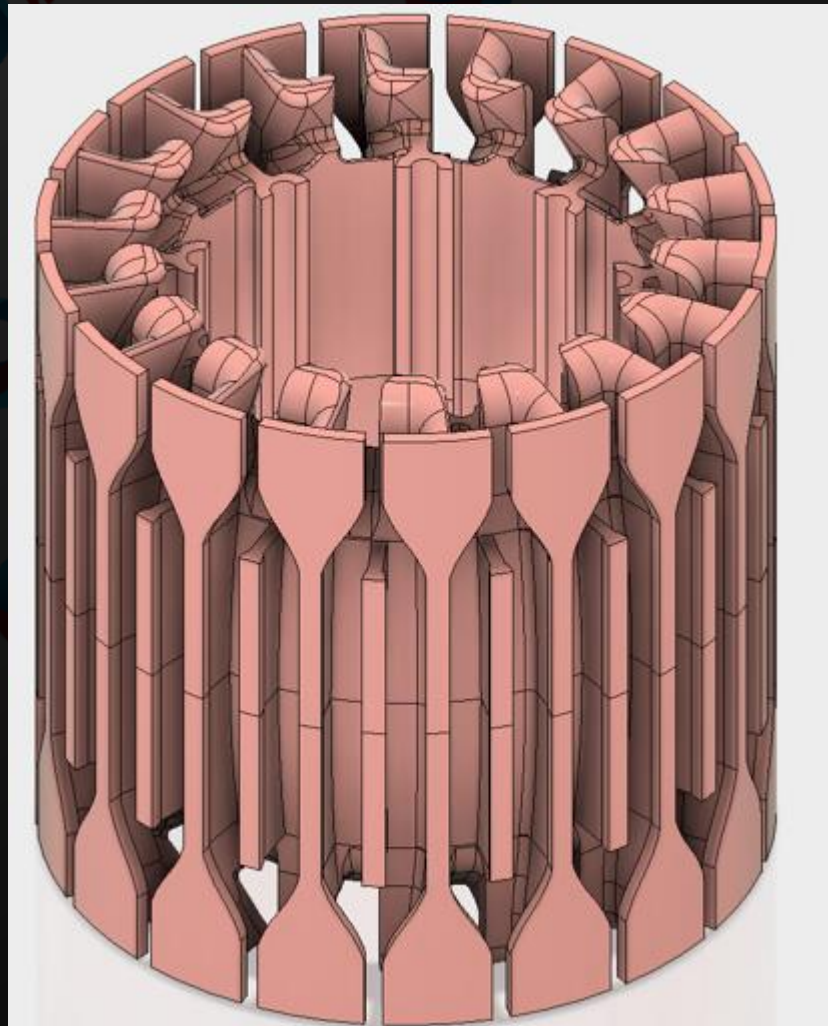


Image: Additive Drives



电力驱动及控制系统是电动汽车的核心，也是区别于内燃机汽车的最大不同点。电力驱动及控制系统由驱动电动机、电源和电动机控制装置等组成。电动汽车的其他装置基本与内燃机汽车相同。电力驱动子系统由电控单元、控制器、电动机、机械传动装置和驱动车轮组成。主能源子系统由主能源、能量管理系统和充电系统构成。辅助控制子系统具有动力转向、温度控制和辅助动力供给等功能。

使用铸铜转子的电动机可以帮助普通感应式电动机有效降低电动机的转子损耗，从而帮助提高电动机的效率，在电动机损耗降低的同时，由于转化为热能能量减少，从而使得转子以及定子线圈温度降低。使用铸铜转子的电动机可以帮助普通感应式电动机有效降低电动机的转子损耗，从而帮助提高电动机的效率，在电动机损耗降低的同时，由于转化为热能能量减少，从而使得转子以及定子线圈温度降低。

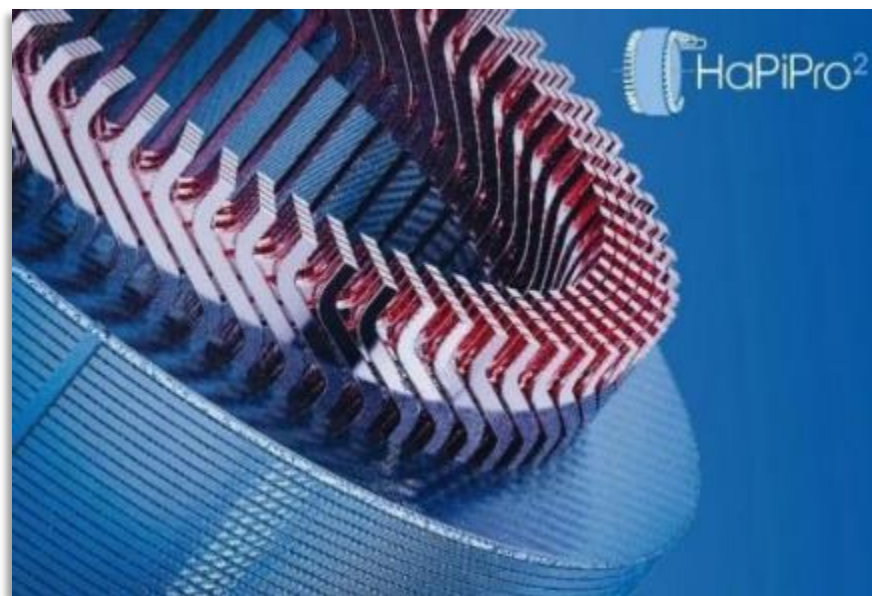


福特将与蒂森克虏伯系统工程，亚琛工业大学DAP学院一起，在一条生产线上开发灵活而可持续的电动机零部件生产。

该项目的名称是HaPiPro2，指的是发夹技术。发夹绕组是电动机领域中的一项新技术，矩形铜棒代替了缠绕的铜线。该过程比传统的绕线电机更易于自动化，并且在汽车领域特别受欢迎，因为它可以大大缩短制造时间。

3D打印适用于快速的原型制造，能够将测量结果实时反馈到仿真中，从而确保了所需的操作性能并提高了质量保证。

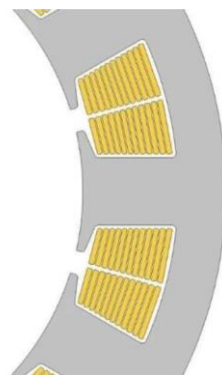
HaPiPro2项目不仅旨在高效构建高效的电动机，而且还旨在开发生产中的各种灵活性。亚琛工业大学把与面向应用程序研究有关的专业知识带到整个发夹的生产过程链。亚琛工业大学的任务还包括分析因果关系以及在生产计划中测试数字方法。



© Ford 福特

未来的驱动任务-无论是在工业领域还是交通领域-都对各个组件提出了很高的要求。电动机的经典制造工艺很快达到了极限。基于传统的制造工艺，优化的几何形状通常是不可能的，结果是设计者在性能和效率上进行折衷。

德国Additive Drives 公司通过3D打印增材制造电动机定子绕组，不仅有望改善以上问题，而且电动机中较高的铜含量可减少损耗并改善绕组的热耦合。



3D打印的单个线圈的横截面：
通过选区激光熔化工艺制造，
可以调整每一匝，以最佳方式
利用可用的槽口面积。铜填充
系数约为65%。

- 几何形状完美匹配的线圈可最大程度地提高铜填充率
- 用于直流电压800 VDC
- 从绕组到叠片铁心的强制传热可防止热点形成
- 可变导体厚度以减少电流位移
- 为获得最佳性能而开发

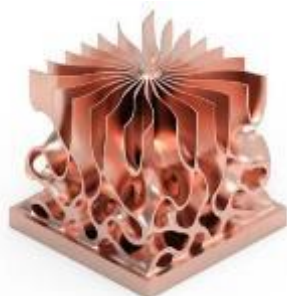
基于选区激光熔化的3D打印技术为电机定子绕组带来更高的设计自由度，使得凹槽中的铜含量更大。从物理上讲，这意味着匝的最大横截面和较小的电阻。而通过3D打印所实现的可变的形状还有利于散热，因为每条电线都与线圈的所谓叠片铁芯热接触，因此没有热点。



热交换、散热器



1



2

散热器



3

热交换器
(Demo Part)



航空航天发动机



4



5

火箭发动机燃烧室



6

尾喷管

实现复杂一体化、功能集成设计

纯铜具有超高的传热和导电能力。德国通快TruPrint 1000 绿光版3D打印设备能够进行纯铜金属零件的增材制造。该设备使用波长为515纳米的绿光激光器 TruDisk 1020, 可采用指定铜含量大于 99.9% 的高导电纯铜ETP (EN CW004A), 能够实现 100% IACS 的电导率和远低于 0.5% 的孔隙率。



TruPrint 1000 绿光版3D打印设备
©德国通快



重量	190 克
打印时间	32.5 小时 (整版)
层厚	3217 à 30 μm



面向增材制造的设计更改了芯片冷却方法, 提高了一倍的冷却效果, 从而可以选择更便宜, 功率更大的芯片。



材料 纯铜
通过内部集成的随形冷却通道, 散热器的冷却性能得到提升。增材制造可实现这一复杂设计并进行灵活的生产。

16 直接打印工艺铜散热器制造应用

选区金属熔化3D打印技术

TheSys开发的CPU热交换器，结果是CPU冷却器以相同的冷却性能运行，却节约了81%的空间。并且极大地缩短了开发时间（和成本）。除了CPU冷却器外，还可以用于其他电子应用，包括高功率LED，激光器，自动驾驶单元，电力电子和化学微反应器。

由Heraeus增材制造有限公司与Hyperganic Technologies合作设计和制造的铜质热交换器。



© Heraeus

雷尼绍与nTopology合作展示了一种将软件与增材制造系统结合，设计3D打印铜散热器的简单方法。



© Renishaw



© EOS

17 间接打印工艺铜散热器制造应用

间接打印-材料挤出3D打印技术

Markforged 基于材料挤出工艺的熔丝制造 (FFF) 技术, 使得3D打印铜变得简单。铜金属粉末与粘结剂混合加工成长丝, 3D打印完成后, 用户清洗零件脱蜡, 然后将零件装入熔炉中, 熔炉去除残留的粘结剂, 然后将粉末烧结成最终的全金属零件。

德国初创企业TSI采用FFF技术实现了高密度、结构复杂、无氧纯铜散热器3D打印。



© TSI



© Markforged

Desktop Metal通过材料挤出工艺打印的电机散热片。



© Desktop Metal

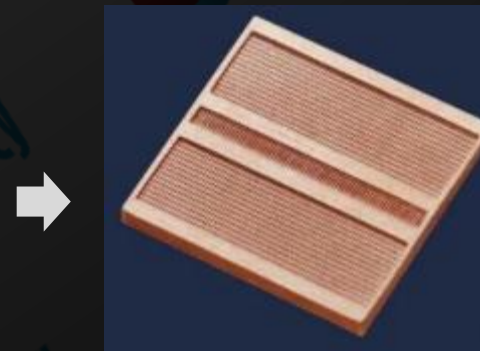
18 间接打印工艺纯铜增材制造应用

美国Holo公司实现了DLP技术3D打印铜散热器零件，并且希望每年制造数百万个零件。Holo采用的浆料数字光处理（DLP）技术，通过为散热器生产具有成本效益的，拓扑优化的零件，该公司希望在处理器，逆变器和电力电子设备中获得真正的吸引力。

Holo公司称其浆料具有极佳的分散性，在打印过程中可形成均匀的层厚，打印机可在不到10s的时间内固化新层。目前，Holo通过DLP+脱脂烧结工艺成型的纯铜的致密度平均为96-98%，足以达到大块铜95%的导热率和导电率。

Holo着重于散热器件的开发与制造，而不是销售3D打印机。Holo目前一条试验生产线每月可生产2万个纯铜小零件，并希望每年生产数百万个铜散热片零件。

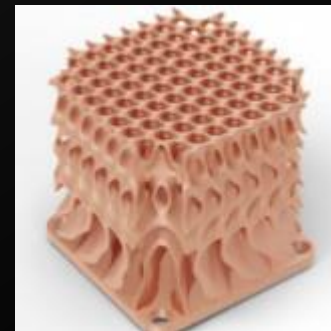
间接打印-DLP 3D打印



© Holo

间接打印-粘结剂喷射3D打印

2021年初，Digital Metal宣布推出纯铜3D打印材料，成为第一个为粘结剂喷射3D打印系统提供官方认证的纯铜材料和工艺的设备商。根据Digital Metal，通过粘结剂喷射技术成型的纯铜致密度为96.6%，铜纯度为99.9%。



© Digital Metal

一体式3D打印热交换器为制造商节省了资金，在过去，组装需要将非常细的管钎焊到歧管上。这不仅经常导致高压应用中的大量泄漏情况，而且该过程不必要地具有挑战性。3D打印的交换器不会遇到这个问题，因为所有部件都是在一个连续的过程中组合在一起的。3D打印的热交换器比其他方式制造的热交换器更轻，更有效。某些案例中通过3D打印技术生产的热交换器比使用其他方法生产的热交换器轻约20%，效率高20%。



© EOS



铜与不锈钢两种金属材料的一体化热交换器结构件



© DMGMORI

高纯铜具有很高的导热性，这种特性使得激光在加热纯铜粉末时会产生较其它常规材料更大的局部热梯度。这使得零件容易产生分层、翘曲或者其他缺陷，致使零件成形失败。

高纯铜对主流SLM 设备所用激光具有很高的反射率。目前主流选区激光熔化技术所用激光器波长为1064nm或1090nm。高纯铜对这些波长的激光吸收率仅为5%，这不仅会直接导致大部分输入的能量浪费、成形零件致密度不高，反射的激光也会损伤设备内部的光学器件。

铂力特能够针对纯铜增材制造，提供搭载绿激光配置的金属增材制造定制设备。这种短波长激光的应用将提升铜零件成形的成功率及致密度，同时降低能量损失和对设备损坏的可能性。



铂力特突破纯铜尾喷管激光增材制造技术，可实现具有复杂流道的纯铜制造工艺，为航天等领域铜加工制造提供了新型创造途径。

纯铜尾喷管

材料：纯铜

尺寸 (WDXH) : $\Phi 210\text{mm} \times 295\text{mm}$

机时：96 小时

设备：铂力特 BLT-S310

重量：2813g

选区金属熔化3D打印技术



▲ LCUSP项目-火箭燃烧室腔室

- 基于选区激光熔化 (L-PBF) 工艺开发了铜合金GRCop-84 的3D打印技术。
- 成功地在超过1400 psig的腔室压力下完成了双金属腔室增材制造工艺的开发、表征和热火测试。

▼ RAMPT项目-基于LCUSP 及其他项目开发的增材制造技术

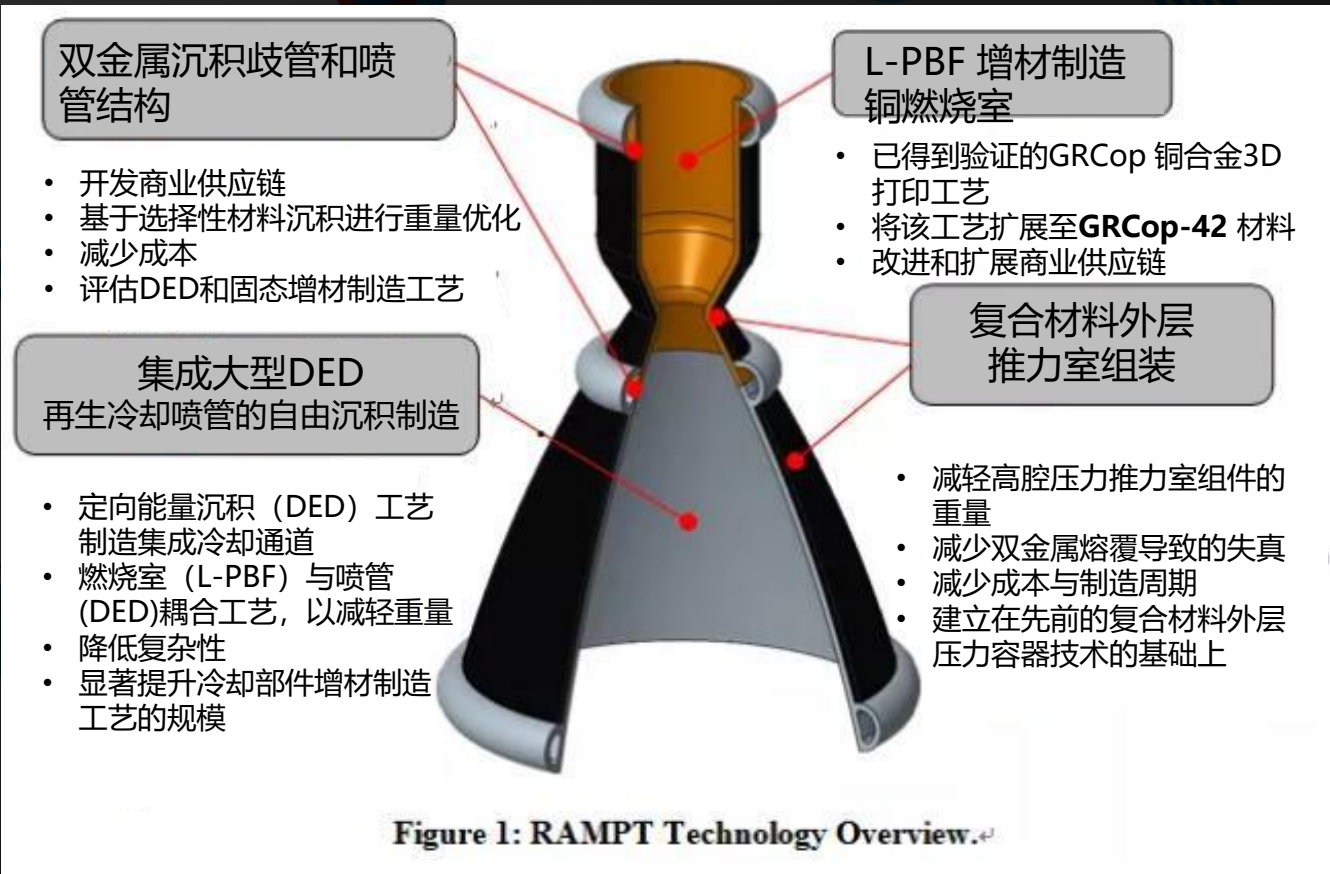


Figure 1: RAMPT Technology Overview.

来源: NASA
Lightweight Thrust Chamber Assemblies using Multi- Alloy Additive Manufacturing and Composite Overwrap/2020 AIAA Propulsion and Energy Forum

Launcher E-2液体火箭发动机 3D打印铜合金燃烧室

E-2 是Launcher和AMCM 合作制造的，使用的是一台为AMCM 定制的选区激光熔化设备。

E-2火箭发动机的推力为10吨力（22,000磅力），高度为85厘米（33.5英寸），直径为40厘米（15.7英寸）。在这款发动机中，发动机的燃烧室和喷嘴被设计为一个整体的部件，它将实现更高的冷却性能，同时减少零件数量和对装配的需求，最终通过金属3D打印技术来实现这样的复杂设计。



传统电感器线圈



电感线圈需要经历若干机械制造工序，线圈通过手动弯曲和焊接达到想要的形状，其中小块铜（管）被放在一起并焊接。传统制造工艺通常只能实现相对简单的标准形状。

增材制造电感线圈



设备	通快TruPrint 1000 绿光版
重量	100 克
打印时间	5.3 小时
层厚	2142 à 30 μm

- ▶ 通过粉末床3D打印技术整体成形，无需手工弯曲和焊接。
- ▶ 设计自由度提升，可根据应用需求灵活调整设计。
- ▶ 通过设计、打印质量控制、软件使质量更具可重复性。
- ▶ 优化几何形状，提升性能。如增加冷却面积，提高寿命。

常规设备+铜合金¹+热处理

导电性：89.26% IACS

绿光设备+纯铜

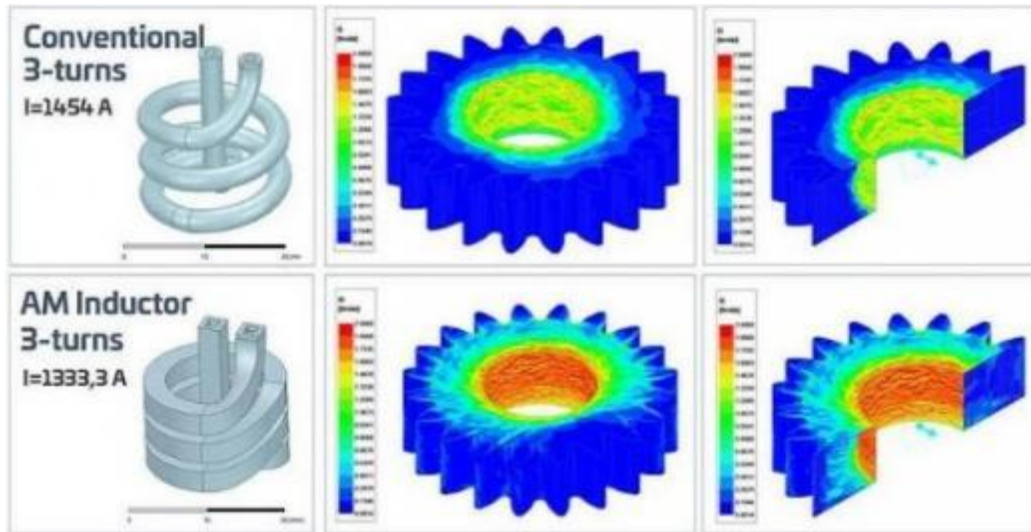
导电性：100% IACS

参考资料来源：GKN、德国通快。
备注：1. 此案例中使用的铜合金为：CuCr1Zr。

24 面向增材制造的设计提升电感器线圈性能

在设计3D打印线圈时，吉凯恩（GKN）考虑了粉末床激光熔化技术所产生的几何形状和设计自由度如何提高材料的特性，从而在性能、耐用性、效率和成本方面，比传统工艺制造的纯铜线圈（焊接或弯曲）更具优势。

吉凯恩将其中一个3D打印的铜线圈与手工弯曲的纯铜线圈进行了感应淬火仿真分析，展示了3D打印铜电感器线圈获得更好结果的多种方式。实验中对两种感应线圈版本都保持相同的边界条件、磁激励和仿真频率。如下图所示，仅看设计外观就可以看到两种设计的明显区别，传统线圈为圆形管结构，3D打印线圈为方形管结构。



在此样本中，由增材制造线圈激发产生的磁场比传统线圈产生的磁场更具穿透性。增材制造线圈硬化层的厚度大于常规线圈的硬化层。（边界条件和负载： $f = 100\text{ kHz}$ ，相同的磁激励）。来源：GKN

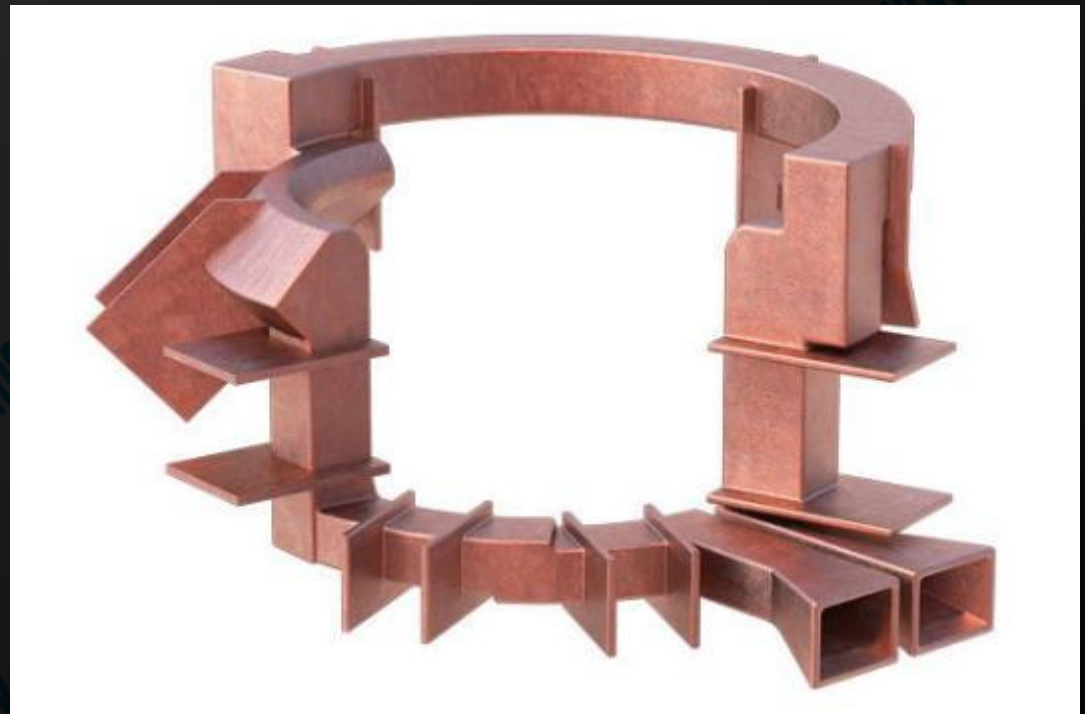
3D打印线圈的几何形状能够对性能做出许多改善。集成空心方形线圈增加了冷却面积，从而延长了线圈的使用寿命并降低了能耗。传统弯曲的线圈需要的电流值为 $1,454\text{ A}$ ，而3D打印的线圈仅需要的电流为 $1,333\text{ A}$ 。

吉凯恩开发了从材料、先进设计、打印、质量控制的完整3D打印铜线圈增材制造工艺，并结合ADDvantage生产软件，来实现质量的可重复性。这一数字化的制造方式表现出色比传统焊接、弯曲工艺更高的重复性。与焊接线圈相比3D打印线圈的耐用性至少是弯曲线圈的两倍，这是因为整个结构的壁厚是一致的，而弯曲线圈则显示出弱点和弯曲处较薄的壁厚。

著名感应加热设备制造商GH Induction 已推出了3D打印铜金属产品-3DPCoil感应器。GH Induction 对其感应加热处理设备中的感应器进行了设计迭代，并使用电子束熔融（EBM）金属3D打印技术来制造迭代后的感应器-3DPCoil，GH Induction 已为其3D打印铜感应器申请了专利。

3DPCoil的产品优点正是来自3D打印技术，主要优势在于无需使用钎焊就可以制造出一体式的铜感应器，铜感应器的密度是均匀的，感应器的冷却效果得到优化。3D打印铜感应器的使用寿命与上一代感应器相比得到了显著的提升，对于使用感应加热设备的制造业用户来说，这意味着能够减少更换感应器的频次，继而减少生产时间，节省每个零件的制造成本，提高对设备的投资回报率。

电子束熔融3D打印技术



穆格着眼于在提高金属增材制造方面的工艺知识和冶金理解以引领行业的发展，2018年穆格宣布将铜应用添加到其客户可用的日益增多的产品清单中。

铜金属的加工不仅仅涉及到穆格对其选区激光熔化设备的增材制造工艺的理解，对于铜金属的后处理能力和其他加工能力也是十分重要的。在3D打印过程中由于铜可以反射激光能量，简单地提高功率也会带来加工挑战。在后处理过程中，通过HIP（热等静压）和热处理来满足铜零件所要求的性能参数，这一切都在不断的探索和不断的完善过程中。

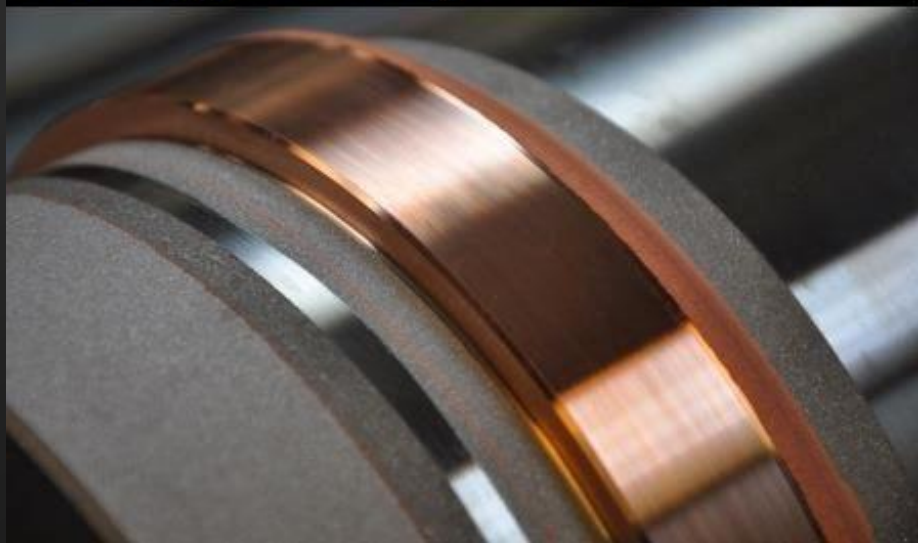
穆格的运动控制技术已经被广泛应用于民用机座舱、发电风机、一级方程式赛车、医用输液系统等众多的市场和应用领域，



© 穆格

Plasma Giken公司的高温、高压冷喷涂设备将铜材料冷喷到普通的不锈钢材料基底上，再通过CNC机床加工来获得两种不同材料结合的法兰零件。Plasma Giken公司的冷喷涂设备由北京联合涂层技术有限公司代理。

Pure copper coating on steel substrate



在亚洲，日本东北大学早在2010年左右就开发出这项技术，并用于零件的修复。日本东北大学副教授小川和洋率领的研究小组将这项技术称为纳米修补技术，使修补损坏的金属表面更为简便。



研究成果与专利



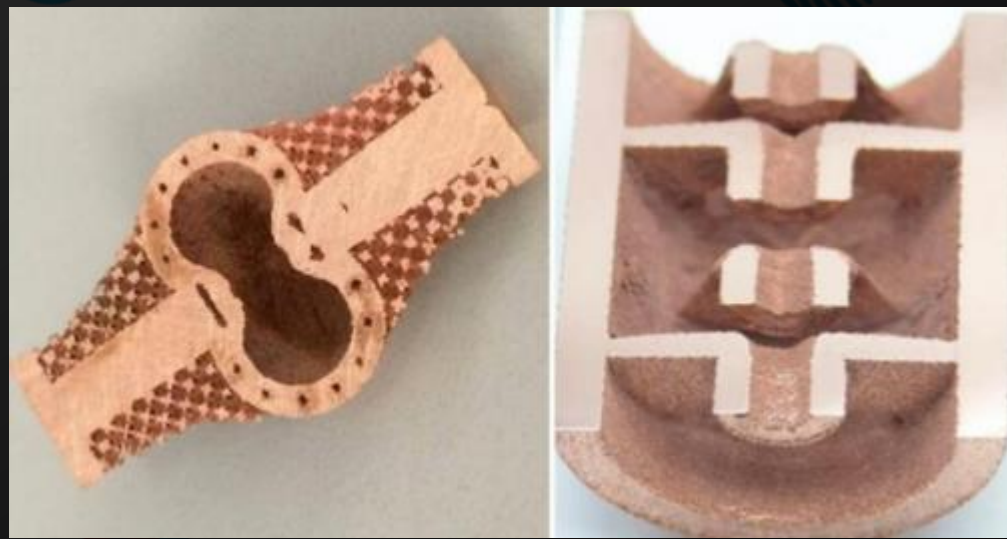
www.3dsciencevalley.com

28 加速器和真空设备组件铜增材制造应用探索

美国SLAC国家加速器实验室、北卡罗来纳州立大学等机构的研究人员，正在通过改善铜粉末表面质量和电子束熔融（EBM）3D打印技术，克服纯铜材料增材制造领域的挑战。研究中使用的打印材料为高纯度的铜粉。在计算机控制下，打印机进行逐层铺粉和打印，电子束将材料加热到约2000华氏度，将下一层材料与上一层焊接在一起。

对于加速器应用而言，铜通常需要达到或超过1级无氧电子（OFE）铜的ASTM F68的要求，这些设备需要极高的质量和纯净的材料，以避免零件故障（例如破裂或真空泄漏）。尽管铜合金3D打印技术得到了发展，但进行高纯度铜增材制造仍是困难的。研究团队通过首先改善材料的表面质量，使用更细的铜粉并改变将层融合在一起的方式来解决这些挑战。但是，使用更细的铜粉使更多的氧气附着在铜粉上，增加了每层中的氧化物，使打印物体的纯度降低。

研究团队需要找到降低铜粉中氧气含量的方法，他们采用的方法是通过氢气将氧气结合成水蒸气，并将其驱离粉末。



与这一方法相关的研究论文发表于Applied Science杂志中，论文题为“Characteristics and Processing of Hydrogen-Treated Copper Powders for EB-PBF Additive Manufacturing”。

29 表面改性材料，降低反射率

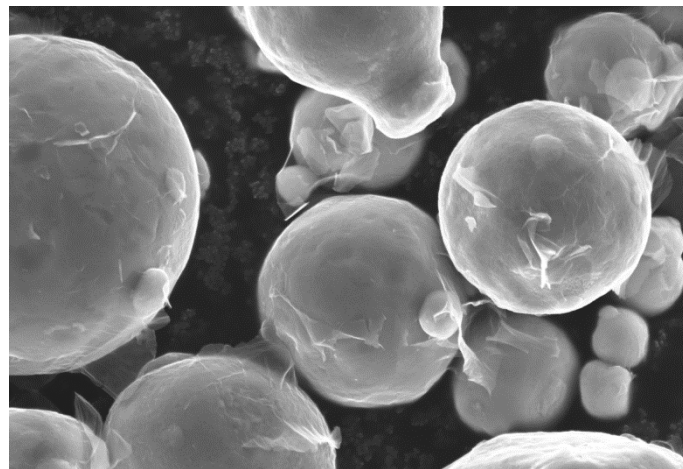
乌普萨拉大学的研究人员与瑞典石墨烯材料公司Graphmatech合作，证明了用于激光增材制造（AM）在铜的可打印性方面存在的潜在突破，可显著降低铜粉的反射率，从而获得更致密的增材制造铜金属零件。

研究人员通过使用Graphmatech的专利石墨烯技术对铜粉的表面进行改性，成功地将铜粉材料的激光反射率降低了67%。

石墨烯在增材制造过程中也能存留下来，从而对3D打印铜-石墨烯零件的密度产生积极影响，显著降低其孔隙率。



石墨烯改性铜粉测试件 © Uppsala University

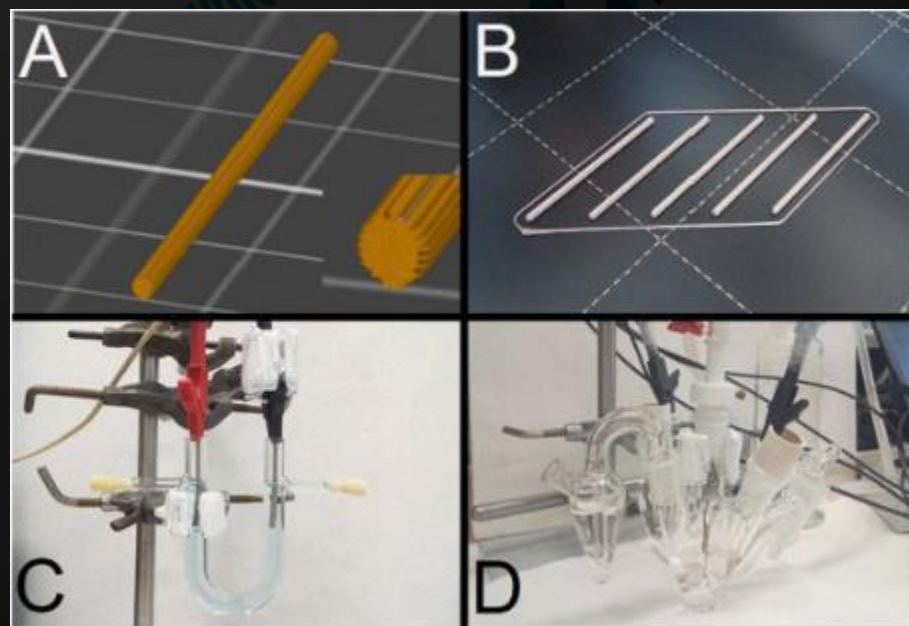
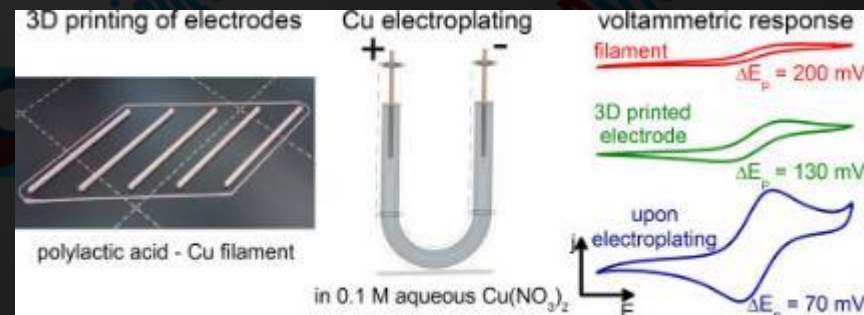


铜粉末颗粒表面涂层为通过Graphmatech 公司的专利石墨烯材料。© Uppsala University

通过3D打印方法制造电极已被认为是基于减材制造工具的传统制备技术的一种快速，廉价和环保的替代方案。但是，3D打印电极通常对电子转移显示出相当大的固有动力学势垒。

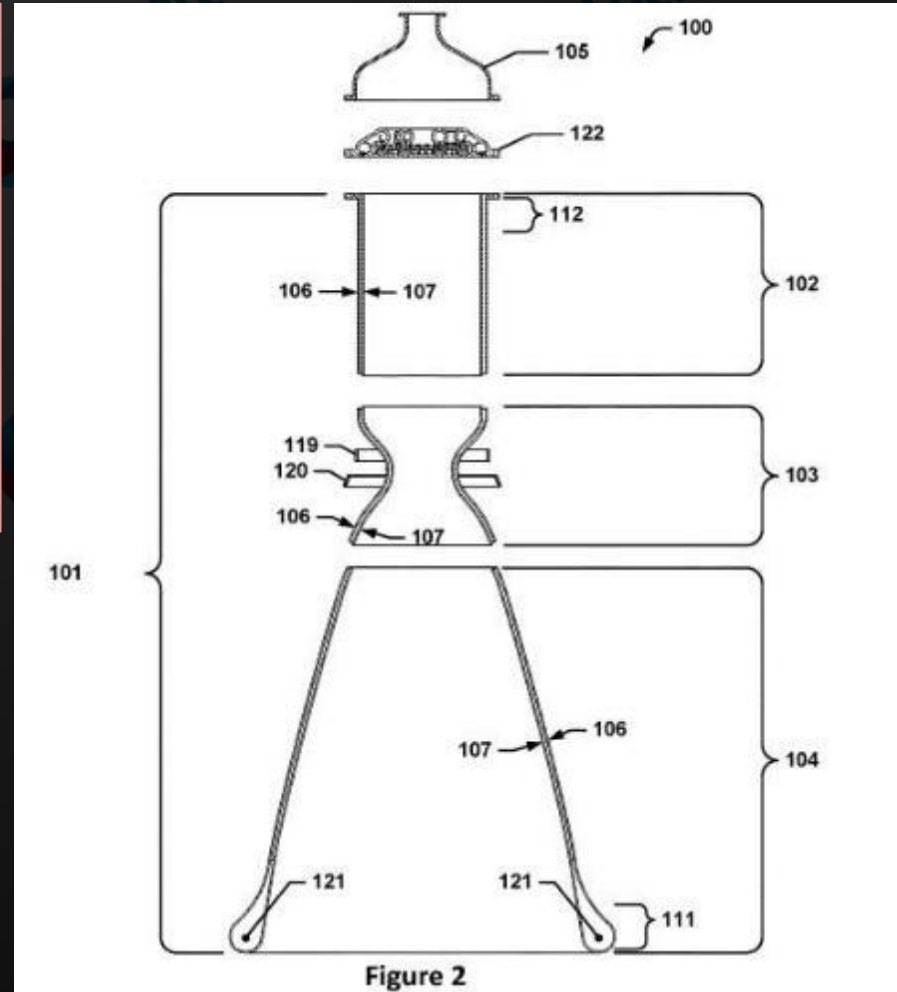
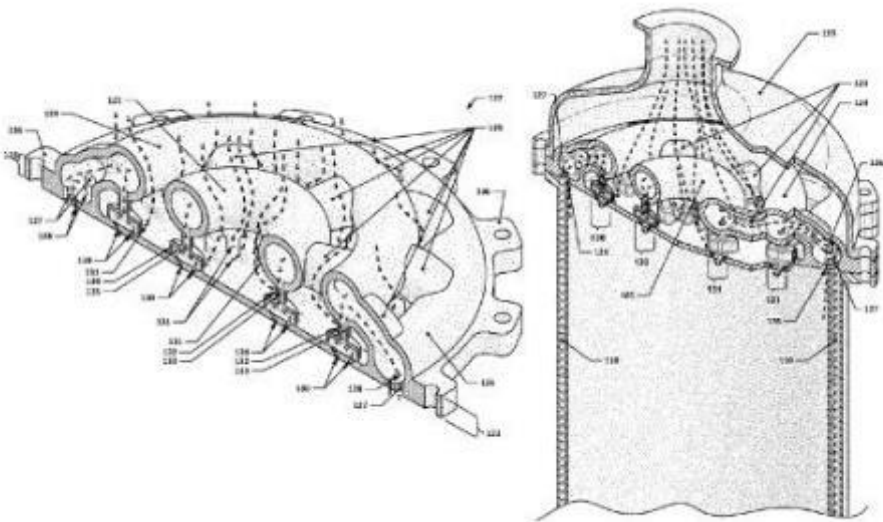
在捷克科学基金会（18-09848S和19-03160S）和CTI 瑞士能源研究能力中心（SCCER热量和电力存储）的财政支持下，科学家们采用熔融沉积3D打印技术来加工聚乳酸/铜复合细丝制造电极，并通过电镀铜对其进行表面功能化，以消除这种动力学障碍。

这种3D打印功能电极的方法，通过操作安全，可靠的实验程序，最小的资本和运营支出，为金属化3D打印复合电极的制造开辟了新的方向。预计这种金属化电极将很快在电化学研究的各个领域以及教育机构的实验室课程中找到应用。



A) 由Slic3r软件生成的3D打印电极的结构以及显示电极端的放大图。
B) 3D打印的一批PLA-Cu电极。在这项工作中使用的实验装置，用于 C) 电镀铜和 D) 3D打印PLA-Cu电极的伏安法检查。

Rocket Lab所获批的专利US10527003B1(授权日2020年1月7日)，详细的披露了Rocket Lab通过增材制造工艺来制造火箭推力室、用于火箭发动机的喷射器和涡轮泵。3D打印的推力室可以使用钛合金(包括Ti.sub.6Al.sub.4V)，钢合金(包括不锈钢合金和马氏体时效钢合金)和Inconel合金(例如Inconel.RTM.625(UNS N06625)或Inconel.RTM.718(UNS N07718))或者铜合金。



推力室的分解侧视图
来源：Rocket Lab所获批的专利US10527003B1
(授权日2020年1月7日)

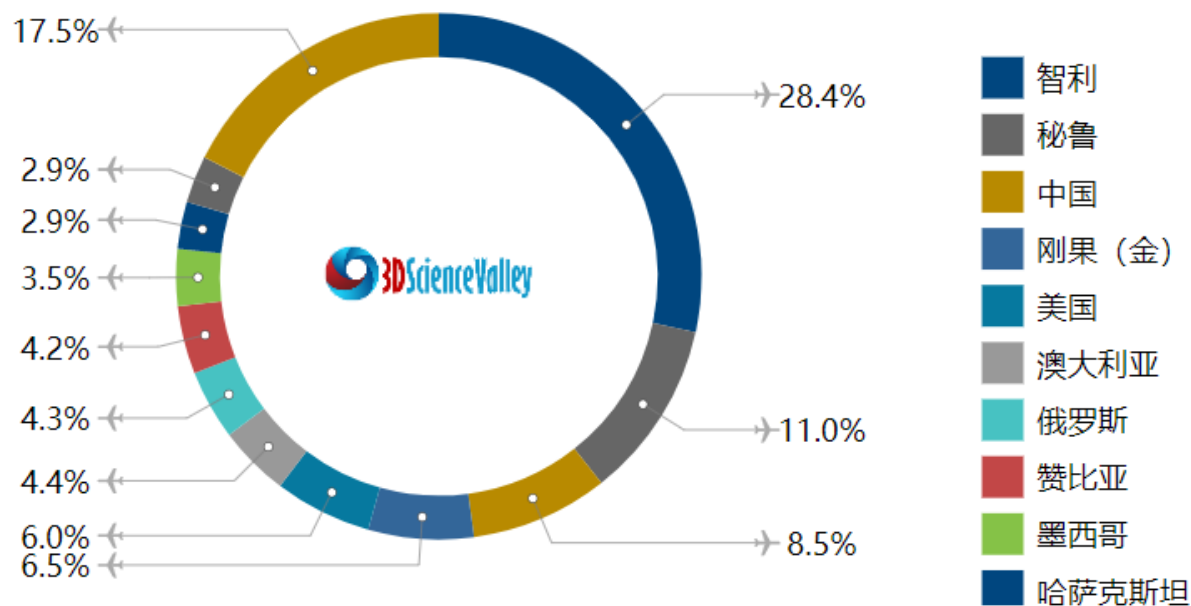
供应链



www.3dsciencevalley.com

由于铜矿品位下降以及近年来新项目开发较少，铜矿成为影响铜供给的主要环节，并导致铜冶炼的加工费持续下降。尽管2021年有新少量铜矿项目投产，但投产时间大多在下半年，对当年产量贡献较为也有限，铜矿供给偏紧格局短期难以环节。

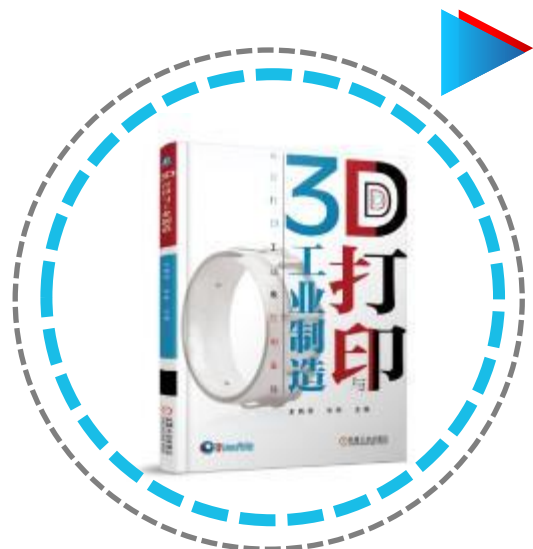
全球铜矿产量分布（2020年）



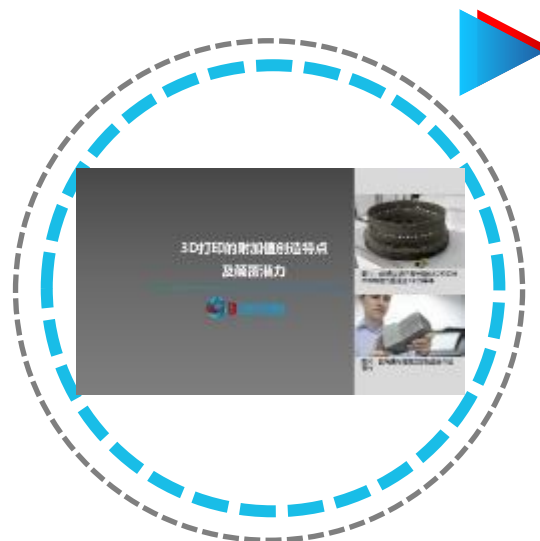
33 粉末床工艺铜、铜合金材料列举

企业	材料
Elementum	Cu (纯铜)
CNPC Powder	电解铜粉 (纯度99.7%)、雾化铜粉 (纯度99.7%)、CuSnZnPb 合金
GKN Additive	CuCr1Zr 合金
LPW(被Carpenter收购)	Cu(>99.8%)
Infinite Flex	Cu01 (>99.5%, SLM 铜粉可用于标准红外激光器设备)
HanaAMT	Cu (>99.5%,)、Cu80Sn20、CuCr1Zr、CuNi2SiCr
Sandvik	Cu、Cu-10Sn、Cu-15Sn
Eckart	CuNi3Si、CuAL10Fe5Ni5、Cu 99.99%.....
Heraeus	CuSn10、CuSn8
精研粉体	铜及铜合金粉、定制合金粉体.....
江苏威拉里	CuSn10

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



特别感谢对本白皮书制作的赞助支持：

德国通快
纯铜3D打印技术



铂力特
增材制造大·生产时代



- 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。