

铜金属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



铜

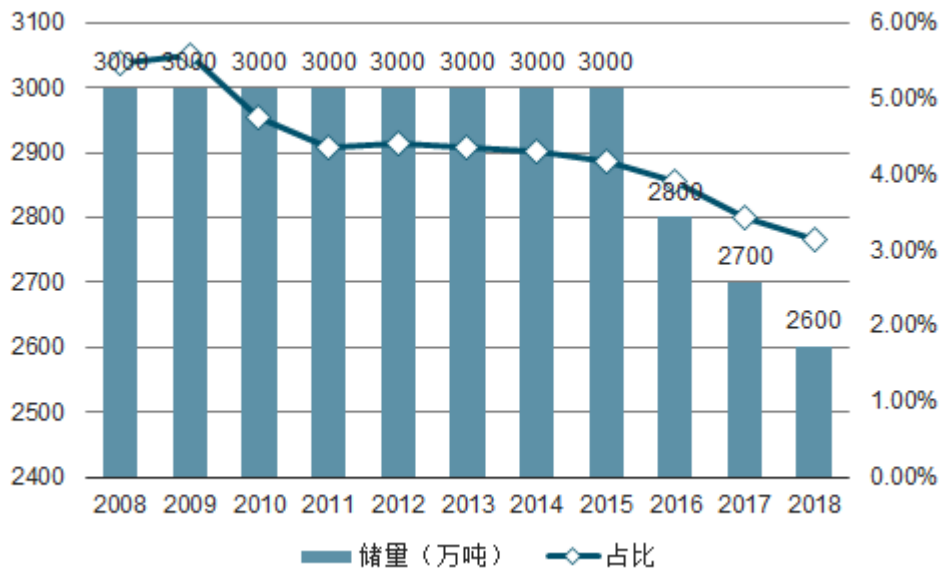


1 铜矿

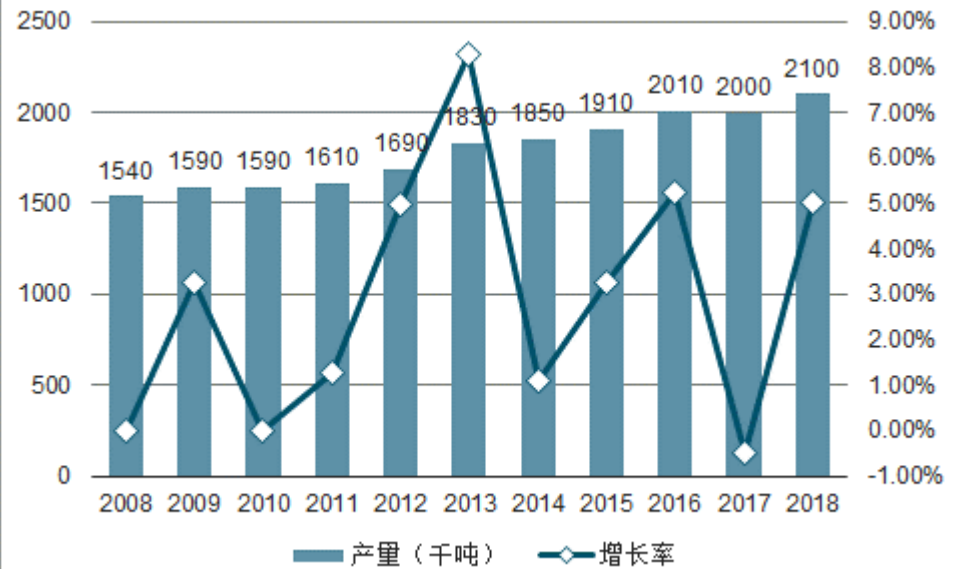
纯铜及铜合金由于极好的导电、导热、耐腐蚀性及韧性等特点，被广泛应用于电力、散热、管道、装饰等领域，有的铜合金材料因具有良好的导电、导热性和较高强度，被广泛应用于制造航空、航天发动机燃烧室部件。但是随着应用端对于复杂结构零部件的需求增多，传统加工工艺已逐渐无法满足需求。选区激光熔化金属3D打印技术具有可成形复杂结构零部件，材料利用率高，无需模具等优点，该技术在制备复杂结构的铜合金热交换器、尾喷管等零部件方面具有巨大的应用潜力。

铜矿指可利用的含铜的自然矿物计和的总成，中国开采的主要是黄铜矿，其次是辉铜矿和斑铜矿。我国铜矿资源十分匮乏，约占世界储量的3%，且有下滑趋势。

我国铜矿储量占比逐年下滑



2008-2018年全球铜矿产量及增速



2 金属3D 打印及铜金属2019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（例如电动车的电机转子），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。

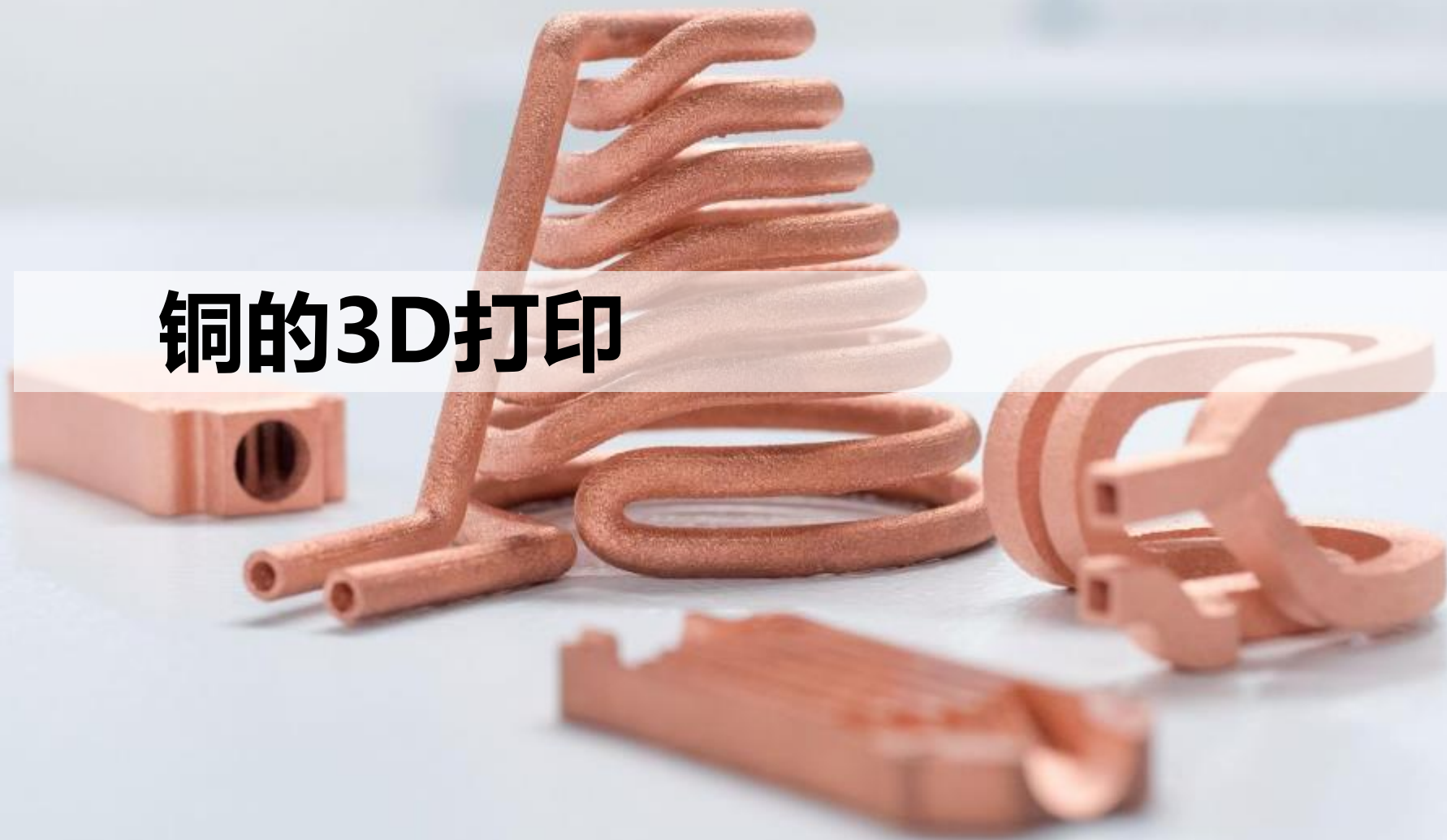
激光器

铜金属3D打印激光器的发展也促进了纯铜和铜合金的3D打印应用。根据3D科学谷的市场观察，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，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。

铜材料与3D打印

根据3D科学谷的市场观察，已投入应用的典型3D打印铜合金粉末材料还包括：CuNi2SiCr 铜合金粉末；NASA（美国国家航空航天局）开发的高强度，高导电率的铜基合金GRCop-42；GKN公司开发的CuCrZr、CuNi3Si材料，以及Heraeus公司开发的CuSn10和CuSn8等。在我国增材制造企业中，西安铂力特已在铜金属激光成形领域取得了进展，研制出针对难熔金属和高导热、高反射金属的3D打印工艺，实现了复杂流道的铜材料制造工艺，成功制备出3D打印铜合金尾喷管；长沙新材料产业研究院有限公司等材料企业进行了CuCrZr铜合金3D打印粉末的研发。德国Fraunhofer“SLM绿色”项目所推动了绿色激光器的发展，该激光器与1 μ m波长的波长相比更短，波长在515nm，旨在解决铜对激光的高反射问题。

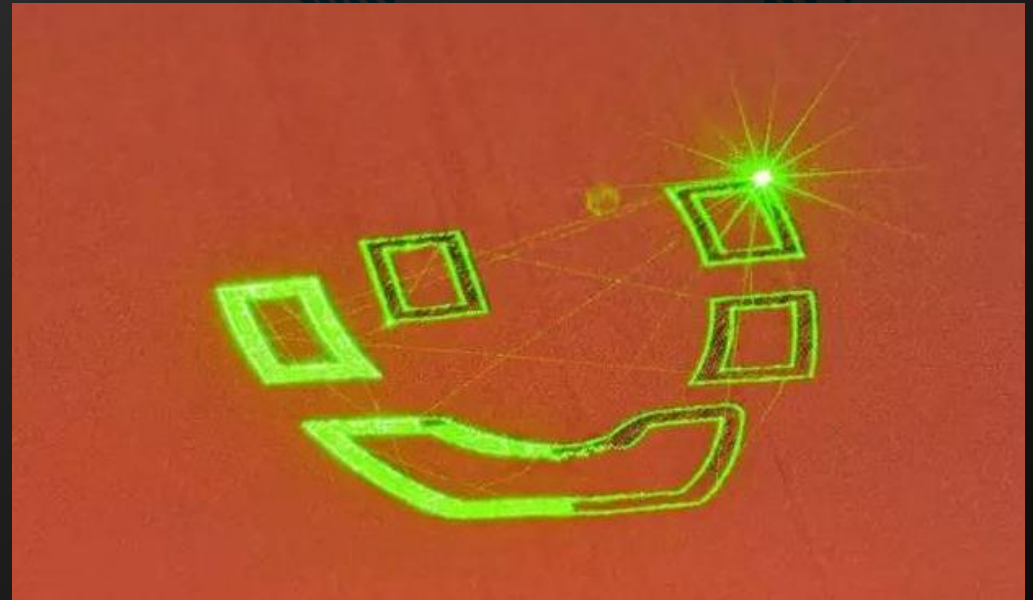
铜的3D打印



❄️ 铜金属的加工

由于铜的导热性和反射性极佳，这使得铜金属在3D打印机内部难以操作。虽然当前选择性激光熔化（SLM）3D打印技术可以用于制造铜金属粉末材料。但是铜金属在激光熔化的过程中，吸收率低，激光难以持续熔化铜金属粉末，从而导致成形效率低，冶金质量难以控制等问题。此外，铜的高延展性给去除多余粉末这样的后处理工作增加了难度。

Fraunhofer ILT推出了绿色激光器解决方案，与 $1\mu\text{m}$ 波长的波长相比更短，波长在 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SLM工艺制造更加精细的部件。



4 蓝光二极管激光器

❄️ 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，这对传统的红外激光器是一个严峻的挑战。新研发的 3D 打印机可以用纯铜粉高效打印物体。现有的 3D 打印机技术一般采用 CuCr1Zr 等铜合金来代替纯铜。



5 热交换器

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%。



图片来源：EOS



铜与不锈钢两种金属材料的一体化热交换器结构件



图片来源：DMGMORI

6 散热器 – 铜电子散热



铜

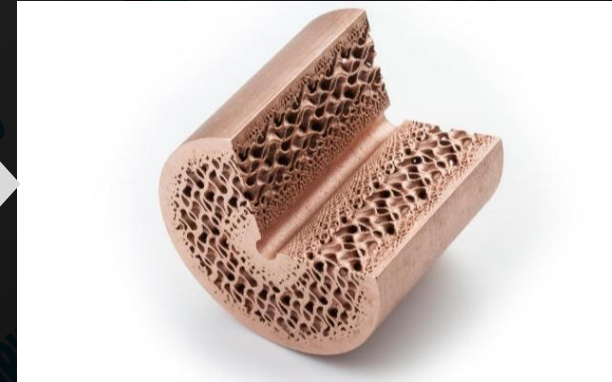
选区金属熔化3D打印技术



结构一体化

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



图片来源：Heraeus



图片来源：EOS

Stratasys的3D打印服务业务制造的铜材料复杂形状的散热器，避免了焊接的需求，使得结构更加紧凑。



图片来源：Stratasys

NASA在2015年取得了铜合金部件3D打印方面获得进展，制造技术也是选区激光熔化3D打印，打印材料为GRCo-84铜合金。NASA用这项技术制造的3D打印零件为火箭燃烧室衬里，该部件总共被分为8,255层，进行逐层打印，打印时间为10天零18个小时。

这个铜合金燃烧室零部件内外壁之间具有200多个复杂的通道，制造这些微小的、具有复杂几何形状的内部通道，即使对增材制造技术来说也是一大挑战。部件打印完成后，NASA的研究人员使用电子束自由制造设备为其涂覆一层含镍的超合金。NASA的最终目标是要使火箭发动机零部件的制造速度大幅提升，同时至少降低50%的制造成本。

Aerojet Rocketdyne在火箭铜合金推力室3D打印领域取得的突破，为制造新一代RL10发动机带来了可能性。3D打印铜合金推力室部件将替代以前的RL10C-1推力室部件。被替代的推力室部件是由传统工艺制造的，由多个不锈钢零件焊接而成，而3D打印的铜合金推力室部件则由两个铜合金零件构成。



图片来源：
NASA

Launcher 也测试了铜合金火箭发动机部件。Launcher2018年以来一直致力于开发概念验证发动机E-1，这是一种3D打印铜合金 (CuCrZr) 发动机部件，集成了复杂冷却通道，这一设计将使发动机冷却效率得到提升。

一般来说，电感器中的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，焊接是一个耗时的过程并且导致大量的生产成本产生。焊接的挑战是很难应对的，在焊接第二块节点的时候，热量将转移到第一个焊接点。这种额外的热量可以从第一个焊接点溶解焊料。即使是经验丰富的工人也认为这是一项非常复杂和棘手的工作。每个焊接点都会破坏电流并导致性能显著下降。电感器的效率不仅受焊接接头的影响，而且还受到电感器几何形状的限制。

传统制造工艺通常只能实现相对简单的标准形状。然而，3D打印的电感线圈几何形状可以尽可能紧致，从而使得电感器实现更高的效率。3D打印的电感器形状可以更加接近元件的轮廓，而电感器的形状决定了效率。通过金属增材制造（AM），可以实现优质的零件，这些零件具有高度复杂的几何形状，从而满足规模生产的需求。没有焊接接头的3D打印电感器需要更少的能量，具有更高的效率并且可以实现均匀的硬化结果。



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。

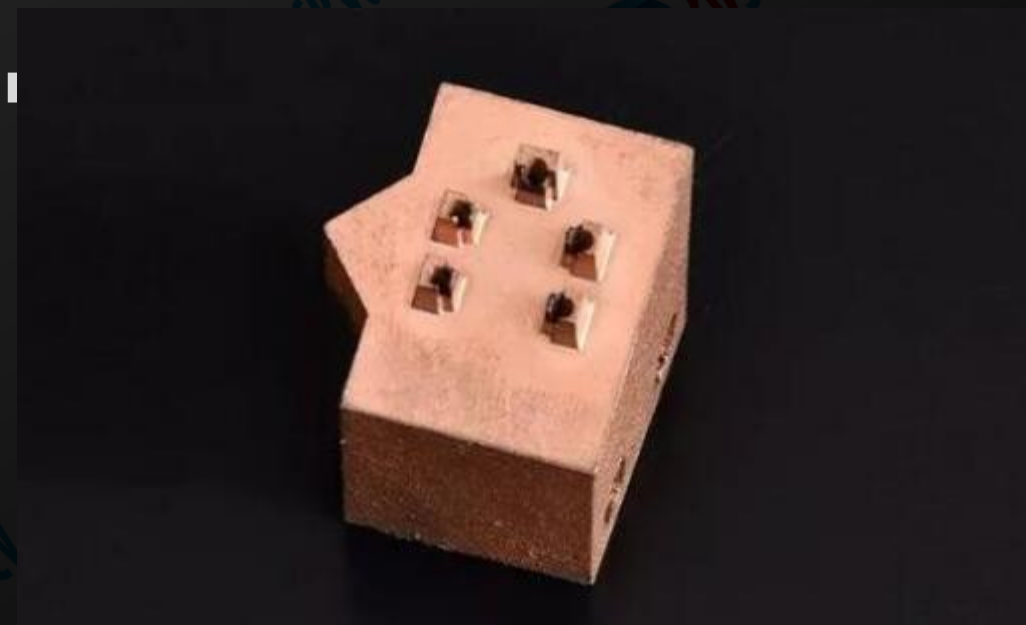
3DPCoil的产品优点正是来自3D打印技术，主要优势在于无需使用钎焊就可以制造出一体式的铜感应器，铜感应器的密度是均匀的，感应器的冷却效果得到优化。3D打印铜感应器的使用寿命与上一代感应器相比得到了显著的提升，对于使用感应加热设备的制造业用户来说，这意味着能够减少更换感应器的频次，继而减少生产时间，节省每个零件的制造成本，提高对设备的投资回报率。

GH Induction 公司为航空航天、汽车、机床工具、造船等制造业用户提供零件热处理解决方案。例如在汽车行业，GH Induction的感应加热设备已为宝马、沃尔沃、丰田、标志等众多汽车制造商所使用，在车身、电机、传动系统、车轮轴承等零部件的热处理中发挥着作用。



穆格着眼于在提高金属增材制造（金属AM）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直接金属激光熔融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。

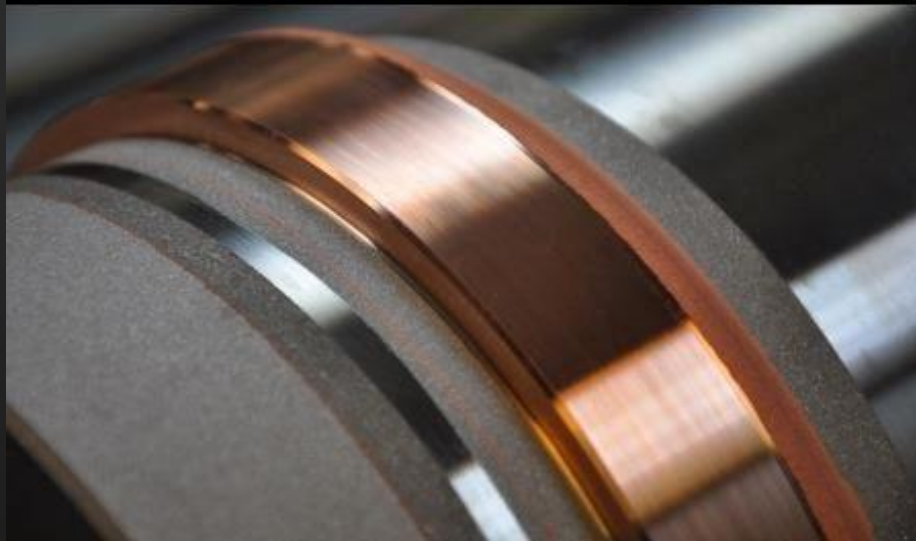
穆格的运动控制技术已经被广泛应用于民用机座舱、发电风机、一级方程式赛车、医用输液系统等众多的市场和应用领域，



图片来源：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。



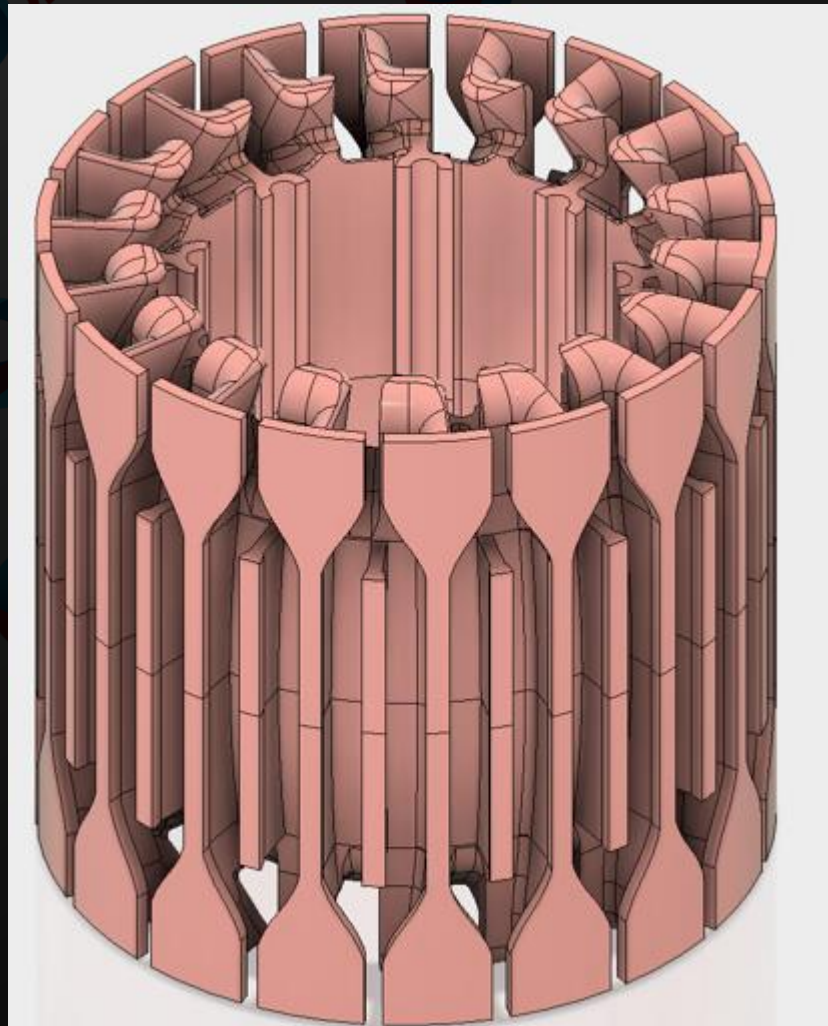
©Tohoku University

12 潜力应用-铜转子

选区金属熔化3D打印技术

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。



专利与论文

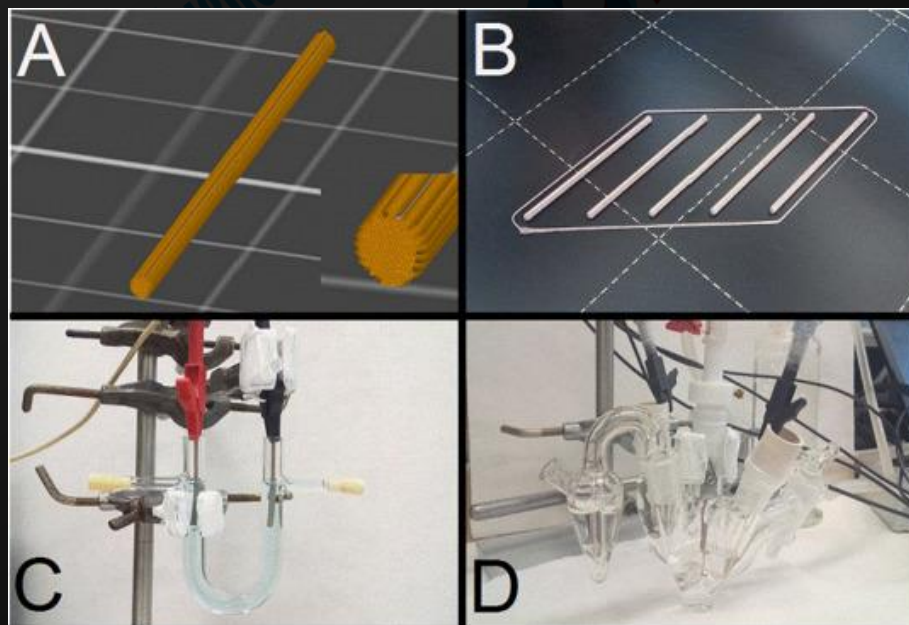
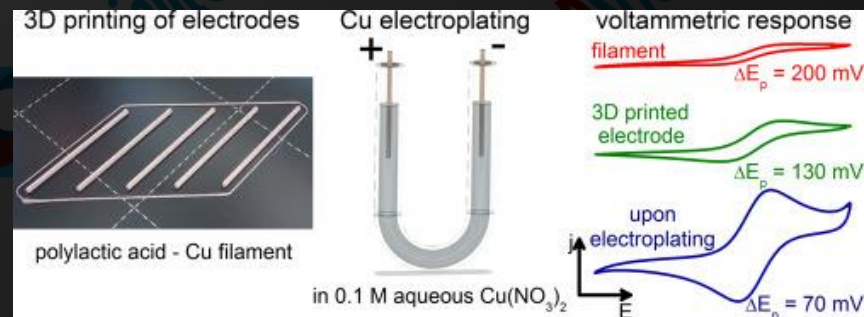


13 3D打印铜电极

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。

供应链



SANDVIK



CARPENTER
Specialty Alloys



ARCONIC



oerlikon

AP&C Advanced
Powders & Coatings



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、江苏威拉里新材料、中航迈特、宁波中物力拓超微材料、长沙新材料产业研究院、成都优材、成都科万智能科技、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...

矿山名称	国家	主要持有者	生产
Escondida 铜矿	智利	必和必拓、力拓	精矿+精铜
Grasberg complex 铜矿	印尼	自由港印尼公司、力拓	精矿
Morenci 铜矿	美国	自由港麦克默伦公司、 日本住友商事	精矿+精铜
Buenavista delCobre 铜矿	墨西哥	墨西哥铜业	精矿+精铜
Collahuasi 铜矿	智利	英美资源集团，嘉能可	精矿+精铜
El Teniente 铜矿	智利	智利国家铜业	精矿+精铜
Antamina 铜矿	秘鲁	必和必拓、嘉能可、加 拿大 Teck	精矿
Los Bronces	智利	英美资源集团，三菱集 团、智利国家铜业	精矿+精铜
Polar Division	俄罗斯	俄罗斯诺里尔斯克镍业 公司	精矿
Los Pelambres 铜矿	智利	智利安托法加斯塔集 团、日本新日矿业	精矿

17 铜金属粉

日本DaiHen开发了强度是目前两倍的3D打印用铜合金粉末

贺利氏（Heraeus开发了一种高导电性铜粉，其固体铜的密度为99.8%，电导率约为95%IACS（国际退火铜标准。市场上通常使用的IACS约为85%。）

Hoeganaes是GKN旗下专门提供高质量金属粉末的公司，其产品包括铁粉、铜粉、钨粉、钛粉等金属粉末，广泛用于粉末冶金，化工和焊接等工业。其市场份额世界第二。

製品の詳細データ Product specification

MA-CC

品番	グレード	粉体特性			造形物特性					
		比表面積	タップ密度	D50	密度	導電率	引張強度	0.2%耐力	伸び	ヤング率
		m ² /g	cm ³ /g	μm	%	% IACS	MPa	MPa	%	GPa
MA-CCR25L	導電性グレード	0.07	5.6	25	>99.5	95	316	190	22	112
MA-CCR25H	強度グレード	0.07	5.6	25	>99.5	60	755	720	15	124
純銅		—	—	—	—	100	195	200	35	117

NASA（美国国家航空航天局）的研究人员开发了一种新的3D打印铜合金材料，并通过该材料和选区激光熔化3D打印设备制造了一种火箭推进部件。这一新材料是GRCop-42，它是一种高强度，高导电率的铜基合金，由NASA 马歇尔太空飞行中心（MSFC）和俄亥俄州的美国宇航局格伦研究中心（GRC）的团队创建。GRCop-42 铜合金粉末可用于生产近乎完全密集的3D打印部件，如火箭燃烧室内衬和燃料喷射器面板。

GRCop-42 3D打印铜合金粉末还有一个“前身”-GRCop-84。根据3D科学谷的市场观察，NASA 从2014年开始开发这种用于制造火箭燃烧室的GRCop-84 3D打印铜合金粉末。继2016年和2017年，NASA 在马歇尔太空飞行中心对3D打印的GRCop-84组件进行热火试验后，该团队开始开发GRCop-42。NASA 希望通过该材料具有与GRCop-84相似强度，但具有更高导热率。

SLM Solutions的**铜合金CuNi2SiCr材料**能够与SLM Solutions的所有激光熔化3D打印系统兼容，是一种可热硬化的合金，具有高刚度以及电导率和导热率的平衡组合的特征。该合金中包括镍和硅成分，具有很高的耐腐蚀性和耐磨性。

SLM Solutions对CuNi2SiCr 铜合金材料进行了鉴定与参数验证，并确立这款材料的理想打印参数。在测试这些参数时，铜合金突出的主要问题是对氧气的敏感性，为了解决这个问题，SLM Solutions建议在使用该材料时，其系统中的氧气最大含量为500 ppm。

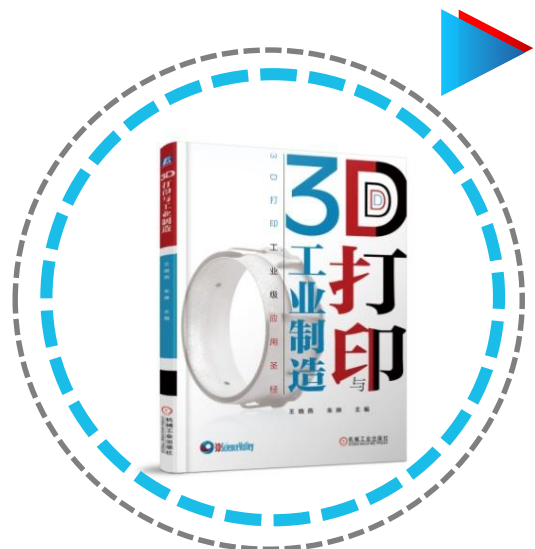
3D打印铜合金材料导电性通常低于纯铜（IACS值为100%），SLM Solutions的CuNi2SiCr材料在经过热处理后，IACS值由打印完成时的14%，提升至40%，导电性虽然低于纯铜，但仍适用于部分导电应用。

CuNi2SiCr 铜合金3D打印材料适合应用于模具制造、电气工程的导电触点、焊接喷嘴、阀等领域。CuNi2SiCr 材料的强度、电阻和导电性能使其非常适合于制造在机械、热和摩擦应力环境中的导电性零件。

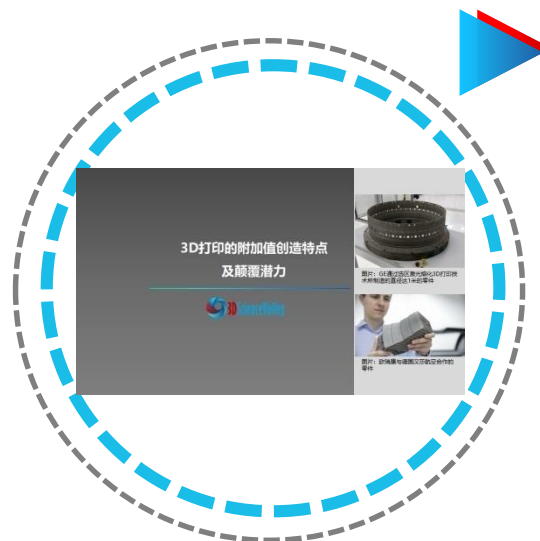
		打印完成	热处理后
		平均值	平均值
Tensile strength 抗拉强度	R_m [MPa]	280	633
Offset yield strength 偏移屈服强度	$R_{p0.2}$ [MPa]	226	551
Vickers hardness 维氏硬度	HV10	109	225

SLM Solutions的还提供**青铜CuSn10**，是一种铜锡合金，具有很高伸长率和适中的硬度。青铜具有良好的耐磨性和耐海水腐蚀和空化作用。典型应用包括：海洋环境中设备的组件和外壳。

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。