

贵金属首饰精密制造中 3D 打印与 CNC 加工工艺的融合应用

周继光 王诣 肖双勇
国机金刚石(河南)有限公司
DOI:10.32629/pe.v4i1.19056

[摘要] 随着个性化定制需求的激增与智能制造技术的飞速发展,传统首饰加工模式正面临深刻变革。本文聚焦于贵金属首饰(如钻戒戒托、耳钉等)的精密制造环节,系统分析了失蜡铸造、手工雕蜡等传统工艺在复杂结构实现、生产效率及材料利用率方面的局限性。在此基础上,深入探讨了以光固化(SLA/DLP)和金属直接打印(如SLM)为代表的3D打印技术,以及高精度五轴联动CNC加工中心在现代首饰生产中的核心作用。重点阐述了“3D打印+铸造”与“CNC直接切削”两种主流技术路径的工艺流程、适用场景、优势与挑战。研究表明,将3D打印的无模快速成型优势与CNC加工的超高表面质量及尺寸精度相结合,构建起一种柔性、高效且高度自动化的混合制造模式,不仅能完美复现设计师的复杂创意,更能显著提升贵金属材料的利用效率与产品的整体品质,为高端定制首饰制造业提供了强有力的技术支撑。

[关键词] 首饰加工; 3D打印; CNC加工; 贵金属; 混合制造

中图分类号: TP334.8 **文献标识码:** A

Precise Manufacturing of Precious Metal Jewelry: The Integrated Application of 3D Printing and CNC Machining

Jiguang Zhou Yi Wang Shuangyong Xiao
Sinomach Diamond (Henan) Co., Ltd.

[Abstract] With the surge in demand for personalized customization and the rapid advancement of intelligent manufacturing technologies, traditional jewelry processing models are undergoing profound changes. This paper focuses on the precision manufacturing of precious metal jewelry (such as diamond ring settings and earrings), systematically analyzing the limitations of traditional processes like investment casting and hand-carved wax modeling in terms of realizing complex structures, production efficiency, and material utilization. Building upon this, it delves into the pivotal roles of 3D printing technologies—represented by Stereolithography (SLA/DLP) and direct metal printing (e.g., Selective Laser Melting, SLM)—and high-precision 5-axis CNC machining centers in modern jewelry production. The paper elaborates on the process flows, applicable scenarios, advantages, and challenges of two mainstream technological pathways: "3D Printing + Casting" and "Direct CNC Milling." The research indicates that integrating the mold-free, rapid prototyping advantage of 3D printing with the superior surface finish and dimensional accuracy of CNC machining establishes a flexible, efficient, and highly automated hybrid manufacturing model. This approach not only perfectly realizes designers' intricate concepts but also significantly enhances the utilization efficiency of precious metals and the overall product quality, providing robust technical support for the high-end custom jewelry manufacturing industry.

[Key words] Jewelry Processing; 3D Printing; CNC Machining; Precious Metals; Hybrid Manufacturing

引言

贵金属首饰作为融合艺术审美与精湛工艺的高端消费品,正经历由大众化量产向个性化、高精度定制转型的关键阶段。消费者对独特设计、卓越品质及快速交付的日益追求,对传统制造模式提出了严峻挑战。失蜡铸造、手工雕蜡等沿用多年的工艺,

在应对复杂几何结构、控制材料损耗及保障产品一致性方面渐显乏力。与此同时,以3D打印和计算机数控(CNC)加工为代表的数字化制造技术迅猛发展,为行业突破瓶颈提供了全新路径。3D打印赋予了无模化、高自由度的成型能力,而CNC加工则确保了微米级的尺寸精度与镜面级的表面质量。本文旨在系统探讨这

两种前沿技术在贵金属首饰精密制造中的融合应用逻辑,分析其协同优势与实践策略,以期为推动首饰制造业向柔性化、智能化和高附加值方向升级提供理论参考与实践指导。

1 传统首饰加工的难点分析

1.1 复杂结构与个性化设计的实现瓶颈

现代首饰设计已从传统的对称、规整形态,演变为日益追求艺术性与独特性,大量采用仿生曲面、镂空编织、微镶密钉等复杂几何形态。传统的失蜡铸造工艺依赖于手工或机械方式制作蜡模,对于此类高自由度、多曲率的设计,不仅制作周期长、成本高昂,且极易因人为因素导致细节失真或对称性偏差。更关键的是,一旦客户提出修改意见,几乎意味着整个蜡模需要推倒重来,严重制约了新品开发的速度和灵活性。手工雕蜡师傅的经验更成为了制约产品一致性的关键变量,难以满足规模化定制的需求。

1.2 材料成本与加工损耗

贵金属(如18K金、铂金)价格昂贵,其材料利用率是衡量加工经济性的核心指标。在传统机加工(如车、铣)中,为了获得最终形状,往往需要从一块实心坯料上切除大量多余材料,造成高达30%-50%甚至更高的贵金属浪费。这些屑末虽可回收,但熔炼提纯过程本身也存在约2%-3%的损耗,且会增加额外的人工与能源成本。此外,在镶嵌、抛光等后处理工序中,也存在因操作不当导致的材料损耗或工件报废风险。

1.3 表面质量与尺寸精度的平衡

高端首饰对表面光洁度和宝石镶嵌位的尺寸精度要求极为严苛。手工抛光虽能赋予作品独特的温润质感,但效率低下,不同批次的产品间,其光泽度和细腻度都可能存在肉眼可见的差异。而早期的三轴CNC设备,受限于刀具尺寸、刚性以及刀具路径规划的局限性,难以有效加工首饰内部的深腔、窄缝等微观特征,易产生振刀纹或过切现象,严重影响最终的美观度与佩戴舒适度。

2 现代首饰加工的核心技术方法

针对上述难点,以3D打印和CNC加工为代表的数字化制造技术已成为行业破局的关键。

2.1 3D打印技术在首饰领域的应用

3D打印技术通过逐层堆积材料的方式,从根本上突破了传统减材制造的几何限制。

2.1.1 光固化打印(SLA/DLP)用于铸造母模:这是目前应用最广泛、技术最成熟的模式。以Formlabs Form 3B+或EnvisionTEC Micro Plus等专业级设备为例,其XY轴分辨率可达25-50微米,Z轴层厚可低至10微米。设计师在Rhino或Matrix等专业珠宝CAD软件中完成数字建模后,模型被导入切片软件(如PreForm)。软件会自动添加必要的支撑结构,并优化打印方向以减少应力变形。打印完成后,经过清洗、二次固化等后处理,即可得到一个高精度、高强度的类蜡树脂模型。该模型可直接用于标准的失蜡铸造流程。此方法的优势在于:

(1) 高精度与复杂性:轻松实现0.1mm级别的细节,完美呈现

设计师的原始意图。

(2) 快速迭代:从设计到实物模型仅需数小时,极大缩短了新品开发周期。

(3) 一致性:数字化文件确保了批量生产的高度一致性,消除了手工误差。

2.1.2 金属直接打印(如SLM):该技术使用高能激光束直接熔融金属粉末(如18K金粉、铂金粉),逐层构建出实体金属部件。它省去了铸造环节,适用于小批量、高价值的定制件或原型验证。其优势在于极高的材料利用率(接近100%,未熔粉末可回收)和优异的力学性能。然而,其面临以下几大问题:设备购置与维护成本高昂;打印过程需在惰性气体(氩气)保护下进行,运行成本高;打印件内部可能存在微小孔隙,需通过热等静压(HIP)处理来消除;且打印完成后仍需进行复杂的支撑去除、喷砂、抛光等后处理工序。因此,目前主要应用于高附加值的艺术收藏级作品或快速原型验证。

2.2 CNC加工技术在首饰领域的深化

现代高精度、微型化的五轴联动CNC加工中心为首饰制造带来了革命性变化,已成为提升首饰品质的关键一环。

2.2.1 直接切削成型:对于结构相对简单、对表面质量要求极高的部件(如素圈、简约款耳钉),可直接选用贵金属棒料或块料,通过CNC进行精密铣削、车削。先进的微型刀具(直径可小于0.3mm)配合高速主轴(转速可达40,000 RPM以上),能够加工出镜面般的光滑表面,几乎无需后续抛光,大幅提升了生产效率和产品的一致性。

2.2.2 精修与后处理:CNC在3D打印-铸造流程中扮演着至关重要的角色。铸造毛坯件常存在浇口、轻微变形或表面瑕疵,此时将毛坯件精准装夹在CNC工作台上,通过探针进行在机测量,获取实际尺寸数据,并与原始CAD模型进行比对。CNC系统可自动生成补偿程序,精准地铣除浇口、修正关键尺寸(如戒圈内径、爪位高度),甚至执行初步的镜面抛光。这一自动化精修过程,将原本需要数小时的手工打磨工作缩短至十几分钟,同时将产品良品率从手工时代的85%左右提升至98%以上。大幅减轻了手工后处理的工作量,进一步提升了产品的一致性和良品率。

3 3D打印与CNC的协同制造模式

单一技术难以满足所有需求,二者的融合构成了当前最先进的首饰制造范式。

3.1 “3D打印+铸造+CNC精修”模式

这是目前兼顾效率、成本与品质的黄金组合。3D打印负责快速、精确地制造复杂蜡模;铸造负责将贵金属液注入型壳形成毛坯;CNC则负责对毛坯进行自动化、高精度的精加工。这种模式充分发挥了各自的优势,实现了从数字设计到高品质成品的无缝衔接。

3.2 工艺参数的优化

在实际应用中,需综合考虑多种因素。例如,3D打印树脂模型的壁厚需保证足够的强度以承受铸造时的高温 and 压力,过薄

易导致模型变形甚至烧毁。通常建议最小壁厚不低于0.6mm。CNC精修时,切削参数(如主轴转速、进给速度、切削深度)需根据贵金属的具体牌号(如18K白金、铂950)进行精细调整。以18K金为例,因其延展性好但硬度较低,应采用高转速、小切深、快进给的策略,以避免材料被“拉扯”而非“切削”,从而获得光滑的表面。

表1 贵金属首饰主要加工方法对比

项目	传统手工/机加工	3D打印(树脂模)+铸造	CNC直接切削
复杂结构适应性	差	优	中(受限于刀具可达性)
材料利用率	低(30%-50%损耗)	中(铸造有收缩,但蜡模无浪费)	极低(>50%损耗)
表面初始质量	依赖手工	需大量后处理	优(可近净成形)
生产效率(单件)	低	中(打印+铸造周期)	高(对于简单件)
初始设备投入	低	中	高
适用场景	小批量、艺术性强	主流,尤其复杂定制件	简约款、高光洁度要求件

4 行业发展趋势及未来展望

在当前高端定制首饰制造领域,3D打印与CNC加工的融合不仅是一种技术叠加,更代表了制造逻辑的根本转变——从“经验驱动”向“数据驱动”的跃迁。传统工艺高度依赖技师个人技艺,而数字化流程则将设计意图精准转化为物理实体,大幅压缩了人为误差空间。尤其在微镶结构、异形戒臂、仿生纹理等高难度设计中,这种优势尤为突出。例如,一件采用蜂巢镂空结构的铂金吊坠,若采用手工雕蜡,不仅耗时数日,且难以保证六边形单元的一致性;而通过SLA打印树脂模型后铸造,再辅以五轴CNC对镶嵌爪位进行0.01mm级修整,可在一天内完成高一致性成品,显著提升交付效率。

此外,材料成本控制亦因该融合模式得到优化。虽然CNC直接切削贵金属的材料损耗较高,但在“3D打印+铸造+CNC精修”路径中,铸造毛坯已接近最终形态(近净成形),CNC仅需微量去除浇口与修正关键尺寸,贵金属切屑量可控制在5%以内。同时,未使用的金属粉末在SLM打印中可循环利用达95%以上,配合闭环回收系统,整体材料利用率远超传统车铣工艺。值得注意的是,随着国产高精度微型刀具与专用切削参数库的完善,CNC对18K金、铂950等软质贵金属的加工稳定性显著提升,避免了过去因粘刀、积屑导致的表面拉伤问题。

未来,首饰制造的数字化融合将向更深层次发展。一方面,AI技术将被引入设计环节,通过算法生成符合力学与美学双重标准的全新结构;另一方面,3D打印与CNC的硬件将进一步集

成,出现集打印、铣削、检测于一体的混合制造单元。此外,环保与可持续性将成为重要议题,如何进一步提高贵金属回收率、开发更环保的打印材料和切削液,将是行业共同面临的课题。可以预见,以3D打印与CNC为核心的数字化、智能化、柔性化制造体系,将成为驱动全球珠宝产业转型升级的核心引擎。长远来看,3D打印与CNC的深度协同,不仅是工艺升级,更是构建柔性化、智能化首饰制造体系的核心支柱。

5 结语

3D打印与CNC加工技术的深度融合,正在重塑贵金属首饰制造业的格局。前者以其无与伦比的设计自由度解决了复杂结构的制造难题,后者则以其卓越的精度和表面质量保障了产品的高端品质。二者并非简单的替代关系,而是形成了优势互补、协同增效的混合制造生态。对于身处一线的加工企业而言,深刻理解并灵活运用这两种技术,是提升核心竞争力、赢得未来市场的关键所在。未来,随着设备成本的进一步降低、材料性能的持续优化以及智能化软件(如AI驱动的路径规划)的介入,这一融合模式将变得更加普及和高效,为全球珠宝设计师和制造商赋能,推动整个行业向更高水平的个性化、精密化和可持续化方向发展。

[参考文献]

- [1]王明远,李华.基于SLM技术的18K金首饰直接制造工艺研究[J].中国珠宝玉石,2023,41(2):45-50.
- [2]张伟,陈静.五轴联动CNC在铂金首饰精密加工中的应用[J].现代制造工程,2022,(8):112-116.
- [3]刘洋.数字化技术在珠宝首饰个性化定制中的应用探析[J].装饰,2021,(5):124-126.
- [4]陈志强.现代机械技术在首饰加工中的应用与创新[J].机械设计与制造工程,2022,51(4):45-48.
- [5]王昶,袁军平.首饰制作工艺[M].北京:中国地质大学出版社,2019.
- [6]李强.珠宝首饰CAD/CAM技术应用现状与发展趋势[J].机械设计与制造,2020,(11):288-290.

作者简介:

周继光(1989--),男,汉族,河南省新密市人,本科,国机金刚石(河南)有限公司中级工程师,研究方向:机械设计制造及自动化。

王诣(1987--),女,汉族,陕西省汉中市人,本科,国机金刚石(河南)有限公司中级经济师,研究方向:工业工程。

肖双勇(1977--),男,汉族,广东省韶关市人,本科,国机金刚石(河南)有限公司中级工程师,研究方向:机械制造。