

3D砂型打印技术在铝、镁合金领域的应用

王代君¹ 刘于青² 欧阳春芳¹ 连凯文¹ 曹继伟²

1. 中国航发南方工业有限公司 湖南 株洲 412002

2. 共享智能装备有限公司 宁夏 银川 750021

摘要:近年来,铝合金、镁合金因其轻质、比强度高和易于加工的特性,在航天、汽车等领域中应用广泛。3D砂型打印技术则在铝和镁合金铸造应用展示了其作为一种新兴制造技术的显著潜力。这项技术通过直接从数字模型生成复杂砂型,使得铸件工艺设计具有前所未有的灵活性,同时缩短试制周期,并降低了成本。本文论述了铸造铝和镁合金的技术现状,分析了国内外砂型制备的主要进展,总结分析了砂型3D打印技术优势及发展前景,最后展望了砂型3D打印技术未来研究方向,以期促进铸造铝和镁合金的应用,推动制造业向更高效、更精准的方向发展。

关键词: 3D打印; 铸造; 铝合金; 镁合金; 砂型; 粘结剂喷射

引言

3D砂型打印技术,是一种能快速响应、高度定制地生产铸造铝合金、镁合金用复杂结构砂型的新型制造技术。该技术可简化传统铸造砂型中复杂繁琐的模型制备流程,大大缩短试制周期,降低工序,减少成本。3D打印,是通过使用CAD设计,将所需材料逐层累加堆积的方法,制造实体零件的技术^[1]。铸造则是将熔融金属注入对应的铸型后,通过冷却凝固获得零件的技术。其中,砂型铸造由于成本较低、工艺简便和周期较短的优点,被广泛应用于铸件生产。随着3D打印技术的快速发展,为传统铸造行业转型提供了有力支撑。结合3D打印在复杂结构成型以及快速制造的优点,可节省传统砂型铸造中铸型设计、制备的时间成本,大大缩短了试制周期。近年来,3D砂型打印在铝、镁合金铸造领域的应用越来越广泛,为铝、镁合金零件在航空、汽车等高端领域发展提供了重要的技术支撑。

1 铸造铝、镁合金 3D 砂型打印技术现状

铝是一种密度低($2.7\text{g}/\text{cm}^3$)的金属,铝合金则是在铝中加入一种或多种合金化元素。目前,铸造铝合金因其在高温下良好的力学性能和比强度和比刚度高,耐腐蚀和抗氧化等诸多优点,主要应用于汽车领域中。其中,铸造铝合金占汽车总用铝量的80%^[2]。镁合金则是实际应用中轻质的金属材料,具有比强度高,铸造和切削性能好的优点。镁合金还具有优异的流动性、尺寸稳定性等特点,在航天、航海领域得到了广泛的应用^[3]。

作者简介: 王代君, 1991年,女,籍贯黑龙江省,汉族,硕士研究生学历,工作于中国航发南方工业有限公司,高级工程师,铝镁合金铸造方向,联系电话18173349435,电子信箱395185499@qq.com。

3D砂型打印,是一种用于铸造领域的增材制造技术,主要用于生产铸造用的砂型和砂芯。这项技术利用CAD设计数据来层层构建砂型,无需传统的模具制作过程。这种方法提高了砂型铸造的灵活性,简化了模具设计到制备的工序,并能制作出传统砂型制备方法难以实现的复杂形状。该方法具有设计自由度高、效率快和成本低的优点,具体来说,则是可以制造复杂结构砂型,快速制造周期短,小批量定制生产。

2 砂型 3D 打印应用现状

3D打印砂型中,应用较广泛的是粘结剂喷射3D打印技术(Binder Jetting)。该技术是通过粉末材料的堆积和选择性喷墨至成型面,层与层之间的相互连接,通常固化后,松散粉末被去除,得到生坯。该技术具有设备运行与维护成本低、成型效率高、可批量化生产的优势,在铸造领域3D打印砂型方面展现出优势。该技术的砂型打印工艺:1、零件模型;2、设计砂型模型;3、砂型模型转换为切片文件;4、打印头、铺砂器路径规划;5、铺砂器铺砂;6、打印头喷墨;7、成型面下降;8、逐层往复5-7步骤,直至模型打印完毕;9、清粉;10、得到砂型。

当前,国外公司及国内学者已展开铸造用铝、镁合金砂型的试制研究。特斯拉3D打印以制造其“一体化压铸成型”砂型,宝马和凯迪拉克也使用了Voxeljet打印机,进入粘结剂喷射技术开发研究^[4]。湖州美迈科技有限公司试制的副车架采用无模化快速制造,基于3D砂型打印技术和铸造模拟软件进行系统设计,然后打印砂型,再合箱浇注,发现可以有效缩短工期,最终得到副车架铸件^[5]。马亮等人,则采用3D打印砂型的方式浇铸制备铸件材质为ZL205A复杂框架结构铸件,来改进传统

铸造工艺流程，优化铸造浇注系统工艺设计。他通过模型结构分析，发现该铸件壁厚不均匀、内腔尺寸大，对冶炼过程要求较严格。他通过对3D打印砂型技术，将22个木模砂芯减少到12个3D打印砂芯，减少机械加工工序，降低了加工成本^[6]。

洪润洲^[7]等人则研究通过铸造工艺仿真，在3D打印砂型中设置成形冷铁，以进行复杂铝合金壳体铸件的开发。他采用不同的浇注温度和充型速度，设计了两种方案，并按技术需求进行X光、尺寸检测，铸件热处理后进行荧光检测和机械性能检测。最终采用了第二套方案，使得疏松缺陷显著减少，外形尺寸均处于公差范围内，满足要求。图4为铸件实物。

共享智能铸造产业创新中心有限公司的闫科，刘轶等人，基于3DP砂型打印技术开发了中冷器铝合金铸件^[8]。他们采用KOCCEL 2215打印机，使用100-140目硅砂打印砂型，降低了人工操作难度，减少了砂型组合带来的风险。

李爽则针对浇注过程中，产生浇不足、冷隔的充型缺陷，对浇注系统进行优化设计。打印材料使用100~140目焙烧砂（经过焙烧相变的硅砂）；表面涂料为流涂醇基锆英粉涂料，厚度达到0.1~0.3mm。通过实验，发现薄壁3D样件为防止浇注冷隔，建议将铸件大面积的薄壁区域优先放置在底部^[9]。

据作者所知，暂未见国内商业化的镁合金的铸造用3D砂型，这可能与镁合金熔炼时易氧化燃烧，需采用阻燃防护有关。不仅要解决镁合金在3D打印砂型铸造过程中产生的问题，也为防止铝合金铸造时产生缺陷，可以考虑以下几个技术改进方向：

2.1 改良砂型材料：

开发和具有高热稳定性和阻燃特性的砂型材料。例如，可以探索添加特定的阻燃剂或复合材料，以增强砂型在高温环境下的结构完整性和阻燃能力；

2.2 优化砂型设计：

通过模拟，优化砂型的内部结构，使其在铸造过程中能有效控制气体流动，减少氧气与熔融镁合金、铝合金的直接接触；

2.3 使用保护气氛：

在铸造过程中使用惰性或还原性气氛，如氩气，以替代空气中的氧气，从而抑制镁合金、铝合金的氧化和燃烧。这要求铸造系统具备密封和气体控制能力，以维持稳定的保护气氛；

2.4 表面处理技术：

研发适用3D打印镁合、铝合金砂型的表面涂层技术，如采用陶瓷涂层或特殊的化学处理方法，为砂型表

面提供额外的防护层，从而阻隔氧气接触并提高砂型的耐热性和耐化学性；

2.5 铸造过程监控与控制技术：

实施实时监控和控制系统，确保操作条件始终在安全范围内。

通过这些技术的研发和实际应用，相信可以提高3D打印砂型铸造镁合金、铝合金的安全性和可行性，有助于拓宽3D打印砂型铸造在航空航天、汽车等领域的应用前景。

3 铸造铝、镁合金 3D 砂型打印技术优势及发展前景

铸造铝、镁合金使用3D砂型打印技术，不仅提高了生产试制效率和所需铸铝、镁合金件质量，还扩展了设计的灵活性。技术优势如表1。

表1 砂型3D打印技术优势

优势	详解
设计灵活	3D打印技术使设计师可以探索更加复杂的铸造件结构，如多孔结构，这在传统铸造技术中很难或无法实现。
缩短生产周期	传统砂型制作耗时较长，需要制作模具和砂芯。使用3D打印技术可直接从数字模型快速生成砂型，缩短从设计到铸件的时间。
节约材料	3D打印只在需要的地方增加材料，从而减少材料浪费。这对于成本较高的铝合金和镁合金材料尤其有价值。
提高铸件质量	3D打印砂型可提高铸件的尺寸精度和表面光洁度，减少后续的加工。
减少工具投资	3D打印砂型无需昂贵的模具，使得小批量、单件生产变得更为经济适用。
提高铸造安全性	可在砂型制造中更精确地控制材料和结构，从而降低在铸造高活性金属如镁合金、铝合金时的安全风险。
迭代优化迅速	3D打印技术能够快速迭代设计和测试原型，加快新产品的开发速度

3D砂型打印技术在铸造铝、镁合金方面的发展前景是非常广阔的，主要在以下几个领域展现巨大潜力：

3.1 航空航天行业：

在航空航天行业中往往需要具有复杂的几何形状和轻质结构。3D打印砂型技术能够生产出传统方法难以实现的复杂铸件，如整体铝合金或镁合金机体部件，从而减轻重量并提高性能。

3.2 汽车制造业：

随着汽车行业对提高燃油效率和减少排放的需求日益增加，轻量化成为关键趋势。铝合金和镁合金因其重量轻和强度高的特性，成为理想的材料选择。3D打印砂型可以加速这些材料在汽车零件中的应用，例如车身整体结构。

3.3 医疗设备制造：

在医疗行业，特定的铝合金和镁合金因其生物兼容性和良好的力学性能被用于制造人体植入物。3D打印砂型技术可以用于高度定制复杂的植入物，满足个性化医疗需求。

总体而言，3D砂型打印技术正逐渐成为铸造行业的一项颠覆性技术，它的发展将持续推动制造业向高效、灵活和高性能的方向发展。

结语

3D砂型打印技术通过其高设计自由度、快速原型制作和批量化规模生产能力，不仅为航空航天、汽车制造等关键行业带来了创新的解决方案，还推动了铸造铝、镁合金向更高效和更可持续性的未来迈进。

然而，该技术仍需快速发展，以进一步满足关键行业的需求，研究者需聚焦在如下三点方向：1、探索各种成型材料的打印适配性，研究3D打印砂型缺陷形成机理，提高砂型的尺寸精度和机械性能；2、在保证精度和性能的前提下，提高打印效率，降低打印成本，研究者需对打印设备持续改进；3、开发国产打印喷头，解决“卡脖子”问题，降低设备成本。

可以预见的是，随着技术的不断进步和成本的进一步优化，预计3D砂型打印将在制造业中扮演越来越重要的角色。因此，持续关注3D砂型打印技术的研发将是推动制造业创新和保持铸造领域竞争力的关键。

参考文献

[1]卢秉恒;李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展.机械制造与自动化 2013, 42 (04), 1-4. DOI: 10.19344/j.cnki.

issn1671-5276.2013.04.001 From Cnki.

[2]隋育栋. Al-Si-Cu-Ni-Mg系铸造耐热铝合金组织及其高温性能研究. 博士, 2016. <https://link.cnki.net/doi/10.27307/d.cnki.gsytu.2016.002697>.

[3]樊振中;陈军洲;陆政;熊艳才. 镁合金的研究现状与发展趋势. 铸造 2020, 69 (10), 1016-1029. From Cnki.

[4]刘金城. 特斯拉采用3D打印砂型“超级铸造”大型汽车零件. 铸造 2023, 72 (11), 1526. From Cnki.

[5]美迈科技采用“3D打印+铸造技术”试制新能源汽车铝合金副车架. 特种铸造及有色合金 2023, 43 (09), 1239. From Cnki.

[6]马亮;古良;李鑫;沈达维. 3D打印在复杂铝合金框架铸件生产中的应用. 金属加工(热加工) 2023, (08), 110-113. From Cnki.

[7]洪润洲;周永江;左强;范学焱;张喆;王万成. 基于仿真与3D打印砂型的复杂铝合金壳体制造. 特种铸造及有色合金 2019, 39 (11), 1192-1194. DOI: 10.15980/j.tzzz.2019.11.009 From Cnki.

[8]闫科;刘轶;刘国强;张超. 基于3DP砂型打印技术的中冷器铝合金铸件研发. 中国铸造装备与技术 2023, 58 (04), 55-59. From Cnki.

[9]李爽;李磊;王丹;陈海军;黄遼凯. 改善薄壁铝合金3D样件浇注冷隔的应用实例. In 第十七届中国铸造协会年会暨第六届全国铸造行业创新发展论坛, 中国上海, 2021; p 4. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2021.009754.