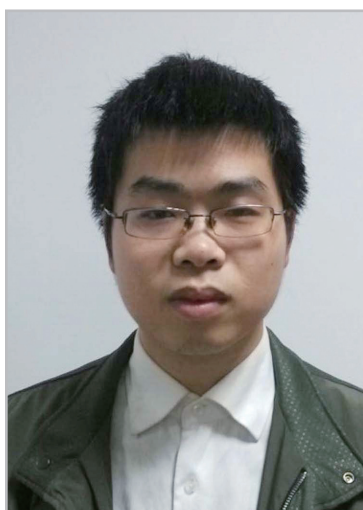


基于增材制造技术的复杂结构模具数字化制造方法*

Digital Manufacturing Method of Complex-Structure Mould Based on Additive Manufacturing Technology

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 田国强 鲁中良 李涤尘



田国强

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室博士研究生,研究方向为快速成形及模具制造。

模具是现代工业生产中的重要装备,其制造水平直接决定产品的质量、效益和新产品的研发能力^[1]。传统模具制造的方法很多,如数控铣削加工、成形磨削、电火花加工、线切割加工、铸造模具、电解加工、电铸加工、压力加工和照相腐蚀等^[2]。但是,

* 国家重大专项(燃气轮机定向凝固叶片氧化铝型壳型芯制备技术及关键设备(2012ZX04007-021)资助。

相比模具传统制造方法,增材制造技术可以实现任意复杂结构模具的快速制造,在单件或小批量生产用模具制造过程中,具有制造成本低、周期短的优势,因此广泛应用于模具制造业。

这些方法在制造复杂结构模具时存在周期长、成本高等问题。随着国际竞争加剧和市场全球化发展,产品更新换代加快,多品种、小批量成为模具行业的重要生产方式^[3-4]。这种生产方式要求缩短模具制造周期、降低模具制造成本。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)作为一种重要的数字化制造技术,可以由三维数字模型直接成形任意复杂实体结构,省去了传统的材料去除制造方法中使用的刀具、工装、冷却液和其他辅助装置,在产品单件或小批量生产方面具有显著的成本和效率优势^[5-6]。因此,AM技术广泛应用于模具工业,推动了复杂结构模具数

字化制造的技术进步^[7-9]。

基于 AM 技术的复杂结构模具数字化制造方法及特点

目前,能够制造复杂结构模具的 AM 技术主要有:光固化快速成形(Stereolithography, SL)、选择性激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)、熔融沉积制造(Fused Deposition Modeling, FDM)、三维打印成形(Three Dimension Printer, 3DP)、分层实体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM)、金属直接成形。利用 AM 技术实现模具快速制造的方法有两种:直接制模法和间接制模法。直接制模法是指利用 AM 技术直接由模具 CAD 数字模型制造模

具本身,然后进行必要的后处理以获得模具所必须的力学性能、几何尺寸精度和表面质量。目前,能够直接制造模具的 AM 技术主要有金属直接成形、3DP、SLS 和 LOM。间接制模法是指将 AM 技术与传统模具翻制技术相结合来制造模具。目前,用于间接制模法的 AM 技术主要有 SL、FDM、LOM 和 SLS。基于 AM 技术的模具快

速制造方法如图 1 所示。

基于 AM 技术的模具数字化制造方法的主要特点:可以实现复杂结构模具的快速制造;适用于金属、陶瓷、树脂、硅胶等多种类型材料的模具成形;在基于 CAD 数据直接制造模具的过程中,无需夹具、工装及人员参与,制造过程高度自动化。

增材制造技术在模具制造方面的应用状况

1 SL 与模具快速制造

在模具直接制造方面,Corcione 等^[10]以氧化硅/光敏树脂混合浆料为成形材料,采用 SL 技术直接固化浆料来制造铸型生坯,经干燥和烧结获得陶瓷铸型,并铸造铝材零件;Bae 等^[11]利用 SL 技术固化氧化硅/丙烯酸酯单体的混合浆料,实现燃气轮机叶片的型芯/型壳一体化陶瓷铸型模具的快速制造。这些制模方法工艺简单,但制造的模具收缩过大、精度不高,同时由于浆料沉淀导致致密度不均匀。

目前,SL 技术广泛应用于模具的间接制造过程中。美国 3D Systems 公司推出了 Quick Casting 工艺来制造熔模铸造用陶瓷铸型,主要工艺过程为:利用 SL 工艺制造树脂原型→在原型外涂挂陶瓷浆料→在高温炉内进行脱脂和焙烧后得到陶瓷铸型。3D Systems 公司还推出了用于制造金属模具的 Keltool 工艺,其工艺过程为:制造 SL 原型→翻制硅胶模具→在硅胶模具内填充工具钢粉末及粘接剂→脱脂和渗铜→模具。Grolman 等^[12]以 SL 原型为母模,以环氧树脂为模具材料,翻制饮料瓶成形用吹塑模具。Beal 等^[13]首先制造 SL 模具型壳,并在其内填充混有铝颗粒的环氧树脂,实现金属粉末注射模具的快速制造。西安交通大学研究人员首先采用 SL 技术制造某复杂航空零件熔模铸造用压蜡模具的型壳,其包含了上下模、活块 1 和活块 2 的型壳,如图 2(a)所示;然后在型壳内浇注金属树脂浆料,经固化后制备出包含上下模、活块 1 和活块 2 的压蜡模具如 2(b)所示;图 2(c)为压制的蜡型和熔模铸造成形的金属零件。相比 SL 直接制模方法,SL 间接制模方法在实用化方面占有优势,但因增加模具翻制工艺,导致工艺复杂及模具精度控制难度大。此外,利用 SL 原型翻制的环氧树脂等软

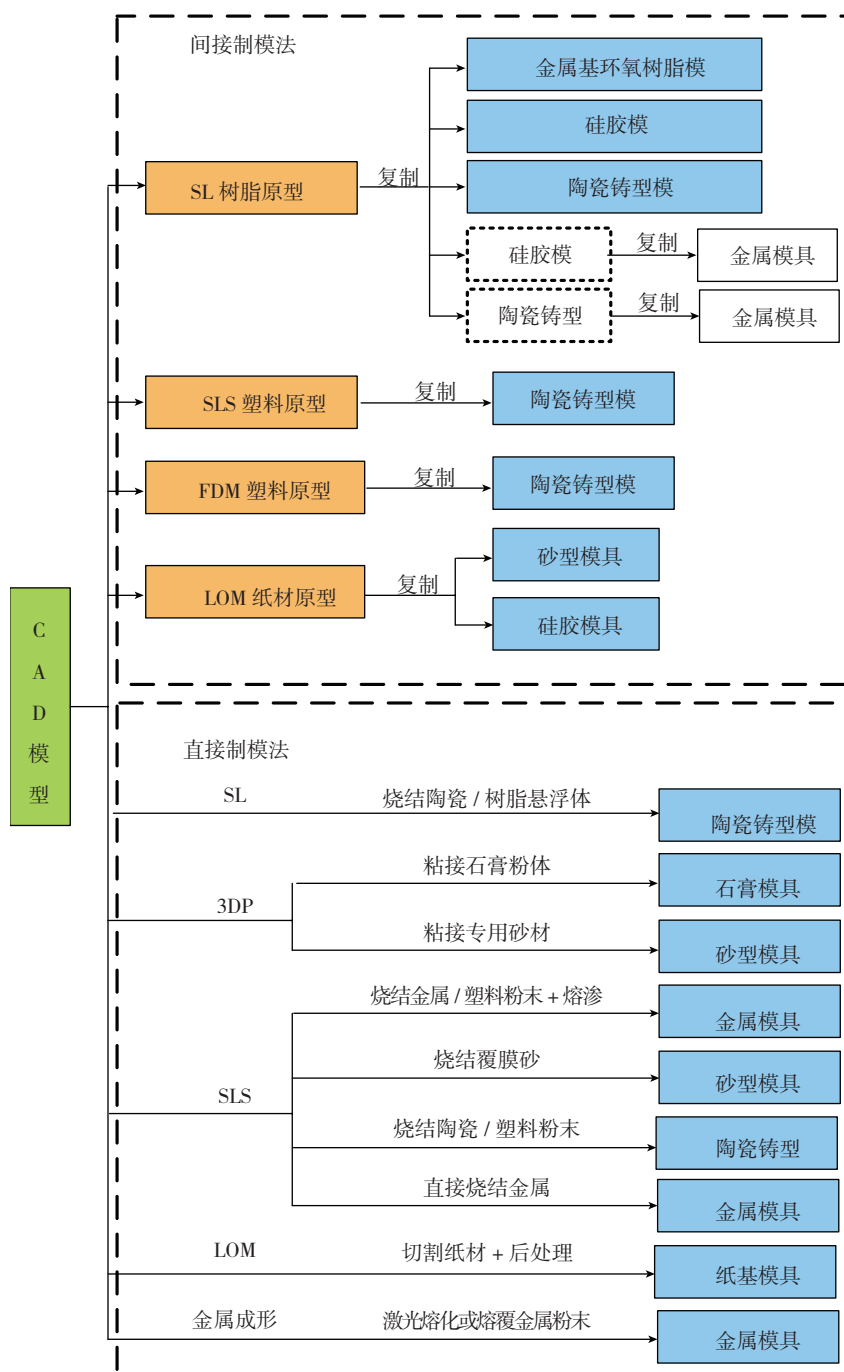
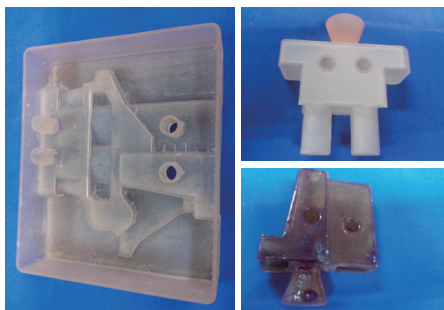
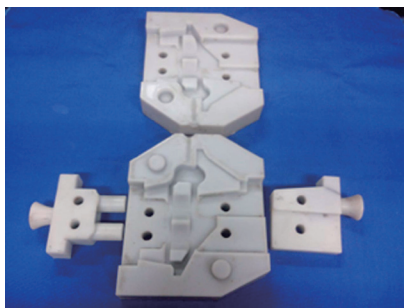


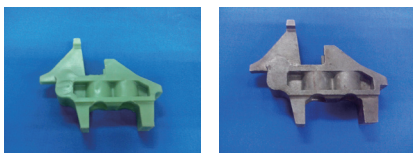
图1 基于增材制造技术的模具制造方法



(a) 模具的树脂型壳



(b) 压蜡模具



(c) 蜡型及零件

图2 复杂航空零件熔模铸造用压蜡模具的制造

材模具,其耐磨和散热性能较差。

2 3DP 与模具快速制造

目前,工业界主要利用 3DP 技术直接制造模具。Dippenaar 等^[14]以石膏粉体为成形材料,采用 3DP 技术制造真空辅助树脂传递成形用模具(见图 3),并利用该模具制备刀片。Junk 等^[15]以石膏为材料,采用 3DP 方法制造热塑成形用模具,以压制汽车模型车身顶盖。Budzik^[16]采用 Zcorp 公司的 Z510 三维打印机和 Zcast 501 专用粉体材料,直接制造的砂型模具,用于铸造转子叶片这些制模方法周期短、



图3 真空辅助树脂传递成形用模具

工艺简单,但制造的模具精度和表面粗糙度较差,致密度低、力学性能差。

3 FDM 与模具快速制造

FDM 技术主要应用在模具的间接制造过程中。Idris 和 Blake 等^[17-18]采用 FDM 方法制作 ABS 树脂原型,并通过翻模方法制造熔模铸造用砂型模具。Lee 等^[19]在采用 FDM 方法制造 ABS 树脂原型后,通过两种翻模工艺将树脂原型转换为陶瓷铸型,即:①在树脂原型外表面挂浆,经脱脂和焙烧来制造陶瓷铸型;②首先由树脂原型翻制硅橡胶模具,然后制造蜡型,最后由蜡型翻制陶瓷铸型。FDM 间接制模方法的工艺复杂,同时制造的原型精度低于 SL 原型,导致模具精度补偿难度增加。

4 LOM 与模具快速制造

LOM 技术在模具直接制造及间接制造方面均有应用。Tari 等^[20]采用 LOM 方法制造树脂传递成形用模具,工艺过程为:①以底层涂覆热塑性粘合剂的纸材为成形材料,利用 CO₂ 激光光源切割纸材制造模具的单层截面,通过热压辊热压纸材实现各层截面的粘接,以制备树脂传递成形用模具;②在对模具进行表面涂覆和打磨后,得到模具成品。利用该模具,制造了以乙烯基脂为材料的 I 型梁。Wang 等^[21]选择美国 Helisys 公司的 LOM 2030 成形设备,以纸材为成形材料,通过 LOM 及后处理工艺制造弹道的砂型模具。Mueller 等^[22]研究了 LOM 技术在砂型铸造、熔模铸造和陶瓷成形方面的应用,给出了有关的应用案例,如利用 LOM 原型翻制砂型;利用 LOM 原型翻制陶瓷蜗杆注射成形用模具,该模具内部为硅胶外部为金属套;直接制造熔模铸造中的压蜡模具。但是,利用 LOM 技术制造模具,存在材料利用率和精度低、后处理工艺复杂等问题。

5 SLS 与模具快速制造

在模具直接制造方面,美国 DTM 公司推出了 Rapidtool 制模技术,其主要工艺过程为:利用 CO₂ 激光器烧结外层包裹粘接剂的金属粉末来制造模

具半成品→烧结脱脂→渗铜处理→模具成品。德国 EOS 公司推出了 Direct Tool 制模技术,该技术也称为直接金属激光烧结(Direct Metal Laser Sintering, DMLS)制模技术,通过烧结不同熔点的金属粉末混合物来制造金属模具。这两种技术已被广泛应用于金属模具制造,如 Kenny 等^[23]选用 DTM 公司的 Sinterstation 2000 成形设备及 RapidSteel1 和 RapidSteel2 成形材料,采用 Rapidtool 工艺制造高分子材料成形模具;Milovanovic 等^[24]利用 DMLS 烧结 H20 模具钢(Cr, Ni, Mo, Si, V 和 C 的复合粉末材料),制造了一段汽车轮胎的胎面模具;Kumar 等^[25]利用 SLS 工艺烧结 WC-Co 粉末来直接制造注射模具,并通过熔渗青铜来提高模具的致密度和力学性能。刘锦辉等^[26]利用 SLS 烧结环氧树脂与金属的粉末复合材料制造具有随形冷却水道的注塑模具镶块(见图 4),并通过熔渗青铜来提高镶块的致密度和力学性能。Harlan 等^[27]将聚合物粘接剂喷涂至氧化铝粉体颗粒表面,然后利用 SLS 技术烧结粉体来制备氧化铝陶瓷铸型模具,并进行钛合金零件的铸造。SLS 制模方法工艺过程简单,可以实现具有复杂内流道结构的模具的快速制造,但为了提高模具的致密度和力学性能需要进行熔渗等后



(a) 型芯镶块



(b) 型腔镶块

图4 采用SLS技术制造的注塑模具镶块



图5 采用SLM和数控技术制造的注塑模具型腔镶块

处理,增加了制模时间。

此外,也可应用SLS技术制造原型后再翻制模具,如刘红军等^[28]利用SLS烧结聚苯乙烯粉体来制造塑料原型,然后在原型外挂浆,经脱脂和焙烧后得到陶瓷铸型模具,以进行铝合金零件的精密铸造。但是,利用SLS技术制造的原型精度较低,难以满足高精度模具制造的要求。

6 金属直接成形与模具快速制造

金属直接成形技术可以实现模具的直接和快速制造。Armillotta等^[29]通过选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)和数控技术结合来实现注塑模具型腔镶块的制造(见图5),其中镶块上体由SLM技术熔化H11热作钢粉末制造,镶块下体由数控加工制造。Jeng等^[30]选用Fe、Ni和Cr的混合粉体材料,采用金属激光熔覆(Selective Laser Cladding, SLC)和研磨结合的方法来制造金属粉末注射成形模具,其中激光熔覆方法用于模具成形,研磨方法用于精确控制各熔覆层的高度和顶面平滑程度。金属直接成形法可以实现具有较高致密度和力学性能的模具的快速制造,但工艺难度大,因此还处于技术研究阶段。

增材制造技术在模具数字化制造领域的发展趋势

(1)与直接制模方法相比,间接制

模方法工艺复杂,制模周期长,模具寿命较短。直接制模方法,尤其是综合性能良好的金属模具的直接制造,是增材制造技术在模具行业的优先发展方向。

(2)增材制造技术基于分层/叠加原理成形实体结构,其中直接制模过程中模具表面因台阶效应而精度较低,间接制模过程中原型表面的台阶效应会传递至模具,导致模具表面精度的控制难度增加。此外,模具成形及后处理过程中的各种变形及收缩也会导致模具精度降低。基于增材制造技术的模具精度控制将成为一个重要的研究方向。

(3)目前,增材制造技术主要用于小型模具快速制造,在大型模具制造方面还存在技术瓶颈。未来有必要在大型模具制造方面进行深入探索。

结束语

相比模具传统制造方法,增材制造技术可以实现任意复杂结构模具的快速制造,在单件或小批量生产用模具制造过程中,具有制造成本低、周期短的优势,因此广泛应用于模具制造业。未来,有必要在模具直接制造方法、模具精度和大型模具增材制造等方面进行重点技术攻关,以进一步提升基于增材制造技术的模具数字化制造水平。

参考文献

- [1] Altan T, Lilly B, Yen Y C. Manufacturing of dies and moulds. *CIRP Annals*, 2001,50(1):405-409.
- [2] 颜永年,张人信,单忠德,等.快速模具技术的最新进展及其发展趋势. *航空制造技术*, 2002(4):17-21.
- [3] Ding YC, Lan H B, Hong J, et al. An integrated manufacturing system for rapid tooling based on rapid prototyping. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2004, 20(4):281-288.
- [4] Rosochowski A, Matuszak A. Rapid tooling: the state of the art. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 106(1-3):191-198.
- [5] Huang S H, Liu P, Mokasdar A, et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67:1191-1203.
- [6] Mahendru P, Mahindru D V. Rapid prototyping-technology to shorten the product design and development process. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 2013, 4(8):477-488.
- [7] Freitas A, Soares R, Martinho P G, et al. Rapid prototyping and tooling in the manufacture of mould elements for large parts. 2012.
- [8] Pham D T, Dimov S S. Rapid prototyping and rapid tooling-the key enablers for rapid manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2003, 217(1): 1-23.
- [9] Radstok E. Rapid tooling. *Rapid Prototyping Journal*, 1999, 5(4): 164-169.
- [10] Corcione C E, Montagna F, Greco A, et al. Free form fabrication of silica moulds for aluminium casting by stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 2006, 12(4): 184-188.
- [11] Bae C J, Halloran J W. Integrally cored ceramic mold fabricated by ceramic stereolithography. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(6): 1255-1262.

本文共有参考文献30篇,因篇章有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 深蓝)