

文章编号: 1001-3806(2003)06-0572-05

激光熔覆金属粉末直接制造砂型铸造模具的探讨

刘继常^{1,2} 李力钧¹ 鄢 锜¹(¹湖南大学激光研究所,长沙,410082) (²株洲工学院,株洲,412008)

摘要: 探讨了激光熔覆金属粉末快速原型技术直接制造砂型铸造用金属模具的问题。介绍了这种技术的工作原理及其特点;通过分析砂型铸造用金属模具的结构和工况特征,论证了激光熔覆金属粉末快速原型技术适用于这种模具的制造,能降低模具制造成本、缩短工期;提出了在应用中进一步轻量化、低耗化的对策。最后预计,随着各种相关技术的发展及其综合、集成度的提高,激光熔覆金属粉末制造铸造模具的轻量化、低耗化将逐步实现。

关键词: 激光熔覆成型;砂型铸造金属模具;模具结构;模具工况

中图分类号: TGI56.99 **文献标识码:** A

Discussion on direct manufacturing metallic pattern for sand mold based on laser cladding technology

Liu Jichang^{1,2}, Li Lijun¹, Yan Cuo¹(¹Laser Institute, Hunan University, Changsha, 410082) (²Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou, 412008)

Abstract: This paper discusses laser direct manufacturing metallic patterns for sand mould based on laser cladding technology. The fundamental principle and characteristics of this rapid manufacturing (RM) technology are introduced. According to analysis of the structure and working condition of metallic pattern for sand mould, it is demonstrated that this RM technology would make great contributions to fabrication of this pattern. In practice, to acquire lightweight products and to decrease consumption in the procedure, corresponding measures are put forward to improve the process of laser cladding. Finally, it is indicated that lightweight patterns would be produced in low-consumption procedures while the relative techniques and their integration being advanced enough.

Key words: direct manufacturing based on laser cladding technology; metallic pattern for sand mould; structure of pattern; working condition

引 言

快速原型技术可以把由计算机辅助设计的或扫描实物等反求工程方法得到的三维实体(CAD)模型,直接、快速地制造出实物模型(即所谓的“原型”)。这种制造技术具有一些传统加工方法无法比拟的优点,因而自诞生以来,就得到了不断的发展和应用。

在快速原型技术领域中,目前发展最迅速、产值增长最明显的应属快速模具技术。这一点,在2000年5月法国巴黎召开的全球RP协会联盟(GARPA)最高峰会议上得到了普遍的认同^[1]。目前的快速模具技术(主要指金属模具)以间接快速模具制造为主。国内外在这方面有许多研究和应用,如3D Sys-

tems公司的Keltool烧结工艺、CMCOM公司的NCC(nickel-ceramic composite)电铸工艺、爱达荷国家工程和环境实验室的快速凝固工艺(RSP)和Soligen Tech. Inc公司的铸造工艺、Badger Pattern公司的锌合金熔射、东京大学的熔射快速制造硬模(rapid spray hard tooling, RSHT)方法以及日产汽车公司的不锈钢熔射快速制模法等^[2];在国内,清华大学、华中科技大学在铸造和熔射快速制模方面取得了许多研究成果,上海交通大学用精密铸造法快速翻制出汽车轮胎等金属模具,殷华公司及烟台机械工艺研究所同烟台泰利汽车快速模具公司合作采用电弧熔射锌合金制作出快速经济模具^[3]。这些间接快速模具制造方法都包含粉末烧结、或者电铸、或者铸造、或者熔射等工序,制造环节多、工序时间较长,有些复杂件难以成型。相比之下,直接快速模具制造方法的制造环节简单,能够较充分地发挥RP技术的优势,能够制造那些需要复杂形状的内流道冷却的

作者简介: 刘继常,男,1968年8月出生。博士。主要从事激光加工、机械制造和铸造等方面的研究工作。

收稿日期: 2003-01-12; **收到修改稿日期:** 2003-02-27

模具^[4~6]。目前能够直接制造金属模具的 RP 工艺包括激光选区烧结 (SLS)、三维打印 (3D-P)、形状沉积制造 (SDM)、laser engineered net shaping (LENS, 即激光工程净成形, 亦称激光熔覆成型) 和三维焊接 (3D-welding) 等^[1]。

激光熔覆成型技术是快速原型技术之一。它不但与其它快速原型技术一样, 能够由 CAD 模型快速地制造出零件的原型, 而且能够利用与零件材质一样的粉末直接制造出具有最终使用功能特性的零件。这种技术目前在国内外主要处于研究阶段, 但也已经得到一些应用, 如美国的 Optomec Design Co. 公司和我国的清华大学等都已经取得了一些研究和应用成果。由于金属铸造模具具有独特的结构, 更加适合于用激光熔覆成型技术制造。

1 激光熔覆成型技术

1.1 激光熔覆成型的原理

在国际上, 这种快速原型制造技术的名称有多种: laser engineered net shaping (LENS), directed light fabrication (DLF), laser form (Lasform) 和 controlled metal buildup (CMB) 等。这种技术能够直接制造出具有功能特性的致密的零件或模具, 故也称之为激光直接制造技术。图 1 为这种技术的示意图, 其工作原理: 先由计算机辅助设计或通过反求工程生成零件的三维 CAD 模型文件, 再将 CAD 模型文件直接或者通过 STL 格式文件生成分层文件, 在每层上设计扫描路径, 然后通过接口软件, 产生驱动激光工作头或工作台运动的数控程序; 在激光工作头或工作台运动时, 金属粉末通过送粉装置和喷嘴被聚焦到激光束所形成的熔池中, 激光束相对金属基底做

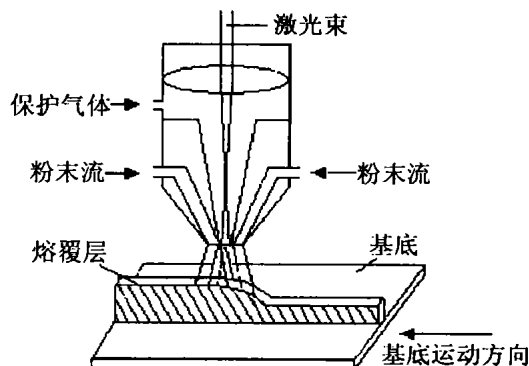


图 1 激光熔覆成型示意图

平面扫描运动, 从而在金属基底上按扫描路径熔覆出具有一定宽度和高度的连续金属带, 形成一层后在垂直方向做一个相对运动, 接着形成后续层, 如此循环形成各层, 而且每前后两层熔合在一起, 最后构成整个金属零件^[7~12]。

1.2 激光熔覆成型技术的优点

这种技术不仅与其它快速原型技术一样能快速成型复杂零件, 还有自己独特的优点。

(1) 优化结构

由于激光直接制造技术成型的零件是通过逐层叠加的方法成型的, 零件的内部结构可以进行优化设计和制造。比如用这种方法成型塑料注塑模具, 可以在制作模具的同时, 将冷却通道一块制作出来, 并能实现冷却通道的优化设计和制造。

(2) 优良性能

该方法使用高功率激光束熔化金属粉末, 并熔覆在金属基底或先前沉积的熔覆层上。由于激光极高的加热和冷却速率, 用该方法成型的金属零件的内部组织细化, 成型件的性能达到或超过传统方法如铸造或锻造成型零件的性能 (如表 1 所示)。

表 1 激光熔覆成型与其它方法成型制件性能比较^[13]

材料	Ti6Al4V		316 不锈钢		625 铬镍铁合金	
	锻造	激光熔覆成型	退火态	激光熔覆成型	锻造	激光熔覆成型
σ/MPa	830 ~ 860	830 ~ 900	241	448	400	634
σ _{0.2} /MPa	900 ~ 950	900 ~ 1000	586	792	834	930
δ/%	10	9 ~ 12	50	66	37	38
δ ₅ /%	20 ~ 25	18 ~ 22				

(3) 实现梯度功能

金属零件或模具在使用过程中, 不同部位的受力状况不同, 相应地有不同的性能要求。由于激光的能量密度可以达到很高, 激光熔覆成型能够适应很多种金属粉末, 包括各种牌号的不锈钢、H3 工具

钢、钛合金等。通过改变输送粉末的类别和成分, 可以在成型件的不同部位得到不同的材质, 得到不同的性能。

(4) 降低成本

激光熔覆成型技术的成型件一般不需后续的渗

透或烧结处理;在成型过程中,金属粉末的利用率较高,还可以在制件不同部位用不同材料,节约贵重材料。所以,成本降低。

表2所示的是激光熔覆成型技术与锻造和铸造技术在材料利用率、设计修改时间、加工循环周期、消耗物、返修率和费用方面的综合比较。可见,激光熔覆成型的设计修改时间和加工循环周期最短,材料利用率最高,费用最低,返修率也较低,故激光熔覆成型技术在金属件的制造上具有很大的优势。

表2 激光熔覆成型技术与锻造和铸造技术的综合比较^[13]

加工方法	激光熔覆成型	锻造	铸造
材料利用率	2/3	<1/10	1/5
设计修改时间	(1~2)d	6个月	3个月
加工循环周期	(1~2)d	4个月	(6~12)个月
消耗物	氩气	模具	铸型、铸模、浇注系统
返修率	低	低	高
费用	低	高	中等

1.3 激光熔覆成型技术需要解决的问题

这种技术需要解决的首要问题是现在还不能稳定地获得高的精度(和表面光洁度)。据文献[7],[10]中的介绍,运用这种技术成型的制件,其 $x-y$ 平面的成型精度为 0.07mm , z 向精度为 0.38mm 。笔者根据实验,认为 $x-y$ 平面的成型精度比较难以达到 0.07mm 。而 0.5mm 的 z 向精度显然是不能满足某些制件的要求的。

其次,这种技术不利于制造悬臂构件。若没有支撑件,因为重力作用,熔化金属下落而无法集聚在所要求达到的悬空位置上,水平悬臂结构无法形成。

2 激光熔覆成型砂型铸造金属模具

激光熔覆成型技术在材料利用率、设计加工周期、返修率和费用等方面比铸造技术具有较大优势;而数控加工模具的周期较长,且有些部位难以加工出来^[14]。因而人们自然会考虑用激光熔覆成型方法代替铸造、机械加工等方法来制造砂型铸造金属模具。

2.1 一般铸造模具的结构有利于激光熔覆成型

一般铸造模具具有如下特点:有拔模斜度;采用圆角过渡;以活块和型芯代替悬臂和中空结构。铸造模具的这些特点,使之能够运用激光熔覆成型技术进行制造。

为便于起模,模具应有拔模斜度,这点有利于激光熔覆金属粉末成型。在激光分层成型过程中,每

一层熔覆在基板或已经形成的层上。如果所需制造的工件具有斜度,虽然它的CAD模型经过分层处理后,其数据模型必然有一些台阶,但是由于在激光熔覆过程中,形成的熔池具有一定尺寸,熔化了的金属能够进行一定流动,能够基本上消除台阶,形成如图2所示的轮廓。这样的轮廓能够达到较高的精度。如果没有斜度,则由于熔池中金属的流动,引起边缘轮廓变化,难以满足精度要求。所以拔模斜度有利于激光熔覆成型。

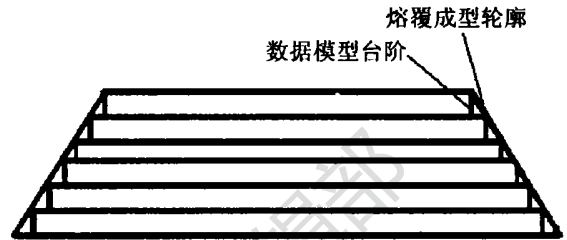


图2 具有拔模斜度的轮廓

为减小或消除内应力,避免铸件形成尖角,要求铸件横截面变化处圆角过渡;而激光光斑及其所形成的熔池都具有一定的尺寸,因而成型时不会形成尖角,正好适应圆角过渡。

在模具中以活块和型芯分别形成铸件的悬臂和中空结构,避开了熔覆成型不利于制造悬臂构件的缺点。形状简单的活块和型芯可用机械加工的方法制造,而形状复杂的活块和型芯可激光熔覆成型。

2.2 砂型铸造模具的结构更便于激光熔覆成型

砂型铸造金属模具用于批量较大的场合。整套模具一般由模底板、铸件模、冒口模和浇注系统模等构成。铸件模、直浇道模座、横浇道模、内浇道模和冒口模固定在模底板上,直浇道模在造型时定位在其模座上。为讨论问题,用图3表示一个带孔和筋的铸件,图4表示对应于图3所示的铸件的砂型铸造金属模具的上半部分,砂芯及其芯盒如图5所示。



图3 铸件

从图4可以看出,因为冒口模、直浇道模座、横浇道模和内浇道模与铸件模一样都装配在模板上,

同样为便于脱模,应有拔模斜度,因而激光熔覆容易成型。

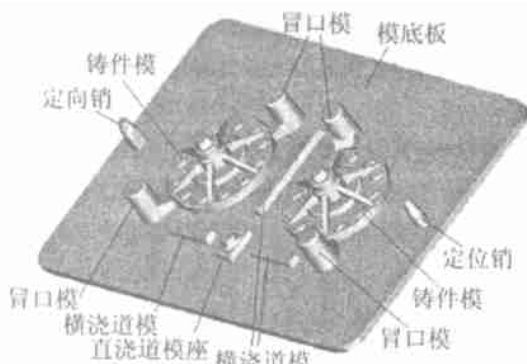


图 4 砂型铸造金属模具上半部

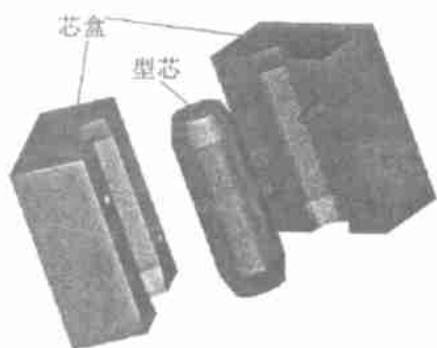


图 5 砂芯及芯盒

为防止起模时掉砂,铸件模与内浇道模之间、内浇道模(或冒口颈模)与冒口模之间的连接处必须圆弧过渡。这些部位在用机械加工或铸造等传统工艺制模时不便成形。对于不规则形状的铸件模,其铸造用木模不易制造,且精度不高;而机械加工也比较困难。激光熔覆成型技术则能解决这些难题。铸件模、非标准的冒口模和浇注系统模可以整体激光熔覆成型,然后经过少量的修整和打孔,装配在模底板上。

2.3 砂型铸造金属模具的工作条件要求激光熔覆成型

砂型铸造模具在使用过程中,表面受到型砂的冲刷、磨擦,而且距离模底板越远,表面受到这种作用越大。因此模具在使用一段时间后,尺寸精度降低、甚至过早地报废。所以希望模具表面有较强的耐磨性和抗表面疲劳性。激光熔覆成型能够适应很多种金属粉末,通过改变输送粉末的类别和成分,可以在成型件的不同部位得到不同的材质和性能。因此激光熔覆成型方法可以在模具表面形成耐磨和抗疲劳层,提高模具的使用寿命。

综上所述,激光熔覆成型技术适用于砂型铸造金属模具的制造,能够降低模具制造费用、缩短工

期、提高模具使用寿命。

3 激光熔覆成型砂型铸造模具技术的改进

随着环境、能源和资源对人类压力的加重,制造者们既要使产品多样化、更新换代快,又要尽可能地节约能源和资源、减少或避免环境污染,因而迫切希望产品体积尽可能小、重量尽可能轻,在制造和使用过程中消耗最低。对激光熔覆成型制件及其过程而言,同样希望进一步轻量化、低耗化。对此,笔者认为应进行如下几方面的工作。

3.1 在保证精度和表面质量的同时提高效率

目前提高精度和表面质量有两种主要的方法:第1种是利用声光信号实时检测熔覆表面状况,反馈控制激光熔覆过程^[15]。实时检测技术已经比较成熟。因为熔池直径和深度与激光光斑直径、功率密度、扫描速度及送粉量和送粉速度等相关,如果能根据检测结果,实时控制这些参数来准确地控制熔池直径与深度,则能获得较好的精度和表面质量。第2种是用磨床或铣床实时修整熔覆层表面及轮廓^[11]。这两种方法目前还不能完全解决问题。

精度与效率并不完全对立。可以通过适当调节与熔池直径和深度相关的上述参数,在得到适当熔池直径和深度的同时,保持较大的扫描速度,从而提高效率、降低消耗。

对包括上述几个参数在内的有关成型工艺参数及其组合与成型质量和速度之间的关系已有研究^[18,9];而要实时控制熔池尺寸与深度,则要求相关的光、机、电技术有所突破。

另外,根据激光与材料相互作用的关系,选取合适的金属粉末组成和激光种类,得到较高的激光利用率,从而使效率提高,消耗降低。

3.2 轻金属制作砂型铸造模具

为减轻重量,轻金属及其合金在砂型铸造模具中应用较多,但是它们对工业中较常使用的激光的反射率较高。虽然多数轻金属的熔点较低,熔化所需的能量相对较少,但其对CO₂激光等的高反射率使激光能量利用率减小。因而效率较低,能耗较大。

笔者认为,适当调整轻金属合金粉末的组成,可以提高粉末对激光的吸收率,从而在减轻重量的同时消耗不会提高。

3.3 减小熔覆体积

图4、图5所示的模具与芯盒厚度较大,熔覆体积较大,消耗金属粉末较多,成型时间较长,导致成本较高;同时,较大的体积导致较大的重量,致使操

作灵活性降低。

减小熔覆体积的对策是在模具(芯盒)的工作面的背部形成空腔。如图6所示,图左为无空腔的

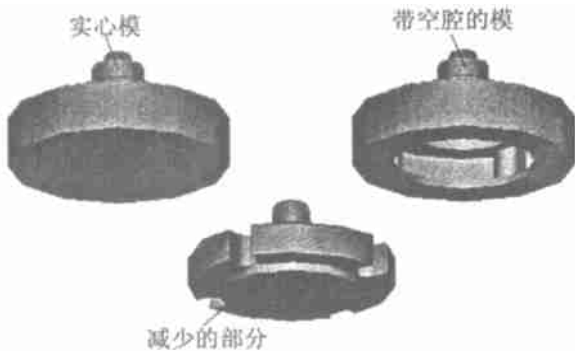


图6 实心铸件模和带空腔的铸件模

铸件模,图右为后背部带空腔的铸件模。可以看出,带空腔的铸件模的体积大大减小。不过,空腔会导致铸件模中存在悬空部位,不易熔覆成型。这个问题也有一些解决办法,例如, Kruth^[11]和 Hensinger^[16]分别采用5轴熔覆机床和机械手, Fessler^[12]采用铜做支撑,成型后蚀除(该方法只能减轻模重,不能降低成本)。而且因为空腔在铸件模的后背部,其制造精度不重要。当然,要彻底解决这个问题,必须有先进的机电控制、图形信息技术等基础,要求较高的机床精度和性能,对材料的理化性能及其与激光和其它物质作用的机理有深入的认识。

综上所述,实现激光熔覆成型砂型铸造金属模具的轻量化、低耗化,必须解决上述的一些问题,而这些问题的解决有赖于各种相关技术,如光、机、电、信息、材料等技术的发展和综合应用。

4 结 论

(1) 激光熔覆成型技术在制造成本、工期和制件结构、性能等方面具有不少优点,但这种技术在制造悬臂构件和成型精度等方面有待于继续改进。

(2) 砂型铸造金属模具无悬臂结构、有拔模斜度、采用圆弧过渡等结构特点和受型砂冲刷、磨擦的工作条件能够使激光熔覆成型技术发挥优点、避开缺点,从而使这种模具适合用激光熔覆成型技术直接制造。

(3) 随着光、机、电和材料等相关技术的发展与综合应用,激光熔覆成型技术将逐步能够优质、高效地直接制造各种结构的轻金属模具,实现模具的轻量化、低耗化。

参 考 文 献

- [1] 颜永年,张人佶,单忠德 *et al.* 航空制造技术,2002(4):17~21,30.
- [2] 张海鸥,徐继彭. 航空制造技术,2002(4):22~23,66.
- [3] 黄树槐,张祥林,马黎 *et al.* 中国机械工程,1997,8(5):8~12.
- [4] Pham D T, Dimov S S. Journal of Mechanical Engineering Science, 2003, 217(1):1~23.
- [5] Prinz F B, Weiss L E. Novel applications and implementations of shape deposition manufacturing. <http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/lew/www/NRR/nrr-paper.html>, 1998-03-25.
- [6] Hu Y P, Chun C W, Mukherjee K. Journal of Materials Science, 1998, 33:1287~1292.
- [7] 焦向东,佟泽民,邓双城 *et al.* 制造技术与机床,2000(7):8~9.
- [8] Kahlen F J, Kar A. Transactions of the ASME, 2001, 123:38~44.
- [9] Vasinonta A, Beuth J L, Griffith M L. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001, 123:615~622.
- [10] Atwood C, Griffith M, Harwell L *et al.* Laser engineered net shaping (LENSTM): a tool for direct fabrication of metal parts. <http://nfgshop.sandia.gov/1400-ext/icalco98.pdf>, 2003-09-09.
- [11] Kruth J P, Leu M C, Nakagawa T. Annals of the CIRP, 1998, 47(2):525~540.
- [12] Fessler J R, Merz R, Nickel A H *et al.* Laser deposition of metals for shape deposition manufacturing (SDM). <http://www.rpl.stanford.edu/files/papre/1996/sf1996a.pdf>, 2003-02-28.
- [13] 黄卫东,李延民,冯利萍 *et al.* 材料工程,2002(3):40~43,27.
- [14] 梅琼凤,吴志超,叶升平 *et al.* 特种铸造及有色合金,2002(1):10~11.
- [15] 钟敏林,宁国庆,刘文今. 激光技术,2002,26(5):388~391.
- [16] Hensinger D M, Ames A L. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000, 4:3095~3100.

(上接第543页)

参 考 文 献

- [1] 苏显渝,李继陶. 信息光学. 北京:科学出版社,1999:39~45.

- [2] Hunt J T, Manes K R, Renard P A. Appl Opt, 1993, 32(30):5973~5982.
- [3] 景峰,张小民,朱启华 *et al.* 强激光与粒子束,2000,12(5):551~555.
- [4] Taha T R, Ablowitz M J. J Commun Phys, 1984, 55:203~207.