

增材制造和切削混合加工机床

张曙

(同济大学 现代制造技术研究所, 上海 200092)

摘要:随着近年来航空航天、汽车和模具工业的技术进步,零件的结构和形状越来越复杂,材料越来越难加工,因此传统的金属切削加工方法受到严峻的挑战。提出了混合加工的定义和类型,并对三种新一代的增材制造和切削加工混合工艺和机床:激光烧结 3D 打印和铣削混合加工、激光堆焊 3D 打印和铣削混合加工以及超声 3D 打印与铣削混合加工的原理和应用案例进行了详细的阐述。

关键词:增材制造;混合加工;3D 打印

中图分类号:TG659 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2015)06-0001-06

Hybrid Machining with Additive and Cutting Technologies

ZHANG Shu

(Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Along with the technical progress in aeronautic and aerospace, automotive and mold industry in recent years, the structure and shape complex of parts are dermally increased, their material are more and more difficult to be machined. In this case, traditional metal cutting technologies are facing serious challenges. In this paper, definitions and types of hybrid machining are proposed. Three new generation hybrid machining technologies and machines: laser-sintered 3D-printing with milling, laser welding with milling and ultrasonic 3D printing with milling are described in details.

Keywords: additive manufacturing, hybrid machining, 3D printing

0 引言

混合加工(Hybrid Machining)是在一台设备上可完成两种不同机理的加工过程,如增材制造(3D 打印)和切削加工混合,电加工和超声波加工混合等。混合加工过程借助不同加工方法的优势互补,显著改善了难加工材料(如钛合金)的可加工性,减少了过程力和刀具/工具磨损,对加工零件的复杂表面完整性和光洁度起到积极作用,为产品设计师开辟了新思路,大大促进了高端产品的创新。

混合加工不是通常所说的复合加工。复合加工是指一台机床上集成了包括车、铣、钻、攻丝和深镗孔等多种工序,能够对一个工件通过一次装夹进行从毛坯到成品全部加工,也称为多任务(Multi-tasking)、多功能(Multi-functional)或完整加工(Complete machining)。

混合加工可分为不同能源或工具的混合和不同过程机理的可控应用两大类,不同能源或工具的混合又可分为辅助性过程(如车削时借助激光软化工件表面)以及混合

性过程(如电加工和电化学加工同时进行等)。增材制造与切削加工的混合属于不同过程机理可控应用的混合。

1 现状与趋势

1.1 激光加热辅助切削

激光加热辅助切削(Laser Assisted Machining)是将激光束聚焦在切削刃前的工件表面,在材料被切除前的短时间内将局部加热到高温,使材料的切削性能变得易于切削。通过对工件表面加热,提高材料的塑性,降低切削力,减小刀具磨损,减小振动,从而达到提高加工效率、降低成本、提高表面质量的目的。对高强度材料,激光加热改善了其可加工性,对硬脆材料可将其脆性转化为延展性,使屈服强度降低到断裂强度以下,避免加工中出现裂纹。

振动辅助车削(Vibration Assistance Turning)是在车刀上施加振幅很小(300 nm~500 nm)的超声振动(40 kHz~80 kHz),使刀具和工件周期地接触和脱离,从而改变切削

作者简介:张曙(1932-),男,江苏如皋人,同济大学教授、博士生导师,现代制造技术研究所名誉所长、兼任上海理工大学机械学院名誉院长、哈尔滨工业大学等十余所高校兼职教授,中国机械工程学会高级会员、常务理事、生产工程分会副主任委员、中国自动化学会机械制造自动化分会副主任委员、美国制造工程师学会高级会员以及诺维特机械科学技术发展中心主任。张曙致力于先进制造技术及其发展战略,包括独立制造岛、分散网络化制造、快速原型制造、并联运动机床等技术的研究,对我国制造业的现状和问题进行了深入的调查研究,系统地提出适合我国国情的柔性制造技术、企业技术改造策略和组织管理模式,是我国先进制造技术研究和应用的倡导者和先驱者之一。曾获得机械工业部、国家教委和上海市人民政府多项部级科技进步奖外,还获得国防科工委的光华科技基金一等奖、中国机械工程学会的科技成就奖、上海市人民政府的上海市科技功臣、中国科学技术协会的全国优秀科技工作者。

过程的物理特性。由于在振动状态下,刀具和工件的接触时间短于相互脱离时间,所形成的切屑短小,切削力小,切削温度低,改善了加工表面的质量。超声振动装置结构相

对简单,可作为刀夹部件安装在标准精密车床上,即可对淬硬工件或难加工材料进行镜面车削。

激光加热和超声振动辅助加工的案例如 2 图所示。



图 1 激光加热和超声振动辅助加工

1.2 电加工和磨削的混合加工机床

德国瓦尔特(Walter)公司的 Helitronic Diamond 刀具磨床按 2 合 1 的设计理念,在一台机床上用旋转电极加工 PKD/CBN 刀具和砂轮磨削硬质合金/高速钢刀具。机床为龙门结构,X、Y、Z 轴的移动皆采用直线电机,A、C 轴由力矩电机驱动,机床两外侧可分别配置电极/砂轮和刀具工件的交换系统。机床用于加工结构对称而形状复杂的刀具,采用中间皮带驱动的轴,两端可分别安装 1~3 个旋转电极和砂轮,回转 180°切换;采用电主轴时只能在一端安装 1~3 个旋转电极或砂轮。机床的外观和加工实况如图 3 所示。

1.3 新趋势:增材制造和切削加工的混合

增材制造的原理是通过材料的不断叠加而形成零件,包括粉末激光融化、粉末激光烧结、薄材叠层、液态树脂光固化和丝材熔融等,是加法。切削加工是从毛坯上切除多余的材料而形成最终零件,包括车、铣、钻、刨、磨等,与增材制造相反,就材料而言都是减法。增材制造优势在于节



图 2 电加工和磨削混合加工的刀具机床

省材料、可以构建结构和形状极其复杂的零件,而切削加工却具有高效率、高精度和高表面质量的优点,两者混合和集成在一台机床上就开创了令人鼓舞的应用前景。3D 打印是直接数字制造,将产品 CAD 实体模型切成薄片,按轮廓进行加工,再一层层叠加而成,故也称为叠层制造,是智能制造的支撑技术。

3D 打印可构建任意复杂形状的产品,最有效地发挥

材料特性,为设计师打开了无限的创新空间。3D 打印的产品是定制和个性化的独一无二产品,不仅可按需制造,还可以在本企业就地制造。

应该指出,汽车、航空航天和模具的重要零件都是金属而非塑料制成的;因此金属 3D 打印零件而非原型制作处于增材制造前沿,开创了产品创新的新纪元。

2 激光烧结 3D 打印和铣削的混合加工

日本松井(Matsuura)公司推出的 Lumex Avance-25 混合加工机床是将激光烧结 3D 打印与铣削加工集成,其外观和典型加工案例如图 3 所示。

Lumex Avance-25 是在一台机床上先进行激光烧结(3D 打印),然后借助高速铣削精加工整个零件或其部分表面以获得高精度和高表面质量。其原理是每打印 10 层(约 0.5 mm~2 mm)形成一金属薄片后,用高速铣削(主



图 3 Lumex Avance-25 混合加工机床及其加工案例

轴 45 000 r/min) 对其轮廓精加工一次,再打印 10 层,再精铣轮廓,不断重复,最终叠加成为高精度、结构复杂的零件,如图 4 所示。

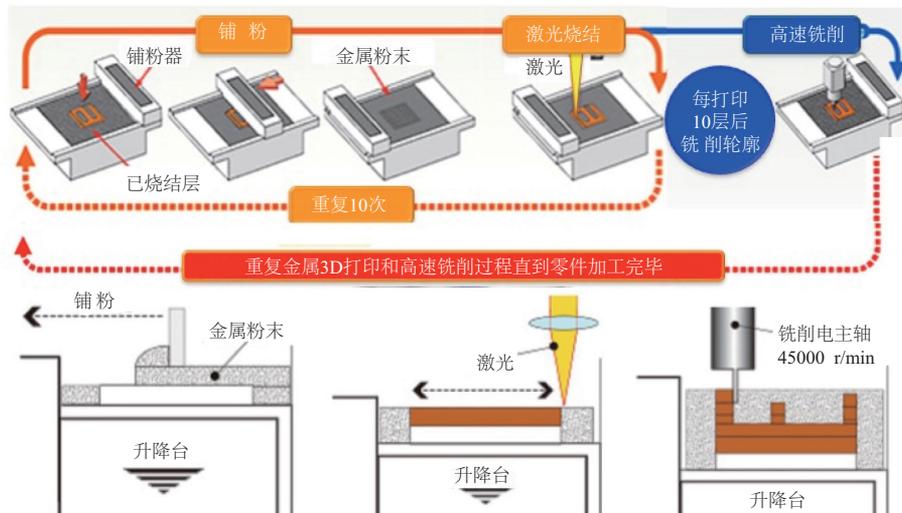


图 4 激光烧结 3D 打印和铣削混合加工的过程

改变激光的聚焦大小和粉末材料,可制造出不同材料密度,包括多孔结构的零件。由于一次装夹完成工件的“增材成长”和精加工,激光烧结与铣削混合加工可达到 $\pm 2.5 \mu\text{m}$ 精度,整个工件的尺寸精度可达 $\pm 25 \mu\text{m}$ 。

激光烧结和铣削混合加工的最大优点是,无需拼装即可制成复杂模具。传统制造方法是,将复杂模具其分解为若干组件,制成后加以拼装,不仅费时费事,而且不可避免存在一定误差,降低了模具的精度。在激光烧结 3D 打印和铣削集成的机床上却可将具有深沟、薄壁的复杂模具一次加工完成,完全改变了复杂模具的设计和制造过程。

其次,注射机将融化的塑料射入注塑模时,会产生高温,导致模具冷却时间大于注射成形的时间,冷却管道的设计和加工往往成为注塑模优劣的关键。传统注塑模采用钻孔方法制作直通和交叉的冷却管道,与模具表面形状不等距,热传导不均匀,冷却效果较差。采用激光烧结 3D 打印,可制作沿模具表面共形的 3D 冷却管道,发热表面与冷却表面基本等距,明显提高冷却效果,缩短冷却时间,

明显提高注射机的生产效率。

3 激光堆焊 3D 打印和铣削混合加工机床

3.1 德马吉的 LASERTEC 65 3D 机床

德马吉森精机(DMG MORI)公司推出 LASERTEC 65 3D,是将激光堆焊技术与 5 轴铣削技术集于一体,构成独特的混合加工机床,其外观如图 5 所示。

LASERTEC 65 3D 混合加工机床配有 2kW 的激光器进行激光堆焊 3D 打印,同时还借助全功能的高刚性的单体(monoBLOCK)结构的 5 轴联动数控铣床进行高精度的铣削加工。“LASERTEC 65 3D 的铣削加工与激光加工之间能全自动切换,它能完整加工带底切的复杂工件,能进行修复加工和对模具及机械零件甚至医疗器械零件进行局部或全面的喷涂加工。与粉床的激光焊接方法不同,激

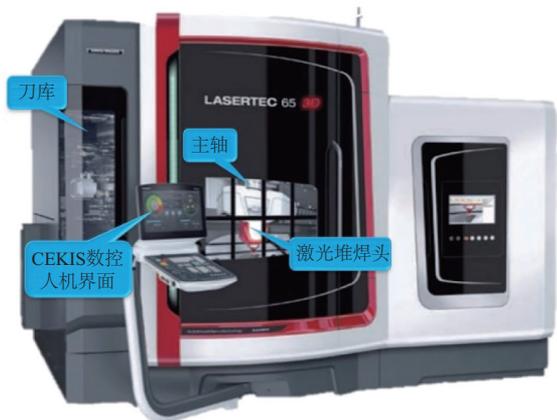


图5 LASERTEC 65 3D 机床的外观

光堆焊技术通过金属粉末喷嘴可生产大型零件。堆焊速度可达 1 kg/h,比粉末激光烧结方法制造零件的速度快 10 倍。它与铣削技术的结合开创了全新的应用领域。复杂的工件通过多个步骤成形,铣削与堆焊可交替进行。这样,由于几何形状的限制无法用刀具加工的零件部位能在最终成形前加工,并达到最终精度要求。

混合加工机床不仅拥有数控铣床优点,如高精度和高表面质量,还有粉末堆焊技术的灵活性和堆焊速度快的优点。例如,对于整体构件,需要铣削切除的金属比例达 95%,而用增材方法仅在需要的地方堆焊。这将大幅节省昂贵的工件材料和降低加工成本。

激光器以及所带的粉末堆焊头一起安装在铣削主轴的 HSK 刀柄处。机床进行铣削加工时,它自动停靠在安全的右侧位置。机床与加工过程由数控系统控制,控制系统是带 CELOS 与 Operate 4.5 版的 Siemens 840D solution-line。

颗粒大小为 50 μm~200 μm 的粉末通过激光头中的管道输送到工件表面,与此同时激光束将金属粉末堆焊在基体材料(工件)的表层,并与基体材料结合在一起,中间无空洞也无裂纹,因而结合强度很高。在堆焊过程中,同时提供惰性保护气体,避免熔覆的金属氧化。金属层冷却后,即可进行机械加工。LASERTEC 65 3D 激光堆焊头的工作原理和运行实况如图 6 所示。

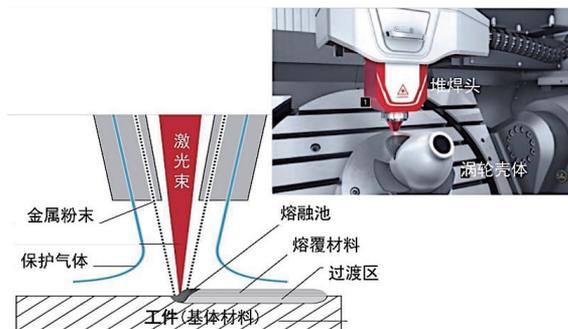


图6 激光堆焊头的工作原理和运行实况

这个混合加工方法的突出优点之一是允许堆焊多层的不同材料。根据选用的激光器与喷嘴几何参数,堆焊的壁厚从 0.1 mm 到 5 mm,能生成复杂的 3D 轮廓和几何形状。由于激光堆焊和铣削加工可方便地相互切换和交替进行,使得能够在零件堆焊成形过程中间,精铣工件在成形完后刀具无法到达的部分。典型案例是一喇叭状涡轮增压壳体,底端有带分布孔的法兰,需铣削外圆、平面和钻孔,喇叭外周有 12 个接头,需焊接、铣削、钻孔等,喇叭口的大于底座的法兰,造成法兰上的孔难以加工。如图 7 所示。按照传统的制造观念,这是一个工艺性极差、几乎无法在一台设备上加工完毕的零件,但是混合加工却创造了现代制造的奇迹。



图7 涡轮增压壳体的 12 道混合加工工序

一般来说,能源或航空航天工业用的数控机床都非常昂贵。因此,用同一台机床进行粗加工、堆焊和精加工将带给客户巨大的经济利益。此外,能源和石油工业的零件通常需要喷涂耐蚀合金,避免磨损。堆焊技术能保护许多应用于恶劣环境中的产品,例如管接头、法兰和特殊结构件。

LASERTEC 65 3D 机床的亮点是巧妙结合激光堆焊技术与铣削技术,实现最高的表面质量和工件精度。配粉末喷嘴的激光堆焊比粉床方式的增材制造速度快 10 倍,金属粉末的利用率高达 80%。可加工完整 3D 工件,最大直径达 500 mm,不需要任何支撑构造,甚至可形成悬垂轮廓,直接加工成品件上无法加工到的部位。

德马吉森精机公司最近又推出 Lasertec 4300 3D 混合加工机床,将同样的增材制造技术与铣削/车削集成,可加工 $\Phi 660\text{mm}$ 和长 1,500mm 的工件,进一步为产品设计师开辟新的创新空间。

3.2 3D 打印堆焊头

美国混合制造技术 (Hybrid Manufacturing Technologies) 公司推出结构紧凑的 3D 打印堆焊头,具有与铣刀锥柄相同的接口,可安装在加工中心刀库中,像刀具一样进行交换。如图 8 所示。

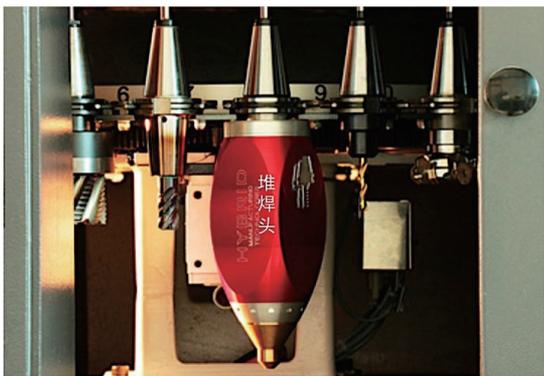


图 8 美国混合制造技术的堆焊 3D 打印头

当机械手将堆焊头插入主轴后,连接激光光源、供粉和供气管道的接口座随即移至相应位置,插到堆焊头上,接通各种供应,即可开始工作。由于这种“功能部件”的堆焊头使用方便,颇受各国机床制造商的欢迎,例如,日本马扎克的 Integrex i400 AM 增材制造车铣加工中心就采用这种堆焊头,其外观如图 9 所示。

4 Fabrisonic 的超声增材制造

美国 Fabrisonic 公司是一家与众不同的工业级三维打印机生产商。该公司使用爱迪生焊接研究所的专利开发了一种将超声波焊接与数控加工结合起来的技术,称为超声增材制造 (Ultrasonic Additive Manufacturing--UAM)。超声增材制造与 LSA、FDM、SLS 等增材制造 (3D 打印) 工艺不同,不是采用液态树脂固化、丝材熔融涂覆或激光粉末烧结,而是用超声波去熔融带状金属薄片,一层层叠加起来,从而实现基于叠层制造 (Layer Manufacturing) 原理的三维打印。超声增材制造与分层实体的薄材选择性切割 (LOM) 有些类似,不过不是将纸用激光轮廓切割后一层层粘接成零件,而是使用频率高达 20,000Hz 的超声波施加在金属片上,借助超声波的振荡能量使两个需焊接的表面摩擦,构成分子层间的熔合,然后以同样的原理逐层连续地焊接金属片,并同时通过机械加工来实现精细的三维形状,从而形成坚实的金属物体。借助 Fabrisonic 的方法可以同时“打印”多种金属材料,如铝、铜、不锈钢和钛合金。由于超声焊接的工作温度很低,不会产生不必要的金相变化。该工艺能够使用成卷的铝或铜质金属箔片制造出有高度复杂内部通道的金属部件。

大多数金属三维打印机成形效率较低,小于 100 cm^3 ,且工作空间有限。Fabrisonic 公司的 SonicLayer 系列超声增材制造机床的打印效率能达到 $250\text{ cm}^3 \sim 500\text{ cm}^3$,其工作台面积为 $1\ 000\text{ mm} \times 600\text{ mm}$,机床外观和工作空间如图 9 所示。

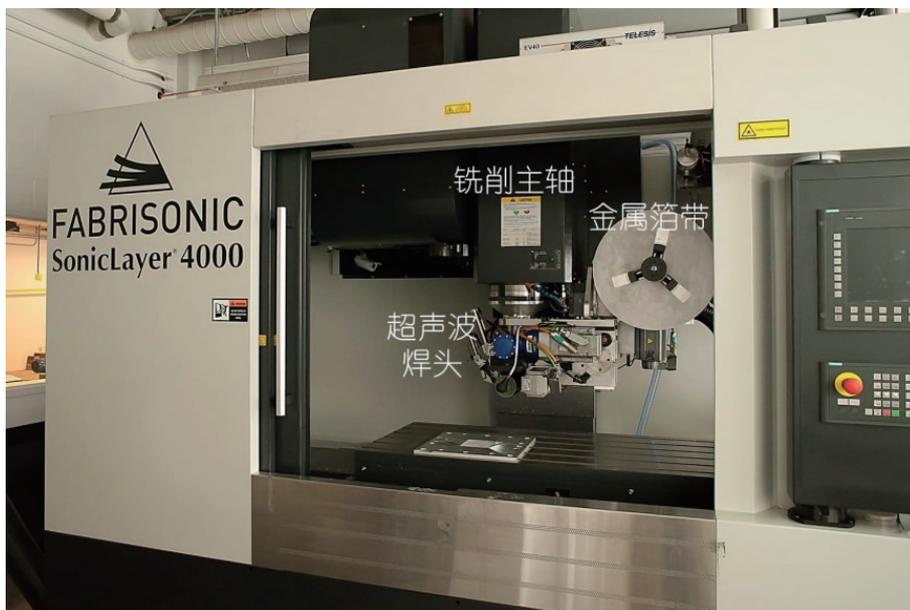


图 9 超声增材制造机床的外观和工作空间

从图中可见, SonicLayer 4000 超声增材制造机床的结构分为两部分, 中间是用于铣削加工的主轴, 功率为 19 kW, 转速为 8 000 r/min; 右侧为 9 kW 的超声增材制造焊头, 焊接力 1 200 kg, 最大进给速度为 5 000 mm/min, 用于增材制造金属零件。

由此可见, 这种超声增材制造设备是在 3 轴数控机床的基础上衍生出来的, 焊接过程可以在任何时点停止, 然后再用机械加工做出内部的三维通道。然后再用增材制造将其密封起来。

由于电子设备往往会产生热量, 热管理组件往往会成

为设计的关键部分。这种热交换器装置过去是借助数控机床加工而成的, 但机加工在创建复杂的通道以及阵列式的交叉钻孔和内部路径的能力十分有限。而如今可以通过超声增材制造来制造出拥有复杂内部通路的金属部件, 使其具备良好的热传导性。因为超声增材制造工艺是固态的, 温度低于 250 ℃, 没有达到金属熔化温度。超声增材制造工艺可以用来将导线、带、箔和所谓的“智能材料”比如传感器、电子电路和致动器等完全嵌入密实的金属结构, 而不会导致任何损坏, 从而为电子器件的设计带来新的可能性, 如图 10 所示。

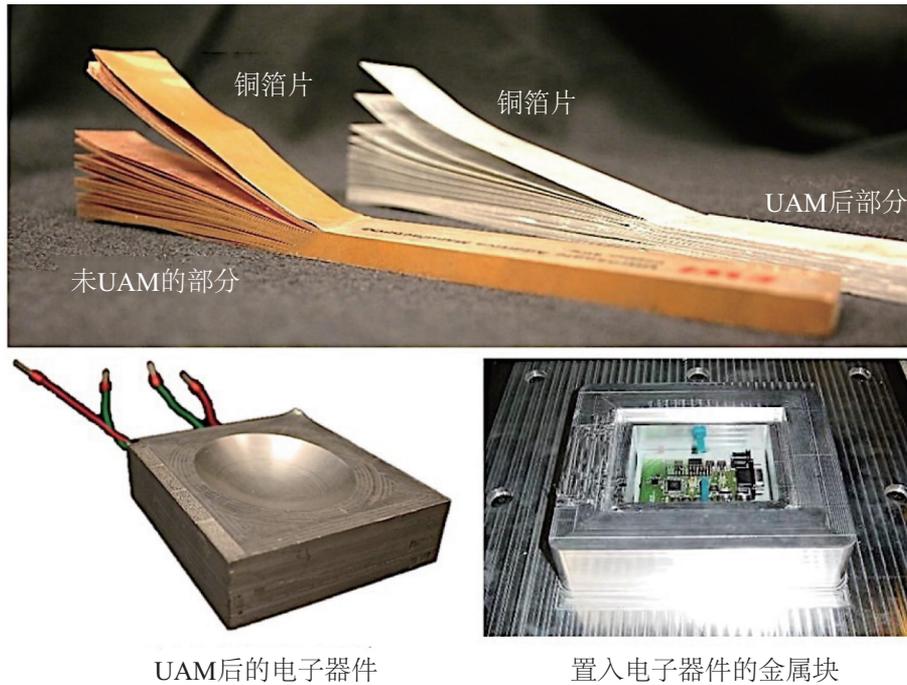


图 10 超声增材制造的典型应用

5 结语

增材制造与传统切削加工的集成在一起, 解决了许多传统加工方法, 包括 3D 打印的难题, 为产品设计师开拓了新的创新空间, 成为智能制造一支新的生力军。

参考文献:

- [1] 张曙. 混合加工挑战传统[J]. 现代制造现代金属加工, 2015, 12:9-11.
- [2] B Lauwers, F Klocke, A Klink, et al. Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2014, 63(2):561 - 583.
- [3] A Richter. Hybrid machining expands a part designer's pallet[J/OL]. Cutting tool engineering, 2015, www.ctemag.com/aa_

- pages/2015/150109-hybrid.html[2015-11-08].
- [4] DMGMORI. Additive Manufacturing in Milling quality[OB/OL]. <http://cn.dmgmori.com/产品/lasertec/lasertec-additivemanufacturing>[2015-11-08].
- [5] Matsuura. Unique one process solution: laser sintering and milling [OB/OL]. <http://www.matsuura.co.jp/english/contents/products/lumex.html>[2015-11-08].
- [6] Fabsonic. 3D metal printing technology without the compromise [OB/OL]. <http://fabrisonic.com/ultrasonic-additive-manufacturing-overview/>[2015-11-08].
- [7] Hybrid Manufacturing Technologies. The AMBIT™ multi-task system-As easy as tool change[OB/OL]. <http://www.hybridmanutech.com/technology.html>[2015-11-08].

收稿日期: - -