

增材与切削混合五轴加工机床技术

■ 同济大学现代制造技术研究所名誉所长 张 曙



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、攻螺纹及深镗孔等多种工序，能够对一个工件通过一次装夹进行从毛坯到成品全部切削的加工过程。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/工具的磨损，对加工零件的复杂表面完整性和表面质量起到了积极作用，为产品设计师开辟了新思路，大大促进了高端产品的创新。

随着航空航天、军事工业、海洋工程的发展，零件结构的形状越来越复杂、材料越来越难以

加工，零件的价值越来越高。传统的机械加工和增材制造的工艺方法遇到挑战，混合加工应运而生。

近年来，各国机床制造商频频推出商品化的增材制造和切削加工混合加工机床。这些混合加工机床可以分为两大类：一类以粉床激光烧结3D打印机为基础集成高速铣削，激光功率在500W以下，加工工件尺寸较小，主要用于精密模具的制造；另一类以五轴金属切削加工机床为基础集成增材制造，激光功率可高达10kW，主要用于大型、高价值和特殊用途零件的制造和修复，本文将对后者进行全面综述。以推出年代为序的增材制造和切削混合加工机床的发展历程如图1所示。

1. 德马吉森精机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五轴铣削技术集于一体，构成独特的混合加工机床。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单体结构的五轴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可以全自动切换，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、机械零件和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1kg/h，比粉床激光烧结方法制造零件的速度快10倍。其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。

产品	公司/机型	主要参数	安装位置	机床外观
激光堆焊头 AMBIT (2013.9)	美国 Hybrid Manufacturing Technology 公司	激光功率 2kW 各种切削加工机床 皆可作为平台	AMBIT 可安装在主轴上，为刀具提供有效力矩	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2013.9)	德国 Harms 五轴 车铣式加工中心 HST1000/1500 AMBIT 激光堆焊头	堆焊速度铣削、激光 堆焊、激光、打磨、 调质于一体机床	激光堆焊头安装在主轴上，存放在刀库中	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2013.12)	德国 DMG MORI 公司 maceH-COCK 五轴 加工中心为基础 LaserTec 65 3D	激光功率 2kW 最大工件尺寸 ø600mm×1000mm 最大工件重量 600kg	堆焊头安装在主轴上，存放在右侧专用位置	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2014.12)	日本 MAZAK 公司 Integrex i-400 AM AMBIT 激光堆焊头	最大工件尺寸 ø600mm×1000mm	激光堆焊头可安装在主轴上，存放在刀库中	
MPA 40 Metal Powder Application (2015.2)	德国 Harms 公司 MPA40 以 C40U 五 轴加工中心为基础 de Laser 激光	最大工件尺寸 ø550mm×1400mm 最大工件重量 600kg	堆焊头安装在主轴上，存放在右侧	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2015.4)	奥地利 WFL 公司 以 M60Tum M60 年 最大工件尺寸 铣加工中心为基础 ø1000mm×4500mm	激光功率 10kW 最大工件尺寸 ø1000mm×4500mm	激光堆焊头安装在主轴上，存放在右侧专用的主座上	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2015.12)	德国 DMG MORI 公司 五轴加工中心 LaserTec 4900 3D 1500kg	最大工件尺寸 ø600mm×1000mm 最大工件重量 1500kg	堆焊头安装在主轴上，存放在右侧专用位置	
LENS PRINT ENGINE (2015.5)	美国 OPTOTEC 公 司	激光功率 0.5~3kW 各种切削加工机床 皆可作为平台	堆焊头安装在主轴的一侧	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2015.6)	德国 ELSA 公司的 激光功率 2kW MORTEKIN AMBIT 激光堆焊头	激光功率 2kW	激光堆焊头安装在主轴上，存放在右侧的刀库	
激光堆焊头 集成 加工机床 (2015.9)	西班牙 TARMIA 公司 动柱加工中心	激光功率 3kW		

图1 增材制造和切削加工混合机床发展历程

混合加工机床不仅拥有数控铣床的优点，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%，而用增材方法可以仅在需要的地方堆焊。这将大幅节省贵重的工件材料，并降低加工成本。进行堆焊时，激光堆焊头可像刀具一样安装在铣削主轴的HSK锥孔内。在机床进行铣削加工时，加工堆焊头退出，并自动停靠在安全的右侧位置，如图2所示。

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50~200 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3所示。

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，堆焊的壁厚为0.1~5mm，能

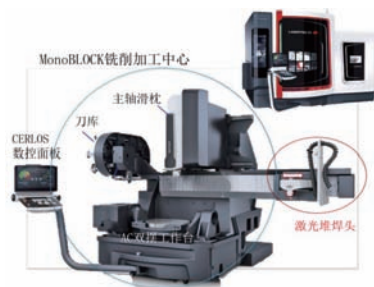


图2 LASERTEC 65 3D机床的配置

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，精铣工件在成形后刀具无法到达的部分。典型案例是喇叭状涡轮增压壳体的加工，其底端有带分布孔的法兰，需铣削外圆、平面和钻孔；喇叭上段外周有12个接头，需焊接、铣削及钻孔等；喇叭口外径大于底座的法兰，造成法兰上的孔难以加工，其加工过程如图4所示，图中浅棕色标注为堆焊工序，浅蓝色标注为铣削工序。

按照传统的制造工艺观念，这是一个工艺性极差、几乎无法在任何一台设备上加工完成的零件，但是混合加工却创造了现代制造的奇迹。

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腐蚀合金，避免磨损。堆焊技术能保护许多应用于恶劣环境中的产

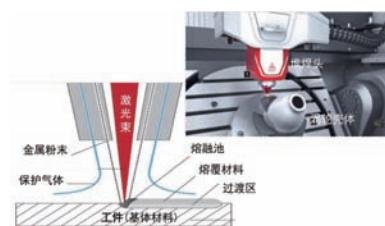


图3 激光堆焊头的工作原理和运行实况



图4 涡轮增压壳体的12道混合加工工序

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%。其可加工完整的3D工件，最大直径可达500mm，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1500mm的工件，进一步为产品设计师开辟了新的创新空间。

2. 激光堆焊3D打印头——AMBIT

美国混合制造技术公司推出结构紧凑的激光堆焊3D打印头，称之为AMBIT，它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5所示。

当机械手从刀库中取出带锥柄的激光堆焊头，插入主轴后，连接激光光源、供粉和供气管道的接口插座随即移至相应位置，



图5 AMBIT激光堆焊3D打印头

与激光堆焊头通过插口快速连接，接通各种能源供应，即可开始工作。采用AMBIT激光堆焊3D打印头在德国HAMUEL HSTM机床上修复叶片的实况如图6所示。

由于这种“功能部件”式的堆焊头使用方便，颇受机床制造商的欢迎，例如，图7所示为在德国ELB公司的Mill Grind铣磨机床上借助AMBIT激光堆焊头修复导流片座和进行成型磨削。

激光堆焊技术相对比较成熟，在增材制造和切削加工混合加工机床上应用案例比较多。除AMBIT激光堆焊头外，美国OPTPMEC公司也推出包括供粉器、控制器和编程软件在内的类似激光堆焊系统，称之为LENS PRINT ENGINE；奥地利WFL公司在Mill Turn M80车铣复合加工中心上集成了功率高达10kW的加工堆焊头；西班牙IBARMIA公司在ZVH系列铣车加工中心集成3kW激光堆焊系统后，推出新的Add+Process系列机床，其加工实

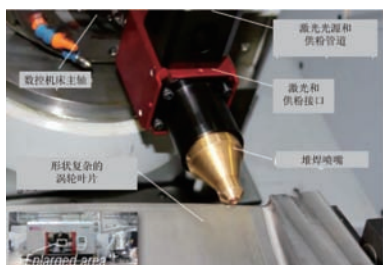


图6 AMBIT激光堆焊头在HAMUEL机床上修复叶片



图7 AMBIT激光堆焊头在Mill Grind机床上修复导流片座

况如图8所示。

3. 哈默公司的金属粉末应用技术

德国哈默公司耗时7年开发了一种增材制造与铣削混合加工的新工艺，称为金属粉末应用（Metal Powder Application——MPA）。MPA工艺是一种热喷射过程，借助高速喷射出的金属粉末的动能，将材料融合到构建对象表面，以生成较大体积和具有复杂内部几何形状的部件，其工作原理如图9所示。

从图9中可见，根据CAD/CAM文件的信息，用高热蒸汽推动悬浮在氮气中的 $\phi 24 \sim \phi 75 \mu\text{m}$ 大小的金属颗粒，并通过de Laval的喷嘴以声速的3倍速度喷射到构建对象的基体上，接触面局部瞬时可产生10GPa的压力和高达1000℃的高温。如此巨大的冲击力和由此产生的高温高压，导致单个金属颗粒剧烈变形，并被粘合在接触面上。这种“微锻造”可实现多达6种不同金属粉



图8 IBARMIA公司的激光堆焊头

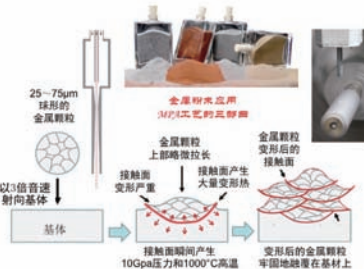


图9 MPA工艺的工作原理

末的增材制造，包括耐热模具钢、不锈钢、纯铜、铜、钛及铝等。可构建的零件最大尺寸可达550mm× $\phi 460\text{mm}$ ，质量可达600kg。

哈默MPA40混合加工机床是在哈默C40U立式铣床的主轴左侧安装了喷射粉末的喷嘴，在双摆工作台上还安装了加热器，以便在必要时对工件进行热处理，其工作空间如图10所示。

借助MPA工艺不仅可以构建复杂形状的工件，还可以构建具有共形冷却管和散热铜导体的多种材料异构的零件，如图11所示。

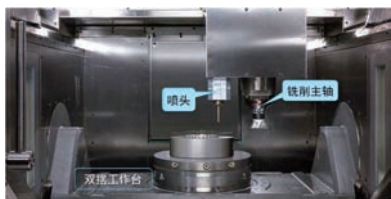


图10 MPA 40混合加工机床的工作空间

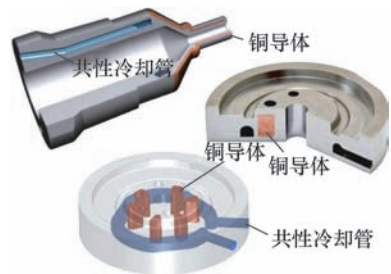


图11 具有共形冷却管道和散热铜导体的零件

4. 结语

增材制造与传统切削加工的集成，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。

MW (收稿日期：20160201)