

混合制造技术在研制空天作动筒中的应用

康拓, 陈金涛, 沈涛, 宋宝龙, 王永福

庆安集团有限公司 陕西西安 710077

摘要: 针对空天作动筒中单筒体类零件生产周期长的难题, 通过对筒体的零件结构、加工工艺进行分析, 将增减材混合制造技术应用于筒体, 并给出了增材制造阶段、预处理阶段和减材制造阶段的工艺流程, 实现了单筒体类零件快速制造的目的。

关键词: 增材制造; 减材制造; 混合制造; 筒体类零件

1 序言

随着航空零部件轻量化设计的发展、难加工材料的应用普及以及产品更新换代的加速, 空天作动筒中的单筒体类零件(以下简称为“筒体”)的结构复杂性日益增加, 而材料的切削性能却在降低。这导致产品的研制周期显著延长, 传统的以金属切削为主的减材制造方式已无法满足当前的研制周期需求。

增材制造凭借其独特的优势, 引起了业界的广泛关注。然而, 该技术也存在着诸多限制性因素, 制约了其应用和发展的广度。因此, 将增材制造与减材制造相结合的混合制造技术逐渐成为研究的焦点^[1]。本文对常见的不锈钢、钛合金和高温合金等材料的筒体加工工艺流程进行了深入分析, 研究了筒体的增减材混合制造工艺, 并将该技术应用于筒体的研制过程中, 并分别给出了增材制造阶段、预处理阶段以及减材制造(切削加工)阶段的工艺流程, 从而实现了高效制造的目的。

2 分析问题

筒体的外形主要以回转体为主, 部分区域分布有油路管、油管接口及法兰盘等凸台, 这类零件属于复杂回转体类型。筒体的加工流程主要包括切削加工、热处理和表面处理等工序。在切削加工阶段, 又可细分为热处理前的粗加工、热处理后的粗加工、半精加工孔系以及精加工内孔等多个步骤, 流程如图1所示。



图1 单筒体加工流程图

新品的研制通常采用棒料或板料(包括自由锻件)作为原材料进行加工。据统计, 在加工过程中, 材料的去除率普遍在70%左右, 甚至可高达97%。粗加工去除余量和铣削外形的时间通常占据整个切削加工总时长的50%以上, 有时甚至达到70%。此外, 切削加工时间一般占零件整体加工时

间的70%以上（不包括周转、检验和等待等辅助工序的时间）。若是遇见高温合金、钛合金这种难加工材料，切削加工占零件整体加工的时间比重更高。

根据以上分析，缩短制造周期的一个重要途径是降低加工过程中的材料去除率。焊接和精密铸造等方法可以减少金属的去除率，但焊接的热影响区较大，难以满足航空航天行业的高标准要求；精密铸造模具的设计与制造周期过长，不符合缩短周期的目标。增材制造技术虽然能够加快加工速度，但容易产生台阶效应（见图2），这会降低尺寸精度和表面质量。对于筒体类零件来说，其对孔系的要求极为严格，单纯依赖增材制造难以达到所需的精度水平^[2]。

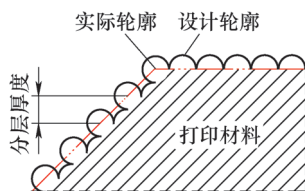


图2 增材制造台阶效应

有学者提出了增减材混合制造技术。现有的增减材混合制造方法大致可分为两种模式：先整体进行增材制造，再进行减材制造；或者增减材交替进行。其中，增减材交替工艺流程通常是将增材制造与减材制造集成在同一台机器上，从而实现复杂零件的高效加工^[3, 4]。然而，这种设备的成本较高，而且属于干式切削^[5]，其加工效率较低，散热速度慢，因此不适合用于切削余量较大或难加工材料的零件。通过对筒体类零件结构进行分析，发现先整体增材后减材的工艺流程较为简单，能够避免单一制造模式的缺陷，基本满足筒体的加工要求。混合制造的加工方式可以有效缩短零件在研制阶段的加工周期，间接提高了难加工材料的加工效率。

3 解决问题

根据筒体零件的结构特点和加工工艺，将混合制造流程划分为三个阶段：增材制造阶段、预处理阶段以及减材制造阶段，具体过程如图3所示。

3.1 增材制造阶段

增材制造阶段的目的是合理预留切削余量和工艺附加量，以满足切削加工过程中的装夹需求。这一阶段旨在降低切削加工的材料去除率，同时确保切削加工的质量。

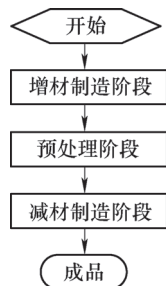
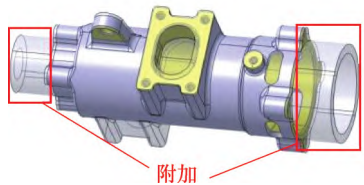


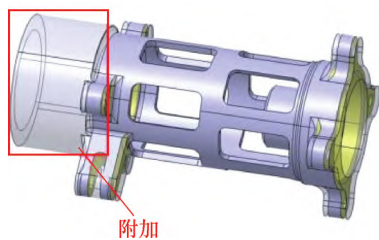
图3 混合制造流程

(1) 工艺附加设计 工艺附加是指在切削加工过程中，为改善或满足零件的装夹性而添加的一些额外结构。这些结构通常在零件加工完成前被去除。鉴于筒体零件的特殊工艺要求，工艺附加一般位于筒体轴线的两端。为确保工艺系统的稳定性，根据经验，当零件总长度 $<150\text{mm}$ 时，仅需在零件一端设置一处工艺附加；后续加工中，通过使用自定心卡盘夹持此处附加结构进行加工。若筒体长度 $\geq 150\text{mm}$ ，则在两头均需设置工艺附加，以自定心卡盘和中心架配合，分别固定两端附加结构进行加工，如图4所示。当零件端面在 30mm 范围内全部为回转结构（或者在自定心卡盘无干涉的情况下），该回转结构本身即可作为此端的工艺附加，无需额外设计；若零件两端没有合适的回转结构可用于直接装夹，则必须设计额外的工艺附加。

(2) 其余孔系余量设计 筒体外壁上分布着油路管、接口和法兰盘等凸台。这些凸台上布满了各种孔系，包括螺纹孔、保险丝孔、油路接口孔和机械接口孔等。这些孔系通常具有几何公差的要求，属于精密孔系。为确保加工精度，需在这些孔系的



a) 一夹一架附加预留



b) 一夹预留

图4 工艺附加预留示意

直径方向及端面上方预留2mm的加工余量。当法向孔系直径 $<10\text{mm}$ 时，一般直接将内孔填充为实心。对于法向孔系直径 $\geq 10\text{mm}$ 的情况，为了保证镗削轴向孔系时的切削质量、降低内孔的表面粗糙度值与提高尺寸精度，并减少加工余量，通常采用分层填充的方法。具体做法是，只在轴向孔系孔壁外2mm的范围内进行实心填充，法向孔系预留如图5所示。外形设计则依据图样中的中差模型进行。

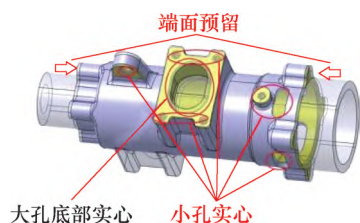


图5 法向孔系预留示意

(3) 轴向孔系余量设计 当轴向孔系的直径 $<\phi 10\text{mm}$ 时，通常将内孔加工成实心并进行填充；而对于直径 $\geq 10\text{mm}$ 的轴向孔系，则一般仅需在单侧预留2mm的加工余量。轴向孔系预留如图6所示。

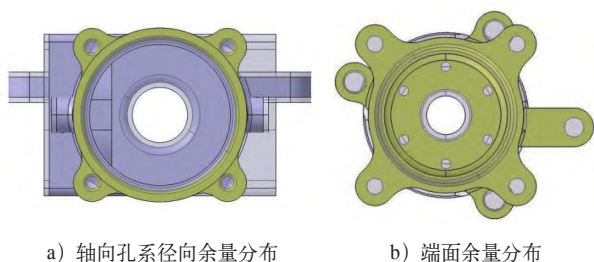


图6 轴向孔系预留示意

(4) 毛坯打印要求 为尽量使筒体的轴向保持竖直方向，从而确保零件的轴向纤维方向一致，在3D打印机规模较小的情况下，可以适当倾斜进行打印，但严禁将筒体轴向水平放置。

3.2 预处理阶段

(1) 毛坯表面处理 由于金属零件在沉积过程中层间会积累残余应力，并且表面因台阶效应而变得粗糙，如果不及时消除这些应力，后续的减材制造过程可能会导致零件翘曲变形，从而对加工质量产生不利影响。因此需要使用80~120目的砂砾进行吹砂处理，吹砂处理后的零件如图7所示，这一步骤不仅能够去除沉积过程中产生的残余应力，而且能提高零件表面质量。

(2) 基准预处理 通常情况下，修整工作内容包括两端外圆和倒角，以及根据具体情况进行的



图7 吹砂处理后的零件

内孔修整。在一端附加零件的加工中，分为两种情况：一种是修整一端附加外圆，并修整另一端的内孔倒角；另一种是同时修整附加外圆和内孔与另一端的内孔倒角。在修整两端外圆之后，进行一夹一架的装夹，以修整好的外圆作为基准，继续修整内孔基准，确保其与修整后的外圆一致。

3.3 减材制造阶段

根据筒体作为复杂回转体的结构特点，其装夹方式通常采用一夹一顶或一夹一架的形式。减材制造阶段工艺流程基本如图8所示。第一步，3D打印毛坯。第二步，使用卧式车床，根据基准线对内孔进行精加工（见图9），尽量保持车削过程的连续性，避免断续车削。第三步，利用四轴立式加工中心，一夹一顶的方式加工零件在直径方向的法兰接口和孔系。第四步，根据零件结构，去除不必要的附加部分。第五步，根据零件两端端面是否有法兰接口，安排三轴立式加工中心，交替进行去除附加和加工端面法兰结构。第六步，根据零件结构选择是否磨削内孔。通过钳工处理去除零件内外表面的毛刺，消除机械加工表面的接刀痕迹，完成整个加

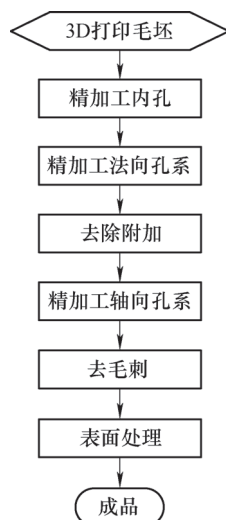


图8 减材制造阶段工艺流程



图9 精加工内孔

工过程。第七步，根据需要，安排检测工序以及涂干膜润滑剂工序。

4 应用推广

(1) 分析零件与毛坯设计 某单筒体材料为GH3625，长度为100mm。该零件左右两端均设有法兰结构。尽管在零件的法向部分没有凸台、接口和孔系，但存在一个铰链接口，需要使用四轴立式加工中心铣削完成加工。由于零件内孔的精度要求不高，因此车床可以满足加工精度要求。在设计毛坯时，在一端预留了30mm的附加长度，法兰面则预留了2mm的余量。法兰面的轴向不同心孔系直径分别为3mm、5mm、6mm和6.2mm，均小于 $\phi 10\text{mm}$ 的标准，因此需要对这些孔系进行填充，最终设计的毛坯模型如图10所示。

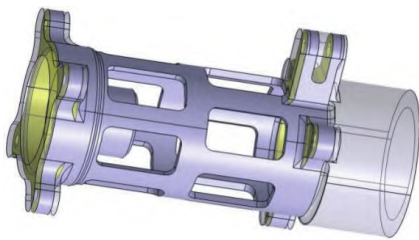


图10 筒体毛坯模型

(2) 预处理阶段 毛坯加工完成后，采用80~120目的砂砾进行吹砂处理，以去除零件表面的残余应力。由于该零件长度较短且内孔较浅，仅对附加外圆和内孔进行修整，以此作为基准，并在另一端面孔口修整倒角。

(3) 减材制造阶段 在加工中首先装夹附加外圆，见光端面作为工艺基准。以此为基准，进行右侧端面的加工，保证其长度适当，并进行镗削内孔、挖内槽等操作。根据图样要求，在左侧内孔处加工出倒角，从而完成内孔的加工工作。接下来，使用四轴立式加工中心，夹持附加外圆并顶紧，以

加工铰链接口。随后，采用三轴立式加工中心，利用自定心卡盘装夹附加外圆，找正内孔的位置。在此之后，加工右侧法兰面的孔系。继续使用三轴立式加工中心，通过组合夹具装夹零件，以左侧法兰面的孔系为定位基准，找正附加内孔，从而加工出零件右端面法兰面。在确保零件总长度的同时，加工右端面法兰面上的孔系。最终通过钳工处理去除零件外表面毛刺，以及机械加工表面的接刀痕迹，完成零件的加工，零件成品如图11所示。



图11 零件成品

5 结束语

本文通过分析研制阶段的单筒体结构和工艺，将增减材混合制造技术应用于筒体的生产，给出了增材制造、预处理以及减材制造三个阶段的工艺流程和方法，并将这些方法成功应用于某筒体加工项目中，缩短了零件在研制阶段的加工周期，进而间接提高了难加工材料的加工效率。该工艺不仅适用于筒体类零件的加工，还可扩展到其他多种零件及多个行业，具有广泛的应用场景和参考价值。

参考文献：

- [1] 王公海，冯培锋. 增/减材柔性制造及加工系统构成形式[J]. 制造技术与机床，2022（1）：24-28.
- [2] 林郁，李阳，高希坤，等. 浅谈3D打印与切削混合制造工艺的原理与应用[J]. 世界制造技术与装备市场，2020（3）：65-67.
- [3] 孙海江，邢飞，卞宏友，等. 增减材混合制造技术的研究现状与进展[J]. 世界制造技术与机床，2022（12）：15-23.
- [4] 张曙. 增材与切削混合五轴加工机床技术[J]. 金属加工（冷加工），2016（5）：2-4.
- [5] 董一巍，赵奇，李晓琳. 增减材复合加工的关键技术与发展[J]. 金属加工（冷加工），2016（13）：7-12.

MW 20250420