

大直径薄壁深腔类框环零件加工工艺

■ 天津航天长征火箭制造有限公司 (天津 300462) 张朋朋 梁津鹤 姚 辉 樊艳权

摘要: 针对某薄壁深腔类框环零件结构特点, 分析其制造难点, 结合现有加工设备, 对工艺路线、车削和铣削等过程进行分析, 给出具体的加工工艺流程。

关键词: 薄壁深腔; 框环; 车削; 铣削

1. 产品结构及加工难点分析

某薄壁深腔框环类零件为新一代运载火箭芯级核心承力结构件, 飞行过程中需承受多重载荷的考验, 其结构强度直接影响整个飞行任务的成败。该产品毛坯采用2219-T852铝合金整体锻环, 外形规格为 $\phi 5\,050 \times \phi 4\,360 \times 250\text{mm}$, 毛坯质量约3 400kg。产品型腔截面为梯形“工”字结构(见图1a), 型腔最大深度95mm, 型腔网格间立筋宽度10mm, 成品质量仅480kg, 机加工过程中材料去除率高达86%。

由于产品材料去除量大, 异形截面型腔切削受力不平衡, 机加工过程中切削应力累积与释放造成侧壁变形较大, 导致产品切削效率低、尺寸精度稳定性差, 制约型号研制进度。

加工难点分析如下:

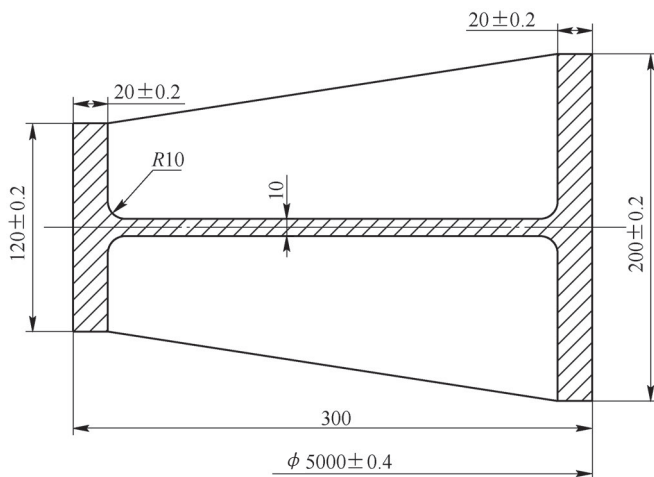
1) 薄壁深腔。网格型腔最大深度为95mm, 网格圆角R15mm, 型腔特征要求网格精铣

时铣刀最大直径为30mm, 最小长度为135mm(含40mm夹具高度), 长径比大于4:1, 属于典型深腔加工。

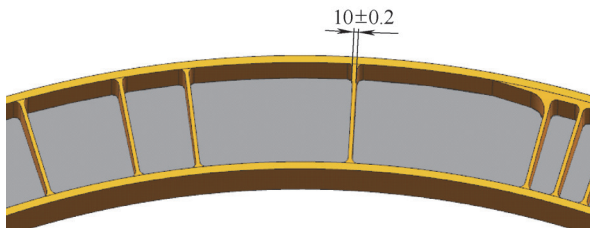
2) 产品变形大。网格型腔铣削过程中, 网格间立筋(见图

1b) 受单侧切削力影响, 易发生塑性变形, 另一侧铣削时导致立筋宽度变薄。

3) 切削效率低。产品机加工过程中去除材料约2 900kg, 其中70%以上材料去除由铣削完成,



a) 型腔截面



b) 型腔结构
图1 产品结构示意

整个产品制造周期约2 000h，滞后于型号研制节点要求。

2. 工艺方案

该产品机械加工过程中主要涉及车削和铣削两种加工方式，材料去除量大且材料切削主要由铣削完成，若仅安排一次铣削工序，长周期加工必然导致变形增大，增加壁厚超差风险。因此，根据产品特点和现有能力，工艺人员安排进行两次铣削。为消除加工内应力、减小铣削变形，在铣削之前分别进行时效去应力，加强制造精度控制。此外，为消除时效引起的变形，在时效前后安排多次车削工序，并为铣削提供找正基准。

3. 车削

该产品毛坯直径约5 050mm，结合车间现有工艺装备，选择普通数控双柱立式车床进行车削。该机床工作台直径6 000mm，最大车削直径6 300mm，满足产品加工需求。

由于产品壁厚较薄，型腔截面不规则，为减少残余应力对于精度稳定性的影响，产品粗车时需尽可能多地进行材料去除工作。结合前期同类 $\phi 5\ 000\text{mm}$ 框环零件变形情况，设定粗车后产品单边余量8~10mm，便于后续时效过程应力释放造成的变形量去除。

产品半精车前需测量内外圆柱面圆度和端面平面度，对产品振动时效效果及残余应力释放情况进行评价。根据评价结果，设定半精车后产品余量一般为3~5mm，如图2所示。在保证精车产品成形的前提下，尽可能将材

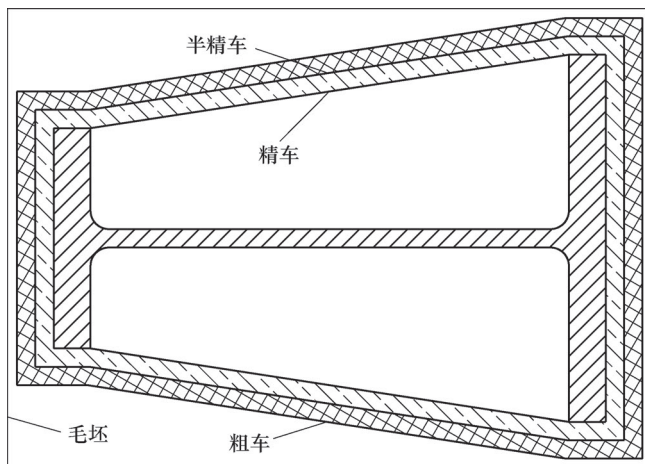


图2 产品车削余量示意

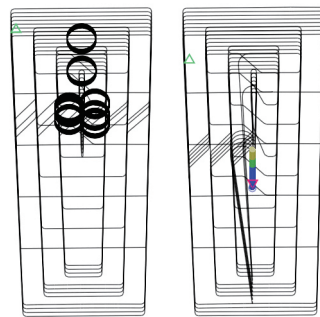
料去除量前移，减小切削应力释放造成的产品变形。

4. 铣削

该产品型腔截面为梯形结构，若采取传统单层平面铣削方式，必然造成顶部斜面部分大量空行程，不利于生产效率的提高。因此，工艺人员将其分为上下两部分，单独进行铣削。

(1) 斜面部分的铣削 为提高铣削稳定性，减少刀具振动造成的侧面粗糙，采用 $\phi 44\text{R}2$ 铣刀进行粗铣。该铣刀为镶刀片式盘铣刀，中间芯部不具备切削能力，必须从零件外部进入。按照刀具使用规范，工艺人员采取螺旋进刀方式，设定起始安全高度为1mm，单层切削深度5mm，然而进刀螺旋时间占网格铣削时间的40%，严重影响网格切削效率。

为解决这一问题，工艺人员将分层界面进行调整，将原斜面部分切削深度由40mm调整至30mm，进而将中心位置螺旋进刀改为斜面外部指定点进刀（见图3），既避免了程序进刀时直接切削，又缩短了进刀路径长度。

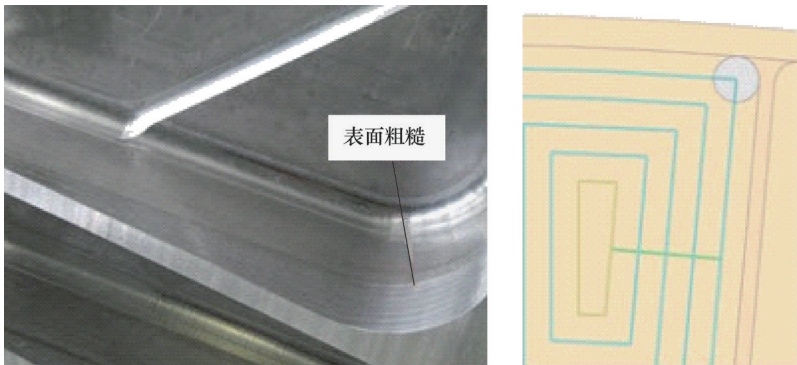


a) 螺旋进刀 b) 指定点进刀
图3 斜面粗加工刀具路径示意

斜面部分剩余的10mm高度采用与底面型腔部分相同的加工方式，连续切削。

(2) 型腔部分的铣削 网格型腔部分采用传统“型腔铣”方式，由网格中心处进刀，沿外形轮廓逐层向外切削，直至型腔底面。然而，精铣时工艺人员发现型腔侧壁拐角处存在明显振纹，不符合工艺文件要求，如图4a所示。

分析认为，网格型腔高速切削时，在拐角处铣刀运动速度及方向发生改变，由于机床惯性影响造成刀具振颤，稳定性降低，影响切削表面质量，且该位置存在轻微过切现象。此外，拐角处切削时铣刀约1/4区域同时



a) 表面振纹
b) 切削示意
图4 拐角处切削过程示意

进行作业，铣刀与工件接触方式由线接触改为面接触，导致瞬时切削阻力骤增，进一步增大该处表面粗糙度值，切削过程如图4b所示。因此，根据网格特点，定制 $\phi 28R5$ 非标铣刀，网格拐角处 $R1\text{mm}$ 圆滑过渡，平衡切削阻力，提高表面切削质量。

网格型腔由螺旋进刀改为指定点直接进刀方式，有效避免了机床小范围内频繁“抖动”问题，提高切削参数，进一步提升切削效率，单网格铣削时间由 195.3min 缩短至 157.5min ，效率提升 19.3% ，效果详见表1。

5. 时效去应力

该产品加工过程中受切削力影响，导致大量残余应力累积，若不进行时效去应力，产品精加工时应力释放，导致侧壁变形加剧，极易造成超差。由于该产品外径规格大，型腔截面规则，若

采取传统热时效去应力工艺，不仅产品运输困难、设备造价高以及能源消耗大，而且热时效周期长，导致产品变形较大，不利于后续加工的开展。振动时效技术属于新型高效去应力工艺，具有自动化程度高、工艺简便、设备轻便以及不受产品规格限制等优点，特别适用于大型薄壁锻铸件去应力时效。

振动时效 (Vibratory Stress Relief, 简称VSR) 又称振动消除应力，源于通过锤击消除金属零件残余应力的工程实践，旨在通过控制激振器的激振频率对零件施以交变循环载荷，使其发生共振或亚共振，产生适当的交变运动并吸收外部能量，以致内部组织发生微观粘弹塑性力学变化，从而使零件内残余应力得到降低或均化，提高尺寸精度稳定性。

6. 结语

采取上述工艺方案，有效解决了大直径薄壁深腔类框环零件加工难题，保证了产品切削质量，产品各项指标均满足设计要求；提高了加工效率，网格铣削周期缩短约 20% ，保障了型号研制进度。

参考文献：

- [1] 苏清玲. 谈谈车削步骤的选择原则[J]. 科学大众, 2007 (6) : 108.
- [2] 刘晓霏. 振动时效原理分析及在大型环框类零件上的应用[J]. 制造技术研究, 2008 (6) : 10~21.

MW (收稿日期: 20191227)

专家点评



本文所述零件为大型空腔薄壁零件，加工中极易产生变形。作者根据零件的结构特点，并参考以前的加工经验，最终确定了合理的加工工艺，保证了产品质量，提高了加工效率。

表1 型腔网格铣削效果对比

	斜面部分			型腔部分			用时总计/ min
	路径长度/ mm	进给速度/ (mm/min)	铣削时间/ min	单层时间/ min	层数	铣削时间/ min	
优化前	25 582.7	300	85.3	10	11	110	195.3
优化后	13 794.5	500	27.5	10	13	130	157.5