大型薄壁深腔端框零件的车加工工艺分析

高显胜 郭东亮 葛 佳 郑 骥
（天津航天长征火箭制造有限公司，天津 300462）

摘要：以某大型薄壁深腔大角度关键结构件为研究对象，在数控立车设备上，首先通过设计车削加工夹具，选用专用机夹刀具和选择合理的切削参数，其次通过工艺优化控制零件加工过程中的切削变形和热变形，并考虑了深腔出屑和让刀等问题。结果表明，本文方法可以实现该复杂零件的加工并保证其加工精度。

关键词：薄壁件；复杂型面；变形控制；装夹优化

Turning Process Technology Analysis of Large Thin-walled Deep Cavity Side Box Part

Gao Xiansheng Guo Dongliang Ge Jia ZhengJi
(Tianjin Aerospace Long March Rocket Manufacturing Company, Tianjin 300462)

Abstract: A new type of satellite carrying stent of the rocket, which is a large angle key structure with thin-walled and deep cavity, is treated as research object in this paper. On the vertical CNC lathe equipment, first, the NC program is developed based on the designed turning angle, with special machining tool and optimized process parameter; second, the cutting and thermal deformation of the part is controlled by process optimization, and the problems such as the deep cavity chip removal and cutter relieving are also considered. The machining result show that, the method developed in this paper can complete the complex parts processing and ensure the machining accuracy.

Key words: thin-walled part；complex surface；deformation control；clamping optimization

1 引言

某新型运载火箭为我国最新研制的大型运载火箭，整体直径为 5m，该型号关键结构件卫星支架为倒 F 型结构。其结构特点为：深腔、大倾斜角和薄壁结构等。受其自身复杂的结构特点制约，实际加工中存在以下几个工艺问题[1]：装夹困难，装夹位置及压边数量较难选取，装夹位置、数量及装夹方式的选择会严重影响零件加工精度；易变形，该支架为典型的薄壁结构件，加工中随着材料的去除，内应力及热应力导致变形，且在加工过程中让刀严重，加工精度难以保证；排屑困难，由于倾斜深槽的存在，切刀倾斜安装存在困难，并随着切槽深度的增加，将导致排屑不顺畅，以及切屑挤压已加工型面导致结构变形甚至槽底开裂；测量困难，由于设计所给多个尺寸为尖点尺寸，加工过程中不易测量[2]。本文以该新型运载火箭卫星支架为研究对象，根据该结构件的加工特性，提出了一系列的工艺优化方法，并最终在保证设计精度的前提下实现该零件的加工。

2 工艺技术方案

零件材料为铝锻件（2219/T852），零件结构为倒 F 型角度框，工艺要求保证内径尺寸为 $\Phi(5036\pm0.2)$ mm，薄壁倾角 56°±15′，壁厚 2mm，整体高度 72mm，槽宽 8mm，深 33mm，槽底存在 *R*2mm 圆角，外圆圆

作者简介：高显胜（1975–），技师，机电专业；研究方向：运载型号大型、重型零件车削加工。
收稿日期：2014–08–12

度要求 0.5mm，端面平面度要求 0.5mm。产品三维结构如图 1 所示，从中可以看出，该产品主要加工难点在于工件装夹、排屑、尺寸测量和减小工件变形等方面，进而保证产品设计要求。

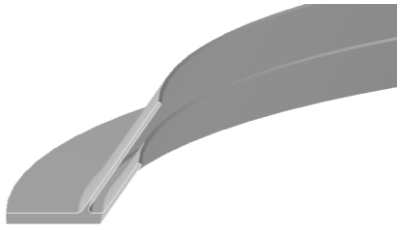

图 1　端框三维结构

为实现刀具 56° 倾斜装夹，设计制作了专用小刀架。如图 2 所示，小刀架设计成可双向装刀，两侧均设有压紧螺钉。正装时适用于下端框零件（向内倾斜槽）的加工，反装时可作为上端框零件（向外倾斜槽）装夹车刀使用[4, 5]。

图 2　小刀架

2.1　零件装卡

为保证零件在加工过程中均匀受力，防止径向变形，装卡采用轴向下压方式。根据以往加工经验，当定位点距离大于 350mm 时，倒压板后的工件的圆度都会大于 0.25mm，由此可见，只有让定位点距离小于 350mm，才能使变形量不大于公差的一半（0.2mm），进而保证壁厚公差要求（±0.2mm）及倾斜角度公差要求（±15′）。

实际加工设备的工作台花盘上只有 24 条“T”型槽，若按 24 点定位，则相邻定位点距离最长约为 780mm，如此定位，则零件的夹持刚度将被严重削弱，在车削时会产生让刀，引起工件圆度过度变化。为此，在没有特制工装的条件下，利用 400mm 长压板的侧面，两端垫以铜皮，对工件下压装卡。一个“T”型槽便能产生 2 个定位点，使总定位点达到 48 个，各定位点间距离可有效控制在 350mm 以内，提高工件夹持刚度，使工件圆度在装夹状态下保持在 0.2mm 以内，满足设计需求。

2.2　刀具选择

根据零件材料特点，该零件材料具有良好的抗疲劳强度、塑性和韧性，车削时，切屑和刀具表面摩擦力大，容易造成粘刀，且根据零件加工直径大、走刀时间长、材料去除量大的特点，刀具需能够实现较大切深，并具有较好的耐磨性。因此，粗车时，选用 SANDVIK 的 VCGX-16 04 08-Al 涂层车刀[3]，精车选用手工刃磨的 YW1 硬质合金车刀。

切槽用切刀较长，刚性较差，容易震颤，因此切削应尽量减小切削抗力，故选取具有较大前角（约为 24°），较小后角（约为 6°）及较小副偏角（3°）的刀具，卷屑槽为开放型。

2.3　刀具装夹

3　工艺设计及实施

在分析工件结构及其材料特性的基础上，为有效控制加工过程中零件变形，制定以下总体工艺方案：粗车→振动时效→半精车→振动时效→精车。通过安排两次振动时效工序，使应力得到充分释放，材料组织内应力均匀分布，在后续加工中保证加工精度。

粗车，零件由约 1.5T 毛坯材料车至成品后，约重为 30kg，材料去除量大，零件变形大，粗车过程中留车工艺边，为后续工序的大余量去除提供可靠的压紧方式。粗车采用大余量去除快速车削的方式加工。

半精车，在径向留余量 5mm，高度方向留余量 3mm，为方便装夹，在精车内型时留工艺压边。同时考虑中间槽壁薄的特点，将粗开槽工序安排在半精车工序。

半精车装夹及余量安排如图 3 所示，*B*、*F*、*C*、E 各外型面精车时均留 5mm 余量，并留工艺压边 *A*，压边相比零件尺寸 6mm（下底厚）；2mm（壁厚）相对较大，根据以往类似零件加工经验，压边尺寸与被加工零件尺寸比值较大时，在去压边的过程中，工件容易发生较大变形，造成工件圆度增大，使接刀痕变深，即在车削面 *E* 面上留接刀台，降低工件表面质量，因此 *A* 厚度须小于 10mm。

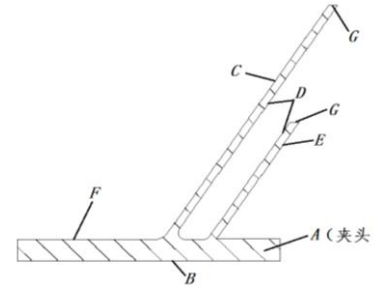

图 3　装夹及余量安排

粗扎槽时留槽底 R 圆角余量 3mm，薄壁内侧 *D* 面留余量 2mm，倒压板车削 E 面及 *C* 面，留精车余量 2mm。在切槽时，由于采用的切刀为开放型卷屑槽，使切屑不易折断，成带状切屑流出。

精车仍采取内外表面去除余量均等的原则，对称切削，使零件残余应力对称释放。首先精车定位基面 *B*，确保平面度在 0.05mm 之内，保证在压 *A* 和 *F* 面时，*B* 面能与工作台表面紧密贴合，且保证 2mm 薄壁设计角度公差要求。将 *E* 面车至尺寸，保证直径方向的尺寸，间接保证尺寸 *Φ*(5036±0.2)mm；车 *C* 面，保证厚度尺寸(12±0.2)mm，按中差加工；此时薄壁壁厚为 4mm，工件刚性相对较好，适合加工薄壁斜面顶端（*G*）34 °小斜面，避免因工件变形引起圆度变化，导致小斜面（*G*）宽窄不一。倒压板精车槽内表面 *D* 至尺寸，车槽底 R，保证底部厚度，最后去除压边。

在精车 *C* 面与 *E* 面时，在斜槽中楔入胶皮，胶皮位置间距离为 270～300mm，均布约 50 处，以降低切削振动。

在车削 *D* 面时，工件厚度已小于 2.5mm，刚性下降，车削过程中开始出现显著的让刀现象。因此，在 C 面与压板之间楔入胶皮，起到辅助支撑及吸振作用。

为了保持工件刚性，在车削 *D* 面时采用接刀法车削。先车削上半部分 30mm 长，厚度至尺寸上限 2.2～2.3mm，如图 4 左图所示；再车削下半部分 33mm 长，厚度与上半部分一致，在厚度接近 2.2mm 时，由上至下，将尺寸车至公差范围内，如图 4 右图所示。

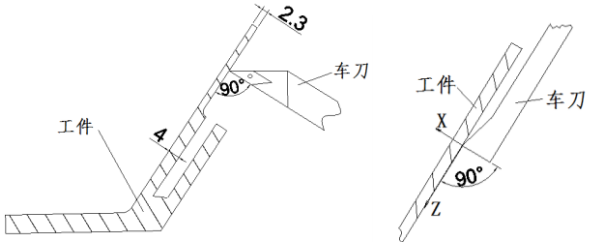

图 4　工件局部厚度尺寸示意图

切削参数选取，从减小切削力，控制材料变形，降低切削温度的原则出发。尽可能减小切削深度，每次背吃刀量不大于 0.2mm，切削速度不大于 220m/min（14r/min），进给量 0.16～0.2mm/r。刀具主偏角 κ_r 选取 90 °，刀尖圆弧半径选取小于 0.3mm，以减小 *X* 方向切削力，如图 4 所示。

工作台表面存在很多下凹，造成 6mm 薄壁与机床花盘接触大面积悬空，在车型面 *R* 时极易产生震颤。因此，加工时需将所有下陷部位垫实后，低速运行，分层切削。

在车削过程中，为防止刀尖部位产生切削瘤，在零件表面涂以少量润滑油。因斜槽深且窄，切屑不易排出，故采用高速气流去除法，及时排除积屑，避免因积屑对已加工面造成挤压致使零件变形甚至槽底开裂。

4　加工结果测量

利用本文所提出的加工方法，精车完后在装卡状态下，使用超声波测厚仪（型号 GL5），取 48 处位置对壁厚(2±0.2)mm 尺寸进行测量，所得数据均在 2.02～2.15mm 之间，符合公差要求；薄壁的上下位置处厚度差小于 0.05mm，说明本文加工方法对切削过程中的让刀现象控制的较好；利用机床 *X* 轴与 *Z* 轴坐标，对斜壁角度精确测量，测量值均在公差要求±15′之内；用百分表打工件外圆圆度为 0.15mm；其他尺寸及粗糙度也完全符合工艺要求。

松开压板后，用百分表测得自由状态平面度为 0.12mm，测自由状态外圆圆度为 0.9mm，工件变形较小，状态理想，各尺寸公差满足设计要求。

5　结束语

由于新型号产品尺寸大，薄壁，结构复杂，加工精度要求高，设计专用工装将导致成本大幅增加，利用本文加工方法，可以在不使用专用工装的情况下完成该复杂结构件的加工，并满足设计需求，大量节省制造成本，并缩短生产周期。通过后期的多次加工，充分验证了该加工工艺方法的可靠性，加工状态稳定性和加工精度可控性。

参考文献

1　王斌，蔡祥宝. 瓶型零件内腔的数控加工方法研究[J]. 航天制造技术，2013(4)：67～69

2　徐金梅，师俊东.大型薄壁铝合金机匣外环加工工艺[J]. 航空制造技术，2014(4)：92～93

3　刘跃南. 机床计算机数控及其应用[M]. 北京：机械工业出版社，2001.6

4　SANDVIK. www.sandvik.coromant.com

5　周泽华，于启勋. 金属切削原理[M]. 第二版. 上海：上海科学技术出版社，1993