薄壁箱体加工变形问题分析及解决方案

南京机电液压工程研究中心　（江苏　211106）　周海祥

摘要：针对薄壁箱体加工变形问题，对刀具、加工参数和装夹方式进行合理改进，消除了加工变形对零件加工精度的影响。

薄壁零件的加工一直是制造业的一个技术难点。根据零件材料、结构和技术要求的不同，零件加工的最终变形情况不一。油箱箱体加工变形是多年来困扰我公司的技术瓶颈之一。箱体作为产品的核心零件之一，其加工难度是整个产品中最大的，它的加工质量也直接影响产品的装配和性能。

1. 箱体的加工难点

我公司油箱箱体按结构类型分为两类：通孔类、盲孔类。盲孔类箱体经过多年的加工，其工艺方法已经固化，零件加工质量稳定。本文关注的是通孔类箱体的加工。

通孔类箱体是典型的薄壁铝合金筒类零件，目前最大的油箱箱体外圆直径达400mm，零件长600mm，壁厚5mm。本文所述箱体外圆直径300mm，零件长370mm，壁薄处仅厚4mm，内孔圆柱度要求0.032mm，表面粗糙度值R_a=0.4μm（见图1）。由于箱体是铝合金锻材，材料性能、零件结构造成零件的加工极其容易产生变形，表面粗糙度、圆柱度要求难以保证。因此，该零件的加工有以下两个难点：①控制加工变形，保证圆柱度要求。②保证内孔表面粗糙度要求。

2. 加工难度分析

该零件曾进行过多年的加工探索，工艺路线安排如下：粗加工→人工时效→半精加工→人工时效→精加工→自然时效→精车零件内孔→表面处理→珩磨零件内孔。使用该工艺方法，内孔的圆柱度要求能够保证到0.10～0.12mm，表面粗糙度值能够保证到R_a=0.4～0.6μm，无法满足设计图样的要求。

经分析，造成表面粗糙度、圆柱度等要素无法保证的原因如下：

（1）加工应力变形。影响加工精度的主要误差源包括机床的几何精度、加工工艺系统的力

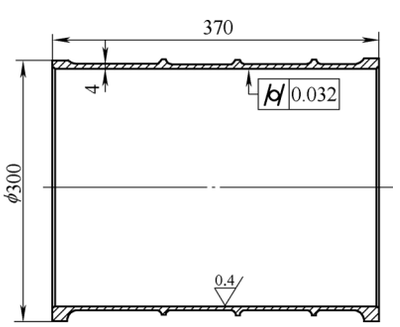

图1　油箱箱体简图

变形与热变形、切削力变形、刀具的磨损以及计测误差等因素。该箱体加工余量很大，材料去除率达到80%以上。由此可知，在零件的加工过程中，会产生相当大的加工应力，加上毛坯锻造和热处理过程中产生的热加工应力，都会造成加工变形，直接影响零件的尺寸和几何形状精度。另外，随着加工过程中零件壁厚的降低，零件本身的刚性以及装夹等工艺刚性减低，加工变形增大，容易发生切削振颤，严重影响零件的加工质量。因此，消除加工变形是保证壳体零件各项技术要求的首要条件。

（2）工艺路线安排。在考虑工艺路线时，需要合理安排粗加工、半精加工、精加工以及时效等去应力工序。此外，去应力的方法也是影响零件变形的重要因素之一。人工时效简单快捷，但会有应力残留，且经过多年的加工总结认为，人工时效对铝合金材料应力释放的作用很小甚至是没有；自然时效加长了加工周期，但应力释放相对彻底，需要综合考虑。精加工工序的余量安排是影响零件加工的重要因素之

一，余量留得过多，会带来新的加工应力，为后续应力变形埋下隐患；余量留得太少，会无法修正内圆的形状，无法保证圆柱度等形位要求，这需要经过大量试验加工摸索。

（3）装夹方式。在零件的加工工艺路线中，精车与珩磨两道工序都是保证零件重要特性的关键工序，内孔的几何尺寸、圆柱度等形位公差要求均在精车工序中保证，因此箱体零件在精加工中的装夹方式对于加工变形的影响非常大。这里就涉及到精车加工和珩磨加工的装夹方法选择。

对于精车加工，现在数控车床采用的专用工艺装备是通过两端面夹紧的方法，由于零件既长且大，这种悬臂装夹方法造成的夹具和零件自身重量产生的力矩导致零件会有内部应力产生。

对于珩磨加工的装夹方法，立式珩磨夹具采用的是包覆式的装夹方式（见图2），其外圆定位上下端面的紧固方式、夹紧力对零件、珩磨加工均有致命的影响。因为珩磨时，油石与零件内表面之间的切削力很大，紧固方法不当很容易造成零件脱落。卧式珩磨加工对夹具的要求更高（见图3），零件要在珩磨过程中消除自身重量的影响，还要利用夹紧方法消除珩磨头轴向加工的力量，珩磨夹具的设计需要考虑这两个方面的因素。

3. 解决方案

（1）逐步消除加工应力。由于箱体的尺寸较大、加工余量大以及相对刚度较低，故加工工艺性差。在制订零件的加工工艺路线时，要考虑到如何充分消除零件的加工变形。应采用多工步粗、精加工去除加工余量，反复自然时效消除加工应力。在粗加工、半精加工阶段，采用切削加工和2～3天自然时效去应力反复穿插，在最终精加工前自然时效20～30天。最大程度上在加工阶段去除每道工序的加工应力，在精加工前将应力完全释放出来。

针对车削振颤情况，首先要注重车加工设备的选择。由于零件的外形尺寸较大，精车加工内孔设备的行程要较大，更重要的是机床的精度必须满足零件的各项精度要求，如机床主轴跳动等指标须小于零件几何形状误差的1/3。可根据箱体的尺寸要求，在行程满足加工需求的前提下，选择斜导轨床身（提高了机床的刚性），设备主轴跳动、窜动及刀架的重复定位精度均在0.005～0.01mm范围内，以满足零件的加工精度要求。其次是刀具的选择，在选择精车刀具时，要充分考虑如何减小切削力、切削热和切削振颤等因素对零件加工质量的影响，并在保证加工质量的前提下，尽可能地提高加工效率。经过不断地摸索，采用带阻尼块的防振刀杆（见图4）可最大程度降低刀具加工过程中的振颤作用。该刀杆内部设计有阻尼模块，利用其调谐质量阻尼器吸收刀柄弯曲变形振动，增加了加工稳定性。

内孔精车分两把刀进行。这两把刀各有其特点，第一把刀去除大部分余量，仅留下最后精车余量约0.05mm，并使得表面粗糙度值达到R_a=0.8μm，刀片材料为钨钴类硬质合金，大前角γ_o=20°，较大后角α_o=12°，刀尖半径r=0.2mm，刀片各表面经过抛光，特别是前、后刀面和切削刃都仔细研磨至R_a≤0.1μm。由于刀片的前、后角均较大，为防止加工过程中出现“扎刀”现象，刀具在安装时需使其切削刃高于零件中心2mm左右。第二把刀是人造金刚石镗刀，完成零件表面的最终要求R_a=0.4μm；其前角γ_o=3°～5°，后角α_o=8°，刃倾角λ_s=0°，刀尖半径r=0.1mm，刀具在安装时需使其切削刃高于零件中心2mm左右。虽然采用刀具修光刃是减小表面粗糙度值最常用的有效措施，但由于油箱壳体属于薄壁零件，加工中务必要降低径向切削分力、减少振动，因此，这两把刀都采用了较小的

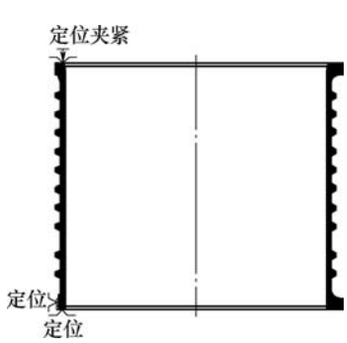

图2　立式装夹示意图

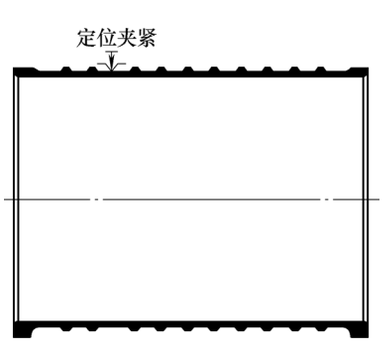

图3　卧式装夹示意图

图4　防振刀杆

刀尖圆弧半径。为降低刀具后面与加工表面的摩擦，对减小表面粗糙度值有利，两把刀都选取了较大的后角。第一把硬质合金镗刀采用大前角，使得切削刃口锋利，减小切削力，能切下较薄的切屑，并有效地抑制积屑瘤和鳞刺的产生，减小振动振幅。而第二把刀的材质金刚石硬而脆，为保证刀具的强度，则选取了较小的前角。

（2）工艺路线安排。经过多次试验后，较为成熟的加工路线如下：粗加工去除大余量→自然时效(小周期)→半精加工→自然时效(小周期)→精加工（除内孔外，零件其余部分全部加工至成品尺寸）→自然时效(大周期)→精车零件内孔→珩磨零件内孔→表面处理→珩磨零件内孔（保证表面粗糙度）。这其中精车与两道珩磨工序都是保证零件重要特性的关键工序，内孔的几何尺寸、圆柱度等形位公差要求均在精车工序中保证，同时内孔的表面粗糙度值也要达到R_a=0.4μm；自然时效工序对于精车前消除零件内应力非常有效。对于箱体内孔的圆柱度、表面粗糙度要求，表面处理前精车加工、珩磨加工保证其圆柱度控制在0.03mm以内；由于零件内孔表面硬质阳极化处理会降低表面粗糙度一个等级，而车削加工必须要达到表面粗糙度值R_a≤0.4μm，所以表面处理后再通过珩磨见光满足零件内孔的表面粗糙度要求。这里需要强调的是，圆柱度要求主要在表面处理以前的精车加工、珩磨加工工序保证，表面处理后由于加工余量所限，无法对圆柱度进行大尺寸修正。

此外，精车工序中零件的加工余量是0.2mm，余量太大则刀具的磨损加快；而余量太小则有可能还修正不了上道工序零件内圆的变形量，导致无法见光。切削时分多次加工，进给量f选取0.05mm/r左右。另外在加工过程中，还采用了润滑性良好的油性切削液，对提高零件的表面粗糙度质量非常有效。由于箱体零件的尺寸较大，加工后几何重心不一定与机床主轴中心完全保持一致，因此加工中机床转速不能过高，以防止离心力造成的加工变形，所以零件的切削速度较慢。珩磨工序保证一定的加工余量，以便于修正内孔的圆柱度。

（3）装夹方式。通孔式箱体的装夹方法是影响加工精度的重要因素，不仅在精车内孔时要注意装夹对加工质量的影响，而且在半精加工中也不能忽略这一问题。盲孔式箱体由于端面有材料，端面装夹的变形影响很小，因此装夹方法采用的是三点扇型软爪装夹。通孔类箱体采用端面压紧、角向定位的专用夹具整体装夹后，整体安装在花盘上（见图5）。该装夹方法避免了零件因端面受力产生扭矩变形的困扰，但由于夹具较大且笨重，零件也较重，因此在设备允许的情况下可使用中心架进行支撑。另外，整体装夹时，注意端面夹紧力量的控制，拧紧力矩控制在最小力矩，以保证零件紧固为宜。

图5　车加工夹具

此外，珩磨夹具是最关键的，根据设备而定。目前通孔式油箱珩磨比较成熟的方法是采用卧式珩磨加工。该珩磨夹具采用的是径向气浮式、轴向紧固式装夹方法。该装夹方法最大程度消除了箱体自重、珩磨头重量以及装夹对珩磨加工的影响。此外，轴向紧固力量一部分分解到气囊上，降低了两端面采用过多紧固力对零件的影响，也最大程度地降低了珩磨头轴向拉伸力的影响。

对于立式珩磨机床，传统的装夹方法是外圆定位、端面夹紧的方法，因为箱体零件壁薄，导致端面夹紧力不能过大，但夹紧力过低存在容易被珩磨头拉出夹具的风险。较为合理的装夹方案（见图6）是：以箱体一端端面、外圆为基准，以气囊紧固箱体外圆，加强筋与夹具内壁保留3～5mm的间隙，上端面保留5mm的间隙作为限位使用。零件装夹完全由气囊径向固定，消除由端面紧固造成的力矩无法调节的因素。外圆和端面限位防止珩磨过程中切削力过大将零件拉出夹

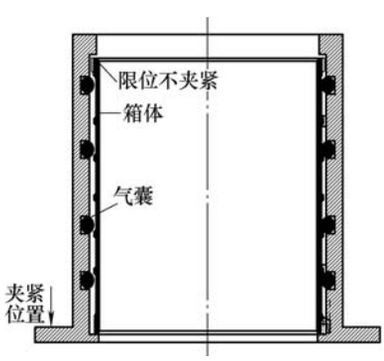

图6　珩磨夹具构想

小型装载机前车架加工工艺研究

徐州罗特艾德回转支承有限公司 （江苏 221004） 孙 响

徐州徐工特种工程机械有限公司 （江苏 221004） 王 磊

摘要：小型装载机前车架形状复杂、铰接孔多。设计制作合理的铆焊和镗孔工装，实现铆焊和镗孔的定位基准统一，并给出了最佳加工方式，保证了工件的加工质量。

小型装载机是一种广泛用于公路、铁路、水电、建筑、港口和矿山等建设工程的土石方施工机械，具有作业速度快、效率高、机动性好和操作轻便等优点，同时可以配置多种机具，实现推土、推雪、起重和装卸木材等多种工作。随着我国城镇化规模的快速发展，中央财政对农村公路建设、农田水利投入和对农机购置补贴的持续加大，小型装载机市场将快速发展。小型装载机作为一种应用广泛、技术门槛低的产品，市场广大的同时竞争也十分激烈。如何提高小型装载机的性价比，将决定其是否能在白热化的市场竞争中存有立足之地，因此研究一种先进的加工工艺，可直接影响小型装载机的成本和质量。

1. 小型装载机前车架结构

前车架为小型装载机的关键

具。该方案需要摸索两道珩磨加工时气囊的压力值，结合表面处理前和表面处理后珩磨所需切削力的大小，逐步确定气囊的最佳压力范围，这需要做大量的试验。

4. 结语

文中介绍和分析的通孔式油箱箱体薄壁结构零件的机械加工工艺技术，其核心就在于消除加工变形对零件加工精度的影响。是结合公司内部的加工经验、查阅资料以及攻关过程中的个案总结。针对不同材料、不同结构和不同要求的薄壁零件，解决方案必然需要有针对性地进行设计，本文所述方案不一定都适用。本文的目的只是提供一种解决思路和处理方法。

参考文献：

[1] 白丽艳. 浅析影响薄壁零件加工精度的因素及其工艺措施[J]. 现代制造，2012（30）：103.

[2] 雷奋红. 浅析薄壁零件加工装夹方法及车削加工技巧[J]. 商情，2010（22）：150.

[3] 吕凤环. 薄壁零件的车削加工[J]. 现代制造技术与装备，2012（2）：36-38.

[4] 袁哲俊. 金属切削刀具[M]. 上海：上海科学技术出版社，1984.

MW（收稿日期：20170511）

专家点评

铝件加工中的应力变形是影响零件加工精度的重要因素，本文所述的薄壁零件在加工中的应力变形尤其明显，再加上切削力、装夹变形等因素，最后零件的精度很难保证。本文作者对刀具、加工参数和装夹方式等进行了分析和改进，在此类薄壁圆筒零件的加工方面积累了丰富的经验，值得同行借鉴。