

铝合金薄壁结构加工的余量堆积法应用研究

王熙杰^[1,2]

(1. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 412006;
2. 湖南省高铁运行安全保障工程技术研究中心, 湖南 株洲 412006)

摘要 铝合金薄壁产品有着切削刚性差、易变形的特点, 因此在数控加工中, 很难达到良好的表面质量和加工精度。针对该问题, 本文提出了一种针对铝合金薄壁结构的余量堆积方法, 将非均匀余量作为整个薄壁件的粗加工、半精加工外形, 提高加工刚性。最后, 利用有限元仿真软件进行了分析对比, 并应用于薄壁零件的加工中, 证明了该方法的有效性, 为相关领域工作者提供一定的指导和借鉴。

关键词 薄壁 铝合金 余量堆积法

中图分类号: TF6

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2021)08-0015-05

1 概述

铝合金材料因其韧性好、强度高及质量轻的特点广泛应用于航空航天与民用工业领域, 但也因其弹性模量小、屈服比大的特性, 较易在加工中产生变形。

因此本文以铝合金薄壁结构为研究对象, 分别针对某下壳体的薄壁深腔结构进行了工艺性分析, 针对长悬臂薄壁结构, 提出了一种将非均匀余量作为半精加工毛坯的余量堆积法, 并通过有限元仿真进行实例验证, 证明了以上观点。

2 存在的问题及应用

针对小尺寸薄壁件, 通过增大粗加工余量预留量, 使用分层切削的加工策略, 可以有效减小加工变形, 保证薄壁件侧壁表面质量。但若薄壁件尺寸较大, 则必须要考虑在热处理残余应力的作用, 对于尺寸越大的薄壁件, 其余量总体积越大, 则产生的残余应力就愈大。

因此, 为了保证残余应力最小化的情况下, 获得较好的加工刚性, 本文提出了一种针对大尺寸薄壁件的余量堆积法, 即将均匀分布在壁厚方向的余量按越靠近支点侧壁余量越厚的规则进行重新排布, 亟待解决较好的加工质量。

3 薄壁零件受载情况下受力分析

3.1 切削力的确定

2A12 铝合金材料侧壁铣削的铣削力预测公式^[1-4]如下所示公式(1)。根据表1中常用薄壁铝合金切削经验参数, 经过计算以确定铣削力的三向分力及其总切削力 F 。

$$\begin{aligned} F_e &= 295a_p^{0.8474} \times v_c^{-0.5574} \times f_z^{0.4363} \times a_e^{0.5018} \\ F_{eN} &= 122.63a_p^{0.8682} \times v_c^{-0.3065} \times f^{0.6185} \times a_e^{0.8838} \\ F_p &= 64.87a_p^{0.7230} \times v_c^{-0.6209} \times f^{0.1145} \times a_e^{0.9215} \end{aligned} \quad (1)$$

根据计算结果, 在薄壁件加工时, 总切削力的变化范围约为5-10N。为了简化研究对象, 因此受力分析模型使用沿垂直于薄壁方向, 且作用于直线上的均布载荷作为约束条件进行分析, 并按均布载荷的极限值 $F_1=5N$ 、 $F_2=10N$ 进行研究。

3.2 简化模型的确定

定义了一个长×宽为110mm×81.5mm, 厚2mm的薄板进行金丝的力学分析, 底部为悬臂支撑, 左侧施加固定支撑, 右侧悬空, 如图1所示。定义其材料为2A12铝合金, 其作为加工的目标零件, 命名为C1。

对于第一种余量预留方案, 即采用阶梯式均匀分布的单侧余量结构, 即在厚2mm的薄板单侧, 增加四段截面为(1×a)mm的长方形余量, 其中a分别为81.5mm、60mm、40mm、20mm并依次递减, 将该结构命名为C2, 如图2(a)所示。

第二种余量预留方案为沿截面的均匀余量, 即在厚2mm的薄板单侧, 增加截面为(2.5×81.5)mm的长方形余量, 并保证余量的总体积与方案一致, 将其命名为C3, 如图2(b)所示。

3.3 受载情况变形分析

使用NX高级仿真模块对图1的A点处底面施加固定约束, 为了对两种结构最大受载情况进行分析, 因此对远离支点的B点分别施加作用于直线上的均布载荷 $F_1=5N$ 、 $F_2=10N$, 分别对C2、C3进行载荷作用下的变形仿真分析, 约束条件如图3所示, 仿真结果的数据汇总见表2。

通过以上分析, 对于悬臂薄板的两种余量预留方案, 在保证切削总余量体积不变的情况下, 在载荷为 $F=5N$ 及 $F=10N$ 时, 沿受载方向的最大位移分别能减少约29.36%与29.68%; 沿受载方向的最大应力能减少15.72%。因此通过结构的优化, 通过改变余量分布的结构, 采用阶梯式的余量堆积方法, 能够有效减少切削加工时受铣削力作用产生

★基金项目: 湖南省科技计划自然科学基金资助项目, 项目编号: 2020JJ7053。

表1 常用薄壁铝合金切削经验参数

参数 / 序号	背吃刀量 a_p (mm)	进给速度 v_c (mm/min)	每个齿进给量 f_z (mm/z)	侧吃刀量 a_e (mm)	切削力 F_e (N)	垂直切削力 F_{eN} (N)	背向力 F_{pN} (N)	总切削力 F (N)
1	1	300	0.067	1	3.76	4.00	1.38	5.66
2	1	450	0.075	2	4.48	7.01	2.06	8.57

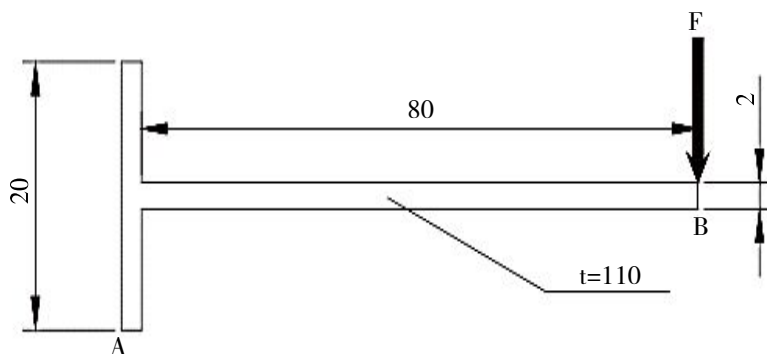
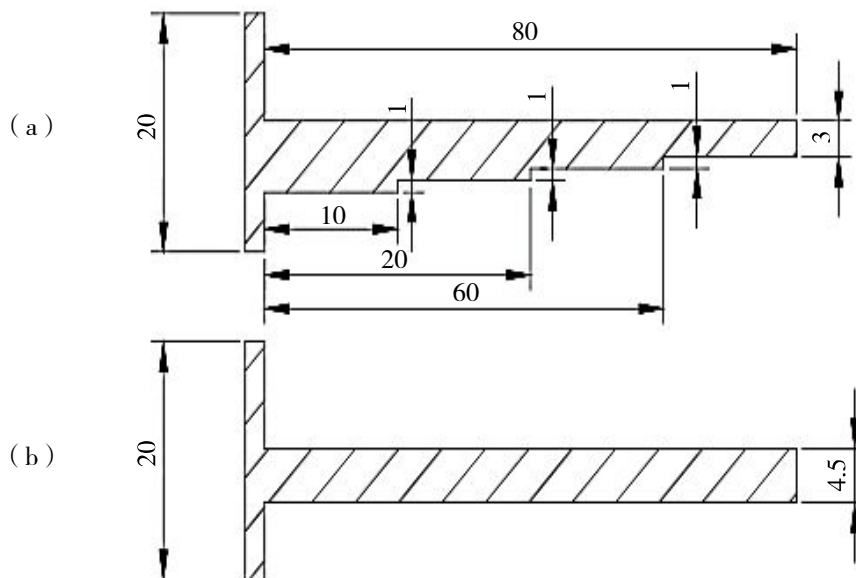


图1 悬臂薄板 C1 外形图



(a) 余量预留方案一 (C2)

(b) 余量预留方案二 (C3)

图2 悬臂薄板的两种余量预留方案

的变形及应力的产生。

3.4 余量堆积参数的判定方法

在使用了余量堆积法的情况下,需要对余量堆积的层数、每层厚度进行适当的设置,避免出现余量底层在壁厚方向延展过多或余量总体积过大的情况。

为了简化计算,假设某截面为长方形的薄壁简支板长

为 L , 其经验余量厚度为 δ , 因此其总余量截面厚度为 $L \times \delta$, 如图 4 (a) 所示。为了保证在余量堆积的情况下余量的总体积与经验余量厚度保持一致,假设余量堆积的每层厚度 δ_0 及每层高度 L/n 均保持相同,则有下文公式 (2), 简化后有每层厚度 δ_0 与 δ 、 n 的关系式为下文公式 (3)。

因此,根据零件结构,通过设定经验余量厚度 δ 及需

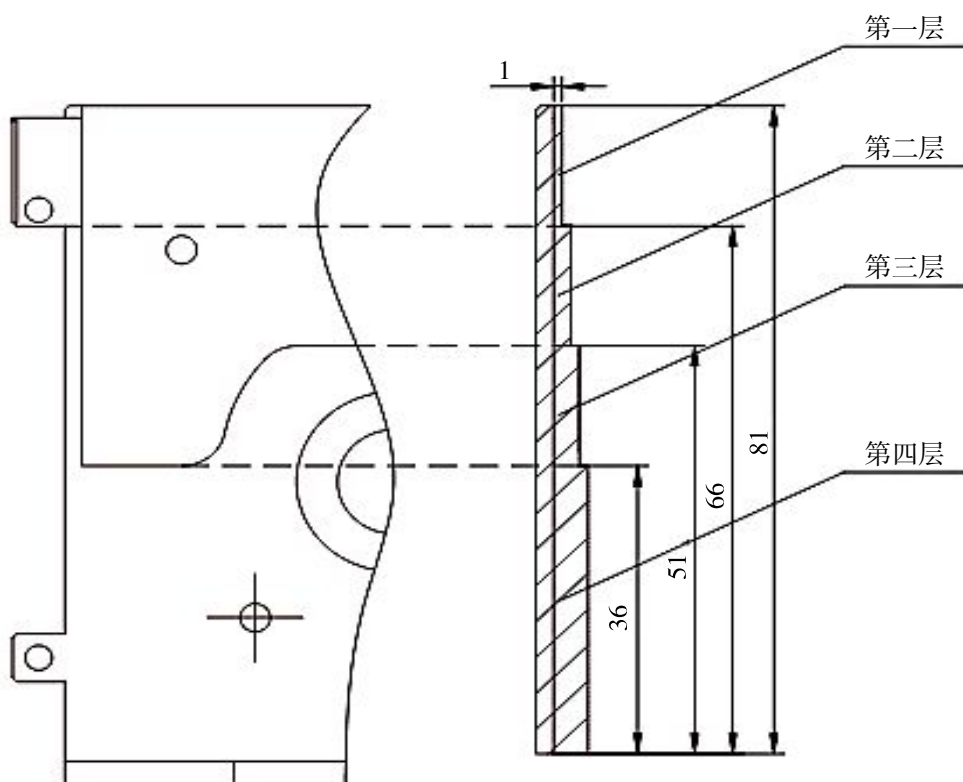


图5 针对侧壁的余量堆积法参数法

表4 主机壳薄体侧壁切削参数

序号	刀具类型	转速 N (rpm)	背吃刀量 a_p (mm)	进给速度 V_c (mm/min)	第1刀侧吃刀量 a_e (mm)	第2刀侧吃刀量 a_e (mm)
第一层	Φ4 铣刀	2000	1	450	0.85	0.15
第二层	Φ6 铣刀	1500	1	450	1.85	0.15
第三层	Φ8 铣刀	1200	1	450	2.85	0.15
第四层	Φ8R1 铣刀	1200	1	300	3.85	0.15

表5 主机壳机加工工艺流程

工序序号	工序名称	工序内容	装夹方案
1	粗细	a. 加工底部 3R 夹具接口, 开去应力槽	台钳 + 三轴机床
		b. 对四侧面开粗, 余量为 1mm	3R 夹具 + 四轴机床
		c. 粗加工内腔, 对内侧壁采用余量堆积法进行非均布余量布置	3R 夹具 + 三轴机床
2	热处理	去应力退火	/
3	精铣	a. 对四侧面精加工, 至外形尺寸图	3R 夹具 + 四轴机床
		b. 采用分层切削法精加工内腔	3R 夹具 + 三轴机床
4	镗	精镗两薄筋上的安装孔	3R 夹具 + 四轴机床
5	慢走丝	割底部外形达图	压板装夹
6	钳	修毛刺	/

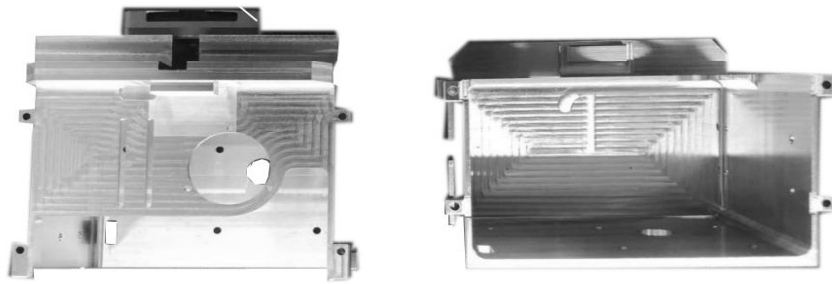


图6 主机壳精加工后外形

要的堆积层数 n ，综合考虑得到的每层厚度 δ_0 及侧壁最大壁厚 $n \times \delta_0$ ，可得出合适的堆积余量值。

$$\frac{L}{n} \times \delta_0 + \frac{L}{n} \times \delta_0 \times 2 + \dots + \frac{L}{n} \times \delta_0 \times n = L \times \delta \quad (2)$$

$$\delta_0 = \frac{2\delta}{1+n} \quad (3)$$

4 基于余量堆积法的零件加工

4.1 零件结构分析

下壳体零件的外形为无盖开放式盒体式结构，由三面 2mm 厚的侧板，一面 3mm 侧板及 3mm 厚的底板组成，其最大包络外形尺寸为 (122 × 106 × 85) mm。

由于其内部安装涡轮蜗杆结构，因此对于相对两薄壁上的同心孔有 $\Phi 0.01$ 的同轴度要求，又因该零件余量去除率高，薄壁结构势必会引起因侧壁的弯曲收缩而导致孔同轴度超差，因此控制侧壁的变形量是该零件加工的关键。

对于该零件，依然采用 3R 夹具的装夹方式，以底部定片作为固定基准以达到机床基准的转移。因此该零件在四轴机床上加工四侧壁，而内腔结构在三轴机床上加工。

为保证材料残余应力释放，因此在铣床粗精加工之间使用退火处理以消除应力。

4.2 基于零件结构的余量堆积参数的设置

根据公式 (3) 中的判定方法，在粗加工时在加工余量 1mm 的基础上，增加余量厚度，根据经验设置为 $\delta = 2.5\text{mm}$ 。由于侧壁高度较大，出于简化编程刀路的目的，设置层数 $n=4$ ，因此根据公式 (3) 有：

$$\delta_0 = \frac{2\delta}{1+n} = \frac{2 \times 2.5}{1+4} = 1$$

因此主机侧壁余量堆积参数如表 3 所示。

根据表 3 中的数据为参考，根据实际结构对每层高度进行调整。以异型薄壁的两个台阶平面、及外侧壁安装搭子的平面，作为余量堆积法四层的高度平面，如图 5 所示。

4.3 切削参数设置

由于零件为薄壁结构，且轴向方向高度较高，为了保证刀具较大装长情况下仍有较好的加工刚性，因此对第一至第四层分布采用 $\Phi 4$ 、 $\Phi 6$ 、 $\Phi 8$ 、 $\Phi 8R1$ 的铣刀进行精加工。

对于侧壁的侧吃刀量控制，为了减少变形，使用分层切削的方式，沿侧壁方向使用两次走刀，考虑到不同刀具的接刀要求，第二次均采用 0.15 的侧吃刀量，保证表面质量。实际切削参数如表 4 所示。

根据工艺优化策略，总结的主机壳机加工工艺如表 5 所示。加工后外形如图 6 所示，经三坐标测量，两涡轮蜗杆安装孔满足 $\Phi 0.01$ 同轴度的要求，因此基于余量堆积法的加工工艺能够满足大尺寸薄壁铝合金特征的加工要求。

5 结论

本文以某下壳体的薄壁深腔结构为例，针对两种开放式薄壁铝合金零件，利用有限元仿真软件进行分析对比，提出了余量堆积法以满足加工过程中残余应力的消除与加工刚性的平衡，解决了薄壁铝合金的机加工难题，能够有效提升表面质量及加工精度，对于铝合金薄壁结构的加工生产具有一定的指导和借鉴意义。

参考文献：

- [1] Fu Yucan, Ding Wenfeng, Su Honghua, et al. Tool wear in milling Ti40 burn-resistant titanium alloy using pneumatic mist jet impinging cooling[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 641-650.
- [2] 罗海霞, 马宝, 李福强, 等. 一种特殊材料薄壁缸筒加工关键技术研究 [J]. 液压气动与密封, 2014, 34(11): 81-83.
- [3] 郭子晔, 房奎正, 葛英飞, 等. 高速列车车体铝合金薄壁中空结构件高效铣削加工研究 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(01): 54-64.
- [4] 万熠, 艾兴, 刘战强, 等. 高速铣削航空铝合金 7050-T7451 时刀具的磨损破损 [J]. 机械工程学报, 2007, 43(04): 103-108.