

基于能量转化规律的加工变形控制方法研究

夏灵, 杨吟飞, 郝秀清, 李亮, 何宁

南京航空航天大学

摘要: 由于航空弱刚性整体结构件具有尺寸大、壁薄、材料去除量大等特点,在加工成型过程中的变形问题十分突出。本文建立了典型结构的弹性力学物理方程,研究了初始残余应力释放对应变能转化及结构变形的影响,揭示了应变能减低的初始状态与结构最小变形的对应关系。利用应变能转化规律建立了毛坯余量分配优化的解析模型,可通过该模型精确计算零件最小变形时的余量分配。以 T 型缘条结构件为例,通过数值仿真验证了基于应变能转化的加工变形控制方法的有效性。

关键词: 应变能转化;加工变形;残余应力;解析模型

中图分类号: TG501;TH161+.3;TH162+.2

文献标志码: A

Research on Process Distortion Control Method Based on Energy Conversion Law

Xia Ling, Yang Yinfei, Hao Xiuqing, Li Liang, He Ning

Abstract: Because of its large size, thin wall and high material removal volume, the distortion in machining the aeronautical structural part with weak rigidity is remarkable. In this paper, the physical equation of the elastic mechanics of a typical structure is established. The effect of initial residual stress release on transformation of strain energy and structural distortion is studied, and the relationship between initial state of strain energy and minimum distortion of the structure is revealed. For optimization of the blank allowance distribution, an analytical model which can be used to calculate the allowance with the minimum distortion is established by using the transformation law of strain energy. Taking the T shaped strip structure as an example, the effectiveness of the processing distortion control method based on strain energy conversion is verified by numerical simulation.

Keywords: strain energy conversion; process distortion; residual stress; analytic model

1 引言

现代飞机的设计制造采用了大量的整体结构件,例如机翼中的缘条、机身中的大梁、腹板、隔框等^[1],这些结构件通常以铝合金和钛合金为主,在加工过程中将近 90% 的毛坯材料被去除转变为切屑。当加工完成并卸除工装后,由于初始应力的释放和重分布,会使结构件发生不同程度的变形,从而影响零件的最终尺寸、形状和加工质量。

国内外对残余应力导致零件加工变形的研究已取得了丰硕成果^[2]。研究主要以铝合金预拉伸板材为对象,分析残余应力与变形之间的关系,采用有限元仿真技术对零件的变形进行预测和分析。零件的加工变形量主要由残余应力、材料去除方式和零件的几何外形决定,目前最有效的控制加工变形方法是降低初始残余应力,常用的加工方法有时效法、机械拉伸法、深冷处理及振动消除法等^[3]。材料去除方式属于加工工艺优化,零件的几何外形则属于

机械设计领域。

零件变形的本质是能量释放导致的功能转化。根据能量守恒定律,零件内部储存的应变能释放转化成零件变形时所做的功。因此,零件内部储存的应变能越少,加工过程中零件产生的变形量就越小。但只要存在有残余应力,加工中的变形问题就不可避免。本文提出了一种基于能量转化规律的加工变形优化的新思路,即在一定初始应变能下通过研究初始应力释放与应变能转化规律,采用工艺优化来降低零件的加工变形量。

2 能量转化分析

2.1 能与功转换

物体受到内应力作用产生变形的过程可以看作一个简单的静力学平衡问题。假设物体的动能为 E_k ,应变能为 U ,在微小的时间间隔内物体从初始状态转变为另一种状态时,根据热力学第一定律,总能量的变化为

$$\delta E_k + \delta U = \delta W + \delta Q \quad (1)$$

式中, δW 为内应力在单元体上所做的功; δQ 为物体变形过程中与周围介质所吸收或散发的热量。

当物体受内应力作用产生变形时,由于此过程的时间间隔十分微小,因此可将物体的变形看作变形前后的两个不同静止状态,其对应的 $\delta E_k = 0, \delta Q = 0$ 。由式(1)可得

$$\delta U = \delta W \quad (2)$$

由式(2)可知,根据能量守恒定律,物体的变形由应变能转化做功导致。

根据功能转换,应变能不但可用应力应变表示,还能用内力做功表示。在外载荷作用下,物体将产生变形,因此内部产生相应的内力: N (轴力)、 Q (剪力)、 M (弯矩)、 M_t (扭矩)。根据最小总势能原理,物体处于平衡状态时,其总势能必为最小值,即 $\delta \Pi = 0$ 。由此可得

$$H = U \quad (3)$$

式(3)中外势力 H 可用内力所做功 W 表示,所以有

$$U = W \quad (4)$$

各内力对变形体所做的功可表示为

$$W = \int_0^l \frac{N^2}{2EA} dx + \int_0^l \frac{M^2}{2EI} dx + \int_0^l \frac{M_t^2}{2GI_t} dx + \int_0^l \frac{KQ^2}{2GA} dx \quad (5)$$

根据能与功的转化,当变形体处于平衡状态时,应变能 U 与外力功相等。初始残余应力是物体内部能量的一种表现形式,在其作用下,加工变形问题的本质取决于边界条件,即材料去除策略和零件的几何外形^[4]。

2.2 应变能转化的解析分析

长梁类结构件(包括缘条和肋板等薄壁件)的变形主要以长度方向的弯曲变形为主,因此预测和控制这类零件的变形主要通过控制其弯曲变形来实现。弯曲变形是零件内部弯曲应变能释放导致,因此控制其变形的关键是研究弯曲应变能的释放和转化规律。根据能与功的转化,通过弯曲变形做功来求得相应的弯曲应变能 U_i ,即

$$U_i = \int_l \frac{M^2}{2EI} dx \quad (6)$$

式中, M 为零件内部的弯矩; EI 为抗弯刚度。

型材的残余应力仅沿板厚方向变化,假设板材内任意一平行截面上的应力分布均匀,在平衡状态下板材内的合力与合力矩均为0,即

$$\int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma dx = 0 \quad \int_{-\frac{e}{2}}^{\frac{e}{2}} \sigma x dx = 0 \quad (7)$$

当毛坯部分材料被去除后,合力与合力矩的平衡被打破,弯矩变形应变能的释放使零件产生弯曲变形。将毛坯部分材料的去除过程简化为图1所示

的二维图。图1中,厚度为 e_k 的板材被划分为 n 层,每一层内都含有一定的应力与弯曲应变能。当去除一层后,剩余层内的应力与应变能将产生变化并重新保持平衡。

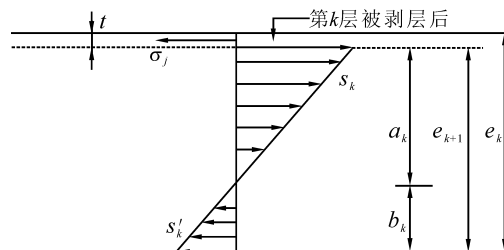


图1 应力转化^[5]

设 R_k 和 e_k 分别表示材料的原始曲率半径和初始工件厚度, R_{k+1} 和 e_{k+1} 分别表示第 k 层材料被去除以后的曲率半径和工件剩余厚度, σ_j 表示被去除层内的应力,则剥层前后材料的曲率关系为

$$\frac{1}{R_k} - \frac{1}{R_{k+1}} = \frac{6te_k\sigma_j}{E(e_{k+1})^3} \quad (8)$$

式中, $j = k - 1$ (当 $k = 1$ 时, $\sigma_j = \sigma_1$); t 为被去除层的厚度。

令曲率 $\phi = \frac{1}{R_{k+1}}$,则去除 k 层材料后,剩余部分材料的变形挠度为

$$\Delta = \frac{\phi l^2}{8} \quad (9)$$

材料去除后,剩余材料内的应力重新分布,工件厚度、中性层的位置等发生相应的改变,根据力的平衡关系有

$$\sigma_j t - \frac{a_k S_k}{2} + \frac{b_k S'_k}{2} = 0 \quad (10)$$

式中, S_k 、 S'_k 分别为去除第 k 层材料后附加在上下表面的应力值; a_k 为上表面到中性层的距离; b_k 为下表面到中性层的距离。

附加应力值 S_k 与板材曲率变化的关系式可表达为

$$S_k = -a_k E \left(\frac{1}{R_k} - \frac{1}{R_{k+1}} \right) \quad (11)$$

根据图1中的几何关系,有

$$a_k + b_k = e_{k+1} \quad (12)$$

$$S'_k = \frac{b_k}{a_k} S_k \quad (13)$$

根据式(8) - 式(13)可得

$$\sigma_k = \frac{e_{k+1}(3e_k + e_{k+1})}{6e_k} \quad (14)$$

假设去除的每一层都是等厚度 t ,因去除 k 层导致剩余每层材料内的附加弯矩 T_{ki} 为

$$T_{ki} = \int_{a_{m-(i-m)t}}^{a_{m-(i-m-1)t}} S_k \cdot \frac{a_k - x}{a_k} [(x - a_m + (i - m + 0.5)t)] dx \quad (15)$$

式中, x 为离剩余材料中性层的距离; $i = m + 1, m + 2, \dots$ 。

当材料逐层去除后, 剩余材料的弯矩就会叠加每次去除后的附加弯矩。由于每层材料的厚度一致, 因此其抗弯刚度 EI 相同。由式(6)可知, 此时弯矩变形应变能的变化只取决于弯矩的变化。通过以上分析, 材料去除后剩余材料的弯曲应变能演化见表 1。

表 1 弯矩转化规律

每层编号	初始弯矩	剥除一层后的附加弯矩	剥除二层后的附加弯矩	...	剥除 k 层后的附加弯矩	重分布后的弯矩
1	M_1			...		
2	M_2	T_{11}		...		$M_2 + T_{11}$
3	M_3	T_{12}	T_{21}	...		$M_3 + T_{12} + T_{21}$
...
n	M_n	$T_{1(n-1)}$	$T_{2(n-2)}$...	$T_{k(n-k)}$	$M_n + T_{1(n-1)} + T_{2(n-2)} + \dots + T_{k(n-k)}$

由式(15)计算得知, 每剥除一层后的附加弯矩值都相等, 即 $T_{11} = T_{12} = \dots = T_{1(n-1)}$, 表明随着材料的去除, 剩余材料内每一层的弯矩变化一致。弯曲应变能的转化规律与弯矩变化规律一致, 即随着材料的去除, 零件内不同位置处的弯曲应变能转化程度保持一致。

3 基于能量转化的加工变形控制方法

3.1 毛坯余量分配优化的解析模型

根据上述分析, 弯曲变形是由弯曲应变能释放导致, 而弯曲应变能的转化规律表明其对变形的贡献度是由初始状态所含的应变能大小决定。根据能与功转化定律, 当零件内包含的初始弯曲应变能达到最小时, 其在毛坯中所处的位置最佳, 最后的变形量达到最小。零件结构和初始应力分布状态决定了零件内弯曲应变能的大小, 由此可建立如图 2 所示的模型进行解析分析。

为了提高模型的预测精度, 需要对模型进行以下合理假设: ①平面应力假设。铝合金预拉伸板材的应力分布可近似为平面应力状态, 应力只有在长度和宽度的分量, 切应力对变形的影响很小, 通常可以忽略^[11]; ②缘条类结构件的长度远大于宽度和厚度, 因此可看作是梁类结构, 其变形以长度方向的弯曲变形为主。本文主要研究长度方向的应力所产生

的弯矩对零件弯曲变形的影响。

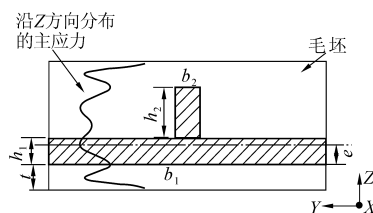


图 2 毛坯余量分配解析模型

如图 2 所示, 零件处于毛坯中的某个位置, 底面加工余量为 t 。零件在弯曲变形过程中, 外层受拉伸, 内层受挤压, 在其断面上必然存在一个既不受拉、又不受压、应力为零的过渡层, 该过渡层即为中性层。

假设零件的尺寸如图 2 所示, 零件内中性层距离零件底面的高度为 e , 主应力沿厚度 Z 方向的分布为 $\sigma(z)$, 根据材料力学求得零件内的弯矩为

$$M_0 = \int_t^{t+h_1} \sigma(z) [z - (t + e)] b_1 dz + \int_{t+h_1}^{t+h_1+h_2} \sigma(z) [z - (t + e)] b_2 dz \quad (16)$$

根据能与功的转化计算得到弯曲应变能为

$$U_0 = \int_l \frac{M_0^2}{EI} dx \quad (17)$$

由式(17)可计算得到零件在毛坯不同位置处所包含的弯曲应变能。根据应变能转化规律, 当零件所含弯曲应变能最小时, 零件加工后最终的变形量最小。

3.2 数值仿真实验

为了验证基于能量转化的毛坯余量分配解析模型的正确性, 建立了图 3 所示的 T 型缘条结构件数值仿真模型。毛坯尺寸为 $1000\text{mm} \times 110\text{mm} \times 50\text{mm}$, 初始应力分布如图 4 所示。采用 ABAQUS 软件对模型的余量分配进行数值仿真。首先建立相应的毛坯模型, 模型必须包含零件和被去除材料单元。选中将要被去除的材料并设置成一个集合, 利用生死单元法去除相应材料。由于仿真处于全约束状态, 零件最终的变形量与材料的去除路径无关。为了提高仿真分析效率, 将除零件外的所有材料一次性去除。边界条件采用“3-2-1”固定法, 即在同一平面内选取 3 个不共线的点分别限制其“ $X-Y-Z$ ”、“ $Y-Z$ ”、“ Z ”方向的位移, 固定后模型的刚性位移被限制但能够自由变形。

假设零件模型底面余量为 t , 根据毛坯厚度和零件尺寸得出 t 的范围为 $0-20\text{mm}$ 。当余量 $t=0$ 时, 零件位于毛坯最下面的极端位置。将余量 t 每增加 2mm 进行一次仿真, 得到在不同余量下零件变形的

最大挠度值;当余量 $t = 20\text{mm}$ 时,零件位于毛坯最上面,其仿真结果如图 5 所示。

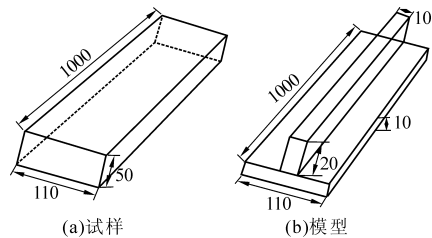


图 3 试样与模型尺寸 (mm)

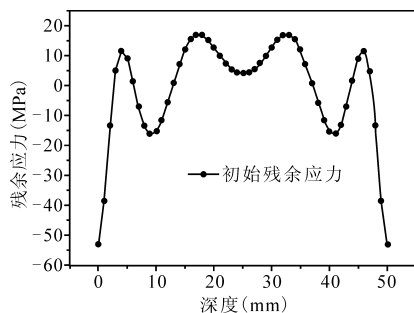


图 4 初始应力分布曲线

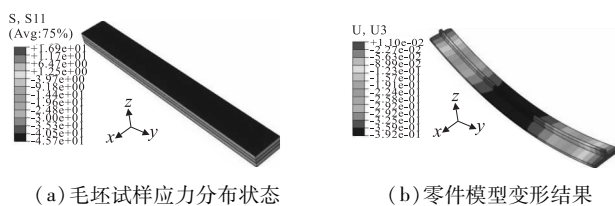


图 5 余量分配数值仿真结果 ($t = 20\text{mm}$)

已知沿厚度方向变化的主应力分布和零件模型尺寸,根据解析计算可得到不同余量下零件内所包含的弯曲应变能大小。为了提高计算效率,通过 MATLAB 软件对解析模型进行编程计算,得到每个位置处零件的弯曲应变能大小。如图 6 所示,将不同余量下数值仿真得到的挠度与解析计算得到的弯曲应变能进行对比。

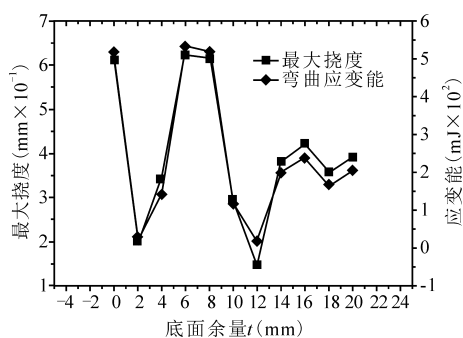


图 6 变形量与应变能的对应关系

由图 6 可以看出,不同余量下零件的最大变形挠度与弯曲应变能的变化趋势非常接近。在余量为 12mm 时,零件所含弯曲应变能最小,正好此处的最

大挠度最小。这证明了基于能量转化的解析模型能够对非对称结构件的加工余量进行精确计算,以达到零件最终变形量最小化的目的。本文基于简化毛坯应力条件,通过 T 型缘条结构件验证了基于能量转化的加工余量分配的解析法是有有效的。

4 结语

本文以初始应力释放、应变能转化为基础,揭示了加工变形机理。通过能与功转换对变形进行分析,提出了基于应变能转化的毛坯余量分配优化的解析方法。主要结论如下:

(1) 采用解析建模的方法分析了零件加工过程中弯曲应变能的转化规律。结果表明,随着材料的去除,剩余材料内的应变能转化程度一致,即材料内弯曲应变能释放对剩余材料变形的贡献度取决于其初始状态所含应变能的大小。

(2) 根据弯曲应变能转化规律,以 T 型缘条结构件为模型进行解析和数值仿真分析。结果表明,可以通过优化余量分配的方式来控制加工变形,且通过解析模型可以精确计算得到零件最小变形时的余量分配。

参考文献

- [1] 唐国兴. 残余应力重分布引起的结构件铣削变形研究[J]. 机械设计与制造, 2008(7): 25-26.
- [2] 唐志涛. 航空铝合金残余应力及切削加工变形研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [3] 王秋成, 柯映林. 航空高强度铝合金残余应力的抑制与消除[J]. 航空材料学报, 2002, 22(3): 59-62.
- [4] 张峥. 飞机弱刚性铝合金结构件的残余应力和加工变形控制技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [5] 宋寒. 7055 机翼壁板加工变形研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [6] Prime M B, Hill M R. Residual stress, stress relief, and in homogeneity in aluminum plate [J]. Scripta Materialia, 2002, 46(1): 77-82.

第一作者: 夏灵, 硕士研究生, 南京航空航天大学机电学院, 210016 南京市

First Author: Xia Ling, Postgraduate, School of Mechatronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China

通信作者: 杨吟飞, 博士, 副教授, 南京航空航天大学机电学院, 210016 南京市

Corresponding Author: Yang Yinfei, Doctor, Associate Professor, School of Mechatronic Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China