

# 金属薄板平面铣削形变分析与控制

苟慎龙,邱吕强,徐刚,郑炜,韩明洋

(中国核动力研究设计院 第四研究所,四川 成都 610005)

**摘要:**由于初始残余应力的作用,金属薄板平面加工普遍存在加工难度大,加工变形严重等问题,难以保证板面的加工质量。以不锈钢薄板的平面加工为基础,通过理论分析、仿真模拟和实验验证的方式,对金属薄板的加工形变进行较为系统的研究,分析了金属薄板加工形变的关键因素,总结了金属薄板残余应力分布形式以及有效避免加工形变的工艺方法,为类似金属材料加工提供理论参考依据。

**关键词:**金属薄板;加工;残余应力;加工形变;理论分析;仿真模拟

**中图分类号:** TG506; TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2020)01-0065-03

## Deformation Analysis and Control of Sheet Metal Surface Milling

GOU Shenlong, QIU Lvqiang, XU Gang, ZHENG Wei, HAN Mingyang

(China Nuclear Power Research and Design Institute, Fourth Institute, Chengdu, 610005)

**Abstract:** Due to the effect of initial residual stress, some problems exist in the sheet metal surface processing, such as difficulty in processing and serious processing deformation. It is difficult to guarantee the processing surface quality. This paper takes the surface processing of stainless steel sheet for example, by theoretical analysis, simulation and experimental verification, makes a systematic study of the processing deformation of steel metal, analyzes the key factor of the deformation of the metal sheet, summarises the residual stress distribution form and puts forward the processing method which is used to effectively avoid the processing deformation. The theoretical basis is provided for similar metal sheet processing.

**Keywords:** sheet metal; processing; residual stress; processing deformation; theoretical analysis; simulation

## 0 引言

金属薄板类零部件广泛应用于汽车、船舶、航天、核能等领域,其在军、民生产和生活中占有举足轻重的地位。然而,金属薄板类零部件的加工制造普遍存在形变严重、加工难度大等问题,直接影响产品质量和使用性能。因此,如何有效控制薄板零部件的加工变形,对提高加工质量和生产效率具有重要研究价值。

金属薄板通常由热轧或冷轧工艺制成,初始形态各异,弯曲程度严重,平面加工难度较大。同时,在初始状态下,金属薄板通常都存在较大的残余应力,加工形变严重。因此,薄板零部件的加工过程中对于装夹方式、工艺流程、吃刀深度等加工参数需严格把控<sup>[1]</sup>。加工实例如图1所示。



图1 金属薄板实际加工状态

## 1 金属薄板加工形变因素分析

由于在实际加工过程中,金属薄板加工形变量较大<sup>[2]</sup>,需对金属薄板的形变因素进行分析。金属薄板的加工变形主要包括两个方面:装夹形变和加工形变。

装夹形变主要指工装夹具与工件之间相互作用而产生的形变。该种形变可通过调控装夹点、装夹顺序等有效控制形变量。

加工形变主要包括让刀、热应力形变和残余应力形变。

1) 让刀为材料弹性形变,形变量相对较小且不可避免;

2) 热应力形变为切削热在工件表面形成的应力形变,可通过合理使用切削液,提高切削速度等方式有效调控;

3) 残余应力为材料内部应力,随着加工过程的进行,工件初始残余应力的平衡被破坏,导致板材弯曲变形。残余应力加工形变量只受初始残余应力以及切削厚度的影响<sup>[3]</sup>。

因此,内部残余应力是造成工件加工变形的主要因素,本文主要针对薄板零件加工残余应力形变进行分析和研究。

## 2 金属薄板加工形变理论

实际生产过程中,金属薄板厚度远小于长度和宽度。加工过程中,从表面开始逐层铣削,设金属薄板厚度为 $h$ ,单层铣削厚度为 $t$ 。沿板材长度方向设为 $x$ 轴,厚度方向为 $z$ 轴,金属薄板加工简易模型如图2所示。

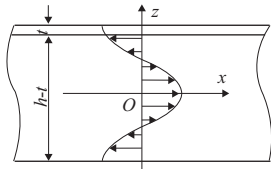


图2 金属薄板铣削模型

根据金属薄板的内应力平衡,应力应变关系以及应变曲率关系,可以得到金属薄板加工过程中的应力曲率关系<sup>[4]</sup>,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \end{bmatrix} = \frac{6ht}{E(h-t)^3} \begin{bmatrix} 1 & -\nu \\ -\nu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x1} \\ \sigma_{y1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

当被剥除第一层材料内平均应力值 $\sigma_{x1}$ 和 $\sigma_{y1}$ 已知,可解出 $z=0$ 处 $x,y$ 向应变的 $\varepsilon_{x0}$ 和 $\varepsilon_{y0}$ 及构件 $x,y$ 向的曲率 $\rho_x$ 和 $\rho_y$ 。其中, $E$ 为材料弹性模量, $\nu$ 为泊松比。

在第一层铣削的基础上进行后面各层的铣削加工,由此可以得到各层材料铣削后的应力曲率关系,如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} \rho_{x1} & \rho_{y1} \\ \rho_{x2} & \rho_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ \rho_{xn} & \rho_{yn} \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ c_{12} & c_{22} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ c_{1n} & c_{2n} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{x1} & \sigma_{y1} \\ \sigma_{x2} & \sigma_{y2} \\ \vdots & \vdots \\ \sigma_{xn} & \sigma_{yn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\mu \\ -\mu & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

挠度和曲率的几何关系为:

$$\Delta d = \frac{\rho L^2}{8} \quad (3)$$

其中: $\rho$ 为曲率; $L$ 为长度,mm; $\Delta d$ 为挠度,mm。

## 3 金属薄板逐层切削模拟仿真

本文以大平面不锈钢薄板平面铣削加工为研究对象,在实验过程中要得到初始残余应力,需获取大量实验数据。为不影响项目工作的正常运行,本文借助非线性仿真软件进行模拟试验<sup>[5]</sup>。

设置材料弹性模量 $E=194020$  MPa,泊松比 $\nu=0.3$ ;沿厚度方向将模型分为16层,单层切削厚度为1mm,加载预设残余应力,分布如图3所示。

在有限元软件ABAQUS中进行仿真试验,测量薄板底面沿长度方向各测量点的 $z$ 向位移量,并与理论计算值

进行对比,位移测量值如图4所示。

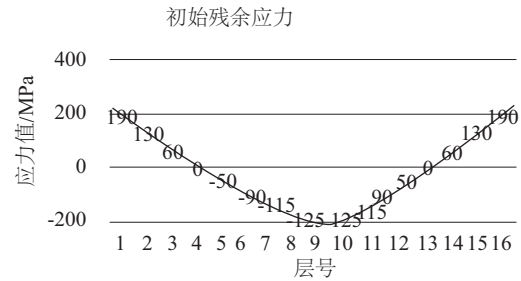


图3 初始残余应力分布图

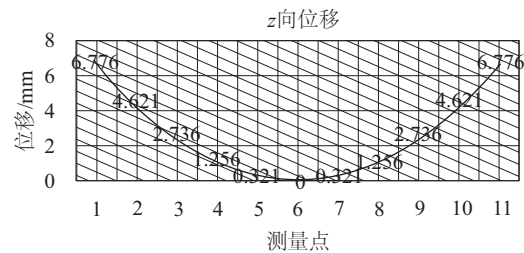


图4 单层铣削 $z$ 向位移

将图3中设置的初始残余应力带入第2节中理论分析公式,可计算得板材铣削一层理论挠度值为7.03 mm,而有限元仿真挠度值为6.78 mm,相对误差约为3.75%,依次类推可得铣削 $n$ 层的挠度理论计算值与仿真值,如图5所示。

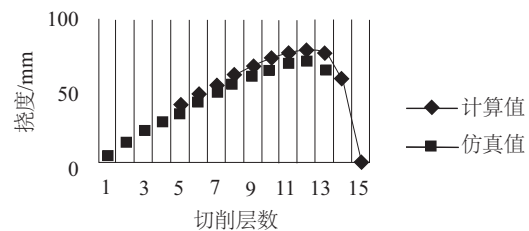


图5 逐层切削理论与仿真对比

由图5可知,随着逐层切削的不断进行,挠度的理论计算与有限元仿真的变化规律基本一致,且因累计误差的影响,随着切削层数的增加相对误差逐渐增大,但总体上相对误差都不超过15%。因此,可证明计算公式的有效性。

## 4 金属薄板加工形变实验测试

板材轧制长度约为1700 mm,厚度约为16 mm,属于典型的大平面薄板零件。加工最终厚度为13 mm,总体剥除厚度约为3 mm,平面度要求0.3 mm。在铣削实验过程中,各层铣削厚度根据工件的实际形变状态进行适当微调。由于残余应力的形变影响,逐层铣削实验共分6层,依次为上下表面轮流交替翻面铣削,沿不锈钢板材长度方向,每间隔170 mm取点,用塞尺测量各层切削前后板材剩余厚度和底面与平台间隙,测量数据如表1和图6所示(本刊系黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

表1 不锈钢薄板逐层铣削数据统计

实测项目	实验数据记录											备注	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
第一组	间隙	0.30	0.70	0.52	0.60	0.49	0.60	0.60	0.62	0.90	0.75	0.40	初始
	板厚	16.16	16.2	16.28	16.26	16.28	16.20	16.16	16.18	16.12	16.16	16.04	
第二组	间隙	3.87	3.04	1.83	0.90	0.35	0.35	0.60	1.45	2.74	4.28	5.78	上表面铣削
	板厚	15.38	15.21	15.03	15.2	15.17	15.12	15.20	15.15	15.18	15.17	15.33	
第三组	间隙	0.25	0.45	0.34	0.15	0.02	0.02	0.02	0.15	0.34	0.45	0.45	下表面铣削
	板厚	14.67	14.69	14.67	14.6	14.6	14.63	14.67	14.68	14.67	14.69	14.70	
第四组	间隙	3.44	2.54	1.65	0.75	0.25	0.08	0.16	0.54	1.20	1.99	2.99	上表面铣削
	板厚	14.10	14.09	14.10	14.1	14.10	14.10	14.11	14.10	14.09	14.06	14.04	
第五组	间隙	0.08	0.34	0.35	0.25	0.08	0.02	0.06	0.11	0.17	0.19	0.11	下表面铣削
	板厚	13.42	13.41	13.38	13.31	13.31	13.42	13.41	13.41	13.41	13.42	13.41	
第六组	间隙	0.17	0.26	0.25	0.17	0.07	0.02	0.05	0.13	0.21	0.26	0.33	上表面铣削
	板厚	13.19	13.18	13.18	13.19	13.21	13.22	13.19	13.20	13.18	13.16	13.20	
第七组	间隙	0.02	0.17	0.22	0.11	0.05	0.02	0.02	0.02	0.15	0.15	0.02	下表面铣削
	板厚	13.03	13.06	13.06	13.05	13.06	13.06	13.05	13.06	13.05	13.05	13.07	

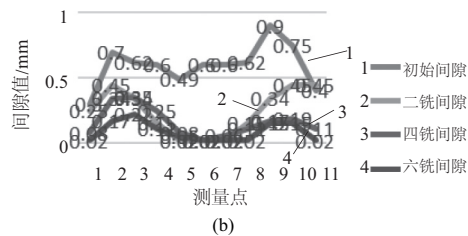
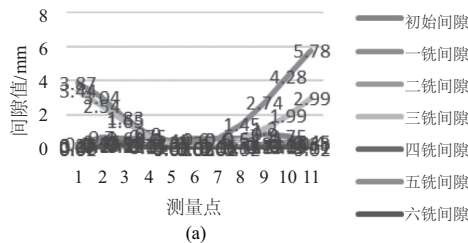


图6 板面逐层铣削数据统计图

由图6可知,板材初始状态较为平整,挠度约为0.3 mm。在经过第1次铣削后,不锈钢板呈两端翘起状态,挠度约为4.25 mm;经过第2次铣削后,板面回到较为平整状态,挠度约为0.43 mm;经过第3次铣削后,板面再次呈两端翘起状态,挠度约为3.13 mm;经过第4次铣削后,板面再次回到较为平整状态,挠度约为0.26 mm;第5次和第6次铣削,板面形变量较小,满足加工技术要求。

实验结果分析:

a) 板材初始残余应力呈“外压内拉”状态,沿厚度方向对称分布。第一层剥离后,该层压应力被释放,剩余板材为达到新的平衡状态,会出现上表面收缩,下表面伸展的趋势,导致板材两端翘起;第二层与第一层沿厚度方向对称,释放的压应力与第一层释放压应力相互抵消,因此,板面重新回到较为平整状态;同样第三层和第四层铣削结果一致。

b) 由实验结果a)可知,板材残余应力沿厚度方向由外到内,逐渐从压应力转变成拉应力。因此,在同性残余应力范围内,不锈钢板板面铣削形变量随铣削厚度的增加而增加。

c) 由初始状态和2、4、6次铣削测量结果可知,板材铣削过程存在边缘效应,板材边缘部分应力较大且分布较为集中,会对板材局部形变状态造成影响,使板材呈M形

变状态。

由实验结果分析可知,板材存在显著的边缘效应,计算过程需去除两端数据。此处取第3-9个测量点的数据进行分析计算。根据表1实测参数值,带入式(1)和式(2)中可计算得:

- 1) 第1层应力:  $\sigma_1^{0.79} = 169.6 \text{ MPa}$ ;
- 2) 第2层应力:  $\sigma_2^{0.75} = 155.9 \text{ MPa}$ ;
- 3) 第3层应力:  $\sigma_3^{0.62} = 106.4 \text{ MPa}$ ;
- 4) 第4层应力:  $\sigma_4^{0.65} = 106.2 \text{ MPa}$ ;
- 5) 第5层应力:  $\sigma_5^{0.2} = 9.1 \text{ MPa}$ ;
- 6) 第6层应力:  $\sigma_6^{0.136} = 22.0 \text{ MPa}$ ;

由以上计算结果可以看出:板材初始残余应力基本呈对称分布状态,这也符合板材较为平整的初始状态。因此,可由板材的初始形变状态判断其初始残余应力分布状态。

## 5 结语

1) 金属薄板的初始残余应力呈“外压内拉”状态,在机械加工过程中单侧释放应力将会造成板面两端相对翘曲;

2) 若金属薄板经过退火或预拉伸处理,初始残余应力较小,在机械加工过程中应尽量保证两侧表面对称等量切削;

3) 若金属板材未经过残余应力预处理,则应根据板材初始形变状态判断残余应力分布状态。如果板材最初呈弯曲状态,则应先铣削凸形面,且凸形面吃刀量应略大于凹形面吃刀量;

4) 根据残余应力分布状态,薄板类零件采用对称切削方式进行,加工过程中为控制加工形变量,设置板材挠度限值  $X$ ,则可计算得到最大吃刀深度  $t$ :  $\Delta d = \frac{6htL^2(1-\mu)}{E(h-t)^3}\sigma \leq X$ 。

参考文献:

- [1] 林勇,罗育果,汤立民. 航空薄壁弧形框加工变形控制方法研究[J]. 机械设计与制造,2012(2):107-109.
- [2] 于鑫,孙杰,熊青春,等. 7050-T7451 铝合金铣削加工表面材料特性与本构关系模型的建立[J]. 中国有色金属,2015(11):2982-2989.
- [3] 黄其圣,费业泰,胡鹏浩,等. 表层残余应力对几何形体热变形的影响[J]. 应用科学学报,1998,16(3):367-369.
- [4] 王晓燕. 铝合金薄壁件铣削变形模型及其残余应力研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [5] 章正伟,白万金. 航空薄壁整体结构件加工变形的有限元分析[J]. 机械设计,2011(5):92-96.

收稿日期:2018-10-15