

# 蜂窝夹层结构高精度面板的三维铣削研究\*

李东升, 游佳琪, 王明明

(北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京 100191)

**[摘要]** 建立了蜂窝夹层结构高精度面板三维铣削有限元仿真模型, 分析了主轴转速、进给速度、铣削深度等因素对铣削后面板表面粗糙度及温度的影响规律, 进行了蜂窝夹层结构面板的正交铣削试验及水超声脉冲反射法无损检测试验, 优化了铣削加工参数; 在面板铣削仿真和试验分析的基础上, 以最优加工参数设计了焦距分别为 5500mm、2750mm、1090mm 的 400mm×400mm 双曲率夹层结构高精度面板的铣削精加工试验及超声波脉冲穿透法无损检测试验, 测量了面板铣削前后的型面精度及表面粗糙度。结果表明: 模拟与试验结论一致; 铣削后面板表面粗糙度与主轴转速负相关, 与铣削深度和进给速度正相关; 面板温度主要由铣削深度决定, 单次铣削深度超过 300 $\mu$ m 时, 面板温度超过环氧树脂胶的玻璃态转变温度(313K), 夹层结构发生轻微脱粘; 铣削后的双曲率面板型面精度数值、峰峰值(波峰-波谷值)及表面粗糙度数值均显著降低, 且无脱粘现象, 验证了铣削工艺在保证结构稳定性的基础上可提高面板表面质量。

**关键词:** 蜂窝夹层结构; 三维铣削; 表面粗糙度; 型面精度; 结构稳定性

## Research on 3D Milling of Honeycomb Sandwich Structure High-Precision Panel

LI Dongsheng, YOU Jiaqi, WANG Mingming

(College of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

**[ABSTRACT]** The 3D milling finite element simulation model of honeycomb sandwich structure high-precision panel is established. The influence of the spindle speed, the feed speed and the milling depth on the surface roughness and the temperature of the honeycomb sandwich panel are analyzed. The orthogonal milling experiment and non-destructive testing of water ultrasonic pulse reflection method have been carried out, in company with optimizing the milling parameters. Based on the simulation analysis and experiment, the 400mm×400mm double-curvature high-precision sandwich panels with focal lengths of 5500mm, 2750mm, and 1090mm are milled, as well as non-destructive testing of ultrasonic pulse penetration method. Meanwhile both the surface precision and roughness are inspected before and after forming. The results show that the experimental results are consistent with the finite element simulation. The surface roughness of the sandwich plate after milling is negatively correlated with the spindle speed, and is positively correlated with the milling depth and feed rate. Plus, the panel temperature is mainly determined by the milling depth. When the single milling depth exceeds 300 $\mu$ m, the panel temperature exceeds the glass transition temperature of the epoxy resin (313K), and the sandwich structure is slightly debonded. Eventually the precision value, the peak-to-peak value (crest-to-valley value) and the surface roughness value of the double-curvature panels are significantly reduced. No debonding phenomenon occurs simultaneously. It is verified that milling can improve the surface quality of the panel on the basis of ensuring structural stability.

**Keywords:** Honeycomb sandwich panel; 3D milling; Surface roughness; Surface precision; Structure stability

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2020.09.074

太赫兹 (THz) 波因其频率高、波长短而表现出分辨率高、散射小等优点, 被广泛用于雷达探测、通讯传输等领域。高增益天线是发射和接收太赫兹波必不可少的部件, 紧缩场 (Compact Antenna Test Range)<sup>[1]</sup> 技术则是

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (51575028)。

天线测试的最有效方法。其中, 高精度反射面的设计制造是建造紧缩场的基础, 其结构稳定性和型面精度直接影响被测天线的增益。蜂窝夹层结构通常由上下两层厚度较薄、强度较高、刚度较大的面板, 和厚度较大、密度较小的蜂窝芯材组成, 是一种特殊的复合材料, 具有

比刚度大、抗疲劳性能强、型面精度高等优点,广泛用于高精度反射面的成形制造。周贤宾<sup>[2]</sup>、李东升等<sup>[3]</sup>采用“点阵钉模、真空负压、蜂窝夹层、应力释放”成形原理进行蜂窝夹层结构高精度反射面制造,以大型精密平台为基准,以离散钉模形成高精度包络面,在真空负压下同时实现面板与蜂窝的成形和胶接固化,有效解决了小曲率和较大曲率的大面积夹层结构面板的精密成形问题。紧缩场实际成形与理论型面之间的误差(均方根偏差,RMS)要求为最小工作波长的1/100~1/60,太赫兹波频率较高,整体型面精度需小于30 $\mu\text{m}$ 且表面粗糙度( $R_q$ )需小于1.2 $\mu\text{m}$ 。传统真空负压成形的大曲率面板型面精度最优只达30 $\mu\text{m}$ ,因此,需在现有的精密成形工艺的基础上结合铣削精加工工艺以实现面板的更高精度。

铣削工艺以金刚石、立方氮化硼等材料作为刀具对有色金属或非金属零件进行加工,以期得到高型面精度(0.1 $\mu\text{m}$ )和低表面粗糙度(0.004 $\mu\text{m}$ )的零件,广泛用于复杂曲面的加工。在铣削技术研究中,航空工业联合西安近代化学研究所研制的“Nanosys-300非球曲面超精密复合加工系统”,可加工型面精度0.3~0.6 $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度小于0.02 $\mu\text{m}$ 的零件<sup>[4]</sup>;航空工业精密研究所研制的非球曲面超精密加工机床可加工面形精度0.228 $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度0.0078 $\mu\text{m}$ 的样件。在铣削仿真研究中,谢峰等<sup>[5]</sup>对金属二维切削过程进行了模拟,得到了工件应力、切削力的变化规律;程林<sup>[6]</sup>建立了二维直角自由切削有限元仿真模型,在分析金属切削过程切屑形成过程的基础上,得到了切削过程的应力场和温度场;Saffar等<sup>[7]</sup>建立了端铣加工的三维有限元模型,可预测切削力和刀具变形;胡福文等<sup>[8]</sup>基于ALE有限元法建立了铝合金三维铣削仿真模型,建立了虚拟的铣削力测试系统。目前,铣削加工主要围绕厚板材、铸件等各向同性材料的二维连续切削进行探索,对蜂窝夹层结构等三维非连续铣削研究未见报道。

蜂窝夹层结构面板的铣削加工量较小,但铣削工艺是多齿形断续切削,工件进给的同时伴随着刀具旋转<sup>[9]</sup>,铣削后夹层结构面板的表面粗糙度和型面精度难以预测。同时,当加工参数选择不当时,刀具与切屑、面板摩擦产生大量铣削热,铣削热在薄面板上迅速传导,当面板温度超过胶黏剂的玻璃态转变温度时,胶层软化或流动导致面板与蜂窝之间脱粘,高精度面板的结构稳定性难以保证。因此,应选择合理的加工参数以保证后续铣削过程中夹层结构的稳定。

本文建立了蜂窝夹层结构高精度面板三维铣削模型,设计了铣削正交试验与无损检测试验,分析了铣削过程中铣削参数对蜂窝夹层结构高精度面板表面粗糙度和温度的影响规律,验证了铣削工艺在保证结构稳定

性的基础上对夹层结构面板表面粗糙度及型面精度的有效贡献。

## 1 有限元模拟

铣削过程是一个涉及弹塑性力学、断裂力学、热力学等诸多学科的复杂工艺过程,传统的铣削加工通常采用“试错法”来获取经验值,既费时费力又增加成本。本文采用ABAQUS有限元分析软件对蜂窝夹层结构的铣削过程仿真建模方法及模型准确性进行分析,为后续加工选择合理参数提供依据。

### 1.1 有限元模型

#### 1.1.1 材料特性

铣削加工时,与铣刀接触的面板处于高温、高应变和高应变率状态,采用Johnson-Cook本构模型<sup>[10]</sup>描述面板在铣削加工时的热粘塑性变形行为,准确表达材料的应变硬化、应变速率硬化和热软化效应,保证有限元仿真的可靠性。Johnson-Cook本构模型的本构关系见式(1),失效应变见式(2)。

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \left[ 1 + \text{CLN} \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_1}{T_m - T_1} \right)^m \right] \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon}_f^{\text{pl}} = \left[ d_1 + d_2 \exp \left( d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \times \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{\text{pl}}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad (2)$$

式中, $A$ 表征准静态条件下材料的屈服极限; $B$ 表征硬化模量; $C$ 表征应变速率强化系数; $n$ 表征应变强化系数, $m$ 表征温度软化系数; $\dot{\varepsilon}_0^{\text{pl}}$ 为等效塑性应变初始值,取决于塑性应变变化率 $\dot{\varepsilon}_0$ 、无量纲压应力与偏应力之比 $p/q$ 和无量纲温度 $\hat{\theta}$ ; $\dot{\varepsilon}_0^{\text{pl}}$ 为失效应变; $\Delta \varepsilon^{\text{pl}}$ 为等效塑性应变增量; $d_1 \sim d_5$ 是实际测得的失效参数; $\hat{\theta}$ 是当前的温度。

为了实现切屑和面板的分离,同时采用Johnson-Cook失效模型和剪切失效模型来描述铣削时的材料失效。从单元积分点处的等效塑性应变值出发,定义损伤参数为单元等效塑性应变值与失效应变值的比值<sup>[11]</sup>,当某个单元的所有积分点的损伤参数均达到1时,该单元失效,从网格移除。

本文采用单层蜂窝夹层结构,面板与背板均采用LY12CZO铝合金,其热力学参数、Johnson-Cook模型参数及剪切失效模型参数以实现三维铣削仿真,见表1。

蜂窝壁厚0.04mm,胞元为边长5mm的正六边形,采用1:1实体建模方式(图1)以提供准确的失效模型参数,蜂窝的热力学性能、Johnson-Cook失效模型及剪切失效模型参数见表2<sup>[12]</sup>。

夹层结构面板的铣削深度较小,铣刀端面为作用面,因而重点表现铣刀的刃数、直径等特征,忽略其立面的螺旋角、前后角等参数,本文采用直径为6mm的

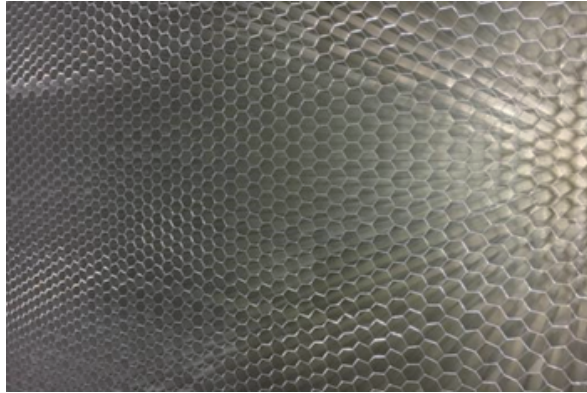


图1 铝蜂窝实物

Fig.1 Physical object of aluminum honeycomb

表1 LY12CZO铝合金材料热力学性能、Johnson-Cook失效模型及剪切失效模型参数

Table 1 Parameters of thermodynamic properties, Johnson-Cook failure model and shear failure model of LY12CZO aluminum alloy material

参数	数值	
热力学性能参数	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
	弹性模量 $E/\text{MPa}$	70000
	泊松比 $\nu$	0.33
	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	23.6
	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	124
	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	940
	Johnson-Cook 失效模型参数	$A/\text{MPa}$
$B/\text{MPa}$		1798.7
$C$		0.013
$n$		0.73
$m$		1.52
$d_1$		0.13
$d_2$		0.13
$d_3$		-1.5
$d_4$		0.011
$d_5$	0	
剪切失效模型参数	断裂应变	2
	剪切疲劳试验应力比	0
	应变速率	0
	失效位移 $x/\text{mm}$	$4 \times 10^{-6}$

两刃 YG3 硬质合金铣刀, 铣刀的力学及热学性能参数见表 3。

1.1.2 模型设置

面板、背板及蜂窝均采用 1:1 实体建模, 面板与背板均厚 1.5mm, 蜂窝厚 50mm。合理装配各部件, 模型整体尺寸为 400mm × 400mm × 53mm。采用 tie 连接代替蜂窝和铝板间的环氧树脂胶结。采用 Zorev 黏滑接触模型<sup>[13]</sup>描述刀具端面与待铣削面板表面的摩擦接触问题, 根据 Joyot 等<sup>[14]</sup>的铝合金加工研究, 摩擦系数  $\mu$  取 0.32。铣刀设置为刚体, 施加合理的进给速度和转速; 背板采用六自由度全约束; 整体模型设置 293K (20℃) 的初始温度场。

表2 铝蜂窝材料热力学性能、Johnson-Cook失效模型及剪切失效模型参数

Table 2 Parameters of thermodynamic properties, Johnson-Cook failure model and shear failure model of aluminum honeycomb materials

参数	数值		
力学性能参数	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	33.264	
	弹性模量 $E/\text{MPa}$	$E_1$	0.083
		$E_2$	0.083
		$E_3$	886.81
	泊松比 $\nu$	$\nu_{12}$	0.33
		$\nu_{13}$	0
		$\nu_{23}$	0
	剪切模量 $G/\text{MPa}$	$G_{12}$	0.021
		$G_{13}$	0.021
		$G_{23}$	120.01
热学性能参数	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	940	
	热膨胀系数 $\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	$\alpha_1$	2.2
		$\alpha_2$	2.2
		$\alpha_3$	2.2
	热导率 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\lambda_1$	2.645
		$\lambda_2$	1.488
		$\lambda_3$	0.992
Johnson-Cook 失效模型参数	$A/\text{MPa}$	66.562	
	$B/\text{MPa}$	108.853	
	$C$	0.029	
	$n$	0.238	
	$m$	0.5	
	$d_1$	0.13	
	$d_2$	0.13	
	$d_3$	-1.5	
	$d_4$	0.011	
$d_5$	0		
剪切失效模型参数	断裂应变	2	
	剪切疲劳试验应力比	0	
	应变速率	0	
	失效位移 $x/\text{mm}$	$4 \times 10^{-6}$	

采用热力耦合八节点六面体完全积分单元 (C3D8T) 划分网格。待铣削面板厚度方向网格加密, 单层网格厚度与铣削深度相同, 在铣削过程中, 面板第一层网格发生失效后, 从整体网格中移除, 面板第 2 层网格递进成为第 1 层网格, 由此类推。非厚度方向网格尺寸为 1.0mm; 不参与直接铣削的蜂窝和背板采用较大的网格单元, 背板网格尺寸为 1.5mm, 蜂窝网格尺寸为 2.5mm; 铣刀网格尺寸设置为 1.0mm。

蜂窝夹层面板三维铣削几何和边界条件均为非线性, 选用动力学显式算法进行模拟计算。综合研究质量放大系数对铣削力、蜂窝表面最高温度和计算时间的影响, 在不造成模型动态失真的情况下<sup>[15]</sup>, 将其数值设置为  $10^4$  以减小计算时间。

三维铣削仿真计算实例如图 2 所示。

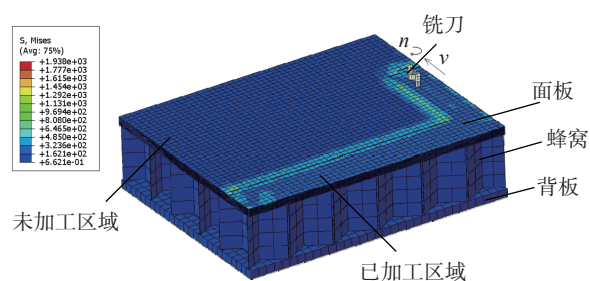


图2 夹层结构面板铣削仿真实例

Fig.2 Sandwich structure panel milling simulation example

## 1.2 模拟方案与结果

对于夹层结构面板的铣削精加工工艺为关键的两个问题是:(1) 铣削后的面板表面质量能否满足使用要求;(2) 高速铣削带来的铣削热是否会造成胶层的软化或流动, 从而出现脱胶现象, 面板整体稳定性难以保证。

### 1.2.1 铣削参数对面板表面质量的影响

铣削方案及结果如表 4 所示。在表面形貌表征参数中, 表面粗糙度  $R_q$  表示在取样长度内, 轮廓偏离平均线的均方根值, 是对应于  $R_a$  的均方根参数。表面轮廓高度算术平均值与表面轮廓高度均方根值具有同步同趋势, 可采用表面轮廓高度均方根值  $R_a$  来表征表面形貌特征。根据 Zeng 等<sup>[15]</sup> 提出的表面粗糙度  $R_q$  的计算方法, 统计铣削完成后加工区域的若干点的厚向位移, 取其标准差。标准差越小, 所提取点的厚向位移离散程度越小, 面板粗糙度越低, 表面质量越好。

(1) 主轴转速对面板表面粗糙度的影响。

根据方案 1~5 的结果, 主轴转速对面板表面粗糙度的影响如图 3 所示。随着主轴转速的增加, 粗糙度逐渐降至最低值后又略微上升。当铣刀转速较低时, 摩擦生热较少, 切屑易去除, 热量易扩散。转速越大, 铣削频率越大, 表面质量改善越明显。但铣刀转速超过临界值(约 15000r/min) 时, 切屑的粘刀现象逐渐明显, 摩擦热累积, 面板温度上升, 切屑堆积, 面板表面质量下降。

表3 YG3硬质合金热力学性能参数

Table 3 Parameters of thermodynamic properties of YG3 cemented carbide

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\nu$	热膨胀系数 $\alpha/\text{K}^{-1}$	导热系数 $K/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $C/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
15800	210000	0.22	$4.7 \times 10^{-6}$	46	200

表4 铣削模拟方案及结果

Table 4 Milling simulation scheme and results

方案	主轴转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	铣削深度 $d/\mu\text{m}$	进给速度 $v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	面板最高温度 $K/^\circ\text{C}$	表面粗糙度 $R_q/\mu\text{m}$
1	6000	100	3	307.4	0.083
2	9000	100	3	306.7	0.073
3	12000	100	3	306.5	0.067
4	15000	100	3	306.6	0.063
5	18000	100	3	307.2	0.066
6	12000	50	3	301.9	0.062
7	12000	150	3	313.1	0.077
8	12000	200	4	322.4	0.0997
9	12000	250	3	341.8	0.117
10	12000	100	1	303.3	0.062
11	12000	100	5	308.5	0.064
12	12000	100	7	308.7	0.064
13	12000	100	9	308.7	0.066

(2) 铣削深度对面板表面粗糙度的影响。

根据方案3和方案6~9的结果,铣削深度对面板表面粗糙度的影响如图4所示。随着切削深度的增加,表面粗糙度逐渐增加。切削深度增加时,铣刀端面与面板的接触面积增大,摩擦和挤压促进切屑瘤的形成和长大。切屑瘤部分堆积在铣刀表面,部分嵌入面板表面,既影响铣削速率,又破坏面板表面粗糙度。

(3) 进给速度对面板表面质量的影响。

根据方案3和方案10~13的结果,进给速度对面板表面粗糙度的影响如图5所示。随着进给速度的增加,面板表面粗糙度呈微弱增大趋势。铣削的周期振动会使已加工表面出现细微波纹痕迹,使表面粗糙度增大。当进给速度大于3m/min后,其波动明显增大,峰峰值显著增大。同时,进给速度的增大使得工件表面的切削层残留面积增大,表面粗糙度增加。但蜂窝夹层结构面板的铣削量非常小,表面粗糙度的变化不明显,因而在面板表面粗糙度满足使用要求前提下可设置较大的进给

速度,以缩短加工周期。

1.2.2 铣削参数对夹层结构面板温度的影响

单个加工参数对夹层结构面板最高温度的影响如图6所示。

在铣削过程中,第一变形区的塑形变形产生大量热量,且刀具、切屑及加工区域因摩擦产生大量热,导致铣削热在夹层结构内积聚。面板温度需小于玻璃态转化温度(313K),以避免胶层发生软化或流动,保证铣削过程的结构稳定性。

随着铣削深度的增加,面板最高温度显著增长。铣削深度的增大增加了铣刀端面与面板、切屑瘤的接触面积,产生大量的铣削热;同时,面板厚度的逐渐减薄使热量更易传递到蜂窝表面。铣刀的进给速度和转速对面板最高温度影响较微弱。进给速度的增加导致铣刀端面所受摩擦增大,产生的铣削热增大,但铣削时间随之降低,热量传递时间减短,面板温度变化不明显。铣刀转速的增大导致摩擦生热增加,但切屑的有效排出带走了大部分热量,因而面板温度无较大变化。

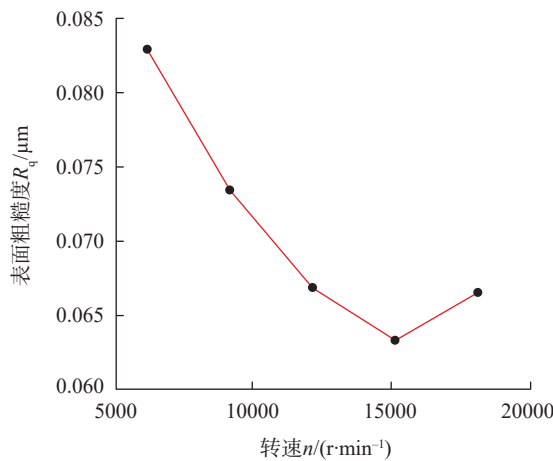


图3 主轴转速与表面粗糙度的关系

Fig.3 Relationship between spindle speed and surface roughness

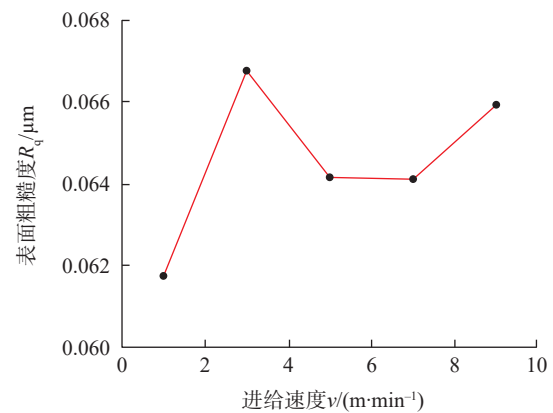


图5 进给速度与表面粗糙度的关系

Fig.5 Relationship between feed rate and surface roughness

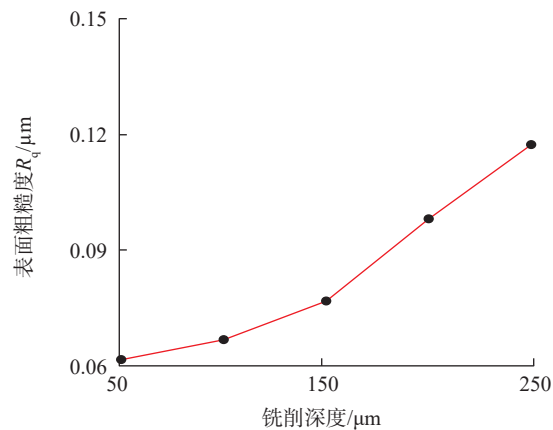


图4 铣削深度与表面粗糙度的关系

Fig.4 Relationship between milling depth and surface roughness

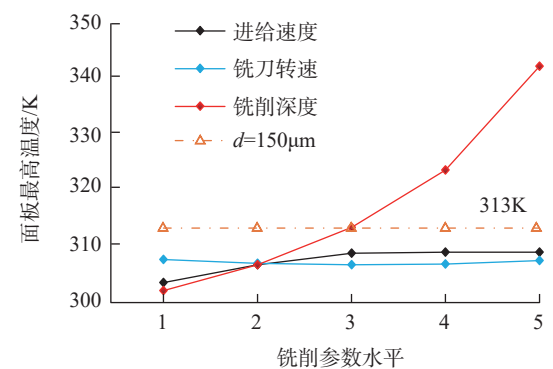


图6 面板最高温度与铣削参数水平的关系

Fig.6 Relationship between the maximum temperature of honeycomb surface and milling parameter level

在不采取任何冷却方式时,单次铣削量超过  $150\mu\text{m}$  的面板最高温度超过许用温度  $313\text{K}$ 。但刀具持续移动,最高温度只在铣削瞬间产生,铣刀离开后,温度随即下降。因此,需采取合理的冷却方式以控制在实际铣削加工的胶层温度。

## 2 试验

### 2.1 铣削工艺对面板表面质量的影响试验

#### 2.1.1 原理

单层蜂窝夹层高精度面板尺寸为  $400\text{mm} \times 400\text{mm}$ ,待铣削的面板厚  $1.5\text{mm}$ 。铣削设备采用精雕集团的 JDHGT60\_A13S 高速加工数控机床。采用环氧树脂胶将夹层结构背板固定在铣床平台上。铣刀转速、进给速度、路径间距、铣削深度影响因素各取 5 个水平,设计正交试验方案,每组试验对应加工一个  $25\text{mm} \times 15\text{mm}$  的浅槽,利用粗糙度测量仪测量每一个浅槽的粗糙度,如

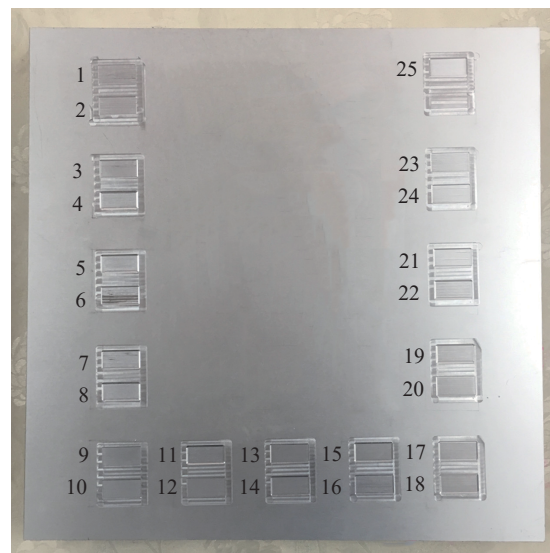


图7 铣削完成试件

Fig.7 Test piece after milling

表5 正交试验方案及粗糙度测量结果

Table 5 Orthogonal test scheme and surface roughness

编号	主轴转速 $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	进给速度 $v / (\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	路径间距 $a / \text{mm}$	铣削深度 $d / \mu\text{m}$	表面粗糙度 $R_a / \mu\text{m}$
1	5000	0.5	0.05	50	0.506
2	5000	1.0	0.1	100	0.845
3	5000	2.0	0.15	150	1.507
4	5000	2.5	0.2	200	1.342
5	5000	3.0	0.25	300	1.554
6	7500	0.5	0.1	150	0.263
7	7500	1.0	0.15	200	0.665
8	7500	2.0	0.2	300	1.147
9	7500	2.5	0.25	50	0.711
10	7500	3.0	0.05	100	0.562
11	10000	0.5	0.15	300	1.012
12	10000	1.0	0.2	50	0.561
13	10000	2.0	0.25	100	0.770
14	10000	2.5	0.05	150	0.602
15	10000	3.0	0.1	200	0.831
16	12000	0.5	0.2	100	0.479
17	12000	1.0	0.25	150	0.774
18	12000	2.0	0.05	200	0.528
19	12000	2.5	0.1	300	0.934
20	12000	3.0	0.15	50	0.679
21	15000	0.5	0.25	200	0.649
22	15000	1.0	0.05	300	0.419
23	15000	2.0	0.1	50	0.485
24	15000	2.5	0.15	100	0.672
25	15000	3.0	0.2	150	0.935

表 5 所示。采用水超声法对未加工区域和加工区域进行无损检测,检测频率为 10MHz。

2.1.2 试验结果及分析

铣削后的试件如图 7 所示。

(1) 夹层结构高精度面板表面粗糙度检测及结果分析。

铣削完成后,采用正交试验极差法分析各个浅槽的表面粗糙度,结果见表 6。

过大的表面粗糙度会影响夹层结构面板的电气性能,紧缩场夹层结构面板的表面粗糙度要求不超过  $1.6\mu\text{m}$ ,任一水平下的表面粗糙度均满足使用要求。影响表面粗糙度的因素主次关系是: 主轴转速 > 铣削深度 > 路径间距 > 进给速度。同时,表面粗糙度与主轴转速呈负相关关系,与进给速度和铣削深度呈正相关关系。单从表面粗糙度考虑,最优的铣削参数组合是  $n=15000\text{r}/\text{min}$ ,  $v=0.5\text{m}/\text{min}$ ,  $a=0.05\text{mm}$ ,  $d=50\mu\text{m}$ , 最差的铣削参数组合是:  $n=5000\text{r}/\text{min}$ ,  $v=3\text{m}/\text{min}$ ,  $a=0.25\text{mm}$ ,  $d=300\mu\text{m}$ 。试验所得的铣削参数对夹层结构表面粗糙度的影响规律与模拟结果一致。

(2) 夹层结构高精度面板稳定性检测与结果分析。

铣削参数选择不当时,会产生大量的铣削热,造成胶层的软化和流动,使夹层结构发生分层或脱粘,影响面板的型面精度。因此,必须对铣削完成后的夹层结构内部情况进行探究,以便选择合理的加工参数。

水超声脉冲反射法可以在不破坏夹层结构的情况下,对蜂窝夹层结构工件内部的脱粘、空穴、胶接质量不良等缺陷进行检测<sup>[16-17]</sup>,检测结果如图 8 所示。不使用任何冷却方式时,当铣削深度为  $50\sim 200\mu\text{m}$  时,夹层面板均不脱粘;当铣削深度为  $300\mu\text{m}$  时,夹层面板出现轻微脱粘。过高的铣削深度会给面板积聚大量热量,不仅造成夹层结构的脱粘,更会缩短铣刀寿命,因此必须采取适当的冷却降温措施。

表6 粗糙度极差统计分析结果  
Table 6 Analysis of surface roughness range

水平	主轴转速 $n$	进给速度 $v$	路径间距 $a$	铣削深度 $d$
1	1.15	0.58	0.52	0.59
2	0.67	0.65	0.67	0.67
3	0.76	0.89	0.89	0.82
4	0.68	0.85	0.89	0.80
5	0.63	0.91	0.91	1.01
极差	0.52	0.33	0.39	0.42

实际铣削加工中空气的对流与热交换无法忽略,因而检测结果与仿真模拟存在一定偏差。有限元模拟和试验所得结论基本一致,验证了三维铣削模型的准确性,其结果为后续选择合理加工参数提供依据。

2.2 铣削工艺对面板型面精度的影响试验

2.2.1 原理

将已成形的焦距  $F_0$  分别为  $5500\text{mm}$ 、 $2750\text{mm}$ 、 $1090\text{mm}$ ,尺寸均为  $400\text{mm} \times 400\text{mm}$  的双曲率夹层结构高精度面板分别采用上述最优参数组合进行铣削加工。以基于真空吸盘的柔性装夹系统定位夹层面板。铣削精加工在全闭环机床上进行,采用光栅及时补偿位置信息,以液冷方式进行面板冷却,面板铣削现场如图 9 (a) 所示。采用激光跟踪仪分别测量面板铣削前

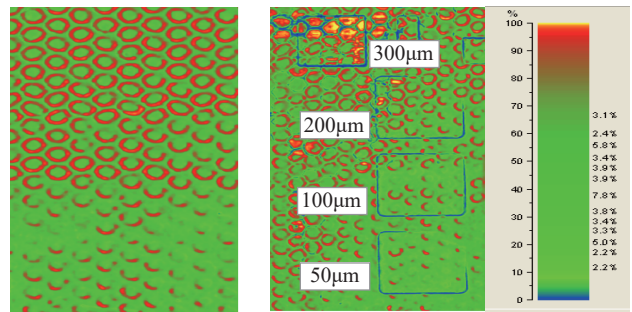
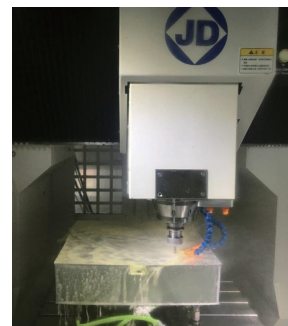
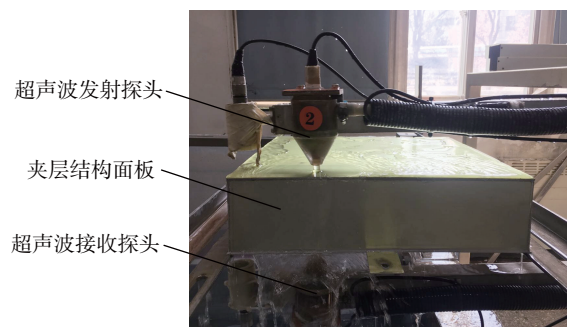


图8 蜂窝夹层板无损检测结果

Fig.8 Non-destructive testing result of honeycomb sandwich panel



(a) 双曲率面板的铣削加工



(b) 穿透法对夹层结构面板进行无损检测

图9 铣削工艺对面板型面精度的影响试验原理

Fig.9 Influence of ultra-precision milling on precision of panel

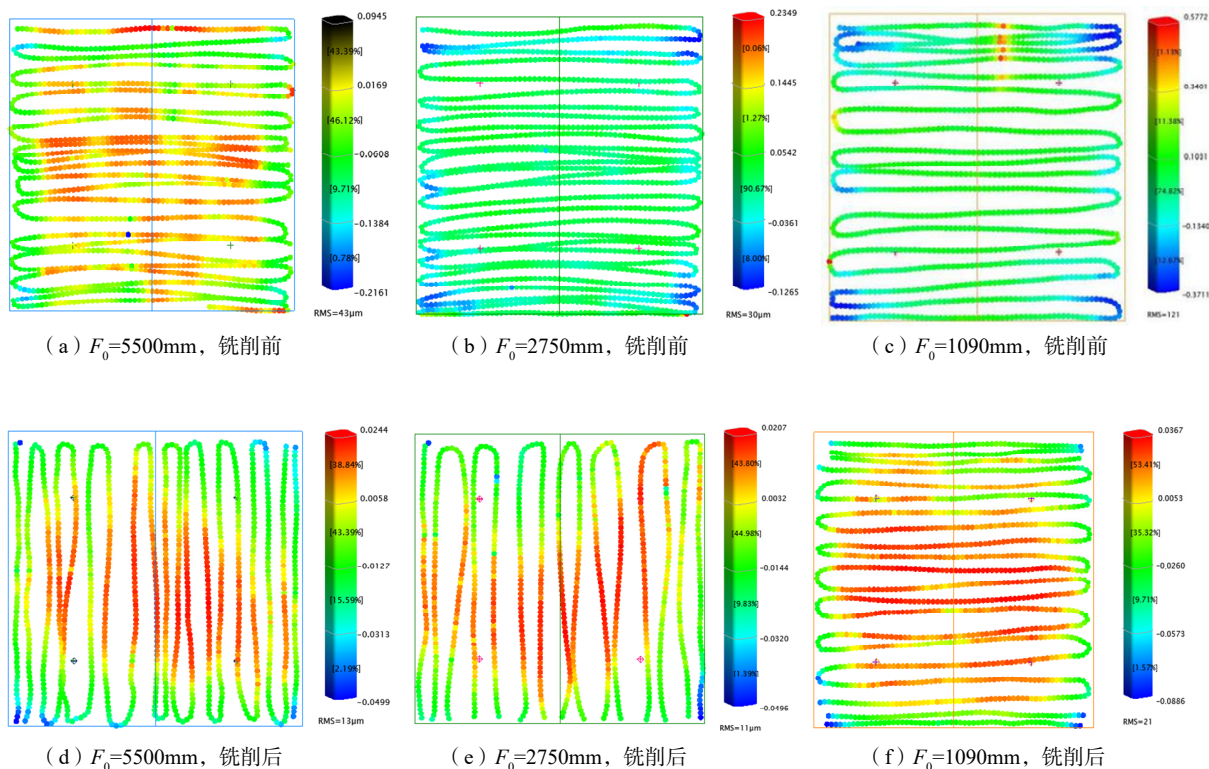


图10 铣削前后的面板型面精度检测误差分布云图

Fig.10 Panel precision error distribution before and after milling

后型面精度。采用超声波脉冲穿透法<sup>[18]</sup>对加工后的 $F_0=5500\text{mm}$ 和 $F_0=1090\text{mm}$ 的面板进行无损检测,选用低频(0.5MHz)探头,超声扫描步进为1mm,扫描速度约为100mm/min,检测现场如图9(b)所示。

### 2.2.2 试验及结果分析

#### (1) 面板精度检测及结果分析。

型面精度检测误差云图如图10所示,3种不同焦距的夹层结构面板型面精度RMS值分别由初始的43 $\mu\text{m}$ 、30 $\mu\text{m}$ 、121 $\mu\text{m}$ 降至13 $\mu\text{m}$ 、11 $\mu\text{m}$ 、21 $\mu\text{m}$ ,峰峰值由310.6 $\mu\text{m}$ 、361.4 $\mu\text{m}$ 、948.3 $\mu\text{m}$ 降至74.3 $\mu\text{m}$ 、70.3 $\mu\text{m}$ 、125.3 $\mu\text{m}$ ,表面粗糙度由0.958 $\mu\text{m}$ 、1.526 $\mu\text{m}$ 、1.254 $\mu\text{m}$ 降至0.385 $\mu\text{m}$ 、0.507 $\mu\text{m}$ 、0.429 $\mu\text{m}$ 。铣削加工后的夹层面板的型面精度和表面质量得到了显著改善。将铣削后的夹层面板在常温下静置数日后,再对其进行反复测量,型面精度RMS值基本未发生改变,说明铣削工艺并未破坏夹层面板的结构稳定性,型面精度可保持稳定。

#### (2) 双曲率夹层结构高精度面板稳定性检测与结果分析。

夹层结构铣削过程中,铣刀无法一次加工面板全局,仍余有大量难加工区域。面板曲率越大,难加工区域面积越大,需进行多次铣削,铣削厚度逐渐增大,面板

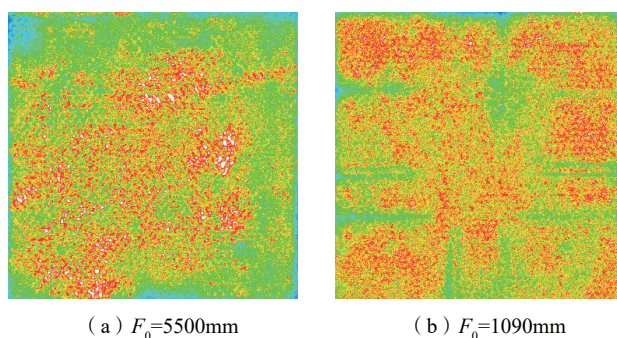


图11 铣削面板无损检测结果

Fig.11 Non-destructive testing result of panel after milling

内部发生脱粘现象的可能性增加。加工后的5500mm曲率面板和1090mm曲率面板的无损检测结果如图11所示。两块面板均未出现深蓝色,故无脱粘现象发生。综上所述,铣削加工能显著提高面板型面精度和表面粗糙度,且不影响面板胶结质量。

## 3 结论

(1) 对比有限元仿真结果和试验可知,蜂窝夹层面板铣削正交试验得到了与有限元模拟基本一致的结论,证明了夹层结构三维铣削仿真建模方法的准确性。因

此,三维铣削仿真结果可作为后续加工选择合理参数的依据。

(2) 蜂窝夹层结构表面质量影响因素的主次关系分别是: 铣刀转速 > 铣削深度 > 路径间距 > 进给速度, 表面粗糙度与主轴转速负相关, 与铣削深度和进给速度正相关, 这一结论与纯金属铣削加工一致。铣削深度是影响铣削热的最主要原因, 单次铣削深度超过 300 $\mu\text{m}$  时夹层面板发生轻微脱粘。实现蜂窝夹层结构最优加工表面质量且保证型面稳定的最优加工参数组合为  $n=15000\text{r}/\text{min}$ ,  $v=0.5\text{m}/\text{min}$ ,  $a=0.05\text{mm}$ ,  $d=50\mu\text{m}$ 。

(3) 铣削加工工艺能显著提高双曲率蜂窝夹层结构高精度面板的型面精度和表面粗糙度, 且超声无损检测结果表明: 铣削后的夹层面板内部未发生脱粘或分层现象。

(4) 基于蜂窝夹层结构高精度面板的三维铣削加工能够有效改善面板的表面质量且保证结构稳定性, 验证了三维铣削加工在紧缩场制造大曲率的夹层结构高精度反射面板的可行性。

## 参考文献

[1] OLVER A D. Compact antenna test ranges[C]// International Conference on Antennas & Propagation. Finland, 2002.

[2] 周贤宾, 常和生, 杜颂. 从一种大型表面超精密成形技术看先进成形技术的发展[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 450-452.

ZHOU Xianbin, CHANG Hesheng, DU Song. The development of advanced forming technology from a large surface ultra-precision forming technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1996: 450-452.

[3] 李东升, 周贤宾, 常和生, 等. 高精度反射器面板精密成形若干关键技术研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(13): 1133-1135.

LI Dongsheng, ZHOU Xianbin, CHANG Hesheng, et al. Several key technologies of precise forming for reflector panels[J]. China Mechanical Engineering, 2003, 14(13): 1133-1135.

[4] 张建明, 罗松保. Nanosys-300 非球曲面超精密加工系统的研究[J]. 国防技术基础, 2002(6): 14-18.

ZHANG Jianming, LUO Songbao. Research on Nanosys-300 aspheric surface ultra-precision machining system[J]. National Defense Technology Foundation, 2002(6): 14-18.

[5] 谢峰, 赵吉文, 刘正士, 等. 二维金属切削过程的数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2004(7): 1412-1416.

XIE Feng, ZHAO Jiwen, LIU Zhengshi, et al. Numerical simulation of two-dimensional metal cutting process[J]. Journal of System Simulation, 2004(7): 1412-1416.

[6] 程林. 二维金属切削应力场和温度场的数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004.

CHENG Lin. Numerical simulation of stress field and temperature field for two-dimension metal cutting[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.

[7] SAFFAR R J, RQZFAR M R, ZAREI O, et al. Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling

operation based on finite element method[J]. Simulation Modelling Practice & Theory, 2008, 16(10): 1677-1688.

[8] 胡福文, 李东升, 李小强, 等. 面向飞机蒙皮柔性夹持数控切边的定位仿真系统及应用[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 993-998.

HU Fuwen, LI Dongsheng, LI Xiaoqiang, et al. Locating simulation for aircraft skins NC trimming based on flexible holding fixture[J]. Journal of Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5): 993-998.

[9] 路冬, 李剑峰, 融亦鸣, 等. 航空铝合金 7075-T7451 三维铣削过程有限元仿真[J]. 中国机械工程, 2008, 19(22): 2708-2710.

LU Dong, LI Jianfeng, RONG Yiming, et al. 3D Milling process simulation of aero-aluminum alloy 7075-T7451[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2708-2710.

[10] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Seventh International Symposium on Ballistics, 1983.

[11] BACARIA J L, DALVERNY O, PANTALE O, et al. 2D and 3D numerical models of metal cutting with damage effects[C]//European Congress on Computational Methods in Applied and Engineering. Barcelona, 2000.

[12] 庄茁. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

ZHUANG Zhuo. Finite element analysis and application based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

[13] ZOREV N N. Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting [C]// International Research in Production Engineering, 1963.

[14] JOYOT P, RAKOTOMALALA R, TOURATIER M. Modelisation de l' usinage formulee en eu-ler-lagRqnge arbitraire[J]. Supplement au Journal de Physique III, 1993(3): 1141-1144.

[15] ZENG Q R, QIN Y, CHANG W L, et al. Correlating and evaluating the functionality-related properties with surface texture parameters and specific characteristics of machined components[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 149: 62-72.

[16] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

CAO Jinfeng, SHI Yiping. Frequently asked questions about ABAQUS finite element analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.

[17] 索会迎. 超声波无损检测技术应用研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2012.

SUO Huiying. The application and research of ultrasonic non-destructive testing technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2012.

[18] 车丕堂. 用于检测大型飞机蜂窝构件的超声波穿透法[J]. 材料工程, 1988(4): 29-30.

CHE Pitang. Ultrasonic penetration method for detecting honeycomb components of large aircraft[J]. Journal of Materials Engineering, 1988(4): 29-30.

通讯作者: 李东升, 博士、教授, 研究方向为超大型曲面的超精密成形制造理论与技术、航空钣金数字化制造与数控装备研究, E-mail: bhldongs@126.com。

(责编 大漠)