

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.05.013

复合材料蒙皮的打磨工艺技术研究

孙廉策, 陈炳发

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为研究复合材料飞机蒙皮机器人恒力打磨过程中工艺参数对材料去除和表面质量的影响规律,搭建基于视觉引导的飞机蒙皮机器人恒力打磨系统,通过打磨实验结合有限元方法进行研究,分析不同打磨参数下的材料损伤机制。结果表明:影响加工表面质量的主要因素是磨粒尺寸,其次是打磨压力。在一定范围内,材料去除量跟打磨压力、磨具转速成正相关。建立 CFRP 材料去除模型,确定最优参数组合,通过实验拟合出面向 CFRP 的材料去除系数,设计实验对材料去除模型进行验证,在保证 $Ra < 0.6 \mu\text{m}$ 的基础上实现了蒙皮材料的快速均匀去除。

关键词:CFRP; 飞机蒙皮; 恒力打磨; 去除机制

中图分类号:TH161⁺.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)05-0062-06

Research on Grinding Technology of CFRP Composite Aircraft Skin

SUN Liance, CHEN Bingfa

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:In order to study the influence of process parameters over material removal and surface quality in the process of robot constant force grinding of composite aircraft skin, a robot constant force grinding system of aircraft skin based on visual guidance was built, and with grinding experiments and by finite element method, the material damage mechanism under different grinding parameters was analyzed. The results show that grain size is the main factor affecting the quality of machined surface, followed by grinding pressure as the secondary factor, and in a certain range, material removal is positively correlated with grinding pressure and grinding speed. Thus, the CFRP material removal model was established, the optimal parameter combination was determined, the CFRP-oriented material removal coefficient was fitted through experiments, the material removal model was verified by design experiments, and the fast and uniform removal of skin materials was realized on the basis of machining roughness $< 0.6 \mu\text{m}$.

Keywords:CFRP; aircraft skin; constant force grinding; removal mechanism

0 引言

CFRP 因为优良的力学性能更适合作为飞机蒙皮等大尺寸结构的材料^[1]。CFRP 属于难加工材料,在加工过程中容易产生加工缺陷等问题。因在飞机蒙皮装配阶段,飞机结构和装配工艺复杂^[2],装配过程中变形明显易产生累积误差^[3]。为了确保装配满足要求并保证良好的气动外形,需要对蒙皮进行修磨。在飞机复合材料结构件的损伤中,蒙皮结构的损伤数量占有所有损伤复合材料结构数量的 75%^[4],所以对蒙皮修磨后的表面质量都有较高要求。目前对于蒙皮的修磨主要依靠人工打磨。传统的人工打磨加工结果主要取决于技工的经验与技术。如果仅仅依靠人工进行修磨^[5],不仅加工精度无法保障,其加工过程的稳定性也无法控制,并且修磨效率低,难以保证飞机装

配进度,且加工过程中粉尘污染严重,对人体伤害大,而传统磨床无法对蒙皮等大尺寸^[6]工件进行加工。机器人因其控制灵活、工作范围大等优点在打磨行业被广泛应用。但是针对飞机蒙皮的机器人打磨工艺,在国内研究较少^[7-8]。本文提出并设计了一种使用机器人恒力打磨飞机蒙皮的方法,使用 ABAQUS 软件对所搭建的打磨平台进行仿真,分析了加工参数对材料表面质量和材料损伤的影响。在保证表面质量的前提下 ($Ra < 0.6 \mu\text{m}$),通过正交试验确定最优的打磨参数组合。拟合材料去除系数,实现更加精准的材料去除。

1 蒙皮打磨系统搭建

本文设计并搭建了基于视觉引导的飞机蒙皮的机器人恒力打磨系统。该系统由 KUKA KR210 R170 机器人、CAS-500 恒力浮动打磨装置、三维

第一作者简介:孙廉策(1998—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,研究方向为计算机视觉,609626540@qq.com。

扫描仪和工作台组成,如图 1 所示。其中恒力装置通过控制气缸内部压强保持恒定,在装置浮动范围内控制气缸输出力大小。对扫描仪与机器人进行手眼标定,确定扫描仪坐标系和机器人末端坐标系之间的旋转和平移关系。

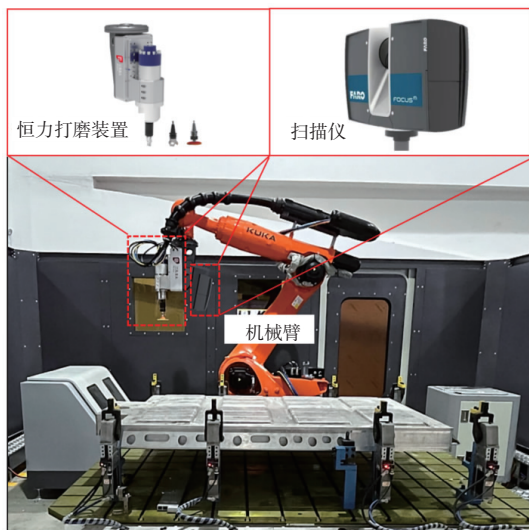


图 1 打磨系统组成

通过三维扫描仪获取蒙皮表面形貌的点云数据,使用开发的点云处理算法自动对打磨区域进行提取,结合本文研究的 CFRP 材料去除模型规划打磨轨迹。通过机器人仿真平台生成机器人各关节控制代码,发送给机器人控制柜,实现机器人恒力打磨。

2 打磨实验和仿真分析

2.1 打磨参数对表面质量的影响分析

因飞机蒙皮对打磨后的表面质量有一定要求,所以需要研究恒力打磨过程中的复合材料去除机制和材料损伤机制。

根据实际打磨过程中的加工参数范围,对打磨压力、磨具转速、进给速度和磨具粒度进行单因素打磨实验。其中打磨压力 F_c 取 20 N、30 N、40 N,磨具转速 ω_r 取 2 000 r/min、3 000 r/min、4 000 r/min,磨具粒度选取 80[#]、150[#]、240[#],进给速度选取 10 mm/s、13 mm/s、15 mm/s。打磨实验设计如表 1 所示。其中实验 1、2、3 组为磨具粒度的对比实验,实验 2、4、5 组为进给速度的对比实验,实验 2、6、7 组为磨具转速的对比实验,实验 2、8、9 组为打磨压力的对比实验。表 2 为各组实验打磨后材料表面粗糙度。

表 1 单因素实验表

序号	磨具粒度	转速/(r/min)	压力/N	进给速度/(mm/s)
1	80	3 000	30	13
2	150	3 000	30	13
3	240	3 000	30	13
4	150	3 000	30	10
5	150	3 000	30	15
6	150	2 000	30	13
7	150	4 000	30	13
8	150	3 000	20	13
9	150	3 000	40	13

表 2 单因素打磨实验表面粗糙度 单位: μm

序号	R_a	R_z
1	1.9	19.8
2	0.7	14.5
3	0.4	7.7
4	0.7	14.0
5	0.7	14.2
6	0.7	13.4
7	1.0	15.5
8	0.6	12.7
9	1.2	16.1

用 HIROX RH-2000 超景深三维显微镜对各组打磨后材料表面进行观察,其结果如图 2 所示。可以发现,磨粒尺寸即磨具粒度的变化对于材料表面质量影响较大,其次是打磨压力,而进给速度和磨具转速对于表面质量影响较小。

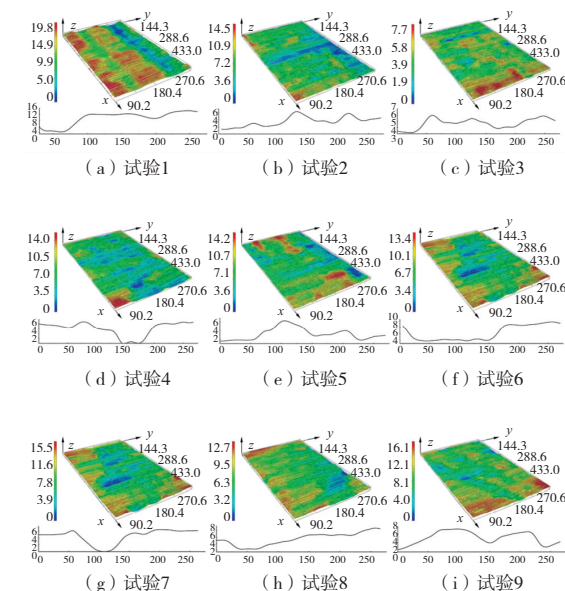


图 2 打磨后加工形貌和表面粗糙度曲线

因为磨具粒度对于表面质量影响较大,对实验 1 和实验 3 两组表面粗糙度相差较大的打磨表面进行观察,结果如图 3 所示。

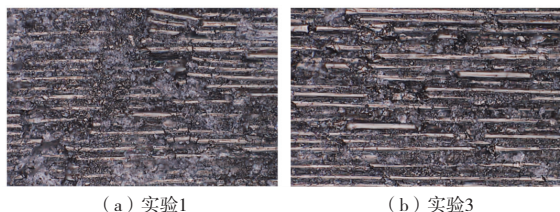


图 3 实验 1 和实验 3 表面微观形貌

可以观察到实验 1 中碳纤维表面损伤较大、纤维产生较大翘曲,部分纤维根部压入基体,尾部向上弯曲凸起,导致表面粗糙度较大,纤维走向产生较大变化。基体表面呈现碎屑状,去除不均匀并且基体出现较大凹坑。使用尺寸较大的磨粒会导致纤维和基体产生较大损伤,并且表面粗糙度也不符合需求。实验 3 的加工纤维表面光滑、没有大面积凹坑。纤维仅从中部断裂,并未与基体分离,纤维走向一致,表面质量较好。

2.2 有限元建模过程

为研究打磨过程中材料损伤的机制,选取对表面质量影响较大的因素即磨具粒度进行有限元仿真。所以对实验 1 和实验 3 的打磨过程进行了单磨粒磨削仿真,对复合材料采用跨尺度建模方式,对复合材料的纤维、基体、界面相分别进行三维建模。李娜娜等^[9]使用 ANSYS 对打磨过程进行仿真,研究了应力对表面质量的影响规律。

本文采用复合材料模型尺寸 $60\mu\text{m}\times 40\mu\text{m}\times 24\mu\text{m}$,纤维直径 $7\mu\text{m}$,纤维含量 60%。对纤维和基体使用实体建模,界面相使用 ABAQUS 内的 cohesive 单元进行建模。采用线弹性模型来表示纤维的本构模型,单元失效采用最大主应力失效准则。当纤维的最大主应力达到材料的抗拉极限强度或者纤维的最小主应力达到材料的抗压极限强度时,在 ABAQUS 中表现为纤维的网格单元无法继续受力,随之失效删除。

当最大主应力达到基体强度极限时,基体开始损伤,伴随基体的刚度退化,随着应变增大,刚度逐渐退化为 0,无法继续承载,单元删除。

模型采用六面体单元进行网格划分,单元类型为 C3D8R,有限元区域划分示意图如图 4 所示。

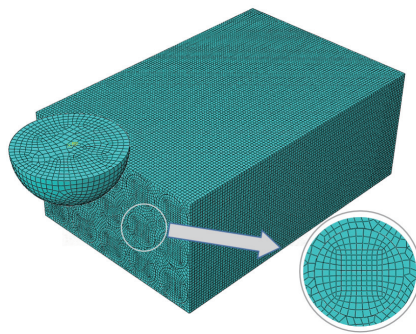


图 4 有限元区域划分示意图

2.3 有限元仿真过程

1) 实验 1 打磨仿真过程

仿真中选用粒度为 240# 的磨粒,磨粒直径为 $50\mu\text{m}$ 。径向截面的仿真结果如图 5 所示。

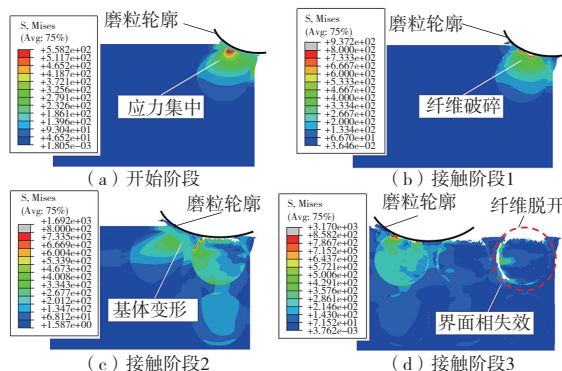


图 5 径向截面的仿真结果图

在磨粒进入材料过程中,当碳纤维没有裸露在表面的情况下,基体在受磨粒表面正向压力作用下,发生常规弹塑性材料切削过程,即材料受到应力产生应变,其过程遵循胡克定律。应力逐渐增大,材料发生屈服,产生不可复原的塑性应变,最终达到材料的抗压极限,材料的刚度下降为 0,无法承受载荷,单元失效。由于界面相的厚度很薄,体积很小,让其失效的断裂能较小,所以在与界面相邻的基体失效前界面相会提前失效。

由于碳纤维材料强度优于基体,在基体受挤压失效删除前,碳纤维会产生应力集中以及轻微形变。当碳纤维与磨粒之间的基体与界面相失效删除后,碳纤维直接与磨粒接触,由于碳纤维的轴向强度较高,而径向强度低,所以在磨粒沿着径向挤压,碳纤维容易产生纤维破碎失效,即纤维依旧连接但是表面受损,如图 5(b) 接触阶段 1 所示。由于界面相性能较低,在加工过程会发生纤维某

段的界面相完全失效,即纤维和基体产生裂纹并脱出,与基体不再连接。随着其余磨粒继续磨削,由于纤维失去基体的包裹直接与磨粒接触,纤维会发生断裂,成为磨屑,被带出材料。

2) 实验 2 打磨仿真过程

仿真中选用粒度为 80# 的磨粒,磨粒直径为 180 μm 。轴向截面的仿真结果如图 6 所示。

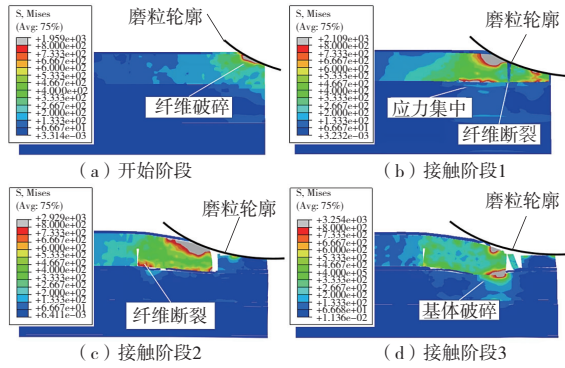


图 6 轴向截面的仿真结果图

与上文材料去除量低的过程类似,轴向磨削过程中,3 种结果的损伤也存在相同的顺序。首先当纤维或基体受力发生变形时,界面相会受到纤维和基体的压缩或拉伸,界面相因为形状等原因导致其断裂能低,相较于其余两种材料,会更早失效;其次是基体失效,因为基体材料弹性模量和强度低于碳纤维,会早于碳纤维发生破坏。其中基体破坏的原因有两种:分别是磨粒挤压基体以及碳纤维挤压基体;最后是碳纤维损伤破坏。

当基体和界面相失效删除后磨粒挤压纤维,碳纤维中轴以上产生拉应力,另一部分产生压应力。当磨粒继续进给,碳纤维所受拉应力达到材料的抗拉极限强度或压应力达到抗压极限强度,开始失效,形变进一步增大,纤维断裂破坏。

此外伴随着上层纤维的变形,上层纤维与下层纤维之间的基体受挤压失效,上下层纤维相互挤压产生损伤,可见当材料去除率高的情况下,材料出现深层损伤,会对加工表面质量产生影响。

2.4 加工表面质量分析

通过 2.1 节打磨实验和 2.3 节对部分打磨过程的有限元仿真可以发现当磨粒较大时,去除形式为纤维变形断裂,基体挤压破坏。纤维产生较大弯曲,并且伴随上层纤维断裂后挤压下层,导致材料由于上层挤压产生凹坑的最终结果。去除量小时,去除形式为纤维碎裂、基体挤压破坏以及界面相破坏去除等,结果表面质量较好,纤维无明显

变形,仅表面损伤。打磨压力相同时磨粒尺寸能够决定磨粒压入材料深度,而磨粒尺寸较小时,压力增大,会因磨粒尺寸限制导致磨粒压入材料深度无法继续增加。

通过实验与仿真结果进行对比,验证了仿真的准确性,且发现了磨粒尺寸是影响工件表面质量的主要因素。

要达到打磨后表面粗糙度 $Ra < 0.6 \mu\text{m}$,需要选用磨粒尺寸较小的 240# 砂轮进行打磨,在此基础上才可以进一步改变其他加工参数以提升材料去除量和加工效率。

3 材料去除模型及实验验证

3.1 材料去除模型建立

恒力打磨的材料去除模型的建立主要基于一种需要通过实验确定具体参数的 PRESTON^[10] 经验方程,其表示形式为

$$dH(x, y) = k_w v_r(x, y) P_c(x, y) dt \quad (1)$$

式中: k_w 为材料去除系数; $dH(x, y)$ 为单位时间内磨具和工件接触点 (x, y) 的材料去除量; $v_r(x, y)$ 为磨具和工件接触点 (x, y) 的相对速度; $P_c(x, y)$ 为磨具和工件接触点 (x, y) 的压强。

本系统采用刚性的 T 型砂轮,其受力时弹性形变可忽略不计,对于 CFRP 复材蒙皮,由于恒力打磨工艺的磨削力较小,所以本文忽略加工过程中压力作用导致的局部形变引起的压强分布不均。即 $P_c(x, y)$ 在接触区域内为固定值,设定打磨压力为 F ,则 P_c 可以表示为

$$P_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中 A 为接触面积。由于砂轮的进给速度远小于砂轮线速度,任意位置 $v_r(x, y)$ 可以用下式表示。

$$v_r(x, y) = \omega_r \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1),并对接触区域和时间进行积分,可以得到接触区域 D 在 T 时间内材料去除体积 V 为

$$V = \frac{2}{3} \pi r^3 k_w P_c \omega_r T \quad (4)$$

将等式两边同乘 CFRP 复合材料蒙皮密度 ρ ,可以得到接触区域 D 在时间 T 内材料去除质量 ψ 为

$$\psi = \frac{2}{3} \omega_r r k_w F \rho T \quad (5)$$

材料去除质量可以使用电子天平(精度 0.001 g)

称重打磨前后工件质量差值得。由于 k_w 也可以表示为:除相对运动速度、接触压强和影响材料去除的一切因素统一表示的比例常数。所以可以把式(5)中常数归进 k_w ,整理可得式(6)。

$$k_w = \frac{\psi}{\omega_r F_c \rho T} \quad (6)$$

由此可以控制打磨时砂轮转速 ω_r 和打磨压力,计算出 $\omega_r F_c \rho T$,通过测量打磨前后工件质量拟合出 CFRP 的材料去除系数。

3.2 去除函数最优组合确定

飞机蒙皮对加工表面质量有一定的要求。根据前文仿真和试验证明影响恒力打磨后表面质量的主要因素是磨具表面的磨粒尺寸大小,所以选用 240#较细的砂轮对材料进行打磨。想要在保证加工表面质量的前提下,使材料去除量提高,需要进行正交试验,探究出磨粒尺寸外其他加工参数对材料去除量的影响作用,确定最佳参数组合。正交试验方案及结果如表 3 所示。

表 3 正交试验方案及结果

序号	进给速度/ (mm/s)	砂轮转速/ (r/min)	压力/N	去除 质量/g
1	10	4 000	20	1.311
2	10	3 000	30	2.690
3	10	2 000	40	2.545
4	13	4 000	30	3.797
5	13	3 000	40	2.213
6	13	2 000	20	1.627
7	15	4 000	40	4.130
8	15	3 000	20	1.507
9	15	2 000	30	0.914

通过对材料去除质量的信噪比进行分析,获得各参数及水平的信噪比如图 7 所示。

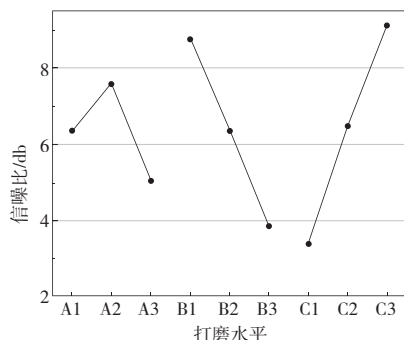


图 7 各修磨参数及水平响应图

为使材料去除量最高,所以打磨的最佳参数选择 A2B1C3,即打磨力为 40 N,砂轮转速为 4 000 r/min,进给速度为 13 mm/s。

3.3 材料去除系数确定

为了建立较为准确的复合材料磨削去除模型,需要求得 PRESTON 公式中该 CFRP 材料的材料去除系数,而该系数需要打磨实验来确定。根据上节确定的最优参数,设计材料去除系数实验。实验参数及结果如表 4 所示,拟合结果如图 8 所示。在该实验条件下 k_w 的值为 1.33×10^{-3} 。

表 4 材料去除实验及结果

序号	压力/N	转速/(r/min)	ψ/g	$\omega_r F_c \rho T$
1	20	2 000	0.489 9	182.112
2	22	2 200	0.453 0	220.355
3	24	2 400	0.448 8	262.241
4	26	2 600	0.476 5	307.769
5	28	2 800	0.595 2	356.939
6	30	3 000	0.536 3	409.752
7	32	3 200	0.700 0	466.206
8	34	3 400	0.734 0	526.303
9	36	3 600	0.672 7	590.042
10	38	3 800	0.875 0	657.424
11	40	4 000	0.891 0	728.447

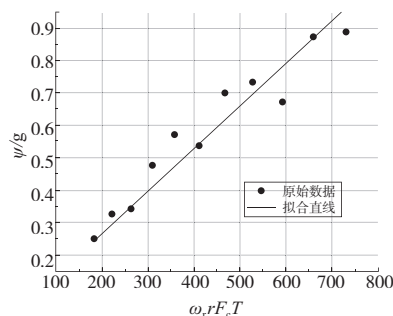


图 8 材料去除实验数据线性拟合图

3.4 实验验证

为了验证材料去除深度模型的准确性和稳定性,进行打磨实验验证,打磨前后分别用显微镜等间距测量样本点周围的平均高度,计算多个样本点打磨前后厚度差,并取平均值,作为一次打磨的实际材料去除深度。

将使用的工艺参数通过材料去除模型计算出材料去除质量,计算出打磨区域材料深度,作为模型的理论值。

采用砂轮粒度为 240#、打磨压力 40 N、砂轮转

速 4 000 r/min、进给速度 13 mm/s 作为工艺参数。该参数下理论去除深度为 75.6 μm 。实验结果如表 5 所示。

表 5 打磨前后厚度对比 单位: μm

测量点	打磨前	打磨后	去除深度
1	1 861.1	1 789.1	72.0
2	1 862.3	1 793.9	68.4
3	1 861.5	1 791.9	69.6
4	1 860.6	1 781.4	79.2
5	1 861.3	1 786.9	74.4
6	1 861.5	1 793.1	68.4
7	1 861.5	1 790.1	71.4
8	1 861.0	1 786.6	74.4
9	1 860.8	1 782.2	78.6
10	1 861.2	1 787.4	73.8

加工后表面粗糙度 $Ra = 0.5 \mu\text{m}$,符合对打磨表面质量的要求。去除深度平均值为 72.7 μm ,平均误差为 5.56%,验证了该模型的有效性。

4 结语

1)通过 CFRP 恒力打磨实验发现打磨表面质量主要受磨粒尺寸影响,其次是打磨转速。使用复合材料跨尺度建模的方式,对磨粒磨削复合材料的过程进行细观尺度上的有限元仿真,模拟了磨粒磨削工件材料过程中 CFRP 各部分材料变形、材料去除和切屑形成等过程。使用与实验相同参数进行仿真,对打磨实验得出的结论进行验证。

2)建立了 CFRP 材料去除模型,通过正交试验确定了各工艺参数对材料去除的影响,通过打

磨实验拟合出了材料去除系数,为实际打磨参数选取提供了理论基础。

3)所设计的机器人恒力打磨系统稳定性好,接触力控制稳定,能够完成材料表面的均匀去除,并获得较好的表面质量。

参考文献:

- [1] 马壮. 民用飞机复合材料翼盒蒙皮结构设计[J]. 信息记录材料, 2022, 23(5): 63-65.
- [2] 杜娟. 飞机装配不协调问题的原因分析及解决方法[J]. 中国高新技术企业, 2011(21): 114-116.
- [3] 岳胜,代多兵,安鲁陵. 飞机结构装配间隙超差分析与对策[J]. 航空制造技术, 2013, 56(12): 81-84.
- [4] 邓金鑫, 陈林, 卢思彤, 等. 某型飞机复合材料结构损伤分布规律[J/OL]. 北京航空航天大学学报. (2022-08-04) [2022-12-23]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2022.0379>.
- [5] 聂琪. 飞机复合材料蒙皮打磨机器人的精度分析与综合[D]. 天津:中国民航大学, 2019.
- [6] 陈正文,任启乐,庞雷,等. 大尺寸碳纤维复合材料飞机蒙皮构件精密水切割装备的研制[J]. 流体机械, 2019, 47(9): 12-16, 26.
- [7] 祝世兴,蔡高存. 自适应飞机大翼打磨设备的设计与分析[J]. 机械设计与研究, 2018, 34(6): 115-118.
- [8] 李云鹏. 飞机复合材料蒙皮打磨的并联机构刚度研究[D]. 天津:中国民航大学, 2019.
- [9] 李娜娜,李钦. 基于 ANSYS Workbench 的叶片砂带磨削用量分析与研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(4): 125-127.
- [10] PRESTON F W. Glass technology[J]. Journal of the Society of Glass Technology, 1927, 11(10): 277-281.

收稿日期:2023-02-20

(上接第 61 页)

2)切削深度大小直接决定了刀具和工件接触面大小,确定了切削力大小和摩擦产生热量的速率,因此切削深度成为影响五轴机床铝合金车削加工热变形的首要因素;

3)通过 ANSYS 模拟切削深度分别为 0.2 mm 和 0.3 mm 时的变形量比较,以及刀具受力的时域图进行分析,能精准设定切削用量,有效减少铝合金工件的变形。

参考文献:

- [1] 吴逸宇,赵国龙,李亮,等. C_4/SiC 复合材料铣削加工过程仿真分析及试验研究[J]. 机械制造与自动化,

2023, 52(2): 77-80, 100.

- [2] 王霆,周海飞. 薄壁深腔铝合金零件的铣削加工参数研究[J]. 轻金属, 2016(11): 52-55.
- [3] 吕跟来. 刀具几何角度对 7050 铝合金高速切削影响研究[J]. 轻金属, 2016(6): 50-52, 58.
- [4] 赵庆军,尹胜,向瑶,等. 基于 ABAQUS 切削仿真加工技术应用[J]. 工具技术, 2022, 56(2): 76-80.
- [5] 肖阳,袁海洋. 铣削加工对铝合金内应力测试与结构变形的影响[J]. 轻金属, 2015(8): 51-54.
- [6] 廖奎,侯力,张海燕,等. 变双曲圆弧齿线齿轮切削仿真及参数优化[J]. 机床与液压, 2022, 50(10): 142-147.

收稿日期:2022-11-17