

引文格式: 田凤杰, 邓聪, 韩晓, 等. 机器人打磨飞机蒙皮环氧树脂涂层工艺研究 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(20): 14-20.

TIAN Fengjie, DENG Cong, HAN Xiao, et al. Research on technology of robot grinding on epoxy coating for aircraft skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(20): 14-20.

机器人打磨飞机蒙皮环氧树脂 涂层工艺研究*

田凤杰¹, 邓聪¹, 韩晓¹, 李论²

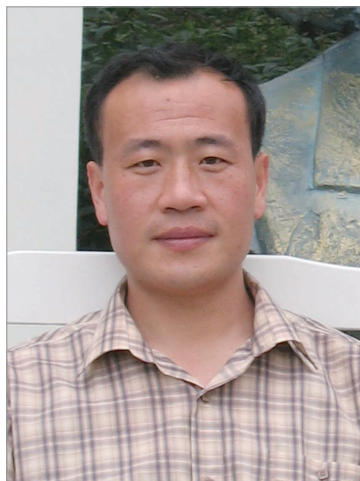
(1. 沈阳理工大学, 沈阳 110159;

2. 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

[摘要] 为了研究机器人打磨飞机蒙皮环氧树脂涂层过程中主要工艺参数对工件表面去除深度的影响规律, 搭建了机器人自动打磨系统平台。根据 Preston 方程建立环氧树脂涂层的去除模型; 运用 Deform 软件对工件打磨过程进行模拟仿真, 研究单因素条件下主要工艺参数对去除深度的影响; 并通过建立去除深度回归数学模型与工件打磨试验进行理论分析验证。结果表明, 在一定范围内, 去除深度与打磨压力、工具转速成正相关, 与工具进给速度、磨料粒度成负相关; 打磨压力对去除深度的影响较大, 工具转速对去除深度的影响相对较小。打磨过程中采用控制接触力恒定实现均匀去除, 取得良好的表面质量。

关键词: 机器人打磨; 环氧树脂涂层; 工艺参数; 去除深度; 回归数学模型

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2021.20.014



田凤杰

教授, 博士, 主要从事机器人先进制造理论与技术应用研究。

民用飞机蒙皮为薄板零件, 一般厚度为 2~4mm, 常采用铝合金或铝锂合金材料^[1-2]。飞机作业的环境使飞机蒙皮容易收缩变形, 加速老化, 适航性能差, 因此需要高要求的涂层作为保护^[3]。聚氨酯涂层耐磨性好、硬度高, 并且漆膜光亮平滑, 可以降低飞行阻力, 多用作蒙皮面漆; 而环氧树脂涂层附着力高、抗腐蚀性强, 多作为蒙皮底漆^[4]。为了使面漆涂层更好地附着于底漆上, 对喷涂后再打磨的环氧树脂底漆的厚度和表面粗糙度有严格的要求, 且环氧树脂材料具有的粘黏性导致可打磨性较差, 难以获得良好的加工质量^[5-6]。

近年来, 国内外研究人员相继开

展了对飞机蒙皮以及漆层打磨设备的相关研究, 而针对飞机蒙皮环氧树脂涂层的打磨工艺研究较少^[7-8]。目前主要靠人工打磨, 磨削过程很难保证材料去除的一致性和稳定性, 且工作环境差, 严重影响健康, 急需一种自动化打磨设备代替手工打磨作业。针对以上问题本文提出了一种机器人自动打磨方案, 并通过 Deform 软件进行仿真模拟, 分析比较各工艺参数对去除深度的影响。利用搭建的机器人自动打磨加工系统, 采用单因素试验, 研究主要打磨参数对去除深度的影响规律, 通过回归数学模型进行理论分析验证, 并选取最佳工艺参数进行打磨加工, 以获得良好的加工

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775542)。

质量。

机器人打磨平台搭建

机器人打磨系统平台主要由库卡机器人、控制柜、ATI 六维力/力矩传感器、计算机、打磨工具和工作台等组成,如图 1 所示。打磨工具选用费斯托偏心振动打磨机,通过专用夹具连接到传感器,传感器通过法兰盘安装到机器人末端执行器,如图 2 所示。传感器通过实时采集其坐标系下 x 、 y 、 z 3 个方向的打磨压力值,实现在线测量打磨压力的大小,并将测量数据输送到计算机。计算机将接收的数据进行运算处理,再将信息发送给机器人控制柜,进行调节补偿打磨工具与环氧树脂涂层间的距离,实现恒力打磨。试验材料为铝基材涂覆环氧树脂涂层,尺寸 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 2\text{mm}$ 。测量仪器为希玛 AR932 复合型涂层测厚仪。

磨抛盘磨削工件模型建立与仿真分析

1 磨抛盘去除深度模型建立

目前,对于柔性打磨去除深度模型的建立多基于 Preston 理论,其标准方程式为^[9]:

$$\frac{dH(x,y)}{dt} = k \times P(x,y) \times v(x,y) \quad (1)$$

式中, $\frac{dH(x,y)}{dt}$ 为单位时间内涂层材料打磨去除量; k 是与材料特性相关的常数; $P(x,y)$ 为任意时刻的接触压强; $v(x,y)$ 为打磨工具与工件的瞬时相对速度。

打磨过程中,磨抛盘与工件垂直接触,接触区域为圆形,如图 3 所示。设接触区域的半径为 R ; AB 上任意一点与圆心夹角为 θ ; w 为磨抛盘打磨的角速度; t_1 为磨抛盘与工件表面 A 点刚接触时刻; t_2 为磨抛盘打磨过程中,工具表面 A 点到达接触区域 AB 连线上某一点时的时刻。打磨去

除过程相当于一个累加的过程,磨抛盘的向右进给运动相当于接触区域 A 点向 B 点运动的过程,则在 AB 上任意一点到圆心的距离 r 可表示为:

$$r = R \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = R \frac{\sin w t_1}{\sin w t_2} \quad (2)$$

打磨过程中,由于 $n \gg v_f$, 则 AB 上任意一点的瞬时速度 v 可近似表示为:

$$v(x,y) = wr = \frac{\pi n R}{30} \times \frac{\sin w t_1}{\sin w t_2} \quad (3)$$

设打磨压力为 F , 则压强为:

$$P = \frac{F}{A} \quad (4)$$

式中, A 表示接触面积。

将式(3)和(4)代入式(1)中进行积分,得到:

$$H = k \frac{\pi n R F}{30 A} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\sin w t_1}{\sin w t_2} dt \quad (5)$$

设机器人加工时进给速度为 v_f , 则有:

$$dx = v_f \times dt \quad (6)$$

代入式(5)得最终去除深度函数为:

$$H = k \frac{\pi n R F}{30 v_f A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sin w t_1}{\sin w t_2} dx \quad (7)$$

由此可见,接触区域内去除深度与工具进给速度成负相关,与工具转速及打磨压力成正相关。

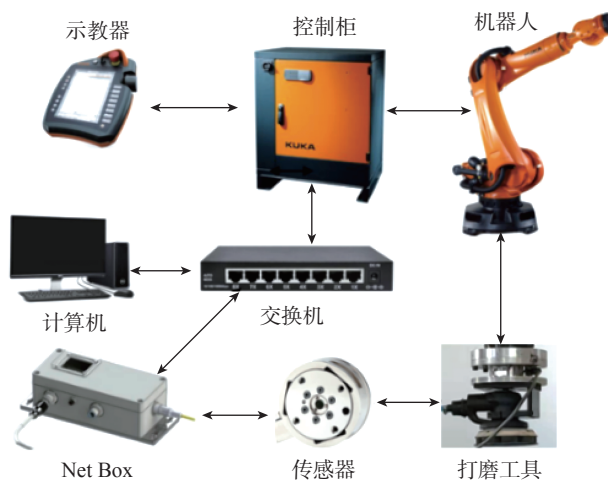


图1 机器人打磨系统
Fig.1 Robot grinding system

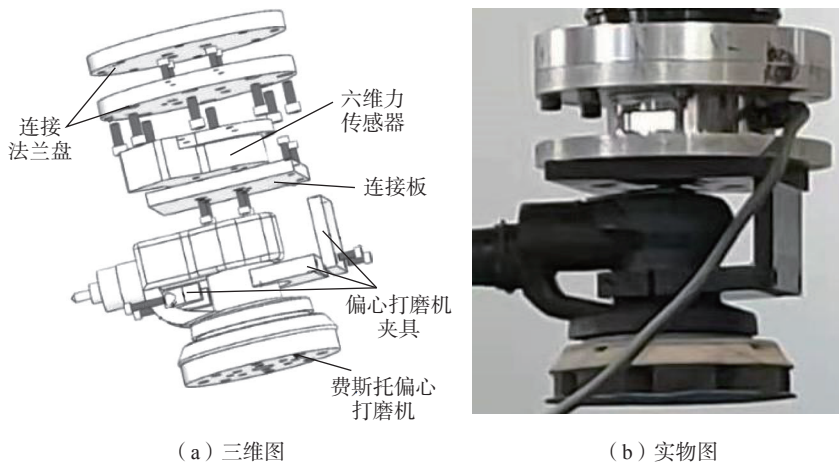


图2 打磨工具三维图及实物图
Fig.2 Grinding tool 3D map and physical map

2 磨抛盘磨削工件去除仿真

磨抛盘磨削工件的过程相当于多颗磨粒磨削工件表面的材料去除过程,如图4所示。建立磨抛盘和环氧树脂涂层的三维模型,其中环氧树脂涂层 20mm×20mm×1mm,磨抛盘弹性海绵φ5mm×1mm,弹性海绵黏附砂纸φ5mm×0.1mm,锥形磨粒大小根据不同粒度号砂纸计算得出。运用 Deform 软件对三维模型进行网格划分,并设定合适的模拟步数、边界条件等进行仿真,模拟仿真表面形貌如图5所示。分析模拟加工过程中各

打磨参数对去除深度的影响如下。

(1) 打磨压力 F 对去除深度的影响。

取砂纸粒度 $M=80$, 工具进给速度 $v_f=10\text{mm/s}$, 工具转速 $v_s=10000\text{r/min}$, 打磨压力 $F=3\sim 20\text{N}$, 对环氧树脂涂层进行仿真模拟。如图6(a)所示,随着打磨压力增加,材料去除深度有递增趋势,求得去除深度随打磨压力变化的斜率 $k=0.8683$ 。

(2) 进给速度 v_f 对去除深度的影响。

取砂纸粒度 $M=80$, 打磨压力

$F=10\text{N}$, 工具转速 $v_s=10000\text{r/min}$, 工具进给速度 $v_f=5\sim 25\text{mm/s}$, 对环氧树脂涂层进行仿真模拟。如图6(b)所示,随着进给速度增加,去除深度有递减趋势,求得去除深度随工具进给速度变化的斜率 $k=-0.624$ 。

(3) 磨料粒度对去除深度的影响。

设工具进给速度 $v_f=10\text{mm/s}$, 打磨压力 $F=10\text{N}$, 工具转速 $v_s=10000\text{r/min}$, 砂纸号为 80#、120#、180#、240# 和 320#, 对环氧树脂涂层进行仿真模拟。如图6(c)所示,随着磨料粒度的增加,材料去除深度有递减的趋势,求得去除深度随磨料粒度变化的斜率 $k=-0.2238$ 。

(4) 工具转速 v_s 对去除深度的影响。

取砂纸粒度 $M=80$, 打磨压力 $F=10\text{N}$, 工具进给速度 $v_f=10\text{mm/s}$, 工具转速 $v_s=7000\sim 10000\text{r/min}$, 对环氧树脂涂层进行仿真模拟。如图6(d)所示,随工具转速增大,去除深度有递增的趋势,求得去除深度随工具转速变化的斜率 $k=0.0189$ 。

根据仿真曲线斜率大小,得到各工艺参数对材料去除深度影响从大到小依次为: 打磨压力 > 进给速度 > 磨料粒度 > 工具转速。

试验验证

1 评价指标回归数学模型的建立

根据理论研究、仿真分析和前期试验测试,试验工艺参数选取见表1。打磨前用涂层测厚仪分别测量各工件表面 20 个样本点的厚度值,打磨后再次分别测量各工件表面样本点的厚度值并对数据进行处理,去除异常点,计算各样本点厚度差并取平均值,即平均去除深度值。

根据试验数据绘制各工艺参数对去除深度的影响规律曲线如图6所示,经计算得各试验曲线斜率为: $k_F=0.9031$, $k_{v_f}=-0.724$, $k_M=-0.2346$, $k_{v_s}=0.0206$ 。即试验中各工艺参数对材料去除深度影响从大到小依次为:

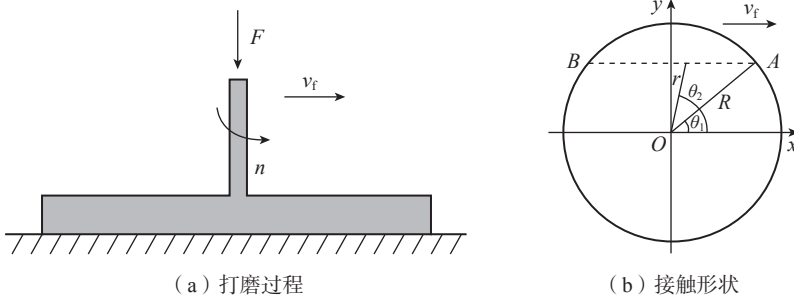


图3 打磨工具与工件接触形状
Fig.3 Contact shape of grinding tool and workpiece

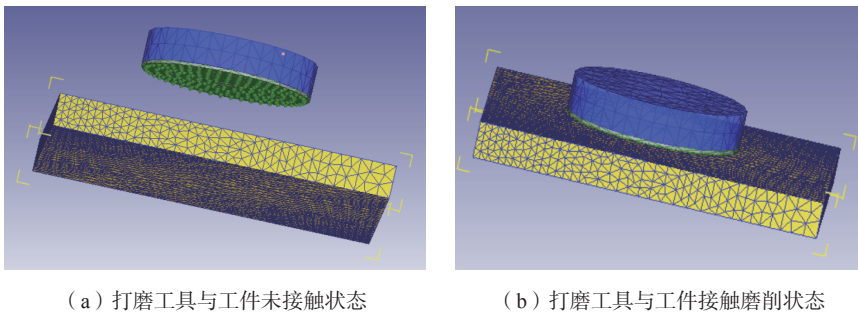


图4 多颗磨粒磨削示意图
Fig.4 Schematic diagram of multiple abrasive grains grinding

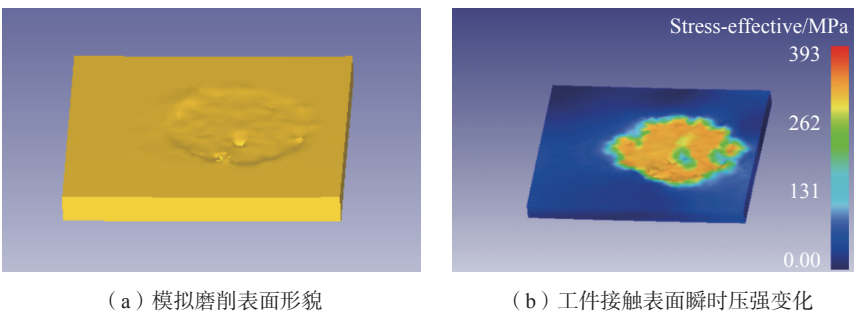


图5 模拟仿真形貌
Fig.5 Simulation morphology

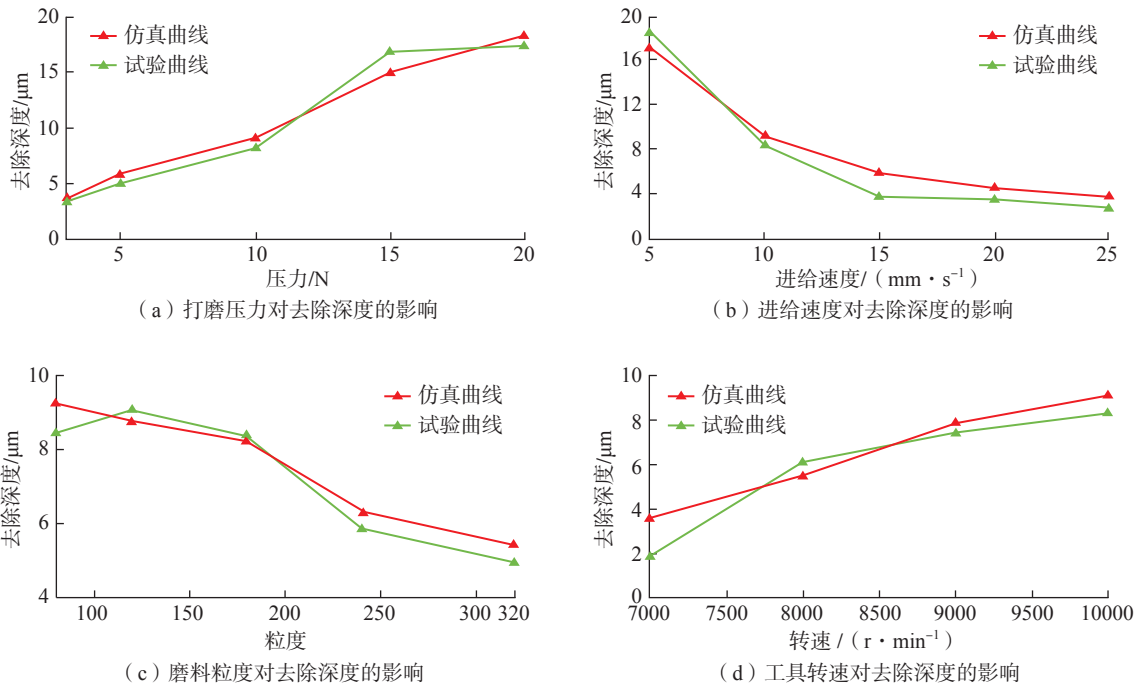


图6 主要工艺参数对去除深度的影响

Fig.6 Influence of main process parameters on removal depth

表1 磨抛盘磨削试验方案及试验结果
Table 1 Disc grinding test scheme and test results

试验编号	磨料粒度 M	打磨压力 F/N	进给速度 $v_f/(mm \cdot s^{-1})$	工具转速 $v_s/(r \cdot min^{-1})$	去除深度 H 试验值/ μm
1	80	3	10	10000	2.4
2	80	5	10	10000	5.1
3	80	10	10	10000	8.3
4	80	15	10	10000	16.8
5	80	20	10	10000	17.4
6	80	10	5	10000	18.5
7	80	10	10	10000	8.3
8	80	10	15	10000	3.8
9	80	10	20	10000	3.5
10	80	10	25	10000	2.8
11	80	10	10	10000	8.3
12	80	10	10	9000	7.5
13	80	10	10	8000	6.1
14	80	10	10	7000	1.9
15	80	10	10	10000	8.3
16	120	10	10	10000	9.2
17	180	10	10	10000	8.2
18	240	10	10	10000	5.8
19	320	10	10	10000	4.6

打磨压力 > 进给速度 > 磨料粒度 > 工具转速, 与仿真结果一致。

设去除深度的回归数学模型^[10]为:

$$H = cv_f^t v_s^p F^k M^q \quad (8)$$

式中, c, k, t, p, q 为回归待定系数。

将式(8)两边同时取对数得:

$$\ln H = \ln c + k \ln F + t \ln v_f + p \ln v_s + q \ln M \quad (9)$$

令 $\ln H = y, \ln c = b_0, \ln F = x_1, \ln v_f = x_2, \ln v_s = x_3, \ln M = x_4, k = b_1, t = b_2, p = b_3, q = b_4$, 则对应的线性回归曲线方程为:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4 \quad (10)$$

式中, y 为评价指标; x_1, x_2, x_3, x_4 为4个自变量。

代入19组试验数据可建立线性回归方程为:

$$\begin{cases} y_1 = b_0 + b_1 x_{11} + b_2 x_{12} + b_3 x_{13} + b_4 x_{14} \\ y_2 = b_0 + b_1 x_{21} + b_2 x_{22} + b_3 x_{23} + b_4 x_{24} \\ \vdots \\ y_{19} = b_0 + b_1 x_{191} + b_2 x_{192} + b_3 x_{193} + b_4 x_{194} \end{cases} \quad (11)$$

矩阵方程可表示为:

$$Y = Xb + \varepsilon \quad (12)$$

式中, ε 为试验误差; Y 为 19 组试验所测去除深度值组成的数值矩阵, 可表示为:

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{19} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.4 \\ 5.1 \\ \vdots \\ 4.6 \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{191} & x_{192} & x_{193} & x_{194} \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix};$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \end{bmatrix}。$$

由最小二乘法可得:

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y = \begin{bmatrix} -15.232 \\ 0.936 \\ -0.644 \\ 0.012 \\ -0.082 \end{bmatrix} \quad (13)$$

最终求解得到回归数学模型:

$$H = e^{-15.232} F^{0.936} v_f^{-0.644} v_s^{0.012} M^{-0.082} \quad (14)$$

2 显著性检验与验证试验

为了验证式(14)去除深度数学模型的准确性和可靠性, 运用 SPSS 软件, 输入变量为磨料粒度 M 、打磨压力 F 、进给速度 v_f 、工具转速 v_s 进行显著性检验, 验证结果如表 2 和 3 所示。

由表 2 可以看出 4 个主要工艺参数对去除深度变化的影响值是 92.8% > 70%, 即磨料粒度、打磨压力、进给速度和工具转速 4 个工艺参数能

够明显反映去除深度变化, 试验工艺参数的选取可靠。德宾-沃森(DW)为 2.009 (1.98 < DW < 2.02), 则去除深度回归数学模型是可靠的。由表 3 可以看出, 各工艺参数的显著性 $P=0$ 或 $0.001 < 0.05$, 故工件去除深度回归数学模型是高度显著的。各工艺参数对工件去除深度影响程度依次为, 打磨压力 ($|t|=6.097$) > 进给速度 ($|t|=5.396$) > 磨料粒度 ($|t|=3.769$) > 工具转速 ($|t|=2.737$), 数学模型预测结果与仿真和试验结果一致。

为了进一步验证数学模型准确性, 做了进一步试验验证, 试验参数及结果如表 4 所示, 预测值与试验值误差在 $\pm 7\%$ 以内, 表明了该数学模型的有效性。

3 稳定性试验验证

根据表 4 去除深度回归数学模

型预测值与试验值误差百分比, 选取误差最小的编号为 2 的工艺参数组合: 砂纸粒度为 80, 打磨压力 5N, 工具转速 10000r/min, 工具进给速度 10mm/s, 进行 7 次打磨加工试验。

打磨前后分别用涂层测厚仪测量工件表面 10 个等间距样本点的厚度值, 如图 7 (a) 和 (b) 所示, 随后计算 10 个样本点打磨前后的厚度差并取平均值, 则得到一次打磨试验时的去除深度平均值, 最后重复 7 次试验得到表 5 所示的 7 组平均去除深度值。随机选取其中一次试验, 图 7 (c) 和 (d) 分别是打磨过程和打磨前后对比图, 将打磨前后各样本点涂层厚度的记录值绘制成表 6, 图 8 是对应表 6 的数据分析曲线。

由测试结果可以看出, 经 7 次同组工艺参数重复打磨试验得到去除

表 2 模型摘要分析表
Table 2 Model summary analysis table

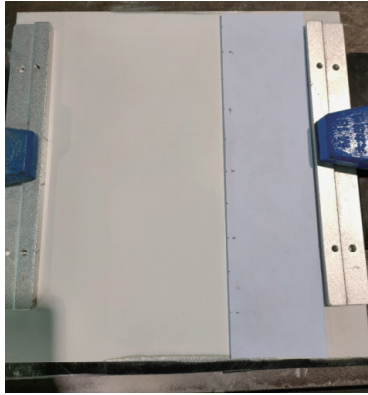
模型	相关系数 R	判定系数 R^2	德宾-沃森
1	0.963	0.928	2.009

表 3 回归系数分析表
Table 3 Regression coefficient analysis table

变量	标准化系数 B	回归系数检验值 t	显著性 P
磨料粒度 M	-0.082	-3.769	0.001
打磨压力 F	0.936	6.097	0
进给速度 v_f	-0.644	-5.396	0
工具转速 v_s	0.012	2.737	0.001

表 4 验证试验误差百分比
Table 4 Verification test error percentage

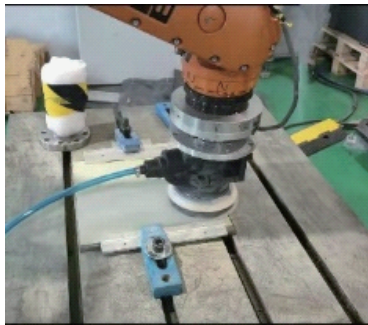
试验编号	磨料粒度 M	打磨压力 F/N	进给速度 $v_f / (mm \cdot s^{-1})$	工具转速 $v_s / (r \cdot min^{-1})$	试验值 / μm	模型预测值 / μm	误差 / %
1	80	10	5	10000	18.5	18.9	2.16
2	80	5	10	10000	5.1	5.0	1.96
3	80	5	10	9000	4.3	4.6	6.97
4	120	15	5	10000	21.1	20.6	-2.37
5	180	20	20	10000	7.3	6.9	-5.79



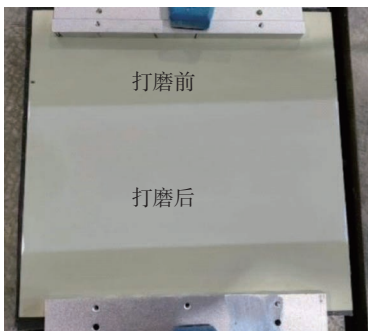
(a) 10个样本点



(b) 厚度测量



(c) 打磨过程



(d) 打磨前后对比图

图7 环氧树脂涂层试片打磨试验

Fig.7 Grinding test of epoxy resin coating specimen

表5 多次试验去除深度平均变化值
Table 5 Removal depth average change of multiple tests μm

试验次数	去除深度平均值
1	5.0
2	5.1
3	4.9
4	5.2
5	5.0
6	5.2
7	5.1

表6 单次打磨前后涂层厚度对比
Table 6 Comparison of coating thickness before and after single grinding μm

测量点	打磨前	打磨后	去除深度
1	54.6	50.1	4.5
2	56.7	50.4	6.3
3	53.7	48.2	5.5
4	51.5	48.3	4.2
5	55.9	50.1	5.8
6	56.9	51.6	5.1
7	59.9	53.6	6.3
8	61.5	54.3	7.2
9	54.7	50.8	3.9
10	58.1	53.7	4.4

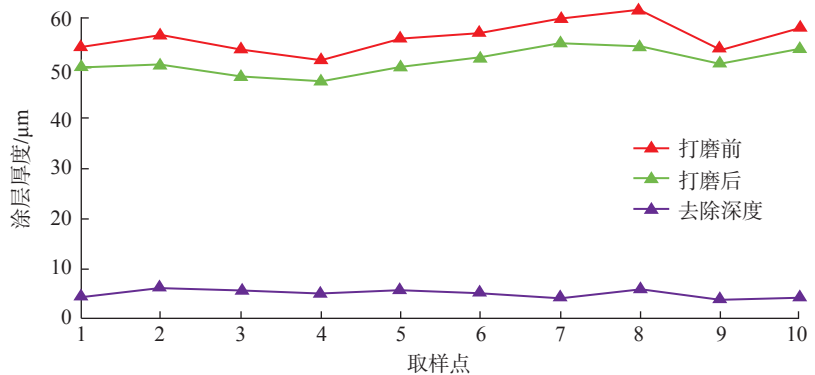


图8 单次打磨前后涂层厚度对比图

Fig.8 Comparison of coating thickness before and after single grinding

深度平均变化值在 4.9~5.2 μm 之间,在单次打磨试验中,打磨前后涂层厚度平均值由 56.3 μm 降至 51.2 μm ,极差由初始 10.1 降至 6.0,方差由初始 12.12 降至 5.31,涂层表面一致性提高,并且涂层去除深度稳定可控,即打磨后表面质量良好,该机器人自动打磨方案可行。

结论

(1) 通过建立环氧树脂涂层的去除模型,运用 Deform 软件模拟加工过程,并对仿真结果进行分析,得出各工艺参数对去除深度的影响趋势,为实际打磨工艺参数的选择提供了理论基础。

(2) 该打磨系统稳定可靠,通过控制接触力恒定,达到了均匀去除的目的,并且涂层去除厚度的可控性良好,能够获得良好的表面质量,同时改善了传统打磨方式工作环境。

(3) 通过环氧树脂涂层的打磨试验,获得其打磨工艺知识,客观性较强,对于飞机蒙皮其他涂层材料例如聚氨酯涂层材料的打磨加工研究具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 徐志才,郝新超.两种民用飞机金属蒙皮加工工艺对比[J].中国科技信息,2016(11):46-47.

XU Zhicai, HAO Xinchao. Comparison of

two kinds of civil aircraft metal skin processing technology[J]. China Science and Technology Information, 2016(11): 46-47.

[2] 郝鹏, 卢翔, 杜建勋. 民用飞机铝蒙皮表面处理评价量化方法研究 [J]. 表面技术, 2013, 42(3): 91-93.

HAO Peng, LU Xiang, DU Jianxun. Study on quantitative method of civil aircraft aluminum skin surface treatment evaluation[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 91-93.

[3] 赵芯, 于新华, 苏正良, 等. 民用航空器用蒙皮涂层的验证技术及适航要求 [J]. 涂料工业, 2014, 44(8): 69-74.

ZHAO Xin, YU Xinhua, SU Zhengliang, et al. Verification technology and airworthiness requirements of skin coatings for civil aircraft[J]. Coating Industry, 2014, 44(8): 69-74.

[4] 赵芯, 谢飞, 张帆, 等. 浅析现代民用航空飞机蒙皮防腐体系 [J]. 全面腐蚀控制, 2014, 28(1): 22-24, 54.

ZHAO Xin, XIE Fei, ZHANG Fan, et al.

Analysis on anti-corrosion system of modern civil aviation aircraft skin[J]. Total Corrosion Control, 2014, 28(1): 22-24, 54.

[5] 李德宏, 杨岗伟, 刘龙飞. 环氧树脂材质底板数控工艺改进 [J]. 金属加工 (冷加工), 2015(1): 48-50.

LI Dehong, YANG Gangwei, LIU Longfei. Numerical control technology improvement of epoxy resin material base plate[J]. Metal Working (Cold Working), 2015(1): 48-50.

[6] 时辰. 风电叶片磨削加工中磨削力及表面成形过程研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

SHI Chen. Research on grinding force and surface forming process in grinding of wind turbine blade[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.

[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.

ZHU Shixing, CAI Gaocun. Design and

analysis of adaptive aircraft large wing grinding equipment[J]. Machine Design and Research, 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.

LI Yunpeng. Research on stiffness of parallel mechanism for aircraft composite skin grinding[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2019.

[9] 安宏伟. 复杂曲面机器人自动磨抛工艺研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2019.

AN Hongwei. Research on automatic grinding technology of complex curved surface robot[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.

[10] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2015.

HE Xiaqun, LIU Wenqing. Applied regression analysis[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2015.

Research on Technology of Robot Grinding on Epoxy Coating for Aircraft Skin

TIAN Fengjie¹, DENG Cong¹, HAN Xiao¹, LI Lun²

(1. Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;

2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

[ABSTRACT] In order to research the effect of process parameters on removal depth in the process of robot grinding epoxy coating on aircraft skin, a robot automatic grinding platform was built. According to Preston equation, the removal model of epoxy coating was established. The workpiece grinding process was simulated by Deform software and the influence of process parameters on removal depth under the single factor condition was studied. The regression mathematical model of removal depth and workpiece grinding test are established for theoretical analysis and verification. The results show that the removal depth is directly proportional to the grinding pressure and tool rotation speed, inversely proportional to the tool feed speed and abrasive particle size. Grinding pressure has great influence on removal depth, while tool rotation speed has relatively little influence on removal depth. During the grinding process, the uniform removal is realized by controlling the constant contact force and good surface quality is obtained.

Keywords: Robot grinding; Epoxy coating; Process parameters; Removal depth; Regression mathematical model

(责编 大漠)