

引文格式: 纪俐, 冯晓悦, 白洁, 等. 基于胶体形貌的多参数耦合自动涂胶工艺研究[J]. 航空制造技术, 2025, 68(17): 22-31.

Ji Li, FENG Xiaoyue, BAI Jie, et al. Automatic gluing process with multi-parameter coupling based on colloid morphology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2025, 68(17): 22-31.

# 基于胶体形貌的多参数耦合自动涂胶工艺研究

纪俐<sup>1,2</sup>, 冯晓悦<sup>1,2</sup>, 白洁<sup>1,2</sup>, 韩炜<sup>3</sup>, 尹怀江<sup>4</sup>

1. 沈阳航空航天大学机电工程学院, 沈阳 110136;
2. 飞行器快速试制技术研究教育部重点实验室, 沈阳 110136;
3. 中航西飞民用飞机有限责任公司, 西安 710089;
4. 广东汇天航空航天科技有限公司, 广州 511400)

**[摘要]** 由于传统手工涂胶方法存在效率低、工人劳动强度大、密封质量差及涂胶量难以控制等问题, 针对自动化涂胶过程中涂胶量稳定控制和涂胶形貌一致性差的技术难点, 提出一种基于胶体形貌的多参数耦合自动涂胶工艺研究方案。首先开展针对多参数影响的自动涂胶正交试验, 通过皮尔逊相关系数分析确定涂胶过程中的重要影响参数; 其次对3种不同涂胶工艺对象进行多参数影响研究的涂胶试验, 探寻最佳涂胶工艺参数; 最后采用三维检测技术采集各胶体点云数据, 通过点云数据处理算法获取更精确的位置信息, 使用梯形数值积分法计算胶体截面积, 从而判断胶体形貌类型。通过多参数耦合自动涂胶试验, 确定最佳的涂胶工艺参数: 速度 5 mm/s、压力 103 kPa、距离 3 mm、角度 90°。采用上述参数时, 胶体形貌最佳, 可有效防止出现漏胶、断胶、胶体过窄和过宽等现象, 提高了涂胶工艺的效率 and 精度。

**关键词:** 正交试验设计; 自动涂胶; 涂胶工艺参数; 三维检测; 梯形数值积分法

中图分类号: V26

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2025.17.022



纪俐

副教授, 博士, 研究方向为脑功能网络、智能装备与机器人控制、三维数字化检测。

飞机制造的质量、数量及其技术水平是一个国家综合实力的重要体现之一<sup>[1]</sup>。据统计, 在现代制造中装配的工作量占整个产品研制工作量的 20%~70%, 平均为 45%, 装配时间占总制造时间的 40%~60%。产品的可装配性和装配质量直接影响着产品性能, 装配通常占用的手工劳动量大、费用高, 且属于产品生产工作的后端, 因此提高装配效率和装配质量具有更加重要的工程意义<sup>[2]</sup>。密封是飞机制造、维修工作中的重要工序。在飞机很多区域, 为防止气体和液体的渗漏或者为达到更好的防腐效果, 通过在零件的相互贴合表面、零件根部及缝隙之间、空穴、紧固件端部、碳纤维复合材料零件的切割表面施加密封黏接剂, 确保飞机的气密性能、油密性能及抗腐蚀性能<sup>[3]</sup>。

飞机涂胶在作业方式上一般有人工涂胶和自动涂胶<sup>[4]</sup>。目前大多采用人工手动涂覆的方式, 飞机的密封涂胶工艺经历着手工刷子作业和人工挤压瓶装密封胶作业的过程, 这两种工作方法都存在生产效率较低、涂胶量不均匀等问题, 不能适应我国飞机制造业迅猛发展的迫切要求<sup>[5]</sup>。

目前, 国内许多相关专家学者已经针对自动化涂胶参数及胶体形貌优化等各个方面做了大量的科学研究和技术探索, 并且已经取得了一定的研究成果。包乐等<sup>[6]</sup>研究复合防热结构件的自动化涂胶方法, 以解决手工涂胶的溢胶和不均匀问题, 保证产品密封质量的一致性。而在自动化涂胶的过程中, 密封胶的流动性和黏度极易受到环境的影响。章易镰等<sup>[7]</sup>通过设计伺服驱动的涂胶方案,

实现快速、稳定、精确涂胶,保证窝口涂胶剂量均匀、填充稳定,满足航空紧固件湿安装要求。为应对复杂涂胶场景,赵连红等<sup>[8]</sup>从密封形式、涂覆形式和装配形式3个方面研究它们对结构密封性能的影响,选择正确的密封组合形式有利于提高飞机的密封性能和减重。Li等<sup>[9]</sup>在连续装配和间断式装配模式下,采用气动涂胶和伺服加压涂胶结合的方法,实现高黏度胶体的均匀涂覆,涂胶效率相比手工提升80%以上。不同模型和仿真的方法也逐渐与涂胶工艺结合,以保障涂胶的稳定性。Shen等<sup>[10]</sup>开发了一种喷射点胶控制技术,通过多项式模型的建立和供胶压力控制器的设计,实现了出胶量的稳定控制。

综上所述,现有学者对自动化涂

胶工艺的研究多集中于单一因素的分析,缺乏对涂胶过程多参数耦合作用的系统性分析,特别是在不同涂胶对象上稳定控制涂胶量和均匀性的问题尚未得到有效解决。针对上述问题,本文提出一种基于胶体形貌的多参数耦合自动涂胶工艺研究方案。通过正交试验设计,系统评估了关键参数对胶体形貌的综合影响。采用三维检测技术结合图像处理算法获取胶体点云数据,进而提取胶体截面数据,并运用梯形数值积分法计算截面积,以精确分析胶体形貌,实现对胶体形貌的有效控制,解决了涂胶量不稳定、漏胶和断胶等问题,显著提升了工艺效率和质量稳定性。

## 1 涂胶方式及计算方法

为了便于理解本文的技术路线,

图1展示了本研究的整体流程。

涂胶密封主要通过结构连接部位或在紧固件表面涂覆合适胶体密封剂,以填补结构之间或紧固件与安装孔之间的缝隙,防止电解液积聚,预防和控制缝隙腐蚀<sup>[11]</sup>。整机密封形式主要包括紧固件封包、贴合面密封、填角密封、缝隙密封等<sup>[12]</sup>。

封包密封是指对螺丝、螺栓、螺母等紧固件进行密封包装,以确保其密封性能和防护效果,如图2(a)所示;贴合面密封是指在两个工件表面或部件之间使用密封剂<sup>[13]</sup>,确保其紧密接触,防止物质通过接触面渗透或泄漏,如图2(b)所示;填角密封涉及在构件贴合面边缘施加胶体密封剂并进行整形,形成连续光滑无波纹状的密封剂涂层<sup>[14]</sup>,特别适用于有阶差的结构边缘,旨在阻隔气体

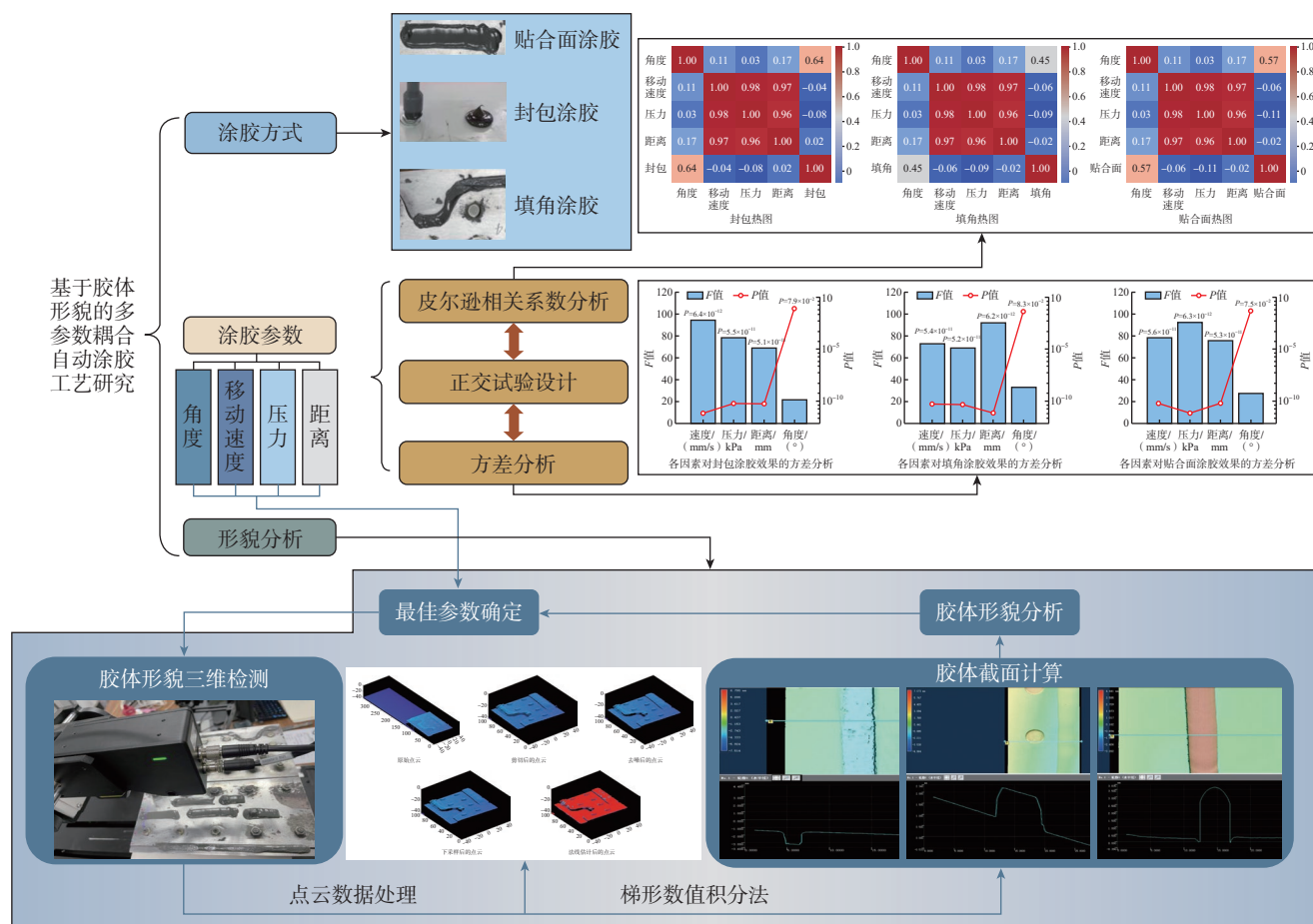


图1 技术路线图

Fig.1 Diagram of technical route

或液体穿过接缝,如图 2 (c)所示。

### 1.1 涂胶方式及硬件设备

目前常见涂胶方式有辊涂法、丝网印刷法、旋涂法、挤胶法、刮涂法、喷涂法等,而要实现精密涂胶密封,只有挤胶法涂胶方式可以达到要求<sup>[5]</sup>。胶体密封剂选择 HM109 改性聚硫密封剂,供胶装置选择气压供胶,机器结构选择的是六自由度 KUKA 工业机器人,夹持末端执行器进行涂胶工作,末端执行器选择的是螺杆泵结构,整体设备如图 3 所示。

如图 4 所示,使用基恩士 LJ8080 相机对固化的胶体进行激光线扫,采集胶体的形貌数据。

### 1.2 胶体截面计算方法

对于采集的截面数据,采用梯形数值积分法计算胶型截面积,首先将需要计算的截面边界离散化,然后通过积分来计算物体的截面积,将复杂形状的截面积近似为许多小梯形的面积和,逐步逼近真实面积。具体计算过程如下。

截面边界由函数  $y=f(x)$  表示,区间为  $[a, b]$ 。

离散化边界:将界面  $X$  轴区间  $[a, b]$  分成  $n$  个小区间,步长为

$$h = \frac{b-a}{n} \quad (1)$$

计算每个小区间的面积:每个小区间的面积可以近似为

$$A_i = \frac{1}{2}[f(x_i) + f(x_{i+1})] \times h \quad (2)$$

其中  $x_i = a + i \times h, i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ 。

累加所有小区间的面积:整个截面积  $A$  可以表示为

$$A = \sum_{i=0}^{n-1} A_i = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{2}[f(x_i) + f(x_{i+1})] \times h \quad (3)$$

## 2 涂胶工艺试验设计

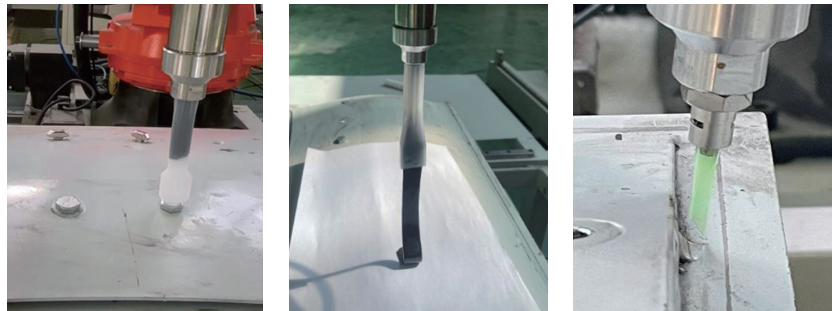
### 2.1 正交试验设计

通过正交试验设计方法,系统地研究各因素对试验结果的影响。正

交试验设计能够有效减少试验次数,本次试验针对 3 种涂胶对象且在一个包含 4 个因素的五水平试验中,完全因子设计需要  $3 \times 4^5 = 3072$  次试验,而正交设计只需要  $3 \times 25 = 75$  次试验。这种设计方法的优点在于能

够识别出主要因素的影响,能评估多个因素之间的交互作用对响应变量的影响并在多因素同时变化的情况下保持结果的高效性和准确性。

在本研究中,通过预试验选择了 4 个主要因素来探讨它们对涂胶效



(a) 封包密封

(b) 贴合面密封

(c) 填角密封

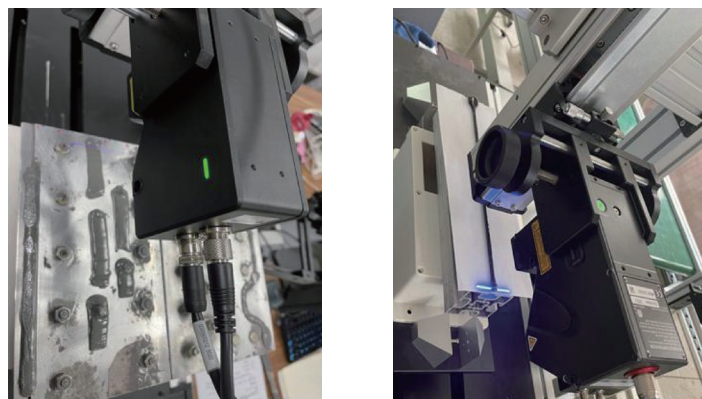
图 2 密封形式

Fig.2 Sealing type



图 3 涂胶设备

Fig.3 Gluing equipment



(a) 线扫图1

(b) 线扫图2

图 4 基恩士 LJ8080 线扫图

Fig.4 Line scan image of Keyence LJ8080

果的影响。在3个不同的水平下对每个因素进行了测试,具体试验条件如表1所示。每次试验前,首先将设备调整到指定的角度,然后根据正交表中的条件设置移动速度、压力和距离。每个条件下重复3次试验以确保数据的稳定性,试验数据在完成每次试验后及时记录并保存。

为评估各因素之间的线性相关关系,采用皮尔逊相关系数进行分析。皮尔逊相关系数的值范围在-1到1之间,表示从完全负相关到完全

正相关。通过热图直观展示这些相关系数,有利于识别因素之间可能存在的显著交互作用。

图5是封包、填角、贴合面皮尔逊热图,从皮尔逊热图中各参数与试验结果的关系可知,速度、距离和压力与试验结果存在较强的正相关。所以试验中需要优先设置速度、压力、距离的参数,以获得最佳的参数条件,这与正交表的结论一致。当移动速度为8 mm/s、压力为103 kPa、距离为15 mm时,出胶稳定性最佳,

胶体均匀性达到最优。

为证明正交试验的准确性,通过方差分析,评估各因素对不同涂胶工艺的统计显著性。 $F$ 值是方差分析中用于检验组间差异的统计量,通过方差比率计算得出,反映了解释性变量相对于随机误差对结果变量的影响程度。 $F$ 值越大,说明模型解释的方差越多,即变量之间的关系越强或组间差异越大。组内方差衡量的是同一试验组内各个样本之间的变异性,组内方差计算公式为

$$\sigma_{SSW}^2 = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 \quad (4)$$

式中, $X_{ij}$ 是第*i*组中的第*j*个观测值; $\bar{X}_i$ 是第*i*组的均值; $k$ 是组数; $n_i$ 是第*i*组的样本数。

组间方差衡量的是不同试验组之间的均值差异,组间方差计算公式为

$$\sigma_{SSB}^2 = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{X}_i - \bar{X}_G)^2 \quad (5)$$

式中, $\bar{X}_G$ 是总体均值。 $F$ 值是组间方差与组内方差的比率,用于评估不同试验组之间的差异是否显著,计算公式为

$$F = \frac{MSB}{MSW} \quad (6)$$

式中, $MSB = \frac{\sigma_{SSB}^2}{k-1}$ ,  $MSW = \frac{\sigma_{SSW}^2}{N-k}$ ;  $N$ 是总样本数。

$P$ 值表示在原假设为真的情况下,观察到当前结果的概率。通常将 $P$ 值与显著性水平(0.05)比较,若 $P$ 值小于显著性水平,则结果具有统计学意义;若 $P$ 值大于显著性水平,则结果无统计学意义。图6中的 $P$ 值根据计算所得的统计量及其自由度,通过查阅标准统计分布表得出,反映了在原假设为真的情况下观察到该统计量的概率。

速度、压力和距离对封包涂胶效果的影响显著,如图6(a)所示,其 $F$ 值最高, $P$ 值较低。同样,图6(b)和图6(c)分别展示了这些因素对填角涂胶和贴合面涂胶效果的影响。

表1 正交试验

Table 1 Orthogonal experimental

角度/(°)	移动速度/(mm/s)	压力/kPa	距离/mm
30	5	35	3
	8	69	5
	10	103	10
	15	138	15
	20	172	20
60	5	10	10
	8	103	15
	10	138	20
	15	172	3
	20	35	5
90	5	103	20
	8	138	3
	10	172	5
	15	35	10
	20	69	15
125	5	138	5
	8	172	10
	10	35	15
	15	69	20
	20	103	3
145	5	172	15
	8	35	20
	10	69	3
	15	103	5
	20	138	10

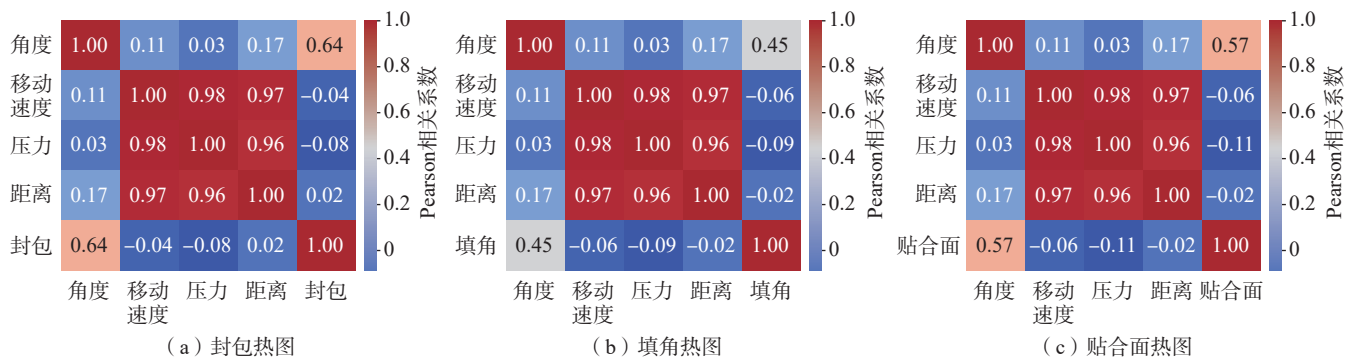


图5 正交试验皮尔逊热图

Fig.5 Pearson heatmap of orthogonal experiment

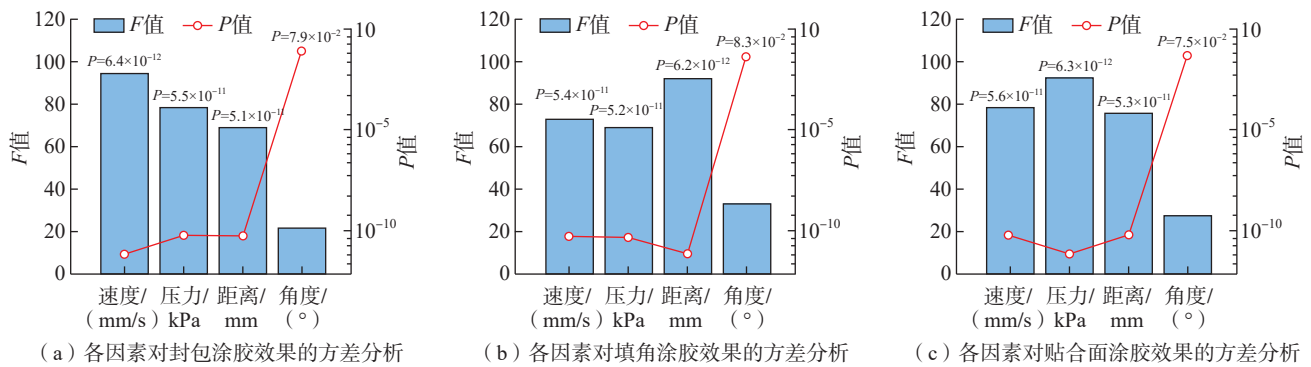


图6 各因素对涂胶工艺影响的方差分析

Fig.6 Variance analysis of the effect of various factors on the gluing process

方差分析表明,速度、压力和距离对3种涂胶工艺的影响最大,与皮尔逊热图的结论一致,因此试验中应优先设置速度、压力和距离的参数。

## 2.2 胶体形貌三维检测

为实现胶体形貌的高精度三维检测,采用基恩士LJ8080非接触式激光位移传感器。LJ8080具有高分辨率和高采样率,基于激光三角测量原理,能够准确采集胶体的坐标位置,实现三维轮廓的精确扫描与重建,以判断不同参数匹配下的胶体形貌,从而有效防止漏胶、断胶及胶体过窄、过宽等现象。

利用三维检测技术得到固化后的胶体形貌点云,如图7(a)所示。在MATLAB软件中首先使用阈值过滤的方法来选定重要的点云数据;通过统计滤波去除噪声点,提高点云的整体质量;利用体素网格过滤算法来减少点云中的数据点数量,从而降低计算复杂度的同时保持点云的

结构和特征;法线估计算法通过分析点云的局部邻域结构进一步优化数据处理。这些算法的处理结果如图7(b)~(c)所示。这些算法使点云更为轻量化,提高了后续处理的效率,去除不相关数据和噪声后,结果更为可靠,降低了错误分析的可能性。

将处理后的点云文件导入数据可视化和分析软件LJ-X Observer,分别对图8(a)~(c)所示的填角、封包和贴合面胶体进行截面数据采集,并在同一涂胶工艺下采集不同胶体的数据,如图8(d)~(f)所示。通过观察不同参数耦合下的胶体形貌,确定最佳工艺参数,判断涂胶形貌类型及胶体的均匀性,有效防止漏胶、断胶、胶体过窄或过宽等现象。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 不同胶体截面扫描结果

针对贴合面、封包、填角胶体的

形貌,使用三维检测技术进行数据采集,将胶体 $n$ 等分,结果分别如图9~11所示,以相等距离进行截面数据采集。通过分析不同截面的面积变化,可以评估胶体形貌的均匀性和胶型。

### 3.2 各参数对3种涂胶工艺的影响

为研究各参数对胶体体积的影响,采用控制变量法系统分析各参数对胶体形貌的影响。根据表1中的正交试验设计,分别控制单一变量进行试验:当压力、距离、胶枪角度固定为103 kPa、3 mm、90°时,改变涂胶速度;当涂胶速度、距离、胶枪角度固定为5 mm/s、3 mm、90°时,改变压力;当涂胶速度、压力、胶枪角度固定为5 mm/s、103 kPa、90°时,改变距离;当涂胶速度、压力、距离固定为5 mm/s、103 kPa、3 mm时,改变涂胶角度。通过控制变量法对3种涂胶工艺进行试验,并利用三维检测技术采集胶体数据以计算体积。

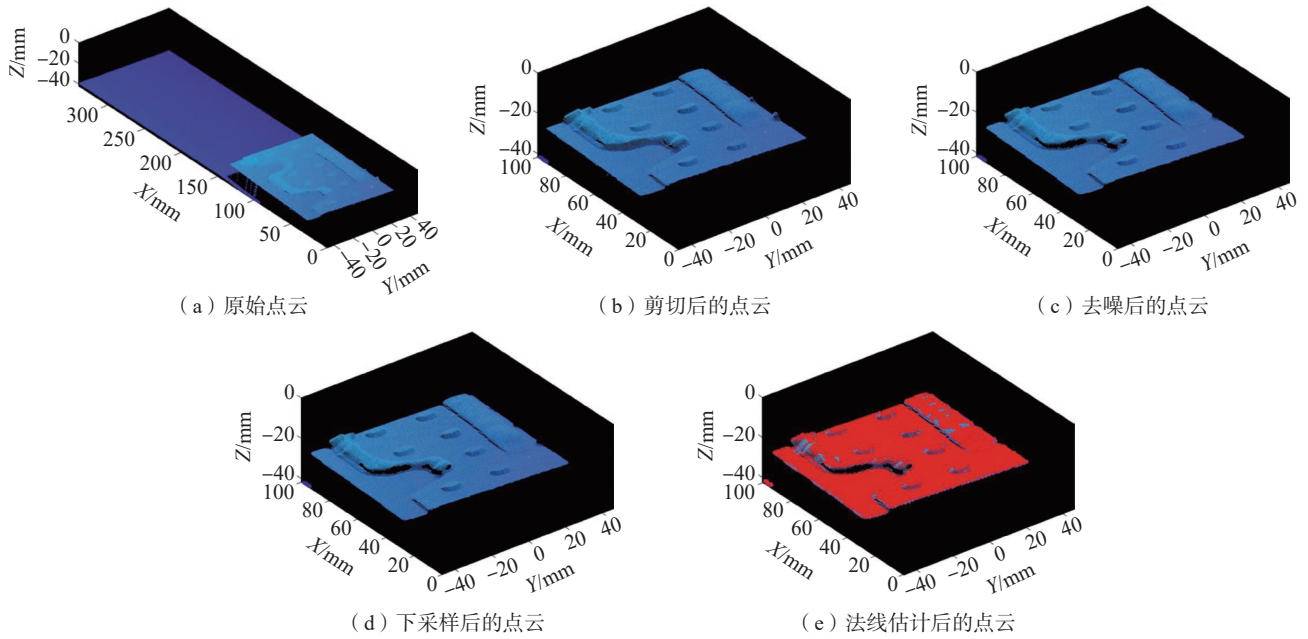


图7 点云数据处理算法的结果  
Fig.7 Results of point cloud data processing algorithms

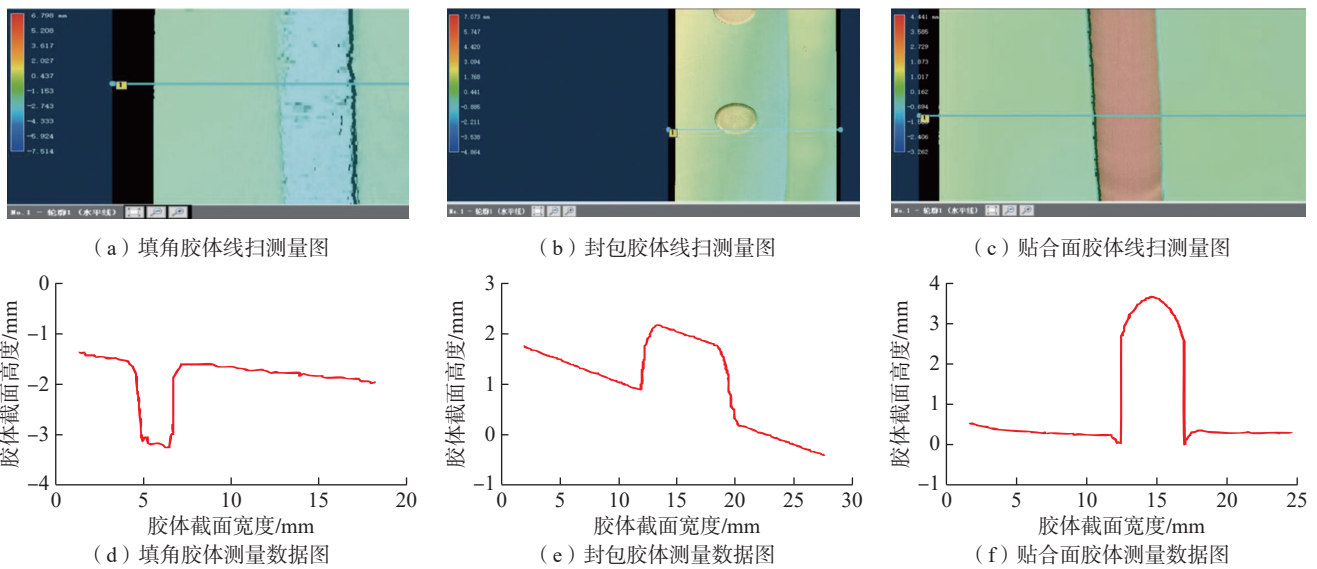


图8 胶体截面数据采集  
Fig.8 Data collection of colloid cross-section

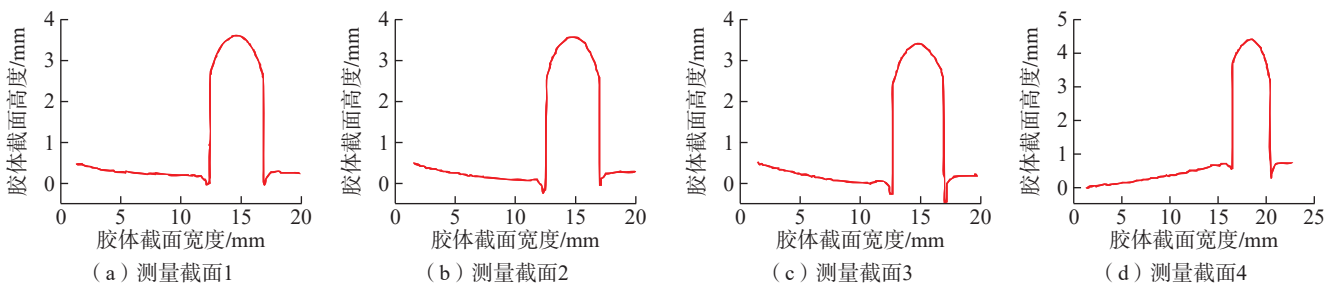


图9 贴合面胶体截面  
Fig.9 Cross-section of bonding surface colloid

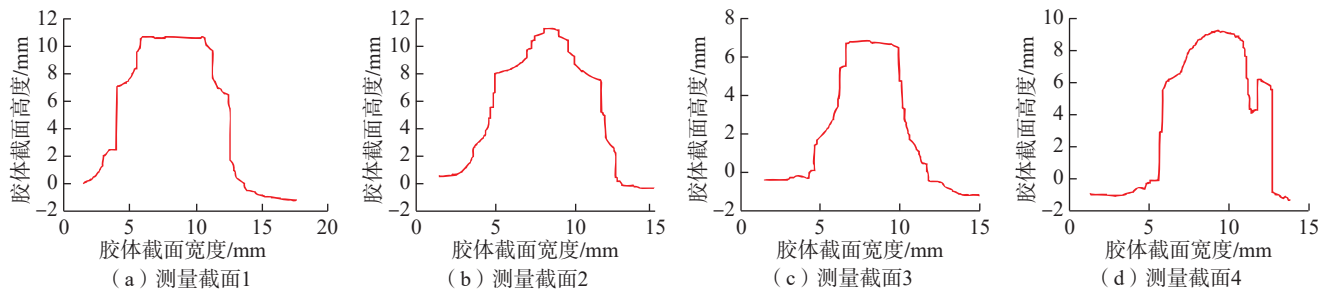


图 10 封包胶体截面

Fig.10 Cross-section of encapsulated colloid

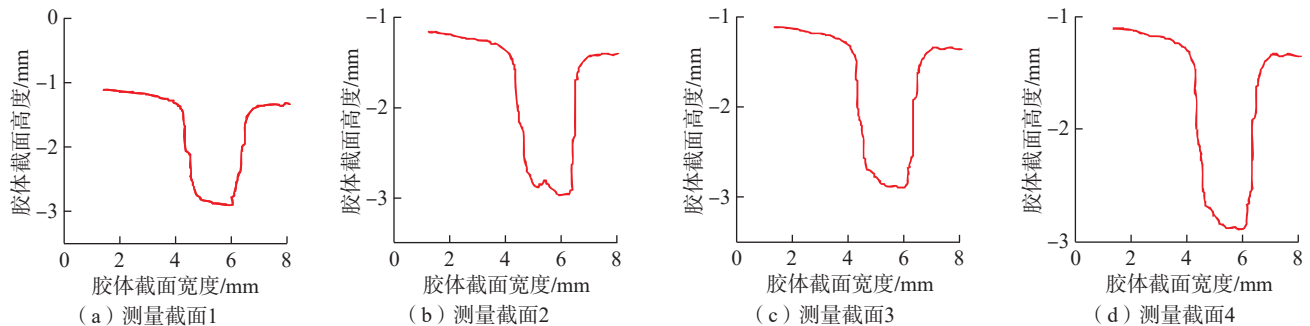


图 11 填角胶体截面

Fig.11 Cross-section of corner filling colloid

当其他 3 个参数保持不变时,随着速度的增加,3 种工艺下的胶体体积均呈减小趋势,在 5 mm/s 时涂胶体积达到最大值,如图 12 (a) 所示;当其他 3 个参数保持不变时,随着压力的增加,3 种工艺下的胶体体积呈现先增大后减小的趋势,胶体体积在 103 kPa 时达到最大值,如图 12 (b) 所示;当其他 3 个参数保持不变时,随着胶嘴到工件距离的增加,胶体体积均呈现减小的趋势,如图 12 (c) 所示;随着角度的增大,3 种工艺下的胶体体积总体上呈现先增大后趋于稳定的趋势,如图 12 (d) 所示,在  $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$  之间,胶体体积呈上升趋势,胶体体积在  $90^{\circ}$  时达到最大值,随着角度继续增大,胶体体积逐渐趋于平稳。结果表明涂胶速度、距离和压力与试验结果存在较强的相关性,而涂胶角度的持续增大对出胶体积的影响较小,具有较弱的相关性,和图 5、图 6 的结果一致。

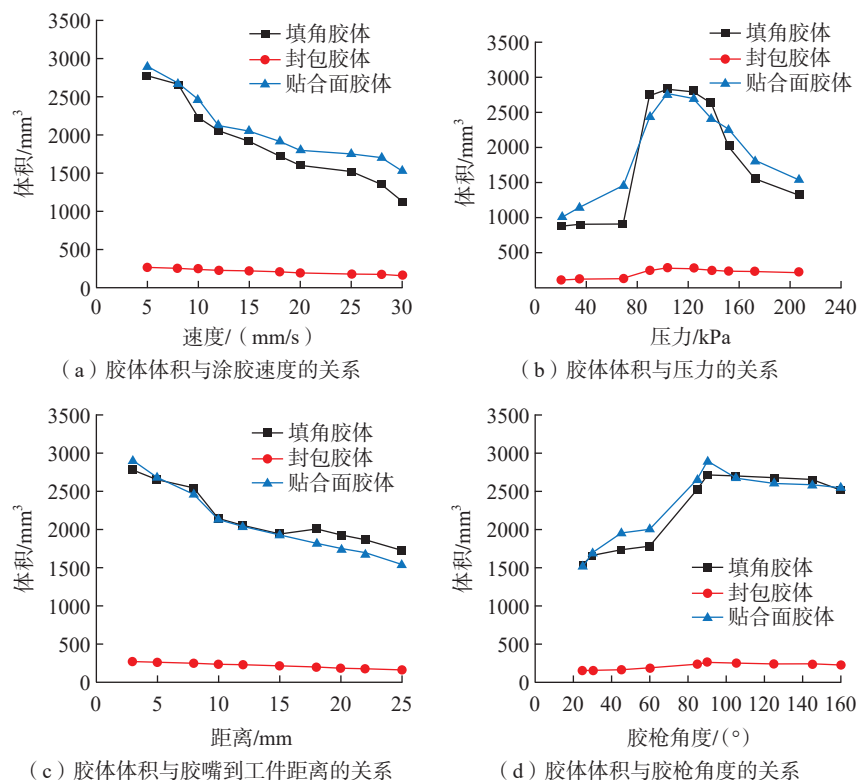


图 12 各参数对胶体体积的影响

Fig.12 Influence of various parameters on colloid volume

### 3.3 涂胶试验结果

#### 3.3.1 贴合面涂胶试验结果

图 13 为贴合面胶体形貌。当涂胶距离过大或压力增大时,贴合面涂胶过程中易出现断胶和缺胶现象,导致部分区域胶体覆盖不足,形成密封漏洞,进而降低密封效果,如图 13 (a) 所示;当起始速度设置过快时,会在胶体头部出现堆胶、拖胶的现象,且在涂胶过程中会出现胶体堆叠现象,如图 13 (b) 所示;当设置速度 5 mm/s、压力 103 kPa、距离 3 mm 时,贴合面涂胶均匀,无断胶、堆胶缺陷,如图 13 (c) 和 (d) 所示。

#### 3.3.2 封包涂胶试验结果

在封包试验中,首先采用正交试验表中的最佳涂胶参数,随后通过改变涂胶移动速度、距离和压力进行封包密封试验。当移动速度为 20 mm/s 时,胶枪移动过快,导致胶体出现拉丝现象,胶水分布不均匀,影响密封完整性,增加漏气或漏液的风险,如图 14 (a) 所示;当速度调整为 5 mm/s、压力 103 kPa 时,胶体封包密封效果最好,有效防止螺母松动和气(液)体的泄漏,如图 14 (b) 所示;随之调整不同的距离、涂胶速度后,出现了图 14 (c) 和 (d) 所示的密封不完全现象。

#### 3.3.3 填角涂胶试验结果

在填角密封试验中,采用正交试验设计中的最佳涂胶参数,并通过改变移动速度和压力进行测试。当涂胶速度设置为 5 mm/s、压力为 103 kPa、涂胶距离为 3 mm 时,填角密封的胶体涂覆均匀且质量较高,无断胶或缺胶现象,如图 15 (a) 所示;在保持其他条件不变的情况下,加快移动速度或增大、减小压力时,试验中出现了图 15 (b) 所示的胶体堆积、缺胶、断胶及胶体整体偏细的现象;当涂胶速度设置为 5 mm/s、压力为 103 kPa、涂胶距离为 5 mm 时,填角密封整体质量较高,无缺陷现象,如图 15 (c) 所示;当增大涂胶距离、提高速

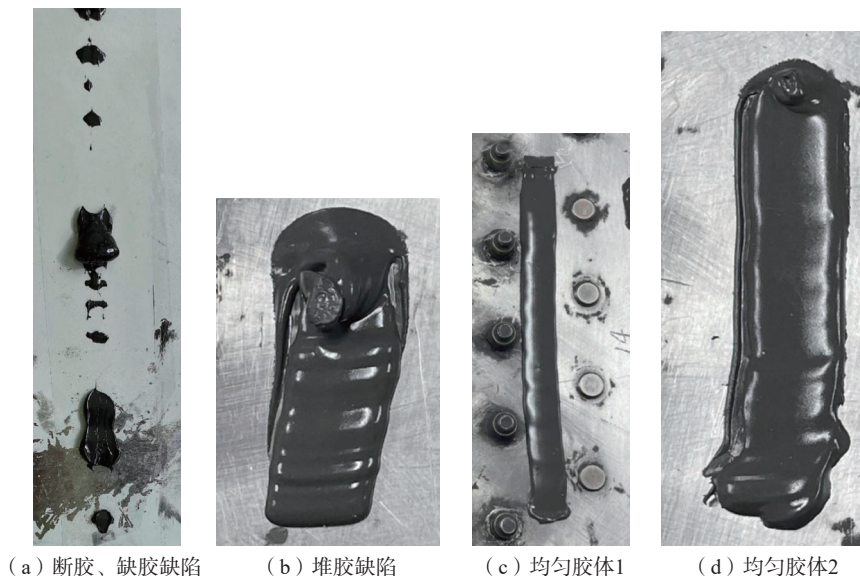


图 13 贴合面胶体形貌

Fig.13 Morphology of bonding surface colloid

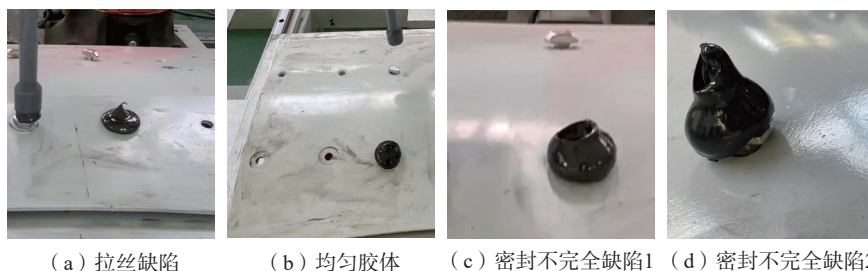


图 14 封包胶体形貌

Fig.14 Morphology of encapsulated colloid

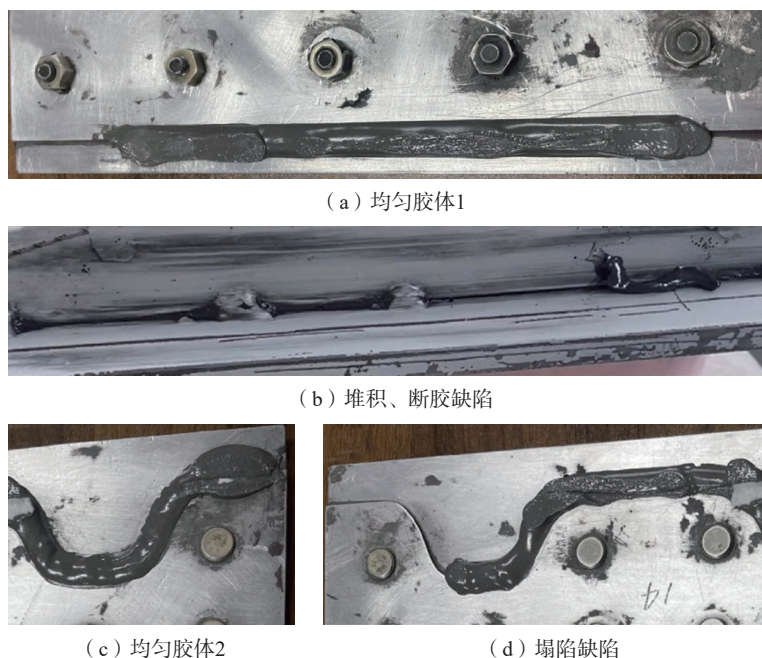


图 15 填角胶体形貌

Fig.15 Morphology of corner filling colloid

度和增大压力时,出现图 15 (d) 所示的胶体塌陷现象,无法达到理想的密封效果。

### 3.4 胶体形貌分析

胶体形貌均匀性如图 16 所示。如图 16 (a) 所示,在贴合面涂胶试验中,当速度为 5 mm/s、压力为 103 kPa、距离为 3 mm、角度为 90° 时, A 胶体的截面积变化较小,整体均匀性较高,如图 13 (c) 和 (d) 所示的均匀贴合面;在其他参数不变且速度提高至 15 mm/s 时, B 胶体的截面积在不同位置波动较大,表现出波浪重叠现象,如图 13 (b) 所示的不均匀涂覆;当速度为 15 mm/s、距离增至 15 mm、压力为 138 kPa 时, C 胶体的截面积波动最大,甚至出现截面积骤降至 0 的情况,如图 13 (a) 所示,表明胶体出现严重的缺胶、断胶现象,显著影响了涂胶质量。

如图 16 (b) 所示,在封包涂胶试验中,由于封包涂胶后的胶体呈半球状,其截面积表现出先增加后减小的趋势。当速度为 5 mm/s、压力为 103 kPa、距离为 3 mm 时, A 胶体在不同位置的截面积变化较稳定,表明其封包质量较高,如图 14 (b) 所示;在其他参数不变的情况下, B 胶体提高涂胶速度至 15 mm/s, C 胶体同时提高速度至 15 mm/s、距离增至 15 mm、压力为 138 kPa 时, B 和 C 胶体的截面积在一定长度范围内剧烈变化,且在最大截面积处出现缩小现象,表明

B 和 C 胶体在封包过程中出现拉丝甚至塌陷现象,如图 14 (a) 所示的拉丝现象和图 14 (c) 和 (d) 所示的塌陷现象。

如图 16 (c) 所示,在填角涂胶试验中,当提高速度至 15 mm/s、距离增至 15 mm、压力为 138 kPa 时, A 胶体的截面积在不同位置剧烈变化,甚至骤降至 0,表明填角质量较差,出现缺胶和断胶现象,如图 15 (b) 所示;在其他参数不变的情况下, B 胶体仅提高涂胶速度至 15 mm/s,其截面积变化较大,整体偏小且剧烈起伏,表现出如图 15 (d) 所示的细条波浪重叠现象;当速度设置为 5 mm/s、压力为 103 kPa、距离为 3 mm 时, C 胶体的截面积变化最为平稳,涂胶效果最佳,如图 15 (a) 所示,将距离提高至 5 mm 后,胶体形貌较好,未见缺陷,如图 15 (c) 所示。

## 4 结论

(1) 通过多参数影响的自动涂胶工艺正交试验,结合皮尔逊相关系数热图和方差分析,确定了影响胶体形貌的关键参数为速度、距离和压力。

(2) 对 3 种不同涂胶工艺对象进行多参数涂胶试验,确定了最佳涂胶参数:速度为 5 mm/s,压力为 103 kPa,距离为 3 mm,角度为 90°。

(3) 通过三维检测技术采集各胶体的点云数据,并利用图像处理算法去除不相关数据和噪声,提高了点

云处理效率。随后,使用梯形数值积分法计算胶体截面积,以分析不同参数耦合下的胶体形貌变化。当速度为 5 mm/s、压力为 103 kPa、距离为 3 mm、角度为 90° 时,封包、贴合面和填角涂胶效果最佳,无缺胶断胶、头宽头窄、波浪或拉丝现象;当其他参数不变,将速度提高至 15 mm/s 时,贴合面和填角涂胶出现波浪胶或胶体偏细现象,封包涂胶则出现拉丝现象;将速度提高至 15 mm/s、距离增至 15 mm、压力增至 138 kPa 时,贴合面和填角涂胶出现缺胶和断胶,封包涂胶则出现拉丝和塌陷现象。

## 参考文献

- [1] 王细洋. 航空概论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- [2] WANG Xiyang. Introduction to aviation[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006.
- [3] 刘检华, 孙清超, 程晖, 等. 产品装配技术的研究现状、技术内涵及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2018, 54(11): 2-28.
- [4] LIU Jianhua, SUN Qingchao, CHENG Hui, et al. The state-of-the-art, connotation and developing trends of the products assembly technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(11): 2-28.
- [5] 王茹. 民用飞机贴合面密封方法研究[J]. 装备制造技术, 2018(5): 216-219.
- [6] WANG Ru. Civil aircraft fay surface seal method research[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(5): 216-219.
- [7] 蔡国栋. 基于数字化工厂的轿车后地板自动焊装线设计与模拟[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [8] CAI Guodong. Design and simulation of

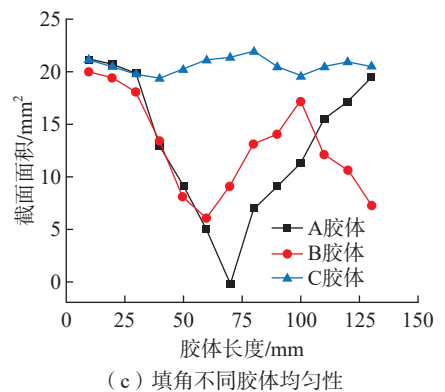
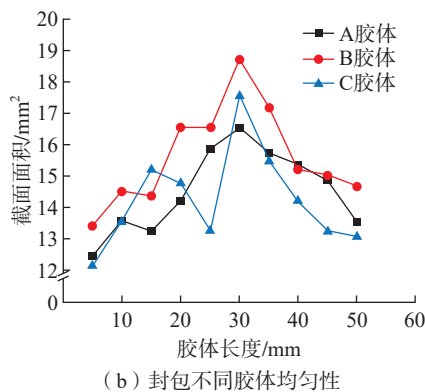
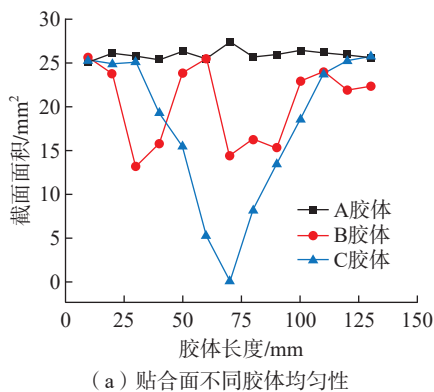


图 16 胶体形貌均匀性

Fig.16 Uniformity of colloid morphology

automatic welding line of car rear floor based on digital factory[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.

[5] 张羽. 飞机壁板涂胶机机械系统设计[D]. 西安: 西京学院, 2015.

ZHANG Yu. The mechanical system design of aircraft panel gluing machine[D]. Xi'an: Xijing University, 2015.

[6] 包乐, 倪鑫, 张帆, 等. 复合耐热结构件自动涂胶工艺研究[J]. 航天制造技术, 2023(1): 16-18.

BAO Le, NI Xin, ZHANG Fan, et al. Study on automatic gluing technology of compound heat proof structural parts[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2023(1): 16-18.

[7] 章易镰, 范云飞. 基于伺服驱动的钉孔稳定涂胶方法研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(14): 76-81.

ZHANG Yilian, FAN Yunfei. Research on servo sealant applying method for fastener hole[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(14): 76-81.

[8] 赵连红, 刘成臣, 何卫平, 等. 密封组

合形式对结构密封性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 33-37.

ZHAO Lianhong, LIU Chengchen, HE Weiping, et al. Effects of seal combination on structural sealing performance[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 33-37.

[9] LI R, LU Y, ZHOU M, et al. Automatic coating technology of high viscosity epoxy resin adhesive[J]. Material Sciences, 2019, 9(7): 699-707.

[10] SHEN P, LI H X. Novel consistency control strategy for jet dispensing[J]. Journal of Central South University, 2018, 25(6): 1418-1436.

[11] 李超, 冯万喜. 腐蚀防护与控制技术在某型水陆两栖飞机研制中的应用研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(20): 70-79.

LI Chao, FENG Wanxi. Application research of corrosion prevention and control technology in development of amphibious aircraft[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(20): 70-79.

[12] 方尚庆. 民用飞机整体油箱密封设计[J]. 科技视界, 2018(16): 243-244.

FANG Shangqing. Sealing design of integral fuel tank of civil aircraft[J]. Science & Technology Vision, 2018(16): 243-244.

[13] 陈永良. 传动装置密封环润滑状态判别方法[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.

CHEN Yongliang. Method for discriminating the lubrication status of the sealing ring of the transmission device[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015.

[14] 韩洁. 飞机装配自动涂胶技术[J]. 科学与信息化, 2018(16): 2.

HAN Jie. Automatic glue coating technology for aircraft assembly[J]. Science and Information Technology, 2018(16): 2.

[15] 焦朝. 用于微电子封装的电子胶粘剂及其涂覆工艺[J]. 数码设计, 2019(9): 288.

JIAO Chao. Electronic adhesives and their coating processes for microelectronic packaging[J]. Digital Inside, 2019(9): 288.

通信作者: 冯晓悦, 硕士研究生, 研究方向为自动涂胶工艺、三维数字化检测。

## Automatic Gluing Process With Multi-Parameter Coupling Based on Colloid Morphology

JI Li<sup>1,2</sup>, FENG Xiaoyue<sup>1,2</sup>, BAI Jie<sup>1,2</sup>, HAN Wei<sup>3</sup>, YIN Huaijiang<sup>4</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China;

2. Key Laboratory of Rapid Development & Manufacturing Technology for Aircraft, Ministry of Education, Shenyang 110136, China;

3. AVIC XAC Commercial Aircraft Co., Ltd., Xi'an 710089, China;

4. Guangdong Aeroht Technology Co., Ltd., Guangzhou 511400, China)

**[ABSTRACT]** Due to the inefficiency, high labor intensity, poor sealing quality, and challenges in controlling the amount of glue applied of traditional manual gluing methods, this study proposes a solution of the automatic gluing process using multi-parameter coupling based on colloid morphology to enhance the stable control of glue amount and colloid morphology of automated gluing processes. First, an orthogonal experimental design is conducted to analyze the impact of multiple parameters on the automated gluing process, with Pearson correlation coefficient analysis used to identify the key influencing parameters. Next, gluing experiments are performed on three different gluing objects to explore the optimal gluing parameters. Ultimately, the three-dimensional detection technology is employed to acquire the point cloud data of the colloid. By utilizing point cloud data processing algorithms, more accurate positional information is obtained. The cross-sectional area of the colloid is calculated using the trapezoidal numerical integration method to determine the colloid's morphological type. Through comprehensive analysis of the multi-parameter coupled automated gluing experiments, the optimal gluing parameters are identified: a speed of 5 mm/s, a pressure of 103 kPa, a distance of 3 mm, and an angle of 90°, the glue morphology is optimal, effectively preventing problems such as glue leakage, breaks, and excessively narrow or wide glue bodies. This approach improves the efficiency and precision of the gluing process.

**Keywords:** Orthogonal experimental design; Automatic gluing; Gluing process parameter; Three-dimensional detection; Trapezoidal numerical integration method

(责编 青燕)