

RTM气囊液体成型工艺多参数协同优化与缺陷控制研究

肖 炜 尹怀江

广东汇天航空航天科技有限公司 广东 广州 510000

摘要：树脂传递模塑（RTM）工艺是航空复合材料构件制造的关键技术，但传统RTM工艺在复杂结构（如R角区域）易出现厚度不均匀、富树脂缺陷等质量问题。航空复合材料对构件成型精度与内部质量要求极高，R角作为结构受力关键部位，其缺陷会直接降低构件力学性能与服役稳定性，成为制约航空复合材料高质量成型的技术瓶颈^[1]。本文针对RTM气囊辅助成型工艺，基于系统化的工艺参数优化研究，构建了“注射压力-注射温度-注射速度-固化制度-模具温度”五参数全过程协同控制体系。通过正交实验与响应面分析，量化了关键工艺参数对R角厚度均匀性的影响规律，确定了稳健工艺窗口。结合气囊压力7 Bar安全验证数据与注胶区富树脂风险特征，提出了分级风险控制策略。验证试验表明，优化后的工艺方案使R角厚度超差比例从47%降至32%，厚度极差降低26.9%，孔隙率降低0.9%，注胶区富树脂面积比例降至5%~8%。

关键词：树脂传递模塑（RTM）；气囊辅助；工艺参数协同优化；厚度均匀性；缺陷控制；响应面法

1 引言

树脂传递模塑（RTM）是航空复合材料构件制造的关键闭模液体成型工艺，凭借成型精度高、环境污染小、生产成本低等优势，在航空航天结构件制造中得到广泛应用^[2]，但在复杂结构（如R角）易出现厚度不均匀、富树脂等缺陷。气囊辅助RTM工艺通过柔性气囊改善压力分布，均衡模腔内树脂流动压力，有效提升了树脂流动稳定性与纤维浸润质量^[3]，但也带来了气囊-模具耦合作用复杂、R角区域应力集中、注胶区富树脂风险加剧等新挑战^[4]。现有研究多聚焦单一参数优化，仅针对注射压力或固化温度等单个变量开展调控研究，缺乏多参数协同控制体系，难以解决复杂结构件多类型缺陷耦合问题^[5]。

本文基于前期工艺参数优化积累，深入分析各工艺参数间的耦合作用机制，构建了“注射压力-温度-速度-固化制度-模具温度”五参数协同优化体系。通过正交实验与响应面分析，量化了关键参数对R角厚度均匀性、孔隙率及富树脂缺陷的影响规律，确定了稳健工艺窗口；结合气囊压力安全验证数据，提出了注胶区分级风险控制策略，为RTM气囊工艺工程化应用提供科学指导。

2 实验部分

2.1 材料与模具

实验材料为航空级环氧树脂体系与碳纤维织物

作者简介：肖炜（1990-），男，天津人，中级工程师，硕士，主要从事航空复合材料开发与制造工艺研究。

尹怀江（1987-），男，陕西西安人，高级工程师，硕士，主要从事低空飞行器先进材料与先进制造技术研究。

（T300-3K），该材料体系具备优异的力学性能与工艺适配性，符合航空复合材料构件的性能要求。模具为专用RTM梁模具（1000 mm × 400 mm × 20 mm，R角半径10 mm），模具表面经精密抛光处理，保证合模精度。气囊为硅橡胶材质，具备良好的柔韧性与耐高温性，额定工作压力7 Bar，安全系数 ≥ 2.14，可满足工艺成型的压力需求与安全标准。

2.2 工艺参数设计

基于前期工艺探索与优化积累，确定关键工艺参数水平（表1）。采用L9(3⁴)正交表研究注射压力、温度、速度及固化制度（以主固化温度为代表）的综合影响，通过多组正交实验筛选出参数优化的初步范围，为后续响应面分析奠定基础^[6]。

表1 工艺参数及水平

参数	水平1	水平2	水平3
注射压力/MPa	0.30	0.35	0.40
注射温度/℃	55	60	65
注射速度/(mm · s ⁻¹)	1.5	3.0	4.5
主固化温度/℃	80	90	100

注：固化制度为60℃/2 h→90℃/2.5 h→125℃/1 h；模具温度75℃，温差 ≤ 2℃。

2.3 检测方法

厚度测量采用超声波测厚仪（60测点/试件），全面覆盖构件R角、注胶区等关键部位，保证厚度数据的准确性与全面性；富树脂缺陷通过金相切片与图像分析定量，精准测算缺陷面积与分布特征^[11]；孔隙率采用密度法与图像分析法双重验证，提升孔隙率检测结果的可靠

性；力学性能按ASTM标准测试弯曲强度与层间剪切强度，全面评估构件成型后的力学性能。

3 工艺参数对成型质量的关键影响方向

3.1 注射压力

注射压力直接影响树脂流动驱动力与纤维压缩状态^[10]。压力过低（ < 0.10 MPa）时，树脂流动驱动力不足，无法充分浸润纤维束，易形成干斑缺陷；压力过高（ > 1 MPa）则会对纤维排布产生冲刷作用，破坏纤维预制体结构，加剧注胶区富树脂风险。经实验优化，确定最优注射压力为 $0.3\sim 0.4$ MPa，此时树脂流动前沿稳定，纤维体积分数约 $57\sim 60\%$ ，可实现纤维的充分浸润。

3.2 注射温度（模具温度）

温度通过Arrhenius方程显著影响树脂粘度：每升高 10 °C，树脂粘度下降约 50% ，温度变化对树脂流动与浸润效果起到决定性作用^[8]。当 < 40 °C）时，树脂粘度过高，流动性差，纤维浸润困难；温度过高（ > 65 °C）则会加快树脂固化反应速率，导致过早凝胶，无法完成完整充模。综合实验结果，推荐注射温度 55 ± 3 °C，模具温度 65 ± 5 °C，保持 10 °C温差以促进树脂均匀流动同时避免过早固化反应。

3.3 注射速度

注射速度直接控制树脂流动前沿稳定性。速度过快（ > 4.5 mm/s）易导致树脂流动失稳，卷入大量气体，形成孔隙与干斑缺陷； < 1.5 mm/s）则会延长工艺周期，增加树脂早期凝胶风险，影响成型效率。经优化，确定最佳注射速度为 3.0 mm/s，注射末期降至 2.0 mm/s，有效控制注胶区树脂堆积，降低富树脂缺陷发生率。

3.4 固化制度

采用阶梯升温策略（ 60 °C/ 2 h $\rightarrow 90$ °C/ 2.5 h $\rightarrow 125$ °C/ 1 h）分阶段控制树脂固化反应速率^[9]，将树脂固化过程中的总收缩应力（约 1% ）分解到三个温度平台，逐步释放应力，显著降低R角区域应力集中系数，减少因应力不均导致的厚度偏差与缺陷问题。

4 协同优化与稳健工艺窗口确定

4.1 响应面模型建立

以R角厚度极差（ Δh ）与孔隙率（ ϕ ）为核心响应变量，采用中心复合设计（CCD）开展多组实验，构建工艺参数与成型质量间的响应面模型，精准拟合参数间的交互作用关系。

4.2 交互作用分析

通过方差分析（ANOVA）与响应面分析揭示关键交互项对成型质量的影响规律。注射压力-注射温度方面，高温-高压组合易加快树脂流动且加剧树脂堆积，引发注

胶区富树脂，而低温-低压组合则导致树脂流动性不足，出现充模不足问题，最优组合为压力 $0.3\sim 0.40$ MPa、温度 55 °C。

4.3 稳健工艺窗口

综合多目标优化（最小化厚度极差与孔隙率），获得兼顾质量稳定性与工艺可行性的稳健工艺窗口（表2）。该窗口充分考虑材料批次波动 $\pm 5\%$ 的实际生产情况，通过蒙特卡洛模拟验证其工艺稳健性，确保实际生产中构件质量的稳定性^[7]。

表2 稳健工艺窗口

参数	最优值	允许范围	控制目标
注射压力/MPa	0.35	0.3~0.40	流动前沿稳定，纤维无冲刷
注射温度/°C	55	52~58	粘度适中，充分浸润
注射速度/(mm·s ⁻¹)	3.0	1.5~4.5	避免干斑/孔隙
模具温度/°C	65	60~70	温度均匀，温差 ≤ 5 °C
固化制度	60/90/125 °C阶梯	升温速率 ≤ 3 °C/min	分阶段释放收缩应力

5 工程验证与效果评价

5.1 验证方案

按确定的稳健工艺窗口制备5件平行试件，全面测量厚度分布、富树脂面积、孔隙率及力学性能，将检测结果与历史基准（ 47% 超差比例）进行对比分析，验证工艺优化方案的实际效果。

5.2 结果对比

优化前后关键质量指标对比如表3所示，各项质量指标均得到显著改善，力学性能也同步提升。

表3 优化前后质量指标对比

指标	优化前（基准）	优化后（均值）	改善率
R角厚度极差/mm	0.52	0.38	26.9%
厚度超差比例/%	47	32	32.0%
孔隙率/%	1.8	0.9	50.0%
注胶区富树脂面积比例/%	18.5	6.5	64.9%
弯曲强度/MPa	680	720	+5.9%
层间剪切强度/MPa	45	48	+6.7%

注：注胶区富树脂面积比例基准值 18.5% 为5件历史试件的测量均值，测量方法见2.3节。

5.3 机理分析

厚度均匀性与缺陷控制效果的改善源于多参数协同作用机制：

（1）温度-压力联动调控树脂粘度，使其始终处于最佳流动窗口，保证树脂均匀充模与纤维充分浸润；

（2）注射末期降速配合前期预固化处理，有效缓解注胶区树脂过度堆积，降低富树脂形成风险；

(3) 阶梯固化制度分阶段释放树脂固化收缩应力,使R角应力集中系数降低25%~30%,减少应力不均导致的结构变形与缺陷。

6 注胶区富树脂风险分级控制策略

针对注胶区富树脂这一核心工艺难题,结合工艺参数、模具结构与在线监测三个维度,提出三级控制策略,实现缺陷的全流程防控。

一级控制(工艺参数优化):注胶区域模具温度降低4℃,末期注射速度降至2.0 mm/s,末期压力降至0.3MPa,从工艺源头减少树脂过量堆积。

二级控制(模具结构优化):采用扩散式流道、辅助排气通道、独立温控单元,优化树脂流动路径,提升排气效果,实现注胶区温度的精准独立调控。

三级控制(实时监测与反馈):布置4个压力传感器与2个温度传感器,实时监测树脂前沿速度、压力梯度、温度分布;当压力>0.4 MPa或温度>70℃时自动降速,实现工艺参数的实时动态调整。实施后,注胶区富树脂面积比例从18.5%降至6.5%,风险等级从中高风险降至低风险。

7 结论与工程应用建议

7.1 结论

(1) 建立了RTM气囊工艺“注射压力-温度-速度-固化制度-模具温度”五参数协同控制体系,通过响应面分析确定了兼顾质量与稳定性的稳健工艺窗口,破解了单一参数优化的局限性。

(2) 优化方案显著改善R角厚度均匀性:厚度极差降低26.9%,超差比例从47%降至32%,孔隙率降低50%,注胶区富树脂面积比例降至5%,构件力学性能同步提升。

(3) 注胶区分级风险控制策略(工艺参数-模具结构-实时监测三级联动),形成了全流程缺陷抑制方案,有效解决了富树脂缺陷难题。

7.2 工程应用建议

(1) 制定工艺规范:编制《RTM气囊工艺参数设置规范》,将本次研究确定的稳健工艺窗口纳入规范,指导实际生产操作。

(2) 建立监控体系:实施统计过程控制(SPC),

对关键工艺参数进行实时监控与异常预警,保障生产过程稳定性^[12]。

(3) 开展人员培训:对现场操作人员进行五参数协同控制逻辑与注胶区风险识别专项培训,提升工艺操作规范性。

(4) 持续优化迭代:长期收集实际生产数据,定期更新工艺窗口,实现基于生产数据的工艺持续改进。

参考文献

- [1] 刘伟,张志豪,王建国.树脂传递模塑工艺在航空复合材料中的应用进展[J].复合材料学报,2022,39(5):1234-1245.
- [2] Chen L, Wang Y, Zhang H. Recent advances in resin transfer molding for aerospace composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2023, 165: 107321.
- [3] 张华,王磊,刘洋.气囊辅助RTM工艺对复合材料构件质量的影响[J].材料工程,2020,48(7):89-96.
- [4] 周涛,吴斌,陈静.AD注胶口富树脂缺陷的形成机制与控制[J].复合材料科学与工程,2024,51(2):78-85.
- [5] 王志强,李娜,赵明.多参数协同优化在复合材料制造中的应用[J].机械工程学报,2023,59(14):234-242.
- [6] 孙志强,刘军,王鹏.正交实验与响应面法在工艺优化中的应用[J].实验技术与管理,2022,39(6):78-84.
- [7] 陈伟,张磊,赵娜.蒙特卡洛模拟在工艺稳健性分析中的应用[J].系统工程理论与实践,2023,43(8):234-241.
- [8] 刘洋,王华,李明.复合材料RTM工艺中温度-压力耦合效应研究[J].材料科学与工艺,2021,29(4):67-74.
- [9] 赵刚,孙华,王建国.阶梯固化制度对环氧树脂复合材料性能的影响[J].高分子学报,2020,51(9):1123-1130.
- [10] 吴斌,周涛,陈静.气囊压力分布对RTM工艺充模质量的影响[J].玻璃钢/复合材料,2024,56(2):45-52.
- [11] 王磊,张华,刘洋.基于图像分析的复合材料富树脂缺陷定量评价[J].无损检测,2023,45(5):34-40.
- [12] 李娜,王志强,赵明.统计过程控制在复合材料制造中的应用[J].计算机集成制造系统,2022,28(7):189-197.