

ICS 25.080.99

CCS G60

T

团体标准

T/CEATEC XXX—2026

航空复合材料自动铺丝工艺质量控制 规范

Quality control specification for automated fiber placement process of
aerospace composite materials

2026-X-XX 发布

2026-X-XX 实施

中国欧洲经济技术合作协会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 总则	3
4.1 质量控制原则	3
4.2 质量管理体系	3
4.3 工艺文件体系	3
5 原材料质量控制	3
5.1 预浸丝束技术要求	3
5.2 入厂检验	3
5.3 贮存管理	4
5.4 使用前质量确认	4
6 工艺环境控制	4
6.1 生产车间分级	4
6.2 温湿度控制	4
6.3 洁净度控制	4
6.4 通风与除尘	5
7 设备与工装质量控制	5
7.1 自动铺丝设备要求	5
7.2 工装与模具	5
8 工艺设计与过程控制	5
8.1 铺层设计	5
8.2 铺丝路径规划	6
8.3 工艺参数设定与优化	6
8.4 铺层顺序与方向	6
8.5 首件验证	7
9 铺放过程质量控制	7
9.1 铺前准备	7
9.2 过程监控	7
9.3 铺层压实	8
10 缺陷控制与处理	8
10.1 缺陷分类	8
10.2 缺陷控制要求	8
10.3 缺陷处理与修复	9

11 质量检验与验收	9
11.1 检验分类	9
11.2 入厂检验	9
11.3 过程检验	9
11.4 最终检验	10
11.5 验收规则	11
11.6 检验记录与报告	12
12 人员资质与文件管理	13
12.1 人员资质	13
12.2 文件管理	13

前言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会提出并归口。

本文件主要起草单位：。

本文件主要起草人：。

本文件为首次编制。

航空复合材料自动铺丝工艺质量控制规范

1 范围

本文件规定了航空复合材料自动铺丝（AFP）工艺的质量控制要求，包括原材料质量控制、工艺环境控制、设备与工装质量控制、工艺设计与过程控制、铺放过程质量控制、缺陷控制与处理、质量检验与验收以及人员资质与文件管理等方面的要求。

本文件适用于连续碳纤维增强热固性和热塑性树脂基预浸料采用自动铺丝技术制造航空复合材料制件的工艺质量控制与管理。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1449 纤维增强塑料弯曲性能试验方法

GB/T 3354 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法

GB/T 3365 碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法

GB/T 19001 质量管理体系 要求

GB/T 25915.1 洁净室及相关受控环境 第 1 部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级

GB/T 28461 碳纤维预浸料

GB/T 30969 聚合物基复合材料短梁剪切强度试验方法

GB/T 32788.1 预浸料性能试验方法 第1部分：凝胶时间的测定

GB/T 32788.2 预浸料性能试验方法 第2部分：树脂流动度的测定

GB/T 32788.3 预浸料性能试验方法 第3部分：挥发物含量的测定

GB/T 32788.5 预浸料性能试验方法 第5部分：树脂含量的测定

GB/T 32788.6 预浸料性能试验方法 第6部分：单位面积质量的测定

GB/T 40396 聚合物基复合材料玻璃化转变温度试验方法 动态力学分析法（DMA）

HB 5342 复合材料航空制件工艺质量控制

HB 7069 环氧树脂/玻璃布预浸料规范

HB 7736.1 复合材料预浸料物理性能试验方法 第1部分：总则

ASTM E2582 复合材料孔隙率超声波检测标准规程（Standard Practice for Infrared Flash Thermography of Composite Panels and Repair Patches Used in Aerospace Applications）

3 术语和定义

HB 7736.1界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

自动铺丝 automatic fiber placement; AFP

将多束预浸纤维丝束在数控系统控制下，通过铺丝头的夹持、导向、剪切、重送和滚压压实等动作，按照预定铺层路径逐层铺放到模具或芯模表面，最终形成复合材料制件的自动化制造工艺。

3.2

铺丝头 placement head

集成了送丝、重送、夹紧、切断、加热、施压等功能单元，用于完成预浸纱铺设动作的核心功能部件。

3.3

丝束 tow

用于铺放的连续纤维增强预浸料窄带，通常宽度为3mm至25mm。

3.4

压实 compaction

铺丝头上的压辊对铺设于模具表面的预浸纱施加压力，使其与模具表面或下层铺层紧密贴合的过程。

3.5

铺放间隙 gap

相邻两条平行铺设的预浸纱边缘之间的设计距离。

3.6

褶皱 wrinkle

由于丝束在铺放过程中受到面外压缩或剪切作用而导致的纤维局部弯曲或折叠变形。

3.7

桥接 bridging

铺丝束在模具曲率急剧变化区域未能与模具表面完全贴合的悬空现象。

3.8

丝束张力 tow tension

在铺放过程中对单根预浸丝束施加的轴向张紧力。

3.9

随炉件 test coupon

与制件同一批预浸料、采用相同的铺层工艺并在同一次固化周期内固化的试验件，用于代表制件工艺质量进行力学或物理性能测试。

3.10

孔隙率 porosity

复合材料内部微孔（空隙）占据总体积的体积百分比，是衡量制件固化质量的重要指标。

4 总则

4.1 质量控制原则

航空复合材料自动铺丝工艺的质量控制应满足HB 5342的要求，并遵循以下原则：

- a) 全过程控制原则：对材料验收、工艺设计与仿真、铺放过程、固化处理及成品检验的全流程实施质量控制；
- b) 预防为主原则：通过工艺参数优化、路径规划和过程监控等手段预防缺陷产生，而非仅依靠最终检验；
- c) 可追溯性原则：建立完整的工艺参数记录、操作记录和检验记录体系，确保每件制品的工艺过程可追溯。

4.2 质量管理体系

从事航空复合材料自动铺丝制件生产的企业应建立符合GB/T 19001要求的质量管理体系，并结合航空复合材料制造的特殊要求，建立覆盖本文件全部要求的工艺质量控制文件体系。

4.3 工艺文件体系

企业应编制并有效执行以下工艺文件：

- a) 自动铺丝工艺规范；
- b) 铺层作业指导书；
- c) 质量检验计划。

5 原材料质量控制

5.1 预浸丝束技术要求

预浸丝束的主要技术指标应满足以下要求：

- a) 纤维类型：碳纤维（如T300、T700、T800、IM7等），性能应符合GB/T 28461的要求；
- b) 树脂体系：环氧树脂、双马来酰亚胺树脂或热塑性树脂，性能应符合HB 7069的要求；
- c) 纤维面密度：偏差不超过标称值的 $\pm 5\%$ ；
- d) 树脂含量：偏差不超过标称值的 $\pm 3\%$ ；
- e) 挥发分含量：不大于1.5%；
- f) 凝胶时间：本文件不作要求，可依据制造商规定的范围要求；
- g) 黏性：铺放温度下（40℃~80℃）应具有良好的黏附性，不粘手、不流淌。

5.2 入厂检验

预浸料入厂后应进行入厂复验，检验项目至少应包括：

- a) 外观检查：逐卷检查，丝束表面应平整、均匀，无断丝、扭结、污染及异物；
- b) 宽度测量：每批次抽检不少于5卷，宽度偏差不超过标称值的 $\pm 0.2\text{ mm}$ ；

- c) 树脂含量测定：按照GB/T 32788.5规定的方法进行测试；
- d) 挥发分含量测定：按照GB/T 32788.3规定的方法进行测试；
- e) 凝胶时间测定：按照GB/T 32788.1规定的方法进行测试；
- f) 黏性测试：按照HB 7736.8规定的方法进行测试；
- g) 单位面积纤维质量（FAW）：按照GB/T 32788.6规定的方法进行测试；
- h) 树脂流动度：按照GB/T 32788.2规定的方法进行测试。

5.3 贮存管理

5.3.1 预浸料贮存

预浸料应按照材料制造商规定的条件进行低温贮存，贮存温度应不高于-18℃。贮存管理应符合以下要求：

- a) 预浸料入库后应在材料外包装上标注入库日期、批号和有效期；
- b) 从冷库取出的预浸料应在密封包装状态下自然回温至室温（通常不少于8小时），方可开启包装使用；
- c) 已开启的预浸料应根据工艺要求限时用完，超出允许操作时间的预浸料应报废处理；
- d) 应建立预浸料台账，按照先进先出原则进行领用管理。

5.3.2 辅助材料贮存

脱模剂、隔离膜、透气毡、真空袋膜、密封胶带等辅助材料应储存在干燥、阴凉、通风的环境中，避免受潮及污染。

5.4 使用前质量确认

预浸料在投入自动铺丝前，应逐卷检查外观质量，确认无局部树脂分布不均、无纤维扭曲、无尘粒夹杂、无预固化等异常现象。如发现异常，应停止使用。

6 工艺环境控制

6.1 生产车间分级

根据铺丝工艺对环境洁净度的要求，生产区域划分为以下等级：

- a) 铺放工作区（特殊工作间）：用于预浸料铺放操作，应符合GB/T 25915.1中ISO 7级或更高级别洁净度要求，即粒径 $\geq 0.5 \mu\text{m}$ 的颗粒浓度不超过352000个/ m^3 ；
- b) 一般工作区：用于模具准备、辅料裁剪和制件转运等操作，应符合GB/T 25915.1中ISO 8级洁净度要求。

6.2 温湿度控制

铺放工作区应保持恒温恒湿环境，具体要求如下：

- a) 环境温度：22℃ $\pm$ 3℃；
- b) 相对湿度：30%~65%；
- c) 应配置连续记录式的温湿度监测设备，每班至少记录一次温湿度数据。

6.3 洁净度控制

铺放工作区应具备以下洁净控制措施：

- a) 铺放操作人员应穿戴洁净服、发网、手套和鞋套；
- b) 工作区入口应设置风淋和粘尘垫；
- c) 禁止在铺放工作区进行产生粉尘的打磨或切割作业；

d) 应定期对工作区洁净度进行检测并记录。

6.4 通风与除尘

铺放工作区应配备有效的通风除尘系统,自动铺丝设备应配备局部排风或真空除尘装置,用于清除铺丝过程中产生的碳纤维粉尘。

7 设备与工装质量控制

7.1 自动铺丝设备要求

7.1.1 设备基本性能

自动铺丝设备应具有不少于6个联动轴的运动能力,各轴的定位精度和重复定位精度应符合设备技术文件的规定,铺丝设备应通过定期精度检验。

7.1.2 铺丝头性能要求

铺丝头应具备以下功能模块,各功能均应为可编程控制:

- a) 丝束夹紧功能:在剪切操作前能夹持丝束防止回缩;
- b) 丝束剪切功能:可按需对任意单根丝束进行精确切断;
- c) 重送功能:对已切断丝束可靠地重新导入铺放路径;
- d) 滚压压实功能:通过可编程压紧压力对铺放丝束进行压实,压紧力应不低于1000 N且压力可调节;

e) 加热功能:用于控制预浸料粘度,可采用红外加热或激光加热方式,加热温度应能在10℃~80℃范围内调节。

7.1.3 张力控制系统

铺丝设备应配备各丝束独立可控的张力控制系统,张力控制范围宜为0 N~10 N,张力控制精度应不低于设定值的±10%,系统响应时间应不大于100 ms。

7.1.4 数控系统

数控系统应符合设备制造商技术规范,应支持六轴及以上联动控制,具备实时工艺参数监测与记录功能,支持与工艺编程软件的可靠数据通信。

7.2 工装与模具

7.2.1 模具要求

铺丝模具应能满足铺丝工艺要求,模具表面应光滑、无缺陷,表面粗糙度Ra应不大于1.6 μm。模具材料应具有足够的热稳定性,在固化温度下不发生变形。

7.2.2 模具定位精度

模具在铺丝机工作台上的安装定位应精确可重复,模具坐标系与铺丝机坐标系的对应关系应经过校准确认。

7.3 设备维护与校准

企业应制定自动铺丝设备的维护保养计划,包括但不限于以下内容:

- a) 每日点检:铺丝头各功能动作检查、丝束通道清洁、张力校准;
- b) 定期校准:每季度进行一次运动轴精度校准,每年进行一次全面的设备精度鉴定;
- c) 故障维修记录:每次设备故障和维修情况应详细记录并存档。

8 工艺设计与过程控制

8.1 铺层设计

8.1.1 铺层文件

铺层设计文件应包括以下内容：

- a) 铺层顺序表，规定各铺层的序号、材料牌号、铺层角度、丝束宽度及丝束数量；
- b) 各铺层的铺覆区域边界定义；
- c) 铺层搭接与对接要求。

8.1.2 铺层角度

铺层角度的公差应为 $\pm 5^\circ$ ，对于关键区域宜控制为 $\pm 2^\circ$ 。铺层角度应在铺层设计图中明确标注，角度以模具坐标系为基准。

8.2 铺丝路径规划

8.2.1 路径规划软件

铺丝路径的生成应使用经过验证的AFP专用CAM（计算机辅助制造）软件。该软件应具备以下功能：

- a) 可根据复合材料构件CAD数模生成铺丝轨迹；
- b) 应包含切、送纱等特殊操作指令的自动生成；
- c) 应与数控机床实现可靠的数据通信；
- d) 应具有后置处理、避碰干涉检验和离线加工仿真功能。

8.2.2 路径质量要求

铺丝路径规划的质量应符合以下要求：

- a) 丝束间隙：在低曲率区域，相邻丝束间隙应控制在0 mm~1.0 mm范围内；高曲率区域可放宽至0 mm~2.5 mm；
- b) 丝束重叠：应避免丝束重叠，特殊设计要求除外；
- c) 路径覆盖率：铺放带宽度组合后应覆盖设计铺层区域，不得出现未覆盖区域。

8.3 工艺参数设定与优化

8.3.1 关键工艺参数

自动铺丝的关键工艺参数应包括但不限于：

- a) 铺放速度：通常为0.3 m/min~60 m/min，具体速度取决于预浸料类型、制件几何复杂度和铺丝头加热能力；
- b) 铺放压力：建议范围为200 N~1 300 N，应根据预浸料类型和制件曲率设定；
- c) 铺放温度：热固性预浸料的推荐铺放温度为25 ℃~45 ℃，热塑性预浸料的加热温度可达280 ℃以上；
- d) 丝束张力：建议控制在2 N~8 N范围内，最佳值需根据预浸料特性和铺放路径确定。

8.3.2 参数验证

首次投入生产的制件应进行工艺参数验证试验。通过制备工艺试验件并对其开展力学性能测试和缺陷检测，最佳化工艺参数组合。参数验证报告应经评审批准后作为正式生产依据。

8.3.3 参数交互作用管理

在参数设定时，应充分考虑铺放速度、铺放压力、铺放温度及丝束张力四类参数之间的交互耦合作用。推荐采用响应面法、正交试验设计等方法进行多参数协同优化，以获得兼顾铺层质量与生产效率的最佳参数组合。

8.4 铺层顺序与方向

8.4.1 铺层顺序控制

铺丝操作应严格按照铺层顺序表执行。每层铺放完成后应进行自检确认，确认无误后方可进行下一层铺放。

8.4.2 纤维方向控制

铺放纤维方向应满足铺层设计的要求。典型铺层方向为 0° 、 $\pm 45^{\circ}$ 和 90° ，具体组合按制件受力分析确定。每层铺放完成后应检查纤维方向偏差，偏差超过 $\pm 2^{\circ}$ 时应及时调整。

8.5 首件验证

新型号制件的首个铺丝制件应进行首件验证，首件验证合格后，方可转入批量生产。验证内容包括：

- a) 铺放路径的完整性和正确性；
- b) 铺放丝束间隙和重叠的符合性；
- c) 纤维方向精度；
- d) 随炉件的力学性能。

9 铺放过程质量控制

9.1 铺前准备

9.1.1 模具准备

模具应清洁干燥，无残留脱模剂积聚。涂敷脱模剂应按工艺规范执行，确保涂层均匀完整。模具表面温度应与工艺参数规定值一致。

9.1.2 预浸料准备

按工艺文件要求领取预浸料丝束。应确认预浸料的牌号、批号、使用期限和回温记录符合要求。将丝束安装至铺丝头纱架时，应确保各丝束通道通畅。

9.1.3 设备启动自检

设备启动后应执行以下自检项目：

- a) 各轴回零并确认原点位置正常；
- b) 铺丝头各执行机构（夹紧、剪切、重送）动作正常；
- c) 加热系统达到预设温度；
- d) 各丝束张力传感器读数正常；
- e) 真空除尘系统运行正常。

9.2 过程监控

9.2.1 在线缺陷检测

铺丝设备宜配备在线缺陷检测系统。可采用但不限于以下检测技术：

- a) 基于线激光轮廓仪的铺层表面2.5D图像检测，用于识别间隙、搭接、翻折和夹杂等表面缺陷；
- b) 基于红外热成像的缺陷检测，用于检测层间结合不良和局部温度异常；
- c) 基于机器视觉与深度学习的缺陷自动识别系统，其在线检测的误检率应不高于10%，漏检率应不高于5%。

9.2.2 工艺参数实时监控

铺丝设备的数控系统应具备工艺参数的实时采集和显示功能，监控参数至少应包括：

- a) 各轴的实时位置和进给速度；
- b) 各丝束的实时张力值；
- c) 铺丝头加热区域的实际温度；

d) 滚压压力实际值。

9.2.3 异常报警与处置

当工艺参数超出设定范围或在线检测系统识别到超差缺陷时,数控系统应发出声光报警,并根据严重程度触发暂停或停机操作。操作人员应根据异常处置规程进行原因排查和纠正。

9.3 铺层压实

9.3.1 在线压实

铺丝头在铺放每一丝束的同时应实施滚压压实。压辊与模具型面的接触应连续、均匀,压紧压力应根据铺放速度和预浸料粘温特性进行调节。

9.3.2 中间压实

对于层数较多的制件,宜每铺放4层~8层实施一次中间压实,以排除层间滞留空气并减少固化后的孔隙率。

9.4 铺丝操作记录

铺丝过程应自动生成电子工艺记录,至少包括以下内容:

- a) 制件编号、材料批号和铺层序号;
- b) 各铺层的关键工艺参数(速度、压力、温度等)设定值与实际值;
- c) 在线检测记录的缺陷类型、位置和处理措施;
- d) 设备报警和停机事件记录;
- e) 操作人员信息。

10 缺陷控制与处理

10.1 缺陷分类

自动铺丝过程中可能出现的铺层缺陷分为以下类别:

- a) 间隙: 相邻丝束之间存在未被覆盖的区域;
- b) 重叠: 相邻丝束之间的材料交叠区域;
- c) 缺丝: 某根丝束未能按路径铺放而导致的缺失;
- d) 扭转: 丝束沿其轴向发生扭转;
- e) 褶皱: 纤维局部屈曲或折叠;
- f) 桥接: 丝束在曲率变化处未能贴模的悬空现象;
- g) 异物夹杂: 外来物嵌入铺层间;
- h) 纤维波纹: 纤维在铺层平面内的波浪形变。

10.2 缺陷控制要求

10.2.1 间隙控制

铺放丝束间隙的控制要求如下:

- a) 单条间隙宽度,在结构件表面区域不应大于2.0 mm,在非结构区域不应大于2.5 mm;
- b) 在任意305 mm带宽内,最大累计间隙宽度不应超过6.35 mm(低曲率区域)。

10.2.2 重叠控制

铺放丝束之间不应出现可见重叠,特殊设计允许的重叠区域应经设计部门批准并在工艺文件中明确标注。

10.2.3 其他缺陷控制

各类缺陷的控制要求如下:

- a) 缺丝：单层缺丝的面积占比不应超过该层总面积的0.5%，且相邻两层不应在同一位置出现缺丝；
- b) 扭转：不应出现丝束扭转缺陷；
- c) 褶皱：褶皱深度不应超过单层厚度的50%，且不应连续出现在相邻三层及以上；
- d) 桥接：在曲率半径大于1.2 m的区域不应出现桥接缺陷。

10.3 缺陷处理与修复

10.3.1 在线修复

铺丝过程中发现的允许修复的缺陷（如局部间隙超标），应在该层铺放完成后、下一层铺放开始前实施在线修复。修复操作应按照经批准的修复作业指导书执行。

10.3.2 报废判定

以下情况应判定制件报废：

- a) 出现贯穿多层（三层及以上）的桥接或褶皱；
- b) 出现异物夹杂后无法清除或清除后对制件结构完整性造成影响；
- c) 多次修复后仍不符合质量要求的铺层。

10.3.3 修复记录

所有缺陷修复操作应详细记录，包括缺陷类型、位置、修复方法和修复结果。修复记录应作为制件质量档案的一部分归档保存。

11 质量检验与验收

11.1 检验分类

航空复合材料自动铺丝制件的质量检验应覆盖从原材料验收到成品交付的全过程，分为入厂检验、过程检验和最终检验三个阶段。

11.2 入厂检验

原材料入厂检验按本文件第5章的要求执行。未经入厂检验或检验不合格的原材料，不得投入生产使用。

11.3 过程检验

11.3.1 铺前检查

铺前检查应在每件制件铺放操作开始前完成，检查项目至少包括：

- a) 模具表面状态：模具工作面应清洁、干燥，脱模剂涂层均匀完整，无残留杂物或损伤；
- b) 预浸料状态：确认预浸料牌号、批号、回温记录和使用期限符合工艺文件要求，丝束外观无异常；
- c) 设备状态：铺丝头各功能动作正常，各丝束张力传感器零点校准完成，加热系统达到设定温度。

以上各项检查结果均应记录并签字确认，任何一项不合格不得开始铺放操作。

11.3.2 铺层过程检验

11.3.2.1 在线实时检验

铺丝设备宜配置在线检测系统，在铺放过程中对每根丝束的铺放质量实施实时检测。在线检测系统的功能要求应符合9.2.1的规定。检测数据应实时显示并自动记录。

11.3.2.2 铺层外观循环检验

每铺放完1层~2层后,操作人员应对铺层表面进行外观检查,检验内容包括:

- a) 各丝束位置是否正确,有无缺丝、跳丝或丝束偏离预定路径的现象;
- b) 相邻丝束之间是否存在超差间隙或重叠,测量方法按11.3.2.3执行;
- c) 铺层表面有无褶皱、桥接、异物夹杂或其他可见缺陷;
- d) 铺层边缘与模具边界的对齐情况。

外观检查结果应记录于铺层检验记录表中。发现缺陷时,应按第10章的规定进行处理。

11.3.2.3 铺放间隙测量

铺放间隙的测量按以下要求进行:

- a) 测量工具:采用经过校准的光学测量显微镜或铺丝设备自带的投影测量系统,测量分辨率不低于0.1 mm;
- b) 抽检频次:每层至少选取5个代表性测量区域,每个区域沿丝束垂直方向测量不少于3条相邻间隙;
- c) 判定依据:测量结果应满足本文件10.2.1的规定。

11.3.2.4 铺放角度检验

每层铺放完成后,采用纤维角度测量仪或铺丝设备数控系统反馈数据,检查纤维方向与设计角度的偏差,偏差值不应大于 $\pm 2^\circ$ (关键区域)或 $\pm 5^\circ$ (非关键区域)。

11.3.2.5 中间压实后的检验

实施中间压实后,应采用目视结合手感检查铺层表面,确认压实后无新增褶皱、气泡或局部脱粘。必要时可采用超声波测厚仪对压实区域进行厚度一致性抽测。

11.3.3 铺放完成后的检验

全部铺层完成后、固化处理前,应对制件进行如下检验:

11.3.3.1 铺层总厚度测量

使用超声波测厚仪或专用千分尺,在制件上不少于10个均布检测点处测量铺层总厚度。测量结果与理论厚度的偏差不应超过 $\pm 5\%$ 。

11.3.3.2 铺层完整性检查

逐层对照铺层顺序表,确认全部铺层均已按设计要求铺放,无遗漏层、多余层或铺层顺序错误。

11.3.3.3 随炉件确认

确认随炉件已按设计要求铺放完成,其铺层顺序、材料牌号和铺层数量与制件保持一致。

11.4 最终检验

11.4.1 无损检测

11.4.1.1 超声波检测

制件固化后应进行超声波检测。检测方法按ASTM E2582或等效标准的规定执行,具体要求如下:

- a) 检测范围:应对制件的全部铺层覆盖区域实施扫查,特殊不可达区域除外;
- b) 检测方法:优先采用超声C扫描成像法,对于厚度较大的制件可采用超声A扫描辅助;
- c) 孔隙率要求:关键结构件的孔隙率应不大于1.0%,一般结构件的孔隙率应不大于1.5%;
- d) 分层判定:凡检测到超过12.5 mm (或按设计图样规定的临界尺寸)的分层缺陷,应作不合格判定。

11.4.1.2 X射线CT检测

对有以下情况之一的制件,应进行X射线计算机断层扫描(CT)检测:

- a) 制件几何形状复杂,超声波检测无法有效覆盖全部区域;
- b) 设计技术条件明确要求进行CT检测;

c) 超声波检测中发现疑似内部夹杂或间隙缺陷, 需进一步确认。

CT检测的体素分辨率不应低于0.5 mm, 检测结果应生成三维可视化报告。

11.4.2 随炉件性能检验

11.4.2.1 随炉件管理

每批次(同一材料批号、同一工艺参数、同一固化周期)制件应至少制备一个随炉件。随炉件应在制件铺放的同时、采用同一设备同一工艺参数铺放, 并与制件同炉固化。

11.4.2.2 测试项目

随炉件的力学和物理性能测试应至少包括以下项目:

- a) 玻璃化转变温度, 按GB/T 40396或等效方法测定;
- b) 短梁剪切强度, 按GB/T 30969或等效方法测定;
- c) 纤维体积含量, 按GB/T 3365或等效方法测定;
- d) 孔隙率, 按GB/T 3365或等效方法测定。

11.4.2.3 判定规则

随炉件各项测试结果均应满足制件设计技术规范的要求。出现不合格时, 应扩大抽样至同一批次中的另一随炉件或从制件余料区域取样复测。复测仍不合格时, 应对该批次制件进行评审处理。

11.4.3 几何尺寸检验

11.4.3.1 检验方法与工具

固化后制件的几何尺寸检验采用以下方法:

- a) 关键特征尺寸: 采用三坐标测量机(CMM)或激光跟踪仪测量, 测量不确定度应不大于设计公差的1/3;
- b) 一般特征尺寸: 可采用专用量规、卡尺或高度规等常规量具测量。

11.4.3.2 检验项目与公差

几何尺寸检验项目至少应包括外形轮廓尺寸、安装定位孔位置度、型面轮廓度和壁厚分布, 各项公差值应符合设计文件的规定。

11.4.4 目视检验

11.4.4.1 检验条件

目视检验应在光照度不低于500 lx的条件下进行。检验人员与制件表面的距离宜为300 mm~600 mm, 视线与制件表面的夹角不应小于30°。

11.4.4.2 检验内容

目视检验内容包括:

- a) 表面质量: 记录表面划痕、凹坑、白斑、树脂富集或贫胶区域、纤维裸露等表面缺陷的位置、尺寸和形态;
- b) 边缘状态: 检查制件边缘有无分层、崩边或毛刺;
- c) 颜色均匀性: 目视评估固化制件表面的颜色是否均匀一致, 局部变色或异常区域应记录。

11.4.5 力学性能验证检验(必要时)

对以下情况之一, 应从制件的工艺余料或试块区域取样, 进行力学性能验证:

- a) 新材料的首次生产批次;
- b) 工艺参数发生重大变更后;
- c) 设计或用户有明确要求。

验证检验的至少应包括拉伸强度(按照GB/T 3354的规定方法进行试验)和弯曲强度(按照GB/T 1449的规定方法进行试验)。

11.5 验收规则

11.5.1 逐件验收

每件制件均应独立进行验收，不得以抽样结果代表同批次其他制件。

11.5.2 合格判定

同时满足以下条件的制件，判定为合格：

- a) 全部过程检验项目记录完整、结果合格；
- b) 所有无损检测项目合格；
- c) 随炉件各项性能测试结果合格；
- d) 几何尺寸检验结果在设计公差范围内；
- e) 目视检验未发现不可接受的表面缺陷。

11.5.3 让步接收

对检验项目中存在轻微超差但不影响制件结构完整性和使用功能的非关键项目，经设计单位和使用方共同评审同意后，可作让步接收处理。让步接收应满足以下要求：

- a) 出具正式的让步接收评审报告，明确让步的项目、超差值、评审结论和使用限制；
- b) 让步接收的制件应在标识中标注让步编号和让步有效期；
- c) 同一制件的让步接收项不应超过三项。

11.5.4 返修与报废

11.5.4.1 返修

判定不合格但具备返修可行性的制件，应按经批准的返修工艺规范执行返修。返修后制件应重新进行全部相关检验项目的检验。

11.5.4.2 报废

有下列情况之一的制件，应作报废处理：

- a) 存在贯穿多层（三层及以上）的结构性缺陷；
- b) 存在不可清除的异物夹杂；
- c) 返修后仍不合格；
- d) 经评审认定不具备修复价值或修复费用超过制件价值的50%。

报废制件应有明确的报废标识和隔离处置记录。

11.6 检验记录与报告

11.6.1 过程检验记录

过程检验记录应包括以下内容，由操作人和检验人共同签字确认：

- a) 铺前检查记录；
- b) 每层铺放后的外观检验和间隙测量记录；
- c) 铺层厚度测量记录；
- d) 中间压实的操作与检查记录；
- e) 缺陷发现、处理与修复记录。

11.6.2 最终检验报告

每件制件应出具最终检验报告，报告至少包括：

- a) 制件基本信息：名称、图号/件号、批次号、制件序列号；
- b) 检验项目清单及各项检验结果；
- c) 无损检测报告及图像数据；
- d) 随炉件性能测试报告；
- e) 几何尺寸检验的实测数据；
- f) 缺陷处理记录（如有）；
- g) 最终检验结论（合格/让步接收/报废）；

h) 检验人员、审核人员的签名及检验日期。

11.6.3 检验记录的保存

全部检验记录和报告应归档保存，保存期限不应少于制件服役寿命结束后10年。

12 人员资质与文件管理

12.1 人员资质

12.1.1 操作人员

自动铺丝设备的操作人员应经过专门的理论培训和实际操作培训，并取得内部上岗资质后方可独立操作设备。培训内容包括：

- a) AFP设备的操作原理和安全规程；
- b) 铺丝头的功能操作与日常维护；
- c) 预浸料的识别、安装和使用规范；
- d) 铺放过程中常见缺陷的识别与处理；
- e) 在线检测系统的操作与报警响应。

12.1.2 工艺人员

AFP工艺工程师应具备复合材料专业或机械工程相关专业本科及以上学历，并具有不少于2年的AFP工艺调试或工艺设计实践经验。工艺人员负责铺丝路径规划、工艺参数制定及工艺文件编制。

12.1.3 检验人员

从事AFP制件质量检验和无损检测的人员应具备相应资质。无损检测人员应持有国家认可的超声检测（UT）II级及以上资格证书。

12.2 文件管理

12.2.1 工艺文件管理

企业应建立工艺文件管理制度，确保工艺文件的编制、审批、发放、变更和废止均处于受控状态。工艺文件的版本号、发布日期和执行日期应明确标注。

12.2.2 质量记录管理

以下质量记录应至少保存至制件服役寿命结束后10年：

- a) 铺丝过程的电子工艺记录；
- b) 工艺参数设定与调整记录；
- c) 过程检验与最终检验报告；
- d) 缺陷处理与修复记录；
- e) 无损检测报告与图像数据；
- f) 随炉件力学性能测试报告；
- g) 设备校准与维护记录。

12.2.3 变更控制

对工艺参数、铺层设计或设备的重大变更，应执行工程变更控制程序。变更应经过技术评审和验证确认，更新相关工艺文件，并对相关人员进行变更培训后方可实施。