ICS 49.045
CCS V 22

T/CIET

团 体 标 准

T/CIET 2450—2026

航天异形筒体加工工艺优化设计规范

Aerospace special-shaped cylinder processing technology optimization design specification

2026－05－14 发布 2026－05－14 实施

中国国际经济技术合作促进会 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　总体要求 1
4.1　基本原则 1
4.2　数字化基础要求 2
4.3　质量控制通用要求 2
5　工艺优化 3
5.1　数字化工艺规划优化 3
5.2　加工实施环节优化 4
5.3　变形控制与检测优化 5
6　关键工艺技术要求 6
6.1　旋压成工艺 6
6.2　液压成型工艺 6
6.3　数字化精确成型工艺 7
6.4　增减材复合制造 7
6.5　复合材料成型工艺 7
6.6　加工变形控制要求 8
7　成品性能要求 8
7.1　几何与尺寸性能 9
7.2　力学性能要求 9
7.3　环境适应性性能 9
8　工艺验证与改进 9
8.1　工艺过程检验 9
8.2　成品验收 9
8.3　持续改进 10
9　工艺文件与记录管理 10
9.1　工艺文件要求 10
9.2　记录保存 10
9.3　溯源管理 10
10　安全与环保要求 10
10.1　操作安全要求 10
10.2　环保控制 10

10.3　职业防护 10

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。

本文件由成都韵弘科技有限公司提出。

本文件由中国国际经济技术合作促进会归口。

本文件起草单位：成都韵弘科技有限公司、合肥工业大学、途邦认证有限公司、极客智行科技（成都）有限公司、太原通领科技有限公司。

本文件主要起草人：彭泽友、严思梁、周明爱、曹隆飞、郭建利。

本文件首次发布。

航天异形筒体加工工艺优化设计规范

1 范围

本文件规定了航天异形筒体（以下简称“筒体”）加工工艺优化设计的总体要求、工艺优化、关键工艺技术要求、成品性能要求、工艺验证与改进、工艺文件与记录管理、安全与环保要求。

本文件适用于航天异形筒体加工工艺的优化设计。

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 1184 形状和位置公差 未注公差值

GB 8978 污水综合排放标准

GB 16297 大气污染物综合排放标准

GB/T 43127 航天产品结构部件与组件通用要求

GB/T 46132 空间环境 航天材料空间辐射效应试验方法

HJ 2025 危险废物收集、贮存、运输技术规范

QJ 20517.1 航天器三维设计数字样机 第1部分：通用要求

QJ 20517.2 航天器三维设计数字样机 第2部分：模型体系

GJB 3947 军用电子测试设备通用规范

ISO 14001 环境管理体系 要求及使用指南(Environmental management systems. Requirements with guidance for use second edition)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

航天异形筒体 aerospace special-shaped cylinder

航天装备中具有非回转对称截面、复杂母线曲面或变直径特征，可采用传统组装或一体成型方式制造，承担结构支撑、介质存储等功能的筒状构件。

3.2

工艺优化设计 technology optimization design

通过数字化仿真、装备适配、参数迭代等手段，对加工全流程进行系统性改进，实现精度、效率与成本协同优化的设计活动。

4 总体要求

4.1 基本原则

航天异形筒体加工工艺优化设计应遵循以下基本原则：

——轻量化与功能一体化原则：工艺设计应有利于实现结构轻量化，并促进机械承载、热管理、防辐射等多功能集成；

——变形协调控制原则：通过工艺优化、参数调控与变形补偿相结合的系统方法，控制加工全过程累积变形；
——质量稳定性原则：工艺设计应确保产品批量生产条件下性能一致性，降低对操作人员经验的依赖性；
——成本效益原则：在保证产品性能前提下，通过工艺创新降低材料消耗与生产周期，提升经济效益；
——材料适配原则：根据筒体材料特性匹配刀具类型、切削参数与冷却方式。

4.2 数字化基础要求

工艺优化设计应建立数字化基础支撑体系：
——全流程数字化模型：构建涵盖设计、工艺规划、数控编程、加工仿真与检测的数字化链条；
——工艺知识库：积累典型材料、典型结构的工艺参数与优化案例，支持工艺智能决策；
——变形预测与补偿系统：基于有限元分析构建加工变形预测模型，指导工艺参数优化与路径规划；
——三维数字化扫描测量：采用三维扫描技术对产品进行快速检测，实现闭环制造。

4.3 质量控制通用要求

4.3.1 过程监测点设置

4.3.1.1 应在材料准备、成形、焊接、机加、表面处理等核心工序设立固定质量控制点，同步在工序衔接处增设动态监测节点。
4.3.1.2 各控制点应明确监测内容与技术手段：
a) 材料准备阶段宜采用光谱分析、X 射线探伤等技术核查成分与内部缺陷；
b) 成形工序宜集成应变片、激光位移传感器实时采集成形参数；
c) 焊接工序宜配备在线视觉监测与焊缝质量实时分析系统；
d) 机加工序宜融合激光测头与三坐标测量机实现尺寸动态监测。
4.3.1.3 所有监测点数据应实时接入数字孪生工艺模型，支持工序质量的可追溯与实时干预。

4.3.2 变形监控

4.3.2.1 针对薄壁异形件，宜采用全周期变形监控方案：加工前通过有限元仿真预判变形趋势，加工中部署分布式光纤传感器、激光跟踪仪等采集实时变形数据，加工后宜利用三维光学扫描完成全尺寸变形复核。
4.3.2.2 应建立变形数据库，整合材料特性、加工参数、工装状态与变形数据，可通过机器学习算法构建变形预测模型，实现变形趋势预警与加工参数的提前补偿。
4.3.2.3 变形数据应按产品唯一标识关联存档，涵盖加工全过程的变形量、补偿措施、最终偏差等信息，满足全生命周期质量追溯要求。

4.3.3 工艺稳定性评估

4.3.3.1 批量生产阶段，宜采用 AI 赋能的统计过程控制方法，通过实时采集切削速度、焊接电流、成形压力等关键工艺参数与质量指标数据，可利用机器学习算法识别微小波动趋势，提前预警系统性偏差风险。
4.3.3.2 宜结合数字孪生工艺模型开展稳定性验证，对比虚拟仿真数据与实际生产数据的一致性，迭代优化工艺参数边界。
4.3.3.3 应定期开展跨批次一致性评估，通过大数据分析各批次产品的尺寸精度、力学性能、缺陷分布等差异，形成工艺稳定性报告；当过程能力指数（Cpk）不满足要求时，启动工艺参数重构或装备精度校准流程。

4.3.4 工艺定型监测

4.3.4.1 小批量试产合格后、正式批量生产前，应开展工艺定型专项监测，监测周期覆盖至少 1 个完整生产批次。

4.3.4.2　应聚焦切削参数、冷却介质状态、夹具支撑力、加工环境温湿度等核心工艺参数，宜通过数字孪生加工模型实时采集数据，分析参数波动趋势，确保波动范围符合设计允许区间。
4.3.4.3　应按批量生产抽样规则抽取样品，开展全尺寸检测与性能测试，重点验证尺寸精度、表面质量、内部缺陷等指标的一致性，无系统性偏差。
4.3.4.4　应监测加工设备动态精度稳定性、刀具使用寿命一致性、夹具重复定位精度，评估装备与工装在批量生产场景下的适配可靠性，及时排查异常磨损或精度衰减问题。
4.3.4.5　宜形成《工艺定型监测报告》，明确监测数据统计分析结果、工艺稳定性判定结论；若出现参数波动超标或质量一致性不达标，应优化加工参数、工装状态或检测方案，直至监测合格后方可定型。

5　工艺优化

5.1　数字化工艺规划优化

5.1.1　工艺路线重构

5.1.1.1　一体成型式筒体：采用“集成化毛坯制备→整体粗加工→去应力处理→整体半精加工→二次去应力→整体精加工→稳定化处理”路线，相较于传统的组装式筒体，减少组装环节与应力集中风险。
5.1.1.2　增材制造（3D 打印）式筒体：采用“数字模型切片→增材成形→去支撑→热处理去应力→精加工→稳定化处理”路线，利用近净成形优势减少材料浪费与加工余量。
5.1.1.3　铸造+机加工复合式筒体：采用“精密铸造毛坯→铸后热处理→粗加工→去应力处理→半精加工→二次去应力→精加工→稳定化处理”路线，适配复杂内腔结构的异形筒体制造。
5.1.1.4　卷焊成型式筒体：采用“板材下料→数控卷制→自动焊接→焊后热处理→去应力处理→机加工→稳定化处理”路线，优化卷制与焊接协同性，降低焊接应力集中。
5.1.1.5　塑性成型式筒体：

a）挤压成型：采用“挤压坯料制备→在线固溶处理→精准挤压成型→去应力退火→时效处理→半精加工→二次去应力→精加工→稳定化处理”路线，强化成形精度与结构均匀性，适配规则截面、长筒类异形件；
b）旋压成型：采用“旋压毛坯制备→预旋整形→主旋压成形（冷旋/热旋适配）→去应力处理→精旋校准→半精加工→二次去应力→精加工→稳定化处理”路线，适配锥形、曲线母线及带筋结构，提升壁厚均匀性与曲面成形精度；
c）液压成型：采用“板料/管坯下料→预成形→液压胀形（分区压力控制）→校准整形→去应力退火→半精加工→二次去应力→精加工→稳定化处理”路线，适配 C/U/W 型等复杂截面结构，减少焊缝数量并强化结构完整性。

5.1.1.6　数字化成型式筒体：采用“数字模型优化→坯料预处理→数字化精确成形→在线检测与回弹补偿→去应力处理→精加工→稳定化处理”路线，以数字化驱动适配小批量、多品种生产，减少专用模具依赖，提升复杂曲面成形精度与效率。

5.1.2　虚拟加工仿真

5.1.2.1　仿真内容

负责仿真应包含轨迹干涉检测、切削力与热变形预测、夹具适配性验证；不同工艺筒体要求如下：

a）一体成型筒体应额外开展整体结构加工协调性仿真；
b）增材制造式筒体应增加熔池行为仿真、层间温度场分布仿真、残余应力演化仿真及支撑结构合理性验证；
c）挤压成型式筒体应增加挤压过程金属流动仿真、模具受力变形仿真、坯料温度场衰减仿真；
d）铸造式筒体应增加充型流动仿真、凝固过程仿真、铸造缺陷预测仿真；
e）卷焊成型式筒体应增加卷制过程弹塑性变形仿真、焊接热循环仿真、焊缝应力场分布仿真。

5.1.2.2　模型要求

5.1.2.2.1　按照 QJ 20517.1 与 QJ 20517.2 的要求构建三维模型，模型精度与设计模型偏差应符合加工要求，集成材料性能、工装参数等关键数据。

5.1.2.2.2　增材制造模型应包含切片参数、支撑结构设计、粉末床特性等数据，仿真精度需匹配熔池尺寸与层厚控制要求。
5.1.2.2.3　挤压/铸造模型应集成模具几何参数、热传导系数、材料流变特性等数据，确保成形过程仿真准确性。
5.1.2.2.4　卷焊成型模型应包含板材力学性能、焊接工艺参数、卷制工装约束条件等数据，同步关联焊缝成形质量仿真需求。

5.1.3　输出要求

应形成《工艺仿真报告》，明确干涉检查结果、变形补偿方案、参数调整建议及仿真模型有效性评估。

5.2　加工实施环节优化

5.2.1　材料与毛坯准备

5.2.1.1　材料质控

5.2.1.1.1　金属材料应提供完整化学成分与力学性能报告，复合材料应检测纤维分布与孔隙率，并符合相关材料标准要求；材料溯源信息完整可查。
5.2.1.1.2　粉末材料应检测粒度分布、松装密度、流动性及纯度，金属粉末氧含量需符合航天级材料要求；定期开展粉末循环使用质量验证。
5.2.1.1.3　铸锭/坯料应检测内部疏松、夹杂等缺陷，采用超声波探伤或 X 射线探伤验证；挤压用铝合金需控制合金元素均匀性，铸造用高温合金需控制杂质元素含量。
5.2.1.1.4　板材应检测平面度、厚度公差及焊接兼容性，高强度钢/钛合金板材需进行焊接性试验，验证焊缝力学性能匹配性。

5.2.1.2　毛坯要求

5.2.1.2.1　应优先采用近净成形毛坯，金属毛坯可选用挤压、锻造等工艺制备，复合材料毛坯应控制预制件质量；毛坯形状与尺寸适配后续加工需求。
5.2.1.2.2　精密铸造毛坯应控制尺寸公差与形位偏差，减少铸造缺陷；关键部位预留合理加工余量，兼顾成形效率与加工精度。

5.2.2　设备与工装优化

5.2.2.1　设备选型

设备选型要求如下：

a) 粗加工可采用三轴加工中心，精加工应选用具备动态精度补偿功能的五轴联动加工中心；一体成型筒体加工设备应匹配构件整体尺寸与精度要求；
b) 增材制造设备应选用航天级选区激光熔化（SLM）或电子束熔化（EBM）设备，设备应具备分区扫描、实时温度监测及缺陷在线检测功能，成形舱室真空度、氧含量控制精度符合航天产品要求；
c) 挤压成型设备应选用数控精密挤压机，配备坯料预热系统、模具温度控制系统及在线尺寸检测装置，设备挤压速度与压力控制精度需满足异形截面成形要求；
d) 铸造设备应采用如失蜡铸造、砂型精密铸造设备等精密铸造设备，配备充型压力控制系统、凝固冷却控制系统及在线探伤装置；大型异形筒体可选用低压铸造或离心铸造设备；
e) 卷焊成型设备应选用具备预弯、卷制、校圆一体化功能的数控卷板机、自动焊接设备及焊后热处理设备，焊接设备宜具备焊缝跟踪与参数自适应调节功能。

5.2.2.2　夹具设计

夹具设计要求如下：

a) 薄壁筒体应优先采用矩阵柔性夹具或真空吸附式加工装置，夹具贴合面形状与工件适配，通过可调节支撑单元或负压腔实现精准夹持，减少装夹变形。

b) 增材制造筒体应设计专用基板工装，确保基板与成形件连接稳定性；配备随形支撑辅助工装，抑制分层打印过程中的变形与翘曲；
c) 挤压成型筒体的模具设计采用组合式结构，配备导向机构与脱模装置；针对变截面筒体，采用可调式模具型腔，适配不同截面形状成形需求；
d) 铸造筒体的砂型铸造应采用高强度砂芯与定位工装，确保砂芯装配精度；熔模铸造采用模组组合工装，控制模组变形；
e) 卷焊成型筒体的卷制工装应采用可调式辊轮组，配备防回弹装置；焊接工装采用刚性定位夹具，控制焊接过程中的变形，确保筒体圆度与同轴度。

5.2.2.3 工装管理

5.2.2.3.1 夹具定位面精度与粗糙度应符合加工要求，每批次加工前进行精度校验；模块化夹具应建立快速换型方案与参数库。
5.2.2.3.2 增材制造基板应定期清理与平整度校验，模具/砂芯应定期检查磨损与变形情况；卷焊工装的辊轮、定位块需定期检测精度，焊接夹具需验证重复定位精度。

5.2.3 刀具与切削参数优化

5.2.3.1 刀具选型

刀具选型应按以下规定进行：
——钛合金：选用涂层硬质合金刀具，采用刃口钝化设计，配备内冷结构以强化散热；
——高温合金：选用立方氮化硼（CBN）刀具，采用强化刃口设计，设置合理断屑槽结构；
——复合材料：选用金刚石涂层刀具，采用锋利刃口与低损伤结构设计，避免纤维撕裂与分层。

5.2.3.2 切削参数

切削参数优化应符合以下规定：
——依据材料特性、刀具类型及加工阶段（粗加工、半精加工、精加工）确定切削速度、进给量与背吃刀量；
——薄壁件与复杂曲面加工可采用自适应切削方式，通过实时监测切削力、振动等参数离线调整加工参数，逐步规划加工参数与轨迹。

5.2.4 冷却与热控制优化

5.2.4.1 金属材料

应优先采用高压内冷系统，通过刀具内冷孔将冷却介质直达切削区，有效带走切削热。

5.2.4.2 复合材料

应采用低温冷风冷却配合微量润滑方式，避免冷却液导致的层间损伤，减少加工热影响。

5.2.4.3 专项工艺热控制

专项工艺热控制优化如下：
a) 增材制造：应采用分区控温与随形冷却技术，控制成形过程中的温度梯度；打印完成后实施炉内缓冷，减少残余应力；
b) 挤压成型：应采用模具分段冷却与坯料保温协同控制，避免成形过程中因温度不均导致的变形与缺陷；
c) 铸造：应采用定向凝固冷却或分段冷却技术，控制铸件凝固顺序，减少缩孔、缩松及裂纹缺陷；大型筒体可采用余热热处理工艺，提升结构稳定性；
d) 卷焊成型：焊接过程应采用惰性气体保护冷却，焊后采用局部热处理或整体退火方式，消除焊接残余应力；控制冷却速度，避免焊缝脆化。

5.3 变形控制与检测优化

5.3.1 变形控制措施

5.3.1.1 加工策略：

a) 变截面筒体采用对称切削方式，平衡径向切削力；一体成型筒体加工应控制整体切削热分布，避免局部应力集中；
b) 增材制造式筒体应采用分层预热、交错扫描路径及支撑结构优化，抑制层间变形与翘曲；大型筒体采用分段打印+中间热处理工艺，释放累积应力；
c) 挤压成型式筒体应采用预变形补偿设计，在模具中预留变形量；挤压后实施在线校直，控制回弹变形；
d) 铸造式筒体应采用均衡凝固工艺，优化铸件结构设计，避免壁厚突变；铸后及时进行去应力退火，消除铸造应力；
e) 卷焊成型式筒体卷制过程应采用多步渐进式卷制，避免一次性卷制导致的塑性变形过大；焊接采用对称焊接或分段焊接工艺，平衡焊接应力。

5.3.1.2 稳定化处理：通过适配性应力消除方法，降低加工/成形过程中产生的残余应力，适用于增材制造、挤压、铸造、卷焊、机加工等全工艺环节；消除残余应力的方法包括低温时效、深冷处理、振动处理等多种类型，应结合材料特性、工艺类型及应力分布特点选择。

5.3.1.3 夹具适配：加工过程中通过矩阵柔性夹具的动态调节功能，实时补偿工件变形，维持加工稳定性。

5.3.2 检测体系要求

5.3.2.1 在线检测：加工过程中宜采用激光测头等装置进行实时检测，关键截面尺寸与形位公差应符合 GB/T 1184 的相关规定，偏差超限时启动参数补偿。

5.3.2.2 离线复检：应结合航天异形筒体的结构特征、尺寸范围及加工工艺，采用多样化检测方法协同开展全尺寸检测与质量评估，全尺寸检测需根据检测需求选用三坐标测量机、三维光学扫描测量仪、关节臂测量机、激光跟踪仪等设备，其中大尺寸筒体优先采用激光跟踪仪配合三维光学扫描实现整体形位公差与局部尺寸全覆盖检测，微小精密特征可辅以影像测量仪强化检测精度；壁厚均匀性检测可采用超声测厚仪进行快速复核；复合材料筒体应额外开展 X 射线 CT 探伤等检测，评估内部孔隙与层间结合质量。

5.3.2.3 环境验证：成品应通过高低温交变等极端环境试验，检测尺寸稳定性与力学性能保持性。

5.3.2.4 报告要求：形成《全尺寸检测报告》，包含检测数据、与设计模型对比分析及质量判定结果。

6 关键工艺技术要求

6.1 旋压成工艺

6.1.1 工艺选择

6.1.1.1 常见旋压成型工艺如下：

a) 基础成型工艺：普通旋压、强力旋压、增厚旋压；
b) 能场辅助成型工艺：热旋压、激光辅助旋压、电流辅助旋压、超声辅助旋压。

6.1.1.2 旋压成型工艺应根据筒体不同材质和应用场景等进行选择。

6.1.2 参数设计

6.1.2.1 筋条填充饱满度：铝合金内筋筒段旋压筋条填充饱满度应不低于 95%。

6.1.2.2 壁厚均匀性：异形筒体壁厚偏差应控制在公称壁厚的±10%以内。

6.1.2.3 表面质量控制：旋压表面不应有裂纹、起皮等缺陷，表面粗糙度 Ra 值不大于 3.2 μm。

6.1.2.4 激光参数匹配：激光辅助热旋压时，需匹配激光功率、光斑大小与旋压速度，确保加热区域温度均匀，避免局部过热导致的材料性能衰减。

6.2 液压成型工艺

6.2.1 适用范围

液压成型工艺核心适用于直径200 mm～800 mm的中大型变截面异形筒体，通过分区液压胀形实现整体成形，减少焊缝数量并强化结构完整性。

6.2.2 工艺要求

6.2.2.1 工艺协调性：应合理设计工艺路线，协调好预成形、液压胀形与校准工序的关系。
6.2.2.2 压力控制：根据材料性能和截面复杂程度，精确控制内压力与轴向进给匹配关系。
6.2.2.3 回弹补偿：基于数值模拟与工艺试验，在产品设计阶段预置回弹补偿量。
6.2.2.4 模具适配：中大型筒体应采用模块化组合模具，配备导向机构与密封装置，确保成形过程中模具贴合性与气密性。

6.3 数字化精确成型工艺

6.3.1 框环拉弯成型

6.3.1.1 一次拉弯成型：基于三维数字化扫描测量技术，结合 AI 算法优化拉弯轨迹，实现框环一次拉弯精确成形。
6.3.1.2 回弹控制：通过材料性能精确测试、回弹预测模型与实时应变监测，优化拉弯工艺参数。
6.3.1.3 效率提升：采用数字化精确成形技术，成形效率应提高 70%以上，多工位联动拉弯，实现复杂框环的连续成形。

6.3.2 柔性成型

6.3.2.1 渐进成型：适用于小批量、多品种异形筒体制造，无需专用模具。宜采用五轴联动渐进成形，适配复杂曲面的高精度加工。
6.3.2.2 电磁成形：适用于高精度复杂曲面低应力成形，通过放电线圈感生瞬态脉冲强磁场，进而在板坯、管坯上产生强洛伦兹力，驱动其高速成形；并可以通过可动工具头与工模具运动匹配，逐次累积局部变形，成形大型复杂曲面构件。
6.3.2.3 多点模柔性成形：适用于大尺寸平板件到异形筒体的预成形，通过可调式点阵模具实现不同曲面的快速适配，缩短模具开发周期。

6.4 增减材复合制造

6.4.1 工艺集成

6.4.1.1 设计制造一体化：采用分层调控原理设计多功能结构，可通过拓扑优化与增减材协同设计，实现结构轻量化与性能优化。
6.4.1.2 材料体系：可采用金属丝和碳纤维增强的高熔点聚醚醚酮等复合材料，实现多功能集成。采用钛合金/高温合金粉末与陶瓷颗粒复合增材，提升筒体耐高温与耐磨性能。
6.4.1.3 工艺协同：宜采用一体化工艺，减少装夹次数，提升形位公差精度；增材过程中应进行原位超声探伤，实时排查内部缺陷并进行局部补材。

6.4.2 性能要求

6.4.2.1 结构刚度：多功能结构在弯曲载荷下刚度比纯树脂基板提高 35%以上，金属基复合结构刚度提升不低于 30%。
6.4.2.2 热管理性能：等效热导率相比纯树脂基板提高 568%以上，高温合金复合结构热导率优化至满足航天服役温度要求。
6.4.2.3 辐射屏蔽：对质子辐射的屏蔽能力增强 27.9%以上。
6.4.2.4 缺陷控制：内部孔隙率不大于 0.5%，裂纹、夹杂等缺陷等级符合航天产品质量要求。

6.5 复合材料成型工艺

6.5.1 材料确认

适用于航天异形筒体用树脂基复合材料，核心材料体系及基础要求如下：

a) 增强纤维：优先选用 T300、T700、T1000 级的碳纤维、Kevlar 49、Kevlar 149 级芳纶纤维，纤维需满足航天级纯度要求，无明显杂质、断丝，力学性能离散度不大于 3%；

b) 基体树脂：适配纤维类型选用环氧树脂、聚醚醚酮（PEEK）、双马来酰亚胺（BMI）等，树脂需具备低挥发、高耐热、低收缩特性，玻璃化转变温度（Tg）不低于 120 ℃，高温工况用材料 Tg 不低于 200 ℃；
c) 辅助材料：脱模剂、固化剂、促进剂等需与基体树脂兼容性良好，无有害挥发物，符合航天产品环保与可靠性要求。

6.5.2 RTM 成型工艺

6.5.2.1 模具设计要求：模具应确保合模和气密性，解决制品固化后的干斑和气孔问题。宜具备模具温度分区控制功能，适配复杂结构的均匀固化。
6.5.2.2 树脂灌注控制：精确控制树脂灌注压力、温度和速度，确保纤维充分浸润。采用可视化灌注监测与 AI 流量调控，避免局部缺胶。
6.5.2.3 固化工艺：采用合理的固化曲线，控制升温速率、保温时间和冷却速率。宜通过原位固化监测，实时反馈固化度，优化固化参数。

6.5.3 自动铺丝工艺

6.5.3.1 轨迹规划：采用环向、双螺旋自动、变角度铺丝轨迹优化，实现加强筋的精确加工，适配复杂曲面的纤维连续性铺设。
6.5.3.2 铺丝参数：优化铺丝张力闭环控制、铺丝温度、压力和速度，确保预浸料带良好粘贴与压实，避免纤维损伤与堆积。
6.5.3.3 模具设计：采用软模具实现加强筋成型，固化脱模后保证零件精度。

6.5.4 新型复合材料成型工艺

6.5.4.1 激光辅助原位固化工艺

6.5.4.1.1 适用于碳纤维、芳纶纤维增强复合材料异形筒体，尤其适配复杂曲面与变截面结构。
6.5.4.1.2 激光功率与铺放速度协同匹配，确保原位固化度达到 85%以上；采用惰性气体保护，避免树脂氧化。
6.5.4.1.3 固化后复合材料表面无气泡、裂纹等缺陷。

6.5.4.2 D 编织-RTM 一体化工艺

适用于大尺寸、高载荷复合材料异形筒体，提升整体结构完整性，编织纱线张力应均匀，编织密度符合设计要求；树脂灌注与编织过程协同，确保纤维充分浸润。整体结构力学性能离散度不大于5%，抗冲击性能较传统工艺提升20%以上。

6.6 加工变形控制要求

6.6.1 减振工装设计

6.6.1.1 柔性支撑：对于薄壁多孔筒形结构件，应采用专用减振工装增强整体结构刚性，或采用智能柔性支撑，通过压力传感器实时调整支撑力度。
6.6.1.2 减振环设计：减振环应有效固定薄壁多孔筒形结构件上部，降低加工过程中的工件振动。
6.6.1.3 安装底座：安装底座应具有足够的刚性，配合压块将工件底部可靠固定。宜增加底座温度补偿设计，避免加工热导致的底座变形。

6.6.2 切削参数优化

6.6.2.1 动态切削：改横向层切为动态切削方式，减少切削应力，将变形量控制在要求范围内。
6.6.2.2 刀具选择：根据材料特性优化选取刀具几何参数和涂层，延长刀具寿命。
6.6.2.3 切削参数：通过试验验证，优化切削速度、进给量和切削深度，宜采用 AI 驱动的切削参数自适应优化，实时匹配加工状态。

7 成品性能要求

7.1 几何与尺寸性能

7.1.1 异形筒体的外形尺寸精度应满足以下要求：

a) 轮廓度：筒体母线轮廓度公差应不低于 GB/T 1182 中规定的 8 级精度，或符合产品数字模型定义的公差带要求；

b) 圆度/椭圆度：对于圆形或近似圆形截面，在自由状态下或模拟安装状态下，圆度误差不应超过其公称直径的 0.05%；

c) 壁厚均匀性：筒体任意位置的壁厚与设计标称值的偏差应在±10%以内；对于关键承载区域，偏差应控制在±5%以内。

7.1.2 异形筒体的内部特征尺寸应满足以下要求：

a) 筋条填充饱满度：采用旋压等工艺成形的内外筋条，其填充饱满度应不低于 95%；

b) 特征位置精度：筒体上的开孔、凸台、法兰等特征的定位精度应符合设计图样要求，通常位置度公差应不低于 Φ0.5 mm。

7.2 力学性能要求

7.2.1 静态力学性能

异形筒体力学性能应符合GB/T 43127的规定。

7.2.2 疲劳与耐久性能

对于可重复使用运载器等有寿命要求的产品，应验证其疲劳性能，在指定的载荷谱下，筒体的疲劳寿命应不低于设计要求寿命，并考虑足够的分散系数，对于复合材料筒体或特定金属结构，应评估其损伤容限能力。

7.3 环境适应性性能

7.3.1 空间环境适应性

对于在轨服役的卫星、飞船等产品的异形筒体，应考核其空间环境适应性：

a) 热真空变形：在经过-150℃～120℃的热循环试验后，筒体关键形面的尺寸变化应在其公差带内；

b) 抗空间辐射性能：外露材料的性能应满足 GB/T 46132 的要求，保证在轨期间性能不退化；

c) 真空出气特性：非金属材料应符合低挥发性要求，避免污染光学载荷等敏感器件。

7.3.2 正弦振动与随机振动

异形筒体在经历验收量级的振动试验后，不应出现任何结构损伤、松动或永久变形。

7.3.3 声学环境

对于承受高声压载荷的异形筒体，应验证其在声振联合载荷下的结构完整性。

8 工艺验证与改进

8.1 工艺过程检验

8.1.1 首件检验

采用三维数字化扫描测量技术，对首件产品进行全尺寸检测；对关键截面进行剖面检验，分析筋条填充饱满度与内部缺陷。

8.1.2 在线检测

对加工过程中关键尺寸进行在线检测，及时发现偏差；对薄壁件加工全过程进行变形监测，记录数据用于工艺优化。

8.2 成品验收

检验成品的尺寸精度、表面质量、力学性能及极端环境稳定性，一体成型筒体应额外评估整体结构强度与可靠性。

8.3 持续改进

8.3.1 数据管理：宜建立工艺数据库，持续收集刀具寿命、切削参数、变形量、检测结果等数据，构建数据驱动的优化基础。
8.3.2 迭代优化：宜定期对工艺方案进行评估与调整，结合新技术等优化仿真模型与加工参数；每年至少开展一次全面工艺评审。
8.3.3 异常处理：当成品合格率未达要求或出现质量异常时，应启动溯源分析，重点核查仿真参数、工装状态及相关技术应用情况，制定整改措施。

9 工艺文件与记录管理

9.1 工艺文件要求

工艺优化设计应形成“三报告一方案”，即《工艺仿真报告》《加工参数优化方案》《全尺寸检测报告》《工艺验证报告》，文件编制符合航天行业工艺文件管理规范。

9.2 记录保存

加工过程参数、检测数据、设备校验记录、专利许可文件等应电子化存档，保存期限不少于产品全生命周期

9.3 溯源管理

推荐采用二维码等标识方式，实现从毛坯到成品的全流程数据追溯，包含材料信息、加工环节、检测结果等。

10 安全与环保要求

10.1 操作安全要求

设备操作人员应经专业培训合格后方可上岗；高压冷却系统、真空吸附装置等需设置安全防护与过载报警装置；复合材料加工区域需防范粉尘爆炸风险。

10.2 环保控制

10.2.1 应符合 ISO 14001 环境管理体系要求，建立切削液回收处理系统，复合材料废料按危险废物管理标准分类收集与处置；减少生产过程中的能源消耗与污染物排放。
10.2.2 金属切削、电镀、酸洗等工序产生的废水，应经隔油、沉淀、过滤及重金属吸附处理，符合 GB 8978 的规定，其中铅、铬、镍等重金属排放浓度应不大于 0.5 mg/L。
10.2.3 焊接烟尘、金属磨削粉尘需配备专用除尘设备，焊接废气经净化处理后排放，应符合 GB 16297 的规定。
10.2.4 金属废料按钢、铝、钛合金等材质分类回收，资源化利用率应不小于 90%；含油金属屑、废化学试剂包装等危险废物，应按 HJ 2025 的规定单独封装，张贴危险废物标签，委托有资质单位处置。

10.3 职业防护

加工区域应配备必要的防护设施，复合材料加工时操作人员需佩戴防尘面罩、防静电手套等防护用品，保障职业健康。

T/CIET 2450—2026

中 华 人 民 共 和 国

团 体 标 准

航天异形筒体加工工艺优化设计规范

T/CIET 2450—2026

*

中国国际经济技术合作促进会

网址 www.capc.com.cn

中国国际经济技术合作促进会标准化工作委员会

网址 www.capcgbw.com.cn

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.5 字数 10.6 千字

2026 年 6 月第一版 2026 年 6 月第一次印刷

*

如有印装差错 由中国国际经济技术合作促进会调换

版权专有 侵权必究

举报电话：010-53635604

T/CIET 2450—2026