

团 体 标 准

T/HEC 001—2025

镁合金航天航空零部件长效防护微弧氧化 膜层工艺规范

Process specification for long-term protective micro-arc oxidation coating for
aerospace components of magnesium alloy

2025 - 09 - 30 发布

2025 - 12 - 22 实施

黑龙江省企业联合会 发布

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 环境要求	2
4.1 生产布局	2
4.2 生产车间	2
4.3 生产区域	2
4.4 车间	2
4.5 微弧氧化作业区	2
4.6 生产照明	2
5 人员要求	2
6 法律法规要求	2
7 环保要求	2
8 原材料要求	3
8.1 材料	3
9 基材	4
9.1 镁合金基材	4
9.2 电解液	4
9.3 预处理试剂	4
9.4 设备设施	5
9.5 工装	5
9.6 烘箱	6
9.7 工艺文件	6
10 生产工艺过程	6
10.1 生产工艺流程	6
10.2 氧化前验收	6
10.3 微弧氧化工艺过程	7

11 工艺质量控制	10
11.1 关键参数验证	10
12 性能检测方法	10
12.1 检测内容、设备及条件	10
12.2 检测方法	11
12.3 检测结果评价	11
12.4 检测报告	12
参考文献	13
附录 A	14
附录 B	15
附录 C	16

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。

本文件由哈尔滨三泳金属表面技术有限公司提出。

本文件由黑龙江省企业联合会归口。

本文件起草单位：哈尔滨三泳金属表面技术有限公司、黑龙江工程学院、哈尔滨龙江特种装备有限公司、东北轻合金有限公司、中国航发东安发动机有限公司、哈尔滨东盛金属材料有限公司、哈尔滨哈飞工业有限责任公司、哈尔滨理工大学、黑龙江省企业联合会、黑龙江省企业家联合会、黑龙江省工业经济联合会。

本文件主要起草人：宋航、迟美月、张晓晨、李大龙、陈思仁、张骊珠、尹志娟、张春艳、高业龙、李洲、高岩、刘宇鹏、许红雨、郭睿智、于超、王帅。

引 言

为规范镁合金航天航空零部件长效防护微弧氧化膜层的制备工艺流程，确保膜层性能的稳定性、可靠性及长效防护效果，满足航天航空领域对镁合金零部件轻量化、耐腐蚀、抗磨损及抗高温等严苛性能要求，结合镁合金材料特性、微弧氧化技术原理及航天航空工程应用实践，制定本文件。

本文件整合了镁合金微弧氧化膜层制备及性能检测的核心技术要点，涵盖工艺实施与质量验证的关键要求。其中，工艺实施部分明确了原材料规格、设备选型、工艺参数及操作流程，为膜层制备提供技术支撑；质量验证部分规范了检测项目、检测方法、评价指标及合格判定标准，为膜层性能评估提供统一指导。

本文件可作为产品设计研发、生产制造、性能检测及验收的重要技术依据，对于提升镁合金零部件在复杂服役环境下的使用寿命、保障航天航空装备运行安全性具有重要意义。

镁合金航天航空零部件长效防护微弧氧化膜层工艺规范

1 范围

本文件规定了镁合金航天航空零部件长效防护微弧氧化膜层制备的原材料要求、设备设施、工艺参数、操作流程、质量控制及安全环保要求。适用于航天航空领域用镁合金（AZ31B、AZ91D、ZM5 等）零部件表面长效防护微弧氧化膜层的制备过程。

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 4956 磁性基体上非磁性覆盖层 覆盖层厚度测量 磁性法

GB/T 9286 色漆和清漆 划格试验

GB/T 9790 金属覆盖层及其他有关覆盖层维氏和努氏显微硬度试验

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 12611 金属零（部）件镀覆前质量控制技术要求

GB/T 21526 结构胶剂粘接前金属和塑料表面处理导则

GJB 480 金属镀覆和化学覆盖工艺质量控制要求

HB 5472 金属镀覆和化学覆盖工艺用水水质规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

微弧氧化micro-arc oxidation

通过电解液与相应电参数组合，在200V~1000V压微弧放电条件下，以镁合金试件为阳极，在镁合金表面生长出以基体金属氧化物为主的陶瓷膜，实现镁合金表面耐、耐蚀的处理技术。

4 环境要求

- 4.1 生产布局：应布局合理划分为产品储存区、预处理区、微弧氧化作业区、后处理区、检验区、包装区等功能分区，各区域间设置明显标识，避免交叉污染。产前验收可以按照 HB5034 或其他文件执行。
- 4.2 生产车间：应保持干燥、清洁、通风良好，放置酸性、碱性等气氛腐蚀，地面平整防滑，无明显粉尘堆积，环境温度控制在 15°C~35°C，相对湿度不超过 75%，避免潮湿环境引发设备故障或镁合金腐蚀。
- 4.3 生产区域：应远离明火、热源及易燃易爆场所，厂界外设置不少于 100 米的环境防护距离，防护距离内不得规划建设学校、集中居民区等环境敏感建筑。
- 4.4 车间：应设置清晰的安全通道和应急出口，通道宽度不小于 1.5 米，应急出口保持畅通，配备应急照明和疏散指示标志。
- 4.5 微弧氧化作业区：应具备良好的绝缘防护措施，设备接地电阻不大于 4Ω，作业区域设置绝缘垫、防护围栏及“高压危险”警示标识，防止电击事故。
- 4.6 生产照明：应满足作业需求：生产区域（含预处理、微弧氧化、后处理等作业工位）平均照度不低于 300lx，照明均匀度 ≥ 0.7 ，无明显眩光和阴影；采用节能、防爆、防尘型照明设备，避免因照明设备故障引发安全风险，照明线路应规范敷设，做好绝缘防护。

5 人员要求

本标准要求操作人员应经过专业培训，掌握微弧氧化工艺原理、设备操作及安全规程，具备识别和处理常见工艺问题的能力。关键工序人员需持证上岗。质量检验人员应熟悉相关检测标准与方法，能正确使用检测设备并对结果进行准确判定。所有人员应严格遵守工艺纪律和质量管理体系要求。

6 法律法规要求

本文件符合《中华人民共和国标准化法》《中华人民共和国产品质量法》等法律法规要求，遵循国家关于航空航天装备制造、安全生产、环境保护及职业健康的相关强制性规定。文件内容不得与现行有效的法律、行政法规及部门规章相抵触，其制定与实施旨在确保工艺过程合法合规，保障产品质量安全与生态环境安全。

7 环保要求

本文件涉及的工艺过程应符合国家及地方环保法律法规要求。生产过程中产生的废水、废气须经有效处理，确保达标排放；废渣应作为危险废物委托有资质单位处置。作业场所需具备良好通风，操作人员应佩戴防护用具，确保职业健康安全。企业应建立环保与安全生产责任制，定期进行环境监测与风险评估。

8 原材料要求

8.1 材料

8.1.1 工艺材料：（含化学材料、辅助材料、压缩空气等）的名称、型号规格、技术指标及适用标准，应在工艺文件（如工艺规程、作业指导书）中作出明确规定，确保材料选用与镁合金微弧氧化工艺要求一致。

8.1.2 工艺材料进场：包装应完好无损，外包装需清晰标注产品名称、型号规格、生产厂家、生产日期、保质期、执行标准等关键信息，同时附带产品合格证（或质量证明书）；使用方应按入厂检验规程开展复验，复验项目包括确认外观、主要成分含量、纯度、稳定性等关键指标，复验合格并形成合格文件后方可入库使用；不合格材料应单独标识、隔离存放，按规定程序处置，严禁流入生产环节。主要化学材料参见附录 A。

8.1.3 工艺材料的储存、运输应符合产品说明书及相关安全标准要求：化学材料应按性质分类存放（如酸、碱、氧化剂等分开隔离存放），避免混存引发化学反应；储存环境应干燥、通风、阴凉，远离火源、热源及易燃易爆物品，设置防泄漏、防腐蚀设施；易挥发、有毒有害化学材料应存放在专用密闭库房，配备相应的安全防护设施及应急处理物资。

8.1.4 工艺材料在使用：使用过程中，应严格遵循操作规程，控制使用量及配比精度；开封后的化学材料应及时密封，防止吸潮、挥发或变质，并在保质期内用完；若材料出现浑浊、沉淀、变色、异味等异常现象，应暂停使用，重新检验确认合格后方可继续使用，不合格材料按 3.3.2 条规定处置。

8.1.5 配制溶液用水

8.1.5.1 水质类型：配制镁合金维护氧化用电解液、前处理液（脱脂、活化等）及后处理清洗液、封孔液时，应采用工业纯水，可选用经初级纯化处理的水（如单级反渗透水、简易离子交换处理水），严禁使用未纯化的自来水、井水等；水的纯化处理需符合 HB 5472《金属镀覆和化学覆盖工艺用水水质规范》中镁合金阳极氧化用水中，B类及C类的基础要求，确保水质稳定且无明显杂质干扰。

8.1.5.2 关键技术指标：水质需满足以下指标要求，检测应在 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 环境下进行：

8.1.5.2.1 电导率： $\leq 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ，其中用于民用镁合金制品（如日常五金件、轻量结构件）处理的溶液配制用水，电导率可放宽至 $\leq 100\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ；若用于对膜层基础性能有要求的场景（如普通机械零部件），电导率应控制在 $\leq 50\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ；

8.1.5.2.2 pH 值：6.0~7.2，避免因水质过酸或过碱导致电解液初始 pH 值大幅偏移，影响氧化反应均匀性；

8.1.5.2.3 总溶解固体（TDS）： $\leq 100\ \text{mg}/\text{L}$ ，减少可溶性盐类在电解液中的累积，防止溶液出现异常沉淀或影响膜层外观；

8.1.5.2.4 金属离子含量：钙、镁离子总量 $\leq 50\ \text{mg}/\text{L}$ ，铁离子 $\leq 1.0\ \text{mg}/\text{L}$ ，铜离子 $\leq 0.5\ \text{mg}/\text{L}$ ，避免异金属离子引发局部微腐蚀，导致膜层出现斑点、针孔等轻微缺陷；

8.1.5.2.5 氯离子、硫酸根离子：各离子含量均 ≤ 10 mg/L，防止氯离子加速镁合金基体腐蚀，或硫酸根离子与电解液中阳离子结合形成杂质沉淀，影响膜层致密性。

8.1.5.3 水质检测与控制：

8.1.5.3.1 纯化水制备后，应每日检测电导率、pH 值，检测结果记录至《水质检测台账》；每年至少开展 2 次全指标检测，确保指标符合要求；

8.1.5.3.2 纯化水应储存于专用密闭聚乙烯、聚丙烯、玻璃钢、不锈钢等相应容器中，储存周期不超过 5 天；储存期间每 2 天复测一次电导率，若电导率超过 $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，需重新纯化处理后再使用；

8.1.5.3.3 溶液配制前，需现场核查水质最新检测数据，未达标的水不得用于溶液配制；若采用简易纯化设备（如小型反渗透装置），需每日检查设备运行状态（如滤芯压差、产水流量），确保纯化效果稳定。

8.1.5.4 水质异常处理：若水质不达标，可能导致电解液浑浊、氧化膜层质量下降、耐蚀性降低等问题。发现水质异常后，应立即停止使用，排查纯化系统（如滤芯堵塞、反渗透膜破损、离子交换树脂失效等），更换故障部件并重新制备合格水，经检测确认达标后，方可恢复溶液配制；

8.1.6 槽液配制、生产用风搅拌、吹干零件用压缩空气，应满足以下要求：使用前必须经油水分离器、精密过滤器（过滤精度 $\leq 1\mu\text{m}$ ）两级处理，确保压缩空气清洁、干燥，无油、无水、无粉尘及其他杂质；压缩空气的露点应 $\leq -20^\circ\text{C}$ ，含油量 $\leq 0.01\text{mg}/\text{m}^3$ ，颗粒物含量 $\leq 0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ；使用单位应定期对压缩空气处理设备进行检查、维护和校准，建立设备运行及检测台账，并按规定周期对压缩空气质量进行抽检，确保满足零件吹干及后续工艺要求。

9 基材

9.1 镁合金基材

9.1.1 镁合金零部件基材应符合航天航空专用镁合金材料标准，化学成分公差应控制在 $\pm 0.05\%$ 。

9.1.2 基材表面应无裂纹、气孔、夹杂等缺陷，表面粗糙度 $Ra \leq 1.6\mu\text{m}$ 或根据客户需求而定。

9.1.3 基材尺寸精度应满足设计图纸要求，形位公差 $\leq 0.02\text{mm}/\text{m}$ 。

9.2 电解液

9.2.1 基础电解液体系：采用硅酸盐-铝酸盐复合体系，主要成分包括 Na_2SiO_3 （浓度 $20\text{g}/\text{L} \sim 40\text{g}/\text{L}$ ）、 NaAlO_2 （浓度 $10\text{g}/\text{L} \sim 20\text{g}/\text{L}$ ）。

9.2.2 添加剂：加入 $5\text{g}/\text{L} \sim 10\text{g}/\text{L}$ 的 Na_2WO_4 （提高膜层硬度）、 $2\text{g}/\text{L} \sim 5\text{g}/\text{L}$ 的 K_2ZrF_6 （增强膜层致密性），添加剂纯度 $\geq 99.5\%$ 。

9.2.3 电解液 pH 值控制在 $10.5 \sim 12.0$ ，温度保持在 $18^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ ，杂质含量 $\leq 0.1\%$ 。

9.3 预处理试剂

9.3.1 除油剂：采用碱性除油剂，主要成分为 NaOH （ $5\text{g}/\text{L} \sim 10\text{g}/\text{L}$ ）、 Na_2CO_3 （ $15\text{g}/\text{L} \sim 25\text{g}/\text{L}$ ），pH

值 11~13；

9.3.2 活化剂：采用稀硫酸溶液（体积分数为 3%~5%），杂质含量 $\leq 0.05\%$ ；

9.3.3 去离子水：电导率 $\leq 10 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，pH 值 6.5~7.5。

9.4 设备设施

9.4.1 核心设备

9.4.1.1 微弧氧化电源：采用脉冲直流电源 380V 三项电源，输出电压范围 0V~750V，电流密度 $0.5\text{A}/\text{dm}^2 \sim 30\text{A}/\text{dm}^2$ ，脉冲频率 200Hz~2000Hz，脉冲占空比 10%~95%，微弧氧化设备精度 1%。

9.4.1.2 电解槽：采用耐强碱腐蚀的 PP 或 PVDF 材质，有效容积 $\geq 50\text{L}$ ，配备冷却装置（控温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ）及搅拌装置。

9.4.1.3 挂具：阳极采用铝或铝合金材质、铜及铜合金材质，阴极材料选用不溶性金属材料，如不锈钢。与零部件接触部位需进行绝缘处理，确保导电均匀。

9.4.2 辅助设备

9.4.2.1 预处理设备：包括超声波清洗机（功率 500W~1000W，频率 28kHz~40kHz）、烘干箱（控温范围 $50^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ ，控温精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ）。

9.4.2.2 检测设备：

包括涂层测厚仪（测量范围 $0\mu\text{m} \sim 500\mu\text{m}$ ，精度 $\pm 1\%$ ）、
显微硬度计（试验力 0.1N~10N）、
盐雾试验箱（符合 GB/T 10125-2021 要求）、
扫描电子显微镜（放大倍数 ≥ 10000 倍）。

9.4.3 仪器仪表

9.4.3.1 仪器仪表应按国家计量法规及相关标准要求，委托具备相应资质的计量检定 / 校准机构进行定期检验 / 校准，检验 / 校准周期根据仪器仪表类型、使用频率及精度要求确定（常规周期为 6 个月~1 年，关键精密仪器可缩短周期），检验 / 校准项目应覆盖核心测量参数。

9.4.3.2 经检验 / 校准合格的仪器仪表，应粘贴有效合格标识（注明检定 / 校准机构、日期、有效期）；不合格仪器仪表应立即停用，粘贴不合格标识并隔离存放，按维修、报废等程序处置，严禁超期或不合格仪器仪表投入使用。

9.5 工装

镁合金微弧氧化工装（含挂具、夹具等）应满足导电稳定性、结构合理性、耐蚀可靠性及绝缘安全性要求，具体规定如下：

a、工装与零件的导电接触部位，优先选用镁合金、铝及铝合金材质；

- b、工装非接触部位可以进行绝缘保护，工件加工时需保证绝缘部位无破损、开裂、脱落现象，确保作业过程中无漏电、短路风险。
- c、工装与零件的接触应紧密、可靠，优先采用螺纹连接、专用夹具夹持或耐高温绝缘绑扎带固定等方式，夹持/绑扎时需确保紧固度，避免作业过程中因振动、电解液冲刷导致零件松动或接触不良；接触面积应根据零件尺寸、微弧氧化工艺电流参数计算确定，确保满足断面载流量要求（建议电流密度不超过 $5\text{A}/\text{cm}^2$ ），避免局部接触电阻过大引发打火、烧蚀零件或工装；工装结构设计应遵循“无积液、易清洗”原则，避免设置盲孔、凹槽等易导致电解液滞留的结构，确保电解液循环顺畅，减少溶液残留对零件表面质量及工装寿命的影响。
- d、工装应具备良好的耐蚀性和机械强度，表面无毛刺、尖锐棱角，避免划伤零件表面；针对复杂形状、薄壁类零件，工装应设置专用定位支撑结构，防止零件变形；工装尺寸应与微弧氧化槽体、零件规格适配，确保零件在槽内分布均匀，与电极间距一致，保证膜层生长均匀性。
- e、工装应定期进行维护保养：使用后及时清洗残留电解液，检查绝缘层完整性、接触部位磨损情况及导电性能，发现绝缘层破损、接触部位氧化锈蚀或松动变形时，应及时修复或更换；建立工装使用维护台账，记录工装编号、适用零件型号、使用次数、维护修复情况及报废时间，确保可追溯。

9.6 烘箱

微弧氧化处理完成后的镁合金工件需通过烘箱去除表面及孔隙中的残留水分，促进涂层结构稳定，避免后续存放或使用过程中出现水迹、返潮或局部腐蚀。烘干过程应在专用烘箱内进行。

在烘箱有效工作空间内，温度均匀性不应大于 $\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$ ，温度控制精度不应低于 $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ 。

为确保镁合金微弧氧化膜层稳定，推荐烘干温度为 $60\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$ ，时间依据工件尺寸、膜层结构及工艺要求确定，通常不低于 10 min 。

9.7 工艺文件

用于指导镁合金微弧氧化生产的工艺文件应完整、明确、可操作，能够满足产品质量及过程控制要求。工艺文件包括但不限于：特殊过程确认、工艺规程、作业指导书、设备操作规程、检验与试验规范、工序卡及相关技术记录等。

10 生产工艺过程

10.1 生产工艺流程

详见工艺流程图附录 3

10.2 氧化前验收

10.2.1 检验依据

10.2.1.1 产品入厂验收, 应按 GB/T 12611 《金属零(部)件镀覆前质量控制技术要求》、HB 5034 《零(组)件镀覆前质量要求》或相应来料接收技术文件规定进行验收。

10.2.1.2 按照采购合同、技术协议中明确的镁合金牌号、表面状态、尺寸公差及缺陷限定要求;

10.2.2 检验批次与抽样规则

10.2.2.1 检验批次: 以同一生产厂家、同一牌号、同一生产批次、同一规格的镁合金工件为一个检验批次, 每批次需附带厂家提供的材质证明书。

10.2.2.2 抽样比例

若批次数量 ≤ 30 件, 应逐件检验; 若批次数量 > 20 件, 按批次数量的 5-10% 抽样, 最少不少于 3 件; 或根据来料接收技术文件规定指定抽样比例。

10.2.3 工件表面状态

针对铸造类镁合金工件, 采用目视观察(必要时可结合 5-10 倍放大镜)检查, 表面不得存在因铸造工艺产生的致命性缺陷, 具体要求如下: 无明显气孔、明显夹杂(如非金属夹渣、金属异物)及疏松缺陷; 铸造过程中形成的飞边、浇冒口残余、毛刺等需彻底清理, 残留高度 $\leq 0.1\text{mm}$, 防止影响工装夹持稳定性及膜层均匀覆盖。或根据客户需求而定、或与客户沟通产品存在的缺陷, 经客户同意后方可生产。

10.3 微弧氧化工艺过程

10.3.1 手工除油: 可使用手动擦拭的方式, 用专用擦拭工具蘸航空除油剂擦拭除油。如果镁合金工件较小, 也可将镁合金工件浸入航空除油剂槽中, 温度: 常温, 处理时间 0.5min~10min, 去除表面油污及杂质。

10.3.2 自然晾干或冷风吹干: 采用未经加温的洁净压缩空气, 将工件表面吹干。

10.3.3 安装挂具: 挂具安装需严格遵循客户技术协议或图纸中指定的挂具安装位置, 优先选择工件非关键功能面、非装配基准面(如工件边缘、工艺孔、非配合面)作为挂点, 避免占用工件核心区域影响后续使用; 若客户未明确挂点, 需由工艺部门结合工件结构、电流分布特性确定挂点位置, 确保挂点处无遮挡、便于电解液流通, 且单个工件挂点数量需满足电流传导需求(常规小件 ≥ 2 个挂点, 大件 ≥ 4 个挂点)。固定时需确保工件与夹具紧密贴合、无松动, 可采用螺纹连接、专用卡扣夹持等方式固定; 夹持力需适中, 既要避免工件因振动、电解液搅拌冲击导致位移或接触不良, 又要防止夹持过紧造成工件变形(尤其是薄壁件、易损件, 可在夹具与工件接触处垫柔性耐蚀垫片)。

10.3.4 化学除油: 通过碱性或中性化学除油剂, 彻底去除镁合金工件表面在铸造、加工、储存过程中附着的油污(如切削油、冲压油、防锈油、脱模剂残留等), 同时应避免油污在后续活化、微弧氧化工序中阻碍反应进行, 防止膜层出现针孔、斑点、结合力不足等缺陷, 为后续工序提供洁净的基材表面。

10.3.5 二次纯水洗: 分别采用纯水清洗、流动纯水清洗, 每次清洗需配有压缩空气搅拌, 上下摆动 3-5 次, 清洗时间 1min~2min, 确保表面无残留化学除油剂。

10.3.6 局部保护：如工件存在非氧化部位，则需对非氧化部位进行局部保护。

10.3.6.1 保护时应根据被保护部位的几何形状、尺寸精度、保护要求及生产批量，选择以下一种或多种组合方法：

10.3.6.1.1 可剥离型涂料保护法：适用于形状复杂、边界不规则或大面积的非处理区域。

10.3.6.1.2 耐高温胶带遮蔽法：适用于平整或规则曲面、边界清晰的区域。

10.3.6.1.3 专用工装夹具机械遮蔽法：适用于批量生产的标准件或具有关键精密特征（如深孔、内螺纹）的工件。

10.3.6.2 保护材料基本要求

所选用的保护材料必须满足以下全部性能要求：

10.3.6.3 绝缘性：在微弧氧化过程的高压电场下（通常 $\geq 500V$ ），具有稳定且可靠的绝缘电阻，确保被覆盖区域无放电击穿。

10.3.6.4 耐化学性：能耐受微弧氧化碱性电解液（通常 pH 值 ≥ 10 ）的长期浸泡、冲刷与电解作用，不发生溶胀、溶解、剥离或性能退化。

10.3.6.5 耐温性：能承受槽液工作温度（通常 $10^{\circ}C-60^{\circ}C$ ）及微弧放电产生的局部瞬时高温，不发生流淌、碳化或与基体粘连。

10.3.6.6 结合力与易剥离性：在加工过程中与基体结合牢固，无翘边、渗液；加工后应能通过规定方法完整、干净地去除，无残留且不损伤基体。

10.3.6.7 无害性：不应含有对镁合金基体造成腐蚀（如卤素、硫等）或对后续工序（如胶接、涂装）造成污染的组分。

10.3.6.8 保护效果验证

保护层施工完成后、入槽前，必须进行100%目视检查，并用万用表抽查关键部位保护层与工件裸露区的绝缘电阻，其值应大于 $5 M\Omega$ ，确保无任何漏保护点。

10.3.6.9 保护后的工件，应重复 10.3.3-10.3.5 工序。

10.3.7 镁合金活化：将零部件浸入专用的活化溶液中，室温下处理 60s~300s，此步骤可以去除表面残留的氧化膜、清除表面污染物，同时可以改善表面微观状态。如产品表面无腐蚀坑、铸造缺陷等严重问题，可根据生产验证，跳过此步骤。

10.3.8 二次纯水洗：分别采用一级逆流纯水清洗、二级逆流纯水清洗，每次清洗需配有压缩空气搅拌，上下摆动 3-5 次，清洗时间 1min~2min，确保表面无残留活化剂。

10.3.9 微弧氧化处理流程

10.3.9.1 电解质溶液

推荐使用以硅酸盐、铝酸盐、氢氧化物、氟化物等一种或多种为主盐的碱性水溶液。具体配方及浓度范围应根据产品最终性能要求确定。

pH值：定期检测并记录槽液pH值，其波动范围不应超过设定值的 ± 0.5 。

10.3.9.2 电参数典型范围

电流密度：1-20 A/dm²（恒流模式）

电源波形：可选择单极或双极模式

最终电压：300-600 V（恒压模式，取决于膜厚要求）

频率：50-1000 Hz

占空比：10%-50%

氧化时间：5-60分钟（取决于膜厚要求及电流密度）

10.3.9.3 氧化阶段

初始火花稳定后，按预定程序（如阶梯升压、恒压保持等）进入主氧化阶段。此阶段火花特征会随膜层增厚而变化，通常由密集细小火花逐渐转变为移动缓慢、数量减少但亮度增强的较大橙色火花。

火花状态：持续观察，确保火花宏观上均匀分布，无持续的剧烈电弧（打火）现象。

10.3.9.4 搅拌与冷却

氧化过程中必须开启空气搅拌或机械搅拌，并确保冷却系统正常运行，以保证槽液成分和温度的均匀性。

槽液温度：通过循环冷却系统，将槽液工作温度严格控制在 15°C-35°C 范围内，最佳区间为 20°C-25°C。

10.3.9.5 安全注意事项

氧化过程中，严禁触摸工件、挂具、阴极及槽液。高压区域应有明确的警示和物理隔离。

保持车间通风系统正常运行，及时排出过程中产生的微量气体及溶液雾气。

操作人员必须佩戴绝缘手套、防护眼镜等个人防护装备。

10.3.10 二次纯水洗：分别采用一级逆流纯水清洗、二级逆流纯水清洗，每次清洗需配有压缩空气搅拌，上下摆动 3-5 次，清洗时间 1min~2min，确保表面无残留微弧氧化溶液。

10.3.11 热纯水清洗：热纯水（>70°C）可通过提升水分子活性，增强对孔隙内残留盐分的溶解与冲刷能力，彻底去除电解液残留，保障膜层耐蚀性（中性盐雾试验结果稳定达标）。清洗时需上下摆动 3-5 次，清洗时间不得低于 8min。

10.3.12 冷风干燥及热风干燥：用冷风干燥和热风干燥 2 道工序彻底将工件表面吹干。

10.3.13 去除局部保护

10.3.13.1 初始剥离：戴橡胶手套或无尘手套，用塑料镊子轻轻挑起保护胶边缘（优先选择工件非关键边角处），以 45°-60° 角沿基材表面匀速剥离，剥离速度控制在 5-10cm/min，避免过快剥离导致胶层断裂、残留；若剥离阻力较大，可在胶层边缘滴 1~2 滴无水乙醇，浸润 10~15s 后再继续剥离；

10.3.13.2 残留胶清理：对剥离后基材表面可能遗留的点状、条状残胶，用无尘布蘸取足量无水乙醇，

以“顺时针打圈”方式轻轻擦拭（力度控制在 5-10N，避免用力过猛划伤基材），每擦拭 10-15cm² 更换一次无尘布区域，防止残胶转移污染；

10.3.13.3 复杂区域处理：针对凹槽、拐角等难清理部位，用软毛刷蘸取无水乙醇，沿缝隙方向轻刷（刷毛与基材夹角 30°），反复 3-5 次，直至残胶完全清除；若仍有顽固残胶，可涂抹少量专用剥离剂，浸润 2-3min 后用软毛刷清理，严禁剥离剂接触微弧氧化膜层（可提前用胶带遮挡膜层边缘）。

10.3.14 冷风干燥：用常温压缩空气吹干工件表面前一工序残留的溶液。

10.3.15 拆卸挂具

确定工件完全干燥后，佩戴洁净无尘手套，将零件从挂具上拆卸下来，操作应平稳、柔和，避免使用蛮力导致工件磕碰、划伤或变形。

11 工艺质量控制

11.1 关键参数验证

11.1.1 每批次生产前，需用同材质试片进行工艺验证，确认膜层厚度、硬度等关键指标符合要求后，再进行批量生产。

11.1.2 若更换电解液批次或调整工艺参数，需重新进行试片验证，验证合格后方可继续生产。

12 性能检测方法

12.1 检测内容、设备及条件

检测样件需从每批次零部件中随机抽取，抽样比例不低于3%，且不少于3件。检测内容包括膜层外观、厚度、硬度、耐腐蚀性、附着力等。检测设备及条件如表1所示。

表 1 检测设备及条件

检测项目	检测设备	检测条件与关键参数
外观	体视显微镜（放大倍数 10 倍~50 倍）	室温；自然光或白色光源照射；目视距离 300mm±50mm
厚度	涂层测厚仪	室温；选取零部件不同部位至少 5 个测点，测点间距≥10mm，去除最大值与最小值后取算术平均值
硬度	显微硬度计	室温；试验力 1N，保载时间 15s，每个样件测试 5 个点，去除最大值与最小值后取算术平均值，压痕应位于膜层横截面或经确认的厚膜区域表面
耐腐蚀性	盐雾试验箱	中性盐雾（5% NaCl 溶液）；温度 35°C±2°C；连续喷雾
附着力	划格器、胶带	室温；划格间距 1mm；胶带粘贴力≥10N/cm ² ，胶带粘贴后压实，以 60°角在 0.5-1.0 秒内快速撕离

12.2 检测方法

12.2.1 外观检测

将样件置于体视显微镜下，观察膜层表面是否存在裂纹、气孔、脱落、色差等缺陷，记录缺陷位置、大小及数量。

12.2.2 厚度检测

按照GB/T 4956—2003进行检测，在样件表面均匀选取5个测点，去除最大值和最小值后取平均值作为膜层厚度。

12.2.3 硬度检测

按照GB/T 9790—1988进行检测，在膜层横截面选取5个不同区域进行测试，取平均值作为膜层硬度。

12.2.4 耐腐蚀性检测

按照GB/T 10125—2021进行中性盐雾试验，试验时间不低于500h，试验过程中每24h观察一次样件表面腐蚀情况，试验结束后记录腐蚀面积占比。

12.2.5 附着力检测

按照GB/T 9286—1998进行检测，用划格器在膜层表面划1mm×1mm的网格（深度至基材），用胶带紧密粘贴网格区域后快速撕离，观察网格边缘膜层脱落情况，评定附着力等级。

12.3 检测结果评价

12.3.1 外观要求

膜层表面应均匀一致，呈灰色或深灰色，无明显裂纹、气孔、脱落及明显色差，缺陷面积占比 $\leq 1\%$ 。

12.3.2 厚度要求

膜层厚度应控制在 $50\mu\text{m}\sim 150\mu\text{m}$ ，同一零部件上膜层厚度偏差 $\leq \pm 10\mu\text{m}$ 。

12.3.3 硬度要求

膜层显微硬度 $\geq 350\text{HV}$ 。

12.3.4 耐腐蚀性要求

中性盐雾试验600h后，样件表面无明显腐蚀点，腐蚀面积占比 $\leq 5\%$ 。

12.3.5 附着力要求

附着力等级不低于1级（网格边缘无脱落或脱落面积 $\leq 5\%$ ）。

12.3.6 合格判定

所有检测项目均满足7.3.1~7.3.6要求时,判定该批次膜层合格;若有一项不满足,需加倍抽样复检,复检合格则判定合格,复检仍不合格则判定该批次不合格。

12.4 检测报告

检测报告应至少包含以下内容,确保信息的完整性和可追溯性:

- a) 产品名称;
- b) 批次编号;
- c) 样件数量;
- d) 检测项目;
- e) 检测设备;
- f) 检测条件;
- g) 原始数据;
- h) 测试结果;
- i) 评价结论;
- j) 检测人员及检测日期。

报告统一命名为《XX 批次镁合金航天航空零部件微弧氧化膜层性能检测报告》。

参 考 文 献

- [1] GB/T 9793—2017 金属和其他无机覆盖层 热喷涂锌、铝及其合金。
 - [2] HB/Z 340—2015 镁合金化学转化膜与阳极氧化膜层技术要求。
 - [3] Q/AG 1020—2018 航天航空零部件表面处理质量控制规范。
-

附录A、槽液的配制、维护、更换周期

槽液配制

配制顺序：先溶解主盐（如铝酸盐、钼酸盐等），再加入络合剂，最后缓慢添加分散剂。

水质要求：使用GB/T 6682-2008三级水（电导率 $\leq 0.5\text{mS/cm}$ ）。

熟化时间：溶液需熟化24小时以上，确保组分充分络合。

基材适配：

镁合金：铝酸盐-钼酸盐体系，加1-2g/L氟化钠。

槽液维护

液位控制：槽液波动不超过 $\pm 5\text{mm}$ ，防止边缘效应导致膜层不均。

温度管理：需配备热交换制冷系统，控制槽液温度（通常 $20\text{-}60^\circ\text{C}$ ）。

杂质清除：定期清理液面漂浮物、油污及脱落工件，避免污染。

阴极材料：不锈钢、碳钢或镍制成，需定期打磨或更换。

参数监控：电压 $400\text{-}750\text{V}$ ，电流密度约 $0.01\text{-}0.1\text{A/dm}^2$ （部分工况可达 8A/dm^2 ）。

更换周期

定期分析：每生产周期检测游离酸浓度和金属离子含量（如铝、铁）。

更换条件：

酸浓度低于下限或金属离子超标时，排放 $1/4\text{-}1/3$ 槽液并补充新液。

沉淀物过多或槽液老化时，需彻底清槽并更换。

维护频率：一般每年清槽一次，阴极板视污染情况更换。

注意事项

安全防护：高电压操作需防触电，槽液温度上升快需及时冷却。

工艺优化：时间越长膜层致密性越好，但粗糙度增加，需平衡工艺参数。

附录B、常见故障及排除方法

烧蚀问题

夹具问题：夹具与样品接触不紧固或夹具表面氧化膜未及时打磨，导致能量传递不均。

工艺参数不当：瞬时能量（电流/电压）过高，或脉冲占空比、频率设置不合理，引发局部过热。

材料缺陷：样品表面存在基体缺陷、杂质元素或铸造偏析，易在微弧阶段形成固定弧斑。

排除方法

夹具优化

确保夹具与样品紧密接触，避免松动。

定期打磨夹具表面氧化层，保持导电性。

工艺参数调整

采用阶梯式升压，避免电压瞬时过高。

优化脉冲参数：降低占空比（延长冷却时间）或调整频率，减少局部热积累。

材料预处理

清除样品表面杂质、脱模剂残留，修复铸造缺陷。

使用辅助阴极改善电场分布，抑制边缘烧蚀。

电解液控制

监控电解液温度，避免过热导致起弧电压降低。

其他故障

膜层疏松：可能因电解液成分或浓度不当，需调整配方。

结合力不足：需确保基体清洁度及氧化膜均匀性。

附录C、工艺流程图

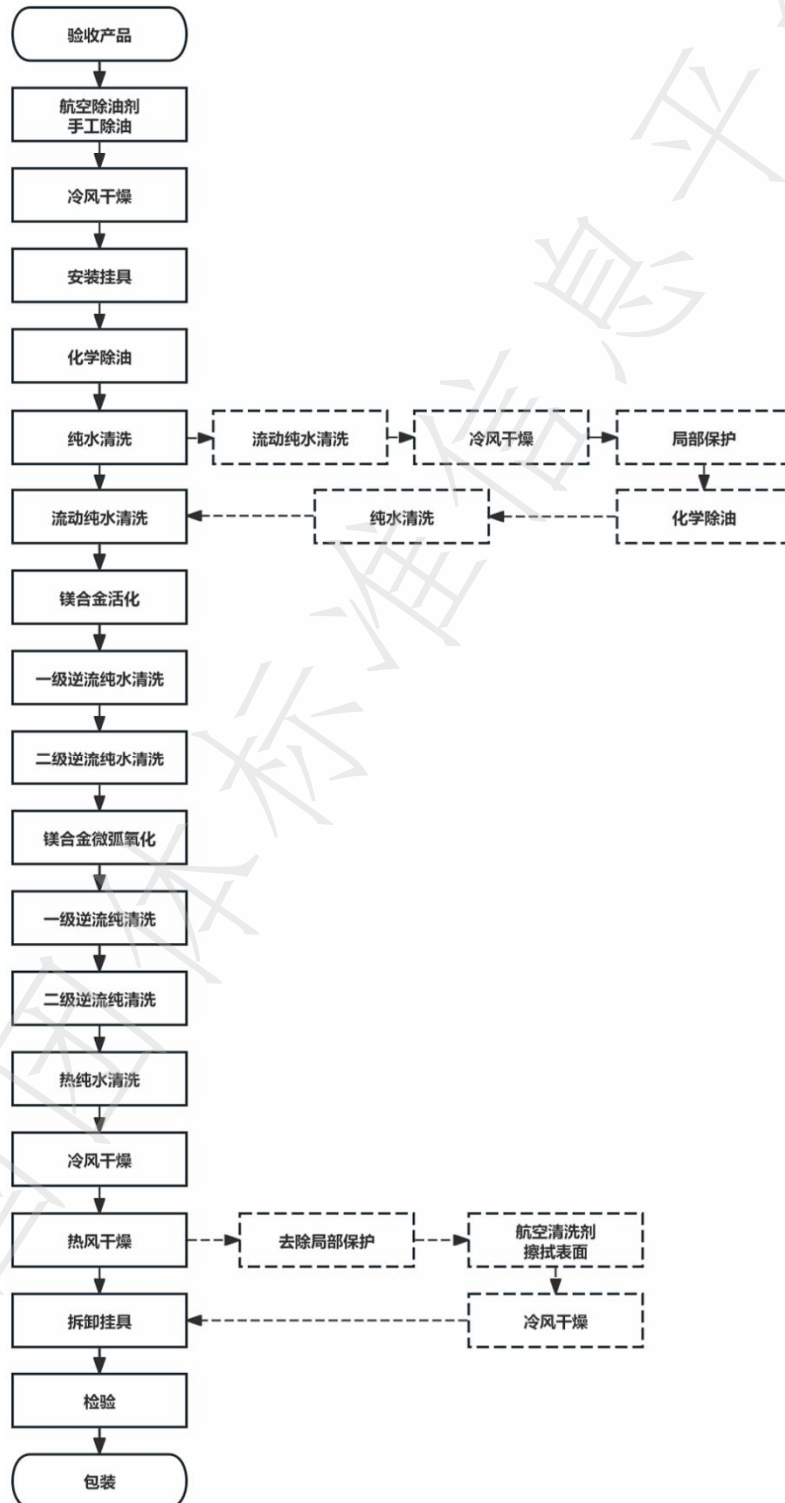


图1 工艺流程图