

# 镁合金三旋轮热强力旋压成形质量智能化调控数字孪生预测模型技术要求

## 1 主要工作内容

围绕航空航天等领域对高性能镁合金（VW93M）复杂薄壁构件的制造需求，系统研究成形工艺参数与零件成形质量的关联关系，通过热力耦合工艺仿真获取数据集，训练机器学习预测模型，开发逆向自适应控制算法，形成镁合金三旋轮热强力旋压成形质量智能化调控数字孪生预测模型，实现对薄壁回转体零件成形质量的精确预测与在线调控。

## 2 工艺参数与成形质量相关性研究工作

查阅相关文献及资料，调研 VW93M 镁合金材料三旋轮热强力旋压成形工艺参数与成形质量的关联关系，提供工件加热温度、主轴转速、进给比与成形质量（主要为壁厚预测，喇叭口、起皱的缺陷预测）的耦合关系图，制定各工艺参数的合理范围，确定有限元仿真工艺参数的波动范围。甲方提供该材料在不同温度下的应力应变压缩试验数据。

## 3 成形质量在线检测的研究

调研可用于本项目的成形质量检测手段，包括但不限于视觉、热成像、超声波、激光测距等无损检测技术，检测技术手段要求为在线式，满足镁合金旋压现场工况。检测结果用于辅助预测模型提

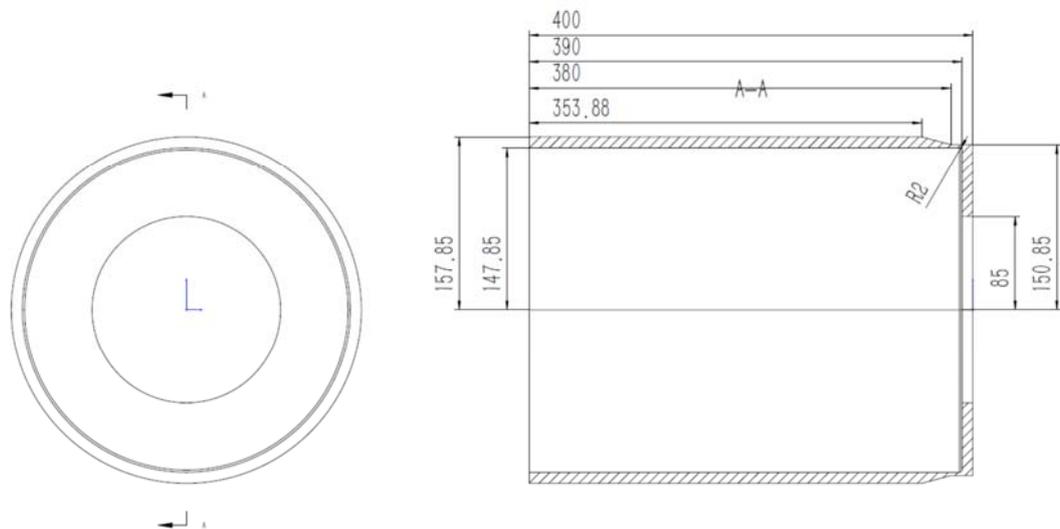
升预测精度，具体检测方式由乙方提交成形质量检测调研报告，并由双方根据质量预测的需求，协商确定在线检测技术的规格参数、数据格式和通信方式等，在线检测系统/装置由甲方完成。

## 4 成形质量预测模型

### 4.1 镁合金三旋轮热加工有限元模型构建

乙方案针对 VW93M 镁合金材料，以及甲方提供的长直薄壁管件旋压加工为典型件，采用 COMSOL、ANSYS 或 ABAQUS 等有限元仿真软件建立三旋轮热强力旋压过程中的热-力耦合有限元模型，进行典型件仿真计算与后处理分析，并结合甲方提供实验数据进行模型验证、优化。

典型件的毛坯规格尺寸如下：



### 4.2 构建工艺参数与成形质量数据集

基于构建的有限元模型，根据乙方研究结果确定有限元仿真工艺参数的波动范围（正常值的 $\pm 20\%$ ），设计正交试验仿真，根据正交表仿真次数不少于 27 次，0%的正常工艺参数进行不少于 3 次

的扩充仿真。以此构建由不同工艺参数与对应成形质量组成的数据集。

通过数据清洗剔除无效数据、统一数据格式，使仿真数据符合模型输入要求。对仿真数据集的样本数据进行归一化处理，统一数据格式、维度，方便计算以及避免部分神经元达到过饱和。采用移动平均或者高斯滤波算法对噪声数据进行平滑处理，通过数据标注将“预测目标”与样本关联，采用自动标注、规则标注等方法。根据数据类型选择数据增强方法（例如加入噪声，SMOTE、几何变换或噪声叠加等），且符合仿真场景的物理逻辑。

处理后的数据集使用数据库保存，包括但不限于 SQLite、Parquet 或 ClickHouse 数据库，乙方提供处理后的数据库文件。

数据集的 20%用于测试预测模型的准确度。

#### 4.3 预测模型的训练和优化

使用 ML.NET、Python、PyTorch 或 TensorFlow 进行模型训练。

模型输入参数：

工件加热温度、主轴转速、旋轮进给量以及进给比，或其他与成形质量相关的工艺参数。

模型训练过程：

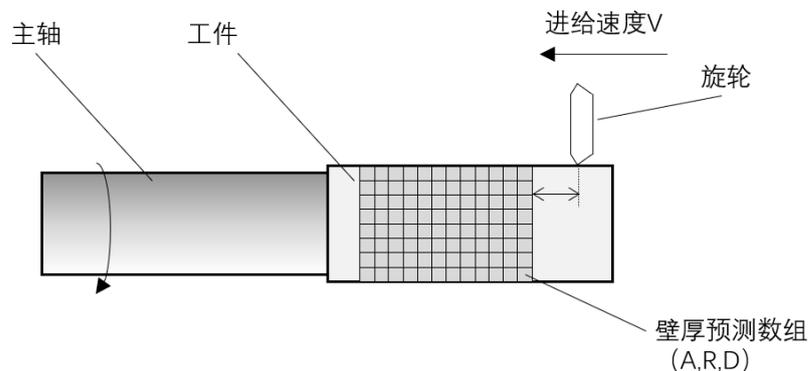
模型训练过程包括离线基础训练和在线动态优化。离线基础训练主要使用仿真数据所构建的数据集和历史监测数据集作为训练集进行训练，无需实时数据；在线动态优化是在运行时实时监测数据（传感器采集数据），通过轻量、低延迟的方法优化预测模型，

提高预测结果的实时准确性。

预测模型输出结果：

预测模型输出结果为成形质量的实时预测值，包括零件的壁厚预测，喇叭口、起皱等的缺陷预测。

将加工零件按照径向等角度划分，轴向等距离划分为序列节点，各节点的壁厚特征值可以用三维数组（轴向位置，径向角度，壁厚预测值）描述。零件壁厚的预测是基于实时工艺参数输入数据后，输出下一系列节点的特征值（轴向位置，径向角度，壁厚预测值）。乙方的模型提供基于此种划分的数组数据集，用于甲方的可视化进行壁厚预测模型展示。



喇叭口、起皱等的缺陷是基于实时工艺参数输入数据后，预测该工艺参数组合下产生缺陷的概率（0-100%）。

预测模型校准及优化：

甲方提供不少于 20 组不同工艺组合的现场加工实际数据，乙方根据实际数据集对模型进行优化，校准对现实数据预测的准确性。

模型性能指标：

预测模型从输入参数到输出结果的反应时间小于 100ms，以便于集成到甲方的实时系统。优化后的模型预测指标：召回率 $\geq 90\%$ ，召回率通过人工制造缺陷样本测试。

#### 4.4 反向自适应工艺优化算法

模型基于预测结果，和工艺参数与成形质量之间的关系，对实时的工艺参数进行反向自适应优化，并提供基于工件加热温度、主轴转速、旋轮进给量的建议值。并提供建议值的数据接口。

#### 4.5 预测模型的部署

预测模型格式要求为 ONNX、TensorRT、TFLite、OpenVINO 或框架原生格式中的一种。

模型可集成在甲方的可视化系统中，可视化系统运行环境为 win11。

#### 4.6 预测模型验证指标

预测模型部署于甲方可视化系统后，甲方提供实时采集的预测模型所需的工艺参数数据，模型在现场端部署后，根据现场实际数据进行优化，优化后的精度指标如下：

序号	预测维度	预测指标	考核标准
1	成形质量	壁厚	预测值与实测值的平均相对误差 $\leq 10\%$
2	成形缺陷	喇叭口、起皱	预测准确率 $\geq 90\%$

#### 4.7 预测模型的数据交互接口

表 4.7-1 输入数据

序号	项目	类型	备注
1	工件毛坯尺寸	输入	单位 mm
2	成形质量在线检测数据	输入	形式待定
3	工件加热温度	输入	单位 °C
4	主轴转速	输入	单位 rpm
5	旋轮进给量	输入	单位 mm，三个旋轮
6	轴向旋轮力	输入	单位 N
7	径向旋压力	输入	单位 N
注:预留接口用于甲方提供其他有价值的输入数据			

表 4.7-2 输出数据

序号	项目	类型	备注
1	工件壁厚预测值	输出	壁厚预测数组 (A, R, D), 单位 mm、度、mm
2	喇叭口、起皱缺陷	输出	百分比
注:预留接口用于提供其他有价值的的数据			

## 5 交付物清单

乙方应按以下清单向甲方交付成果:

序号	交付物	数量
1	仿真产生的测试数据库文件	1 套

2	镁合金三旋轮热强力旋压成形质量智能化调控数字孪生系统预测模型及源代码	1套
---	------------------------------------	----

## 6 进度计划

2026年6月31日之前完成。

## 7 知识产权及保密要求

本项目所涉及的任何研究内容及成果，未经甲方允许，禁止公开发表。

本项目所涉及到的所有材料、零件、设备数据，禁止向任何第三方公开或传播，并在签署合同时一并签署保密协议。