



# 团 体 标 准

T/CWAN 0170—2025

## 大模型技术应用于自适应焊接的技术要求与评估规范

Specification for technical requirements and evaluation of large model technology for  
adaptive welding

2025-12-31 发布

2026-02-01 实施

中国焊接协会 发布

## 目 次

前 言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
4 技术要求 .....	3
5 评估规范 .....	7
6 安全要求 .....	12
附录 A（资料性）焊接缺陷库 .....	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。

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。

本文件由中国焊接协会提出并归口。

本文件起草单位：中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、北京博清科技有限公司、上海昇视唯盛科技有限公司、山东奥太电气有限公司、上海中巽科技股份有限公司、中焊科技发展（哈尔滨）有限公司、北京理工大学（珠海）、哈尔滨华德学院、广西柳工机械股份有限公司、北部湾大学、哈尔滨职业技术大学、安徽博清机器人科技有限公司、南昌职业大学、黑龙江科技大学、坤智大数据科技（哈尔滨）有限公司。

本文件主要起草人：范东辉、石玮、冯消冰、王德钊、李志勇、王铭秋、张焱、于兴华、郝亮、侯国清、邓军林、杨泽坤、韩滕跃、武鹏博、王滨滨、李哲林、李海龙、李爱民、吕涛、张大林、王永东、赵贺新、于修和、黎泉、周坤、于春洋。

# 大模型技术应用于自适应焊接的技术要求与评估规范

## 1 范围

本文件规定了大模型技术应用于自适应焊接的术语和定义、基本要求、技术要求、评估规范及实施与维护等内容。

本文件适用于基于大模型技术实现自适应焊接的自动化焊接设备及工艺体系,覆盖碳钢、低合金钢、不锈钢等材料的焊接场景,涉及汽车制造、航空航天、轨道交通、钢结构工程、压力容器等领域的熔化极气体保护焊(MIG/MAG)焊接与非熔化极惰性气体保护电弧焊(TIG)焊接方法。

## 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 700 碳素结构钢

GB/T 1591—2018 低合金高强度结构钢

GB/T 2650—2022 金属材料焊缝破坏性试验 冲击试验

GB/T 2651—2023 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验

GB/T 2652—2022 金属材料焊缝破坏性试验 熔化焊接头焊缝金属纵向拉伸试验

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 4171—2008 耐候结构钢

GB/T 17235.1 信息技术 连续色调静态图像的数字压缩及编码 第1部分:要求和指南

GB/T 17626.3—2023 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分:射频电磁场辐射抗扰度试验

GB/T 19866—2005 焊接工艺规程及评定的一般原则

GB/T 19867.1—2005 电弧焊焊接工艺规程

GB/T 19867.2—2008 气焊焊接工艺规程

GB/T 19418-2003 钢的弧焊接头 缺陷质量分级指南

GB/T 20878—2024 不锈钢 牌号及化学成分

GB/T 31496—2023 信息技术 安全技术 信息安全管理体系 指南

GB/T 33475.2—2024 信息技术 高效多媒体编码 第2部分:视频

GB/T 33475.3—2018 信息技术 高效多媒体编码 第3部分:音频

GB/T 41867—2022 信息技术 人工智能 术语

GB/T 42755—2023 人工智能面向机器学习的数据标注规程

GB/T 45288.1—2025 人工智能 大模型 第1部分：通用要求

GB/T 45288.2—2025 人工智能 大模型 第2部分：评测指标与方法

GB/T 45288.3—2025 人工智能 大模型 第3部分：服务能力成熟度评估

### 3 术语和定义

GB/T 41867—2022界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### **自适应焊接系统 adaptive welding system**

集成多模态传感、大模型决策、执行控制的闭环系统，基于焊接过程实时数据动态调整工艺参数（电流、电压、焊接速度等），以保证焊接质量稳定性的焊接过程，具有参数自优化、路径自校正的特征。

#### 3.2

##### **焊接大模型 welding large-scale model**

基于焊接领域知识图谱、工艺数据及缺陷样本训练的人工智能模型，能够基于多模态输入数据实现焊接工艺参数计算推理、缺陷诊断、路径规划等功能的大模型。

注：焊接大模型的参数量由其功能和模态决定，一般参数量 $\geq 1$ 亿。焊接大模型训练使用的数据总量受参数量的影响，达到收敛的焊接大模型的参数量的对数与其训练数据总量的对数成正比。

#### 3.3

##### **焊接工艺参数预测 welding process parameter prediction**

通过输入焊接工况信息使用焊接大模型推理的结果，具备一定指导性和准确性的焊接工艺参数。

#### 3.4

##### **多模态传感融合 multimodal sensor fusion**

通过视觉（2D/3D相机）、声学（声传感器）、电学（电流/电压传感器）、热学（红外热像仪）等多类型传感器，实现焊接区域图像、电弧声纹、电信号波形、温度场分布等数据的同步采集与融合处理。

#### 3.5

##### **模型适应性 model adaptability**

焊接大模型在焊接工况波动（如电网电压变化、气体流量波动、工件装配偏差）及数据噪声干扰下，保持稳定输出与控制精度的能力。

#### 3.6

##### **焊接工艺知识库 welding process knowledge base**

存储焊接材料特性、坡口形式、工艺参数组合、缺陷处理方案等结构化数据的数据库，为大模型推理提供领域知识支撑，需定期更新行业最新工艺标准。

#### 3.7

##### **大模型再学习 large-scale model relearn**

在大模型已训练完成的基础上，无需重新训练全部数据，仅通过补充新场景、新材料或新工况下的少量数据，实现模型性能迭代优化的学习方式，可有效降低模型更新的时间与算力成本。

## 4 技术要求

### 4.1 模型架构

自适应焊接大模型应采用“感知层-决策层-执行层”三层分布式架构，各层级功能与交互要求如下：

a) 感知层：应由 2D/3D 视觉、电弧声纹、电参数监测、红外温度等多种传感器组成，实现多模态数据的实时采集与预处理；

b) 决策层：应包含大模型推理引擎、焊接工艺知识库、参数优化、缺陷诊断等功能模块，负责焊接状态评估与控制指令生成；

c) 执行层：接收决策层指令后，应调整焊接电源、送丝机构、送气单元、执行机构等相应的焊接工艺参数。

### 4.2 性能要求

应用于自适应焊接的大模型应具备以下能力：

#### a) 推理能力：

1) 若具备焊中缺陷检测能力，应对焊接过程中熔池出现的粘连、气孔等典型缺陷进行检测，对于单个缺陷区域最小外接矩形面积 $\geq 10 \text{ mm}^2$ 且矩形最短边长度 $\geq 3 \text{ mm}$ 的显著缺陷，熔化极气体保护焊的检测准确率应 $\geq 85.5\%$ 、召回率应 $\geq 88\%$ 、误检率应 $\leq 12.0\%$ ，非熔化极惰性气体保护电弧焊的检测准确率应 $\geq 88\%$ 、召回率应 $\geq 90\%$ 、误检率应 $\leq 10.0\%$ 。而对于单个缺陷区域最小外接矩形面积 $< 10 \text{ mm}^2$ 或矩形最短边长度 $< 3 \text{ mm}$ 的非显著缺陷，熔化极气体保护焊的检测准确率应 $\geq 80\%$ 、召回率应 $\geq 82\%$ 、误检率应 $\leq 18.0\%$ ，非熔化极惰性气体保护电弧焊的检测准确率应 $\geq 85\%$ 、召回率应 $\geq 85\%$ 、误检率应 $\leq 15.0\%$ ；

2) 若具备焊后缺陷检测能力，应对焊接完成后焊道表面存在人眼可见的气孔、夹渣、未焊透、未熔合、裂纹、凹坑、咬边、焊瘤等典型缺陷进行检测，在不同工况和环境下，对于单个缺陷区域最小外接矩形面积 $\geq 10 \text{ mm}^2$ 且矩形最短边长度 $\geq 3 \text{ mm}$ 的显著缺陷，熔化极气体保护焊的检测准确率应 $\geq 87.5\%$ 、召回率应 $\geq 90\%$ 、误检率应 $\leq 10.0\%$ ，非熔化极惰性气体保护电弧焊的检测准确率应 $\geq 90\%$ 、召回率应 $\geq 91.5\%$ 、误检率应 $\leq 8.0\%$ 。而对于单个缺陷区域最小外接矩形面积 $< 10 \text{ mm}^2$ 或矩形最短边长度 $< 3 \text{ mm}$ 的非显著缺陷，熔化极气体保护焊的检测准确率应 $\geq 85\%$ 、召回率应 $\geq 88\%$ 、误检率应 $\leq 15.0\%$ ，非熔化极惰性气体保护电弧焊的检测准确率应 $\geq 87\%$ 、召回率应 $\geq 88\%$ 、误检率应 $\leq 13.0\%$ ；

3) 应具备参数预测能力，对焊接电流、焊接电压、焊接速度、送丝速度、执行机构路径进行准确预测，其中，焊接电流、电压预测值与工艺评定最优值的偏差不宜超过 $\pm 3\%$ ，焊接速度、送丝速度调整精度应优于 $\pm 0.5 \text{ mm/min}$ ；

4) 应具备实时推理能力，在 GPU 显存为 24 GB、内存 64GB DDR5/HBM 硬件配置下，从数据输

入到控制指令输出的响应时间应 $\leq 50$  ms，单次焊接大模型推理时间应 $\leq 30$  ms；

5) 宜具备结果纠正能力，若在同一任务下，实时推理结果数据相较于之前推理结果具有较大偏差，应对此次推理结果进行纠正或过滤；

6) 应具有模型推理加速优化功能，如并行化加速推理、循环分块推理、量化推理等。

b) 适应能力：

1) 若出现电网电压波动，且电压波动 $\leq 15\%$ 时，模型输出参数稳定性偏差应 $\leq 2\%$ ；

2) 若发生气体流量波动，且流量变化 $\leq 20\%$ 时，焊缝成形质量（熔宽、余高）偏差应 $\leq 0.5$  mm；

3) 若发生工件温度变化，且温度变化 $\leq 100$  °C时，模型推理准确率下降应 $\leq 3\%$ ；

4) 若出现装配尺寸偏差，且错边量 $\leq 2$  mm、间隙 $\leq 3$  mm，模型推理准确率下降应 $\leq 5\%$ ；

5) 宜支持 10~30 mm 不同厚度母材的缺陷检测及参数预测功能；

6) 若出现单路传感器（非核心）故障时，模型应能基于其他模态数据正常推理，模型推理准确率下降应 $\leq 10\%$ ；

7) 若发生模型推理超时（ $> 50$  ms），超时后应自动切换至备用推理引擎并进行纠正、过滤及记录，若无备用推理引擎，应进行报警、纠正、过滤及记录。

c) 学习能力

应支持增量学习、跨场景迁移、知识库更新，并具备 OTA 远程更新功能，其中，增量学习单次微调数据量应 $\leq 100$  组焊接循环，跨场景迁移适应新工况数据量应 $\leq 300$  个焊接循环，工艺知识库更新后，推理准确率应无下降。

#### 4.3 数据要求

数据应覆盖数据采集、数据处理、数据标注、数据管理等要求，具体内容如下：

a) 数据采集

1) 图像数据：2D 图像分辨率应 $\geq 720 \times 576$  像素，采集帧率 $\geq 30$  fps，格式应为\*.png、\*.tiff、\*.bmp、\*.jpeg、\*.webp 等常用图像格式，并应符合 GB/T 17235.1—1998 的要求；

2) 视频数据：视频帧率 $\geq 30$  fps，视频格式应符合 GB/T 33475.2—2024 的要求；

3) 点云数据：点云数据：基础级 3D 点云点间距 $\leq 0.3$ mm、Z 向重复精度 $\geq 0.2$ mm；高端级点云点间距 $\leq 0.1$ mm、Z 向复精度 $\geq 0.1$ mm（VDI/VDE 2634 Part 2 标准），格式应为\*.ply、\*.pcd 等常用格式；

4) 线结构光数据：基础级帧率 $\geq 30$ fps；高端级帧率 $\geq 50$ fps，中心视野 Y 向分辨率 $\leq 0.1$ mm、平均深度分辨率 $\leq 0.1$ mm；

5) 电弧声纹数据：采样率应 $\geq 44.1$  kHz，采样精度宜 $\geq 16$  bit，应覆盖 20 Hz~20 kHz 频率范围，音频格式应符合 GB/T 33475.3—2018 的要求；

6) 电源参数数据：电流、电压采集误差应控制在 $\pm 2\%$ 以内，采样频率应 $\geq 1$  kHz；

7) 送丝速度数据：送丝速度采集量程应在 0~50 m/min 范围，送丝速率采集精度应 $\geq 1.5\%$ ；

8) 气体流量数据：应可直接测量 CO<sub>2</sub>、Ar 等保护气体流量，最大流量应≥40 SLPM，精度应控制在±2.3 FS%范围内；

9) 温度数据：测温范围应在-30 °C~1500 °C，温度测量精度应≤2 °C，采样频率应≥2 Hz；

10) 湿度数据：测量范围应在 0~100% RH，精度应在±5% RH 范围内；

11) 大气压数据：测量范围应覆盖 100~1000 hPa，在-40 °C~+60 °C环境下应保持±0.5 hPa 的精度；

12) 控制指令数据：数据格式应为常见消息报文体格式，如 JSON、XML、YAML 等，应涵盖指令 ID、参数类型、目标值、调整步长、生效时间戳等字段。

#### b) 数据处理

1) 图像处理：图像在去噪、滤波、刚体变换、形态学运算等处理方式后应保留完整的焊缝/焊道表面特征；

2) 点云处理：点云在降采样、过滤、去噪等处理方式后应保留完整的焊缝/焊道形貌信息，焊缝/焊道特征（左右坡口、宽度、高度等）提取准确性应≥98%，特征提取及尺寸测量精度应≥0.1 mm；

3) 信号处理：电弧声纹、电流、电压采集、送丝速度等数据处理完成后应保持时序对齐和格式统一，如在某个时间节点上格式应统一为字符串类型或浮点型小数；

4) 数据清洗：通过人工或结合深度学习方法去除图像、点云、信号等数据中重复、无效、错误的的数据去除；

5) 数据对齐：通过人工或结合深度学习方法去除图像、点云、信号等数据应按照时间序列的方式进行对齐处理；

6) 数据诊断：应具备多源原始数据在时序上的完整性检查、空值检查和规则校验等能力；

7) 数据分析：宜具备数据集内不同标注数据以及不同版本数据集之间的统计分析功能，对比数据分布差异。

#### c) 数据标注

1) 图像标注应使用 LabelMe、LabelImg、LabelTrack 等常用标注软件，标注数据格式应为\*.xml、\*.txt、\*.json、\*.yaml 等常用格式，且不同人员标注的一致性 Kappa 系数应≥0.8；

2) 文本标注应将工况信息、电流电压数据等文本分配到预先定义好的类别中，可以进行命名实体识别（NER），建立实体之间的关联关系，并应建立图像与对应的文本描述之间的关联标注，且不同人员标注的一致性 Kappa 系数应≥0.85；

3) 语音标注应将语音数据与对应的文本转录数据或者映射数据进行对齐标注，其中文本转录中标点符号的使用和映射数据的方式应具有统一使用标准，环境干扰噪声、设备运行噪声与特殊音效（操作人员主观发出的声音）需标注或过滤。

#### d) 数据管理

1) 宜建立分级权限管理体系，分为管理员、操作员、观察员三级权限；

2) 对于敏感数据（工艺参数、缺陷数据）应进行脱敏处理，仅管理员可查看完整数据；

3) 应具备日志信息管理功能, 可根据日志追溯访问人员、时间、操作内容、推理结果数据和进行故障定位及排查, 数据访问日志保存期限应 $\geq 1$ 年, 包含访问人员、时间、操作内容;

4) 宜具备支持数据追溯能力, 每批数据关联唯一批次号, 可追溯采集设备、操作人员、焊接工件等信息;

5) 应提供数据管理工具, 宜具备对原始数据、中间数据及产出数据进行增添、删除、修改、查询、检索、分析等操作的功能;

6) 应兼容多种数据存储方式, 例如分布式云存储和本地存储等。

#### e) 数据质量

1) 数据应具有完整性, 每批数据缺失率应 $\leq 1\%$ ;

2) 数据应具有时序一致性, 同一焊接任务的多模态数据时间戳偏差应 $\leq 3$  ms;

3) 数据应具有有效性, 在剔除错误、无效、重复等异常值后, 有效数据占比应 $\geq 95\%$ 。

#### 4.4 接口要求

a) 应提供标准化 API 接口, 支持 C++/Python/Java 等编程语言;

b) 应支持与主流工业控制系统通信交互功能, 例如西门子、汇川、三菱等;

c) 应支持数据重传机制, 宜具备重传次数 $\leq 3$ 次时数据接收成功率 $\geq 99.9\%$ 。

#### 4.5 可靠性要求

a) 模型输出异常率应 $\leq 1\%$ , 异常状态下应自动触发安全模式(切断焊接电源、执行机构停止运动);

b) 应具备系统断电后重启至正常工作状态的时间 $\leq 30$  s, 重启后模型参数与工艺数据无丢失;

c) 应具备模型、数据、文件周期性备份功能, 例如每周对现有焊接大模型、采集的数据、保存的文件进行备份;

d) 应具备执行状态任务跟踪功能, 并对异常任务进行提示;

e) 应具备资源受限、模型失效、通信中断后持续提供或恢复服务的能力, 如具备历史版本调用、工艺参数保存、采集数据存储的能力等。

#### 4.6 开发环境要求

a) 应提供模型训练、微调、迁移及调优工具和方法流程, 并应具有模型部署到生产环境的标准流程, 降低系统整合的风险;

b) 应具备涵盖串行通讯、现场总线通讯、以太网通讯等方式的通信脚本或算子库;

c) 宜具备实时一站式图形界面调试环境, 例如开发环境可直接查看图像、信号、音频和视频等输入数据及模型推理输出结果;

d) 应具备计算资源的分配与调度能力, 并应具备单步调试功能;

e) 应具备模型多种精度(如 FP32、FP16、TF32 和 BF16)转换功能, 面向不同的推理精度和实时性需求, 转换不同的模型精度;

f) 应具备包括数据多线程采集、处理及多模型并行推理能力;

g) 宜具备边云协同的服务插件开发功能,如实现模型的边云同步和证书管理等。

#### 4.7 兼容性要求

##### a) 软件兼容性

- 1) 应具备软件服务的兼容性,其他应用程序和软件能够正常运行;
- 2) 应兼容主流操作系统(如 Windows、Linux),兼容多种编程语言(如 C/C++、Python、Java 等);
- 3) 应具备接口数据信息传递和互操作功能;
- 4) 应具备焊接知识库、焊接大模型、控制指令更新、迭代、优化内容提示功能;
- 5) 应兼容不同工况环境下,多源数据采集、焊接知识库、焊接大模型、控制指令等模块的优化和扩展功能。

##### b) 硬件兼容性

- 1) 应兼容多种计算引擎,例如 CPU、单 GPU、多 GPU;
- 2) 应兼容多种数据存储方式,例如分布式云存储和本地存储等;
- 3) 应兼容多种网络连接方式,例如以太网(Ethernet)和 InfiniBand 网络;
- 4) 宜兼容多种计算推理平台,例如本地服务器和云端服务器。

#### 4.8 安全要求

- a) 不应未经授权将数据进行导出,导出数据应添加水印(含设备编号、时间戳、操作人员);
- b) 应具备对焊接工艺知识库、大模型权重的防篡改能力以及保护能力;
- c) 应具备将实时采集数据、模型推理结果、控制响应状态等任务详细信息实时保存到日志的功能;
- d) 应划分多个权限等级,例如管理员(全权限)、操作员(操作与数据查看)、观察员(仅数据查看);
- e) 应具备多源数据采集和处理、焊接大模型推理和执行控制输出的稳健性和实时性评估能力;
- f) 应具备部分数据采集算法、焊接大模型、数据处理算法、通信算法和控制方法的可解释能力;
- g) 不应安装非授权软件,知识库、模型及算子库等更新后需经测试验证后实施,避免影响正常运行;
- h) 应具备对用户的访问历史、修改记录、拷贝内容查询能力;
- i) 应具备运行环境的监控能力,包括底层资源的统一监控,如 CPU/GPU 利用率和温度、处理系统内存使用率等;
- j) 应具备传感设备的监控能力,包括各类传感器是否到达正常使用的温度临界点、数据通信是否发生中断、传感器是否出现故障报警等;
- k) 宜提供主要监控指标的图表或文字可视化功能;
- l) 应屏蔽非法输入;
- m) 应定期检查散热系统,确保通风良好。

## 5 评估规范

### 5.1 评估环境

提供者应提供评估环境文档,内容应包括:物理环境、测试试件、系统运行环境、传感器信息、设

备型号及参数、自适应焊接平台设计图纸等，具体内容如下：

a) 物理环境：文档内物理环境部分应涵盖环境温度、湿度及测试评估时的电磁辐射，并且应具备波动范围，具体如下：

- 1) 环境温度：温度变化应在  $20\pm 15$  °C 范围内；
- 2) 相对湿度：湿度应在  $30\pm 20$  %RH 范围内；
- 3) 电磁辐射：辐射强度应  $\leq 30$  V/m (1 MHz~1 GHz)，并符合 GB/T 17626.3—2023 的相关要求；

b) 测试试件：文档内测试试件部分应涵盖材料类型、试件尺寸、坡口形式及表面处理方式，具体如下：

1) 材料类型：在提供者提供的测试材料中普通碳素钢应符合 GB/T 700、低合金高强度结构钢应符合 GB/T 1591—2018、耐候结构钢应符合 GB/T 4171—2008、不锈钢应符合 GB/T 20878—2024 的相关要求；

2) 试件尺寸：同一测试材料应提供  $\geq 6$  种不同规格的试件尺寸；

3) 坡口形式：应涵盖 V 型、U 型、X 型等常见坡口，坡口角度应在  $20^\circ\sim 60^\circ$  之间，且应允许存在  $\pm 0.5^\circ$  的加工公差；

4) 钝边尺寸：应在 1 mm~3 mm 之间，且应允许存在  $\pm 0.5$  mm 的加工公差；

5) 表面处理：表面除锈 Sa 应  $\geq 2.5$  级、油污清除所残留的油分应  $\leq 5$  mg/m<sup>2</sup>、水分清除所残留的水分应目视无可见水分和水迹。

c) 系统运行环境：

1) 操作系统应满足焊接大模型、相关软件、算子库的安装部署；

2) 推理引擎应满足焊接大模型实时计算推理的算力需求；

3) 相关软件及算子库应满足数据处理和通信的功能需求；

4) 硬盘存储空间应满足日志和知识库的存储需求。

d) 传感器信息：应明确传感器的型号、参数、通信方式和安装方式，具体如下：

1) 应明确传感器具体型号和参数信息，考虑是否存在可替代产品；

2) 应明确传感器通信方式和数据传输方式，预先设定数据交互格式及预留 IP 网段或其他通信接口；

3) 应明确传感器安装方式，若传感器需要进行标定，宜说明标定方法及标定后精度，若传感器需要进行校正，宜说明校正方式及校正后精度。

e) 设备型号及参数：应确定焊接电源、送丝机构、送气单元和执行机构等设备的型号和参数，以便明确设备通信和控制方式；

f) 平台设计图纸：应具备完整的自适应焊接平台设计图纸，应包括传感器安装方式、执行机构设计及安装方式、操作台放置位置、焊接平台放置位置等。

## 5.2 评估方法

### 5.2.1 多源数据采集评估

多源数据应包括图像数据、点云数据、结构光数据、电流电压、焊接速度、气体流量、焊接区域温

度、声音数据等。多源数据应采集需具备完整性和准确性，数据格式和排列方式应预先定义，并在时序上保持对齐，若在时序节点上，数据若存在数据异常、缺失的情况，应进行过滤处理。

### 5.2.2 数据标注质量评估

开展下列工作以评估数据标注质量情况：

- a) 查看数据标注使用软件和标注机理，检查是否对标注结果采取交叉验证，查看针对不同数据是否具备统一的标注方法；
- b) 通过外部标注团队进行标注的，应查看委托协议或技术协议，查看是否制定质量检查方案，检查标注结果质量；
- c) 统计每种标注类别的数量，防止出现标注数据种出现数据分布失衡的情况。

### 5.2.3 焊接大模型推理性能评估

评估内容包括缺陷检测能力、参数预测能力和实时性评估，详细评估方法和评估标准如下：

#### a) 图像缺陷检测能力：

1) 图像缺陷检测评估方法：可采用附录 A 选取包含 8 类缺陷 $\geq 2000$  张图像，根据视觉传感器安装位置和分辨率，调整待测试图像数据，并由大模型自动识别缺陷类型及位置与样本库标注结果对比；

2) 图像缺陷检测评估标准：每类缺陷检测准确率应 $\geq 85\%$ 、召回率应 $\geq 87\%$ ，平均缺陷检测准确率宜 $\geq 90\%$ 、召回率宜 $\geq 90\%$ 。

1) 点云缺陷检测评估方法：采用附录 A.2 标准焊接缺陷点云库，应选取包含 8 类缺陷 $\geq 1000$  个点云文件，根据视觉传感器安装位置、分辨率和标定参数，调整待测试点云数据，并由大模型自动识别缺陷类型及位置，与样本库标注结果对比；

2) 点云缺陷检测评估标准：每类缺陷检测准确率应 $\geq 80\%$ 、召回率应 $\geq 82.5\%$ ，平均缺陷检测准确率宜 $\geq 85\%$ 、召回率宜 $\geq 85\%$ 。

#### c) 工艺参数预测能力：

1) 工艺参数预测评估方法：首先应选取焊接 $\geq 5$  组不同规格试件，每组 $\geq 10$  个试件，并根据试件的材料、规格、坡口等信息制定基准工艺参数，基准工艺参数需符合 GB/T 19867.1-2005 等国家标准，且需提供至少 3 组连续焊接验证记录（合格率 $\geq 98\%$ ），作为基准有效性证明；然后，分别通过基准工艺参数和大模型推理预测参数，焊接多组试件；最后，对比两组焊接工艺参数（电流、电压、送丝速度、保护气流量）和两组试件的焊缝成形（熔宽、余高、熔深）与力学性能（抗拉强度、冲击韧性）；

2) 工艺参数预测评估标准：通过大模型推理预测参数和基准工艺参数的电流、电压偏差应 $\leq \pm 3\%$ ，焊接速度偏差应 $\leq \pm 5\%$ ，气体流量偏差应 $\leq \pm 10\%$ ，焊缝成形与基准工艺参数和焊缝成形偏差应 $\leq 0.5$  mm，力学性能达标率应 $\geq 98\%$ 、参数调整后焊缝合格率 $\geq 98\%$ 。

#### d) 推理实时性：

1) 实时性预测评估方法：应采用脚本文件或相应软件在大模型运行的不同时间段共计测量 $\geq 1000$  次“数据输入-指令输出”的推理周期；

2) 实时性评估标准：平均推理时间应 $\leq 30$  ms，最大推理时间应 $\leq 50$  ms，超时次数宜 $\leq 2$  次。

#### 5.2.4 功能评估

功能评估包括执行响应速度、消息日志、交互界面等：

a) 执行响应速度评估：应采用脚本文件或相应软件记录控制决策指令到参不同设备执行响应所需的时间，测量次数应 $\geq 200$  次，平均响应时间应 $\leq 20$  ms，最大响应时间应 $\leq 30$  ms；

b) 消息日志评估：查看日志存储功能，检查是否具备完整的日志记录，包括访问人员、时间、操作内容、推理结果数据和异常故障信息等；

c) 交互界面评估：查看交互界面功能、运行流程性及长时间连续运行稳定性。

1) 界面中应涵盖图像、信号、音频和视频等输入数据的内容显示和焊接大模型推理的输出结果；

2) 查看界面中是否具有功能按键，检查功能按键的触发响应稳定性和准确性；

3) 查看界面中应具有权限登录、知识库访问、数据导出等功能；

4) 查看界面在长时间连续（应 $\geq 48$  h）运行和操作下，检查是否出现功能响应延迟、数据显示卡顿和异常中断。

#### 5.2.5 自适应焊接质量评估

通过大模型技术应用于自适应焊接的试件焊接质量应符合包括 GB/T 2650—2022 规定的冲击试验要求、GB/T 2651—2023 规定的拉伸试验要求、GB/T 2653—2008 规定的弯曲试验要求和 GB/T 2654—2008 规定的接头硬度试验要求；

### 5.3 评估实施流程

对大模型技术应用于自适应焊接的评估实施流程应包括评估机制、评估准备、评估方案、评估执行、评估结论及评估报告，具体如下：

#### a) 评估机制

1) 当模型发布时，应在应用前开展评估工作；

2) 当模型发生优化、迭代、迁移等变更情况时，应及时开展评估工作；

3) 当传感器、设备出现型号更换时，应及时开展评估工作；

4) 当无上述 1) 发布情况与 2)、3) 变更情况，宜每年开展异常评估工作。

#### b) 评估准备

1) 应明确焊接大模型安全评估的应用场景、推理目标和焊接质量要求,充分调研焊接领域相关法规政策及标准文件，确定评估工作任务和方向；

2) 一般应以焊接大模型应用人员为主组建评估团队，团队成员可包括管理人员、风险控制人员、电气控制人员、焊接工艺人员、生产操作人员等；

3) 评估团队与评估对象的对接人员应充分了解学习焊接大模型与自适应焊接的相关政策法规和标准；

4) 提供者需提交系统架构图、大模型训练数据集说明（含数据来源、标注报告）、工艺知识库版

本清单、既往 1 个月内应用大模型技术的自适应焊接质量报告等文件；

5) 提供者应调整焊接平台参数，完成传感器的校准和标定；

6) 应按照 5.1 (b) 要求准备测试试件，应对试件坡口尺寸进行测量，并可以对试件材料进行成分检测、力学性能测试，确保试件符合评估要求。

#### c) 评估方案

评估方案的编制应结合评估对象的具体情况，应包括以下内容：

1) 评估范围；

2) 评估环境：其中涉及物理环境、测试试件、系统运行环境、传感器信息、设备型号及参数、平台设计图纸的，评估内容应包括 5.1 所述评估条件；

3) 评估对象；

4) 评估目标；

5) 评估内容：其中涉及多源数据采集、数据标注质量、焊接大模型推理性能、功能评估、自适应焊接质量的，评估内容应包括 5.2 所述评估方法；

6) 实施方法和时间进度安排；

7) 风险管控措施；

8) 人员安排、项目管理制度；

9) 被评估方需要配合的事项清单；

10) 被评估方应准备的相关材料清单：需包括说明使用文档、代码、图纸及其他相关材料；

11) 对制定的评估方案的可行性、适用性及针对性评价。

#### d) 评估执行

评估执行应按照评估方案逐项评估、形成分项评估结果、留存证明材料，具体包括以下内容：

1) 逐项评估，其中涉及多源数据采集、数据标注质量、焊接大模型推理性能、功能评估、自适应焊接质量评估的，应按照 5.2 所述评估方法进行逐项评估；

2) 形成分项评估结果，对每项评估内容的评估结果应分为“符合”、“不符合”和“不适用”三种，其中，评估对象情况与评估内容相符合的为“符合”，评估对象情况与评估内容不相符合为“不符合”，评估对象不涉及该项内容的为“不适用”；

3) 留存证明材料，证明材料应包含文件名称、文件格式、文件内容以及评估人员和时间信息，其中，分项评估结果为“不符合”的，还应需留存未能满足该项要求的证明材料；分项评估结果为“不适用”的，还应需留存该项评估项不适用的真实情况说明；

#### e) 评估结论

1) 在完成所有分项评估后，所有分项评估结果均没有“不符合”的，则本次评估结论可记为“完全通过”；

2) 在完成所有分项评估后，评估结果出现“不符合”的，若分项不涉及焊接大模型推理性能、自适

应焊接过程、焊接质量等关键项，本次评估结论可记为“基本通过”；

3) 在完成所有分项评估后，评估结果出现“不符合”的，若分项涉及焊接大模型推理性能、自适应焊接过程、焊接质量等关键项，本次评估结论应记为“未通过”；

4) 在完成所有分项评估后，不符合1)、2)、3)的其他情况评估结论应记为“未通过”；

5) 在完成所有分项评估后复检规则，若出现评估结果“不符合”的情况，应允许复检1次，复检应需更换全新试件，重新进行完整评估流程，复检仍“不符合”的，评估结论应记为“未通过”，需整改后重新申请评估；

#### f) 评估报告

评估报告应由评估团队出具，评估报告的具体要求如下：

1) 评估报告至少应包含：

- 标题信息；
- 负责评估的机构和/或人员资质；
- 焊接大模型应用于自适应焊接提供机构/人员的基本信息；
- 评估的目的；
- 逐项评估结果与证明材料；
- 观察、测试得到的故障描述；
- 本次评估的最终结果。

2) 任何与评估计划的不一致之处增加或减少评估项目均应加以记录并说明原因；

3) 评估报告应附封面，封面应注明报告标题统一编号、评估机构信息和发布日期，以便于不同焊接大模型应用于自适应焊接评估的比较；

4) 评估方应将填写的所有内容形成报告正文，并宜将所有证明材料存于单独文件夹内形成证明材料集；

5) 由评估机构或团队的主管部门对报告有效性进行认证，需加盖部门或企业印章，评估团队负责人签字，表示对结果进行负责；

6) 评估报告（含纸质版与电子版）发布后，若需改动或增补，只能采用补充报告的形式，报告上应标明原报告的标题和编号，补充报告的编写要求与原报告相同。

## 6 安全要求

### 6.1 操作安全

- a) 操作人员应经过专业培训，熟悉焊接大模型与自适应焊接的工作流程和运行机制；
- b) 操作人员应监控报警和异常信息，宜重点监控模型推理、通信中断、焊接参数偏差，出现异常立即暂停作业；
- c) 禁止在模型和自适应焊接运行状态下插拔传感器接口和电源接口；
- d) 应做好权限登录账号密码、指纹的保密工作。

## 6.2 维护安全

- a) 软件更新前应备份模型参数与工艺数据；
- b) 视觉传感器校准标定，可以采用标准标定板校准 3D 点云精度，若偏差 $\geq 0.5$  mm，可考虑进行内参校正、维修或更换；
- c) 电参数传感器校准，可以使用标准信号源校准电流、电压的采集精度；
- d) 温度传感器校准，应在标准温度点校准，若温度偏差超 $\pm 2$  °C时，宜进行维修或更换；
- d) 机械部件检查，可以通过润滑机械臂关节，检查送丝机构导丝轮磨损情况；
- f) 执行机构精度检测：可以使用激光跟踪仪检测重复定位精度，超 $\pm 0.05$  mm 时进行精度补偿。

## 6.3 典型故障处理流程

- a) 模型推理超时：
  - 1) 检查 CPU/GPU 负载，关闭非必要后台进程；
  - 2) 验证模型轻量化参数，必要时重新部署量化后的模型；
  - 3) 若仍超时，停止作业，通过日志追溯超时原因，并将情况上报技术团队。
- b) 焊接缺陷率突升：
  - 1) 检查传感器状态并调取近期参数推理数据，查找是否存在异常参数数据；
  - 2) 检查工件装配偏差，若装配偏差超限，调整装配精度；
  - 3) 启动大模型增量学习，补充合格焊接数据进行模型微调或重新训练。

## 附录 A

(规范性)  
焊接缺陷库

## A.1 焊接缺陷图像样本库构成

- a) 总数量： $\geq 2000$  幅焊接缺陷图像；  
b) 缺陷分布：焊接缺陷图像样本库构成如图A.1所示。

图A.1 焊接缺陷图像样本

序号	缺陷类型	缺陷名称	图像数量	图像格式	尺寸范围	特征描述
1	裂纹	表面裂纹	$\geq 200$	*.png/*.jpg	1.长度 $\geq 5.0\text{mm}$ ; 2.宽度 $\geq 0.1\text{mm}$ ;	1.沿焊缝中心或熔合线分布,呈锯齿状、树枝状、直线状或略带弯曲; 2.开口型缺陷(肉眼可见),在灰度图像中表面裂纹区域灰度值低于周围焊缝;
2	凹陷	焊缝中心凹陷	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.深度 $\geq 0.5\text{mm}$ ; 2.与焊缝熔宽基本一致;	1.沿焊缝轴线呈连续或断续的锅底状、槽状下凹; 2.表面光滑且与焊缝表面平缓过渡;
		焊趾凹陷	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.深度 $\geq 0.5\text{mm}$ ; 2.宽度 $\geq 2\text{mm}$ ;	1.位于焊缝与母材的过渡处,呈月牙形、沟槽状局部下凹; 2.开口朝向母材,且边缘与母材/焊缝平缓连接,深度从焊趾向母材逐渐递减;
3	气孔	表面球形气孔	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.直径 $\geq 0.5\text{mm}$ ;	1.呈圆形或椭圆形开口,表面光滑,口边缘圆润,无尖锐棱角; 2.单孔独立分布,无连通性;
		表面条形气孔	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.长度 $\geq 3\text{mm}$ ; 2.宽度 $\geq 0.5\text{mm}$ ;	1.呈长椭圆形或纺锤形,沿焊缝轴线方向分布,表面光滑,边缘平缓; 2.部分呈“串珠状”连续分布且开口宽度均匀,无明显收口或扩张趋势;
		表面簇状气孔	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.单孔直径0.2-1mm; 2.簇状面积 $\geq 30\text{mm}^2$ ; 3.单聚集区 $\geq 3$ 个;	1.多个小型气孔密集聚集,呈“蜂窝状”或“星云状”分布; 2.单孔独立但间距较小,整体区域下凹不明显;
4	咬边	连续咬边	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.深度 $> 0.5\text{mm}$ ; 2.连续长度 $\geq 100\text{mm}$ ;	1.沿焊趾呈连续沟槽状,长度与焊缝走向一致,沟槽深度均匀,沟槽边缘尖锐; 2.无平缓过渡,开口朝向焊缝外侧;
		断续咬边	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.深度 $> 0.5\text{mm}$ ; 2.单段长度 $\geq 10\text{mm}$ ; 3.每段间距 $\geq 10\text{mm}$ ;	1.沿焊趾呈分段沟槽状,单段长度较短; 2.单段沟槽形态与连续咬边一致,无连通性,且多分散在焊缝中上部焊趾;
		局部深咬边	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.深度 $> 1.0\text{mm}$ ;	1.位于焊趾局部区域,呈短深沟槽状; 2.深度明显大于常规咬边,沟槽长度短,边缘尖锐;
5	弧坑	弧坑	$\geq 200$	*.png/*.jpg	1.深度 $> 0.5\text{mm}$ ;	1.呈圆形或椭圆形下凹,表面光滑,边

						缘与周围焊缝平缓过渡，无尖锐棱角； 2.中心无明显孔洞且下凹深度均匀，主要集中在：焊缝末端收弧处、多层焊的层间收弧点、手工焊或自动焊的间断焊缝收尾处；
6	夹渣	表面点状夹渣	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.最大尺寸（长 / 宽） $> 1.0\text{mm}$ ； 2.单条焊缝 $> 4$ 个；	1.呈不规则块状、粒状，表面粗糙，边缘模糊，与周围焊缝金属无明显分界； 2.单块独立分布，部分突出于焊缝表面或半埋于表面；
		条状夹渣	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.长度 $> 5.0\text{mm}$ ；	1.呈长条状、棱柱状，沿焊缝轴线或熔合线分布，表面粗糙，边缘呈锯齿状； 2.部分与焊缝表面平行延伸，多为半外露状态，易在表面形成沟槽；
		簇状夹渣	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.单块尺寸（长 / 宽） $> 1.0\text{mm}$ ； 2.簇状面积 $> 20\text{mm}^2$ ； 3.单聚集区 $\geq 4$ 块；	1.多块小型夹渣密集聚集，呈“蜂窝状”或“斑块状”，单块夹渣形态不规则； 2.多突出于焊缝表面，易伴随飞溅物残留；
7	焊瘤	块状焊瘤	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.凸起高度 $> 2.0\text{mm}$ ； 2.底部宽度 $> 5.0\text{mm}$ ；	1.呈不规则块状、半球状凸起，表面粗糙，与焊缝本体过渡陡峭，边缘无平缓衔接； 2.部分存在未熔合缝隙，单块独立分布，无连续延伸趋势，凸起高度明显超过焊缝余高；
		条状焊瘤	$\geq 100$	*.png/*.jpg	凸起高度： $> 2.0\text{mm}$ ，长度： $\geq 20\text{mm}$ ，底部宽度： $> 5.0\text{mm}$	呈长条状、带状凸起，沿焊缝轴线连续分布，长度与焊缝走向一致； 2.表面粗糙，两侧边缘可能伴随轻微咬边； 3.凸起高度较均匀，整体呈“脊状”，与焊缝本体连接较紧密；
		飞溅型焊瘤	$\geq 100$	*.png/*.jpg	凸起高度： $> 0.5\text{mm}$ ； $>$ 单颗直径： $> 1\text{mm}$ ； $>$ 数量：单聚集区 $> 10$ 颗	1.呈细小颗粒状、尖刺状凸起，多为单个或少量分散分布； 2.凸起高度低，表面无金属光泽（因快速冷却氧化），与母材结合松散； 3.易脱落，脱落后表面可能残留微小凹坑或氧化痕迹；
8	烧穿	穿孔型烧穿	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.孔径 $> 3.0\text{mm}$ ；	1.呈圆形或椭圆形穿孔，贯穿母材厚度（双面可见），孔壁光滑（未氧化时呈金属本色，氧化后呈暗灰色）； 2.孔边缘有熔化卷边（向焊缝外侧凸起），无尖锐棱角，部分孔内残留少量熔渣； 3.单孔独立分布，无连续延伸趋势，穿孔区域无填充金属覆盖；
		凹陷型烧穿	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.凹直径 $> 5.0\text{mm}$ ；	1.呈局部碟状下凹，未完全贯穿母材（单面可见），下凹深度接近母材厚度； 2.边缘与周围焊缝平缓过渡，表面光滑，可能伴随少量气孔或夹渣；

						3. 下凹中心区域金属极薄, 易在受力时破裂;
		局部熔透型烧穿	$\geq 100$	*.png/*.jpg	1.长度 $>15.0\text{mm}$ ;	1. 呈长条状局部熔透, 沿焊缝轴线分布, 未完全贯穿但熔透深度应 $\geq$ 板厚70%; 2.表面呈沟槽状下凹, 边缘有轻微熔化卷边, 内部可能残留熔渣或气孔; 3. 多为连续分布, 易伴随未熔合或咬边缺陷;

## A.2 焊接缺陷点云样本库构成

a) 总数量: 1200个焊接缺陷点云数据;

b) 缺陷分布:

焊接缺陷点云样本库构成如图A.2所示。

图A.2 焊接缺陷点云样本

序号	缺陷类型	缺陷名称	点云数量	点云格式	尺寸范围	特征描述
1	裂纹	表面裂纹	$\geq 150$	*.ply/*.pcd	1.长度 $\geq 5.0\text{mm}$ ; 2.宽度 $\geq 0.1\text{mm}$ ;	1.沿焊缝中心或熔合线分布, 呈锯齿状、树枝状、直线状或略带弯曲; 2.开口型缺陷(肉眼可见);
2	凹陷	焊缝中心凹陷	$\geq 75$	*.ply/*.pcd	1.深度 $\geq 0.5\text{mm}$ ; 2.与焊缝熔宽基本一致;	1.沿焊缝轴线呈连续或断续的锅底状、槽状下凹; 2.表面光滑且与焊缝表面平缓过渡;
		焊趾凹陷	$\geq 75$	*.ply/*.pcd	1.深度 $\geq 0.5\text{mm}$ ; 2.宽度 $\geq 2\text{mm}$ ;	1.位于焊缝与母材的过渡处, 呈月牙形、沟槽状局部下凹; 2.开口朝向母材, 且边缘与母材/焊缝平缓连接, 深度从焊趾向母材逐渐递减;
3	气孔	表面球形气孔	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.直径 $\geq 0.5\text{mm}$ ;	1.呈圆形或椭圆形开口, 表面光滑, 口边缘圆润, 无尖锐棱角; 2.单孔独立分布, 无连通性;
		表面条形气孔	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.长度 $\geq 3\text{mm}$ ; 2.宽度 $\geq 0.5\text{mm}$ ;	1.呈长椭圆形或纺锤形, 沿焊缝轴线方向分布, 表面光滑, 边缘平缓; 2.部分呈“串珠状”连续分布且开口宽度均匀, 无明显收口或扩张趋势;
		表面簇状气孔	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.单孔直径0.2-1mm; 2.簇状面积 $\geq 30\text{mm}^2$ ; 3.单聚集区 $\geq 3$ 个;	1.多个小型气孔密集聚集, 呈“蜂窝状”或“星云状”分布; 2.单孔独立但间距较小, 整体区域下凹不明显;
4	咬边	连续咬边	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.深度 $> 0.5\text{mm}$ ; 2.连续长度 $\geq 100\text{mm}$ ;	1.沿焊趾呈连续沟槽状, 长度与焊缝走向一致, 沟槽深度均匀, 沟槽边缘尖锐; 2.无平缓过渡, 开口朝向焊缝外侧;
		断续咬边	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.深度 $> 0.5\text{mm}$ ; 2.单段长度 $\geq 10\text{mm}$ ;	1.沿焊趾呈分段沟槽状, 单段长度较短; 2.单段沟槽形态与连续咬边一致, 无连通性, 且多分散在焊缝中上部焊趾;

					3.每段间距 $\geq$ 10mm;	
		局部深咬边	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.深度 $>1.0\text{mm}$ ;	1.位于焊趾局部区域,呈短深沟槽状; 2.深度明显大于常规咬边,沟槽长度短,边缘尖锐;
5	弧坑	弧坑	$\geq 150$	*.ply/*.pcd	1.深度 $>0.5\text{mm}$ ;	1.呈圆形或椭圆形下凹,表面光滑,边缘与周围焊缝平缓过渡,无尖锐棱角; 2.中心无明显孔洞且下凹深度均匀,主要集中在:焊缝末端收弧处、多层焊的层间收弧点、手工焊或自动焊的间断焊缝收尾处;
6	夹渣	表面点状夹渣	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.最大尺寸(长/宽) $>1.0\text{mm}$ ; 2.单条焊缝 $>4$ 个;	1.呈不规则块状、粒状,表面粗糙,边缘模糊,与周围焊缝金属无明显分界; 2.单块独立分布,部分突出于焊缝表面或半埋于表面;
		条状夹渣	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.长度 $>5.0\text{mm}$ ;	1.呈长条状、棱柱状,沿焊缝轴线或熔合线分布,表面粗糙,边缘呈锯齿状; 2.部分与焊缝表面平行延伸,多为半外露状态,易在表面形成沟槽;
		簇状夹渣	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.单块尺寸(长/宽) $>1.0\text{mm}$ ; 2.簇状面积 $>20\text{mm}^2$ ; 3.单聚集区 $\geq 4$ 块;	1.多块小型夹渣密集聚集,呈“蜂窝状”或“斑块状”,单块夹渣形态不规则; 2.多突出于焊缝表面,易伴随飞溅物残留;
7	焊瘤	块状焊瘤	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.凸起高度 $>2.0\text{mm}$ ; 2.底部宽度 $>5.0\text{mm}$ ;	1.呈不规则块状、半球状凸起,表面粗糙,与焊缝本体过渡陡峭,边缘无平缓衔接; 2.部分存在未熔合缝隙,单块独立分布,无连续延伸趋势,凸起高度明显超过焊缝余高;
		条状焊瘤	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	凸起高度: $>2.0\text{mm}$ ,长度: $\geq 20\text{mm}$ ,底部宽度: $>5.0\text{mm}$	呈长条状、带状凸起,沿焊缝轴线连续分布,长度与焊缝走向一致; 2.表面粗糙,两侧边缘可能伴随轻微咬边; 3.凸起高度较均匀,整体呈“脊状”,与焊缝本体连接较紧密;
		飞溅型焊瘤	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	凸起高度: $>0.5\text{mm}$ ; $>$ 单颗直径: $>1\text{mm}$ ; $>$ 数量:单聚集区 $>10$ 颗	1.呈细小颗粒状、尖刺状凸起,多为单个或少量分散分布; 2.凸起高度低,与母材结合松散; 3.易脱落,脱落后表面可能残留微小凹坑或氧化痕迹;
8	烧穿	穿孔型烧穿	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.孔径 $>3.0\text{mm}$ ;	1.呈圆形或椭圆形穿孔,贯穿母材厚度(双面可见),孔壁光滑; 2.孔边缘有熔化卷边(向焊缝外侧凸起),无尖锐棱角,部分孔内残留少量熔渣; 3.单孔独立分布,无连续延伸趋势,穿孔区域无填充金属覆盖;

		凹陷型烧穿	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.凹直径 $> 5.0\text{mm}$ ;	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 呈局部碟状下凹，未完全贯穿母材（单面可见），下凹深度接近母材厚度；</li> <li>2. 边缘与周围焊缝平缓过渡，表面光滑，可能伴随少量气孔或夹渣；</li> <li>3. 下凹中心区域金属极薄，易在受力时破裂；</li> </ol>
		局部熔透型烧穿	$\geq 50$	*.ply/*.pcd	1.长度 $> 15.0\text{mm}$ ;	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 呈长条状局部熔透，沿焊缝轴线分布，未完全贯穿但熔透深度应<math>\geq</math>板厚70%；</li> <li>2. 表面呈沟槽状下凹，边缘有轻微熔化卷边，内部可能残留熔渣或气孔；</li> <li>3. 多为连续分布，易伴随未熔合或咬边缺陷；</li> </ol>

### A.3 焊接缺陷样本库使用规范

- 测试时应随机抽取 80% 样本作为测试集，20% 作为验证集；
- 禁止修改样本库缺陷标注信息，确保评估客观性；
- 每年应更新 200 张新缺陷图像样本、200个新缺陷点云样本，覆盖新型材料 / 工艺缺陷特征。