ICS 93.080
CCS P 66

团　　体　　标　　准

T/JSCTS XX——20XX

公路钢混组合梁桥钢梁制造技术规程

Technical Specification for Intelligent Manufacturing of Steel Girders for Highway Steel-Concrete Composite Girder Bridges

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

20XX-XX-XX 发布　　20XX-XX-XX 实施

江苏省综合交通运输学会　　发　布

目 次

前言 I
1 范围 1
2 规范性引用文件 1
3 术语和定义 1
4 基本规定 2
5 材料及智能预处理 2
6 板单元智能焊接 3
7 节段智能总装 7
8 智能质量控制 8

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。

本文件由江苏常鑫路桥集团有限公司提出。

本文件由江苏省综合交通运输学会归口。

本文件起草单位：江苏常鑫路桥集团有限公司、常州市武进区公路事业发展中心、常州交通建设管理有限公司、江苏育通交通工程咨询监理有限责任公司、常州市建创信息科技有限公司。

本文件主要起草人：张光宁、毛娟、裴涛、龚俞、黄耀斌、丽辉忠、姜边、蒋更宇、董阳阳、尤奇、秦弘、孟停、陈丽婧、蒋燕俊、孔祥军、李英亮、黄俊、朱智典、郑炎文、姜晓刚、吕凌志。

公路钢混组合梁桥钢梁制造技术规程

1 范围

本文件规定了公路钢混组合梁桥钢梁材料及智能预处理、板单元智能焊接、节段梁智能总装和质量控制的要求。

本文件适用于公路钢混组合梁桥钢梁的机器人焊接、数控智能下料、智能化总装及配套质量管控。

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 714 桥梁用结构钢

GB/T 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 4171 耐候结构钢

GB/T 5117 非合金钢及细晶粒钢焊条

GB/T 5118 热强钢焊条

GB/T 5293 埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝 一 焊剂组合分类要求

GB/T 8110 熔化极气体保护电弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝

GB/T 10045 非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝

GB/T 10433 电弧螺柱焊用圆柱头焊钉

GB/T 36037 埋弧焊和电渣焊用焊剂

JTG/T 3651 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 机器人焊接 robotic welding

通过多轴工业机器人搭载焊接执行机构，结合传感与控制系统自动完成焊缝轨迹行走、参数动态调控的焊接工艺方式，可适配复杂空间焊缝，保障焊接质量一致性与稳定性。

3.2 焊接工艺数据库 welding process database

按钢材牌号、板厚、接头形式分类存储焊接全流程参数的结构化数据集合，涵盖起弧、焊接、收弧各阶段电流、电压、速度、摆动参数，可实现工艺参数自动调用、匹配与迭代优化。

3.3 焊缝跟踪传感 weld seam tracking sensor

焊接过程中实时识别坡口位置与焊缝轨迹的传感装置，分为机械接触式、视觉式与电弧式三类，可动态修正焊枪位姿与行走路径，抵消装配误差与热变形带来的焊接偏差。

3.4 离线编程 offline programming

脱离焊接作业现场，基于构件三维模型与工艺要求，在软件环境中生成机器人焊接路径、姿态与参数程序的编程方式，可提升编程效率，减少现场占用时间。

3.5 板单元智能焊接 intelligent welding of steel panel

以机器人焊接装备为核心，结合自动定位工装、工艺数据库与质量在线监测系统，实现板单元组装、焊接、矫正全流程少人化作业的制造模式。

3.6 智能化预处理生产线 intelligent pretreatment production line

集成钢板矫平、抛丸除锈、喷漆烘干、自动标识与数据采集于一体的连续化生产线，可根据钢板规

格自动匹配工艺参数，并实现生产信息自动上传管控系统。

3.7 焊缝地图 weld map

与钢梁实体结构一一对应的三维焊缝数字化模型，按焊缝等级、类型分类存储位置、工艺参数、检测结果、责任人员等全链路信息，可实现焊缝快速定位与质量追溯。

3.8 焊接工艺自优化 welding process self-optimization

基于熔池图像识别与工艺参数时序分析，实时诊断焊接缺陷并动态调整电流、电压、焊接速度等参数的智能控制技术。

3.9 热 - 力场耦合检测 thermal-mechanical coupling detection

通过实时求解焊接温度场与应力场，识别热裂纹、变形等潜在缺陷的检测技术。

3.10 数字孪生焊接仿真 digital twin welding simulation

构建与实体构件一一对应的数字化模型，模拟焊接过程温度场、应力场演变，用于工艺验证与参数优化的仿真技术。

4 基本规定

4.1 钢梁制造的通用制造与焊接要求应符合 JTG/T 3651《公路钢结构桥梁制造和安装施工规范》的规定。

4.2 钢梁制造前应完成设计文件工艺性审核，编制加工图与制造工艺文件；设计变更应履行相应程序。机器人焊接专项工艺文件应单独编制，涵盖编程规范、参数校验、首件鉴定等内容。

4.3 应建立全过程质量检验与工序交接制度，质量记录应齐全、可追溯。

4.4 制造及检验所用计量器具应经检定合格；制造前应明确构件设计制造线形，建立线形监控体系。

4.5 焊接机器人操作工应取得焊工特种作业资格，并通过机器人焊接专项技能考核，等级不低于 D级；若无专项资质，应通过机器人焊接专项考核合格后方可上岗。

4.6 应建立焊接工艺数据库，按钢材牌号、板厚、接头形式、焊接方法分类结构化存储焊接工艺参数及配套工艺评定记录，实现工艺参数的精准调用、动态迭代与全流程质量追溯。

4.7 关键智能设备应接入生产管控系统，实现设备状态、生产数据、质量信息的实时采集与上传。

4.8 宜建立焊接工艺智能优化机制，基于焊接过程数据与缺陷检测数据，通过机器学习算法实现工艺参数的动态迭代与自优化。

4.9 宜建立跨工序数据联动机制，实现下料精度、焊接变形、总装线形等数据的交互传递与工艺补偿，形成全流程数据驱动的智能管控闭环。

4.10 构件制造完成后应按本文件及设计要求验收；设计相同的构件，制造精度宜满足互换性要求。

5 材料及智能预处理

5.1 材料

5.1.1 钢梁用钢材、焊接材料、圆柱头焊钉的牌号、性能应符合设计文件及对应标准规定；通用材料技术要求应符合 JTG/T 3651 的规定。

5.2 智能下料与预处理

5.2.1 零件下料宜优先采用数控智能切割工艺，优化切割路径、预留补偿量，保证尺寸精度；板料不应接料。

5.2.2 应采用智能套料系统排版优化，自动生成切割程序；数控切割设备应具备参数自适应调节功能，并接入生产管控系统，实现下料过程可追溯。

腹板宜采用数控等离子切割下料，U 形肋板宜采用多嘴精切工艺下料；横隔板下料设备应具备自动喷线功能。

5.2.3 零件加工精度

切割后零件的外观质量与尺寸偏差应符合表 1 的规定。

表 1 切割允许偏差

工程	允许偏差	备注
零件宽度、长度	±2.0mm	
过焊孔宽度、长度	±3.0mm	
切割面平坦度	0.05t,且不大于 1.5mm	t为板厚
割纹深度	0.3mm	
局部缺口深度	1.0mm	

5.2.4 钢板应通过智能化预处理生产线依次完成矫平、抛丸、喷漆与烘干；生产线应具备规格自动识别、参数自动匹配功能，实现工艺闭环控制。钢板矫平后 1m 长度内平面度偏差不应大于 0.5mm；除锈及涂装质量应符合 JTG/T 3651 的规定。

5.2.5 零件坡口宜采用机器人加工，加工前通过视觉识别自动核对零件信息；坡口精度应满足机器人焊接匹配要求。钢板下料后宜采用双面铣床加工边缘，配合机器人坡口工序保证尺寸精度。

5.2.6 零件标识应标注机器人识别编码，宜采用二维码实现全流程追溯；带识别信息的零件应与生产管控系统联动管理。

6 板单元智能焊接

6.1 一般规定

6.1.1 板单元制造应以机器人焊接为核心，遵循数控精密下料、智能加工、胎架自动定位、机器人焊接、变形智能调控的工艺流程。关键工艺控制应符合下列要求：

a) 板单元坡口宜采用机器人加工，一端预留配切量；

b) 单侧带纵肋的板单元应采用反变形焊接工艺，反变形量可通过焊接变形预测模型自动计算；

c) 焊接工艺参数应优先从焊接工艺数据库中调用，经首件验证后执行。

6.2 顶板单元

6.2.1 U形肋可采用钢板冷压成型，坡口宜采用机器人加工，加工精度满足焊接匹配要求；加工信息自动同步至生产管控系统。U形肋与顶板装配间隙不应大于 0.5mm，宜采用专用机床自动定位压紧。

6.2.2 U形肋内侧角焊缝应采用配备激光焊缝跟踪传感器的双枪机器人焊接系统,系统应符合下列要求。

a) 适用于截面不小于 260mm×250mm 的U形肋，肋中心间距不应小于 400mm。

b) 具备参数自动匹配、熔透状态实时监测功能。

c) 焊接速度 0.3m/min~0.8m/min，可根据坡口形式与板厚自动调节。

d) 接入焊接工艺数据库，支持离线编程与现场示教。

6.2.3 U形肋机器人焊接应达到下列指标。

a) 稳定达到设计熔透率；

b) 焊脚尺寸 6mm~7mm，偏差±0.5mm 以内；

c) 线能量输入小于 15kJ/cm；

d) 自由状态下板整体变形小于 12mm，局部变形小于 20mm；

e) 焊接参数闭环控制，电流、电压波动不超过±5%。

6.2.4 剪力钉焊接应采用智能栓钉焊接机器人系统，具备视觉定位、压力反馈、间距校验、漏焊报警功能；焊接参数应通过工艺评定确定，可存入工艺数据库复用。

6.2.5 顶板单元制造工艺流程见图 1。

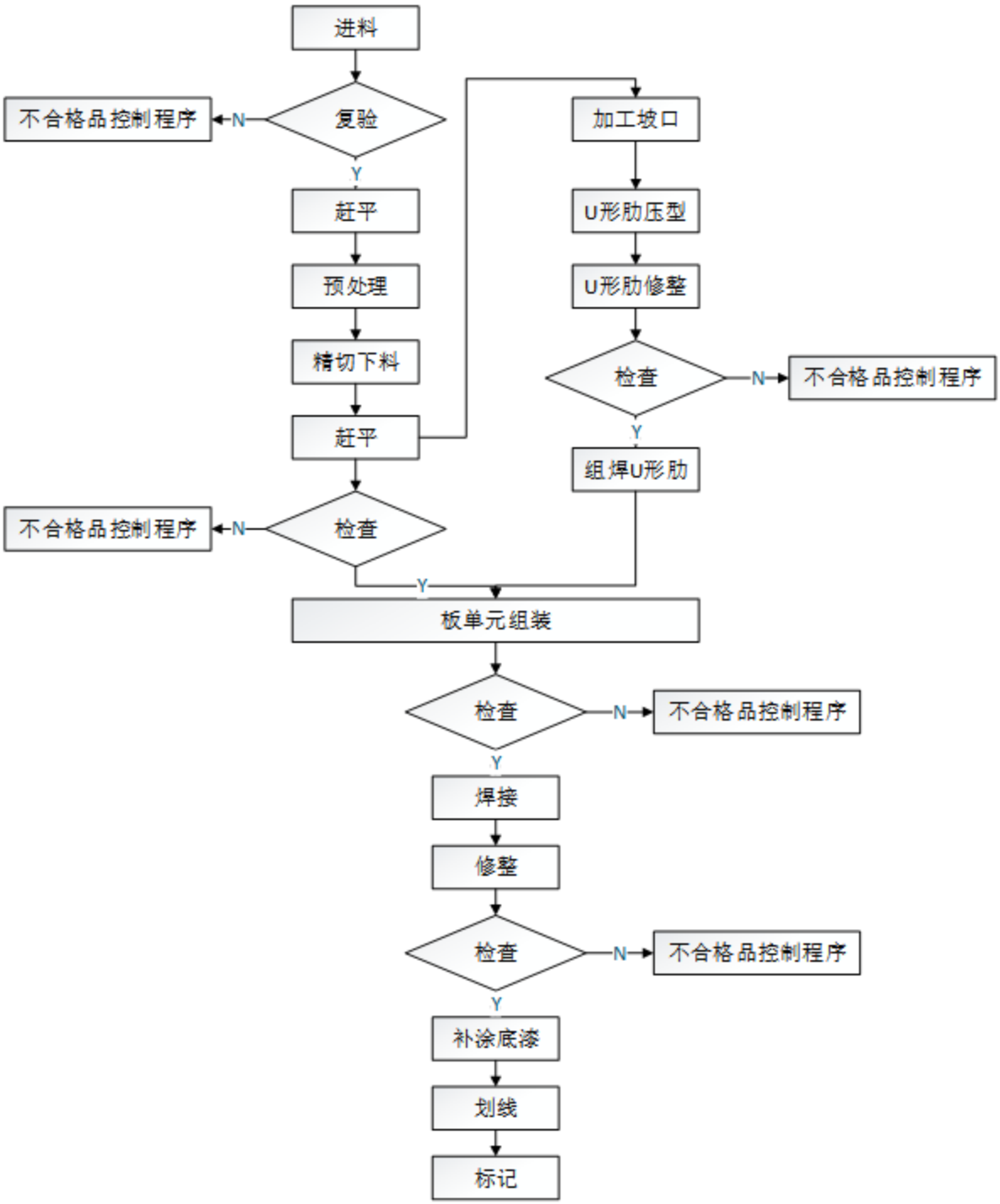


图 1　顶板单元智能制造工艺流程图

6.3 底板单元

6.3.1 底板应采用数控精密切割下料，预留焊接收缩量；宜采用机器人焊接 I 形加劲肋，预设反变形量可通过模拟计算确定。

6.3.2 焊后应结合机械矫正与局部热矫正保证平面度；检验合格后重新刻划基准线，信息同步录入生产管控系统。

6.3.3 底板单元制造工艺流程见图 2。



图 2　底板单元智能制造工艺流程图

6.4 横隔板单元

6.4.1 横隔板应采用数控精密切割下料，焊前刚性固定防止变形超出机器人跟踪范围。

a) 长直焊缝宜采用双机器人对称焊接，减小变形；肋板端头宜采用机器人自动包角焊。

b) 多层多道焊应采用智能规划算法，自动生成焊道层数、偏移量与顺序，层间温度自动监测。

c) 焊接宜采用符合 GB/T 10045 规定的 E500T-1 型药芯焊丝，直径宜为 1.4mm。

6.4.2 横隔板内部狭小空间焊缝宜采用轻量化协作机械臂作业，具备 6 自由度冗余设计与力控传感功能；宜配备激光视觉焊缝跟踪系统，跟踪精度不低于±0.5mm。

6.4.3 横隔板智能制造工艺流程见图 3。

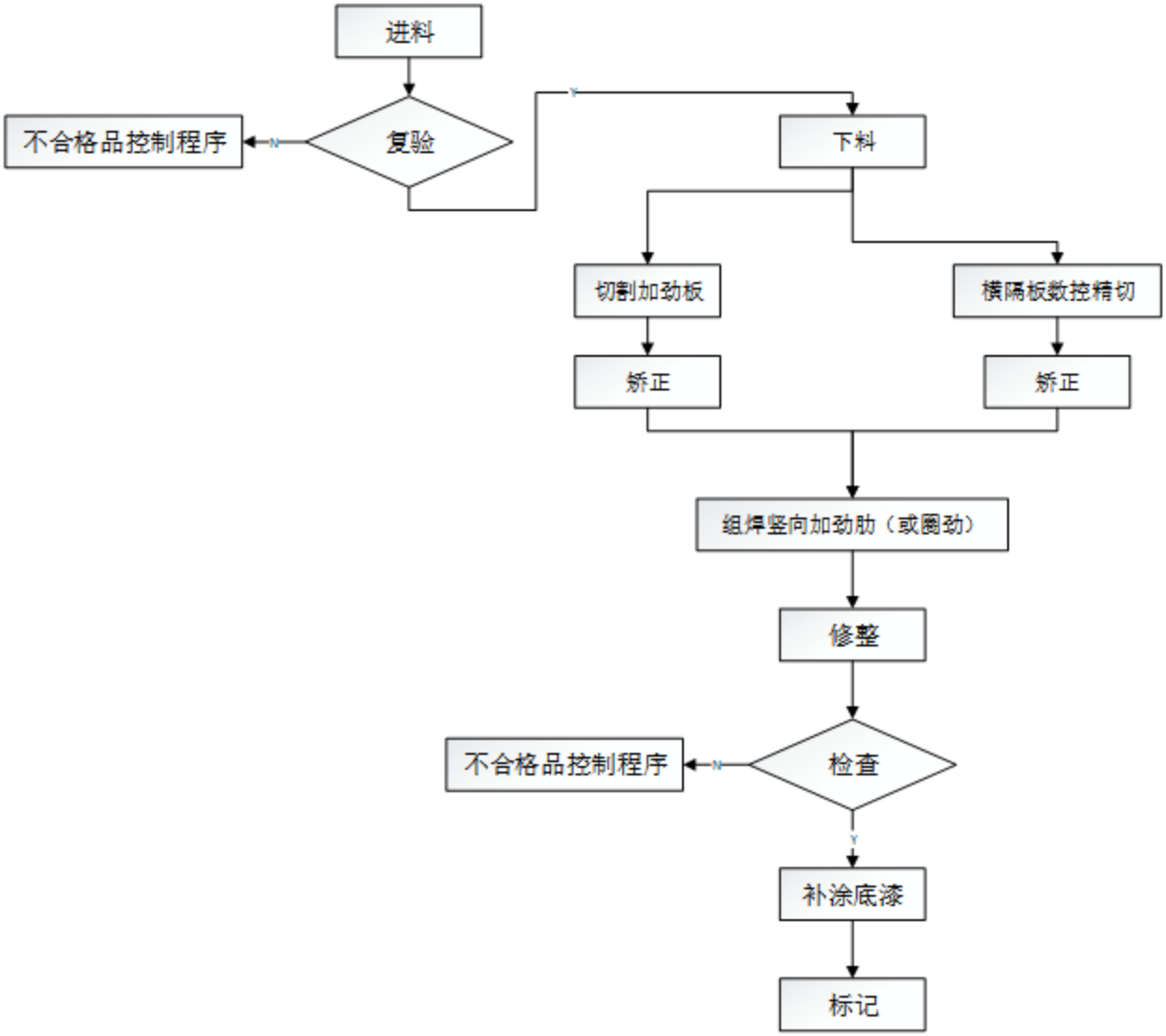


图 3　横隔板智能制造工艺流程

6.5 腹板单元

6.5.1 腹板应采用数控精密切割下料，矫平控制平面度；坡口精度满足机器人焊接匹配要求。

6.5.2 焊接宜采用机器人自动焊，实施对称、分段焊接顺序，严格控制变形；机器人焊接应配备电弧跟踪功能，实时修正轨迹。

6.5.3 腹板单元制造工艺流程见图 4。

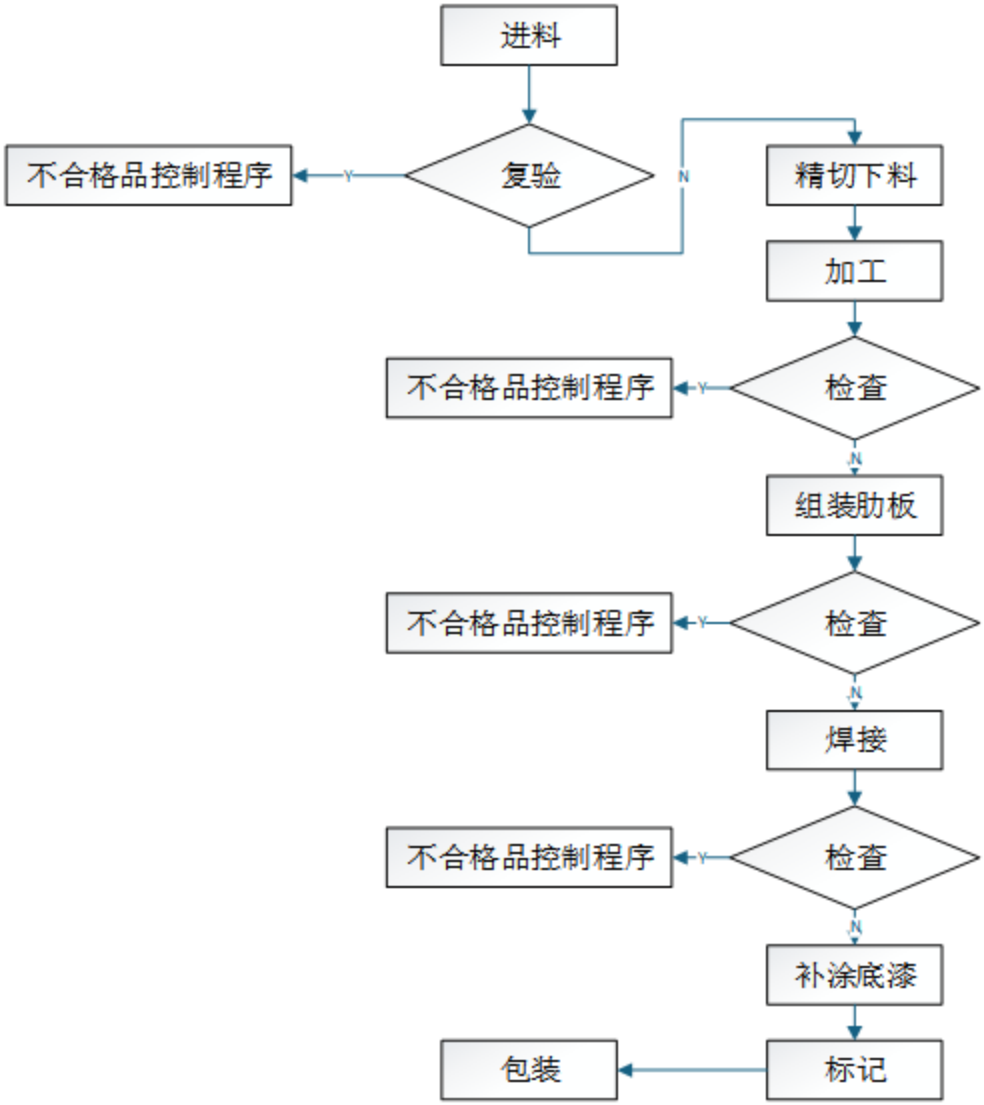


图 4　腹板单元智能制造工艺流程图

7 节段智能总装

7.1 板单元智能组装

7.1.1 板单元组装应在专用工装胎架上进行，组装精度应符合 JTG/T 3651 的规定；首件检验合格后方可开展批量生产。

7.1.2 板单元组装宜采用智能化工装，自动定位夹紧，定位信息同步至生产管控系统；定位焊宜采用机器人完成。宜采用双向反变形翻转胎架，通过工艺数据库自动预设反变形量，配合门式机器人焊接系统完成焊接。

7.1.3 大尺寸板单元拼装宜采用分布式压力传感智能调平技术，通过阵列传感器捕捉微变形，配合专用构件实现精准对位，调平精度不低于 1mm/m。

7.2 梁段智能预拼装

7.2.1 梁段组焊检验合格后，应在总拼胎架上进行端口配切、线形调整；检测前解除临时约束，使梁段处于自由状态。

7.2.2 宜采用三维激光扫描技术对梁段纵向线形、扭曲变形、端口匹配度进行自动检测，自动生成报告并与设计模型比对偏差。重要尺寸测量应避免日照影响，同步记录环境温度。梁段接口间隙应严格控制，设计规定间隙为 6mm，允许偏差-2～+6mm；修正后错边量不应大于 1mm。

7.2.3 应根据检测结果精确配切，预留焊接收缩量；梁段编号采用永久性喷涂标记，信息同步录入生产管控系统

7.2.4 吊耳应采用不低于 Q355 级钢板制作，宜设置于结构节点位置；吊耳焊接宜采用机器人焊接。

7.3 梁段总拼智能制造工艺

7.3.1 梁段的匹配组装、预拼装及线形控制应在专用胎架上一次完成；匹配制造经检验合格后，方可分解为吊装节段进行运输。

7.3.2 胎架工作面线形应依据设计线形与预拱值设置，宜具备线形自动调节功能；胎架应设置高精度位置控制装置，定位数据自动采集上传。胎架结构应满足强度刚度要求，最低高度不应低于 0.6m。

7.3.3 总拼宜采用正装法，组装焊接顺序应符合工艺要求；单元件组装前应核查编号、尺寸、坡口及标识。

7.3.4 主焊缝宜采用埋弧自动焊或机器人焊接，采用对称、分段施焊顺序控制变形；箱内狭小空间焊缝宜采用协作机器人焊接。焊接过程应实时监控梁段线形变化，根据变形数据动态调整焊接顺序与参数。

7.3.5 梁段检验合格后，应绘制中心线、检查线等定位标记；内部横隔板应设置永久性钢印编号。所有检验数据应自动上传生产管控系统，形成完整质量档案。

8 质量控制

8.1 一般规定

8.1.1 钢梁制造焊接质量除应符合本文件规定外，通用焊接质量要求应符合 JTG/T 3651 的规定。

8.1.2 焊接作业环境温度高于 5℃、相对湿度低于 80%；环境温度低于-10℃时严禁施焊；作业区风速不应超过 2m/s，超出时应采取防风措施。机器人设备使用环境温度宜为-5℃～45℃，相对湿度宜为 20%～90%且无凝露。

8.1.3 机器人焊接通用工艺要求。

a) 传感跟踪距离宜为 30mm，焊丝干伸长宜为 22mm。

b) 打底焊道焊接电流宜控制在 290A～310A。

c) 焊接工艺参数应优先从焊接工艺数据库调用，经首件验证后执行。

8.1.4 计量器具、检测设备应经检定合格，按规定周期校准。

8.2 坡口质量控制

坡口宜采用机器人加工，加工精度应符合表 2 的规定；坡口面应无裂纹、夹渣、分层、氧化皮等缺陷。

表 2 坡口允许偏差表

工程	允许偏差	备注
坡口角度	当 T≤25mm 时，±2°	保证坡口一致性
	当 T＞25mm 时，±1°	
坡口钝边	1mm±0.5mm	免清根全熔透坡口
坡口面平直度	0.05t,且不大于 2.0mm	t 为板厚

8.3 机器人焊接焊缝质量控制

8.3.1 定位焊宜采用机器人完成，焊缝不得有裂纹、夹渣、焊瘤、焊偏等缺陷；定位焊缝尺寸、间距应满足工艺要求。

8.3.2 通用焊缝质量应符合 JTG/T 3651 的规定。

8.3.3 机器人焊接专项质量要求。

a) 焊接过程应实现参数实时监控，电流、电压波动超过±15%时系统应自动报警；

b) U 形肋内焊应配置在线视频监控系统，焊缝外观分辨率应优于 0.1mm；

c) 焊缝内部质量宜采用超声相控阵检测，缺陷检出分辨率应满足设计文件及 JTG/T 3651 的相关规定；

d) 焊缝应在外观检查合格 24h 后进行无损检测；板厚大于 25mm 或环境温度低于 5℃时，应在焊接完成 48h 后检测。

8.3.4 焊接变形控制应符合设计要求，板单元平面度、梁段线形偏差应满足本文件对应章节的规定。

8.4 现场焊接质量控制

8.4.1 现场拼接焊缝宜采用便携式智能焊接设备，具备焊缝自动跟踪功能；通用现场焊接质量要求应符合 JTG/T 3651 的规定。

8.5 焊缝返修质量控制

8.5.1 焊缝返修应先制定专项工艺方案，经确认后实施；同一部位返修次数不宜超过 2 次，超过时应经技术负责人批准。返修过程及结果应纳入质量追溯体系。

8.6 栓钉焊接质量控制

8.6.1 栓钉焊接外观不得有裂纹、未熔合等缺陷，应按批次进行抽样检验，检验要求符合 GB/T 10433 及 JTG/T 3651 的规定。智能栓焊系统应具备质量自动检测与漏焊报警功能。

8.7 智能化质量管控

8.7.1 机器人焊接设备应自动采集并存储焊接全流程参数，包括电流、电压、焊接速度、保护气流量等，数据应与构件编号、焊缝编号关联，实现焊接质量全流程可追溯。

8.7.2 宜采用焊缝外观视觉检测系统，自动识别表面缺陷；宜采用基于机器学习的缺陷实时诊断技术，结合熔池图像识别与热-力场耦合分析，实现缺陷实时检测与预警。无损检测数据应同步上传生产管控系统，缺陷位置自动标注，实现定位与追溯。

8.7.3 应建立焊缝地图，按焊缝等级、类型分类存储全链路信息，实现快速检索与质量追溯。宜将焊缝地图与 BIM 制造模型关联集成，实现可视化定位与全生命周期追溯，支撑数字化建造与智能管控。

8.7.4 宜建立焊接数字孪生模型，集成材料参数与工艺参数，模拟温度场、应力场演变，用于工艺验证、变形预测与参数优化，仿真与实测误差宜控制在 5%以内。