

T/CSCS

中国钢结构协会团体标准

T/CSCS XXXX—202X

耐候钢桥梁制造及监理技术要求

Technical Requirements of Manufacturing and Supervision for Weathering Steel
Bridge

(送审稿)

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。

202X - XX - XX 发布

202X - XX - XX 实施

中国钢结构协会 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	1
4 基本要求	2
4.1 耐候钢桥梁制造	2
4.2 制造场地与设备	2
4.3 人员资质	2
5 材料要求	2
5.1 耐候钢	2
5.2 焊接材料	2
5.3 紧固件材料	2
5.4 锈层稳定化处理溶液	2
5.5 材料的存放及管理	3
6 制造技术要求	3
6.1 切割	3
6.2 矫正与弯曲	3
6.3 加工	3
6.4 制孔	4
6.5 组装	4
6.6 焊接	4
6.7 预处理及除锈	5
6.8 锈层稳定化处理	6
7 监理技术要求	9
7.1 制造前检查	9
7.2 原材料检查	9
7.3 耐候钢桥梁制造	10
7.4 存放及运输	11
8 成品验收	11
附 录 A (规范性) 锈层致密性测试	12
附 录 B (规范性) 锈层颜色均匀性检测	13
附 录 C (规范性) 锈层稳定化处理工艺记录表	14

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。

近年来，随着耐候钢在桥梁工程中的广泛应用，其制造工艺和耐候性能处理技术日益成熟。耐候钢桥梁具有良好的耐大气腐蚀性能、维护成本低、使用寿命长等优势，已逐步应用于公路桥梁、城市高架、铁路桥梁等结构中。但目前工程实践中对耐候钢桥梁制造质量控制、锈层稳定化处理、以及全过程监理技术尚缺乏统一、系统的标准依据，导致质量控制方式不一致，产品性能稳定性不足，迫切需要制定行业统一的制造及监理标准。

本标准在总结工程实践经验的基础上，结合现有国家标准、行业标准和团体标准的要求，提出了耐候钢桥梁制造的基本工艺流程、质量控制要点、锈层稳定化处理的施工与检验方法，以及全过程监理的关键控制要求，具有较强的工程实用性和指导性。本标准对耐候钢桥梁制造及表面锈层稳定化处理过程中的自然色差、结构性差异等问题进行了明确界定，以减少对颜色一致性过度要求所引发的不必要工程争议，保障项目顺利交付。

本文件适用于采用耐候钢材料制造的各类公路桥梁、铁路桥梁及市政桥梁等相关工程。

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。

本文件由四川省钢构智造有限公司提出。

本文件由中国钢结构协会标准化管理委员会归口。

本文件起草单位：四川省钢构智造有限公司、四川成乐高速公路有限责任公司、中交二公局华东建设有限公司、中铁山桥集团有限公司、河钢股份有限公司、中国铁路设计集团有限公司、北京交通大学、北京科技大学、山东省交通规划设计院集团有限公司、天津弘康工程科技有限公司、唐山开元焊接自动化技术研究所有限公司。

本文件主要起草人：孙立雄、赵涛、许金华、张明闪、高建忠、杨虹、岳建洪、黄茗星、杨博、马根弟、徐向军、陈振业、王景宁、张上、邓江涛、苏翰、李秀程、丛菁华、赵洪蛟、高雪磊、张晓、程庆、毕学松、徐瑞强。

耐候钢桥梁制造及监理技术要求

1 范围

本文件规定了耐候钢桥梁制造及监理的基本要求、技术要求、质量检验与验收、监理要点等。本文件适用于采用耐候钢材料制造的各类公路、铁路桥梁等相关工程。

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 4171 耐候结构钢
 GB/T 714-2015 桥梁用结构钢
 TB/T 3556-2020 铁路桥梁用结构钢
 GB 50205-2020 钢结构工程施工质量验收标准
 GB/T 26429-2010 设备工程监理规范
 GB/T 3274-2017 碳素结构钢和低合金结构钢热轧钢板和钢带
 GB/T 8110-2020 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 1591-2018 低合金高强度结构钢
 DB21/T 3616-2022 公路桥梁耐候钢焊接技术规程
 GB/T 44204-2024 钢结构焊接监理技术要求
 Q/320584TJHK 002-2017 耐候钢锈蚀处理剂及施工标准
 GB/T 8923.1-2011 涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定
 GB/T 1231 钢结构用高强度大六角头螺栓连接副
 GB/T 43151-2023 钢结构用耐候钢高强度螺栓连接副
 JTG/T 3651-2022 公路钢结构桥梁制造和安装施工规范
 Q/CR 9211-2015 铁路钢桥制造规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 耐候钢 Weathering steel

通过添加少量的合金元素如Cu、Cr、Ni等，使其在金属基体表面形成保护层，以提高耐大气腐蚀性能的钢。

3.2 锈层自然差异 Natural Rust Layer Variation

由于构件几何、角度、位置、天气、水流等不可控因素影响，在锈层稳定化处理后和服役早期阶段，构件表面颜色深浅不一、局部水渍痕迹、条纹、锈流附着等自然现象的统称。

注：此类自然差异不影响耐候钢的防腐性能，属正常可接受现象。

3.3 表观均匀性 Visual Uniformity

指在一般观察条件下，构件表面颜色及质感的一致性。由于耐候钢锈层存在自然发展过程，表观均匀性不以颜色一致为强制性判定依据，仅作外观协调性建议参考。

3.4 制造监理 Manufacturing consulting service

监理单位接受业主委托，按照合同约定对桥梁制造过程进行专业化监督和管理的服务。

3.5 锈层稳定化处理 Rust stabilization treatment

在耐候钢表面初期锈蚀形成阶段，通过人工喷淋特定溶液等方式促进锈层快速形成、致密均匀、稳定发展的表面处理工艺，以提升其外观一致性和长期防护性能。

4 基本要求

4.1 耐候钢桥梁制造

耐候钢桥梁制造及检验应满足设计及钢桥制造相关标准要求，当需要修改设计时，应与相关设计单位联系，签署设计变更文件。

4.2 制造场地与设备

4.2.1 制造场地应平整、坚实，有良好的排水条件，具备足够的空间用于原材料堆放、构件制造和存放。

4.2.2 加工设备（如切割设备、机加设备、焊接设备、矫正设备等）应满足钢加工的精度和性能要求，定期进行维护和校验。

4.3 人员资质

4.3.1 桥梁制造单位的技术人员、焊接工人、无损检测人员等应具备相应的资格证书。

4.3.2 监理人员应熟悉耐候钢桥梁制造工艺和相关标准，具备相应的监理资质。

5 材料要求

5.1 耐候钢

5.1.1 依据桥梁设计要求，选择合适的耐候钢牌号及规格，化学成分、力学性能应符合 GB/T 4171 耐候结构钢或 GB/T 714-2015 桥梁用结构钢或 TB/T 3556-2020 铁路桥梁用结构钢标准规定。

5.1.2 对耐候钢的质量证明文件进行严格审查，包括钢厂名称、炉批号、化学成分、力学性能、耐候指数等试验结果。

5.1.3 耐候钢到厂后，制造单位应按批次进行外观检查，不得有裂纹、分层、夹渣等缺陷。

5.1.4 按规定比例对耐候钢进行复验，复验结果应符合 GB/T 4171 或 GB/T 714-2015 或 TB/T 3556-2020 的要求。

5.2 焊接材料

5.2.1 焊接材料的化学成分与力学性能应与母材耐候钢相匹配，其合金元素含量组合应保证焊缝区域具备与母材相当的耐大气腐蚀性能或符合设计要求。应优先选用专用于耐候钢的焊材，并避免由于成分差异引起焊缝与母材之间的腐蚀速率不一致或明显色差。

5.2.2 焊接材料表面应光滑平整，不应有毛刺、划痕、锈蚀和氧化皮或其他对焊接性能及焊接操作性能有不良影响的杂质存在。

5.3 紧固件材料

高强度螺栓、螺母、垫圈的技术条件应符合 GB/T 1228、GB/T 1229、GB/T 1230、GB/T 1231、GB/T 43151 的规定。

5.4 锈层稳定化处理溶液

5.4.1 锈层稳定化处理溶液应为盐溶液，不含强酸且无刺激性气味，表面锈层稳定化处理的溶液应符合表 1 中要求。

表1 锈层稳定化处理溶液技术要求

检测项目	检测方法	检测限值	检测指标	单位
铬离子	ICP光谱法	≤0.005	不高于检测限	%

检测项目	检测方法	检测限值	检测指标	单位
硝酸	离子色谱法	≤0.01	不高于检测限	%
硫酸	离子色谱法	≤0.01	≤0.8%	%
盐酸	滴定法	≤0.01	不高于检测限	%
刺激性气味	/	/	无刺激性气味	/
备注	1、检测限值：指采用某种检测方法，在当前条件下可被可靠检测到的最低浓度，低于这个数值就无法确定该物质是否存在。 2、“不高于检测限”指经规定方法检测结果低于方法检测限，不得明确检出。 3、若锈层稳定化处理溶液中使用硫酸铜、硫酸钠等硫酸盐作为配料，使用离子色谱法检测时可能检出SO ₄ ²⁻ ，不应误判为游离硫酸。此时应结合总酸滴定法、pH测试及前处理方法，确认是否为游离酸存在。若确认为稳定硫酸盐成分，不作为“硫酸检出”处理。			

5.4.2 锈层稳定化处理溶液厂家应提供至少1年大气暴晒的试验数据。

5.5 材料的存放及管理

5.5.1 材料存储及成品管理应有专人负责，管理人员应经企业培训上岗。

5.5.2 材料入库前应进行检验，核对材料的牌号、规格、批号、质量合格证明文件等，检查表面质量、包装等。

5.5.3 检验合格的材料应按品种、规格、批号分类堆放。

5.5.4 材料入库和发放应有记录，发料和领料时应核对材料的品种、规格和性能。

5.5.5 剩余材料应回收管理，回收入库时，应核对其品种、规格、数量，分类保管。

6 制造技术要求

6.1 切割

6.1.1 切割方法（如机械切割、火焰切割、等离子切割、激光切割等）应根据钢材厚度和切割精度要求合理选择，常见切割方法见表2。

表2 常见切割方法（推荐）

切割方法	适用钢材厚度（mm）	设备类型	精度等级
机械切割	≤30	剪板机、带锯床、圆盘锯	尺寸偏差±2mm
火焰切割	10~150	数控火焰切割机	尺寸偏差±2mm
等离子切割	3~100	数控等离子切割机	尺寸偏差±2mm
激光切割	≤30	光纤激光切割机	尺寸偏差±1mm

6.1.2 钢板切断后，断口上不应有裂纹和大于1.0mm的边缘缺棱，切断处切割面平面度不应大于0.05t（t为厚度），且不应大于2.0mm，割纹深度不应大于0.3mm，局部缺口深度允许偏差为1.0mm。

6.1.3 厚度>50mm的耐候钢火焰切割前，应预热至60℃~100℃，防止冷裂纹。

6.1.4 钢材强度级别不小于420MPa时，切割面的硬度应不超过380HV10；其他钢材切割面的硬度应不超过350HV10。

6.2 矫正与弯曲

6.2.1 零件矫正宜采用冷矫，矫正后的钢板表面不应有明显的凹痕和损伤。

6.2.2 若采用热矫时，加热温度应控制在600℃~800℃，设计文件有要求时，按设计文件规定执行，矫正后钢材温度应缓慢自然冷却，温度降至室温前，不得锤击和用水急冷。加热时应对温度控制，采用远红外温度计测温度。

6.2.3 零件冷作弯曲时，环境温度不宜低于-5℃，内侧弯曲半径不宜小于板厚的15倍，但对U形肋折弯时不宜小于板厚的4倍，U形肋成型后要求圆角外边缘不得有裂纹，手孔切割处打磨平整且过渡圆滑，弯曲后的零件边缘不得有裂纹。

6.2.4 零件的内侧弯曲半径小于板厚的15倍应热煨，热煨的加温温度、高温停留时间、冷却速率应与所加工钢材的性能相适应。

6.3 加工

- 6.3.1 钢结构加工制造前，应经过专项制造方案、焊接工艺评定评审，形成焊接作业指导书等技术文件。
- 6.3.2 零件加工的尺寸精度应符合设计和相关标准要求。加工面的表面粗糙度应 $\leq Ra25\ \mu m$ ，零件边缘的加工深度不得小于3 mm，零件边缘硬度不超过350HV10时，加工深度不受此限。
- 6.3.3 顶紧传力面的表面粗糙度应 $\leq Ra12.5\ \mu m$ ，顶紧加工面与板面垂直度偏差应小于 $0.01t$ （ t 为板厚），且不得大于0.3 mm。
- 6.3.4 零件应根据预留加工量及平直度要求，两边均匀加工，磨去边缘的飞刺、挂渣，使端面光滑。
- 6.3.5 支座垫板应采用机加工的方式，加工完成后支座垫板与钢梁底板相接触面的表面粗糙度应 $\leq Ra12.5\ \mu m$ 。
- 6.3.6 加工过程可通过先进设备与智能化系统的协同应用，自动完成组立、定位焊、构件翻转、熔透焊接、矫正等工序。

6.4 制孔

- 6.4.1 钻孔前，应对工件进行校直或整平，每次钻孔板层厚度不宜超过80 mm。
- 6.4.2 螺栓孔应成正圆柱形，孔壁表面粗糙度应 $\leq Ra25\ \mu m$ ，孔缘无损伤不平，无刺屑，不得采用冲孔、气割孔。孔圆度偏差为 $\pm 0.5\ mm$ 。
- 6.4.3 板厚 $t \leq 30\ mm$ 时，孔壁垂直度不大于0.3 mm，板厚 $t > 30\ mm$ 时，孔壁垂直度不大于0.5 mm。
- 6.4.4 制孔完成后应对孔壁及周边进行打磨处理，不得有飞刺，表面及棱角处应平整且过渡圆滑。

6.5 组装

- 6.5.1 构件应在专用胎架或平台上进行组装，用于组装的胎架或平台应具有足够的强度、刚度和稳定性，并应满足支承、定位、固定和操作等工作需要。
- 6.5.2 U形肋与桥面板应采用自动定位或机械定位组装机进行组装。
- 6.5.3 当条件允许时，应在对接焊缝、全熔透或部分熔透T形接头的端部连接引板，引板的材质、厚度和坡口应与所焊接的焊件相同。
- 6.5.4 构件组装完成后，应按规定进行编号标识，并应做好记录，对其加以保护，防止损坏。
- 6.5.5 组装尺寸允许偏差应符合JTG/T 3651的要求。

6.6 焊接

6.6.1 焊接工艺评定

首次采用的耐候钢、焊接材料、焊接方法、结构形式、预热、后热处理等，在焊接施工前应按JTG/T 3651、Q/CR 9211要求进行焊接工艺评定，并编制焊接工艺规程和焊接作业指导书。

6.6.2 焊接基本规定

焊接件的施焊范围不应超过焊接工艺评定的覆盖范围，焊接现场环境应符合以下要求：

- 电弧焊作业区最大风速不宜超过8 m/s，气体保护电弧焊不宜超过2 m/s，如果超过，应采取有效措施以保障焊接电弧区域不受影响；
- 环境相对湿度 $\geq 80\%$ 或者焊件表面潮湿、暴露于雨雪中时，禁止焊接；
- 焊接环境温度低于 $5\ ^\circ C$ 时，应采取加热或防护措施，确保接头焊接处各方向不小于2倍板厚且不小于100 mm范围内的母材温度，不低于 $20\ ^\circ C$ 或规定的最低预热温度二者的较高值，且在焊接过程中不应低于该温度；
- 焊接环境温度低于 $-10\ ^\circ C$ 时，应进行相应焊接环境下的工艺评定试验。

6.6.3 焊缝间隙

焊缝间隙应满足焊评要求。

6.6.4 焊接坡口

坡口的形式和尺寸应符合GB/T 985.1、GB/T 985.2的有关规定，特殊要求的应根据设计，结合焊接工艺评定确定。焊接坡口应优先采用机械方法加工。

6.6.5 焊接返工

焊接返工的质量控制应和正式焊接作业的质量控制相同，焊缝同一部位的返工次数超过两次时，返工次数、部位和返工情况应在产品的验收资料中说明。

6.6.6 焊接件装配

零部件应经过检查合格后再进行装配，焊缝坡口及边缘每边30 mm~50 mm内的铁锈、毛刺、油污等影响焊接质量的表面缺陷应清除干净并采取必要的防止焊接变形措施。

6.6.7 焊缝质量

焊缝质量应符合以下要求：

- a) 应采用自动化程度高的专机设备进行焊接，提高生产效率和焊缝质量；
- b) 焊缝外观应外形均匀、成型较好，焊道与焊道、焊缝与基体金属间圆滑过渡；
- c) 当外观检查发现裂纹或者怀疑有裂纹时，应进行表面缺陷无损检测；
- d) 焊接完成 24 h 并经过外观检测合格后进行焊缝内部质量检验，内部质量宜采用脉冲反射法超声波检测；
- e) 焊缝内部局部无损检测发现存在疑似裂纹、未熔合或未焊透等危害缺陷时，应加倍检测，仍不合格时应将该条焊缝的检测范围延至全长。
- f) 焊缝如有超标的缺陷，应在缺陷清除后进行补焊，并对该部分焊缝采用原检测方法重新检测。

6.6.8 焊后消除应力处理

如设计有要求按设计要求，如无要求则不处理。

焊后消除应力措施应根据母材耐候钢的化学成分、焊接类型、厚度和焊接接头的拘束度及使用条件等因素确定。

6.7 预处理及除锈

耐候钢分为三种使用场景，涂装使用，免涂装使用，锈层稳定化处理。后续内容适用于锈层稳定化处理的耐候钢。涂装使用的应满足JT/T 722《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》或Q/CR 749.1-2020《铁路桥梁钢结构及构件保护涂装与涂料 第1部分：钢梁》。

6.7.1 构件预处理

构件进场后，应进行预处理和清洗，包括：

- a) 对焊缝进行打磨处理，使其表面平整、焊趾与母材圆滑过渡，清除焊接飞溅物，可使用刮刀或砂轮机操作；
- b) 对存在咬边缺陷（深度 $>0.8\text{mm}$ 或宽度小于深度）部位应进行补焊处理，并打磨平整；
- c) 切割边峰谷差超过1 mm时应打磨至小于1mm，确保切口均匀平整；
- d) 对表面存在层叠、裂缝、夹杂等缺陷的区域，应先打磨处理，必要时补焊后再修整；
- e) 构件临时存放前应清扫其表面浮尘、颗粒物和可见附着物；
- f) 对存在油污区域可使用专用清洁剂进行低压喷洗或软刷刷洗，之后应用淡水彻底冲洗，确保表面无残留；
- g) 可采用碱液或火焰处理表面污染物，处理后应用淡水充分冲洗至表面pH中性；
- h) 小面积油污污染可使用有机溶剂（如酒精或丙酮）擦拭清除；
- i) 清洗完毕后，应使用白色粉笔在构件表面划线进行检测。若划线清晰、无扩散，表明表面清洁达标；
- j) 清洗后应等待构件表面自然干燥，无可见水痕或潮湿痕迹后方可进行喷砂处理；
- k) 当钢构件表面盐分（可溶性氯化物）含量超过控制值时，应使用高压淡水枪冲洗直至达标。

6.7.2 喷砂或抛丸除锈

喷砂或抛丸处理去除构件表面氧化铁皮，表面清洁处理效果应符合GB/T 8923.1规定的Sa2~Sa2.5级，确保钢板表面具备均匀的粗糙纹理。具体要求包括：

- a) 喷砂除锈所用磨料建议选用 S330 钢丸与 G40 钢砂的混合物，性能应符合 GB/T 18838.1 的要求；
- b) 磨料应清洁(不含油、杂物)、干燥、盐分 $\leq 250 \mu\text{S}/\text{cm}$ ，其粒度和形状应满足喷砂处理后对表面粗糙度的要求；
- c) 使用过程中应经常检查磨料的使用情况，并采取过筛、除灰、补充新料等手段，必要时采取烘干措施，以保持所使用磨料的清洁、干燥、数量及性能；
- d) 喷砂应在喷砂房内进行，喷砂房应具备全天候正常进行喷砂作业条件；
- e) 喷砂房除尘通风量应达到 10~12 次/h；
- f) 喷砂房照明应采用防尘、防爆型照明系统，室内照度不小于 300 lx；
- g) 喷砂房温度应高于大气露点 3℃，相对温度应 $\leq 85\%$ ；
- h) 喷砂房的粉尘排放应满足当地政府的环保要求。

6.7.3 质量检查

质量检查要求见表3。

表3 质量检查要求

工序	项目	检测方法	检验要求	频率	标准
污染物处理	油污、杂质	目测、粉笔划线	无可见油污、杂质	全检	Q/CR 749-2020
	水分、盐分	目测	目测不可见	全检	/
工序	项目	检测方法	检验要求	频率	标准
污染物处理	焊割烟尘	手指摩擦	用手指轻摩擦，不见有烟尘跌落	全检	/
	粉笔记号	目测	用干净棉布擦拭至表面无残留痕迹，允许可见痕迹	全检	/
	油漆笔记号	目测	目测不可见	全检	/
喷砂	清洁度	图谱对照	涂装体系/锈层稳定化处理	全检	GB/T 8923.1-2011 GB/T 8923.2-2008
	粗糙度	表面粗糙度比较样板或粗糙度测量仪	涂装体系	全检	GB/T 13288.2-2011 GB/T 6062-2009

6.8 锈层稳定化处理

6.8.1 施工前准备

施工前准备应符合以下要求：

- a) 在项目开工前，应对施工人员进行岗位培训及技术培训，学习施工工艺规程，进行安全技术交底，要求所有施工人员必须熟悉施工规范、技术规范、质检标准，严格按照施工工艺施工；
- b) 应提前做好物资采购工作，耐候钢锈蚀处理剂按计划日期进场；
- c) 对投入使用的抛丸机、喷砂设备、激光除锈机、电动喷雾器、高压无气喷涂机以及配电箱等进行全面的检查，确保施工过程安全可控；
- d) 厂房的设置必须保证钢结构的涂装进度与制造进度相匹配；
- e) 所有用于表面处理施工的设备及检测仪器应建立明细台帐；
- f) 所有用于表面处理施工的计量仪器应按规定进行计量检测，合格后方可用于施工；
- g) 所有设备要编制定期检修、维护保养计划，并按规定做好定期检修、维护保养记录；
- h) 已经损坏的设备或检测仪器禁止使用，应及时检修或更换。

6.8.2 构件摆放

为确保锈层稳定化处理剂及水分能充分排出、避免积液，耐候钢构件摆放(堆放)应符合下列要求：

- a) 槽形、H型、I型构件应沿开口方向设置排液坡度，倾斜角宜 $\geq 5^\circ$ （推荐 10° ），以便凹槽内液体排出，不得长期水平积液。

- b) 管状构件（圆管、方管等）：
- 外径（或对边尺寸） < 500 mm 时，可竖直或倾斜摆放，倾斜角宜 $\geq 5^\circ$ ；
 - 外径 ≥ 500 mm 的大型构件在水平运输或处理条件下可水平摆放，但应设置一端抬高 ≥ 20 mm 或开设排液孔，保证排液。
- c) 平板（板件、翼缘板等）宜立放或倾斜堆放，倾角 $\geq 3^\circ$ ；当必须平放时，应在板面最低处设置排液间隙或吸液处理。
- d) 复杂异形构件（桁架、支撑件、组合节点）应根据构造最低点确定排液方向，必要时使用临时支撑或翻转工具使整体形成 $\geq 5^\circ$ 排液坡度；局部封闭腔体应预留泄水孔。
- e) 对形状不规则构件应使用可调支架、楔块或钢垫片定位，调整姿态确保无积液“死角”。
- f) 除已设计排液措施的特殊工序外，构件不得长时间完全水平平放，以免处理剂或雨水滞留影响锈层稳定化。
- g) 所有堆放应离地垫高，宜采用型钢、镀锌钢支撑或其他不吸潮材料；严禁使用木材、纸质或易吸湿材料直接接触构件。离地高度宜 ≥ 100 mm。
- h) 喷淋处理剂或水洗后，应在 30 min 内对构件最低汇液部位进行检查；对可见积液、挂珠区域应采用吸液滚筒、无绒抹布或压缩空气辅助去除，避免形成局部色差或黑斑。

6.8.3 施工环境

耐候钢构件的喷淋环境应符合以下要求：

- a) 喷淋作业不得在夏季阳光直射下进行，以避免构件表面温度过高（建议 $\leq 40^\circ\text{C}$ ），防止处理剂和水分蒸发过快导致锈层发黑、粘附性降低；
- b) 环境温度应控制在 $0^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 之间，不得在 0°C 以下或构件表面结冰时作业；
- c) 风力 ≥ 5 级、下雨、下雪及高湿度（相对湿度 $\geq 90\%$ ）天气禁止进行喷淋处理作业；
- d) 喷淋施工区域应设置明显安全标识，施工场地应封闭或设置围挡，避免处理剂飞溅至无关区域或污染已处理部件；
- e) 已完成处理的构件表面不得受到二次碰撞或摩擦；
- f) 在封闭空间内施工应保持良好通风条件，通风换气次数建议 ≥ 6 次/h；
- g) 操作人员应穿戴胶皮手套、防护眼镜、防毒口罩、防滑鞋等防护用品，喷涂作业时应穿防腐耐药品喷淋服；
- h) 喷淋作业中应控制喷枪压力与喷洒角度，避免锈层稳定剂飞溅扩散，确保施工效率与材料利用率。

6.8.4 处理效果

耐候钢构件的喷淋效果应符合以下要求：

- a) 喷淋应覆盖构件所有外露表面，处理剂分布无漏喷、堆积、挂流现象；
- b) 构件表面锈蚀程度与颜色应保持一致，色差应符合附录 B 中 $\Delta E \leq 20$ 的要求；
- c) 喷淋次数与间隔时间应结合现场气候条件（温度、湿度、风速、阳光照射）和试样反应结果确定，整体喷淋应在 1-2 天内完成。
- d) 喷淋技术要求见表 4。

表4 喷淋工艺参数

项目	喷淋技术要求
喷涂距离	约350 mm
喷涂角度	$80^\circ \sim 90^\circ$
喷涂方式	上下往复均匀喷涂，并平行于构件表面匀速移动，避免漏喷

6.8.5 积水和残液处理

为保证锈层稳定化处理效果及颜色均匀性，喷淋过程中应及时处理构件表面可能产生的积液或水珠。具体要求如下：：

- a) 构件底板等水平表面在喷淋后易积聚过多处理剂，应在喷涂后 5~10 分钟内使用滚筒刷吸除多余液体，并在湿润状态下均匀滚刷底板，避免液膜厚薄不一导致颜色不均。
- b) 外立面喷淋后，底部边缘常出现垂挂水珠，易造成下部颜色偏深。应在喷淋后每隔 5~10 分钟检查一次，使用滚筒或无绒吸水布及时吸除水珠，直至外立面自然干燥。
- c) 外立面上缘或边角位置若积液较多，应在处理剂干燥前及时吸除，避免二次流淌造成中部或底部色差。
- d) 所有积液易聚区域（如凹陷、角部、螺栓孔周围）应重点巡查。若发现局部发黑、水渍残留，应立即吸干，以避免锈层形成斑驳。
- e) 若构件服役状态存在积水位置，应按照标准规范，开工艺孔。

6.8.6 检查

构件的检查应符合以下要求：

- a) 应提高结构完整性检查，稳定化处理前装焊所有构件，降低后装构件与已锈化构件的色差；
- b) 构件安装前需要进行构件锈层致密性和颜色均匀性检查，构件锈层致密性和颜色均匀性检查方法及要求参照附录 A、B 进行；
- c) 若构件锈层致密性和颜色均匀性未达到要求，则必须重新进行锈层预处理。

6.8.7 表观色差处理要求

- a) 锈层稳定化处理后的构件在初期服役阶段可能因雨水冲刷、湿润干燥周期、阳光照射、表面状态等影响，导致不同部位颜色呈现浅黄、深褐、棕红或条纹等差异。此类锈层外观差异为自然生锈过程的一部分，不影响构件防护性能。
- b) 色差的外观检测应以《附录 B》的 ΔE 评价作为参考，结合整体构件外观协调性判断，不应以局部颜色差异、淋雨区域发黄、锈液条纹为依据要求返工。确属工艺失误导致锈层无法自修复者，方可判为质量问题。

6.8.8 构件标识

构件或其重要部位的包装应有醒目标识，标识不得形成构件表面污染，亦不得影响构件性能。免涂装构件制造过程中，应避免构件上沾染油脂、油漆、焊接飞溅等，作标记时应采用水性笔。

6.8.9 成品保护

锈层稳定化处理完成后的钢构件在存放和运输过程中应采取成品保护措施，避免锈层质量下降、表面污染或物理损伤。具体要求如下：

- c) 稳定化处理完成后，构件可在自然环境中暴露于雨水中，但不得出现大面积积水或与潮湿土壤直接接触。表面应保持清洁，排水畅通；
- d) 严禁使用防水篷布、塑料膜等完全覆盖构件，防止形成密闭高湿环境。必要时可采用防尘围挡或防泥墙，避免泥水溅污构件表面；
- e) 水平放置的管状构件（如圆管、方管等）应在室内存放，或设置临时挡雨棚。应设置排液坡度，避免锈液挂流或积水污染，保持构件表面颜色均匀；
- f) 构件底部不得与泥土、沙石或含腐蚀性液体的地面直接接触，宜使用镀锌型钢、镀锌方管等金属支架垫高。构件离地高度不应小于 100 mm；
- g) 垫高材料不得使用木材、纸板、泡沫等易吸湿或腐蚀性材料，以防吸湿后污染钢构件底部表面，造成锈层异常；
- h) 对于凹槽构件（如 H 型钢、槽钢等）宜倾斜或倒置存放，使构件开口向下或侧向，避免雨水积聚在构件凹槽中；

6.8.10 运输

构件的运输应符合以下要求：

- a) 装卸和运输过程中，应尽量避免钢构件之间的直接碰撞、摩擦或刮擦，以防止破坏锈层；
- b) 构件运输时如存在积水面，应避免雨天运输，如不存在积水面，可雨天运输；
- c) 严禁使用防水篷布或防水包装材料将构件完全覆盖；

- d) 构件在运输车厢内应有一定的离地高度，底部用型钢或其他不吸潮的材料垫高。

6.8.11 安装

构件的安装应符合以下要求：

- 现场存储和安装耐候钢构件时，应避免破坏已形成的稳定锈层，务必干燥存储、严禁浸泡；
- 安装过程中，锈层处理后的钢构件应避免受到机械碰撞、刮擦和摩擦，确保锈层的完整性；
- 安装时应确保锈层处理后的钢构件不会被污染物（如泥浆、化学品等）附着，若不慎接触污染物，应及时清理；
- 焊接部位因受高温影响会破坏原有锈层，焊接完成后应对热影响区进行机械打磨，并按照本标准 6.8.3~6.8.5 条款重新进行喷淋和锈层处理；
- 安装完成后，应对施工过程中产生的污渍、工具印记、油脂等进行清理，以避免这些物质对钢构件表面锈层产生不良影响。

6.8.12 锈层损伤修复与污染清理

耐候钢构件在制造、运输、安装或使用过程中，若因污染、冲击或特殊检测手段导致锈层损伤，应根据污染或损伤类型，采取以下修复措施：

- 泥土污染：使用软刷、空气压缩机或高压水枪清除泥土；
- 混凝土污染：在混凝土尚未完全硬化时，尽快用湿布或软刷将其清除。如果混凝土已经硬化，可以用塑料刮刀轻轻刮掉表面残留物，避免使用金属工具以防止刮伤锈层；
- 耦合剂污染：在超声检测或其他操作中，耐候钢构件可能会被耦合剂污染，应尽量减少耦合剂流淌，并对污染区域打磨处理；
- 清除污染物后的钢构件，如色差对整体影响较小，可不做处理；
- 探伤液：对探伤区域用水冲洗，并放置 1~3 天再喷砂，待残存探伤剂和钢基体反应完全后，尽量将钢构表面喷砂至 Sa2.5 级，喷砂不便位置局部打磨至 St3 级，减少喷砂后色差，探伤后用油漆稀释剂涂刷探伤区域，清洗残存探伤剂，之后再对构件整体喷砂；
- 锈层稳定化处理后的耐候钢构件，如大面积损伤或污染，出现明显色差时，颜色偏黄的区域可以不作处理，锈层呈现黑色的区域，需先使用工具打磨至 St3 级，再进行锈层稳定化处理和养护，直至色差缩小；
- 焊缝及破损区域修补要求见表 5。

表5 焊缝及破损区域修补方案

工序	工艺要求	施工方法
表面净化	无油、干燥	稀释剂擦洗
表面清理	清除焊渣、焊豆，焊缝修整平整且过渡圆滑	机械打磨
除锈	手工机械除锈St3级	角磨机、砂轮等打磨
后处理	锈层稳定化处理	除锈后4小时内刷涂或辊涂完成涂装

6.8.13 施工记录

处理过程中应对处理工艺参数进行记录，内容应包括：构件编号、处理时间、处理人员、处理前构件表面状态确认、积液情况、构件存放期间积水情况等。锈层稳定化处理工艺记录表见附录C。

7 监理技术要求

7.1 制造前检查

7.1.1 应对被监理单位的生产条件进行审查，检查质量体系运行情况，包括检查原材料管理、生产控制、检验与测量、不合格品控制、产品追溯性、产品放行等程序以及实物质量。

7.1.2 检查特殊岗位人员持证情况，如焊工、无损探伤人员、理化性能试验人员等，检查检验工具、仪器和设备的计量检定和运行情况。

7.2 原材料检查

- 7.2.1 对耐候钢的检查内容应包括：
- 审查质量证明文件；
 - 现场检查标识、包装及存储情况；
 - 抽查尺寸及外观质量；
 - 现场见证复验过程；
 - 审查复验报告。
- 7.2.2 对焊接材料的检查内容应包括：
- 审查质量证明文件；
 - 现场见证标识、包装及存储情况；
 - 审查复验报告。

7.3 耐候钢桥梁制造

7.3.1 切割

应对以下项目进行检查：

- 检查切割设备是否正常运行，切割刀具是否符合要求。例如，火焰切割时，割嘴的型号和状态会影响切割质量；
- 巡检切割过程中的工艺参数，如切割速度、火焰温度（对于火焰切割）、等离子气体流量（对于等离子切割）、激光功率（对于激光切割）等；
- 对切割后的构件进行检查，查看切口边缘是否平整、无裂纹和毛刺，尺寸精度是否符合要求。

7.3.2 制孔

- 应对以下项目进行检查：
- 检查制孔设备运行情况；
- 监督制孔过程控制；
- 制孔完成后，检查孔径尺寸、垂直度和清洁度等。

7.3.3 焊接

应对以下项目进行检查：

- 审查焊接工艺评定报告，确保焊接工艺参数是经过评定且合理的。检查焊接人员的资质证书，只有具备相应资格的焊工才能进行重要部位的焊接。查看焊接材料是否与母材相匹配，其质量证明文件是否齐全；
- 在焊接过程中，巡检焊接操作是否符合工艺要求，如焊接顺序、焊接方向等。对于多层多道焊，检查每一层焊缝的质量，包括焊缝的成型、是否有夹渣、气孔等缺陷。巡检焊接环境，如湿度、温度等是否符合焊接要求；
- 对焊接后的焊缝进行外观检查，采用无损检测方法（如超声波探伤、射线探伤等）对焊缝内部质量进行检测，确保焊缝质量达到规定的标准。

7.3.4 构件制作

应对以下项目进行检查：

- 检查构件的尺寸与设计图纸尺寸的精度；
- 检查构件的形状是否符合设计要求；
- 查看构件表面是否有油污、铁锈、氧化皮等杂质，查看除锈等级是否符合要求。

7.3.5 组装

应对以下项目进行检查：

- 按照设计文件和施工组织设计，监督构件的组装顺序；
- 再次检查焊缝质量，尤其是现场组装焊接的部位；
- 使用测量仪器检查构件组装后的整体精度。

7.3.6 锈层稳定化处理

应对以下项目进行检查：

- a) 审查施工单位提交的锈层稳定化处理施工方案，确保方案符合设计要求；
- b) 检查锈层稳定化处理溶液的质量证明文件；
- c) 检查施工单位准备的喷砂和喷淋设备运行情况；
- d) 检查耐候钢构件表面喷砂是否达到 Sa2~Sa2½级除锈等级要求；
- e) 监督锈层稳定化处理施工工艺，确保喷淋顺序、干燥-喷淋的时间间隔、喷淋次数等满足 6.8 的要求；
- f) 锈层稳定化处理结束后，检查耐候钢构件的整体外观颜色，应符合设计要求。

7.4 存放及运输

应对以下项目进行检查：

- a) 检查搬运工具和方式；
- b) 检查存放环境和方式；
- c) 检查运输工具、支撑固定方式和防护措施。

8 成品验收

8.1 耐候钢桥梁成品验收应在制造单位自检合格的基础上进行，由建设单位、设计单位、监理单位等相关方共同参与。

8.2 验收内容包括桥梁整体尺寸、外观质量、焊缝质量等，验收标准应符合本标准和设计文件要求。

8.3 耐候钢锈层属自然氧化产物，其颜色随时间、气候和构件状态动态演化，呈现局部色差、条纹、浅锈斑等为常见现象。成品构件如经稳定化处理并符合除锈等级、工艺规范、构件表面无浮锈、无可见污染、锈层附着牢固、颜色过渡自然等要求，即视为合格，不应因非结构性、非性能性外观差异作为退货、整改或拒收依据。

8.4 交付验收记录需存档至少 5 年。

附录 A
(规范性)
锈层致密性测试

A.1 将宽 12 mm 或 24 mm、长度不小于 50 mm 的透明胶带均匀黏贴在待测试的试样表面。抓住透明胶带的一端头，弯曲透明胶带使其粘合面与试片约成 45° 角，向其方向急剧牵拉，从试片撕开胶带。利用 40 倍放大镜查验被粘贴撕开的试片表面，如果试片表面无金属基体露出，表示锈层致密；若试片表面有金属基体露出，表示锈层疏松。



图A.1 稳定化锈层致密度分析示意图

A.2 锈层稳定化处理后构件表面锈层致密性测试后应无金属基体漏出。

附 录 B
(规范性)
锈层颜色均匀性检测

- B.1 采用色差仪对耐候桥梁钢构件锈层颜色均匀性检测。
- B.2 选取待检测部位某一点锈层为标准样，测量构件同一平面 10 个点锈层色差值 ΔE 。
- B.3 计算 10 个检测点平均色差值 ΔE 。
- B.4 锈层稳定化处理后构件同一平面锈层平均色差值 ΔE 应小于等于 20。

附录 C
(规范性)

锈层稳定化处理工艺记录表

序号	构件编号	处理日期	操作人员	处理前表面状态	喷淋次数	是否存在积液	是否存在色差	存放期间是否积水	现场环境情况备注	负责人签字
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
...										