

ICS 91.040

CCS E487

团 体 标 准

T/CI—2024

风电塔架主体结构用高强度钢焊接适应性 评价方法

Evaluation method of welding adaptability of high-strength steel for main
structure of wind power tower

(征求意见稿)

2024-XX-XX 发布

2024-XX-XX 实施

中国国际科技促进会 发布

引 言

随着当今清洁能源需求的快速增长，风电领域的投资与建设日新月异。作为风电装备成本构成的重要部分，风电塔架结构钢材料的升级换代对未来行业高质量发展具有重要影响。当前，风电塔架结构钢材料的应用存在以下两方面问题：

第一、行业内一般采用GB 1591标准进行风塔结构钢材料验收，但该标准所规定的技术要求过于宽泛，且不考虑材料特性对现场焊接的适应性，从而为后续现场制造焊接带来了风险和隐患；

第二、当前上游材料供应商众多，装备能力和技术能力差别较大，对风电塔架领域用钢的认识也不在同一水平，亟需推出一套能够约束材料性能和焊接适应性的标准，从而为风塔现场制造焊接与质量的均匀稳定提供保障。

本标准规定的风电塔架主体结构用高强钢焊接适应性评价方法，适用于基于屈服强度极限设计以及疲劳设计的大型风电塔架结构高强钢材料的选择和比对，通过在供应商资质评审或投标阶段基于现场制造焊接条件的高强钢焊接适应性评价，为高强钢风电塔架现场制造焊接过程的顺利实施提供保证。所有高强钢材料供应商在参与项目竞标前，必须按照本标准要求完成高强钢材料焊接适应性评价，评价结果作为项目竞标的补充性文件与重要技术依据。

1 范围

本文件规定了风电塔架主体结构用高强钢焊接适应性评价方法，包括筒体和门框，不包括法兰和附属件。本文件规定的焊接适应性评价方法，可应用于陆地和海上风电塔架项目，但作为特定环境条件下的服役性能，需要结合实际需求单独进行评价。

本文件适用于风电塔架主体结构用高强钢焊接适应性评价，根据需要也可用于普碳钢。通过在选材、供应商资质评审或投标阶段材料焊接适应性评价，为业主和设计方选择结构钢材料和供应商提供重要参考。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 1591 低合金高强度结构钢

GB/T 28410 风力发电塔用结构钢板

GB/T 5313 厚度方向性能钢板

GB/T 19072 风力发电机组 塔架

GB/T 3375 焊接术语

GB 50661 钢结构焊接规范

GB/T 12467.1 金属材料熔焊质量要求. 第1部分质量要求相应等级的选择准则

GB/T 12467.2 金属材料熔焊质量要求. 第2部分完整质量要求

GB/T 12467.3 金属材料熔焊质量要求. 第3部分一般质量要求

GB/T 12467.4 金属材料熔焊质量要求. 第4部分基本质量要求

GB/T 12467.5 金属材料熔焊质量要求. 第5部分满足质量要求应依据的标准文件

GB/T 985.1 气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口

GB/T 985.2 埋弧焊的推荐坡口

JB/T 10045 热切割 质量和几何技术规范

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 39281 气体保护电弧焊用高强钢实心焊丝

GB/T 10045 非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝

GB/T 36233 高强钢药芯焊丝

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-焊剂组合分类要求

GB/T 36034 埋弧焊用高强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求

GB/T 36037 埋弧焊和电渣焊用焊剂

GB/T 18591 焊接 预热温度、道间温度及预热维持温度的测量指南

GB/T 32260.2 金属材料焊缝的破坏性试验 焊件的冷裂纹试验 弧焊方法 第2部分：自拘束试验

ISO 17642-2 金属焊缝的无损检查 焊件的冷裂开检查 第2部分-自约束检查

NB/T 47013.3 承压设备无损检测 第三部分：超声检测

NB/T 47014 承压设备焊接工艺评定

NB/T 47015 压力容器焊接规程

NB/T 47016 承压设备产品焊接试件的力学性能检验

ISO 15614-1 金属材料焊接工艺规程及评定 焊接工艺评定试验 第一部分：钢的电弧焊和气焊、镍及镍合金的电弧焊

ISO 15609-1 金属材料焊接工艺规程和评定 焊接工艺规程 第一部分：电弧焊

ISO/TR 17671-2 焊接 金属材料焊接的推荐 第二部分：铁素体钢的电弧焊接

ISO 17640 焊缝无损检测 超声波检测 技术、检测水平和评定

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第一部分：室温试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 4340.1 金属材料 维氏硬度试验 第一部分：试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

ISO 1099 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 24176 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法

ISO 12107 金属材料 疲劳试验 数据统计方案与分析方法

IIW-2259-15 Recommendations for fatigue design of welded joints and components

DNV-RP-C203 Fatigue design of offshore steel structures

ISO 12135 金属材料准静态断裂韧度的统一试验方法

ISO 15653 金属材料 焊接接头准静态断裂韧性试验方法

GB/T 21143 金属材料 准静态断裂韧度的统一试验方法

GB/T 28896 金属材料 焊接接头准静态断裂韧性测定的试验方法

3 术语和定义

GB/T 3375确立规定的以及下列术语和定义适用于本标准：

3.1

业主 Owner

工程的主管单位或建设单位，或由其委托并授权的单位或代表。

3.2

钢材供应商 Supplier

风电塔架主体结构用高强钢生产和供应单位。

3.3

必须 Shall

表示一种强制性要求的术语，是达到某种特定目的或满足某种特定要求的必要条件。

3.4

风电塔架主体结构 Wind turbines tower main structure

特指风电塔架中应用高强钢板的筒体和门框部分，不包括法兰和附属件。

3.5

筒体 Tube

由具备特定形状的钢板经过卷制及纵焊缝焊接形成的锥筒形或直筒型单个部件。

3.6

门框 Doorframe

出于服役过程中检修需要在筒体特定部位开孔的门孔框架，一般用超过筒体厚度的结构钢与筒体进行连接，起到补强作用以及用于安装塔架门。

3.7

法兰 Flange

用于筒段之间连接的结构件，一般通过焊接形式与筒节连接。

3.8

附属件 Attachment

出于检修或其他部件安装目的，在筒体上以焊接形式连接的各类接口结构件。

3.9

高强钢 High strength steel

根据风电塔架行业特点与使用习惯，特指规定最低屈服强度级别达到 420MPa 及以上的结构钢，供货状态包括正火、正火轧制、控轧控冷 (TMCP) 等。

3.10

焊接适应性 Weldability

基于特定材料和焊接工艺方法的焊接过程中形成质量与性能良好的焊接接头的的能力。

3.11

焊接工艺指导书 Proposed welding procedure specification

按照工程项目要求，根据已有的焊接试验结果或工程经验编制的可用于材料焊接适应性评价的焊接工艺指导性文件。

3.12

焊接工艺规程 Welding procedure specification

基于焊接工艺指导书、经过评价合格的可用于材料焊接适应性评价的一整套详细的焊接技术规定和程序。

3.13

重要变量 Essential variables

特指某一重要的条件或因素，当其发生变化时，会对已经评价合格的材料焊接适应性结果产生重要影响，并需要重新按照标准要求重新进行焊接适应性评价。

3.14

焊接工艺性能 Welding operability and defect sensitivity

在特定焊接工艺条件下，特定材料组合能够实现稳定焊接并得到质量良好的焊接接头的的能力，以及对各种焊接缺陷的敏感性。

3.15

焊接冷裂纹敏感性 Welding cold crack sensitivity

在一定的焊接拘束条件下，特定母材与焊接材料组合在焊接过程中产生冷裂纹的倾向。

3.16

焊接接头力学性能 Weld joint mechanical performance

焊接接头在服役载荷作用下抵抗失效的能力，包括强度、导向弯曲性能、低温冲击韧性、断裂韧性、高周疲劳性能等。

3.17

断裂韧性 Fracture toughness

材料或焊接结构在弹塑性状态下抵抗裂纹起裂和止裂的能力，一般通过断裂力学方法测试并计算获取，工程上通常用裂纹尖端张开位移 (CTOD) 表示。

3.18

高周疲劳性能 High cycle fatigue performance

材料或焊接结构在一定的循环交变动载荷作用下，在不发生局部宏观塑性变形前提下的疲劳寿命。

3.19

疲劳强度特征值 Detailed category fatigue strength

基于固定斜率的高周疲劳S-N曲线、疲劳循环次数为 2×10^6 次对应的疲劳应力范围值。

4 代号和缩略语

本文件出现的代号和缩略语规定如下：

PWPS：焊接工艺指导书

WPS：焊接工艺规程

SAW：埋弧焊

FCAW-G：药芯焊丝熔化极气体保护焊

NDT：无损检验

UT：超声波检验

HAZ：焊接热影响区

CTOD：裂纹尖端张开位移

SENB：单侧缺口弯曲

CMOD：引伸计监测到的裂纹嘴张开位移

FAT：疲劳强度特征值

F_m ：CTOD 试验过程中非稳态脆性断裂或达到最大力平台时最大力

V_p ：对应于 F_m 的引伸计监测到的裂纹嘴张开位移

δ_c ：稳定裂纹扩展长度 $\delta_a < 0.2\text{mm}$ 时非稳态脆性断裂 CTOD 特征值

δ_u : 稳定裂纹扩展长度 $\delta_a > 0.2\text{mm}$ 时非稳态脆性断裂 CTOD 特征值

δ_m : 加载过程中出现最大力平台时对应的 CTOD 特征值

ECA: 工程临界评估

σ_{\max} : 疲劳载荷最高应力值

σ_{\min} : 疲劳载荷最低应力值

$\Delta\sigma$: 疲劳载荷应力范围值, $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

N: 特定疲劳载荷条件下循环次数(条件疲劳寿命)

5 焊接工艺性能评价

5.1 本标准主要侧重于与高强钢材料属性密切相关焊接冷裂纹敏感性评价。

5.2 结合风电塔架现场制造焊接工艺特点, 推荐采用 GB/T 32260.2 规定的具有自拘束特征的斜 Y 坡口裂纹试验进行高强钢特定材料组合焊接冷裂纹敏感性评价, 提供完整的评价报告。

5.3 对于壁厚达到 30mm 及以上的高强钢板, 应按照本标准要求对焊接冷裂纹敏感性评价。对于壁厚小于 30mm 的高强钢板, 可以与业主、主机供应商或第三方进行协商, 免除基于本标准的焊接冷裂纹敏感性评价。

5.4 斜 Y 坡口裂纹试验评价报告内容应该包括:

a) 母材与焊接材料组合种类、质量证明书

b) 焊接方法

c) 预热温度范围

d) 焊接工艺参数(焊接电流、焊接电压、试验焊缝焊接速度等)

e) 试验焊缝整体形貌

f) 试验焊缝表面裂纹、根部裂纹、断面裂纹评价, 提供裂纹率与宏观图

g) 评估根部单道焊缝焊接条件下材料硬化程度, 遵循 GB/T 2654, 提供各个位置 HV10 维氏硬度值。如果焊接冷裂纹率满足标准要求, 根部单道焊缝硬度值不作为验收指标, 但硬化程度作为不同钢材供应商材料优劣的比较依据。

6 基于对接接头力学性能评价的焊接工艺指导书与焊接工艺规程

6.1 本标准侧重于风电塔架主体结构用高强钢焊接适应性评价, 包括筒体和门框, 不包括法兰和附属件。涉及的焊接方法分别为埋弧焊和气体保护药芯焊丝半自动焊。

6.2 为了完成高强钢特定焊接工艺条件下对接接头力学性能检测与评价，需要完成板材对接焊缝的焊接。

6.3 在进行高强钢板材焊接前，钢材供应商需要结合风电塔架现场制造焊接条件与自身经验，编制完成高强钢焊接适应性评价焊接工艺指导书(PWPS)，并提交业主或权威第三方审核批准，只有该 PWPS 经过审核批准后，方可开始高强钢板材焊接试验。

6.4 经过焊接适应性评价合格后，PWPS 上升为焊接工艺规程(WPS)，并作为高强钢焊接适应性评价报告的一部分提交业主。

6.5 为了保证高强钢焊接适应性评价结果对后期项目设计、塔架制造焊接的指导作用，钢材供应商宜采用与塔架厂现场制造焊接相同的工艺，或者由业主、主机供应商指定塔架厂开展联合焊接试验。

6.6 PWPS 和 WPS 应包含以下内容：

a) 高强钢板材信息 包括来源、最终状态、强度级别、厚度、主要化学成分、碳当量(C_{eq})与冷裂纹敏感指数(P_{cm})、实际的力学性能(屈服强度、抗拉强度、延伸率、低温冲击韧性、维氏硬度等)

b) 焊接接头型式设计 包括坡口形式、坡口角度、钝边尺寸、组对间隙范围、是否使用背面衬垫等，提供详细的接头形式图

c) 焊接方法 结合风电塔架主体结构现场制造焊接特点，高强钢焊接适应性适用埋弧自动焊(SAW)和熔化极气体保护药芯焊丝半自动焊(FCAW-G)两种焊接方法

d) 焊接材料 包括气体保护实心焊丝(用于埋弧焊前的打底焊)、埋弧焊丝、焊剂、气体保护药芯焊丝、保护气体等，并提供所选择的焊接材料的型号(AWS 或 GB 标准型号分类)、牌号(厂家和商标)、规格

e) 焊接位置与焊接方向 结合风电塔架主体结构现场制造焊接特点，焊接位置包括平焊、横焊和立焊，立焊位置的焊接方向包括上向焊与下向焊，焊接位置与焊接方向的选择需要明确

f) 焊接环境 包括环境温度、湿度和风速

g) 电流种类与极性 电流种类是指焊接电源的输出电流特征，包括直流和交流两种。在直流输出特征情况下，包括焊丝直流正接(DCEP)和直流反接(DCEN)两种接线方式。电流种类与极性的选择需要明确，并由业主或权威第三方审核批准；

h) 焊接电源厂家与型号 提供焊接电源厂家与型号，对于多功能焊接装备，明确具体的焊接模式

i) 焊接准备工作 明确焊前坡口及其两侧清理方法和范围、焊前组对方法、拘束焊接或自由焊接等

j) 预热、后热与焊后热处理 明确焊前预热温度、预热方法与预热温度监测方法，明确是否采用后热与焊后热处理，如有，规定采用的后热与焊后热处理制度

k) 道间清理 规定详细的道间清理方法与使用的工具，避免焊道夹渣缺陷，保证后续焊道均匀成型

l) 焊接工艺参数 结合风电塔架主体结构现场制造焊接特点，明确焊接电流、焊接电压、焊接速度、焊接热输入范围、保护气体流量等

6.7 焊接工艺实施过程参照 GB 50661：钢结构焊接规范，由于本标准侧重于结构钢材料焊接适应性评价，而非具体的结构件制造焊接，在满足试验目的的前提下，GB 50661 相关条款均不作为本标准中的强制选项。

6.8 具体的 PWPS 和 WPS 参考格式见附件 1。

7 对接接头外观检查与无损检验

7.1 针对完成对接焊接的高强钢焊板，进行外观检查，除了标记咬边、表面气孔、不均匀尖锐焊道等可能存在的焊接缺陷以外，至少随机记录 5 组不同位置焊缝余高和宽度数据。

7.2 针对完成外观检查的对接焊接的高强钢焊板，按照 ISO 17640 标准要求进行超声波无损检验(UT)，并进行横向扫查，对发现的除焊接裂纹以外的内部超标缺陷进行标记，以便在后续取样时避开焊接缺陷。

7.3 如果发现各种形式的焊接裂纹，需要对裂纹试样进行解剖与分析，明确产生焊接裂纹的种类和原因，形成分析报告与解决方案，并报业主和第三方知晓。同时，有针对性调整焊接工艺指导书后重新进行焊接与检验，直至没有焊接裂纹缺陷为止。

8 对接接头力学性能评价

针对完成外观检查与超声波无损检验的高强钢对接接头，进行力学性能评价试验。图 1 所示为对接接头常规力学性能试样取样位置。对于焊接接头 CTOD 断裂韧性和疲劳试样，由于所需试样数量较多，需要单独准备一副焊板，去除两端各 25mm 长度的焊接不均匀区域后，可以在任意位置取样。

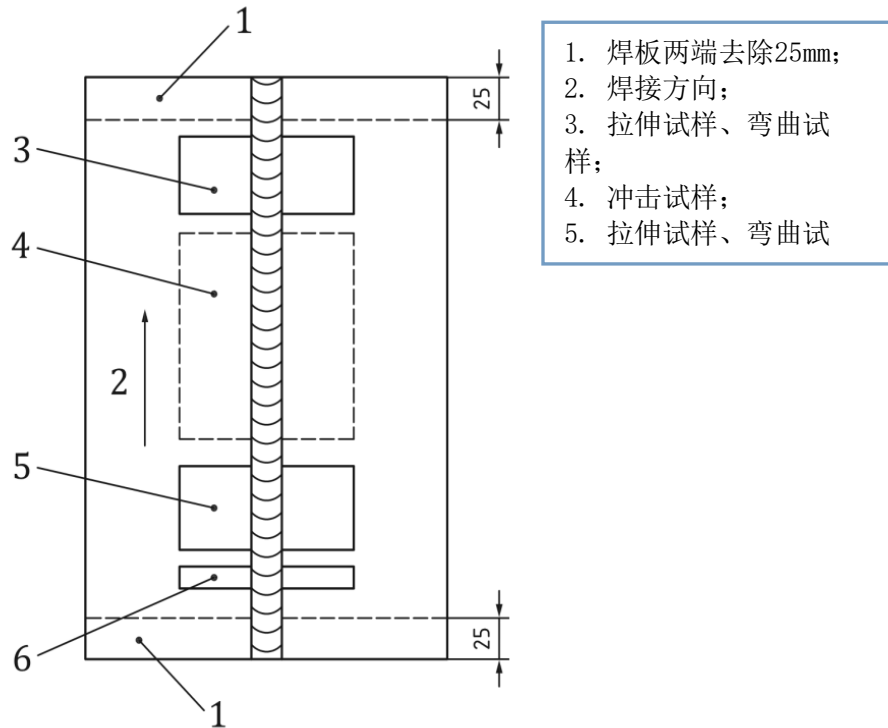


图1 对接接头常规力学性能试样取样位置

力学性能评价项目与试验数量如表 1 所示。推荐采用机械冷加工方法取样，如果采用热加工方法取样，则需要去除热影响区至少 3mm。取样时，根据前期外观检查与无损检验结果，避开超标焊接缺陷区域。如果焊后试板出现较大的角变形，对于拉伸、弯曲、疲劳 S-N 曲线试验试样，可以进行冷矫直。然而，对于冲击和 CTOD 断裂韧性试样，不允许进行冷矫直。

表 1 高强钢对接接头力学性能评价项目与试验数量

厚度 (mm)	拉 伸 (个)	弯曲 (个)			冲击 ⁽¹⁾ (个)	宏观金 相(个)	维氏硬 度 (个)	CTOD ⁽²⁾ (个)	S-N 曲线 ⁽³⁾ (组)
		面弯	背弯	侧弯					
<20	2	2	2	/	6	1	1	6	1
≥20	2	/	/	4	6	1	1	6	1

备注:

(1) 接头冲击试验位置包括焊缝金属和 HAZ，每个位置 3 个试样；

(2) CTOD 断裂韧性试验位置包括焊缝金属和 HAZ，每个位置 3 个有效试样；

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/888043121042006034>