

ICS 27.180

F 11

T/CRES

中国可再生能源学会标准

T/CRES0035-2025

风力发电机组 塔架设计钢材选取规范

Wind turbines-Specification for steel selection of tower design

2025-03-31 发布

2025-04-30 实施

中国可再生能源学会 发布

目 次

前言	II
范围	1
规范性引用文件	1
术语及定义	1
符号	2
钢材选取方法	2
附录 A (资料性) 风力发电机组钢制塔架常用钢材	9
图 1 典型接头层状撕裂	6
图 2 a_{eff} 示意	8
表 1 冷成形度取值 (%)	3
表 2 钢材牌号及最大允许厚度 (mm)	5
表 3 影响厚度方向性能的要素	6

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有可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由金风科技股份有限公司提出。

本文件由中国可再生能源学会归口。

本文件起草单位：金风科技股份有限公司、挪威船级社（中国）有限公司、上海泰胜风能装备股份有限公司、中信金属股份有限公司、山东钢铁股份有限公司莱芜分公司、南京钢铁股份有限公司、北京科技大学、清华大学、上海电气风电股份有限公司、明阳智慧能源集团股份有限公司、中国机械总院集团哈尔滨焊接研究所有限公司、中国华能清洁能源研究院、中车山东风电有限公司、山西天宝集团有限公司。

本文件起草人：韩军杰、张紫平、陈秋华、张景华、曹旭东、郭文辉、刘中柱、胡大伟、麻衡、潘中德、武会宾、班慧勇、曹广启、李学旺、王历亮、郭泉、陆辉、何康、胡其龙、周昞鸣、毕成、戚玉超、张雁玲。

本文件在执行过程中的意见和建议请反馈至中国可再生能源学会标准化工作办公室。

风力发电机组 塔架设计钢材选取规范

1 范围

本文件规定了风力发电机组钢制塔架设计中的常用钢材选取方法。

本文件适用于风力发电机组筒状钢制塔架，包括塔筒、法兰、门框、加强板等主要承力结构件的钢材选取。

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 低合金高强度结构钢
- GB/T 3375 焊接术语
- GB/T 5313-2023 厚度方向性能钢板
- GB/T 19072 风力发电机组 塔架
- GB/T 28410 风力发电塔用结构钢板
- GB/T 42600-2023 风能发电系统 风力发电机组塔架和基础设计要求

3 术语及定义

GB/T 3375 和 GB/T 19072 界定的及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

结构件最低设计温度 T_{ed} component lowest design temperature

考虑了热辐射、结构件应力水平、冷成形度等影响因素的最低设计温度，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

3.2

最低环境温度 T_{md} lowest ambient temperature

在一定重现周期内，风力发电机组服役所在地最冷一小时内的环境温度平均值。对于处于空气环境中的结构件，最低环境温度则为最冷一小时内的平均气温，单位为摄氏度（ $^{\circ}\text{C}$ ）。

3.3

临界应力水平 σ critical stress level

设计时考虑的结构件在拉力、弯矩或扭矩等作用下产生的最大等效应力，单位为兆帕（MPa）。

3.4

冷成形度 ϵ_{cf} degree of cold forming (DCF)

金属结构件经冷弯加工后，用百分数表示的塑性变形的程度。

3.5

厚度方向性能 through-thickness properties

垂直于钢板表面的变形能力，反映钢板抗层状撕裂的能力。

注：厚度方向性能通常采用厚度方向拉伸试验的断面收缩率进行评定。

4 符号

下列符号适用于本文件。

a: 焊缝厚度, 单位为毫米 (mm)

a_{eff} : 焊脚尺寸, 单位为毫米 (mm)

$f_y(t)$: 与钢材厚度相关的屈服强度, 单位为兆帕 (MPa)

r: 塔架筒节的半径, 单位为毫米 (mm)

t: 钢材厚度, 单位为毫米 (mm)

Z_a : 与焊脚尺寸相关的Z向性能要素

Z_b : 与焊接位置、形状相关的Z向性能要素

Z_c : 与钢材厚度相关的Z向性能要素

Z_d : 与结构件远端拘束相关的Z向性能要素

Z_e : 与结构件预热状态相关的Z向性能要素

Z_{Ed} : 设计时要求的Z向性能

Z_{Rd} : 钢材的Z向性能

ε : 结构件的应变率

ε_{cf} : 冷成形度

ε_0 : 结构件的基准应变率

ΔT_r : 与辐射损耗相关的调整量, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_o : 与应力、材料屈服强度、结构件形状与尺度相关的调整量, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_n : 安全裕度, 反映了不同应用时对应的不同可靠性, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)

ΔT_{ε} : 除基准应变率之外应变率的调整量, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)

$\Delta T_{\varepsilon_{cf}}$: 与冷成形度相关的调整量, 单位为摄氏度 ($^{\circ}\text{C}$)

5 钢材选取方法

5.1 总则

结构件最低设计温度、临界应力水平体现了对钢材韧性与强度的要求; 钢板厚度方向性能, 即Z向性能等级体现了对钢材厚度方向抗撕裂性能的要求。在塔架设计中, 可以根据韧性、强度与厚度方向性能要求选取合适的钢材规格和钢材牌号。

塔架设计中常见的钢材牌号参考附录A。

5.2 基于韧性与强度的钢材选取

5.2.1 设计要素

选取钢材牌号时, 应考虑以下要素:

- a) 钢材属性:
 - 1) 与钢材厚度相关的屈服强度 $f_y(t)$;
 - 2) 钢材的质量等级。
- b) 结构件特征:
 - 1) 结构件的形状和细节;
 - 2) 应力集中程度;

- 3) 厚度；
- 4) 适当的制造缺陷假设（例如厚度方向裂纹或者类半椭圆表面裂纹）。
- c) 设计条件：
- 1) 结构件最低设计温度 T_{Ed} ；
 - 2) 设计条件下的结构件临界应力水平 σ ；
 - 3) 冷成形度 ε_{cf} 不大于表1要求，对于塔架筒节设计冷成形度 ε_{cf} 应不大于2%。
- 注：对于塔架，冷成形度 ε_{cf} 可以考虑为：（外径对应周长-中径对应周长）/中径对应周长，并用百分数表示。

表 1 冷成形度取值(%)

折弯半径 r 与材料厚度 t 的比值	冷成形度 ε_{cf}
$r/t \geq 25$	≤ 2
$10 \leq r/t < 25$	≤ 5
$3 \leq r/t < 10$	≤ 14
$2 \leq r/t < 3$	≤ 20

5.2.2 结构件最低设计温度 T_{Ed} 的计算

结构件最低设计温度 T_{Ed} 的计算方法如下：

- a) 常温风力发电机组塔架设计时，结构件最低设计温度 T_{Ed} 按-30℃考虑；
- b) 低温风力发电机组塔架设计时，结构件最低设计温度 T_{Ed} 按公式（1）考虑：

$$T_{Ed} = T_{md} - 10 \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

T_{Ed} ——结构件最低设计温度，单位为℃；

T_{md} ——最低环境温度，单位为℃。

- c) S类风力发电机组塔架设计时，结构件最低设计温度 T_{Ed} 按公式（1）考虑；
- d) 当需要精细计算时，S类风力发电机组塔架设计，结构件最低设计温度 T_{Ed} 可以按公式（2）考虑：

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_o + \Delta T_R + \Delta T_\varepsilon + \Delta T_{\varepsilon_{cf}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

其中：

ΔT_r ，钢制塔架设计时，一般取-5℃；

ΔT_o ，符合设计要素时，一般取0℃；

ΔT_R ，符合设计要素时，一般取0℃；

ΔT_ε ，一般取0℃。基准应变率 ε_0 为 $4 \times 10^{-4}/s$ ，此值可以覆盖大部分设计情况；使用其他应变率时， ΔT_ε 按公式（3）计算：

$$\Delta T_\varepsilon = -\frac{1440 - f_y(t)}{550} \times \left(\ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^{1.5} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$\Delta T_{\varepsilon_{cf}} = -3 \times \varepsilon_{cf} \times 100$ （℃）。钢制塔架设计时，一般取-5℃。

5.2.3 临界应力水平 σ 的计算

载荷一般为不含安全系数的全工况极限载荷各分量；当选用其他载荷时，应符合GB/T 42600-2023中6.3.2.3的规定。

计算结构件关键横截面以及预期裂纹扩展位置处的名义应力；对于门框等需要有限元分析的复杂结构件，可以采用热点应力。

5.2.4 钢材牌号及最大允许厚度选择

T/GRES0035-2025

钢材牌号及最大允许厚度的选择应符合表2规定。表2参考自EN 1993-1-10-2005，考虑实际的临界应力水平 σ ，允许根据表2在 $0.25f_y(t) \leq \sigma \leq 0.75f_y(t)$ 的范围内进行线性插值。

全国团体标准信息平台

表 2 钢材牌号及最大允许厚度 (mm)

钢材牌号		夏比 (V型缺口) 冲击功 CVN	结构件最低设计温度 $T_{Ed}/^{\circ}\text{C}$																							
			温度 $^{\circ}\text{C}$	J_{\min}	$\sigma = 0.75f_y(t)$							$\sigma = 0.5f_y(t)$							$\sigma = 0.25f_y(t)$							
10	0	-10			-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	10	0	-10	-20	-30	-40	-50				
Q235	B	20	27	60	50	40	35	30	25	20	90	75	65	55	45	40	35	135	115	100	85	75	65	60		
	C	0	27	90	75	60	50	40	35	30	125	105	90	75	65	55	45	175	155	135	115	100	85	75		
	D	-20	27	125	105	90	75	60	50	40	170	145	125	105	90	75	65	200	200	175	155	135	115	100		
Q355	B	20	27	40	35	25	20	15	15	10	65	55	45	40	30	25	25	110	95	80	70	60	55	45		
	C	0	27	60	50	40	35	25	20	15	95	80	65	55	45	40	30	150	130	110	95	80	70	60		
	D	-20	27	90	75	60	50	40	35	25	135	110	95	80	65	55	45	200	175	150	130	110	95	80		
	ND MD	-20	40	110	90	75	60	50	40	35	155	135	110	95	80	65	55	200	200	175	150	130	110	95		
	NE ME	-50	27	155	130	110	90	75	60	50	200	180	155	135	110	95	80	210	200	200	200	175	150	130		
Q420	ND MD	-20	40	95	80	65	55	45	35	30	140	120	100	85	70	60	50	200	185	160	140	120	100	85		
	NE ME	-50	27	135	115	95	80	65	55	45	190	165	140	120	100	85	70	200	200	200	185	160	140	120		
Q460	ND MD	-20	40	90	70	60	50	40	30	25	130	110	95	75	65	55	45	200	175	155	130	115	95	80		
	NE ME	-50	27	125	105	90	70	60	50	40	180	155	130	110	95	75	65	200	200	200	175	155	130	115		

5.3 基于厚度方向性能的钢材选取

5.3.1 一般要求

在T形、十字形和角形焊接的连接节点中，当钢板厚度不小于40 mm且沿板厚方向有较高撕裂拉力作用，包括较高约束拉应力作用时，如图1 a) 和b) 所示，该部位钢板宜具有足够的板厚度方向抗撕裂性能，即Z向性能的合格保证。其沿板厚度方向端面收缩率不小于GB/T 5313-2023规定的Z15级，具体的钢板Z向性能等级应根据连接节点形式、板厚、熔深或焊缝尺寸、焊接时拘束度以及预热、后热情况等综合确定。



图 1 典型接头层状撕裂

5.3.2 厚度方向性能确定

厚度方向性能应满足公式 (4)：

$$Z_{Ed} \leq Z_{Rd} \dots\dots\dots (4)$$

Z_{Ed} 可以按公式 (5) 确定：

$$Z_{Ed} = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d + Z_e \dots\dots\dots (5)$$

式中， Z_a 、 Z_b 、 Z_c 、 Z_d 、 Z_e 详见表3说明。

表 3 影响厚度方向性能的因素

		焊脚尺寸和焊缝厚度 (mm)		Z_i
		$a_{eff} \leq 7$	$a=5$	$Z_a=0$
a)	焊脚尺寸的影响	$7 < a_{eff} \leq 10$	$a=7$	$Z_a=3$
		$10 < a_{eff} \leq 20$	$a=14$	$Z_a=6$
		$20 < a_{eff} \leq 30$	$a=21$	$Z_a=9$
		$30 < a_{eff} \leq 40$	$a=28$	$Z_a=12$
		$40 < a_{eff} \leq 50$	$a=35$	$Z_a=15$
		$50 < a_{eff}$	$a > 35$	$Z_a=15$

表3 影响厚度方向性能的要素(续)

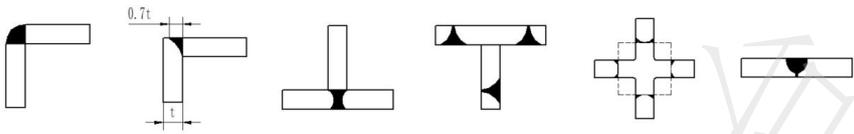
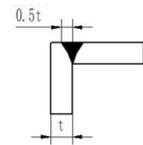
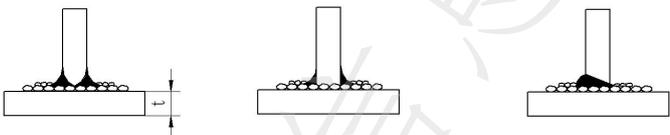
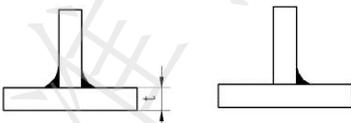
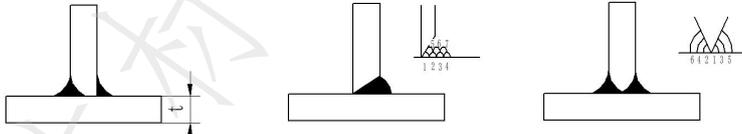
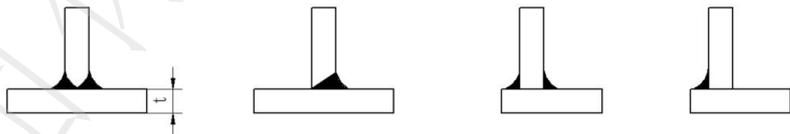
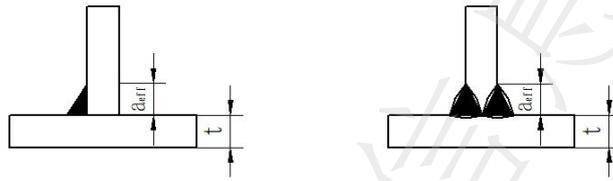
b)	T形接头、十字接头和转角接头焊缝形状和焊接位置的影响		$Z_b = -25$	
		角接头		$Z_b = -10$
		单道角焊缝 $Z_a=0$ 或者使用低强度焊材预堆边焊的角焊缝 $Z_a>1$		$Z_b = -5$
		多道角焊缝		$Z_b = 0$
		局部或全熔透焊缝, 具有合适的焊接顺序降低收缩影响		$Z_b = 3$
		局部或全熔透焊缝		$Z_b = 5$
		角接头		$Z_b = 8$
c)	钢材厚度 t 的影响	$t \leq 10 \text{ mm}$	$Z_c = 2^a$	
		$10 \text{ mm} < t \leq 20 \text{ mm}$	$Z_c = 4^a$	
		$20 \text{ mm} < t \leq 30 \text{ mm}$	$Z_c = 6^a$	
		$30 \text{ mm} < t \leq 40 \text{ mm}$	$Z_c = 8^a$	
		$40 \text{ mm} < t \leq 50 \text{ mm}$	$Z_c = 10^a$	
		$50 \text{ mm} < t \leq 60 \text{ mm}$	$Z_c = 12^a$	
		$60 \text{ mm} < t \leq 70 \text{ mm}$	$Z_c = 15^a$	
		$70 \text{ mm} < t$	$Z_c = 15^a$	

表 3 影响厚度方向性能的要素（续）

d)	结构件远端拘束的影响	低拘束度：自由收缩（例如，T形接头）	$Z_d=0$
		中拘束度：受限的自由收缩（例如，箱梁横隔梁）	$Z_d=3$
		高拘束度：不能自由收缩（例如，正交异性桥面板中的纵梁）	$Z_d=5$
e)	预热状态的影响	无预热	$Z_e=0$
		预热温度 $\geq 100\text{ }^\circ\text{C}$	$Z_e=-8$
注：参考自EN 1993-1-10-2005。			
^a 如果在厚度方向存在占主导的压力静载荷，该值可以降低50%；			
^b 焊脚尺寸 a_{eff} 见图2所示。			

图 2 a_{eff} 示意

附录 A

(资料性)

风力发电机组钢制塔架常用钢材

A.1 风力发电机组钢制塔架常用钢材有：Q235、Q355、Q420、Q460。

A.2 Q235 钢材性能符合 GB/T 700 的要求，Q355、Q420、Q460 钢材性能符合 GB/T 1591 或 GB/T 28410 的要求。

A.3 国内外标准牌号对照关系可参考表 A.1。

表 A.1 国内外标准牌号对照表

GB/T 1591	GB/T 28410	EN 10025-2	EN 10025-3	EN 10025-4
Q355B	---	S355JR	---	---
Q355C	Q345FTC	S355J0	---	---
Q355D	Q345FTD	S355J2	---	---
Q355ND	Q345FTD-正火、正火 轧制	---	S355N	---
Q355NE	Q345FTE-正火、正火 轧制	---	S355NL	---
Q355MD	Q345FTD-TMCP	---		S355M
Q355ME	Q345FTE-TMCP	---		S355ML
Q420ND	Q420FTD-正火、正火 轧制	---	S420N	---
Q420NE	420FTE-正火、正火轧 制	---	S420NL	---
Q420MD	Q420FTD- TMCP	---		S420M
Q420ME	Q420FTE- TMCP	---		S420ML
Q460ND	Q460FTD-正火、正火 轧制	---	S460N	---
Q460NE	460FTE-正火、正火轧 制	---	S460NL	---
Q460MD	Q460FTD- TMCP	---	---	S460M
Q460ME	Q460FTE- TMCP	---	---	S460ML

参考文献

- [1] EN 1993-1-10-2005 Eurocode 3: Design of steel structures-Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties
-

全国团体标准信息平台