

ICS 27.180

F 11

T/CRES

中国可再生能源学会标准

T/CRES XXXX-2024

风力发电机组 塔架钢材选取规范

Wind turbines specification for tower steel-selection

(征求意见稿)

2024 - XX - XX 发布

2024 - XX - XX 实施

中国可再生能源学会 发布

目 次

前 言	2
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语及定义	3
4 风力发电机组钢制塔架常用钢材	3
5 钢材选取推荐方法	4
附录 A.....	10
图 1 典型节点层状撕裂示意.....	7
图 2 有效焊高.....	9
表 1 冷成形度取值(%).....	2
表 2 钢材最大允许厚度.....	6
表 3 影响 ZED 的判据	7

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。

本文件的某些内容有可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由XXXXXXX等提出。

本文件由中国可再生能源学会归口。

本文件起草单位：XXXXXXXXXXXXXXXXXX。

本文件起草人：XXXXXXXXXXXXXXXXXX。

本文件在执行过程中的意见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常用钢材和选取推荐方法。

本文件适用于风力发电机组钢制塔架，包括塔筒、法兰、门框、加强板等结构件的钢材选取。

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 厚度方向性能钢板

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 界定的及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

最低结构温度 lowest component temperature

设计时考虑的会影响结构材料性质的最低温度。

3.2

最低环境温度 lowest ambient temperature

在一定重现周期内，风力发电机组服役所在地以小时计的环境温度最低值。对于处于空气环境中的结构，最低环境温度则为一小时内的最低气温。

3.3

临界应力水平 critical stress level

设计时考虑的结构在拉力和弯矩作用下产生的最大拉应力。

3.4

冷成形度 Degree of cold forming (DCF)

金属结构件经冷弯加工后，用百分比表示的塑性变形的程度。

4 风力发电机组钢制塔架常用钢材

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

4.2 Q235 钢材性能应符合 GB/T 700 的要求，Q355、Q420、Q460 钢材性能应符合 GB/T 1591 或 GB/T 28410 的要求。

4.3 国内外标准牌号对照关系可参考附录 A。

5 钢材选取方法

5.1 总则

根据最低结构温度、结构的临界应力水平和厚度方向性能来选取合适的钢材厚度和钢材牌号。

5.2 基于强度与韧性的钢材选取

5.2.1 评估程序

5.2.1.1 考虑因素

关于钢材牌号的选取应考虑以下因素：

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) 适当的制作缺陷假设（例如厚度方向裂纹或者类半椭圆表面裂纹）。

c) 设计条件：

- 1) 最低结构温度 T_{Ed} ；
- 2) 设计条件下的结构临界应力水平 σ ；
- 3) 冷成形度（DCF） ϵ_{cf} 不大于表1要求，对于塔架筒节设计冷成形度不应大于2。

注：对于塔架而言，DCF可以考虑为：[外径对应周长-中径对应周长] / 中径对应周长] %。

表 1 冷成形度取值(%)

折弯半径 r 与材料厚度 t 的比值	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

5.2.1.2 计算方法

最低结构温度 T_{Ed} 的计算：

- a) 常温风力发电机组塔架的最低结构温度 T_{Ed} 按 -30°C 考虑；
- b) 低温风力发电机组塔架的最低结构温度 T_{Ed} 按下式考虑：

$$\text{最低结构温度 } T_{Ed} = \text{最低环境温度 } T_{md} - 10 \text{ } ^\circ\text{C} \dots\dots\dots (1)$$

- c) S类风力发电机组塔架的最低结构温度 T_{Ed} 按公式(1)考虑;
 d) S类风力发电机组塔架或者其他钢结构最低结构温度 T_{Ed} 也可以按下式考虑:

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

式中:

- T_{md} ——最低环境温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$;
 ΔT_r ——与辐射损耗相关的调整量;
 ΔT_σ ——与应力、材料屈服强度、结构件形状与尺度相关的调整量;
 ΔT_R ——安全裕度,反映了不同应用时对应的不同可靠性;
 ΔT_ε ——除参考应变率之外应变率的调整量;
 $\Delta T_{\varepsilon_{cf}}$ ——与冷成形度相关的调整量。

其中:

- ΔT_r , 对于钢制塔架设计,可以考虑取 -5°C ;
 ΔT_R , 按第5.2.2条评估时,一般取 0°C ;
 ΔT_σ , 按第5.2.2条评估时,一般取 0°C ;
 ΔT_ε , 一般取 0°C 。参考应变率 $\varepsilon_0=4 \times 10^{-4}$ /秒,此值可以覆盖大部分设计情况;
 使用其他应变率时, ΔT_ε 按下式计算:

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

$\Delta T_{\varepsilon_{cf}}=-3 \times \varepsilon_{cf} \times 100 (^{\circ}\text{C})$ 。对于塔架设计,可以考虑取 -5°C 。

5.2.1.3 临界应力水平 σ 的计算

一般考虑不带安全系数的全工况极限载荷各分量计算结构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,可以采用热点应力。当选用其他载荷时,应符合GB/T 42600-2023 第6.3.2.3条规定。

5.2.1.4 根据第5.2.1条的考虑因素,按第5.2.2条和表2选择合适的钢材。

5.2.2 最大允许厚度

各钢材牌号对应不同临界应力水平 σ 和最低结构温度条件下钢材允许的最大厚度应符合表2规定。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。

表 2 钢材允许最大厚度 (mm)

钢材牌号		冲击功 CVN		最低结构温度 $T_{ed}/^{\circ}\text{C}$																				
				$\sigma=0.75f_y(t)$							$\sigma=0.5f_y(t)$							$\sigma=0.25f_y(t)$						
钢级及质量等级		温度 $^{\circ}\text{C}$	J_{\min}	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所示，该部位钢板宜具有足够的板厚方向抗撕裂性能，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规定的Z15级。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。

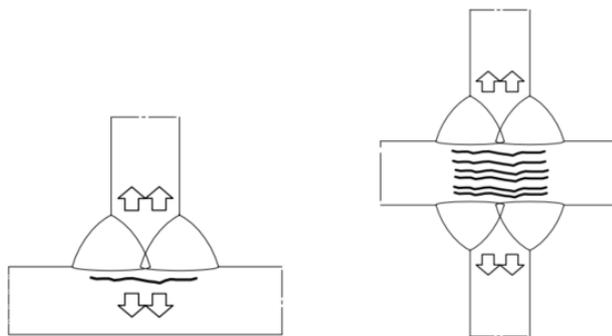


图 1 典型接头层状撕裂示意图

5.3.2 厚度方向性能确定

厚度方向性能，即Z向性能应满足：

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

式中：

Z_{Ed} ——设计时要求的Z向性能；

Z_{Rd} ——钢材实际Z向性能。

Z_{Ed} 可以按下式确定：

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

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

表 3 影响 Z_{Ed} 的判据

a)	与金属收缩应变相关的焊脚尺寸	焊脚尺寸 (mm)		Z_i
		$a_{eff} \leq 7$	$a = 5$	$Z_a = 0$
	$7 < a_{eff} \leq 10$	$a = 7$	$Z_a = 3$	
	$10 < a_{eff} \leq 20$	$a = 14$	$Z_a = 6$	
	$20 < a_{eff} \leq 30$	$a = 21$	$Z_a = 9$	
	$30 < a_{eff} \leq 40$	$a = 28$	$Z_a = 12$	
	$40 < a_{eff} \leq 50$	$a = 35$	$Z_a = 15$	
	$50 < a_{eff}$	$a > 35$	$Z_a = 15$	

表 3 影响 Z_{ed} 的判据 (续)

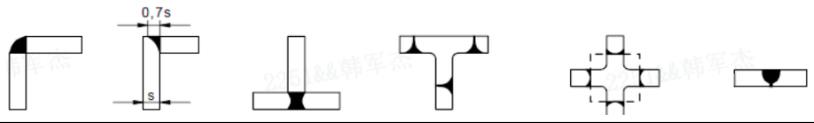
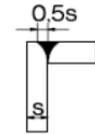
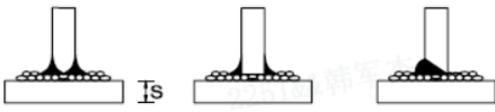
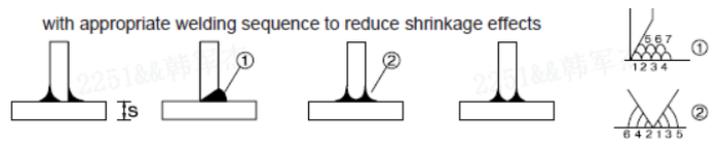
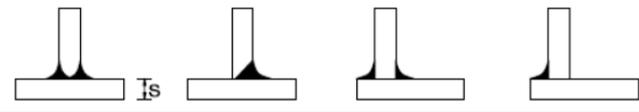
b)	T形接头、十字接头和转角接头的焊缝形状和焊接位置		$Z_b=-25$
		角接头	$Z_b=-10$
			
		单道角焊缝 $Z_a=0$ 或者角焊缝 $Z_a>1$, 且为低强度焊材	$Z_b=-5$
			
		多道角焊缝	$Z_b=0$
			
		局部或全熔透焊缝, 且具有合适的焊接顺序来降低收缩影响	$Z_b=3$
			
局部或全熔透焊缝	$Z_b=5$		
			
角接头	$Z_b=8$		
			
c)	材料厚度 S 对收缩拘束度的影响	$S \leq 10 \text{ mm}$	$Z_c=2^a$
		$10 \text{ mm} < S \leq 20 \text{ mm}$	$Z_c=4^a$
		$20 \text{ mm} < S \leq 30 \text{ mm}$	$Z_c=6^a$
		$30 \text{ mm} < S \leq 40 \text{ mm}$	$Z_c=8^a$
		$40 \text{ mm} < S \leq 50 \text{ mm}$	$Z_c=10^a$
		$50 \text{ mm} < S \leq 60 \text{ mm}$	$Z_c=12^a$
		$60 \text{ mm} < S \leq 70 \text{ mm}$	$Z_c=15^a$
		$70 \text{ mm} < S$	$Z_c=15^a$

表 3 影响 Z_{ed} 的判据 (续)

d)	结构其他部分对焊后收缩远端拘束的影响	低拘束度: 自由收缩 (例如, T形接头)	$Z_{i'}=0$
		中拘束度: 受限的自由收缩 (例如, 箱梁横隔梁)	$Z_{i'}=3$
		高拘束度: 不能自由收缩 (例如, 正交异性桥面板中的纵梁)	$Z_{i'}=5$
e)	预热影响	无预热	$Z_{i'}=0$
		预热温度 $\geq 100\text{ }^{\circ}\text{C}$	$Z_{i'}=-8$
^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 焊脚尺寸

附 录 A
(资料性附录)
国内外标准牌号对照表

国内外标准牌号对照见表 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		S355J0		
Q355D		S355J2		
Q355ND			S355N	
Q355NE			S355NL	
Q355MD				S355M
Q355ME				S355ML
Q420ND			S420N	
Q420NE			S420NL	
Q420MD				S420M
Q420ME				S420ML
Q460ND			S460N	
Q460NE			S460NL	
Q460MD				S460M
Q460ME				S460ML