

海上风电结构用钢欧洲标准和中国标准的比较

谯明亮¹, 潘中德¹, 张玉伟²

1.南京钢铁 (NISCO) 2.南京达钢 (DASCO)

海上风力发电是清洁能源和可再生能源领域中最成熟、最具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一,且可利用的风能在全世界范围内分布广泛、储量巨大。随着海上风电相关技术不断成熟、设备不断升级,风力发电行业在过去十年发展迅速,并在未来二十年持续高速发展。欧洲和中国将是世界上最大的两个海上风电市场。不同国家或地区的海上风电项目,由于项目业主和设计规范的不同,对于风电结构用钢选材也不尽相同,甚至会出现由于材料标准不同而导致的分歧,不利于海上风电用钢技术进步和行业全球化发展。

目前,欧洲海上风电结构用钢材质设计,一般选择 EN10025-2 标准“非合金钢”、EN10025-3 标准“正火/正火轧制焊接细晶粒钢”或 EN10025-4 标准“热机械轧制焊接细晶粒钢”,如 S355J2、S355NL、S355ML 等牌号;对于欧洲北海地区海上风电结构用钢,也有采用 EN10225 标准“固定式海上结构之可焊接结构钢”,如 S355G8、S355G10 等牌号。而中国海上风电结构用钢材质设计,一般选择 GB/T 1591 标准“低合金高强度结构钢”,如 Q355C、Q355ND 等;也有采用 GB/T712 标准“船舶及海洋工程用结构钢”,如 DH36、EH36 等牌号。

目前国内外海上风电结构用钢,主要供货标准及产品牌号见表 1:

表 1 风电用钢标准产品及牌号

标准号	标准名称	典型牌号
GB/T 1591 :2018	低合金高强度结构钢	Q355B/C/D, Q355NB/NC/ND/NE/NF, Q355MB/MC/MD/ME/MF
GB/T 28410	风力发电塔用结构钢板	Q345FTC/D/E/F
GB/T 712	船舶及海洋工程用结构钢	DH36、EH36
EN10025-2	非合金钢技术交货条件	S355JR/J0/J2/K2
EN10025-3	正火/正火轧制焊接细晶粒技术交货条件	S355N/NL, S420N/NL
EN10025-4	热机械轧制焊接细晶粒技术交货条件	S355M/ML, S420M/ML, S460M/ML, S500M/ML
EN10225:2009 EN10225-1:2019	固定式海上结构之可焊接结构钢	S355G7/8/9/10, S420G1/2, S355MLO/NLO, S420MLO/QLO
JIS G3106	焊接结构用轧制钢材	SM490, SM520, SM570
ASTM A572/A572M	高强度低合金钢规范	A572Gr50/Gr60/Gr65
ASTM A709/A709M	桥梁用结构钢标准规范	A709Gr50

为了与国际标准接轨,减少国际贸易壁垒,中国积极推动GB/T1591: 2008标准修订工作,重点参照ISO 630标准和EN10025-2、EN10025-3、EN10025-4等标准,现GB/T1591: 2018标准已于2018年05月14日发布、2019年02月01日实施。欧洲标准和中国标准是风电结构用钢选材最为常用的标准,下面重点对欧洲EN10025标准S355系列牌号,和中国GB/T 1591标准Q355系列牌号、中国GB/T 712标准DH36系列牌号进

行对比研究。

1、牌号表示方式

(1) GB/T 1591标准, 示例Q355ND, 其中: “Q”代表钢的屈服强度的“屈”字汉语拼音的首字母; “355”代表规定的最小上屈服强度数值,单位为兆帕(MPa); “N”代表交货状态为正火或正火轧制; “D”代表质量等级为D级 (-20℃)。当钢的交货状态为热轧AR时, 牌号中可省略交货状态, 直接以Q355D表示。

(2) GB/T 712标准, 示例:DH36为高强度船板, 其中: “D”代表质量等级为D级 (-20℃); “D”代表高强度; “36”代表强度级别为高强度 (≥355Mpa)。

(3) EN10025-2, 示例:S355J2, 其中: “S”代表结构钢 (Structure) 的首字母; “355”代表厚度≤16mm钢的最小屈服强度,单位为兆帕(MPa); “J2”代表质量等级为J2级 (-20℃)。

(3) EN10025-3或EN10025-4标准, 示例:S355NL或S355ML, 其中: “S”代表结构钢 (Structure) 的首字母; “355”代表厚度≤16mm钢的最小屈服强度,单位为兆帕(MPa); “N”或“M”交货状态N或TMCP; “L”规定不低于-50℃温度下的最小冲击的材料, 以大写字母L表示。

2、交货状态

(1) 热轧 (AR), 钢材未经任何特殊轧制和/或热处理的状态。

(2) 正火 (N), 钢材加热到高于相变点温度以上的一个合适的温度,然后在空气中冷却至低于某相变点温度的热处理工艺。

(3) 正火轧制 (+N), 最终变形是在一定温度范围内的轧制过程中进行,使钢材达到一种正火后的状态,以便即使正火后也可达到规定的力学性能数值的轧制工艺。

(4) 热机械轧制 (M), 钢材的最终变形在一定温度范围内进行的轧制工艺,从而保证钢材获得仅通过热处理无法获得的性能。

3、标准牌号对照

GB/T 1591: 2018标准中, Q355共有13个牌号, 其中热轧交货有3个牌号, 正火或正火轧制交货有5个牌号, 热机械轧制有5个牌号, 质量等级B、C、D、E、F分别对应冲击试验温度为20℃、0℃、-20℃、-40℃、-60℃; GB/T 712标准中, 有AH36、DH36、EH36、FH36等4个牌号, 对应冲击试验温度为0℃、-20℃、-40℃、-60℃, 但牌号中不体现交货状态。

具体牌号对照表见表2:

表2 国标和欧标牌号对照表

交货状态	GB/T 1591-2018	GB/T 712	EN10025-2	EN10025-3	EN10025-4
AR	Q355B		S355JR		
	Q355C	AH36	S355J0		
	Q355D	DH36	S355J2		
			S355K2		
N/+N	Q355NB				
	Q355NC	AH36			
	Q355ND	DH36		S355N	
	Q355NE	EH36		S355NL	

	Q355NF	FH36	
	Q355MB		
	Q355MC	AH36	
TMCP	Q355MD	DH36	S355M
	Q355ME	EH36	S355ML
	Q355MF	FH36	

4、技术要求对比

不同标准牌号的化学成分要求见表A-1，碳当量要求见表A-2，机械性能要求见表A-3、表A-4。

(1) 标准交货状态区分

- GB/T1591和EN10025标准，根据AR、N/+N、TMCP等不同的交货状态，化学成分、CEV、机械性能等要求是不一样的。
- GB/T 712标准，不以交货状态来区分化学成分、机械性能，也仅要求了TMCP状态的CEV要求。

(2) GB/T1591：2018标准与EN10025标准较为接近，且GB/T1591标准有B、C、D、E、F等5个质量等级，其中：

- 交货状态为AR的Q355B/C/D，与EN10025-2标准S355JR/J0/J2对应，最小冲击值Q355B/C要求34J，高于S355JR/J0要求的27J，最小冲击值Q355D要求34J，高于S355J2要求的27J、低于S355K2要求的40J，Q355D和S355K2都可以约定-30℃温度冲击。
- 交货状态为N/+N的Q355ND/NE，与EN10025-3标准S355N/NL对应，Q355NE要求做-40℃温度冲击，也可以约定-50℃温度冲击。
- 交货状态为TMCP的Q355MD/ME，与EN10025-4标准S355M/ML对应，Q355ME要求做-40℃温度冲击，也可以约定-50℃温度冲击。

(3) GB/T712标准DH36/EH36与EN10025 S355有着一定的区别，其中：

- 屈服强度要求所有厚度均不低于355Mpa，而EN10025标准要求厚度≤16mm的屈服强度最小值为355Mpa，更厚规格钢板屈服强度随着厚度增加而相应降低。
- 抗拉强度要求490-630Mpa，而EN10025标准常规抗拉强度最小值470Mpa，且厚度增加后抗拉强度最小值也有不同程度的降低。
- 冲击性能按照不同厚度，如厚度≤50mm、50<厚度≤70mm、70<厚度≤150mm规定最小冲击值分别为34J、41J、50J，且不同质量等级/冲击温度的试验值要求是一样的，而EN10025标准常规冲击值不按厚度进行区分，但冲击温度越低、冲击值要求也越小。

因此，对于风电用钢原材料设计为EN10025标准、牌号，可建议按GB/T1591：2018相对应标准、牌号，进行同级别替代，具体见表3：

表3 国标和欧标牌号替代

EN10025 标准牌号		GB/T 1591-2018 标准牌号	备注
EN10025-2	S355JR	Q355B	
EN10025-2	S355J0	Q355C	
EN10025-2	S355J2	Q355D	

EN10025-2	S355K2	Q355D	可约定冲击温度-30℃
EN10025-3	S355N	Q355ND	
EN10025-3	S355NL	Q355NE	可约定冲击温度-40℃或-50℃
EN10025-4	S355M	Q355MD	
EN10025-4	S355ML	Q355ME	可约定冲击温度-40℃或-50℃

附件1

表3 不同标准牌号化学成分 (%)

标准	钢种	交货状态	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	N	
			max	max		max	max					Min	max	max	max	max	max
GB/T 1591	Q355B	AR	0.24	0.55	-1.60	0.035	0.035				0.020	0.30	0.50		0.40	0.012	
GB/T 1591	Q355C		0.20	0.55	-1.60	0.030	0.030				0.020	0.30	0.50		0.40	0.012	
GB/T 1591	Q355D		0.20	0.55	-1.60	0.025	0.025				0.020	0.30	0.50		0.40		
EN10025-2	S355JR		0.24	0.55	-1.60	0.035	0.035									0.55	0.012
EN10025-2	S355J0		0.20	0.55	-1.60	0.030	0.030									0.55	0.012
EN10025-2	S355J2		0.20	0.55	-1.60	0.025	0.025				0.020					0.55	
EN10025-2	S355K2		0.20	0.55	-1.60	0.025	0.025				0.020					0.55	
GB/T 1591	Q355NB	N/+N	0.20	0.50	0.90-1.65	0.035	0.035	0.005-0.05	0.01-0.12	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355NC		0.20	0.50	0.90-1.65	0.030	0.030	0.005-0.05	0.01-0.12	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355ND		0.20	0.50	0.90-1.65	0.030	0.025	0.005-0.05	0.01-0.12	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355NE		0.18	0.50	0.90-1.65	0.025	0.020	0.005-0.05	0.01-0.12	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355NF		0.16	0.50	0.90-1.65	0.020	0.010	0.005-0.05	0.01-0.12	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
EN10025-3	S355N		0.20	0.50	0.90-1.65	0.025	0.020	-0.050	-0.120	-0.050	0.020	0.30	0.50	0.10	0.55	0.015	
EN10025-3	S355NL		0.18	0.50	0.90-1.65	0.025	0.020	-0.050	-0.120	-0.050	0.020	0.30	0.50	0.10	0.55	0.015	
GB/T 1591	Q355MB	TMCP	0.14	0.50	-1.60	0.035	0.035	0.01-0.05	0.01-0.10	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355MC		0.14	0.50	-1.60	0.030	0.030	0.01-0.05	0.01-0.10	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355MD		0.14	0.50	-1.60	0.030	0.025	0.01-0.05	0.01-0.10	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355ME		0.14	0.50	-1.60	0.025	0.020	0.01-0.05	0.01-0.10	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
GB/T 1591	Q355MF		0.14	0.50	-1.60	0.020	0.010	0.01-0.05	0.01-0.10	0.006-0.05	0.020	0.30	0.50	0.10	0.40	0.015	
EN10025-4	S355M		0.14	0.50	-1.60	0.030	0.025	-0.050	-0.100	-0.050	0.020	0.30	0.50	0.10	0.55	0.015	
EN10025-4	S355ML		0.14	0.50	-1.60	0.025	0.020	-0.050	-0.100	-0.050	0.020	0.30	0.50	0.10	0.55	0.015	

GB/T 712	AH36	0.18	0.50	0.90-1.60	0.030	0.030	0.02-0.05	0.05-0.10	-0.02	0.020	0.20	0.40	0.08	0.35	
GB/T 712	DH36/EH36	0.18	0.50	0.90-1.60	0.025	0.025	0.02-0.05	0.05-0.10	-0.02	0.020	0.20	0.40	0.08	0.35	
GB/T 712	FH36	0.16	0.50	0.90-1.60	0.020	0.020	0.02-0.05	0.05-0.10	-0.02	0.020	0.20	0.80	0.08	0.35	0.009

注：1)、可用0.015%酸熔铝（Als）替代0.020%的全铝（Alt）；

2)、如果钢中最小Als含量为0.015%或最小Alt含量为0.020%，或添加了其它固氮合金元素，N含量不作限制。

3)、细化晶粒元素Al、Nb、V、Ti可以单独或以任一组合形式加入钢中，当单独加入时，其含量应符合表中要求，若混合加入2种或2种以上细化晶粒元素时，表中细化晶粒元素含量下限规定不适用，同时要求Nb+V+Ti≤0.12%。

表4 不同标准牌号碳当量（CEV）

标准	牌号	交货状态	不同厚度的最大 CEV 值		
			≤30	>30, ≤150	>150, ≤250
GB/T 1591	Q355B/C/D	AR	0.45	0.47	0.49
EN10025-2	S355JR/J0/J2/K2		0.45	0.47	0.49
标准	牌号	交货状态	不同厚度的最大 CEV 值		
			≤63	>63, ≤100	>100, ≤250
GB/T 1591	Q355NB/C/D/E/F	N/+N	0.43	0.45	0.45
EN10025-3	S355N/NL		0.43	0.45	0.45
标准	牌号	交货状态	不同厚度的最大 CEV 值		
			≤40	>40, ≤63	>63, ≤120
GB/T 1591	Q355MB/C/D/E/F	TMCP	0.39	0.40	0.45
EN10025-4	S355M/ML		0.39	0.40	0.45
标准	牌号	交货状态	不同厚度的最大 CEV 值		
			≤50	>50, ≤100	>100, ≤150
GB/T 712	DH36/EH36/FH36	TMCP	0.38	0.40	0.42

表5 GB/T1591和EN10025标准、牌号机械性能

标准	钢种	不同厚度的屈服强度 ReH/MPa								不同厚度的抗拉强度 Rm/MPa			冲击		
		≤16	>16, ≤40	>40, ≤63	>63, ≤80	>80, ≤100	>100, ≤150	>150, ≤200	>200, ≤250	>250, ≤400	≤100	>100, ≤250	>250, ≤400	冲击温度/℃	冲击值/J
GB/T 1591	Q355B/C	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	-	20/0	≥34
GB/T 1591	Q355D	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275	≥265	470-630	450-600	450-600	-20	≥34
EN10025-2	S355JR	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275	-	470-630	450-600	-	20	≥27
EN10025-2	S355J0	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275	-	470-630	450-600	-	0	≥27
EN10025-2	S355J2	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275	≥265	470-630	450-600	450-600	-20	≥27
EN10025-2	S355K2	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275	≥265	470-630	450-600	450-600	-20	≥40

标准	钢种	不同厚度的屈服强度 ReH/MPa								不同厚度的抗拉强度 Rm/MPa		冲击温度/℃	冲击值/J	
		≤16	>16, ≤40	>40, ≤63	>63, ≤80	>80, ≤100	>100, ≤150	>150, ≤200	>200, ≤250	>200, ≤250	≤100			>100, ≤250
GB/T 1591	Q355NB/C	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	20/0	≥34
GB/T 1591	Q355ND	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	-20	≥40
GB/T 1591	Q355NE	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	-40	≥31
GB/T 1591	Q355NF	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	-60	≥27
EN10025-3	S355N	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	-20	≥40
EN10025-3	S355NL	≥355	≥345	≥335	≥325	≥315	≥295	≥285	≥275		470-630	450-600	-50	≥27

标准	钢种	不同厚度的屈服强度 ReH/MPa						不同厚度的抗拉强度 Rm/MPa				冲击温度/℃	冲击值/J	
		≤16	>16, ≤40	>40, ≤63	>63, ≤80	>80, ≤100	>100, ≤120	≤40	>40, ≤63	>63, ≤100	>100, ≤120			
GB/T 1591	Q355MB/C	≥355	≥345	≥335	≥325	≥325	≥320		470-630	450-610	440-600	430-590	20/0	≥34
GB/T 1591	Q355MD	≥355	≥345	≥335	≥325	≥325	≥320		470-630	450-610	440-600	430-590	-20	≥40
GB/T 1591	Q355ME	≥355	≥345	≥335	≥325	≥325	≥320		470-630	450-610	440-600	430-590	-40	≥31
GB/T 1591	Q355MF	≥355	≥345	≥335	≥325	≥325	≥320		470-630	450-610	440-600	430-590	-60	≥27
EN10025-4	S355M	≥355	≥345	≥335	≥325	≥325	≥320		470-630	450-610	440-600	430-590	-20	≥40
EN10025-4	S355ML	≥355	≥345	≥335	≥325	≥325	≥320		470-630	450-610	440-600	430-590	-50	≥27

表6 GB/T 712标准牌号机械性能

标准	钢种	屈服强度 ReH/MPa	抗拉强度 Rm/MPa	不同厚度的冲击值/J			
				冲击温度/°C	≤50	>50, ≤70	>70, ≤150
GB/T 712	AH36	≥355	490-630	0	≥34	≥41	≥50
	DH36			-20			
	EH36			-40			
	FH36			-60			