大型海上风电塔架法兰锻件制造技术

任秀凤，牛余刚

摘要：介绍了大型海上风电塔架法兰锻件的技术要求、锻造方法、热处理及其力学性能。进一步探讨了提高大型海上风电法兰锻件力学性能的技术措施。

我公司是专业生产环形锻件的厂家，大型风电法兰是其主导产品，具备生产直径8m大型环件的能力。近期我公司承接的8MW海上风电塔架法兰直径为6.9m，内孔6.1m，法兰截面宽度400mm，厚度190mm。此法兰用于118m海上风电塔架底座基础环的法兰连接。海上风电法兰的服役条件比陆上风塔法兰还要恶劣，法兰需承载复杂的应力负荷，以适应低温、海上风浪、台风、暴雨等恶劣气候的风源袭击，使风电机组的塔架构件，受到叶轮旋转时的动负载及随机风载荷的共同作用，这时风电机组的零部件安全运行面临着严峻考验。所以，风电塔架法兰产品的设计选材，除考虑材料的强度和工艺性能及安全运行外，还应充分考虑材料的低温冲击韧度这一重要指标。

大型风电塔架法兰锻件，一般采用S355NL钢（EN10025-3）锻制，此钢为低合金高强度结构钢，含碳量低，锰是主要的强化元素，并加入了少量的细化晶粒元素。此次生产的海上风电塔架法兰用钢化学成分及技术要求如表1所示。

为保证法兰锻件的低温韧度，在钢冶炼时，需严格控制钢中磷、硫的含量，有效降低钢中夹杂物含量。严格限制钢中的“五害”元素：铅（Pb）、锡（Sn）、砷（As）、锑（Sb）、铋（Bi），这些低熔点的元素如果在钢中存在，因为溶解度都很小，剩余量即分布于晶界上，钢在加热时，就会被熔化而使钢的塑性和韧性大幅降低。

要使大型风电法兰锻件能够满足技术条件的高要求，除严格控制钢锭的化学成分，残余有害元素含量，降低钢中的夹杂物外，还要策划严格的锻造工艺流程，保证锻件获得足够的锻造比，打碎钢中的树枝晶，充分压实锻透内部金属，减少锻件内部缺陷，提高内部金属的致密程度。

我公司安排锻造工艺流程为在100MN油压机上进行锻造，经镦拔、冲扩孔、平整等工序，再转到8m辗环机上进行辗扩成形。锻件锻造比达到10.5。辗环时严格控制终锻温度，也起到了细化晶粒的效果。

大型风电法兰锻制辗压成形后，在井式电阻炉中进行加热，

表1　大型海上风电法兰锻件用钢的化学成分　（%）

熔炼炉号		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Ti	Nb	N	Al	CEQ
技术要求	熔炼	≤ 0.18	≤ 0.50	0.90～1.65	≤ 0.025	≤ 0.020	≤ 0.30	≤ 0.50	≤ 0.10	≤ 0.12	≤ 0.55	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.015	≥ 0.02	≤ 0.45
	成品	≤ 0.20	≤ 0.55	0.85～1.75	≤ 0.030	≤ 0.025	≤ 0.35	≤ 0.55	≤ 0.13	≤ 0.14	≤ 0.60	≤ 0.06	≤ 0.06	≤ 0.017	≥ 0.015	
BDVD40881		0.17	0.33	1.29	0.01	0.003	0.11	0.12	0.05	0.03	0.05	0.002	0.022	0.090	0.02	0.43
BDVD40778		0.15	0.32	1.30	0.008	0.001	0.08	0.05	0.01	0.03	0.04	0.002	0.029	0.010	0.02	0.40
BDVD40781		0.14	0.33	1.38	0.008	0.001	0.06	0.03	0.014	0.03	0.02	0.001	0.018	0.080	0.025	0.39

加热温度为910℃，保温时间为5h，出炉后进行强制冷却。具体热处理工艺如图1所示。

该工件热处理工艺要求，锻件加热至650℃保温1.5～2h，消除温差应力，650℃以上快速升温，迅速通过相变温度，增加钢在相变时的过热度，提高奥氏体的形核率，从而达到细化奥氏体晶粒的目的。910℃保温后，出炉迅速移至风场内，进行吹风+喷雾的强制冷却，提高冷却速度，为使工件冷却均匀，工件在风场内不停旋转，直到冷却结束。

热处理后的工件，本体取样检测，其性能结果如表2所示。

锻件金相组织检验，纵、横向的金相组织均为均匀细小的珠光体+铁素体组织；晶粒度：纵向8.9级，横向9.3级，没有明显带状，金相如图2、图3所示。

由表2所列数值可知，大型风电法兰锻件的力学性能-纵向抗拉强度的平均值较技术要求的低限值高出21.2%，屈服强度的平均值较技术要求高出23.5%，伸长率的平均值较技术要求高出51%，冲击吸收能量平均值较技术要求高出129.8%。

从以上结果不难看出，大型风电法兰锻件实物的力学性能数据中，法兰强度、塑性、韧性指标都非常好，强韧性匹配优良，综合力学性能完全满足客户技术要求，而且锻件的各向异性差异不大。

大型海上风电法兰的生产，首先要保证原材料的质量，钢在冶炼时选用适当的脱氧剂，降低钢中的氧化物，提高钢的纯净度，减少钢中的非金属夹杂物，严格控制有害元素的含量。同时还要加入适量的细化晶粒元素，获得镇静的本质细晶粒钢。

法兰在锻造时，要保证足够的锻造比，充分压实锻透内部金属，增加内部金属的致密度，严格控制加热温度，防止锻件产生严重过热组织、粗晶和混晶。

热处理时升温到650℃时，根据法兰截面大小适当保温，然后按炉子功率快速加热通过Ac_1～Ac_3温度，增加钢在相变时的过热度，来提高奥氏体的形核率，达到细化奥氏体晶粒的目的。出炉后采取控冷措施，强化正火冷却速度，从而提高产品的强韧性。

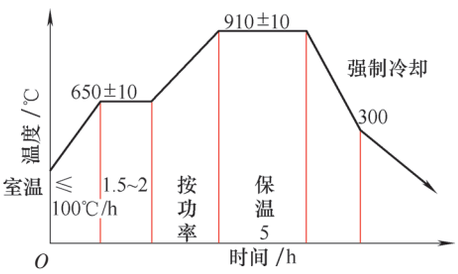

图 1

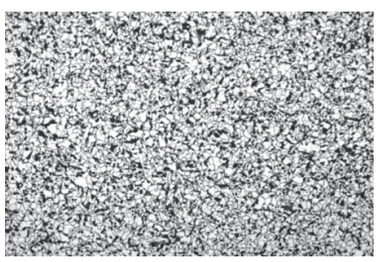

图2 纵向 ×100

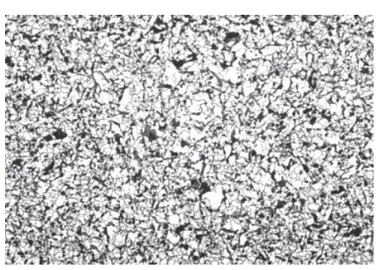

图3 横向 ×100

表2 大型海上风电法兰锻件的力学性能

试件编号	熔炼炉号	试样方向	R_m /MPa	R_{eL} /MPa	A (%)	Z (%)	R_{eL}/R_m	A_{KV} (-50℃) /J	A_{KV} (-50℃) 平均	晶粒度/级
技术标准			450～600	≥295	≥21	—	—	—	≥50	≥6
15-01	BDVD40881	纵向	542	364	31	69	0.67	153.3、158.8、98.7	136.9	—
		横向	527	336	32	70	0.64	114.1、89、95	99.4	—
15-02	BDVD40881	纵向	565	402	29	75	0.71	37.2、93.3、84.8	71.8	—
		横向	519	356	29	78	0.69	138.7、105.5、121	121.7	—
15-03	BDVD40778	纵向	535	356	33.5	72	0.67	81.6、116.3、89	95.6	—
		横向	513	359	36.5	77	0.70	58.4、154.4、143.2	118.7	—
15-04	BDVD40781	纵向	540	335	33.5	77	0.62	184.1、133.1、148.8	155.3	—
		横向	511	329	28.5	79	0.64	41.6、102、126.3	90	—

作者简介：任秀凤，技术部部长，牛余刚，山东伊莱特重工有限公司。

MW 20160506