



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113913690 B

(45) 授权公告日 2022.07.26

(21) 申请号 202111114011.9	G22C 38/42 (2006.01)
(22) 申请日 2021.09.23	G22C 38/46 (2006.01)
(65) 同一申请的已公布的文献号	G22C 38/48 (2006.01)
申请公布号 CN 113913690 A	G22C 33/06 (2006.01)
(43) 申请公布日 2022.01.11	B22D 11/00 (2006.01)
(73) 专利权人 山东钢铁股份有限公司	(56) 对比文件
地址 271104 山东省济南市钢城区府前大街99号	CN 106191670 A, 2016.12.07
(72) 发明人 袁淑君 赵新华 闫志华 张鹏	审查员 蔡旭东
(74) 专利代理机构 北京方安思达知识产权代理有限公司 11472	
专利代理师 张红生 李彪	
(51) Int. Cl.	
G22C 38/02 (2006.01)	
G22C 38/04 (2006.01)	

权利要求书1页 说明书6页

## (54) 发明名称

一种海上风电法兰用钢及制备方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种海上风电法兰用钢及制备方法,其屈服强度 $R_{eL} \geq 460\text{MPa}$ ,抗拉强度 $R_m$ : 530~680MPa断后伸长率 $A \geq 25\%$ ,厚度方向性能为Z35级别,  $-60^\circ\text{C}$ 下低温冲击吸收能量 $KV_2 \geq 50\text{J}$ 。其组成按质量百分数为:C:0.05~0.08%、Si:0.30~0.50%、Mn:0.50~0.80%、P: $\leq 0.012\%$ 、S: $\leq 0.003\%$ 、Cr:1.20~1.40%、Cu:0.10~0.30%、Ni:0.05~0.20%、V:0.040~0.060%、Nb:0.010~0.030%、N:0.0120~0.0180%、RE:0.0010~0.0030%、As: $\leq 0.015\%$ 、Sn: $\leq 0.015\%$ 、Pb: $\leq 0.0025\%$ 、Sb: $\leq 0.0025\%$ 、Bi: $\leq 0.0025\%$ 、(As+Sn+Pb+Sb+Bi): $\leq 0.025\%$ 、[O] $\leq 0.0012\%$ ,其余为Fe和不可避免的杂质;且化学成分满足碳当量 $CEV \leq 0.47\%$ ;裂纹敏感系数 $P_{cm} \leq 0.22\%$ ;耐腐蚀性指数 $I \geq 6.0$ 要求。本发明制得的海上风电法兰用钢具有高耐腐蚀性、高耐低温性、高强度、易焊接性能、高抗层状撕裂性等优良性能。

CN 113913690 B

1. 一种海上风电法兰用钢, 其特征在于, 所述海上风电法兰用钢的屈服强度 $R_{eL} \geq 460\text{MPa}$ , 抗拉强度 $R_m: 530\text{--}680\text{MPa}$ , 断后伸长率 $A \geq 20\%$ , 厚度方向性能为Z35级别,  $-60^\circ\text{C}$ 下低温冲击吸收能量 $KV_2 \geq 50\text{J}$ , 其组成按质量百分比为:

C:  $0.05\text{--}0.08\%$ 、Si:  $0.30\text{--}0.50\%$ 、Mn:  $0.50\text{--}0.80\%$ 、P:  $\leq 0.012\%$ 、S:  $\leq 0.003\%$ 、Cr:  $1.20\text{--}1.40\%$ 、Cu:  $0.10\text{--}0.30\%$ 、Ni:  $0.05\text{--}0.20\%$ 、V:  $0.040\text{--}0.060\%$ 、Nb:  $0.010\text{--}0.030\%$ 、N:  $0.0120\text{--}0.0180\%$ 、RE:  $0.0010\text{--}0.0030\%$ 、As:  $\leq 0.015\%$ 、Sn:  $\leq 0.015\%$ 、Pb:  $\leq 0.0025\%$ 、Sb:  $\leq 0.0025\%$ 、Bi:  $\leq 0.0025\%$ 、(As+Sn+Pb+Sb+Bi):  $\leq 0.025\%$ 、[O]  $\leq 0.0012\%$ , 其余为Fe和不可避免的杂质;

所述海上风电法兰用钢的碳当量 $CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \leq 0.47\%$ ; 裂纹敏感系数 $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \leq 0.22\%$ ; 耐腐蚀性指数 $I = 26.01(\%Cu) + 3.88(\%Ni) + 1.20(\%Cr) + 1.49(\%Si) + 17.28(\%P) - 7.29(\%Cu)(\%Ni) - 9.10(\%Ni)(\%P) - 33.39(\%Cu)^2 \geq 6.0$ ;

所述海上风电法兰用钢的制备方法包括以下步骤:

#### 1) 电炉冶炼

入炉原料为铁水和废钢, 铁水中As  $\leq 0.010\%$ , 电炉出钢终点[C]:  $0.02\text{--}0.04\%$ 、[P]  $\leq 0.007\%$ , 钢水的出钢温度控制在 $1640\text{--}1680^\circ\text{C}$ ; 加入金属锰、微碳铬铁、硅锰、硅铁进行钢包合金化, 使Si控制在 $0.15\text{--}0.30\%$ , Mn控制在 $0.40\text{--}0.50\%$ , Cr控制在 $0.40\text{--}0.50\%$ ;

#### 2) LF精炼+VD真空处理

控制LF炉精炼渣碱度 $3.2\text{--}3.5$ , 采用大渣量、喂铝线强脱氧、脱硫工艺; 加入金属锰、微碳铬铁、镍板、硅铁、铜粒、氮化铬铁、钒铁、铌铁合金进行合金成分微调, 控制C、Si、Mn、P、S、Cr、Ni、Cu、Nb、V符合成分要求; 到VD工位后, 采用喂丝工艺加入稀土合金, 真空度小于 $67\text{Pa}$ 保持时间 $\geq 15$ 分钟; 破空后, 取样检验钢水成分, 结合稀土含量以及氮含量检验结果, 适当补喂稀土合金以及补吹氮气, 使RE、N符合成分要求;

#### 3) 连铸

中间包过热度控制在 $20\text{--}25^\circ\text{C}$ , 即中间包钢水温度控制在 $1540\text{--}1545^\circ\text{C}$ ; 采用低碳钢专用连铸保护渣, 其碱度为 $1.10\text{--}1.20$ , 黏度为 $0.30\text{--}0.50\text{Pa}\cdot\text{s}$ , 熔化温度为 $1050\text{--}1090^\circ\text{C}$ ; 结晶器电磁搅拌电流控制在 $350\text{--}400\text{A}$ , 频率控制在 $2.5\text{--}3.5\text{Hz}$ , 末端电磁搅拌电流为 $50\text{--}80\text{A}$ , 频率为 $1.0\text{--}1.2\text{Hz}$ ; 坯型为 $\Phi 800\text{mm}$ , 拉速为 $0.16\text{--}0.18\text{m/min}$ 。

2. 根据权利要求1所述的海上风电法兰用钢, 其特征在于, 所述海上风电法兰用钢的组成按质量百分数为:

C:  $0.06\text{--}0.07\%$ 、Si:  $0.40\text{--}0.48\%$ 、Mn:  $0.55\text{--}0.65\%$ 、P:  $\leq 0.011\%$ 、S:  $\leq 0.003\%$ 、Cr:  $1.30\text{--}1.40\%$ 、Cu:  $0.15\text{--}0.25\%$ 、Ni:  $0.08\text{--}0.15\%$ 、V:  $0.040\text{--}0.060\%$ 、Nb:  $0.020\text{--}0.030\%$ 、N:  $0.0140\text{--}0.0170\%$ 、RE:  $0.0010\text{--}0.0030\%$ 、As:  $\leq 0.015\%$ 、Sn:  $\leq 0.015\%$ 、Pb:  $\leq 0.0025\%$ 、Sb:  $\leq 0.0025\%$ 、Bi:  $\leq 0.0025\%$ 、(As+Sn+Pb+Sb+Bi):  $\leq 0.025\%$ 、[O]  $\leq 0.0012\%$ , 其余为Fe和不可避免的杂质;

所述海上风电法兰用钢的碳当量CEV控制范围为 $0.43\text{--}0.47\%$ , 裂纹敏感系数 $P_{cm} \leq 0.20\%$ , 耐腐蚀性指数 $I \geq 6.0$ 。

3. 根据权利要求1所述的海上风电法兰用钢, 其特征在于, 所述废钢使用低合金系列自循环废钢和/或优碳系列自循环废钢。

## 一种海上风电法兰用钢及制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于钢铁冶金技术领域,具体涉及一种海上风电法兰用钢及制备方法。

### 背景技术

[0002] 风力发电是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,已经成为仅次于火电和水电的第三大电力来源。海上风力发电作为风力发电的重要组成部分,由于其风力资源丰富、风源稳定、风速较陆上更大、信号主导方向稳定、年利用小时长、不占用土地资源以及接近沿海用电负荷中心等优点,已成为近年来改变国家能源结构、实现绿色低碳发展的重要手段。同时在风电装备制造技术和国家产业政策的支持下,国内海上风力发电得到了快速的发展,2020年,国内风力发电新增容量为3.06GW,累计装机容量为12.05GW。

[0003] 海上风力发电装备要在长期经受海面台风、严寒冰冻、海水喷溅高盐雾等恶劣环境中使用寿命达到50年以上,且随着单台海上风力发电机普遍容量从1-2MW发展到目前的5-8MW,导致机组的大型化,对海上风力发电机所用法兰、塔筒、风轮等部件的质量及性能提出更高的严格。针对海上风电法兰,对其材质的耐腐蚀性、耐低温性、强度级别、焊接性能、抗层状撕裂性等各项性能均提出了更高的要求。

[0004] 中国专利CN102517494B公开一种风电法兰用钢材及其制备方法,此发明的钢材按重量百分含量主要包括C:0.15~0.19%,Si:0.17~0.35%,Mn:1.45~1.55%,V:0.060~0.090%,Nb 0.02~0.04%,Al:0.015~0.040%,Ti $\leq$ 0.005%, $[O]\leq 0.0015\%$ , $[N]\leq 0.012\%$ , $S\leq 0.005\%$ , $P\leq 0.012\%$ , $As\leq 0.04\%$ , $[H]\leq 0.00015\%$ ,余量为Fe。该发明中钢材的碳当量为0.41-0.46%;抗拉强度 $R_m=580\sim 720\text{MPa}$ ;屈服强度 $Re1=470\sim 500\text{MPa}$ ;伸长率 $A5=22\sim 26\%$ ;断面收缩率 $Z=66\sim 72\%$ ;  $-20^\circ\text{C}$ ,V型缺口冲击功 $A_{kv}=60\sim 90\text{J}$ 。此发明中只保证材质 $-20^\circ\text{C}$ 温度下的冲击性能,已不能满足海上风电 $-50^\circ\text{C}$ 低温下的使用要求, $[O]\leq 0.0015\%$ 的要求,难以保证钢优良的洁净度,从而可导致其低温性能的降低。

[0005] 中国专利申请CN112342459A公开了一种耐低温风电法兰用钢及其轧制方法,提供的耐低温风电法兰用钢的化学成分按质量百分比计包括:C 0.15~0.20%、Si 0.15~0.35%、Mn 1.25~1.50%、 $P\leq 0.020\%$ 、 $S\leq 0.015\%$ 、 $Al\leq 0.020-0.050\%$ 、 $Cr\leq 0.30\%$ 、 $Cu\leq 0.30\%$ 、 $Ni\leq 0.30\%$ 、 $[H]\leq 2.0\text{ppm}$ 、 $[O]\leq 20\text{ppm}$ 、 $[N]\leq 120\text{ppm}$ 、 $Al/N\geq 2$ 、 $CE\leq 0.43$ ,其余为Fe和不可避免的杂质。该发明的钢材屈服强度 $R_{p0.2}\geq 360\text{MPa}$ ,抗拉强度:512~540MPa,延伸率 $A\geq 30.5\%$ , $Z\geq 33.0\%$ ,低温冲击韧性满足( $-50^\circ\text{C}$ ): $\geq 68\text{J}$ 。此发明的钢材强度较低,难以达到大型海上风电的使用要求; $S\leq 0.015\%$ 也满足不了钢材的抗层状撕裂性能要求; $[O]\leq 20\text{ppm}$ 的要求,难以保证钢优良的洁净度。同时其公开了轧制方法,规定热轧圆钢规格为 $\Phi 100\text{mm}\sim \Phi 200\text{mm}$ ,可知其钢材并不是作为大型风电法兰用钢。

[0006] 在上述两项专利中,均未对钢材的耐腐蚀性能进行要求;而在本发明中需要充分考虑海上风电作业环境中的海洋腐蚀的影响。本发明针对海上风电法兰的服役条件以及高耐腐蚀性、高耐低温性、高强度、易焊接性能、高抗层状撕裂性等优良性能要求,通过合理的

成分设计和工艺控制,提供了一种海上风电法兰用钢及制备方法。

### 发明内容

[0007] 针对现有风电法兰用钢耐腐蚀性差、低温性能较差、强度偏低、焊接性能以及抗层状撕裂性能较差,难以满足海上风电法兰使用要求的情况,本发明的目的之一是提供一种海上风电法兰用钢,所述钢具有高耐腐蚀性、高耐低温性、高强度、易焊接性能、高抗层状撕裂性等优良性能。

[0008] 为达到上述目的,本发明的技术方案如下:

[0009] 一种海上风电法兰用钢,其屈服强度 $R_{eL} \geq 460\text{MPa}$ ,抗拉强度 $R_m: 530 \sim 680\text{MPa}$ 断后伸长率 $A \geq 25\%$ ,厚度方向性能为Z35级别, $-60^\circ\text{C}$ 下低温冲击吸收能量 $KV_2 \geq 50\text{J}$ 。为满足以上性能指标的要求,重点从以下几方面制定方案:

[0010] 1、海上风电法兰用钢的化学成分质量百分比为:C:0.05~0.08%、Si:0.30~0.50%、Mn:0.50~0.80%、P: $\leq 0.012\%$ 、S: $\leq 0.003\%$ 、Cr:1.20~1.40%、Cu:0.10~0.30%、Ni:0.05~0.20%、V:0.040~0.060%、Nb:0.010~0.030%、N:0.0120~0.0180%、RE:0.0010~0.0030%、As: $\leq 0.015\%$ 、Sn: $\leq 0.015\%$ 、Pb: $\leq 0.0025\%$ 、Sb: $\leq 0.0025\%$ 、Bi: $\leq 0.0025\%$ 、(As+Sn+Pb+Sb+Bi): $\leq 0.025\%$ 、[O] $\leq 0.0012\%$ ,其余为Fe和不可避免的杂质。

[0011] 所述海上风电法兰用钢的碳当量 $CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \leq 0.47\%$ ;裂纹敏感系数 $P_{cm} = C + Si/30 + Mn/20 + Cu/20 + Ni/60 + Cr/20 + Mo/15 + V/10 + 5B \leq 0.22\%$ ;耐腐蚀性指数 $I = 26.01(\%Cu) + 3.88(\%Ni) + 1.20(\%Cr) + 1.49(\%Si) + 17.28(\%P) - 7.29(\%Cu)(\%Ni) - 9.10(\%Ni)(\%P) - 33.39(\%Cu)^2 \geq 6.0$ 。

[0012] 本发明的海上风电法兰用钢各化学元素设计原理为结合高耐腐蚀性、高耐低温性、高强度、易焊接性能、高抗层状撕裂性等综合性能的要求,主要采用低碳、高铬、铜-镍复合来提高钢材的耐腐蚀性,采用钒、铌、氮微合金化原理提高钢材的强度,采用RE稀土元素对钢液进行净化、夹杂物变性及微合金化,来保证钢材优良的耐腐蚀性、耐低温性以及强韧性;同时严格控制磷、硫、砷、锡、铅、锑、铋、氧等有害元素含量,来提高钢材的耐腐蚀性、抗层状撕裂性能;各合金元素含量微调,保证碳当量、裂纹敏感系数、耐腐蚀系数的要求,从而保证钢材良好的焊接性能以及耐腐蚀性。各元素的设计原理分析如下:

[0013] 碳:C元素是钢铁材料中不可缺少的元素,为本发明中需重点考量钢材的耐腐蚀性能以及耐低温性能,同时为避开包晶钢(C含量0.08~0.17%)范畴,降低连铸生产难度,因此将C元素含量上限定为0.080%;且为保证钢材一定的强度以及电炉炼钢脱碳的难度,因此将C元素含量下限定为0.050%。

[0014] 硅:Si元素是炼钢过程中主要的脱氧剂,作为合金元素时,其以固溶体形态存在铁素体或奥氏体中,可显著的提高钢材的屈服强度和抗拉强度,因此将Si元素含量下限定为0.30%;但Si元素的热传导能力较差,将导致铸坯心部与表面温度差较大,易出现锻造裂纹,且会促进钢材表面脱碳,从而恶化锻件的表面质量,因此将Si元素含量上限定为0.50%。

[0015] 锰:Mn元素是钢铁材料中的常存元素,低于0.80%时,可较好的提高钢材的强度并不降低钢材的韧性,同时为不恶化钢材的焊接性能,因此将Mn元素含量的上限定为0.80%;但Mn元素含量低于0.50%时,则稳定奥氏体组织不足,将降低钢材的耐腐蚀性能,因此将Mn

元素含量的下限定为0.50%。

[0016] 铬:在海洋环境中,由于Cr元素的存在,钢材表面可形成由 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{FeOOH}$ 和 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 组成的氧化性保护膜,可阻止 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 等海洋环境中的腐蚀性阴离子渗入钢材内部,从而可提高钢材的抗海洋腐蚀性能,同时也可较好的提升钢材的强度,因此将Cr元素含量下限定为1.20%;但过高的Cr含量将严重影响钢材的焊接性能以及韧性,因此将Cr元素含量上限定为1.80%。

[0017] 铜、镍:Cu是最有效提高钢材耐腐蚀性能的元素之一,但Cu的熔点为 $1085^\circ\text{C}$ ,在连铸以及后续锻造加工过程中易因铜脆而造成表面微裂纹、翘皮等表面质量缺陷,反而不利于钢材的耐腐蚀性能。而加入一定量的Ni,可以与铜形成高熔点的Cu-Ni二元合金相,从而可以避免铜脆现象的出现。综合考虑生产控制难度与生产成本问题,将Cu元素含量范围控制在0.10~0.30%,Ni元素含量范围控制在0.05~0.15%;同时控制Ni/Cu质量比不低于0.5。

[0018] 钒、铌、氮:V、Nb都是可显著提高钢材的强度的微合金化元素,Nb的作用主要是细晶,V的作用主要是沉淀强化,两个元素复合作用将远高于单一元素的强化作用。在钢材中Nb含量较低时,钢的屈服强度增长较快,且和含量成正比,当Nb含量达0.030%时,强化效果开始降低,因此为最好的发挥Nb元素的强化效果,将Nb含量范围控制在0.010%~0.030%。V元素的沉淀强化作用主要是通过和C、N元素形成V(C,N)化合物在奥氏体晶界的铁素体中析出达到强化效果,因此钢中必须保证一定的N含量;结合本发明钢的强度要求,将V元素含量范围控制在0.040~0.060%,N含量范围控制在0.0120~0.0180%。

[0019] 稀土:RE稀土元素在钢中有净化钢液、使夹杂物变性和微合金化作用,可很好的提升钢材的耐腐蚀性、耐低温性以及强韧性。当RE含量低于0.0010%时,主要起到净化钢液的作用,微合金化作用不佳;当RE含量高于0.0030%时,在连铸过程中容易氧化,氧化物易堵塞水口,影响连铸生产的顺行;因此将RE含量范围控制在0.0010%~0.0030%。

[0020] 磷:钢中的P元素易在晶界处积聚,导致晶界脆性断裂,从而急剧恶化钢的低温冲击性能,将P元素控制越低越好;但考虑到电炉冶炼过程中脱磷的难度以及带来的成本上升情况,因此将P元素含量上限定为0.012%。

[0021] 硫:S元素是钢中的有害元素,易形成 $\text{MnS}$ 、 $\text{FeS}$ 等非金属夹杂物,导致热脆,且恶化钢材的耐腐蚀性以及抗层状撕裂性能,同时考虑电炉流程中LF精炼过程脱硫工艺及生产成本要求,将S元素含量上限定为0.003%。

[0022] 五害元素:钢中五害元素是指砷、锡、铅、铋、铋五种元素,这五种元素的氧化位低于铁,因此在冶炼过程中不能被去除,将不断的在钢材中积聚。五害元素对钢的耐低温性、耐腐蚀性均有害,因此应该尽量减少其含量;结合冶炼原材料情况及生产成本控制情况,要求As、Sn元素含量上限为0.015%,Pb、Sb、Bi元素含量上限为0.0025%,同时要求五害元素总量上限为0.025%。

[0023] 氧:为了避免钢中形成大颗粒的氧化物夹杂,恶化钢的耐腐蚀性、耐低温性等性能,故要求O含量上限为0.0012%。

[0024] 优选的钢的化学成分质量百分比为:C:0.06~0.07%、Si:0.40~0.48%、Mn:0.55~0.65%、P: $\leq 0.011\%$ 、S: $\leq 0.003\%$ 、Cr:1.30~1.40%、Cu:0.15~0.25%、Ni:0.08~0.15%、V:0.040~0.060%、Nb:0.020~0.030%、N:0.0140~0.0170%、RE:0.0010-

0.0030%、As:  $\leq 0.015\%$ 、Sn:  $\leq 0.015\%$ 、Pb:  $\leq 0.0025\%$ 、Sb:  $\leq 0.0025\%$ 、Bi:  $\leq 0.0025\%$ 、(As+Sn+Pb+Sb+Bi):  $\leq 0.025\%$ 、[O]  $\leq 0.0012\%$ ,其余为Fe和不可避免的杂质。

[0025] 优选的碳当量CEV控制范围为0.43~0.47%,裂纹敏感系数 $P_{cm} \leq 0.20\%$ 。

[0026] 2、本发明上述海上风电法兰用钢的制备方法主要包括以下步骤:电炉冶炼-LF精炼+VD真空处理-连铸。具体工艺步骤包括:

[0027] (1)电炉冶炼:入炉原料为铁水和废钢,铁水中As  $\leq 0.010\%$ ,废钢使用低合金系列、优碳系列自循环废钢,不能使用高Ti的废钢以及渣钢、罐帮铁等高P、S废钢;电炉出钢终点[C]:0.02~0.04%、[P]  $\leq 0.007\%$ ,钢水的出钢温度控制在1640~1680°C;加入金属锰、微碳铬铁、硅锰、硅铁进行钢包合金化,使Si控制在0.15~0.30%,Mn控制在0.40~0.50%,Cr控制在0.40~0.50%。

[0028] (2)LF精炼+VD真空处理:控制LF炉精炼渣碱度3.2~3.5,采用大渣量、喂铝线强脱氧、脱硫工艺;加入金属锰、微碳铬铁、镍板、硅铁、铜粒、氮化铬铁、钒铁、铌铁合金进行合金成分微调,控制C、Si、Mn、P、S、Cr、Ni、Cu、Nb、V符合成分要求。到VD工位后,采用喂丝工艺加入稀土合金,真空度小于67Pa保持时间 $\geq 15$ 分钟;破空后,取样检验钢水成分,结合稀土含量以及氮含量检验结果,适当补喂稀土合金以及补吹氮气,使RE、N符合成分要求。

[0029] (3)连铸:中间包过热度控制在20~25°C,即中间包钢水温度控制在1540~1545°C;采用低碳钢专用连铸保护渣,其碱度为1.10~1.20,黏度为0.30~0.50Pa·s,熔化温度为1050-1090°C;结晶器电磁搅拌电流控制在350~400A,频率控制在2.5~3.5HZ,末端电磁搅拌电流为50~80A,频率为1.0~1.2HZ;坯型为 $\Phi 800$ mm,拉速为0.16~0.18m/min。

[0030] 以上制备方法中未加限定的工艺条件均可参照本领域常规技术。

## 具体实施方式

[0031] 结合实施例1-3对本发明的具体实施方式做进一步描述。

[0032] 实施例1-3生产工序控制参数见表1;LF精炼出钢以及成品化学成分见表2;成品有害元素含量、碳当量CEV、裂纹敏感系数 $P_{cm}$ 以及耐腐蚀系数I结果见表3。

[0033] 根据实施例1-3生产出来的连铸圆坯,采用正常的风电法兰生产工艺即“下料→加热炉加热→制坯→二次加热→碾环→码垛缓冷→粗加工→热处理→精加工→探伤→成品”生产出的风电法兰锻件,其力学性能检验结果见表4,其中拉伸性能和厚度方向性能取2个样,冲击性能取3个样进行检验。

[0034] 表1实施例1-3生产工序控制参数

编号	控制工序	控制要点		
		实施例 1	实施例 2	实施例 3
[0035]	1 冶炼	入炉铁水比例为 65.7%，As 为 0.002%；废钢为自循环低合金钢，电炉出钢终点 [C]：0.03%、[P]：0.005%，出钢温度为 1660℃。	入炉铁水比例为 68%，As 为 0.003%；废钢为自循环低合金钢，电炉出钢终点 [C]：0.02%、[P]：0.007%，出钢温度为 1670℃。	入炉铁水比例为 70%，As 为 0.006%；废钢为自循环低合金钢，电炉出钢终点 [C]：0.04%、[P]：0.006%，出钢温度为 1650℃。
	2 LF 精炼	到位，检验钢水成分：C：0.04%，Si：0.20%、Mn：0.45%、Cr：0.50%、P：0.006%、S：0.015%；按 15kg/t 钢水加入造渣料，精炼渣碱度为 3.4；按 3.5m/t 钢喂入铝线；加入金属锰、微碳铬铁、镍板、硅铁、铜粒、氮化铬铁、钒铁，铌铁进行成分微调；出钢前按 2.5m/t 钢喂入钙线进行夹杂物变性处理。	到位，检验钢水成分：C：0.04%，Si：0.22%、Mn：0.41%、Cr：0.45%、P：0.009%、S：0.017%；按 18kg/t 钢水加入造渣料，精炼渣碱度为 3.3；按 3.6m/t 钢喂入铝线；加入金属锰、微碳铬铁、镍板、硅铁、铜粒、氮化铬铁、钒铁，铌铁进行成分微调；出钢前按 2.5m/t 钢喂入钙线进行夹杂物变性处理。	到位，检验钢水成分：C：0.05%，Si：0.25%、Mn：0.50%、Cr：0.40%、P：0.008%、S：0.020%；按 20kg/t 钢水加入造渣料，精炼渣碱度为 3.5；按 3.8m/t 钢喂入铝线；加入金属锰、微碳铬铁、镍板、硅铁、铜粒、氮化铬铁、钒铁，铌铁进行成分微调；出钢前按 2.5m/t 钢喂入钙线进行夹杂物变性处理。
	3 VD 真空处理	采用喂丝工艺加入稀土合金，真空度小于 67Pa 保持时间为 18 分钟；破空后，取样检验钢水成分，其中 RE 为 0.0025%、N：0.009%，补吹氮气；后进行软吹氩，软吹氩时间为 20 分钟。	采用喂丝工艺加入稀土合金，真空度小于 67Pa 保持时间为 20 分钟；破空后，取样检验钢水成分，其中 RE 为 0.0010%、N：0.011%，补喂稀土合金和补吹氮气；后进行软吹氩，软吹氩时间为 15 分钟。	采用喂丝工艺加入稀土合金，真空度小于 67Pa 保持时间为 15 分钟；破空后，取样检验钢水成分，其中 RE 为 0.0015%、N：0.013%，适当补喂稀土合金和补吹氮气；后进行软吹氩，软吹氩时间为 18 分钟。
	4 连铸	到位，中间包钢水温度为 1545℃，过热度为 25℃；拉速为 0.16m/min；采用低碳钢专用连铸保护渣，其碱度为 1.15，黏度为 0.45Pa·s，熔化温度为 1070℃；结晶器电磁搅拌电流为 400A，	到位，中间包钢水温度为 1543℃，过热度为 23℃；拉速为 0.17m/min；采用低碳钢专用连铸保护渣，其碱度为 1.20，黏度为 0.30Pa·s，熔化温度为 1055℃；结晶器电磁搅拌电流为 350A，	到位，中间包钢水温度为 1540℃，过热度为 20℃；拉速为 0.17m/min；采用低碳钢专用连铸保护渣，其碱度为 1.18，黏度为 0.35Pa·s，熔化温度为 1090℃；结晶器电磁搅拌电流为 400A，
[0036]		频率控制在 2.5HZ，末端电磁搅拌电流为 60A，频率为 1.0HZ；浇铸坯型为 Φ800mm。	频率控制在 3.5HZ，末端电磁搅拌电流为 80A，频率为 1.2HZ；浇铸坯型为 Φ800mm。	频率控制在 3.0HZ，末端电磁搅拌电流为 50A，频率为 1.2HZ；浇铸坯型为 Φ800mm。

[0037] 表2 LF精炼出钢及成品化学成分(%)

实施 例		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Cu	Nb	RE	N	O	
[0038]	1	LF	0.06	0.40	0.60	0.009	0.002	1.32	0.09	0.04	0.17	0.020	-	0.020	0.0009
		成 品	0.07	0.40	0.60	0.010	0.002	1.32	0.09	0.04	0.17	0.020	0.0020	0.0140	0.0010
	2	LF	0.06	0.42	0.55	0.010	0.003	1.30	0.10	0.06	0.18	0.022	-	0.0250	0.0010
		成 品	0.06	0.42	0.55	0.011	0.003	1.30	0.10	0.06	0.18	0.022	0.0015	0.0160	0.0010
	3	LF	0.07	0.45	0.60	0.009	0.002	1.34	0.11	0.05	0.20	0.025	-	0.0270	0.0010
		成 品	0.07	0.45	0.60	0.010	0.002	1.34	0.11	0.05	0.20	0.025	0.0018	0.015	0.0011

[0039] 表3五害元素含量(%)、CEV(%)、Pcm(%)、I值

实施 例	As	Sn	Pb	Sb	Bi	As+Sn+Pb+Sb+ Bi	CEV	Pcm	I 值	
[0040]	1	0.0078	0.0059	0.0002	0.0011	0.0003	0.0154	0.46	0.20	6.0
	2	0.0064	0.0049	0.0002	0.0039	0.0005	0.0159	0.44	0.19	6.2
	3	0.0063	0.0051	0.0002	0.0056	0.0007	0.0180	0.47	0.20	6.6

[0041] 表4风电法兰锻件力学性能

实施例	试样	R <sub>eL</sub> /MPa	R <sub>m</sub> /MPa	A/%	Z35/%	KV <sub>2</sub> /J (试验温度为-60°C)	
[0042]	1	1-1	540	650	28	40	80
		1-2	535	630	29	38	86
		1-3	-	-	-	-	74
	2	2-1	500	590	30	38	96
		2-2	515	600	28	42	82
		2-3	-	-	-	-	86
	3	3-1	525	620	27	44	94
		3-2	510	615	29	41	102
		3-3	-	-	-	-	90

[0043] 本发明的工艺参数(如温度、时间等)区间上下限取值以及区间值都能实现本法,在此不一一列举实施例。

[0044] 本发明未详细说明的内容均可采用本领域的常规技术知识。

[0045] 最后所应说明的是,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非限制。尽管参照实施例对本发明进行了详细说明,本领域的普通技术人员应该理解,对本发明的技术方案进行修改或者等同替换,都不脱离本发明技术方案的精神和范围,其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。