



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102477518 B

(45) 授权公告日 2014.03.12

(21) 申请号 201010558553.0

(22) 申请日 2010.11.24

(73) 专利权人 宝钢特钢有限公司

地址 200940 上海市宝山区水产路 1269 号

(72) 发明人 吴江枫 陈新建 周灿栋 张甫飞
陆青林

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所
11256

代理人 郑立柱 金惠淑

JP 特开 2006-336059 A, 2006.12.14, 说明书第 6 段.

JP 特开 2006-336059 A, 2006.12.14, 说明书第 6 段.

CN 101195895 A, 2008.06.11, 说明书第 7 页第 5 段.

CN 101195895 A, 2008.06.11, 说明书第 7 页第 5 段.

审查员 牛培利

(51) Int. Cl.

C22C 38/48 (2006.01)

C22C 33/02 (2006.01)

C21D 8/00 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 1509342 A, 2004.06.30, 权利要求 1-11.

CN 1509342 A, 2004.06.30, 权利要求 1-11.

权利要求书 2 页 说明书 9 页

(54) 发明名称

一种汽轮机叶片用钢及其制造方法

(57) 摘要

本发明涉及一种汽轮机叶片用钢,其化学成分的质量百分比为:C:0.18-0.24%, Si:0.60-1.00%, Mn:0.10-0.20%, Mo:0.80-1.20%, Cr:11.00-12.50%, Ni:0.70-0.80%, V:0.25-0.35%, Nb:0.005-0.020%, N:0.02-0.05%, S≤0.03%, P≤0.02%,其余为Fe及不可避免的杂质。该钢的制造方法包括EF+AOD+LFV冶炼;浇注成电极钢锭,其中浇注过热度为40-70℃,钢锭脱模温度控制在600-700℃;电极钢锭进行热装退火;电极钢锭熔炼进行电渣重熔;锻造,锻后热装退火;轧制,轧后退火。这样得到的高性能中碳型马氏体不锈钢,适合用于使用温度在560-580℃范围内的汽轮机叶片。

1. 一种汽轮机叶片用钢的制造方法,其化学成分的质量百分比为:C:0.18-0.24%, Si:0.65-1.00%, Mn:0.10-0.20%, Mo:0.80-1.20%, Cr:11.00-12.50%, Ni:0.70-0.80%, V:0.25-0.35%, Nb:0.005-0.020%, N:0.02-0.05%, S \leq 0.03%, P \leq 0.02%,其余为Fe及不可避免的杂质;

所述方法包括:

EF+AOD+LFV冶炼;

浇注成电极钢锭,其中浇注过热度为40-70℃;

电极钢锭进行热装退火,退火温度为680-750℃,加热保温时间为15-20小时;

电极钢锭熔炼进行电渣重熔,其中渣量配比为CaF₂:Al₂O₃:MgO=(60~65):(35~30):5;电渣重熔后进行790-850℃,保温16-20小时的热装退火;

锻造,开锻温度为1020-1200℃,终锻温度为800-950℃,锻后进行760-780℃,保温18-20小时的热装退火;

轧制,粗轧开轧温度为1100-1150℃,粗轧终轧温度为950-960℃,精轧入口温度为960-980℃,精轧终轧温度为900-940℃,轧后进行(820~840)℃ \times (18~20)小时的退火。

2. 如权利要求1所述的方法,其特征在于,浇注的电极钢锭进行的热装退火中,退火炉起始温度为600-650℃,以30-80℃/小时的加热速度缓慢升温至680-750℃,加热保温时间为15-20小时;再以10-50℃/小时的降温速度炉冷至350-450℃出炉。

3. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,浇注为模铸,模铸后的钢锭脱模温度控制在600-700℃。

4. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,冶炼中,AOD全程吹氩;LFV炉对高温钢液进行成分微调和脱气处理,在真空度 \leq 140Pa进行15-20分钟的真空脱气处理,使钢液中的氧含量 \leq 25ppm,氢含量 \leq 2ppm。

5. 如权利要求3所述的方法,其特征在于,模铸后电极钢锭直径为 Φ 422-490mm。

6. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,电渣重熔中,结晶器直径D与电极直径d的关系为 $d=(0.4-0.85)D$;渣量w与电渣钢锭重量W满足 $w=(4\sim5\%)W$ 。

7. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,电渣重熔中,电压为58-64V,电流为13000-14000A。

8. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,电渣重熔后钢锭的直径为 Φ 500-700mm。

9. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,电渣重熔后钢锭的脱模温度为650-750℃。

10. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,电渣重熔后热装退火中,退火炉开始温度为550-650℃,保温时间为4.5-5.5小时,再以40-60℃/小时的速度升温加热到790-850℃,保温16-20小时进行退火,再以30-60℃/小时的冷却速度冷却至160-200℃后空冷。

11. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,锻造后热装退火中,加热至760-780℃,保温18-20小时,再以40-60℃/小时的冷却速度炉冷至240-300℃,保温2-4小时,最后空冷至室温。

12. 如权利要求1或2所述的方法,其特征在于,轧后退火工艺为(820~

840)℃ × (18 ~ 20) 小时,然后以 10 ~ 30℃ / 小时的冷却速度冷却到 580-600℃后,出炉空冷。

13. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其特征在于,轧制钢棒还进行扩散去氢工艺,加热至 740-780℃,保温 3-6 小时后在退火炉中冷却至 660-690℃,保温 12-20 小时,出炉空冷。

14. 如权利要求 1 或 2 所述的方法,其特征在于,还包括淬火工艺,淬火加热温度为 1020-1070℃,保温 1-2 小时,进行油冷,再进行回火处理,回火温度为 650-680℃,保温 1-2 小时,空冷。

一种汽轮机叶片用钢及其制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及中碳型马氏体不锈钢,尤其涉及一种适用于使用温度在 560-580℃范围内的汽轮机叶片用高性能中碳型马氏体不锈钢及其制造方法。

背景技术

[0002] 叶片是汽轮机最重要部件之一(担负着将热能转变为机械能的作用;它在极复杂工况如高温高压、较大的离心力和气动力、振动、氧化、腐蚀性气氛下,长期工作 10 万小时以上)。为保证汽轮机的稳定运行,汽轮机叶片用材(叶片钢)的选择至关重要。

[0003] 使用温度在 560-580℃范围内的汽轮机叶片是汽轮机重要的组成部分。一台汽轮机通常由几套机组组成,不同部位的机组所承受的蒸汽温度不同,温度范围为 450-620℃;前级机组承受的温度较高,高达 620℃;末级机组承受的温度较低,接近 450℃;而靠近前级机组的中间机组所处温度范围为 560-580℃。

[0004] 叶片钢(包括使用温度在 560-580℃范围内的叶片钢)的性能选用指标中,主要有 2 个直接与其使用寿命直接相关:①高温性能(包括高温瞬时拉伸综合性能和高温持久性能);②韧脆转变温度 $FATT_{50}$,可作为材料寿命消耗评估的一项重要内容。该指标的含义是环境温度减低时,材料会发生韧性状态向脆性状态转化,发生冷脆。人们就用标准夏比 V 型缺口冲击断裂后,断口面积呈现 50%脆性和 50%韧性断口所对应的温度来表示。

[0005] 随着社会科学技术的发展,使用温度在 560-580℃范围内的高性能叶片钢(高温屈服强度大于 450MPa,高温抗拉强度大于 500MPa,断面收缩率大于 80%;560℃温度下工作 10 万小时后高温持久强度大于 150MPa,580℃温度下工作 10 万小时后高温持久强度大于 100MPa;韧脆转变温度 $FATT_{50} \leq 24^\circ\text{C}$)的需求,日益增加。

[0006] 现在,使用温度在 560-580℃范围内的叶片钢,最广泛使用的钢种是 2Cr12MoV(欧洲牌号 X22CrMoV12-1)、2Cr12NiMo1W1V(它们的成分、室温力学性能和高温力学性能如表 3、表 4 所示)。这两种钢的特点是:含有较高含量的 Mo、V 元素,钢的热强性比较好,缺口敏感性小,具有良好的减振性和抗松弛性能。

[0007] 2Cr12MoV、2Cr12NiMo1W1V 两种叶片钢的缺点是(如表 4 所示):

[0008] 高温瞬时拉伸综合性能偏低(在 560℃温度,高温屈服强度小于 420MPa;高温抗拉强度小于 480MPa;断面收缩率小于 80%);高温持久性能偏低(560℃温度下工作 10 万小时后高温持久强度小于 150MPa;580℃温度下工作 10 万小时后高温持久强度小于 100MPa),且,这些钢种在高温和应力长期作用下,形成的碳化物稳定性低,直接影响叶片的使用寿命。

[0009] 韧脆转变温度 $FATT_{50}$ 数值偏高(大于 26℃),在机组和使用运行中容易造成叶片变脆失效,降低安全性。

[0010] 综上所述,现有的使用温度在 560-580℃范围内的叶片钢(2Cr12MoV、2Cr12NiMo1W1V),不能满足叶片钢的发展要求。具有高温瞬时拉伸综合性能:高温屈服强度大于 450MPa,高温抗拉强度大于 500MPa,断面收缩率大于 80%;高温持久性能:560℃温度

下工作 10 万小时后强度大于 150MPa, 580℃ 温度下工作 10 万小时后强度大于 100MPa ; 韧脆转变温度 $FATT_{50} \leq 24^{\circ}C$ 的高性能叶片钢的制备, 是一个技术难题。

发明内容

[0011] 本发明的目的是提供一种汽轮机的高性能叶片用材及其制造方法, 制备的高性能叶片钢, 使用温度在 560–580℃ 范围内, 主要性能指标达到: (1) 高温瞬时拉伸综合性能: 高温屈服强度大于 450MPa, 高温抗拉强度大于 500MPa, 断面收缩率大于 80%; (2) 高温持久性能: 560℃ 温度下工作 10 万小时后高温持久强度大于 150MPa, 580℃ 温度下工作 10 万小时后强度大于 100MPa; (3) 韧脆转变温度 $FATT_{50} \leq 24^{\circ}C$ 。满足叶片钢的发展要求。

[0012] 为实现上述目的, 本发明的高性能汽轮机叶片用钢的化学成份 (质量百分数) 是 C: 0.18–0.24%, Si: 0.60–1.00%, Mn: 0.10–0.20%, Mo: 0.80–1.20%, Cr: 11.00–12.50%, Ni: 0.70–0.80%, V: 0.25–0.35%, Nb: 0.005–0.020%, N: 0.02–0.05%, S $\leq 0.03\%$, P $\leq 0.02\%$, 其余为 Fe 及不可避免的杂质。其特点是进行控氮 N 和微量 Nb 合金化, 使得钢有足够的组织热稳定性和热强性, 且在高温高压下具有较好的耐磨性和较高的 $FATT_{50}$ 指标。上述合金元素的作用如下:

[0013] 碳 (C): 碳是钢中最重要的合金元素, 主要是形成碳化物或与氮一起形成碳氮化物, 提高高温强度的重要元素, 对长时间服役的强度有贡献。同时, 碳还强烈影响钢的硬度、冲击韧性和耐磨性。此外, 碳还是强烈奥氏体形成元素, 有利于降低钢中 δ 铁素体的形成。本发明中碳控制在 0.18–0.24% 范围内。

[0014] 铬 (Cr): 铬在叶片钢中的主要作用是抗氧化和耐腐蚀, 还与碳一起形成 M_6C 和 $M_{23}C_6$ 型碳化物, 提高钢的硬度和强度, 从而改善耐磨损性能。Cr 能增加钢的淬硬性和淬透能力, 提高碳化物在奥氏体中的溶解度, 阻止高温时碳化物的聚集。但过高的 Cr 含量会有损钢的高温强度。在本发明中铬含量控制为 11.00–12.50%。

[0015] 钼 (Mo): 钼的主要作用是提高钢在氧化条件下钢的耐腐蚀性能, 防止回火脆性, 提高钢的高温强度, 但钼含量高的钢在加热到 800–850℃ 时极易脱碳, 且热加工性能不佳, 易促进钢中 d 铁素体形成。本发明中钼的含量控制为 0.80–1.20%。

[0016] 钒 (V): 钒是强碳化物形成元素, 产生二次硬化反应, 提高各回火阶段的强度。V 含量过高造成基体中 V 含量增加, 同时析出物变得粗大、呈块状, 降低长时蠕变性能, 影响强化效果。还会强烈促成 d 铁素体形成。本发明中钒的含量控制为 0.25–0.35%。

[0017] 镍 (Ni): 镍主要用来提高钢的延性, 但过高会降低碳在基体中的固溶度, 增加 Cr_7C_3 和 M_2X 量, 轻微增加二次硬化强度, 故 Ni 含量控制在 0.70–0.80% 范围。

[0018] 铌 (Nb): 铌是强碳化物形成元素, 主要形成 MC 型碳化物, 可用来部分替代 V, 将 V 含量降至仅保持二次硬化的水平。铌碳化物的形成会提高钢的耐磨损性能而不降低钢的冲击韧性。Nb 会降低铬碳化物的形成使得基体中会有较多的铬而提高钢的耐腐蚀性能。不过, Nb 过高会使得钢的热加工温度提高, 从而提高了钢的可加工性能的门槛, 因此 Nb 含量控制在 0.005–0.020%, 保证热加工加热温度低于 1200℃。

[0019] 氮 (N): 加入氮, 主要是扩大奥氏体区, 细化晶粒, 提高材料的抗氧化性。同时, 可以与碳一起形成复合碳化物, 改善钢的综合性能。此外加入氮还可减少钢中 δ 铁素体形成。但钢中氮含量过高会使得冶炼浇注和电渣重熔过程中钢锭易形成氮气孔洞。因此 N 含

量控制在 0.02-0.05% 范围。

[0020] 锰 (Mn) : 作为脱氧剂而加入, 含量控制在 0.10-0.20%。控制钢中 $Mn/S \leq 20$, 有利于提高钢的锻、轧的热塑性, 明显减少坯材裂纹及提高成材率。

[0021] 硅 (Si) : 作为强脱氧元素而加入, 含量一般控制在 0.60-1.00%。硅促进粗大的一次碳化物 MC 的形成, 且硅含量高时, Mo 的平衡固溶度降低, 是 d 铁素体形成元素。

[0022] 磷 (P) : 磷在钢液凝固时形成微观偏析, 随后在奥氏体化温度加热时偏聚在晶界, 使钢的脆性显著增大。控制磷含量在 0.02% 以下, 并且含量越低越好。

[0023] 硫 (S) : 会形成 FeS, 给钢带来热脆性。控制硫含量在 0.03% 以下, 并且含量越低越好。

[0024] 本发明还提供一种高性能汽轮机叶片用钢的制造方法。制造使用温度在 560-580℃ 范围内的上述高性能叶片钢, 该钢具有以下性能: 1、高温瞬时拉伸综合性能: 高温屈服强度大于 450MPa, 高温抗拉强度大于 500MPa, 断面收缩率大于 80%; 2、高温持久性能: 560℃ 温度下 10 万小时的高温持久强度大于 150MPa, 580℃ 温度下 10 万小时的高温持久强度大于 100MPa; 3、韧脆转变温度 $FATT_{50} \leq 24^\circ C$; 4、其他性能指标如耐蚀性能达到相应的国家标准。

[0025] 上述高性能叶片钢的工艺步骤是: 原材料准备 → EF (电弧炉冶炼) + AOD + (LFV) 冶炼, 浇注 $\Phi 422-490mm$ 电极 → 热装退火 → 剥皮 (车) → 电渣重熔成 $\Phi 500-700mm$ 电极 → 热装退火或热送 → 4000T/2000T 锻造开坯 → 1300T 径锻成 $(100 \sim 200)mm \times (50 \sim 250)mm$ 轧坯 → 热装退火 → 轧制 → 退火 → 取样 → 性能检测 → 探伤 → 成品砂剥 → 尺寸、外观检查 → 入库。

[0026] 本发明的汽轮机叶片用钢的制造方法, 主要包括:

[0027] EF+AOD+LFV 冶炼;

[0028] 浇注成电极钢锭, 其中浇注过热度为 40-70℃;

[0029] 电极钢锭进行热装退火, 退火温度为 680-750℃, 加热保温时间为 15-20 小时;

[0030] 电极钢锭熔炼进行电渣重熔, 其中渣量配比为 $CaF_2 : Al_2O_3 : MgO = (60 \sim 65) : (35 \sim 30) : 5$; 电渣重熔后进行 790-850℃, 保温 16-20 小时的热装退火;

[0031] 锻造, 开锻温度为 1020-1200℃, 终锻温度为 800-950℃, 锻后进行 760-780℃, 保温 18-20 小时的热装退火;

[0032] 轧制, 粗轧开轧温度为 1100-1150℃, 粗轧终轧温度为 950-960℃, 精轧入口温度为 960-980℃, 精轧终轧温度为 900-940℃, 轧后进行 $(820 \sim 840)^\circ C \times (18 \sim 20)$ 小时的退火。

[0033] 根据本发明的优选实施方式, EF+AOD+(LFV) 冶炼中, EF 炉冶炼, 按常规的不锈钢返回吹氧法熔炼钢液, 所用含 Cr 合金是低 P 的 Cr 不锈钢返回料以降低生产成本, 并采用 1-2 次造渣, 以去除钢水中夹杂, 出钢时成分到位。AOD 全程吹氩, 加强还原脱氧。冶炼中注意成分均匀性的控制及残余元素的控制。采用 LFV 炉对高温钢液进行成分微调和脱气处理, 真空前适当插 Al, 全程底吹氩搅拌, 去除钢液中的有害夹杂物。真空度 $\leq 140Pa$ 进行脱气处理, 真空脱气时间 15-20 分钟, 使钢液中的氧含量 $\leq 25ppm$, 氢含量 $\leq 2ppm$, 主要是氧和氢为钢液中的有害气体, 且后续的电渣重熔并没有脱气功能, 氧含量过高, 会导致钢材夹杂物总量的增加, 降低叶片钢的疲劳寿命, 氢含量过高, 会引起氢致裂纹, 导致报废。

[0034] 根据本发明的优选实施方式, 冶炼的钢水模铸浇注成电渣重熔的电极钢锭, 电极

钢锭直径为 $\Phi 422-490\text{mm}$ 。浇注过程中采用氩气保护,以免钢水二次氧化。浇铸过热度控制在 $40-70^\circ\text{C}$ 范围,以减少钢锭偏析。钢锭脱模温度控制在 $600-700^\circ\text{C}$,并热装退火。

[0035] 根据本发明的优选实施方式,模铸的电极钢锭进行如下热装退火:钢锭脱模后,进行热装退火以消除组织应力,避免裂纹产生。退火炉起始温度 $600-650^\circ\text{C}$,表面温度 $550-700^\circ\text{C}$,此时心部温度约在 $800-900^\circ\text{C}$ 之间,存在热应力,以 $30-80^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的加热速度缓慢升温至 $680-750^\circ\text{C}$ 。加热保温时间 $15-20$ 小时,消除钢锭表面和心部内外温度差和马氏体转变组织应力,随后以 $10-50^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的降温速度炉冷至 $350-450^\circ\text{C}$ 出炉,减少热应力。

[0036] 根据本发明的优选实施方式,将模铸的电极钢锭熔炼进行电渣重熔,以得到成分均匀的电渣锭,减缓较严重的叶片钢钢锭成分偏析现象,并提高钢锭的纯净度,从而改善产品的高温性能和疲劳性能。更优选地,先将电极钢锭表面进行剥皮。采用结晶器直径 D 与电极 d 满足 $d = (0.4-0.85)D$;渣量配比是 $\text{CaF}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO} = (60 \sim 65) : (35 \sim 30) : 5$;渣量 w 与电渣钢锭重量 W 满足 $w = (4 \sim 5\%)W$ 。采用金属电极直接起弧造渣,来弧后迅速加渣,确保电流稳定,渣料加完 $5-15$ 分钟后提高电流,控制不超过 6000A 。当渣料熔化完,电流升到规定值后,转入正常电渣重熔冶炼。用电制度:电压 $58-64\text{V}$,电流 $13000-14000\text{A}$ 。冶炼后期充填,充填方法:逐渐降电流,每次降电流 $500-1000\text{A}$,采用间断给电流充填。所得电渣钢锭直径为 $\Phi 500-700\text{mm}$ 。对电渣钢锭缓冷,缓冷时间控制在 $20-60$ 分钟。电渣冶炼完成后脱模,锭子马上进退火炉进行热装退火。

[0037] 根据本发明优选实施方式,将杂质含量低、成分分布比较均匀的电渣钢锭采用热装不完全退火工艺,以消除组织应力,避免裂纹产生和溶解凝固时析出的粗大碳化物,细化组织。优选电渣钢锭脱模温度为 $650-750^\circ\text{C}$ 。此时心部温度 800°C 左右,显微组织是过冷奥氏体加一次碳化物。退火炉温度开始控制在 $550-650^\circ\text{C}$,保温时间 $4.5-5.5$ 小时,消除内外温差,再以 $40-60^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速度升温加热到 $790-850^\circ\text{C}$,保温 $16-20$ 小时进行退火,获得奥氏体加碳化物的均衡组织,并消融或减少一次碳化物尺寸。再以 $30-60^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的冷却速度冷却至 $160-200^\circ\text{C}$ 后空冷。

[0038] 根据本发明的优选实施方式,热锻造工艺(直接影响锻后材料的碳化物分布和大小)是,电渣锭进炉后在 $350-400^\circ\text{C}$ 的温度保温 $4.5-5.5$ 小时,确保内外温度的均匀化,再以 $40-60^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速度缓慢加热至 $830-880^\circ\text{C}$ 后,保温 $4.5-5.5$ 小时,均匀电渣锭内外温差减少热应力,形成奥氏体+碳化物组织,并为高温段缩短保温时间减少电渣锭表面脱碳创造条件,然后以 $100-120^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的加热速度,快速升温至 $1150-1200^\circ\text{C}$ 保温 $2.5-3.5$ 小时,完成均温和碳化物的完全溶解,出炉热加工锻造。先用 $40\text{MN}/20\text{MN}$ 快锻机开坯,将电渣钢锭锻造成 $\Phi 250-350\text{mm}$ 的八角钢锭,始锻温度控制在 $1020-1200^\circ\text{C}$ 范围,终锻温度控制在 $800-950^\circ\text{C}$ 范围。先锻粗拔长二次(每次锻粗至原高度的 $1/2$)。锻造回炉保温时间:锻粗回炉时保温 $2-4\text{h}$;当钢锭直径 $\geq 300\text{mm}$ 时保温 $1-3\text{h}$;当钢锭直径 $< 300\text{mm}$ 时保温 $1-1.5\text{h}$ 。然后再用 13MN 径锻机进行精锻,锻出 $(150 \sim 200)\text{mm} \times (150 \sim 200)\text{mm}$ 的轧坯。始锻温度控制在 $1020-1200^\circ\text{C}$ 范围,终锻温度控制在 $800-950^\circ\text{C}$ 范围。锻造完毕后轧坯再进行热装退火。退火炉在 $550-650^\circ\text{C}$ 的温度范围内保温待料,待锻后轧坯进炉完毕后,以 $50-80^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速度升温至 $760-780^\circ\text{C}$ 保温 $18-20$ 小时实现锻后组织的均匀化,随后,以冷却速度 $40-60^\circ\text{C}/\text{小时}$ 炉冷至 $240-300^\circ\text{C}$ 保温 $2-4$ 小时,促使奥氏体转变为铁素体和二次碳化物,细化组织,最后空冷至室温。

[0039] 根据本发明的优选实施方式,轧制工艺中,采用连续步进炉加热工艺对(150~200)mm×(150~200)mm 轧坯进行加热,加热温度设置在 1100-1170℃范围,而均热温度设置在 1140-1160℃范围,阴阳面温差≤30℃,加热保温时间 3-4 小时。轧制 1-2 次完成,粗轧开轧温度为 1060-1080℃,粗轧终轧温度为 950-960℃,精轧温度设定在 1100-1150℃范围,精轧入口温度为 960-980℃,终轧温度为 900-940℃,轧出 Φ80-100mm 圆棒。轧后进移罩炉预退火,退火工艺为 (820-840)℃×(18~20) 小时,然后以 10-30℃/h 的冷却速度冷却到 580-620℃后,出炉空冷。为了考虑氢元素的影响,还根据需要进行扩散去氢工艺:将轧制钢棒加热至 740-780℃,保温 3-6 小时后在退火炉中冷却至 660-690℃并保温 12-20 小时,出炉空冷。

[0040] 根据本发明的优选实施方式,对成品钢棒进行表面磨光或车光处理,消除表面缺陷并使钢棒尺寸、形状、表面质量满足设计要求,制得成品钢棒。

[0041] 根据本发明的优选实施方式,在成品钢棒上取样进行热处理,热处理工艺如下:

[0042] 先进行淬火工艺,淬火加热温度为 1020-1070℃,保温 1-2 小时,进行油冷;再进行回火处理,回火温度为 650-680℃,保温时间为 1-2 小时,空冷。

[0043] 本发明采用上述材料及相应工艺方法制备的汽轮机叶片钢,纯净度比较高且组织均匀,成分中所加合金元素则是稍稍提高,因此生产成本的提高幅度比较小。材料的热加工加热温度在 1220℃以下,因此对热加工设备的要求不高。最终所得材料具有的较高的高温持久性能和瞬时拉伸性能、较好的韧脆转变温度指标。

具体实施方式

[0044] 以下通过具体实施例对本发明进行说明:

[0045] 本发明实施例包括如下步骤:

[0046] 1) 常规冶炼

[0047] 取所需元素按 EF+AOD+(LFV) 工艺路线,在熔炼过程中调节各元素的含量,使其质量百分数如表 1 所示:

[0048] 表 1 本发明实施例叶片钢的合金成分(质量百分数)

[0049]

	C	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	V	Nb	N
实施例 1	0.24	1.00	0.12	0.02	11.23	0.79	1.10	0.28	0.020	0.05
实施例 2	0.22	0.85	0.15	0.01	11.30	0.76	0.93	0.28	0.010	0.04
实施例 3	0.20	0.78	0.14	0.01	11.48	0.78	0.89	0.30	0.015	0.05
实施例 4	0.21	0.65	0.19	0.01	11.42	0.74	0.85	0.30	0.005	0.03
实施例 5	0.18	1.00	0.11	0.01	12.30	0.80	1.15	0.32	0.020	0.05
实施例 6	0.19	0.88	0.20	0.015	11.10	0.70	1.19	0.35	0.020	0.05

[0050] EF 炉冶炼,按常规的不锈钢返回吹氧法熔炼钢液,所用含 Cr 合金是低 P 的 Cr 不锈钢返回料以降低生产成本,并采用二次造渣,以去除钢水中夹杂,出钢时成分到位。AOD 全程吹氩,加强还原脱氧。采用 LFV 炉对高温钢液进行成分微调和脱气处理,真空前适当插 Al,全程底吹氩搅拌。真空度 100Pa 时进行脱气处理,真空脱气时间 20 分钟,使钢液中的氧含量 $\leq 25\text{ppm}$,氢含量 $\leq 2\text{ppm}$,模铸浇注成电渣重熔的电极钢锭,电极钢锭直径为 $\Phi 490\text{mm}$ 。浇注过程中采用氩气保护,以免钢水二次氧化。浇铸过热度控制在 50°C ,以减少钢锭偏析。钢锭脱模温度控制在 650°C ,并进行热装退火。

[0051] 2) 电极钢锭热装退火

[0052] 钢锭脱模后,进行热装退火以消除组织应力,避免裂纹产生。退火炉起始温度 650°C ,以 $50^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的加热速度缓慢升温至 690°C 。加热保温时间 18 小时,随后以 $40^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的降温速度炉冷至 400°C 出炉,减少热应力。

[0053] 3) 电渣重熔

[0054] 先将电极钢锭表面进行剥皮。采用的结晶器直径为 $\Phi 600\text{mm}$;渣量配比是 $\text{CaF}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3 : \text{MgO} = 65 : 30 : 5$;渣量 150kg。采用金属电极直接起弧造渣,来弧后迅速加渣,确保电流稳定,渣料加完后 10 分钟后提高电流达 5980A。当渣料熔化完了,电流升到规定值后,转入正常电渣重熔冶炼。用电制度:电压 64V,电流 13000A。冶炼后期充填,充填方法:逐渐降电流,每次降电流 1000A,采用间断给电流充填。所得电渣钢锭直径为 $\leq 600\text{mm}$ 。对电渣钢锭缓冷,缓冷时间控制在 50 分钟。电渣冶炼完后脱模,锭子马上进退火炉进行热装退火。

[0055] 4) 热装退火

[0056] 将电渣钢锭采用热装不完全退火工艺,电渣钢锭脱模温度 690°C 。退火炉温度开始控制在 650°C ,保温时间 5.0 小时,再以 $50^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速度升温加热到 800°C ,保温 18 小时后以 $40^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的冷却速度冷却至 200°C 后空冷。

[0057] 5) 热锻造

[0058] 热锻加热工艺是:电渣锭进炉后在 400°C 的温度保温 5.5 小时,再以 $50^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速度缓慢加热至 840°C 后,保温 5.5 小时,然后以 $120^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的加热速度,快速升温至 1150°C 保温 3.5 小时,出炉热加工锻造。先用 40MN/20MN 快锻机开坯,将电渣钢锭锻造成直径 $\Phi 350\text{mm}$ 的八角钢锭,始锻温度控制在 $1020\text{--}1200^\circ\text{C}$ 范围,终锻温度控制在 $800\text{--}950^\circ\text{C}$ 范围。先锻粗拔长二次(每次锻粗至原高度的 $1/2$)。锻造回炉保温时间:锻粗回炉时保温 3h,然后再用 13MN 径锻机进行精锻,锻出 $170\text{mm}\times 170\text{mm}$ 的轧坯。始锻温度 1050°C ,终锻温度控制在 900°C 。锻造完毕后轧坯再进行热装退火。退火炉在 650°C 的温度保温待料,待锻后轧坯进炉完毕后,以 $60^\circ\text{C}/\text{小时}$ 的速度升温至 780°C 保温 20 小时实现锻后组织的均匀化,随后,以冷却速度 $50^\circ\text{C}/\text{小时}$ 炉冷至 240°C 保温 2 小时,最后空冷至室温。

[0059] 6) 轧制

[0060] 采用连续步进炉加热工艺对 $170\text{mm}\times 170\text{mm}$ 轧坯进行加热,加热温度设置在 1150°C ,阴阳面温差 $\leq 30^\circ\text{C}$,加热保温时间 4 小时。轧制 1 次完成,粗轧开轧温度为 1080°C ,粗轧终轧温度 950°C ,精轧温度设定在 1150°C ,精轧入口温度 970°C ,终轧温度 930°C ,轧出 $\Phi 80\text{mm}$ 圆棒。轧后进移罩炉预退火,退火工艺为 $840^\circ\text{C}\times 20$ 小时,然后以 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 的冷却速度冷却到 600°C 后,出炉空冷。为了考虑氢元素的影响,还需进行扩散去氢工艺:将轧制钢

棒加热至 760℃,保温 4 小时后在退火炉中冷却至 680℃并保温 20 小时,出炉空冷。

[0061] 7) 表面处理

[0062] 对成品钢棒进行表面磨光或车光处理,消除表面缺陷并使钢棒尺寸、形状、表面质量满足设计要求,制得成品钢棒。

[0063] 8) 热处理

[0064] 在成品钢棒上取样进行热处理,热处理工艺如下:

[0065] 先进行淬火工艺,淬火加热温度为 1050℃,保温 1 小时,进行油冷;再进行回火处理,回火温度为 660℃,保温 1 小时,空冷。

[0066] 表 2、表 4 是本发明的钢种性能。所有成分不仅具有较优的高温持久性能、瞬时拉伸性能和综合室温力学性能,而且所具有的 FATT₅₀ 指标比常用的汽轮机叶片钢种低。

[0067]

表 2 本发明叶片钢钢种实施例的力学性能

	R _{p0.2} (MPa)	R _m (MPa)	断后伸长率 A (%)	断面收缩率 Z (%)	夏比冲击吸收功 Ak _v (J)	FATT ₅₀ (°C)
实施例 1	886	1025	18.80	54.40	27.0	24
实施例 2	858	1010	19.50	53.80	27.5	23
实施例 3	835	1000	17.50	57.25	28.5	23
实施例 4	838	990	16.75	54.75	29.5	24
实施例 5	830	980	18.20	55.10	29.1	22
实施例 6	835	990	18.30	55.50	29.4	22

表 3 适合于 560-580°C 温度范围叶片钢的牌号和合金化学成分 (质量百分数)

	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Cu	Nb	N
2Cr12MoV(22CrMoV12 1)	0.18- 0.23	≤0.50	0.30- 0.80	0.30- 0.50	11.00- 12.50	0.80- 1.20	-	0.25- 0.35	≤0.30	-	-
2Cr12NiMo1W1V	0.20- 0.25	≤0.50	0.50- 1.00	0.50- 1.00	11.00- 12.50	0.90- 1.25	0.90- 1.25	0.20- 0.30	0.30	-	-
本发明	0.18- 0.24	0.60-1.00	0.10- 0.20	0.70- 0.80	11.00- 12.50	0.80- 1.20	-	0.25- 0.35	-	0.005- 0.020	0.02- 0.05

[0068]

表 4 适合于 560-580°C 温度范围叶片钢的力学性能

	室温力学性能							高温瞬时拉伸性能(560°C)					高温持久性能	
	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	断后延 伸率 A(%)	断面收 缩率 Z(%)	夏比冲 击吸收 功 AkV (J)	FATT ₅₀ (°C)	$R_{p0.2}$ (MPa)	R_m (MPa)	断后延 伸率 A(%)	断面收 缩率 Z(%)	$\sigma_{10^5}^{560^\circ C}$ (MPa)	$\sigma_{10^5}^{580^\circ C}$ (MPa)	$\sigma_{10^5}^{560^\circ C}$ (MPa)	$\sigma_{10^5}^{580^\circ C}$ (MPa)
2Cr12MoV(2 2CrMoV12 I)	590-735	≤930	15	50	27	26	408	462	22	76	118	82	118	82
2Cr12NiMo1 W1V	610	795	20	55	26	-	415	478	23	78	144	98	144	98
本发明	830-880	980-1020	16-20	53-57	27-29	22-23	491.0-504.9	555-568.9	28.24-33.2	87.14-85.56	150-155	100-105	150-155	100-105