

一种高性能均匀性海底管线钢及其制造方法

5 技术领域

本发明属于管线钢制造领域，具体涉及一种高性能均匀性海底管线钢及其制造方法。

背景技术

10 海底管道铺设在国际上已有较长的发展历程，从 1954 年在美国的墨西哥湾由 Brown & Root 海洋工程公司铺设了第一条海底管道以来，世界各近海海域，包括北海、墨西哥湾、地中海、澳大利亚及中国南海等，成功铺设了大量条各种类型、各种管径的海底管道。尤其是近年来随着陆地油气资源的逐步枯竭，油气资源开采向海洋、极地等地质条件恶劣的地区延伸，对高性能海底管线钢提出了更旺盛需求。

15 海底管道在铺设时将承受较大的压缩、拉伸载荷甚至弯曲变形；在服役过程中，深水高压、涌浪、强底流、海床运动等苛刻的工况条件也将导致其产生较大塑性变形，甚至断裂，并造成严重的环境灾难。这些复杂的工况对深水管道提出了比陆上管道更为严苛的要求，且随着水深的增加，对原材料的要求不断提高。

海底管道建设具有高风险、高投入的特点，相比陆上管道建设，对施工质量、
20 施工环境、施工技术等方面要求很高，同时为规避海管的失效带来的难修复及环境污染的风险，往往在技术上提出更严格要求以提升海管的品质，同时强化过程管理以提升产品可靠性，因此对钢板的各向同性（长度/厚度方向更均匀的强度/韧性分布）提出要求，还要求钢板具备良好的焊接性能、低温断裂韧性、应变时效性能等。另外，由于海管在铺设、服役过程承受较大的轴向力和位移，通过控制纵向性能可
25 保证其承载能力和应变能力，因此还对钢板提出纵向拉伸性能尤其是纵向低屈强比的要求。

中国专利申请 CN201210123639.X 公开了“一种大壁厚海底管线钢板及其生产方法”，该钢板由以下重量百分比的组分组成：C：0.05~0.07%，Si：0.15~0.25%，
Mn：1.42~1.48%，P≤0.010%，S≤0.002%，Ni：0.13~0.18%，Nb：0.043~0.048%，
30 Al：0.020~0.040%，Ti：0.014~0.024%，Mo：0.13~0.18%，余量为 Fe 和不可避免的

杂质。具有低温冲击韧性高、抗撕裂性能好、强度高、屈强比适中及延伸率好的特点。但是该专利中管线钢仅能满足-20℃低温韧性要求，不能满足在极低温下的韧性要求，难以满足时效后拉伸性能要求尤其是低屈强比要求，最重要的是没有考虑性能均匀性的实现，

5 中国专利申请 CN201310457780.8 公开了“一种低成本厚规格海底管线钢板及其制造方法”，其组成为按重量百分比计的下述组分：C：0.04~0.06%，Si：0.15~0.20%，Mn：1.43~1.47%， $P \leq 0.008\%$ ， $S \leq 0.003\%$ ，Ni：0.10~0.15%，Nb：0.030~0.040%，Ti：0.012~0.023%，Al：0.015~0.025%， $N \leq 0.006\%$ ， $Nb+V+Ti \leq 0.15\%$ ，其余为铁和不可避免的杂质。生产的钢板具有双相显微组织，达到了高强度和低屈强比，适合海底管线抗大变形要求，并兼具良好的韧性。但是该专利中管线钢仅能满足-30℃
10 低温韧性要求，不能满足在极低温下的韧性要求，难以满足时效后拉伸性能要求尤其是低屈强比要求，且该专利未考虑性能均匀性的实现。

中国专利申请 CN201210492187.2 公开了“厚壁高 DWTT 性能 X65-70 海底管线钢及制造方法”，其成分重量百分比为：C 0.03~0.05%， $Si \leq 0.25\%$ ，Mn 1.47~1.70%，
15 $P \leq 0.010\%$ ， $S \leq 0.001\%$ ，Ti 0.006~0.010%，Cr 0.10~0.20%，Cu 0.12~0.20%，Ni 0.36~0.45%，Al 0.025~0.045%，Ca 0.0008~0.0025%， $N \leq 0.0035\%$ ， $O \leq 0.0025\%$ ，Nb 0.040~0.050%，其余为 Fe 和不可避免杂质；且， $Ceq=0.34\sim 0.040$ ， $Pcm=0.13\sim 0.17$ ；其中， $Ceq=C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$ ； $Pcm=C+Si/30+Cu/20+Ni/60+Cr/20+Mo/15+V/10$ ，其余为铁和不可避免的杂质。钢板
20 具有厚规格、高强度、优良的低温冲击韧性和可焊性及良好的 DWTT 性能。但是该专利中管线钢仅能满足-20℃低温韧性要求，不能满足低屈强比要求以及时效后拉伸性能要求，且未考虑性能均匀性的实现，

中国专利申请 CN201410515400.6 公开了“一种特厚规格 X70 管线钢及其制造方法”，其化学成分按质量百分比计为 C：0.03~0.06%，Si：0.1~0.30%，Mn：
25 1.30~1.60%， $P \leq 0.010\%$ ， $S \leq 0.0050\%$ ，Nb：0.030~0.050%，Ti：0.008~0.020%，Ni：0.10~0.30%，Cr：0.10~0.30%，Cu：0.10~0.30%，余量为 Fe 及不可避免的杂质元素。获得了一种厚度大、强度高且强度区间窄、低温韧性优异、抗低温时效性能和抗 HIC 性能兼优的管线钢。但该专利中管线钢仅能满足-30℃低温韧性要求，不能满足在极低温下的韧性要求，且未考虑性能均匀性的实现。

30 中国专利申请 CN201510383013.6 公开了“一种低屈强比抗酸性海底管线钢的

生产方法”，化学成分为：C：0.03~0.05%，Si：0.10~0.30%，Mn：1.15~1.35%，P ≤0.010%，S≤0.0010%，Al：0.01~0.06%，Nb：0.04~0.07%，Ti：0.008~0.020%，Ni：0.10~0.25%，Cr：0.10~0.30%，余量为Fe和不可避免杂质元素。该专利采用先进的冶炼连铸工艺技术来控制碳当量窄波动范围与夹杂物的数量、尺寸及形态，并采用弛豫相变工艺控制钢板的组织形态与采用新的水冷控制模式提高钢板的水冷均匀性，有效确保了钢板具有低的屈强比和优良的抗酸性能。但是该专利中管线钢未考虑性能均匀性的实现。

中国专利申请 CN202011039510.1 公开了“一种具有优异低温 CTOD 性能的海底管线钢板卷及其生产工艺”，其化学成分及质量百分比为：C：0.030~0.070%，Si：0.10~0.20%，Mn：1.10~1.60%，Nb：0.020~0.050%，V：0.020~0.040%，Ti：0.010~0.030%，Mo：0.10~0.20%，Al≤0.06%，S≤0.0080%，P≤0.018%，其余为Fe和不可避免的杂质元素。使得海底管线钢板卷具备优异的 CTOD 性能，但是并没有考虑管线钢的性能均匀性。

现有专利研究可发现，现有的海底管线钢虽然会考虑强度和低温韧性，但是如何保证管线钢在具有高性能的基础上，还具有良好的性能均匀性没有做过多的研究。

发明内容

本发明的目的在于提供一种高性能均匀性海底管线钢及其制造方法，所述管线钢具有较高的强度和良好的低温韧性，同时，还能保证管线钢性能的均匀性。

为达到上述目的，本发明的技术方案是：

一种高性能均匀性海底管线钢，其化学成分重量百分比为：C：0.02~0.06%，Si：0.10~0.30%，Mn：1.20~1.65%，Cu≤0.30%，Ni≤0.30%，Cr：0.15~0.30%，Mo≤0.15%，Nb：0.03~0.05%，V≤0.05%，Ti：0.008~0.020%，Ca：0.0012~0.0030%，Al：0.015~0.045%，余量包括Fe及其它不可避免的杂质，需控制杂质元素P≤0.01%，S≤0.001%，B≤0.0004%，N≤0.005%，O≤0.0025%，H≤0.0002%；且同时满足：

$$\text{Ti/N} \geq 2;$$

$$(\text{Nb}/7.7\text{C} + \text{V}/4.3\text{C}) \geq 0.10;$$

$$1.5 \leq \text{Ca/S} \leq 4;$$

$$0.30 \leq \text{Ceq} \leq 0.39, \text{Ceq} = \text{C} + \text{Mn}/6 + (\text{Cr} + \text{V} + \text{Mo})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15;$$

焊接冷裂纹敏感性指数 $P_{cm} \leq 0.17$, $P_{cm} = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$ 。

进一步, 余量为 Fe 和其它不可避免杂质。

5 本发明所述海底管线钢的显微组织为铁素体+贝氏体, 其中, 所述铁素体的体积含量百分比为 20~40%。

本发明所述海底管线钢的晶粒度等级 ≥ 9 级。

本发明所述海底管线钢横向拉伸性能: 屈服强度 $R_{t0.5}$: 415~555MPa, 抗拉强度 R_m : 515~670MPa, 屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.88$; 所述钢板头尾强度差 ≤ 50 MPa;

10 纵向拉伸: 屈服强度 $R_{t0.5}$: 405~530MPa, 抗拉强度 R_m : 505~650MPa, 屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.86$; 所述钢板头尾强度差 ≤ 50 MPa;

经过 3%预应变, 250℃保温 1 小时后的应变时效试验后, 钢板纵向拉伸性能: 屈服强度 $R_{t0.5}$: 405~530MPa, 抗拉强度 R_m : 505~650MPa, 屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.88$ 。

15 本发明所述海底管线钢-45℃夏比冲击功 ≥ 250 J, 且钢板厚度中心和近表面夏比冲击功差 ≤ 50 J; -30℃下 DWTT 试验 SA $\geq 85\%$, 单面减薄 DWTT 试样和全厚度 DWTT 试样的 SA 差值 $\leq 5\%$; 硬度 ≤ 230 HV10, 其中, 钢板表面硬度与钢板中心硬度差值 ≤ 25 HV10, 优选钢板表面硬度与钢板中心硬度差值 ≤ 15 HV10。

本发明海底管线钢成分设计的特点是:

20 1、采用低 C 低 Mn 合金成分体系, 控制 $0.30 \leq C_{eq} \leq 0.39$, $P_{cm} \leq 0.17$, 在材料强韧性满足要求的前提下, 确保了良好的焊接性能, 同时可以改善中心偏析及带状组织, 保证材料性能的各向同性。

2、杂质元素 P、S、B、N、O、H 控制在极低水平, 减少夹杂物数量, 降低偏析程度, 保证强韧性, 尤其有利于确保管线钢优异的低温韧性。

25 3、添加合金元素 Cu、Ni、Cr、Mo, 起到固溶强化作用, 同时影响材料冷却过程中的相变行为, 提高钢板性能的各向同性。

4、添加微量 V-Nb-Ti, 同时严格限制 $Ti/N \geq 2$, $(Nb/7.7C + V/4.3C) \geq 0.10$, 形成微合金碳氮化物, 细化晶粒、析出强化的同时起到固定 C、N 原子的作用, 减弱应变时效对材料性能的影响。

30 C: 最基本的强化元素, 碳溶解在钢中形成间隙固溶体, 起固溶强化的作用,

与强碳化物形成元素形成碳化物析出，则起到沉淀强化的作用。但随 C 含量的增加显著降低钢的延性、韧性和焊接性能，同时引起连铸坯的中心偏析，不利于钢板性能厚度方向的均匀性；此外，钢板应变时效后，游离的 C 原子会和位错相互纠缠，阻碍位错的运动，使屈服强度升高，不利于低屈强比的维持。因此，本发明控制 C 含量在 0.02~0.06%。

Mn：固溶强化元素，是钢中补偿因 C 含量降低而引起强度损失的最主要、经济的强化元素。Mn 还是扩大 γ 相区的元素，可以提高钢的淬透性，降低钢的 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变温度，有助于获得细小的相变产物，提高钢的韧性。但是，Mn 也是易偏析元素，含量过多时容易在连铸坯中产生中心偏析，轧后冷却过程中易生成硬相组织，降低材料的低温韧性，也不利于钢板性能厚度方向的均匀性。因此，本发明中控制 Mn 含量为 1.20~1.65%。

Si：固溶强化元素，同时也是钢中的脱氧元素，但含量过高会恶化钢材的焊接性能，尤其是焊接热影响区韧性的恶化，同时不利于热轧过程中氧化铁皮的去除。因此，本发明中控制 Si 含量为 0.10~0.30%。

Cu、Ni：固溶强化元素，同时可提高钢的韧性，在钢板冷却期间还具有提高钢的淬透性和延迟珠光体转变的作用，但添加过多对钢板韧性和焊接性能不利。因此，本发明中将 Cu、Ni 含量均控制为 $\leq 0.30\%$ 。

Cr、Mo：固溶强化元素，提高钢的淬透性的重要元素，促进针状铁素体的形成，改善钢的韧性，有利于确保钢板全厚度的组织及性能均匀性；但含量过多会促进低温相变组织的形成，对低温韧性不利。因此，本发明中控制 Cr 含量为 0.15~0.30%，控制 Mo 含量 $\leq 0.15\%$ 。

Nb：低碳微合金钢的重要元素之一，热轧过程中固溶的 Nb 应变诱导析出形成 Nb(C, N) 粒子，可以延迟奥氏体再结晶，提高钢的奥氏体再结晶温度，使得两阶段控制轧制成为可能，避免了混晶的形成，有利于获得均匀细小的组织，在提高材料强韧性的同时保证了钢板性能的各向同性。此外，固溶的 Nb 冷却过程中以第二相粒子 NbC 在基体内弥散析出，起到析出强化作用。但是，过高含量的 Nb 并不能够完全固溶，不仅发挥不了作用而且会增加生产成本，并且会使得 NbC 在高温下过早析出，易在中心偏析处形成尺寸较大的 NbC 析出，对韧性不利。因此，本发明中控制 Nb 含量在 0.03~0.05%。

V：重要的微合金化元素之一，易与钢中 C 结合形成 VC，具有较高的析出强

化作用和较弱的晶粒细化作用。但 V 含量过高，析出颗粒粗化明显，有损钢的低温韧性。在本发明中，V 主要通过发挥析出强化的作用弥补其他合金不足造成的强度降低，因此，本发明中控制 V 含量 $\leq 0.05\%$ 。

此外，为了充分发挥 Nb、V 的固碳作用，减小游离碳对应变时效性能的影响，
5 需要控制 $(Nb/7.7C+V/4.3C) \geq 0.10$ 。在一些实施方案中，控制 $(Nb/7.7C+V/4.3C)$ 在 0.10~0.50 的范围内，如在 0.10~0.47 的范围内。

Ti：是一种强烈的碳氮化物形成元素，可以起到固氮的作用，在板坯连铸时可形成细小的高温稳定的 TiN 析出相，从而改善材料的韧性。此外，Ti 的未溶碳氮化物在钢加热时可以阻止奥氏体晶粒的长大，在高温奥氏体区粗轧时析出的 TiN 和
10 TiC 可有效抑制奥氏体晶粒长大。另外在焊接过程中，钢中的 TiN 和 TiC 粒子能显著阻止热影响区晶粒长大，从而改善钢板的焊接性能。因此，本发明中控制 Ti 含量在 0.008~0.020%；同时，为了充分发挥 Ti 的固氮作用，需要控制 $Ti/N \geq 2$ 。在一些实施方案中，控制 Ti/N 在 2.0~5.0 的范围内。

Ca：主要用于实现 MnS 夹杂物改性，使得夹杂物形态球化并且使得其分布均匀，有利于改善低温韧性，但含量过多易形成 CaO 夹杂，反而对韧性不利。因此，
15 本发明中控制 Ca 含量在 0.0012~0.0030%。同时，为了充分发挥 Ca 的硫化物改性作用，控制 $1.5 \leq Ca/S \leq 4$ ，使长条形的 MnS 夹杂转变为弥散分布的球状 CaS 夹杂，提高材料低温韧性。

Al：主要是用于钢的脱氧，添加适量的 Al 有利于细化晶粒，改善钢材的强韧
20 性能。但是，Al 含量的增加会使得钢中形成 Al 的氧化物，从而降低母材和焊接热影响区的韧性。因此，本发明中控制 Al 含量在 0.015~0.045%。

S、P、B、N、O、H：钢中不可避免的杂质元素，P 是钢中易偏析元素；S 在钢中易形成硫化物，都会严重降低钢的低温韧性；B 易在晶界析出导致材料塑性、韧性的下降；N、H 含量过高易在连铸坯中形成裂纹；O 含量过高形成各种氧化物，
25 使热加工性、耐腐蚀性、韧性等降低。因此，本发明控制 $P \leq 0.01\%$ ， $S \leq 0.001\%$ ， $B \leq 0.0005\%$ ， $N \leq 0.005\%$ ， $O \leq 0.0025\%$ ， $H \leq 0.0002\%$ 。

Pcm：焊接冷裂纹敏感性的指标，当 Pcm 值超过一定值时，由于钢的淬硬性变得太大而使得焊接区韧性显著降低。此本发明控制 $Pcm \leq 0.17$ 。在一些实施方案中，Pcm 在 0.12~0.17 的范围内。

30 本发明采用低 C 低 Mn 合金成分体系，在满足钢板强度要求的前提下，减少中

心偏析，结合 Cr、Mo、Cu、Ni 提高淬透性抑制铁素体转变的作用，将铁素体含量控制在 20~40%，进一步降低中心偏析，满足钢板厚度方向良好的均匀性，单面减薄 DWTT 试样和全厚度 DWTT 试样的 SA%差值 $\leq 5\%$ ，钢板表面硬度与钢板中心硬度差值 $\leq 25\text{HV}10$ 。另外，通过 C、Mn 和 Cu、Ni、Cr、Mo、V 的组合，控制 $0.30 \leq \text{Ceq} \leq 0.39$ ，保证了钢板的强度性能。

通常管线钢中添加微合金元素 Nb、V 以发挥细晶强化与析出强化的作用，但在本发明中，利用了 Nb、V 对 C 原子的固定作用，设计了 $(\text{Nb}/7.7\text{C} + \text{V}/4.3\text{C}) \geq 0.10$ ，将 Nb、V 对于 C 原子固定作用最大化，减小游离碳对应变时效性能的影响，满足了海底管线钢对于应变时效后拉伸性能这一非常规性能的要求。本发明所述海底管线钢经过 3%预应变，250℃保温 1 小时后的应变时效试验后，钢板纵向拉伸性能：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：405~530MPa，抗拉强度 R_m ：505~650MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.88$ 。

本发明将铁素体含量控制在 20~40%，获得合适比例的铁素体是满足海底管线钢性能要求的关键，铁素体含量过低无法满足低屈强比要求，铁素体含量过则高强度不足，因此，在成分设计上，添加 Cu、Ni、Cr、Mo 合金元素获得一定的奥氏体稳定性，可以控制铁素体转变量在期望的范围内。

本发明所述的高性能均匀性海底管线钢的制造方法，包括如下步骤：

1) 冶炼、连铸

按上述成分经冶炼、连铸成坯；连铸过程中，中间包过热度控制在 15~40℃，连铸坯拉速控制在 0.40~1.10m/min，保证连铸坯凝固末端处于连铸机水平段；所述连铸机结晶器采用电磁搅拌工艺；

2) 控制轧制

加热温度为 1120~1190℃，粗轧开轧温度为 1000~1100℃，粗轧终轧温度为 930~980℃，粗轧压下率 $\geq 50\%$ ， $1.20 \leq \text{展宽比} \leq 1.80$ ；精轧开轧温度为 790~880℃，精轧终轧温度为 780~850℃，精轧压下率 $\geq 70\%$ ；

3) 控制冷却

弛豫时间 $\geq 30\text{s}$ ，开冷温度为 730~780℃，冷却速度 10~40℃/s，停冷温度 350~550℃，停冷后钢板上下表面温差 $\leq 30^\circ\text{C}$ ；

4) 钢板停冷后空冷或堆冷至室温。

优选的，步骤 4) 中，所述停冷温度 $\leq 450^\circ\text{C}$ 时，将钢板在 450~650℃回火 10~30min。

优选的，步骤 1)中，相邻板坯过热度波动值 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 和/或相邻板坯拉速波动 $\leq 10\%$ 。

优选的，步骤 1)中，所述连铸坯凝固末端采用动态轻压下工艺，压下量为 2~3mm。

5 优选的，步骤 3)中，钢板头尾入水温差 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ 。

优选的，步骤 4)中，所述钢板冷却至室温后将钢板头尾部分切除，头尾切舍量各自 $\geq 250\text{mm}$ ，如 250~350mm。在一些实施方案中，头部切舍量为 250~350mm，尾部切舍量为 250~300mm。

10 在本发明所述的制造方法中：

为了减少连铸坯的中心偏析，提高钢板的低温韧性及性能的各向同性，连铸工艺需要满足以下要求：

①中间包过热度控制在 $15\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，相邻板坯过热度波动值 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ ；

②连铸坯拉速控制在 $0.40\sim 1.10\text{m/min}$ ，恒定拉速控制，相邻板坯拉速波动 $\leq 10\%$ ，保证连铸坯凝固末端处于连铸机水平段；

③在连铸结晶器段使用电磁搅拌工艺；

④在连铸坯凝固末端采用动态轻压下工艺。

20 本发明通过控制中间包过热度、连铸坯拉速及严格限定其波动范围，保证了连铸过程的稳定性，可以保证连铸坯凝固末端处于连铸机的水平段，最大程度的发挥动态轻压下效果，从而保证了板坯中心偏析的良好控制。同时，连铸工艺采用电磁搅拌，可以有效使元素分布均匀化，从而降低偏析倾向，保证管线钢性能的均匀性。

板坯加热温度为 $1120\sim 1190^{\circ}\text{C}$ ，加热温度过低，合金碳化物溶解不充分，难以充分发挥固溶强化和析出强化的作用，且不利于中心偏析的控制；加热温度过高，晶粒粗化，对钢板低温韧性不利。

25 粗轧开轧温度为 $1000\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，粗轧终轧温度为 $930\sim 980^{\circ}\text{C}$ ，粗轧压下率 $\geq 50\%$ ， $1.20\leq \text{展宽比}\leq 1.80$ ，在奥氏体完全再结晶区进行粗轧，避免混晶的出现，足够的粗轧压下率可以充分细化原始奥氏体晶粒，有利于钢板的强韧性；同时精确控制展宽比有利于板形的控制，减小钢板横纵向性能差异。在一些实施方案中，粗轧压下率为 50~80%，如 50~74%。

30 精轧开轧温度为 $790\sim 880^{\circ}\text{C}$ ，精轧终轧温度为 $780\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，精轧压下率 $\geq 70\%$ ；

在奥氏体非再结晶区进行精轧，足够的精轧压下率可以充分使得奥氏体晶粒扁平化，为后续相变提供更多的形核位置，从而细化最终组织，提高钢板强韧性。在一些实施方案中，粗轧压下率为 70~85%。

弛豫时间 $\geq 30s$ ，开冷温度为 $730\sim 780^{\circ}C$ ，冷却速度 $10\sim 40^{\circ}C/s$ ，停冷温度 $350\sim 550^{\circ}C$ ，适当的冷却速度和停冷温度，可以确保形成铁素体+贝氏体的双相组织，保证钢板强韧性的同时获得低屈强比的特性；一定的弛豫时间和开冷温度，可以保证钢板组织内生成一定量的先共析铁素体，从而在保证强度的同时降低屈强比。钢板头尾入水温差 $\leq 30^{\circ}C$ ，降低头尾入水温差有利于保证钢板性能的各向同性。冷却后钢板上下表面温差 $\leq 30^{\circ}C$ 。降低冷却后上下表温差则有利提高厚度方向性能的各向同性。在一些实施方案中，弛豫时间为 $30\sim 60s$ 。

较高的终轧温度、较低的终冷温度以及较快的冷却速度，有利于抑制相变过程中合金元素向板厚中心的富集，因此进一步减轻了中心偏析的影响。

钢板停冷后冷却至室温。优选地，可采取堆冷的方式冷却至室温。

优选地，对于停冷温度 $\leq 450^{\circ}C$ 的钢板，可在 $450\sim 650^{\circ}C$ 进行 $10\sim 30min$ 的回火。
钢板停冷后通常可采取在冷床上空冷至室温；或者将轧后钢板堆放在一起冷却至室温的冷却方式。

堆冷方式冷却速度较慢，可以使钢板在高温下停留较长时间，有利于合金碳化物的析出，充分发挥析出强化和固碳的作用。对于停冷温度较低的钢板，合金碳化物析出时间不足，利用短时高温回火，可以充分发挥合金析出强化和固碳的作用，同时有利于硬相 MA 组元的分解，有利于提高低温强韧性。

轧后成品钢板的头尾切舍量 $\geq 250mm$ ，由于钢板头尾的变形条件、冷却条件和钢板本体的差异较大，因此组织性能与钢板本体有较大的差异，保证一定的头尾切舍量，去除了变形、冷却不受控位置的影响，有利于实现钢板性能的各向同性。

与现有技术相比，本发明具有如下优点：

本发明在成分设计上通过添加较低含量 C、Mn 元素，杂质元素 P、S、B、N、O、H 控制在极低水平，结合合金元素 Cr、Mo、Cu、Ni 的添加，并且控制 $0.30 \leq Ceq \leq 0.39$ ， $Pcm \leq 0.17$ ，改善中心偏析，影响材料冷却过程中的相变行为，增加了奥氏体稳定性，推迟了铁素体相变进程，在保证钢板力学性能的基础上，满足钢板性能具有良好的均匀性。

本发明利用微量 V-Nb-Ti 添加作用，同时严格限制 $Ti/N \geq 2$ 、 $(Nb/7.7C+V/4.3C)$

≥0.10，形成微合金碳氮化物，细化晶粒、析出强化的同时起到固定 C、N 原子的作用，减弱应变时效对材料性能的影响；应变时候后仍然保持较高的性能，钢板经过 3%预应变，250℃保温 1 小时后的应变时效试验后，钢板纵向拉伸性能：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：405~530MPa，抗拉强度 R_m ：505~650MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.88$ 。

5 在成分设计的基础上，连铸工艺中通过严格控制中间包过热度、连铸拉速及其波动范围，利用动态轻压下工艺，保证连铸坯凝固末端处于连铸机的水平段，最大程度的发挥动态轻压下效果，从而降低偏析倾向，保证管线钢性能的均匀性。而常规连铸过程对于中间包过热度、连铸拉速及其波动范围没有特别规定或者是要求较低，主要考虑前后工序生产节奏的匹配进行参数设定，因此连铸坯的凝固末端常处
10 于连铸机弧形段，无法充分发挥位于水平段施加的动态轻压下的提升板坯内质、降低中心偏析的作用，因而无法满足对于高性能及高均匀性的要求。

另外，使用奥氏体再结晶区和非再结晶区两阶段控轧技术及展宽比控制，保证两阶段轧制过程足够的压缩比，充分细化晶粒，避免混晶组织，轧制温度、弛豫时间、开冷温度，从热力学和动力学两方面控制铁素体相变进程，形成铁素体+贝氏
15 体的双相组织，准确控制铁素体比例在 20~40%，确保钢板具有优异的强韧性等力学性能及各向同性，解决海底管线钢强度与性能均匀性不匹配的问题。

附图说明

图 1 为本发明实施例 1 钢的显微组织照片。

20

具体实施方式

下面结合附图对本发明做进一步说明。

本发明实施例钢的化学成分参见表 1 和表 2，余量包括 Fe 及不可避免的杂质；具体工艺参数见表 3 和表 4。

25 拉伸性能测试：在室温下，根据 ASTM A370-2021，对本发明各实施例获得的钢板样本进行拉伸性能测试，测量各实施例钢板的屈服强度、抗拉强度及屈强比，并测量经过 3%预应变，250℃保温 1 小时应变时效后钢板纵向拉伸性能，具体结果如表 5 所示。

低温韧性测试：在-45℃下，使用 V 型缺口试样，按照 ASTM E23-2018，对试
30 验钢板进行冲击试验，测得各实施例钢板的-45℃夏比冲击功，具体结果如表 6 所示。

在-30℃下，分别使用全厚度 V 型缺口试样和单面减薄 V 型缺口试样，按照 API RP 5L3-2014，对试验钢板进行落锤撕裂试验，以测得各实施例钢板在-30℃下 DWTT 试验 SA 值，具体结果如表 7 所示。

5 硬度测试：按 ASTM E92 在 10kgf 下，测得钢板近上表面、厚度中心、近下表面的硬度值，具体结果如表 8 所示。

晶粒度测试方法按 ASTM E112。

由图 1 可以看出，采用本发明所述成分及工艺获得的钢板显微组织为铁素体+贝氏体组织，其中，铁素体含量为 20~40%。

10 从表 5 可见，本发明钢的横向拉伸性能：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：415~555MPa，抗拉强度 R_m ：515~670MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m$ 0.88，且钢板头尾强度差 ≤ 50 MPa。

纵向拉伸性能：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：405~530MPa，抗拉强度 R_m ：505~650MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m$ 0.86，且钢板头尾强度差 ≤ 50 MPa。

经过 3%预应变，250℃保温 1 小时应变时效试验后，钢板纵向拉伸性能：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：405~530MPa，抗拉强度 R_m ：505~650MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m$ 0.88。

15 从表 6 可以看出，本发明获得的钢板-45℃夏比冲击功 ≥ 250 J，且钢板厚度中心和近表面夏比冲击功差 ≤ 50 J。

从表 7 可以看出，本发明获得的钢板-30℃下 DWTT 试验 SA $\geq 85\%$ ，特别的，使用单面减薄 DWTT 试样（按照 API RP 5L3 相应降低温度进行试验）和全厚度 DWTT 试样的 SA 差值 $\leq 5\%$ 。

20 从表 8 可以看出，本发明获得钢板硬度 ≤ 230 HV10，特别的，钢板近表面硬度和钢板中心硬度差值 ≤ 25 HV10。

25 对比例 1 中 $Ti/N=1.5$ ， $Ca/S=1.12$ ，均不满足本发明 $Ti/N \geq 2$ ， $1.5 \leq Ca/S \leq 4$ 的要求，且 P、S、N 含量较高，工艺控制中拉动波速不在本发明的控制范围，不能满足连铸坯凝固末端处于连铸机水平段，且过热度波动值、钢板头尾入水温差、冷后钢板上下表温差均没有在本发明控制范围内，最后获得的钢板虽然强度能满足要求，但是头尾强度差太大，超过了 50MPa，且屈强比较高，且钢板厚度中心和近表面夏比冲击功差为 66，单面减薄 DWTT 试样和全厚度 DWTT 试样的 SA 差值为 14，钢板表面硬度与钢板中心硬度差值为 35，显然对比文件 1 获得的钢板性能均匀性不好。

30 对比例 2 中 $Nb/7.7C+V/4.3C=0.09$ ，不满足本发明 $(Nb/7.7C+V/4.3C) \geq 0.10$

的要求，且 B、O 含量较高，工艺控制中加热温度、粗轧终轧温度和弛豫时间均不在本发明规定的范围内，最终获得的-45℃夏比冲击功小于 250J，-30℃下 DWTT 试验 SA 小于 85%，钢板低温韧性不好。

对比例 3 中 $C_{eq}=0.40$ ， $P_{cm}=0.18$ ， $Nb/7.7C+V/4.3C=0.07$ ，均不满足本发明 $0.30 \leq C_{eq} \leq 0.39$ ， $P_{cm} \leq 0.17$ ， $(Nb/7.7C+V/4.3C) \geq 0.10$ 的要求，最终获得的钢板单面减薄 DWTT 试样和全厚度 DWTT 试样的 SA 差值为 13，厚度中心和近表面夏比冲击功差 115J，对比例 3 获得的钢板性能均匀性不好。

表 1（单位：重量百分比）

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Ca	Alt	B	N	O	H
实施 例 1	0.02	0.10	1.45	0.0075	0.0010	0.30	0.30	0.16	0.11	0.020	0.030	0.010	0.0015	0.0450	0.0004	0.0050	0.0025	0.00020
实施 例 2	0.03	0.15	1.20	0.0880	0.0008	0.10	0	0.30	0.15	0.030	0.039	0.008	0.0026	0.0280	0.0003	0.0030	0.0021	0.000170
实施 例 3	0.05	0.18	1.57	0.0098	0.0009	0	0.08	0.24	0	0	0.040	0.012	0.0014	0.0334	0.0003	0.0038	0.0018	0.00015
实施 例 4	0.025	0.22	1.22	0.0076	0.0007	0.25	0.10	0.19	0.04	0.015	0.033	0.018	0.0021	0.0220	0.0004	0.0043	0.0017	0.00017
实施 例 5	0.040	0.20	1.38	0.0083	0.0008	0.17	0.26	0.15	0.08	0.040	0.037	0.015	0.0028	0.0190	0.0003	0.0037	0.0023	0.00016
实施 例 6	0.031	0.19	1.24	0.0063	0.0006	0.19	0.15	0.26	0	0.037	0.045	0.011	0.0019	0.0330	0.0003	0.0040	0.0019	0.00015
实施 例 7	0.035	0.30	1.65	0.0100	0.0008	0.13	0.14	0.18	0.12	0.050	0.035	0.020	0.0030	0.0150	0.0004	0.0040	0.0022	0.00018
实施 例 8	0.041	0.23	1.23	0.0070	0.0006	0.20	0.17	0.25	0.06	0	0.041	0.013	0.0016	0.0287	0.0002	0.0039	0.0019	0.00016
实施 例 9	0.060	0.27	1.62	0.0084	0.0008	0.05	0.06	0.20	0	0.010	0.050	0.016	0.0012	0.0310	0.0003	0.0033	0.0020	0.00019
对比 例 1	0.04	0.19	1.38	<u>0.0145</u>	<u>0.0025</u>	0.17	0.26	0.15	0.08	0.040	0.038	0.008	0.0028	0.0190	0.0003	<u>0.0055</u>	0.0023	0.00016
对比 例 2	0.05	0.18	1.57	0.0098	0.0009	0.00	0.08	0.24	0.00	0.000	0.033	0.012	0.0014	0.0334	<u>0.0006</u>	0.0038	<u>0.0035</u>	0.00015
对比 例 3	0.07	0.27	<u>1.70</u>	0.0084	0.0008	0.05	0.06	0.20	0	0.010	<u>0.020</u>	0.016	0.0012	0.0310	0.0003	0.0033	0.0020	0.00019

	Ceq	Pcm	Ti/N	Nb/7.7C+V/4.3C	Ca/S
实施例 1	0.36	0.13	2.0	0.43	1.50
实施例 2	0.33	0.12	2.7	0.40	3.25
实施例 3	0.36	0.15	3.2	0.10	1.56
实施例 4	0.30	0.12	4.2	0.31	3.00
实施例 5	0.35	0.15	4.1	0.35	3.50
实施例 6	0.32	0.13	2.7	0.47	3.17
实施例 7	0.39	0.15	5.0	0.46	3.75
实施例 8	0.33	0.14	3.3	0.13	2.67
实施例 9	0.38	0.17	4.8	0.14	1.50
对比例 1	0.35	0.15	<u>1.5</u>	0.36	<u>1.12</u>
对比例 2	0.36	0.15	3.2	<u>0.09</u>	1.56
对比例 3	<u>0.40</u>	<u>0.18</u>	4.8	<u>0.07</u>	1.50

备注：Ceq=C+Mn/6+(Cr+V+Mo)/5+(Cu+Ni)/15；Pcm= C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B。

表 3

	中间包过热度 ℃	过热度波动值 ℃	连铸坯拉速 m/min	拉速波动 %	加热温度 ℃	粗轧开轧温度 ℃	粗轧终轧温度 ℃	粗轧压下率 %	展宽比	精轧开轧温度 ℃	精轧终轧温度 ℃	精轧压下率 %
实施例 1	40	5	1.00	9	1130	1070	940	58	1.40	810	810	73
实施例 2	20	6	1.10	8	1170	1010	945	63	1.60	820	820	82
实施例 3	25	5.5	0.55	5	1152	1020	960	65	1.20	790	790	75
实施例 4	30	10	0.40	7	1190	1090	975	60	1.80	870	820	70
实施例 5	15	7	0.70	4	1140	1060	970	55	1.42	830	800	78
实施例 6	23	4.5	1.05	10	1180	1100	980	70	1.50	880	850	79
实施例 7	18	8	0.80	6	1120	1000	930	50	1.30	800	780	80

实施例 8	28	5.7	0.65	5	1160	1040	950	74	1.48	860	840	78
实施例 9	35	9	0.90	5.5	1138	1080	938	69	1.70	850	830	85
对比例 1	25	<u>12</u>	0.70	<u>15</u>	1140	1060	970	55	1.42	830	800	78
对比例 2	25	5	0.55	5	<u>1200</u>	1040	<u>910</u>	65	1.20	790	790	75
对比例 3	35	9	0.90	5	1138	1080	938	69	1.70	850	830	85

表 4

	弛豫时间 s	开冷温度 ℃	钢板头尾入水温差 ℃	冷却速度 ℃/s	停冷温度 ℃	冷后钢板上 下表温差 ℃	钢板冷却方式	回火温度 ℃	回火时间 min	钢板头部切舍量 mm	钢板尾部切舍量 mm
实施例 1	50	760	18	30	380	8	堆冷	-	-	300	250
实施例 2	55	770	23	18	400	18	堆冷	550	20	250	250
实施例 3	35	745	15	20	460	10	堆冷	-	-	350	300
实施例 4	60	730	20	25	550	20	堆冷	-	-	300	250
实施例 5	45	750	18	15	445	25	空冷	650	10	300	250
实施例 6	33	775	28	40	500	12	空冷	-	-	350	300
实施例 7	40	780	30	10	350	30	堆冷	450	30	250	250
实施例 8	30	765	25	33	450	15	堆冷	-	-	350	300
实施例 9	42	740	26	26	420	5	空冷	-	-	350	300
对比例 1	45	750	<u>51</u>	15	450	<u>42</u>	空冷	-	-	300	250
对比例 2	<u>10</u>	760	15	20	460	10	堆冷	-	-	<u>100</u>	<u>50</u>
对比例 3	42	740	26	26	420	5	空冷	-	-	350	300

表 5

	取样位置	横向拉伸				纵向拉伸				纵向拉伸-应变时效后		
		屈服强度 R _{0.5} MPa	抗拉强度 R _m MPa	头尾强度差 MPa	屈强比 R _{0.5} /R _m	屈服强度 R _{0.5} MPa	抗拉强度 R _m MPa	头尾强度差 MPa	屈强比 R _{0.5} /R _m	屈服强度 R _{0.5} MPa	抗拉强度 R _m MPa	屈强比 R _{0.5} /R _m
实施例1	钢板头部	460	560	12/20	0.82	457	558	8/19	0.82	459	566	0.81
	钢板尾部	448	540		0.83	449	539		0.83	466	565	0.82

实施例2	钢板头部	500	590	50/50	0.85	485	575	5/9	0.84	488	588	0.83
	钢板尾部	450	540		0.83	480	566		0.85	489	577	0.85
实施例3	钢板头部	513	597	17/17	0.86	486	564	14/10	0.86	495	568	0.87
	钢板尾部	496	580		0.86	472	554		0.85	486	566	0.86
实施例4	钢板头部	438	530	23/15	0.83	428	518	28/13	0.83	430	520	0.83
	钢板尾部	415	515		0.81	405	505		0.80	405	505	0.80
实施例5	钢板头部	495	600	28/12	0.83	485	583	50/50	0.83	479	586	0.82
	钢板尾部	467	588		0.79	435	533		0.82	468	568	0.82
实施例6	钢板头部	498	568	3/4	0.88	488	566	1/2	0.86	499	570	0.88
	钢板尾部	495	572		0.87	489	568		0.86	495	572	0.87
实施例7	钢板头部	555	670	50/20	0.83	530	650	26/6	0.82	530	650	0.82
	钢板尾部	505	650		0.78	504	644		0.78	515	648	0.79
实施例8	钢板头部	513	581	13/12	0.88	493	570	8/7	0.86	509	588	0.87
	钢板尾部	500	569		0.88	485	563		0.86	503	577	0.87
实施例9	钢板头部	535	660	20/50	0.81	528	639	11/6	0.83	525	648	0.81
	钢板尾部	515	610		0.84	517	633		0.82	530	635	0.83
对比例 1	钢板头部	542	610	<u>55/52</u>	<u>0.89</u>	521	601	<u>54/50</u>	<u>0.87</u>	<u>544</u>	611	<u>0.89</u>
	钢板尾部	<u>487</u>	558		0.87	467	551		0.85	495	588	0.84
对比例 2	钢板头部	559	617	<u>57/16</u>	<u>0.91</u>	523	597	35/25	<u>0.88</u>	<u>565</u>	604	<u>0.94</u>
	钢板尾部	502	633		0.79	488	622		0.78	528	633	0.83
对比例 3	钢板头部	596	<u>680</u>	11/31	0.88	<u>578</u>	<u>661</u>	5/16	<u>0.87</u>	<u>595</u>	<u>667</u>	<u>0.89</u>
	钢板尾部	585	649		<u>0.90</u>	<u>573</u>	645		<u>0.89</u>	<u>588</u>	650	<u>0.90</u>

表 6

	取样位置	CVN1 J	CVN1 J	CVN1 J	CVN-avg J	差值
实施例1	壁厚中心	250	268	278	265	50
	近表面	327	318	301	315	
实施例2	壁厚中心	330	345	317	331	19
	近表面	359	340	351	350	
实施例3	壁厚中心	411	414	402	409	43
	近表面	465	438	453	452	
实施例4	壁厚中心	315	312	330	319	30
	近表面	346	342	358	349	
实施例5	壁厚中心	320	343	331	331	18
	近表面	342	352	354	349	
实施例6	壁厚中心	429	424	422	425	13
	近表面	453	434	427	438	
实施例7	壁厚中心	336	314	322	324	19
	近表面	354	322	354	343	
实施例8	壁厚中心	430	427	411	423	18
	近表面	457	439	428	441	
实施例9	壁厚中心	314	307	309	310	36
	近表面	358	337	343	346	
对比例 1	壁厚中心	<u>188</u>	<u>255</u>	<u>223</u>	222	<u>66</u>
	近表面	286	279	299	288	
对比例 2	壁厚中心	<u>195</u>	<u>225</u>	<u>231</u>	217	37
	近表面	<u>232</u>	<u>214</u>	<u>241</u>	229	
对比例 3	壁厚中心	<u>235</u>	<u>247</u>	<u>211</u>	231	<u>115</u>
	近表面	325	338	321	346	

表 7

	试样类型	SA %	SA %	SA-avg %	差值
实施例1	全厚度试样	89	88	89	1
	单面减薄试样	89	91	90	
实施例2	全厚度试样	85	85	85	5

	单面减薄试样	88	92	90	
实施例3	全厚度试样	90	87	89	2
	单面减薄试样	90	91	91	
实施例4	全厚度试样	86	86	86	4
	单面减薄试样	89	91	90	
实施例5	全厚度试样	90	90	90	4
	单面减薄试样	92	95	94	
实施例6	全厚度试样	95	93	94	2
	单面减薄试样	95	96	96	
实施例7	全厚度试样	86	88	87	5
	单面减薄试样	95	88	92	
实施例8	全厚度试样	92	93	93	4
	单面减薄试样	98	95	97	
实施例9	全厚度试样	87	90	89	2
	单面减薄试样	94	87	91	
对比例 1	全厚度试样	<u>67</u>	<u>81</u>	<u>74</u>	<u>14</u>
	单面减薄试样	88	87	88	
对比例 2	全厚度试样	<u>69</u>	<u>77</u>	<u>73</u>	4
	单面减薄试样	<u>78</u>	<u>76</u>	<u>77</u>	
对比例 3	全厚度试样	<u>68</u>	<u>72</u>	<u>70</u>	<u>13</u>
	单面减薄试样	<u>80</u>	86	<u>83</u>	

表 8

	近上表面			厚度中心			近下表面			差值	晶粒度
	硬度	硬度	硬度	硬度	硬度	硬度	硬度	硬度	硬度		
实施例 1	210	203	194	211	208	194	200	196	199	4	10
实施例 2	197	195	196	202	203	207	191	199	200	8	9
实施例 3	218	213	214	200	219	212	213	215	218	5	11
实施例 4	203	208	215	210	190	196	202	191	201	5	9
实施例 5	198	198	203	214	214	192	196	203	195	8	10
实施例 6	201	210	203	197	190	207	202	204	203	6	11
实施例 7	205	207	218	217	230	215	215	213	209	9	9
实施例 8	201	205	200	204	201	190	208	207	205	6	10
实施例 9	208	211	202	196	195	207	220	212	212	12	11

对比例 1	197	201	200	233	238	231	195	205	199	<u>35</u>	<u>9</u>
对比例 2	223	218	219	205	220	216	218	221	223	7	8
对比例 3	211	213	215	228	218	215	198	210	205	12	9

权 利 要 求 书

1. 一种高性能均匀性海底管线钢，其化学成分重量百分比为：C：0.02~0.06%，Si：0.10~0.30%，Mn：1.20~1.65%， $Cu \leq 0.30\%$ ， $Ni \leq 0.30\%$ ，Cr：0.15~0.30%， $Mo \leq 0.15\%$ ，Nb：0.03~0.05%， $V \leq 0.05\%$ ，Ti：0.008~0.020%，Ca：0.0012~0.0030%，
5 Al：0.015~0.045%，余量包括 Fe 及不可避免的杂质，其中，需控制杂质元素 P $\leq 0.01\%$ ， $S \leq 0.001\%$ ， $B \leq 0.0004\%$ ， $N \leq 0.005\%$ ， $O \leq 0.0025\%$ ， $H \leq 0.0002\%$ ；
且同时满足：
 $Ti/N \geq 2$ ；
 $(Nb/7.7C + V/4.3C) \geq 0.10$ ；
10 $1.5 \leq Ca/S \leq 4$ ；
 $0.30 \leq Ceq \leq 0.39$ ， $Ceq = C + Mn/6 + (Cr + V + Mo)/5 + (Cu + Ni)/15$ ；
 $Pcm \leq 0.17$ ， $Pcm = C + Si/30 + (Mn + Cu + Cr)/20 + Ni/60 + Mo/15 + V/10 + 5B$ 。
2. 如权利要求 1 所述的高性能均匀性海底管线钢，其特征是，余量为 Fe 和不可避
15 免杂质。
3. 如权利要求 1 或 2 所述的高性能均匀性海底管线钢，其特征是，所述海底管线钢的显微组织为铁素体+贝氏体，其中，所述铁素体体积含量百分比为 20~40%。
4. 如权利要求 1 或 2 或 3 所述的高性能均匀性海底管线钢，其特征是，所述海底管线钢的晶粒度等级 ≥ 9 级。
- 20 5. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述的高性能均匀性海底管线钢，其特征是：
所述海底管线钢横向拉伸性能为：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：415~555MPa，抗拉强度 R_m ：515~670MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.88$ ；钢板头尾屈服强度差和拉伸强度差均 $\leq 50MPa$ ；
纵向拉伸：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：405~530MPa，抗拉强度 R_m ：505~650MPa，屈
25 强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.86$ ；钢板头尾屈服强度差和拉伸强度差均 $\leq 50MPa$ ；
经过 3%预应变，250℃保温 1 小时后的应变时效试验后，钢板纵向拉伸性能：屈服强度 $R_{t0.5}$ ：405~530MPa，抗拉强度 R_m ：505~650MPa，屈强比 $R_{t0.5}/R_m \leq 0.88$ 。
6. 如权利要求 1 或 2 或 3 或 4 或 5 所述的高性能均匀性海底管线钢，其特征是，
30 所述海底管线钢-45℃夏比冲击功 $\geq 250J$ ，且钢板厚度中心和近表面夏比冲击功

差 $\leq 50\text{J}$ ； -30°C 下 DWTT 试验 $SA \geq 85\%$ ，单面减薄 DWTT 试样和全厚度 DWTT 试样的 SA 差值 $\leq 5\%$ ；硬度 $\leq 230\text{HV}10$ ，其中，钢板表面硬度与钢板中心硬度差值 $\leq 25\text{HV}10$ 。

7. 如权利要求 1~6 任一项所述的高性能均匀性海底管线钢的制造方法，其特征是，
5 包括如下步骤：
- 1) 冶炼、连铸
按权利要求 1 或 2 所述成分经冶炼、连铸成坯；连铸过程中，中间包过热度控制在 $15\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，连铸坯拉速控制在 $0.40\sim 1.10\text{m/min}$ ，保证连铸坯凝固末端处于连铸机水平段，所述连铸机结晶器采用电磁搅拌工艺；
- 10 2) 控制轧制
加热温度为 $1120\sim 1190^{\circ}\text{C}$ ，粗轧开轧温度为 $1000\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，粗轧终轧温度为 $930\sim 980^{\circ}\text{C}$ ，粗轧压下率 $\geq 50\%$ ， $1.20 \leq \text{展宽比} \leq 1.80$ ；精轧开轧温度为 $790\sim 880^{\circ}\text{C}$ ，精轧终轧温度为 $780\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，精轧压下率 $\geq 70\%$ ；
- 3) 控制冷却
15 弛豫时间 $\geq 30\text{s}$ ，开冷温度为 $730\sim 780^{\circ}\text{C}$ ，冷却速度 $10\sim 40^{\circ}\text{C/s}$ ，停冷温度 $350\sim 550^{\circ}\text{C}$ ，停冷后钢板上下表面温差 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ ；
- 4) 钢板停冷后空冷或堆冷至室温。
8. 如权利要求 7 所述的制造方法，其特征是，步骤 1)中，相邻板坯过热度波动值 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ 和/或相邻板坯拉速波动 $\leq 10\%$ 。
- 20 9. 如权利要求 7 或 8 所述的制造方法，其特征是，步骤 1)中，所述连铸坯凝固末端采用动态轻压下工艺，压下量 $2\sim 3\text{mm}$ 。
10. 如权利要求 7 或 8 所述的制造方法，其特征是，步骤 1)中，粗轧压下率为 $50\sim 80\%$ ，精轧压下率为 $70\sim 85\%$ 。
11. 如权利要求 7 所述的制造方法，其特征是，步骤 3)中，钢板头尾入水温差 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ 。
- 25 12. 如权利要求 7 所述的制造方法，其特征是，步骤 3)中，弛豫时间为 $30\sim 60\text{s}$ 。
13. 如权利要求 7 所述的制造方法，其特征是，步骤 4)中，所述停冷温度 $\leq 450^{\circ}\text{C}$ 时，将钢板在 $450\sim 650^{\circ}\text{C}$ 回火 $10\sim 30\text{min}$ 。
14. 如权利要求 7 或 13 所述的制造方法，其特征是，步骤 4)中，所述钢板冷却至室温后将钢板头尾部分切除，头尾切舍量均 $\geq 250\text{mm}$ 。