

一种耐腐蚀钢筋及其生产方法

相关申请的交叉引用

本申请要求在 2023 年 3 月 16 日提交中国专利局、申请号为 202310252937.7、发明名称为“一种耐腐蚀钢筋及其生产方法”的中国专利申请优先权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请属于钢铁冶炼技术领域，具体涉及一种耐腐蚀钢筋及其生产方法。

背景技术

钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构耐久性不足的主要因素，现有技术通过添加大量的铬、钼、镍等合金元素来提高钢筋耐腐蚀性能，但是合金成本高、生产难度大，难以大范围推广应用。

中国专利文献 CN114790532A 公开了一种合金耐蚀钢筋及其制备方法，该合金耐蚀钢筋按重量百分比计，包括：C:0.05-0.25%、Si:1.05-2%、Mn:0.3-1.5%、Cr:0.5-2.5%、Ni:0.05-1%、O:0.001-0.005%、S:0.001-0.0035%、Ti:0.005-0.1%、Al:0.005-0.1%、V:0.005-0.03%、Nb:0.005-0.03%；余量为 Fe 和不可避免的杂质；所述 Si、Mn 的含量满足 $2 \leq \text{Si/Mn} \leq 5$ ；Si、Cr 的含量满足 $0.75 \leq \text{Si/Cr} \leq 1.5$ ；Ti、Al 的含量满足 $0.02\% \leq \text{Ti+Al} \leq 0.2\%$ ，该耐蚀钢筋通过 Si、Ti、Al 等元素关联设计，在不添加 Mo 元素的前提下保证钢筋具有较好的耐腐蚀性能，但是仍需添加 Cr 和 Ni 元素，且 Cr 和 Ni 元素含量高，导致成本增加。因此，研究开发一种无需添加 Cr、Ni、Mo 等合金元素就可具有较好耐腐蚀性能的钢筋对于本领域来说意义重大。

发明内容

因此，本申请要解决的技术问题在于克服现有技术均需添加 Cr、Ni、Mo 等合金元素来提升钢筋耐腐蚀性能，导致钢筋生产成本低、难度大等缺陷，从而提供一种耐腐蚀钢筋及其生产方法。

为此，本申请提供了以下技术方案。

本申请提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C: 0.03-0.15%，Si: 0.8-2.0%，Mn: 0.8-2.0%，Cu: 0.10-0.50%，P: 0.08-0.2%，S: 0.005-0.01%， $\text{Nb} \leq 0.1\%$ ， $\text{V} \leq 0.2\%$ ， $\text{Ti} \leq 0.1\%$ ， $\text{Al} \leq 0.1\%$ ，余量为 Fe 以及不可避免的杂质；其中， $0.6 \leq \text{Si/Mn} \leq 2.0$ ， $0.25 \leq \text{Cu+P+S} \leq 0.62$ 。

所述耐腐蚀钢筋满足 (1) - (5) 中的至少一项：

- (1) 所述 C 为 0.05-0.12%；
- (2) 所述 Si 为 0.9-1.7%；
- (3) 所述 Mn 为 0.9-1.8%；
- (4) 所述 Cu 为 0.2-0.3%；
- (5) 所述 P 为 0.11-0.18%。

所述耐腐蚀钢筋满足 (1) - (4) 中的至少一项：

- (1) 所述 C 为 0.06-0.09%;
- (2) 所述 Si 为 1.0-1.3%;
- (3) 所述 Mn 为 1.0-1.5%;
- (4) 所述 P 为 0.13-0.17%。

本申请提供了一种上述耐腐蚀钢筋的生产工艺，其工序包括：冶炼、精炼、连铸、铸坯加热和热连轧。

所述连铸工序满足 (1) - (4) 中的至少一项：

- (1) 采用低碳钢保护渣，渣层厚度为 8-10mm；其中，低碳钢中的碳含量不大于 0.15%；
- (2) 结晶器水流量为 1950-2050L/min；
- (3) 结晶器电磁搅拌电流 330A-370A，频率 3-5Hz；末端电磁搅拌电流 380A-420A，频率 10-12Hz；
- (4) 拉速为 2.5-3.5m/min。

所述冶炼工序满足 (1) - (3) 中的至少一项：

- (1) 出钢温度为 1600-1640°C；
 - (2) 出钢脱氧合金化按照硅锰-硅铁-石灰顺序加入；
- 所述硅锰的加入量为 10-30kg/t，硅铁的加入量为 15-30kg/t；
- (3) 底吹压力：前期 0.4-0.5MPa，后期 0.3-0.4MPa。

前期是指开始加入合金到结束加合金的过程；

后期是指钢液成分达到目标成分之后到冶炼结束的过程。

所述铸坯加热工序：加热的温度为 1200-1250°C。

所述热连轧工序：上冷床温度为 850-900°C。

所述精炼工序满足 (1) - (3) 中的至少一项：

- (1) 所述精炼工序包括加入磷铁和铜的步骤；
- (2) 所述精炼的搅拌时间不低于 10min；
- (3) 出钢温度为 1580-1600°C。

所述磷铁中磷的质量含量为 20-25%；

所述磷铁的加入量为 3-6kg/t；

所述铜的加入量为 1.5-3.5kg/t。

本申请技术方案，具有如下优点：

1. 本申请提供的耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，耐腐蚀钢筋包括：C：0.03-0.15%，Si：0.8-2.0%，Mn：0.8-2.0%，Cu：0.10-0.50%，P：0.08-0.2%，S：0.005-0.01%，Nb $\leq$ 0.1%，V $\leq$ 0.2%，Ti $\leq$ 0.1%，Al $\leq$ 0.1%，余量为 Fe 以及不可避免的杂质；其中， $0.6\leq\text{Si/Mn}\leq 2.0$ ， $0.25\leq\text{Cu+P+S}\leq 0.62$ 。本申请通过 Si、Mn、Cu、P、S 等合金元素的关联设计，综合考虑各元素的强化作用和耐蚀作用，弥补了不添加 Cr、Ni 和 Mo 导致钢材耐蚀性下降的问题，降低了钢筋生产成本；各元素在特定含量下的协调作用，可以使耐蚀和强化作用得到充分发挥，解决了现有技术耐蚀性、力学性能和成本不能兼具的问题，克服了现有技术提升耐蚀性必加 Cr、Ni 或 Mo 的技术偏见。本申请尤其是 Si、Mn、Cu、S 这

四者之间协同耦合来提升耐氯盐腐蚀作用和钢材强度-塑性协调匹配。本申请提供的耐腐蚀钢筋可以兼具耐蚀性和低成本，克服现有技术中耐蚀性能和合金成本难以协同匹配的问题，显著延长建筑工程在氯盐侵蚀环境下的服役寿命。

C 元素起到强化作用，其含量过高容易形成碳化物，降低钢材的耐蚀性、塑性、韧性和焊接性能。Si 元素起到脱氧剂作用，可以显著降低钢中的氧含量，减少氧化物夹杂的形成，高 Si 含量有利于钢材表面形成硅酸盐物相，阻隔侵蚀介质的传输和聚集，提高耐腐蚀性能，同时 Si 是强化元素和铁素体形成元素，含量高有利于调控强度和塑性，克服 Cu 和 P 含量过高引发的脆性问题，优化力学性能，Si 含量过高不利于焊接。Mn 通过固溶强化作用可以显著提高钢材强度，其含量过高，增加淬透性，由于 Mn、S 易形成 MnS 夹杂，降低钢材塑性和耐蚀性，通过控制 Mn 含量和控制 Cu 元素，使 Cu 消耗了 S，抑制了 MnS 的形成，阻止 MnS 腐蚀行为的发生，提高了耐蚀性。Cu 是耐腐蚀元素，通过锈层富集，与 S 形成 CuS 提升耐蚀性能，但是 Cu 含量过高易引起铜脆。P 可以提高钢筋耐蚀性，与 Cu 协同作用，效果最佳，P 含量过高会增加钢的冷脆性。S 与 Cu 形成致密 CuS，可以阻碍侵蚀介质的传输，利于提升耐蚀性能，虽然 S 与 Mn 易形成夹杂，但是相对 MnS，更易形成 CuS，因此适量的 S 元素对于本申请来说是一种有利元素，与 Cu 配合可以提高耐腐蚀性能。

Ti 是一种耐腐蚀元素和强化元素，可以提高钢材的腐蚀电位和腐蚀性，通过细晶强化作用，可以提高钢材的力学性能，Ti 含量过高易生成氧化物，连铸时堵住水口。Al 在冶炼过程中脱氧，降低钢液中氧含量，同时 Al 在钢中能形成氧化物，富集在锈层中，提高耐腐蚀性能，其含量过高，在连铸时容易堵住水口。V 和 Nb 均为强化元素，在钢中形成碳氮化物，通过细晶强化、析出强化，提高钢材力学性能，该强化效果与 C、N 含量相关。

本申请采用低碳合金钢成分，通过各个元素的关联设计，协调各元素含量，使各元素的耐蚀性和强化作用充分发挥，通过合金配比和复相组织精细控制，解决了现有技术不能兼具耐蚀性、力学性能和低成本的问题。

2. 本申请提供的耐腐蚀钢筋的生产工艺，该生产工艺制得的耐腐蚀钢筋具有较好的耐氯盐腐蚀性，无需添加 Cr、Ni 和 Mo，成本低，生产工艺难度低。该工艺得到的钢筋组织为珠光体和铁素体，铁素体占比为 50-75%，屈服强度 $\geq 400\text{MPa}$ ，断后延伸率 $\geq 30\%$ ，最大力总伸长率 $\geq 20\%$ ，强屈比 ≥ 1.30 ，氯盐腐蚀环境下（5%NaCl，35℃，湿度 70%），与普通钢筋 HRB400 相比，腐蚀速率相对值不大于 35%。

3. 本申请提供的耐腐蚀钢筋的生产工艺，通过在钢筋生产过程中控制合金加入类型和加入方式，实现多元素合金含量的精细控制和低成本生产，通过控轧控冷工艺（铸坯加热温度、上冷床温度等），实现了铁素体/珠光体复相组织的调控，保证了合金元素的强化作用，优化了钢筋耐蚀性与强-塑性的协调匹配，实现低成本、高耐蚀合金钢筋的开发。

本申请冶炼工序中的出钢温度（1）可以保证冶炼时废钢完全溶解，（2）保证钢液进入精炼时的温度，这是因为在冶炼出钢过程中，加入合金会使钢液温

度下降，影响精炼的温度；本申请通过控制冶炼，可以实现高效冶炼和成分精细控制。

在精炼工序中加入磷铁，这是因为磷铁属于易氧化元素，在其它阶段加入，元素收得率低；精炼出钢温度为 1580-1600℃，该温度与连铸温度关联的，这是因为精炼温度决定了连铸温度，而连铸温度是根据合金成分计算获得的，与钢筋中各元素含量直接相关。

连铸采用低碳钢保护渣，渣层厚度 8-10mm，(1) 降低保护渣中的碳对钢液中的碳含量的影响，确保成品碳含量精确控制，满足低碳要求，防止碳化物影响耐腐蚀性能，(2) 渣层可减少钢液与空气的接触、对流，保持钢液温度的稳定性。电磁搅拌参数与钢液成分的均匀性有很大的关联，本申请产品为耐腐蚀钢，钢液越纯净，耐腐蚀性越好。结晶器水流量主要起到冷却作用，因坯料截面尺寸大，表面和芯部存在温差，如果水流量配比不合适，表面质量差，出现裂纹等问题。拉速受钢液温度、冷却能力等影响，合适的拉速在保证获得高均匀性铸坯的同时还可以避免漏钢事故。

铸坯加热温度影响合金元素的溶解和晶粒大小，对产品组织和力学性能影响显著，该参数设置是根据合金成分（元素溶解温度）、晶粒度大小来确定的；上冷床温度与冷却方式是关联的，主要是根据钢筋过冷奥氏体连续冷却曲线来设计的。

具体实施方式

提供下述实施例是为了更好地进一步理解本申请，并不局限于所述最佳实施方式，不对本申请的内容和保护范围构成限制，任何人在本申请的启示下或是将本申请与其他现有技术的特征进行组合而得出的任何与本申请相同或相近似的产品，均落在本申请的保护范围之内。

实施例中未注明具体实验步骤或条件者，按照本领域内的文献所描述的常规实验步骤的操作或条件即可进行。所用试剂或仪器未注明生产厂商者，均为可以通过市购获得的常规试剂产品。

以下具体的实施例中提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.03-0.15%，Si：0.8-2.0%，Mn：0.8-2.0%，Cu：0.10-0.50%，P：0.08-0.2%，S：0.005-0.01%，Nb≤0.1%，V≤0.2%，Ti≤0.1%，Al≤0.1%，余量为 Fe 以及不可避免的杂质；

其中， $0.6 \leq \text{Si/Mn} \leq 2.0$ ， $0.25 \leq \text{Cu+P+S} \leq 0.62$ 。

可选地，C 为 0.05-0.12%；更可选为 0.06-0.09%；

Si 为 0.9-1.7%；更可选为 1.0-1.3%；

Mn 为 0.9-1.8%；更可选为 1.0-1.5%；

Cu 为 0.2-0.3%；

P 为 0.11-0.18%；更可选为 0.13-0.17%。

上述耐腐蚀钢筋的生产工艺，其工序包括：

冶炼：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度为 1600-1640℃，出钢脱氧合金化按照硅锰-硅铁-石灰顺序加入合金及渣料，以钢水 1t 为基准，硅锰加入量为

10-30kg/t, 硅铁加入量为 15-30kg/t; 出钢前打开钢包底吹氩气控制阀, 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力: 前期为 0.4-0.5MPa, 后期为 0.3-0.4MPa。

精炼: 精炼到站后分别加入磷铁、铜板, 精炼软搅拌时间不低于 10min, 出钢温度为 1580-1600°C; 以钢水 1t 为基准, 磷铁加入量为 3-6kg/t, 磷铁中磷含量为 20-25wt%, 铜板加入量为 1.5-3.5kg/t。

连铸: 采用低碳钢保护渣, 渣层厚度为 8-10mm, 拉速为 2.5-3.5m/min, 结晶器水流量为 1950-2050L/min, 结晶器电磁搅拌电流 330A-370A, 频率 3-5Hz; 末端电磁搅拌电流 380A-420A, 频率 10-12Hz。

铸坯加热: 加热的温度为 1200-1250°C。

热连轧: 上冷床温度为 850-900°C, 轧后自然冷却至室温, 轧后冷却速度及上冷床温度的控制有利于获得理想组织。

实施例 1

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋, 按重量百分比计, 包括: C: 0.06%, Si: 1.0%, Mn: 1.0%, Cu: 0.2%, P: 0.13%, S: 0.005%, Nb: 0.075%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, $Si/Mn=1.0$, $Cu+P+S=0.34$ 。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序: 在转炉中进行钢水冶炼, 出钢温度 1630°C, 以 1t 钢水为基准, 出钢加硅锰($FeMn_{65}S_{17}$) 20kg/t, 加入硅铁($FeSi_{72}$)20kg/t; 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力控制: 前期为 0.4MPa, 后期为 0.3MPa。

精炼工序: 磷铁(P 含量 23%, 加入量 4kg/t), 铜板(Cu 含量 99%, 加入量 1.5kg/t), 铌铁(Nb 含量 65%, 加入量 1.2kg/t); 精炼软搅拌时间 12min, 连浇出钢温度 1600°C。

连铸工序: 渣层厚度为 8mm; 拉速 2.8m/min; 结晶器水流量 2000 ± 50 L/min, 结晶器电磁搅拌电流 350A, 频率 3Hz; 末端电磁搅拌电流 400A, 频率 10Hz; 铸坯截面尺寸 140mm×140mm (宽×高)。

铸坯加热及热连轧工序: 加热温度为 1220°C, 上冷床温度为 880°C, 轧后自然冷却至室温, 钢筋直径 20mm。

实施例 2

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋, 按重量百分比计, 包括: C: 0.08%, Si: 1.28%, Mn: 1.0%, Cu: 0.25%, P: 0.15%, S: 0.005%, V: 0.15%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, $Si/Mn=1.28$, $Cu+P+S=0.41$ 。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序: 在转炉中进行钢水冶炼, 出钢温度 1630°C, 出钢加硅锰($FeMn_{65}S_{17}$) 20kg/t, 加入硅铁($FeSi_{72}$)23kg/t; 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力控制: 前期为 0.42MPa, 后期为 0.32MPa。

精炼工序: 磷铁(P 含量 23%, 加入量 4.5kg/t), 铜板(Cu 含量 99%, 加入量 1.8kg/t), 钒铁(V 含量 48%, 加入量 3.3kg/t); 精炼软搅拌时间 13min, 连浇出

钢温度 1595℃。

连铸工序：渣层厚度为 10mm；拉速 3.0m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 330A，频率 5Hz；末端电磁搅拌电流 390A，频率 10Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1250℃，上冷床温度为 890℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 28mm。

实施例 3

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.09%，Si：1.3%，Mn：1.5%，Cu：0.3%，P：0.17%，S：0.01%，Nb：0.10%，Ti：0.01%，Al：0.01%，余量为 Fe 和不可避免的杂质；

其中，Si/Mn=0.87，Cu+P+S=0.48。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括：

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1630℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 25kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)23kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.45MPa，后期为 0.35MPa。

精炼工序：磷铁(P 含量 23%，加入量 5kg/t)，铜板(Cu 含量 99%，加入量 2.0kg/t)，铌铁(V 含量 65%，加入量 1.6kg/t)，钛铁(Ti 含量 30%，加入量 0.5kg/t)，铝粒(Al 含量 99%，加入量 0.15kg/t)；精炼软搅拌时间 15min，连浇出钢温度 1595℃。

连铸工序：渣层厚度为 9mm；拉速 2.6m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 370A，频率 3.5Hz；末端电磁搅拌电流 420A，频率 11Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1200℃，上冷床温度为 900℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 32mm。

实施例 4

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.05%，Si：0.9%，Mn：1.49%，Cu：0.5%，P：0.11%，S：0.01%，Nb：0.03%，V：0.15%，余量为 Fe 和不可避免的杂质；

其中，Si/Mn=0.60，Cu+P+S=0.62。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括：

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1630℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 25kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)18kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.4MPa，后期为 0.3MPa。

精炼工序：磷铁(P 含量 23%，加入量 3.5kg/t)，铜板(Cu 含量 99%，加入量 3.5kg/t)，铌铁(V 含量 65%，加入量 0.5kg/t)，钒铁(V 含量 48%，加入量 3.3kg/t)；精炼软搅拌时间 11min，连浇出钢温度 1600℃。

连铸工序：渣层厚度为 8mm；拉速 3.5m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 350A，频率 5Hz；末端电磁搅拌电流 380A，频率 12Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1250℃，上冷床温度为 850℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 16mm。

实施例 5

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.12%，Si：1.7%，Mn：0.9%，Cu：0.1%，P：0.18%，S：0.01%，Ti：0.1%，余量为 Fe 和不可避免的杂质；

其中，Si/Mn=1.89，Cu+P+S=0.29。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括：

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1630℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 11kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)25kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.5MPa，后期为 0.4MPa。

精炼工序：磷铁(P 含量 23%，加入量 5.5kg/t)，铜板(Cu 含量 99%，加入量 1.5kg/t)，钛铁(Ti 含量 30%，加入量 5kg/t)；精炼软搅拌时间 15min，连浇出钢温度 1590℃。

连铸工序：渣层厚度为 10mm；拉速 2.5m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 350A，频率 5Hz；末端电磁搅拌电流 400A，频率 12Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1250℃，上冷床温度为 880℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 10mm。

实施例 6

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.03%，Si：0.8%，Mn：0.8%，Cu：0.3%，P：0.08%，S：0.005%，V：0.2%，Ti：0.01%，Al：0.01%，余量为 Fe 和不可避免的杂质；

其中，Si/Mn=1，Cu+P+S=0.39。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括：

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1610℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 10kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)15kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.4MPa，后期为 0.3MPa。

精炼工序：磷铁(P 含量 23%，加入量 3kg/t)，铜板(Cu 含量 99%，加入量 2kg/t)，钒铁(V 含量 48%，加入量 4kg/t)，钛铁(Ti 含量 30%，加入量 0.5kg/t)，铝粒(Al 含量 99%，加入量 0.15kg/t)；精炼软搅拌时间 10min，连浇出钢温度 1595℃。

连铸工序：渣层厚度为 9.5mm；拉速 2.6m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 345A，频率 3.5Hz；末端电磁搅拌电流 405A，频率 11Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1200℃，上冷床温度为 900℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 18mm。

实施例 7

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.15%，Si：

2%, Mn: 2%, Cu: 0.25%, P: 0.2%, S: 0.01%, Al: 0.1%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, $Si/Mn=1$, $Cu+P+S=0.46$ 。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序: 在转炉中进行钢水冶炼, 出钢温度 1640°C , 出钢加硅锰($\text{FeMn}_{65}\text{Si}_{17}$)30kg/t, 加入硅铁(FeSi_{72})30kg/t; 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力控制: 前期为 0.5MPa, 后期为 0.4MPa。

精炼工序: 磷铁(P 含量 23%, 加入量 6kg/t), 铜板(Cu 含量 99%, 加入量 1.8kg/t), 铝粒 (Al 含量 99%, 加入量 1.5kg/t); 精炼软搅拌时间 15min, 连浇出钢温度 1600°C 。

连铸工序: 渣层厚度为 8.5mm; 拉速 2.6m/min; 结晶器水流量 $2000 \pm 50\text{L/min}$, 结晶器电磁搅拌电流 350A, 频率 5Hz; 末端电磁搅拌电流 410A, 频率 12Hz; 铸坯截面尺寸 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ (宽 $\times$ 高)。

铸坯加热及热连轧工序: 加热温度为 1250°C , 上冷床温度为 900°C , 轧后自然冷却至室温, 钢筋直径 25mm。

实施例 8

本实施例提供了一种耐腐蚀钢筋, 按重量百分比计, 包括: C: 0.08%, Si: 2%, Mn: 1%, Cu: 0.145%, P: 0.1%, S: 0.005%, Nb: 0.05%, V: 0.05%, Ti: 0.1%, Al: 0.1%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, $Si/Mn=2$, $Cu+P+S=0.25$ 。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序: 在转炉中进行钢水冶炼, 出钢温度 1630°C , 出钢加硅锰($\text{FeMn}_{65}\text{Si}_{17}$)20kg/t, 加入硅铁(FeSi_{72})30kg/t; 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力控制: 前期为 0.4MPa, 后期为 0.3MPa。

精炼工序: 磷铁(P 含量 23%, 加入量 3.5kg/t), 铜板(Cu 含量 99%, 加入量 1.9kg/t), 铌铁(Nb 含量 65%, 加入量 0.8kg/t), 钒铁(V 含量 48%, 加入量 1kg/t), 钛铁 (Ti 含量 30%, 加入量 5kg/t), 铝粒 (Al 含量 99%, 加入量 1.5kg/t); 精炼软搅拌时间 15min, 连浇出钢温度 1600°C 。

连铸工序: 渣层厚度为 10mm; 拉速 2.6m/min; 结晶器水流量 $2000 \pm 50\text{L/min}$, 结晶器电磁搅拌电流 350A, 频率 5Hz; 末端电磁搅拌电流 395A, 频率 12Hz; 铸坯截面尺寸 $140\text{mm} \times 140\text{mm}$ (宽 $\times$ 高)。

铸坯加热及热连轧工序: 加热温度为 1250°C , 上冷床温度为 900°C , 轧后自然冷却至室温, 钢筋直径 28mm。

对比例 1

本对比例提供了一种耐腐蚀钢筋, 按重量百分比计, 包括: C: 0.25%, Si: 0.5%, Mn: 1.5%, Cu: 0.3%, P: 0.035%, S: 0.0035%, Nb: 0.05%, Ti: 0.1%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, $Si/Mn=0.33$, $Cu+P+S=0.34$ 。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1600℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 20kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)5kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.4MPa，后期为 0.3MPa。

精炼工序：不加磷铁，铜板(Cu 含量 99%，加入量 2kg/t)，铌铁(Nb 含量 65%，加入量 0.8kg/t)，钛铁(Ti 含量 30%，加入量 5kg/t)；精炼软搅拌时间 15min，连浇出钢温度 1600℃。

连铸工序：渣层厚度为 8mm；拉速 2.6m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 350A，频率 4Hz；末端电磁搅拌电流 400A，频率 11Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1250℃，上冷床温度为 900℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 25mm。

对比例 2

本对比例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.08%，Si：2.5%，Mn：0.5%，P：0.035%，S：0.0035%，V：0.15%，Ti：0.1%，Al：0.1%，余量为 Fe 和不可避免的杂质；

其中，Si/Mn=5，Cu+P+S=0.04。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括：

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1600℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 8kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)35kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.5MPa，后期为 0.4MPa。

精炼工序：不加磷铁和钢板，钒铁(V 含量 48%，加入量 3kg/t)，钛铁(Ti 含量 30%，加入量 5kg/t)，铝粒(Al 含量 99%，加入量 1.5kg/t)；精炼软搅拌时间 15min，连浇出钢温度 1590℃。

连铸工序：渣层厚度为 10mm；拉速 2.5m/min；结晶器水流量 2000±50L/min，结晶器电磁搅拌电流 350A，频率 4Hz；末端电磁搅拌电流 400A，频率 11Hz；铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1200℃，上冷床温度为 850℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 20mm。

对比例 3

本对比例提供了一种耐腐蚀钢筋，按重量百分比计，包括：C：0.25%，Si：0.6%，Mn：2.5%，Cu：0.5%，P：0.2%，S：0.01%，V：0.15%，Ti：0.1%，余量为 Fe 和不可避免的杂质；

其中，Si/Mn=0.24，Cu+P+S=0.71。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括：

冶炼工序：在转炉中进行钢水冶炼，出钢温度 1600℃，出钢加硅锰(FeMn₆₅S₁₇) 35kg/t，加入硅铁(FeSi₇₂)8kg/t；出钢过程全程吹氩气，底吹压力控制：前期为 0.5MPa，后期为 0.4MPa。

精炼工序：磷铁(P 含量 23%，加入量 6kg/t)，钢板(Cu 含量 99%，加入量 3.5kg/t)，钒铁(V 含量 48%，加入量 3kg/t)，钛铁(Ti 含量 30%，加入量 5kg/t)；

精炼软搅拌时间 15min, 连浇出钢温度 1610°C。

连铸工序: 渣层厚度为 5mm; 拉速 2.5m/min; 结晶器水流量 2000±50L/min, 结晶器电磁搅拌电流 350A, 频率 4Hz; 末端电磁搅拌电流 400A, 频率 11Hz; 铸坯截面尺寸 140mm×140mm (宽×高)。

铸坯加热及热连轧工序: 加热温度为 1250°C, 上冷床温度为 880°C, 轧后自然冷却至室温, 钢筋直径 16mm。

对比例 4

本对比例提供了一种耐腐蚀钢筋, 按重量百分比计, 包括: C: 0.25%, Si: 2.5%, Mn: 2.5%, Cu: 1%, P: 0.2%, S: 0.01%, Nb: 0.05%, Ti: 0.1%, Al: 0.1%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, Si/Mn=1, Cu+P+S=1.21。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序: 在转炉中进行钢水冶炼, 出钢温度 1640°C, 出钢加硅锰 (FeMn₆₅S₁₇) 35kg/t, 加入硅铁 (FeSi₇₂) 35kg/t; 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力控制: 前期为 0.5MPa, 后期为 0.4MPa。

精炼工序: 磷铁 (P 含量 23%, 加入量 6kg/t), 钢板 (Cu 含量 99%, 加入量 4kg/t), 铌铁 (Nb 含量 65%, 加入量 0.8kg/t), 钛铁 (Ti 含量 30%, 加入量 5kg/t), 铝粒 (Al 含量 99%, 加入量 1.5kg/t); 精炼软搅拌时间 15min, 连浇出钢温度 1610°C。

连铸工序: 渣层厚度为 11mm; 拉速 2.5m/min; 结晶器水流量 2000±50L/min, 结晶器电磁搅拌电流 350A, 频率 5Hz; 末端电磁搅拌电流 400A, 频率 12Hz; 铸坯截面尺寸 140mm×140mm (宽×高)。

铸坯加热及热连轧工序: 加热温度为 1250°C, 上冷床温度为 900°C, 轧后自然冷却至室温, 钢筋直径 32mm。

对比例 5

本对比例提供了一种耐腐蚀钢筋, 按重量百分比计, 包括: C: 0.15%, Si: 0.7%, Mn: 1.35%, Cu: 0.3%, P: 0.015%, S: 0.005%, Nb: 0.015%, Cr: 1.35%, Ni: 0.3%, Mo: 0.1%, 余量为 Fe 和不可避免的杂质;

其中, Si/Mn=0.52, Cu+P+S=0.32。

上述耐腐蚀钢筋的生产方法包括:

冶炼工序: 在转炉中进行钢水冶炼, 出钢温度 1630°C, 出钢加硅锰 (FeMn₆₅S₁₇) 27kg/t, 加入硅铁 (FeSi₇₂) 14kg/t, 铬铁 (Cr 含量 65%) 30kg/t, 钼铁 (Mo 含量 55%) 3kg/t; 出钢过程全程吹氩气, 底吹压力控制: 前期为 0.4MPa, 后期为 0.3MPa。

精炼工序: 磷铁 (P 含量 23%, 加入量 1kg/t), 铜板 (Cu 含量 99%, 加入量 2kg/t), 铌铁 (Nb 含量 65%, 加入量 0.3kg/t), 镍板 (镍含量 99%, 2kg/t); 精炼软搅拌时间 12min, 连浇出钢温度 1600°C。

连铸工序: 渣层厚度为 8mm; 拉速 2.8m/min; 结晶器水流量 2000±50L/min, 结晶器电磁搅拌电流 350A, 频率 3Hz; 末端电磁搅拌电流 400A, 频率 10Hz;

铸坯截面尺寸 140mm×140mm（宽×高）。

铸坯加热及热连轧工序：加热温度为 1220℃，上冷床温度为 880℃，轧后自然冷却至室温，钢筋直径 20mm。

试验例

本试验例提供了各实施例和对比例得到的钢筋的性能，具体如下：

屈服强度的测试方法：参见国标 GB/T228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分：室温试验方法进行测试，并计算强屈比，强屈比=抗拉强度/屈服强度，测试结果见表 1。

抗拉强度的测试方法：参见国标 GB/T228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分。

断后延伸率的测试方法：参见国标 GB/T228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分。

最大力总伸长率：参见国标 GB/T228.1-2010 金属材料拉伸试验第 1 部分。

腐蚀速率相对值：分别对实施例、对比例制备的耐腐蚀钢筋的耐氯盐腐蚀性能进行测试，并计算其耐氯盐腐蚀性相比型号为 HRB400 型钢筋的提升倍数；具体测试方法为：截取长度为 100mm 的耐腐蚀钢筋，采用车床进行车削加工获得直径为 10mm 的测试试样，在温度为 35℃、湿度为 70%的条件下，将测试样品放入腐蚀溶液中进行盐雾腐蚀试验，测试腐蚀溶液为 5wt%的氯化钠溶液，其 pH 值为 7.0，测试时间为 14 天，采用电子显微天平测试腐蚀前后测试样品的重量。计算公式为：腐蚀速率相对值=（耐蚀钢筋腐蚀前后的重量变化值/HRB400 腐蚀前后的重量变化值）×100%。

铁素体和珠光体测试方法：采用蔡司光学显微镜在放大 200 倍的视场下分别观察实施例和对比例制备的耐腐蚀钢筋的组织类型，并计算其中的铁素体体积占比。铁素体在光学显微镜下显示白色，珠光体显示黑色，通过颜色差，计算当面面积中各组织的体积比。结果见表 1 和表 2。

表 1 各实施例和对比例钢筋的力学性能测试结果

示例	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	断后延伸 率/%	最大力总伸 长率/%	强屈比
实施例 1	435	580	34	23	1.33
实施例 2	448	605	33	23	1.35
实施例 3	456	610	30	21	1.34
实施例 4	465	610	30	20	1.31
实施例 5	435	575	38	26	1.32
实施例 6	480	635	34	21	1.32
实施例 7	430	583	38	27	1.36

实施例 8	433	575	38	26	1.33
对比例 1	440	565	25	15	1.28
对比例 2	390	500	38	26	1.28
对比例 3	450	568	28	13	1.26
对比例 4	425	630	10	6	1.48
对比例 5	545	687	12	3	1.26

表 2 各实施例和对比例钢筋的耐蚀性测试结果

示例	组织类型	铁素体占比 /%	氯盐腐蚀环境下，与普通 HRB400 相比，腐蚀速率相对值/%
实施例 1	铁素体+珠光体	65	22
实施例 2	铁素体+珠光体	65	20
实施例 3	铁素体+珠光体	60	16
实施例 4	铁素体+珠光体	55	27
实施例 5	铁素体+珠光体	69	30
实施例 6	铁素体+珠光体	50	30
实施例 7	铁素体+珠光体	75	34
实施例 8	铁素体+珠光体	73	33
对比例 1	铁素体+珠光体	45	88
对比例 2	铁素体+珠光体	85	95
对比例 3	铁素体+珠光体	40	90
对比例 4	铁素体+珠光体	20	90
对比例 5	铁素体+贝氏体	5	30

从上述结果中可知，本申请在不添加 Cr、Ni 或 Mo 的情况下就可以具有较好的耐蚀性，且本申请耐腐蚀钢筋可以兼具耐蚀性、力学性能和低成本。进一步地，本申请提供的耐腐蚀钢筋的腐蚀速率相对值不大于 35%。

从对比例 1-4 可以看出，本申请通过控制 Si/Mn、Cu+P+S 可以使钢筋兼具较好耐腐蚀性和力学性能，强度-塑性协调匹配。与对比例 5 相比可以看出，与加入 Cr 的钢筋相比，本申请提供的钢筋的力学性能更优，比如断后延伸率和最大力总伸长率，说明本申请在不添加 Cr、Ni 和 Mo 的情况下可以使钢筋具有较好的强度的和力学性能，且成本更低。

显然，上述实施例仅仅是为清楚地说明所作的举例，而并非对实施方式的

限定。对于所属领域的普通技术人员来说，在上述说明的基础上还可以做出其它不同形式的变化或变动。这里无需也无法对所有的实施方式予以穷举。而由此所引申出的显而易见的变化或变动仍处于本申请的保护范围之内。

权 利 要 求 书

1.一种耐腐蚀钢筋，其特征在于，按重量百分比计，包括：C：0.03-0.15%，Si：0.8-2.0%，Mn：0.8-2.0%，Cu：0.10-0.50%，P：0.08-0.2%，S：0.005-0.01%， $Nb \leq 0.1\%$ ， $V \leq 0.2\%$ ， $Ti \leq 0.1\%$ ， $Al \leq 0.1\%$ ，余量为Fe以及不可避免的杂质；其中， $0.6 \leq Si/Mn \leq 2.0$ ， $0.25 \leq Cu+P+S \leq 0.62$ 。

2.根据权利要求1所述的耐腐蚀钢筋，其特征在于，满足（1）-（5）中的至少一项：

- （1）所述C为0.05-0.12%；
- （2）所述Si为0.9-1.7%；
- （3）所述Mn为0.9-1.8%；
- （4）所述Cu为0.2-0.3%；
- （5）所述P为0.11-0.18%。

3.根据权利要求1或2所述的耐腐蚀钢筋，其特征在于，满足（1）-（4）中的至少一项：

- （1）所述C为0.06-0.09%；
- （2）所述Si为1.0-1.3%；
- （3）所述Mn为1.0-1.5%；
- （4）所述P为0.13-0.17%。

4.一种权利要求1-3任一项所述耐腐蚀钢筋的生产方法，其特征在于，其工序包括：冶炼、精炼、连铸、铸坯加热和热连轧。

5.根据权利要求4所述的生产方法，其特征在于，所述连铸工序满足（1）-（4）中的至少一项：

- （1）采用低碳钢保护渣，渣层厚度为8-10mm；其中，低碳钢中的碳含量不大于0.15%；
- （2）结晶器水流量为1950-2050L/min；
- （3）结晶器电磁搅拌电流330A-370A，频率3-5Hz；末端电磁搅拌电流380A-420A，频率10-12Hz；
- （4）拉速为2.5-3.5m/min。

6.根据权利要求4或5所述的生产方法，其特征在于，所述冶炼工序满足（1）-（3）中的至少一项：

- （1）出钢温度为1600-1640°C；
- （2）出钢脱氧合金化按照硅锰-硅铁-石灰顺序加入；所述硅锰的加入量为10-30kg/t，硅铁的加入量为15-30kg/t；
- （3）底吹压力：前期0.4-0.5MPa，后期0.3-0.4MPa。

7.根据权利要求4或5所述的生产方法，其特征在于，所述铸坯加热工序：加热的温度为1200-1250℃。

8.根据权利要求4或5所述的生产方法，其特征在于，所述热连轧工序：上冷床温度为850-900℃。

9.根据权利要求4或5所述的生产方法，其特征在于，所述精炼工序满足(1)-(3)中的至少一项：

- (1) 所述精炼工序包括加入磷铁和铜的步骤；
- (2) 所述精炼的搅拌时间不低于10min；
- (3) 出钢温度为1580-1600℃。

10.根据权利要求9所述的生产方法，其特征在于，所述磷铁中磷的质量含量为20-25%；

所述磷铁的加入量为3-6kg/t；

所述铜的加入量为1.5-3.5kg/t。