

一种低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢及其制造方法

5 **技术领域**

本发明涉及齿轮钢制造领域，尤其涉及一种低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢及其制造方法。

背景技术

10 齿轮钢是汽车、铁路、船舶、工程机械领域使用特殊合金钢中要求较高的关键材料之一，是保证安全的核心部件的制造材料。随着工业技术发展，齿轮钢正朝着高性能、长寿面、齿轮运行平稳、低噪音、安全性、低成本、易加工、多品种等方向发展。

 Mn-Cr 系齿轮钢是一种高标准轿车齿轮用钢系列，该系列钢种淬透性好，以应用范围最广的 20MnCr5 来说，其淬透性可以达到 J5mm=36-45HRC，
15 J9mm=34-40HRC，J15mm=28-34HRC。淬透性值的大小反映了不同大小齿轮的芯部硬度，而淬透性带宽对齿轮热处理变形具有重要影响。国外高品质齿轮钢淬透性带宽可以控制在 4HRC 以内，而国内先进水平能达到 4~6HRC，与国外控制水平还存在一定差距。由于低淬透性窄带宽齿轮钢
20 易锻造成型，切削性能良好，热处理变形小，有利于用户部分零件的加工制造，目前对低淬透性窄带宽齿轮钢的需求量也开始增加，而 20MnCr5 的高淬透性不再能满足用户的特殊要求。

 齿轮钢的淬透性和淬透性带宽的控制，主要取决于化学成分及其均匀性，根据钢中碳元素和合金元素对淬透性各点硬度值的影响，确定该钢的
25 内控成分范围。

 如中国专利申请 CN108193029A 公布了一种齿轮钢窄淬透性带宽的控制方法，其采用生产数据对淬透性计算公式进行优化，得到适合齿轮钢钢种的计算参数，然后根据优化后的计算公式计算影响淬透性的元素 C、Si、Mn、Cr、Ni、Mo、Ti、B 的成分上下限，要求满足 J5、J9、J11、J13 处的
30 淬透性带宽小于 3.5HRC，得到的成分范围与 $\Delta C \leq \pm 0.01\%$ 、

5 $\Delta\text{Si} \leq \pm 0.02\%$ 、 $\Delta\text{Mn} \leq \pm 0.02\%$ 、 $\Delta\text{Cr} \leq \pm 0.01\%$ 、 $\Delta\text{Ni} \leq \pm 0.01\%$ 、 $\Delta\text{Mo} \leq \pm 0.01\%$ 、 $\Delta\text{Ti} \leq \pm 0.01\%$ 、 $\Delta\text{Al} \leq \pm 0.01\%$ 、 $\Delta\text{B} \leq \pm 0.005\%$ 、 $\Delta\text{S} \leq \pm 0.002\%$ 进行对比，最终确定最窄的控制范围作为具有窄淬透性带宽要求的齿轮钢的成分控制范围，采用 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 的低过热度浇注，保证连铸坯加热温度波动 $\leq \pm 7^\circ\text{C}$ ，保温时间波动 $\leq \pm 5\text{min}$ ，得到淬透性带宽小于 4HRC 的齿轮钢棒材。但该专利申请设计的成分控制要求极高，不易于工业大生产，且 J5、J9 处硬度值仍偏高。

中国专利申请 CN115029618A 公布了一种窄淬透性冷锻齿轮钢及其制造方法，其质量百分比计，包括：C：0.15~0.17%，Si：0.10~0.20%，Mn：
10 1.0~1.10%，Cr：0.80~0.90%，Al：0.02~0.04%；该冷锻齿轮钢淬透性满足 J5mm=30~34HRC，J9mm=21~25HRC，虽然淬透性值较低，但其强度也下降，从而不能满足低淬透性钢对强度的要求。

中国专利申请 CN111945070A 公布了一种窄淬透性齿轮钢及其制造方法。窄淬透性齿轮钢按质量百分比计，包括：C：0.19~0.21%，Si：0.22~0.28%，
15 Mn：0.82~0.87%，Cr：0.52~0.58%，Ni：0.50~0.55%，Mo：0.19~0.21%，Al：0.025~0.035%，N：0.0080~0.0120%以及余量的 Fe 及不可避免的杂质，其中，Al/N=3~3.6，获得的窄淬透性齿轮钢不仅满足钢种淬透性要求，同时降低钢种成分带来的对表面质量的影响倾向，有效提高窄淬透性齿轮钢表面质量。该专利申请通过调控 Ni 的含量以及优化 Al/N 比，减少了钢表
20 面裂纹敏感性，使齿轮钢的末端淬透性满足 J4.7mm=36-41HRC，J7.9mm=28-32HRC，但是该发明的齿轮钢淬透性值仍不能满足当前用户加工要求。

发明内容

25 本发明的目的在于提供一种低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢及其制造方法，该 Mn-Cr 系齿轮圆钢满足 J5=33~36HRC，J9=25~28HRC，J15=20~24HRC，J9 之前淬透性带宽 $\leq 3\text{HRC}$ ，达到降低热处理变形的目的；并且屈服强度 $\geq 800\text{MPa}$ 、抗拉强度 $\geq 1100\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 12\%$ 、断面收缩率 $\geq 50\%$ 、冲击功 $\text{KU2} \geq 80\text{J}$ ，晶粒度不小于 6 级。本发明所述齿轮圆钢可以
30 满足新能源汽车等应用场景对齿轮钢材料的性能要求，提高新能源汽车用

钢性能的稳定性和安全性。

为达到上述目的，本发明的技术方案是：

一种低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其化学成分质量百分比为：

C: 0.15~0.18%、Si: 0.040~0.10%、Mn: 1.10~1.40%、 $P \leq 0.02\%$ 、S:
5 0.015~0.030%、Cr: 1.00~1.20%、Mo: 0.006~0.02%、Ni: 0.020~0.10%、
Al: 0.020~0.050%、N: 0.007~0.015%、 $Al/N \geq 2.0$ 、Nb: 0.004~0.03%、 $[O] \leq 0.0015\%$ ，余量包含 Fe 和其它不可避免杂质；且，齿轮圆钢制作端淬试样的端部获得全马氏体区的长度 b 范围为： $0.70 \leq b \leq 1.16$ ， $b=0.22h-0.45$ ，
 $h=(6.9[Mn]^2+3.2[Si]+22.6[Cr]^2+23.1[Mo]+(13.0[Cr]+2.5[Mo]+9.7)[Ni]+2.5)[C]$ ；

10 同时，淬透性系数 k 满足： $1.18 \leq k \leq 1.65$ ，

$$k=0.54*[C]*(-1.12+5.1*[Mn])*(1+0.7*[Si])*(1+2.16*[Cr])。$$

进一步，本发明所述齿轮圆钢化学成分中，余量为 Fe 和其它不可避免杂质。

优选的，所述不可避免杂质中， $Ti \leq 0.003\%$ 、 $B \leq 0.0004\%$ 、 $Ca \leq 0.003\%$ 。

15 优选的，成分中有害元素， $As \leq 0.02\%$ 、 $Sn \leq 0.02\%$ 、 $Pb \leq 0.012\%$ 、 $Sb \leq 0.012\%$ 、 $Bi \leq 0.012$ ，且有害元素总和 $\leq 0.05\%$ 。

本发明所述齿轮圆钢的淬透性实测值满足 J5=33~36HRC，J9=25~28HRC，J15=20~24HRC，且 J9 前淬透性带宽 $\leq 3HRC$ 。在一些实施方案中， $1HRC \leq J9$ 前淬透性带宽 $\leq 3HRC$ 。

20 本发明所述齿轮圆钢的屈服强度 $\geq 800MPa$ ，抗拉强度 $\geq 1100MPa$ ，延伸率 $\geq 12\%$ ，断面收缩率 $\geq 50\%$ ，冲击功 KU2 $\geq 90J$ ，晶粒度不小于 6 级。

在一些实施方案中，本发明所述齿轮圆钢的屈服强度为 800~820MPa。

在一些实施方案中，本发明所述齿轮圆钢的抗拉强度为 1100~1150MPa。

25 在一些实施方案中，本发明所述齿轮圆钢的延伸率为 12%~19%。

在一些实施方案中，本发明所述齿轮圆钢的断面收缩率为 50%~65%。

在一些实施方案中，本发明所述齿轮圆钢的冲击功 KU2 为 90~100J。

在一些实施方案中，本发明所述齿轮圆钢的晶粒度为 7.0~9.0 级。

在本发明所述齿轮圆钢的成分设计中：

30 C: C 是影响齿轮钢淬透性最重要的元素，对末端淬透性数值影响较

大，也是钢中最基本的有效强化元素。由于渗碳齿轮钢要保证齿轮芯部的韧性以及一定的强度，本发明中将 C 含量控制在 0.15~0.18%。

5 Si: Si 在钢中具有较强的固溶强化作用，以置换方式替代 Fe 原子，从而阻碍位错运动，可以显著提高钢的屈服强度；同时，Si 能在一定程度上降低钢的临界冷却速度，使淬透性值增大，对末端淬透性 J5mm 以后数值影响较大，但主要提高过冷奥氏体在中温区的稳定性，而对 650°C~700°C 的高温区影响很小，甚至降低其稳定性。本发明中要求 Si 的含量范围为 0.040~0.10%。

10 Mn: Mn 具有固溶强化、细化晶粒从而提高钢强度的作用，并能显著提高钢的淬透性，对末端淬透性 J7mm 以后数值影响更大；但是 Mn 可以降低钢的 A_1 温度，促进奥氏体晶粒长大，增加了钢材的过热敏感性。因此在本发明中将 Mn 的含量控制在 1.10~1.40%。

15 Cr: Cr 能够提高珠光体的形核功和转变激活能，降低珠光体的形核率和长大速度，增加了过冷奥氏体的稳定性，提高钢的淬透性，得到强化效果，并对冲击韧性有良好的影响。Cr 对 J5、J9、J15 处数值影响较大，在本发明中将 Cr 控制在 1.00~1.20% 范围内。

20 Ni: Ni 可以有效提高齿轮钢的芯部韧性，降低韧脆转变温度，提高低温冲击性能，同时可以细化组织，得到强化效果，但 Ni 含量过高会降低齿轮钢热加工后的切削性。Ni 对 J5 有一定影响，对 J9、J15 影响较大，本发明中要求 Ni 的含量范围为 0.020~0.10%。

25 Mo: Mo 与 Cr 的合理配合可使钢的淬透性和回火抗力得到明显提高，并且 Mo 能够细化晶粒；Mo 含量过高，会导致晶界铁素体薄膜的形成，不利于钢的热塑性，增加钢的再热裂纹倾向，且提高了成本。Mo 对 J5 之前数值影响不明显，对大于 J7 位置处的数值影响较大。因此本发明中 Mo 含量范围为 0.006~0.020%。

本发明中要求 P 含量 $\leq 0.02\%$ 。在一些实施方案中，P 含量范围为 0.005~0.02%，例如 0.007%、0.010%。

本发明中要求 [O] 含量 $\leq 0.0015\%$ 。在一些实施方案中，[O] 含量范围为 0.0010~0.0015%，例如 0.0012%。

30 淬透性是指钢奥氏体化后在淬火时获得马氏体的能力，其大小与圆钢

截面各点的冷却速度有关，冷却速度高于钢的临界淬火速度，就会获得全马氏体。C 是影响淬透性硬度的主要成分，Si、Mn、Cr、Ni 会降低钢的临界淬火速度，提高钢的淬透性。为了保证本发明齿轮钢的淬透性，要求本发明圆钢制成的端淬试样端部获得全马氏体区的长度 b 满足：

5 $0.70 \leq b \leq 1.16$, $b = 0.22h - 0.45$,

$$h = (6.9[\text{Mn}]^2 + 3.2[\text{Si}] + 22.6[\text{Cr}]^2 + 23.1[\text{Mo}] + (13.0[\text{Cr}] + 2.5[\text{Mo}] + 9.7)[\text{Ni}] + 2.5)[\text{C}].$$

在一些实施方案中，b 满足： $0.80 \leq b \leq 1.15$ 。

端淬试样是根据 GB/T 225-2006《钢淬透性的末端淬火试验方法》将本发明齿轮圆钢制成标准的端淬试样。

10 为了保证本发明齿轮钢的淬硬性，同时限制圆钢淬火后端面到半马氏体区的距离，根据计算和数据分析要求本发明圆钢的淬透性系数 k 满足 $1.18 \leq k \leq 1.65$;

$$k = 0.54 * [\text{C}] * (-1.12 + 5.1 * [\text{Mn}]) * (1 + 0.7 * [\text{Si}]) * (1 + 2.16 * [\text{Cr}]).$$

在一些实施方案中，k 满足： $1.25 \leq k \leq 1.55$ 。

15 其中，C 是影响淬透性的主要元素，C 与碳化物元素形成的碳化物的体积和尺寸会影响端淬试样末端不同距离处的硬度，同时碳化物对奥氏体晶粒的钉扎作用会影响奥氏体晶粒度，从而影响淬透性；Mn、Cr、Si 对贝氏体转变的推迟作用远大于珠光体转变的影响，Mo 对珠光体转变的推迟作用远大于贝氏体，Ni 也会推迟珠光体转变，因此 Mn、Cr、Si、Mo 和 Ni
20 通过增大过冷奥氏体的稳定性，提高圆钢淬透性。

为了使本发明的齿轮钢满足高温渗碳工艺，控制 Al: 0.020~0.050%、N: 0.007~0.015%、Al/N ≥ 2.0 、Nb: 0.004~0.03%。这是因为，Al 与 N 形成的 AlN 在轧制加热和高温渗碳时能有效阻碍奥氏体晶粒长大，细化奥氏体晶粒，但 AlN 在 940°C 左右会发生聚集和溶解，随温度升高，Al 元素对奥氏体晶粒尺寸的抑制起到有害作用；铌是非常有效的细化晶粒的合金元素，Nb (C, N) 可以钉扎晶界，阻碍奥氏体晶粒长大，有效地降低渗碳淬火变形。但是当铌含量超过一定值时，铸坯中 Nb 元素的碳氮化物析出相不能回溶到齿轮钢基体中，随着后续热加工或热处理过程的执行，一些析出相会发生粗化，粗大的析出相不能在高温渗碳过程中阻止奥氏体晶粒的
30 长大。因此，本发明设计的齿轮钢中 Al 的含量为 0.020~0.050%，Nb 的含

量为 0.004~0.03%。本发明中要求 $Al/N \geq 2.0$ 。在一些实施方案中， $2.0 \leq Al/N \leq 4.0$ 。

5 本发明所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢的制造方法，其包括如下步骤：

1) 冶炼、铸造

按上述成分冶炼、浇铸成铸坯；

2) 加热

10 预热段温度为 840~880℃，加热段温度控制在 1120~1175℃，均热段温度为 1150~1230℃，加热炉中的加热总时长不小于 4h；

3) 轧制

控制开轧温度为 1100~1170℃，终轧温度为 950~1000℃；

4) 淬火+回火

15 一次淬火温度为 850~910℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；二次淬火温度为 800~830℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；回火温度为 150~200℃，保温时间 60~150min，回火后空冷至室温。

在一些实施方案中，加热炉中的加热总时长为 4~6h，例如 4~5.5h。

20 优选的，所述冶炼采用电炉或转炉，再经过 LF（Ladle Furnace）精炼和 VD（Vacuum Degassing）真空脱气；在 LF 精炼过程中，精炼时间 $\geq 50\text{min}$ ，渣中的 FeO 含量小于 1.0wt%，白渣时间 $\geq 20\text{min}$ ；在 VD 真空脱气处理过程中，控制真空度 $\leq 66.7\text{Pa}$ ，高真空时间 $\geq 20\text{min}$ ，镇静时间 $\geq 10\text{min}$ ，VD 终温温度为 1550℃~1580℃。在一些实施方案中，精炼时间为 25 50~65 分钟。在一些实施方案中，白渣时间为 20~30 分钟。在一些实施方案中，高真空时间为 20~35 分钟。在一些实施方案中，镇静时间为 10~20 分钟。

30 优选的，所述铸造采用连铸，为了保证连铸坯从表到里的成分均匀性，联合钢水过热度控制，同时根据本发明钢对 Cr、Ni、Mo 窄成分要求，窄淬透性带宽要求，以及结合铸坯断面尺寸，将结晶器电磁搅拌的频率控制

为 2.0~3.0HZ，电流为 150~300A；末端电磁搅拌的频率为 8.0~8.5HZ，电流为 300~350A；钢水过热度控制在 22~38℃，连铸拉坯速度控制在 0.62~0.68 m/min 之间。

5 在本发明所述制造方法中，

VD 真空脱气处理的全过程均可以具体采用底吹氮气增氮，以防止钢水的二次氧化，提高钢水的纯净度。

连铸工艺中控制结晶器电磁搅拌的频率为 2.0~3.0HZ，电流为 150~300A，末端电磁搅拌的频率为 8.0~8.5HZ，电流为 300~350A。在连铸
10 工艺中，通过电磁搅拌，可以促进尺寸较大的夹杂物尽快上浮，提高钢液的纯净度，防止夹杂物聚集，减小夹杂物尺寸，降低夹杂物对钢材性能的危害。

连铸坯加热中预热段温度与现有技术相比温度提高 40℃，因此需要热装进炉，增加了从预热段到加热段的加热速度，使成分更均匀化，促进析
15 出相的溶解，以便于在轧制过程和冷却过程弥散析出，使圆钢淬透性稳定。

轧制过程中，控制开轧温度为 1100~1170℃，终轧温度为 950~1000℃；空冷（如上冷床），得到铁素体+珠光体组织，避免吹冷风和喷水，防止产生贝氏体组织，引起组织不均匀，对后续热处理得到圆钢性能产生影响；

热处理工艺为淬火+回火，其中，一次淬火温度为 850~910℃，保温时
20 间 30~60min，油冷或水冷至室温，促进形成更多形核质点，使奥氏体晶粒细化；二次淬火温度为 800~830℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；回火温度为 150~200℃，保温时间 60~150min，使碳化物充分弥散析出，回火后空冷至室温。

相较于现有技术，本发明的优点以及有益效果：

25 本发明基于物理冶金单因子法，研究 C、Si、Mn、Cr、Mo、Ni 元素对淬透性的影响，设计、制造一种低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢，满足 J5=33~36HRC，J9=25~28HRC，J15=20~24HRC，J9 前淬透性带宽 ≤ 3HRC，可以满足用户热处理变形小的目的；同时力学性能满足屈服强度 ≥ 800MPa、抗拉强度 ≥ 1100MPa、延伸率 ≥ 12%、断面收缩率 ≥ 50%、冲击功 KU2 ≥ 90J。
30

与中国专利申请 CN115029618A、CN111945070A 相比，本发明所述齿轮圆钢降低了 J5、J9 和 J15 值，满足低淬透性齿轮钢加工和使用要求，更加适用于新能源汽车变速器齿圈等对热处理变形要求严格的应用场景。

与中国专利申请 CN115029618A 相比，本发明所述齿轮圆钢对 C、Si、
5 Mn、Cr、Mo、Ni 元素含量关系提出更明确要求，利用元素间的互相作用，在满足低淬透性要求下其力学性能没有降低，且应用的场景不同。

本发明所述齿轮圆钢采用二次淬火+回火工艺可实现高强度、高韧性的匹配，满足高强钢使用要求。

10 **附图说明**

图 1 为本发明实施例 1~6 和对比例 1~2 的淬透性曲线；

图 2 为本发明实施例 2 淬火+回火处理后的微观组织金相照片（放大
倍数 500x）。

15 **具体实施方式**

下面将结合说明书附图和具体的实施例对本发明作进一步的解释和说明，然而该解释和说明并不对本发明的技术方案构成不当限定。

本发明所述低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮钢实施例的成分见表 1 和表 2，余量为 Fe 和不可避免杂质。

20 实施例齿轮圆钢中成分系数见表 3，可知各实施例圆钢马氏体区的长度 b 范围在 0.70~1.16 之间，同时淬透性系数 k 的范围在 1.18~1.65 之间。

本发明实施例的制造方法中的工艺参数见表 4-1、表 4-2、表 5，采用电炉冶炼—LF 精炼—VD 真空脱气—连铸—加热—轧制—缓冷，包括以下步骤：

25 1) 冶炼、铸造

按表 1 和表 2 的成分冶炼、浇铸成铸坯；冶炼采用电炉，再经过 LF 精炼和 VD 真空脱气；在 LF 精炼过程中，精炼时间 $\geq 50\text{min}$ ，渣中的 FeO 含量小于 1.0wt%，白渣时间 $\geq 20\text{min}$ ；在 VD 真空脱气处理过程中，控制真空度 $\leq 66.7\text{Pa}$ ，高真空时间 $\geq 20\text{min}$ ，镇静时间 $\geq$
30 10min，VD 终温温度为 1550℃~1580℃，VD 真空脱除处理中全过

程均采用底吹氮气增氮；铸造采用连铸，将结晶器电磁搅拌的频率控制为 2.0~3.0HZ，电流为 150~300A；末端电磁搅拌的频率为 8.0~8.5HZ，电流为 300~350A；钢水过热度控制在 22~38℃，连铸拉坯速度控制在 0.62~0.68 m/min 之间；

5 2) 加热

预热段温度为 840~880℃，加热段温度控制在 1120~1175℃，均热段温度为 1150~1230℃，加热炉中的加热总时长不小于 4h；

3) 轧制

控制开轧温度为 1100~1170℃，终轧温度为 950~1000℃；

10 4) 淬火+回火

一次淬火温度为 850~910℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；二次淬火温度为 800~830℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；回火温度为 150~200℃，保温时间 60~150min，回火后空冷至室温。

15 采用金相法观察步骤 3) 获得的齿轮圆钢在热轧态的显微组织，结果显示实施例 1~6 的齿轮圆钢在热轧态的显微组织均为铁素体+珠光体。

获得的圆钢根据 GB/T 225-2006 进行端淬实验，测定距离试样末端不同位置处的硬度(硬度测试标准为：GB/T 230.1、GB/T 230.2、GB/T 230.3)，见表 6 和图 1 所示。

20 根据 GB/T 228.1-2010 和 GB/T 229-2007 进行室温拉伸和室温冲击，力学性能实测值见表 7 所示。

25 由于各实施例和对比例经冶炼后得到的不同炉次的钢，各实施例和对比例对应的每一炉钢可以制得多个批次的棒材，同一实施例或对比例得到的多个批次的棒材在 J5、J9 和 J15 三点处的淬透性并非完全相同，因此在表 6 中，实施例 1~6 和对比例 1、2 在 J5、J9 和 J15 三点处的淬透性值是一个范围。

从表 6 可以看出，相较于对比例 1、2，实施例 1~6 的圆钢淬透性带宽更窄，在 J9 前能够达到 $\leq 3\text{HRC}$ ；且 J5、J9、J15 数值明显低于对比例，具有优异的技术效果，满足本发明对低淬透性窄带宽的要求。

30 由表 7 可知，实施例的屈服强度 $\geq 800\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 1100\text{MPa}$ ，延

伸率 $\geq 12\%$ ，断面收缩率 $\geq 50\%$ ，冲击功 $KU2\geq 90J$ ，达到本发明设计要求，具有优异的综合力学性能。 $KU2$ 表示 U 型缺口试样在夏比摆锤冲击试验中的冲击吸收能量。

5 由图 2 可知，本发明实施例的齿轮圆钢经过淬火+回火处理后，得到细小的回火马氏体组织。

将实施例 1~6 的热轧圆钢在 $980^{\circ}C$ 保温 4 小时后，按照标准 GB/T 6394-2017《金属平均晶粒度测定方法》测试晶粒度，测试结果如表 8 所示。

本发明方法制备的低淬透性窄带宽齿轮圆钢满足 $J5=33\sim 36HRC$ ，
10 $J9=25\sim 28HRC$ ， $J15=20\sim 24HRC$ ， $J9$ 之前淬透性带宽 $\leq 3HRC$ ；同时控制 Al、N 含量，以及添加 Nb 元素，使热轧圆钢在 $980^{\circ}C$ 保温 4 小时后的晶粒度不小于 6 级。故采用本发明方法所制备的低淬透性窄带宽齿轮圆钢能够满足新能源车高温渗碳齿圈的加工要求。

以上实施例是为了使本领域内的技术人员能够了解本发明的内容并
15 据以实施，本发明的保护范围不限于上述实施例。所以，凡依据本发明所揭示的原理、设计思路所作的等同变化或修饰，均在本发明的保护范围之内。

表 1：实施例和对比例的主要化学成分（wt.%）

编号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Al	N	O	Ti	B	Ca
实施 例 1	0.163	0.068	1.10	0.010	0.017	0.025	1.18	0.010	0.010	0.042	0.011	0.0013	0.0006	0.0001	0.0008
实施 例 2	0.174	0.056	1.25	0.009	0.020	0.050	1.04	0.009	0.006	0.037	0.010	0.0015	0.0003	0.0001	0.0017
实施 例 3	0.152	0.060	1.40	0.008	0.026	0.086	1.01	0.006	0.027	0.022	0.008	0.0014	0.0004	0.0001	0.001
实施 例 4	0.159	0.083	1.15	0.009	0.018	0.040	1.03	0.008	0.011	0.047	0.014	0.0013	0.0004	0.0001	0.0014
实施 例 5	0.165	0.091	1.13	0.007	0.019	0.028	1.10	0.007	0.020	0.035	0.012	0.0015	0.0005	0.0001	0.0008
实施	0.156	0.040	1.20	0.008	0.030	0.031	1.08	0.020	0.007	0.036	0.013	0.0012	0.0004	0.0001	0.0008

例 6															
对比 例 1	0.200	0.10	1.30	0.018	0.022	0.25	1.20	-	-	0.034	0.011	-	-	0.0002	-
对比 例 2	0.168	0.11	1.01	0.009	0.015	-	0.82	-	-	0.025	0.045	0.0022	0.002	0.0007	0.002

备注：对比例 1-CN113444979A，对比例 2-CN115029618A。

表 2：实施例的有害元素化学成分（wt.%）

编号	As	Sn	Pb	Sb	Bi	总和
实施例 1	0.0038	0.0065	0.0002	0.0001	0.0006	0.0112
实施例 2	0.0033	0.0063	0.0002	0.0001	0.0002	0.0101
实施例 3	0.0034	0.0086	0.0005	0.0001	0.0001	0.0127
实施例 4	0.0035	0.0091	0.0004	0.0001	0.0003	0.0133
实施例 5	0.0037	0.0068	0.0006	0.0001	0.0004	0.0116
实施例 6	0.0033	0.007	0.0004	0.0001	0.0005	0.0113

5

表 3：实施例和对比例圆钢的成分系数

	马氏体区的长度 b	淬透性系数 k
实施例 1	1.11	1.36
实施例 2	1.05	1.54
实施例 3	0.93	1.52
实施例 4	0.84	1.28
实施例 5	0.99	1.37
实施例 6	0.93	1.34
对比例 1	1.90	2.12
对比例 2	0.48	1.01

备注：对比例 1-CN113444979A，对比例 2-CN115029618A。

表 4-1

	LF 精 炼时 间 min	白 渣 时 间 min	真 空 脱 气 镇 静 时 间 min	结 晶 器 电 磁 搅 拌 频 率 HZ	结 晶 器 电 磁 搅 拌 电 流 A	末 端 电 磁 搅 拌 频 率 HZ	末 端 电 磁 搅 拌 电 流 A	中 间 包 钢 水 过 热 度 ℃	连 铸 拉 坯 速 度 m/min	预 热 段 温 度 ℃	加 热 段 温 度 ℃	均 热 段 温 度 ℃	加 热 时 间 h	开 轧 温 度 ℃	终 轧 温 度 ℃
实施例 1	50	28	15	2.2	160	8.0	300	28	0.62	840	1120	1158	5.5	1115	985
实施例 2	53	25	16	2.3	200	8.1	310	30	0.63	850	1135	1165	4.5	1120	993
实施例 3	55	23	17	2.4	260	8.3	320	25	0.65	860	1145	1190	4.6	1130	1000
实施例 4	60	20	16	2.5	300	8.2	330	26	0.66	855	1155	1211	4.2	1145	990
实施例 5	65	22	17	2.7	180	8.5	340	32	0.68	880	1160	1220	4	1155	960
实施例 6	58	26	14	2.3	220	8.4	350	35	0.64	875	1170	1175	5	1165	950
对比例 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		-		-	-
对比例 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		1160		-	921

备注：对比例 1-CN113444979A，对比例 2-CN115029618A。

表 4-2

	LF 精炼过程中 渣中 FeO 含量 wt%	VD 真空脱气 中真空度 Pa	VD 真空脱气中 高真空时间 min	VD 终温温度 ℃
实施例 1	0.70	47	35	1550
实施例 2	0.60	53	30	1560
实施例 3	0.50	57	27	1565
实施例 4	0.45	60	25	1570
实施例 5	0.35	63	23	1575

实施例 6	0.30	66.7	20	1580
对比例 1	-	-	-	-
对比例 2	-	-	-	-

表 5

编号	一次淬火	二次淬火	回火
实施例 1	850℃×30min 油冷	805℃×60min 油冷	155℃×150min 空冷
实施例 2	865℃×50min 油冷	815℃×50min 油冷	165℃×120min 空冷
实施例 3	870℃×60min 油冷	825℃×40min 油冷	175℃×90min 空冷
实施例 4	880℃×40min 油冷	830℃×45min 油冷	185℃×80min 空冷
实施例 5	890℃×50min 油冷	810℃×52min 油冷	190℃×70min 空冷
实施例 6	910℃×55min 油冷	820℃×30min 油冷	200℃×60min 空冷

表 6：实施例和对比例圆钢的淬透性数值

	淬透性/HRC	J9 前淬透性带宽
实施例 1	J5/33~35,J9/25~27,J15/20~22	≤3HRC
实施例 2	J5/34~35,J9/25~26,J15/21~23	
实施例 3	J5/34~36,J9/26~28,J15/20~23	
实施例 4	J5/33~35,J9/25~28,J15/22~24	
实施例 5	J5/34~36,J9/26~27,J15/21~24	
实施例 6	J5/33~36,J9/26~28,J15/20~24	
CN113444979A	J5/44.4,J9/39.1,J15/34.5	≤4HRC
CN115029618A	J5/32.5,J9/24.1	

5 注：J5 表示距离端淬试样末端 5mm 处的硬度，J9 表示距离端淬试样末端 9mm 处的硬度，J15 表示端淬试样末端 15mm 处的硬度。

表 7：实施例圆钢的力学性能

	屈服强度 MPa	抗拉强度 MPa	延伸率 %	断面收缩 率	室温冲击功 KU2
实施例 1	805	1130	17.5	59	90
实施例 2	810	1120	16.5	56	94
实施例 3	812	1135	15.5	58	96
实施例 4	807	1150	17.5	61	97
实施例 5	820	1110	18.0	63	97
实施例 6	802	1140	18.5	60	90

表 8：实施例圆钢的晶粒度

	实施例 1	实施例 2	实施例 3	实施例 4	实施例 5	实施例 6
晶粒度	8.0	7.0	9.0	8.5	9.0	7.5

权 利 要 求 书

1. 一种低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其化学成分质量百分比为：C：0.15~0.18%、Si：0.040~0.10%、Mn：1.10~1.40%、 $P \leq 0.02\%$ 、
5 S：0.015~0.030%、Cr：1.00~1.20%、Mo：0.006~0.02%、Ni：0.020~0.10%、
Al：0.020~0.050%、N：0.007~0.015%、 $Al/N \geq 2.0$ 、Nb：0.004~0.03%、 $[O] \leq 0.0015\%$ ，余量包含 Fe 和其它不可避免杂质；且，齿轮圆钢制作端淬试样的端部获得全马氏体区的长度 b 范围为： $0.70 \leq b \leq 1.16$ ， $b=0.22h-0.45$ ，
 $h=(6.9[Mn]^2+3.2[Si]+22.6[Cr]^2+23.1[Mo]+(13.0[Cr]+2.5[Mo]+9.7)[Ni]+2.5)[C]$ ；
10 同时，淬透性系数 k 满足： $1.18 \leq k \leq 1.65$ ，
 $k=0.54*[C]*(-1.12+5.1*[Mn])*(1+0.7*[Si])*(1+2.16*[Cr])$ 。
2. 根据权利要求 1 所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其特征在于，其化学成分中，余量为 Fe 和其它不可避免杂质。
3. 根据权利要求 1 或 2 所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢，
15 其特征在于，所述不可避免杂质中， $Ti \leq 0.003\%$ 、 $B \leq 0.0004\%$ 、 $Ca \leq 0.003\%$ 。
4. 根据权利要求 1 或 2 或 3 所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其特征在于，成分中有害元素， $As \leq 0.02\%$ 、 $Sn \leq 0.02\%$ 、 $Pb \leq 0.012\%$ 、 $Sb \leq 0.012\%$ 、 $Bi \leq 0.012$ ，且有害元素总和 $\leq 0.05\%$ 。
5. 根据权利要求 1~4 中任一项所述的低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮
20 圆钢，其特征在于，所述齿轮圆钢的热轧态的显微组织为铁素体+珠光体。
6. 根据权利要求 1~5 中任一项所述的低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其特征在于，所述齿轮圆钢的淬透性实测值满足 $J5=33\sim 36HRC$ ， $J9=25\sim 28HRC$ ， $J15=20\sim 24HRC$ ，且 J9 前淬透性带宽 $\leq 3HRC$ 。
7. 根据权利要求 1~6 中任一项所述的低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮
25 圆钢，其特征在于，所述齿轮圆钢的力学性能满足屈服强度 $\geq 800MPa$ ，抗拉强度 $\geq 1100MPa$ ，延伸率 $\geq 12\%$ ，断面收缩率 $\geq 50\%$ ，冲击功 $KU2 \geq 90J$ ，晶粒度不小于 6 级。
8. 根据权利要求 6 所述的低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其特征在于，J9 前淬透性带宽满足： $1 HRC \leq J9 \text{ 前淬透性带宽} \leq 3 HRC$ 。
- 30 9. 根据权利要求 7 所述的低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其特

征在于，所述齿轮圆钢的屈服强度为 800~820MPa，抗拉强度为 1100~1150MPa，延伸率为 12%~19%，断面收缩率为 50%~65%，冲击功 KU2 为 90~100J，晶粒度为 7.0~9.0 级。

10. 根据权利要求 1 所述的低淬透性窄带宽 Mn-Cr 系齿轮圆钢，其特征
5 在于，b 满足： $0.80 \leq b \leq 1.15$ ，和/或，k 满足： $1.25 \leq k \leq 1.55$ 。

11. 根据权利要求 1~10 中任一项所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系
齿轮圆钢的制造方法，其特征是，包括如下步骤：

(1) 冶炼、铸造

按权利要求 1 或 2 或 3 或 4 所述成分冶炼、浇铸成铸坯；

10 (2) 加热

预热段温度为 840~880℃，加热段温度控制在 1120~1175℃，均热段
温度为 1150~1230℃，加热炉中的加热总时长不小于 4h；

(3) 轧制

控制开轧温度为 1100~1170℃，终轧温度为 950~1000℃；

15 (4) 淬火+回火

一次淬火温度为 850~910℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；
二次淬火温度为 800~830℃，保温时间 30~60min，油冷或水冷至室温；回
火温度为 150~200℃，保温时间 60~150min，回火后空冷至室温。

12. 根据权利要求 11 所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢的
20 制造方法，其特征是，所述冶炼采用电炉或转炉，再经过 LF 精炼和 VD 真
空脱气；在 LF 精炼过程中，精炼时间 $\geq 50\text{min}$ ，渣中的 FeO 含量小于 1.0wt%，
白渣时间 $\geq 20\text{min}$ ；在 VD 真空脱气处理过程中，控制真空度 $\leq 66.7\text{Pa}$ ，高
真空时间 $\geq 20\text{min}$ ，镇静时间 $\geq 10\text{min}$ ，VD 终温温度为 1550℃~1580℃，
VD 真空脱气处理过程中全过程采用底吹氮气增氮。

25 13. 根据权利要求 11 所述的低淬透性窄带宽的 Mn-Cr 系齿轮圆钢的
制造方法，其特征是，所述铸造采用连铸，控制结晶器电磁搅拌的频率为
2.0~3.0HZ，电流为 150~300A；末端电磁搅拌的频率为 8.0~8.5HZ，电流为
300~350A；钢水过热度控制在 22~38℃，连铸拉坯速度控制在 0.62~0.68
m/min 之间。