

钒对高温渗碳 SCM420H 齿轮钢组织和淬透性的影响

刘年富^{1,2}, 胡 涛¹, 田钱仁¹, 王高峰¹, 付建勋^{1*}

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 先进凝固技术中心, 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 宝武杰富意特殊钢有限公司, 广东 韶关 512123)

摘 要: 对高温渗碳 SCM420H 齿轮钢进行了钒微合金化处理, 并对钢中组织及淬透性进行了研究。结果表明: SCM420H 齿轮钢中 V 含量和 N 含量应控制范围分别在 0.03% ~ 0.05% 和 0.012% ~ 0.018%。MN(M=Ti,V) 在 966 °C 时析出并在 559 °C 时向 M(C,N) 发生转化, 常温时的 M(C,N) 质量百分数约为 0.049%。将加热温度控制在 1 200 °C±20 °C, 在预热段(室温升至 850 °C 左右)加热时间控制在 120 min 内, 在 940 ~ 980 °C 高温渗碳保温 6 h 后, 圆钢的带状组织控制在 1.5 ~ 2 级, 奥氏体晶粒稳定在 7.5 ~ 8 级, M(C,N) 主要为能起到钉扎晶界、细化奥氏体晶粒的纳米级球状 V(C,N)。将连铸结晶器电磁搅拌强度参数调整为 150 A, 2.5 Hz, 铸坯拉速为 0.85 m/min, 浇铸过热度为 15 ~ 30 °C, 碳含量偏差值可控制在 0.01%, 碳含量的均匀化有利于淬透性的窄带化控制, 钒微合金化后, 试样的淬透性硬度值(HRC)最高为 37, 最低为 35, 淬透性带宽度值(HRC)≤3。

关键词: 齿轮钢; SCM420H; 钒微合金化; 高温渗碳; 淬透性

中图分类号: TF841.3, TF76

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0125-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.020

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Microstructure and hardenability of vanadium microalloyed high temperature carburized SCM420H gear steel

Liu Nianfu^{1,2}, Hu Tao¹, Tian Qianren¹, Wang Gaofeng¹, Fu Jianxun^{1*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Center for Advanced Solidification Technology (CAST), State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai 200444, China; 2. Baowu JFE Special Steel Co., Ltd., Shaoguan 512123, Guangdong, China)

Abstract: The high-temperature carburized SCM420H gear steel was modified with vanadium microalloying, and the structure and hardenability of the steel were studied. The results show that the V and N contents in SCM420H gear steel should be controlled within the range of 0.03%~0.05% and 0.012%~0.018%, respectively. MN (M=Ti,V) precipitates at 966 °C and transforms into M(C,N) at 559 °C. The mass percentage of M(C,N) approximates 0.049%. The heating temperature is controlled at 1200 °C±20 °C, and the heating time is controlled within 120 minutes in the preheating section (from room temperature to about 850 °C). After high temperature carburizing and holding at 940~980 °C for 6 hours, the banded structure of bar steel is controlled at 1.5 to 2 level, and the austenite grain size is at ASTM 7.5 to 8. M (C,N) is mainly nano-seized spherical V (C,N) which can pin grain boundaries and refine austenite grains. Under the following casting parameters: the electromagnetic stirring intensity

收稿日期: 2021-12-08

作者简介: 刘年富(1981—), 男, 博士研究生、高级工程师, 研究方向: 高品质特殊钢, E-mail: A28285@baosteel.com;

*通讯作者: 付建勋(1969—), 男, 博士、教授, 研究方向: 高品质特殊钢, E-mail: fujianxun@shu.edu.cn。

parameters of the continuous casting mold are adjusted to 150 A, 2.5 Hz, the casting speed is at 0.85 m/min, the casting superheat is 15 to 30 °C, the deviation value of carbon content can be controlled at 0.01% which is beneficial to narrowing control of hardenability. After vanadium microalloying, the maximum hardenability value(HRC) of the sample is 37, the minimum is 35, and the hardenability bandwidth(HRC)is not greater than 3.

Key words: gear steel, SCM420H, vanadium microalloying, high-temperature carburizing, hardenability

0 引言

高温渗碳技术能显著提升渗碳效率、降低生产成本并广泛应用于齿轮钢表面硬度强化^[1-2]。国外在 20 世纪 60 年代就已经开始了该技术的研究,而近年来国内的特钢生产企业也开展了相关钢种的高温渗碳技术研究。一般渗碳温度每提高 50 °C,渗碳效率可提高近 1 倍。研究表明^[3],将常规的渗碳温度由 920~930 °C 提高至 950 °C,渗碳周期可降低约 30%;当渗碳温度提高至 1 000 °C 时,该周期可降低约 50%。

由于常用的齿轮钢渗碳温度达到 950 °C 后会出现少量粗大的奥氏体晶粒,导致齿轮变形,极大地降低了齿轮疲劳性能^[4]。而渗碳温度在 1 000 °C 时,钢中会出现大量粗大奥氏体晶粒,导致齿轮零件报废。为了使齿轮在高温渗碳后奥氏体晶粒不出现异常粗大,可主要通过添加少量的 Al、Ti、V、Nb、B 等微合金^[2,5-7],形成 AlN、TiN、VN、Nb(C,N)、BN 等夹杂物并钉扎晶界,抑制奥氏体晶粒长大。

尽管国内开展了 SCM420H 齿轮钢相关的研制工作^[8-9],但是其讨论的重点在于对冶炼工艺和组织调控的总结,对 SCM420H 齿轮钢高温渗碳效果与微合金化的大生产应用效果却鲜有研究报道。因此,笔者采用钒微合金化细晶方法对高温渗碳 SCM420H 齿轮钢中的奥氏体晶粒尺寸进行了控制,通过调控特征成分含量范围、连铸工艺参数、加热工艺参数,将高温渗碳 SCM420H 齿轮钢奥氏体晶

粒尺寸控制在不低于 6 级,碳偏析偏差值约为 0.01%,淬透性带宽(J10 mm)硬度值(HRC)在 34~38 范围内。

1 生产工艺与检测

1.1 生产工艺流程

钒微合金化 SCM420H 齿轮钢生产工艺流程采用长流程工艺:高炉铁水→130 t 转炉→130 t LF 精炼→130 t RH 精炼→280 mm×280 mm 连铸→步进式加热炉→连轧机轧制→自然冷却→精整。SCM420H 齿轮钢轧制的成品规格为直径 65 mm 的圆棒。

1.2 检测试验

1.2.1 化学成分检测

根据 SCM420H 齿轮钢成分及钒微合金化细晶思路确定了钢种的具体成分内控范围,在同一浇次的 2 炉 280 mm 方坯中分别取 1 批连铸坯进行编号,分别为批号 1 和批号 2,取轧制后的两个批号的圆钢进行化学成分取样分析,采用 QSN 750 直读光谱仪、O-N-H 836 型氧氮氢联合测定仪和 C-S 844 型碳硫测定仪进行成分检测分析,相关成分范围如表 1 所示。其中,在成分内控范围内,为满足含钒第二相粒子的有效析出,采用热力学分析确定了钢中钒含量和氮含量范围。为分析圆钢中碳偏析情况,根据图 1 所示取点方式,在距边部 5 mm 左右均匀钻点,取钢屑分析碳含量及其偏析程度。

表 1 SCM420H 齿轮钢化学成分要求及设计范围
Table 1 Chemical compositions requirements and design range for SCM420H gear steel

%

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Al	Mo	B	N
技术要求	0.17~0.23	0.15~0.35	0.60~0.90	≤ 0.025	≤ 0.025	1.00~1.25		0.015~0.040	0.15~0.30		0.010~0.020
内控范围	0.19~0.21	0.20~0.30	0.82~0.88	≤ 0.020	≤ 0.015	1.12~1.16	0.03~0.05	0.015~0.035	0.24~0.26	≤ 0.000 3	0.012~0.018
批次1	0.20	0.24	0.84	0.011	0.005	1.13	0.037	0.018	0.24	0.000 1	0.014 5
批次2	0.20	0.25	0.85	0.013	0.004	1.14	0.041	0.022	0.25	0.000 2	0.016 1

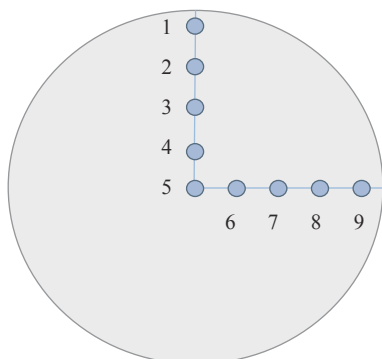


图1 碳偏析取样示意

Fig. 1 Sampling points for carbon segregation determination

1.2.2 显微组织与夹杂物观察

对 $\varnothing 65$ mm 规格圆钢按 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》^[10] 取样及试样制备要求,在半径位置取 $15\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 毛坯样,磨制平行于轧制方向作为观察面分析圆钢的带状组织。按 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》^[11] 取样及试样制备要求,在半径位置取 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 毛坯样,试样经 940 、 960 $^{\circ}\text{C}$ 及 980 $^{\circ}\text{C}$ 内保温 6 h 进行渗碳,确保获得 1 mm 以上的渗碳层。采用 ZEISS Axio Lab.A1 正置金相显微镜对这 2 个轧制批次进行带状组织分析和奥氏体晶粒度分析。

采用 Zeiss Sigma 500 型热场发射扫描电子显微镜对钒微合金化的 SCM420H 齿轮钢中夹杂物和纳米级析出物进行了观察能谱分析,讨论了夹杂物和纳米级析出物成分与形态大小之间的关系。

1.2.3 淬透性测试

对两个轧制批次按 $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行正火、 $925\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 淬火工艺进行热处理,并按 GB/T 225—2006《钢淬透性的末端淬火试验方法(Jominy 试验)》^[12] 的要求进行末端淬透性试验,制成 $\varnothing 25\text{ mm}$ 标准端淬试样,每个批次各取 3 个试样进行淬透性硬度检测。

2 结果与讨论

2.1 钢的化学成分及组织控制

2.1.1 钢中化学成分与物相的关系

本研究采用含钒夹杂物发挥钉扎晶界、阻碍奥氏体晶粒长大的作用,调控钢的化学成分、加热工艺对夹杂物尺寸和奥氏体晶粒尺寸及其稳定性都起着至关重要的作用。

钢中加入少量的 Al 主要是用于脱氧,而加入的钒是强氮化物形成元素,为确定钢中 V、N 合适的量,形成足够的 VN 析出相钉扎晶界。根据夹杂物

析出热力学计算的平衡浓度积公式, $\lg([V] \cdot [N]) = 3.63 - 8700/T^{[13]}$, 计算了 VN 夹杂物在 $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1373 K) 到 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1073 K) 之间的平衡曲线,如图 2 所示。在 V : N 理想化学计量关系(质量百分数比值为 $2 : 1$ 到 $3 : 1$)内, VN 在 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1173 K) 时能析出,因此将 V、N 内控成分百分含量分别控制在 $0.03\% \sim 0.05\%$ 、 $0.012\% \sim 0.018\%$ 范围内,如图 2 中黑色方框所示。

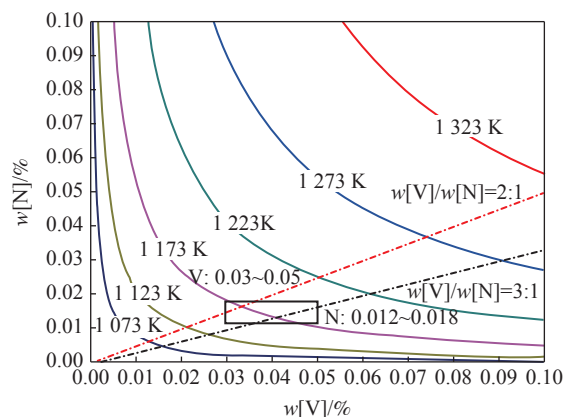


图2 V-N 相平衡浓度曲线

Fig. 2 Equilibrium concentration curve of V-N phase

采用 J MatPro 计算软件根据批次 2 的化学成分计算了 SCM420H 钢主要组分的相图,如图 3 所示。随着温度的降低,钢的基体组织转变路径为:液相 $\rightarrow$ 高温铁素体($\delta\text{-Fe}$) $\rightarrow$ 奥氏体($\gamma\text{-Fe}$) $\rightarrow$ 铁素体($\alpha\text{-Fe}$),钢中第二相粒子主要是碳化物(M_{23}C_6 和 M_7C_3)、氮化物夹杂(MN, M 主要为 V 和 Ti)和 MnS 夹杂物。其中, MN 在 $966\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时析出,并在 $559\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时向 M(C,N) 发生转化,且转化过程所需的温差是较小的。在 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的钢中, M(C,N) 质量百分数约为 0.049% 。

由于 SCM420H 钢淬透性带硬度值(HRC)需 ≤ 4 及高温奥氏体晶粒度 ≥ 6 级,需对钢中成分范围进行窄带化精确控制。在冶炼生产时需对合金,如 Mn、Cr、Mo、V 等进行高位料仓自动加入,并确保加入量精确到 10 kg 级。精炼过程中,可在 RH 工序根据 LF 精炼出站检测情况适当补加增碳剂,从而确保碳含量在内控范围内;另外,为了确保氮稳定可控,真空处理采用全程吹氮气增氮,真空处理结束后补喂氮铬线增氮。根据笔者对 CrMnTi、CrMo 系及 MnCr 系齿轮钢产品淬透性检测分析经验,每提升质量百分数为 $0.017\%\text{C}$ 、 $0.06\%\text{Mn}$ 、 $0.067\%\text{Cr}$ 或 $0.02\%\text{Mo}$ 可使齿轮钢中硬度值(HRC)提升 1,而残余 B 元素需保持在 0.0003% 以下,从而确保淬透稳定性^[14]。

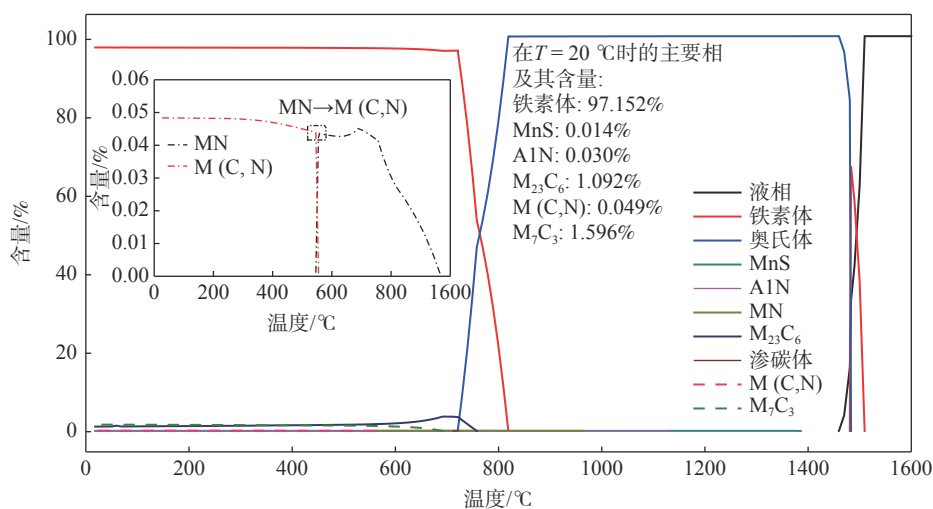


图3 SCM420H 钢主要物相相图

Fig. 3 Phase diagram of main components of SCM420H steel

2.1.2 轧材中的显微组织控制

为了控制加热工艺对奥氏体晶粒度的影响,本研究根据试验生产的铸坯尺寸情况及加热工艺条件,将加热温度控制在 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,在预热段(室温升至 $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右)加热时间控制在 120 min 以内。

经过上述成分窄带化控制和加热工艺控制,将钒微合金化 SCM420H 齿轮钢两个批次样品在 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $980\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下保温 6 h 进行渗碳处理。两个批次样品中的带状组织及保温后的奥氏体晶粒度大致相同,如表 2 所示。

表 2 圆钢显微组织情况
Table 2 Microstructures rating of steels

圆钢	带状组织/级	不同保温温度下的晶粒度/级		
		$940\text{ }^{\circ}\text{C}$	$960\text{ }^{\circ}\text{C}$	$980\text{ }^{\circ}\text{C}$
批次1	2.0	8.0	8.0	7.5
批次2	1.5	8.0	8.0	8.0

以 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例,两个批次样品中的带状组织和奥氏体晶粒度分别如图 4、5 所示。图 4 的带状组织检测表明,两个批次样品中带状组织均可控制在 1.5 ~ 2.0 级。

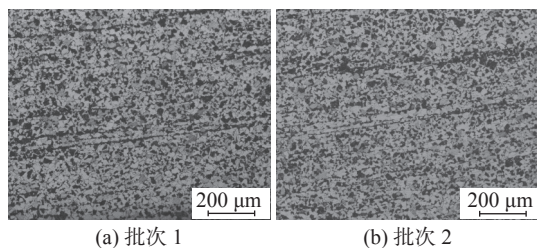
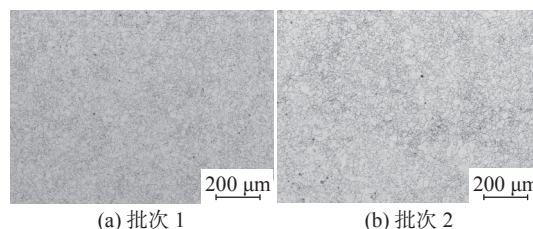
图4 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 渗碳处理后钒微合金化 SCM420H 齿轮钢带状组织Fig. 4 Banded structures of V microalloyed SCM420H gear steel after carburization at $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 图5 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 渗碳处理后钒微合金化 SCM420H 齿轮钢奥氏体晶粒度Fig. 5 Austenite grain size of V microalloyed SCM420H gear steel after carburization at $960\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 5 的奥氏体晶粒检测表明,在 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温经过 6 h 渗碳处理后,奥氏体晶粒度达到 7.5 ~ 8.0 级,且未出现混晶,说明在该温度内保温渗碳处理,晶粒长大趋势不明显。

通过扫描电镜观察,发现钒微合金化 SCM420H 钢中的 $\text{M}(\text{C},\text{N})$ 分布于晶粒内部和晶界附近,且数量较多,如图 6(a) 所示。该类 $\text{M}(\text{C},\text{N})$ 主要是以 V、C、N 元素为主的纳米级球形 $\text{V}(\text{C},\text{N})$ 析出物,等效直径约为 50 ~ 100 nm,白色箭头所指析出物成分及含量如图 6(b) ~ (d) 所示。结合金相试验的观察分析结果不难发现,这些纳米级 $\text{V}(\text{C},\text{N})$ 析出物能够起到钉扎晶界和抑制奥氏体晶粒长大的效用。

与未加入钒的 SCM420H 圆钢(其余化学成分完全按照内控成分设计生产的圆钢)相比,按照相同制样和检测方法分析了其在 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 6 h 的奥氏体晶粒度,实际检测的晶粒度情况如图 7 所示。

图 7 的检测结果表明,不加钒的 SCM420H 圆钢在 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温渗碳时出现了少量奥氏体晶粒长大现象;而随着保温温度的提高,在 $960\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时奥氏

体晶粒长大非常显著, 出现了大量的粗大奥氏体晶粒。也有文献认为奥氏体晶粒的尺寸和带状组织带

宽是受热变形过程的终了温度影响的, 终了温度越高得到的晶粒越粗大^[15]。

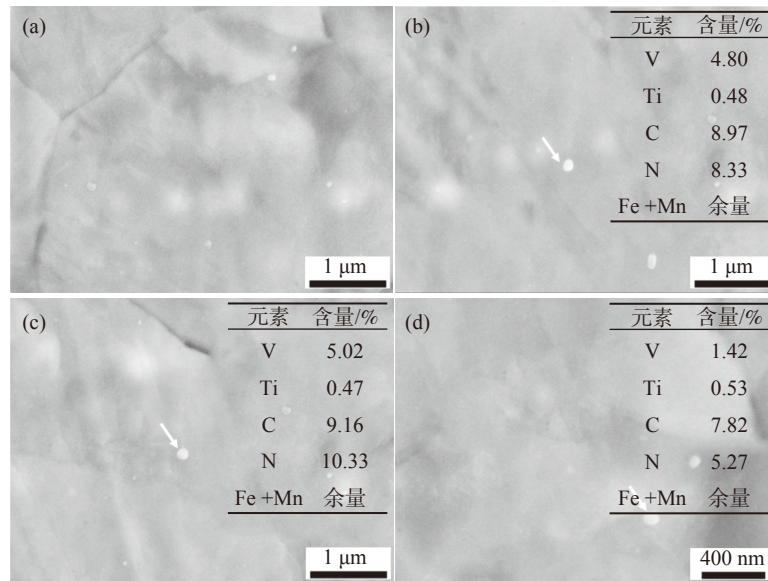


图 6 钒微合金化 SCM420H 钢中的 V(C,N) 析出物

Fig. 6 V(C, N) precipitation in vanadium microalloyed SCM420H steel

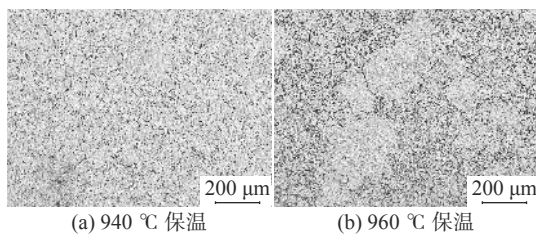


图 7 不加 V 的 SCM420H 齿轮钢中奥氏体晶粒度

Fig. 7 Austenite grain size of SCM420H gear steel without V addition

上述检测结果说明钒微合金化高温渗碳 SCM420H 钢中, 添加适量的钒与钢中的氮在加热、轧制过程中会析出 VN, 并起到稳定的钉扎作用。在后续 960 °C、甚至 980 °C 的高温渗碳时, V(C,N) 不会产生重溶引起奥氏体晶粒生长现象, 从而起到了细化奥氏体晶粒的作用。而不加钒的 SCM420H 钢依靠少量的 AlN 夹杂物钉扎晶界、细化奥氏体晶粒, 在后续 960 °C 高温的长时间的保温过程中, 晶界中的 AlN 出现了部分重溶, 导致部分晶粒长大, 从而出现了混晶现象。

2.2 碳偏析及淬透性分析

2.2.1 碳偏析控制水平

对批次 1 和批次 2 中碳偏析检测的结果表明, 碳含量在试样边部和中心处都较小, 在 3、7 号取样点位较大, 但整个试样横截面不同位置碳的含量波

动值均在 0.19% ~ 0.21% 范围内, 炉批次间成分偏差较小, 偏差值约为 0.01%, 如图 8 所示。

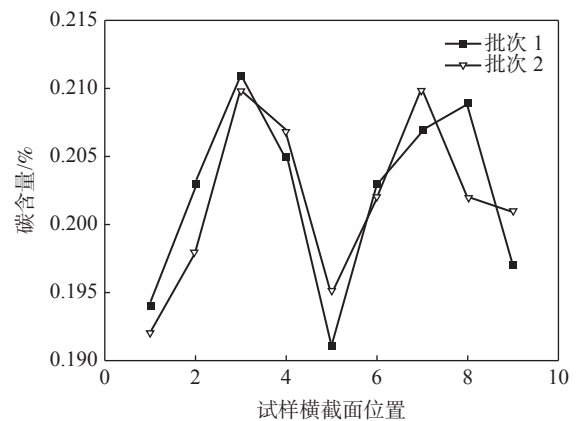


图 8 圆钢碳偏析结果

Fig. 8 Results of carbon segregation in bar steel

2.2.2 碳偏析与淬透性的关系

连铸工艺的稳定性既影响着产品化学成分的统一性, 也影响着齿轮钢淬透性的稳定程度, 而碳元素的均匀性对齿轮钢淬透性稳定性影响最大。对不同合金系列低碳齿轮钢中影响成分均匀性的连铸工艺开展了大量试验研究, 分析了碳偏析与淬透性之间的关系。研究表明, 圆棒试样全截面的碳波动在 0.025% ~ 0.045% 范围内, 碳偏析对淬透性带宽度值(HRC)影响可达到 2 ~ 3。

优化连铸结晶器电磁搅拌强度是减小铸坯碳偏析、提高端淬检测值稳定性、实现齿轮钢淬透性窄带化控制的有效途径之一^[16]。因此,为了降低碳偏析对淬透性稳定性的影响,根据现场设备工艺能力,将 280 mm×280 mm 断面试验钢的连铸结晶器电磁搅拌强度参数由 300 A, 2.5 Hz 调整为 150 A, 2.5 Hz;相应地,将拉速由 0.90 m/min 调整为 0.85 m/min,过热度控制在 15~30 ℃。

对钒微合金化高温渗碳 SCM420H 齿轮钢淬透性采取窄带化控制, J10 mm 的硬度值(HRC)要求在 34~38。图 9 为上述两个批次共计 6 个样品的淬透性检测结果, 1~3 号为批次 1 的试样, 4~6 号为批次 2 的试样。结果表明,在较好的成分控制和组织控制条件下,同一炉批号及不同炉批号的试样淬透性硬度值(HRC)最高为 37,最低为 35,淬透性带宽硬度值(HRC)可控制在 3 以内。

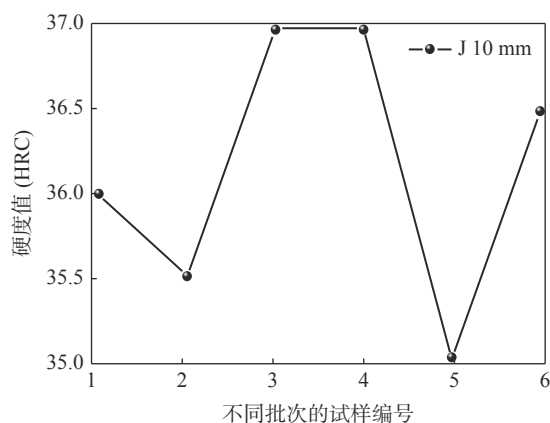


图 9 不同试样端淬硬度值分布情况

Fig. 9 Distribution of end-quenching harnesses of different samples

3 结论

对高温渗碳 SCM420H 齿轮钢进行钒微合金化处理,并对钒微合金化的齿轮钢中组织及淬透性进行了研究,主要结论如下:

1)在钒微合金化 SCM420H 齿轮钢成分内控范围内,对 VN 的析出热力学研究表明,将 V 和 N 的含量范围分别控制在 0.03%~0.05% 和 0.012%~0.018%,而对该钢种的相图计算表明固溶型夹杂物 MN 在 966 ℃ 时析出,在 559 ℃ 时向 M(C,N) 发生转化,钢中 M(C,N) 质量百分数约为 0.049%,采用成分范围窄带化控制可实现成分均匀分布,并满足奥氏体晶粒尺寸和淬透性要求。

2)为实现该齿轮钢在高温渗碳过程中奥氏体晶粒不低于 6 级,需将加热温度控制在 1 200 ℃±20 ℃,在预热段(室温升至 850 ℃ 左右)加热时间控制在 120 min 内,在 940~980 ℃ 高温渗碳保温 6 h 后,带状组织控制在 1.5~2 级,奥氏体晶粒可稳定在 7.5~8 级, M(C,N) 主要为纳米级球状 V(C,N),其在钢中能起到良好的钉扎晶界、细化奥氏体晶粒的作用。

3)除成分窄带化控制外,将连铸结晶器电磁搅拌强度参数调整为 150 A, 2.5 Hz,铸坯拉速为 0.85 m/min,浇铸时过热度为 15~30 ℃,可将碳含量偏差值控制在约为 0.01%,良好的碳含量均匀性有利于淬透性的窄带化控制,淬透性检测结果表明,同一炉批号及不同炉批号试样的淬透性硬度值(HRC)最高为 37,最低为 35,淬透性带宽硬度值(HRC)≤3。

参考文献

- [1] Zhang Guoqiang, He Xiaofei, Wei Wenchao, *et al.* Grain coarsening behavior of high temperature carburizing gear steels[J]. *Iron & Steel*, 2019, 54(5): 68–72, 77.
(张国强, 何肖飞, 尉文超, 等. 高温渗碳齿轮钢的晶粒粗化行为[J]. *钢铁*, 2019, 54(5): 68–72, 77.)
- [2] Yang Yanhui, Wang Maoqiu, Chen Jingchao, *et al.* Research progress in gear steels for high temperature carburization[J]. *Special Steel*, 2013, 34(1): 22–24.
(杨延辉, 王毛球, 陈敬超, 等. 高温渗碳齿轮钢的研究进展[J]. *特殊钢*, 2013, 34(1): 22–24.)
- [3] Zhang Huawei. Development and application of high temperature carburizing gear steel[J]. *Nisco Technology and Management*, 2015, (3): 1–5, 27.
(张华伟. 高温渗碳齿轮钢研制与应用[J]. *南钢科技与管理*, 2015, (3): 1–5, 27.)
- [4] Yang Yanhui, Wang Maoqiu, Chen Jingchao, *et al.* Fatigue properties of gear steels after high temperature carburizing[J]. *Iron & Steel*, 2013, 48(7): 53–57, 83.
(杨延辉, 王毛球, 陈敬超, 等. 齿轮钢高温渗碳后的疲劳性能[J]. *钢铁*, 2013, 48(7): 53–57, 83.)
- [5] Liu Lianqian. Study on microstructures and properties of 20CrMn(Ti)-Al gear steel: high temperature intercritical

- carburization grain refinement[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
(刘连骞. 高温临界区渗碳细化晶粒20CrMn(Ti)-Al齿轮钢组织与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.)
- [6] Liu Nianfu, Yue Feng, Bao Feng. High temperature carburized gear steel: China, ZL201810994814. X[P]. 2020-08-28.
(刘年富, 岳峰, 包锋. 一种高温渗碳齿轮钢: 中国, ZL201810994814. X[P]. 2020-08-28.)
- [7] Li Jiawang, Liu Fangce, Wang Qi, *et al.* Effect of oxide particles containing Ti on microstructure and mechanical properties of high-temperature hot-rolled low-carbon steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(6): 82-90.
(李家旺, 刘方策, 王琪, 等. 含Ti 氧化物对低碳钢高温热轧组织及力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(6): 82-90.)
- [8] Miao Huajun, Zhao Xiaogang, Wang Zhixiang. The development of the high grade gear steel SCM420H[J]. *Heavy Castings and Forgings*, 2004, (2): 12-14.
(苗华军, 赵晓刚, 王之香. 高等级齿轮钢SCM420H的开发研制[J]. *大型铸锻件*, 2004, (2): 12-14.)
- [9] Zheng Guiyun, Qi Xianling, Wang Zhiming, *et al.* Development of high grade gear steel SCM420H for automobile[J]. Shandong Metallurgy, 2008(4): 14-15.
(郑桂芸, 亓显玲, 王志明, 等. SCM420H高级汽车齿轮钢研制[J]. 山东冶金, 2008(4): 14-15.)
- [10] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 13298-2015《Inspection methods of microstructure for metals》[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2015: 2.
(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 2.)
- [11] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 6394—2017《Determination of estimating the average grain size of metal》[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2017: 5.
(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 5.)
- [12] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB/T 225-2006《Steel hardenability test by end quenching(Jominy test)》[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2006: 2.
(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 225—2006《钢淬透性的末端淬火试验方法(Jominy试验)》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 2.)
- [13] Yong Qilong, Zheng Lu. Solid solubility formula and stoichiometry on the composition design of microalloy steels[J]. Iron & Steel, 1988, 23(7): 47-51.
(雍岐龙, 郑鲁. 固溶度积公式、理想化学配比值与微合金钢化学成分设计[J]. 钢铁, 1988, 23(7): 47-51.)
- [14] Liu Nianfu. Development of gear steel 20CrMnTiH with narrow hardenability band[J]. Special Steel, 2018, 39(1): 45-47.
(刘年富. 窄淬透性带20CrMnTiH齿轮钢的开发[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 45-47.)
- [15] Yan Huicheng. Effect of electromagnetic stirring on hardenability of gearing steel[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2015, 43(5): 34-37.
(颜慧成. 结晶器电磁搅拌对齿轮钢端淬检验值的影响[J]. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(5): 34-37.)
- [16] Gu Tie, Zhou Yuelin. Effect of thermal deformation on banded structure of SCM420H gear steel[J]. Modern Metallurgy, 2017, 45(6): 4-7.
(顾铁, 周月林. 热变形对SCM420H齿轮钢带状组织的影响[J]. 现代冶金, 2017, 45(6): 4-7.)