

引用格式: 何肖飞, 郭涛, 孙鸿平, 等. 高品质 Mn-Cr 系汽车齿轮钢质量稳定性研究[J]. 中国材料进展, 2025, 44(3): 303-308.
HE X F, GUO T, SUN H P, *et al.* Study on Quality Stability of High-Quality Mn-Cr Automotive Gear Steel[J]. Materials China, 2025, 44(3): 303-308.

高品质 Mn-Cr 系汽车齿轮钢质量稳定性研究

何肖飞¹, 郭涛¹, 孙鸿平², 陈武³, 曹红福²

(1. 钢铁研究总院有限公司 特殊钢研究院, 北京 100081)

(2. 江阴兴澄特种钢铁有限公司研究院, 江苏 江阴 214429)

(3. 钢研纳克检测技术股份有限公司, 北京 100081)

摘要: 齿轮作为变速箱核心零件, 需要具备高质量性能稳定性, 以避免因个别齿轮提前失效导致整个变速箱损坏。而质量稳定性齿轮的制造, 关键是要有高质量稳定性齿轮钢材料的供应。以上百炉次 Mn-Cr 系汽车齿轮钢为研究对象, 通过对其冶炼成分、成品材 C 波动、淬透性、带状组织等进行统计和分析, 研究了国内 Mn-Cr 系汽车齿轮钢质量稳定性控制水平和技术。结果显示, 通过工艺技术参数优化, 国内 Mn-Cr 系汽车齿轮钢可以实现冶炼终点 C 偏差稳定 $\leq \pm 0.01\%$, Mn, Cr 偏差稳定 $\leq \pm 0.05\%$, 成品材截面 C 波动 $\leq 0.02\%$ 的比例达 95% 以上, 而淬透性带宽稳定 $\leq 4\text{HRC}$ 、带状组织稳定 ≤ 2.0 级。通过大批量生产和实践, 国内 Mn-Cr 系汽车齿轮钢在达到高性能的同时, 还具备高的质量稳定性, 这有益于加速推进我国高等级变速器的开发和应用。

关键词: 齿轮钢; 质量稳定性; 成分; 淬透性; 带状组织

中图分类号: TG142.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2025)03-0303-06

Study on Quality Stability of High-Quality Mn-Cr Automotive Gear Steel

HE Xiaofei¹, GUO Tao¹, SUN Hongping², CHEN Wu³, CAO Hongfu²

(1. Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

(2. Research Institute, Jiangyin Xingcheng Special Steel Works Co., Ltd., Jiangyin 214429, China)

(3. NCS Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: As the core part of gearbox, the performance of all gears in gearbox should be stable and consistent to avoid damage to the entire gearbox due to premature failure of individual gears. The key to the manufacturing of quality stability gears is the supply of high-quality stability gear steel materials. In this paper, the Mn-Cr automotive gear steels more than 100 heats are taken as the research object. Through the statistics and analysis of the smelting composition, C fluctuation of rolled bar, hardenability and banded structure, the research on the advanced quality stability control level and technology of domestic Mn-Cr automotive gear steel is completed. The results show that through the optimization of process parameters, the C deviation of smelting end is stably controlled $\leq \pm 0.01\%$, the Mn and Cr deviation are stably controlled $\leq \pm 0.05\%$ and the proportion of C fluctuation $\leq 0.02\%$ of rolled bar cross section is controlled over 95% for Mn-Cr automotive gear steel. Also, the hardenability bandwidth can be controlled $\leq 4\text{HRC}$ and the banded structure can be controlled ≤ 2.0 stably. According to the mass production and practice, domestic Mn-Cr gear steel has achieved high performance and high-quality stability, which will be beneficial to accelerating the development and application of advanced transmissions in China.

Key words: gear steel; quality stability; component; hardenability; banded structure

收稿日期: 2023-03-31 修回日期: 2023-09-20

基金项目: 钢铁研究总院有限公司自主研发项目(22T60950J);

国家重点研发计划项目(2016YFB0300102)

第一作者: 何肖飞, 男, 1986 年生, 高级工程师,

Email: xiaofei6423@126.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202303021

1 前言

齿轮钢属于典型的特殊钢产品, 应用领域比较广泛, 如汽车、机械、风电、高铁等^[1, 2]。作为齿轮钢的一类, 汽车齿轮钢不仅用量大, 而且牌号多, 有 Mn-Cr 系、Cr-Ni-Mo 系、Cr-Mn-Ti 系等, 其中 Mn-Cr 系汽车齿轮钢是

典型的乘用车齿轮钢, 目前已在许多车型上得到良好应用。

高性能是各类特殊钢材料的发展方向^[3-5], 为了获得高性能齿轮零件, 对 Mn-Cr 系汽车齿轮钢材料提出了高性能要求, 如高的力学性能、疲劳性能等, 学者们基于此开展了针对性研究。在成分设计及控制方面, Costa 等^[6]针对 20MnCr5 汽车齿轮钢, 研究添加 B 对渗 C 组织特征和弯曲疲劳性能的影响; 段飞虎等^[7]对 28MnCr5 齿轮钢中关键元素的控制进行研究, 以进一步实现提升齿轮钢性能的目的。在夹杂物控制方面, Dong 等^[8]研究了精炼过程中炉渣成分对 28MnCr5 齿轮钢洁净度的影响; Ahmad 等^[9]针对 Mn-Cr 系齿轮钢研究了 MnS 改性钢中复合夹杂物的形成; 张浩等^[10]研究了 Mg 对 20MnCr5 齿轮钢中夹杂物改质的影响; 何肖飞等^[11]研究了总氧含量对齿轮钢夹杂物的影响。这些针对洁净度、夹杂物开展的科学研究, 均有希望进一步提升 Mn-Cr 系齿轮钢性能, 尤其是疲劳性能。另外, Fuchs 等^[12]研究了加热速率和均热温度对 20MnCr5 齿轮钢硬度和晶粒度的影响; 庾桃等^[13]研究了 27MnCr5 齿轮钢压缩变形及动态再结晶, 可实现细化晶粒和组织调控; Chen 等^[14]研究了不同渗 C 淬火工艺对 16CrMnH 钢组织和硬度特征的影响, 通过渗 C 热处理工艺优化, 可进一步提升 Mn-Cr 系齿轮钢性能。

虽然在各生产工艺技术改进下, Mn-Cr 系汽车齿轮钢性能不断提升, 但随着对汽车高档变速器的开发, 齿轮钢在保持高性能的同时, 还需具备高的质量稳定性, 从而保证零件制造的稳定性和良好服役性。成分的精确控制和偏析的稳定控制, 对渗 C 后零件硬度及韧性控制具有重要作用; 淬透性稳定控制, 可以保证淬火组织^[15]和变形稳定, 从而保证齿轮精度控制及硬度稳定性控制, 对齿轮接触疲劳性能提升具有重要意义; 而带状组织的良好及稳定控制, 对齿轮表面及渗层组织稳定性具有积极作用, 同时可提升齿轮组织的均匀性, 保证齿轮疲劳性能稳定可靠。

针对 Mn-Cr 系汽车齿轮钢的现有研究, 多数还是基于其高性能方面, 而有关质量稳定性方面的报道还相对较少, 齿轮钢淬透性带宽是质量稳定性研究的一个方向, 虽然有部分研究报道^[16-18], 但目前研究炉次数量较少, 使质量稳定性研究深度不够。

本文针对 Mn-Cr 系汽车齿轮钢, 从冶炼成分精确控制、成品材 C 波动控制、淬透性带宽控制、带状组织控制等几个方面研究其质量稳定性, 通过上百炉数据分析, 使结果更充分, 可为钢厂汽车齿轮钢质量稳定性控制提供借鉴。

2 试 验

2.1 试验材料

试验用材料为 Mn-Cr 系汽车齿轮钢棒材, 经转炉—精炼—连铸—轧制生产获得, 棒材规格在 $\Phi 40 \sim 60$ mm, 各试验材料在生产中执行相同的技术标准, 以保持各炉次工艺稳定, 在此基础上获得成品材, 并研究其质量稳定性, 各炉次关键合金成分控制目标一致, 如表 1 所示, 其中 C 质量分数控制目标为 0.17%, Mn 质量分数控制目标为 1.25%, Cr 质量分数控制目标为 1.24%。

表 1 Mn-Cr 系汽车齿轮钢关键合金成分控制目标

Table 1 Control target of key alloy composition of Mn-Cr automotive gear steel(w / %)

Element	C	Si	Mn	Cr	P	S
Control target	0.17	≤0.25	1.25	1.24	≤0.025	≤0.035

2.2 试验方案

2.2.1 合金成分分析

在 Mn-Cr 系齿轮钢精炼结束后取钢水样, 并分析所取得钢水样的 C, Mn, Cr 等合金成分质量分数, 检验炉次为 110 炉。

2.2.2 成分偏析研究

在 Mn-Cr 系齿轮钢成品材上切取 20 mm 厚圆片试样, 随后在圆片不同位置钻取钢屑样, 钻头尺寸为 $\Phi 5 \sim 6$ mm, 具体取样位置方案见图 1, 包括截面 C 成分分布取样方案和 C 波动取样方案。随后采用红外吸收法分析试样 C 质量分数, 获得 Mn-Cr 系齿轮钢成品材横截面 C 成分分布及各炉次 C 波动控制, 各炉次 C 波动可用式(1)计算获得:

$$\Delta C = C_{\max} - C_{\min} \quad (1)$$

其中, ΔC 为截面 C 波动, %; C_{\max} 为截面 5 个检测位置中 C 质量分数的最大值, %; C_{\min} 为截面 5 个检测位置中 C 质量分数的最小值, %。

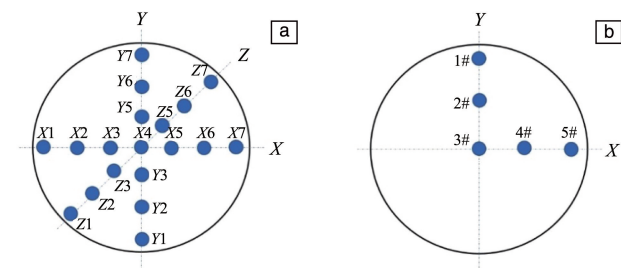


图 1 C 成分分布(a)和 C 波动(b)取样方案

Fig. 1 Sampling schemes of C composition distribution (a) and C fluctuation (b)

2.2.3 淬透性检测

参照 GB/T 225—2006, 在 Mn-Cr 系齿轮钢成品材上切取端淬试样毛坯, 并进行正火处理, 随后进一步将毛坯样加工成端淬试样, 如图 2 所示。之后将试样在 870 ℃ 保温一定时间后在端淬试验机上进行末端淬火实验。末端淬火实验结束后, 在平行于试样轴线方向磨制出 2 个深度为 0.4~0.5 mm 的平行的平面, 利用洛氏硬度计测量特定位置处的硬度, 从而分析试验钢淬透性。

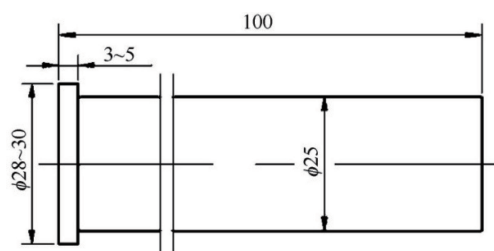


图2 端淬试样尺寸

Fig. 2 Dimension of Jominy specimen

2.2.4 带状组织分析

利用线切割方式在成品材上切取金相试样, 随后将金相试样纵截面进行粗磨、精磨、抛光处理, 并利用硝酸酒精溶液对抛光面进行腐蚀, 待组织清晰显现后在光镜下观察带状组织形貌, 并根据 GB/T 13299 对试验钢带状组织级别进行评定。

3 结果与讨论

3.1 Mn-Cr 系齿轮钢成分稳定控制

成分在保证齿轮钢性能的重要参数, 如强韧性、淬透性、硬度等, 汽车齿轮钢成分控制包括两方面内容, 一是冶炼终点成分控制, 二是成品材成分波动控制。

3.1.1 冶炼终点成分控制

冶炼终点成分控制是钢厂冶炼的关键控制点, 对钢材性能发挥具有重要作用, 尤其是部分关键合金成分的控制^[19, 20]。

为研究 Mn-Cr 系齿轮钢冶炼成分控制, 随机选取不少于 100 炉次的 Mn-Cr 系齿轮钢, 在其生产冶炼终点取样, 分析检测样品 C, Mn, Cr 等关键合金元素成分, 结果如图 3 所示。从图中可以看出, C 成分质量分数可以稳定控制在 0.16%~0.18%, 结合 C 控制目标, C 成分控制波动为 $\pm 0.01\%$, 即 $0.17\% \pm 0.01\%$, 控制精度 $\leq \pm 0.01\%$; Mn 成分质量分数可以控制在 1.21%~1.28%, 控制精度 $\leq \pm 0.04\%$, 并且绝大部分炉次可以控制在 1.23%~1.27%, 即 $\pm 0.02\%$ 以内; Cr 成分质量分数可以控制在 1.21%~1.29%, 控制精度 $\leq \pm 0.05\%$, 且 Cr 质量分数控制波动 $\leq \pm 0.02\%$ 的比例在 95% 以上。

从以上分析可以看出, 本研究中的 Mn-Cr 系齿轮钢成分控制精度非常高, C 波动 $\leq \pm 0.01\%$; Mn, Cr 波动 $\leq \pm 0.05\%$, 且 Mn, Cr 波动 $\leq \pm 0.02\%$ 的比例在 95% 以上。

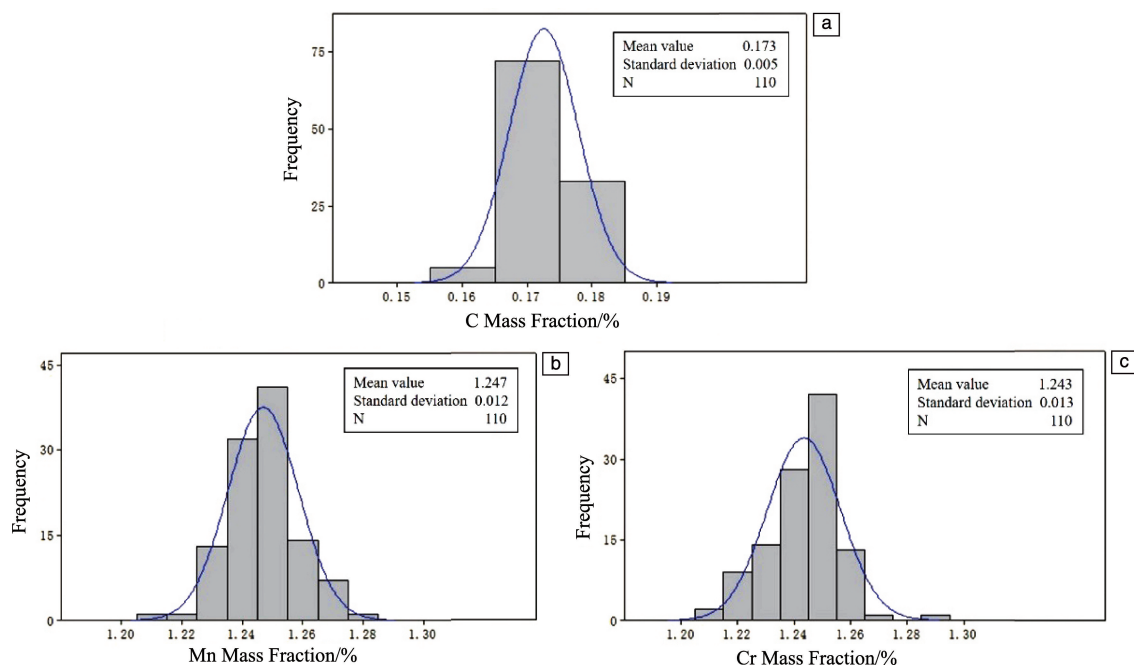


图3 Mn-Cr 系齿轮钢成分精确控制效果: (a)C, (b)Mn, (c)Cr

Fig. 3 Precise control effect of Mn-Cr gear steel: (a)C, (b)Mn, (c)Cr

3.1.2 成品材 C 波动

C 是钢材中的易偏析元素, C 的波动可以反映材料成分均匀性的控制效果, 以下结合 C 元素波动研究 Mn-Cr 系齿轮钢成分控制的稳定性。

(1) 成品材 C 波动特征

图 4 为某炉次 Mn-Cr 系齿轮钢成品材截面不同方向、不同位置 C 成分结果, 从图中可以看出, 成品材不同位置 C 质量分数不同, 即在成品材截面上存在成分偏析现象, 心部 C 质量分数相对较低, 边部部分位置 C 质量分数稍低, 部分位置 C 质量分数相对较高, 并且整体成分波动在 0.02% 以内。成品材成分波动与凝固偏析有关, 在铸坯上形成的宏观偏析会体现在成品材上。

(2) 成品材 C 波动控制

为了控制成品材 C 波动, 重点需要从铸坯凝固偏析控制入手, 通过连铸工艺参数优化减小铸坯原始偏析^[21, 22]。在 Mn-Cr 系齿轮钢连铸过程中, 浇铸过热度、

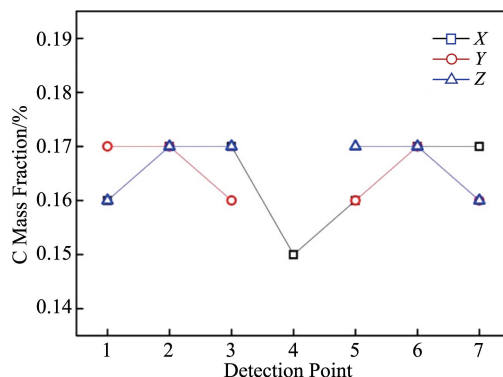


图 4 棒材截面 C 成分分布

Fig. 4 C distribution in cross section of rolled bar

拉速等对偏析的影响较大, 图 5 为过热度和拉速对成品材截面 C 波动的影响。从图中可以看出, 降低过热度, C 波动 $\leq 0.02\%$ 的比例升高; 降低拉速, C 波动 $\leq 0.02\%$ 的比例升高; 连铸工艺直接影响 C 波动控制效果。

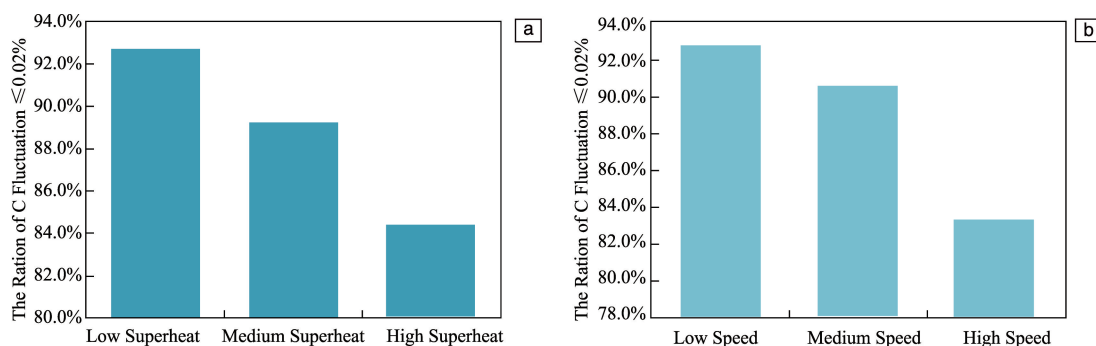


图 5 过热度(a)和拉速(b)对 Mn-Cr 系齿轮钢棒材 C 均匀性的影响

Fig. 5 Effect of superheat(a) and casting speed (b) on C uniformity of Mn-Cr gear rolled bar

(3) C 波动效果

在连铸工艺参数优化下, 进行 Mn-Cr 系齿轮钢工业化生产, 并随机选取不少于 100 炉 Mn-Cr 系齿轮钢成品材, 检测各炉次成品材截面不同位置 C 质量分数, 获得各炉次齿轮钢成品材 C 波动控制结果, 如图 6 所示。从图中可以看出, Mn-Cr 系齿轮钢 C 波动主要在 0.01% 左右, C 波动 $\leq 0.01\%$ 的比例达到 80% 以上, 而 C 波动 $\leq 0.02\%$ 的比例达到 95% 以上, 可知材料的截面成分稳定性取得了很好的控制效果。

3.2 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性

图 7 为典型 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性曲线, 从图中可以看出, 随着距淬火端距离的增加, Mn-Cr 系齿轮钢淬透性硬度逐渐降低, 从 43HRC ~ 44HRC 逐渐降低到 20HRC 以下, 并在距离淬火端 4~14 mm, 淬透性曲线斜率绝对值最大, 即硬度变化最大。

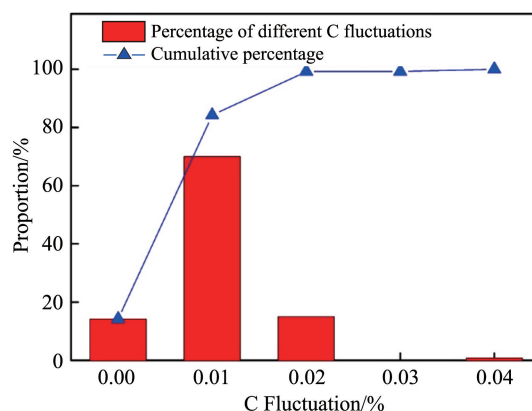


图 6 系齿轮钢棒材截面 C 波动控制效果

Fig. 6 Control effect of C fluctuation in cross section of gear steel bar

为了保证淬透性的稳定性, 对淬透性带宽提出了严格要求, 在实际应用中, 淬透性带宽越窄越好。根据 Mn-

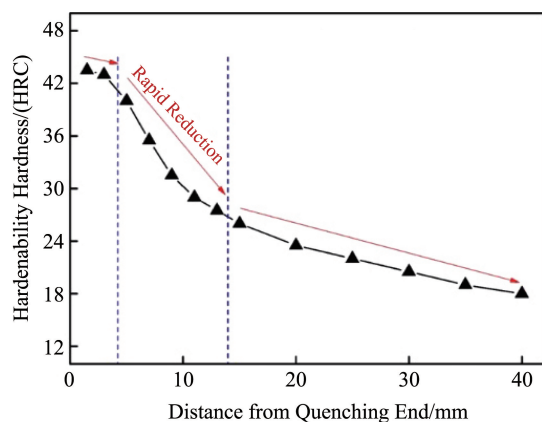


图7 典型 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性曲线

Fig. 7 Hardenability curve of typical Mn-Cr gear steel

Cr 系齿轮钢淬透性特点,并结合用户需求,设定距离淬透端 10 mm(J10)位置为淬透性硬度控制关键位置,该位置淬透性硬度波动显著,在后续淬透性带宽分析中,以该位置淬透性硬度为依据进行研究。

为了分析 Mn-Cr 系齿轮钢整体淬透性带宽控制,随机选择 110 炉 Mn-Cr 系齿轮钢进行淬透性分析,J10 位置淬透性硬度分析结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,本研究针对的 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性硬度可以稳定控制在 30HRC~34HRC 范围,淬透性带宽 ≤ 4 HRC,实现了窄淬透性带宽的控制。

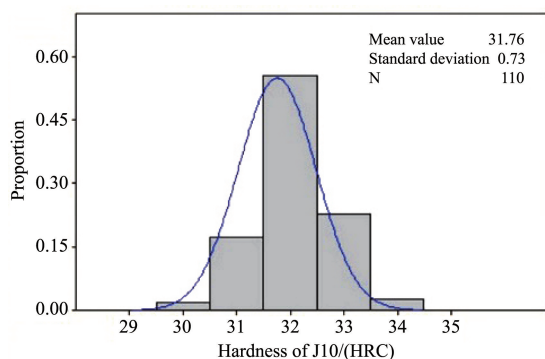


图8 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性带宽控制效果

Fig. 8 Control effect of hardenability bandwidth of Mn-Cr gear steel

目前 GB/T 5216—2014《保证淬透性结构钢》提出淬透性基带为 12HRC,2/3 窄带为 8HRC,而国外先进水平则要求带宽为 4HRC。对比分析,可以看出本研究中 Mn-Cr 系齿轮钢淬透性带宽控制水平大幅度提升,已达到世界先进水平。

2.3 Mn-Cr 系齿轮钢带状组织稳定控制

带状组织是齿轮钢质量不均匀性的体现,会对齿轮性能产生较大影响,随着用户对汽车齿轮钢质量均匀性及稳定性的要求越来越高,对汽车齿轮钢带状组织控制

要求也越来越高。

Mn-Cr 系汽车齿轮钢属于亚共析钢,在轧制后经缓慢冷却形成铁素体和珠光体组织,图 9 为典型 Mn-Cr 系齿轮钢轧制后的显微组织,可以看到 Mn-Cr 系齿轮钢轧态组织呈现带状组织特征。

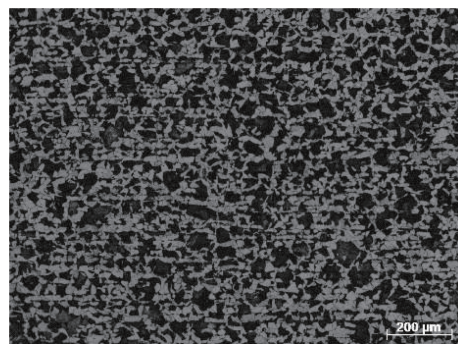


图9 Mn-Cr 系齿轮钢带状组织形貌

Fig. 9 The banded structure morphology of Mn-Cr gear steel

为了保证带状组织的稳定且良好控制,除了利用连铸工艺优化尽量降低成分偏析外^[23-25],还需要对轧制工艺进行优化和稳定性控制。有研究^[26, 27]指出,轧制加热温度、轧制应变速率、轧后冷却速率等都会对带状组织产生影响,在实际工业生产中,适当提高加热温度是比较简单有效的带状组织优化手段。高温可以促进元素扩散,使成分更加均匀,从而在轧后形成较均匀的组织,降低带状组织级别^[26]。

在 Mn-Cr 系汽车齿轮钢生产中,充分利用高均匀连铸工艺技术,并借鉴高温均匀化的有益作用,优化轧制工艺参数,形成了良好的带状组织控制方法。表 2 为统计检验的 130 炉 Mn-Cr 系汽车齿轮钢棒材带状组织的评级结果,可以看出, Mn-Cr 系汽车齿轮钢带状组织控制在 2.0 级以内,其中 1.5 级比例为 43.1%,2.0 级比例为 56.9%,达到了带状组织稳定 ≤ 2.0 级的水平,带状组织控制效果良好。

表2 Mn-Cr 系齿轮钢带状组织

Table 2 Banded structure of Mn-Cr gear steel

The banded structure grade	1.5	2.0	≤ 2.0
Heat number	56	74	130
Proportion/%	43.1	56.9	100

4 结 论

(1) 本试验研究分析的 Mn-Cr 系汽车齿轮钢,其冶炼终点 C 质量分数波动 $\leq \pm 0.01\%$,Mn,Cr 质量分数偏差 $\leq \pm 0.05\%$,实现成分精确控制的同时还保证了稳定性

控制,并且实现了成品材截面C波动 $\leq 0.02\%$ 的稳定性控制。

(2)通过工艺技术优化,将Mn-Cr系汽车齿轮钢淬透性带宽稳定控制在 $\leq 4\text{HRC}$ 水平,实现了窄淬透性带宽控制目标,淬透性带宽控制水平达到世界先进水平。

(3)充分利用高均匀连铸工艺技术,并借鉴高温均匀化的有益作用,优化轧制工艺参数,获得了良好的带状组织控制,将Mn-Cr系汽车齿轮钢带状组织稳定控制在 ≤ 2.0 级的水平。

参考文献 References

- [1] 李彩云,邢志国,赵向伟,等.材料导报[J],2020,34(11):21146-21154.
LI C Y, XING Z G, ZHAO X W, *et al.* Materials Reports[J], 2020, 34(11): 21146-21154.
- [2] SU S R, SONG R B, CHEN C, *et al.* Materials Science & Engineering A[J], 2019, 765: 138322.
- [3] 张中武.中国材料进展[J],2016,35(2):141-151.
ZHANG Z W. Materials China[J], 2016, 35(2): 141-151.
- [4] 翁宇庆.中国材料进展[J],2009,28(9/10):51-61.
WENG Y Q. Materials China[J], 2009, 28(9/10): 51-61.
- [5] 魏瑛康,齐山权,王岩,等.中国材料进展[J],2023,42(11):902-910.
WEI Y K, QI S Q, WANG Y, *et al.* Materials China[J], 2023, 42(11): 902-910.
- [6] COSTA L V, OLIVEIRA D C, WALLACE D L, *et al.* Journal of Materials Engineering and Performance[J], 2020, 29(6): 3593-3602.
- [7] 段飞虎,申景霞,朱荣,等.工业加热[J],2012,41(3):41-44.
DUAN F H, SHEN J X, ZHU R, *et al.* Industrial Heating[J], 2012, 41(3): 41-44.
- [8] DONG W L, NI H W, ZHANG H, *et al.* International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials[J], 2016, 23(3): 269-275.
- [9] AHMAD H, ZHAO B J, LYU S, *et al.* Metals[J], 2021, 11(12): 2051.
- [10] 张浩,刘年富,胡芳忠,等.钢铁研究学报[J],2021,33(8):775-783.
ZHANG H, LIU N F, HU F Z, *et al.* Journal of Iron and Steel Research[J], 2021, 33(8): 775-783.
- [11] 何肖飞,胡成飞,徐乐,等.工程科学学报[J],2021,43(4):537-544.
HE X F, HU C F, XU L, *et al.* Chinese Journal of Engineering[J], 2021, 43(4): 537-544.
- [12] FUCHS D, ROMMEL S, TOBIE T, *et al.* Journal of Heat Treatment Materials[J], 2021, 76(5): 321-339.
- [13] 庾桃,刘孟迪,文辉,等.材料热处理学报[J],2018,39(6):133-139.
YU T, LIU M D, WEN H, *et al.* Transactions of Materials and Heat Treatment[J], 2018, 39(6): 133-139.
- [14] CHEN W, HE X F, YU W C, *et al.* Micron[J], 2021, 144: 103028.
- [15] 宗洪祥,丁向东,孙军,等.中国材料进展[J],2016,35(6):416-422.
ZONG H X, DING X D, SUN J, *et al.* Materials China[J], 2016, 35(6): 416-422.
- [16] 刘锟,刘浏,何平,等.钢铁[J],2015,50(3):73-77.
LIU K, LIU L, HE P, *et al.* Iron and Steel[J], 2015, 50(3): 73-77.
- [17] 林平,王福利,刘浏.钢铁研究学报[J],2010,22(1):4-8.
LIN P, WANG F L, LIU L. Journal of Iron and Steel Research[J], 2010, 22(1): 4-8.
- [18] LANDEK D, LISCIC B, FILETIN T, *et al.* Materials and Manufacturing Processes[J], 2009, 24(7/8): 879-886.
- [19] 胡锋,周立新,张志成,等.中国材料进展[J],2015,34(7/8):595-604.
HU F, ZHOU L X, ZHANG Z C, *et al.* Materials China[J], 2015, 34(7/8): 595-604.
- [20] 王舟,李亦庄,何斌斌,等.中国材料进展[J],2019,38(3):223-230.
WANG Z, LI Y Z, HE B B, *et al.* Materials China[J], 2019, 38(3): 223-230.
- [21] 吴清明,许伟阳,颜慧成,等.钢铁[J],2012,47(5):23-28.
WU Q M, XU W Y, YAN H C, *et al.* Iron and Steel[J], 2012, 47(5): 23-28.
- [22] CHOUDHARY S K, GANGULY S. ISIJ International[J], 2007, 47(12): 1759-1766.
- [23] VERHOEVEN J D. Journal of Materials Engineering and Performance[J], 2000, 9(3): 286-296.
- [24] WANG Y L, CHEN Y L, YU W. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials[J], 2021, 28(4): 665-675.
- [25] HE X F, WANG X H, WANG Y, *et al.* Metallurgical Research & Technology[J], 2015, 112: 606.
- [26] 何肖飞,曹燕光,王毛球,等.金属热处理[J],2018,43(4):134-139.
HE X F, CAO Y G, WANG M Q, *et al.* Heat Treatment of Metals[J], 2018, 43(4): 134-139.
- [27] YANG C, MIN Y M, SUN H, *et al.* Advanced Materials Research[J], 2014, 915/916: 643-649.