



轻压下工艺对高硅石墨钢组织演变及 石墨粒子析出行为的影响

亓奉友¹, 苏博扬², 唐庆¹, 万勇², 左锦中¹, 温永红², 董强¹, 张行利¹

(1 中信泰富特钢研究院青钢分院, 青岛 266000; 2 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243032)

摘要:通过工业连铸、热处理试验及金相显微镜、扫描电子显微镜等工具系统研究了有/无轻压下(分五段压下, 总压下量 7 mm)及后续盐浴(440 °C和 500 °C)和回火(630 °C和 680 °C)工艺对高硅石墨钢铸坯碳、硅偏析, 以及其后续盘条组织转变和回火过程石墨粒子析出行为的影响。结果表明, 采用轻压下工艺可明显改善石墨易切削钢铸坯心部质量, 有效降低其铸坯中心碳、硅偏析。未轻压下和轻压下流次热轧盘条在 440 °C和 500 °C盐浴时均发生了明显贝氏体转变, 且在高碳、高硅的盘条厚度和中心及低盐温条件下, 更容易形成针状贝氏体。采用 440 °C盐浴和 680 °C回火的热处理工艺可有效提高石墨易切削钢回火过程的石墨化形核数量, 在此基础上, 增加基体碳、硅含量, 可加速促进回火过程 $\geq 1 \mu\text{m}$ ~ $< 3 \mu\text{m}$ 的石墨粒子大量形核。未轻压下、轻压下流次盘条经 440 °C盐浴、680 °C回火后的厚度中心石墨粒子密度较高, 分别达到 24 434、32 675 个/ mm^2 , 其石墨粒子尺寸主要位于 $\geq 1 \mu\text{m}$ ~ $< 3 \mu\text{m}$ 。

关键词:轻压下; 高硅石墨钢; 盐浴温度; 回火温度; 石墨粒子

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00166 **中图分类号:**TG142. 7

The Effect of Soft-reduction Process on Microstructure Evolution and Graphite Particle Precipitation Behavior of High Silicon Graphited Steel

Qi Fengyou¹, Su Boyang², Tang Qing¹, Wan Yong², Zuo Jinzhong¹, Wen Yonghong²,
Dong Qiang¹, Zhang Xingli¹

(1 Qingdao Branch, CITIC Pacific Steel Research Institute, Qingdao 266000, China;

2 School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China.)

Abstract: This study systematically investigates the influence of soft reduction (with/without, 5 passes with a total reduction of 7 mm) and subsequent heat treatments—salt bathing (440 °C and 500 °C) and tempering (630 °C and 680 °C)—on carbon/silicon segregation in high-silicon graphited steel billets and its effects on microstructure evolution and graphite precipitation behavior in wire rods. Industrial continuous casting, heat treatment trials, and characterization tools (metallographic microscopy, SEM) were employed. Results demonstrate that implementing soft reduction significantly improves centerline quality of free-cutting graphited steel billets, effectively reducing carbon and silicon segregation at the billet core. Bainite transformation significantly occurred in both non-soft-reduction and soft-reduction strand hot-rolled wire rods during salt baths at 440 °C and 500 °C. Furthermore, acicular bainite was more readily formed under conditions of high carbon and silicon content in the rod thickness center and at lower salt bath temperatures. The heat treatment process employing a 440 °C salt bath followed by tempering at 680 °C can effectively increase the number of graphite nucleation sites during the tempering process of free-cutting graphited steel. Building upon this optimized process, increasing the base carbon and silicon content can accelerate and promote the massive nucleation of graphite particles in the size range $\geq 1 \mu\text{m}$ but $< 3 \mu\text{m}$ during tempering. After undergoing the 440 °C salt bath and 680 °C tempering treatment, the graphite particle densities in the thickness center of the non-soft-reduction and soft-reduction rods were relatively high, reaching 24,434 particles/ mm^2 and 32,675 particles/ mm^2 , respectively. The graphite particle sizes in both cases were predominantly within the $\geq 1 \mu\text{m}$ to $< 3 \mu\text{m}$ range.

Key Words: Soft-reduction; High Silicon Graphited Steel; Salt Bath Temperature; Tempering Temperature; Graphite Particles

随着制造业朝着绿色化、高效化和精密化方向发展, 对基础零部件用易切削钢的需求日益迫切。

传统铅系易切削钢因在冶炼和车削加工过程会产生大量有毒有害烟气和冷却废液, 正逐渐受到限

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(项目号 2023AH051081)

作者简介: 亓奉友(1976年—), 男, 本科, 高级工程师; **E-mail:** qifengyou@citicsteel.com; **收稿日期:** 2025-07-05

通信作者: 万勇(1987年—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** wanyong0729@163.com

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

制。有害物质限制指令 RoHS 和 ELV 已明确规定汽车、家电等零部件产品的铅含量应低于 0.1%。因此,石墨易切削钢引起了学者和制造商的广泛关注^[1-4],也被公认为是硫、铅易切削钢的最佳替代品。日本 JFE 公司^[5-6]、日本住友金属公司、韩国浦项钢铁公司^[7]、台北上晋金属公司、韩国庆北大学^[8]、北京科技大学^[9]和安徽工业大学^[10-11]等钢铁企业和科研院所也竞相开展了石墨易切削钢的研制工作。

石墨易切削钢主要是利用 Fe_3C 的高温分解得到大量弥散分布起润滑、断屑作用的石墨粒子,以此获得优异的切削性能。以国内某钢铁企业生产的 GEC01 石墨易切削钢(高碳高硅系列)为研究对象,研究连铸轻压下工艺对其铸坯心部碳浓度的影响规律,探讨铸坯碳偏析对其后续盐浴、回火组织转变及回火过程石墨粒子析出的影响行为,从而为石墨易切削钢的连铸轻压下技术应用及后续盐浴、回火工艺的合理设计提供理论依据和科学指导。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料及生产方法

在国内某钢铁企业进行高硅石墨易切削钢 GEC01(其熔炼成分见表 1)的连铸试验,其冶炼工艺为 120 t 顶底复吹转炉冶炼→LF 炉精炼→RH 精炼→矩形坯连铸,其铸坯断面为 180 mm×240 mm,中间包温度为 1 485 °C,连铸机为 R8.5 m 弧形连铸机,拉速为 1.00 m/min,二冷比水量为 0.27 L/kg,结晶器电磁搅拌电流为 200 A,频率为 3.5 Hz,末端电磁搅拌 420 A,频率为 6 Hz,其中,第 3 流采用五段轻压下工艺,总压下量为 7.0 mm,各段压下量依次为 0、0.5、1.5、3、2 mm;其余流次均不采用轻压下工艺。随后,在第 3 流、第 4 流铸坯中分别挑选 2 根进行后续热轧-盐浴实验,4 根铸坯的热轧工艺基本相同,其开轧温度为 $(1\ 160\pm 15)$ °C,吐丝温度为 (920 ± 20) °C,盘条直径为 $\phi 10$ mm。同一流 2 根铸坯的轧后盐浴温度分别选择 500 °C 和 440 °C,盐浴时间均为 5 min。待每卷盐浴盘条冷至室温后,各截取若干小段试样分别进行不同回火温度(630 °C 和 680 °C)实验,回火时间均为 5 h。

表 1 GEC01 石墨易切削钢的熔炼成分(质量分数)

%						
C	Si	Mn	S	P	Al	Fe
0.713	2.305	0.221	0.026	0.011	0.005	Bal

1.2 检测及分析方法

每 1 流铸坯分别沿横、纵截面切取低倍样一块,采用 10% 的热盐酸(HCl)侵蚀(50 °C, 5 min)其低倍组织。采用 $\phi 5$ mm 合金钻头对其低倍样横截面进行钻孔取屑,取样位置如图 1 铸坯所示(①为凝固中心),采用红外 C、S 分析仪检测各取样点的钢屑碳含量,采用化学分析法检测各取样点的钢屑硅含量,用中心偏析指数 c_i/c_0 表征铸坯碳、硅偏析指数(c_i 为铸坯横截面中心取样点碳、硅含量检测值, c_0 为实验钢中间包内碳、硅的熔炼成分)。分别对盐浴、回火盘条横截面进行打磨、抛光和 4% 硝酸酒精溶液侵蚀。采用蔡司金相显微镜观察铸坯心部及盐浴、回火盘条横截面 1/4 处和心部的金相组织并拍照。采用 GeminiSEM 460 场发射扫描电镜及 EDS 能谱仪观察、分析各回火盘条横截面 1/4 处和心部的石墨、 Fe_3C 形貌和成分。采用 Photoshop 软件对各回火盘条横截面 1/4 处和心部的石墨粒子尺寸、数量进行测量、统计,得出其横截面 1/4 处和心部的石墨粒子总密度(石墨总数量÷总面积)及在不同尺寸范围的数量百分比。基于 ASTM E112—2013 截点法计算各回火盘条横截面 1/4 处和心部的平均晶粒尺寸。

2 结果与讨论

2.1 铸坯偏析及组织演变

2.1.1 铸坯低倍组织及碳、硅偏析

图 2 为未轻压下和轻压下的石墨易切削钢铸坯横、纵截面低倍组织。采用凝固传热模型计算得到石墨易切削钢开始进行轻压下时的铸坯液芯区域如图 2(c)、(d)中红虚框/线区域所示。从图 2 可以看出,未轻压下的石墨易切削钢铸坯横截面凝固中心附近呈黑灰色(明显偏析区域),其纵截面心部也出现明显的黑灰色偏析带,同时铸坯内部存在明显中心疏松和缩孔,如图 2(a)、(b)所示;相比之下,采用轻压下后,石墨易切削钢铸坯内部中心疏松和缩孔缺陷基本消失,其横、纵截面也未出现明显黑灰色偏析区域/带,但在距其铸坯表面 1/4 厚度处出现较多纵裂纹,如图 2(c)(d)所示。由此可见,采用轻压下技术虽可明显改善石墨易切削钢铸坯心部质量和偏析,但易导致其铸坯厚度 1/4 处沿压下方向开裂,其主要原因一方面是铸坯厚度 1/4 处正处于粗大柱状晶区,晶界面积较少,位错滑移困难,从而造成压下变形时,应力易集中在晶界处;另一方面可能是石墨易切削钢凝固时,固液前沿的高浓度碳、硅原子易在枝晶间富集且随柱状晶的不断生长逐渐富集

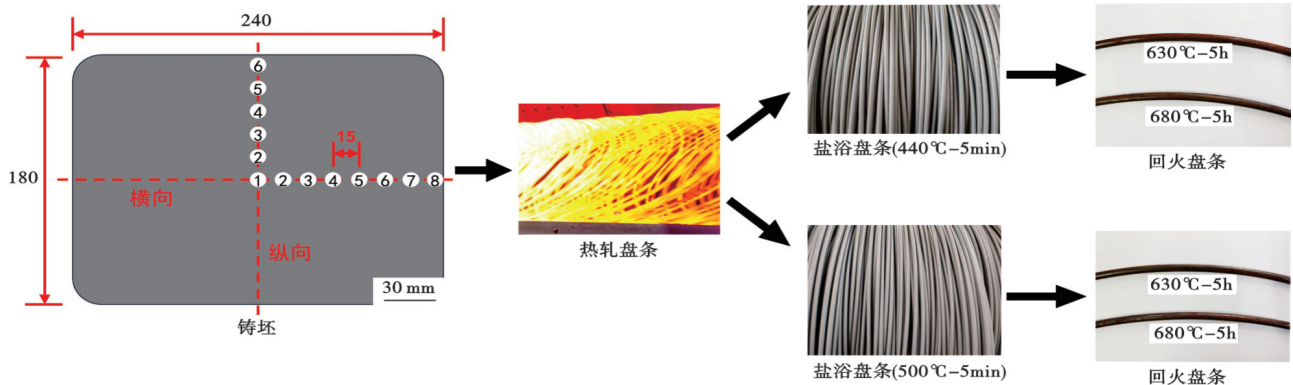


图 1 GEC01 石墨易切削钢铸-轧过程取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sampling in the cast-rolling process of GEC01 free-cutting graphited steel

于晶界,进而造成晶界脆性增大,晶界结合力下降,最终导致在压下辊的压下作用下,该柱状晶区晶界所承受的拉应力明显高于晶界结合力,形成沿晶界方向(与铸坯厚度方向平行)开裂的纵裂纹^[12-15]。

图3、图4分别为未轻压下和轻压下的石墨易切削钢铸坯横截面横、纵方向各取样点(各取样点命名和图1铸坯中的编号一致)的C、Si偏析指数。从图3可以看出,未轻压下和轻压下的实验钢铸坯凝固中心(取样点1)C、Si偏析较为严重,其碳偏析指数分别达到1.38(0.985%w[C])和1.22(0.872%w[C]),其硅偏析指数分别达到1.16(2.67%w[Si])和1.11(2.56%w[Si]),对应的金相组织为索氏体,且索氏体内部弥散分布较多细小的石墨粒子,尺寸在2~5 μm。未轻压下和轻压下流次铸坯横截面横向中心线上取样点2、3、4位置均出现C、Si的轻微负偏析,其中,未轻压下流次铸坯在取样点2-4位置的C、Si偏析指数分别为0.93~0.97、0.95~0.98,轻压下流次铸坯在取样点2-4位置的C、Si偏析指数分别为0.96~0.97、0.96~0.98。相比之下,在铸坯横截面纵向中心线上,未轻压下和轻压下流次均只在取样点2位置出现C、Si的轻微负偏析,其C偏析指数分别

为0.93、0.88,Si偏析指数分别为0.94、0.92。由此可见,使用轻压下可以有效降低石墨易切削钢铸坯的中心碳、硅偏析。

2. 1. 2 盐浴组织

未轻压下和轻压下流次石墨易切削钢分别经440、500 °C盐浴的盘条横截面厚度1/4处和中心金相组织如图5所示。从图5可以看出,经440 °C和500 °C盐浴后,未轻压下和轻压下流次盘条厚度1/4处和厚度中心组织均为贝氏体,但其贝氏体形貌存在些许差异。在盘条厚度1/4处,未轻压下和轻压下流次实验钢在两种盐浴温度下的组织均为杆状贝氏体,且440 °C盐浴的实验钢渗碳体更少、更细;在盘条厚度中心,未轻压下流次实验钢经440 °C盐浴后组织为针状贝氏体,而经500 °C盐浴后组织为针状+杆状贝氏体。相比之下,轻压下流次实验钢经440、500 °C盐浴后,其盘条心部组织均为针状+杆状贝氏体。综上可知,本实验钢热轧盘条在440、500 °C盐浴时均发生了明显贝氏体转变,且随盐浴温度降低和基体碳、硅含量升高,其贝氏体形貌逐渐由杆状转为针状,分析其贝氏体形貌变化的主要原因可能与钢中碳的扩散速率和渗碳体析出难易程度有关。

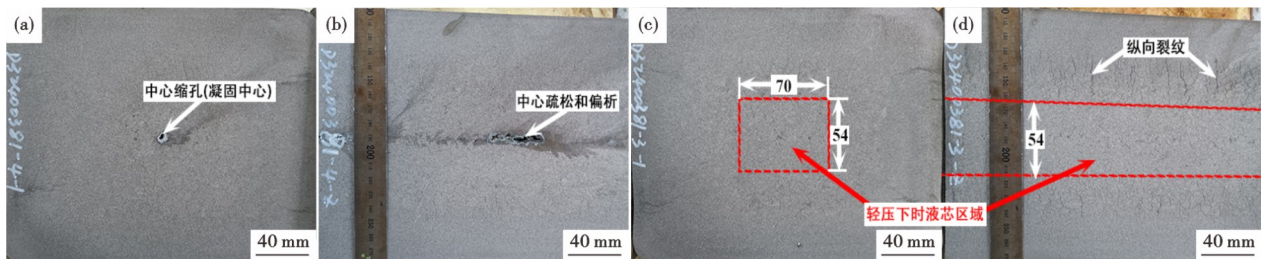


图2 GEC01 石墨易切削钢铸坯低倍组织:(a) 横截面-未轻压下,(b) 纵截面-未轻压下,(c) 横截面-轻压下,(d) 纵截面-轻压下

Fig. 2 Macrostructure of GEC01 free-cutting graphited steel billet: (a) cross-section-non-soft reduction, (b) longitudinal section-non-soft reduction, (c) cross-section-soft reduction, (d) longitudinal section-soft reduction

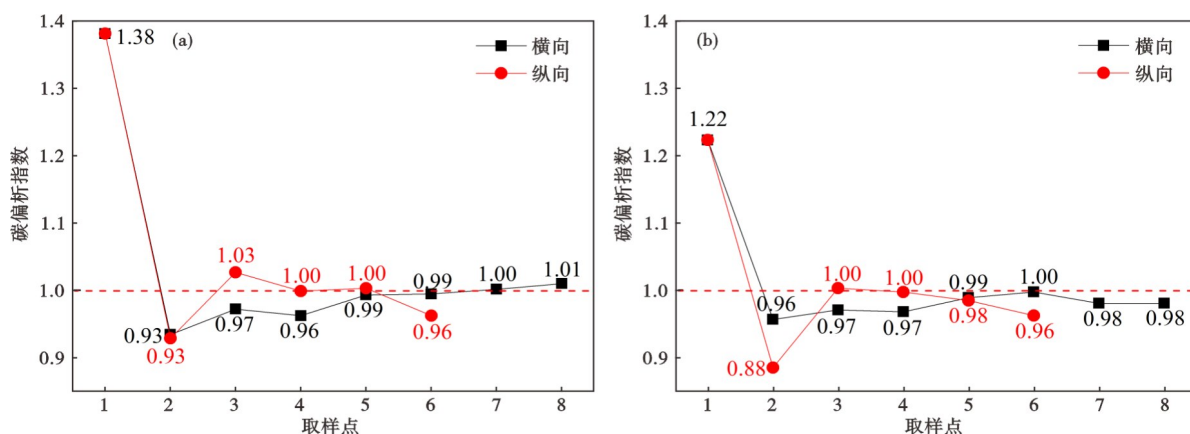


图3 GEC01石墨易切削钢铸坯横截面各取样点的碳偏析指数:(a)未轻压下,(b)轻压下

Fig. 3 Carbon segregation index at various sampling locations on the cross-section of GEC01 free-cutting graphited steel billet: (a) non-soft reduction, (b) soft reduction

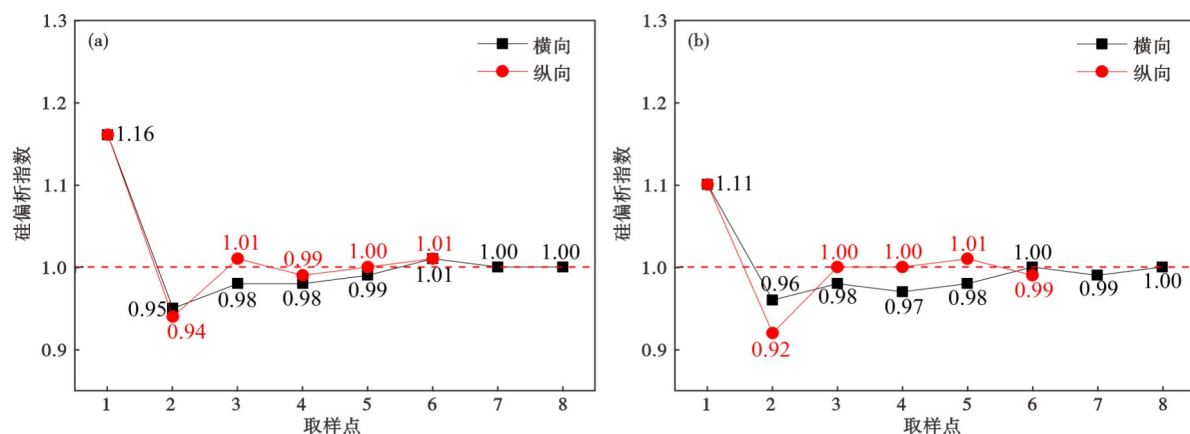


图4 GEC01石墨易切削钢铸坯横截面各取样点的硅偏析指数:(a)未轻压下,(b)轻压下

Fig. 4 Silicon segregation index at various sampling locations on the cross-section of GEC01 free-cutting graphited steel billet: (a) non-soft reduction, (b) soft reduction.

盐浴温度越低,在奥氏体晶界或其附近贫碳区形成的铁素体晶核可能更容易按切变共格方式长大,其奥氏体中碳原子已难以扩散至晶界,而碳原子在铁素体中扩散也明显受到抑制,因此与铁素体共格长大的同时,碳原子只能在铁素体某些亚晶界或晶面上聚集、析出,从而形成针状贝氏体组织^[16, 17]。而盘条厚度中心碳含量高的同时也伴随硅含量高,这样一方面造成贝氏体相变时需要排出的碳原子量更多,导致贝氏体开始相变温度降低和相变速度减慢,另一方面会促使奥氏体稳定性增加并有效抑制渗碳体析出,因此导致其盐浴组织更易呈现无碳化物或少碳化物(针状)贝氏体形貌^[18-19]。

2.1.3 回火组织

(1) 金相组织

图6和图7分别为未轻压下和轻压下流次石墨易切削钢分别经630、680℃回火的盘条厚度1/4处

和厚度中心金相组织。从图6可以看出,630℃回火时,未轻压下和轻压下流次石墨易切削钢的金相组织主要为铁素体+石墨粒子+Fe₃C,其中Fe₃C呈细小弥散分布,尺寸基本在1μm以下,而石墨粒子尺寸相对较大,大多呈不规则形状,尺寸从1μm至6μm不等。相比500℃盐浴,440℃盐浴的各连铸流次实验钢回火盘条厚度1/4处和厚度中心的Fe₃C数量明显更多。相同盐浴温度下,各回火盘条厚度中心的Fe₃C数量明显多于其厚度1/4处,未轻压下流次回火盘条厚度中心的Fe₃C数量明显多于轻压下流次。从图7可以看出,当回火温度从630℃提高至680℃,各实验钢回火盘条的Fe₃C数量急剧减少,而石墨粒子数量显著增加且其形貌更为圆润。相同盐浴温度下,各回火盘条厚度中心的石墨粒子数量明显多于其厚度1/4处,未轻压下流次回火盘条厚度中心的石墨粒子平均尺寸明显大于轻压下流次,

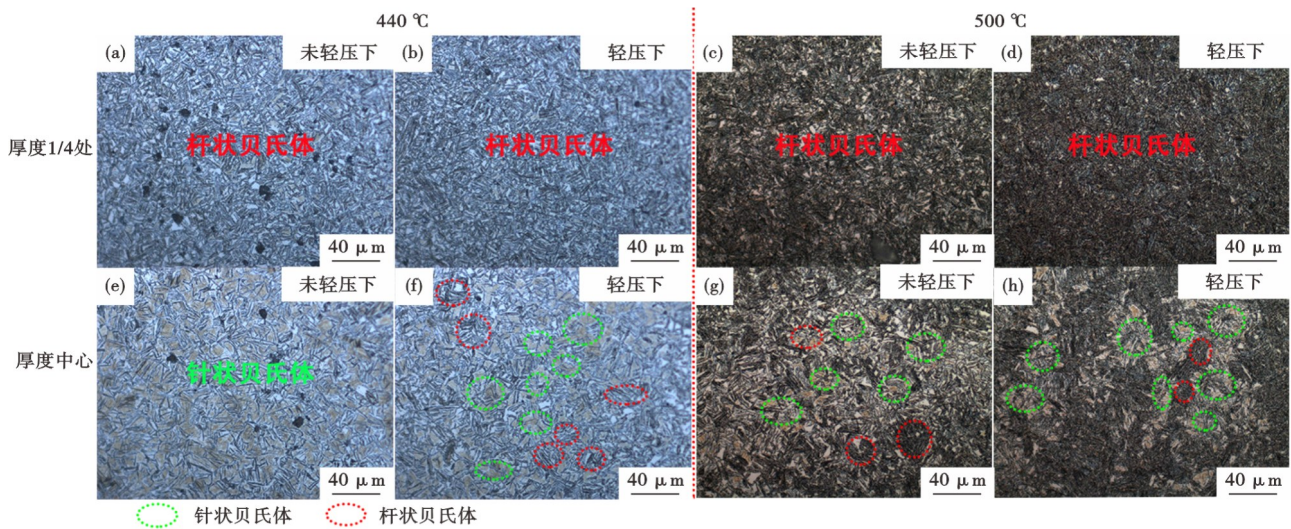


图5 不同盐浴温度下GEC01石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和中心组织:(a)未轻压下-厚度1/4处-440 °C;(b)轻压下-厚度1/4处-440 °C;(c)未轻压下-厚度1/4处-500 °C;(d)轻压下-厚度1/4处-500 °C;(e)未轻压下-厚度中心-440 °C;(f)轻压下-厚度中心-440 °C;(g)未轻压下-厚度中心-500 °C;(h)轻压下-厚度中心-500 °C

Fig. 5 Microstructures at quarter-thickness and center positions on the cross-section of GEC01 free-cutting graphitized steel wire rod under different salt bath temperatures : (a)non-soft reduction-quarter-thickness-440 °C; (b)soft reduction-quarter-thickness-440 °C; (c)non-soft reduction-quarter-thickness-500 °C; (d)soft reduction-quarter-thickness-500 °C; (e)non-soft reduction-center-440 °C; (f)soft reduction - center-440 °C; (g)non-soft reduction-center-500 °C; (h)soft reduction-center-500 °C

但石墨粒子数量明显少于轻压下流次。相比500 °C盐浴,440 °C盐浴的各连铸流次实验钢回火盘条厚度中心的石墨粒子数量明显更多。基于以上结果可以得出,降低盐浴温度和提高回火温度均可有效促进石墨易切削钢回火过程 Fe_3C 的石墨化转变;低回火温度和高碳含量更有利于回火过程 Fe_3C 的弥散析出,高回火温度和高硅含量更有利于 Fe_3C 石墨化过程的石墨粒子形核,分析其主要原因是提高温度和基体硅含量可明显提高碳的扩散系数和渗碳体中碳的活度^[20],降低渗碳体的稳定性,从而促进渗碳体分解和石墨粒子形核^[21]。

(2) 晶粒尺寸

两种回火温度下石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和中心的平均晶粒尺寸统计结果如图8所示。从图8(a)可以看出,随着回火温度升高,其盘条横截面厚度1/4处和中心的晶粒尺寸均明显增加。630 °C回火的石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和心部的平均晶粒尺寸分别为17.9~19.8 μm和14.5~16.7 μm,而680 °C回火的石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和心部的平均晶粒尺寸分别为21.6~22.7 μm和14.5~16.7 μm。此外,低回火温度(630 °C)下,轻压下流次盘条心部的平均晶粒尺寸明显大于同盐浴温度、未轻压下流次盘条心部的平均晶粒尺寸;而高回火温度(680 °C)下,未轻压下流

次盘条厚度1/4处和中心的平均晶粒尺寸均分别大于同盐浴温度、同位置轻压下流次盘条的平均晶粒尺寸。由此可见,回火过程亚微米级 Fe_3C (<1 μm)的石墨化及石墨粒子长大均能有效减轻对铁素体晶界的钉扎作用,明显促进晶粒长大。

2.2 回火后石墨粒子形貌、密度及尺寸分布

2.2.1 石墨粒子形貌及成分

图9为500 °C盐浴、630 °C回火的未轻压下流次盘条心部石墨、 Fe_3C 的SEM形貌及能谱分析结果。从图9可以看出,其回火过程基体中析出了大量 Fe_3C 粒子(呈亮白色), Fe_3C 呈粒状、短棒状和长条状等多种形态弥散分布,同时,基体中还沿晶界析出了少量大尺寸石墨粒子(呈黑色),石墨粒子主要呈椭圆形或纺锤状,长度为5.2~8.5 μm,宽度为2.0~3.2 μm。图10为440 °C盐浴、680 °C回火的未轻压下流次盘条心部石墨、 Fe_3C 的SEM形貌及能谱分析结果。从图10可以看出,其回火过程基体中 Fe_3C (呈亮白色)析出数量显著减少,其形貌主要呈粒状,直径基本小于1 μm;而石墨粒子主要以多边形或不规则形态析出于晶界上(呈暗灰色),分析其主要原因是与晶内相比,晶界上原子无序,能量更高且具有更多空位,更有利于碳原子扩散,加上石墨粒子在晶界上的临界形核功远小于晶内^[22-24]。因此,石墨更倾向于在晶界上形核。相比图9、图10中的石墨粒

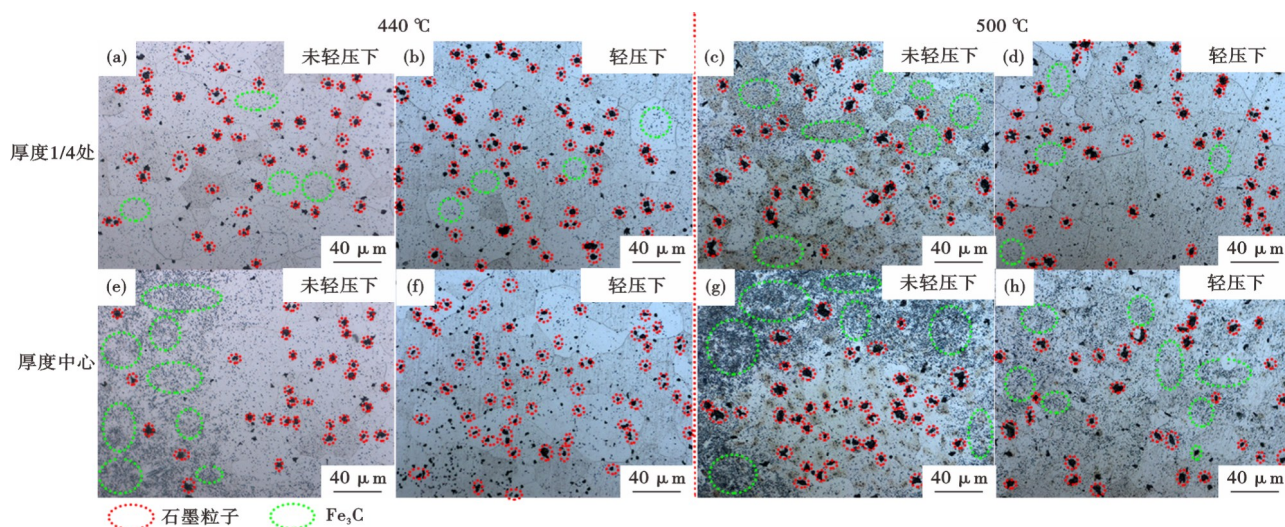


图6 630 °C回火的GEC01石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和中心组织:(a)未轻压下-厚度1/4处-440 °C;(b)轻压下-厚度1/4处-440 °C;(c)未轻压下-厚度1/4处-500 °C;(d)轻压下-厚度1/4处-500 °C;(e)未轻压下-厚度中心-440 °C;(f)轻压下-厚度中心-440 °C;(g)未轻压下-厚度中心-500 °C;(h)轻压下-厚度中心-500 °C

Fig. 6 Microstructures at quarter-thickness and center positions on the cross-section of GEC01 free-cutting graphitized steel wire rod tempered at 630 °C : (a) non-soft reduction-quarter-thickness-440 °C; (b) soft reduction-quarter-thickness-440 °C; (c) non-soft reduction-quarter-thickness-500 °C; (d) soft reduction-quarter-thickness-500 °C; (e) non-soft reduction-center-440 °C; (f) soft reduction - center-440 °C; (g)non-soft reduction-center-500 °C; (h)soft reduction-center-500 °C

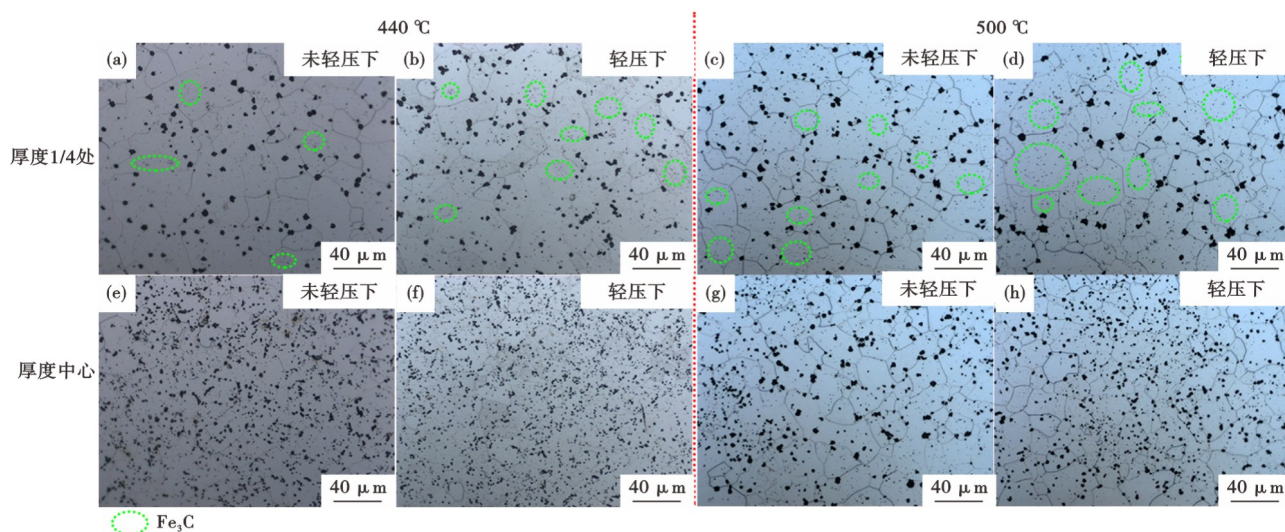


图7 680 °C回火的GEC01石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和中心组织:(a)未轻压下-厚度1/4处-440 °C;(b)轻压下-厚度1/4处-440 °C;(c)未轻压下-厚度1/4处-500 °C;(d)轻压下-厚度1/4处-500 °C;(e)未轻压下-厚度中心-440 °C;(f)轻压下-厚度中心-440 °C;(g)未轻压下-厚度中心-500 °C;(h)轻压下-厚度中心-500 °C

Fig. 7 Microstructure at quarter-thickness and center positions on the cross-section of GEC01 free-cutting graphitized steel wire rod tempered at 680 °C : (a) non-soft reduction-quarter-thickness-440 °C; (b) soft reduction-quarter-thickness-440 °C; (c) non-soft reduction-quarter-thickness-500 °C; (d) soft reduction-quarter-thickness-500 °C; (e) non-soft reduction-center-440 °C; (f) soft reduction - center-440 °C; (g)non-soft reduction-center-500 °C; (h)soft reduction-center-500 °C

子数量明显更多且尺寸较大,直径基本大于2 μm。

2.2.2 石墨密度及尺寸分布

两种回火温度下石墨易切削钢盘条横截面厚度1/4处和中心的石墨粒子密度统计结果如图11所示。从图11(a)可以看出,不同连铸工艺和盐浴

温度下,630 °C回火的实验钢盘条横截面厚度中心的石墨粒子密度略大于其厚度1/4处,而680 °C回火的实验钢盘条横截面厚度中心的石墨粒子密度明显大于其厚度1/4处。在盘条厚度中心处,相同回火温度下,440 °C盐浴对应的石墨粒子密度明显

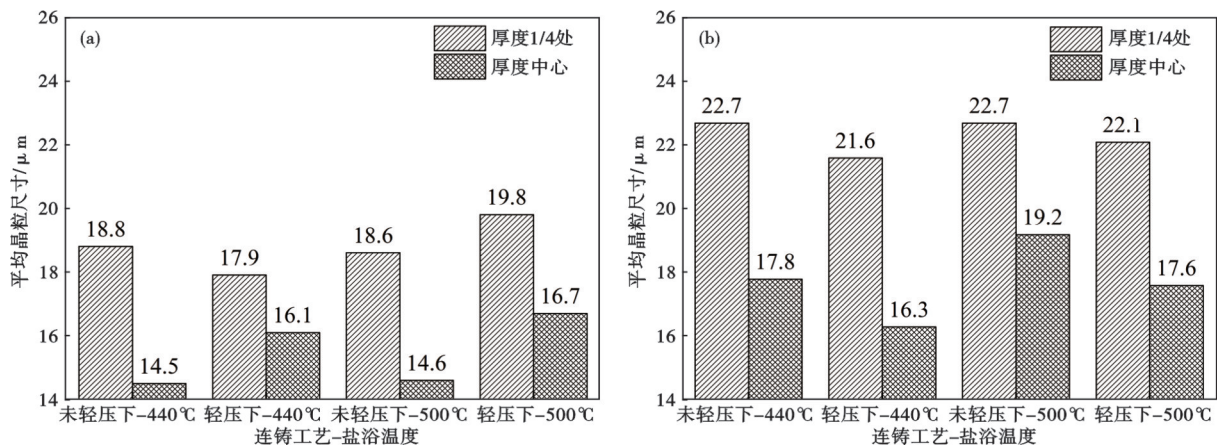


图 8 两种回火温度下 GEC01 石墨易切削钢盘条横截面厚度 1/4 处和中心的平均晶粒尺寸: (a) 630 °C, (b) 680 °C

Fig. 8 Average grain size at quarter-thickness and center positions on the cross-section of GEC01 free-cutting graphitized steel wire rod under two tempering temperatures : (a)630 °C, (b)680 °C

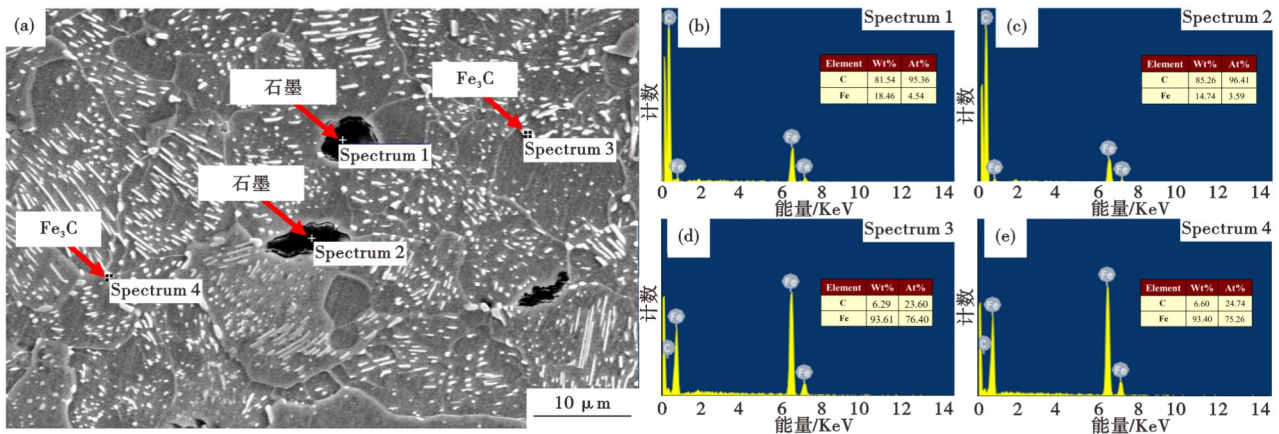


图 9 500 °C 盐浴、630 °C 回火的未轻压下流次盘条心部石墨、Fe₃C 的 SEM 形貌及能谱分析结果: (a) SEM 形貌, (b) 能谱 1, (c) 能谱 2, (d) 能谱 3, (e) 能谱 4

Fig. 9 SEM morphology and EDS analysis results of graphite and Fe₃C in the core region of non-soft-reduction wire rod from a specific cast: salt-bathed at 500 °C and tempered at 630 °C : (a)SEM morphology; (b)spectrum 1; (c)spectrum 2; (d) spectrum 3; (e) spectrum 4

高于 500 °C 盐浴对应的石墨粒子密度。当回火温度从 630 °C 提高至 680 °C, 实验钢盘条横截面厚度 1/4 处石墨粒子密度从 1 549~1 657 个/mm² 增至 2 228~4 581 个/mm², 其厚度中心石墨粒子密度从 1 659~1 906 个/mm² 增至 7 463~32 675 个/mm², 其中, 未轻压下、轻压下流次盘条经 440 °C 盐浴、680 °C 回火后的厚度中心石墨粒子密度最高, 分别达到 24 434、32 675 个/mm²。图 12 为两种回火温度下实验钢盘条横截面厚度 1/4 处和中心不同尺寸范围石墨粒子数量百分比和平均尺寸统计结果。从图 12 可以看出, 当回火温度从 630 °C 提高至 680 °C, 实验钢盘条中 ≥5 μm 和 ≥4 μm~<5 μm 的石墨粒子数量百分比显著降低, 而 ≥1 μm~<2 μm 和 ≥2 μm~<3 μm 的石墨粒子数量百分比明显增加, 其中, 采用 440 °C 盐浴、

680 °C 回火的未轻压下、轻压下流次回火盘条厚度中心 ≥1 μm~<3 μm 的石墨粒子数量百分比最高, 分别为 92%、96%, 相应的石墨粒子平均尺寸最小, 分别为 2.05、1.93 μm。综上可知, 采用 440 °C 盐浴和 680 °C 回火的热处理工艺可有效提高石墨易切削钢回火过程的石墨化形核数量, 在此基础上增加基体碳、硅含量, 可加速促进回火过程 ≥1 μm~<3 μm 的石墨粒子大量形核。

3 结论

通过工业连铸、热处理试验及金相显微镜、扫描电子显微镜等工具系统研究了轻压下、盐浴和回火工艺对高硅石墨钢铸坯碳、硅偏析及其后续盘条厚度 1/4 处和中心盐浴、回火组织转变及回火过程

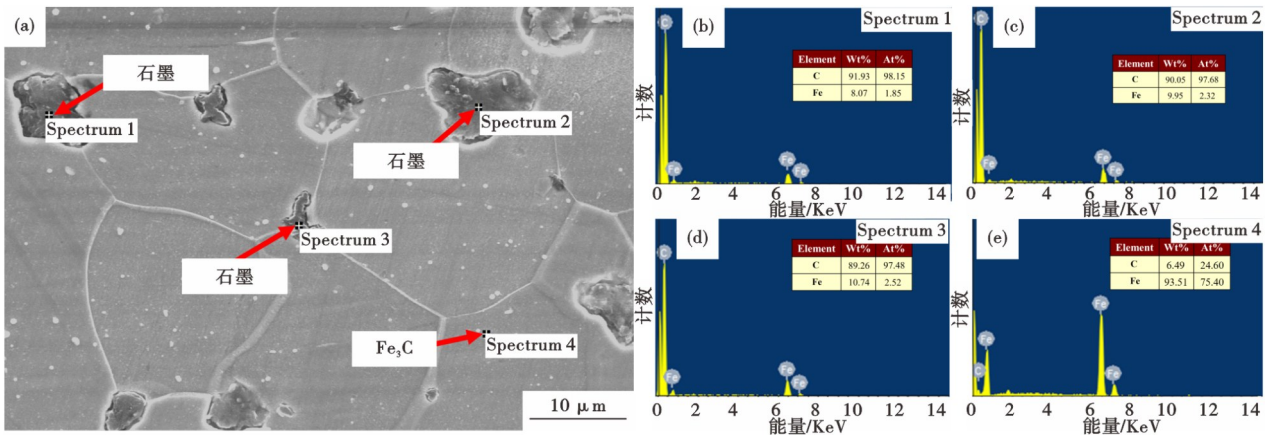


图 10 440 °C盐浴、680 °C回火的未轻压下流次盘条心部石墨、Fe₃C的SEM形貌及能谱分析结果:(a) SEM形貌,(b) 能谱1,(c) 能谱2,(d) 能谱3,(e) 能谱4

Fig. 10 SEM morphology and EDS analysis results of graphite and Fe₃C in the core region of non-soft-reduction wire rod from a specific cast: salt-bathed at 440 °C and tempered at 680 °C : (a) SEM morphology, (b)spectrum 1, (c) spectrum 2, (d)spectrum 3, (e)spectrum 4

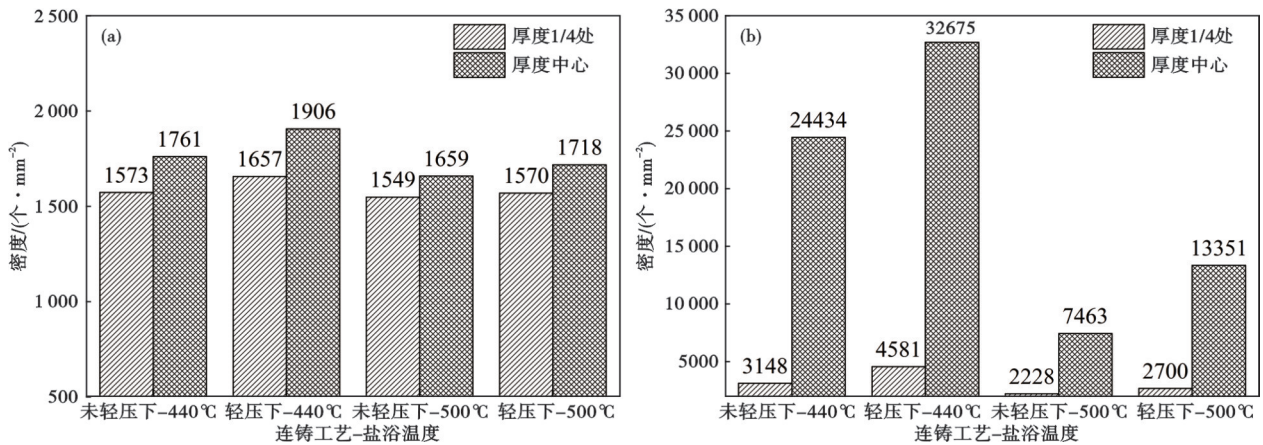


图 11 两种回火温度下 GEC01 石墨易切削钢盘条中的石墨粒子密度统计结果:(a) 630 °C,(b) 680 °C

Fig. 11 Statistical results of graphite particle density in GEC01 free-cutting graphited steel wire rod under two tempering temperatures : (a) 630 °C, (b) 680 °C

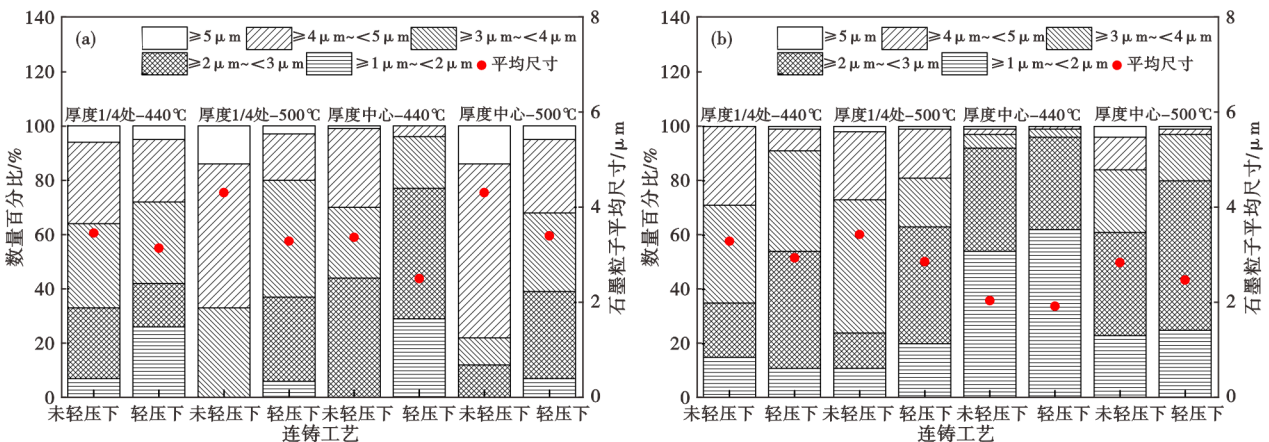


图 12 两种回火温度下 GEC01 石墨易切削钢盘条中各尺寸范围石墨粒子数量百分比和石墨平均尺寸统计结果:(a) 630 °C,(b) 680 °C

Fig. 12 Statistical results of number percentage by size range and average graphite size in GEC01 free-cutting graphited steel wire rod under two tempering temperatures : (a) 630 °C, (b) 680 °C

石墨粒子析出行为的影响,得到如下主要结论:

1) 采用轻压下工艺可明显改善 GEC01 石墨易切削钢铸坯心部质量,有效降低其铸坯中心碳、硅偏析。未轻压下和轻压下流次铸坯凝固中心碳偏析指数分别达到 1.38 和 1.22,硅偏析指数分别达到 1.16 和 1.11。

2) 未轻压下和轻压下流次热轧盘条在 440 °C 和 500 °C 盐浴时均发生了明显贝氏体转变,且在低碳、高硅的厚度中心和低盐温条件下,更容易形成针状贝氏体。

3) 经 630 °C 和 680 °C 回火后,未轻压下和轻压

下流次实验钢盘条的金相组织为铁素体+石墨粒子+Fe₃C。当回火温度从 630 °C 提高至 680 °C,实验钢盘条横截面厚度 1/4 和中心的石墨粒子密度均明显增加,其中未轻压下、轻压下流次盘条经 440 °C 盐浴、680 °C 回火后的厚度中心石墨粒子密度最高,分别达到 24 434、32 675 个/mm²,且其石墨粒子尺寸主要位于 ≥1 μm~<3 μm

4) 采用 440 °C 盐浴和 680 °C 回火的热处理工艺可有效提高石墨易切削钢回火过程的石墨化形核数量,在此基础上增加基体碳、硅含量,可加速促进回火过程 ≥1 μm~<3 μm 的石墨粒子大量形核。

参考文献

- [1] Chen H-X, Gong Y-Q, Baosiriguleng, et al. Fuzzy FMECA for CNC machine tool spindle system[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1043(2): 022037.
- [2] 尹云洋, 方芳, 严翔, 等. 环保石墨易切削钢的组织及性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(4): 133-137.
- [3] 闫卫兵, 邢薇. 环保型易切削钢 X1215 的开发[J]. 金属世界, 2013(1): 61-64.
- [4] 陈宣宇, 曹建春, 周晓龙. 热处理对石墨易切削钢显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2017, 46(4): 234-237.
- [5] Toshiyuki H, Akihiro M, Keniti A, et al. A newly developed unleaded free cutting steel which has both of high fatigue strength and excellent machinability using graphitization of carbon in the steel[J]. Material Japan, 2003, 42(2): 163-165.
- [6] Takashi I, Toshiyuki M. Bar and wire steels for gears and valves of automobiles-eco-friendly free cutting steel without lead addition[J]. JFE Technical Report, 2004, 04: 74-80.
- [7] Kim Y J, Bae S W, Kim S H, et al. Effects of B and Ti addition and heat treatment temperature on graphitization behavior of Fe-0.55C-2.3Si steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 11189-11200.
- [8] Kim Y J, Park S H. Effect of initial microstructure on graphitization behavior of Fe-0.55C-2.3Si steel[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15: 4529-4540.
- [9] 张永军, 李新鹏, 王九花, 等. 石墨化钢石墨化过程的金相分析及其动力学方程[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 228-234.
- [10] 万勇, 马冬, 田莉杰, 等. 碳含量对高硅高铝钢组织及石墨粒子析出行为的影响[J]. 过程工程学报, 2023, 23(10): 1469-1477.
- [11] 万勇, 马冬, 迟敦苇, 等. 中碳高硅高铝钢回火过程石墨析出动力学[J]. 金属热处理, 2023, 48(10): 225-230.
- [12] 王郢, 赵新宇, 王向红, 等. 优特钢小方坯高拉速压下工艺的研究与应用[J]. 钢铁, 2025, 60(1): 92-99.
- [13] 王博, 张炯明, 肖超, 等. 连铸板坯轻压下过程中间裂纹产生机理[J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 351-356.
- [14] 陈德, 张广军, 刘吉刚. GCr15 轴承钢方坯连铸轻压下工艺优化与实践[J]. 特殊钢, 2024, 45(2): 50-55.
- [15] 饶金元, 张孟响, 陈君, 等. 轻压下改善 42CrMo 钢 300 mm×400 mm 大方坯内部质量的工艺实践[J]. 特殊钢, 2022, 43(1): 39-43.
- [16] 张玉鹏, 李硕研, 杨勇涛, 等. 贝氏体钢热处理工艺概述及展望[J]. 金属加工(热加工), 2023(5): 1-10.
- [17] 杨维宇, 张凤明, 何建中, 等. 高强韧 U20Mn₂SiCrNiMo 贝氏体钢热处理工艺的优化[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 28-31.
- [18] 陈鸣, 李青春, 刘伟, 等. 碳含量对纳米贝氏体组织形成的影响[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 160-163.
- [19] 戴钊, 郭智, 龙晓燕, 等. Si 含量对高碳贝氏体钢微观组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(9): 165-173.
- [20] Oikawa K, Mitsui H, Ebata T, et al. A new Pb-free machinable ferritic stainless steel[J]. ISIJ International, 2002, 42(7): 806-807.
- [21] Wan Y, Tian L J, Tang Q, et al. Effect of Si content and tempering temperature on microstructure and precipitation behavior of graphite particles in Fe-0.58C-1.0Al steel[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2025, 32(8): 1902-1912.
- [22] Kingery W D. Plausible concepts necessary and sufficient for interpretation of ceramic grain-boundary phenomena: II, solute segregation, grain-boundary diffusion, and general discussion[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1974, 57(2): 74-83.
- [23] Kaur I, Gust W. Handbook of Grain and Interphase Boundary Diffusion Data[M]. Ziegler Press, 1989.
- [24] He K, Brown A, Brydson R, et al. An EFTEM study of the dissolution of cementite during the graphitisation annealing of a quenched medium carbon steel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 26: 111-114.