微合金化及热处理对高碳钢轨组织的影响

杨 静[1],贾鹏霞[1],王 敏[1],周春玲[1],苏丽丽[1],魏慧慧[1,2],孙梦晨[1]

(1. 内蒙古包钢钢联股份有限公司技术中心,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古科技大学材料科学与工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要:在高碳钢轨的热处理过程中,极易产生沿晶网状渗碳体这类缺陷组织。为系统地探究该材料的热处理特性,通过设计多组差异化热处理方案,采用 SEM、EBSD 以及能谱分析研究了微合金化及热处理对高碳钢轨组织特征的影响规律。结果表明,热处理温度对合金元素的分布、珠光体组织的大小、沿晶网状渗碳体及碳化物颗粒形成均有一定的影响。

关键词:高碳钢轨;网状渗碳体;特殊碳化物;珠光体
中图分类号:TG162.82 **文献标识码**:B **文章编号**:1009 - 5438(2025)06 - 0044 - 05

Effects of Microalloying and Heat Treatment on Microstructure of High Carbon Rail

Yang Jing[1], *Jia Pengxia*[1], *Wang Min*[1], *Zhou Chunling*[1], *Su Lili*[1], *Wei Huihui*[1,2], *Sun Mengchen*[1]

(1. *Technical Center of Inner Mongolia Baotou Steel Union Co., Ltd., Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*;
2. *School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

Abstract: During the heat treatment process of high carbon rail, it is easy to generate such defective microstructure as intergranular network cementite. In order to systematically explore heat treatment characteristics of the material, the effect laws of microalloying and heat treatment on microstructure characteristics of high carbon rail are studied with scanning electron microscope (SEM), electron back - scattered diffraction (EBSD) and energy spectrum analysis by designing several differentiated heat treatment schemes. The results showed that there were certain effects of heat treatment temperature on distribution of alloying elements, size of pearlite structure as well as formation of intergranular network cementite and carbide particles.

Key words: high carbon rail; network cementite; special carbide; pearlite

铁路钢轨需具备良好的硬度与强度,以承载车辆运行。在重载线路中,钢轨踏面与车轮频繁接触,承受高负荷与高压,致使钢轨轨头表面磨损加剧,剥落问题突出,极大地缩短了钢轨的服役寿命。高碳

收稿日期:2025 - 07 - 02
作者简介:杨 静(1992 -),女,内蒙古包头市人,工程师,现从事金属材料检验及研究工作。

钢轨在生产过程中,很难控制碳元素均匀分布,若处理不当,热处理后易形成沿晶网状渗碳体。此类渗碳体在热处理阶段由原奥氏体晶界处析出,显著削弱晶界结合力,使钢轨在实际服役过程中面临脆断风险,可能引发严重的安全事故。在热处理过程中,合金元素对奥氏体的分解行为将产生复杂的影响[1],如合金元素影响铁素体和渗碳体两相的形成和共析过程。目前,根据相关研究[2],在热处理过程中,合金元素再分配如何影响珠光体的形核及长大、沿晶网状渗碳体的形成和碳化物的分布,其内在机理尚未明确,且尚未开展过以钢轨为对象的相关研究。因此研究微合金化及热处理对高碳钢轨组织的影响具有重要意义。

1　试验原料及实验方案

1.1　试验原料

以某高碳热轧态钢轨为研究对象,加入 Cr、Nb、Ni 制备试验用钢,恒拉速连续浇铸,以保证制备出质量稳定的钢轨钢坯。利用直读光谱仪、碳硫分析仪、氧氮分析仪等离子发射光谱仪检测试验钢的化学成分,见表 1。

表 1　高碳热轧态钢轨化学成分(质量分数)　　%

C	Si	Mn	P	S	Cr + Nb + Ni
0.9 ~ 1.0	0.59	0.99	≤0.015	≤0.010	0.4 ~ 0.5

1.2　试验方案

CCT 曲线(连续冷却转变曲线)决定了钢轨能否通过热处理获得满足服役要求的高强度、高耐磨性、高韧性等关键性能,对保障钢轨安全与延长使用寿命至关重要。本文依据钢的连续冷却转变曲线图,利用热模拟试验机,试样升温至 900 ℃,保温 15 min,促使其组织充分转变为奥氏体,然后通过喷气喷雾的冷却方式以 8 ℃/s 的冷速将试样分别冷却至 630 ℃、600 ℃、570 ℃,采用炉内保温的方式将试样保温 30 s,然后以 8 ℃/s 的冷速喷气喷雾冷却至室温,具体热处理工艺如表 2 所示。

表 2　高碳热轧态钢轨热处理工艺

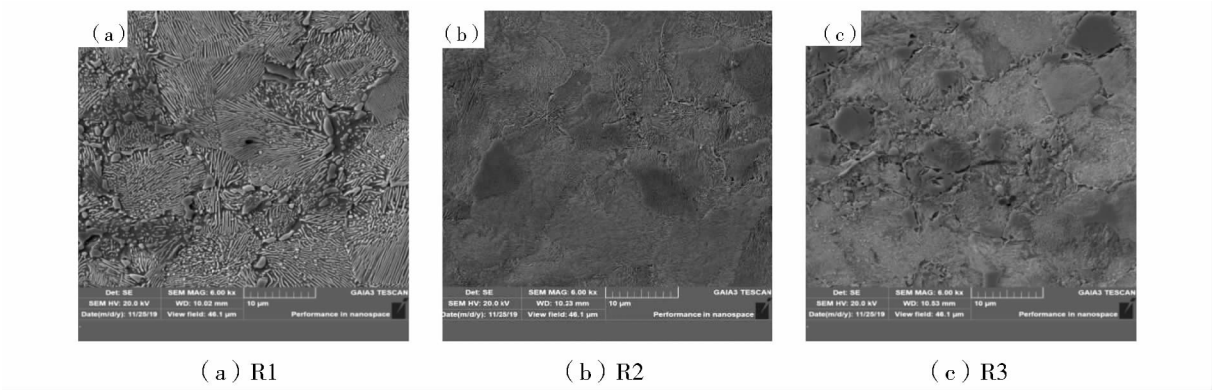
工艺	相变前冷却速率/(℃ · s^{-1})	热处理温度/℃	相变时间/s	相变后冷却速率/(℃ · s^{-1})
R1	8	630	30	8
R2	8	600	30	8
R3	8	570	30	8

本研究综合运用电子背散射衍射(EBSD)技术与发射扫描电子显微镜(SEM),对材料微观组织进行观察,研究热处理温度对珠光体组织的影响规律。同时,通过能谱分析技术对沿晶网状渗碳体和特殊碳化物颗粒进行成分分析,研究合金元素在不同相中的分配行为对网状渗碳体析出过程的调控作用。

2　试验结果与讨论

2.1　网状渗碳体及特殊碳化物

图 1 为不同热处理工艺下的试验钢 SEM 图像。通过 R1、R2、R3 热处理工艺对比研究发现,当相变前冷速与相变后冷速均为 8 ℃/s 时,热处理温度由 630 ℃降至 570 ℃,得到的显微组织均为珠光体组织。如图 1(a)所示,当热处理温度为 630 ℃时,可明显地看到在珠光体组织外部有沿晶网状渗碳体析出,而这种沿晶网状渗碳体的出现,会产生局部的应力集中,在钢轨受到交变载荷的作用下,晶界处往往是应力集中区域,而渗碳体又是硬质相,渗碳体聚集到晶界处,使得晶界处的能量积聚,最终导致钢轨内部出现裂纹萌生和扩展,严重地较低了钢轨的使用寿命。如图 1(b)所示,当热处理温度为 600 ℃时,显微组织为珠光体组织,未出现沿晶网状渗碳体及碳化物颗粒。如图 1(c)所示,当热处理温度为 570 ℃时,珠光体组织中出现碳化物颗粒。热处理温度对高碳钢轨的显微组织有一定的影响,热处理温度为 600 ℃时,得到的显微组织全部为珠光体组织。

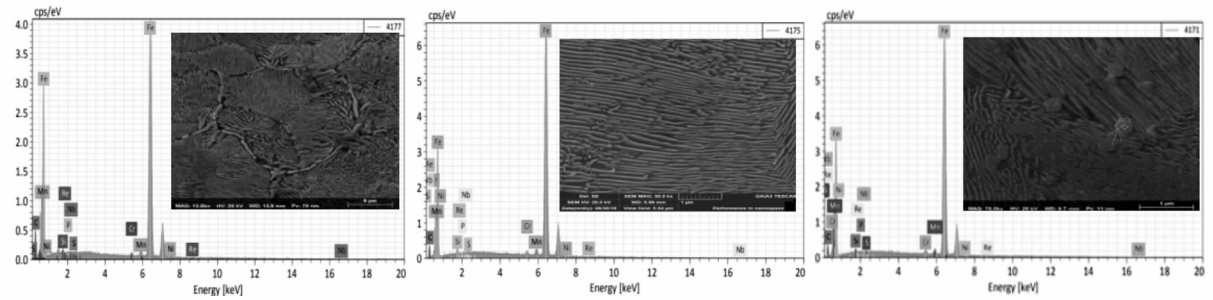


(a) R1 (b) R2 (c) R3

图 1 不同热处理工艺下的试验钢 SEM 图像

图 2 和表 3 分别为不同热处理工艺下点扫描能谱图及点扫描元素能谱分析结果,明确体现了热处理温度对合金元素的分布及沿晶网状渗碳体和碳化物颗粒的影响。结合图 2 和表 3 可知,在 R1 热处理工艺下发现网状渗碳体周围 Ni、Nb 元素分布不均匀,存在局部的偏聚;在 R2 热处理工艺下,微合金元素分布较均匀,未出现合金元素的局部偏聚现象;在 R3 热处理工艺下,特殊的碳化物颗粒中也存在 Ni、Nb 元素分布不均匀的现象。由此可见,热处理温度对合金元素的分布、珠光体组织的形核长大、沿晶网状渗碳体及碳化物颗粒形成均有一定的影响。

珠光体形核多发生于晶界区域,主要有两方面原因[3]:其一,晶界处原子排列紊乱,具有较高的界面能,为形核提供了能量基础;其二,晶界富集大量空位与缺陷,能够释放能量并加速原子扩散迁移,从而促进晶核形成。在珠光体相变初期,作为非碳化物形成元素的 Ni,会在渗碳体生长时被排挤至铁素体相中,而碳化物形成元素 Nb,与碳的结合力强,在铁素体生长过程中被排斥至渗碳体。值得注意的是,当局部区域 Ni 偏聚程度较高时,会导致奥氏体相区扩展,共析点左移,进而减少铁素体含量。热处理温度的改变会使晶界处产生显著的能量与浓度梯度,促使大量渗碳体析出。这些渗碳体一部分与铁素体协同形成珠光体组织,另一部分则沿晶界析出,形成网状结构。此外,珠光体的形核与长大过程会大量消耗晶界能量,使晶界处于低能状态,而晶内高浓度的 C 原子为了平衡体系能量,会向晶界扩散迁移,这正是网状渗碳体及特殊碳化物形成的关键驱动因素。



(a) R1 工艺 (b) R2 工艺 (c) R3 工艺

图 2 不同热处理工艺下点扫描能谱图

表 3　不同热处理工艺下点扫描元素能谱分析结果

元素	原子序数	质量分数/%			原子分数/%		
		R1	R2	R3	R1	R2	R3
Fe	26	86.25	80.41	78.27	61.53	49.91	45.56
C	6	10.88	16.59	18.52	36.09	47.87	51.21
Mn	25	1.98	1.95	1.92	1.43	1.23	1.16
Si	14	0.46	0.53	0.44	0.65	0.66	0.52
Cr	24	0.29	0.34	0.32	0.18	0.23	0.21
Ni	28	0.14	0.05	0.12	0.10	0.03	0.12
Nb	41	0.06	0.05	0.16	0.02	0.02	0.06
P	15	0.00	0.06	0.10	0.00	0.06	0.11
S	16	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.05
Re	75	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00

2.2　珠光体片层间距

图 3 为试验钢珠光体片层间距大小分布图。依据文献[4]中公式，对统计数据进行计算，并绘制频率分布直方图，直观呈现片层间距的分布特征与变化规律。

$$\lambda_r = \frac{\pi d_c}{n\mathrm{M}} \tag{1}$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_r}{2} \tag{2}$$

式(1)、(2)中：M 为放大倍数；d_c 为平均随机测量的珠光体片间距，nm；n 为测量区域渗碳体片的截点数，λ_0 为实际珠光体片间距，nm，λ_c 为计算得到的珠光体片间距，nm。

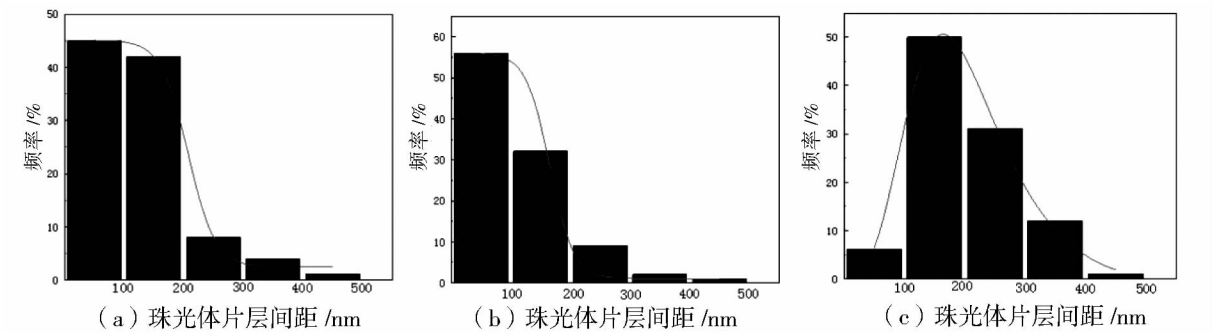


图 3　试验钢珠光体片层间距大小分布图

由图 3(a)可知，当热处理温度为 630 ℃时，珠光体片层间距主要分布在 100 ~ 300 nm 区间；由图 3(b)可知，随着热处理温度降至 600 ℃，珠光体片层间距在 0 ~ 200 nm 的占比增加；由图 3(c)可知，当热处理温度降低至 570 ℃，珠光体片层间距的频率分布主要集中在 100 ~ 300 nm 之间。由此可知，试验中当只改变热处理温度时，对珠光体片层间距的影响不大。

2.3　珠光体组织形貌

图 4、图 5、图 6 为不同热处理工艺 EBSD 形貌图。由图可知，热处理温度对珠光体组织大小有一定的影响，热处理温度为 630 ℃时，珠光体晶粒较大，热处理温度为 600 ℃和 570 ℃时，珠光体晶粒较小。

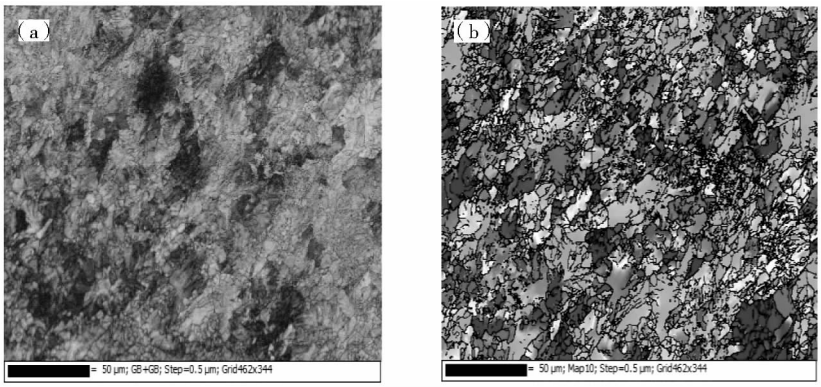


图 4 R1 工艺 EBSD 形貌图

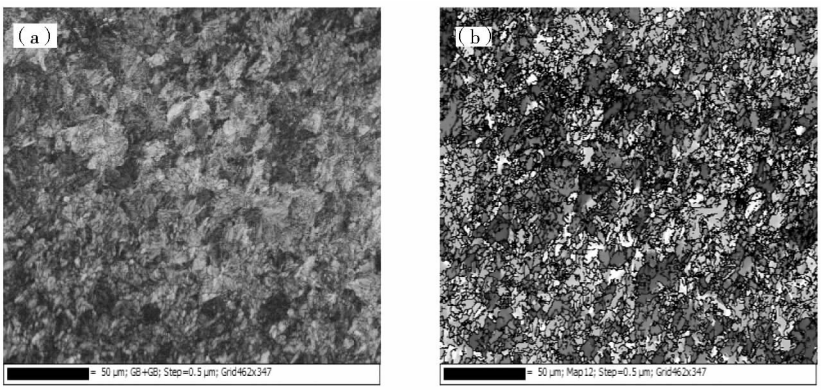


图 5 R2 工艺 EBSD 形貌图

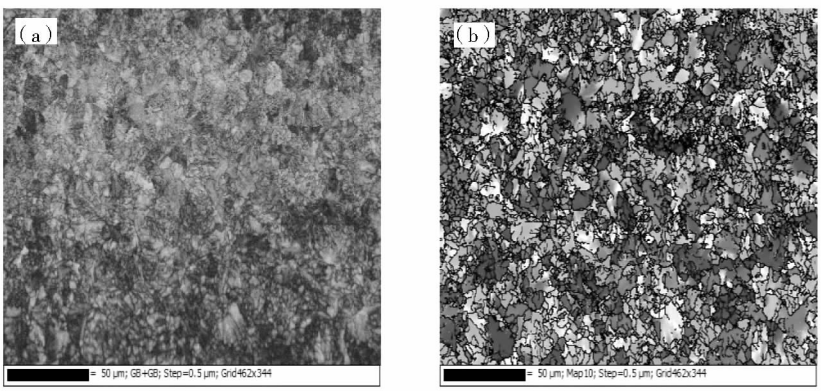


图 6 R3 工艺 EBSD 形貌图

研究发现[5],珠光体相变作为典型的扩散控制过程,严格遵循形核、长大机制。从热力学与动力学角度分析,热处理温度对珠光体相变过程存在双重影响:一方面,相变前的过冷状态决定形核驱动力;另一方面,相变过程中 C 原子的扩散行为主导组织演变。当热处理温度偏高时,过冷度会相应减小,致使珠光体形核核心数量减少,同时,较高的温度加速了 C 原子扩散速率,使其能够实现长程迁移,最终形成较大的珠光体晶粒。此外,由于过冷度不足导致形核位点稀缺,珠光体晶核数量受限,已形成的晶核得以快速生长,进而促使珠光体晶粒尺寸显著增大。

(下转第 79 页)

综合以上测量和检查结果,诊断该分接开关的故障原因为长期高负荷运行以及频繁操作导致触头过度磨损,从而引起接触电阻增大,进而导致触头温度升高和放电现象。

3.3　处理方法

根据故障现象,工作人员采取了一系列的处理措施。作业人员根据分接开关的型号和规格,采购了相同型号的触头进行更换。更换触头时严格按照厂家的安装要求进行操作,确保触头安装正确,接触良好。更换完成后,使用接触电阻测试仪再次对触头接触电阻进行测量,测量结果为 80 μΩ,符合正常范围。

作业人员对变压器的运行方式进行了调整,合理分配负荷,避免变压器长期处于高负荷运行状态。同时,优化了分接开关的操作策略,减少不必要的切换操作,降低分接开关的操作频繁程度。此外,在分接开关更换触头并调整运行方式后,作业人员加强了对分接开关的在线监测和定期巡检,增加触头温度、接触电阻等参数的监测频率,实时掌握分接开关的运行状态。

4　结束语

变压器真空有载分接开关的运行可靠性提升是一个系统工程,需要设计、制造、安装、调试和运行维护等多环节的协同配合。未来,随着技术的不断进步和运行经验的不断积累,真空有载分接开关的运行可靠性将得到进一步提升,为电力系统的高效运行提供更加坚实的保障。

参　考　文　献

[1] 贾远温,彭锋. 真空有载分接开关主触头烧蚀研究[J]. 自动化应用,2024,65(18):112 – 114.

[2] 荣一鸣,孙佳佳,史宗谦,等. 真空有载分接开关中真空灭弧室触头合闸行为研究[J]. 高电压技术,2025,51(4):1969 – 1979.

[3] 王绍武,李鹏,李金忠,等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报,2022,42(18):6893 – 6908.

[4] 金雷,罗维,周凯,等. 真空有载分接开关常见故障原因及运行可靠提升措施[J]. 变压器,2022,59(3):13 – 17.

[5] 胡鹏伟,何艳琪,杨俊波,等. 变压器真空有载分接开关运用与分析[J]. 电气技术与经济,2021(2):50 – 51.

(上接第 48 页)

3　结论

(1)热处理温度影响高碳钢轨的组织形成,当热处理温度为 630 ℃时,珠光体组织外部有沿晶网状渗碳体析出。当热处理温度为 600 ℃时,显微组织为珠光体组织,且未出现沿晶网状渗碳体及碳化物颗粒。当热处理温度为 570 ℃时,珠光体组织中有碳化物颗粒。

(2)热处理温度对珠光体晶粒大小有一定的影响,热处理温度为 630 ℃时,珠光体晶粒较大。热处理温度为 600 ℃和 570 ℃时,珠光体晶粒较小。热处理温度在 630 ~ 570 ℃范围内时,珠光体片层间距的变化不大,珠光体片层间距分布在 0 ~ 300 nm 之间。

参　考　文　献

[1] 刘宗昌,任慧平,计云萍. 固态相变原理新论[M]. 北京:科学出版社,2005.

[2] Li Zhao Dong. Nuclention of austenite from pearlitic structure in an Fe – 0.6C – 1Cr alloy[J]. Metallurgical&Materials Transactions A, 2011, 42(6):1586 – 1596.

[3] 刘宗昌. 过冷奥氏体扩散型相变[M]. 北京:科学出版社,2007.

[4] 李昭东,宫本吾郎,杨志刚,等. Mn 和 Si 对 Fe – 0.6C钢中珠光体 – 奥氏体相变的影响[J]. 金属学报,2010,46(9):1066 – 1074.

[5] 崔桂彬,鞠新华,孟杨,等. 钢中珠光体球团尺寸的 EBSD 表征技术[J]. 金属热处理,2019,44(1):223 – 228.