

doi: 10.11835/j.issn.1000.582X.2025.12.002

引用格式:洪晓晚,王武荣,罗伟,等.钢铁材料中带状组织的形成机理及影响因素研究[J].重庆大学学报, 2025,48(12): 12-19.



# 钢铁材料中带状组织的形成机理及影响因素研究

洪晓晚<sup>1</sup>,王武荣<sup>1</sup>,罗伟<sup>2</sup>,王文亚<sup>3</sup>,张所全<sup>2</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院,上海 200444; 2. 宝山钢铁股份有限公司研究院,上海 201900;  
3. 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室,沈阳 110819)

**摘要:**通过均匀化处理试验和缓冷实验,结合光学显微镜和电子探针显微分析仪,深入探讨了钢铁材料中带状组织的形成机理及其影响因素。结果表明,带状组织主要在两相区温度范围内形成,其条带特征随冷却温度的降低而愈加明显。均匀化处理能有效减少 Mn 元素的偏析,进而抑制带状组织的形成。具体而言,在 0.05 °C/s 的缓冷条件下,短时间均匀化处理(1 h)可使条带特征减弱,而长时间均匀化处理( $\geq 2$  h)能完全消除带状组织。然而,在 0.02 °C/s 的冷速缓冷后,即使经过长时间均匀化处理( $\geq 2$  h)的试样仍会出现带状组织。综上所述,冷却速率与均匀化处理的共同作用影响了钢铁材料中带状组织的形成。

**关键词:**带状组织;两相区;均匀化;元素偏析;冷却速率

**中图分类号:**TF04

**文章编号:**1000-582X(2025)12-012-08

## Study on the formation mechanism and influencing factors of banded structures in steel materials

HONG Xiaowan<sup>1</sup>, WANG Wurong<sup>1</sup>, LUO Wei<sup>2</sup>, WANG Wenya<sup>3</sup>, ZHANG Suoquan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China;  
2. Research Institute, Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, P. R. China;  
3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China)

**Abstract:** The formation mechanism and influencing factors of banded structures in steel materials are investigated through homogenization treatment tests and slow cooling experiments, combined with optical microscopy and electron probe micro-analyzer. The results indicate that banded structures primarily form within the temperature range of the two-phase region, and their banding characteristics become more pronounced with decreasing cooling temperatures. Homogenization treatment effectively reduces the segregation of Mn elements, thereby inhibiting the formation of banded structures. Specifically, under a slow cooling rate of 0.05 °C/s, short-term homogenization treatment (1 h) weakens the banding characteristics, while long-term homogenization

收稿日期:2025-02-28

基金项目:国家自然科学基金(42276214);宝钢股份基础研究项目(F23YYJC06Z)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (42276214), and the Fundamental Research Project of Baoshan Iron & Steel Co., Ltd., China (F23YYJC06Z).

作者简介:洪晓晚(2000—),女,硕士研究生,主要从事梯度材料的研究,(E-mail)hong\_xiaowan@163.com。

通信作者:王武荣,男,教授,硕士生导师,(E-mail)wrwang@shu.edu.cn;张所全,男,高级工程师,(E-mail)zhangsuoquan@baosteel.com。

treatment ( $\geq 2$  h) completely eliminates the banded structures. However, after slow cooling at a rate of 0.02 °C/s, banded structures still appear in samples even after long-term homogenization treatment ( $\geq 2$  h). In conclusion, the combined effects of cooling rate and homogenization treatment significantly influence the formation of banded structures in steel materials.

**Keywords:** banded structure; two-phase region; homogenization; elemental segregation; cooling rate

在钢铁材料的加工与性能研究中,带状组织作为一种常见的显微组织形态,引起了广泛关注。带状组织表现为铁素体、珠光体或马氏体等相沿轧制方向呈带状排列,在制造过程中与材料的力学性能密切相关。由于其对材料垂直于轧制方向力学性能的负面影响,通常被视为一种不利的显微组织<sup>[1-2]</sup>。学者通过大量实验揭示了带状组织的形成与多种因素密切关系,尤其是合金元素在凝固过程中的偏析现象。Haida 等<sup>[3]</sup>和 Krauss 等<sup>[4]</sup>研究发现,钢液在凝固过程中呈现枝晶生长模式。随着温度的下降,合金元素如锰(Mn)、铬(Cr)、硅(Si)、磷(P)等在枝晶间区域与枝晶干区域的分布差异显著,导致枝晶间区域合金元素的富集与枝晶干区域的贫化,进而形成枝晶间的微观偏析<sup>[2,5-9]</sup>。这种偏析在随后的热加工过程中,尤其是在高温轧制变形阶段,会沿轧制方向形成合金元素的偏析带,并对冷却过程中奥氏体的相变产生影响<sup>[10]</sup>。锰元素的偏析是带状组织形成的核心因素,锰通过降低奥氏体向铁素体转变的  $A_{\text{cs}}$  温度,使得富 Mn 区域的奥氏体稳定性增加,导致贫 Mn 区域的先共析铁素体优先形核<sup>[11-15]</sup>。在铁素体晶粒的生长过程中,晶粒相互碰撞并连接,最终形成带状组织<sup>[16-17]</sup>。

然而,带状组织的形成并非不可逆,通过有效的工艺控制,尤其是高温均匀化处理、奥氏体晶粒尺寸的调控以及冷却速率的优化等手段,可以显著抑制带状组织的形成<sup>[14,18-20]</sup>。Wang 等<sup>[20]</sup>的研究表明,在 1 200 °C 下保温 3 h 后,铸坯中的 Cr 元素聚集区增大,但是合金元素的偏析指数下降,热轧样品中不再形成带状组织,进一步证明了均匀化处理在抑制带状组织方面的关键作用。研究发现,较快的冷却速率会限制铁素体生长界面的迁移,碳原子扩散不足,使珠光体无法形成连续带状结构,而是以零散形式析出。此外,较高的冷却速率还可能促使奥氏组织的形成,碳元素扩散方向无序,进一步抑制带状组织的生成<sup>[21-24]</sup>。Zhao 等<sup>[25]</sup>在研究中指出,当奥氏体晶粒尺寸大于元素偏析带宽度的 2~3 倍时,带状组织的形成会受到显著抑制。

目前,关于带状组织形成机制和影响因素的研究已取得一定进展,尤其是两相区相变与带状组织演变之间的关系,以及结合均匀化时间和慢冷速对带状组织形成的影响方面,研究仍显不足。因此,文中通过缓冷实验,探讨两相区带状组织的演变规律,分析冷却速率和均匀化时间对带状组织形成的影响,研究带状组织的形成机理,并为材料工艺的优化提供理论依据。

## 1 实验材料与方法

试验钢的化学成分如表 1 所示。首先,通过真空熔炼和铸造得到初始尺寸为 200 mm×120 mm×60 mm 的钢锭。将钢锭加热至 1 150 °C 并保温 2 h,随后进行 5 道次高温轧制,最终得到厚度为 4 mm 的热轧板,变形量约为 93%。轧制完成后,试样在空气中冷却,并用盐酸酸洗去除表面氧化物。从热轧板中间部分截取 2 组试样:一组保持原始热轧态,标记为 R;另一组在氮气保护下进行均匀化处理,加热至 1 200 °C 后分别保温 1 h、2 h 和 4 h 淬火至室温,以促进碳和其他溶质元素的均匀扩散,标记为 1H、2H 和 4H。对 2 组试样进行相同的缓冷实验,具体工艺流程如图 1 所示,分别标记为 RT<sub>v</sub>、1HT<sub>v</sub>、2HT<sub>v</sub> 和 4HT<sub>v</sub>,其中 T 表示缓冷实验中的淬火温度, v 表示缓冷实验的冷却速率。

将试样沿垂直轧制方向切割后,经过镶嵌、机械研磨和抛光处理,使用 5% 硝酸酒精溶液进行腐蚀。利用 VHX-7000N 光学显微镜(optical microscopy, OM)观察显微组织、计算平均铁素体条带宽度及 500× 放大倍数下显微组织图中贯穿视场的平均铁素体条带数目,并通过 Image Pro Plus 6.0 软件计算先共析铁素体的相比比例。使用 JEOL JXA-8500F 型电子探针显微分析仪(electron probe micro-analyzer, EPMA),加速电压为 20 kV,

聚焦探头内束流为  $3 \times 10^{-8}$  A, 扫描步长为  $1 \mu\text{m}$ , 测试试样的溶质元素分布情况。

使用 DIL805A 热膨胀仪测定 R 和 1H 试样在缓冷实验中的膨胀率, 获得  $0.05 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  冷却速率下的热膨胀曲线, 通过切线法确定相变温度。试验在真空环境下进行, 参照《钢的临界点测定方法(膨胀法)》标准(YB/T 5127—2018)。试样以  $0.4 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  加热至  $950 \text{ } ^\circ\text{C}$  奥氏体化, 保温  $5 \text{ min}$ , 再以  $0.05 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  的冷速冷却至室温。

表 1 试验钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of the experimental steel (mass fraction)							%
C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Fe
0.191	0.368	1.500	0.006	0.003	0.032	0.019	Bal.

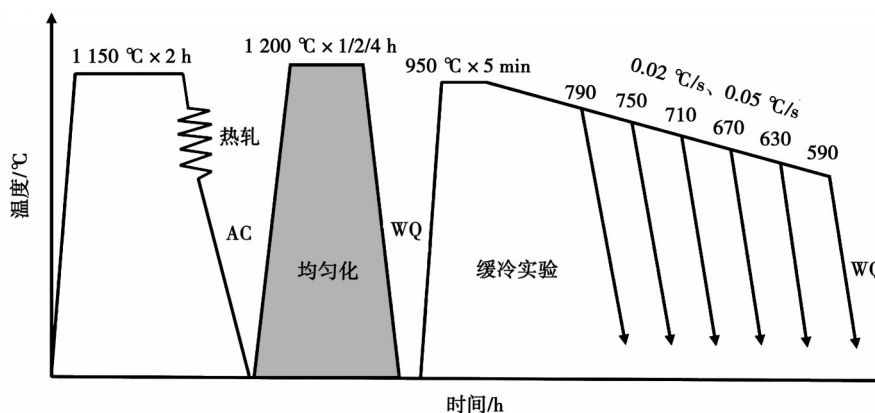


图 1 工艺流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the process flow

## 2 结果与讨论

### 2.1 缓冷实验中带状组织的形成规律

图 2 是热轧和均匀化 1 h 试样在  $0.05 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  冷速的缓冷实验中冷却至不同温度淬火后的显微组织。淬火温度高于或等于  $670 \text{ } ^\circ\text{C}$  时, 图中白色区域为铁素体, 黑色区域为马氏体; 淬火温度低于或等于  $630 \text{ } ^\circ\text{C}$  时, 黑色

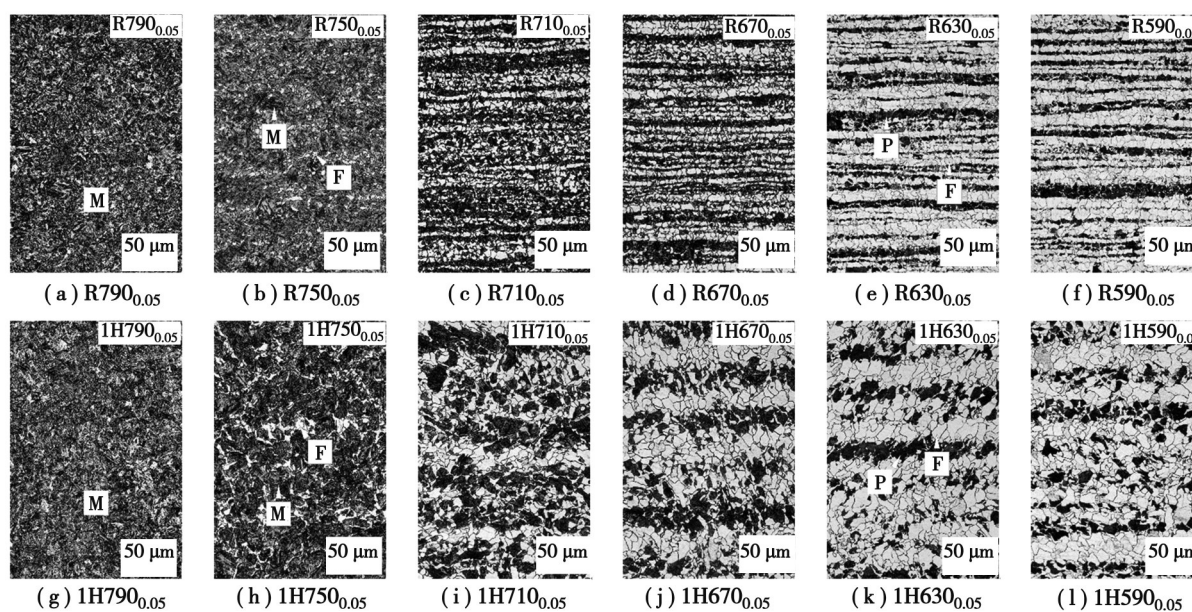


图 2 热轧和均匀化 1 h 试样在缓冷实验中冷却至不同温度淬火后的显微组织

Fig. 2 The microstructures of hot-rolled and 1 h homogenized samples quenched after cooling to different temperatures during the slow cooling experiment



区域为珠光体组织。实验结果表明,淬火温度为 750 ℃时,开始出现少量铁素体;随着淬火温度降低,带状组织逐渐增多,铁素体条带宽度增加;当淬火温度低于 630 ℃后,带状组织趋于稳定。其中,平均铁素体条带宽度值随淬火温度变化如表 2 所示。

表 2 热轧和均匀化 1 h 试样在缓冷实验中冷却至不同温度淬火后的平均铁素体条带宽度  
Table 2 Average ferrite band width of hot-rolled and 1 h homogenized samples quenched after cooling to different temperatures during the slow cooling experiment μm

淬火温度/℃	790	750	710	670	630	590
RT <sub>0.05</sub> /μm	0	0	9.08	10.81	12.79	12.95
1HT <sub>0.05</sub> /μm	0	0	24.81	36.90	41.55	42.63

通过 DIL 805A 热膨胀仪测定 R 和 1H 试样在 0.05 ℃/s 冷速的缓冷实验中相变温度相近,其中  $A_{r3}$  约为 750 ℃,  $A_{r1}$  约为 632 ℃。图 3 展示了部分显微组织和先共析铁素体相比比例曲线,结果表明,随着淬火温度降低,先共析铁素体相比比例逐渐增加。结合图 2 的显微组织图和相变温度分析发现,当淬火温度高于  $A_{r3}$  时,2 组试样均未出现带状组织;在  $A_{r3}$  临界温度附近,开始出现少量先共析铁素体组织;在  $A_{r1}$ ~ $A_{r3}$  两相区温度内淬火后,先共析铁素体与马氏体呈交替条带状分布,条带特征随淬火温度降低而更加显著;当淬火温度低于  $A_{r1}$  后,带状组织趋于稳定。由此可见,带状组织主要发生在两相区温度范围内,其条带特征与先共析铁素体的形核、长大密切相关。

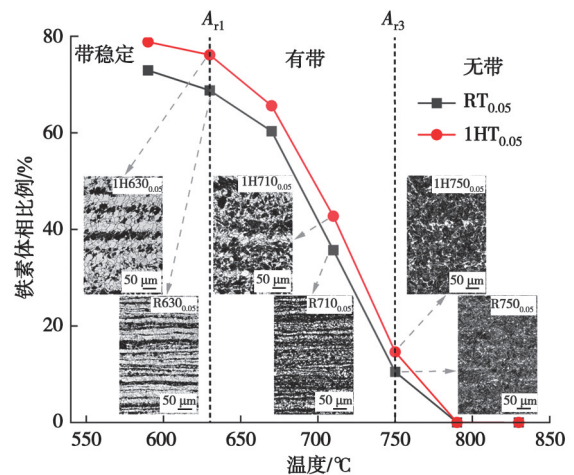


图 3 缓冷实验后试样的先共析铁素体相比比例曲线和部分显微组织  
Fig. 3 Proeutectoid ferrite phase fraction curves and partial microstructures of the samples after the slow cooling experiment

2.2 均匀化时间对带状组织形成的影响

采用 EPMA 对热轧和均匀化处理 1 h、2 h、4 h 后的试样,在缓冷实验前进行面扫描分析,结果表明,除 Mn 元素外,其他溶质元素分布较为均匀,且均匀化处理后碳元素扩散均匀。图 4 展示了缓冷实验前试样的 Mn 元素分布情况,定性分析显示热轧试样存在明显的 Mn 元素偏析,呈条带状分布,偏析带宽度约为 15.63 μm。经均匀化处理 1 h 后,试样的 Mn 元素偏析带仍然存在,但偏析程度减弱,偏析带数量减少,宽度增加至 36.34 μm。当均匀化时间延长至 2 h 以上时,试样中未发现明显的 Mn 元素偏析现象。

图 5 展示了热轧及均匀化 1 h、2 h、4 h 试样以 0.05 ℃/s 冷速冷却至 670 ℃淬火后的显微组织,主要由铁素体和马氏体组成。对比显微组织分布特征发现,热轧试样在缓冷实验后形成明显的带状组织,条带连续性良好;均匀化 1 h 试样在缓冷实验后,同样呈现带状组织,但其条带宽度显著增加,且马氏体条带内部出现少量铁素体,条带特征明显减弱。随着均匀化时间延长,缓冷实验后的带状结构特征逐渐减弱:均匀化 2 h 后,带

状组织几乎消失,仅残留少量不连续条带;当均匀化时间达到4 h时,试样的显微组织呈现出均匀分布的铁素体和马氏体,带状结构完全消除。表明均匀化处理通过减弱Mn元素偏析,显著抑制了带状组织的形成,且均匀化时间越长,抑制效果越显著。

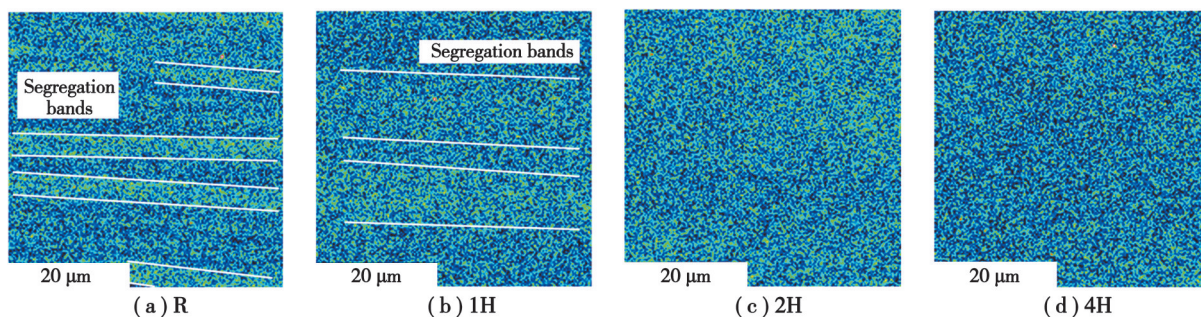


图4 缓冷实验前试样的Mn元素分布图

Fig. 4 Mn element distribution maps of the samples before the slow cooling experiment

结合图4的EPMA面扫描结果分析,Mn元素偏析对带状组织的形成和分布状态具有决定性作用。首先,热轧试样中存在明显的Mn元素偏析,由于Mn元素会降低奥氏体向铁素体转变的 $A_{3s}$ 温度,富Mn区域的奥氏体稳定性增强,导致贫Mn区域先共析铁素体优先形核<sup>[16]</sup>。在平行于偏析带方向上,先共析铁素体晶粒在低锰区形核并长大,相互碰撞、连接形成条带<sup>[16]</sup>;在垂直于偏析带方向上,当铁素体/奥氏体界面迁移至贫、富溶质区之间的化学界面或碳含量达到平衡浓度时<sup>[26-28]</sup>,铁素体停止生长,最终形成铁素体与马氏体/珠光体交替分布的带状组织。其次,当试样经过1 h均匀化处理后,碳元素扩散均匀,Mn元素偏析有所减弱,但偏析带仍未完全消除。因此,在随后的缓冷实验(0.05 °C/s)中,显微组织仍呈现条带状分布,但是条带特征减弱。同时,由于贫、富溶质区之间的化学界面阻碍作用减弱,先共析铁素体能够更充分形核和长大,导致带状组织宽度增加。随着均匀化时间延长至2 h及以上,元素偏析进一步减弱,直至残留的少量偏析不足以影响组织形成条带结构,先共析铁素体在试样内部均匀形核和长大,形成铁素体和马氏体/珠光体均匀分布的显微组织,带状结构逐渐消失。

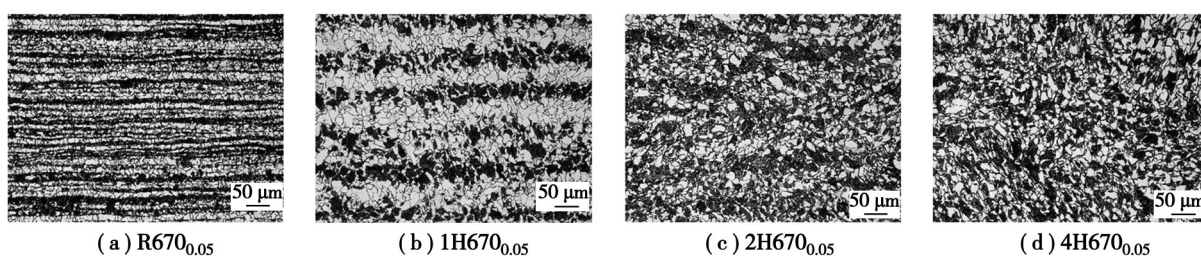


图5 热轧和均匀化1 h、2 h、4 h试样在缓冷实验中冷却至670 °C淬火后的显微组织

Fig. 5 The microstructures of hot-rolled and 1 h, 2 h, 4 h homogenized samples quenched after cooling to 670 °C during the slow cooling experiment

### 2.3 冷却速率对带状组织形成的影响

通过对均匀化试样进行不同冷速的缓冷实验,分析冷却速率对带状组织形成的影响。图6所示为均匀化2 h试样分别以0.05 °C/s和0.02 °C/s冷速冷却到710 °C后淬火至室温的显微组织。实验结果表明,经过2 h均匀化处理的试样,在0.05 °C/s冷速的缓冷实验后,带状组织完全消失,显微组织呈现出几乎均匀分布的铁素体和马氏体。然而,试样以0.02 °C/s冷速进行缓冷实验后,带状组织重新出现且条带结构明显。

研究发现,在缓冷实验中,冷却速率降低导致带状组织的程度加剧。在0.02 °C/s冷速的缓冷实验中,尽



管均匀化处理 2 h 有效减弱了试样中 Mn 元素的偏析,但是残留的少量元素偏析影响先共析铁素体的形核区域,使其优先在贫 Mn 区域形核,由于冷却速率降低导致缓冷时间增加,促使先共析铁素体能够充分形核、长大。同时, Mn 元素在先共析铁素体形核、长大过程中由于化学势的影响被持续配分到未转变的奥氏体区域,极慢冷速延长了这一过程,加剧了剩余奥氏体中 Mn 元素的富集,富 Mn 区域的奥氏体稳定性更高<sup>[29-30]</sup>,相变滞后,导致贫 Mn 区域的先共析铁素体充分长大,进一步放大组织差异,使带状组织重新出现。

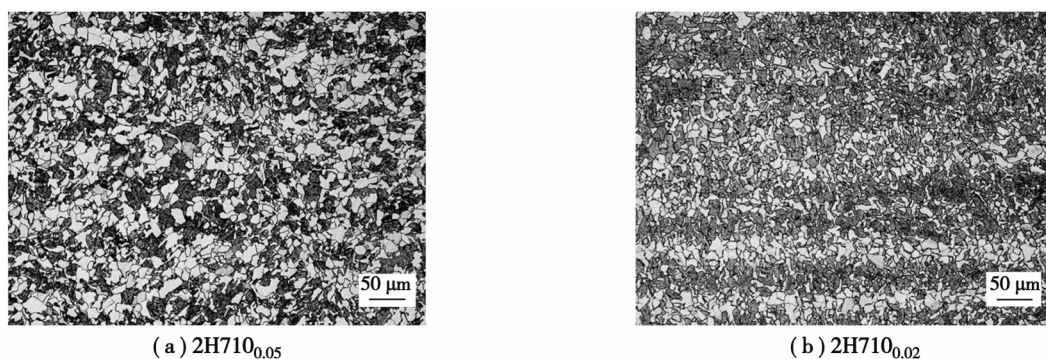


图 6 均匀化 2 h 试样分别以 0.05 °C/s 和 0.02 °C/s 冷速冷却至 710 °C 后淬火的显微组织  
Fig. 6 The microstructures of the 2 h homogenized samples quenched after cooling to 710 °C at cooling rates of 0.05 °C/s and 0.02 °C/s

通过对缓冷实验后的显微组织进行统计,计算其贯穿视场(500×)的平均铁素体条带数目。条带数目越多表明带状特征越明显,分析均匀化时间和冷却速率对带状组织形成的影响,如图 7 所示。结果表明,随着缓冷实验中的冷却温度降低,铁素体条带数目增加,带状特征增强。其次,随着均匀化时间的延长,缓冷实验后铁素体的条带数目减少,带状特征减弱,甚至使其完全消失。当冷却速率降低时,带状组织重新出现,条带数目增多。这表明冷却速率显著影响了均匀化处理对带状组织形成的抑制作用,冷却速率越低,均匀化的抑制作用越弱,反之则越强。

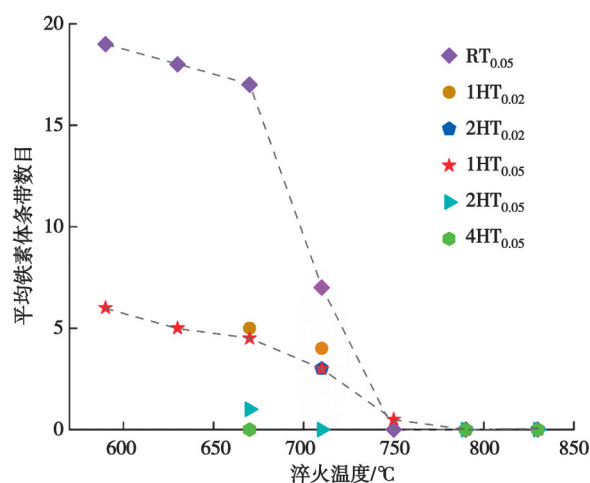


图 7 缓冷实验后显微组织中贯穿视场的平均铁素体条带数目  
Fig. 7 Average number of ferrite bands traversing the field of view in the microstructures after the slow cooling experiment

### 3 结 论

通过对热轧和均匀化 1 h、2 h、4 h 试样进行不同冷速的缓冷实验,分析了带状组织的形成机理及其影响因素。实验结果表明,带状组织的形成主要受冷却温度、Mn 元素偏析和冷却速率的共同调控。主要结论如下:

1)带状组织的形成发生在两相区温度范围内, $A_{c3}$ 温度以下先共析铁素体呈条带状分布发生局部形核、长大,条带特征随冷却温度降低而增加。

2)均匀化处理减少Mn元素偏析,导致均匀化1 h试样在缓冷实验(0.05 °C/s)后,带状特征减弱,条带宽度增加;而均匀化2 h及以上试样在缓冷实验(0.05 °C/s)后,带状组织逐渐消失。

3)均匀化2 h试样在0.05 °C/s冷速的缓冷实验中,带状组织被显著抑制,甚至完全消失;而在0.02 °C/s冷速的缓冷实验中,带状组织重新出现。

## 参考文献

- [1] Ennis B L, Bos C, Aarnts M P, et al. Work hardening behaviour in banded dual phase steel structures with improved formability[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, 713: 278-286.
- [2] 石莉, 龙杰, 庞辉勇, 等. 大厚度海上风电用钢的组织结构与低温冲击韧性[J]. *重庆大学学报*, 2024, 47(11): 104-111.  
Shi L, Long J, Pang H Y, et al. Microstructure and low-temperature impact toughness of large-thickness steel for offshore wind power[J]. *Journal of Chongqing University*, 2024, 47(11): 104-111. (in Chinese)
- [3] Haida O, Kitaoka H, Habu Y, et al. Macro- and semi-macroscopic features of the centerline segregation in CC slabs and their effect on product quality[J]. *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan*, 1984, 24(11): 891-898.
- [4] Krauss G. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2003, 34(6): 781-792.
- [5] 赵宜娜, 陈银莉, 余伟, 等. 退火对齿轮钢枝晶偏析及元素扩散的影响[J]. *钢铁*, 2019, 54(2): 60-66.  
Zhao Y N, Chen Y L, Yu W, et al. Effect of annealing on dendritic segregation and elemental diffusion of gear steel billet[J]. *Iron and Steel*, 2019, 54(2): 60-66. (in Chinese)
- [6] 刘起航, 刘睿霖, 杨双平, 等. 钼精矿焙烧处理过程中典型杂质元素的热力学行为及分析[J]. *重庆大学学报*, 2023, 46(6): 89-100.  
Liu Q H, Liu R L, Yang S P, et al. Thermodynamic behavior and analysis of typical impurity elements in the roasting process of molybdenum concentrate[J]. *Journal of Chongqing University*, 2023, 46(6): 89-100. (in Chinese)
- [7] 李科敏, 杨玉军, 王志刚, 等. GH350 合金铸锭元素偏析及其均匀化热处理[J]. *钢铁研究学报*, 2012, 24(7): 54-58.  
Li K M, Yang Y J, Wang Z G, et al. Microsegregation and homogenizing treatment of GH350 ingot[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 24(7): 54-58. (in Chinese)
- [8] Feng R, Li S L, Zhu X D, et al. Microstructural characterization and formation mechanism of abnormal segregation band of hot rolled ferrite/pearlite steel[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 646: 787-793.
- [9] Du Y F, Lu H H, Shen X Q. Coupled effects of banded structure and carbide precipitation on mechanical performance of Cr-Ni-Mo-V steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 832: 142478.
- [10] Bee C, Slater C, Davis C, et al. Micro-Segregation induced strain inhomogeneity in >900 MPa UTS martensitic hot rolled advanced high strength steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 888: 145335.
- [11] Offerman S E, van Dijk N H, Rekveldt M T, et al. Ferrite/pearlite band formation in hot rolled medium carbon steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2002, 18(3): 297-303.
- [12] Shi L, Yan Z S, Liu Y C, et al. Development of ferrite/bainite bands and study of bainite transformation retardation in HSLA steel during continuous cooling[J]. *Metals and Materials International*, 2014, 20(1): 19-25.
- [13] 梁文, 吴润, 黄海娥, 等. 碳含量对600 MPa级高强钢中心偏析和带状组织的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2018, 39(3): 149-157.  
Liang W, Wu R, Huang H E, et al. Effect of carbon content on the center segregation and banded structure of the 600 MPa grade high strength steel[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2018, 39(3): 149-157. (in Chinese)
- [14] Zhao Y N, Chen Y L, Zuo X J, et al. On the role of chemical banding and austenite grain size in microstructure evolutions and phase transformation kinetics of gear steels[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 356: 129305.
- [15] 杨永坤, 朱佳雨, 李小明, 等. 低碳合金钢带状组织控制研究现状[J]. *钢铁*, 2023, 58(4): 1-10.  
Yang Y K, Zhu J Y, Li X M, et al. A review of research on banded structure control in low carbon alloy steel[J]. *Iron and Steel*, 2023, 58(4): 1-10. (in Chinese)
- [16] Thompson S W, Howell P R. Factors influencing ferrite/pearlite banding and origin of large pearlite nodules in a hypoeutectoid plate steel[J]. *Materials Science and Technology*, 1992, 8(9): 777-784.

- [17] Eckert J A, Howell P R, Thompson S W. Banding and the nature of large, irregular pearlite nodules in a hot-rolled low-alloy plate steel: a second report[J]. *Journal of Materials Science*, 1993, 28(16): 4412-4420.
- [18] 孔祥华, 孙瑞虹, 唐晋, 等. 两相区冷速对齿轮钢 20CrMnTi 带状组织的影响[J]. *材料热处理学报*, 2012, 33(4): 91-95.  
Kong X H, Sun R H, Tang J, et al. Influence of cooling speed in two-phase region on banded structure of 20CrMnTi steel[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2012, 33(4): 91-95. (in Chinese)
- [19] 刘源, 许磊磊, 赵庆权, 等. 冷却速率和冷却温度对 SA-210Gr.C 钢中带状组织形成的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(6): 57-60.  
Liu Y, Xu L L, Zhao Q Q, et al. Effect of cooling rate and cooling temperature on the formation of banded structure in SA-210Gr.C steel[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, 26(6): 57-60. (in Chinese)
- [20] Wang Y L, Chen Y L, Yu W. Effect of Cr/Mn segregation on pearlite: martensite banded structure of high carbon bearing steel [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2021, 28(4): 665-675.
- [21] Großterlinden R, Kawalla R, Lotter U, et al. Formation of pearlitic banded structures in ferritic-pearlitic steels[J]. *Steel Research*, 1992, 63(8): 331-336.
- [22] Krebs B, Germain L, Hazotte A, et al. Banded structure in Dual Phase steels in relation with the austenite-to-ferrite transformation mechanisms[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(21): 7026-7038.
- [23] Maalekian M, Azizi-Alizamini H, Militzer M. Phase field modeling of microstructure banding in steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2016, 47(1): 608-622.
- [24] Farahani H, Xu W, van der Zwaag S. A novel approach for controlling the band formation in medium Mn steels[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2018, 49(6): 1998-2010.
- [25] Zhao Y N, Chen Y L, Wei H, et al. The role of elements partition and austenite grain size in the ferrite-bainite banding formation during hot rolling[J]. *Materials*, 2021, 14(9): 2356.
- [26] Zurob H S, Hutchinson C R, Bréchet Y, et al. Kinetic transitions during non-partitioned ferrite growth in Fe-C-X alloys[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(9): 2781-2792.
- [27] Gouné M, Danoix F, Ågren J, et al. Overview of the current issues in austenite to ferrite transformation and the role of migrating interfaces therein for low alloyed steels[J]. *Materials Science and Engineering: Reports*, 2015, 92: 1-38.
- [28] Zhu J N, Luo H W, Yang Z G, et al. Determination of the intrinsic  $\alpha/\gamma$  interface mobility during massive transformations in interstitial free Fe-X alloys[J]. *Acta Materialia*, 2017, 133: 258-268.
- [29] 石磊, 白雪, 田鹏勇, 等. 微合金钢等温过程中带状组织演变规律研究[J]. *热加工工艺*, 2024, 53(8): 27-30.  
Shi L, Bai X, Tian P Y, et al. Study on banded structures evolution of microalloyed steel during isothermal holding process[J]. *Hot Working Technology*, 2024, 53(8): 27-30. (in Chinese)
- [30] 江亮, 廖铭煜, 王振东, 等. 冷却速率对  $\delta$ -TRIP 钢包晶相变的影响[J]. *工程科学学报*, 2023, 45(5): 747-754.  
Jiang L, Liao M Y, Wang Z D, et al. Effect of cooling rate on the peritectic transformation of  $\delta$ -TRIP steel[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45(5): 747-754. (in Chinese)

(编辑 陈移峰)