

低碳微合金钢热轧带状组织演变行为的研究

王 博^{1,2*}, 李书恒^{1,2}, 莫超群^{1,2}, 张庆军^{1,2}

(1. 华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山 063210; 2. 河北省高品质钢连铸工程技术研究中心, 河北 唐山 063210)

摘 要: 低碳微合金钢在轧制过程中经常出现带状组织缺陷, 对产品质量和使用性能都有着重要的影响。以某厂 Q345 热轧板坯为研究对象, 通过对元素偏析, 轧件热轧过程不同轧制道次、不同位置带状组织演变行为进行分析, 结果表明, 枝晶间溶质元素偏析是导致带状组织形成的本质原因。同时发现不同轧制道次和不同位置轧材, 带状组织尺寸有着明显差异。不同轧制道次, 相同位置的带状组织, 压下率越大, 带状组织越细小, 压下率为 50% 时, 中心带状组织宽度约为 175 μm ; 压下率为 67% 时, 中心带状组织宽度约为 75 μm 。相同轧制道次下, 不同轧件位置的带状组织比较, 可以发现厚度中心位置带状组织最为粗大, 表面处最为细小。

关键词: 低碳微合金钢; 热轧; 带状组织; 压下量; 演变行为

中图分类号: TF76, TG335

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)06-0172-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.06.024

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

The evolution of hot-rolled banded microstructure in low carbon microalloyed steels

Wang Bo^{1,2*}, Li Shuheng^{1,2}, Mo Chaoqun^{1,2}, Zhang Qingjun^{1,2}

(1. College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China; 2. Hebei Province High Quality Steel Continuous Casting Engineering Technology Research Center, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: Banded structure defects often appear in low carbon microalloyed steels during rolling process, which have a great impact on the product quality and service properties. In this study, Q345 hot-rolled slab in a plant was selected as the research object, and the evolution of the banded structure in different rolling passes and positions during hot rolling was analyzed. The results show that the segregation of solute elements between dendrites is the essential reason for the formation of banded structure. At the same time, it is found that there are significant differences in the banded structure size of rolled products at different rolling passes and positions. For the banded structure at the same position in different rolling passes, the larger the reduction rate is, the smaller the banded structure is. When the reduction rate is 50%, the width of the central banded structure is about 175 μm . When the reduction rate is 67%, the width of the central banded tissue is about 75 μm . Under the same rolling pass, the comparison of banded structure at different rolling positions can be made. It is found that the banded structure at half-thickness is the largest, compared to the smallest band observed at the surface.

Key words: low carbon microalloyed steel, hot rolling, banded structure, reduction, evolution behavior

收稿日期: 2022-12-09

基金项目: 国家自然科学基金-青年基金(52004093); 国家自然科学基金-区域创新发展联合基金重点项目(U21A20114)。

作者简介: 王博, 1986 年出生, 男, 辽宁铁岭人, 副教授, 通讯作者, 研究方向: 钢铁冶金、铸坯质量控制, E-mail: adherent@163.com。

0 引言

低合金钢在连铸过程中会出现由于偏析而引起的带状组织,这种缺陷是不可避免的^[1]。在热轧冷却过程中,铁素体首先出现在贫碳区,在元素富集区的铁素体带两侧析出珠光体。最终形成平行于轧制方向层状或条带状的铁素体和珠光体混合组织。

带状组织对钢材的使用性能有着重要影响,会导致钢材产生各向异性,很大程度地降低钢材的塑形和韧性,降低材料的使用寿命^[2]。钢中带状组织的形成主要是由枝晶的凝固特性导致了钢中合金元素的微观偏析所引起的^[3]。低合金钢中合金元素,特别是 Mn 元素在凝固枝晶组织处发生偏析,形成 Ar₃ 温度不同的贫 Mn 和富 Mn 带,轧制后贫 Mn 和富 Mn 带分别形成铁素体/珠光体,从而形成了带状组织^[4]。

关于低合金钢带状组织产生的机理、影响和消除已有大量研究报道^[5-7]。Verhoeven^[3]和 Krauss^[8]研究了锰偏析对组织的影响,发现低合金钢在凝固过程中锰偏析导致最终组织的空间分布不均匀。这种现象被认为是热轧过程中的带状组织。高潇等人^[9]研究了 Q345E 钢带状组织与材料性能之间的关系,研究结果表明,带状组织越严重,材料的低温冲击性能越差,但拉伸性能变化幅度较小。王智轶^[10]对拉伸试样断口进行了分析,结果表明,试样分层主要是 Mn、S 等元素在带状组织间偏析形成的夹杂物在轧制过程中形成了分层缺陷。石可伟等人^[11]对连铸二冷制度对带状组织的影响展开研究,结果表明,通过提高连铸二冷冷却强度可以有效改善铸坯成分偏析,降低钢材的带状组织级别。张延玲等人^[12]对如何减轻或消除带状组织的形成进行了研究,一方面需要控制二次枝晶间的间距,获得细小的二次枝晶组织,进而促进枝晶间元素分布均匀,另一方面就是制定适当的轧制冷却制度,控制奥氏体晶粒尺寸,即便枝晶间存在一定的元素偏聚,也可以从控轧控冷制度方面减轻带状组织的危害。

以往学者的研究多针对于带状组织的形成机制,减轻或影响带状组织的生产工艺,而对于低合金钢热轧过程中带状组织的演变行为,特别是不同压下率对轧材不同位置带状组织影响的研究还鲜有报道。笔者结合某钢铁企业实际生产工艺,以典型 Q345 板坯低碳微合金钢为研究对象,分别对不同轧制道次

下轧材取样,并利用光学显微镜对轧材不同位置的带状组织进行统计分析,通过电子显微镜对带状组织元素偏析情况进行分析,探讨了热轧压下率对低合金钢带状组织演变行为的影响规律,为优化轧制生产工艺,改善轧材组织性能方面的研究提供了理论参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

试验用材料来自某钢厂 Q345 连铸板坯,铸坯断面尺寸 280 mm×1 800 mm,主要化学成分如表 1 所示。由于实验室轧机轧制能力有限,因此在铸坯宽度中心位置取样,图 1 为铸坯取样示意,在铸坯中心位置沿拉坯方向连续取三块试样进行实验室轧制试验,试样尺寸 200 mm×280 mm×400 mm (宽×厚×长)。

表 1 Q345 主要化学成分
Table 1 Main chemical composition of Q345 %

C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	N
0.14	0.20	1.40	0.014	0.006	0.028	0.025	0.02	0.007

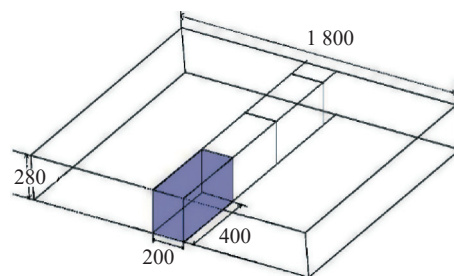


图 1 铸坯取样示意(单位:mm)
Fig. 1 Schematic diagram of slab sampling

1.2 试验分析方法

1.2.1 铸坯偏析检测

对铸坯 C、Mn 偏析情况进行研究,在如图 1 所示的铸坯横断面进行取样,图 2 为偏析取样示意,使用直径为 5 mm 的钻头,按图 2 所示位置分别沿厚度中心内弧、外弧两侧钻屑取样,两孔间中心距 20 mm,共取十个点,并测定每个取样点 C、Mn 含量 (M),取平均值为 M_0 ,并采用公式(1)的方法对 C、Mn 偏析情况进行研究。

$$L = M/M_0 \quad (1)$$

1.2.2 轧制工艺制度

表 2 为实验室轧制工艺参数。为了保证轧制温

度,将试样加热至 1 250 ℃,在加热炉中保温 3 h。初始轧制温度为 1 100 ℃,轧辊半径为 750 mm,轧制速度为 1.0 m/s,空冷。并分别在轧制第五、第七、第九道次取过程样,分析不同轧制道次轧材不同位置组织变化情况。

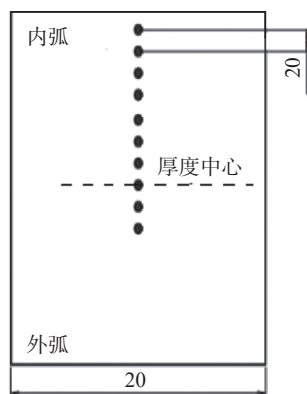


图2 偏析取样示意(单位:mm)

Fig. 2 Schematic diagram of segregation sampling

表2 轧制工艺参数

Table 2 Rolling process parameters

轧制道次	厚度/mm	道次压下率/%	总压下率/%	压缩比
0	280.0	0.0	0.0	0.00
1	247.5	11.6	11.6	1.13
2	216.0	12.7	22.8	1.29
3	186.6	13.6	33.3	1.50
4	161.0	13.7	42.5	1.74
5	140.4	12.8	50.0	2.00
6	124.7	11.2	55.5	2.25
7	111.9	10.3	60.0	2.51
8	100.0	10.6	64.3	2.80
9	92.1	7.9	67.1	3.00

2 试验结果与分析

2.1 铸坯低倍检测

取铸坯低倍试样,对试样进行机加工(铣床+磨床)后,用 50% 盐酸溶液进行热侵蚀,观察铸坯低倍情况,图 3 为连铸板坯低倍组织。可以看出铸坯厚度中心存在大量缩孔、疏松及偏析缺陷,同时可以看出铸坯存在“白亮带”。

2.2 偏析检测分析

钢材轧制后出现带状组织主要是由铸坯内部枝晶偏析引起的^[13],所以控制连铸坯枝晶偏析和促进

钢中溶质元素均匀分布^[14]是减轻或消除带状组织最有效的方法。因此,有必要对钢中元素偏析情况开展研究。图 4 为铸坯 C、Mn 偏析情况。可以看出铸坯厚度中心位置 C、Mn 偏析较为严重,C 偏析在 1.15 左右,Mn 偏析在 1.075 左右。在距铸坯中心 80 mm 位置附近处出现了明显的负偏析情况,C 偏析在 0.775 左右,Mn 偏析在 0.9 左右,这也是铸坯低倍组织存在明显“白亮带”的原因^[15]。

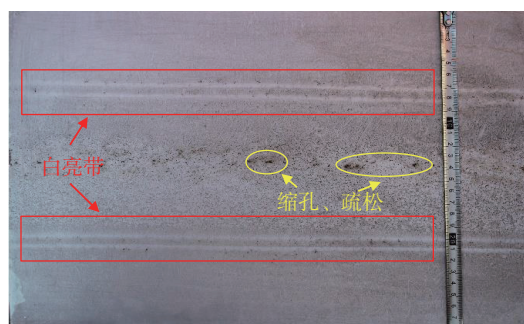


图3 连铸板坯低倍组织

Fig. 3 Macrostructure of continuous casting slab

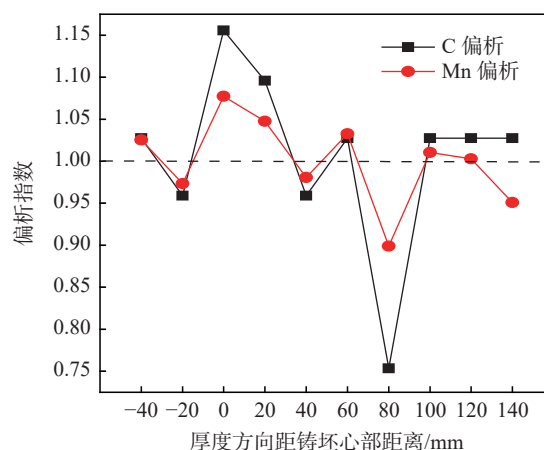


图4 C、Mn 偏析指数

Fig. 4 Segregation index of C and Mn

2.3 带状组织能谱分析

图 5 为带状组织线扫描图像。图中暗色区域为铁素体组织,亮色区域为珠光体组织。沿带状组织垂直方向进行线扫描,图 5(b)~(d) 分别分析 C、Mn、P 元素偏析情况。可以看出明暗相间地带 C、Mn 元素波动明显,图 5(b)、(c) 中虚线区域分别为带状组织贫 C、贫 Mn 区域,特别是 Mn 元素在珠光体、铁素体组织位置出现明显的波峰、波谷,说明存在明显的元素偏析情况。这与带状组织形成机理的研究观点一致,带状组织的形成是偏析的结果。在凝固过程中,枝晶间不可避免地出现溶质元素偏析的

现象, 在铸坯加热、保温过程中 C 将很快达到均匀, 但是对于其他含量相对较多的元素, 如 Mn、P 的扩散系数远小于 C^[16]。因此, 这些元素在加热保温过程中难以均匀化, 钢锭中仍存在偏析现象。铸坯在轧制过程中, 粗大的枝晶在轧制时沿轧制方向被拉长, 并随着轧制过程的进行逐渐与轧制方向一致, 从

而形成了 C 和其他元素贫化带相互堆叠的现象, 在冷却过程中, 元素贫化区先析出铁素体组织, 而 C 和其他元素的富化区形成珠光体组织, 最后就形成了这种铁素体与珠光体彼此交替堆叠的带状组织。图 6(a) 为放大 500 倍带状组织扫描电镜形貌, 图 6(b) 为放大 1 000 倍珠光体形貌。

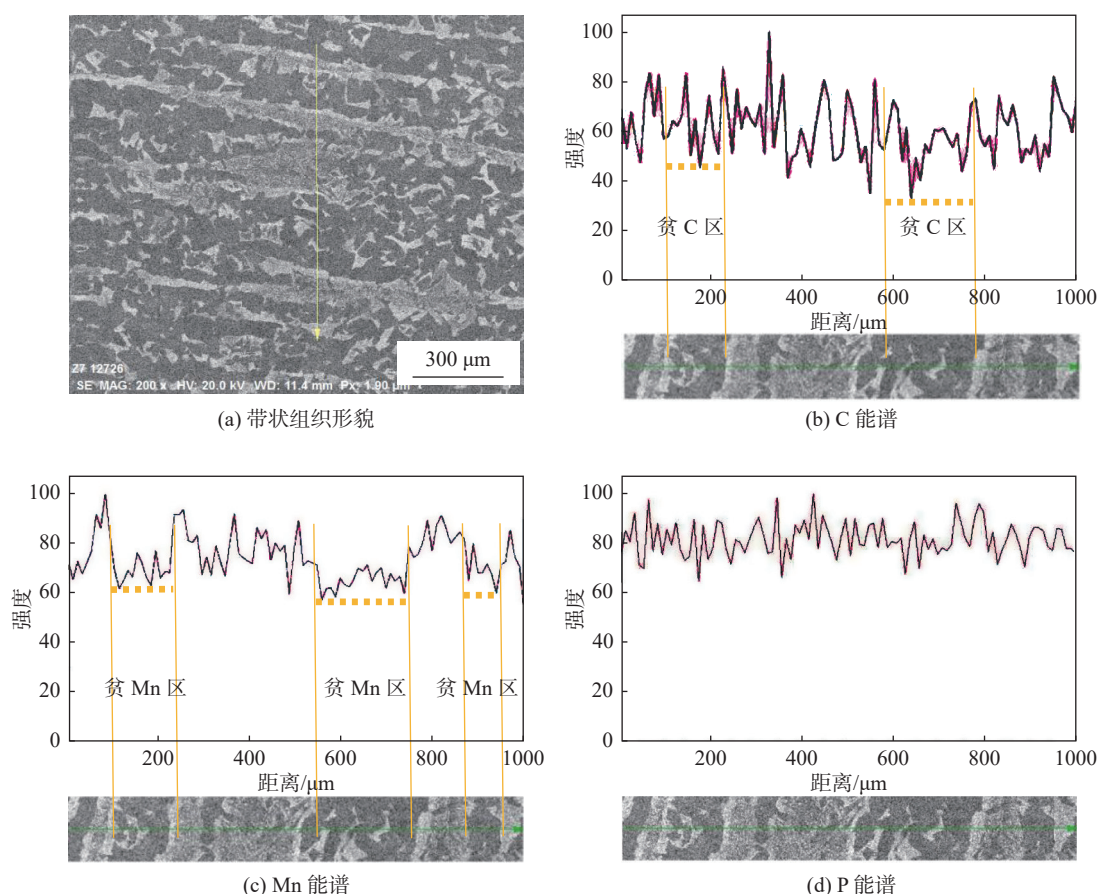


图 5 带状组织线扫描形貌
Fig. 5 Line scan of banded structure

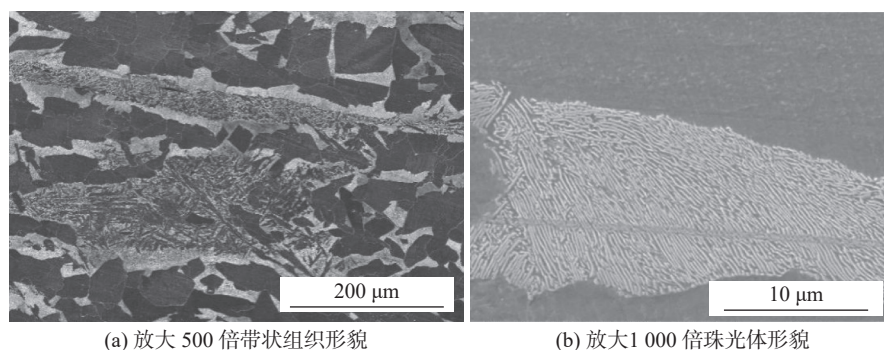


图 6 带状组织形貌
Fig. 6 SEM morphology of banded tissue

2.4 带状组织演变行为分析

分别对轧制试样在不同轧制道次 (5、7、9) 取

样, 分析试样厚度方向不同位置 (1/2、1/4、表层) 组织形貌。图 7 为第五道次不同位置试样组织形貌,

此道次压下率为50%。可以看出试样厚度1/4(图7(b))和表层(图7(c))处已经出现了明显的黑白相间的带状组织结构。同时对试样厚度1/2处组织观察可以发现,此处带状组织不是特别明显,且存在着大量黑色珠光体组织。通过对比相同轧制道次下试样不同位置晶粒尺寸,可以发现厚度1/2位置晶粒尺寸最为粗大,表层晶粒尺寸最为细小。

图8为第七道次试样厚度方向不同位置(1/2、1/4、表层)组织形貌,此道次压下率为60%。可以看出,试样厚度1/4(图8(b))和表层(图8(c))处带状组织较为明显,试样厚度1/2处(图8(a))带状组

织逐渐形成,仍存在较多的黑色珠光体组织,厚度1/4及表层组织较厚度1/2处较为细小。与第五道次组织比较,可以看出随着压下率的增加试样不同位置组织均较为细小。

图9为第九道次试样厚度方向不同位置(1/2、1/4、表层)组织形貌,此道次压下率为67.1%。可以看出,随着轧制过程的进行,压下率的增加,试样厚度方向不同位置均为较为明显的带状组织,同时试样厚度1/2位置(图9(a))仍存在较为明显、较为粗大的黑色珠光体组织,这也与铸坯中心位置C、Mn偏析严重有一定关系。

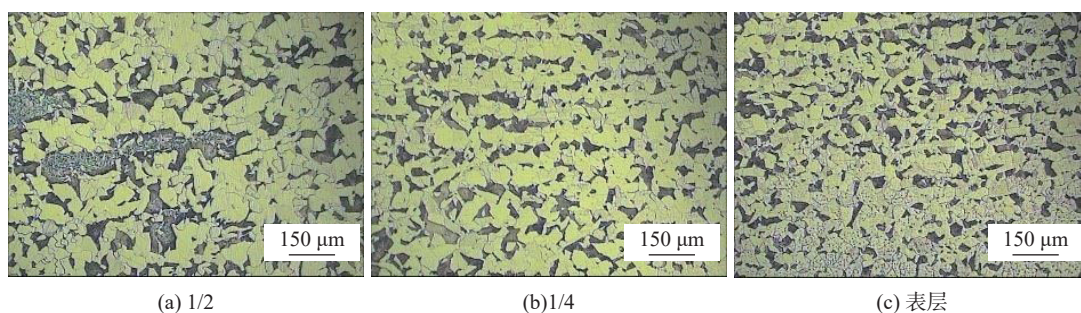


图7 第五道次工序不同位置的组织形貌
Fig. 7 Structure morphology at different positions during the fifth process

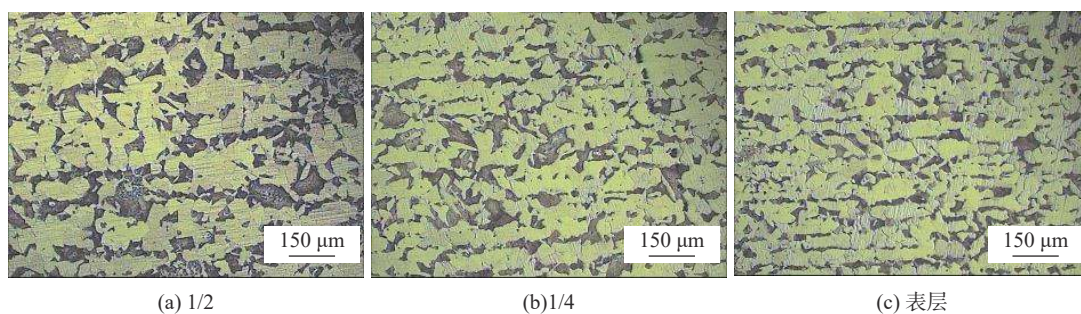


图8 第七道次不同位置的组织形貌
Fig. 8 Structure morphology at different positions during the seventh pass

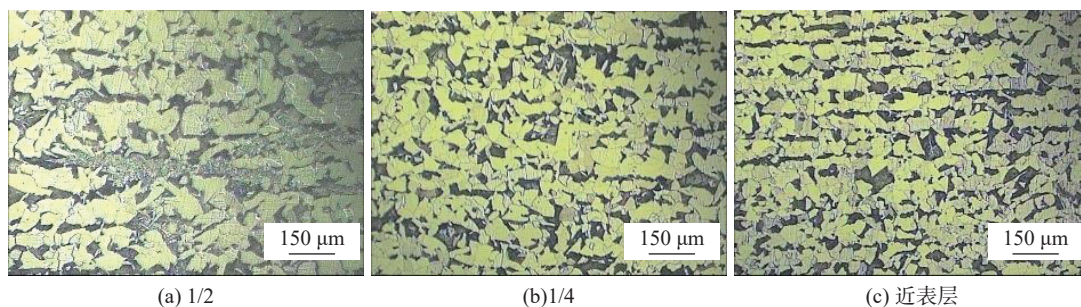


图9 第九道次不同位置的组织形貌
Fig. 9 Structure morphology at different positions during the ninth pass

对轧材不同轧制道次、不同位置的带状组织大小进行对比, 分析轧制过程中不同位置、不同压下量带状组织情况。图 10 为轧制过程中不同位置带状组织宽度。

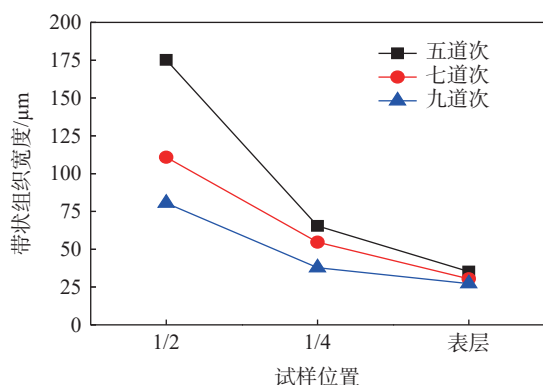


图 10 不同位置带状组织宽度的变化

Fig. 10 Changes of banded structure width at different positions

通过对比可以发现, 不同位置和轧制道次的带状组织宽度存在明显差异。轧件不同轧制道次, 相同位置的带状组织明显减小, 第五道次压下率为 50% 时, 中心带状组织宽度约为 175 μm , 第九道次压下率为 67% 时, 中心带状组织宽度约为 75 μm 。这是由于在轧制过程中, 压下量逐渐增加, 轧制开始阶段轧件发生压扁、拉长的变形, 同时由于动态再结晶和静态再结晶的共同作用, 新的晶粒在晶界位置形核、长大形成新的细小的再结晶晶粒^[17-18]。而随着压下量的进一步增加, 新形成的细小的再结晶晶粒又会再次变形, 晶界处会再一次形成更为细小的二次再结晶晶粒。因此, 压下量增加, 晶粒也越加细化。而对于相同轧制道次下轧件的不同位置, 厚度中心位置带状组织最宽, 表面处最窄。第 5 道次

中心带宽度约 175 μm , 表层为 40 μm 左右。这是因为轧制是一个表面金属逐渐流动的过程, 在轧制初期, 较小变形量不足以传递到轧材心部。随着轧制过程的进行, 轧材由表面到心部应变的逐渐累积, 变形量越大, 应变积累越大, 当应变积累大于动态再结晶临界应变时, 晶粒就会通过动态再结晶而得到更为细小的晶粒尺寸, 这也是轧材表面晶粒尺寸要明显小于心部的主要原因^[19]。

3 结论

通过实验室微合金钢热轧试验, 分析轧制过程不同轧制道次轧件不同位置带状组织演变情况, 得出以下结论:

1) 通过对铸坯 C、Mn 元素偏析检测发现, 铸坯凝固中心位置偏析最为严重, C 偏析在 1.15 左右, Mn 偏析在 1.075 左右。同时可以看出铸坯“白亮带”位置明显存在负偏析, C 偏析在 0.775 左右, Mn 偏析在 0.9 左右。

2) 带状组织主要是铁素体与珠光体彼此交替堆叠所形成的, 而枝晶间溶质元素偏析是导致带状组织形成的本质原因, 元素贫化区形成铁素体组织, 元素富化区形成珠光体组织。

3) 对轧件不同轧制道次, 相同位置的带状组织比较可以发现, 随着轧制过程的进行, 压缩率的增加, 带状组织宽度明显减小, 第五道次压下率为 50% 时中心带状组织宽度约为 175 μm , 第九道次压下率为 67% 时, 中心带状组织宽度约为 75 μm 。

4) 对相同轧制道次下, 不同轧件位置的带状组织比较可以发现, 厚度中心位置带状组织最为粗大, 表面处最为细小。

参考文献

- [1] Uthaisangsuk V, Muenstermann S, Prah U, *et al.* A study of microcrack formation in multiphase steel using representative volume element and damage mechanics[J]. *Computational Materials Science*, 2011, 50(4): 1225–1232.
- [2] Ji Yuan, Min Yunfeng, Li Pengshan, *et al.* Ribbon structure in steel and its research status[J]. *Chinese Metallurgy*, 2016, 26(4): 1–9.
(纪元, 闵云峰, 李鹏善, 等. 钢中带状组织及其研究现状[J]. *中国冶金*, 2016, 26(4): 1–9.)
- [3] Verhoeven J D. A review of microsegregation induced banding phenomena in steels[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2000, 9(3): 286–296.
- [4] Karimi Y, Nedjad S H, Miyamoto G, *et al.* Banding effects on the process of grain refinement by cold deformation and recrystallization of acicular C-Mn steel[J]. *Materials Science Engineering A*, 2017, 697(7): 1–7.
- [5] Grange R A. Effect of microstructural banding in steel[J]. *Metallurgical and Materials Transaction A*, 1971, 2(2): 417–426.
- [6] Zaefferer S, Ohlert J, Bleck W. A study of microstructure, transformation mechanisms and correlation between microstructure

- and mechanical properties of a low alloyed TRIP steel[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(9): 2765–2778.
- [7] Krizan D, Spiradek H K, Pichler A. Relationship between microstructure and mechanical properties in Nb-V microalloyed TRIP steel[J]. *Materials Science and Technology*, 2015, 31(6): 661–668.
- [8] Krauss G. Solidification, segregation, and banding in carbon and alloy steel[J]. *Metallurgical and Materials Transaction B*, 2003, 34(6): 781–792.
- [9] Gao Xiao, Yang Renjie, Li Yingjie, *et al.* Effect of strip group on mechanical properties of Q345E steel[J]. *Large Castings and Forgings*, 2016, (2): 29–31.
(高潇, 杨仁杰, 李英杰, 等. 带状组织对Q345E钢力学性能的影响[J]. 大型铸锻件, 2016, (2): 29–31.)
- [10] Wang Zhiyi, Le Kexiang. Q345B causes of delamination defects in medium and thick steel plates[J]. *Physical and Chemical Testing: Physical Fascicles*, 2009, 45(10): 613–616.
(王智轶, 乐可襄. Q345B中厚钢板分层缺陷的形成原因[J]. 理化检验:物理分册, 2009, 45(10): 613–616.)
- [11] Shi Kewei, Lu Hongxing, Han Yong, *et al.* Experimental study on the influence of continuous casting cooling strength on the banded structure grade of steel[J]. *Continuous Casting*, 2015, 40(5): 42–44.
(石可伟, 卢洪星, 韩勇, 等. 连铸冷却强度对钢材带状组织级别影响的试验研究[J]. 连铸, 2015, 40(5): 42–44.)
- [12] Zhang Yanling, Liu Haiying, Ruan Xiaojiang, *et al.* Segregation behavior of alloy elements in medium and low carbon gear steels and its effect on banded structure[J]. *Journal of Beijing University of Science and Technology*, 2009, 31(S1): 199–206.
(张延玲, 刘海英, 阮小江, 等. 中低碳齿轮钢中合金元素的偏析行为及其对带状组织的影响[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(S1): 199–206.)
- [13] Ji Yuzhong. Control practice of strip structure of 25CrMo4 gear steel produced by continuous casting and rolling[J]. *Shandong Metallurgy*, 2022, 44(4): 54–56.
(纪玉忠. 连铸连轧生产25CrMo4齿轮钢带状组织的控制实践[J]. 山东冶金, 2022, 44(4): 54–56.)
- [14] Wang Jie, Dang Shu'e, Fan Zijing, *et al.* Tissue homogenization of 17CrNiMo6 gear steel[J]. *Metal Heat Treatment*, 2022, 47(11): 126–133.
(王杰, 党淑娥, 范子靖, 等. 17CrNiMo6齿轮钢的组织均匀化[J]. 金属热处理, 2022, 47(11): 126–133.)
- [15] Wen Hongquan, Wu Cunyou, Zhou Yueming. Study on solute redistribution and macroscopic segregation during solidification process of carbon steel continuous casting billet[J]. *Baosteel Technology*, 2019, (4): 45–49.
(温宏权, 吴存有, 周月明. 碳钢连铸坯凝固过程溶质再分配及宏观偏析的研究[J]. 宝钢技术, 2019, (4): 45–49.)
- [16] Chen Jixiong, Liu Weihang, Peng Xiaofeng. Formation reason and process improvement of banded structure in microstructure of Q345B thick steel plate[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis(Part A:Physical Testing)*, 2021, 57(5): 18–20, 26.
(陈继雄, 刘卫航, 彭晓枫. Q345B厚钢板显微组织中带状组织的形成原因及工艺改进[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(5): 18–20, 26.)
- [17] Huo Xiangdong, Hou Liang, Li Liejun, *et al.* Recrystallization law of titanium microalloyed high-strength steel[J]. *Journal of Materials Heat Treatment*, 2017, 38(4): 119–125.
(霍向东, 侯亮, 李烈军, 等. 钛微合金化高强钢的再结晶规律[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(4): 119–125.)
- [18] Xie Xinghua, Yao Zekun, Ning Yongquan, *et al.* Dynamic recrystallization and grain refinement of FGH4096 alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2011, 31(1): 20–24.
(谢兴华, 姚泽坤, 宁永权, 等. FGH4096合金的动态再结晶与晶粒细化研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(1): 20–24.)
- [19] Ma Cainü, Gao Xueyun, Hu Zhiyu, *et al.* Effect of rolling deformation on grain refinement of 0.05C-2.8Mn-4.2Ni-2Al-1.2Mo-1.9Cu of F-M duplex steel[J]. *Special Steel*, 2022, 43(3): 91–94.
(马才女, 高雪云, 呼陟宇, 等. 轧制变形对F-M双相钢0.05C-2.8Mn-4.2Ni-2Al-1.2Mo-1.9Cu晶粒细化的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(3): 91–94.)