

20CrMnTi钢热轧棒材铁素体-珠光体带状组织的控制

王震¹, 李博鹏¹, 唐志刚², 柳萍¹, 张光鸿¹, 徐绪奎¹

1. 大冶特殊钢有限公司技术中心 湖北黄石 435001

2. 比亚迪集团股份有限公司 广东深圳 518000

摘要: 研究了20CrMnTi钢棒材试样在轧制线不同位置的带状组织, 在延展变形量小、温度较高的粗轧处钢材带状组织带状相对较轻, 而在延展变形量大、停轧温度低的终轧处, 带状相对较重。依据上述结果, 通过试验终轧温度分别为800℃、825℃、865℃、905℃、915℃及945℃, 冷却速度分别为0.53℃/s和1.50℃/s的轧制工艺来控制20CrMnTi钢棒材的带状组织, 结果表明: 当终轧温度>915℃、冷却速度控制在1.50℃/s时, 能够控制20CrMnTi钢热轧棒材带状≤2.0级。经过分析得出: 热轧棒材的带状形成机理是钢材在轧制过程中的金属延展变形和奥氏体冷却转变为铁素体和珠光体共同作用的结果, 当20CrMnTi钢棒材组织在奥氏体区进行金属延展变形时, 有利于带状的控制; 当终轧温度<913℃时, 奥氏体发生相变析出先共析铁素体之后再发生延展性变形则不利于带状的控制。采用EPMA-1720型电子探针设备对热轧和退火状态的20CrMnTi钢棒材试样进行扫描分析, 结果表明: 退火处理能够加重钢材带状, 使C、Mn、Cr元素沿金属延展方向聚集。

关键词: 20CrMnTi钢; 热轧棒材; 带状组织; 终轧温度; 冷却速度

Controlling the ferrite and pearlite banded structure of 20CrMnTi steel hot rolled bar

WANG Zhen¹, LI Bopeng¹, TANG Zhigang², LIU Ping¹, ZHANG Guanghong¹, XU Xukui¹

1. Daye Special Steel Co., Ltd., Teconolgy Center, Huangshi 435001, Hubei, China

2. BYD Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

Abstract: This paper studied the banded structure of 20CrMnTi steel bar samples at different positions in the rolling line. In the rough rolling section with small plastic deformation and high temperature, the banded structure is relatively light. In the final rolling section with large plastic deformation and low stop rolling temperature, the banded structure is relatively heavy. Based on the above results, the rolling process was controlled through experiments with final rolling temperatures of 800℃, 825℃, 865℃, 905℃, 915℃, and 945℃, and cooling speeds of 0.53℃/s and 1.50℃/s to control the banded structure of 20CrMnTi steel hot-rolled bars. The results show that when the final rolling temperature is >915℃ and the cooling speed is controlled at 1.50℃/s, the banded structure of 20CrMnTi steel hot-rolled bars can be controlled at ≤2.0 grade. The formation mechanism of hot-rolled bar banding was analyzed, which was the result of the combined effects of metal plastic deformation during rolling and the cooling phase transformation of austenite into ferrite and pearlite. When the bar structure is in the austenite region

基金项目: 中信集团重大科技创新项目“基于稀有金属应用的新材料开发”(No.2022ZXKYA06100)。

第一作者: 王震, 工程师, 主要研究方向为低碳齿轮钢开发, E-mail: wangzhen023527@citicsteel.com。

during metal plastic deformation, it is beneficial to control the banding. When the temperature is $<913^{\circ}\text{C}$, austenite undergoes phase transformation to precipitate primary ferrite, followed by plastic deformation, which is unfavorable for controlling the banding. The 20CrMnTi steel bar samples were scanned using the EPMA-1720 electronic probe device after hot rolling and annealing, and the results showed that annealing treatment can aggravate the steel banding, causing C, Mn, and Cr elements to accumulate along the metal extension direction.

Keywords: 20CrMnTi steel; hot rolled bar; banded structure; final rolling temperature; cooling rate

1 序言

带状组织包括一次带状组织和二次带状组织,一次带状组织的产生受连铸或模铸工艺的影响较大;二次带状组织主要是金属在延展变形和冷却过程中,奥氏体组织转变形成的铁素体-珠光体交错的带状组织,受金属变形量、变形速率、奥氏体冷却相变影响较大^[1-4]。针对低碳齿轮钢的铁素体-珠光体带状(下文简称“带状组织”)控制,科技工作者们做了深入的研究^[5-7]。李小龙等^[8]通过工艺试验研究分析了20CrMoH齿轮钢在奥氏体未再结晶区轧制时,带状组织级别为1.0~1.5级。郑晓宁等^[9, 10]通过提高加热温度、适当延长加热时间、提高终轧温度,以及增加棒材的冷却速度控制20CrMnTiH钢带状 ≤ 3.0 级。王芳等^[11]综述了常用消除或减轻带状组织的方法,即采用高温扩散、控轧控冷、锻造及锻后热处理,可减轻或消除带状组织。孔祥华等^[12]对20CrMnTiH钢热轧棒材进行正火,通过对控制起始冷却温度、终点冷却温度和冷却速度分析,结果表明,控制带状组织的主要因素是冷却速度。

近年来,随着新能源汽车产业的飞速发展,新能源汽车驱动电动机的起动转矩越来越大,电动机转速越来越高,其对传统齿轮传动零件的安全性和可靠性提出了更高、更严的技术要求,促进了传统齿轮材料向洁净化、均质化方向发展。20CrMnTi钢作为一种性价比较高的低碳齿轮钢,备受新能源汽

车行业青睐,因此20CrMnTi钢的带状控制及探究带状程度与元素分布的关系是钢铁企业和主流车企重点研究的课题^[13-16]。本文通过试验20CrMnTi钢棒材在轧制线不同位置的铁素体-珠光体带状取样分析,对轧机粗轧(第7架轧机出口)、中轧(第11架轧机出口)、精轧(KOCKS轧机出口)的试样带状进行对比分析,研究了同一支钢材在不同终轧温度、不同变形延展率时的带状组织分布。通过控制不同终轧温度和冷却速度达到控制钢材带状组织的目的。同时检测分析了热轧和退火状态试样的带状和对应的C、Mn、Cr等元素分布。

2 试验材料和方案

试验采用某钢厂生产的 $\phi 45\text{mm}$ 规格20CrMnTi钢棒材,其生产工艺流程为:120t转炉 $\rightarrow$ LF精炼 $\rightarrow$ RH脱气 $\rightarrow$ 连铸 $240\text{mm} \times 240\text{mm}$ 方坯 $\rightarrow$ 步进式加热炉加热 $\rightarrow$ 除氧化铁皮 $\rightarrow$ 粗轧 $\rightarrow$ 中轧 $\rightarrow$ 精轧 $\rightarrow$ 冷床冷却 $\rightarrow$ 精整。主要化学成分见表1。

2.1 轧制线不同位置带状分布试验方案

某钢厂20CrMnTi钢加热轧制工艺为:加热 $\rightarrow$ 除氧化铁皮 $\rightarrow$ 粗轧 $\rightarrow$ 中轧 $\rightarrow$ 精轧 $\rightarrow$ 冷床冷却。其各轧制工序温度见表2。

为了研究轧线不同位置的带状组织分布,生产 $\phi 45\text{mm}$ 规格的20CrMnTi钢棒材,坯料分别在第7架轧辊出口处、第11架轧辊出口处、KOCKS轧机出口位置取相同体积大小的试样,其中第7架轧辊

表1 20CrMnTi钢化学成分(质量分数) (%)

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Ni	Cu	Mo
标准值	0.17~0.23	0.17~0.35	0.80~1.15	0~0.030	0~0.030	1.00~1.30	0.04~0.10	≤ 0.20	≤ 0.20	≤ 0.10
实测值	0.19	0.26	0.96	0.018	0.018	1.14	0.055	0.03	0.02	0.02

表2 20CrMnTi钢轧制各工序温度 ($^{\circ}\text{C}$)

加热二段	均热段	开轧	第7架轧机出口	第11架轧机出口	KOCKS轧机出口
1161~1193	1214~1237	1090~1100	1000~1040	950~1000	810~950

出口处、第11架轧辊出口处中间坯的尺寸分别为 $\phi 130\text{mm}$ 和 $\phi 80\text{mm}$ ，控制 1.50°C/s 的冷却速度冷却到室温，按照GB/T 34474.1—2017《钢中带状组织的评定 第1部分：标准评级图法》规定取样，标记为1[#]、2[#]、3[#]，并分别对试样的边缘、1/2半径和心部进行带状组织检测。

2.2 不同终轧温度带状组织控制试验方案

为了研究不同终轧温度对20CrMnTi钢棒材带状组织的影响，通过调节冷却水箱的水流量来控制20CrMnTi钢棒材的终轧（KOCKS轧机出口）温度为 800°C 、 825°C 、 865°C 、 905°C 、 915°C 及 945°C ，控制 1.50°C/s 的冷却速度冷却到室温后取试样，标记为4[#]、5[#]、6[#]、7[#]、8[#]与9[#]，并检测带状组织。

2.3 不同冷却速度下带状组织控制试验方案

为了研究不同冷却速度对20CrMnTi钢棒材带状组织的影响，在 $\phi 45\text{mm}$ 规格的20CrMnTi钢棒材终轧

完毕后，打开冷床保温罩，控制钢材的平均冷却速度为 1.50°C/s ，钢材冷却至室温，另将冷床保温罩关闭，控制钢材的平均冷却速度为 0.53°C/s ，冷却至室温后取试样，分别标记为10[#]、11[#]，并检测带状组织。

2.4 退火热处理对带状组织的影响试验方案

对热轧20CrMnTi钢棒材采用 860°C 保温2h，然后经过5h冷却到 550°C 的工艺进行退火处理，对比钢材1/2半径位置处的热轧态和退火态的带状组织，采用EPMA-1720型电子探针设备对热轧和退火状态试样的带状组织检测面元素分布进行扫描，观察钢材不同状态的元素分布。

3 试验结果分析与讨论

3.1 轧制线不同位置带状组织分布

利用光学显微镜分别观察1[#]、2[#]、3[#]试样近表面、1/2半径和心部的带状组织，结果如图1所示。

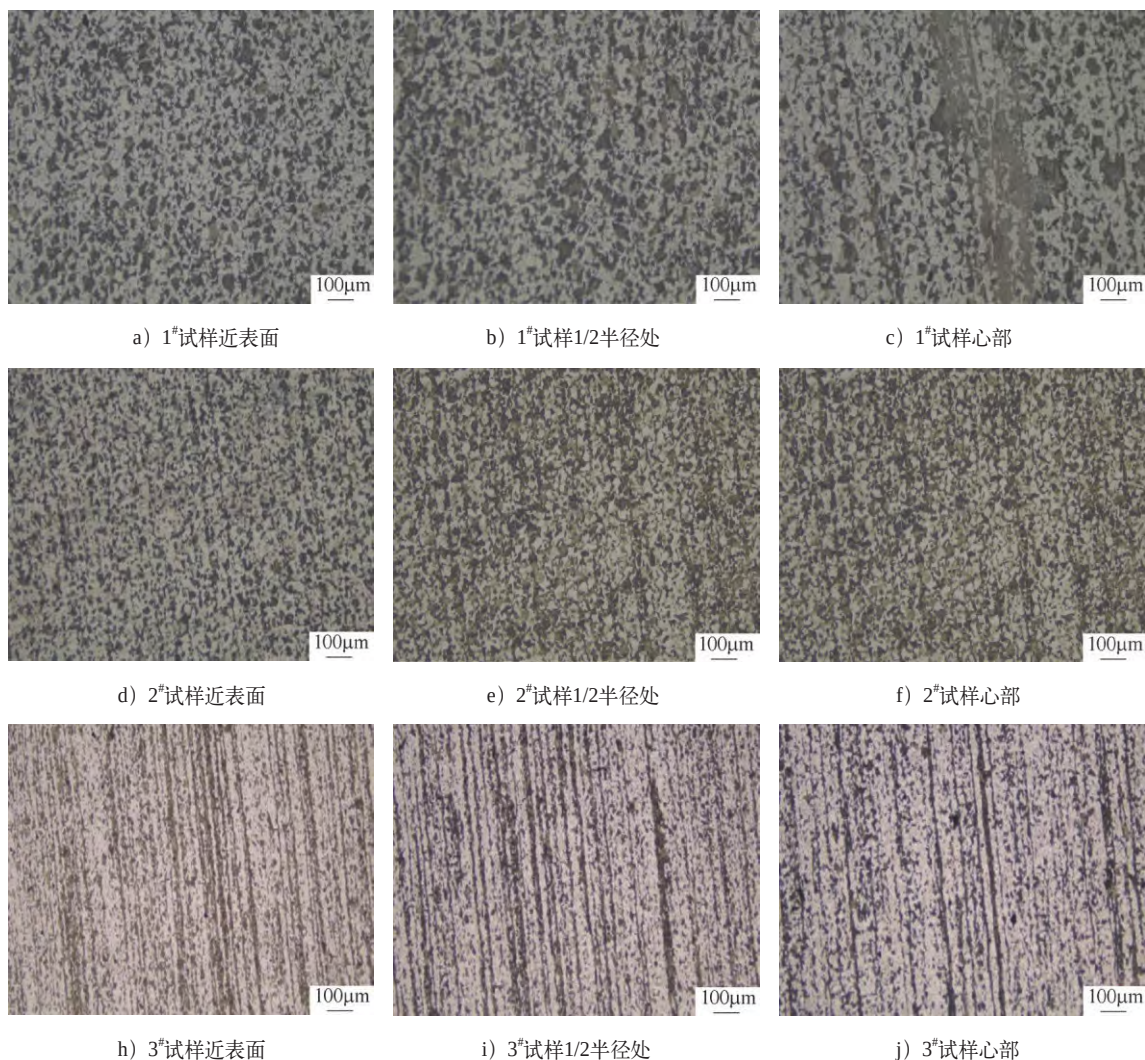


图1 轧制线不同位置的20CrMnTi钢带状组织

其中, 图1a~c分别为1[#]试样的同一截面的边缘、1/2半径和心部, 带状组织评级分别为0级、1.0级、1.5级; 当坯料在第11架轧机出口处, 其边缘、1/2半径和心部处的带状组织分别如图1d~f所示, 其带状组织级别分别为1.0级、1.5级和1.5级; 当坯料在KOCKS轧机出口处, 3[#]试样近表面、1/2半径和心部处的带状组织如图1g~i所示, 其带状组织级别分别为3.0级、3.0级和3.0级。这说明, 随着轧制的进行, 20CrMnTi钢棒材在第7架轧机出口、第11架轧

机出口和KOCKS轧机出口的带状组织带状依次加重, 越靠近轧制末端, 带状越严重, 且钢材带状组织带状是从表面到心部逐渐加重。

3.2 不同终轧温度的带状组织控制

通过调节冷却水箱的水流量控制 $\phi 45\text{mm}$ 规格的20CrMnTi钢棒材的终轧(KOCKS出口)温度为800℃、825℃、865℃、905℃、915℃和945℃。对4[#]、5[#]、6[#]、7[#]、8[#]及9[#]试样的带状组织进行观察, 结果如图2所示, 带状组织评级如图3所示。

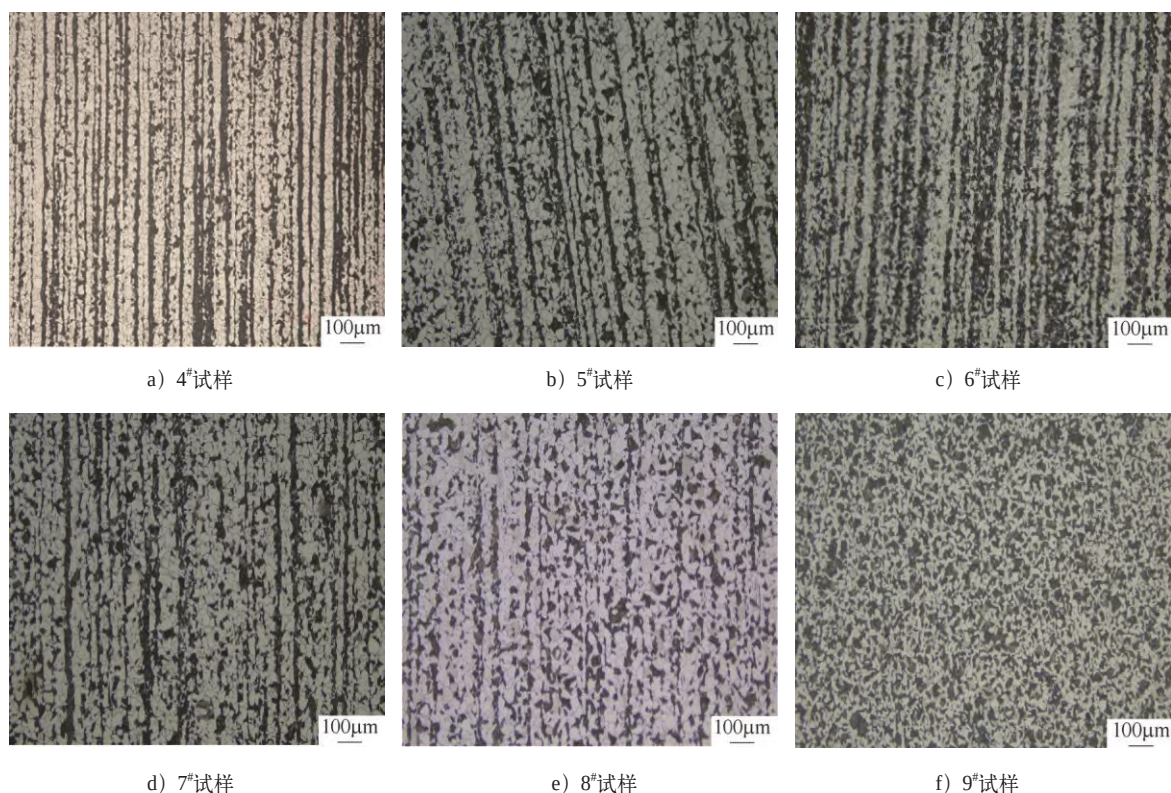


图2 不同终轧温度的20CrMnTi钢棒材带状组织

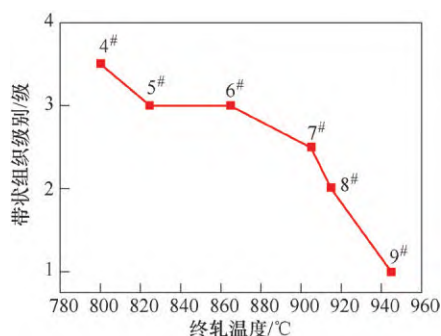


图3 不同终轧温度的20CrMnTi钢棒材带状组织评级

由图2、图3可看出, 当终轧温度 $\geq 905^\circ\text{C}$ 时, 棒材的带状组织级别 ≤ 2.5 级。当终轧温度 $\geq 915^\circ\text{C}$ 时, 带状组织级别 ≤ 2.0 级, 随着终轧温度的升高,

带状组织级别逐渐减小。图3所示中的8[#]试样和9[#]试样, 其终轧温度 $\geq 900^\circ\text{C}$, 处于奥氏体再结晶温度区间, 首先由于轧制变形使奥氏体发生动态再结晶, 因此奥氏体形核质点较多, 晶粒更加细小, 组织转变更加均匀。其次是8[#]试样和9[#]试样的终轧温度较高, 在金属轧制塑性变形完成时, 其组织仍然为奥氏体组织(r相, 见图4), 此时20CrMnTi钢棒材已经完成了轧制的塑性变形, 在随后的冷却过程中, C元素及合金元素的贫化区优先析出先共析铁素体, 不再沿轧制方向拉长延伸, C及合金元素的贫化区和富化区均在原位发生析出转变, 从而形成珠光体、铁素体均匀组织, 无明显带状组织。当温度

低于G点(911℃)温度时,在C及合金元素贫化区的细微夹杂物、晶胞缺陷突变处奥氏体会优先形核并析出先共析铁素体,其沿着轧制方向拉伸变形并形成铁素体带。随着先共析铁素体的析出,C及合金元素的浓度逐渐增大,在随后的降温过程中先共析铁素体附近的C及合金元素的富化区,当达到共析转变的条件时,奥氏体开始转变为珠光体析出。因此,当终轧温度 $\geq 911^{\circ}\text{C}$ 时,相变过程中有效抑制了先共析铁素体的析出,奥氏体是在原位发生相变,其带状组织相对较轻。如4[#]试样、5[#]试样,当轧制温度分别为825℃和800℃时,先共析铁素体会沿着轧制方向塑性变形并形成铁素体带,从而加重带状组织。

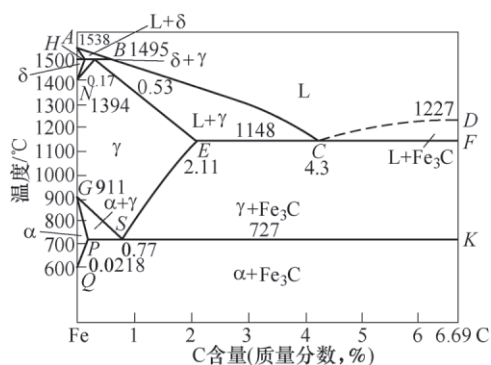
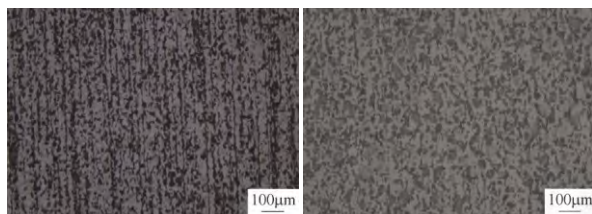


图4 铁碳合金相图

3.3 不同冷却速度下的带状组织控制

在终轧温度920℃的20CrMnTi钢棒材生产轧制过程中,通过调节冷床保温罩,控制轧后冷却速度分别为0.53℃/s、1.50℃/s时10[#]、11[#]试样的带状组织评级分别为2.0级、1.0级,如图5所示。

随着冷却速度从0.53℃/s提高到1.50℃/s时,20CrMnTi钢热轧带状组织从2.0级下降到1.0级。结合铁碳合金相图(见图4),当20CrMnTi钢棒材终轧温度处于G点以上时,奥氏体原位发生相变,当钢材以1.50℃/s冷却速度冷却时,相变的驱动力较大,当C及合金元素的贫溶质区发生先共析铁素体



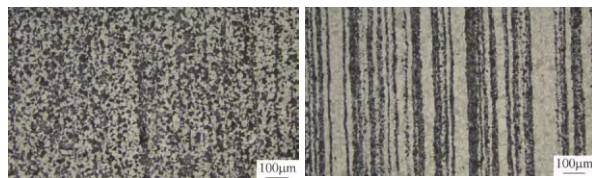
a) 10[#]试样 b) 11[#]试样

图5 不同冷却速度的20CrMnTi钢棒材带状组织

转变后,在相同的时间内,根据菲克扩散定律,其贫化区的C向富溶质区扩散的条件较弱,C在富溶质区的富集程度相对较轻,带状相对较轻。反之,当钢材以0.53℃/s冷却速度冷却时,先共析铁素体不断析出,其附近的C及合金元素不断富集,并逐渐向富溶质区扩散。这就造成了C及合金元素在贫化区组织转变为较多的铁素体,而富化区组织转变为较多的珠光体,这种贫化区的铁素体和富化区的珠光体交替堆叠,使带状逐渐加重。因此,提高冷却速度,能够有效抑制20CrMnTi钢热轧棒材的带状组织。

3.4 退火处理对带状组织和元素分布的影响

在终轧温度920℃时,轧后冷却速度为1.50℃/s的20CrMnTi钢棒材生产轧制过程中,取长=100mm热轧态试样,其中一端截取50mm按照带状标准取样标记为12[#],对另一端50mm长试样采用860℃保温2h,且经过5h冷却到550℃进行退火处理,按带状标准取样并记为13[#]。对12[#]、13[#]试样进行带状组织检测,结果如图6所示,其中12[#]试样带状组织如图6a所示。由图6a可见,珠光体均匀分布在铁素体基体上,无明显条带,带状组织评级为1.0级;而经过退火处理的13[#]试样其带状组织如图6b所示。由图6b可见,铁素体和珠光体交替分布,带状组织评级为4.5级。因此,20CrMnTi钢棒材的带状组织,受退火处理影响较大,对热轧棒材进行退火处理可以使原1.0级带状组织升到4.5级甚至更高。



a) 热轧状态12[#]试样 b) 退火状态13[#]试样

图6 热轧和退火态20CrMnTi钢棒材带状组织

为了进一步研究带状组织级别与元素分布的关系,采用EPMA-1720型电子探针设备分别对上述热轧状态12[#]试样(带状组织1.0级)和退火状态13[#]试样(带状组织4.5级)的带状检测面进行元素分布扫描,渐变条分析元素偏析程度,颜色从蓝色到红色渐变,红色代表浓度高,如图7所示。其中,图7a、7b分别为12[#]试样和退火状态13[#]试样的C元素分布。从图7a可看出,C元素浓度分布均匀,无明显起伏;从图7b可看出,C元素浓度分布呈带状趋

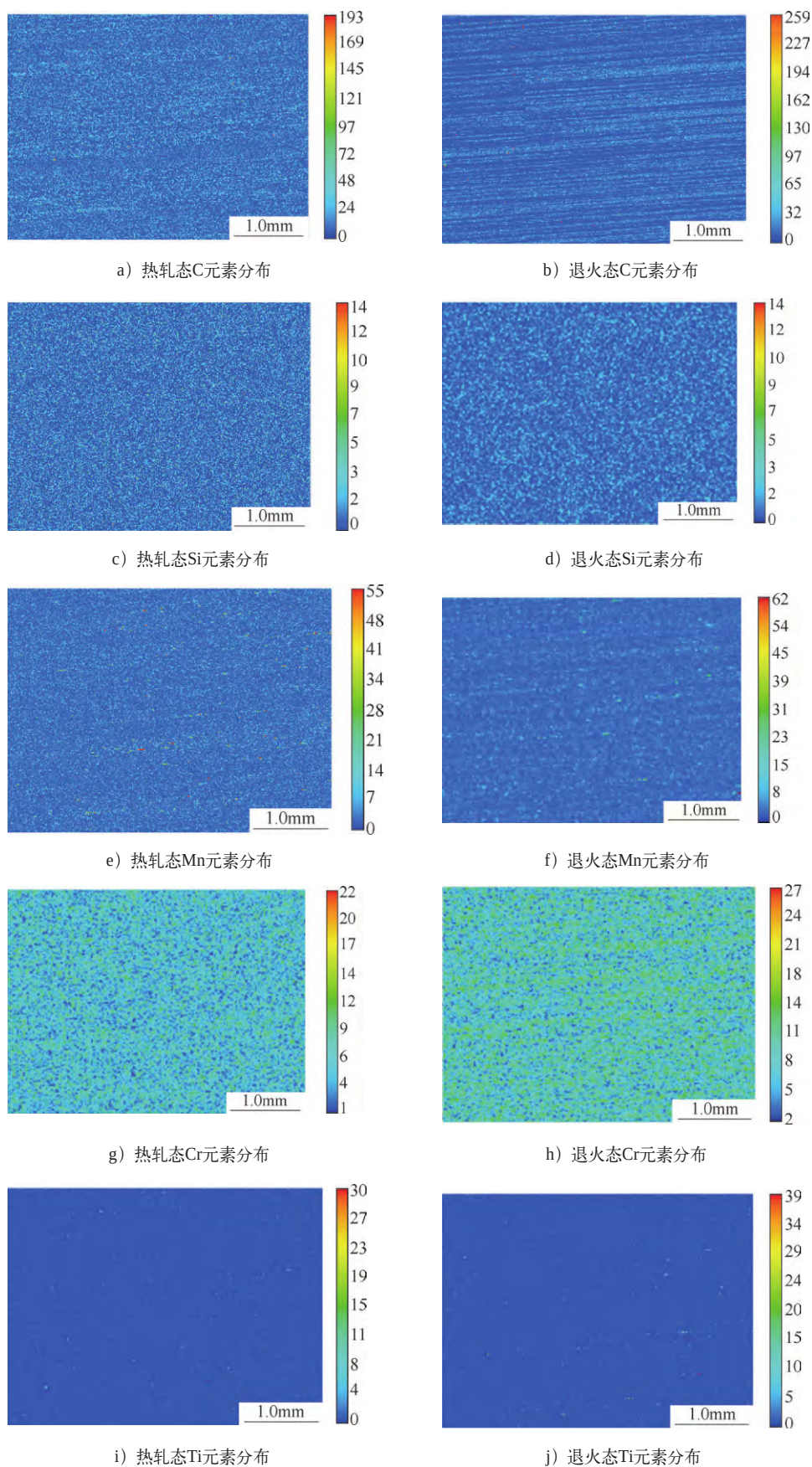


图7 热轧态和退火态20CrMnTi钢棒材元素分布

势。12[#]试样、13[#]试样的合金元素Mn的分布分别如图7e、f所示，合金元素Cr的分布分别如图7g、h所示，其中热轧态的12[#]试样对应的Mn和Cr合金元素分布均较退火态的13[#]试样均匀。而Si和Ti元素的分布差异相对较小。其主要原因是退火处理时，冷却速度较慢，C及合金元素不断富集，并扩散形成铁素体和珠光体交替堆叠，加重带状。这也进一步印证了轧后冷却速度的提高，C及合金元素从贫化区向富化区的扩散减弱，从而减轻带状。

4 结束语

1) 连铸坯20CrMnTi钢棒材在轧制过程中，粗轧处轧制温度均处于 A_{c3} 以上，组织为奥氏体，且钢材延展变形小，在随后的正常冷却中带状组织较轻，而在终轧处的钢材温度相对较低，同时钢材的延展变形相对较大，均不利于棒材带状组织的控制。

2) 钢材在轧制过程中的金属延展变形和奥氏体冷却相变是带状组织形成的直接原因，终轧温度和轧后冷却速度是控制20CrMnTi钢带状组织的关键因素，当终轧温度 $\geq 905^{\circ}\text{C}$ 时，棒材的带状组织 ≤ 2.5 级。当终轧温度 $\geq 915^{\circ}\text{C}$ ，带状组织 ≤ 2.0 级，提高终轧温度，有利于奥氏体原位发生相变，减少铁素体的塑性变形，有利于带状组织级别的降低。提高轧后的冷却速度，能够有效抑制C及合金Cr元素从贫化区向富化区的扩散，有利于带状的减轻。

3) 20CrMnTi钢棒材的带状组织，受退火热处理影响较大，对热轧棒材进行退火处理可以使原1.0级带状组织加重到4.5级，甚至更重，严重的带状组织促使C和合金Mn、Cr元素分布不均匀，加剧其偏析程度，但对Si和Ti元素的分布均匀性无明显影响。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘源, 许磊磊, 赵庆权, 等. 冷却速率和冷却温度对SA-210Cr. C钢中带状组织形成的影响[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26 (6) : 57-60.
- [3] 史建凯, 岳峰, 田儒良, 等. 连铸工艺参数对20CrMnTi齿轮钢150mm $\times$ 150mm铸坯凝固组织影响数值模拟和生产应用[J]. 特殊钢, 2022, 43

(2) : 16-20.

- [4] 廖庆亮, 程亚杰, 孙斌堂, 等. 二次带状组织对低合金非调质钢疲劳性能的影响[J]. 工程科学学报, 2015, 37 (12) : 1581-1587.
- [5] 蔡珍, 黄运华, 张跃, 等. 冷却速度对铁素体—珠光体带状组织的影响机制[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24 (6) : 25-31.
- [6] 陈尹泽, 李娜, 宋立伟, 等. 控轧控冷工艺对低碳贝氏体钢AH80DBD力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44 (1) : 97-100.
- [7] 齐明, 梁晓东, 韩大虹, 等. 冷却速率对新型C61齿轮钢力学性能和微观组织的影响[J]. 特殊钢, 2023, 44 (2) : 80-83.
- [8] 李小龙, 周敦世, 周立新, 等. 精轧控冷工艺对20CrMoH齿轮钢带状组织影响[J]. 钢铁研究, 2017, 45 (2) : 29-31.
- [9] 郑晓宁, 张志旺, 宇文杰, 等. 20CrMnTiH渗碳齿轮钢的带状组织控制[J]. 河北冶金, 2013 (1) : 56-57.
- [10] 郭书玲. 20CrMnTi钢带状组织缺陷控制工艺改进[J]. 河北冶金, 2008 (5) : 46-47, 53.
- [11] 王芳, 袁书强, 田雨江, 等. 带状组织减轻或消除工艺研究现状[J]. 热加工工艺, 2013, 42 (5) : 55-58.
- [12] 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) : 91-96.
- [13] 刘富军, 刘年富, 廖卫团, 等. 带状组织对低碳微合金钢性能的影响及控制[J]. 南方金属, 2011 (1) : 7-11.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 艾玉忠, 刘璇, 李彩云. 20CrMnTi热轧带钢带状组织的控制[J]. 轧钢, 2021, 38 (6) : 91-94.

(收稿日期: 20241226)