

## 双辊连铸 304 不锈钢 2.0 mm 薄带中铁素体的形态与分布

季晨曦<sup>1</sup> 王新华<sup>1</sup> 方园<sup>2</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 宝钢研究院前沿技术研究所,上海 201900)

**摘要** 采用化学侵蚀、彩色金相显示和电子探针(EPMA)分析研究了 304 奥氏体不锈钢(%:0.08C、1.37Mn、0.62Si、17.77Cr、9.09Ni) 2.0 mm 连铸薄带内残留铁素体的形态和分布。结果表明,在薄带表层铁素体呈棒状,其间距 $\leq 20 \mu\text{m}$ ;在薄带柱状树枝晶区,铁素体位于一次枝晶臂和二次枝晶臂中心,铁素体二次枝晶间距 $\leq 10 \mu\text{m}$ ;在中心等轴晶区,残留铁素体形貌和分布与等轴晶区半固态形成机理有关。先凝固的固相颗粒内部铁素体为弯曲树枝状和网状形貌,固相颗粒间隙铁素体呈岛状形貌。

**关键词** 双辊 2.0 mm 薄带连铸 304 奥氏体不锈钢 铁素体

## Morphology and Distribution of Ferrite in 304 Stainless Steel 2.0 mm Strip Produced by Twin-roll Concasting

Ji Chenxi<sup>1</sup>, Wang Xinhua<sup>1</sup> and Fang Yuan<sup>2</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Advanced Technology Institute, Technology Center, Baosteel, Shanghai 201900)

**Abstract** The morphology and distribution of retained ferrite in 304 austenite stainless steel (0.08C, 1.37Mn, 0.62Si, 17.77Cr, 9.09Ni) 2.0 mm cast strip have been studied by chemical etching, colour metallurgy and electroprobe microanalyser (EPMA). Results showed that the ferrite in strip surface area presented rod-like morphology and the space between rod was  $\leq 20 \mu\text{m}$ ; in columnar dendrite area, the ferrite located at center of both primary and secondary dendrite arms and the space between ferrite secondary arms was  $\leq 10 \mu\text{m}$ ; in center of strip - equiaxed zone, the morphology and distribution of ferrite was related to semisolid formation mechanism of equiaxed grains. The ferrite in initially solidified solid-phase particles presented curved dendrite and netlike morphology, while the ferrite in inter-space of initially solidified particles presented island morphology.

**Material Index** Twin-roll 2.0 mm Strip Concasting, 304 Austenite Stainless Steel, Ferrite

实际生产中由于凝固过程不可避免的非平衡特性,以及碳、硫、磷等杂质元素的影响,室温下 304 不锈钢奥氏体基体中一般有残留铁素体的存在。由于铁素体与奥氏体基体之间化学成分、力学性能及热稳定性等方面存在差异,铁素体的出现对奥氏体不锈钢的性能带来不利的影响<sup>[1]</sup>。与传统工艺相比,薄带连铸技术具有节能、环保、生产成本低的特点<sup>[2]</sup>,具有一定发展潜力。连铸薄带平均冷却速率在  $10^2 \sim 10^3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ ,属于亚快速凝固的范畴<sup>[3]</sup>,中心等轴晶区属于半固态钢液铸轧成形<sup>[4]</sup>,均对残留铁素体的形态与分布有直接影响。

### 1 试验方法

双辊薄带连铸工艺过程为:用 50 kg 感应炉将 304 不锈钢熔化,熔清后脱氧、去渣、出钢至钢包,并经垂直双辊薄带连铸机铸成薄带,空冷。薄带的冶炼成分如表 1 所示,铸机参数如表 2 所示。

将薄带试样经过抛光处理后进行化学侵蚀和彩色金相侵蚀<sup>[5]</sup>,观察凝固组织形貌;用 JXA-8100 型电

表 1 试验 304 不锈钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of test 304 stainless steel / %

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	N
0.08	1.37	0.026	0.008	0.62	9.09	17.77	0.035

注:残余元素 0.14% Cu、0.14% Mo、0.02% W。

表 2 双辊薄带连铸基本技术参数

Table 2 Basic technology parameters for twin-roll strip concasting

项目	技术参数
铸机类型	双辊等径铸机
辊径/mm	800
带宽/mm	1 100
浇铸速度/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	60 ~ 100
出辊薄带冷却方式	空气冷却
浇铸温度/ $^\circ\text{C}$	1 470 ~ 1 550
铸带厚度/mm	2.0

子探针显微分析仪(EPMA)对抛光试样表面进行成分分析,确定彩色金相中不同形貌组织的化学成分。

### 2 试验结果分析与讨论

奥氏体不锈钢凝固过程组织演变在不锈钢铸

造、焊接中起到重要的作用。但是在凝固机理的细节上还不十分清楚<sup>[6]</sup>。当前比较一致的认识是,多元的化学成分可以使用 Cr 当量( $Cr_{eq}$ )和 Ni 当量( $Ni_{eq}$ )的概念简化为 Fe-Cr-Ni 三元系统。根据 Cr 当量和 Ni 当量处理可以将奥氏体不锈钢的凝固相变过程划分为如下4类<sup>[7]</sup>:

A 模式: $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$  ( $Cr_{eq}/Ni_{eq} < 1.25$ )

AF 模式: $L \rightarrow L + \gamma \rightarrow L + \gamma + \delta \rightarrow \gamma + \delta$   
 $1.25 < (Cr_{eq}/Ni_{eq}) < 1.48$

FA 模式: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow \delta + \gamma$   
 $1.48 < (Cr_{eq}/Ni_{eq}) < 1.95$

F 模式: $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta \rightarrow \delta + \gamma$  ( $Cr_{eq}/Ni_{eq} > 1.95$ )

式中: $L$ -液相; $\delta$ - $\delta$ 铁素体; $\gamma$ - $\gamma$ 奥氏体。

这4类凝固模式的相对位置可以用伪二元相图表示。根据表1所列的304 不锈钢成分,用(1)式和(2)式计算铬镍当量比值 $Cr_{eq}/Ni_{eq}$ 为1.6左右,属

于FA凝固模式。

$$Cr_{eq} = [Cr] + [Mo] + 1.5[Si] + 0.5[Nb] \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = [Ni] + 30[C] + 0.5[Mn] \quad (2)$$

### 2.1 薄带边部的区域铁素体

薄带从表层到中心依次为胞状组织、柱状树枝晶、等轴晶。由于铸辊表面冷却的不均匀性,胞状组织宽度并不一致。胞状组织区的铁素体呈棒状形貌(图1a)。由于生长方向的不同,在同一个截面上表现出不同的形貌:图1(a)中A处为点状簇群;B和C处为平行的棒状。随着向薄带中心的靠近,棒状铁素体间距逐渐增大,由最靠近表层的10  $\mu\text{m}$ 以下(如A、C处)增加到20  $\mu\text{m}$ 左右(如B)。

图1(b)中是柱状树枝晶区的凝固组织,图中箭头指处为柱状树枝晶区的铁素体。为了清楚显示树枝晶轮廓,采用彩色金相显示方法。图1(c)是柱状

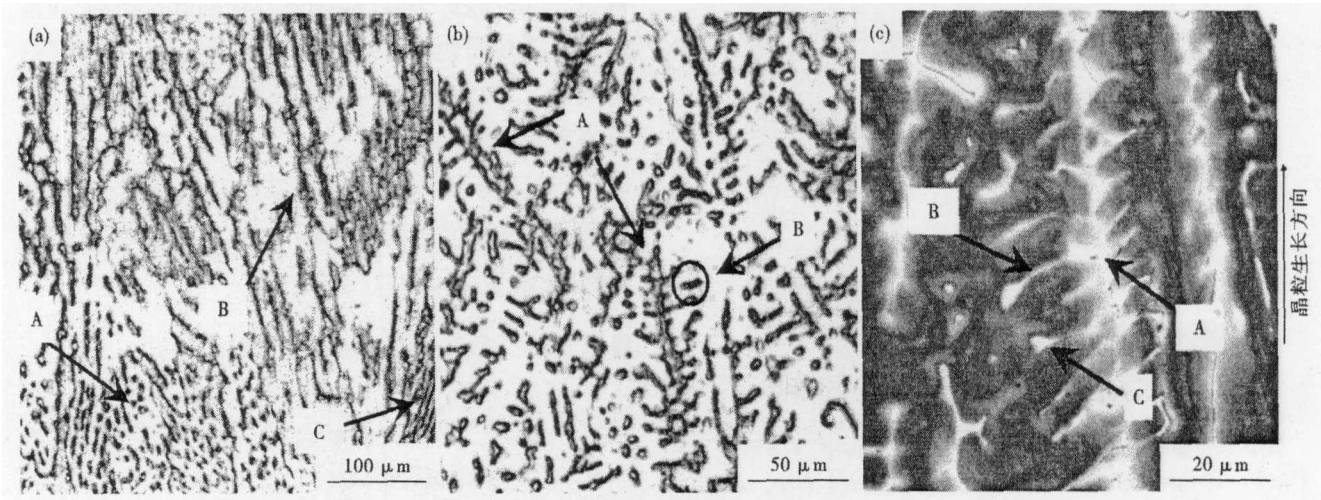


图1 (a)薄带边部胞状组织,化学侵蚀:A-点状簇群,B-,C-平行的棒状;(b)(c)薄带柱状树枝晶组织:(b)化学侵蚀,(c)彩色金相:A-一次枝晶臂,B-,C-二次枝晶臂

Fig.1 (a) Cellular structure in strip surface area, chemical etching: A- particle cluster ferrite, B-, C- parallel rod ferrite; (b) (c) Columnar dendritic structure near strip surface field, (b) chemical etching, (c) colour metallurgy: A- ferrite at center of primary dendrite arms, B-, C- ferrite at center of secondary dendrite arms

树枝晶区彩色金相组织,图中树枝状结构清晰可见,铁素体位于一次枝晶臂(A处)和二次枝晶臂(B和C处)的中心。铁素体一次枝晶间距在20  $\mu\text{m}$ 以内,二次树枝晶间距都在10  $\mu\text{m}$ 以下。无论一次枝晶臂还是二次枝晶臂中心的铁素体宽度并不均匀,图1(c)中B处铁素体二次枝晶与一次枝晶是连接的,但图1(b)B处以及图1(c)C处铁素体二次枝晶与母体的一次枝晶已经分离。这是由于 $\delta$ 铁素体树枝晶向 $\gamma$ 奥氏体转变时,包晶转变不均匀造成的。

### 2.2 薄带等轴晶区铁素体

薄带中心等轴晶区为半固态铸轧组织<sup>[4]</sup>。图

2(a)是薄带中心等轴晶区化学侵蚀组织,图中可见等轴晶区的铁素体形貌主要为岛状(A处)、网状(B处)、弯曲树枝状(C处)。图2(b)是薄带等轴晶区的彩色金相组织,图中近球形组织轮廓分明,先凝固固相颗粒尺寸在50~100  $\mu\text{m}$ ,颗粒边界的深绿色曲线(箭头B所指曲线)为包晶反应起始线<sup>[8]</sup>。与图1(c)对应比较可见,岛状铁素体主要存在于先凝固固相颗粒间隙,如图2(b)中B处所示;网状和弯曲树枝状铁素体位于固相颗粒中心,如图2(b)A处所示。

用电子探针(EPMA)对中心等轴晶区进行了成分分析。对图3所示区域进行成分面分析,结果证

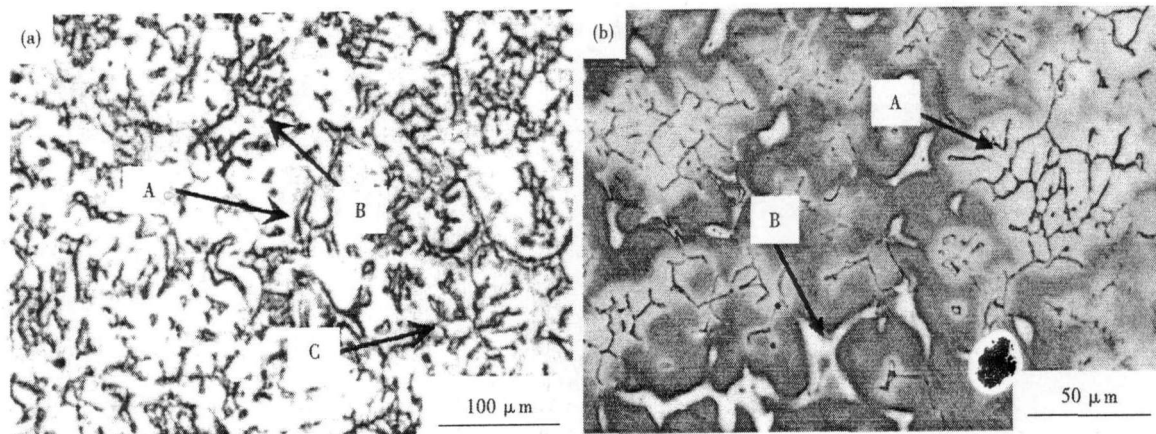


图 2 薄带中心等轴晶区铁素体形貌和分布(a)化学侵蚀:A- 岛状,B- 网状,C- 弯曲树枝状;(b)彩色金相:A- 网状和弯曲树枝状,B- 岛状

Fig. 2 Morphology and distribution of ferrite in equiaxed zone of strip center, (a) chemical etching: A- island shape, B- netlike, C- curved dendrite shape; (b) colour metallography: A- netlike and curved dendrite shape, B- island shape

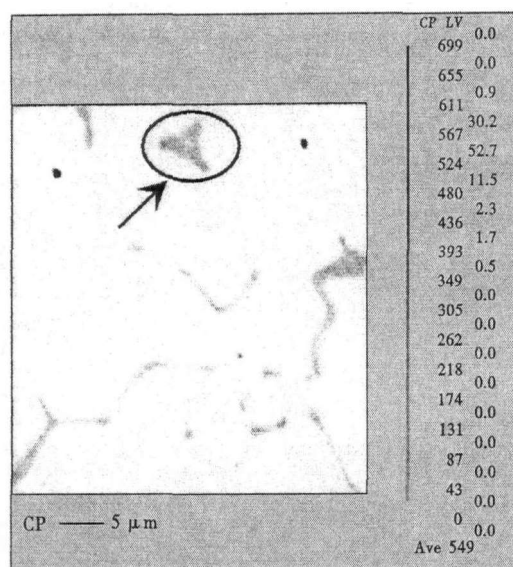


图 3 等轴晶区的背散射电子成分像,箭头-铁素体形貌

Fig. 3 Backscattering electro-photo of equiaxed zone, arrow-ferrite morphology

实,先凝固固相颗粒间隙岛状组织(图 3 箭头所示位置)的成分的确是富铬贫镍的铁素体。在双辊薄带连铸过程中,啮合点上方半固态钢液的相对流动导致固相颗粒周围温度场不断改变,从而形成固相颗粒中铁素体树枝晶的弯曲形貌,甚至形成网状结构。半固态钢液中固相颗粒发生包晶反应时,固相中的 Cr 元素向液相中扩散,而液相中的镍元素向固相中扩散,最终形成固相颗粒间隙富铬贫镍的状况。当剩余液相中的  $Cr_{eq}/Ni_{eq}$  增加到一定值时,液相直接凝固成  $\delta$  铁素体。由于薄带的冷却速度很快,镍铬元素在固相中扩散受到限制,固相颗粒间隙的铁素体不容易发生固态相变转变成  $\gamma$  奥氏体。

### 3 结论

(1) 双辊连铸 304 不锈钢薄带表面的铁素体以

棒状存在,棒状组织间距都在  $20 \mu\text{m}$  以内,随着与表层的距离增加而增大。

(2) 薄带柱状树枝晶区,铁素体位于一次枝晶臂和二次枝晶臂中心,形成树枝状的分布结构,铁素体二次枝晶间距在  $10 \mu\text{m}$  以内。由于包晶转变的不均匀,二次枝晶臂中的铁素体有时形成与一次枝晶分离的形貌。

(3) 薄带中心先凝固的固相颗粒内部,铁素体以弯曲树枝状或者网状形貌存在,在先凝固固相颗粒间隙,铁素体以岛状形貌存在。

国家自然科学基金资助项目(50434040)

### 参考文献

- 1 肖纪美. 不锈钢的金属学问题(第二版). 北京:冶金工业出版社, 2006
- 2 Nikolai Zapuskalov. Comparison of Continuous Strip Casting with Conventional Technology. ISIJ International, 2003, 43(8): 1115
- 3 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术. 北京:机械工业出版社, 1998
- 4 杨明波, 潘复生, 张丁非, 等. 1Cr18Ni9Ti 不锈钢双辊薄带凝固组织区的形成机理. 材料研究学报, 2005, 19(3): 325
- 5 Beraha E, Shpigler B. 彩色金相. 林慧国译. 北京:冶金工业出版社, 1984
- 6 Hunter A, Ferry M. Phase Formation during Solidification of AISI304 Austenitic Stainless Steel. Scripta Mater, 2002(46): 253
- 7 Li Jing-yuan, Sumio Sugiyama, Jun Yanagimoto. Microstructural Evolution and Flow Stress of Semi-solid Type 304 Stainless Steel. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 161: 396
- 8 Rajasekhar K, Harendranath C S, Raman R, et al. Microstructure Evolution during Solidification of Austenitic Stainless Steel Weld Metals: A Color Metallographic and Electron Microprobe Analysis Study. Materials Characterization, 1997, 38: 53

季晨曦(1980-),男,在读博士生,2001年东北大学毕业,双辊薄带连铸工艺研究。

收稿日期:2007-11-16