

# 高强钢连铸过程微观组织相变规律与奥氏体生长研究

谢绍贤<sup>1</sup>, 曾玟瑞<sup>2</sup>, 秦琬琳<sup>2</sup>, 梁壮<sup>1</sup>, 罗芊雨<sup>2</sup>, 张浩浩<sup>1</sup>, 龙木军<sup>1</sup>, 陈登<sup>1</sup>

1. 重庆大学材料科学与工程学院 2M 研究室, 重庆 400044; 2. 重庆市第一中学校, 重庆 400030

## Study on microstructure phase transition and austenite growth of high strength steel during continuous casting

Xie Shaoxian<sup>1</sup>, Zeng Wenrui<sup>2</sup>, Qin Wanlin<sup>2</sup>, Liang Zhuang<sup>1</sup>, Luo Qianyu<sup>2</sup>, Zhang Haohao<sup>1</sup>, Long mujun<sup>1</sup>✉, Chen Dengfu<sup>1</sup>

1. Laboratory of Materials and Metallurgy, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Chongqing No.1 Secondary School, Chongqing 400030, China.

### 1. 前言

随着社会发展, 汽车轻量化技术要求日益提高, 高性能超高强钢的制造成为了钢铁行业的重要发展方向之一。微观组织与晶粒尺寸控制对连铸坯乃至最终产品的性能与质量有重要影响, 掌握连铸过程微观组织相变和奥氏体晶粒生长规律对汽车高强钢连铸工艺优化与质量控制具有重要意义。针对连铸过程铸坯的相变行为, 不少学者开展了研究。刘江<sup>错误!未找到引用源。</sup>和黄福祥<sup>[1]</sup>等学者通过原位观察实验研究分析了 P510L 钢、AISI304 奥氏体不锈钢的冷却凝固过程相变顺序, 并讨论了连铸冷速对奥氏体晶粒尺寸的影响。龙木军等学者<sup>[3]</sup>对微合金钢凝固过程包晶相变行为进行了细致研究, 发现奥氏体最早在高温铁素体晶界处形核。目前关于奥氏体生长的研究<sup>[4][5]</sup>大多集中在热处理阶段, 通过改变实验的温度和保温时间来研究奥氏体晶粒生长行为; 对于汽车高强钢连铸过程的奥氏体晶粒生长行为研究尚缺乏。因此, 本文针对汽车用超高强 22MnB5 钢, 采用高温激光共聚焦显微镜模拟其连铸工艺过程, 原位观察研究不同连铸冷却条件下 22MnB5 铸坯的微观组织演变规律和奥氏体晶粒生长行为, 为连铸工艺优化控制与铸坯质量控制提供依据。

### 2. 实验研究方案

本文以 22MnB5 汽车用高强钢为对象, 应用高温激光共聚焦显微镜模拟连铸工艺过程, 对 22MnB5 钢连铸过程的组织相变行为开展原位观察研究, 并对连铸冷却过程中铸坯奥氏体生长规律进行了分析研究。表 1 为 22MnB 钢的钢种成分。

表 1 22MnB5 钢种成分 (wt.%)  
Table 1 Chemical composition of 22MnB5 steel (wt.%)

| C         | Si        | Mn        | P      | S      | Ti        | N           |
|-----------|-----------|-----------|--------|--------|-----------|-------------|
| 0.20~0.25 | 0.25~0.45 | 1.10~1.50 | ≤0.015 | ≤0.005 | 0.02~0.05 | 0.002~0.005 |

为了探究 22MnB5 汽车高强钢在连铸凝固冷却过程的组织演变规律, 采用高温共聚焦显微镜对其凝固过程组织演变行为进行了原位观察。分别将两个相同的试样以 500°C·min<sup>-1</sup> 的速度升高温度到 1520°C 并保温 1min, 使其完全熔化, 随后以不同冷速 (200°C·min<sup>-1</sup>, 30°C·min<sup>-1</sup>) 进行冷却凝固, 图 1 为微观组织演

变实验过程示意图。同时为了明确奥氏体生长行为，分别在 1450℃、1350℃、1250℃、1150℃、1050℃和 950℃温度下淬冷，制样，最后采用电镜对不同实验温度的试样奥氏体晶粒进行表征分析。

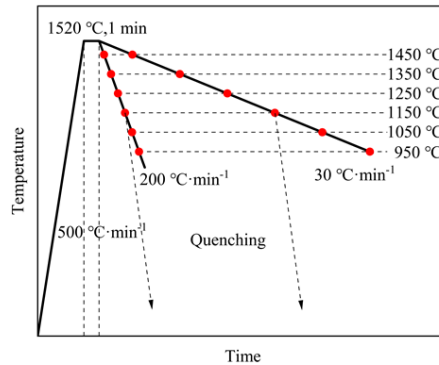


图 6 微观组织演变实验过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental procedure for microstructure evolution

### 3. 结果分析讨论

#### 3.1. 22MnB5 连铸过程铸坯组织演变行为

在两种不同的冷却速度条件下，探究了 22MnB5 高强钢连铸凝固过程组织相变和连铸固态相变的行为，分析了冷却速度对 22MnB5 连铸相变的影响。随着温度的不断下降， $\delta$  铁素体首先在钢液中析出 ( $L \rightarrow L + \delta$ )， $\delta$  铁素体不断形核长大，彼此接触呈现出树枝状结构。钢液区域明显被  $\delta$  铁素体压缩，固液相表面高度出现明显差异。温度继续下降， $\gamma$  奥氏体开始在  $\delta$  铁素体的晶界处析出，即此时开始发生包晶反应  $L + \delta \rightarrow \gamma + L + \delta$ ， $\gamma$  奥氏体相形核后不断向两侧延伸直至完全包围高温铁素体。随后， $\gamma$  奥氏体向  $\delta$  铁素体及液相延伸扩展，直至  $\delta$  铁素体完全转变为  $\gamma$  奥氏体，此时还有部分钢液未凝固。当温度继续下降，钢液完全转化为  $\gamma$  奥氏体  $L + \gamma \rightarrow \gamma$ ，凝固过程结束。凝固冷却过程的相变行为： $L \rightarrow L + \delta \rightarrow L + \delta + \gamma \rightarrow L + \gamma \rightarrow \gamma$ 。

#### 3.2. 连铸冷速对凝固相变的影响

由原位观察结果表明，连铸冷速的大小并不影响 22MnB5 钢的凝固相变序列。冷却速率对相变特征温度、晶粒尺寸以及晶界迁移速率有重要的影响。冷速高的连铸过程各特征温度都低于冷速低的连铸过程，这与龙木军<sup>[6]</sup>等人的研究结果相似。在高冷速的组织演变中，其为典型的非平衡凝固过程。冷速越低越接近于平衡凝固，各相变的特征温度越接近平衡相变温度。

冷速较高的过程中各晶界迁移的速率都明显大于冷速小的晶界迁移的速率，且在同一冷速下，在  $\gamma/\delta$  界面向  $\delta$  相的迁移的速率大于  $L/\gamma$  界面向  $L$  相的迁移速率。由于包晶转变过程  $\gamma/\delta$  与  $L/\gamma$  界面迁移行为主要由  $\gamma$  相内 C 元素扩散控制，因此  $\gamma$  奥氏体内 C 元素向铁素体的扩散速率大于其向液相扩散的速率。此外，冷速越大，得到的高温铁素体和奥氏体晶粒尺寸越小、迁移速率越快、晶界迁移距离越小、相变持续时间越小。

#### 3.3. 连铸冷速对奥氏体生长的影响

在连铸的过程中，随着温度下降，奥氏体尺寸逐渐变大。冷却速率低的奥氏体尺寸在整体上都比冷却速率高的奥氏体晶粒尺寸大。在实验范围内，冷却速率较小的过程中奥氏体晶粒尺寸随温度下降生长明显，奥氏体的平均晶粒尺寸甚至达到 1.635mm，由于奥氏体晶粒尺寸大于 1mm 就极易引发裂纹<sup>[7]</sup>，且晶粒尺寸越大，其裂纹的敏感性也越大，因此这种情况下的钢坯极易产生裂纹。

在低冷速冷却过程中，由于冷却的速率较为缓慢，奥氏体在高温阶段停留时间长，这有利于原子在晶界附近扩散，同时因为晶界能较高，奥氏体为了达到在高温下的相对稳定的状态，不断长大以降低晶界能，从而产生这种特大奥氏体。由于高温下奥氏体的生长速率快<sup>错误!未找到引用源。</sup>，在高温停留的时间相对较长，所以奥氏体明显粗化。

在高冷速过程中奥氏体晶粒尺寸随温度下降，最大的平均奥氏体尺寸为 0.492mm，这有利于减轻表面裂纹<sup>[7]</sup>。在该条件下具有较大的过冷度，使得形核率大大提高，起到细化晶粒的作用，晶粒与晶粒之间容易接触从而相互抑制生长，最终导致奥氏体晶粒细化。

在低冷速下，随着温度的下降，奥氏体晶粒尺寸的方差不断增大，说明了在连铸的过程中，奥氏体晶粒均匀性逐渐变差，奥氏体晶粒尺寸的差异逐渐变大。而在高冷速过程中其方差较小，在整体上有略微的增加，说明低冷速连铸过程的奥氏体晶粒较为均匀。

在连铸的过程中，随着温度的下降，奥氏体的整体生长速率不断降低，但其在不同冷速下的生长速率较为相近。奥氏体的长大主要是由奥氏体晶界不断地向外扩张吞并引起。在开始时，奥氏体是初始奥氏体，此时由于奥氏体晶粒尺寸较小，界面不规则程度较大，界面能很高，为了达到较为稳定的状态，奥氏体必须长大。开始时的界面能与稳定态的界面能的能量差较大，同时温度较高，驱动力较大，原子扩散能力较强，所以奥氏体快速长大。随着奥氏体的不断长大，奥氏体晶粒的界面能与该温度下稳定态的界面能的差值越来越小，这使得总驱动力也越来越小，奥氏体的长大速率逐渐减小。

## 4. 结论

(1) 22MnB5 汽车用高强度钢相变历程为： $L \rightarrow L+\delta \rightarrow L+\delta+\gamma \rightarrow L+\gamma \rightarrow \gamma$ 。连铸冷速不会改变 22MnB5 钢的凝固相变序列。

(2) 连铸冷速越高，晶界迁移速度越快，获得的晶粒尺寸越小，晶界迁移距离越小。此外， $\gamma/\delta$  晶界向  $\delta$  铁素体的迁移速率大于  $\gamma/L$  晶界向液相 L 的迁移速率。

(3) 在连铸的过程中，随着温度的下降，奥氏体晶粒的尺寸不断变大，在高冷速过程奥氏体的平均尺寸明显小于低冷速过程的奥氏体平均尺寸。奥氏体生长速率随着温度不断下降，冷却速率对其没有明显的影响。在冷却过程中奥氏体晶粒尺寸越来越不均匀，且低冷速过程的不均匀程度明显大于高冷速过程。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：U1960113）、第十六届国家级大学生创新训练项目（项目号：202210611041）和重庆市教育委员会雏鹰计划项目的支持。

## 参考文献

- [1] 刘江, 文光华, 唐萍, 等. 微合金钢初始凝固中奥氏体开始长大的温度[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(03):370-374.
- [2] 黄福祥, 王新华, 王万军. 冷却速率对奥氏体不锈钢凝固过程影响的原位观察[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(05):530-534.
- [3] Liu T, Long M, Chen D, et al. Investigations of the peritectic reaction and transformation in a hypo-peritectic steel: Using high-temperature confocal scanning laser microscopy and differential scanning calorimetry[J]. Materials Characterization, 2019, 156:109870.
- [4] 韩正鹏, 夏佃秀, 王学林, 等. 含 Nb 高强海工钢的奥氏体晶粒长大行为. 热加工工艺, 2023, (10): 123
- [5] 张鹤松, 牛涛, 陈斌, 等. X80 管线钢原奥氏体晶粒细化工艺研究. 包钢科技, 2022, 48(03): 4
- [6] Liu T, Long M, Chen D, et al. Investigation of the Peritectic Phase Transition in a Commercial Peritectic Steel Under Different Cooling Rates Using In Situ Observation. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 51(1): 338
- [7] Tsai H T, Yin H, Lowry M, et al. Analysis of transverse corner cracks on slabs and countermeasures. Iron & Steel Technology, 2006, (7): 3