

# 超级奥氏体不锈钢 904L 的凝固组织及凝固过程分析

EPMA-013

**摘要：**904L 超级奥氏体不锈钢凝固过程中，大部分液相先析出  $\delta$  铁素体，通过固态相变转变为奥氏体，剩余液相析出单项奥氏体组织。当冷却速度较快时，合金元素扩散受到抑制，由于剩余液相的合金元素较多，具有较高的化学成分偏析，形成两种形态的奥氏体组织。

**关键词：**奥氏体 不锈钢 904L 凝固过程 凝固组织 微区分析 电子探针

超级奥氏体不锈钢的金相组织为具有面心立方结构的全奥氏体组织，它是基于传统奥氏体不锈钢发展而来，主要是为了解决苛刻环境介质中奥氏体不锈钢所面临的问题。

904L 是一种低碳高钼耐蚀超级奥氏体不锈钢。它是在原不锈钢铬含量 20%、镍含量 25% 的基础上，提高钼含量到 4%~5%，并且加入了铜、锰等合金元素，使其具有强度高、硬度大、冲击韧性好、焊接性能优、

抗高温蠕变能力强等良好的综合力学性能，更重要的是其具有优秀的抗晶间腐蚀、抗点腐蚀、抗缝隙腐蚀以及高抗应力腐蚀的能力，特别是在稀硫酸介质中耐蚀性尤为突出，主要应用于化工、制碱、造纸、海水处理、炼油、焦化等工业领域。

奥氏体不锈钢的凝固组织和凝固过程主要取决于其化学成分和凝固条件。在凝固过程中，不同部位冷却速度存在较大的差异，也会对凝固组织和过程产生影响。

## 实验部分

### 1.1 仪器

岛津电子探针 EPMA-1720



### 1.2 仪器配置

X 射线检出角：52.5°

罗兰圆尺寸：统一 4 英寸

晶体类型：约翰逊型全聚焦晶体

通道数：5 通道共 10 种晶体

### 1.3 分析条件

测试参数

加速电压 (AccV)：20 kV

束流 (Beam Current)：面分析 200 nA、  
定量分析 20 nA

测试时间 (Sampling time)：面分析 120 ms/point、  
定量分析 10s/point

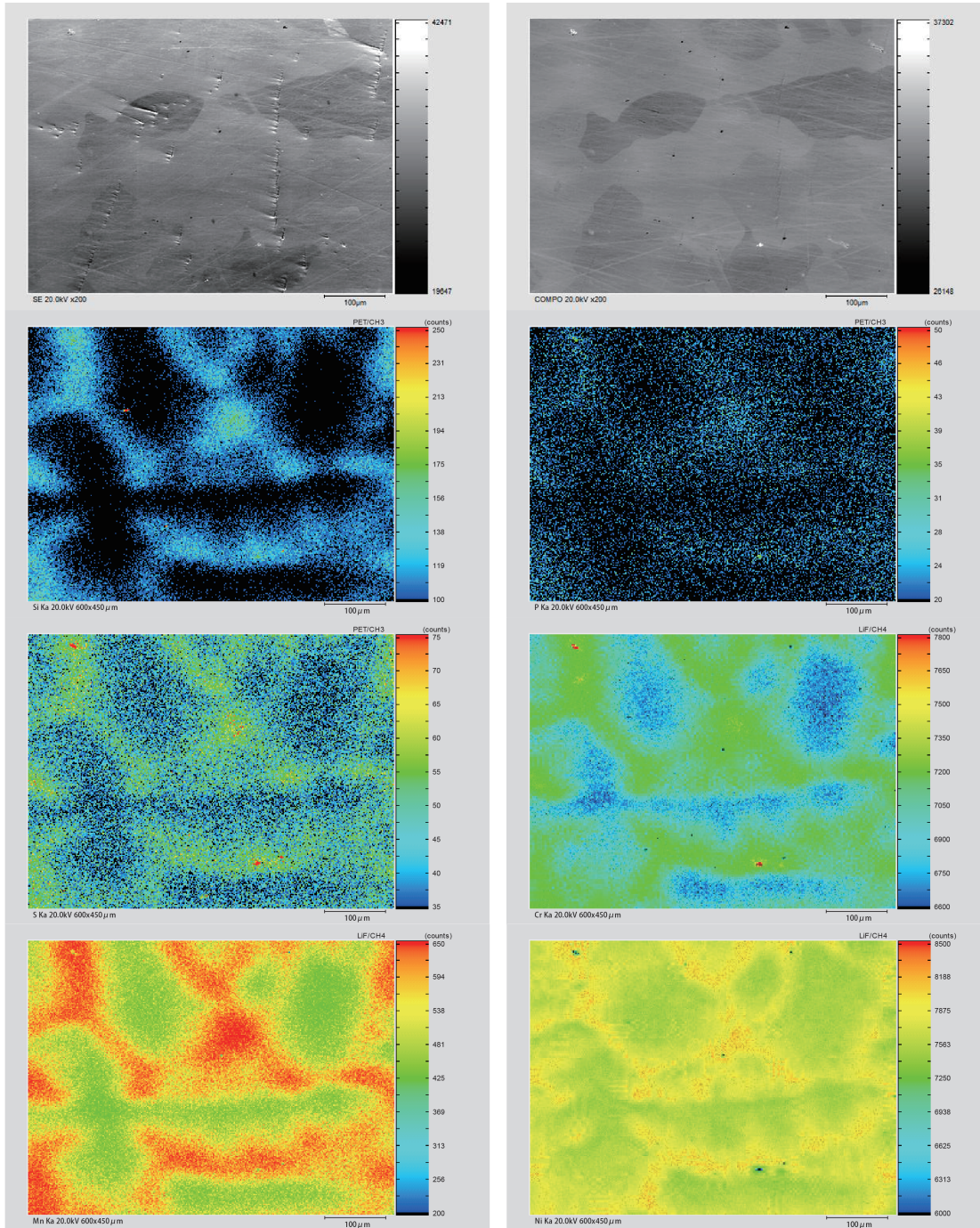
强度单位 (Unit)：Counts、Wt%

### 1.4 样品处理

镶嵌、机械磨制及抛光后测试、然后经表面腐蚀后测试对照。

### ■ 结果与讨论

对 904L 的抛光状态试样进行微区的主要元素面分布测试，见下图 1。结果显示本应为组织单一的奥氏体基体存在合金化的偏析，而且这些合金元素均呈现富集的圈状。背散射图像对应的位置衬度稍高。试样表面轻微腐蚀显示组织后的面分布数据显示了相同的特征，见图 2。



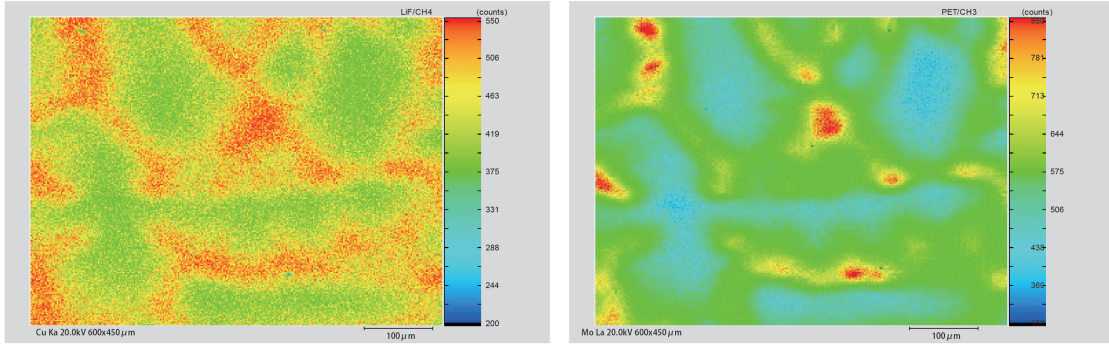
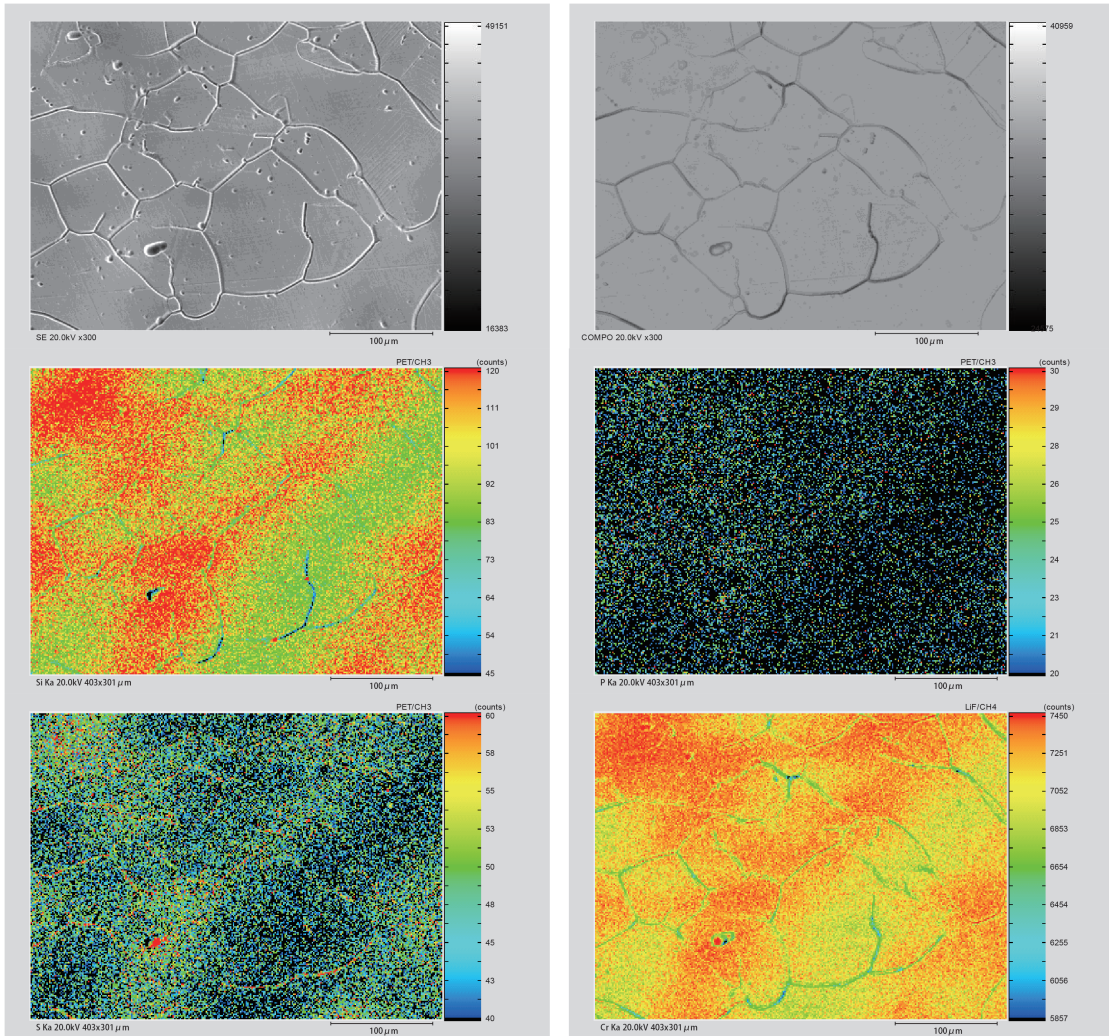


图1 抛光904L试样测试位置二次电子图像、背散射图像及元素的面分布特征



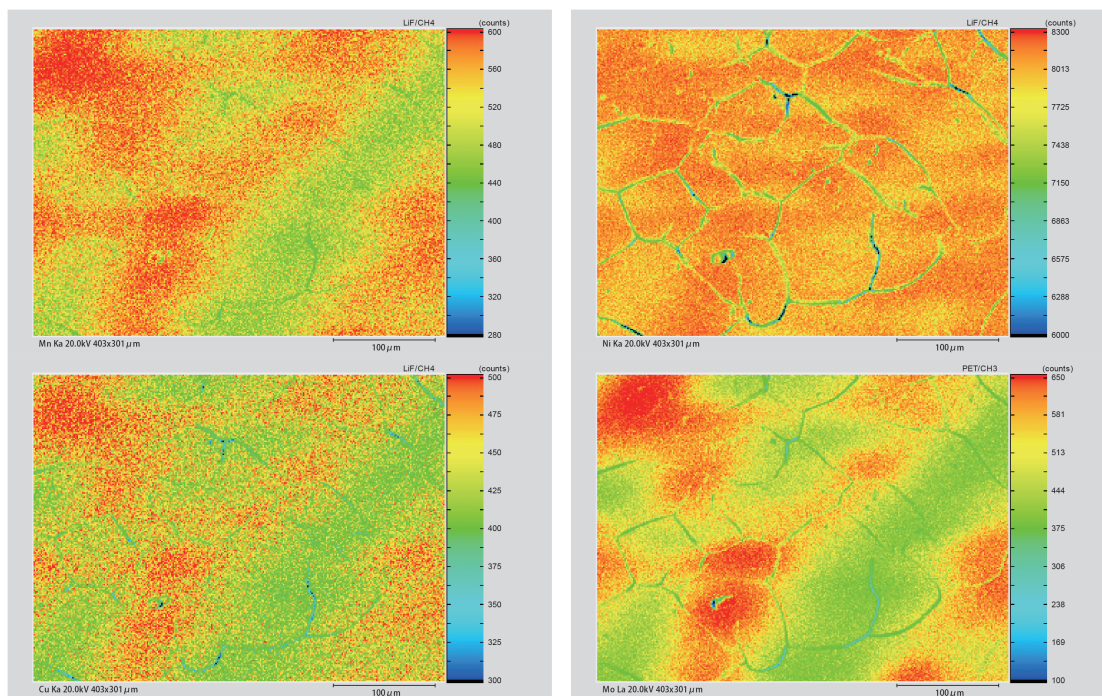


图2 腐蚀904L试样测试位置二次电子图像、背散射图像及元素的面分布特征

对抛光状态试样进行微区定量分析，测试位置示意图见图3，测试结果见表1，其中测试点1和2为基体位置，点3和4为衬度稍高位置，点5为少量弥散的白色高亮颗粒。

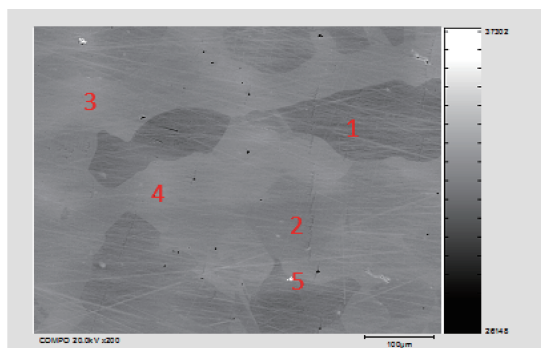


图3 定量测试位置示意图

表1 904L试样定量测试结果(Wt%)

| Data | Al Ka | S Ka  | Cr Ka  | P Ka  | Ni Ka  | Mo La  | Mn Ka | Si Ka | Cu Ka | Fe Ka  | Total   |
|------|-------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|---------|
| 1    | 0.071 | 0.032 | 19.765 | 0.022 | 23.568 | 3.182  | 1.172 | 0.396 | 1.001 | 51.075 | 101.920 |
| 2    | 0.090 | 0.040 | 20.013 | 0.018 | 23.038 | 3.948  | 1.423 | 0.510 | 1.111 | 50.643 | 100.835 |
| 3    | 0.091 | 0.042 | 20.597 | 0.023 | 24.198 | 5.502  | 1.534 | 0.588 | 1.219 | 47.911 | 101.705 |
| 4    | 0.079 | 0.057 | 20.550 | 0.037 | 24.331 | 5.445  | 1.569 | 0.557 | 1.267 | 47.157 | 101.049 |
| 5    | 0.042 | 0.201 | 25.296 | 0.096 | 15.384 | 15.784 | 1.296 | 0.808 | 0.602 | 41.111 | 100.620 |

在背散射图像中衬度相对较高的合金元素富集区域及基体组织的定量测试结果如表 1 所示。可以看出，合金元素富集区域，锰、镍等合金元素的含量较周围基体组织要高，铁含量较低，而元素铬含量没有降低，具有这种成分特征组织亦为奥氏体。尽管衬度较高的合金富集圈状组织和它旁边的灰色基体都是奥氏体，但是它们的化学成分偏析的程度有明显的差异，元素面分布测试到合金化富集的结果与此也有很好的对应关系，可以推测这两种奥氏体的形成过程有所不同。

首先， $\delta$  铁素体作为先析出相在液相中形核长大，在此过程中，消耗较多的铁素体形成元素，如铬，同时将较多的奥氏体形成元素镍、锰等排斥到剩余的液相中，增加了从液相中析出奥氏体的化学成分条件。当  $\delta$  铁素体长大到一定程度时，剩余的液相开始转变为奥氏体。在随后的固态相变过程中  $\delta$  铁素体转变为奥氏体，而从剩余液相中析出的奥氏体由于合金元素较多，形成衬度较高的单相组织。这种固液两相中成分分配不均只能在快冷条件下元素的均匀化扩散受到抑制时才会发生。

## ■ 结论

奥氏体不锈钢凝固过程中，大部分液相先析出  $\delta$  铁素体，在随后的固态相变过程中转变为奥氏体，剩余液相也会转变为奥氏体。当冷却速度较快时，合金元素扩散受到抑制，奥氏体组织将会有两种形态，一种是形成基体的奥氏体组织，由先析出相  $\delta$  铁素体转变形成，二是衬度较高一些的圈状单相奥氏体，由剩余液相转变形成，具有较高的化学成分富集。