

# 高碳当量灰铸铁中的奥氏体枝晶及其影响因素

陕西机械学院 范志康\* 甘雨 王贻青

**【摘要】** 本文介绍了高碳当量灰铸铁中奥氏体枝晶的形貌及其对裂纹扩展的阻碍作用, 以及化学成分、冷却速度、合金元素、冶金因素等对奥氏体枝晶数量的影响。

**【关键词】** 碳当量, 灰铸铁, 奥氏体枝晶

## Austenite Dendrite and Its Influencing Factors of Grey Cast Iron with High Carbon Equivalent

Fan Zhikang Gan Yu Wang Yiqing

**【Abstract】** The relationships between the amount of austenite dendrite and chemical composition, cooling rate, alloy elements and metallurgical factors of grey cast iron with high carbon equivalent were investigated, and the morphology of austenite dendrite and their effect on resisting crack propagation were also discussed.

**【Key words】** carbon equivalent, grey cast iron, austenite dendrite

奥氏体枝晶数量对灰铸铁强度的显著影响已为越来越多的研究所证实<sup>[1~3]</sup>。对碳当量小于3.8%的灰铸铁中奥氏体枝晶的形貌、结晶过程及合金元素的影响也有不少报道<sup>[3, 4]</sup>。而对碳当量4.0%附近以至过共晶成分灰铸铁中奥氏体枝晶的结晶行为及合金元素影响的报道甚少。本文选用了较高的碳当量, 观察其中奥氏体枝晶的形貌、结晶过程及合金元素的影响, 为控制高碳当量灰铸铁中奥氏体枝晶数量提供参考。

### 一、高碳当量灰铸铁中奥氏体枝晶的形貌

依奥氏体枝晶的晶体结构特征和实验观察结果, 有文献认为灰铸铁中的初生奥氏体枝晶空间形貌是框架式结构<sup>[2, 3]</sup>。笔者注意到上述研究者用于观察的试样碳当量约为3.8%左右, 有的试样取自铸件疏松处, 在这样的情况下, 共晶前就有较多的奥氏体枝晶析出, 且形成骨架是完全可能的。

对碳当量4.0~4.4%的粗A型石墨及D型石墨灰铸铁拉伸试样断口观察中, 未发现有奥氏体枝晶骨架形成, 见图1a、b。

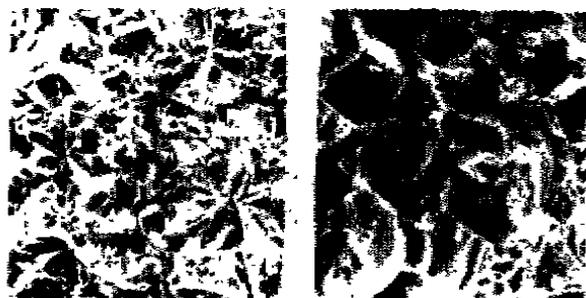


图1 粗A型石墨(a)与D型石墨(b)铸铁断口SEM照片

光学金相下, 观察到高碳当量灰铸铁组织中奥氏体枝晶主要分布在共晶团团界上, 见图2。

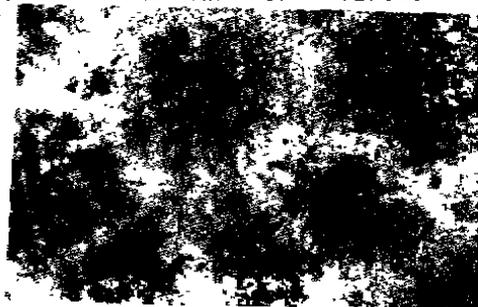


图2 奥氏体枝晶分布(CE4.26%)

2%苦味酸腐蚀 100×

这些均说明, 高碳当量灰铸铁中, 在共晶团生长到一定尺寸时奥氏体枝晶尚未形成骨架, 一些已形成的奥氏体枝晶可能被正在生长的共晶团裹入其中, 而更多的奥氏体枝晶被共晶团前沿推向其前方, 最终大部分奥氏体枝晶分布在共晶团团界上。由此认为, 高碳当量灰铸铁中, 奥氏体枝晶主要是尺寸较小的树枝状枝晶。

### 二、奥氏体枝晶在高碳当量灰铸铁断裂过程中的行为

奥氏体枝晶在高碳当量灰铸铁断裂过程中有阻碍裂纹扩展的作用。如图3, 当裂纹遇到枝晶后, 大都改变方向, 沿枝晶外缘继续扩展, 因而不乏断口垂直剖面取枝晶外缘形状(如图4)。裂纹扩展路径的增加, 必然消耗更多的能量。从断口上观察, 被拉断的奥氏

\* 工学博士, 副教授, 邮编: 710048。

体枝晶主要表现为韧断特征(如图 5)，韧性断裂必有更大的非弹性应变。



图 3 裂纹遇枝晶后改变扩展方向  
4%硝酸酒精腐蚀 200×



图 4 裂纹取枝晶形状(4%硝酸酒精腐蚀) 320×



图 5 枝晶的韧性断裂 SEM 照片 2000×

### 三、奥氏体枝晶数量的影响因素

工业灰铸铁中奥氏体枝晶数量远大于按平衡相图计算的结果。这是由于诸如炉料配比、熔化水平、冷却速度等影响的结果。

#### 1. Si / C 比的影响

按相图计算，碳当量相同时，灰铸铁组织中奥氏体枝晶数量应相同，但实际上碳当量相同而 Si / C 不同时，铸铁中奥氏体枝晶数量并不相同，如表 1。

表 1 Si / C 比与奥氏体枝晶数量

碳当量(%)	4.25		4.10	
Si / C 比	0.5	0.81	0.49	0.81
枝晶数量(%)	16.46	18.77	19.95	22.32

显然，Si / C 比愈高，组织中奥氏体枝晶数量增加。

#### 2. 合金元素的影响

在碳当量约 4.5、4.2、4.0% 三种条件下，分别加入合金元素 Ti、Cr、Mn、Mo、Ni 和 Cu 后，组织中奥氏体枝晶数量的变化如表 2。可见，Ti、Cr、Mn 均有较显著促进奥氏体枝晶数量增加的作用；随碳当量提高，Ti 增加奥氏体枝晶数量的作用显著。

表 2 合金元素对奥氏体枝晶数量的影响

合金元素含量 (%)	/	Ti	Mn	Cr	Cu	Mo	Ni
		0.14~0.24	2.0~2.12	0.39~0.43	0.96~1.07	0.45~0.55	0.27~0.31
枝晶数量(%)	CE4.5%	7.6	27.1	9.5	11.8	5.9	11.8
	CE4.2%	17.1	24.7	18.1	19.4	17.0	18.1
	CE4.0%	22.7	28.3	27.4	26.2	18.0	21.9

#### 3. 冷却速度的影响

冷却速度对碳当量 3.9~4.2% 灰铸铁中奥氏体枝晶数量的影响如图 6。可见，随冷却速度的增加，奥氏体枝晶数量增长迅速。

#### 4. 其它因素的影响

除去碳当量、Si / C 比、合金元素和冷却速度外，还可能有一些其它因素影响奥氏体枝晶的数量。如对某工厂现场取样分析表明，相近碳当量的试样中，奥氏体枝晶数量有时有较大差异。分析结果表明，主要是试样中氮含量有一定差异，见表 3。

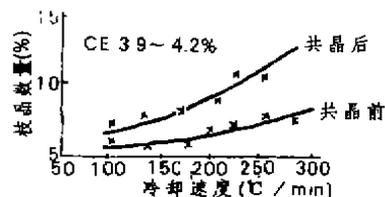


图 6 冷却速度对奥氏体枝晶数量的影响

表 3 枝晶数量与碳当量、氮含量

试样号	碳当量(%)	枝晶数量(%)	抗拉强度(MPa)	氮(%)
112	4.03	36.9	300	0.0201
113	4.03	34.0	310	0.0108
111	4.03	19.6	275	0.0086

### 四、合金元素对奥氏体枝晶形成过程的影响

观察合金元素对奥氏体枝晶结晶过程的影响是用自制的液淬设备，设计的原铁水成分如表 4，通过向小试样中加入 Cr、Mn、Ti，在合适的温度下液淬后，观察其影响。

表 4 液淬试样原铁水的化学成分%

	C	Si	Mn	S	P	CE	Si/C
A 组	3.68	2.40	0.80	0.025	0.06	4.5	0.65
B 组	3.86	1.81	0.81	0.025	0.06	4.49	0.47

在冷却速度 180℃/min 条件下, 表 4 中 A、B 两组成分在不加合金元素时, 共晶前没有奥氏体枝晶析出; 加入 Cr、Mn 的试样, 共晶前有一定数量的奥氏体枝晶析出。图 7 是 A 组成分, 含 Mn 1.9%, 共晶开始后不久 1010℃ 液淬的组织。可以看到, 组织中析出了不少奥氏体枝晶。而加 Ti 的试样中, 共晶前均未见有奥氏体枝晶析出, 图 8a、b 所示此时最终组织中有 6% 左右的奥氏体枝晶。

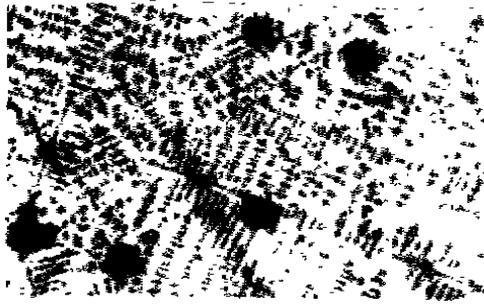
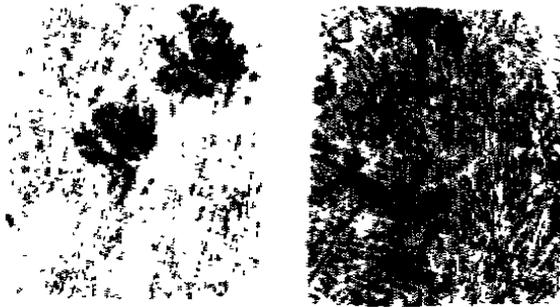


图 7 1.9% Mn, 共晶开始后不久 1010℃ 液淬组织  
4% 硝酸酒精腐蚀 100×



(a) Si/C 比 0.65, 1010℃ 液淬 (b) Si/C 比 0.47, 1030℃ 液淬  
图 8 Ti 0.21% 液淬组织 (4% 硝酸酒精腐蚀) 160×

Cr、Mn 促进奥氏体枝晶的形成, 是由于这些元素减小碳在铁水中的活度, 从而限制共晶领先相—石墨的析出。当继续冷却通过伪共晶区时, 共晶石墨不能析出, 当继续冷却至伪共晶区以下时, 发生奥氏体的析出, 奥氏体的独立析出, 其结晶学特征决定了它呈枝晶状。奥氏体枝晶的析出, 结晶潜热的释放, 使冷却速度减慢, 温度回升重新进入伪共晶区, 发生共晶反应。当然加入 Cr、Mn 时, 共晶点也会发生左移, 相对减小了碳的饱和度, 促进奥氏体枝晶的析出。

加 Ti 过共晶铁水中, 奥氏体枝晶在共晶开始后形《热加工工艺》6/1991

成, 和加钛铁水中存在 TiC 等质点有关。TiC 的晶格常数与奥氏体(111)面上的晶格常数很接近<sup>[5]</sup>, 且能在微区内形成贫碳层, 为奥氏体枝晶的成核提供方便, 促进奥氏体枝晶的形成。事实上, 在奥氏体枝晶内能观察到大量的钛化物质点, 当然也不排除有些质点是在奥氏体枝晶生长过程中将其裹入其中的可能。

加钛铁水的另一个值得注意的现象是许多钛化物是在硫化锰表面生成的, 如图 9 所示质点心部的灰色部分是硫化锰。电子探针分析表明, 其中 Mn 62.21%、S 34.18%。硫化锰外部生成的桔黄色部分是钛化物, 其中钛 72~75% 不等。硫化锰可做为石墨成核的基底, 钛化物在硫化锰表面的生成, 减少了石墨的成核基底, 也能促进奥氏体枝晶数量的增加。

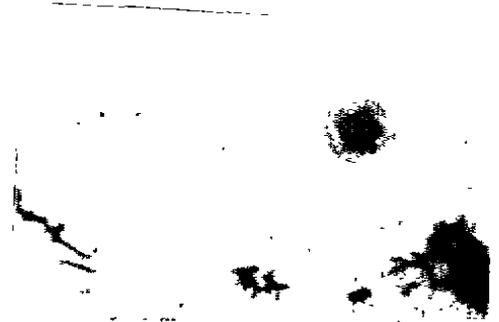


图 9 在硫化锰表面生成的钛化物(未腐蚀) 800×

## 五、结论

1. 高碳当量灰铸铁中奥氏体枝晶是尺寸较小的树枝晶, 较多的分布在共晶团团界上,
2. 奥氏体枝晶在铸铁断裂过程中, 有阻止裂纹扩展的作用。
3. Si/C 比, 冷却速度, 合金元素以至冶金因素均可能影响铸铁中的奥氏体枝晶数量; 合金元素在高碳当量时增加奥氏体枝晶的作用比低碳当量时明显; Ti 更多地在共晶期间增加枝晶数量。

## 参考文献

- [1] W. Patterson. Cast Iron Structure and Properties. 《Modern Casting》, 1951, 41: 176-186
- [2] 矶谷三男. 磷硅对金属型铸造灰铸铁强度的影响. 《铸物》, 1973, (6): 39
- [3] 王贻青, 吕一力. 灰铸铁中初生奥氏体对机械性能的影响. 《铸造技术》, 1985, (5): 43
- [4] 袁森. 灰铸铁中初生奥氏体枝晶形貌的研究. 陕西机械学院研究生论文, 1986
- [5] G. Volkert, E.D. Frank 主编. 《铁合金冶金学》. 上海: 上海科学技术出版社, 1980