

## 高强度二冷对高碳钢小方坯凝固组织和中心碳偏析的影响

冯 军 陈伟庆

(北京科技大学冶金生态与工程学院, 北京 100083)

**摘 要** 试验了 250A/5Hz 电磁搅拌连铸 150 mm × 150 mm 方坯时二冷比水量对 0.64% ~ 0.82% C 钢铸坯冷却速度、凝固组织和中心碳偏析的影响。结果表明, 当二冷比水量由 0.83 L/kg 增加至 1.55 L/kg 时, 距铸坯边缘 46 mm 处的一次枝晶臂间距由 380 μm 降至 300 μm, 平均中心碳偏析指数由 1.15 降至 1.10, 同时等轴晶比例由 45% 降至 40%, 二次强冷工艺适合于小方坯连铸。

**关键词** 高碳钢 小方坯 二次冷却 枝晶间距

## Effect of High Secondary Cooling Intensity on Solidification Structure and Center Carbon Segregation of High Carbon Steel Billet

Feng Jun and Chen Weiqing

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The effect of water ratio in secondary cooling zone on billet cooling speed, solidification structure and center carbon segregation index of 0.64% ~ 0.82% C steel 150 mm × 150 mm billet casting with 250A/5Hz electromagnetic stirring has been tested. The results showed that with water ratio in secondary cooling zone increased to 1.55 L/kg from 0.83 L/kg, the primary dendritic arm spacing at the location with distance from billet edge 46 mm decreased to 300 μm from 380 μm, the average center carbon segregation index decreased to 1.10 from 1.15 and at the same time the ratio of equiaxial crystal decreased to 40% from 45%. The high secondary cooling intensity is only fit for billets casting.

**Material Index** High Carbon Steel, Billet, Secondary Cooling, Dendritic Arm Spacing

高碳钢小方坯连铸的二次冷却制度对于钢的凝固组织及铸坯内部质量有着重要的影响, 二冷强度的选择有两种不同的观点: (1) 采用弱冷, 获得大的等轴晶区, 减少中心碳偏析; (2) 在结晶器电磁搅拌下, 采用强冷降低中心碳偏析并获得精细的枝晶凝固组织<sup>[1]</sup>。本文研究了在结晶器电磁搅拌的条件下, 二冷强度对高碳钢小方坯的显微凝固组织、中心碳偏析、缩孔以及裂纹的影响。

### 1 生产设备及实验条件

高碳钢的生产工艺为: 电弧炉(转炉) → LF → 150 mm × 150 mm 小方坯连铸机。连铸机采用外置式 250A/5Hz 结晶器电磁搅拌, 结晶器长度 850 mm。主要生产钢种有 60、65、70 钢和 82B 钢。

显微凝固组织的检验是在 150 mm × 150 mm 的小方坯横断面上距铸坯边缘分别为 16, 29, 46, 64 mm 的位置截取试样, 将试样打磨、抛光成镜面, 再用饱和苦味酸溶液腐蚀后显形<sup>[2]</sup>。在 20 倍显微镜下, 观察小方坯取样位置的显微组织并照相, 测量一次枝晶臂间距  $\lambda_1$  和二次枝晶臂间距

$\lambda_2$  各 40 个的平均值<sup>[2]</sup>。

用  $\Phi 5$  mm 钻头在铸坯中心钻取钢屑, 分析碳含量, 并求得中心碳偏析指数。

### 2 二冷强度对高碳钢小方坯显微凝固组织的影响

#### 2.1 一次枝晶臂间距和二次枝晶臂间距

从图 1 可以看出, 在结晶器电磁搅拌条件下,

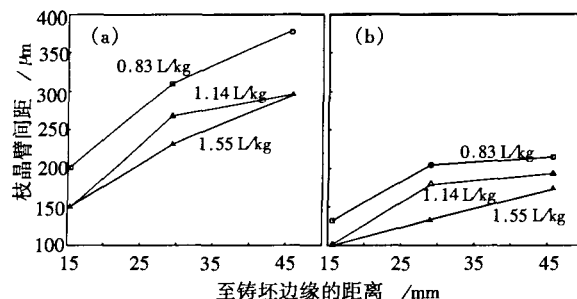


图 1 二冷比水量对一次枝晶臂间距(a)和二次枝晶臂间距(b)的影响

Fig. 1 Effect of water ratio in secondary cooling zone on primary dendritic arm spacing (a) and secondary dendritic arm spacing (b)

随着二冷比水量的增加,一次和二次枝晶臂间距减小。

图2显示结晶器电磁搅拌条件下,二冷比水量为1.55 L/kg时,高碳钢连铸小方坯的显微凝固组织,由图可见,采用较大的二冷强度,铸坯接近凝固中心的位置为排列致密的细小等轴晶与细小树枝晶的组合结构。

## 2.2 铸坯的冷却速率

连铸坯在凝固过程中,铸坯内部不同位置的冷却速率在实际生产中难以测定。但对于不同断面的铸坯,只要测量出二次枝晶臂间距 $\lambda_2$ <sup>[3]</sup>就可以利用经验公式计算出 $\epsilon$ -冷却速率/(K·s<sup>-1</sup>)<sup>[4]</sup>。

$$\lambda_2 = a\epsilon^{-n}$$

式中: $a = 109.2$ ;  $n = 0.44$ 。

在采用M-EMS和不同连铸参数条件下,利用

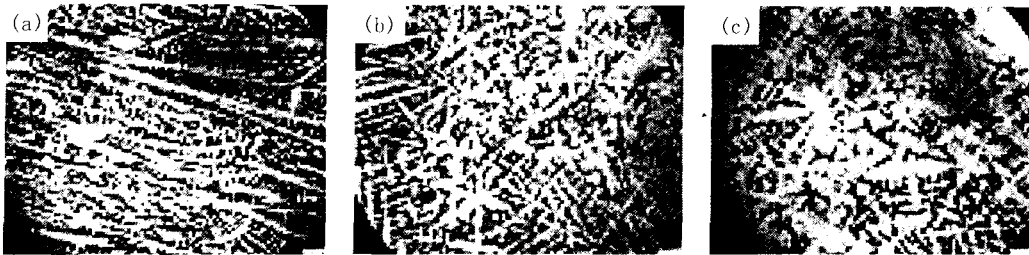


图2 二冷比水量1.55 L/kg时小方坯凝固组织,×20:距铸坯边缘16 mm (a);29 mm (b);46 mm (c)

Fig.2 Solidification structure of billet casting with water ratio in secondary cooling zone 1.55 L/kg, ×20: distance from billet edge 16 mm (a), 29 mm (b) and 46 mm (c)

上式计算了铸坯不同位置的冷却速率,计算结果见表1。由表1可见,距离坯壳越近,冷却速率越大,距离坯壳越远,冷却速率越小,并且随着二冷强度增加,冷却速率增大。试验还得出在接近小方坯的中心位置,不同二冷比水量的冷却速率逐渐趋于一致,但是强冷仍然略高于弱冷的冷却速率。在较大的冷却速率下,二次枝晶的粗化受到

抑制,不存在明显的粗化现象<sup>[5]</sup>。

不论碳含量的高低,二次枝晶臂间距都随着冷却速率的增大而减小。由凝固理论可知,枝晶臂间距取决于凝固界面上的散热条件,散热能力越强,枝晶臂间距越小,凝固时固液界面处的散热能力又取决于凝固期间的冷却速率,冷却速率越大,散热能力越强<sup>[6]</sup>。因此,大的冷却速率会导致

表1 不同二冷比水量所对应的工艺参数和冷却速率

Table 1 Process parameters and cooling speed of billet corresponding to various water ratio in secondary cooling zone

样号	钢中碳含量/ %	比水量/ (L·kg <sup>-1</sup> )	拉速/ (m·min <sup>-1</sup> )	过热度/ ℃	距坯壳不同位置冷却速率/(K·s <sup>-1</sup> )			中心碳 偏析指数
					16 mm	29 mm	46 mm	
12	0.64	1.55	2.4	54	1.25	0.62	0.34	1.08
28	0.64	1.14	2.4	54	1.34	0.39	0.26	1.13
48	0.64	0.83	2.4	54	0.65	0.23	0.20	1.20

形成小的枝晶臂间距。

通过分析计算得出,不论有无M-EMS时,从150 mm×150 mm铸坯边缘向内延伸,冷却速率的差别逐渐减小。不同二冷比水量条件下(0.82~1.85 L/kg),在距离铸坯边缘16,29,46 mm处,冷却速率的差值分别为1.23,0.46,0.15 K/s;而在距离铸坯边缘64 mm处,不同二冷强度下的冷却速率差值仅为0.05 K/s。计算结果表明,尽管由于连铸参数的不同(二冷比水量0.82~1.85 L/kg;过热度18~70℃;拉速1.57~2.8 m/min)导致了铸

坯冷却速率的差别,但在小方坯中心区域的冷却速率已趋近一致。

由上述结果可以推断,当铸坯断面大于150 mm×150 mm后,无论二冷强度大小,铸坯中心位置的冷却速率差别将进一步减小;即提高二冷强度对大断面铸坯中心区域的凝固组织影响不大,而铸坯中心碳偏析与凝固组织有关,所以二冷强冷细化铸坯凝固组织改善中心碳偏析的作用,只适合于小方坯而不适合大方坯;而且方坯断面越小,二冷强冷的作用越显著。

### 3 二冷强度对铸坯内部质量的影响

#### 3.1 中心碳偏析指数

为了分析二冷强度对小方坯内部质量的影响,统计了较大范围(0.82 ~ 2.86 L/kg)内高碳钢小方坯二冷比水量与中心碳偏析的关系,由图 3 (a)可见,高碳钢小方坯的中心碳偏析随二冷比水量的增加而降低。

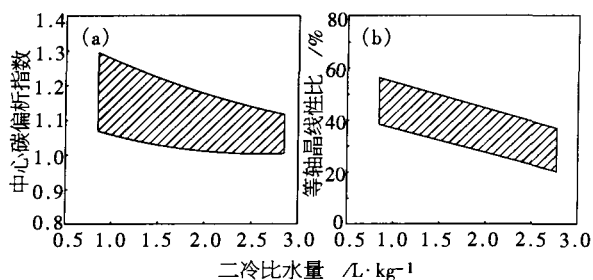


图 3 二冷比水量对中心碳偏析指数(a)和二冷比水量对等轴晶比例(b)的影响

Fig.3 Effect of water ratio in secondary cooling zone on center carbon segregation index (a) and ratio of equiaxial crystal (b)

高冷却强度下快速凝固时对小方坯成分偏析的影响表现在以下两个方面<sup>[7]</sup>: (1) 快速凝固阶段枝晶的生长速率高,析出细密枝晶形成密集的枝晶骨架阻止了因晶体沉淀引起的比重偏析,并且使后续参与缓慢凝固的溶体减少,从而抑制了宏观偏析的产生;(2) 过冷熔体在快速凝固时,结晶潜热迅速释放,引起快速凝固后固液界面出现非平衡溶质分配或溶质捕获现象,所以使钢成分不均匀程度减少。

采用结晶器电磁搅拌,增加二冷强度和降低过热度,是使高碳钢小方坯偏析保持较低水平的有利条件。

#### 3.2 等轴晶区比例

由图 3(b)可知,提高二冷强度会减少铸坯等轴晶比例,过热度的增高使这一趋势更为明显。

根据柱状晶和等轴晶转换模型(CET)<sup>[8]</sup>,当等轴晶粒的体积分数  $\Phi < 0.0066$ ,  $G_n/V > C_{st} = a \left( 8.6 \Delta T_0 \frac{N_0^{1/3}}{n+1} \right)^n$  时,形成柱状晶组织。式中:  
 $G_n$ - 温度梯度;  $V$ - 晶粒生长速率;  $a$ - 合金材料常数;  $\Delta T_0$ - 固、液相线温度差;  $N_0$ - 成核密度;  $n$ - 与合金材料有关的常数。

二冷强度大,温度梯度变大,在其它条件不变时,将使  $G_n/V$  的比值更容易超过形成柱状晶区的临界值,所以强冷扩大了柱状晶区比例。

#### 3.3 其他缺陷

当碳含量为 0.81%,过热度为 22 °C 和拉速为 2 m/min 的条件下,二冷比水量分别为 0.9, 1.62, 1.71 L/kg 时,由 150 mm × 150 mm 的高碳钢小方坯低倍组织观察可得,随着二冷比水量的增大,铸坯的缩孔和裂纹的缺陷恶化。为了解决高碳钢连铸小方坯在大二冷比水量时出现的上述内部质量问题,可采用凝固末端电磁搅拌的措施。

### 4 结论

(1) 对于小断面铸坯,二冷强度增大,铸坯凝固速度加快,易于生成枝晶间距小的凝固组织。

(2) 增加二冷比水量,高碳钢小方坯中心碳偏析降低,等轴晶比例减少,但过大的二冷强度还会加重小方坯的中心缩孔和裂纹。

(3) 距离坯壳越近,冷却速率越大。随着二冷强度的增加,冷却速率加快,虽然在接近小方坯的中心位置,冷却速率明显下降,但是强冷仍然略高于弱冷的冷却速率。

(4) 二冷强冷细化铸坯凝固组织改善中心碳偏析的作用,只适合于小方坯而不适合大方坯。

#### 参考文献

- 1 里摩吉斯 J, 贝特尔曼 L. 二次冷却和结晶器电磁搅拌对高碳钢碳偏析及其凝固结构的影响. 白静译. 天津冶金, 2002 (4): 40
- 2 Cabrera J M, Carreno-Galindo V, Morales R D, et al. Macro-Micro Modeling of the Dendritic Microstructure of Steel Billets Processed by Continuous Casting. ISIJ International, 1998, 38(8): 812
- 3 史宸兴. 连铸钢坯质量. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 26
- 4 Sung P K, Yalamanchili P, Poirier D R, et al. Segregation of Carbon and Manganese in Continuously Cast High Carbon Steel for Wire Rod. Ironmaking and Steelmaking, 1990(6): 424
- 5 顾林喻. 高温合金定向凝固枝晶间距与冷却速率的关系. 西安工业学院学报, 1999, 19(2): 147
- 6 杨卯生, 赵爱民, 毛卫民, 等. 钢的半固态电磁搅拌力场与组织转变. 钢铁研究学报, 2003, 15(4): 18
- 7 Li Jinfu, Lu Yili, Yang Gengcang, et al. Directional Solidification of Undercooled Melt. Progress in Natural Science, 1997, 7(6): 736
- 8 Kurz W, Bezencon C, Gaumann M. Columnar to Equiaxed Transition in Solidification Processing. Science and Technology of Advanced Materials 2. 2001: 185

冯 军(1969-), 男, 博士生, 从事连铸工艺研究。