

## 亚包晶钢 Q235D 连铸大方坯的质量控制

何庆文<sup>1,2</sup> 李 阳<sup>1</sup> 王福明<sup>1</sup> 张家泉<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 莱芜钢铁股份有限公司特殊钢厂,莱芜 271104)

**摘 要** 莱钢特钢厂 50 t UHP-EAF(热装铁水比 $\geq 50\%$ ) + LF(VD)冶炼的 Q235D 钢(0.10% ~ 0.17% C) 260 mm  $\times$  300 mm 的连铸坯轧制成直径  $\Phi 150$  mm 圆钢后,钢材表面出现裂纹。分析表明,钢的包晶点的碳当量 $[C_j]$ 与钢中实际碳含量 $[C]$ 之间的差别  $\Delta C$  越大,亚包晶钢 Q235D 钢材废品率越高。实践表明,控制 0.15% ~ 0.17%  $[C]$  使  $\Delta C < 0.015\%$ , 钢液过热度 20 ~ 30  $^{\circ}\text{C}$ , 结合降低结晶器冷却水流量和二冷区冷却强度,低拉速,使成品材表面质量合格率在 99.3% 以上。

**关键词** 亚包晶钢 Q235D 包晶点碳含量 大方坯表面质量

## Quality Control for Casting Bloom of Hypo-Peritectic Steel Q235D

He Qingwen<sup>1,2</sup>, Li Yang<sup>1</sup>, Wang Fuming<sup>1</sup> and Zhang Jiaquan<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Special Steel Works, Laiwu Iron & Steel Co Ltd, Laiwu 271105)

**Abstract** The cracks at surface of 150 mm round bar occur after rolled from 260 mm  $\times$  300 mm continuous casting bloom of steel Q235D (0.10% ~ 0.17% C) melted by 50 t UHP EAF (hot metal charging ratio more than 50%) + LF (VD) process at Special Steel Works, Laiwu Steel. Analysis indicated that the larger the  $\Delta C$ -difference between carbon equivalent  $[C_j]$  at peritectic point of steel and real carbon content in steel  $[C]$ , the higher the crack rejection rate of hypo-peritectic steel Q235D products. Practice show that with controlling 0.15% ~ 0.17%  $[C]$  for  $\Delta C < 0.015\%$ , overheating extent of liquid steel 20 ~ 30  $^{\circ}\text{C}$ , combined with decreasing mold cooling water rate, decreasing cooling water intensity in secondary zone and with low casting speed, the qualified rate for surface quality of finished products is more than 99.3%.

**Material Index** Hypo-Peritectic Steel Q235D, Carbon Content at Peritectic Point, Surface Quality of Bloom

莱钢特钢厂 Q235D 钢生产流程为:50 t UHP-EAF(热装铁水比 $\geq 50\%$ ) + 50 t LF + 60 t VD 真空脱气 + 3 机 3 流大方坯全弧形合金钢连铸机 + 铸坯入坑缓冷、部分连铸坯直接热送轧制成材。连铸机(表 1)弧形半径为 R11 m/16 m/32 m,3 点矫直,铸坯断面为 260 mm  $\times$  300 mm,采用全封闭无氧化保护浇铸,结晶器液面自动控制,专用 Q235D 钢结晶器保护渣保护浇铸,二冷气雾冷却动态配水,结晶

器 + 末端(M + F-EMS)复合式电磁搅拌,连铸坯重接部分切除、头尾坯优化等技术。

### 1 Q235D 钢的连铸坯表面缺陷产生原因

Q235D 钢生产过程中连铸坯出现表面凹陷等缺陷,如图 1(a);导致连铸坯轧制成材后出现钢材表面裂纹,如图 1(b)。

#### 1.1 凝固过程中发生包晶相变

Q235D 钢铸坯表面缺陷(如凹陷、裂纹)与初生坯壳的收缩变形密切相关。而钢中碳含量对坯壳的变形有重要影响。碳含量范围在 0.10% ~ 0.51% 时,都会发生包晶相变,而生产中 Q235D 碳含量一般在 0.10% ~ 0.17%,正好处于亚包晶相变范围内,将发生  $L \rightarrow L + \delta \rightarrow \delta + \gamma \rightarrow \gamma + \alpha$  反应<sup>[1]</sup>。实际钢种均为多元合金,其它合金元素对钢水凝固包晶相变点也会存在不同程度的影响。因此,采用碳当量  $C_j$  来判定其实际包晶反应成分点。

#### 1.2 凝固收缩对铸坯表面质量的影响

Q235D 亚包晶钢的凝固收缩中会发生包晶反应,在固态收缩中会发生  $\delta \rightarrow \gamma$  转变。若不考虑其它元素的作用,亚包晶钢碳含量范围为 0.10% ~

表 1 大方坯连铸机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of caster for bloom

名称	参数
铸机机型	全弧型
机数 $\times$ 流数	3 $\times$ 3
弧型半径 R/m	11/16/32
铸坯断面/(mm $\times$ mm)	180 $\times$ 220, 260 $\times$ 300, $\Phi 280$
结晶器型式	管式
结晶器铜管长度/m	0.80
结晶器振动方式	液压振动
结晶器液面控制	CS137 自动控制
二冷区总长度/m	9.94
回路个数/个	6
二冷区各回路冷却类型	
足辊段	全水
二冷一区、二区、三区、四区、五区	气雾

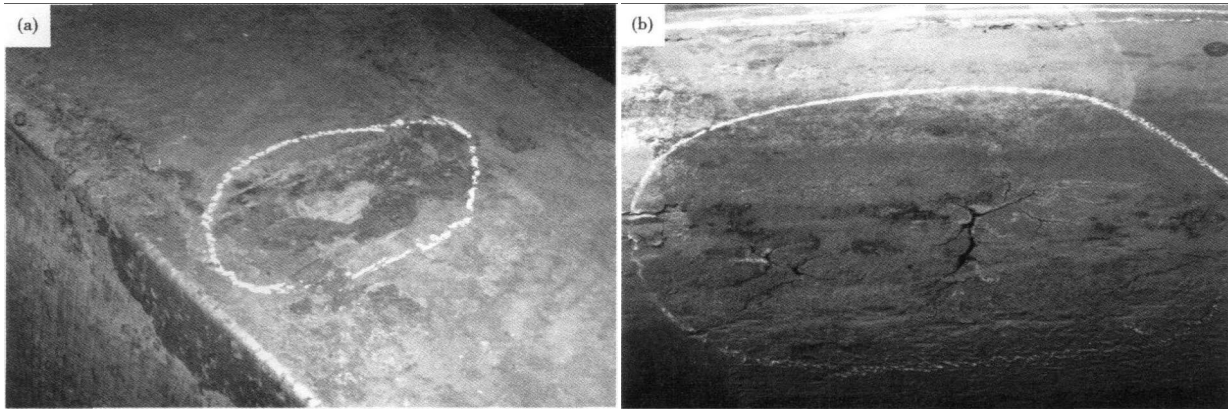


图1 Q235D 钢连铸坯表面凹陷(a)和钢材表面裂纹形貌(b)

Fig. 1 Morphology of casting bloom surface concave (a) and rolled products surface crack (b), steel Q235D

0.17% ;实际凝固过程中,在理论固相线温度  $T_s$  以下发生并完成包晶反应,坯壳线收缩发生突变性增加。结果造成结晶器初生坯壳脱开铜壁形成气隙,使传热减慢,坯壳较薄,成为铸坯产生表面缺陷(凹陷、裂纹)的敏感区。

## 2 质量控制措施

### 2.1 化学成分控制

Q235D 亚包晶钢化学成分的控制要求为(%)

0.10 ~ 0.17C、0.15 ~ 0.30Si、0.70 ~ 0.80Mn。

#### 2.1.1 C 含量的控制

通过对 Q235D 亚包晶钢的化学成分进行分析可知,莱钢特钢厂生产 Q235D 亚包晶钢的碳含量一般控制在 0.10% ~ 0.16%,平均值为 0.14%。一般碳钢的包晶点  $C_j$  含量为 0.163% ~ 0.191%。发生  $\delta \rightarrow \gamma$  相变时,对于过包晶钢,当实际碳含量远离包晶点  $C_j$  含量时,根据杠杆定律可知, $\delta$  和  $L$  的质量分数之比  $W_\delta/W_L$  随  $\Delta C$  ( $\Delta C = |C_j - C|$ ) 的增大而减小,因此会发生的相变收缩比例就越小,越不容易产生凹陷与裂纹等缺陷;对于亚包晶钢,当实际碳含量  $C$  远离包晶点  $C_j$  含量时, $\delta$  和  $L$  的质量分数之比  $W_\delta/W_L$  随  $\Delta C$  的减小而减小,因此会发生的相变收缩比例就越小,凹陷与裂纹倾向也相应减小。对于过包晶钢(如 35 钢和 45 钢)的实际碳含量如果远离包晶点  $C_j$  含量,那么连铸坯不易产生热裂纹和凹陷。而对于亚包晶钢 Q235D 则恰好相反,当其实际碳含量远离包晶点  $C_j$  含量,随着  $\Delta C$  的增大,铸坯越易产生裂纹和凹陷;而当 Q235D 的实际碳含量靠近包晶点  $C_j$  含量时,则  $\Delta C$  变小,连铸坯也将不易产生裂纹和凹陷。

#### 2.1.2 Si、Mn 含量的控制

当前,Q235D 亚包晶钢的硅含量一般控制在 0.16% ~ 0.29%,平均值为 0.20%;锰含量一般控制在 0.71% ~ 0.79%,平均值为 0.74%。

考虑 Si 对包晶反应的影响,包晶点的碳当量用  $C_j$  来表示。实验表明,锰含量等于 0 时,碳钢  $C_j$  值可参考以下计算公式<sup>[2]</sup>:

$$C_{j(Mn=0)} = 0.16 + 0.13[Si] - 0.045[Si]^2 \quad (1)$$

利用式(1)计算出的一系列 Si 含量下的包晶点 C 含量。可见,锰含量等于 0 时,碳钢  $C_j$  随  $[Si]$  增大而增大。

同样基于实验结果,对于硅含量为 0.17% ~ 0.37%,锰含量为 0.35% ~ 0.80% 的碳钢而言,碳钢  $C_j$  值的计算公式有<sup>[2]</sup>:

$$C_j = 0.16 + 0.13[Si] - 0.0242[Mn] - 0.0197[Si][Mn] - 0.045[Si]^2 \quad (2)$$

其中,式中参与计算的  $[Mn]$ 、 $[Si]$  均不带“%”。

由前述可知,包晶点的碳当量  $C_j$ ,随锰含量的增加而减少,随硅含量的增加而增加。当  $\Delta C$  大于 0.020% 时,钢材的合格率较低。而  $\Delta C$  小于 0.015% 时,钢材的合格率就相对较高。尽管钢材合格率与轧制工序也有很大关系,但大量统计结果表明,包晶点的碳当量  $C_j$  与钢中实际碳含量之间的差别,即  $\Delta C$  越大,钢材合格率就越低。因此,实际生产中可以通过窄成分控制来减少包晶点的碳当量  $C_j$  对连铸坯质量的影响,比如,可以将锰含量控制在上限,硅含量控制在下限,保证钢材质量。

## 2.2 连铸工艺控制

### 2.2.1 冷却水量及拉速

亚包晶钢浇铸时,因凝固初期包晶相变收缩较

大,容易产生表面纵裂和凹陷。控制钢水在结晶器内的凝固,通过控制结晶器冷却水量和结晶器热流,实现弱冷却。减弱二冷区冷却强度,综合控制铸坯表面的热应力与裂纹倾向。

Q235D 亚包晶钢若沿用较高拉速,则容易降低保护渣消耗及其下渣的均匀性,坯壳传热的均匀性变差。因此,很容易产生表面裂纹和凹陷。拉速控制是连铸生产 Q235D 亚包晶钢的重要参数,尤其在中间包钢液过热度大于 35 ℃ 时,必须降低拉速保证连铸坯表面质量。钢水过热度为 20 ~ 30 ℃ 时,对应的拉速为 0.60 ~ 0.55 m/min。

### 2.2.2 保护渣

保护渣的碱度高,则其熔化温度和析晶温度较高,且具有低的粘度,能满足弱冷却的要求。保护渣的析晶温度高,固态结晶渣膜晶粒细小,晶粒界面增多,减缓和均匀弯月面区域的热流密度。随着结晶相在渣膜中析出和长大,形成微小孔隙和龟裂,使渣膜热阻增大,减少结晶器传热速率而使纵裂和凹陷发生率减少。熔化温度高可使坯壳与结晶器间形成比较厚的固态渣层,构成较大热阻;渣的粘度低,流入的熔渣多,形成的渣膜厚,有利于增加热阻。但粘度存在一个适宜范围,粘度太小易造成流入坯壳与铜板之间渣膜不均匀,结晶器导热不均匀而导致局部区域坯壳厚度不均匀,影响铸坯质量<sup>[3]</sup>。结晶器保护渣主要参数为:碱度(CaO/SiO<sub>2</sub>) 1.0 ~ 1.05;熔点 1 130 ~ 1 170 ℃;粘度 0.55 ~ 0.75 Pa·s。

### 2.2.3 温度

结晶器内钢液温度波动造成 δ 相向 γ 相的不稳定转变,使 δ/γ 界面发生波动,这种波动造成两相间生长的不匹配,使初始凝固坯壳生长不均匀,可能产生较大的应力集中,增大了表面裂纹等缺陷产生的几率。这一现象在碳含量为 0.10% ~ 0.17% 的亚包晶钢中更为严重。钢液温度波动造成 γ 相枝晶间的重熔,降低坯壳的抗拉强度和延展性,从而容易产生枝晶间裂纹或内部裂纹,碳含量低的亚包晶钢尤为突出。在一定冷却条件下,只有钢液温度波动幅度达到一个临界值才会对包晶凝固过程造成显著影响。因此,把结晶器内钢液温度波动幅度控制在适当的范围内就可以消除或降低温度波动的影响<sup>[4]</sup>。因此要求每包钢液温度波动范围小;通过钢包软吹氩搅拌来均匀温度及消除钢包温度分层现象;加强中间包保温,保证一定的液面高度与稳定性。

Q235D 亚包晶钢的液相线温度为 1 518 ℃,中

间包过热度按 15 ~ 30 ℃ 控制。低的过热度可以缩小柱状晶区,扩大等轴晶区,减轻中心偏析,提高铸坯的质量。但是,过热度过低会导致钢液内夹杂物上浮困难,生产中一般控制钢液过热度 20 ~ 30 ℃ 为宜。同时,通过调整拉速和配水,保证铸坯进拉矫机温度 ≥ 950 ℃。

### 2.3 实施效果

通过在实际生产中对 Si、Mn 等影响包晶点 [C<sub>J</sub>] 的元素进行窄成分控制,保证钢中实际碳含量接近 C<sub>J</sub>,碳含量一般控制在 0.15% ~ 0.17%;控制钢液过热度 20 ~ 30 ℃、降低结晶器冷却水流量、减弱二冷区冷却强度、低拉速控制、采用较高粘度结晶器保护渣;保证了连铸坯质量,消除了连铸坯成材后的表面裂纹缺陷,连铸坯成材后钢材检验合格率稳定在 99.3% 以上。

## 3 结论

(1) 莱钢特钢厂生产的 Q235D 连铸坯主要缺陷为表面凹陷。连铸坯的表面凹陷是导致钢材表面裂纹的主要原因,影响连铸坯成材合格率。

(2) 包晶相变造成的较大体积收缩导致结晶器内初生坯壳不均匀,是造成 Q235D 亚包晶钢连铸坯产生表面凹陷的主要原因。对于亚包晶钢,控制其实际碳含量靠近当量包晶点 C<sub>J</sub>,铸坯热裂纹和凹陷倾向可明显降低。

(3) 包晶点的当量碳含量 C<sub>J</sub> 随锰含量的增加而减少,随硅含量的增加而增加。当 ΔC (ΔC = |C<sub>J</sub> - C|) 大于 0.020% 时, Q235D 钢材合格率比较低;而 ΔC 小于 0.015% 时,钢材合格率就相对较高。ΔC 越大,钢材合格率就越低。通过 Q235D 亚包晶钢钢液中 C、Si、Mn 含量窄成分控制,降低中间包温度、拉坯速度和结晶器冷却强度,采用结晶器专用保护渣等措施可有效保证连铸坯质量和钢材质量。

### 参考文献

- 1 蔡开科. 连铸结晶器. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- 2 苏留记, 王泽民, 黄 华. 连铸圆管坯热裂纹与包晶点的关系. 钢管, 1998, 27(1): 12
- 3 李殿明, 邵明天, 杨宪礼, 等. 连铸结晶器保护渣应用技术. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- 4 马宁博, 雷作胜, 金小礼, 等. 温度波动对包晶钢连铸初始凝固过程的影响. 金属学报, 2008, 44(8): 1019

何庆文(1968-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 电弧炉炼钢、连铸工艺技术研究及产品质量控制。

收稿日期: 2010-03-01