

## Q355 系列及低合金高强度钢板坯凝固特征及其对 中板探伤缺陷的影响与工艺改进

颜慧成<sup>1</sup> 范佳<sup>1</sup> 张凯<sup>2</sup> 冯俊鹏<sup>1</sup> 巩彦坤<sup>1</sup>

(河北钢铁集团邯钢公司 1 技术中心;2 第三炼钢厂,邯郸 056015)

**摘要** 通过对 Q355 系钢中板探伤缺陷进行取样分析,结合板坯连铸凝固传热计算,揭示了板坯凝固末端呈现双锥形液芯的凝固特性,双液芯区域由于 C、Mn 与 H 富集,成为中板两侧探伤缺陷的根源。通过工艺改进并严格控制,RH 真空脱气时间 $\geq 20$  min,连铸全程保护,结晶器钢液 H 含量 $\leq 2 \times 10^{-6}$ ;连铸过热度 $\leq 30$  °C,板坯中心碳偏析优于 1.0 级;结合执行板坯、中板缓冷处理,中板探伤正品率达到 99.6%。

**关键词** Q355 系钢 末端凝固 探伤缺陷 中板

## Feature of Slab Solidification and Its Effect on Ultrasonic Inspection Defect of Medium Plate of Q355 Series and HSLA Steel and Process Improvement

Yan Huicheng<sup>1</sup>, Fan Jia<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>2</sup>, Feng Junpeng<sup>1</sup> and Gong Yankun<sup>1</sup>

(1 Technological Center, 2 The 3rd Steel Plant, Hansteel Company HBIS Group, Handan, 056015)

**Abstract** With sampling analysis on defects of Q355 series steel medium plate defect by ultrasonic inspection and heat-transferring simulation for slab solidification process, it is disclosed that the biconical liquid core appearing at slab solidifying front and C/Mn/H gathering in this zone are the cause of the medium plate two side ultrasonic inspection defect. Through process improvement and strict control, the RH vacuum degassing time  $\geq 20$  min, the whole process of continuous casting protecting, and hydrogen content of steel in mold  $\leq 2 \times 10^{-6}$  and superheat of continuous casting less than 30 °C, the center carbon segregation of slab is better than 1.0 rating, combining slow cooling of slab and medium plate, the qualification rate of medium plate inspection is 99.6%.

**Material Index** Q355 Series Steel, Solidification Liquid Core, Defect Detection, Medium Plate

Q355 系列-低合金高强度钢中板超声探伤缺陷在生产中偶呈批量出现,主要在距离板坯边部 200 ~ 500 mm 区域内(对应板坯三角区附近)发生,与板坯末端凝固机制存在很大关联性,孙猛等<sup>[1]</sup>通过板坯凝固模拟,发现因二冷不合适导致了凝固横断面“眼镜形”双热节现象。通过结合板坯连铸凝固传热计算、铸坯低倍与探伤缺陷分析,澄清了缺陷产生的原因,制定相应措施,使中板探伤合格率得到显著提高。

### 1 中板探伤缺陷的基本表征

中板的工艺流程为:110 t 顶底复吹转炉 LF/RH-板坯连铸(260 mm × 900 mm ~ 1900 mm)-加热轧制,中板探伤缺陷容易在厚度 $\geq 40$  mm 规格中,出现时批量缺陷。浇次 Q550D 钢,RH 精炼纯脱气时间要求 35 ~ 40 min,极少量炉次纯脱气时间不够 10 min,浇铸温度 1 545 ~ 1 555 °C,生产 260 mm × 1 700 mm 断面板坯,板坯中心偏析 C1 级,轧制 20 mm 厚度规格钢板,经超声波探伤后发现,部分钢

板整个面上存在探伤缺陷现象,以距离边部 200 ~ 500 mm 占多,宏观上表现为不连续点状缺陷和连续性条状缺陷。切取样品进行探伤缺陷分析,伤波在钢板厚度方向 1/2 位置处,探伤发现伤波连续性较强,缺陷比较明显,取金相样打磨后腐蚀观察组织,在钢板厚度方向 1/2 位置偏析带上发现内部裂纹,裂纹贯穿整个偏析带,如图 1 所示。

这些沿轧制方向呈现点状或者连续性的探伤缺陷除上述典型案例外,有的缺陷在高倍下表现为明显的带状组织,有的存在贝氏体,在珠光体或者贝氏体组织中往往有细小裂纹,有时伴随 MnS 析出,这些缺陷多出现于厚度 $\geq 40$  mm 规格的中板,在 RH 真空处理后 H 含量 $\leq 2 \times 10^{-6}$ 的炉次很少出现探伤缺陷,显然这些特征除与板坯凝固组织有联系外,与钢液中 H 含量存在较大的关系。

### 2 板坯凝固基本特征

#### 2.1 铸机特征

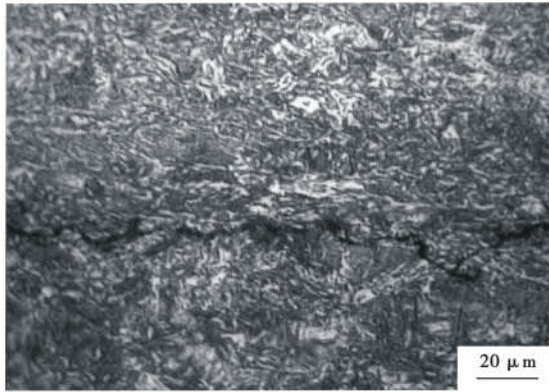


图 1 Q550D 钢 20 mm 板 1/2 厚度处偏析带上裂纹形貌  
Fig.1 Morphology of crack in segregation belt of 1/2 thickness of 20 mm plate of Q550D steel

本单流板坯连铸机为直弧形,规格为 260 mm × (900 ~ 1900) mm;工作拉速 0.7 ~ 1.4 m/min,采用结晶器液面自动控制、结晶器漏钢预报、二冷辊式搅拌、动态轻压下等技术。

### 2.2 板坯凝固传热计算

#### (1) 传热基本方程

采用薄片移动法来模拟板坯二维凝固传热过程,为了合理建模,并且能提高模型的计算速度,需要简化模型并对模型做出如下假设<sup>[1-2]</sup>:

- ①忽略结晶器锥度和铸坯凝固引起的尺寸变化;
- ②中间包测得的浇注温度作为初始温度值;
- ③考虑横向传热,忽略拉坯方向的传热,忽略铸坯与夹棍的传热;
- ④铸坯传热为厚度和宽度方向上的二维传热;
- ⑤用等效增强导热系数的方法处理钢液的对流传热影响。

以板坯横截面作为研究对象,简化后的二维传热控制方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

$$C_p^* = C_p + L \left( \frac{df_s}{dT} \right) \quad (2)$$

式中: $\lambda$ -铸坯导热系数, W/(m·°C); $\rho$ -钢液密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_p^*$ -等效比热容, J/(kg·°C);  $C_p$ -钢液比热容, J/(kg·°C);  $L$ -凝固潜热, J/kg;  $f_s$ -固相率。

#### (2) 边界条件与初始条件

假设铸坯拉坯方向传热为 0,通过计算结晶器热流密度、二冷区换热系数、空冷区换热系数,对结晶器和二冷区分别按照第 2 类和第 3 类边界条件处理<sup>[3]</sup>。

#### (3) 连铸参数与物性参数

以 Q345R 钢种为模拟计算,对板坯(260 mm × 1 700 mm)进行凝固传热计算,钢种成分见表 1,结晶器冷却参数见表 2。

整个二冷段由弯曲段、15 个扇形段组成,第 7 段、第 8 段为矫直段。二冷水总共由 15 个回路组成,二冷比水量 0.6 L/kg。

### 2.3 模拟计算结果分析

对板坯凝固过程进行计算,截取 1 段入口、3 段出口、4 段出口、9 段出口共四个位置的横截面温度场,各位置的宽面厚度、窄面厚度、宽表面中心表面温度、窄表面中心表面温度、三角区中心温度、铸坯中心温度见表 3。结果表明,板坯四周凝固速度并不一致,宽面冷却速度比窄面快,这是由于结晶器宽面冷却强度大,窄面冷却强度小,足辊后二冷段窄面不再喷水冷却,致使板坯中央部位冷却相对更强。致使板坯中部较三角区先凝固,板坯两侧三角区域液芯最后消失,从而造成了板坯凝固双锥形末端现象。双锥形末端液芯聚集夹杂与偏析,包括 H 的富

表 1 Q345R 钢的化学成分/%

C	Si	Mn	P	S	Als
0.15 ~ 0.18	0.20 ~ 0.26	1.43 ~ 1.48	≤0.016	≤0.003	0.02 ~ 0.04

表 2 板坯结晶器冷却参数

Table 2 Cooling parameters for slab mould

结晶器有效高度/m	结晶器上口宽度/m	结晶器上口厚度/m	锥度/%	宽面冷却水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	窄边水量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	进出水温差/°C	拉速/(m·min <sup>-1</sup> )
0.8	1.7	0.252	1.4	170	180	36	0.9

表 3 板坯凝固过程典型位置的温度与坯壳厚度

Table 3 Temperature and shell thickness at typical strand position in solidifying process of slab

铸机	距弯月面距离/m	宽面坯壳厚度/mm	窄面坯壳厚度/mm	宽表面中心表面温度/°C	窄表面中心表面温度/°C	三角区中心温度/°C	铸坯中心温度/°C
1 段入口	4.53	45	42.5	952.28	1220.04	1544.07	1544.18
3 段出口	10.05	70	65	946.6	1133.8	1526.5	1525.9
4 段出口	12.03	77.5	70	933	1105	1524.7	1524.5
9 段出口	22.33	125	102.5	880	1026	1498	1474

集,成为板坯缺陷的敏感区域。

### 3 探伤缺陷原因分析与改进措施

#### 3.1 探伤缺陷原因分析

探伤缺陷主要发生在钢板两侧离边部 200~500 mm,位于厚度 1/2 处,对应板坯三角区附近区域,为了追溯板坯内部质量的影响,取铸坯窄边一端进行低倍检查,低倍照片如图 2,三角区没有裂纹缺陷,中心碳偏析轻,搅拌白亮带清晰,显示辊式搅拌作用明显,白亮带显示铸坯窄边坯壳厚度比较宽面坯壳厚,从边部往中心区域,液芯逐渐变窄,液芯变窄趋势与凝固模拟结果较为一致,三角区区域液芯最后消失,从而为富集夹杂物、Mn/S 等易偏析元素、气体 H 创造了条件。由于该批次板坯窄边区域低倍显示无明显缩孔与偏析,而板材探伤缺陷为偏析带上裂纹所致,裂纹形貌与 H 致裂纹一致<sup>[4]</sup>,认为是凝固末端钢液富集的 H 在轧制后没有充分扩散导致了裂纹。

关于中板因 H 引起裂纹导致探伤缺陷的研究文献很多,机制也比较清晰,即液芯存在的夹杂物/碳偏析形成的 H 陷阱、富集的 H 含量。当钢中 H 原子扩散至夹杂物或带状组织等 H 陷阱处被捕获,聚集结合成 H 分子<sup>[5-6]</sup>,随着缺陷处 H 浓度的不断增加,H 压增加到超过材料的抗拉强度,从而形成 H 致裂纹。研究表明<sup>[7]</sup>,H 致裂纹形成温度区间为 250~100 °C,H 扩散系数最大区间为 650~300 °C,即使生产中进行了真空脱气,因连铸增 H,铸坯热送,缺少足够的 H 扩散时间,轧后钢板未进行堆冷,轧后钢板温度快速下降至 300 °C 以下,钢板中的 H 未得到充分扩散,导致了 H 致裂纹的产生。

#### 3.2 工艺改进措施

中板探伤缺陷一般呈偶发、批量出现,主要因工艺不稳定引起,在澄清形成原因主要为 H 含量、三角区偏析控制不当引起后,生产中主要在以下三个方面进行严格管理,从而杜绝了批量探伤缺陷的发生,中板探伤正品率达到 99.6%。

(1)减少钢水中 H 含量:采用 RH 真空处理精炼工艺,为保工序节奏,以前 RH 处理时间有时不够,RH 处理后 H 含量有时达到 $(3\sim 4)\times 10^{-6}$ ;改善后确保真空脱气时间 $\geq 20$  min,连铸全程保护浇注,杜绝钢水吸 H,将结晶器钢液 H 含量降低至 $2\times 10^{-6}$ 以下。

(2)降低中心碳偏析:降低过热度 $\leq 30$  °C,优化辊式搅拌器、轻压下等工艺参数,板坯中心 C 偏析优于 1.0 级。

(3)扩散析 H:建立铸坯、板材缓冷制度,规定板坯堆冷后的入炉温度与板材的缓冷时间,使钢中 H 能充分析出,有效避免 H 致裂纹。

### 4 结论

(1)由于板坯窄面只在足辊段有喷嘴冷却,宽面冷却行程比较长,模拟结果与低倍白亮带痕迹均显示铸坯凝固末端轮廓呈现双锥形液芯的凝固特性,三角区域为最后凝固位置。

(2)板坯两侧三角区附近区域为成分偏析、气体富集等缺陷集中的区域,成为中板探伤缺陷的发源地。

(3)通过控制 RH 真空脱气时间 20 min,结晶器钢液 H 含量 $\leq 2\times 10^{-6}$ ;连铸过热度 $\leq 30$  °C,板坯中心 C 偏析优于 1.0 级;执行板坯、中板缓冷处理,中板探伤正品率达到 99.6%。

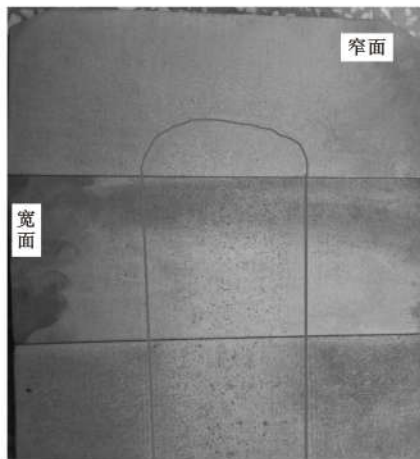


图 2 典型板坯三角区低倍

Fig. 2 Typical macroetch image at triangle area of slab

#### 参考文献

- [1] 孙 猛,王叶婷,沈厚发.板坯二冷区喷嘴布置的数值模拟分析及优化[J].钢铁研究学报,2011,23(4):52-55.
- [2] 王 璐,孙彦辉,牛阿朋,等.X80 板坯传热凝固数值模拟[J].钢铁钒钛,2018,39(6):143-149.
- [3] 高文江,赵克文,沈厚发.连铸大方坯凝固传热过程的数值模拟[J].热加工工艺,2006,35(17):66-69.
- [4] 杨景山.缓冷工艺对坯/板性能影响分析[J].科技信息,2011(25):513-.
- [5] 史术华,罗 登,陈奇明,等.L485M 管线钢超声波探伤不合格原因分析及改进措施[J].金属材料与冶金工程,2019,47(5):16-20.
- [6] 王 涛.X80 管线钢氢助解理断裂规律研究[D].西安:西安石油大学硕士论文,2010.
- [7] 王百木.42CrMo 钢锻件的白点研究[J].热加工工艺,2010,39(9):178-180.

颜慧成(1966-),男,博士(1997 年钢铁研究总院),教授级高级工程师,1989 年中南工业大学(本科)毕业,炼钢、连铸工艺研究。E-mail:huicheng\_yan@163.com

收稿日期:2021-04-06