

石油套管用钢 37Mn5 Φ 210 mm 连铸圆坯凝固过程的 数学模拟和工艺优化

朱新华^{1,2} 朱立光² 孙向东² 孟娜²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083;2 河北联合大学冶金与能源学院,唐山 063009)

摘要 在分析 37Mn5 钢($\% : 0.34 \sim 0.39\text{C}, 0.20 \sim 0.35\text{Si}, 1.25 \sim 1.50\text{Mn}$)凝固特性的基础上通过用 ANSYS 软件建立连铸圆坯凝固热-力耦合数学模型,对 Φ 210 mm 连铸圆坯凝固过程进行模拟,分析了 40 t 中间包,拉速 1.4 m/min,浇铸温度 1531 $^{\circ}\text{C}$ 时,二冷水比水量 0.58 ~ 0.78 L/kg 和各段配置对铸坯表面温度、坯壳厚度、液芯长度和表面应力的影响。模拟结果表明,比水量每增加 0.1 L/kg,铸坯表面约下降 18 $^{\circ}\text{C}$,试验比水量变化对出口坯壳厚度、液芯长度和表面应力影响不显著,但原工艺配水量 0.68 L/kg 下二冷 0 段和 1 段之间空冷部位出现高达 185 $^{\circ}\text{C}$ 急速回温,最大应力达 6.41×10^7 Pa,通过保持配水量 0.68 L/kg 不变,调整各段配水量使 0 ~ 1 段间回温降至 123 $^{\circ}\text{C}$,最高应力降至 4.53×10^7 Pa,铸坯裂纹基本消失,表面质量显著改善。

关键词 石油套管用钢 37Mn5 Φ 210 mm 坯连铸 二冷制度 数学模拟 表面质量

Mathematic Simulation on Solidification Process of Φ 210 mm Cast Round Bloom of Steel 37Mn5 for Petroleum Sleeve Tube and Process Optimization

Zhu Xinhua^{1,2}, Zhu Liguang², Sun Xiangdong² and Meng Na²

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 School of Metallurgy and Energy Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009)

Abstract Based on analysis on solidification characteristics of steel 37Mn5 ($\% : 0.34 \sim 0.39\text{C}, 0.20 \sim 0.35\text{Si}, 1.25 \sim 1.50\text{Mn}$) during casting, a thermal-mechanical coupled mathematical model is established by using software ANSYS to simulate the solidification process of Φ 210 mm casting round bloom and analyze with 40 t tundish, casting rate 1.4 m/min and casting temperature 1531 $^{\circ}\text{C}$ the effect of secondary cooling water ratio 0.58 ~ 0.78 L/kg and distribution of water rate at each section on casting bloom surface temperature, shell thickness, length of liquid core and surface stress. The simulation results show that with increasing secondary cooling water ratio by per 0.1 L/kg the bloom surface temperature decreases by about 18 $^{\circ}\text{C}$, while the effect of testing cooling water ratio on shell thickness at outlet of mold, length of liquid core and surface stress is not obvious. But with cooling water ratio 0.68 L/kg the rapid re-raise temperature of bloom occurs by 185 $^{\circ}\text{C}$ in air cooling region between 0 and 1 section for original process and the max stress is up to 6.41×10^7 Pa. With maintaining the same cooling water ratio 0.68 L/kg, to control the re-raise temperature range decreases to 123 $^{\circ}\text{C}$ and the highest stress decreases to 4.53×10^7 Pa, as a result the bloom cracks basically dismiss and the surface quality of bloom improves markedly.

Material Index Steel 37Mn5 for Petroleum Sleeve Tube, Φ 210 mm Bloom Casting, Secondary Cooling Scheme, Mathematic Simulation, Surface Quality

37Mn5 钢是生产 J55 石油套管的专用钢种,属于低合金结构钢,由于其使用条件极为恶劣,因此对钢管性能提出了非常严格的要求。37Mn5 是一种裂纹敏感性钢种,目前,已有众多研究从多方面提出了控制 37Mn5 圆坯表面纵裂的措施,如控制钢水过热度、控制连铸机拉速、二冷制度采用弱冷及采用高结晶率保护渣等^[1-3]。本文以钢铁厂 37Mn5 钢圆坯生产为例,用 ANSYS 软件建立连铸圆坯凝固传热的数

学模型,对 Φ 210 mm 连铸圆坯凝固过程进行模拟,分析二冷制度比水量的变化对 37Mn5 圆坯质量的影响。

1 37Mn5 钢的凝固特性

钢厂 37Mn5 钢的内控成分如表 1 所示。

由表 1 成分可以看出,钢种的平均 C 含量为 0.37%,Mn 含量 1.35%,属于中碳低合金钢。另外,Mn 是扩大 γ 区的元素,能够降低相变温度,增

通讯作者:朱立光,教授,博士生导师,河北联合大学冶金与能源学院,唐山 063009

E-mail:zhulg@heuu.edu.cn

表 1 37Mn5 钢的内控化学成分 / %
Table 1 Aim chemical composition of steel 37Mn5 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0.34 ~ 0.39	0.20 ~ 0.35	1.25 ~ 1.50	≤ 0.025	≤ 0.015	≤ 0.015	≤ 0.020	≤ 0.020

大 γ 晶粒度,因此,37Mn5 钢铸坯的柱状晶发达,其晶粒较大^[4]。

由铁碳平衡相图可知, [C] < 0.53% 的钢液随着温度改变结晶时都会有 δ 铁素体生成。依据碳含量不同,随着温度的下降,生成的 δ 铁素体会发生晶型转变, δ - γ 转变的微观过程是奥氏体在 δ 铁素体的晶间形核长大,由于晶体点阵的改变(由体心立方晶格变为面心立方晶格),将发生体积变化并引起晶间内应力增加,铸坯表面裂纹指数增加,这种转变是引起纵裂的潜在因素。该钢种的液-固相温差达 90 °C 以上,凝固区间较大,凝固时间较长。

由 37Mn5 钢种的凝固特点分析得出:

(1) 37Mn5 钢的导热性较低。37Mn5 钢中有 Mn、Cr、Ni、Cu 等合金元素的溶入,破坏了基体晶体点阵结构和其中势能体系规律,增加了自由电子运动阻力,降低了钢的导热性。

(2) 钢的脆性温度区较宽,因此要防止在 1250 °C 以上和 900 °C 以下产生较大的组织应力,须采取低过热度、低拉速、弱冷的工艺制度,降低铸坯温度梯度。

(3) 该钢为裂纹敏感性钢种。37Mn5 钢中的 Mn 元素能起到固溶强化铁素体的作用,这是致铸坯易产生裂纹的主要原因之一。文献[5]介绍,钢凝固过程中热流密度增大,铸坯的纵裂指数也会随之增大。生产中如果提高拉速,将引起铸坯热流密度增大,会增加裂纹发生的机率。

2 37Mn5 连铸圆坯凝固热-力耦合模型的建立

2.1 生产现状及存在主要问题

37Mn5 钢圆坯的生产流程为:120 t 转炉-二次精炼(120 t LF、120 t VD)-连铸。主要断面有 $\Phi 120$ 、 $\Phi 270$ 、 $\Phi 310$ mm 等。本研究选取 $\Phi 210$ mm 连铸圆坯为研究对象。

浇铸该钢种中间包容量为 40 t,在拉速为 1.4 m/min 条件下,浇铸温度为 1531 °C,钢厂控制 37Mn5 钢种二冷比水量为 0.68 L/kg。

通过对 37Mn5 钢圆坯取样进行低倍组织检验。观察铸坯内部质量,发现铸坯存在部分皮下裂纹。通过建立模型分析当前冷却制度对铸坯质量的影响。

2.2 模型建立

根据圆铸坯的对称性,取 $\Phi 210$ mm 断面圆坯的 1/4 截面作为研究对象建立有限元模型。

根据已有研究经验和生产特点,对模型进行简化假设:

(1) 忽略圆铸坯的纵向传热;(2) 钢的热物性参数与温度有关,不考虑空间位置的变化;(3) 铸坯的物理特性为各向同性;(4) 二维切片的力学行为满足广义平面的力学假设;(5) 认为物体是连续的,且物体组成均匀,任意部位所具有的力学性能能够代表其物体受力情况;(6) 铸坯凝固过程属于小变形,因铸坯尺寸相对于变形尺寸大的多,所以忽略因受力变形而引发的刚度矩阵变化,简化计算。

2.3 初始条件与边界条件

(1) 传热模型边界条件的确定

初始条件:钢水进入结晶器,假设钢水温度与中间包浇铸温度 T_0 相等,即时间为 0 时,初始浇铸温度等于 T_0 。模型建立的薄片在向下运行凝固过程中经历结晶器、二冷和空冷 3 个冷却段,薄片的传热边界条件随冷却段的不同而不断变化。按如下方式确定各冷却段的边界条件:

$$\text{结晶器内边界条件的确定: } q = A - B\sqrt{t} \quad (1)$$

式中: A- 经验常数; B- 结晶器冷却水量、冷却水温差及铸坯结构尺寸等参数的函数。

二冷区边界条件的确定:

$$q = -h_f(T_w - T_a) \quad (2)$$

$$h_f = 0.581 w^{0.541} (1 - 0.0075 T_w) \quad (3)$$

式中: T_w - 铸坯表面温度; T_a - 冷却水温度; h_f - 铸坯与水之间的给热系数; w - 水流密度 $L/(m^2 \cdot s)$ 由冷却水量、冷却水温等参数计算得到。

空冷区内铸坯主要通过辐射和自然对流的方式向外散热。

(2) 应力模型边界条件的设定

利用 LDREAD 命令读入对应载荷步的温度场结果从而转换为应力场分析时所需要的体力载荷;铸坯承受钢水静压力,作为载荷将其施加在所选择的面上;在结晶器与铸坯坯壳之间施加位移载荷,在此过程中认为保护渣始终填充在结晶器与铸坯之间。

2.4 模型建立所需的工艺参数

模型建立所需的基本工艺参数如表 2。

3 模拟结果与结果分析

3.1 比水量变化对铸坯表面温度的影响

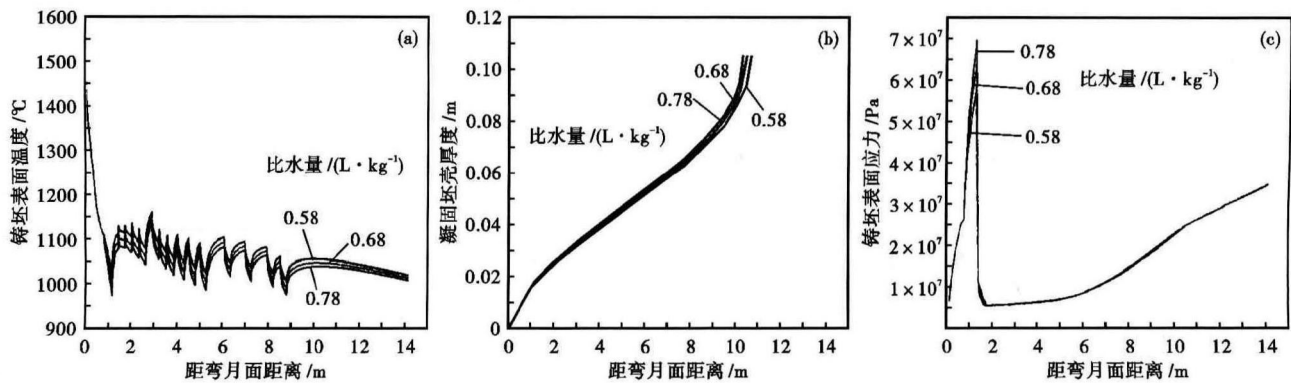


图1 比水量对铸坯表面温度(a), 坯壳厚度(b)和表面应力(c)的影响

Fig. 1 Effect of cooling water ratio on surface temperature (a), shell thickness (b) and surface stress (c) of cast bloom

表2 37Mn5 钢连铸基本工艺参数

Table 2 Basic process parameters for casting steel 37Mn5

铸机半径/m	铸坯尺寸/m	拉坯速度/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	结晶器水温差/ $^{\circ}\text{C}$	距矫直点距离/m
10.39	0.21	1.3~1.5	6	14.1

比水量变化,其它条件稳定的条件下得到冷却强度与铸坯表面温度的关系,如图1(a)。

在拉速 1.4 m/min, 过热度 30 $^{\circ}\text{C}$ 的浇铸条件下,通过变化比水量观察铸坯表面温度的变化。模拟结果发现,比水量每增加 0.1 L/kg,铸坯表面温度约下降 18 $^{\circ}\text{C}$ 。通过调整二冷区比水量,铸坯各区温度均出现几乎同等程度地上升或下降,冷却强度对铸坯二冷区表面温度影响较大。合理的二次冷却水分配可以实现高效优质铸坯的生产。

铸坯在二冷段经过水冷到空冷的冷却过程,铸坯表面同时经历回温,降温的过程。铸坯内部的高热量与铸坯表面反复的温度波动,形成的温度梯度差也在发生变化。若比水量配给不当,将会在铸坯表面形成较大的温差波动,使得铸坯在凝固前沿承受塑性变形应力增加,从而导致铸坯形成内部裂纹。据文献[6]介绍,37Mn5 钢在 950 ~ 1 200 $^{\circ}\text{C}$ 时高温塑性良好,发生裂纹的几率最小。

3.2 比水量变化对凝固坯壳厚度的影响

沿着拉坯方向,不同比水量条件下,坯壳厚度变化如图1(b)所示。随着铸坯的下行,坯壳在变厚;结晶器出口坯壳厚度应满足一定要求,根据浇铸断面,一般认为最小坯壳厚度在 8 ~ 15 mm 可以满足要求,铸坯断面越小,最小坯壳厚度越小。从模拟结果可以看出,在所模拟的比水量范围内结晶器出口坯壳厚度平均为 13.23 mm,均大于 10 mm,对于 37Mn5 钢 $\Phi 210$ mm 圆坯来说,完全可以保证浇铸安全和防止结晶器出口坯壳变形。

比水量增加,坯壳厚度在加厚,铸坯完全凝固时间在缩短,其它条件不变,比水量在 0.78, 0.68, 0.58 L/min 时,铸坯的液芯长度分别为 10.332, 10.481, 10.663 m,铸坯全凝固时间分别为 442.8, 449.2, 457 s。

足够的凝固坯壳厚度可使后续凝固过程中温度梯度减小,热应力基本趋于稳定,有利于稳定铸坯质量。

3.3 比水量变化对铸坯表面热应力的影响

图1(c)为比水量对铸坯表面应力的影响,铸坯出结晶器下口,有一小段应力开始增加,这是因为在出结晶器时,铸坯表面有一定程度的温度回升,且回升幅度较大。从表面温度模拟曲线也可以看出,铸坯出结晶器后表面温度直线下降,而后在 0 段与 1 段之间空冷部位出现急速回温现象,导致铸坯在此受应力增大。回温幅度太大,铸坯表面受压应力,凝固前沿受拉应力,当拉应力大于压应力时,内部容易产生裂纹。

出现较高回温是因为二冷 0 段冷却强度较大,0 段距离短,在冷却水量不变情况下,单位面积冷却强度太高。适当调整 0 段水量,可防止急速回温。

铸坯进入空冷区后,在 420 s 左右,辐射传热和对流传热成为传热的限制环节,铸坯表面温度有一定程度回升,从而导致热应力的再次有所增加。

通过调整比水量,从图1(c)中可以看出,对铸坯表面应力影响不是很大。

4 二冷配水的工艺优化

通过以上分析,确定比水量情况下,调整二冷区各段的水量分配比例,以优化二冷区的配水,使铸坯表面温度变化比较均匀,无明显大幅度回温,使铸坯表面应力在合理范围内,防止表面裂纹的产生。

采用企业给定配水量 0.68 L/kg,过热度按 30 $^{\circ}\text{C}$

控制,其它参数不变。图2是铸坯表面温度变化曲线和表面应力变化曲线。

从模拟结果看,铸坯整个凝固过程中表面温度基本合理,只是在0段与1段之间空冷部位出现急速回温现象,回温值高达185℃,明显偏高。对应铸坯表面应力曲线可以看出,由于急速回温,导致铸坯在此受应力也急速增大,最大应力达 6.41×10^7 Pa。

针对此情况,保持配水量0.68 L/kg,调整二冷区各段的水量分配比例,得出铸坯表面温度变化曲线和表面应力变化曲线如图3。

在不改变原有喷嘴布置的情况下,0段与1段之间空冷部位回温现象有所缓和,最高回温区回温约123℃(图3a)。铸坯表面最高点应力值从 6.41×10^7 Pa下降至 4.53×10^7 Pa。

经过上述配水优化后,对铸坯取样进行低倍分析,裂纹基本消失,铸坯质量明显好转。

5 结论

(1)应用ANSYS软件建立模型,对连铸圆坯凝固过程进行模拟,模型可以较为准确地模拟37Mn5钢 $\Phi 210$ mm连铸圆坯凝固过程。

(2)模拟结果发现,在其它条件不变的情况下,变化比水量来观察其对铸坯表面温度的影响。比水量每增加0.1 L/kg,铸坯表面温度约下降18℃。

(3)其它条件不变,采用变化比水量的方式来研究铸坯液芯长度和全凝固时间的变化。比水量在0.78,0.68,0.58 L/min时,铸坯的液芯长度分别为10.332,10.481,10.663 m,铸坯全凝固时间分别为442.8,449.2,457 s。

(4)不改变各冷却段配比的情况下,按比例调整比水量,比水量的变化对铸坯表面应力影响不是很大。

(5)确定总比水量不变的情况下,通过调整二冷区各段的水量分配比例,可以优化二冷区的配水,使铸坯表面温度变化比较均匀,使铸坯表面应力在

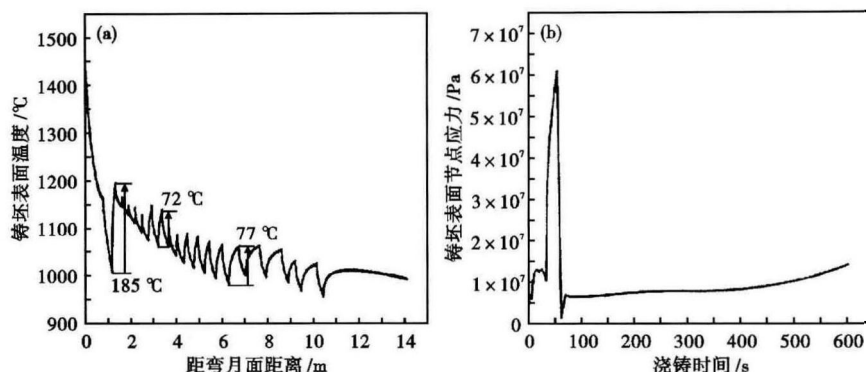


图2 优化前铸坯表面温度(a)和表面应力(b)分布

Fig. 2 Distribution of surface temperature (a) and surface stress (b) of cast bloom before process optimization

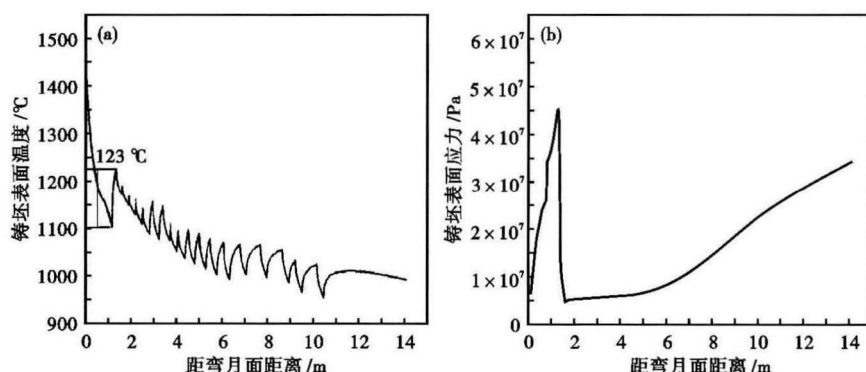


图3 优化后铸坯表面温度(a)和表面应力(b)分布

Fig. 3 Distribution of surface temperature (a) and surface stress (b) of cast bloom after process optimization

合理范围内,铸坯质量得到改善。

国家自然科学基金项目资助(51074063)

参考文献

- [1] 张志祥,姜茂发. 37Mn5 连铸圆坯凝固过程数学模拟[J]. 东北大学学报,2010,31(7):966-969.
- [2] 成泽伟,陈伟庆,金长佳,等. 保护渣性能对连铸圆坯表面质量的影响[J]. 钢铁,2002,37(9):23-25.
- [3] 王爱兰,刘平,李峰. 中碳锰钢结晶器保护渣的分析研究[J]. 包钢科技,2007,33(5):16-18.
- [4] 白月琴,刘平,史凤武. 37Mn5 钢连铸表面纵裂纹产生原因分析[J]. 包钢科技,2005,31(4):29-31.
- [5] 卢盛意. 连铸坯质量[M]. 北京:冶金工业出版社,1994.
- [6] 刘宇雁,包喜荣,陈林,等. 37Mn5 连铸坯高温热塑性的研究[J]. 热加工工艺,2008,37(1):22-24.

朱新华(1977-),女,博士生(北京科技大学),副教授,2001年河北理工大学(本科)毕业,连铸工艺研究。

E-mail: zhuxh221@163.com

收稿日期:2014-08-20