

立弯式奥氏体不锈钢 220 mm × 220 mm 铸坯动态二冷控制和应用

杜辰伟¹ 李聿军¹ 张家泉¹ 田观清² 吕龙斤² 郑新国³ 李靖宇³

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 上海新中冶金设备厂, 上海 201803;

3 山西太钢不锈钢股份有限公司炼钢一厂, 太原 030003)

摘要 根据奥氏体不锈钢的热物理参数和二冷区各区出口目标温度,建立了不锈钢 220 mm × 220 mm 铸坯动态二冷综合控制模型和末端拉速电磁搅拌-拉速优化模型。304 奥氏体不锈钢连铸生产应用结果表明,在该钢正常工作拉速 0.8 ~ 1.1 m/min,根据目标温度(足辊 1 080 °C,一区 1 070 °C,二区 1 060 °C,三区 1 045 °C,进拉矫机 980 °C)制定相应比水量(0.30 ~ 0.33 L/kg),模型实时计算表面温度与目标温度对比,进行在线控制,铸坯温度均匀、稳定,冶金质量良好。

关键词 奥氏体不锈钢 220 mm × 220 mm 坯 立弯式连铸 动态二冷控制 模型 应用

Control of Dynamic Secondary Cooling Process for Vertical-Bending 220 mm × 220 mm Casting Bloom of Austenite Stainless Steel

Du Chenwei¹, Li Yujun¹, Zhang Jiaquan¹, Tian Guanqing², Lü Longjing², Zheng Xinguo³ and Li Jingyu³

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

2 Shanghai Xinzhong Metallurgical Equipment Factory, Shanghai 201803;

3 No.1 Steelmaking Works, Shanxi Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract According to thermal physical parameters of austenite stainless steel and aim temperature at outlet of each section of secondary cooling area, the comprehensive control model for dynamic secondary cooling process of 220 mm × 220 mm casting bloom of stainless steel and the end electromagnetic stirring-casting speed optimized model have been established. The application results of casting production of 304 austenite stainless steel show that at normal casting speed 0.8 ~ 1.1 m/min for the steel, according to aim temperature (foot rolls 1 080 °C, I section 1 070 °C, II section 1 060 °C, III section 1 045 °C and entering straightening machine 980 °C) to defining corresponding water rate (0.30 ~ 0.33 L/kg), the secondary cooling process is controlled based on comparison between calculated surface temperature by model in time and aim temperature value, as a results the temperature of casting bloom is even and stable with nice metallurgical quality.

Material Index Austenite Stainless Steel, 220 mm × 220 mm Bloom, Vertical-Bending Casting, Dynamic Secondary Cooling Control, Model, Application

奥氏体不锈钢的热导率比碳钢低 45%,铁素体不锈钢比碳钢低 20% ~ 30%,连铸冷却过程铸坯内外温度梯度大、容易形成柱状晶发达现象。柱状晶间强度低将增大铸坯裂纹敏感性。此外,在相同的冷却条件下,由于不锈钢的凝固速度小于碳素钢,其铸坯液相穴完全凝固时间较长。

本文针对太钢不锈钢方坯连铸技术改造需要,系统研究了不锈钢的热物性和高温力学性能,基于传热与凝固分析,制定出合理的二冷控制基础水表,进而建立并实现了动态二冷控制。模型通过实时跟踪铸坯表面温度,可使现场操作人员实时跟踪铸坯的冷却状态、监测铸坯凝固进程,并通过拉速优化提升末端电磁搅拌的实施效果。

1 铸机特点及参数

该不锈钢方坯连铸的生产工艺路线为: EAF → AOD → VOD → CCM。其中,普通不锈钢按两步法生

产,即:铁合金和废钢 → 电弧炉 → AOD → (LF) → 连铸/模铸。低碳和超低碳不锈钢按三步法生产:铁合金和废钢 → 电弧炉 → AOD → VOD → 连铸/模铸。

实践表明,原有生产碳素钢的全弧形方坯铸机不适合生产 220 mm × 220 mm 的不锈钢。本次改造铸机采用了直弧形连铸机型。其中对结晶器、振动系统、二冷段、拉矫机、火切机、钢包滑动水口液压站成套设备进行了重新设计制作。此外,新设计的铸机除实现设备和控制技术的升级外,还增强了环保功效。采用全封闭在线火焰切割除尘系统,明显提高了连铸车间的环境质量。铸机具体参数见表 1。

2 不锈钢热物性参数与目标温度

2.1 液固相线

不锈钢产品成分如表 2 所示。基于计算式(1)和(2)^[1-2],并结合热力学软件 JMatPro6.1 计算分析和瑞典钢种手册^[3](以 0.1 °C/s 冷却速率为参照)

表 1 立弯式连铸机参数
Table 1 Parameters of vertical-bending caster

项目	参数
每台铸机流数/流	3
铸机型式	柔引锭杆立弯机型,连续矫直
铸机基本半径/m	R8
流间距/mm	1 350
结晶器铜管长度/mm	780
中间罐容量/t	正常 16,溢流 18
铸机冶金长度/m	24
铸坯断面尺寸/mm	220 × 220
定尺长度/m	4.0 ~ 6.5
拉坯速度/(m · min ⁻¹)	0.5 ~ 1.1
钢包钢水质量/t	45
振动型式	四连杆液压非正弦振动
引锭杆型式	半刚性引锭杆,液压驱动引锭杆侧存放
二冷型式	气水雾化冷却动态配水
电磁搅拌	外置式电磁搅拌 + 二冷末端搅拌(预留)
结晶器液面自动控制	Cs137 检测 + 电动数字柱塞棒
定尺装置	红外摄像定尺
铸机年产量/t	30.0 × 10 ⁴

表 2 典型奥氏体不锈钢成分/%

Table 2 Main analysis of typical austenite stainless steels /%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
304	0.04	0.50	1.20	0.040	0.001	8.05	18.15	-	0.5
316L	0.02	0.50	1.15	0.030	0.001	10.15	16.70	2.1	-
310S	0.05	0.60	1.00	0.025	0.001	19.10	24.60	-	-
308	0.02	0.60	2.00	0.020	0.010	9.80	19.60	-	-
309	0.02	0.55	2.20	0.015	0.010	13.60	23.20	-	-

表 3 典型不锈钢的液固相线温度/°C

Table 3 Temperature of liquidus and solidus of typical stainless steels /°C

钢种	液相(T _L)	固相(T _S)
304	1 461	1 414
304L	1 458	1 410
316L	1 450	1 402
310S	1 413	1 364
308	1 452	1 388
309	1 427	1 368

综合比对,获得典型钢种的凝固液、固相线温度如表 3 所示。

$$T_L = 1\,536.6 - 88[C] - 8[Si] - 5[Mn] - 30[P] - 25[S] - 3[Al] - 1.55[Cr] - 4[Ni] - 2[Mo] - 18[Ti] - 80[N] - 5[Cu] \quad (1)$$

$$T_L = 1\,538 - (65[C] + 13.0[Si] + 4.8[Mn] + 5.0[Cu] + 4.3[Ni] + 1.5[Cr] + 2.5[Mo]) \quad (2)$$

2.2 密度与导热特性

基于 JMatPro6.1 软件计算导热系数、密度、比热容,凝固潜热取推荐值 276.3 kJ/kg。其中获得的 304 不锈钢的密度、导热系数和比热容的温度关系如图 1 所示。每个钢种的热物性参数经计算分析后存入钢种数据库,供动态二冷模型离线模拟与在线应用(模型中的参数设定可作适当简化)。

2.3 目标表面温度

由图 2 可知,其高温时的断面收缩率均在 40% 以上。为保持较好的塑性,矫直时应尽量使表面温度大于 950 °C。依据钢种的高温力学性能制定各冷却区出口处的目标表面温度,如表 4 所示。经传热凝固模型离线模拟计算后,确定合理的基础水表。本研究中,对 304 不锈钢,在拉速为 1 m/min 时,最佳比水量为 0.32 L/kg。制定目标温度时,应使铸坯表面均匀且缓慢冷却,保证各冷却区出口较小的回温,从而消除连铸过程中因较大热应力应变导致的铸坯质量缺陷。同时,奥氏体不锈钢的导热系数较普碳钢低,热膨胀系数高,故应采用弱冷制度。若生产铁素体或马氏体不锈钢,由于其导热系数较奥氏体不锈钢大,则应采用强冷却制度。

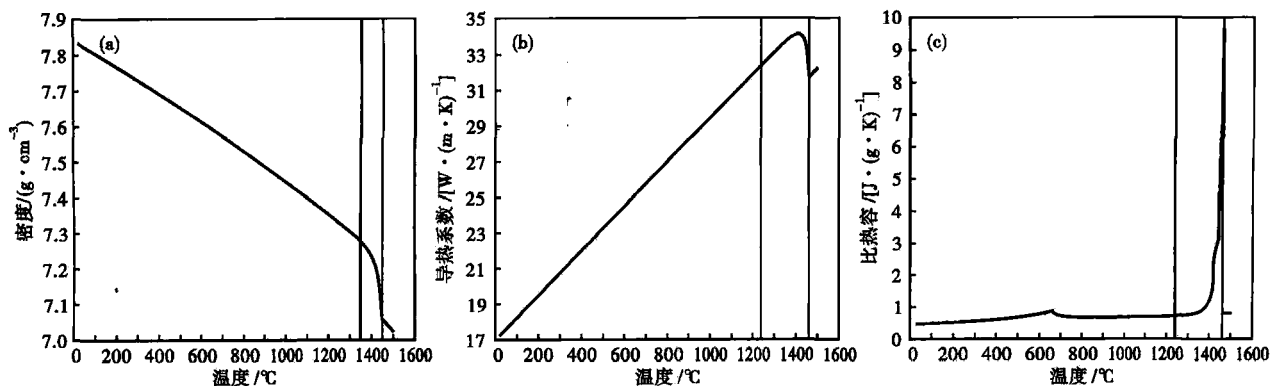


图 1 304 不锈钢的密度(a)、导热系数(b)和比热容(c)

Fig. 1 Density (a), thermal conductivity (b) and specific heat (c) of stainless steel 304

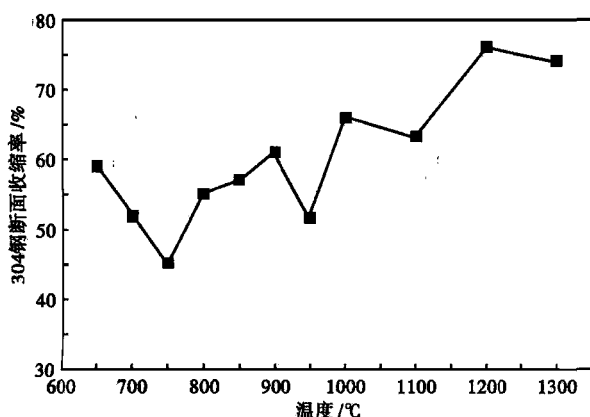


图2 304 不锈钢铸坯的热塑性

Fig. 2 Hot ductility of stainless steel 304

表4 304 不锈钢各段出口目标温度/°C

Table 4 Aim temperature at outlet of each section of secondary cooling area of stainless steel 304 /°C

各区出口	目标表面温度
足辊	1 080
一区	1 070
二区	1 060
三区	1 045
进拉矫机	980

3 不锈钢方坯动态二冷控制模型

3.1 动态二冷综合控制模型

鉴于方坯连铸传热特点,采用如(3)式的基于二维切片的传热控制方程。具体离散方法、边界条件以及模型控制建立思路同文献[1]。

$$\rho C_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中: k - 导热系数/[W · (m · °C)⁻¹]; C_{eff} - 等效比热容/[J · (kg · °C)⁻¹]; T - 温度 /°C; ρ - 密度/(kg · m⁻³)。

在实际生产中,拉速、中间包钢水过热度、各冷却区的水量等因素在实时变化,切片在不同时刻就具有不同的信息。通过动态跟踪每个切片在不同时刻下的“寿命”、位置等信息,确定出每个切片在不同时刻下的凝固传热微分方程边界条件,对每个切片的凝固传热微分方程进行周期性的求解,就可以动态描述每个切片在不同时刻、不同位置的温度场。

动态二冷配水以“坯龄”(当地坯壳生成后在铸机中经历的时间)为控制参数进行基本水量的冷却控制,建立起“坯龄”与基本水量的对应关系^[4]。即在非稳态的浇注情况下,拉速不再直接决定水量的大小,而是通过“坯龄”反映出各位置的铸坯的冷却趋势与有效拉速度,从而供给相应的水量。

其中“坯龄”模型根据实时跟踪的“坯龄”,计算所在 i 段冷却区的有效拉速 V_{ai} 与修正拉速 V_{mai} 。

$$V_{\text{ai}} = Z_i / t_i \quad (4)$$

式中: Z_i - 结晶器弯月面到跟踪单元所在冷却区中心距离; t_i - 坯龄,即 Z 位置处的跟踪单元 t 时刻在铸机中经历的总时间。

$$V_{\text{mai}} = k_i V_{\text{ai}} + (1 - k_i) V_c \quad (5)$$

式中: k_i - 权重; V_c - 瞬时拉速。

引入修正拉速是为了减少温度波动。通过修正拉速在动态二冷参数数据库中得到相应的基本水量。

“坯龄”模型设定基本水量后,控制模型通过铸坯的动态热跟踪模型对各冷却区表面温度进行实时跟踪计算,与目标温度进行对比,当两者有偏差时,及时调整该二冷区的冷却强度,使得铸坯表面温度与目标温度尽量接近。

当计算的铸坯表面温度 T_{si} 与目标温度 T_{aimi} 有偏差时,差值:

$$\Delta T = T_{\text{si}} - T_{\text{aimi}} \quad (6)$$

本研究采用如下简化公式计算修正水量:

$$\Delta Q_i = k_i \cdot \Delta T \quad (7)$$

各回路二冷最终设定水量为:

$$Q_i = Q_i + \Delta Q_i \quad (8)$$

式中: ΔQ_i - 各回路为缩小与目标温度偏差的修正水量,一般不超过 Q_i 的10%。

调试前期,由于需要对控制系统的准确性验证和修订,一般先采用基于“坯龄模型”的有效拉速和中间包温度修正的策略;当模型可靠性和准确性得到确定后,逐渐应用目标表面温度控制策略和回温(坯壳表面温度历程)控制策略。

动态二冷配水系统支持用户增加新钢种和修订相应的二冷工艺,并采取了L1级和L2连锁以及最大和最小水量等保护措施。

3.2 末端电磁搅拌-拉速优化模型

本动态二冷控制系统还加入了针对F-EMS的拉速优化模块。国内多家钢厂^[5-8]对F-EMS的安装位置进行了工业实验研究。结果表明,合理的F-EMS安装位置位于液芯比率在20%~40%,即已凝固的坯壳厚度占总厚度的60%~80%,对应中心固相分率 f_s 一般小于0.3。当F-EMS安装在固相分率 f_s 大于0.4的位置时,F-EMS将不能对铸坯质量起到改善作用,其原因是该区域内钢液的粘性过大^[9]。由

于钢厂生产钢种种类繁多,而 F-EMS 的安装位置固定在狭小的范围内,可调性差。需通过拉速优化来使合适的液芯比率位于搅拌器的安装位置。为此,在动态二冷模型的基础上,开发了拉速优化模型,其具体工作原理为:通过实时计算铸坯各个位置处的中心固相率,以此来反推使最佳液芯比率位于搅拌器安装位置处最为适合的拉速。

4 生产应用

铸机热试投产后,运行情况良好,生产较稳定。例如 304 奥氏体不锈钢正常工作拉速为 0.8 ~ 1.1 m/min,由目标温度曲线所制定的相应比水量范围为 0.3 ~ 0.33 L/kg,将以此计算的各区水量作为基础水表存于钢种数据库中。在线控制时,模型实时计算表面温度,并与目标温度做对比,按照上文中的公式(6)~(8)进行动态二冷控制。为保证铸坯质量,校验模型的准确性,对铸坯的表面温度进行了多次测量,测温结果与模型对比如图 3 所示。

从图 3 可见,动态二冷控制模型较好稳定了铸坯的表面温度,其模型计算值与实测值误差较小。图 4(a)中铸坯表面温度均匀,且铸坯低倍组织良好,无明显缺陷,如图 4(b)所示。

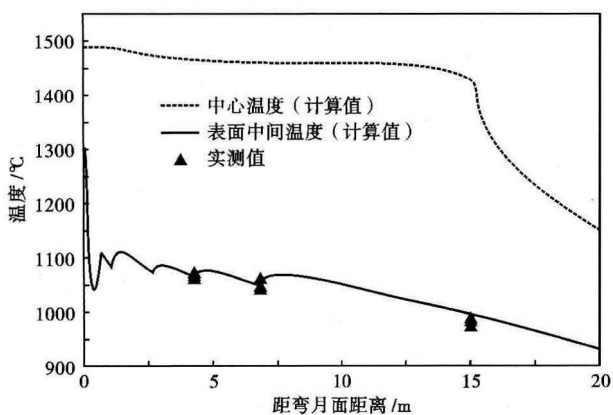


图 3 铸坯表面温度动态二冷模型模拟计算值与实测值对比
Fig. 3 Comparison between dynamic secondary cooling model simulated calculated value and real measured value of casting bloom surface temperature

5 结论

(1)通过对奥氏体不锈钢高温热物理特性的分析与计算,建立钢种数据库,合理地制定了二冷基础

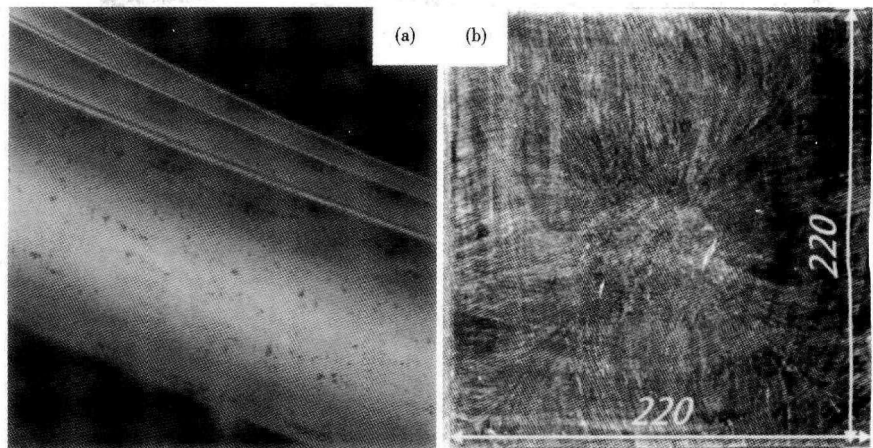


图 4 连铸过程铸坯表面形貌(a)与铸坯低倍组织形貌(b)

Fig. 4 Morphology of bloom surface during casting (a) and morphology of macro-structure of casting bloom

水表,为动态二冷控制提供了基础。

(2)依据所生产不锈钢的高温热特性,基于坯龄模型、目标表面温度和回温控制策略建立了不锈钢动态二冷控制模型对铸坯表面温度进行实时、在线控制。并针对末端电磁搅拌实施效果的提升开发了拉速优化模型。实践表明,采用动态二冷控制模型,铸坯温度均匀且稳定,铸坯低倍质量良好。

钢铁冶金新技术国家重点实验室资助项目(41603013)

参考文献

- [1] 常运合. 连铸工艺过程控制模型研究与应用[D]. 北京:北京科技大学,2012.
- [2] 陆世英,张廷凯,康喜范. 特殊钢丛书-不锈钢[M]. 北京:原子能出版社,1995.
- [3] Grünbaum G, Callmer B, Hammar O, et al. A Guide to the Solidification of Steels[M]. Stockholm:Jernkontoret,1977.
- [4] 常运合,张家泉,钱宏智,等. 基于有限元法异型坯动态二冷控制模型开发与应用[J]. 北京科技大学学报,2011,33(4):418-422.
- [5] 张森林. 小方坯高碳钢 F-EMS 的研究[J]. 连铸,2005,30(1):4-5,25.
- [6] 王彪,谢植,贾光霖,等. 凝固末端电磁搅拌参数确定及其对中心偏析的影响[J]. 钢铁,2007,42(3):18-21.
- [7] 王晓东,王宝峰,曹建刚,等. 大方坯末端电磁搅拌位置和连铸工艺参数的确定[J]. 钢铁,2011,46(8):40-43.
- [8] 丁宁,孙奇松,王立峰,等. 末端电磁搅拌位置确定及对 SWRH82B 钢中心偏析的影响[J]. 北京科技大学学报,2011,33(1):17-21.
- [9] Ayata K, Mori T, Fujimoto T, et al. Improvement of Macro-segregation in Continuously Cast Bloom and Billet by Electromagnetic Stirring[J]. Transaction ISIJ,1984,24(11):931-939.

杜辰伟(1987-),男,博士研究生(北京科技大学),太原科技大学(本科)毕业,连铸坯质量、过程控制工艺研究。

E-mail: dudgeh@163.com

收稿日期:2015-06-08