

连铸-开坯生产流程 325 mm × 280 mm 轴承钢铸坯温度变化的数值模拟

党爱国^{1,2} 崔娟^{1,2} 李永超^{1,2} 冯艳^{1,2}

(1 邢台钢铁有限责任公司, 邢台 054027; 2 河北省线材工程技术研究中心, 邢台 054027)

摘要 通过数值模拟和现场实测的方法研究了在连铸、保温输送、堆垛冷却、加热炉加热等工艺过程中 325 mm × 280 mm GCr15 轴承钢连铸坯温度的变化。结果表明, 铸坯在出拉矫机后的单辊道输送过程不同部位的冷却速率差异较大(角部 10 °C/min、表面 7.1 °C/min、芯部 4.6 °C/min), 而在保温车输送过程(角部 4 °C/min、表面 2.9 °C/min、芯部 1.67 °C/min)及堆垛冷却期间不同部位的冷却速率差异较小, 因此缩短在连铸机尾部的停留时间有利于防止因冷却不均产生微小裂纹。热送热装较冷装工艺可使铸坯的加热时间减少 20 min。

关键词 325 mm × 280 mm 铸坯 GCr15 轴承钢 温度 保温输送 堆冷 加热 数值模拟 现场实测

Numerical Simulation on Temperature Change of 325 mm × 280 mm Bloom of Bearing Steel during Casting-Breakdown Process Flowsheet

Dang Aiguo^{1,2}, Cui Juan^{1,2}, Li Yongchao^{1,2} and Feng Yan^{1,2}

(1 Xingtai Iron & Steel Corp Ltd, Xingtai 054027; 2 Hebei Province Wire Engineering Technical Research Center, Xingtai 054027)

Abstract The temperature change of 325 mm × 280 mm casting bloom of bearing steel GCr15 during process including casting, holding conveying, stacking cooling and heating in heating furnace has been studied by using numerical simulation method and temperature-measuring in situ. Results show that with bloom out of withdrawal and straightening device during conveying process by single roller way, the difference of cooling rate at different parts of casting bloom is larger i. e. the cooling rate at corner 10 °C/min, surface 7.1 °C/min and core of bloom 4.6 °C/min, while the difference of cooling rate at different parts of casting bloom is smaller during conveying process with holding pot (corner 4 °C/min, surface 2.9 °C/min and core 1.67 °C/min) and during stacking cooling period, therefore to shorten the remaining time at tail of caster is available to avoid tiny cracks caused by uneven cooling. As compared by cold charging, the heating time of bloom shall be decreased by 20 min by hot charging process.

Material Index 325 mm × 280 mm Casting Bloom, Bearing Steel GCr15, Temperature, Holding Conveying, Stacking Cooling, Heating, Numerical Simulation, Measuring in Situ

为了实现连铸、开坯和轧制三大工序时间上的衔接及批量生产的协调, 需要有一个合理连接连铸-开坯-轧制三大工序的温度变化系统, 用于编制生产计划、监视和控制铸坯的状态以及各种异常情况的及时处置^[1]。本文通过数学模拟的方法研究了典型大方坯(325 mm × 280 mm)生产流程连铸、保温输送、堆垛冷却、加热等工序内连铸坯的温度(铸坯宽面中心、窄面中心、断面中心和角部 4 个点)随时间的变化规律, 同时计算了热送热装和冷装工艺的加热炉内铸坯温度变化与时间的关系。

1 数值模拟物理参数

本文以 GCr15 轴承钢为例研究其过程温度的变化曲线, 其它钢种的过程温度变化规律与其类似, 其物理参数如表 1 和表 2 所示。

本文采用经验公式的方法对铸坯自然冷却过程的综合换热系数进行计算, 公式如下^[2]:

表 1 GCr15 轴承钢的导热系数和比热容

Table 1 Coefficient of thermal conductivity and specific heat capacity of bearing steel GCr15

温度/°C	导热系数/ [W · (m · °C) ⁻¹]	比热容/ [J · (kg · °C) ⁻¹]
100	41	371
200	41	451
300	39.9	461
400	38.1	496
500	35.9	533
600	33.6	568
700	33.6	611
800	33.6	677
900	33.6	677

表 2 GCr15 轴承钢的热物理参数

Table 2 Thermo-physical parameters of bearing steel GCr15

项目	参数
液相线温度/°C	1 450
固相线温度/°C	1 325
密度(ρ _s)/(g · cm ⁻³)	7.388

$$H = 2.6(T_w - T_c)^{0.25} +$$

$$4.84 \times 10^{-8}(T_w^2 + T_c^2)(T_w + T_c)$$

式中： H - 综合换热系数； T_w - 铸坯温度/ $^{\circ}\text{C}$ ； T_c - 环境温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

2 连铸过程铸坯的温度变化

本模型主要计算铸坯的温度场,因此建立了二维非稳态凝固传热模型,以 5# 大方坯连铸机(325 mm × 280 mm)生产轴承钢为例计算了铸坯凝固过程铸坯温度(铸坯宽面中心、窄面中心和断面中心)随弯月面距离增加的温降曲线,计算结果如图 1(a)。

随着距弯月面距离的增加,铸坯表面中心温度及铸坯中心温度逐渐下降,但在铸坯表面上某些区域出现较高的回热现象,这与该区冷却强度和上一冷却区冷却强度差异较大有关。当表面冷却强度发生突变而减小,由于热传递的平衡,导致铸坯中心向表面传递的热量大于由表面带走的热量,铸坯表面热量积累,温度回升。当铸坯通过矫直区后,铸坯的表面温度达到 900 $^{\circ}\text{C}$ 左右,然后开始在空冷的情况下通过辊道输送至连铸机末端后经过保温车运至线材厂。

3 保温输送过程铸坯的温度变化

大方坯输送过程主要包括从铸坯完全凝固单辊道输送至连铸机尾部,然后多坯堆垛车送至线材厂缓冷库的过程。该过程的模拟严格按照炼钢厂实际生产节奏,辊道输送为 30 min,而车输送过程根据经验(包括装车和运输)亦为 30 min。

铸坯经过辊道输送和保温车保温输送至线材厂后其表面温度在 600 $^{\circ}\text{C}$ 左右,而角部则为 550 $^{\circ}\text{C}$ 左右。如图 1(b)所示,单辊道输送过程铸坯各个部位的冷却速率为角部 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、宽面中心 7.1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、断面中心 4.67 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,保温车输送过程铸坯各个部位的冷却速率为角部 4 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、宽面中心 2.9 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、断面中心

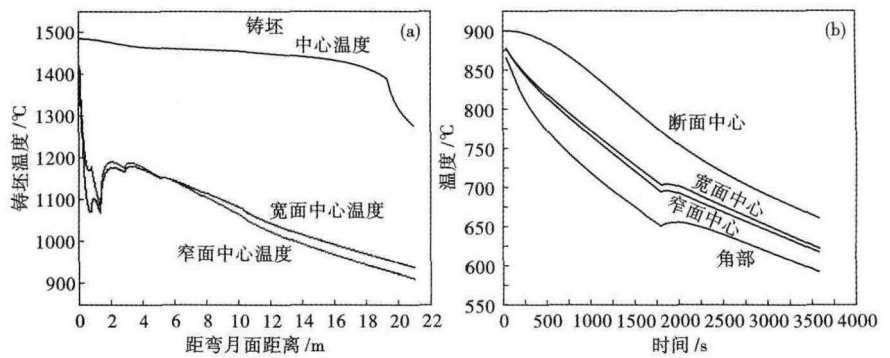


图 1 连铸过程(a)和单辊道输送过程(b)铸坯温度变化曲线
Fig.1 Temperature change curves of bloom during casting process (a) and conveying process by single roller way (b)

1.67 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,因此保温车输送过程可以显著的降低铸坯的冷却速率,对于一些裂纹敏感性钢种可以有效防止裂纹的产生。

4 堆冷过程铸坯的温度变化

开始堆垛时,由于热履历相同,每块铸坯的温度分布基本相同,但在堆垛一段时间后,处于堆垛中部区域的铸坯温度下降缓慢而表层区域的铸坯温度下降较快^[3]。建立了跟现场一致的堆垛模型,同时计算了中间位置从上到下 6 根铸坯随时间的温降曲线。堆垛模型如图 2(a,b)所示,堆冷 40 h 后,将该垛从中间位置剖切后的温度变化云图如图 2(c)所示,中间位置从上到下每根铸坯的温降曲线如

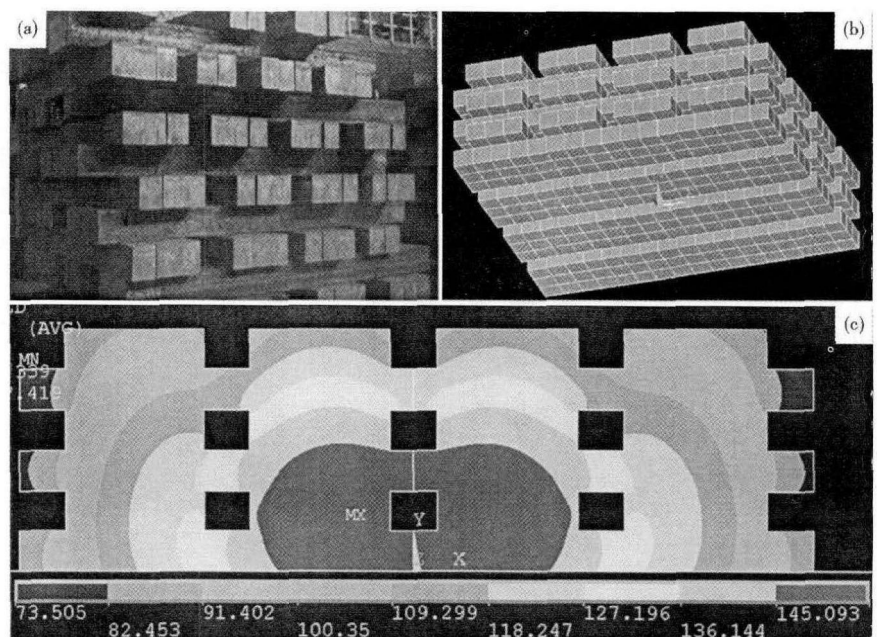


图 2 大方坯现场堆垛图(a),数学模型图(b)和堆垛缓冷后横截面温度变化云图(c)
Fig.2 Figure of stacking in situ (a), mathematical simulation (b) and cloud figure of cross section temperature change after stacking slow-cooling (c) of casting bloom

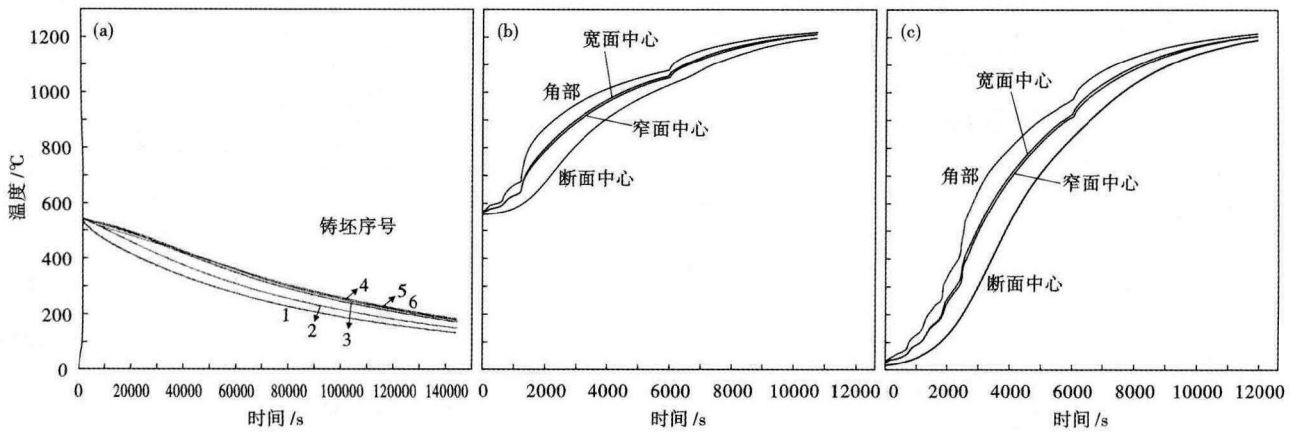


图3 大方坯堆垛冷却过程(a),热送热装加热过程(b)和冷装加热过程(c)温度变化曲线

Fig. 3 Temperature change curves of casting bloom during stacking cooling process (a), hot charging heating process (b) and cold charging heating process (c)

图3(a)。

对于 GCr15 轴承钢而言,铸坯经过堆垛冷却 40 h 后,堆垛表层的铸坯中心温度下降到 70 °C 左右,堆垛中心的铸坯中心温度下降到 145 °C 左右。堆垛的中间区域是高温区,随着冷却时间延长,高温区缓慢向下移动,冷却速率最快的是顶部铸坯,而中间区域和底部区域的冷却速率较慢,堆冷铸坯的冷却速率为 8.3 ~ 16.1 °C/h,铸坯的平均冷却速率为 11.25 °C/h。

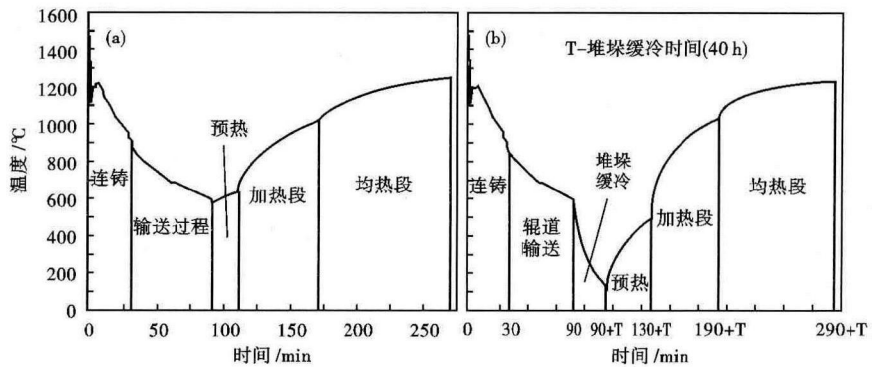


图4 热装热送(a)和冷装(b)过程铸坯宽面中心温度变化曲线

Fig. 4 Temperature change curves of center of slab width during hot charging process (a) and cold charging process (b)

5 加热炉加热过程铸坯的温度变化

5.1 热送热装

连铸坯实现热送热装工艺,可以显著降低加热炉的能耗,提高加热炉的产量水平,减少连铸坯的氧化损烧,取得节能高产降耗的综合经济效益^[4]。由于铸坯经过单辊道输送和保温车运输到线材厂后铸坯横断面温度在 550 ~ 630 °C,本次模拟将铸坯温度设置为均布温度,温度值为铸坯表面温度 560 °C。在经过加热炉加热后其断面温度分布云图和升温曲线如图 3(b)所示。

按照轴承钢的工艺参数,经过 180 (20 + 60 + 100) min 后铸坯温度在 1 211 ~ 1 228 °C。对于轴承钢而言,考虑到碳扩散,均热段时间会延长至 4 h,但对铸坯内部温度分布的影响已经变得很小,当均热段时间超过 100 min 时,铸坯横断面温差小于 30 °C,达到了开坯前铸坯内部温度差小于 30 °C 的要

求,因此本次计算均热段取 100 min。

5.2 冷装工艺

如图 3(c)所示为铸坯在完全冷却到室温的情况下入炉加热的升温曲线图。

由图 3(c)可以看出,铸坯经过 200 (40 + 60 + 100) min 后铸坯温度在 1 209 ~ 1 228 °C,达到了开坯轧制前铸坯内部温差小于 30 °C 的要求。由图 3(c)可以看出,经过 40 min 的预热后铸坯边角部温度还达不到 500 °C 以上,因此可以适当延长预热段时间。

6 铸坯整个过程温度变化规律

图 4(a)为连铸-输送过程-热送热装流程铸坯的温度变化规律,图 4(b)为连铸-输送过程-堆垛冷却-冷装加热流程铸坯的温度变化规律曲线。

7 计算结果与验证

现场的验证工作在 2013 年 12 月份开展并完

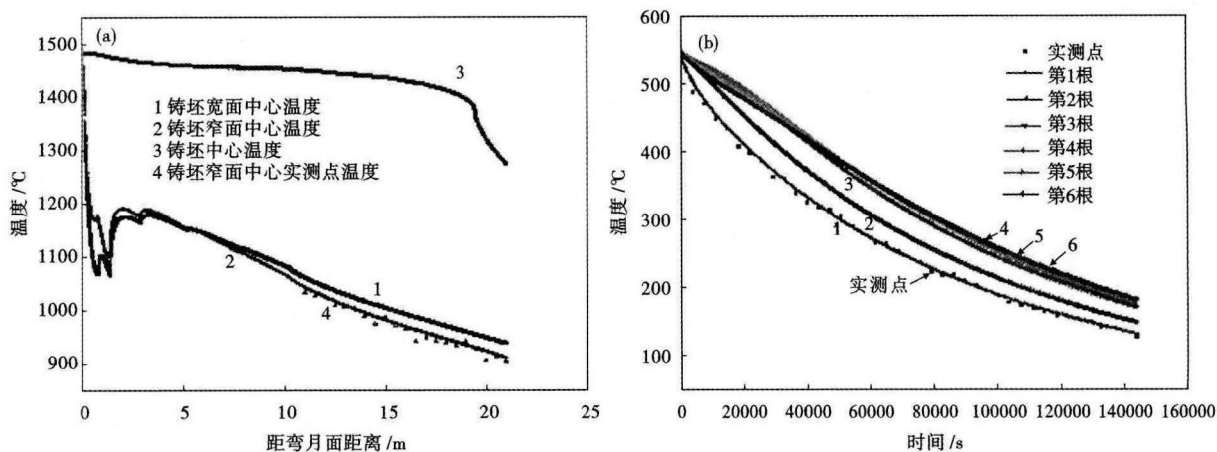


图5 大方坯连铸过程(a)和堆垛缓冷过程(b)铸坯温度实测验证图

Fig.5 Verifying diagram for real measured temperature of bloom during casting process (a) and stacking slow-cooling process (b)

成。验证方法是将在现场对铸坯表面进行测量所得到的温度与模型计算结果进行比较,现场测量的仪器选用非接触式双色红外测温仪。为了达到所测温度的准确性,测温时对每一个测量点测5次,先挑出差异常特别大的数据,将剩下的数据取平均值,从而得到较为准确的铸坯某一位置的实时温度值^[5]。在验证模型时,连铸二冷喷水区由于现场安全的要求而无法测温,连铸工序从喷水区以后开始测温(从距弯月面11 m处开始,每隔0.5 m测一组数据),铸坯堆垛缓冷每隔一个小时测一次温度,实测温度与模型计算温度曲线的比较如图5(a,b)。

由图5可得,对于连铸过程除了极个别点的误差达到了20℃,其余各点与计算结果的温度误差都在15℃范围内。对于堆垛缓冷过程,所测温度与计算结果的误差更小,除了个别点温度超过了10℃,其余各点实测温度都在10℃范围内。由于动态红外测温仪的测量误差范围较静态红外测温仪的大,所以堆垛缓冷时的温度更接近计算温度。对于大方坯在加热炉中加热,由于加热炉中无法测温,只能在过水除鳞后进行测温,所测温度较计算温度降低了约90℃,这与铸坯出加热炉后到进入第1架轧机时的温降范围基本一致。本模型与现场实测温度的吻合性较高。

8 结论

(1)铸坯在出拉矫机后的单辊道输送过程不同部位的冷却速率差异较大(角部10℃/min、表面7.1℃/min、芯部4.6℃/min),而在保温车输送过程(角部4℃/min、表面2.9℃/min、芯部1.67℃/min)及堆垛冷却期间不同部位的冷却速率差异较

小,因此对于一些裂纹敏感性钢种应适当缩短在连铸机尾部的停留时间防止因冷却不均产生微小裂纹。

(2)堆冷开始时,堆垛的中间区域是高温区,随着冷却时间延长,高温区缓慢向下移动;冷却速率最快的是顶部铸坯,而中间区域和底部区域的冷却速率较慢,堆冷铸坯的冷却速率为8.3~16.1℃/h,因此在条件允许的情况下尽可能将堆高可以更好起到缓冷的作用。

(3)热送热装较冷装工艺可以少加热20 min,通过不同钢种在整个过程的温度变化曲线,结合连铸机、加热炉、开坯机在时间上的协调和耦合,各个工序间的衔接和匹配上越紧凑,生产效率越高,降低能耗越显著。

参考文献

- [1] 干勇,倪满森,余志祥.现代连续铸钢实用手册[M].北京:冶金工业出版社,2010.
- [2] 宋华,高明昕,贾昊.铸坯空冷温度场精确模拟[J].塑性工程学报,2011,6(3):95-100.
- [3] 孙先金.钢坯堆垛冷却过程数值模拟与优化研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [4] 朱正海,仇圣桃,廖鹏,等.热送热装过程大板坯传热数值模拟研究[J].炼钢,2009,10(5):43-47.
- [5] 岳月发,朱正海,王建军.基于热量平衡的大方坯连铸传热数学模型研究[J].炼钢,2011,25(5):57-59.

党爱国(1984-),男,硕士(钢铁研究总院),工程师,2008年辽宁科技大学(本科)毕业,连铸坯质量控制。

E-mail:dangaiquo@163.com

收稿日期:2014-10-20