

· 系统与装置 ·

烧结操作辅助参考系统的开发

陶震兴¹, 王阿虎², 何木光², 林文康², 沈群书³

(1 中冶北方集团公司 自动化室, 辽宁 辽阳 114002; 2. 攀枝花新钢钒股份有限公司; 3. 装甲兵技术学院)

摘要:介绍针对攀枝花新钢钒股份有限公司炼铁厂开发的烧结操作辅助参考系统设计及实际应用情况。由于攀钢炼铁厂烧结原料品种多, 生产中变料频繁, 混合料成分、水分、粒度等波动大, 增大了烧结终点温度的控制难度。因此, 根据风箱负压、点火温度以及保温段温度变化, 建立相对透气性指数模型, 通过相对透气性指数对料层和点火温度进行控制。将每块台车看成烧结杯, 对过程数据进行跟踪, 根据每块台车的数据建立时间-废气温度模型、依据模型预测终点温度调节台车车速从而控制终点温度。

关键词:烧结终点; 预测模型; 料层控制; 操作参考

中图分类号: TF124. 5; TP27 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-7059 (2009) 01-0026-05

Development of sintering operation assistant reference system

TAO Zhen-xing¹, WANG A-hu², HE Mu-guang², LIN Wen-kang², SHEN Qun-shu³

(1 Automation Section, Zhongye North Group Co., Liaoyang 114002, China;

2 Panzhihua New Steel Vanadium Co., Ltd.; 3 Armor Technique Institute of PLA)

Abstract: Design and application of sintering operation assistant reference system developed by Iron-making Plant of Panzhihua New Steel Vanadium Co., Ltd. is introduced. Because there are many varieties of sintering raw material in Ironmaking Plant of Panzhihua Iron and Steel Co., raw materials are often changed, and change range of composition, moisture and size of mixture is large, it is difficult to control BTP temperature. Based on negative pressure of blast box, ignition temperature and temperature change in heat preservation zone, a relative ventability index model was established. Bed-level and ignition temperature were controlled through relative ventability index model. Each pallet was taken as a sintering cup and process data was traced. Time-waste gas temperature model was established based on data of each pallet. According to the model, BTP temperature was predicted and speed of pallet was adjusted, thus BTP temperature was controlled.

Key words: BTP; predictive model; bed-level control; operating reference

0 引言

烧结生产中对生产过程的操作控制直接影响烧结矿的产量和质量。由于烧结过程的复杂性、时滞性和动态时变性, 生产过程中只在部分功能上实现了自动控制, 而大部分操作仍由人工完成。虽然近年来国内外学者开发了烧结专家系统、BTP模糊控制等人工智能技术, 但在原料条件经常变化的烧结机控制上都没达到满意的效果。

烧结过程是大滞后环节, 从混合料被布料到烧结机台车经点火器点火燃烧到达烧结机尾一般经过大约 30 min, 如果从配料开始计算则时间更长。烧结终点温度受原料成分、料层厚度、点火温度、烟道负压、风箱风门开度、烧结机速以及台车情况等多种因素的影响, 很难对其进行控制。目前在烧结终点温度控制上, 主要通过从原料开始稳定各环节的操作, 调整适当的机速, 从而稳定烧

收稿日期: 2008-06-02; 修改稿收到日期: 2008-10-29

作者简介: 陶震兴 (1963-), 男, 辽宁辽阳人, 高级工程师, 主要从事自动化仪表设计工作。

烧终点温度。但是类似攀钢这样的企业,原料既有进口矿、地方大矿,也有地方小矿以及除尘灰等,而且量有多有少,生产中原料变化频繁,很难做到前道工序操作稳定。烧终点温度主要依靠操作工经验,根据原料情况通过调整料层厚度、点火强度和烧结机速等操作进行控制,因而攀钢的烧终点温度控制操作要求更高。为此,攀钢项目开发组针对攀钢的原料情况专门开发了烧终点温度控制操作参考指导系统,并于 2006 年 6 月在 1[#]烧结机投入运行,为生产操作提供重要参考。

1 系统设计

烧终点温度控制是个综合性系统,从原料开始每一个环节的变化都对烧终点温度产生影响。在混合料到达烧结机台车之前通过配料系统和混合制粒系统对混合料的成分、水分、粒度等进行控制。对于攀钢原料频繁波动的情况,混合料的成分、水分、粒度等很难稳定,因此操作人员控制稳定的烧结机终点温度更为困难。在整个烧过程中对终点温度有影响的操作有很多,但目前操作手段有限,主要依靠操作人员的经验对料层厚度、煤气流量和台车机速进行调节。通过对烧结操作的研究,我们发现尽管影响因素很多,但是有经验的操作人员还是能够通过对过程参数变化的观察,然后调节相应的操作将终点温度控制在要求的范围内,因此,系统设计采取了通过理论分析人工操作并将其模型化的技术模式。另外,在功能实现上依据技术和设备条件,不追求完善,但追求实用,即其功能不能实现自动控制时可为操作人员的判断提供参考数据。

根据操作要求系统分 3 部分功能:(1)料层及点火温度操作指导 为料层厚度自动控制及料层厚度设定、点火温度设定提供参考指导。(2)终点控制操作指导 为调整烧结机速提供参考指导。(3)操作界面 为操作人员提供方便操作、便于观察、便于分析的操作界面。

1.1 料层厚度及点火温度操作指导

混合料布料到烧结机台车后,操作人员对其进行操作的手段有料层厚度控制、点火温度控制、风箱抽风压力控制和烧结台车机速控制。其中,通过调节风箱阀门开度控制风箱抽风压力,但一般情况下不进行调整;主要根据烧结机尾情况调节烧结台车机速,机头部分数据变化较大时机速也要跟随调整。

1.1.1 模型的建立

在实际操作中操作人员根据人工观察混合料料层厚度和混合料粒度情况及点火温度、保温段温度、风箱负压等确定当前混合料透气性的指标,并与已到达终点台车的终点温度及过程的点火温度、保温段温度、风箱负压等比较判断透气性好坏,然后调整料层厚度和点火温度。同时,对该段台车进行跟踪,在适当的位置对机速进行调节。

经分析可知,原料经一次、二次混合机制粒混合后,无论其水分、粒度等如何变化都会影响混合料的透气性,而透气性变化直接影响风箱负压,进而影响点火温度、保温段温度,最终影响混合料的垂直烧结速度。

根据沃伊斯公式^[1]建立模型

$$P = Q / F \cdot (h / \Delta p)^n \quad (1)$$

式中, P 为料层透气性指数; Q 为通过料层的风量; F 为抽风面积; h 为料层厚度; Δp 为负压; n 为系数,通过实验确定。

由式(1)可知,透气性指数 P 与 Δp 呈反向关系;与通过料层的风量 Q 呈正相关。

目前点火温度通过安装在点火炉内点火器旁的热电偶检测,实际检测的是点火器环境温度,其公式为

$$T_g = (q - Q_s - Q_h) \cdot \lambda / V + T_s \quad (2)$$

式中, T_g 为检测的点火温度; q 为煤气热量; Q_s 为通过料层风量带走的热量, $Q_s = kQ$, k 为料层风量与热量系数; Q_h 为点火器周围热量; λ 为环境体积比热容; V 为点火器内壁与料面之间空间环境体积, $V = K \cdot (H - h)$,其中, H 为点火器内高度; K 为料层到点火器内高距离与体积折算系数,为固定值; T_s 为点火器原始温度。

从式(2)可知, T_g 与 Q_s 正相关,与式(1)中 Q 相关联。

保温段温度与点火温度相似,其公式为

$$T_b = (Q_h - Q_w) \cdot \lambda / V + T_o \quad (3)$$

式中, T_b 为保温段温度; Q_w 为点火器保温段热量; T_o 为环境原始温度。

从式(3)可得 Q_h ,由式(2)得 Q_s ,再由式(1)得 P ,整理后有:

$$P = \left[q - Q_w - \Delta T_b \cdot \frac{V}{\lambda} - \Delta T_g \cdot \frac{V}{\lambda} \right] / k / F \cdot (h / \Delta p)^n \quad (4)$$

式中,点火温度变化 $\Delta T_g = T_g - T_s$;保温段温度变化 $\Delta T_b = T_b - T_o$ 。式(4)中 ΔT_g , ΔT_b , h , Δp 由直接

测量或计算得到; λ, k, F, Q_w 在一定条件下为固定参数, 煤气热量 q 可以根据煤气流量进行计算, 即 $q = f \cdot Q_g$, 其中, f 为煤气流量, Q_g 为煤气发热量。

由上述可知: 由于 λ, k, K 值还不能确定, 但其值不变, 因此, 定义 P 为相对透气性指数, 可人为选择参数, 在台车垂直烧结速度为 18 mm/min 时, 定义 $P = 8$ 。

1.1.2 操作指导

通过相对透气性指数的变化定性反映混合料的透气好坏, 从而为料层厚度和点火温度控制提供参考。

若要对料层厚度进行控制, 首先需要对料层厚度进行检测, 并且要求在点火器前就要将其检测出来。我们先后使用了超声波、雷达波料位检测仪, 但由于现场环境恶劣、检测设备损坏或数据可靠性差, 所以都没能成功应用。最终我们开发了机电一体结构的料层厚度检测仪, 用于点火器前的料层厚度检测。

1.2 终点控制操作指导

混合料经点火器点火后, 影响台车烧结过程的操作仅为风箱风量调节和烧结终点位置调整。风箱风量通过调节大烟道压力或风箱阀门开度完成, 一般情况下不作改变; 烧结终点位置的调节是通过调整台车车速实现的。

1.2.1 模型的建立

在实际操作中无法直接检测烧结终点位置, 而是根据尾部风箱温度和台车机尾端面位置综合判断烧结终点位置是否合理。操作人员根据经验——烧结机机尾倒数第 2 个风箱的废气温度在一定范围内时烧结矿的产量、质量指标都很好 (攀钢 1[#]烧结机共 20 个风箱, 18[#]风箱为终点温度参考风箱) 的事实进行判断。此外, 可根据 15[#]~17[#]风箱温度变化人为预测 18[#]风箱温度, 且利用越后面的风箱越能更准确地预测 18[#]风箱的温度。通过烧结杯实验可以看出, 烧结废气温度随着烧结时间呈一定规律变化, 见图 1。

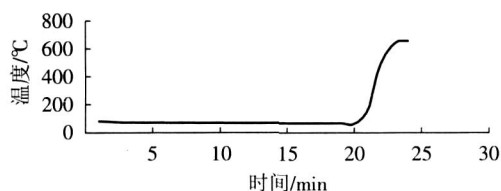


图 1 烧结杯时间-温度曲线

Fig. 1 Time-temperature test curve of sinter

虽然混合料的变化影响了烧结废气温度与烧结时间的关系, 但是, 混合料经过混合机及中间矿槽的综合变化过程, 其变化变得缓慢; 另外, 这些变化会引起相对透气性指数变化, 人为或自动根据相对透气性指数变化调节料层厚度和点火温度可减小混合料变化的影响, 因此, 在一定间隔时间内通过引入一个趋势变化参数, 再和前一段烧结废气温度与烧结时间的关系相结合, 基本上可以反映当前烧结废气温度与烧结时间的关系。当然, 间隔时间越短反映越准确。

模型建立:

$$T(s, N) = \begin{cases} (k_1 s + t_1) & N = 1 \\ (k_2 s + t_2) & N = 2 \\ \dots & \dots \\ (k_{18} s + t_{18}) & N = 18 \end{cases}$$

式中, $T(s, N)$ 为台车在 $N^{\#}$ 风箱 s 时间时的风箱废气温度; t_N ($N = 1, 2, \dots, 18$) 为台车到达第 $N^{\#}$ 风箱的废气温度; k_N 为 $N^{\#}$ 风箱的时间温度系数。

其中, $k_N(P, h) = R_N(P - p_N) + (h - b_N)$

式中, $k_N(P, h)$ 为 $N^{\#}$ 风箱时间温度系数与透气性指数和料层厚度的关系函数; R_N 为 $N^{\#}$ 风箱时间温度系数与料层厚度关系系数; p_N 为 $N^{\#}$ 风箱前一块台车料层透气性指数; b_N 为 $N^{\#}$ 风箱前一块台车料层厚度。

1.2.2 功能实现

烧结终点温度一般依据倒数第 2 个风箱的温度来确定。由于倒数第 2 个风箱温度受机尾漏风影响, 因此, 我们取倒数第 3 个风箱, 即 18[#]风箱的温度数据。

把烧结机台车看成一块块相连的烧结杯, 每块台车废气温度随烧结时间变化与烧结杯实验基本相似。由于相邻台车之间会互相影响, 因此当物料变化时温度变化要相对滞后。为了能够准确获取台车在各位置的数据, 需要对每块台车的位置进行准确跟踪, 为此专门研制了烧结机台车位置跟踪设备。实际台车的跟踪数据见图 2。需要说明的是在图中的取数时间段内, 2[#], 20[#]风箱的测温热电偶出现故障; 18[#], 19[#], 20[#]风箱压力变送器出现故障。

人工观察台车机尾断面, 判定已烧透时, 认为 18[#]风箱的温度为烧透温度。再根据烧结台车过程数据可获得台车从点火开始到废气温度再到烧透温度的时间, 料层厚度除以该时间后的参数为

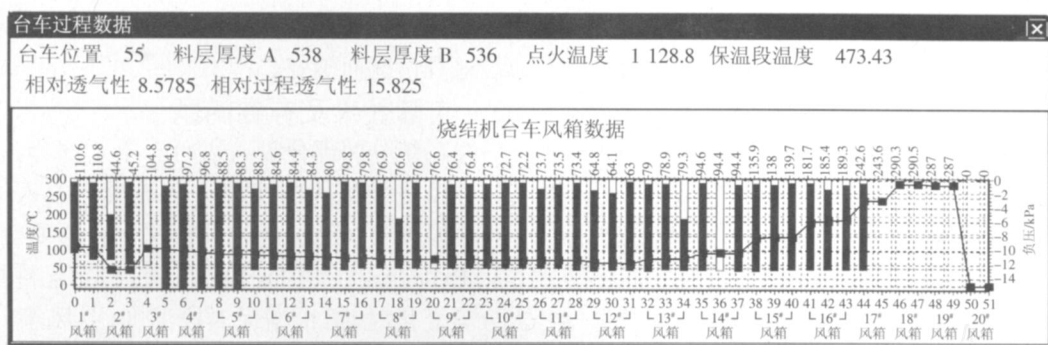


图 2 烧结台车过程数据

Fig. 2 Process data of trolley sinter

—■— 风箱温度; ▨ 风箱负压

垂直烧结速度,该参数为计算相对透气性指数提供数据,也为操作人员提供了操作参考。

在烧结过程中燃烧带前沿到达台车底部前,废气温度较低,因而,受漏风、台车温度等外部因素影响相对较大,而这些外部因素的数据目前没有设备进行在线检测,系统仅依据已有数据无法确定相关因子的系数,所以对拐点前的部分不进行计算。燃烧带前沿到达台车底部后,废气温度开始升高,部分外部影响因素消弱,外部因素影响相对变小,系统在学习计算过程中将其忽略,依据现有数据确定相关因子系数,计算预测拐点后各

台车按现速度到达机尾的温度。由于涉及因素多,现在的模型还不能进行精确的描述,仅做到了正确判断变化趋势和范围计算,很难确定准确的数值,因此台车到达机尾的预测温度以模糊方式给出。通过预测单块台车到达 18#风箱的废气温度,数值以曲线形式给出。再与终点温度的上下限进行比较,用颜色变化给出各种提示,操作人员根据各块台车的预测终点温度及整个烧结机的综合情况调节台车速度及相关操作。

1.3 操作界面

界面分 3 部分,见图 3。

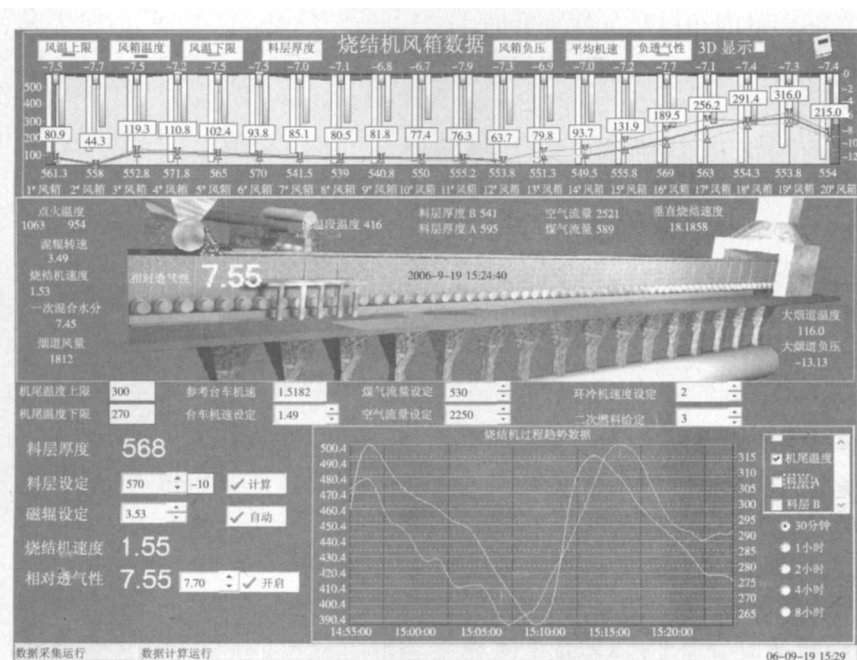


图 3 系统界面

Fig. 3 System interface

(1) 烧结各风箱温度曲线,负压柱形图,各风箱上台车的料层厚度面积图,相对透气性指数柱

形图及各风箱温度控制的上下限曲线;(2) 烧结过程主要操作参数及设定值,包括:点火温度,保温

段温度,磁辊转速,烧结机速,料层厚度,煤气流量,空气流量,烟道温度,垂直烧结速度和相对透气性指数等;(3)关键参数历史趋势曲线。

2 实际操作

2.1 料层厚度控制

料层控制操作有两种方式。(1)手动方式:操作人员根据相对透气性的变化调节泥辊布料器转速,从而调整料层厚度。实际操作为:当相对透气性增大时说明透气性变好,混合料垂直烧结速度将加快,此时需加快泥辊转速使下料量增加,增加料层厚度。当相对透气性减小时说明透气性变差,混合料垂直烧结速度将减慢,此时需减慢泥辊转速使下料量减少,减小料层厚度。当相对透气性变化不大时说明透气性稳定,料层厚度不变。

(2)自动方式:操作人员根据生产情况设定料层厚度,系统自动调节泥辊布料器转速,控制料层厚度稳定,当透气性补偿开启时,料层厚度的设定值根据透气性的高低适当增加或减少。

2.2 点火温度控制

在稳定生产中点火温度控制的主要作用是保证混合料表面的固体燃料着火燃烧,并借助抽风使烧结过程自上而下进行。但是由于攀钢的原料波动大,点火温度控制操作中还考虑了烧结过程透气性的调节。当混合料的相对透气性变好时,一般情况下混合料的烧结过程透气性也变好,垂直烧结速度加快,烧结终点将提前。为了防止这种现象的发生,在实际操作中会增加煤气量,以提高点火温度让混合料表面过熔,使烧结过程初期混合料透气性变差,从而稳定烧结过程。

2.3 烧结机速控制

由人工根据系统对台车到达机尾温度的预测值调节台车速度,1[#]烧结机废气温度拐点在 13[#]风箱,系统从 13[#]风箱开始预测台车到达终点的温度,因 19[#]风箱温度受漏风影响较大,所以用 18[#]风箱温度作为终点温度的控制点。当系统预测某风箱下台车到达 18[#]风箱的温度在设定值的上下限范围内,表明当前台车机速适合;当系统预测某风箱下台车到达 18[#]风箱的温度高于设定值上限时,曲线变成黄色,表明机速应适当加快;当系统预测某风箱下台车到达 18[#]风箱的温度低于设定值下限,曲线变成蓝色,表明机速应适当减慢。在 13[#]~18[#]风箱机速操作的建议中会出现有的台车速度适合、有的需加快、有的需减慢等多种情况,而

台车的最终机速需要操作人员根据建议和整个烧结过程情况而确定。

3 实际效果及存在问题

系统分两部分投入运行。第 1 部分为相对透气性及烧结机速的建议。系统没有投入运行前,料层厚度及烧结机速的调整是否合适要等台车到达 15[#]风箱以后才能作出判断,在混合料粒度、水分等变化时,需根据保温段温度(4[#]风箱)的变化调整料层厚度,操作人员主要依靠经验对过程情况进行大概的定性判断,并指导操作。第 2 部分为预测终点温度。系统投入运行后,终点温度的预测由 15[#]风箱提前到 13[#]风箱,提前 6 块台车(每块台车长 1 m)判断烧结终点情况。混合料粒度、水分等变化通过相对透气性(在 1[#]风箱)指数的变化定量地提前 6 块台车反应出来,操作人员根据相对透气性变化的大小调整料层厚度。

系统投入运行后操作人员根据相对透气性及台车机速建议进行操作,在正常情况下 80% 的终点温度能够控制在设定值的 ± 35 之内,见图 4。

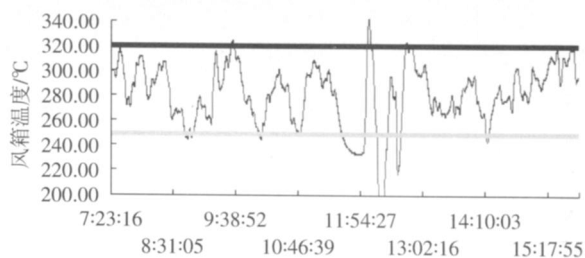


图 4 18[#]风箱温度趋势图

Fig. 4 Trending temperature of No.18 blast box

— 18[#]风箱温度; — 上限 320℃; — 下限 250℃

存在问题:对于混合料粒度、水分等突然变化很大或频繁大波动的情况,系统虽然能判断温度将要超过设定范围,但调整操作的反应时间不够,同时还要考虑其它台车的情况,因此终点温度仍然超出控制限值。另外,有时给出的台车机速建议会出现不合理的情况,需要操作人员根据经验判断是否采纳。

4 结束语

系统与已往的烧结终点控制系统或专家系统相比,引入了料层厚度(在点火器前)、相对透气性指数及台车位置跟踪技术,在原料条件不稳定时根据相对透气性指数调节料层厚度等操作减小台车上混合料烧结过程的烧结终点时间的变化。台

(下转第 38 页)

的频率精度下生产时,应避免采用较高的拉速。

表 2 结晶器空车振动频率的测试数据

Table 2 Vibration frequency test data of the continuous casting mould unloaded

类别	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
设定值	86.0	92.6	99.2	105.8	119.0
实测值	85.959	92.593	98.361	105.633	117.647
差值	0.041	0.007	0.839	0.167	1.353

结晶器空车振动各个测点的平均相位差数据见表 3。表 3 中结晶器各测点的相位差大部分都在 1 以内,相对误差在 $1/360 = 0.27\%$ 以内,故结晶器 4 个测点振动的同步性较好。

同时,从表 3 也可以看出,拉速为 0.7 m/min 时振动的相位差较大,所以为了保证该流结晶器 4 个角振动的同步性,应该尽量避免使用该拉速或者对该拉速进行优化。该流结晶器右下角的相位差较其他点大,下次检修设备时应重点关注。

表 3 结晶器空车振动各个测点的平均相位差数据

Table 3 Average phase difference test data of the continuous casting mould vibration unloaded

测点	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
Z 向左上角	0.472 2	0.646 3	1.000 3	0.677 9	0.362 0
Z 向右上角	0.769 6	0.646 3	1.438 0	0.677 9	0.445 8
Z 向左下角	0.472 2	0.708 8	1.000 3	0.874 5	0.362 0
Z 向右下角	0.818 7	1.769 8	1.672 4	0.912 7	0.554 2

结晶器空车振动各拉速下的工艺参数数据见表 4。表 4 中负滑动时间与负滑动时间比都随着拉速的提高而减小,负滑动率随着拉速的提高而增大。因此,当某钢种需要较小的负滑动时间和较大的负滑动率时,应提高拉速。由于该表所得数据来源于结晶器空车振动,所以对于生产只具有参考意义,不具有指导意义。

4 结束语

便携式结晶器振动监测系统软件的设计过程中,充分考虑了信号离散采样的各种不利因素。

表 4 结晶器空车振动各拉速下的工艺参数数据

Table 4 Process parameters data of the continuous casting mould vibration unloaded

工艺参数	拉速 / (m/min)				
	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
负滑动时间 t_N / s	0.288 5	0.263 1	0.243 8	0.225 4	0.200 2
负滑动时间比 $T_{NSR} / \%$	82.66	81.19	79.94	79.37	78.52
负滑动率 $R_{NS} / \%$	-18.29	-9.33	-2.68	0.05	3.84

利用线性插值法消除了频率计算的误差,采用滑动平均抑制了信号中一些非振动特征的偶然波动对峰峰值的影响。该系统于 2007 年 4 月投入应用,系统的设计满足工业现场的使用要求,能精确地测量结晶器的振动幅值、频率和相位,为结晶器的安全生产提供了科学的依据,有较好的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 陈志新, 阎 瑾, 赵友军, 等. 板坯结晶器振动状态在线监测系统设计与实现 [J]. 冶金自动化, 2001, 25(2): 20-24.
CHEN Zhi-xin, YAN Jin, ZHAO You-jun, et al. Design and realization for an on-line oscillation monitoring system of the slab caster mold [J]. Metallurgical Industry Automation, 2001, 25(2): 20-24.
- [2] 杨文志, 苏凤岐, 陈宏杰. 太钢不锈钢厂连铸机结晶器振动测试及分析 [J]. 包头钢铁学院学报, 2003, 22(1): 59-62.
YANG Wen-zhi, SU Feng-qi, CHEN Hong-jie. The vibration test and analysis of continuous mould crystal device in steelmaking plant of stainless steel of Taiyuan Iron and Steel Co. [J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2003, 22(1): 59-62.
- [3] 陆哲时. 连铸结晶器振动装置在线监测系统的设计与研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [4] 林会明. 连铸机结晶器振动测试分析 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005. [编辑: 夏 宁]

(上接第 30 页)

车位置跟踪技术对于每块台车进行从上料至机尾全过程的数据跟踪,从而为建立终点温度模型提供准确参数。另外,虽然在点火器前可检测到料层厚度数据,但其滞后时间大约为 1.5 min ,同时与台车机速相关,传统的控制方法已不能实现对其进行自

动控制,因此利用系统的建模优势实现了料层自动控制。

参考文献:

- [1] 傅菊英. 烧结球团学 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 1996: 102. [编辑: 魏 方]