

IFAC 第四届国际会议

采矿、选矿、冶金自动化
论文集

(第三分册 冶金自动化)

中国金属学会自动化学术委员会 译
冶金部自动化研究所

前 言

IFAC(国际自动控制联合会)第四届MMM(采矿、选矿、冶金)自动化国际学术会议,于1983年8月22日至25日在芬兰赫尔辛基召开。出席这次会议的正式代表共196人,来自26个国家。我国金属学会冶金自动化学术委员会的3名代表出席了这次会议。

在大会上宣读的论文有3篇,在12个专业分组上宣读的论文共74篇(我国2篇),已汇集成会议论文预印本一卷。这些论文介绍了近年来采、选、冶各领域自动化的新进展,其技术成就已在实际生产中取得了明显的经济效益,显示了自动化技术的重要作用。某些方面值得我们参考和借鉴。

本册汇集了预印本中钢铁自动化方面的27篇分组宣读的论文,及大会宣读的论文1篇——钢厂自动控制系统对节能的作用。由中国金属学会冶金自动化学术委员会和冶金部自动化研究所组织翻译出版。是IFAC第四届国际会议采矿、选矿、冶金自动化论文集的第三分册。(第一分册采矿自动化★、第二分册选矿自动化★)。

编辑工作主要由秦元璇、朱国炳、阎光珠、任冠甲等同志承担。由于论文内容较新,且原文不少语句令人费解,再加之编译者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者予以指正。

1983年2月

前 言

IFAC(国际自动控制联合会)第四届MMM(采矿、选矿、冶金)自动化国际学术会议,于1983年8月22日至25日在芬兰赫尔辛基召开。出席这次会议的正式代表共196人,来自26个国家。我国金属学会冶金自动化学术委员会的3名代表出席了这次会议。

在大会上宣读的论文有3篇,在12个专业分组上宣读的论文共74篇(我国2篇),已汇集成会议论文预印本一卷。这些论文介绍了近年来采、选、冶各领域自动化的新进展,其技术成就已在实际生产中取得了明显的经济效益,显示了自动化技术的重要作用。某些方面值得我们参考和借鉴。

本册汇集了预印本中钢铁自动化方面的27篇分组宣读的论文,及大会宣读的论文1篇—钢厂自动控制系统对节能的作用。由中国金属学会冶金自动化学术委员会和冶金部自动化研究所组织翻译出版。是IFAC第四届国际会议采矿、选矿、冶金自动化论文集的第三分册。(第一分册采矿自动化★、第二分册选矿自动化★)。

编辑工作主要由秦元璇、朱国炳、阎光珠、任冠甲等同志承担。由于论文内容较新,且原文不少语句令人费解,再加之编译者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者予以指正。

1983年2月

★第一分册由长沙矿山研究院负责组织编译出版;第二分册由马鞍山矿山研究院负责组织编译出版。

目 录

连铸坯加热炉的计算机控制系统.....	(1)
热风炉最优化的系统工程方法.....	(9)
采用数学模型制订钢铁生产的计划.....	(19)
钢铁企业能源控制中心及数据处理系统的现代化.....	(27)
钢铁厂节能系统的作用.....	(44)
应用流动能源控制金属加工过程.....	(56)
计算机化冶金联合企业最佳设计的计算机仿真.....	(62)
分析连续铸锭热过程的数学模型的应用.....	(67)
连续浇铸的计算机控制.....	(76)
氧气转炉炼钢的自适应控制.....	(84)
冶金过程金属液面的自动控制.....	(88)
在氧气顶吹转炉上采用微波测量装置预报和控制炉渣喷溅.....	(95)
天车定位自适应系统.....	(102)
鹿岛钢铁厂烧结车间的质量控制系统.....	(112)
金属冶炼厂新型载流X射线分析仪的应用经验.....	(123)
带式输送机系统—计算机辅助技术 (CAE) 及控制系统的应用.....	(134)
使用微分动态规划方法的链篦机球团设备的动态最优化.....	(143)
OVAKO—KOVERHAR钢铁厂的高炉过程控制.....	(154)
冷连轧机轧辊偏心自校正调节器.....	(162)
钢铁工业中冶金过程模型的控制理论观点.....	(169)
带钢冷连轧机厚度控制的研究.....	(183)
冷连轧机轧辊偏心自校正调节器.....	(196)
自动化系统提高冷连轧机的生产率、改善钢板质量和人身安全.....	(202)
板坯轧机的数字式自动化和控制系统.....	(220)
由于轧机模数误差而引起的热带钢轧机AGC系统的稳定性和精度.....	(224)
板材轧制中轧制程序表的在线参数估计.....	(233)
“板坯加热—热带钢轧制”线的初态最优化.....	(239)
计算机控制的冷连轧机.....	(244)

连铸坯加热炉的计算机控制系统

〔日本〕K.Doi, T.Sninmura, T.Ohnishi, T.Kawasumi

摘 要

1981年八月以来, 神户钢铁厂的连铸坯加热炉已应用了一种新的计算机系统, 开发该系统的目的是为了节能、控制质量和自动化操作。新设计的五段加热炉在每一段装设了独立操作的步进梁, 钢坯一般是热装。在新开发的系统中, 为了将燃料的总消耗量减至最低程度, 最佳加热制度是由在线计算来决定的。将燃料消耗量减至最低程度的技术是用线性规划方法实现的。钢坯温度用二维传热方程式计算, 并且用调整炉子温度设定值的办法将其控制到与加热制度相符合。运行结果表明, 燃料消耗量可减少到 $600 \times 10^3 \text{ kJ/t}$, 比人工操作时少10%。铸坯从连铸机起, 装炉、加热及出炉完全自动化传输。

关键词 加热炉; 初轧机; 计算机控制; 线性规划; 差分方程; 温度控制; 节能。

一、前 言

神户钢铁厂的第三初轧车间装备了连铸坯用的步进梁加热炉, 它是和一台生产高质量铸坯的连铸机一起在1981年1月完成的。

预期能大量降低使钢材达到要求的轧制温度的加热炉所需燃料消耗量。此外, 处于连铸和初轧之间的炉子也用做铸坯的热储存, 以便调节两道工序生产能力的差别。考虑到钢坯在炉子里更加复杂的传送方式, 以及保证高质量产品的需要, 钢坯温度必须比人工操作时控制得更精确。因此, 开发了一套用于炉子操作的控制系统, 其目的是节能、改善质量控制和自动化操作。为此目的配备了一台在线过程计算机和8台小型计算机。

该系统的主要功能是:

1. 自动化操作 (装炉、炉内钢坯在两段之间的传送和出炉);
2. 炉温控制 (燃烧控制);
3. 连铸机、炉子和钢坯在各种情况下的信息。

炉子温度控制的突出特点是按照最佳加热制度把钢坯加热到需要的温度, 该加热制度是为减少燃料消耗量而由在线计算结果确定的, 将燃料消耗量减至最低程度的技术是以线性规划方法实现的。

二、炉子和计算机

围绕加热炉附近第三初轧车间的布置示于图1。连铸坯是用专用车 (穿梭式送锭车) 自

动地一根一根地运送并装入炉内，然后加热到约1200℃。

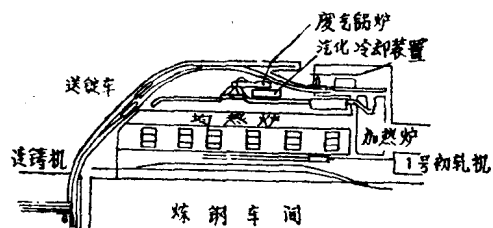


图1 神户钢铁厂的热轧机布置图

炉子的技术条件列于表1，图2是其断面图。新设计的五段加热炉，在每一段装设了单独操作的步进梁，并设计成单独地装炉和出炉（成批操作），以便调节连铸机（90t/h）和初轧机（200t/h）之间生产能力的差别。第三初轧车间是使用在加热炉中加热的铸坯和在均热炉中加热的钢锭来生产方坯料（85~155见方），产品的钢种和规格很多。

表1 加热炉的技术条件

型 式	5—分段步进梁式
控 制 段 数	8段
加 热 能 力	120 t/h
有效长度和宽度	31500mm×12900mm
钢 坯 尺 寸	300mm厚×400mm宽 ×(6000~12100)mm长
燃 料	重 油

控制炉子的计算机配置成如图3所示的层次，每台计算机执行固定的任务。主计算机（IBM3033）是神户钢铁厂的生产控制计算机，炉子的过程计算机（HIDIC—80E，有128 K字的磁芯存储器和2 M字的磁盘存储器）执行钢坯跟踪、钢坯温度控制和操作员的指导。DDC系统由六台小型计算机组成，它控制燃烧和滑道热水器（汽化冷却系统）。两台小型机（程序装置）控制穿梭式送锭车、辊道和步进梁。

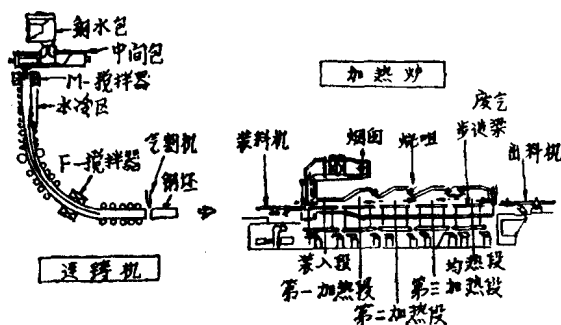


图2 连铸机和加热炉的断面图

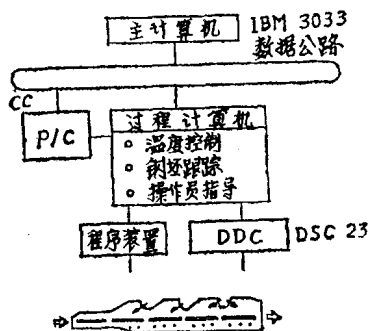


图3 计算机控制系统的设备配置

三、炉子的控制系统

1. 炉子的自动操作

不同长度的连铸坯借助于挡板控制被自动地装入炉内，入炉后按氧气顶吹转炉的炉次将钢坯分组，而后，同样性能(钢种、厚度、宽度、装炉时的温度)的一组钢坯成组自动地送向均热段，如图4所示。这些都是由一台过程计算机和两台小型机所控制的独立的步进梁来实现。由于这样编组，钢坯温度控制更加有效，而且过程计算机的负荷减轻了。

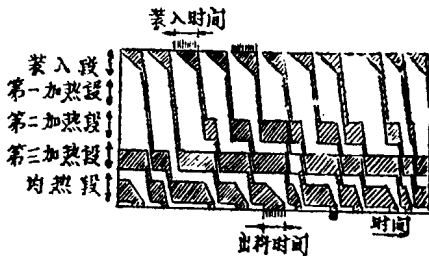


图4 钢坯在炉内的传送制度

2. 钢坯温度控制

在连续加热炉的一些传统的控制系统中，材料(板坯、方坯、钢锭)是按离线计算所决定的规定的加热制度来加热的。

在这个炉子中，因为是成批操作，钢坯在炉内传送比在连续加热炉中更复杂，因此，靠离线计算来决定加热制度是困难的。最佳的加热制度是在一组钢坯

送入加热段之后才确定和更新的。图5所示的钢坯温度控制系统包含下列程序：

- (1) 入炉时钢坯温度的估计；
- (2) 编制钢坯在炉内传送的程序表；
- (3) 计算炉内的钢坯温度；
- (4) 确定最佳加热制度；
- (5) 计算炉温设定值。

3. 装炉时的钢坯温度

因为大部分钢坯是热装炉的，需要估计装炉时的钢坯温度。用一个二维的热传导方程来计算钢坯的温度梯度

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

式中 c ——比热， ρ ——比重， λ ——导热率， θ ——钢坯温度， t ——时间

因为钢坯在铸造和传送时反复被水冷却、空气冷却、以及与导辊接触而冷却，钢坯表面的临界条件是：

$$\lambda\frac{\partial\theta}{\partial x}=\lambda\frac{\partial\theta}{\partial y}=\alpha(Q_a-Q_w) \quad (2)$$

α ——传热系数， Q_a ——钢坯表面温度， Q_w ——水的、空气或辊子的温度。

钢坯的断面分割成9乘9的网格。假设在钢坯内部温度梯度是对称的，用有限差分法对四分之一的断面以数值求解热传导方程。如图6所示，我们用离线仿真的办法得到当冷却时钢坯表面和内部温度的关系，装炉时钢坯内部的温度是借助于这个关系(即图6)和测量钢坯表面温度来估计的。表面温度是用装在炉子入口处的高温计测量的。

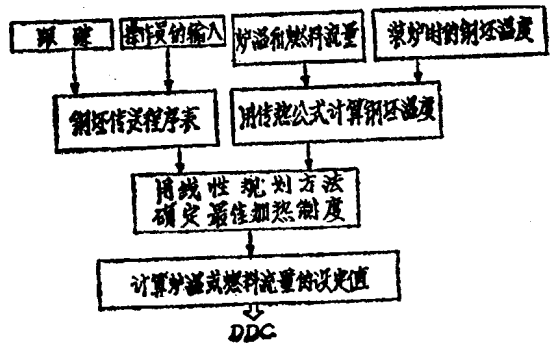


图5 钢坯温度控制系统的结构

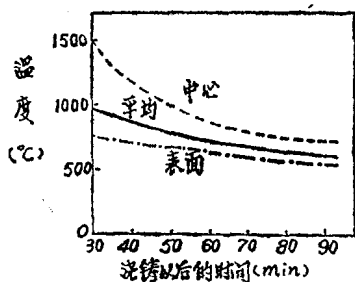


图6 装炉时钢坯温度的仿真

4. 炉内的钢坯温度

测量炉内钢坯温度，特别是测量其内部温度是不可能的，因此有必要估计在加热中的钢坯温度，以便控制它。在加热炉中的传热被认为是通过对流、传导和辐射进行的，而在此系统中全部对流效应被忽略不计。当炉温足够高时，假定实际上炉子对钢坯全部由辐射传热，因此传热取决于斯梯芬一波耳兹曼的四次方定律。从炉子到钢坯的上部（或底部）表面的传热为

$$q_u = 4.88 \phi_{ccu} \left\{ \left(\frac{T_{fu} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_u + 273}{100} \right)^4 \right\} \quad (3)$$

式中 q_u ——从炉子到钢坯上表面的传热； ϕ_{ccu} ——有效辐射系数； T_{fu} ——炉壁温度； θ_u ——上表面温度。

考虑如图7所示的视角因数，从炉子到钢坯侧表面的传热为

$$\begin{aligned} q_s = 4.88 \phi_{ccs} \cdot \left\{ \frac{1}{2} (1 - \cos\beta) \left\{ \left(\frac{T_{fu} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s + 273}{100} \right)^4 \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (\cos\beta + \cos\gamma) \left\{ \left(\frac{\theta_a + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s + 273}{100} \right)^4 \right\} \right. \\ \left. + \frac{1}{2} (1 - \cos\gamma) \left\{ \left(\frac{T_{fl} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_s + 273}{100} \right)^4 \right\} \right\} \quad (4) \end{aligned}$$

式中 q_s ——从炉子到侧表面的传热； θ_a ——对面的钢坯侧表面温度； θ_s ——侧表面温度； β, γ ——图7所示的角度。

同时，钢坯内部的热流用一个二维热传导方程式（即方程(1)）来计算，边界条件是

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} = q_s \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_u (q_L) \quad (6)$$

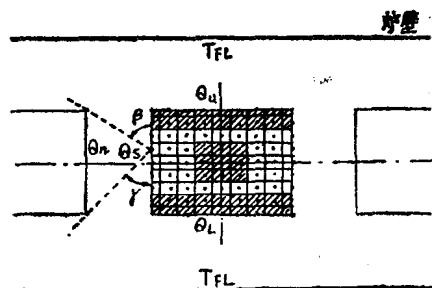


图7 钢坯横断面的网格分布

钢坯的断面被分割成9乘9的网格，这些方程式用有限差分法以数值求解。炉内所有钢坯的温度每16秒计算一次。为了确定 ϕ_{cc} 值，并进一步确认钢坯温度的计算精度，用一台耐热的数据记录器测量炉内钢坯温度。记录器（具有8K字节的存储器）与埋在一块钢坯内的12支热电偶连接，这个记录器放在这块钢坯上，如图8所示。然后将它和钢坯一起装入炉内并通过整个炉子，这样，在加热的同时钢坯温度被记录下来。测量温度和计算温度的比较示于图9。此数据是将一块钢坯装炉加热一次出炉后再与从连铸机传送过来的热装钢坯一起加热的

办法得到的，测量的温度和计算的温度可以说是很一致的。

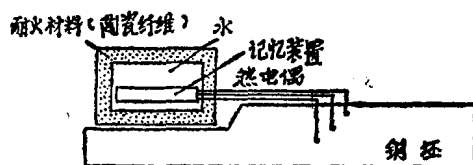


图8 耐热的数据记录器

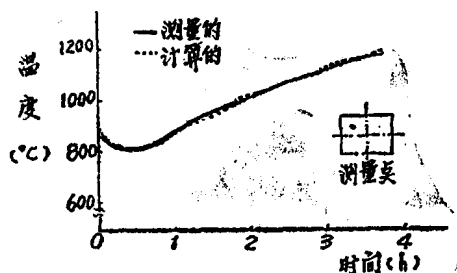


图9 测量温度和计算温度的比较

5. 编制程序表

为了确定最佳加热制度，需要制定每组钢坯在每个被控制的区段内停留的时间，以及每块钢坯的出炉时间。计及一组钢坯的出炉时间、取决于产品尺寸的预定轧机停轧时间和每块钢坯的出炉时间间隔，制表程序的执行从停在均热段的那一组钢坯开始。

在下列情况程序表要修订：

- (1) 预计的程序表和实际程序表之间的差值大于一定值时；
- (2) 当出炉时间变更时（操作员的输入）；
- (3) 当一组钢坯被传送到下一段时。

6. 最佳加热制度

在此系统中，所制定的最佳加热制度是为了将每组钢坯从进炉到出炉时间的燃料消耗量减至最低限度，而且必须服从下列约束条件：

- (1) 出炉时钢坯的平均温度必须高于对特定的钢种规定的温度；
- (2) 出炉时钢坯的表面和中心温度差必须小于规定值；
- (3) 每段的温度和燃料流量不得超出炉子的能力。

上述约束条件可列式表达如下：

$$\theta_E^L \leq \theta_E \quad (7)$$

$$\Delta \theta_E \leq \Delta \theta_E^U \quad (8)$$

$$V_i \leq V_i^U \quad (9)$$

$$T_i^L \leq T_i \leq T_i^U \quad (10)$$

$$\sigma^L \leq (T_{i+1} - T_i) / T_i \leq \sigma^U \quad (11)$$

式中 θ_E ——出炉时钢坯平均温度； $\Delta \theta_E$ ——出炉时钢坯表面和中心温度差； V_i ——第*i*段的燃料流量； T_i ——第*i*段的温度； σ ——相邻两段的温度差； L ——下限， U ——上限。

将一组钢坯在炉内停留的时间分成*n*个区段 ($\Delta \tau_1 + \Delta \tau_2 + \dots + \Delta \tau_n$)，如图11所示，得出如下函数

$$J = V_1 \cdot \Delta \tau_1 + V_2 \cdot \Delta \tau_2 + \dots + V_n \cdot \Delta \tau_n \quad (12)$$

因此，通过求上述函数最小值来实现最佳化。从第*i*段的热平衡得出该段的燃料流量 (V_i)，

如图10所示。

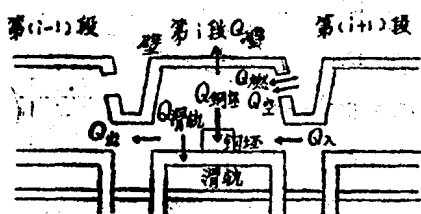


图10 第i段的热平衡

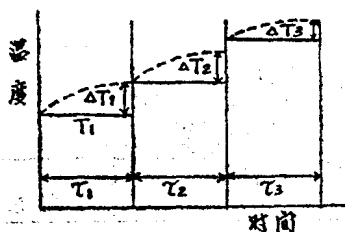


图11 分段

$$Q_{\lambda} + Q_{\text{燃}} + Q_{\text{空}} = Q_{\text{出}} + Q_{\text{坯}} + Q_{\text{壁}} + Q_{\text{轨}} \quad (13)$$

式中 Q_{λ} ——从 $(i+1)$ 段来的废气的显热； $Q_{\text{燃}}$ ——燃料的含热量； $Q_{\text{空}}$ ——预热空气的显热； $Q_{\text{出}}$ ——到 $(i-1)$ 段去的废气显热； $Q_{\text{坯}}$ ——在 i 段从炉子向钢坯的传热； $Q_{\text{壁}}$ ——炉壁的热损失； $Q_{\text{轨}}$ ——炉底滑管的热损失。

$$\text{并且 } Q_{\lambda} = V_{\text{w}} \cdot V_{i+1} \cdot C_{\text{c}} \cdot T_{i+1} \quad (14)$$

$$Q_{\text{燃}} = V_1 \cdot H \quad (15)$$

$$Q_{\text{空}} = a \cdot A_0 \cdot C_{\text{A}} \cdot \theta_{\text{A}} \cdot V_i \quad (16)$$

$$Q_{\text{出}} = V_{\text{w}} (V_{i+1} + V_i) \cdot C_{\text{c}} \cdot T_i \quad (17)$$

$$Q_{\text{坯}} = \sum (q_{\text{v}} + q_{\text{L}} + q_{\text{s}}) \quad (18)$$

$$Q_{\text{壁}} = C_1 \cdot T_i \quad (19)$$

$$Q_{\text{轨}} = C_2 \cdot T_i \quad (20)$$

式中 V_{w} ——单位燃料量的废气体积； V_{i+1} —— $(i+1)$ 段的燃料流量； C_{c} ——废气的比热； T_{i+1} —— $(i+1)$ 段的炉温； H ——热值； a ——过剩空气系数； A_0 ——理论空气量； C_{A} ——预热空气的比热； θ_{A} ——预热空气的温度； C_1 ——常数，决定于炉子的区段； C_2 ——常数，决定于炉子的区段。因此，燃料流量为

$$V_1 = \left[\sum (q_{\text{v}} + q_{\text{L}} + q_{\text{s}}) + (C_1 + C_2) \cdot T_i - V_{\text{w}} \cdot V_{i+1} \cdot (C_{\text{c}} \cdot T_{i+1} - C_{\text{c}} \cdot T_i) \right] / \left[H - V_{\text{w}} \cdot C_{\text{c}} \cdot T_i + a \cdot A_0 \cdot C_{\text{A}} \cdot \theta_{\text{A}} \right] \quad (21)$$

V_1 也是 T_i 的函数。然而公式(7)到(12)构成了一个非线性问题，因此要解决这个问题就超出了过程计算机的能力。既然这样，可将 θ_{e} 、 $\Delta \theta_{\text{e}}$ 和 V_i 线性化。假设随着炉温很小的变化

$$(\Delta T_i), \frac{\partial \theta_{\text{e}}}{\partial T_i}, \frac{\partial \Delta \theta_{\text{e}}}{\partial T_i} \text{ 和 } \frac{\partial V_i}{\partial T_i} \text{ 近似为常数。}$$

式中 $\theta_{\text{e}0}$ ——用 T_i 的初始值计算出的出炉时钢坯的温度； $\Delta \theta_{\text{e}0}$ ——用 T_i 的初始值计算出的出炉时钢坯表面和中心温度之差； V_{i0} ——用 T_i 的初始值计算出的 i 段的燃料流量。

这样，公式(7)到(12)就变成了线性规划问题，而且 $\hat{\Delta T}_i$ 的解可以在较短时间用简化的方法得到。如同钢坯平均温度那样，钢坯组的最佳加热制度由 $\hat{\Delta T}_i$ 和公式(3)到(6)导出。

实际上， τ_i 等于在第 1、2、3 加热段中每一个控制段的停留时间，并且等于在均热段中停留时间的三分之一。用于分段最佳化的炉温分布是一条确定的曲线，如图11所示，与实际的一致。

确定最佳加热制度的程序在下列情况下执行:

- (1) 当程序表需要更新时;
- (2) 当被装入的一组钢坯传送到控制段时;
- (3) 每30分钟。

7. 设定值

为了使同一段内所有钢坯的平均温度与该段的最佳加热制度相符, 炉温或燃料流量的设定值是针对每一段来决定的, 并且每2.5分钟向DDC系统传送一次。

8. 燃烧控制

DDC系统借助于过程计算机传送来的设定值进行炉温和燃料流量的直接数字控制, 并且进行炉子的 O_2 量和压力控制。 O_2 量控制的结果使燃料消耗量和废气中 NO_x 含量降低。

四、人一机联系

本系统有五台CRT和键盘, 安装在初轧生产线上的炉子控制室和精轧区控制室中, 用于人一机联系。因此, 操作员可以用键盘改变出炉时间和规定的出炉温度。当最佳加热制度的可行解在最佳化的处理过程中未得到时, 过程计算机则为操作员在CRT上显示报警信息, 图12是CRT显示的例子, 其中显示的有炉内钢坯温度、加热制度、连铸机有关情况的信息等。

(因图12的原稿很不清晰, 故删此图——编者注)

五、运行结果

从1981年8月以来, 本系统已在炉子上应用, 图13所示是一个炉温控制的实例。虽然均热段和第三加热段的炉温波动较大, 但出炉钢坯的平均温度被控制在离预定值 $20^\circ C$ 以内。最佳加热制度大约每15分钟更新一次。如图14所示, 燃料消耗量降低到 $600 \times 10^3 kJ/t$, 就是说比人工操作时减少10%。

铸坯完全自动地从连铸机输送过来装入炉内, 并以最小的燃料消耗量进行加热和自动出炉, 因此操作员只凭观察CRT显示和仪表即可管理炉子和钢坯的流通。

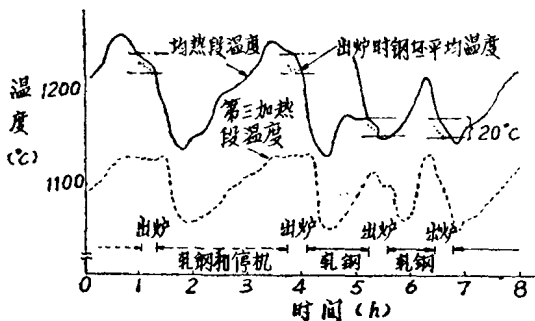


图13 炉子控制的例子

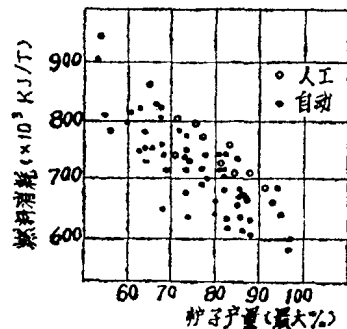


图14 燃料消耗量和炉子产量(每日)的关系

六、概 要

从1981年8月以来开发了计算机控制系统并已应用于连铸坯的加热炉,该炉子完全是自动化操作,燃料消耗降低到 $600 \times 10^3 \text{kJ/t}$ 。

(阎光珠译 曹桂苏校)

热风炉最优化的系统工程方法

〔日本〕 Kazuo Nose, Michinobu Takemura, Tohru Morita

摘 要

在本文中,确立了一种寻求热风炉系统热效率高的条件的系统工程方法;一个非线性最优化问题已经公式化;建立了一个具有余热回收装置的炉子系统的数学模型,用这个模型,提供了许多与送给高炉的热风和炉子系统固定周期的操作有关的约束条件,性能指标是炉子系统的热效率;在非线性最优化过程中,采用了GRG方法;炉子系统的操作工况和设计参数对热效率的影响,对三炉系统和四炉系统作了考查。

关键词 钢铁工业;热风炉系统;余热回收;能源控制;最优化;非线性程序设计。

一、引 言

热风炉占用炼铁炼钢工厂燃料能源消耗总量的大约30%。因此,它在节能上是十分重要的。

在热风炉装置中,热风温度是1200~1300℃,因此采用了使用耐火材料的再生式换热器。一般,一座高炉用三座或四座热风炉。每座热风炉装置,如图1所示,由燃料室和蓄热

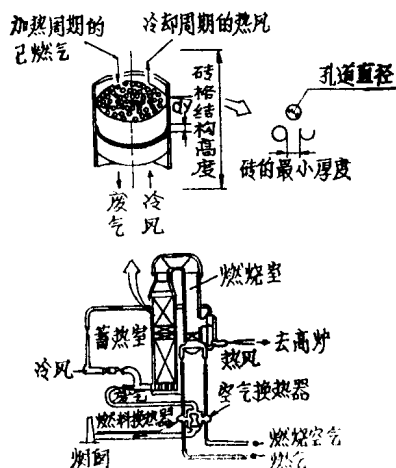


图1 热风炉系统

格子砖构成的蓄热室组成。每个操作过程,包括一个加热期,此时已燃气的热量积蓄在蓄热室内;和一个冷却期,此时积蓄的热量传到送向高炉的风流中。有两种鼓风程序如图2所示。一种是一座炉子送热风,其余的炉子加热,部分冷风从支管分流,出炉的热风与其混合,具有要求温度的热风由控制冷风的分流量来得到。另一种是两座炉子送热风,其余的炉子加热,它们的操作按时轮换,出炉的两股热风的温度互不相同,两热风流混合,具有要求温度的热风由控制两炉的风量分配来得到。前者用于三炉系统,后者用于四炉系统。因此,当考虑热风炉节能时,必须把握从结构和耐火的观点对温度的限制,对应于高炉的鼓风情况来考虑热风炉的操作系统。

本文的目的是应用系统工程方法来寻求热风炉系统热效率高的条件。一个非线性最优化问题已经公式化,用于改善炉子系统的效能。经详细研究燃烧和热交换现象,建立了一个具有

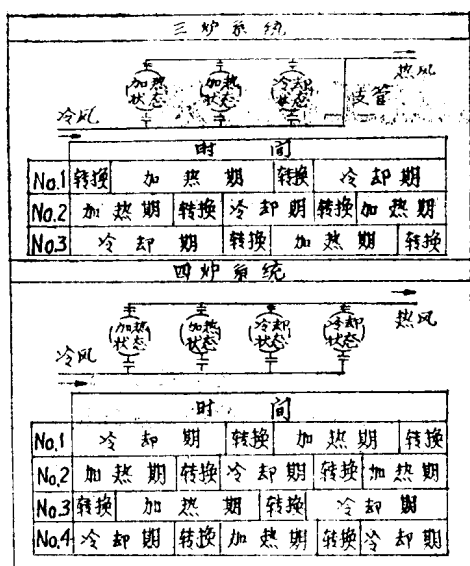


图2 鼓风流通系统比较

废气余热回收装置的炉子系统的数学模型，用这个模型，提供了许多与送给高炉的热风和炉子系统固定周期的操作有关的约束条件。所用判据是炉子系统的热效率。在非线形最优化过程中，采用了通用的简化梯度 (GRG) 法 (Lasdon, et al., 1975)。炉子系统的操作工况和设计参数对热效率的影响，在三炉系统和四炉系统上作了考查。也讨论了燃料特性的影响和设备的改进。

在以前的文献中，Kwakernaak, et al. (1970) 用非线性最优化方法研究过热风炉系统的最优操作。但是，他们的系统模型未充分地详细地讨论燃料特性和余热回收装置的设置，而这正是我们感兴趣的。

二、数学模型

我们从建立燃烧现象的数学模型开始。

1. 燃烧

一般，热风炉是固定炉顶温度操作的。炉顶温度是以焦炉煤气 (COG) 和高炉煤气 (BFG) 的混合燃气的热值来控制的。已燃气体的温度由热平衡来计算：

$$T_c = \frac{H_m + \gamma \bar{C}_c T_c' + (1 - \gamma) \bar{C}_B T_B' + \alpha A \bar{C}_A T_A'}{V_c \bar{C}_c} \quad (1)$$

其中： γ 是气体混合比 (COG 体积 / 混合煤气体积)；

H_m 是混合煤气的热值；

$\bar{C}_A$ 、 $\bar{C}_B$ 、 $\bar{C}_c$ 和 $\bar{C}_c$ 分别是 COG、BFG、燃烧空气和已燃气的平均比热；

T_c' 、 T_B' 、 T_A' 和 T_c 分别是 COG、BFG、燃烧空气和已燃气的温度；

A 是理论燃烧空气体积 / 混合煤气体积；

α 是过剩空气系数；

V_c 是已燃气体积 / 混合煤气体积。

实际炉顶温度可能是进入蓄热室顶部的气体温度，比用方程式 (1) 得到的理论燃烧温度低。于是炉顶温度由下式获得：

$$T_b = \eta_r T_c \quad (2)$$

式中 T_b 是炉顶温度,

η_r 是燃烧温度对炉顶温度的有效系数。

2. 蓄热室里的传热

对蓄热室里的传热作了下列假设, 它保证了精确度, 而且简化了模型。

1) 相对于蓄热室砖格的热容量, 砖格孔道内的气体的热容量小到可以不计。

2) 垂直方向的传热小到可以不计。

3) 砖格内的横向热状态, 可以用校正气体与孔道壁之间的传热系数的办法来估计。

传热方程的概要如下。

(1) 基本方程

砖格里的传热用偏微分方程描述 (Butterfield, et al., 1963)。

$$C_g(T) V(\tau) \frac{\partial T(\tau, y)}{\partial y} = q(\tau, y) \quad (3)$$

$$m(y) C_s(t, y) \frac{\partial t(\tau, y)}{\partial \tau} = q(\tau, y) \quad (4)$$

其中 C_g 和 C_s 分别为气体和砖格的比热,

V 是气体的质量流量,

T 和 t 分别为气体和砖格的温度,

q 是传热量/单位高度/单位时间,

m 是砖格的质量/单位高度,

τ 是时间,

y 是沿气体流向的垂直距离座标。

边界条件是

$$\left. \begin{aligned} T_1(\tau_1, 0) &= T_b, & 0 \leq \tau_1 \leq P_1 \\ T_2(\tau_2, 0) &= T_c, & 0 \leq \tau_2 \leq P_2 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 T_c 是冷风进口温度,

P_1 和 P_2 分别是加热期和冷却期的持续时间。

下标 1 指示加热期, 下标 2 指示冷却期。初始条件为

$$\left. \begin{aligned} t_1(P_1, y) &= t_2(0, H-y) \\ t_2(P_2, H-y) &= t_1(0, y) \end{aligned} \right\} \quad 0 \leq y \leq H \quad (6)$$

其中 H 是砖格结构的高度。

(2) 传热率

冷却期, 热量是以对流的方式从砖格传向鼓风; 加热期, 热量是以辐射和对流的方式从已燃气传向砖格。对流传热率 q_c 为

$$q_c = \alpha_c \cdot (T - t) \quad (7)$$

其中 α_c 是粗糙孔道对流传热系数。辐射传热率 q_r 为

$$q_r = \frac{\sigma \epsilon_s \epsilon_g}{\epsilon_s + \epsilon_g - \epsilon_s \epsilon_g} \left\{ (T + 273)^4 - (t + 273)^4 \right\} \quad (8)$$

其中 σ 是斯蒂芬—波尔兹曼常数,

ϵ_s 和 ϵ_g 分别是砖格和已燃气的辐射系数。

还应考虑向外界的热损失。从蓄热室表面向外界的热量 q_1 , 用如下常见方程计算。

$$q_1 = \alpha_1 \cdot (t - T_A) \quad (9)$$

其中 α_1 是表面与外界之间的传热系数,

T_A 是外界的温度。

因此, 总传热量为

$$q = \pi \cdot \Phi \cdot \frac{D^2}{d} \cdot (q_c + q_r) - \pi \cdot D \cdot q_1 \quad (10)$$

其中 Φ 是有效截面/蓄热室砖格的横截面,

D 和 d 分别为蓄热室砖格和孔道的直径。

三、非线性最优化

支配热风炉内传热的基本方程已经建立。其计算方案介绍于下。

1. 离散化

设想在炉内沿气流方向有等距离向上分布的点 $1, 2, \dots, M+1$, 并设 $\Delta y = H/M$, 沿时间轴设置 N 个等长 $\Delta \tau$ 的时间间隔, 并设 $\Delta \tau = P/N$ 。

离散化方程(3)和(4)给出

$$T(K, i+1) = T(K, i) - \frac{\Delta y}{C_g V(K)} q(K, i) \quad (11)$$

$$t(K+1, i) = t(k, i) + \frac{\Delta \tau}{m C_s(i)} q(k, i) \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, M; \quad K = 1, 2, \dots, N$$

其中 $T(k, i)$ 是在 K 时和 i 点的气体温度,

$t(k, i)$ 是在 K 时, i 到 $i+1$ 区间内的砖格温度,

$q(k, i)$ 是在 K 到 $K+1$ 时间内, i 到 $i+1$ 区间内的传热量,

$V(K)$ 是在 K 到 $K+1$ 时间内气体的流量。

边界条件为

$$\left. \begin{aligned} T_1(k_1, 1) &= T_b; \quad K_1 = 1, 2, \dots, N_1 \\ T_2(K_2, 1) &= T_c; \quad K_2 = 1, 2, \dots, N_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

初始条件为

$$\left. \begin{aligned} t_1(N_1 + 1, i) &= t_2(1, M - i + 1) \\ t_2(N_2 + 1, M - i + 1) &= t_1(1, i) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$i = 1, 2, \dots, M$$

为了简化后面的叙述, 设

$$\bar{T}(K) = T(K, M + 1) + \frac{1}{2} [t(K, M) + t(K + 1, M)] \quad (15)$$

$$h(T) = \bar{C}_{g2}(T) \cdot T \quad (16)$$

2. 具有冷风支管的三炉系统

在这种装置中, 两座炉子加热, 一座炉子送热风。由于出炉的热风温度随时间的推移而降低, 且热风与支管冷风混合以获得所需温度的热风, 因此得出下列条件:

$$V_2(K_2) + V_c(K_2) = V_b \quad (17)$$

$$\frac{V_2(K_2)h(\bar{T}_2(K_2) - \Delta T_2') + V_c(K_2)h(T_c)}{V_b \bar{C}_{g2}(T_b + \Delta T_2'')} = T_b + \Delta T_2'' \quad (18)$$

其中 V_c 是冷风支管流量;

V_b 是需要的热风流量;

T_b 是要求的热风温度;

$\Delta T_2'$ 是炉子与混风室之间的热风温度降;

$\Delta T_2''$ 是混风室与高炉之间的热风温度降。

3. 无冷风支管的四炉系统

在这种配置中, 两座炉子加热, 另两座炉子同时供热风。具有要求温度的热风, 由混合两炉的热风而得到。因此, 得到下列条件:

$$V_2(K_2) + V_2(K_2 + \frac{N_2}{2}) = V_b \quad (19)$$

$$\frac{V_2(K_2)h(\bar{T}_2(K_2) - \Delta T_2') + V_2(K_2 + \frac{N_2}{2})h(\bar{T}_2(K_2 + \frac{N_2}{2}) - \Delta T_2')}{V_b \bar{C}_{g2}(T_b + \Delta T_2'')} = T_b + \Delta T_2'' \quad (20)$$

$$k_2 = 1, 2, \dots, N_2 / 2$$