

稍做一下改动, 即令隐式欧拉方法的分额占 D_F (显然有 $0 \leq D_F \leq 1$), 显式欧拉方法的分额占 $1 - D_F$, 连同上述三种方法一起, 可写成统一的差分格式

$$\begin{aligned} X &= X' + \frac{\sum B_i(X_i - X')}{A/\Delta t + D_F \sum B_i} \quad (10) \\ &= X' + \frac{\Delta t \sum B_i(X_i - X')}{A(1 + D_F T_D)} \end{aligned}$$

当 D_F 分别等于 0、1 和 0.5 时, 方程(10)正好对应着显式欧拉方法、隐式欧拉方法和梯形方法。

4 数值解的稳定性分析

现在讨论各差分方法解的稳定性。根据数值分析的方法, 一般用模型方程来检验, 模型方程为^[3]

$$\frac{dX}{dt} = \lambda X \quad (11)$$

为保证计算的稳定性, 应取 $\lambda < 0$ 。将方程(1)和方程(11)对比, 可得 λ 为

$$\lambda = -\frac{\sum B_i}{A} = -\frac{1}{T_C} \quad (12)$$

由于 T_C 总是正值, 故 λ 恒为负值。

将统一差分方程(10)代入模型方程, 可解出 X 为

$$X = \frac{1 - \Delta t(1 - D_F)/T_C}{1 + \Delta t(1 + D_F)/T_C} X' \quad (13)$$

解的稳定条件为

$$\left| \frac{1 - \Delta t(1 - D_F)/T_C}{1 + \Delta t(1 + D_F)/T_C} \right| \leq 1 \quad (14)$$

解此不等式, 当 $D_F < 0.5$ 时, 稳定域为

$$0 \leq \Delta t \leq \frac{2T_C}{1 - 2D_F} \quad (15)$$

当 $0.5 \leq D_F \leq 1$ 时, 稳定域为

$$0 \leq \Delta t \leq \infty \quad (16)$$

由此可见, 显式欧拉算法条件稳定, 稳定域为 $\Delta t \leq 2T_C$ 。隐式欧拉算法和梯形算法恒稳定, 也就是说, 只要 $0.5 \leq D_F \leq 1$, 用统一差分方程(10)来求解方程(1)都是恒稳定的。

5 动态因子方法

根据上面的稳定性分析可知, 既然 D_F 在区间 $[0.5, 1]$ 内取值解都是稳定的, 那么不一定非采用隐式欧拉方法或梯形方法不可, 但是为得到更好的计算结果, D_F 也不能任意取值。由数值分析理论可

知, 梯形方法和隐式欧拉方法的误差符号相反, 根据介值定理, 与解析解对应的 D_F 必然在区间 $[0.5, 1]$ 上取得, 因此, 令方程(10)和(6)相等, 得

$$\begin{aligned} X' + \frac{\sum B_i(X_i - X')}{A/\Delta t + D_F \sum B_i} & \quad (17) \\ &= \frac{\sum B_i X_i - (\sum B_i(X_i - X'))e^{-T_D}}{\sum B_i} \end{aligned}$$

把 X' 移到等式的右边并与 $\sum B_i X_i$ 项合并在一起, 并约去方程中的 $\sum B_i(X_i - X')$ 项, 再利用式(8)化简, 可解出 D_F 为

$$D_F = \frac{T_D - 1 + e^{-T_D}}{T_D(1 - e^{-T_D})} \quad (18)$$

可见, 为了获得精确的解, D_F 不能任意选择, 必须由式(18)来确定, 而且 D_F 只是 T_D 的函数。对于不同的热力设备或同一设备的不同时间来说, T_D 是变化的, 故 D_F 是变量。另外, 从方程(10)中可以看出, D_F 只有在动态过程才起作用而在静态过程即平衡状态下并不起作用, 因而有理由把 D_F 称作动态因子。

当 $T_D \rightarrow \infty$ 时, 方程(18)的右边是 ∞/∞ 型不定式, 根据高等数学中罗必塔法则可求出 $D_F = 1$ 。当 $T_D \rightarrow 0$ 时, 方程(18)的右边是 $0/0$ 型不定式, 同理, 得 $D_F = 1/2$ 。

D_F 的上、下限正好对应于隐式欧拉方法和梯形方法, 从而证明了在差分算法中, 这两种方法只有在极特殊的情况下才能得到比较精确的解, 即只有当 T_D 较大也即 T_C 较小时采用隐式欧拉方法才合适, 梯形方法则正好相反。对于时间常数很小的热力设备, 可忽略其动态变化过程, 模型可按静态处理, 隐式欧拉方法已显得不必要。然而, 火电厂仿真所描述的热力设备其时间常数虽然各不相同, 但它既不趋于无穷大, 也不趋于零, 一般是在零点几秒到几十秒之间, 而仿真步长(和时帧相对应)一般为 250 毫秒至 1 秒, 美国较先进的仿真机已采用步长为 50 毫秒^[4]。在这么大的时间常数范围内, 无论是采用隐式欧拉方法还是采用梯形方法, 都不可避免地存在着加扰动后动态过程尤其是在扰动后的初瞬时计算误差大的问题。其中 X_1 和 X_2 分别表示第一步和第二步或相邻两步的计算结果。

将式(26)代入(27), 仍采用前面的方法, 经推导可得

$$\frac{8T_D}{(T_D + 2)^2} \geq e^{-2T_D} \quad (28)$$

同理,对于 X 大于稳态值的情况,只需把方程(26)和(27)中的不等式符号 \geq 改成 \leq 即可,并注意到此时 $\sum B_i (X_i - X)$ 项小于 0,消去该项时不等式要再次改变符号,最后推得的结果仍为式(28)。

不等式(28)也有两个解,一个解是 $T_D = 0$,此时不等式需取等号,另一个解是

$$T_D \leq 2.399358 \dots \quad (29)$$

由此得到梯形方法的解不发生振荡的判定准则。

6 结论

(1)若联合采用隐式欧拉方法和梯形方法,则存在可使动态误差减小的判定准则,当 $T_D = 2.589754$ 时,两种方法的误差相等,若 T_D 小于此值,相应于时间常数较大的慢过程,应采用梯形方法,否则应采用隐式欧拉方法。

(2)要进一步提高仿真精度,应根据方程(18)所确定的动态因子作适当的拟合曲线来逼近解析解,

这样就可以从根本上解决隐式欧拉方法和梯形方法在动态过程中计算不准的问题。

(3)梯形方法的解不产生振荡的判定准则是 $T_D \leq 2.399358$ 。

(4)虽然梯形公式的计算精度是二阶的,但在一定条件下,它的计算误差才小于只有一阶精度的隐式欧拉方法的计算误差,不能认为二阶精度的方法就一定比一阶精度的方法的计算误差小。

参考文献

[1] 丁萃菁. 换热设备动态特性计算. 水利电力出版社, 1993.
 [2] 倪维斗, 徐基豫 主编. 自动调节原理与透平机械自动调节(第二版). 机械工业出版社, 1990.
 [3] 李庆扬, 王有超, 易大义. 数值分析. 华中工学院出版社, 1982.
 [4] 王扬. 大型火电厂仿真技术的现代进展. 系统仿真学报, 1995, 5(4): 2~6.

作者简介 老大中, 男, 1957 年生, 副教授. 1995 至 1997 年在清华大学热能系动力工程及工程热物理博士后流动站做博士后. 目前在北京理工大学机电工程学院任教. 曾三次获得省部级科技进步奖, 已在国内外发表论文 10 余篇。

(渠源 编辑)

(上接 207 页)

由 15.1% 下降至 12.5%。空一燃比对于 NO 排放量也有较大影响, 当空一燃比由 2.203 减少到 1.186 时, 计算的 NO 转换率由 20.3% 下降至 6.40%。对于 NO 生成和还原反应的累积反应速率表明, 床内 CO 的浓度和焦炭含量对于 NO 的还原反应和挥发分 N 转化为 NO 和 N₂ 的反应起着非常重要的作用。而 H₂ 对 NO 的反应影响不大。气体均相反应对于床内燃料 N 的反应几乎没有影响。

参考文献

[1] LaNause R D et al. Fluidized combustion of coal washery wastes. Fluidization. Grace J R, Marsen J M, Eds. 1980.
 [2] Pourkashanian M, et al. The combustion of coalwater slurries. The proceeding of the first european conferene on coal liquid mixtures, Cheltenham (U. K); 1983.
 [3] Arena U, et al. CoalWater slurry utilization in fluidized bed combustion. The proceeding of the 7th International symposium on coal slurry combustion and technology. Orlando, Fla. 1984.
 [4] 倪明江等. 煤水混合物在流化床燃烧过程中的凝聚结团现象. 浙江大学学报, 1986, 20(6): 38~45.
 [5] 张永照, 牛长山. 环境保护和综合利用(修订版). 机械工业出版社, 1989; 25~105.

[6] 曾汉才. 燃烧与污染. 华中理工大学出版社, 1992; 26~130.
 [7] Johnson J E. A kinetic model for NO_x Fomation in fluidized bed combustion the proceeding of the 1989 Intemational Conference on FBC. 1989; 1111~1118.
 [8] Chan L K, Sarofim A F, Beer J M. Kinetic of the NO-Carbin reaction at fluidized bed conditions. Combustion and Flame, 1983, 52: 37~45.
 [9] Furusawa T, Tsujimura M, Yasunaga K, et al. Fate of fuel bound nitrogen within fluidized-bed combustor under staged air firing. Proceedings of the 8th International Conference on Fluidized Bed Combustion, 1985; 1095~1104.
 [10] Kuni D, Wu K T, Furusawa T. NO_x emission control from a fluidized bed combustor of coal. Chemical engineering science. 1980, 35; 170~177.
 [11] Lyon R K. Thermal NO_x. environmental science and technology. 1987, 21(3): 231~236.
 [12] Furusawa T, Tsunoda M, Kuni D. Nitric oxide reduction by hydrogen and carbon monoxide over Char Surface. Chemical Reaction Engineering-Boston. ACS Symposium Series, 1982; 347~357.
 [13] 魏小林, 盛宏至, 孙文超等. 流化床中高水分煤的燃烧与排放试验研究. 燃烧科学与技术. 1997, 3(3): 264~269.

作者简介 魏小林, 男, 31 岁, 西安交通大学热能工程专业毕业, 工学博士. 现从事煤燃烧、废弃物焚烧等方面的工作, 已发表相关论文十余篇。(邮编 100080 北京)

(渠源 编辑)

树皮在流化床锅炉中干燥时间的计算

(哈尔滨工业大学) 赵广播 黄怡珉 高志宏 秦裕琨
(大庆市劳动局锅炉检验所) 王绍安

[摘要] 得到了树皮在流化床中的恒速段干燥时间、降速段干燥时间、从临界点对应温度升高到着火温度所用时间及临界湿含量的计算公式。以某一流化床锅炉为例,进行了树皮干燥时间的计算。

关键词 流化床锅炉 树皮 干燥

中图分类号 TK229.6

1 引言

以木材为原料的造纸企业的废弃物树皮,可送入流化床锅炉中燃烧以利用其热量。树皮属高水分燃料,进入流化床中后首先干燥。本文将推导适合流化床条件下的临界湿含量及树皮干燥时间的计算公式,为研究树皮在流化床中的燃烧奠定基础。

2 恒速段干燥时间的计算

树皮的干燥可分为恒速干燥段和降速干燥段,恒速段的干燥速度为:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{M_0 - M_c}{\tau_1} = N \quad (1)$$

式中 M_0 —树皮初始湿含量, kg/kg;

M_c —临界湿含量, kg/kg;

τ_1 —恒速段干燥时间, s;

N —恒速段干燥速度, (kg/kg)/s。

在恒速段,树皮吸收的热量全部用于汽化水分,其干燥速度也可写成

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{\Phi}{R\gamma\theta_s} \quad (2)$$

$$\Phi = (\alpha_d + \alpha_f)(\vartheta_{ft} - t_w) \quad (3)$$

式中 Φ —树皮吸收的热量, kW/m²;

R —定性尺寸, m;

γ —湿球温度下水的汽化潜热, kJ/kg;

θ_s —树皮干物质密度, kg/m³;

α_d —对流换热系数, kW/(m²·°C),按文献[1]中公式计算;

α_f —辐射换热系数, kW/(m²·°C),按文献[2]中公式计算;

ϑ_{ft} —沸腾层温度, °C

t_w —湿球温度, °C。按下列公式计算^[1]:

$$C_H(\vartheta_{ft} - t_w) = (d_w - d)\gamma \quad (4)$$

$$C_H = C_{pa} + C_{pw}(d_w + d)/2 \quad (5)$$

$$d_w = 0.622P_w/(P - P_w) \quad (6)$$

式中 C_H —湿空气的干基比热, kJ/(kg·°C);

d_w —湿球温度下物料表面饱和湿含量, kg/kg;

d —流化床内气体的湿含量, kg/kg;

C_{pa} —干空气定压比热, kJ/(kg·°C);

C_{pw} —水蒸气定压比热, kJ/(kg·°C);

P —流化床内气体总压力, Pa;

P_w —饱和状态下蒸汽分压力,可按下式计算

$$P_w = \exp[(60.433 - 6834.27/(t_w + 273)) - 5.169231 \ln(t_w + 273)] \quad (7)$$

流化床内气体的湿含量按下式计算:

$$d = \frac{\rho_{H_2O}^0 V_{H_2O}^0}{\rho_{gy}^0 V_{gy}^0} \quad (8)$$

式中 $V_{H_2O}^0$ —实际水蒸气体积, Nm³/kg;

V_{gy}^0 —干烟气体积, Nm³/kg;

$\rho_{H_2O}^0$ —水蒸气密度, kg/Nm³;

ρ_{gy}^0 —干烟气密度, kg/Nm³;

由式(1)、式(2)可得树皮的恒速段干燥时间为

$$\tau_1 = \frac{(M_0 - M_c)R\gamma\theta_s}{\Phi} \quad (9)$$

3 降速段干燥时间计算

降速段平均干燥速度方程为^[3]:

$$-\frac{dM}{d\tau} = k(M - M_e) \quad (10)$$

$$k = \frac{1}{\alpha_m + \frac{4R^2}{\pi^2 D_m}} \quad (11)$$

式中 k —干燥系数, 1/s;

M_e —平衡湿含量, kg/kg;

α_m —传质分系数, m/s 按文献[4]中公式计算。

D_m —树皮质扩散系数, m²/s; 根据作者的实验结果, 得到如下公式:

$$D_m = 2.26 \times 10^{-6} M_p T^{5.9} \quad (12)$$

其中 $T = (t + 273) / 1000 \quad (13)$

$$M_p = \frac{\ln M_0 / M_n}{\sum_{m=1}^n \frac{\ln M_{m-1} M_m}{M_{m-1}}} \quad (14)$$

式中 M_p — $M_0 \sim M_n$ 间的平均湿含量, kg/kg;

M_n —终了湿含量, kg/kg;

n —区段数, 按下式计算:

$$n = 100 M_0 - M_n \quad (15)$$

式(12)的适用范围为 $t = 700^\circ\text{C} \sim 1000^\circ\text{C}$,

$M_0 = 1.0 \sim 1.63 \text{ kg/kg}$ 。

对式(10)在临界湿含量和降速段中的某一湿含量间积分, 得

$$\ln \frac{M_c - M_e}{M_n - M_e} = k\tau_2 \quad (16)$$

可见, 降速段干燥时间为

$$\tau_2 = \frac{1}{k} \ln \frac{M_c - M_e}{M_n - M_e} \quad (17)$$

以上为树皮不着火时的降速段干燥时间, 干燥的最终水分平衡水分。在实际的流化床中, 一进入降速段, 树皮温度即开始上升, 当树皮温度达到着火温度时, 干燥即告结束。设树皮从湿球温度升高到着火温度所需的时间为 τ_3 , 如 τ_2 大于 τ_3 说明树皮在干燥到平衡湿含量时尚未着火, 树皮在流化床中的总干燥时间为恒速段干燥时间与降速段干燥时间之和, 即:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \quad (18)$$

如 τ_2 小于 τ_3 , 说明树皮中水分尚未完全析出时就达到了着火温度, 此时总干燥时间为恒速段干燥时间与树皮从湿球温度升高到着火温度所需的时间之和, 即:

$$\tau = \tau_1 + \tau_3 \quad (19)$$

4 从临界点对应温度升高到着火温度的时间计算

在恒速干燥段, 树皮温度等于湿球温度。进入降速干燥段后, 树皮温度开始上升。此时, 树皮的升温为具有第三类边界条件的不稳定导热问题。将树皮看作为相互正交的三块无限大平板交割成的几何图形体, 则某时刻树皮的温度可按文献[5]中方法计算。树皮的着火温度见文献[6]。

5 临界湿含量的计算

临界点是恒速干燥段和降速干燥段的分界点。在临界点之前, 物料处于恒速干燥段, 临界点可认为是恒速干燥段的终点, 把临界点算在恒速段中时, 其干燥速度为:

$$\frac{dM_c}{d\tau_1} = \frac{M_0 - M_c}{\tau_1} \quad (20)$$

同时, 临界点又是降速段的起点, 把临界点算在降速段中时, 其干燥速度为:

$$-\frac{dM_c}{d\tau_1} = k(M_c - M_e) \quad (21)$$

由式(20)、(21)可求出临界湿含量为

$$M_c = M_e + N/k \quad (22)$$

6 算例

将上述计算过程编制成程序, 可进行树皮在流化床中干燥时间的计算。计算时, 树皮外型尺寸为 45mm×45mm×(4~10)mm; 树皮初始水分为 62%; 树皮的真实重度为 529 kg/m³; 沸腾层温度为 700°C~1000°C; 不考虑树皮着火时的终了湿含量为 0.01 kg/kg; 树皮的着火温度取为 310°C^[6]。

计算树皮在流化床中燃烧产生的干烟气体积时用到的树皮收到基成分为: 碳 18.85%, 氢 2.29%, 氧 14.8%, 氮 0.14%, 硫 0.14%; 沸腾层名义过量空气系数为 1.2。

计算结果见图 1~7。由图可见:

(1) 树皮的临界湿含量随温度和树皮厚度而变。温度低、厚度小时, 临界湿含量也低。但相对于初始湿含量而言, 变化幅度不大(见图 1)。

(2) 同一厚度的树皮, 温度增加, 恒速段干燥速度随之增加(见图 2), 干燥时间降低(见图 4)。因为在恒速段, 树皮吸收的热量全部用于水分的蒸发,

炉

微机控制系统,具有以下功能有:

3.1.1 数据采集、处理及显示 装置设有 12 寸绿色 CRT 显示,可对锅筒水位、蒸汽压力炉膛负压、炉内各点温度、煤量、汽量、水量、风量、送风风压等实行模拟流程图显示。改进后,采取了对模拟信号的限幅措施,从而避免了信号超量程造成的数据紊乱现象。

3.1.2 控制系统 具有独立的给水调节系统和给煤、燃烧自动调节系统。微机能完成对给水、给煤、送风与引风的自动控制,使锅筒水位、蒸汽压力、炉膛负压、风煤配比系数、烟气含氧量等运行参数,维持在规定范围,使锅炉处于安全、经济、稳定运行状态,解决了给煤速度信号与微机控制的匹配问题,能适应我厂生产用汽量变化大的实际情况,满足了生产要求。

3.1.3 报警 该系统可对水位、蒸汽压力、炉膛温度、炉膛负压等参数实现上下限越限报警。当运行参数越限时,声光自动报警。上下限位由操作人员在线设定、修改。

3.1.4 报表打印 本机配有 80 字符/行的通用并行打印机,可打印出十几种参数的数据,形成日用汽、水、煤统计报表,并开发出随机打印运行总图、光柱显示图、给定测量值显示图等多项功能。

3.1.5 累计积算 对汽量、水量、煤量等进行累计积算,并可对产汽量进行压力校正计算。

3.1.6 手操/自动双向无扰动切换 备有后备操作装置,能实现直接人工强电操作,提高了微机在生产中的适用性。

3.1.7 参数在线修改 在自动工作状态下,对各给定值、PID 整定参数、配比系数、实时时钟等实现在线修改,并可在 CRT 画面上显示。

3.1.8 备有 RS232 全双工串行接口,可实现计算机联网与管理。

3.2 系统硬件

本系统以 Z180MPU 为核心,主机箱内配有 9104ACPU 板,9210 高分辨率显示板,0811 光隔离 A/D 板,1234 光隔离热电阻 A/D 板,4302,4306 光隔离开关量 I/O 板,11060 光隔离 D/A 板,各模板通过 STD 总线与 CPU 相连,构成完整的工控主机,系统组成见图 1。

3.3 系统控制原理

工业锅炉本身是一个动态特性比较复杂的对象,其具有多输入、多输出,参数间相互耦合等特性。

本系统对锅炉自动控制基本上可分为上锅筒水位控