



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103605842 A

(43) 申请公布日 2014. 02. 26

(21) 申请号 201310560674. 2

(22) 申请日 2013. 11. 12

(71) 申请人 燕山大学

地址 066004 河北省秦皇岛市海港区河北大街西段 438 号

(72) 发明人 白振华 王瑞 王凯 朱厚鸿

任亚超 兴百宪 骆国玲

(74) 专利代理机构 石家庄一诚知识产权事务所

13116

代理人 李合印

(51) Int. Cl.

G06F 17/50 (2006. 01)

C21D 9/56 (2006. 01)

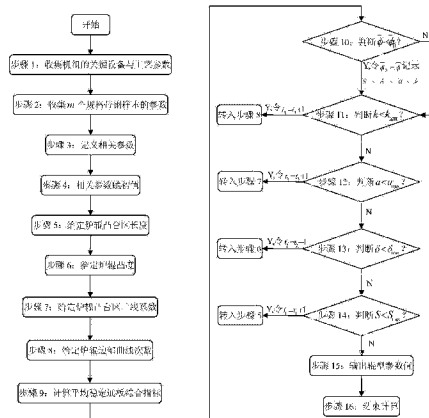
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

连退机组炉子段炉辊辊型的设计方法

(57) 摘要

一种连退机组炉子段炉辊辊型设计方法, 主要包括以下由计算机执行的步骤: 1. 收集机组的关键设备与工艺参数; 2. 收集 m 个规格带钢样本的参数; 3. 定义相关参数; 4. 相关参数赋初值; 5. 令炉辊凸台区长度 $S = S_{min} + t_1 \times \Delta S$; 6. 令炉辊凸度 $\delta = \delta_{min} + t_2 \times \Delta \delta$; 7. 令炉辊凸台区曲线系数 $a = a_{min} + t_3 \times \Delta a$; 8. 令炉辊边部曲线次数 $k = k_{min} + t_4 \times \Delta k$; 9. 计算 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标 $\bar{\phi}$; 10. 判断 $\bar{\phi} < \bar{\phi}_0$ 、 $k < k_{max}$ 、 $a < a_{max}$ 、 $\delta < \delta_{max}$ 、 $S < S_{max}$ 是否成立; 11. 输出辊型参数 S、 δ 、a、k。本发明避免了带钢跑偏和瓢曲, 使常规来料带钢的稳定通板性达到了最佳效果。



1. 连退机组炉子段炉辊辊型设计方法,其特征在于:它包括以下由计算机执行的步骤:

(a) 收集机组的关键设备与工艺参数,主要包括以下步骤:

(a1) 收集炉辊辊形参数,主要包括:炉辊最大辊径 D 、炉辊辊身长度 L 、炉辊表面粗糙度 Ra_{r1} ;

(a2) 收集此工艺段的工艺参数,主要包括:工艺段的设定张力 σ 、设定温度 T ,一般条件下的室内温度 $T_{sw}=25^{\circ}\text{C}$;

(a3) 收集传热学相关参数,主要包括:炉辊与带钢换热系数 a_1 、炉辊与气体换热系数 a_2 、炉辊比热 C_p 、炉辊热膨胀系数 β 、炉辊导热系数 K 及炉辊密度 ρ 等;

(b) 收集 m 个规格带钢样本的参数,主要包括:带钢钢种、带钢宽度 B_i 、带钢厚度 h_i 、带钢温度 T_{gi} 、带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 、带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、带钢常温下弹性模量 E_i^0 , 其中 $i=1, 2, \dots, m$, j 板形测量第 j 个通道,也是炉辊或带钢横向第 j 个取样点;

(c) 定义相关参数,包括辊型参数:炉辊凸台区长度 S 、炉辊凸度 δ 、凸台区曲线系数 a 、炉辊边部曲线次数 k 、炉辊凸台区长度优化范围 S_{\min} 、 S_{\max} 、炉辊凸度优化范围 δ_{\min} 、 δ_{\max} 、凸台区曲线系数优化范围 a_{\min} 、 a_{\max} 、炉辊边部曲线次数优化范围 k_{\min} 、 k_{\max} 、炉辊凸台区长度调整步长 ΔS 、调整参数 t_1 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta$ 、调整参数 t_2 、凸台区曲线系数调整步长 Δa 、调整参数 t_3 、炉辊边部曲线次数调整步长 Δk 、调整参数 t_4 、带钢加热后弹性模量 E_i 、炉辊与带钢摩擦系数 μ_i , 其中 $i=1, 2, \dots, m$, 炉辊或带钢横向取样点个数 $2n+1$, 第 j 个样点距带钢中心距离 x_j , 炉辊实际辊型 D_j , 炉辊热凸度 ΔD_j , 其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$, 第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j , 其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$, 及其最大值 σ_{\max} 、带钢泊松比 ν 、带钢临界屈曲指数 k_{cr} 、摩擦系数影响指数 a_0 、跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i 、临界跑偏因子 ψ^* 、临界瓢曲指数 λ^* 、稳定通板综合指标 ϕ_i 、加权系数 A , m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值 $\bar{\phi}$, m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值的初始值 $\bar{\phi}_0$;

(d) 相关参数赋初值,包括:炉辊凸台区长度优化范围 S_{\min} 、 S_{\max} 、炉辊凸度优化范围 δ_{\min} 、 δ_{\max} 、凸台区曲线系数优化范围 a_{\min} 、 a_{\max} 、炉辊边部曲线次数优化范围 k_{\min} 、 k_{\max} 、炉辊凸台区长度调整步长 ΔS 、调整参数 $t_1=0$ 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta$ 、调整参数 $t_2=0$ 、凸台区曲线系数调整步长 Δa 、调整参数 $t_3=0$ 、炉辊边部曲线次数调整步长 Δk 、调整参数 $t_4=0$ 、临界跑偏因子 ψ^* 、临界瓢曲指数 λ^* 、 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标初始值 $\bar{\phi}_0=10^{10}$, 加权系数 A ;

(e) 令炉辊凸台区长度 $S=S_{\min}+t_1 \times \Delta S$;

(f) 令炉辊凸度 $\delta=\delta_{\min}+t_2 \times \Delta \delta$;

(g) 令炉辊凸台区曲线系数 $a=a_{\min}+t_3 \times \Delta a$;

(h) 令炉辊边部曲线次数 $k=k_{\min}+t_4 \times \Delta k$;

(i) 由于炉辊辊型应在同时考虑经常生产的 m 个规格的基础上进行优化,因此,计算 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标 $\bar{\phi}$, 包括以下步骤:

(j) 判断 $\bar{\phi} < \bar{\phi}_0$ 是否成立? 若不等式成立,记录记录 S 、 δ 、 a 、 k , 令 $\bar{\phi}_0 = \bar{\phi}$, 转入步骤(k); 若不等式不成立,转入步骤(k);

(k) 判断 $k < k_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立, 令 $t_4 = t_4 + 1$, 转入步骤(h); 若不等式不成立, 转入步骤(1);

(1) 判断 $a < a_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立, 令 $t_3 = t_3 + 1$, 转入步骤(g); 若不等式不成立, 转入步骤(m);

(m) 判断 $\delta < \delta_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立, 令 $t_2 = t_2 + 1$, 转入步骤(f); 若不等式不成立, 转入步骤(n);

(n) 判断 $S < S_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立, 令 $t_1 = t_1 + 1$, 转入步骤(e); 若不等式不成立, 转入步骤(o);

(o) 输出辊型参数 S 、 δ 、 a 、 k ;

(p) 结束计算。

2. 根据权利要求 1 所述的连退机组炉子段炉辊辊型设计方法, 其特征在于: 所述的步骤(i) 包括以下步骤:

(i1) 根据带钢钢种及其常温下的弹性模量 E_i^0 , 以及带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 和炉辊表面粗糙度 Ra_{r1} , 计算该工艺段温度下第 i 种规格带钢弹性模量 E_i 及与炉辊之间的摩擦系数 μ_i , 其中 $i=1, 2, \dots, m$;

$E_i = 208639 - 0.21T_{gi}^2$ T_{gi} ——第 i 种规格带钢温度;

(i2) 由传热学相关参数, 炉辊与带钢换热系数 a_1 、炉辊与气体换热系数 a_2 、炉辊比热 C_p 、炉辊热膨胀系数 β 、炉辊导热系数 K 及炉辊密度 ρ 、工艺段设定温度 T 、第 i 种规格带钢温度 T_{gi} 等, 根据传热学原理, 计算炉辊原始辊型与热凸度叠加后的实际辊型 D_j , 其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$;

$$D_j = \begin{cases} D - a[1 + \cos(2\pi \frac{x_j}{S})] + \Delta D_j \\ D - 2\delta(\frac{2|x_j| - S}{L - S})^k + \Delta D_j \end{cases}$$

ΔD_j ——炉辊在 j 点的热凸度, 其具体计算方法是: $\Delta D_j = D\beta(T - T_{sw})/1.05$

(i3) 根据第 i 种规格带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、实际辊型 D_j 、泊松比 ν 、弹性模量 E_i 、带钢与炉辊之间的摩擦系数 μ_i 、工艺段设定张力 σ , 因为带钢横向各条单元的伸长量不同, 由相关力学理论, 计算第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j , 并求出其最大值 σ_{\max} , 其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$;

(i4) 根据带钢张力分布值 σ_j 及其最大值 σ_{\max} , 计算第 i 种规格带钢跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i , 其中 $i=1, 2, \dots, m$;

$$\psi_i = |2(\sum_{j=1}^n \sigma_j x_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j x_j) / \sigma B_i \mu_i^{a_0} + (\sum_{j=1}^n \sigma_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j) / \sigma \mu_i^{a_0}|$$

a_0 ——摩擦系数影响指数, 一般在 $0.4 \sim 0.6$ 之间;

$$\lambda_i = \frac{12\sigma_{\max}(1+\nu)B_i^2}{k_{cr}\pi^2 E_i h_i^2}$$

k_{cr} ——带钢临界屈曲指数, 一般在 $10^3 \sim 10^{3.4}$ 之间;

(i5) 计算第 i 种规格带钢稳定通板综合指标 ϕ_i , 其中 $i=1, 2, \dots, m$;

$$\phi_i = A\psi_i / \psi^* + (1-A)\lambda_i / \lambda^*$$

(i6) 计算 m 种规格带钢稳定通板综合指标平均值 $\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^m \phi_i}{m}$ 。

连退机组炉子段炉辊辊型的设计方法

技术领域

[0001] 本发明属于冶金轧钢技术领域,特别涉及一种连退机组炉辊辊型的设计方法。

背景技术

[0002] 在连退生产过程中,带钢的高速稳定通板性往往受到“跑偏”和“瓢曲”两种缺陷的双重考验。所谓的“跑偏”缺陷是指带钢在连续退火炉内运行中自行偏离生产线的中心,向辊子的一边移动的现象;所谓的“瓢曲”缺陷就是指带钢在连续退火炉内由于带钢横向受力不均,产生了斜向褶皱的板面。缺陷发生后,往往发生带钢断带事故,不但影响生产效率,甚至会造成产品降级或判废,给企业带来了较大的经济损失。为此,为了避免带钢跑偏,同时又要防止瓢曲的发生,需要对炉内炉辊进行合理的辊型设计,常见炉辊有三种辊型:双锥度辊、单锥度辊、平辊。文献[1,2]根据现场情况定性分析了辊型因素对带钢“跑偏”和“瓢曲”的影响。从炉辊凸度、平台区长度等方面入手,同时兼顾带钢“跑偏”和“瓢曲”,为辊型的设计给出了一些参考。但是,到目前为止,国内外学者对辊型因素对带钢“跑偏”和“瓢曲”的影响都还仅仅停留在定性分析阶段。尚未检索到有关从力学角度建立数学模型定量研究辊型因素对带钢“跑偏”和“瓢曲”影响的文献公诸于世,更未有以两种缺陷的发生率最小为目标对炉辊辊型进行优化的研究见诸于文献。这样,如何定量分析炉辊辊型对带钢“跑偏”和“瓢曲”的影响,并相应对辊型进行优化仍然是现场攻关的重点。

[0003] (参考文献:[1] 杨静. 连退炉内炉辊的选择与优化设计 [J]. 工业炉, 2011(6): 23-27. [2] 王彬. 连退炉辊凸度控制技术在预防带钢瓢曲上的应用 [J]. 梅山科技, 2009(4): 14-16. [3] 张靖周. 传热学 [M]. 科学出版社, 2009.)

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种能够防止带钢“跑偏”和“瓢曲”的连退机组炉辊辊型的设计方法。

[0005] 本发明的技术方案如下:

[0006] 本发明包括以下由计算机执行的步骤:

[0007] (a) 收集机组的关键设备与工艺参数,主要包括以下步骤:

[0008] (a1) 收集炉辊辊形参数,主要包括:炉辊最大辊径 D 、炉辊辊身长度 L 、炉辊表面粗糙度 Ra_{r1} ;

[0009] (a2) 收集此工艺段的工艺参数,主要包括:工艺段的设定张力 σ 、设定温度 T ,一般条件下的室内温度 T_{sw} ;

[0010] (a3) 收集传热学相关参数,主要包括:炉辊与带钢换热系数 a_1 、炉辊与气体换热系数 a_2 、炉辊比热 C_p 、炉辊热膨胀系数 β 、炉辊导热系数 K 及炉辊密度 ρ 等。

[0011] (b) 收集 m 个规格带钢样本的参数,主要包括:带钢钢种、带钢宽度 B_i 、带钢厚度 h_i 、带钢温度 T_{gi} 、带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 、带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、带钢常温下弹性模量 E_i^0 (其中 $i=1, 2, \dots, m$, j 板形测量第 j 个通道,也是炉辊或带钢横向第 j 个取样点);

[0012] (c) 定义相关参数,包括辊型参数:炉辊凸台区长度 S 、炉辊凸度 δ 、凸台区曲线系数 a 、炉辊边部曲线次数 k 、炉辊凸台区长度优化范围 S_{\min} 、 S_{\max} 、炉辊凸度优化范围 δ_{\min} 、 δ_{\max} 、凸台区曲线系数优化范围 a_{\min} 、 a_{\max} 、炉辊边部曲线次数优化范围 k_{\min} 、 k_{\max} 、炉辊凸台区长度调整步长 ΔS 、调整参数 t_1 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta$ 、调整参数 t_2 、凸台区曲线系数调整步长 Δa 、调整参数 t_3 、炉辊边部曲线次数调整步长 Δk 、调整参数 t_4 、带钢加热后弹性模量 E_i 、炉辊与带钢摩擦系数 μ_i (其中 $i=1, 2, \dots, m$)、炉辊或带钢横向取样点个数 $2n+1$ 、第 j 个样点距带钢中心距离 x_j 、炉辊实际辊型 D_j 、炉辊热凸度 ΔD_j (其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$)、第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j (其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$)及其最大值 $\sigma_{i\max}$ 、带钢泊松比 ν 、带钢临界屈曲指数 k_{cr} 、摩擦系数影响指数 a_0 、跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i 、临界跑偏因子 ψ^* 、临界瓢曲指数 λ^* 、稳定通板综合指标 ϕ_i 、加权系数 A 、 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值 $\bar{\phi}$ 、 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值的初始值 $\bar{\phi}_0$ 。

[0013] (d) 相关参数赋初值,包括:炉辊凸台区长度优化范围 S_{\min} 、 S_{\max} 、炉辊凸度优化范围 δ_{\min} 、 δ_{\max} 、凸台区曲线系数优化范围 a_{\min} 、 a_{\max} 、炉辊边部曲线次数优化范围 k_{\min} 、 k_{\max} 、炉辊凸台区长度调整步长 ΔS 、调整参数 $t_1=0$ 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta$ 、调整参数 $t_2=0$ 、凸台区曲线系数调整步长 Δa 、调整参数 $t_3=0$ 、炉辊边部曲线次数调整步长 Δk 、调整参数 $t_4=0$ 、临界跑偏因子 ψ^* 、临界瓢曲指数 λ^* 、 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标初始值 $\bar{\phi}_0 = 10^{10}$ 、加权系数 A ；

[0014] (e) 令炉辊凸台区长度 $S=S_{\min}+t_1 \times \Delta S$ ；

[0015] (f) 令炉辊凸度 $\delta = \delta_{\min}+t_2 \times \Delta \delta$ ；

[0016] (g) 令炉辊凸台区曲线系数 $a=a_{\min}+t_3 \times \Delta a$ ；

[0017] (h) 令炉辊边部曲线次数 $k=k_{\min}+t_4 \times \Delta k$ ；

[0018] (i) 由于炉辊辊型应在同时考虑经常生产的 m 个规格的基础上进行优化,因此,计算 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标 $\bar{\phi}$,包括以下步骤:

[0019] (i1) 根据带钢钢种及其常温下的弹性模量 E_i^0 、以及带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 和炉辊表面粗糙度 Ra_{r1} 、计算该工艺段温度下第 i 种规格带钢弹性模量 E_i 及与炉辊之间的摩擦系数 μ_i 、其中 $i=1, 2, \dots, m$ ；

[0020] $E_i = E_i^0 - 0.21T_{gi}^2 T_{gi}$ ——第 i 种规格带钢温度。

[0021] (i2) 由传热学相关参数,炉辊与带钢换热系数 a_1 、炉辊与气体换热系数 a_2 、炉辊比热 C_p 、炉辊热膨胀系数 β 、炉辊导热系数 K 及炉辊密度 ρ 、工艺段设定温度 T 、第 i 种规格带钢温度 T_{gi} 等,根据传热学原理,计算炉辊原始辊型与热凸度叠加后的实际辊型 D_j ,其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$ ；

$$[0022] \quad D_j = \begin{cases} D - a[1 + \cos(2\pi \frac{x_j}{S})] + \Delta D_j \\ D - 2\delta(\frac{2|x_j| - S}{L - S})^k + \Delta D_j \end{cases}$$

[0023] ΔD_j ——炉辊在 j 点的热凸度,其具体计算方法为: $\Delta D_j = D \beta (T - T_{sw}) / 1.05$

[0024] (i3) 根据第 i 种规格带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、实际辊型 D_j 、泊松比 ν 、弹性模量 E_i 、带钢

与炉辊之间的摩擦系数 μ_i 、工艺段设定张力 σ ，因为带钢横向各条单元的伸长量不同，由相关力学理论，计算第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j ，并求出其最大值 $\sigma_{i\max}$ ，其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$ ；

[0025] (i4) 根据带钢张力分布值 σ_j 及其最大值 $\sigma_{i\max}$ ，计算第 i 种规格带钢跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i ，其中 $i=1, 2, \dots, m$ ；

$$[0026] \quad \psi_i = \left| 2 \left(\sum_{j=1}^n \sigma_j x_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j x_j \right) / \sigma B_i \mu_i^{a_0} + \left(\sum_{j=1}^n \sigma_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j \right) / \sigma \mu_i^{a_0} \right|$$

[0027] a_0 ——摩擦系数影响指数，一般在 0.4 ~ 0.6 之间；

$$[0028] \quad \lambda_i = \frac{12 \sigma_{i\max} (1+\nu) B_i^2}{k_{cr} \pi^2 E_i h_i^2}$$

[0029] k_{cr} ——带钢临界屈曲指数，一般在 $10^3 \sim 10^{3.4}$ 之间；

[0030] (i5) 计算第 i 种规格带钢稳定通板综合指标 ϕ_i ，其中 $i=1, 2, \dots, m$ ；

[0031] $\phi_i = A \psi_i / \psi^* + (1-A) \lambda_i / \lambda^*$

[0032] (i6) 计算 m 种规格带钢稳定通板综合指标平均值 $\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^m \phi_i}{m}$ ；

[0033] (j) 判断 $\bar{\phi} < \bar{\phi}_0$ 是否成立？若不等式成立，记录记录 S 、 δ 、 a 、 k ，令 $\bar{\phi}_0 = \bar{\phi}$ ，转入步骤 (k)；若不等式不成立，转入步骤 (k)；

[0034] (k) 判断 $k < k_{\max}$ 是否成立？若不等式成立，令 $t_4 = t_4 + 1$ ，转入步骤 (h)；若不等式不成立，转入步骤 (1)；

[0035] (1) 判断 $a < a_{\max}$ 是否成立？若不等式成立，令 $t_3 = t_3 + 1$ ，转入步骤 (g)；若不等式不成立，转入步骤 (m)；

[0036] (m) 判断 $\delta < \delta_{\max}$ 是否成立？若不等式成立，令 $t_2 = t_2 + 1$ ，转入步骤 (f)；若不等式不成立，转入步骤 (n)；

[0037] (n) 判断 $S < S_{\max}$ 是否成立？若不等式成立，令 $t_1 = t_1 + 1$ ，转入步骤 (e)；若不等式不成立，转入步骤 (o)；

[0038] (o) 输出辊型参数 S 、 δ 、 a 、 k ；

[0039] (p) 结束计算。

[0040] 本发明与现有技术相比具有如下优点和效果：

[0041] 1、充分考虑到了连退机组内辊型因素同时对带钢跑偏和热瓢曲两种缺陷的影响，并兼顾来料板形及不同工艺段退火温度下的热辊型对带钢跑偏和热瓢曲的作用，通过在经常生产的 m 个规格的基础上对炉辊辊型进行优化，避免了带钢跑偏和瓢曲，使常规来料带钢的稳定通板性达到了最佳效果。

[0042] 2、本发明的方法大大提高了带钢的稳定通板性，极大的提高了生产效率，具有进一步推广应用的价值。

附图说明

[0043] 图 1 是本发明的简要总流程图

- [0044] 图 2 是本发明步骤 11-17 对应的详细总流程图
 [0045] 图 3 设计优化后的辊型曲线示意图
 [0046] 图 4 实施例 1 设计优化后的辊型图
 [0047] 图 5 实施例 2 设计优化后的辊型图

具体实施方式

[0048] 本发明设计优化后的辊型曲线如图 3 所示,具体进一步说明如下:

[0049] 实施例 1

[0050] 在图 1 所示的连退机组炉辊辊型的设计方法总流程图中,首先,在步骤 1 中,收集炉辊辊形参数,主要包括:炉辊最大辊径 $D=900\text{mm}$ 、炉辊辊身长度 $L=1950\text{mm}$ 、炉辊表面粗糙度 $Ra_{r1}=4.5\mu\text{m}$;

[0051] 随后,在步骤 2 中,收集此工艺段的工艺参数,主要包括:工艺段的设定张力 $\sigma=6.5\text{MPa}$ 、设定温度 $T=750^\circ\text{C}$ 、一般条件下的室内温度 $T_{sw}=25^\circ\text{C}$;

[0052] 随后,在步骤 3 中,收集传热学相关参数,主要包括:炉辊与带钢换热系数 $a_1=25000\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 、炉辊与气体换热系数 $a_2=\alpha_B=50\text{W}/\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 、炉辊比热 $C_p=460\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$ 、炉辊热膨胀系数 $\beta=12\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、炉辊导热系数 $K=29\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 及炉辊密度 $\rho=7800\text{kg}/\text{m}^3$ 等。

[0053] 随后,在步骤 4 中,收集 20 个规格带钢样本的参数,主要包括:带钢钢种、带钢宽度 B_i 、带钢厚度 h_i 、带钢温度 T_{gi} 、带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 、带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、带钢常温下弹性模量 E_i^0 (其中 $i=1, 2, \dots, 20$, j 板形测量第 j 个通道,也是炉辊或带钢横向第 j 个取样点);

[0054] 随后,在步骤 5 中,定义相关参数,包括辊型参数:炉辊凸台区长度 S 、炉辊凸度 δ 、凸台区曲线系数 a 、炉辊边部曲线次数 k 、炉辊凸台区长度优化范围 S_{\min} 、 S_{\max} 、炉辊凸度优化范围 δ_{\min} 、 δ_{\max} 、凸台区曲线系数优化范围 a_{\min} 、 a_{\max} 、炉辊边部曲线次数优化范围 k_{\min} 、 k_{\max} 、炉辊凸台区长度调整步长 ΔS 、调整参数 t_1 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta$ 、调整参数 t_2 、凸台区曲线系数调整步长 Δa 、调整参数 t_3 、炉辊边部曲线次数调整步长 Δk 、调整参数 t_4 、带钢加热后弹性模量 E_i 、炉辊与带钢摩擦系数 μ_i (其中 $i=1, 2, \dots, m$)、炉辊或带钢横向取样点个数 $2n+1$ 、第 j 个样点距带钢中心距离 x_j 、炉辊实际辊型 D_j 、炉辊热凸度 ΔD_j (其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$)、第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j (其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$) 及其最大值 $\sigma_{i\max}$ 、带钢泊松比 ν 、带钢临界屈曲指数 k_{cr} 、摩擦系数影响指数 a_0 、跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i 、临界跑偏因子 ψ^* 、临界瓢曲指数 λ^* 、稳定通板综合指标 ϕ_i 、加权系数 A 、 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值 $\bar{\phi}$ 、 m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值的初始值 $\bar{\phi}_0$ 。

[0055] 随后,在步骤 6 中,相关参数赋初值,包括:炉辊凸台区长度优化范围 $S_{\min}=150\text{mm}$ 、 $S_{\max}=800\text{mm}$ 、炉辊凸度优化范围 $\delta_{\min}=0.1\text{mm}$ 、 $\delta_{\max}=3\text{mm}$ 、凸台区曲线系数优化范围 $a_{\min}=0.01$ 、 $a_{\max}=0.5$ 、炉辊边部曲线次数优化范围 $k_{\min}=1$ 、 $k_{\max}=5$ 、炉辊凸台区长度调整步长 $\Delta S=50\text{mm}$ 、调整参数 $t_1=0$ 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta=0.1\text{mm}$ 、调整参数 $t_2=0$ 、凸台区曲线系数调整步长 $\Delta a=0.01$ 、调整参数 $t_3=0$ 、炉辊边部曲线次数调整步长 $\Delta k=1$ 、调整参数 $t_4=0$ 、临界跑偏因子 $\psi^*=25$ 、临界瓢曲指数 $\lambda^*=0.95$ 、20 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标初始值 $\bar{\phi}_0=10^{10}$ 、加权系数 $A=0.6$;

[0056] 随后,在步骤 7 中,令炉辊凸台区长度 $S=S_{\min}+t_1\times\Delta S=150\text{mm}$;

[0057] 随后,在步骤 8 中,令炉辊凸度 $\delta=\delta_{\min}+t_2\times\Delta \delta=0.1\text{mm}$;

[0058] 随后,在步骤 9 中,令炉辊凸台区曲线系数 $a=a_{\min}+t_3 \times \Delta a=0.01$;

[0059] 随后,在步骤 10 中,令炉辊边部曲线次数 $k=k_{\min}+t_4 \times \Delta k=1$;

[0060] 随后,在步骤 11 中,由于炉辊辊型应在同时考虑经常生产的 20 个规格的基础上进行优化,因此,计算 20 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标 $\bar{\phi}$,包括以下步骤(如图 2 所示):

[0061] 随后,在步骤 12 中,根据带钢钢种及其常温下的弹性模量 E_i^0 ,以及带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 和炉辊表面粗糙度 Ra_{r1} ,计算该工艺段温度下第 i 种规格带钢弹性模量 E_i 及与炉辊之间的摩擦系数 μ_i ,其中 $i=1, 2, \dots, 20$;

[0062] $E_i = E_i^0 - 0.21T_{gi}^2 T_{gi}$ ——第 i 种规格带钢温度。

[0063] 随后,在步骤 13 中,由传热学相关参数,炉辊与带钢换热系数 a_1 、炉辊与气体换热系数 a_2 、炉辊比热 C_p 、炉辊热膨胀系数 β 、炉辊导热系数 K 及炉辊密度 ρ 、工艺段设定温度 T 、第 i 种规格带钢温度 T_{gi} 等,根据传热学原理,计算炉辊原始辊型与热凸度叠加后的实际辊型 D_j ,其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$;

$$[0064] \quad D_j = \begin{cases} D - a[1 + \cos(2\pi \frac{x_j}{S})] + \Delta D_j \\ D - 2\delta(\frac{2|x_j| - S}{L - S})^k + \Delta D_j \end{cases}$$

[0065] ΔD_j ——炉辊在 j 点的热凸度;

[0066] 随后,在步骤 14 中,根据第 i 种规格带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、实际辊型 D_j 、泊松比 ν 、弹性模量 E_i 、带钢与炉辊之间的摩擦系数 μ_i 、工艺段设定张力 σ ,因为带钢横向各条单元的伸长量不同,由相关力学理论,计算第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j ,并求出其最大值 $\sigma_{i\max}$,其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$;

[0067] 随后,在步骤 15 中,根据带钢张力分布值 σ_j 及其最大值 $\sigma_{i\max}$,计算第 i 种规格带钢跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i ,其中 $i=1, 2, \dots, 20$;

$$[0068] \quad \psi_i = |2(\sum_{j=1}^n \sigma_j x_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j x_j) / \sigma B_i \mu_i^{a_0} + (\sum_{j=1}^n \sigma_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j) / \sigma \mu_i^{a_0}|$$

[0069] a_0 ——摩擦系数影响指数,一般在 0.4 ~ 0.6 之间;

$$[0070] \quad \lambda_i = \frac{12\sigma_{i\max}(1+\nu)B_i^2}{k_{cr}\pi^2 E_i h_i^2}$$

[0071] k_{cr} ——带钢临界屈曲指数,一般在 $10^3 \sim 10^{3.4}$ 之间;

[0072] 随后,在步骤 16 中,计算第 i 种规格带钢稳定通板综合指标 ϕ_i ,其中 $i=1, 2, \dots, 20$;

$$[0073] \quad \phi_i = A \psi_i / \psi^* + (1-A) \lambda_i / \lambda^*$$

[0074] 随后,在步骤 17 中,计算 20 种规格带钢稳定通板综合指标平均值

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^{20} \phi_i}{20} = 0.46;$$

[0075] 随后,在步骤 18 中,判断 $\bar{\phi} < \bar{\phi}_0$ 是否成立?若不等式成立,记录记录 S、 δ 、a、k,令 $\bar{\phi}_0 = \bar{\phi}$,转入步骤 19;若不等式不成立,转入步骤 19;

[0076] 随后,在步骤 19 中,判断 $k < k_{\max}$ 是否成立?若不等式成立,令 $t_4 = t_4 + 1$,转入步骤 10;若不等式不成立,转入步骤 20;

[0077] 随后,在步骤 20 中,判断 $a < a_{\max}$ 是否成立?若不等式成立,令 $t_3 = t_3 + 1$,转入步骤 9;若不等式不成立,转入步骤 21;

[0078] 随后,在步骤 21 中,判断 $\delta < \delta_{\max}$ 是否成立?若不等式成立,令 $t_2 = t_2 + 1$,转入步骤 8;若不等式不成立,转入步骤 22;

[0079] 随后,在步骤 22 中,判断 $S < S_{\max}$ 是否成立?若不等式成立,令 $t_1 = t_1 + 1$,转入步骤 7;若不等式不成立,转入步骤 23;

[0080] 随后,在步骤 23 中,输出辊型参数 $S=450\text{mm}$ 、 $\delta=2.3\text{mm}$ 、 $a=0.06$ 、 $k=2$,设计优化后辊型见附图 4;

[0081] 最后,在步骤 24 中,结束计算。

[0082] 实施例 2

[0083] 首先,在步骤 1 中,收集炉辊辊形参数,主要包括:炉辊最大辊径 $D=900\text{mm}$ 、炉辊辊身长度 $L=1950\text{mm}$ 、炉辊表面粗糙度 $Ra_{r1}=1.8\mu\text{m}$;

[0084] 随后,在步骤 2 中,收集此工艺段的工艺参数,主要包括:工艺段的设定张力 $\sigma=7.3\text{MPa}$ 、设定温度 $T=720^\circ\text{C}$ 、一般条件下的室内温度 $T_{\text{sw}}=25^\circ\text{C}$;

[0085] 随后,在步骤 3 中,收集传热学相关参数,主要包括:炉辊与带钢换热系数 $a_1=2500\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 、炉辊与气体换热系数 $a_2 = a_B = 50\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 、炉辊比热 $C_p=460\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 、炉辊热膨胀系数 $\beta=12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、炉辊导热系数 $K=29\text{W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 及炉辊密度 $\rho=7800\text{kg}/\text{m}^3$ 等。

[0086] 随后,在步骤 4 中,收集 15 个规格带钢样本的参数,主要包括:带钢钢种、带钢宽度 B_i 、带钢厚度 h_i 、带钢温度 T_{gi} 、带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 、带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、带钢常温下弹性模量 E_i^0 (其中 $i=1, 2, \dots, 15$, j 板形测量第 j 个通道,也是炉辊或带钢横向第 j 个取样点);

[0087] 随后,在步骤 5 中,定义相关参数,包括辊型参数:炉辊凸台区长度 S 、炉辊凸度 δ 、凸台区曲线系数 a 、炉辊边部曲线次数 k ,炉辊凸台区长度优化范围 S_{\min} 、 S_{\max} ,炉辊凸度优化范围 δ_{\min} 、 δ_{\max} ,凸台区曲线系数优化范围 a_{\min} 、 a_{\max} ,炉辊边部曲线次数优化范围 k_{\min} 、 k_{\max} ,炉辊凸台区长度调整步长 ΔS 、调整参数 t_1 ,炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta$ 、调整参数 t_2 ,凸台区曲线系数调整步长 Δa 、调整参数 t_3 ,炉辊边部曲线次数调整步长 Δk 、调整参数 t_4 ,带钢加热后弹性模量 E_i 、炉辊与带钢摩擦系数 μ_i (其中 $i=1, 2, \dots, m$),炉辊或带钢横向取样点个数 $2n+1$,第 j 个样点距带钢中心距离 x_j ,炉辊实际辊型 D_j ,炉辊热凸度 ΔD_j (其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$),第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j (其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$)及其最大值 $\sigma_{i\max}$,带钢泊松比 ν ,带钢临界屈曲指数 k_{cr} ,摩擦系数影响指数 a_0 ,跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i 、临界跑偏因子 ψ^* 、临界瓢曲指数 λ^* 、稳定通板综合指标 ϕ_i ,加权系数 A , m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值 $\bar{\phi}$, m 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标平均值的初始值 $\bar{\phi}_0$ 。

[0088] 随后,在步骤 6 中,相关参数赋初值,包括:炉辊凸台区长度优化范围 $S_{\min}=150\text{mm}$ 、 $S_{\max}=600\text{mm}$,炉辊凸度优化范围 $\delta_{\min}=0.1\text{mm}$ 、 $\delta_{\max}=2\text{mm}$,凸台区曲线系数优化范围 $a_{\min}=0.01$ 、 $a_{\max}=0.5$,炉辊边部曲线次数优化范围 $k_{\min}=1$ 、 $k_{\max}=5$,炉辊凸台区长度调整步长 $\Delta S=50\text{mm}$ 、

调整参数 $t_1=0$ 、炉辊凸度调整步长 $\Delta \delta=0.1\text{mm}$ 、调整参数 $t_2=0$ 、凸台区曲线系数调整步长 $\Delta a=0.01$ 、调整参数 $t_3=0$ 、炉辊边部曲线次数调整步长 $\Delta k=1$ 、调整参数 $t_4=0$ 、临界跑偏因子 $\psi^*=25$ 、临界瓢曲指数 $\lambda^*=0.95$ 、15 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标初始值 $\bar{\phi}_0=10^{10}$ ，加权系数 $A=0.6$ ；

[0089] 随后，在步骤 7 中，令炉辊凸台区长度 $S=S_{\min}+t_1 \times \Delta S=150\text{mm}$ ；

[0090] 随后，在步骤 8 中，令炉辊凸度 $\delta=\delta_{\min}+t_2 \times \Delta \delta=0.1\text{mm}$ ；

[0091] 随后，在步骤 9 中，令炉辊凸台区曲线系数 $a=a_{\min}+t_3 \times \Delta a=0.01$ ；

[0092] 随后，在步骤 10 中，令炉辊边部曲线次数 $k=k_{\min}+t_4 \times \Delta k=1$ ；

[0093] 随后，在步骤 11 中，考虑到炉辊辊型应在同时考虑经常生产的 15 个规格的基础上进行优化，因此，计算 15 个规格带钢样本的平均稳定通板综合指标 $\bar{\phi}$ ，包括以下步骤：

[0094] 随后，在步骤 12 中，根据带钢钢种及其常温下的弹性模量 E_i^0 ，以及带钢表面粗糙度 Ra_{r2i} 和炉辊表面粗糙度 Ra_{r1} ，计算该工艺段温度下第 i 种规格带钢弹性模量 E_i 及与炉辊之间的摩擦系数 μ_i ，其中 $i=1, 2, \dots, 15$ ；

[0095] $E_i = E_i^0 - 0.21T_{gi}^2 T_{gi}$ ——第 i 种规格带钢温度；

[0096] 随后，在步骤 13 中，由传热学相关参数，炉辊与带钢换热系数 a_1 、炉辊与气体换热系数 a_2 、炉辊比热 C_p 、炉辊热膨胀系数 β 、炉辊导热系数 K 及炉辊密度 ρ 、工艺段设定温度 T 、第 i 种规格带钢温度 T_{gi} 等，根据传热学原理，计算炉辊原始辊型与热凸度叠加后的实际辊型 D_j ，其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$ ；

$$[0097] \quad D_j = \begin{cases} D - a[1 + \cos(2\pi \frac{x_j}{S})] + \Delta D_j \\ D - 2\delta(\frac{2|x_j| - S}{L - S})^k + \Delta D_j \end{cases}$$

[0098] ΔD_j ——炉辊在 j 点的热凸度；

[0099] 随后，在步骤 14 中，根据第 i 种规格带钢来料板形 $\varepsilon_{i,j}$ 、实际辊型 D_j 、泊松比 ν 、弹性模量 E_i 、带钢与炉辊之间的摩擦系数 μ_i 、工艺段设定张力 σ ，因为带钢横向各条单元的伸长量不同，由相关力学理论，计算第 i 种规格带钢张力分布值 σ_j ，并求出其最大值 $\sigma_{i\max}$ ，其中 $j=1, 2, \dots, 2n+1$ ；

[0100] 随后，在步骤 15 中，根据带钢张力分布值 σ_j 及其最大值 $\sigma_{i\max}$ ，计算第 i 种规格带钢跑偏因子 ψ_i 、瓢曲指数 λ_i ，其中 $i=1, 2, \dots, 15$ ；

$$[0101] \quad \psi_i = |2(\sum_{j=1}^n \sigma_j x_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j x_j) / \sigma B_i \mu_i^{a_0} + (\sum_{j=1}^n \sigma_j - \sum_{j=n+2}^{2n+1} \sigma_j) / \sigma \mu_i^{a_0}|$$

[0102] a_0 ——摩擦系数影响指数，一般在 $0.4 \sim 0.6$ 之间；

$$[0103] \quad \lambda_i = \frac{12\sigma_{i\max}(1+\nu)B_i^2}{k_{cr}\pi^2 E_i h_i^2}$$

[0104] k_{cr} ——带钢临界屈曲指数，一般在 $10^3 \sim 10^{3.4}$ 之间；

[0105] 随后，在步骤 16 中，计算第 i 种规格带钢稳定通板综合指标 ϕ_i ，其中 $i=1, 2, \dots, 15$ ；

$$[0106] \quad \phi_i = A \psi_i / \psi^* + (1-A) \lambda_i / \lambda^*$$

[0107] 随后,在步骤 17 中,计算 15 种规格带钢稳定通板综合指标平均值

$$\bar{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^{15} \phi_i}{15} = 0.52;$$

[0108] 随后,在步骤 18 中,判断 $\bar{\phi} < \bar{\phi}_0$ 是否成立? 若不等式成立,记录记录 S、 δ 、a、k,令 $\bar{\phi}_0 = \bar{\phi}$,转入步骤 19;若不等式不成立,转入步骤 19;

[0109] 随后,在步骤 19 中,判断 $k < k_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立,令 $t_4 = t_4 + 1$,转入步骤 10;若不等式不成立,转入步骤 20;

[0110] 随后,在步骤 20 中,判断 $a < a_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立,令 $t_3 = t_3 + 1$,转入步骤 9;若不等式不成立,转入步骤 21;

[0111] 随后,在步骤 21 中,判断 $\delta < \delta_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立,令 $t_2 = t_2 + 1$,转入步骤 8;若不等式不成立,转入步骤 22;

[0112] 随后,在步骤 22 中,判断 $S < S_{\max}$ 是否成立? 若不等式成立,令 $t_1 = t_1 + 1$,转入步骤 7;若不等式不成立,转入步骤 23;

[0113] 随后,在步骤 23 中,输出辊型参数 $S=450\text{mm}$ 、 $\delta=0.9\text{mm}$ 、 $a=0.08$ 、 $k=2$,设计优化后辊型见附图 5;

[0114] 最后,在步骤 24 中,结束计算。

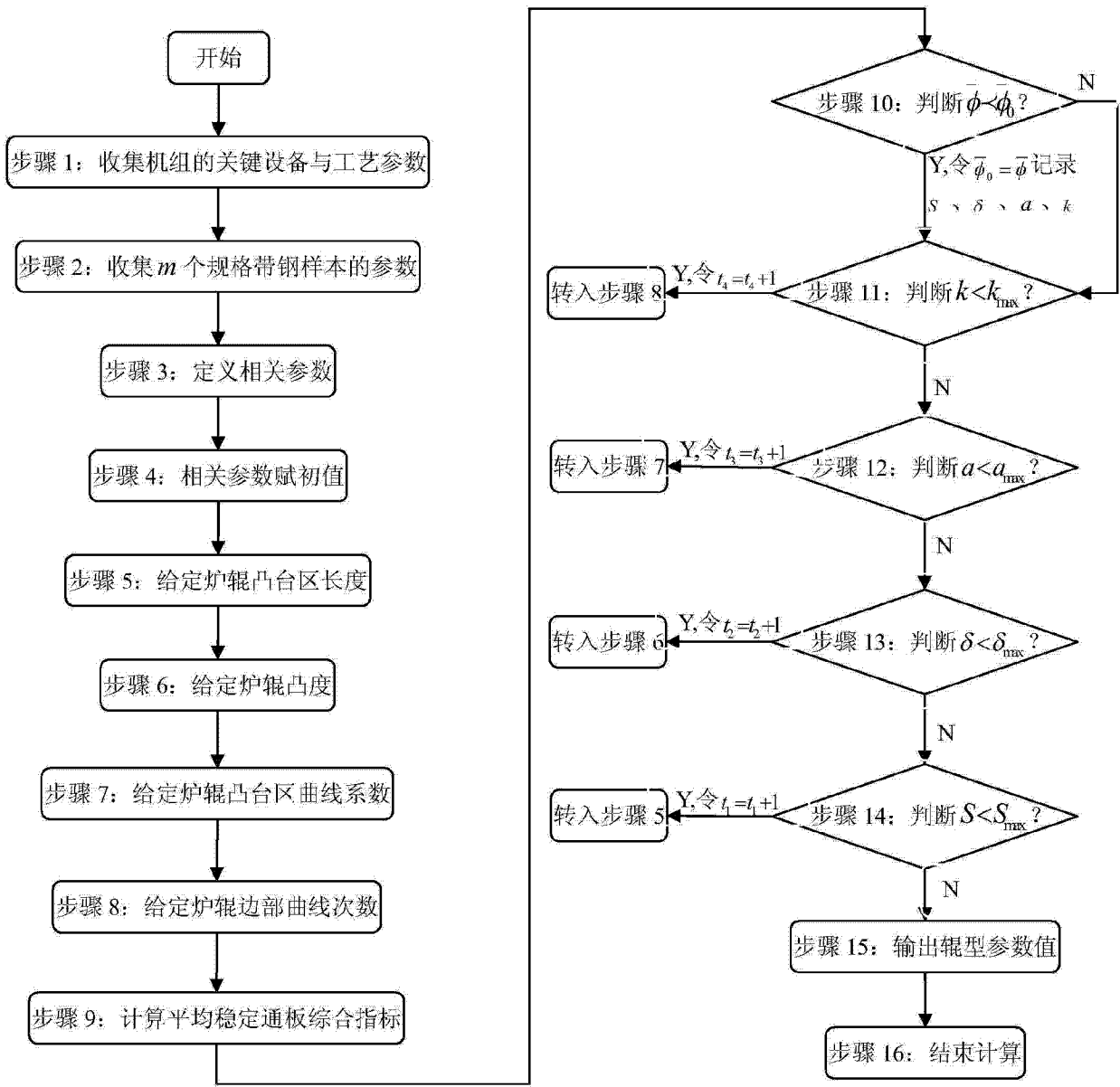


图 1

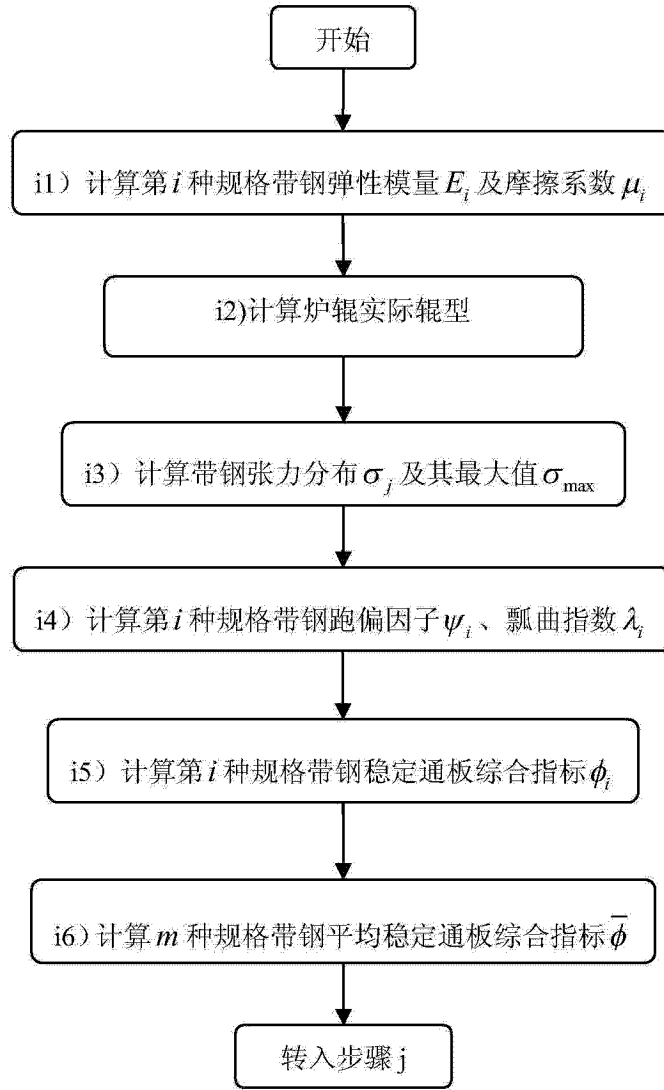


图 2

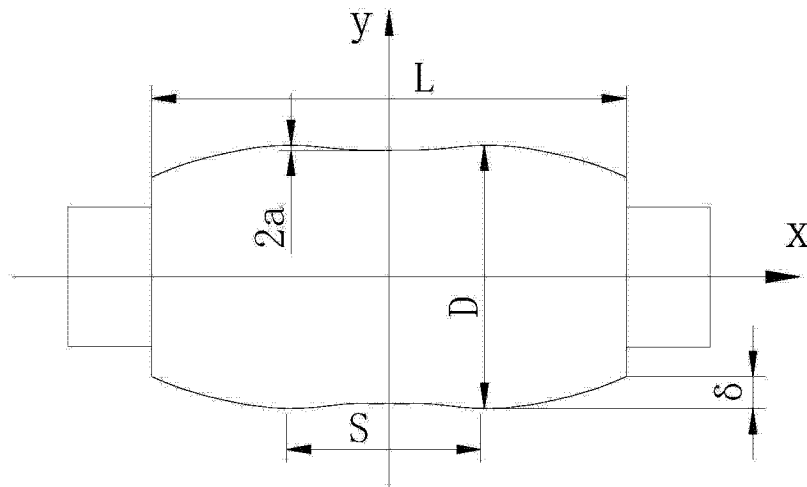


图 3

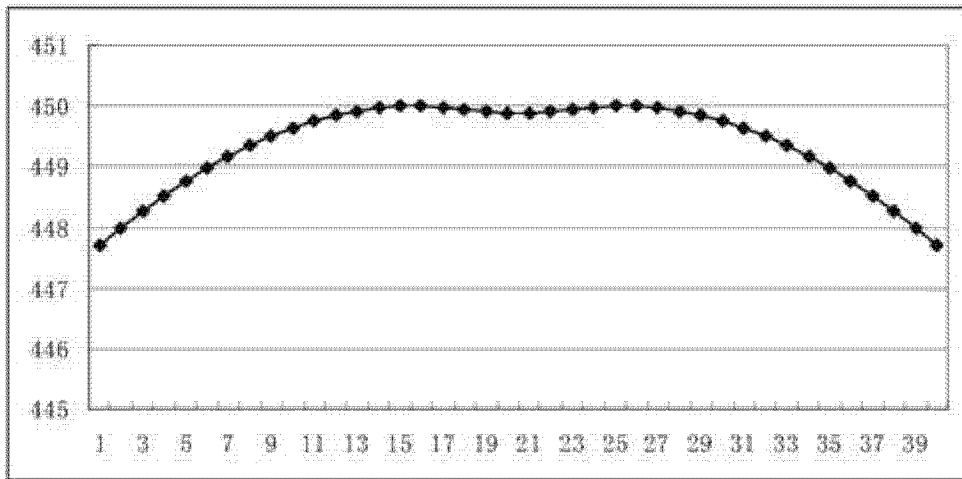


图 4

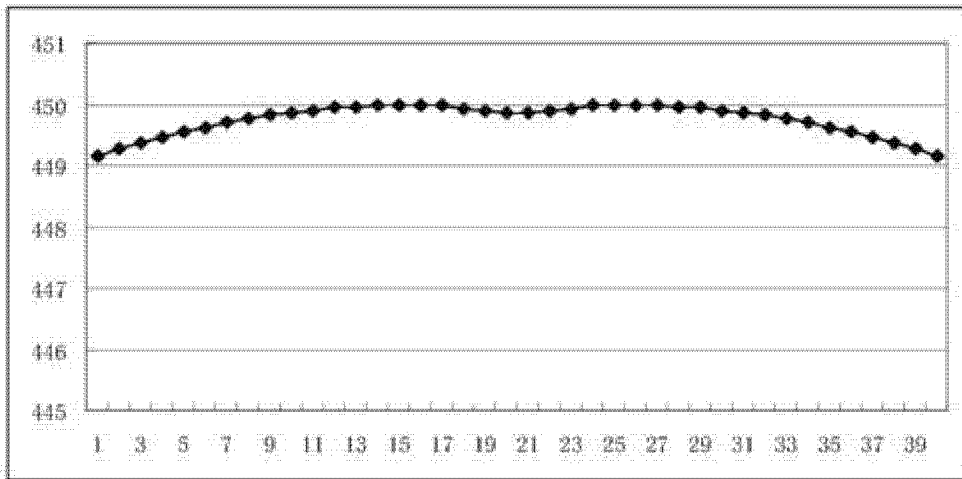


图 5