



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103028615 A

(43) 申请公布日 2013. 04. 10

(21) 申请号 201210501286. 2

(22) 申请日 2012. 11. 29

(71) 申请人 一重集团大连设计研究院有限公司
地址 116600 辽宁省大连市经济技术开发区
东北大街 96 号

申请人 中国第一重型机械股份公司

(72) 发明人 任德方 赵华国 刘付强

(74) 专利代理机构 大连东方专利代理有限责任
公司 21212

代理人 李洪福

(51) Int. Cl.

B21B 37/74 (2006. 01)

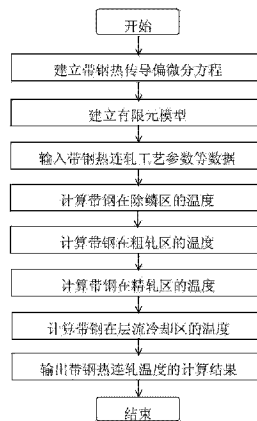
权利要求书 3 页 说明书 6 页 附图 5 页

(54) 发明名称

一种预测带钢热连轧过程温度演变的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种预测带钢热连轧过程温度演变的方法,包括以下步骤:建立带钢热传导偏微分方程;建立有限元模型;输入带钢热连轧工艺参数;计算带钢在除鳞区的温度;计算带钢在粗轧区的温度;计算带钢在精轧区的温度;计算带钢在层流冷却区的温度;输出带钢热连轧温度的计算结果。本发明通过建立有限元模型、求解偏微分方程来解决平面二维热传导问题,在此过程中,结合了设备及带材的各种工艺参数(设备的水量、带材速度、带材厚度、带材宽度),考虑了热连轧全程各个环节的温度演变,从而对包括带钢从出加热炉到高压水除鳞、粗轧、精轧、层流冷却全程的温降进行预测。有了这样详细的温度预测数据结果,能够为热连轧工艺制度的优化提供参考。



1. 一种预测带钢热连轧过程温度演变的方法,其特征在于:包括以下步骤:

A、建立带钢热传导偏微分方程

假设带钢轧件沿长度方向的温度分布相对均匀,只考虑带钢轧件厚度和宽度方向的二维热传导;对于含内热源的二维问题,固体热传导微分方程的形式如下式所示:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{k} \right) \quad (1)$$

式中, T 为带钢的瞬态温度; t 为热传导过程进行的时间; k 为材料的导热系数; ρ 为材料的密度; c_p 为材料的定压比热; \dot{q} 表示内热源强度,为每单位体积在单位时间的发热量; x 和 y 分别为带钢轧件宽度和厚度方向的直角坐标;

B、建立有限元模型

假设沿带钢长度方向上温度分布均匀,按二维传热问题处理;利用带钢轧件的对称性,假设冷却方式对称,取四分之一横断面进行网格单元划分,采用四节点等参单元,在所选取的四分之一横断面上划分单元网格 50×9 个;

求解平面二维热传导问题是偏微分方程(1)在给定的边界条件和初始条件之下求解的问题,它等效地表达为以下泛函形式:

$$\mathcal{A}[T(x, y)] = \iint_D \left\{ \frac{k}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} dx dy + \frac{1}{2} \int_{\tau} h(T - T_{\infty})^2 ds \quad (2)$$

能使泛函式(2)的一阶变分为零的温度函数,必为此问题的正确解;

C、输入带钢热连轧工艺参数

输入的工艺参数包括钢种、化学成分、热物性参数、坯料尺寸、出炉温度、设备参数、粗轧和精轧轧制规程和层流冷却制度,所述的层流冷却制度包括前段冷却规程、后段冷却规程和分段冷却规程;

D、计算带钢在除鳞区的温度

除鳞区指从加热炉出口至轧前除鳞结束时带钢轧件经历的区域,计算带钢轧件在经历这一区域过程中的温度场;首先进行除鳞区设备参数的输入,设备参数包括除鳞前空冷距离和除鳞设备长度,然后进行出炉后的空冷温度场模拟,再进行除鳞区的水冷温度场模拟;

带钢轧件在辊道上运行过程中,通过自由表面和外界进行热交换,主要换热方式有辐射和对流,带钢轧制时的对流传热为自然对流,在带钢轧件温度 $> 800^{\circ}\text{C}$ 时它引起的温降仅为辐射温降的 1%,因此,在高温区段空冷过程中,忽略热对流的影响;利用 Stefan-Boltzmann 定律,辐射换热的热交换系数如下:

$$h_r = \varepsilon S (T_{su}^2 + T_{\infty}^2) (T_{su} + T_{\infty}) \quad (3)$$

式中, S 为 Stefan-Boltzmann 常数; ε 为辐射率或黑度系数; T_{su} 为带钢表面温度; T_{∞} 为环境温度;

在对称面上无热交换发生,为绝热边界条件,其热交换量为 $Q = 0$;

对于高压水除鳞过程,带钢表面温度 T_{su} 、水压以及水量密度 ω 对其热交换系数 h_w ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 的影响较大,尤其是高压水除鳞的水压高达 20MPa,对热交换系数的影响很大;随着表面温度不同,各温度区间的传热现象也不同;对于这种水冷形式的计算公式:

$$h_w = r \times 107.2 \omega^{0.663} \times 10^{-0.00147 T_{SU} \times 1.163} \quad (4)$$

式中： r —水压影响系数，高压水除鳞时 $r > 1$ ；

E、计算带钢在粗轧区的温度

粗轧区包括带钢轧件从除鳞区出口到粗轧末道次出口中间经历的所有区域，该区域中带钢轧件经历了空冷、轧制前除鳞和轧制变形过程；其中空冷与轧前除鳞计算模型与公式(3)和(4)相同；

轧制过程变形区中主要存在以下几种热现象：带钢轧件塑性变形转化成的变形热、带钢轧件与轧辊相对滑动产生的摩擦热、带钢轧件与轧辊接触产生的接触热传导；

E1、变形热：把塑性功转变的热能看作是一种内热源，其变形热的表达式为：

$$W_e = \eta \iiint_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV \quad (5)$$

式中， $\bar{\epsilon}$ —平均变形速率；

$\bar{\sigma}$ —等效应力；

η —塑性功转变为热的比例，取 0.7~0.9；

E2、摩擦热：在轧制过程中因轧辊与带钢轧件间的摩擦而产生的单位表面积、单位时间的摩擦功 \dot{W}_f ，由下式表示：

$$\dot{W}_f = \mu p(\phi) v_r \quad (6)$$

式中， μ 、 $p(\phi)$ 和 v_r 分别为摩擦系数、轧制压力的法向分量和轧辊与带钢轧件的相对速度的绝对值；

E3、接触热传导：在带钢轧件和轧辊接触面上，热量由带钢轧件传向轧辊，此为热流连续、温度不连续的热阻问题，热交换系数 h 按下式处理：

$$h_r = k / \sqrt{\pi a t} \quad (7)$$

$$t = \sqrt{\Delta H \cdot R} / v \quad (8)$$

$$a = k / (\rho \cdot c) \quad (9)$$

式中， t 为带钢轧件与轧辊接触时间， v 为轧制速度， ΔH 为压下量； R 为轧辊半径；

F、计算带钢在精轧区的温度

精轧区指带钢轧件从粗轧末道次轧辊出口到精轧末道次机架轧辊出口经历的区域，中间经历空冷、保温、精轧前除鳞和机架间喷水冷却与轧制变形过程；

其中机架间喷水冷却的热交换系数计算公式：

$$h_w = 107.2 \omega^{0.663} \times 10^{-0.00147 T_{SU} \times 1.163} \quad (10)$$

G、计算带钢在层流冷却区的温度

对于层流冷却过程，是指冷却水在无压力的情况下流向带钢，形成冲击水区和稳定水膜沸腾区，该过程是相对比较复杂的传热过程，对于此过程的热交换系数主要受设备条件、冷却水量和带钢表面温度的影响；对于此过程交换系数采用以下计算公式：

$$h_w = \frac{9.72 \times 10^5 \omega^{0.355}}{(T_{SU} - T_w)} \left\{ \frac{(2.5 - 1.5 \log T_w) D}{P_L P_C} \right\}^{0.645} \times 1.163 \quad (11)$$

式中： ω —水量密度， $m^3 / (\min \cdot m^2)$ ；

D—喷嘴直径, m;

T_{su} , T_w —带钢表面温度和水温, °C ;

P_L , P_C —轧线方向和轧线垂直方向的喷嘴间距, m ;

H、输出带钢热连轧温度的计算结果

输出带钢从出加热炉到高压水除鳞、粗轧、精轧、层流冷却过程中温度预测结果, 输出带钢由出炉后直到层冷结束全程的温降曲线, 所述的降温曲线包括心部温度、表面温度、平均温度 ; 输出带钢头部、中部及尾部由出炉后直到层冷结束全程的典型横断面温度分布, 以及断面上代表点的温度值 ; 所述的典型横断面为 1/4 横断面。

一种预测带钢热连轧过程温度演变的方法

技术领域

[0001] 本发明属于轧钢技术领域,具体涉及一种预测带钢热连轧过程温度演变的方法。

背景技术

[0002] 带钢热连轧过程中温度的作用是至关重要的。首先,温度决定了金属的变形抗力,是轧制力、力矩、功率等力学参数的敏感影响因素;其次,温度决定了带钢轧件的表面状况,如表面氧化铁皮等,从而影响产品的表面质量和表面摩擦系数;摩擦系数又会通过金属流动、宽展等影响到产品的尺寸精度;更重要的是,温度是再结晶、相变、析出等微观组织变化的重要条件,对带钢温度的控制(包括轧制温度、开冷和终冷温度、冷却速度和冷却路径等)决定了轧后产品的组织和性能。精确地计算热轧生产中带钢的温度是保证厚度、板形、宽度及组织性能控制准确的重要前提。因此研究热连轧过程中带钢的温度变化规律,构建能够预测带钢热连轧过程温度演变的方法具有十分重要的现实意义。

[0003] 多数学者对热轧带钢温度的预测是分阶段计算,并没有考虑全程的温度的连续变化,并且得到的温度值也是平均温度。

发明内容

[0004] 为解决现有技术存在的上述问题,本发明要提出一种能够得到热连轧全程各个环节的温度演变的预测带钢热连轧过程温度演变的方法。

[0005] 为了实现上述目的,本发明的技术方案如下:一种预测带钢热连轧过程温度演变的方法,包括以下步骤:

[0006] A、建立带钢热传导偏微分方程

[0007] 假设带钢轧件沿长度方向的温度分布相对均匀,只考虑带钢轧件厚度和宽度方向的二维热传导;对于含内热源的二维问题,固体热传导微分方程的形式如下式所示:

$$[0008] \quad \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\dot{q}}{k} \right) \quad (1)$$

[0009] 式中,T为带钢的瞬态温度;t为热传导过程进行的时间;k为材料的导热系数; ρ 为材料的密度; c_p 为材料的定压比热; \dot{q} 表示内热源强度,为每单位体积在单位时间的发热量;x和y分别为带钢轧件宽度和厚度方向的直角坐标;

[0010] B、建立有限元模型

[0011] 假设沿带钢长度方向上温度分布均匀,按二维传热问题处理;利用带钢轧件的对称性,假设冷却方式对称,取四分之一横断面进行网格单元划分,采用四节点等参单元,在所选取的四分之一横断面上划分单元网格 50×9 个;

[0012] 求解平面二维热传导问题是偏微分方程(1)在给定的边界条件和初始条件之下求解的问题,它等效地表达为以下泛函形式:

[0013]

$$\mathcal{A}[T(x, y)] = \iint_D \left\{ \frac{k}{2} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} dx dy + \frac{1}{2} \int_{\Gamma} h(T - T_{\infty})^2 ds \quad (2)$$

[0014] 能使泛函式(2)的一阶变分为零的温度函数,必为此问题的正确解;

[0015] C、输入带钢热连轧工艺参数

[0016] 输入的工艺参数包括钢种、化学成分、热物性参数、坯料尺寸、出炉温度、设备参数、粗轧和精轧轧制规程和层流冷却制度,所述的层流冷却制度包括前段冷却规程、后段冷却规程和分段冷却规程;

[0017] D、计算带钢在除鳞区的温度

[0018] 除鳞区指从加热炉出口至轧前除鳞结束时带钢轧件经历的区域,计算带钢轧件在经历这一区域过程中的温度场;首先进行除鳞区设备参数的输入,设备参数包括除鳞前空冷距离和除鳞设备长度,然后进行出炉后的空冷温度场模拟,再进行除鳞区的水冷温度场模拟;

[0019] 带钢轧件在辊道上运行过程中,通过自由表面和外界进行热交换,主要换热方式有辐射和对流,带钢轧制时的对流传热为自然对流,在带钢轧件温度 $>800^{\circ}\text{C}$ 时它引起的温降仅为辐射温降的 1%,因此,在高温区段空冷过程中,忽略热对流的影响;利用 Stefan-Boltzmann 定律,辐射换热的热交换系数如下:

[0020]

$$h_r = \varepsilon S(T_{su}^2 + T_{\infty}^2)(T_{su} + T_{\infty}) \quad (3)$$

[0021] 式中, S 为 Stefan-Boltzmann 常数; ε 为辐射率或黑度系数; T_{su} 为带钢表面温度; T_{∞} 为环境温度;

[0022] 在对称面上无热交换发生,为绝热边界条件,其热交换量为 $Q = 0$;

[0023] 对于高压水除鳞过程,带钢表面温度 T_{su} 、水压以及水量密度 ω 对其热交换系数 h_w ($\text{W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$) 的影响较大,尤其是高压水除鳞的水压高达 20MPa,对热交换系数的影响很大;随着表面温度不同,各温度区间的传热现象也不同;对于这种水冷形式的计算公式:

$$h_w = r \times 107.2 \omega^{0.663} \times 10^{-0.00147 T_{su} \times 1.163} \quad (4)$$

[0025] 式中: r—水压影响系数,高压水除鳞时 $r > 1$;

[0026] E、计算带钢在粗轧区的温度

[0027] 粗轧区包括带钢轧件从除鳞区出口到粗轧术道次出口中间经历的所有区域,该区域中带钢轧件经历了空冷、轧制前除鳞和轧制变形过程;其中空冷与轧前除鳞计算模型与公式(3)和(4)相同;

[0028] 轧制过程变形区中主要存在以下几种热现象:带钢轧件塑性变形转化成的变形热、带钢轧件与轧辊相对滑动产生的摩擦热、带钢轧件与轧辊接触产生的接触热传导;

[0029] E1、变形热:把塑性功转变的热能看作是一种内热源,其变形热的表达式为:

$$W_e = \eta \iiint_V \bar{\sigma} \bar{\varepsilon} dV \quad (5)$$

[0031] 式中, $\bar{\varepsilon}$ —平均变形速率;

[0032] $\bar{\sigma}$ —等效应力;

[0033] η —塑性功转变为热的比例,取 0.7 ~ 0.9;

[0034] E2、摩擦热:在轧制过程中因轧辊与带钢轧件间的摩擦而产生的单位表面积、单位

时间的摩擦功 \dot{W}_f ,由下式表示:

$$[0035] \quad \dot{W}_f = \mu p(\phi) v_r \quad (6)$$

[0036] 式中, μ 、 $P(\phi)$ 和 v_r 分别为摩擦系数、轧制压力的法向分量和轧辊与带钢轧件的相对速度的绝对值;

[0037] E3、接触热传导:在带钢轧件和轧辊接触面上,热量由带钢轧件传向轧辊,此为热流连续、温度不连续的热阻问题,热交换系数力按下式处理:

$$[0038] \quad h_r = k / \sqrt{\pi a t} \quad (7)$$

$$[0039] \quad t = \sqrt{\Delta H \cdot R / v} \quad (8)$$

[0040] $a = k / (\rho \cdot c)$ (9) 式中, t 为带钢轧件与轧辊接触时间, v 为轧制速度, ΔH 为压下量; R 为轧辊半径;

[0041] F、计算带钢在精轧区的温度

[0042] 精轧区指带钢轧件从粗轧末道次轧辊出口到精轧末道次机架轧辊出口经历的区域,中间经历空冷、保温、精轧前除鳞和机架间喷水冷却与轧制变形过程;

[0043] 其中机架间喷水冷却的热交换系数计算公式:

$$[0044] \quad h_w = 107.2 \omega^{0.663} \times 10^{-0.00147 T_{SU} \times 1.163} \quad (10)$$

[0045] G、计算带钢在层流冷却区的温度

[0046] 对于层流冷却过程,是指冷却水在无压力的情况下流向带钢,形成冲击水区和稳定水膜沸腾区,该过程是相对比较复杂的传热过程,对于此过程的热交换系数主要受设备条件、冷却水量和带钢表面温度的影响;对于此过程交换系数采用以下计算公式:

$$[0047] \quad h_w = \frac{9.72 \times 10^5 \omega^{0.355}}{(T_{SU} - T_w)} \left\{ \frac{(2.5 - 1.5 \log T_w) D}{P_L P_C} \right\}^{0.645} \times 1.163 \quad (11)$$

[0048] 式中: ω —水量密度, $m^3 / (\min \cdot m^2)$;

[0049] D —喷嘴直径, m ;

[0050] T_{SU} , T_w —带钢表面温度和水温, $^{\circ}C$;

[0051] P_L , P_C —轧线方向和轧线垂直方向的喷嘴间距, m ;

[0052] H、输出带钢热连轧温度的计算结果

[0053] 输出带钢从出加热炉到高压水除鳞、粗轧、精轧、层流冷却过程中温度预测结果,输出带钢由出炉后直到层冷结束全程的温降曲线,所述的降温曲线包括心部温度、表面温度、平均温度;输出带钢头部、中部及尾部由出炉后直到层冷结束全程的典型横断面温度分布,以及断面上代表点的温度值;所述的典型横断面为 1/4 横断面。

[0054] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0055] 本发明通过建立有限元模型、求解偏微分方程来解决平面二维热传导问题,在此过程中,结合了设备及带材的各种工艺参数(设备的水量、带材速度、带材厚度、带材宽度),考虑了热连轧全程各个环节的温度演变,从而对包括带钢从出加热炉到高压水除鳞、粗轧、精轧、层流冷却全程的温降进行预测;不仅能得到带钢的平均温度、心部温度、表面温度,而且能够获得带钢头部、中部及尾部由出炉后直到层冷结束全程的典型横断面(1/4 横断面)温度分布,以及断面上代表点的温度值。有了这样详细的温度预测数据结果,能够为热

连轧工艺制度的优化提供参考。

附图说明

- [0056] 本发明共有附图 9 张,其中:
- [0057] 图 1 为本发明预测板带钢热连轧中温度演变的方法的计算分析流程框图;
- [0058] 图 2 为带钢的头部在除鳞结束时温降曲线的预测结果输出图;
- [0059] 图 3 为带钢的头部在除鳞结束时断面温度分布的预测结果输出图;
- [0060] 图 4 为带钢的中部在粗轧结束时温降曲线的预测结果输出图;
- [0061] 图 5 为带钢的中部在粗轧结束时断面温度分布的预测结果输出图;
- [0062] 图 6 为带钢的尾部在精轧结束时温降曲线的预测结果输出图;
- [0063] 图 7 为带钢的尾部在精轧结束时断面温度分布的预测结果输出图;
- [0064] 图 8 为带钢的中部在层流冷却结束时温降曲线的预测结果输出图;
- [0065] 图 9 为带钢的中部在层流冷却结束时断面温度分布的预测结果输出图。

具体实施方式

[0066] 下面结合附图对本发明进行进一步地描述。如图 1 所示,本发明的具体计算分析步骤如下:

- [0067] 1、开始;
- [0068] 2、建立带钢热传导偏微分方程;
- [0069] 3、建立有限元模型;
- [0070] 4、输入带钢热连轧工艺参数等数据;
- [0071] 5、计算带钢在除鳞区的温度;
- [0072] 6、计算带钢在粗轧区的温度;
- [0073] 7、计算带钢在精轧区的温度;
- [0074] 8、计算带钢在层流冷却区的温度;
- [0075] 9、输出带钢热连轧温度的计算结果;
- [0076] 10、结束。

[0077] 本发明可以通过计算机程序完成实施,程序采用上述的 1~10 步骤。采用 VC++6.0 语言实现带钢热连轧温度的计算过程。

[0078] 预测对象钢种的化学成分如表 1 所示,表 2、3 分别为分析过程中采用的粗轧和精轧轧制规程。

[0079] 表 1 实验用钢的化学成分(质量,%)

[0080]

成分	C	Si	Mn	S	P	Cu
含量	0.2	0.2	0.6	0.03	0.0	0.1
	3	7	2	3	1	2

[0081] 表 2 粗轧轧制规程

[0082]

道次数	轧前 宽度 (mm)	轧前 厚度 (mm)	轧后 宽度 (mm)	轧后厚 度 (mm)	投用 除磷	变形 抗力 (MPa)	轧制 速度 (m/s)
1	1400	230	1413	190	1	67.67	2.0
2	1413	190	1422	151	1	74.30	2.5
3	1422	151	1407	122	1	77.64	3.0
4	1407	122	1390	92	1	91.60	3.5
5	1390	92	1393	66	1	101.74	4.0
6	1303	66	1383	50	1	107.60	4.5

[0083] 表 3 精轧轧制规程

[0084]

道次数	轧前 宽度 (mm)	轧前 厚度 (mm)	轧后 宽度 (mm)	轧后 厚度 (mm)	机架间 冷却	变形 抗力 (MPa)	轧制 速度 (m/s)
第 1 道次	1382	1382	50.00	33.75	1	72.30	0.745
第 2 道次	1382	1382	33.75	22.62	1	78.56	1.111
第 3 道次	1382	1382	22.62	16.19	1	82.60	1.559
第 4 道次	1382	1382	16.19	12.34	1	87.58	2.054
第 5 道次	1382	1382	12.34	9.99	1	92.31	2.563
第 6 道次	1382	1382	9.99	8.84	1	96.54	3.051

[0085]

第 7 道次	1382	1382	8.84	7.58	0	99.63	3.427
--------	------	------	------	------	---	-------	-------

[0086] 本实施例的预测结果如下。

[0087] 1、除鳞结束时带钢温度演变的预测结果。

[0088] 图 2、3 分别为此带钢的头部在除鳞结束时温降曲线和断面温度分布的预测结果。从图中可以看出除鳞使中心温度下降的很少，但使表面温度下降很多。

[0089] 2、粗轧结束时带钢温度演变的预测结果。

[0090] 图 4、5 分别为此带钢的中部在粗轧结束时温降曲线和断面温度分布的预测结果。从图中可以看出每一粗轧道次中由于轧辊表面温度较低，带钢轧件与轧辊接触造成带钢表面温度急剧下降，随后又有回升的趋势。随着轧制道次的进行，这种急剧下降的幅度略有增加的趋势。另外，在轧制道次中，中心温度不但没有下降，反而略有增加，这主要是变形热产生的原因，说明变形热对带钢温度有一定的影响。

[0091] 3、精轧结束时带钢温度演变的预测结果。

[0092] 图 6、7 分别为此带钢的尾部在精轧结束时温降曲线和断面温度分布的预测结果。从图中可以看出随着精轧过程的进行,板坯厚度减小,中心温度逐渐降低,沿断面厚度方向的温差逐渐减小。

[0093] 4、层流冷却结束时带钢温度演变的预测结果。

[0094] 图 8、9 分别为此带钢的中部在层流冷却结束时温降曲线和断面温度分布的预测结果。从图中可以看出水冷造成带钢中心及表面温度迅速下降,中心平均温度与表面平均温度的差别已经很小,最大温度梯度向带钢轧件边部转移,温度分布不均匀集中在边部。

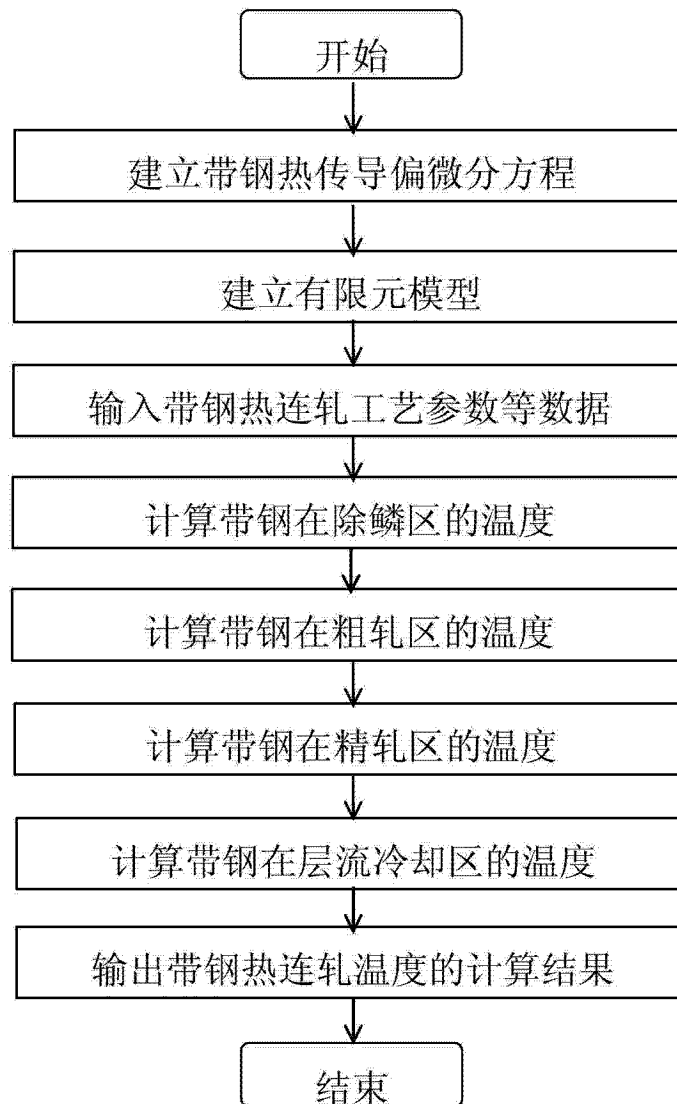


图 1

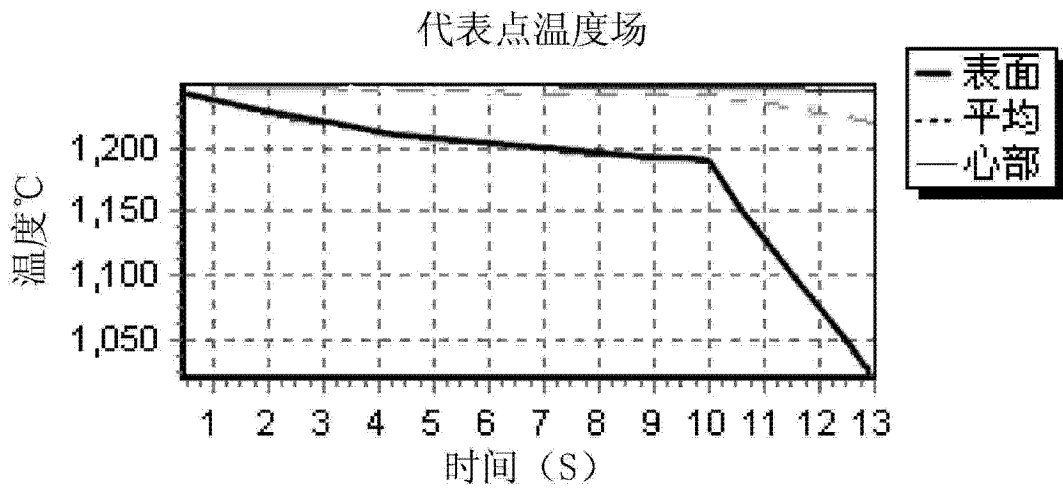


图 2

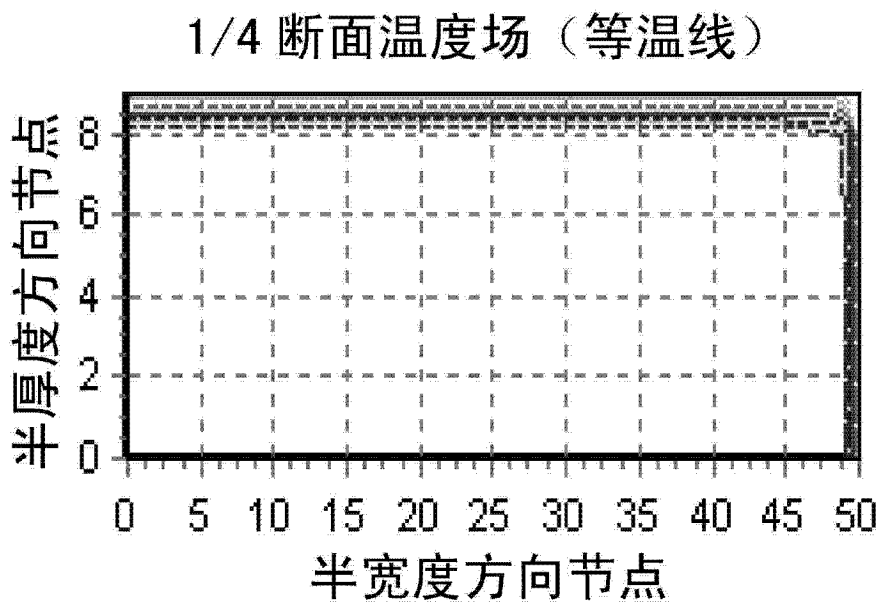


图 3

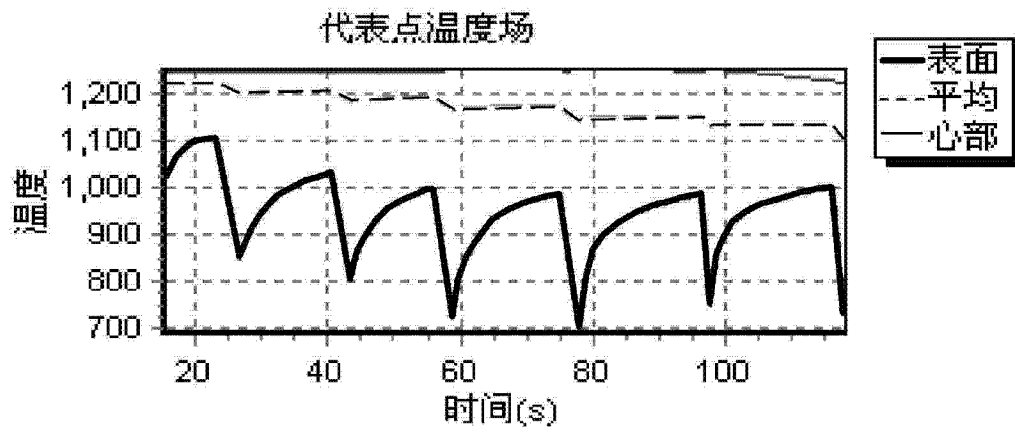


图 4

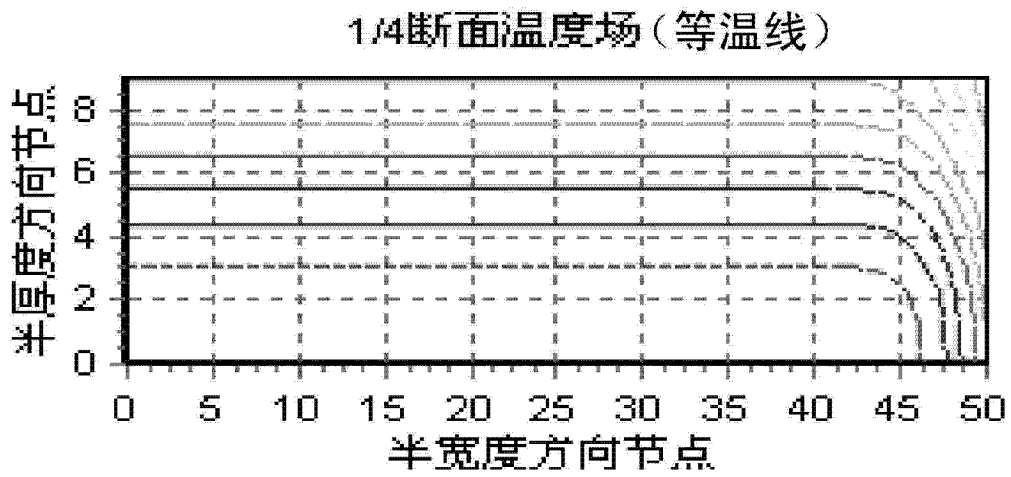


图 5

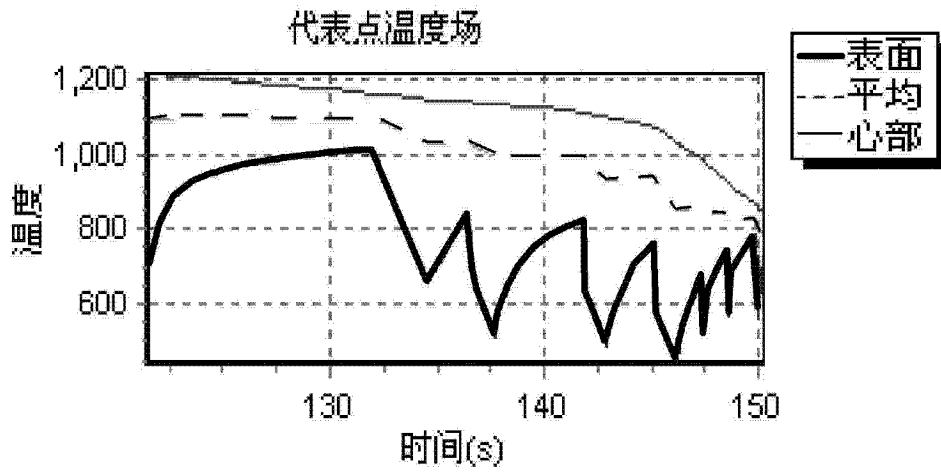


图 6

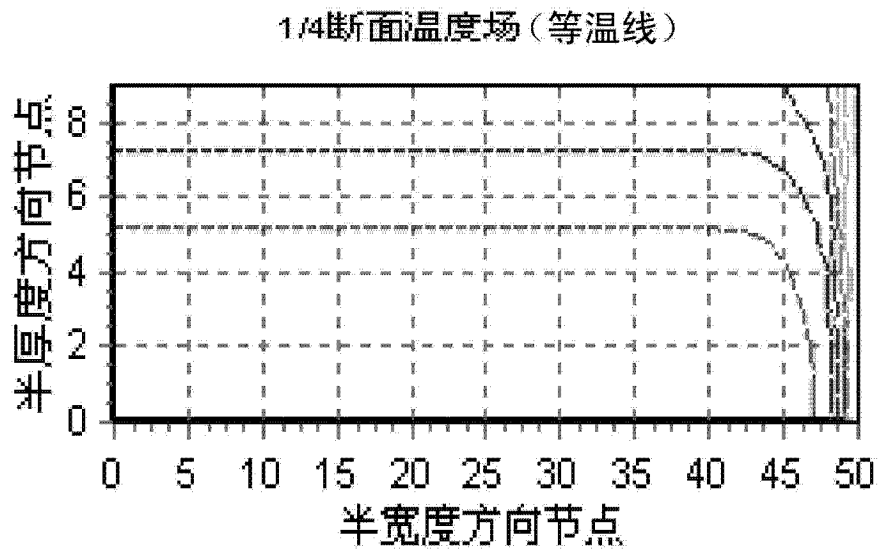


图 7

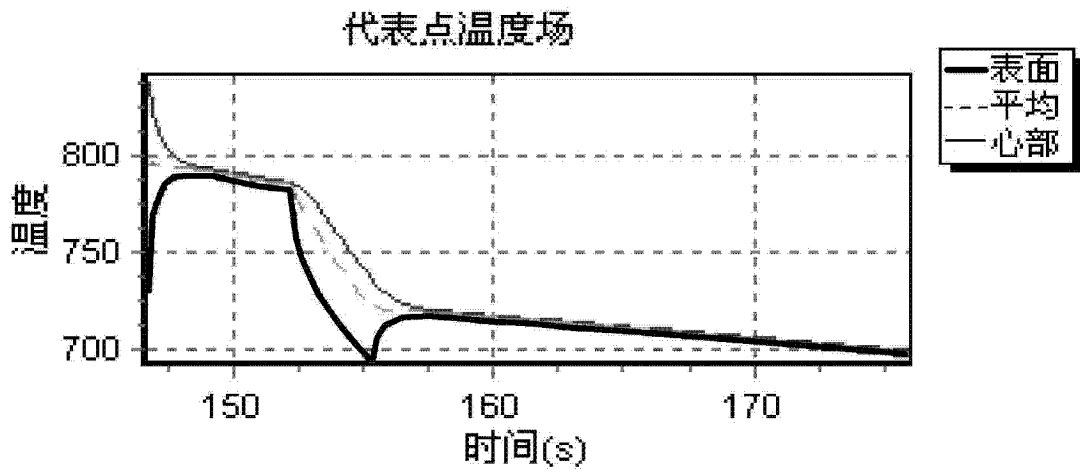


图 8

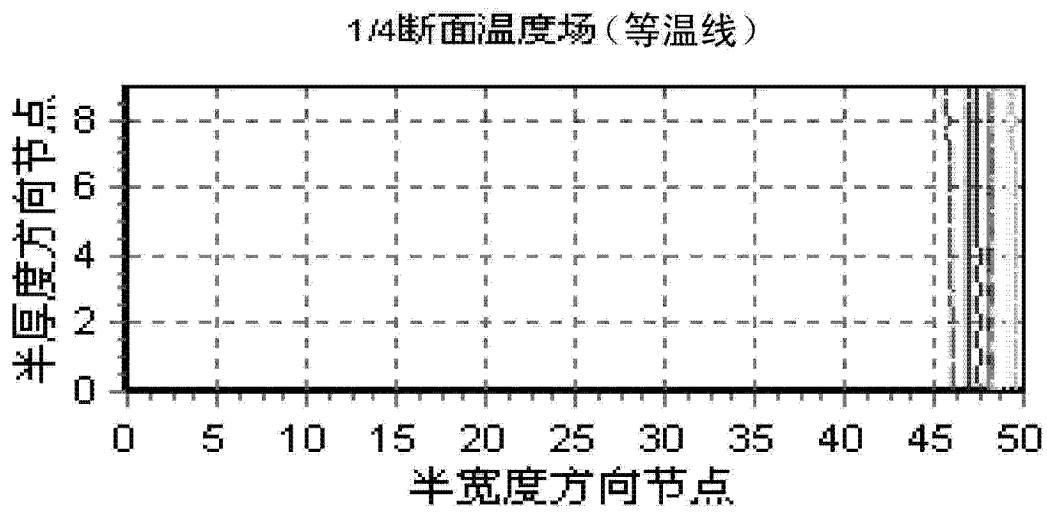


图 9