



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101928811 A

(43) 申请公布日 2010. 12. 29

(21) 申请号 200910053607. 5

(22) 申请日 2009. 06. 23

(71) 申请人 宝山钢铁股份有限公司

地址 201900 上海市宝山区牡丹江路 1813
号南楼

(72) 发明人 闫博 焦四海

(74) 专利代理机构 上海明成云知识产权代理有
限公司 31232

代理人 周成

(51) Int. Cl.

G21D 1/18 (2006. 01)

G21D 11/00 (2006. 01)

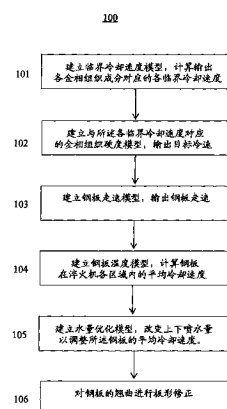
权利要求书 4 页 说明书 14 页 附图 4 页

(54) 发明名称

一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法

(57) 摘要

本发明揭示了一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法,首先根据钢板的元素比例及目标硬度,建立硬度和冷速的相关模型,计算出钢板的目标冷速;再根据目标冷速,利用建立的钢板走速模型计算出钢板走速;利用水量优化模型得到淬火机上下喷水量初始值,利用建立的温度模型得到钢板预测温度分布,从而得到冷速预测分布,如果此分布不满足之前得到的目标冷速,则水量优化模型将重新选择喷水量,直到满足冷速要求,此时的喷水量及钢板走速即为本发明的输出结果。最后,在淬火结束后,还可以通过板形修正步骤对钢板的翘曲进行修正,从而提高相同批次后续钢板的淬火精度。



1. 一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法,适用于钢板在淬火机上的淬火,其特征在于,包括以下步骤:

获取所述钢板的各元素比例以及目标硬度,将所述钢板的各元素比例输入建立的临界冷却速度模型,计算输出各金相组织成分对应的各临界冷却速度;

建立与所述各临界冷却速度对应的金相组织硬度模型,将所述临界冷却速度、钢板的各元素比例以及各金相组织比例输入所述金相组织硬度模型,计算输出金相组织硬度;根据所述金相组织硬度模型确定的金相组织硬度与金相组织比例的对应关系,确定所述目标硬度对应的金相组织比例,将所述目标硬度及其对应的金相组织比例输入所述金相组织硬度模型,计算输出目标冷速;

将获取的所述淬火机的辊道速度、板坯厚度输入建立的钢板走速模型,计算输出钢板走速;

建立钢板温度模型,所述钢板温度模型根据所述钢板的相关参数、所述钢板走速相对应的钢板运行时间,计算所述钢板的实时温度,并计算所述钢板在所述淬火机各区域内的平均冷却速度;

根据淬火机各区域的上下喷水量建立水量优化模型,当所述钢板温度模型输出的平均冷却速度不符合所述目标冷速时,所述水量优化模型改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。

2. 如权利要求 1 所述的冷却方法,其特征在于,所述方法还包括板形修正步骤:

2.1、获取所述钢板的翘曲度;

2.2、建立钢板换热系数修正模型,根据所述钢板翘曲度以及预定规则对所述钢板的上下表面的换热系数进行修正。

3. 如权利要求 1 所述的冷却方法,其特征在于,所述临界冷却速度模型为:

$$\log V = K - (A \cdot C\% + B \cdot Mn\% + D \cdot Ni\% + E \cdot Cr\% + F \cdot Mo\% + G \cdot Pa)$$

其中, K、A、B、D、E、F、G 为回归系数,根据试验数据回归得出; C、Mn、Ni、Cr、Mo 分别为碳、锰、镍、铬、钼元素的百分含量;

$$Pa \text{ 为奥氏体化参数: } Pa = \frac{1}{\left(\frac{1}{T} - \frac{R}{\Delta H} \ln t \right)}, \text{ T 为温度, R 为理想气体常数, } \Delta H \text{ 为过程的激}$$

活能, t 为时间。

4. 如权利要求 3 所述的冷却方法,其特征在于,所述临界冷却速度模型的回归系数见下表:

冷速	k	A	B	D	E	F	G
Logv1	9.81	4.62	0.78	0.41	0.8	0.66	0.0018
Logv1 (90)	8.76	4.04	0.86	0.36	0.58	0.97	0.001
Logv1 (50)	8.2	3	0.79	0.57	0.67	0.94	0.0012
Logv1 (10)	9.8	3.9	$-0.54 \cdot \text{Mn}$ $+2.45 \cdot \sqrt{\text{Mn}}$	0.46	0.5	1.16	0.002
Logv1 (0)	8.56	1.5	1.84	0.7	1.24	1.46	0.002
Logv2 (0)	10.55	4.8	0.8	0.72	1.07	1.58	0.0026
Logv2 (10)	9.06	4.11	0.9	0.6	1	2	0.0013
Logv2 (50)	8.04	3.4	1.15	0.96	1	2	0.0007
Logv2 (90)	8.4	2.8	1.51	1.03	1.1	2.31	0.0014
Logv2	8.56	1.5	1.84	0.78	1.24	$2 \cdot \sqrt{\text{Mo}}$	0.002

其中, Mn、Mo 为锰、钼元素的百分含量;

上表中的各临界冷却速度的含义见下表:

logv	含义	logv	含义
logv1	100%马氏体	logv2 (0)	不出现铁素体、珠光体
logv1 (90)	90%马氏体	logv2 (10)	10%铁素体、珠光体
logv1 (50)	50%马氏体	logv2 (50)	50%铁素体、珠光体
logv1 (10)	10%马氏体	logv2 (90)	90%铁素体、珠光体
logv1 (0)	开始产生 马氏体	logv2	100%铁素体、珠光体

5. 如权利要求 4 所述的冷却方法, 其特征在于, 所述金相组织硬度模型包括基本金相组织硬度模型和混合金相组织硬度模型, 所述基本金相组织硬度模型为:

$$Hv_M = 127 + 949 \cdot C\% + 27 \cdot Si\% + 11 \cdot Mn\% + 8 \cdot Ni\% + 16 \cdot Cr\% + 21 \cdot \log v$$

$$Hv_B = -323 + 185 \cdot C\% + 330 \cdot Si\% + 153 \cdot Mn\% + 65 \cdot Ni\% + 144 \cdot Cr\% + 191 \cdot Mo\% + (89 + 53 \cdot C\% - 55 \cdot Si\% - 22 \cdot Mn\% - 10 \cdot Ni\% - 20 \cdot Cr\% - 33 \cdot Mo\%) \cdot \log v$$

$$Hv_{F+P} = 42 + 223 \cdot C\% + 53 \cdot Si\% + 30 \cdot Mn\% + 12.6 \cdot Ni\% + 7 \cdot Cr\% + 19 \cdot Mo\% + (10 - 19 \cdot Si\% + 4 \cdot Ni\% + 8 \cdot Cr\% + 130 \cdot V\%) \cdot \log v$$

所述混合金相组织硬度模型为: $Hard = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i \cdot H_i}{100}$, 其中, X_i 为金相组织比例 (wt%), H_i

为金相组织硬度, $i = 1, 2, 3$, 分别代表马氏体, 贝氏体, 铁素体 / 珠光体; C、Mn、Ni、Cr、Mo、Si、V 分别为碳、锰、镍、铬、钼、硅、钒元素的百分含量;

其中, 所述基本金相组织硬度模型和所述混合金相组织硬度模型确定的所述临界冷却速度、金相组织硬度以及金相组织比例的对应关系见下表:

log v	硬度模型	硬度	比例
log v ₁	$Hv_M = C1_M + C2_M \log V$	$Hv_{M_s}(100\%M)$	全部为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ⁹⁰		$Hv_M(90\%M)$	90%为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ⁵⁰		$Hv_M(50\%M)$	50%为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ¹⁰		$Hv_M(10\%M)$	10%为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ⁰	$Hv_B = C1_B + C2_B \log V$	$Hv_{Mf}(100\%B)$	刚要出现马氏体，全部为贝氏体的硬度
log v ₂ ⁰	$Hv_B = C1_B + C2_B \log V$	$Hv_{Ff}(100\%B)$	刚要出现铁素体/珠光体，全部为贝氏体的硬度

log v ₂ ¹⁰	$Hv_F = C1_F + C2_F \log V$	$Hv_{F+P}(10\%F + P)$	10%为铁素体/珠光体
log v ₂ ⁵⁰		$Hv_{F+P}(50\%F + P)$	50%为铁素体/珠光体
log v ₂ ⁹⁰		$Hv_{F+P}(90\%F + P)$	90%为铁素体/珠光体
log v ₃		$Hv_{Fs}(100\%F + B)$	全部为铁素体/珠光体的最大硬度

其中 $C1_M = 127 + 949 \cdot C\% + 27 \cdot Si\% + 11 \cdot Mn\% + 8 \cdot Ni\% + 16 \cdot Cr\%$, $C2_M = 21$,

$C1_B = -323 + 185 \cdot C\% + 330 \cdot Si\% + 153 \cdot Mn\% + 65 \cdot Ni\% + 144 \cdot Cr\% + 191 \cdot Mo\%$

$C2_B = 89 + 53 \cdot C\% - 55 \cdot Si\% - 22 \cdot Mn\% - 10 \cdot Ni\% - 20 \cdot Cr\% - 33 \cdot Mo\%$

$C1_F = 42 + 223 \cdot C\% + 53 \cdot Si\% + 30 \cdot Mn\% + 12.6 \cdot Ni\% + 7 \cdot Cr\% + 19 \cdot Mo\%$

$C2_F = 10 - 19 \cdot Si\% + 4 \cdot Ni\% + 8 \cdot Cr\% + 130 \cdot V\%$ 。

6. 如权利要求 5 所述的冷却方法,其特征在于,所述钢板走速模型为:

$RollerSpeed = \alpha_1 * thickness^{\alpha_2}$, 其中, RollerSpeed 为钢板走速(淬火机辊道速度), thickness 为板坯厚度, α_1 , α_2 为回归系数。

7. 如权利要求 6 所述的冷却方法,其特征在于,所述钢板温度模型的工作流程包括以下步骤:

7.1、根据钢板厚度、钢板热导率、钢板上下表面热流以及钢板热扩散系数建立所述钢板的一维非对称热传导方程;

7.2、根据所述一维非对称热传导方程,建立沿钢板厚度方向上的温度分布方程,再按

钢板运行时间计算钢板实时的断面温度；

7. 3、获取钢板进入淬火机的预定区域时的初始平均温度、离开该区域的最终平均温度以及在该区域的停留时间，计算输出钢板的平均冷却速度。

8. 如权利要求 7 所述的冷却方法，其特征在于，所述一维非对称热传导方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \theta(x, 0) = \theta_0(x) \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \frac{\phi_s}{\lambda} \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=-\delta} = -\frac{\phi_l}{\lambda} \end{cases}, \quad \text{其中, } \delta = H/2, H \text{ 为钢板厚度; } \lambda \text{ 为钢板热导率; } \phi_s, \phi_l \text{ 分别为钢板}$$

上下表面热流； a^2 为钢板热扩散系数。

9. 如权利要求 8 所述的冷却方法，其特征在于，所述水量优化模型中，设第 i 段冷却区域的上下喷水量初始值为 flux_{top} 、 flux_{bot} ，将其作为基准值，在这两个基准值的上下，以 Δflux 为步长， n 为步数，形成两组水量，分别为：

第一组喷水量，

$\{\text{flux}_{\text{top}} - n \cdot \Delta \text{flux}, \text{flux}_{\text{top}} - (n-1) \cdot \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{top}}, \text{flux}_{\text{top}} + \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{top}} + n \cdot \Delta \text{flux}\}$ ；

第二组喷水量，

$\{\text{flux}_{\text{bot}} - n \cdot \Delta \text{flux}, \text{flux}_{\text{bot}} - (n-1) \cdot \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{bot}}, \text{flux}_{\text{bot}} + \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{bot}} + n \cdot \Delta \text{flux}\}$ ；

上述两组喷水量逐一配对，形成 $(2n+1) \times (2n+1)$ 组上下喷水量配对，当所述钢板温度模型输出的平均冷却速度不符合所述目标冷速时，所述水量优化模型改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。

10. 如权利要求 2 所述的冷却方法，其特征在于，所述钢板换热系数修正模型中，当下表面的换热系数小于上表面的换热系数时，根据下列公式对上下表面的换热系数进行修正：

$$\text{RatioValue} = \frac{(a_1 - a_2)}{1 + \exp\left(\frac{|ski - 1|}{\text{slope}}\right)} + a_2, \quad \alpha_{\text{bot}} = \alpha_{\text{top}} \times \left(1 - \frac{\text{RatioValue}}{100}\right),$$

其中， ski 为钢板翘曲度；RatioValue 为下表面换热系数的修正参数； a_1, a_2, slope 为公式的调试参数； $\alpha_{\text{top}}, \alpha_{\text{bot}}$ 分别为上下表面的换热系数。

一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法

技术领域

[0001] 本发明涉及钢铁行业的淬火领域,特别涉及一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法。

背景技术

[0002] 钢板的淬火工艺,一般适合厚板,即对轧制后重新加热至完全奥氏体状态的厚板进行急冷处理,使钢材产生马氏体相变和贝氏体相变,从而使其具有高韧性、高强度和良好焊接性能,淬火是调整材料组织性能的关键工艺,对生产具有稳定力学性能和良好板形的高强度厚板至关重要。其中,淬火机是关键设备,其对钢板的冷却方式一般采用上下喷射、喷淋的冷却方式。由于厚板淬火过程中,钢板表面被水雾包围,钢板的温度、板形检测困难,无法闭环控制,只能通过预设定的方式来控制,即根据用户对产品性能的要求确定目标冷速,通过预设冷却水量和钢板走速的方式来控制冷速达到目标,而如何制定目标冷速,以及如何设定水量和走速才能使钢板在达到目标冷速的同时获得稳定的性能和良好的板形,一直是厚板淬火机控制的难点。

[0003] 专利 CN1840723,公开了一种屈服强度 1100MPa 以上超高强度钢板及其制造方法,对终轧温度介于 860 ~ 920℃ 之间的钢板以不低于约 20℃ /s 的冷却速率在线淬火,至低于约 200 ~ 400℃ 的淬火终止温度。但是该方案只是解决了淬火冷速目标制定的问题,并没有提及淬火机如何实现这些目标。

[0004] 专利 CN2334511,公开了一种用于中厚钢板或钢带热轧后的冷却装置,其特点是水喷嘴与气喷嘴配合使用,可形成四种使用方式,能实现由空冷到淬火的系列冷却强度,调节范围大,可实现无阶梯调节。可大幅度地提高钢板或钢带的屈服强度和抗拉强度,而延伸率和冲击韧性不降低。但是该方案是针对淬火装置结构的发明或改进,并不涉及控制淬火机的冷却方法。

[0005] 专利 SU 1708871,公开了一种厚板热处理方法,通过细化组织来增强钢板的力学性能,根据辅助表达式进行水冷和空冷的循环冷却,从 Ar3(90-130℃) 的水冷开始,钢板的整个制造过程为加热、轧制、循环冷却。但是该方案提出的是与淬火有关的热处理方法,与淬火机的控制无关。

发明内容

[0006] 本发明的目的是提供一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法,通过建立控制模型来实现对钢板淬火时的冷却控制。

[0007] 本发明提供一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法,适用于钢板在淬火机上的淬火,包括以下步骤:

[0008] 获取所述钢板的各元素比例以及目标硬度,将所述钢板的各元素比例输入建立的临界冷却速度模型,计算输出各金相组织成分对应的各临界冷却速度;

[0009] 建立与所述各临界冷却速度对应的金相组织硬度模型,将所述临界冷却速度、钢

板的各元素比例以及各金相组织比例输入所述金相组织硬度模型,计算输出金相组织硬度;根据所述金相组织硬度模型确定的金相组织硬度与金相组织比例的对应关系,确定所述目标硬度对应的金相组织比例,将所述目标硬度及其对应的金相组织比例输入所述金相组织硬度模型,计算输出目标冷速;

[0010] 将获取的所述淬火机的辊道速度、板坯厚度输入建立的钢板走速模型,计算输出钢板走速;

[0011] 建立钢板温度模型,所述钢板温度模型根据所述钢板的相关参数、所述钢板走速相对应的钢板运行时间,计算所述钢板的实时温度,并计算所述钢板在所述淬火机各区域内的平均冷却速度;

[0012] 根据淬火机各区域的上下喷水量建立水量优化模型,当所述钢板温度模型输出的平均冷却速度不符合所述目标冷速时,所述水量优化模型改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。

[0013] 所述方法还包括板形修正步骤:

[0014] 2.1、获取所述钢板的翘曲度;

[0015] 2.2、建立钢板换热系数修正模型,根据所述钢板翘曲度以及预定规则对所述钢板的上下表面的换热系数进行修正。

[0016] 所述临界冷却速度模型为:

[0017] $\log V = K - (A \cdot C\% + B \cdot Mn\% + D \cdot Ni\% + E \cdot Cr\% + F \cdot Mo\% + G \cdot Pa)$

[0018] 其中,K、A、B、D、E、F、G为回归系数,根据试验数据回归得出;C、Mn、Ni、Cr、Mo分别为碳、锰、镍、铬、钼元素的百分含量;

[0019] Pa为奥氏体化参数:
$$Pa = \frac{1}{\left(\frac{1}{T} - \frac{R}{\Delta H} \ln t\right)}$$
, T为温度,R为理想气体常数, ΔH 为过程的激活能,t为时间。

[0020] 所述临界冷却速度模型的回归系数见下表:

冷速	k	A	B	D	E	F	G
Logv1	9.81	4.62	0.78	0.41	0.8	0.66	0.0018
Logv1(90)	8.76	4.04	0.86	0.36	0.58	0.97	0.001
Logv1(50)	8.2	3	0.79	0.57	0.67	0.94	0.0012
Logv1(10)	9.8	3.9	$-0.54 \cdot Mn + 2.45 \cdot \sqrt{Mn}$	0.46	0.5	1.16	0.002
Logv1(0)	8.56	1.5	1.84	0.7	1.24	1.46	0.002
Logv2(0)	10.55	4.8	0.8	0.72	1.07	1.58	0.0026
Logv2(10)	9.06	4.11	0.9	0.6	1	2	0.0013
Logv2(50)	8.04	3.4	1.15	0.96	1	2	0.0007
Logv2(90)	8.4	2.8	1.51	1.03	1.1	2.31	0.0014
Logv2	8.56	1.5	1.84	0.78	1.24	$2 \cdot \sqrt{Mo}$	0.002

[0022] 其中,Mn、Mo为锰、钼元素的百分含量;

[0023] 上表中的各临界冷却速度的含义见下表：

[0024]	logv	含义	logv	含义
	logv1	100%马氏体	logv2 (0)	不出现铁素体、珠光体
	logv1 (90)	90%马氏体	logv2 (10)	10%铁素体、珠光体
	logv1 (50)	50%马氏体	logv2 (50)	50%铁素体、珠光体
	logv1 (10)	10%马氏体	logv2 (90)	90%铁素体、珠光体
	logv1 (0)	开始产生马氏体	logv2	100%铁素体、珠光体

[0025] 所述金相组织硬度模型包括基本金相组织硬度模型和混合金相组织硬度模型，所述基本金相组织硬度模型为：

[0026] $Hv_M = 127 + 949 \cdot C\% + 27 \cdot Si\% + 11 \cdot Mn\% + 8 \cdot Ni\% + 16 \cdot Cr\% + 21 \cdot \log v$

[0027] $Hv_B = -323 + 185 \cdot C\% + 330 \cdot Si\% + 153 \cdot Mn\% + 65 \cdot Ni\% + 144 \cdot Cr\% + 191 \cdot Mo\%$

[0028] $+ (89 + 53 \cdot C\% - 55 \cdot Si\% - 22 \cdot Mn\% - 10 \cdot Ni\% - 20 \cdot Cr\% - 33 \cdot Mo\%) \cdot \log v$

[0029] $Hv_{F+P} = 42 + 223 \cdot C\% + 53 \cdot Si\% + 30 \cdot Mn\% + 12.6 \cdot Ni\% + 7 \cdot Cr\% + 19 \cdot Mo\%$
 $+ (10 - 19 \cdot Si\% + 4 \cdot Ni\% + 8 \cdot Cr\% + 130 \cdot V\%) \cdot \log v$

[0030] 所述混合金相组织硬度模型为： $Hard = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i \cdot H_i}{100}$ ，其中， X_i 为金相组织比例

(wt%)， H_i 为金相组织硬度， $i = 1, 2, 3$ ，分别代表马氏体，贝氏体，铁素体 / 珠光体；C、Mn、Ni、Cr、Mo、Si、V 分别为碳、锰、镍、铬、钼、硅、钒元素的百分含量；

[0031] 其中，所述基本金相组织硬度模型和所述混合金相组织硬度模型确定的所述临界冷却速度、金相组织硬度以及金相组织比例的对应关系见下表：

[0032]

$\log v$	硬度模型	硬度	比例
$\log v_1$	$Hv_M = C1_M + C2_M \log V$	$Hv_M(100\%M)$	全部为马氏体组织的最小硬度
$\log v_1^{90}$		$Hv_M(90\%M)$	90%为马氏体组织的最小硬度
$\log v_1^{50}$		$Hv_M(50\%M)$	50%为马氏体组织的最小硬度
$\log v_1^{10}$		$Hv_M(10\%M)$	10%为马氏体组织的最小硬度
$\log v_1^0$	$Hv_B = C1_B + C2_B \log V$	$Hv_{Mf}(100\%B)$	刚要出现马氏体，全部为贝氏体的硬度
$\log v_2^0$	$Hv_B = C1_B + C2_B \log V$	$Hv_{Ff}(100\%B)$	刚要出现铁素体/珠光体，全部为贝氏体的硬度
$\log v_2^{10}$	$Hv_F = C1_F + C2_F \log V$	$Hv_{F+P}(10\%F + P)$	10%为铁素体/珠光体
$\log v_2^{50}$		$Hv_{F+P}(50\%F + P)$	50%为铁素体/珠光体
$\log v_2^{90}$		$Hv_{F+P}(90\%F + P)$	90%为铁素体/珠光体
$\log v_3$		$Hv_{Fs}(100\%F + B)$	全部为铁素体/珠光体的最大硬度

[0033] 其中 $C1_M = 127+949 \cdot C\% + 27 \cdot Si\% + 11 \cdot Mn\% + 8 \cdot Ni\% + 16 \cdot Cr\%$, $C2_M = 21$,

[0034] $C1_B = -323+185 \cdot C\% + 330 \cdot Si\% + 153 \cdot Mn\% + 65 \cdot Ni\% + 144 \cdot Cr\% + 191 \cdot Mo\%$

[0035] $C2_B = 89+53 \cdot C\% - 55 \cdot Si\% - 22 \cdot Mn\% - 10 \cdot Ni\% - 20 \cdot Cr\% - 33 \cdot Mo\%$

[0036] $C1_F = 42+223 \cdot C\% + 53 \cdot Si\% + 30 \cdot Mn\% + 12.6 \cdot Ni\% + 7 \cdot Cr\% + 19 \cdot Mo\%$

[0037] $C2_F = 10-19 \cdot Si\% + 4 \cdot Ni\% + 8 \cdot Cr\% + 130 \cdot V\%$ 。

[0038] 所述钢板走速模型为：

[0039] $RollerSpeed = \alpha_1 * thickness^{\alpha_2}$, 其中, RollerSpeed 为钢板走速 (淬火机辊道速度), thickness 为板坯厚度, α_1 , α_2 为回归系数。

[0040] 所述钢板温度模型的工作流程包括以下步骤：

[0041] 7.1、根据钢板厚度、钢板热导率、钢板上下表面热流以及钢板热扩散系数建立所述钢板的一维非对称热传导方程；

[0042] 7.2、根据所述一维非对称热传导方程，建立沿钢板厚度方向上的温度分布方程，再按钢板运行时间计算钢板实时的断面温度；

[0043] 7.3、获取钢板进入淬火机的预定区域时的初始平均温度、离开该区域的最终平均温度以及在该区域的停留时间,计算输出钢板的平均冷却速度。

[0044] 所述一维非对称热传导方程为:

$$[0045] \begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \theta(x, 0) = \theta_0(x) \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \frac{\phi_s}{\lambda} \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=-\delta} = -\frac{\phi_l}{\lambda} \end{cases} \quad \text{其中, } \delta = H/2, H \text{ 为钢板厚度; } \lambda \text{ 为钢板热导率; } \phi_s, \phi_l \text{ 分别为}$$

钢板上下表面热流; a^2 为钢板热扩散系数。

[0046] 所述水量优化模型中,设第*i*段冷却区域的上下喷水量初始值为 flux_{top} 、 flux_{bot} ,将其作为基准值,在这两个基准值的上下,以 Δflux 为步长,*n*为步数,形成两组水量,分别为:

[0047] 第一组喷水量,

[0048] $\{\text{flux}_{\text{top}} - n \cdot \Delta \text{flux}, \text{flux}_{\text{top}} - (n-1) \cdot \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{top}}, \text{flux}_{\text{top}} + \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{top}} + n \cdot \Delta \text{flux}\}$;

[0049] 第二组喷水量,

[0050] $\{\text{flux}_{\text{bot}} - n \cdot \Delta \text{flux}, \text{flux}_{\text{bot}} - (n-1) \cdot \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{bot}}, \text{flux}_{\text{bot}} + \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{bot}} + n \cdot \Delta \text{flux}\}$;

[0051] 上述两组喷水量逐一配对,形成 $(2n+1) \times (2n+1)$ 组上下喷水量配对,当所述钢板温度模型输出的平均冷却速度不符合所述目标冷速时,所述水量优化模型改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。

[0052] 所述钢板换热系数修正模型中,当下表面的换热系数小于上表面的换热系数时,根据下列公式对上下表面的换热系数进行修正:

$$[0053] \quad \text{RatioValue} = \frac{(a_1 - a_2)}{1 + \exp\left(\frac{|ski - 1|}{\text{slope}}\right)} + a_2, \quad \alpha_{\text{bot}} = \alpha_{\text{top}} \times \left(1 - \frac{\text{RatioValue}}{100}\right),$$

[0054] 其中,*ski*为钢板翘曲度;RatioValue为下表面换热系数的修正参数; a_1, a_2 ,*slope*为公式的调试参数; $\alpha_{\text{top}}, \alpha_{\text{bot}}$ 分别为上下表面的换热系数。

[0055] 采用本发明所述的一种基于模型控制的钢板淬火冷却方法,首先根据钢板的元素比例及目标硬度,建立硬度和冷速的相关模型,计算出钢板的目标冷速;再根据目标冷速,利用建立的钢板走速模型计算出钢板走速;利用水量优化模型得到淬火机上下喷水量初始值,利用建立的温度模型得到钢板预测温度分布,从而得到冷速预测分布,如果此分布不满足之前得到的目标冷速,则水量优化模型将重新选择喷水量,直到满足冷速要求,此时的喷水量及钢板走速即为本发明的输出结果。最后,在淬火结束后,还可以通过板形修正步骤对钢板的翘曲进行修正,从而提高相同批次后续钢板的淬火精度。

附图说明

[0056] 图1是本发明的主流程图;

- [0057] 图 2 是本发明一实施例的流程图；
- [0058] 图 3 是本发明中由目标硬度判断金相组织的流程图；
- [0059] 图 4 是本发明中钢板走速、温度以及水量优化计算的流程图；
- [0060] 图 5 是本发明中的钢板淬火过程中的温度分布图。

具体实施方式

- [0061] 下面结合附图和实施例进一步说明本发明的技术方案。
- [0062] 参照图 1, 图 1 显示了本发明的主流程图 100, 包括：
- [0063] 101、建立临界冷却速度模型, 计算输出各金相组织成分对应的各临界冷却速度。
- [0064] 获取所述钢板的各元素比例以及目标硬度, 将所述钢板的各元素比例输入建立的临界冷却速度模型, 计算输出各金相组织成分对应的各临界冷却速度。
- [0065] 102、建立与所述各临界冷却速度对应的金相组织硬度模型, 输出目标冷速。
- [0066] 建立与所述各临界冷却速度对应的金相组织硬度模型, 将所述临界冷却速度、钢板的各元素比例以及各金相组织比例输入所述金相组织硬度模型, 计算输出金相组织硬度；根据所述金相组织硬度模型确定的金相组织硬度与金相组织比例的对应关系, 确定所述目标硬度对应的金相组织比例, 将所述目标硬度及其对应的金相组织比例输入所述金相组织硬度模型, 计算输出目标冷速。
- [0067] 103、建立钢板走速模型, 输出钢板走速。
- [0068] 将获取的所述淬火机的辊道速度、板坯厚度输入建立的钢板走速模型, 计算输出钢板走速。
- [0069] 104、建立钢板温度模型, 计算钢板在淬火机各区域内的平均冷却速度。
- [0070] 建立钢板温度模型, 所述钢板温度模型根据所述钢板的相关参数、所述钢板走速相对应的钢板运行时间, 计算所述钢板的实时温度, 并计算所述钢板在所述淬火机各区域内的平均冷却速度。
- [0071] 105、建立水量优化模型, 改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。
- [0072] 根据淬火机各区域的上下喷水量建立水量优化模型, 当所述钢板温度模型输出的平均冷却速度不符合所述目标冷速时, 所述水量优化模型改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。
- [0073] 106、对钢板的翘曲进行板形修正。
- [0074] 板形修正步骤包括：首先获取所述钢板的翘曲度, 然后建立钢板换热系数修正模型, 根据所述钢板翘曲度以及预定规则对所述钢板的上下表面的换热系数进行修正。
- [0075] 参见图 2, 图 2 显示了本发明一实施例的总流程图, 下面进行阐述：
- [0076] 首先采用 PH. Maynier 建立的临界冷却速度同化学成分之间的关系公式, 该公式也就是上述的临界冷却速度模型。
- [0077]
$$\log V = K - (A \cdot C\% + B \cdot Mn\% + D \cdot Ni\% + E \cdot Cr\% + F \cdot Mo\% + G \cdot Pa) \quad (1)$$
- [0078] 式中：K、A、B、D、E、F、G 为回归系数, 根据试验数据回归得出, 取值见表 2；C、Mn、Ni、Cr、Mo 分别为钢板碳、锰、镍、铬、钼元素的百分含量；Pa 为奥氏体化参数；

$$[0079] \quad Pa = \frac{1}{\left(\frac{1}{T} - \frac{R}{\Delta H} \ln t \right)} \quad (2)$$

[0080] 式中, T 为温度, R 为理想气体常数 (约为 2mo l/cal), ΔH 为过程的激活能 (约为 110kmol/cal), t 为时间。

[0081] 表 1 显示了各临界冷却速度的含义。而通过实验, 可得到表 2 的回归系数, 进而可求出各临界冷却速度。

[0082] 表 1

[0083]

logv	含义	logv	含义
logv1	100% 马氏体	logv2(0)	不出现铁素体、珠光体
logv1(90)	90% 马氏体	logv2(10)	10% 铁素体、珠光体
logv1(50)	50% 马氏体	logv2(50)	50% 铁素体、珠光体
logv1(10)	10% 马氏体	logv2(90)	90% 铁素体、珠光体
logv1(0)	开始产生马氏体	logv2	100% 铁素体、珠光体

[0084] 表 2

[0085]

冷速	k	A	B	D	E	F	G
Logv1	9.81	4.62	0.78	0.41	0.8	0.66	0.0018
Logv1(90)	8.76	4.04	0.86	0.36	0.58	0.97	0.001
Logv1(50)	8.2	3	0.79	0.57	0.67	0.94	0.0012
Logv1(10)	9.8	3.9	$-0.54 \cdot \text{Mn} + 2.45 \cdot \sqrt{\text{Mn}}$	0.46	0.5	1.16	0.002
Logv1(0)	8.56	1.5	1.84	0.7	1.24	1.46	0.002
Logv2(0)	10.55	4.8	0.8	0.72	1.07	1.58	0.0026
Logv2(10)	9.06	4.11	0.9	0.6	1	2	0.0013
Logv2(50)	8.04	3.4	1.15	0.96	1	2	0.0007
Logv2(90)	8.4	2.8	1.51	1.03	1.1	2.31	0.0014
Logv2	8.56	1.5	1.84	0.78	1.24	$2 \cdot \sqrt{\text{Mo}}$	0.002

[0086] 其中, Mn、Mo 为锰、钼元素的百分含量。

[0087] 金相组织硬度模型包括基本金相组织硬度模型以及混合金相组织硬度模型。可采用 PH. Maynier 建立的由临界冷却速度求马氏体 (M)、贝氏体 (B) 和铁素体 - 珠光体 (F+P) 硬度的计算公式, 该公式就是上述的基本金相组织硬度模型:

$$[0088] \quad H_{v_M} = 127 + 949 \cdot C\% + 27 \cdot Si\% + 11 \cdot Mn\% + 8 \cdot Ni\% + 16 \cdot Cr\% + 21 \cdot \log v \quad (3)$$

[0089] $Hv_B = -323 + 185 \cdot C\% + 330 \cdot Si\% + 153 \cdot Mn\% + 65 \cdot Ni\% + 144 \cdot Cr\% + 191 \cdot Mo\% + (89 + 53 \cdot C\% - 55 \cdot Si\% - 22 \cdot Mn\% - 10 \cdot Ni\% - 20 \cdot Cr\% - 33 \cdot Mo\%) \cdot \log v$ (4)

[0090] $Hv_{F+P} = 42 + 223 \cdot C\% + 53 \cdot Si\% + 30 \cdot Mn\% + 12.6 \cdot Ni\% + 7 \cdot Cr\% + 19 \cdot Mo\% + (10 - 19 \cdot Si\% + 4 \cdot Ni\% + 8 \cdot Cr\% + 130 \cdot V\%) \cdot \log v$ (5)

[0091] 同样, C、Mn、Ni、Cr、Mo、Si、V 分别为碳、锰、镍、铬、钼、硅、钒元素的百分含量。

[0092] 混合金相组织的硬度可以通过混合相加法则计算, 形成的就是所述混合金相组织硬度模型:

$$[0093] \quad Hard = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i \cdot H_i}{100} \quad (6)$$

[0094] 其中, X_i 为金相组织比例 (百分数 (wt%)), H_i 为组织硬度, $i = 1, 2, 3$, 分别代表马氏体, 贝氏体, 铁素体 / 珠光体。

[0095] 这样, 所述基本金相组织硬度模型和所述混合金相组织硬度模型就可以确定所述临界冷却速度、金相组织硬度以及金相组织比例的对应关系, 见以下的表 3:

[0096] 表 3

[0097]

log v	硬度模型	硬度	比例
log v ₁	$Hv_M = C1_M + C2_M \log V$	$Hv_{M_s}(100\%M)$	全部为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ⁹⁰		$Hv_M(90\%M)$	90%为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ⁵⁰		$Hv_M(50\%M)$	50%为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ¹⁰		$Hv_M(10\%M)$	10%为马氏体组织的最小硬度
log v ₁ ⁰	$Hv_B = C1_B + C2_B \log V$	$Hv_{Mf}(100\%B)$	刚要出现马氏体, 全部为贝氏体的硬度
log v ₂ ⁰	$Hv_B = C1_B + C2_B \log V$	$Hv_{Ff}(100\%B)$	刚要出现铁素体/珠光体, 全部为贝氏体的硬度
log v ₂ ¹⁰	$Hv_F = C1_F + C2_F \log V$	$Hv_{F+P}(10\%F+P)$	10%为铁素体/珠光体
log v ₂ ⁵⁰		$Hv_{F+P}(50\%F+P)$	50%为铁素体/珠光体
log v ₂ ⁹⁰		$Hv_{F+P}(90\%F+P)$	90%为铁素体/珠光体
log v ₃		$Hv_{Fs}(100\%F+B)$	全部为铁素体/珠光体的最大硬度

[0098] 其中

[0099] $C1_M = 127 + 949 \cdot C\% + 27 \cdot Si\% + 11 \cdot Mn\% + 8 \cdot Mi\% + 16 \cdot Cr\%$

[0100] $C2_M = 21$

[0101] $C1_B = -323 + 185 \cdot C\% + 330 \cdot Si\% + 153 \cdot Mn\% + 65 \cdot Ni\% + 144 \cdot Cr\% + 191 \cdot Mo\%$

[0102] $C2_B = 89 + 53 \cdot C\% - 55 \cdot Si\% - 22 \cdot Mn\% - 10 \cdot Ni\% - 20 \cdot Cr\% - 33 \cdot Mo\%$

[0103] $C1_F = 42 + 223 \cdot C\% + 53 \cdot Si\% + 30 \cdot Mn\% + 12.6 \cdot Ni\% + 7 \cdot Cr\% + 19 \cdot Mo\%$

[0104] $C2_F = 10 - 19 \cdot Si\% + 4 \cdot Ni\% + 8 \cdot Cr\% + 130 \cdot V\%$

[0105] 参见图 3, 图 3 为由目标硬度判断金相组织的流程图, 图 3 中的 Hard 为目标硬度, 将其与各临界冷速对应的临界硬度进行比较, 通过比较之后不同的结果, 进行目标冷速的计算。金相组织为两相或三相时, 根据表 3 中各临界冷速对应的硬度, 采用线性插值的方法, 可以确定出各相的百分比。

[0106] 金相组织为马氏体和贝氏体时, 即可确定马氏体量为 m, 那么贝氏体量为 100-m,

$$[0107] \quad Hard = \frac{m \times (C1_M + C2_M \log v) + (100 - m) \times (C1_B + C2_B \log v)}{100} \quad (7)$$

$$[0108] \quad v = 10^{\frac{100Hard - C1_M m - C1_B(100-m)}{C2_M m + C2_B(100-m)}} \quad (8)$$

[0109] 金相组织为贝氏体和铁素体 / 珠光体时, 确定铁素体 / 珠光体的量为 m , 贝氏体的量为 $100-m$,

$$[0110] \quad Hard = \frac{(100 - m) \times (C1_B + C2_B \log v) + m \times (C1_F + C2_F \log v)}{100} \quad (9)$$

$$[0111] \quad v = 10^{\frac{100Hard - C1_B(100-m) - C1_F m}{C2_B(100-m) + C2_F m}} \quad (10)$$

[0112] 金相组织为马氏体、贝氏体、铁素体 + 珠光体三相的混合组织, 那么先确定马氏体量为 m , 铁素体 / 珠光体量为 n , 贝氏体量为 $100-m-n$,

$$[0113] \quad Hard = \frac{m \times (C1_M + C2_M \log v) + (100 - m - n) \times (C1_B + C2_B \log v) + n \times (C1_F + C2_F \log v)}{100} \quad (11)$$

$$[0114] \quad v = 10^{\frac{100Hard - C1_M m - C1_B(100-m-n) - C1_F n}{C2_M m + C2_B(100-m-n) + C2_F n}} \quad (12)$$

[0115] 作为一实施例, 以上的公式 (8)、(10)、(12) 即为目标冷速。

[0116] 参见图 4, 图 4 显示了钢板走速、温度以及水量优化计算的流程图, 具体步骤见下:

[0117] 建立钢板走速模型: 钢板的运行速度, 最终是通过淬火机辊道速度来设定的, 本发明采用回归的方法, 对实际生产数据中, 不同厚度板坯的辊道速度进行回归, 得到如下公式 (钢板走速模型):

$$[0118] \quad RollerSpeed = \alpha_1 * thickness^{\alpha_2} \quad (13)$$

[0119] 其中, RollerSpeed 为钢板走速 (淬火机辊道速度);

[0120] thickness 为板坯厚度;

[0121] α_1 , α_2 为回归系数, 根据试验可以得出 α_1 , α_2 分别约为 120, -0.77。

[0122] 建立钢板温度模型: 由钢板走速模型得到的钢板运行速度, 即可得到钢板在淬火机各区域的运行时间, 利用钢板温度模型即可方便的得到钢板在淬火过程中的温度分布, 以及由该温度分布得到的冷速分布。

[0123] 钢板在淬火区域中的温度变化事实上是钢板与冷却水的热交换, 以及钢板内部的热传导过程。付立叶能量守恒定律描绘了物体的热流量和温度分布之间的关系。在热轧钢板的加热或冷却过程一般可用以下的一维非对称热传导方程描述:

$$[0124] \quad \begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \\ \theta(x, 0) = \theta_0(x) \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=\delta} = \frac{\phi_s}{\lambda} \\ \left. \frac{\partial \theta}{\partial x} \right|_{x=-\delta} = -\frac{\phi_l}{\lambda} \end{cases} \quad (14)$$

[0125] 其中： $\delta = H/2$, H :钢板厚度, λ :钢板热导率, ϕ_s 、 ϕ_l :钢板上下表面热流, a^2 :钢板热扩散系数。

[0126] 利用以上的一维非对称热传导方程,从空间上建立钢板厚度方向上的温度分布方程,再按时间片,分时间段进行计算,从而可以计算钢板在任意时刻的断面温度。

[0127] 在对钢板在淬火机每一个区域的温度分布计算完成之后,通过计算板坯进入该区域的初始平均温度、离开该区域的最终平均温度,以及在该区域中的停留时间,即可求出钢板在该区域的平均冷却速度。

$$[0128] \quad V_{\text{cooling}} = (t_{\text{final}} - t_0) / \tau_1 \quad (15)$$

[0129] 其中, V_{cooling} 为平均冷却速度;

[0130] t_{final} 为钢板离开该段区域时的最终平均温度;

[0131] t_0 为钢板进入该段区域时的初始平均温度;

[0132] τ_1 为钢板在该段区域的运行时间(停留时间)。

[0133] 建立水量优化模型,根据公式(15)得到的平均冷却速度,与目标冷速进行比较,即可通过水量优化模型对各段水量的设定值进行优化调整了。

[0134] 所述水量优化模型中,设第 i 段冷却区域的上下喷水量初始值为 flux_{top} 、 flux_{bot} ,将其作为基准值,在这两个基准值的上下,以 Δflux 为步长, n 为步数,形成两组水量,分别为:

[0135] 第一组喷水量,

$$[0136] \quad \{\text{flux}_{\text{top}} - n \cdot \Delta \text{flux}, \text{flux}_{\text{top}} - (n-1) \cdot \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{top}}, \text{flux}_{\text{top}} + \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{top}} + n \cdot \Delta \text{flux}\}; \quad (16)$$

[0137] 第二组喷水量,

$$[0138] \quad \{\text{flux}_{\text{bot}} - n \cdot \Delta \text{flux}, \text{flux}_{\text{bot}} - (n-1) \cdot \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{bot}}, \text{flux}_{\text{bot}} + \Delta \text{flux}, \dots, \text{flux}_{\text{bot}} + n \cdot \Delta \text{flux}\};$$

[0139] (17)

[0140] 上述两组喷水量逐一配对,形成 $(2n+1) \times (2n+1)$ 组上下喷水量配对,当所述钢板温度模型输出的平均冷却速度不符合所述目标冷速时,所述水量优化模型改变上下喷水量以调整所述钢板的平均冷却速度。其对照目标冷速,选取最优的水量组,即为该段区域的水量设定值。

[0141] 钢板的板形修正步骤:虽然淬火过程只能采用预设定的方法控制水量和钢板走速,无法动态控制,但是可以采用模型自适应的方法,利用已淬火结束的钢板板形数据,修正同批次后续钢板的预设模型。建立钢板换热系数修正模型,可将淬火钢板的翘曲度作为该模型的输入,钢板的厚度方向上翘曲度以 ski 表示,其取值范围为 $(-1, 1)$ 。钢板向下

翘, ski 取负值;钢板向上翘, ski 取正值;钢板平直, ski 取零。翘曲度的检测可以采用翘曲度检测设备,也可以采用人工检测。

[0142] 当板坯下表面的换热系数小于上表面的换热系数,修正换热系数的计算公式如下所示。

$$[0143] \quad RatioValue = \frac{(a_1 - a_2)}{1 + \exp(\frac{|ski - 1|}{slope})} + a_2 \quad (18)$$

$$[0144] \quad \alpha_{bot} = \alpha_{top} \times (1 - \frac{RatioValue}{100}) \quad (19)$$

[0145] 其中:ski 为钢板翘曲度,

[0146] RatioValue 为下表面换热系数的修正参数,

[0147] $a_1, a_2, slope$ 为公式的调试参数,根据试验可以分别约为 5, 25, -0.0025;

[0148] $\alpha_{top}, \alpha_{bot}$ 为上下表面的换热系数。

[0149] 上面的公式 (18)、(19) 就是钢板换热系数修正模型的一实施例。对上下表面换热系数进行修正之后,重新启动预计算模型,即可获得更新后的淬火机冷却的预设定值。

[0150] 下面通过一台淬火机进行进一步的说明:

[0151] 该淬火机设置于辊底式热处理炉之后,用于厚板的淬火处理,生产 B610E、SHT700、SHT900 乃至更高强度级别的厚板。该淬火机按喷水方式及水压大小分为三段,即高压段、中压段、低压段,处理钢板的厚度范围为 8mm-50mm,板宽最大为 3100mm。以 SHT900 钢板为例:钢板成分如表 1 所示,厚度为 35mm,宽度为 2150mm,在加热炉中 930℃保温 2 小时,开冷温度值为 900℃,目标硬度为 325(Hv)。

[0152] 钢板化学成分表:

[0153]

成分	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Al
wt%	0.15	0.29	1.38	0.012	0.005	0.02	0.34	0.42	0.26	0.024	0.03

[0154] 实施步骤

[0155] 步骤一,计算目标冷速

[0156] $C\% = 0.15, Si\% = 1.38, Mn\% = 1.38, Ni\% = 0.34, Cr\% = 0.42, Mo\% = 0.26, Nb\% = 0.024, Al\% = 0.03, Cu\% = 0.02$

[0157] $T_{\text{奥氏体化温度}} = 930^{\circ}\text{C}, t_{\text{保温}} = 2\text{h}$

[0158] 由表 2 可以求出各临界冷速,

[0159] $100\% \text{ 马氏体 } V_{M_1} = 5.7^{\circ}\text{C/s}$

[0160] $90\% \text{ 马氏体 } V_{M_{90}} = 5.408^{\circ}\text{C/s}$

[0161] $50\% \text{ 马氏体 } V_{M_{50}} = 4.811^{\circ}\text{C/s}$

[0162] $10\% \text{ 马氏体 } V_{M_{10}} = 3.722^{\circ}\text{C/s}$

[0163] 刚要出现马氏体 $V_{M_f} = 2.775^{\circ}\text{C/s}$

[0164] 刚要出现铁素体 / 珠光体 $V_{F_p} = 5.174^{\circ}\text{C/s}$

- [0165] 10%铁素体 / 珠光体 $V_{F10} = 4.834^{\circ}\text{C} / \text{s}$
- [0166] 50%铁素体 / 珠光体 $V_{F50} = 4.018^{\circ}\text{C} / \text{s}$
- [0167] 90%铁素体 / 珠光体 $V_{F90} = 3.166^{\circ}\text{C} / \text{s}$
- [0168] 100%铁素体 / 珠光体 $V_{F_{\infty}} = 2.863^{\circ}\text{C} / \text{s}$
- [0169] 同样可求出临界硬度,
- [0170] 100%马氏体的最小硬度 $Hv_{M_{\infty}} = 408.62$
- [0171] 刚要出现马氏体的硬度 $Hv_{M_f} = 227.8$
- [0172] 刚要出现铁素体 / 珠光体的硬度 $Hv_{F_f} = 300.4$
- [0173] 100%铁素体 / 珠光体的最大硬度 $Hv_{F_{\infty}} = 113.46$
- [0174] 根据目标硬度为 325 (Hv), 由图 3 可判断出组织为马氏体和贝氏体两相。
- [0175] $Hv_{M90} = 391.50$
- [0176] $Hv_{M50} = 337.16$
- [0177] $Hv_{M10} = 266.40$
- [0178] 则马氏体相含量 $M\% = \frac{50-10}{337.16-266.40} \times (325-337) + 50 = 43.12\%$
- [0179] 贝氏体含量 $B\% = 100\% - 43.12\% = 56.88\%$
- [0180] 由式 (8) 得到目标冷速为 $V = 11.48^{\circ}\text{C} / \text{s}$
- [0181] 步骤二, 计算钢板走速:
- [0182] 式 (13) 中 $a_1 = 120, a_2 = -0.77$
- [0183] $RollerSpeed = \alpha_1 \cdot thickness^{a_2} = 120 \times 35^{-0.77} = 7.77 \text{m} / \text{min}$
- [0184] 步骤三, 计算钢板各冷却段上下表面喷水量:
- [0185] 钢板各段初始喷水量选自历史数据库中最接近该块钢板的数据,
- [0186] $flux_{top1} = 6000 \text{L} / \text{min}, flux_{top2} = 5000 \text{L} / \text{min}, flux_{top3} = 3000 \text{L} / \text{min},$
- [0187] $flux_{bot1} = 9000 \text{L} / \text{min}, flux_{bot2} = 6300 \text{L} / \text{min} \quad flux_{bot3} = 5000 \text{L} / \text{min}$
- [0188] 采用一维有限差分的算法, 可得各冷却段厚度方向的温度分布, 根据式 (5) 求出此组喷水量下能达到的冷速, 通过式 (16)、(17) 所示方法, 循环调整喷水量以到达目标冷速。最终得到下的各段喷水量设定值。
- [0189] 淬火机各段喷水量设定值表

[0190]

冷却区域	喷水量 (L/min)	
高压段	上	6300
	下	9150
中压段	上	5000
	下	6300
低压段	上	3000
	下	5000

[0191] 步骤四, 根据实际淬火结果, 修正同批次后续钢板水量设定值。

[0192] 淬火结束后板坯向下翘曲, $ski = -0.2$

[0193] 根据式 (18)、式 (19), $a_1 = 5, a_2 = 25, slope = -0.005$

[0194]
$$RatioValue = \frac{(a_1 - a_2)}{1 + \exp(\frac{|ski - 1|}{slope})} + a_2 = 5$$

[0195] 得到 $\alpha_{bot} = \alpha_{top} \times (1 - \frac{RatioValue}{100}) = 0.95 \cdot \alpha_{top}$

[0196] 再次调用预设模型, 重复步骤二, 按照图 2 的计算流程, 得到修正后的各段水量的设定值, 如下表所示。

[0197] 淬火机各段喷水量设定值

[0198]

冷却区域	喷水量 (L/min)	
高压段	上	6300
	下	9150
中压段	上	5000
	下	7000
低压段	上	3000
	下	5000

[0199] 以此水量计算出的温度分布如图 5 所示, 与淬火结束后测得的钢板温度值有较强的一致性。以此喷水量作为后续钢板的水量设定值, 可以实现板形改善, 使力学性能满足要求。

[0200] 本技术领域中的普通技术人员应当认识到, 以上的实施例仅是用来说明本发明, 而并非用作为对本发明的限定, 只要在本发明的实质精神范围内, 对以上实施例的变化、变型都将落在本发明的权利要求书范围内。

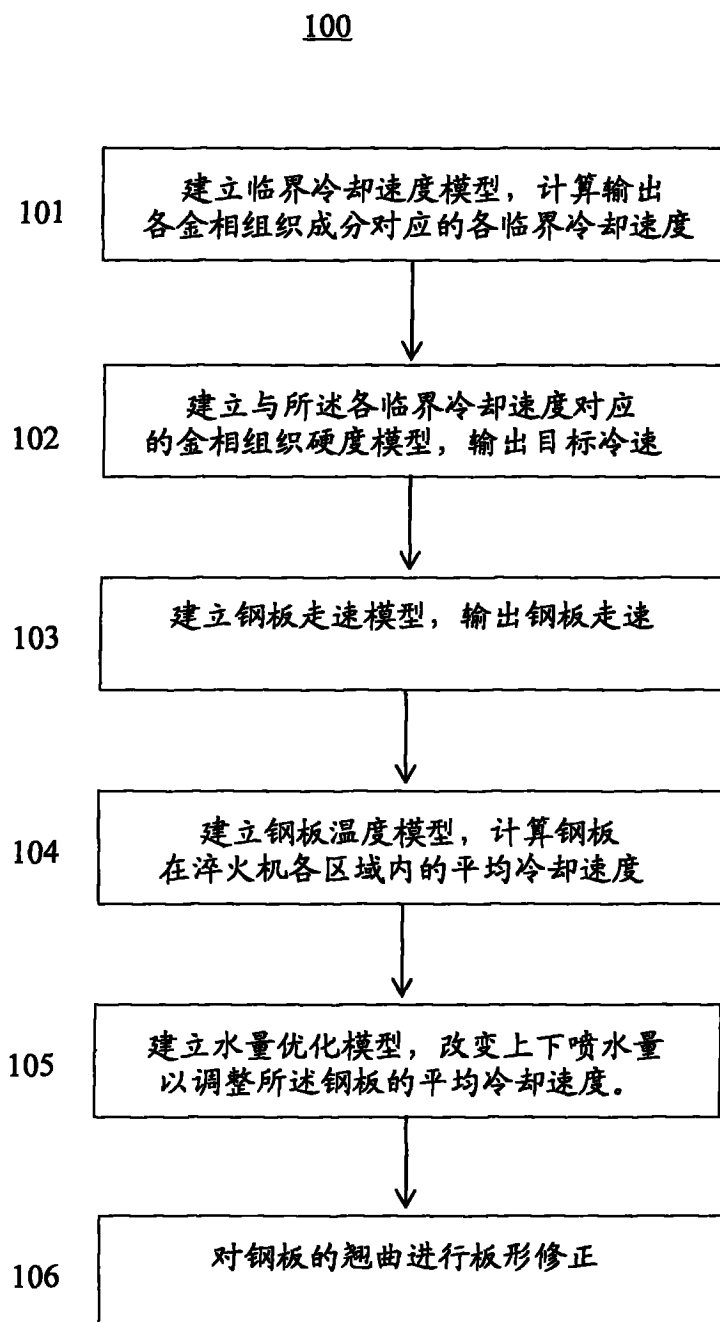


图 1

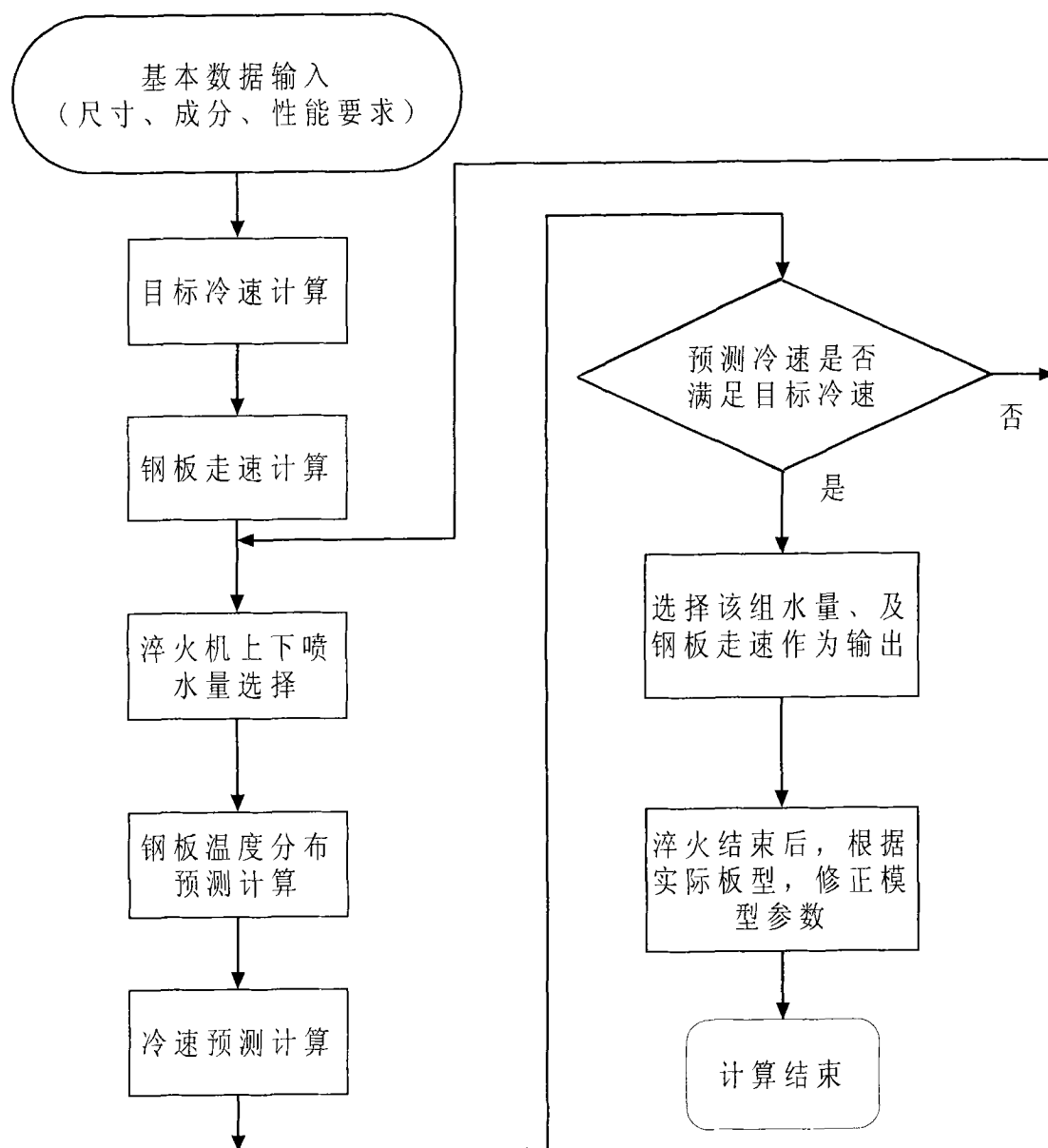


图 2

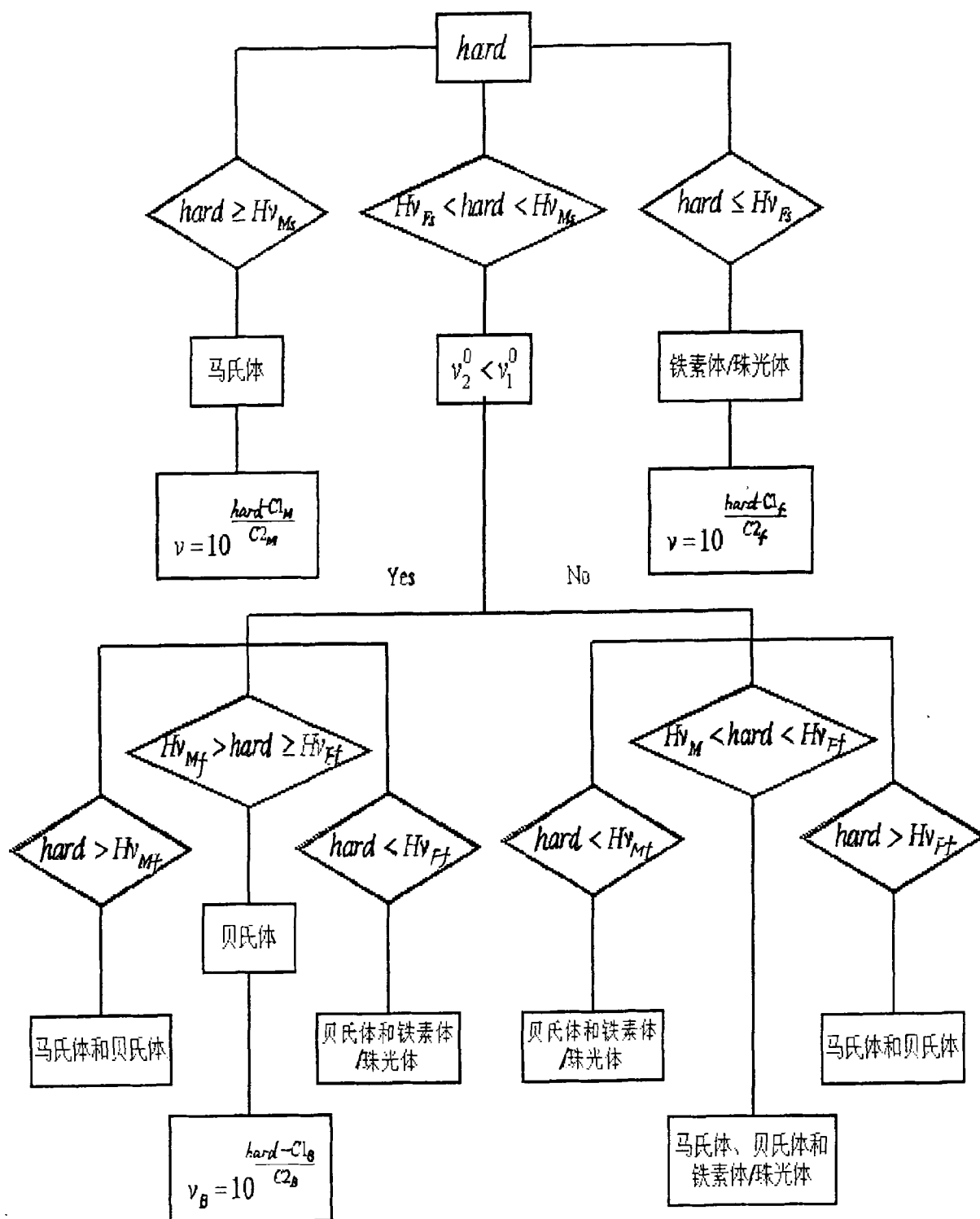


图 3

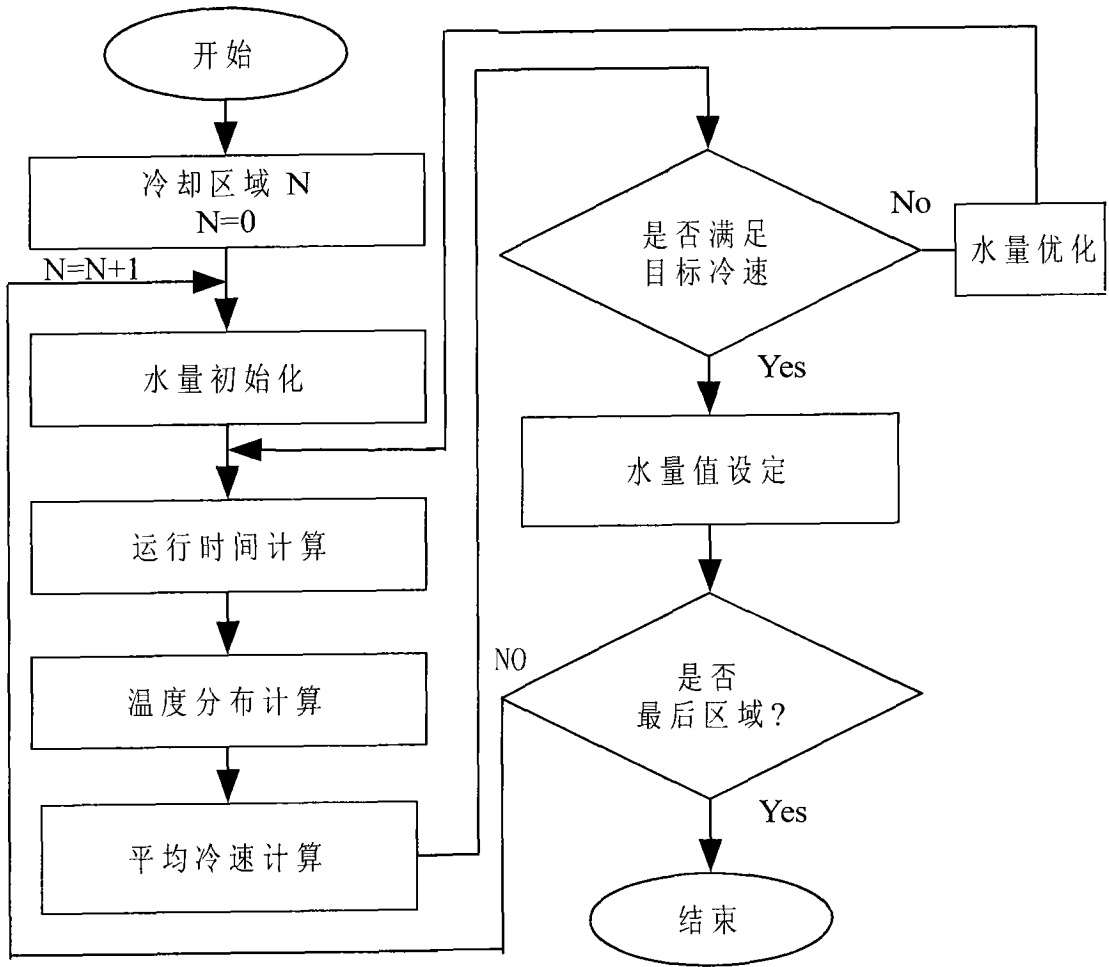


图 4

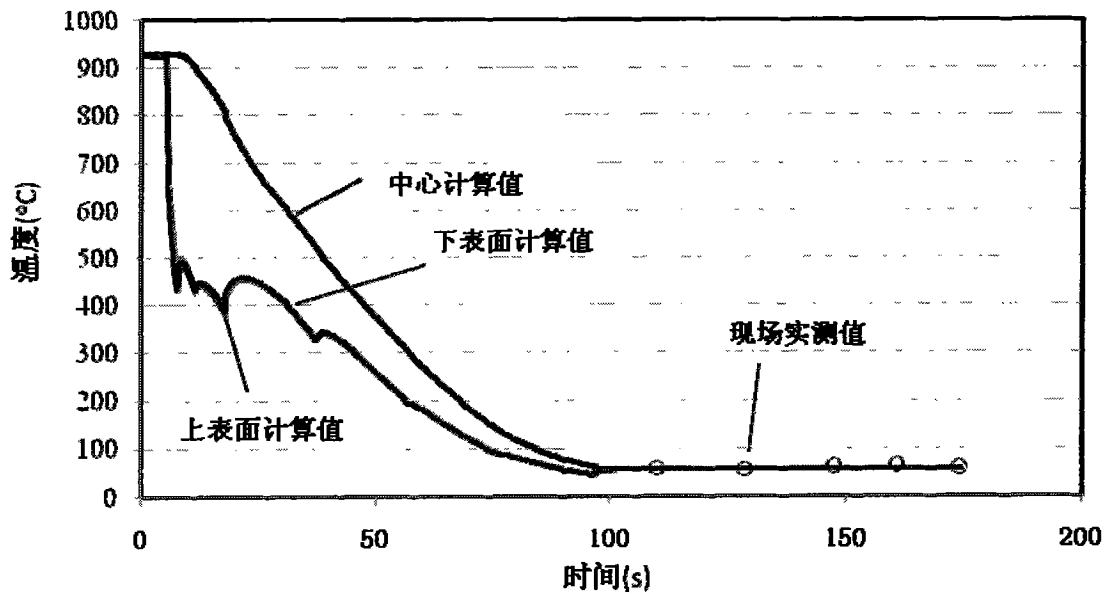


图 5