

连续铸钢的热过程

〔苏〕Ю. А. 萨莫伊洛维奇 编

鲁开疑 俞景录 译

冶金工业出版社



连续铸钢的热过程

〔苏〕Ю. А. 萨莫伊洛维奇 编

鲁开嶷 俞景禄 译

冶金工业出版社

连续铸钢的热过程

[苏] IO. A. 萨莫伊洛维奇 编

鲁开耀 俞景禄 译

责任编辑 王华宗

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店北京发行所发行

河北省阜城县印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 6 字数 156 千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数00,001~3,150册

统一书号: 15062·4516 定价 1.80元

译者说明

苏联科学技术博士 Ю.А.Самойлович 引证大量资料（包括他自己的研究成果）编写了这本《连续铸钢的热过程》（Тепловые процессы при непрерывном литье стали, Металлургия, 1982）。它是一本着重论述连铸坯成形过程热物理问题的专著。

书中首先介绍了铸坯凝固的简易计算法，并作了适当的引伸，从而使连铸工作者有可能随时估计各种工艺因素对铸坯成形过程的影响，然后应用铸坯凝固过程的数学模型对其成形条件进行详细的理论分析，并结合铸坯表面及内部测温（书中详述了测温方法）所得的热分析试验结果，论证并确定正常与非正常（注速或拉速突变时）连铸条件下的合理工艺参数，为建立各类连铸机的通用操作工艺提供某些有价值的论据。这种主次分明、简繁得当、理论分析和试验分析并用的写法构成了该书的特点。

尚嫌不足的是，书中所用符号比较杂乱，特别是对某些符号的物理意义缺乏交待；综合性例题偏少。

本书第一、二章由鲁开巛翻译；序及第三、四章由俞景禄翻译。全书由俞景禄统一校定。为了便于读者查对，编列了主要符号一览表。

限于译者的水平，中译本中肯定会有谬误和不当之处，敬祈读者指正。

1985年元旦于西安

主要符号一览表

a	导温系数
Bi	毕奥准数
b	料块(铸坯)中断面到相际界面的距离
C	辐射传热系数或简写辐射传热系数; 溶质浓度
c	熔体比热; 冷却水的比热容
c_1	凝固层的比热
c_2	熔体比热
C_0	溶液组分的初始浓度; 绝对黑体的辐射系数; 经验常数
C_x	液相中溶质的局部浓度
C_{np}	简写辐射传热系数
c_{ϕ}	有效比热容
∇C	溶质的浓度梯度
D	溶质扩散系数; 雅可比行列式
E	弹性模数
F	铸坯表面与结晶器器壁的接触面积
F_0	傅里叶准数
F_0	结晶器器壁与铸坯表面的额定接触面积
f	铸坯表面与结晶器器壁的平均接触面积; 铸坯的喷水面积
G	抗剪弹性模数; 出钢量
Gr	格拉晓夫准数
g	单位耗水量或喷水密度; 重力加速度
g_B	单位耗水量
H	复热势的实部
h	铸坯两相区上方金属液的高度

K	气体溶解度常数
k	分配平衡常数; 凝固系数; 热物理准数; 二冷区的段数
k_n	树枝晶网状组织的渗透率
L	单位熔化热
l^*	两相区某薄层(流动层)厚度
Δl	渗透区长度
M	弛豫时间的缩比, $M = t^*/t_*$
Nu	努塞尔准数
p	钢液静压力
P^*	两相区缩孔中气体的压力
P_0	充填两相区中缩孔的熔体的压力
Pe	贝克来准数
Pr	普朗特准数
ΔP	渗透液的压差
∇P	压力梯度
Q	注速(质量流率); 总热流量
$Q_{\kappa p}$	相变时坯壳放出的热量
$Q_{\kappa \kappa}$	坯壳平均温度变化时放出的热量
$Q_{\text{пот}}$	被冷却的铸坯表面散失的全部热量
$Q_{\text{конт}}$	接触热交换的热流量
$Q_{\text{мзн}}$	辐射热交换的热流量
q	热流密度
$q_{\text{кст}}$	冷却水汽化的热流密度
$q_{\text{поп}}$	铸坯表面的热流密度
$q_{\text{конт}}$	接触热交换的热流密度; 结晶前沿的热流密度
$q_{\text{мзн}}$	辐射热交换的热流密度
$q_{\kappa p}$	流向结晶器器壁的热流密度
q_s	结晶器器壁一侧相界面处坯壳的热流密度
q_l	铸坯未凝部分环流熔体一侧坯壳的热流密度

R	晶体长大速率
R_c	接触热阻
Re	雷诺准数
$r_{\text{с.о.н}}$	两相区的固相边界
$r_{\text{л.н.к}}$	两相区的液相边界
S	距离; 铸坯的半厚度; 计算域的断面面积
T	温度
$T_{\text{к.р.}}$	熔体的平衡结晶温度; 结晶器器壁的温差
$T_{\text{п}}$	铸坯表面温度
$T^{\text{п}}$	铸坯表面温度
$T_{\text{по.в}}$	铸坯表面温度
T_0	初始温度
T^0	初始温度
T_c	介质温度
T_2^0	料块(铸坯)中断面熔体的初始温度
$\overline{T}$	坯壳断面的平均温度
$T_{\text{л.н.к}}$	液相线温度
$T_{\text{с.о.н}}$	固相线温度
$T_{\text{н}}$	结晶初始温度
$T_{\text{к}}$	结晶温度范围的某一界线的温度
$\Delta T_{\text{к.р.}}$	结晶温度范围
ΔT	熔体的过热度; 坯壳断面上的温差
$T_{\text{л.н.к}}^{\circ}$	初始浓度为 C_0 的合金液相线温度
$T_{\text{э.в.т}}$	共晶转变温度
$T^{\text{н.о.н}}$	初始温度
$T_{\text{ос.н}}$	铸坯轴心温度
$T_{\text{г.р.}}$	铸坯表面中心温度
$T_{\text{с.р.}}$	介质温度
$\Delta T^{\text{н.о.н}}$	熔体的初始过热度
δT	温度余差

$\delta T_{\text{ноб}}$	铸坯表面温度与稳定值的偏差
T_{ci}	i 层铸坯平均表面温度
$T_{\kappa i}$	i 层结晶器器壁的温度
t^*	弛豫时间 (材料蠕变特征值)
t_{κ}	铸坯完全凝固的总时间; 结晶器器壁与铸坯的相对接触时间
t_0	浇注周期; 条件弛豫时间
$t_{\text{пер}}$	过渡过程的时间
t_{11}	金属在两相状态的停留时间
v	浇注的线速度或拉速; 速度矢量
v_0	界面层上边界处的熔体流速; 铸坯液心轴线处上升液流的速度
v^*	有两相区的界面层边界上的流速
$\bar{v}_0$	铸坯液心轴线处上升液流速度的稳定值
v_1	沿结晶前沿下降液流的最大速度
v_0	铸坯两相区中控制体积元之容积
$v_{\text{тн}}$	铸坯两相区中控制体积元内之固相容积
$\bar{v}$	两相区的平均迁移速率
$v_{\text{кп}}$	临界凝固速率
v_r	溶解在金属中的气体体积
W	冷却水耗量; 补缩用的金属液实际消耗量
W_0	补缩所需的金属液消耗量
x	变为蒸汽的水之百分率
α	传热系数或总传热系数; 线性膨胀系数
α_v	两相区内的传热系数
α_{κ}	对流传热系数
$\alpha_{\text{кон}}$	对流传热系数或条件对流传热系数
$\alpha_{\text{рсл}}$	辐射传热系数或条件辐射传热系数
$\alpha_{\text{исп}}$	汽化传热系数或条件汽化传热系数
α^*	传热系数的极限值

α_0	辐射和自然对流条件下铸坯表面热交换强度特征值
Γ_i	铸坯表面的温度梯度
γ	熔体的比重; 运动粘度系数
Δ_{11}	两相区的宽度
δ	水力学热界面层厚度; 热电偶热端之间的距离; 增量符号
δ_r	热界面层的厚度
δ_s	气隙层厚度的当量值
δ_r	显微气隙层的厚度
δ^*	显微气隙层的厚度
δ_0	过热完全消失时的坯壳初始厚度
ε	坯壳厚度; 铸坯表面的黑度; 高温计的测温误差
$\dot{\varepsilon}$	凝固速率, $\varepsilon = \partial \varepsilon / \partial t$
ε_{ij}	应变张量
ε_s	铸坯表面黑度
ε_k	结晶器器壁表面的黑度
η	相对接触面积, $\eta = f/F$; 速度比, $\eta = v^*/v_0$; 面相关值 (相对接触时间)
Θ	温度因子
θ	温度余差; 复热势的虚部
$\nabla \theta$	温度梯度
λ	熔体的分子导热系数
$\lambda_{s\varphi}$	熔体的有效导热系数
λ_r	气隙层的导热系数
λ	显微气隙层的导热系数
λ_s	气隙层导热系数的当量值
λ_1	铸坯导热系数
λ_2	结晶器器壁的导热系数
$\overline{\lambda}$	简写导热系数
μ	动力粘度系数; 冷却水消耗系数

μ_s	晶体长大速度的动力学系数
ρ	钢液密度
ρ_s	水的密度
σ	铸坯表面辐射热交换系数
σ_{ij}	应力张量
φ	相对接触面积, $\varphi = f/F$
ψ	固相相对量
$\dot{\psi}$	凝固速率, $\dot{\psi} = \partial\psi/\partial t$
ω	坯壳厚度; 分布函数或概率密度
ω_0	需要的渗透速率
$\bar{\omega}$	实际渗透速率

目 录

主要符号一览表

序	1
第一章 铸坯的凝固计算	4
1—1 铸坯凝固的简易（工程）算法	4
1—2 合金凝固的准平衡模型	29
1—3 铸坯凝固准平衡模型的数值算法	39
1—4 近似分析法	44
1—5 两相区内熔体的渗透	49
第二章 热分析的试验方法	56
2—1 凝固铸坯内部温度的测定方法	56
2—2 工业试验结果	62
2—3 用高温计测定铸坯表面温度	75
2—4 结晶器的热工研究	83
第三章 连铸的热物理过程	88
3—1 铸坯与结晶器之间的热交换	88
3—2 液流与铸坯结晶前沿之间的热交换	96
3—3 铸坯液心的热对流	104
3—4 循环熔体的有效导热系数	112
3—5 二次冷却区的热交换	117
3—6 坯壳中的热应力	121
第四章 合理连铸制度的确定	133
4—1 合理的连铸制度	133
4—2 确定状态参数的程序	140
4—3 利用数学模型和数字计算机论证状态参数	142
4—4 二次冷却区喷嘴的选择和布置	151
4—5 控制拉速变化时的连铸过渡态	158
参考文献	174

序

连续铸钢是近几年来广泛应用的最先进工艺过程之一。与模铸比较,连铸的优点是,改善钢的质量,提高金属收得率,提高机械化和自动化程度以及劳动生产率。目前苏联许多钢厂投产的大型氧气转炉车间均配有高生产率的连铸工段。例如,在新利佩茨克冶金厂,转炉与连铸机配合(实现“多炉”连浇),可使金属收得率从94~95%增加到96~99%。在使用立式和弧型连铸机的过程中,我们积累了科学论证合理连铸制度的丰富经验,包括解决很多工艺难题。其中,合理连铸制度的热工论证占有重要地位。

研究连铸条件下热物理和热工问题的必要性在于,铸坯的成形过程是在相当高的温度(1750~1770K)以及铸坯本身和同其接触的连铸机部件内温度梯度均很大的情况下发生的集合体转化过程。试验表明,连铸机结构解决得不合理,或者铸坯的冷却制度不适当,就会出现偶发事故或使铸态结构的缺陷超出允许量。生产大断面铸坯时,只要其未凝部分(金属液池)的深度达20~30m,而表面温度通常不低于1200~1300K,对合理连铸制度进行热物理(热工)论证就具有特殊的意义。随着铸坯尺寸和重量的增加,试验研究铸坯成形热条件(铸坯表面及其内部测温)的难度也增加。有鉴于此,才使我们对用现代数理方法和数字计算机分析连铸时铸坯成形条件的理论方法颇为注意。

在苏联和国外,有不少专门论述铸坯成形热物理观点的学术著作。П.П.依万佐夫(Иванцов)^[1]、А.И.魏尼克(Вейник)^[2]、А.А.斯克沃尔佐夫(Скворцов)和А.Д.阿基缅科(Акименко)^[3]的著作就是其代表。有关铸坯结晶方面的许多问题,在В.А.叶菲莫夫(Ефимов)、В.С.鲁捷斯(Рутес)、Д.П.叶夫捷耶夫(Евтеев)、А.И.马诺欣(Манохин)、В.Т.鲍里索夫

(Борисов)、В.Т.斯拉德科施捷耶夫(Сладкоштьев)、М.Я.布罗夫曼(Бровман)^[4~10]和苏联其他研究者的论著中已经顺利解决。

本书中提出的预测和调整连铸机二次冷却系统的综合研究法在工业条件下进行过卓有成效的试验。综合研究法的实质是使数字计算机作出的铸坯结晶之预测同连铸过程中坯体内的新测温法(将热电偶凝结在铸坯中)相结合。综合研究法的工作程序如下:

1) 利用数值法和数字计算机对连铸过程中铸坯的合理二次冷却制度进行预测。预测过程中要用到一些有关铸坯凝固规律性及所选喷嘴的冷却介质(水)雾化条件方面的已知(非实测的)数据。在预测的基础上,对二次(喷水)冷却区各段的布置方式作出初步推荐,设计连铸机时要用到它们。

2) 工业条件下进行的坯体测温(将热电偶组件凝结在未凝铸坯中),能够得到冷却制度和铸坯凝固方面的信息,供连铸机二冷区设计计算用。试验结果可用来估计铸坯的凝固时间(或液心深度)以及沿铸坯周边和长度方向上的冷却均匀度。但是试验所得信息的用途并不局限于此。

3) 根据热分析的试验数据和铸坯结晶过程的数学模型,利用数字计算机重新确立二冷区的热流和传热系数的边界值。归结底是确立二冷区喷嘴的单位耗水量 g 和铸坯表面的有效传热系数 α 值之相互关系。该关系,即 $\alpha=f(g)$ 是校正二次冷却系统的基础,同时可用于设计类似型式的连铸机。

将所述方法用于新利佩茨克冶金厂的弧型连铸机,可建立新的关系式: $\alpha=\alpha_0+\eta g$ 。式中, $\alpha_0=140\sim 160\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, $\eta=151.2\text{ kJ/m}^3\cdot\text{K}$ 。

4) 根据明确的边界条件,再对二冷区各段的布置、各段内的喷嘴数以及沿铸坯周边和长度方向上的冷却水耗量的分配作出修正。

我们认为,上述综合研究法可用于任何形式的连铸机。凝固

过程的数学模型将视铸坯断面形状而作相应修改；连铸机的具体特点有差异可改变铸坯的测温方法，但这时工作程序仍不变。这样一来，建立连铸机二次冷却系统的通用操作法就会成为现实。由于连铸钢产量的增加以及设备和铸坯断面形状的多样化，这项工作尤感迫切。我们利用计算复杂形状铸坯凝固的新方法，试算了运动的液流与坯壳之间的热交换强度，分析了注速突然变化（特别是事故停机）时铸坯冷却和结晶的过渡态。编制相应的 АСУ ТП 算法时，可以利用与连铸过渡态的铸坯结晶有关的数学模型。

考虑到钢液结晶动力学和铸坯各种化学不均匀性的形成等问题在叶菲莫夫^[4]和马诺欣^[8]的著作中已有细述，我们就不再涉及这些内容，而是着重讨论连续铸钢的热过程。

第一章 铸坯的凝固计算

1—1 铸坯凝固的简易（工程）计算法

铸坯的凝固过程可用熔体的凝固层随时间和空间而迁移的规律或凝固定律来描述：

$$\varepsilon = f(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$\dot{\varepsilon} = \varphi(x, y, z, t) \quad (2)$$

式中 ε ——坯壳厚度；
 $\dot{\varepsilon}$ ——凝固速率； $\dot{\varepsilon} = \partial \varepsilon / \partial t$ 。

对操作者来说，掌握式 1 和式 2 很重要，其原因如下：

1) 凝固定律（式 1）描绘出铸坯未凝固部分的相对位置，且可算出总液相深度（连铸机的“冶金长度”），这对于合理确定连铸工艺参数——拉速和表面冷却强度极为重要。

2) 凝固定律反映出可能出现连铸机漏钢的最大危险区（如结晶器下口）的坯壳厚度，而危险区内铸坯周边凝固层的厚度和不均匀性正是研讨防止漏钢的方法时最重要的工艺特征值。

3) 凝固前沿的相对位置决定了铸坯液心的范围，而对铸坯结构的形成和化学成分不均匀性（偏析）的诱发有影响的对流就出现在液心区；对流速度则主要取决于由凝固定律确定的铸坯未凝部分的体积。

4) 凝固速率 $\dot{\varepsilon}$ 对化学成分不均匀性（区域偏析）的产生起着重要的作用。专题研究表明，如果凝固速率超过某一临界值，则能阻止钢中形成区域偏析〔4, 416页〕。

如果由于漏钢形成“靴筒”露出结晶前沿（常有的情况），连铸时凝固前沿的相对位置就可直接估测到。此外，还可利用指示剂（硫化铁，放射性同位素）测定凝固前沿的形状。按照平方根定律估算熔体凝固速率的这种简单方法也被广泛采用：

$$\varepsilon = k \sqrt{t} \quad (3)$$

式 3 中的比例系数 k 称为凝固系数，它随铸坯的断面形状、钢液过热度和表面冷却条件而改变。例如，当浇注断面为 300×300 、 200×200 和 100×100 mm 的 C_T3 中碳钢方坯时， k 值分别为 2.2、2.63 和 3.1 cm/min^{1/2} [5, 58 页]。

钢液的过热度增加 100 K，方坯和圆坯（方坯边长或圆坯直径为 140 mm）的凝固系数就从 2.9 减小到 2.5 cm/min^{1/2} [7, 52 页]。

由经验所得的平方根定律 (3)，与冷却表面保持恒温的半有限大熔体凝固问题的解析解一致 [11, 第 11 章]。下面就介绍该问题的数学式（通常称为斯忒藩 (Стефан) 问题，系以 19 世纪 70～80 年代研究灰浆凝固过程的奥地利数学家的名字命名）。现来研究在被冷却的表面上取 x 为初始坐标的半有限大熔体。料块的一部分 ($0 \leq x \leq \varepsilon$) 为固相，另一部分 ($x > \varepsilon$) 是熔体。该两部分的非稳态导热率，可用抛物线型方程来表示：

当 $0 \leq x \leq \varepsilon$ 时，

$$(\partial T_1 / \partial t) = a_1 (\partial^2 T_1 / \partial x^2)$$

当 $x > \varepsilon$ 时，

$$(\partial T_2 / \partial t) = a_2 (\partial^2 T_2 / \partial x^2)$$

边界条件为：

当 $x = 0$ 时，

$$T_1 = f_1(t)$$

当 $x \rightarrow \infty$ 、 $t > 0$ 时，

$$\partial T_2 / \partial x = 0$$

当 $x = \varepsilon$ 时，

$$-\lambda_1 (\partial T_1 / \partial x)_{x=\varepsilon} = \rho L (\partial \varepsilon / \partial t) - \lambda_2 (\partial T / \partial x)_{x=\varepsilon}$$

当 $x = \varepsilon$ 时，

$$T_1(\varepsilon, t) = T_2(\varepsilon, t) = T_{\text{кр}} = \text{const}$$

当 $t = 0$ 时，

$$T_1(x, 0) = \varphi_1(x)$$

$$T_2(x, 0) = \varphi_2(x)$$

式中 下标带“1”的变量和系数为凝固层的；带“2”者则为熔体的；

ε ——函数对时间可连续微分； $\varepsilon = \varepsilon(t)$ ；

T_1 、 T_2 ——和导数 $\partial T / \partial t$ 、 $\partial^2 T / \partial x^2$ 一起在所示区域内都是有定义和连续的；

$T_{\text{кп}}$ ——熔体的平衡结晶温度（一般视为常数）；

ρ ——料块的密度；

λ ——导热系数；

L ——单位熔化热；

a ——熔体的导温系数， $a = \lambda / \rho c$ ，其中， c 为熔体的比热。

若假设被冷却表面的温度不随时间变化（即 $f_1 = T_n = \text{const}$ ）和初始温度分布均匀（即 $\varphi_1 = \varphi_2 = T_0 = \text{const}$ ），则斯忒藩问题的解具有最简单的形式。这时凝固层沿 x 轴正向的推进情况可由式3求得，并且凝固系数 k 为超越方程的根：

$$\frac{\lambda_1(T_{\text{кп}} - T_1^n)}{\sqrt{a_1} \operatorname{erf}(k/2\sqrt{a_1})} \exp(-k^2/4a_1) + \frac{\lambda_2(T_0 - T_{\text{кп}}) \exp(-k^2/4a_2)}{\sqrt{a_2} \operatorname{erfc}(k/2\sqrt{a_2})} = \rho_2 L k \sqrt{\pi/2} \quad (4)$$

而凝固层和熔体中的温度场可由下式确定^[12, 425页]：

$$T_1(x, t) = T_1^n + (T_{\text{кп}} - T_n) \frac{\operatorname{erf}(x/2\sqrt{a_1}t)}{\operatorname{erf}(k/2\sqrt{a_1})} \quad (5)$$

$$T_2(x, t) = T_0 - (T_0 - T_{\text{кп}}) \times [\operatorname{erfc}(x/2\sqrt{a_2}t)] / \operatorname{erfc}(k/2\sqrt{a_2}) \quad (6)$$

式4~6中用到了高斯误差函数的符号：

$$\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$$

$$\operatorname{erfc} x = 1 - \operatorname{erf} x$$

如果熔体的过热忽略不计，且令 $T_0 = T_{\text{кп}}$ ，则可简化斯忒藩问题的求解过程，此外，若把函数 $\exp Z^2$ 和 $\operatorname{erf} Z$ 展成级数且取