

国外连续炼钢译文

上海科学技术情报研究所

国外连续炼钢译文

上海科学技术情报研究所出版

新华书店上海发行所发行

上海科技情报所印刷厂印刷

◆

开本: 787×1092 1/32 印张: 3.5 字数: 81,000

1974年5月第1版 1974年5月第1次印刷

印数: 1—4,100

代号: 151634·177 定价: 0.45元

(只限国内发行)

毛主席语录

外国一切好的经验、好的技术，都要吸收过来，为我所用。

社会的财富是工人、农民和劳动知识分子自己创造的。只要这些人掌握了自己的命运，又有一条马克思列宁主义的路线，不是回避问题，而是用积极的态度去解决问题，任何人间的困难总是可以解决的。

任何新生事物的成长都是要经过艰难曲折的。在社会主义事业中，要想不经过艰难曲折，不付出极大努力，总是一帆风顺，容易得到成功，这种想法，只是幻想。

近几年来，炼钢新技术——连续炼钢越来越引起注意，英、法、苏、日、美、瑞典及澳大利亚等十几个国家都相继进行试验研究。

炼钢过程的连续化是整个钢铁冶金企业实行从矿石到成品钢材一条龙流水生产的主要关键。这种连续生产法可减少损耗，提高产品质量，最大限度的强化生产过程、提高设备的效率，便于严格控制生产过程，实现机械化和自动化、提高劳动生产率。

遵照伟大领袖毛主席“洋为中用”的教导，我们在上钢五厂、上海交通大学、上海自动化仪表研究所等单位的大力支持下，选择了近几年来这方面较有参考价值的文章编译成册，以供冶金工作者参考。

由于我们编译水平有限，如有错误和不当之处，请批评指正。

编者1973年8月

目 录

连续炼钢的传质估算	(1)
连续氧气炼钢法的发展	(15)
俄克拉(WORCRA)连续炼钢法	(35)
法国钢铁研究院连续炼钢法的工业 发展	(53)
日本金属材料研究所的连续 炼钢法	(64)
英国钢铁研究学会的喷雾炼钢	(70)
铁水、钢水流量计	(90)

连续炼钢传质的估算

序 言

本文试图将平炉或槽式连续炼钢炉内所发生的渣-金反应用一种既能最普遍地包括各种基本限制因素，又能最简单地导出其解答的方式来加以讨论。这种解答极易被理解，并适用于连续炼钢过程的合理设计。最重要的简化是假设所有的精炼反应可用一个决定精炼过程的单一反应速率来表示，而该单一反应基本上是服从于质量扩散定律的。假设质量扩散系数为某一平均总速率，则精炼时间与金属熔池成正比，与平静的渣-金接触面积成反比。

为了数学上的简化起见，垂直方向的微分系数假设为一个平均距离。按此假设，传质过程必须在钢液熔池总深度的一半处进行。同时又假设水平方向和垂直方向的传质系数是相等的。就水平混合而言，这种极端的假设与真实系统相似。垂直方向的混合由于金属内部所形成的一氧化碳气泡的上浮作用而大大地加强了。众所周知，在平炉中正由于一氧化碳气泡的沸腾导致钢水液滴猛烈地垂直上升，并穿过炉渣达到熔池表面。不出所料，精炼速率反比于熔池深度的假设导致了这样的结论：平炉熔池较深主要是为了在一次熔炼中能获得大量的钢，而槽式连续精炼法的熔池就应造得非常浅，以使金属在熔池中的停留时间非常短。这表明连续精炼法的熔池深度大致为平炉熔池深度的 $1/10$ ，而精炼时间即使每小时总产量达好几百吨也仅需平炉的 $1/10$ 。这就意味着连续精炼法的耐火材料消耗和冶炼成

本可大大减少。此外，虽然渣中 FeO 与金属中碳之间的吸热反应需要补充燃烧热量，但也不必使用氧气喷枪，而只要沿熔池的适当位置按设燃料——氧气喷枪即可解决问题。因计算完全取决于传质与钢液深度成反比的基本假设，上述结论尚需通过一系列试验予以证明。为此，伦敦机械工程部实验室正在建造这样一种试验装置，其铁水流量为 $0.2 \sim 3.0$ 吨/小时，熔池深度为若干厘米，并采用逆流渣操作工艺。

摘 要

假设通常从铁水(杂质浓度用 C_a 表示)转变为钢水(C_b)的精炼过程速度受杂质通过渣-金界面的传质速率所控制，而该速率又服从于一般质量传递定律，即它与接触面积以及钢中杂质浓度和渣中与钢液相平衡的同一杂质浓度的差值成正比，与钢液的平均深度成反比，则根据典型平炉精炼法数据得出，比例系数 K 约为 $4.5 \sim 9.0$ 呎²/小时。该系数应用于逆流渣操作的槽式连续炼钢过程表明，对生产能力为 10 吨/小时的设备，若槽的宽度不超过 12 吋，其长度方向(即轴向)的扩散作用是不会发生的。同时也表明，当槽的长度至少为其深度的 30 倍时，用很低的石灰消耗和很少的氧气吹炼就可获得非常纯净的钢。

问题的叙述

精炼过程

在平炉中，精炼过程通常是以钢中各种元素特别是 C、P 和 S 从原始值降至占原始值很小部分的终点值所需的精炼时间来表示的(典型的约为 $1 \sim 1\frac{1}{2}$ 小时)。Si 和 Mn 除了生成 SiO_2

等形态进入炉渣降低其碱度从而也降低了它吸收 S、P 的能力外，一般是没有什么问题的。

本文的目的就是利用平炉数据来预言用逆流渣操作的连续炼钢炉的钢产量。其做法是把控制平炉精炼速率的微分方程展开，利用平炉数据估算该方程的系数并引用到连续精炼过程中去。

这样的假设看来是合理的，即全部精炼过程或至少是其中的决定性或限制性环节是受钢液平均深度上所含的少量元素和渣中相应元素间的传质速率所控制。传质速率与渣-金接触面积 A 以及平衡状态下钢和渣中的杂质浓度差成正比，而与钢液深度 y 成反比。比例系数取全部杂质扩散的有效平均值。

事实上，沿炼钢槽的温度变化仅仅影响方程式中的 n 值，而同传质系数 K 的关系不大。 K 值系按同样温度范围内平炉操作的平均值来计算的，因而把它应用到槽式精炼炉中是合理的。 n 值对所得结果只能起稍加修正的作用，因为在平炉中除了某种特殊情况外，炉渣从未达到接近饱和的状态。从这一理由出发，只要能获得相应的 K 值，至于氧来源于炉渣或来源于气态喷射则并不十分重要。传质基本微分方程的展开(图 1)。

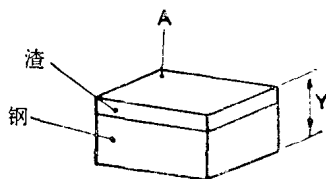


图 1 精炼过程单元

假设反应速度受钢和渣中的传质所控制，则根据一般阻力定律，

$$\frac{d}{dt}(\text{在给定容积中杂质质量}) = -K' \frac{A}{y/2} \left(C - \frac{C_s}{n} \right) \quad (1)$$

式中: A = 渣钢间的接触面积

y = 钢液深度

K' = 特定的传质系数(包括炉渣阻力的影响), 这是一个有效的平均值, 由表面扩张的计算得到, 并且是实际中发生的对流扩散和分子扩散的综合

C = 钢中某杂质的质量浓度(沿 y 向的平均值)

C_s = 渣中同一杂质的质量浓度

$$n = \left(\frac{C_s}{C} \right) \text{平衡, 即 } n \gg 1 \text{ 表示炉渣对杂质的亲和力}$$

(如硫的 n 值在 100 左右)。

这样, 当给定容积中钢的质量 = $9Ay$, 方程式(1)便变成

$$\rho Ay \frac{dc}{dt} = -K' \frac{A}{y/2} \left(C - \frac{C_s}{n} \right)$$

如果将 K (特定容积的传导率) 表示成 $K = \frac{K'}{9}$, 就可以得到

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{K}{y^2/2} \left(C - \frac{C_s}{n} \right) \quad (2)$$

该式可作为描述杂质递减率的基本定律。

基本传质方程式在平炉熔池精炼中的应用

基本方程的积分

在单渣操作和不用氧吹炼的典型平炉中, 过程开始, 即当

$t = 0$ 时, 渣中杂质浓度等于零, 钢中杂质浓度 C_a 系最大值, 即此时的边界条件是 $C_s = 0$, $C = C_a$, 当从 $t = 0$ 过渡到 $t = t$ 时, 杂质的质量平衡为

$$C_s \cdot m_s = (C_a - C) \cdot m$$

于是我们能假设 m_s/m 保持不变, 用 $f = m/m_s$ 来表示 (即钢-渣的质量比, 该比率约为 8)。这样, 方程式 (2)

$$\frac{dc}{dt} = \frac{-K}{y^2/2} \left(C - \frac{C_s}{n} \right)$$

就变成

$$\begin{aligned} \frac{dc}{dt} &= \frac{-K}{y^2/2} \left(C - \frac{f}{n} \overline{C_a - C} \right) \\ &= \frac{-K}{y^2/2} \left(C \overline{1 + \frac{f}{n}} - \frac{f}{n} C_a \right) \\ \frac{dc}{C \overline{1 + \frac{f}{n}} - \frac{f}{n} C_a} &= - \frac{2K}{y^2} dt \end{aligned}$$

积分后得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{1 + \frac{f}{n}} \log_e \left(\frac{C - \frac{f}{n+f} C_a}{C_a - \frac{n}{n+f} C} \right) &= - \frac{2K}{y^2} t \\ C &= \frac{C_a}{n+f} \exp - \frac{2Kt}{y^2} \left(1 + \frac{f}{n} \right) + f \quad (3) \end{aligned}$$

令 $\frac{f}{n} = \varepsilon$, 则式 (3) 可写成

$$C = \frac{C_a}{1 + \varepsilon} \exp \left[- \frac{2Kt}{y^2} (1 + \varepsilon) + \varepsilon \right] \quad (3a)$$

此处

$$\varepsilon = \frac{f}{n} = \frac{m}{m_s} \cdot \left(\frac{C}{C_s} \right)_{\text{平衡}} = \left(\frac{\text{钢中杂质质量}}{\text{渣中杂质质量}} \right)_{\text{平衡}}$$

由于几乎全部的杂质在达到平衡前都能从钢液转入炉渣，故取 $\varepsilon = 0(1/10)$ 。该方程式表明， C 随时间的延迟而减少，即从 $t = 0$ 时的 C_a 降至 $t = \infty$ 时的 $C_a = \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$ 。这就是极限沾污度，它是间断炼钢法的根本弱点。为使 ε 值小，就必须采取较大渣量操作(使 f 变小)。

用平炉数据计算 K 值

若假设平炉熔池深度为3呎，用1小时的时间将不易去除的杂质从 C_a 精炼到 $\frac{C_a}{e^2}$ $\left(= \frac{C_a}{2.72^2} = \frac{C_a}{7.40} \right)$ ，则由于渣量太大，反应仍远远达不到平衡。此时， $\varepsilon = 0$ ，因而

$$\frac{1}{e^2} = \frac{C}{C_a} = \exp \left\{ -\frac{2Kt}{y^2} \right\}$$

$$\frac{2Kt}{y^2} = 2$$

$$K = 9 \text{ 呎}^2/\text{小时}$$

若精炼时间为2小时， $K = 4.5 \text{ 呎}^2/\text{小时}$ 。

这样，从沸腾良好但不吹氧的平炉中所得的合理 K 值为4.5~9.0呎²/小时。

对流扩散率高达1,000呎²/小时(Heat & Mass Transfer in Process Metallurgy P. 122, 1966)和25~80厘米²/秒(100~320呎²/小时)(V.I. Javoisky New Theoretical Developments in the Field of Steelmaking Paper B-4 2nd UN

Symposium on the Iron & Steel Industry)。但是，正如 Javoisky 所指出的，平均有效扩散率必须是从界面到小孔的对流扩散率加上穿过毫米大小的小孔的层流扩散率的综合。他提供的层流扩散率为 6×10^{-4} 厘米²/秒 (2.4×10^{-3} 呎²/小时)。因此，两者的综合系某一取决于小孔尺寸的任意中间值。由此可见，确定真正有效的扩散率的唯一途径只能依靠实际系统中所得到的精炼速率。于是，可以作出这样的假设，即从不吹氧操作平炉数据计算出的扩散率能够应用到不吹氧逆流渣操作的槽式精炼法中去。

对所需渣量的估算

在平衡条件下，当 $t = \infty$ 时，从方程式(3a)可导出

$$C = C_a \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} = C_a \frac{f}{n + f}$$

$$f = \frac{n \frac{C_{\infty}}{C_a}}{1 - \frac{C_{\infty}}{C_a}} = \frac{C_{s\infty}}{C_a} = \frac{m}{m_s}$$

因此，可以这样确定渣量，即当炉渣和达到精炼程度的钢液相平衡时，它应能吸收金属中的全部原始杂质。为了确保规定的精炼时间，实际渣量将超出两倍之多。

$$m_s = 2m \cdot \frac{C_a}{C_s} \quad (6)$$

用逆流渣操作的连续精炼槽

假设有一个宽度为 w ，当量深度为 y (与真实槽具有同样宽度和横断面积的矩形深度) 和长度为 l 的矩形炼钢槽(图2)。

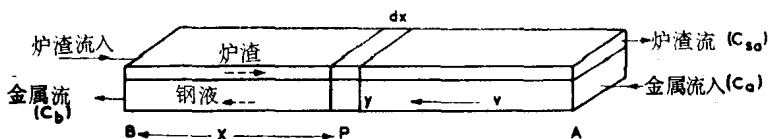


图 2 连续逆流精炼槽

主要杂质浓度为 C_a 的金属从 A 端流入，但具有最高杂质浓度为 C_{s0} 的炉渣则从该端流出。浓度为 C_b 的精炼后的金属从 B 端流出，而杂质浓度为零的炉渣则从该端流入。沿槽的长度从 B 点至 P 点的距离为 x 。若应用方程式 (2) 于 dx 距离上的一个微小单元，则可得

$$-\frac{K}{y^{2/2}} \left(C - \frac{C_s}{n} \right) = \frac{dc}{dt} = -V \frac{dc}{dx} - K \frac{d^2c}{dx^2} \quad (4)$$

假设水平和垂直两方向的混合遵循同一律并具有同一系数的话，则最后一项是将方程式 (1) 应用到浓度梯度 dc/dx 所造成的轴向混合而得到的。

为了计算长度方向上的作用力可能产生的极端不利影响，假设 $K_{\text{水平}} = K_{\text{垂直}}$ 。但是，因 Co 气泡上浮、穿过金属层而引起了剧烈的沸腾，后者所导致的垂直方向的搅拌是主要的。故事实上 $K_{\text{垂直}}$ 要比 $K_{\text{水平}}$ 大得多，正如许多人所观察到的钢水液滴穿过渣层而被抛起的那样。Howard Worner 在澳大利亚用逆流渣所作的最近试验也清楚地证明了这一点。

V 是金属从 A 到 B 间的流速，并假设该流速沿槽的长度不变。

从B到P的质量平衡方程式为

$$f(C - C_b) = C_s - C_{sb} = C_s$$

因假设 $C_{sb} = 0$ ，故方程式(4)便变成

$$\frac{2k}{y^2} \left(c_1 - \frac{f}{n} + \frac{f c_b}{n} \right) = \frac{v dc}{dx} + k \frac{d^2 c}{dx^2}$$

近似解。

方程式(4)的右边第一项代表沿着槽被精炼的金属流量，而第二项代表槽内不希望有的回流混合，即把未精炼的金属带到已精炼的那一端去。若不存在轴向混合，则对精炼过程的估算是应用该方程式来理解整个过程的最好途径，并可应用该方程式的近似解去求得促使长度方向混合最小的条件。为此，可将近似方程式写成

$$\frac{v y^2}{2k} \frac{dc}{c_1 - \frac{f}{n} + \frac{f}{n} c_b} = dx$$

若从B到P进行积分，则可得

$$\begin{aligned} \frac{2k \left(1 - \frac{f}{n} \right)}{v y^2} x &= \log_e \frac{c + \frac{f}{n-f} c_b}{\frac{n}{n-f}} \\ &= \log_e \left\{ \frac{c}{c_b} \left(1 - \frac{f}{n} \right) + \frac{f}{n} \right\} \end{aligned}$$

或

$$\frac{c}{c_b} = \exp \frac{2k \left(1 - \frac{f}{n} \right) x}{v y^2} - \frac{f}{n} \quad (5)$$

就整个熔池长度 l 而言,

$$\frac{c_a}{c_b} = \exp \frac{2k \left(1 - \frac{f}{n} \right) l}{v y^2} - \frac{f}{n} \quad (5a)$$

$$\text{或 } \frac{c_b}{c_a} = \exp \frac{1}{\exp \left(\frac{l 2k_1 - \frac{f}{n}}{v y^2} \right) - \frac{f}{n}}$$

于是, 在这种情况下只要

$$\frac{l 2k_1 - \frac{f}{n}}{v y^2} \gg 1 \quad \text{或} \quad l \gg \frac{v y^2}{2k_1 - \frac{f}{n}}$$

用一个给定的渣/金比率 n 就可以获得任何要求的纯度, 也就是说 C_b/C_a 能够达到要 怎么小就 怎么小。由于 f/n 很小 ($0(1/10)$), 因而用逆流渣操作以获得良好精炼效果的第一个基本条件就是使

$$\phi_1 \equiv \frac{2k l}{v y^2} \gg 1$$

由上述已知, 在无搅拌的渣—钢精炼熔池中 K 值约为 $4.5 \sim 9$ 呎²/小时。因钢的总产量 $\dot{m}$ 与速度 V 的关系是

$$\dot{m} = \rho v \cdot w y$$

故上述条件便变成

$$\phi_1 \equiv \frac{2k l \rho w}{\dot{m} y} \gg 1$$

质量流量和轴向混合的比较

在方程式(5)中 f/n 一项与 1 相比可以忽略不计, 于是便

可得到

$$\frac{c}{cb} = \exp\left(\frac{2kx}{vy^2}\right)$$

并由此获得使方程式(4)中最后一项比前一项小得多的条件, 即

$$v \frac{dc}{dx} = \frac{2k}{y^2} Cb \exp\left(\frac{2kx}{vy^2}\right)$$

$$k \frac{d^2c}{dx^2} = \frac{4k^3}{v^2 y^2} Cb \exp\left(\frac{2kx}{vy^2}\right)$$

因此, 轴向混合成为不重要的条件是

$$\frac{k2}{y^2} \gg \frac{4k^3}{v^2 y^2} \quad \text{或} \quad \frac{v^2 y^2}{2k^2} \gg 1$$

假定

$$\phi_2 \equiv \frac{vy}{\sqrt{2 \cdot k}}$$

其条件为 $\phi_2^2 \gg 1$ 。用 $\dot{m}$ 代替 V 可得

$$\phi_2 \equiv \frac{\dot{m}}{\sqrt{2 \cdot \rho \cdot kw}}$$

于是, 上述条件就意味着

$$\frac{\dot{m}}{\rho w} \gg \sqrt{2 \cdot k}$$

也就是说, 若 $\dot{m} = 10$ 吨/小时, $\rho = 1/4.5$ 吨/呎², $K = 9$ 呎²/小时, 则

$$w << = \frac{45}{13} = 3.5 \text{ 呎}$$

因此，对于生产率为 10 吨/小时的炉子，其熔池宽度必须不大于 1 呎，以满足 $\phi_2 = 3.5$ ， $\phi_2^2 = 12$ 的条件。并且，即使采用平炉中最大的 K 值，轴向混合也可忽略不计。现因

$$\phi_1 = \frac{\sqrt{2l}}{\phi_2 y}$$

故 ϕ_2 定为 3.5。若 ϕ_1 过大，则 l/y 至少应该是 30。这表明，若 $y = 1/3$ 呎 = 4 吋， l 必须是 10 呎。此时，钢液的实际流速是

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho_w y} = \frac{10}{1/4.5 \cdot 1/2 \cdot 1/3} = 270 \text{ 呎/小时} = 0.9 \text{ 吋/秒}$$

如果认为该速度太高的话，可以将熔池长度设计成 $l = 20$ 呎，于是 $y = 8$ 吋， $v = 135$ 呎/小时。

若熔池长度短，K 值过大，则因剧烈的碳沸腾或吹氧的作用，该熔池区将成为一个搅拌器，而使逆流过程无法进行。但是，只要该区长度占总长度的比例很小，则总的逆流效应仍将继续保留，即精炼末端所形成的非常纯净的炉渣可用以生产非常纯净的钢液，而不致于被从另一端来的脏渣所沾污。

对渣量配比的要求：

在逆流渣操作情况下，除非流入的炉渣中含有比渣-钢平衡时还要多的杂质，否则，总渣量将不受前面所论及的存在钢液纯净度极限所控制。其条件纯粹是 $f/n << 1$ 或

$$\frac{1}{\phi_3} \equiv \frac{m}{m_s} \left(\frac{C}{C_s} \right)_{\text{平衡}} << 1$$