

连续铸钢原理

上海人民出版社

连 续 铸 钢 原 理

— 工 艺 基 础 —

〔苏〕B. C. 鲁捷斯等著

《连续铸钢原理》翻译组译

上 海 人 民 出 版 社

鋼鐵冶金

—— 工艺基础 ——

（苏）B. C. 鲁捷斯等著

《连续铸钢原理》翻译组译

连续铸钢原理

—— 工艺基础 ——

〔苏〕B. C. 鲁捷斯等著

《连续铸钢原理》翻译组译

上海人民出版社出版

（上海绍兴路5号）

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 8.5 字数 187,000

1977年7月第1版 1977年7月第1次印刷

统一书号: 15171·274 定价: 0.89 元

译者序

连续铸钢是铸钢技术的一项重大革新，它与传统的模铸-初轧系统相比具有很多优点，如：简化生产工序；提高金属收得率（约 12~15%）；节省基建投资（约 30~40%）、缩短建设周期；降低生产成本（约 10~12%）以及改善劳动条件、提高劳动生产率等。此外，连铸技术的应用还为钢铁工业的连续化、自动化创造了条件。为此，近十年来，国内外在连续铸钢的设备、工艺、品种和质量等方面都有很大发展。目前，世界连续铸钢的产量已接近钢产量的 20%；可浇注的钢种达百余种；还出现了一批全连铸的车间或工厂；新型的水平式和回转式连铸机也进入了工业试验阶段。但是，由于这一钢铁生产新技术的工业化时间不长，因此，尚存在一些问题，例如耐火材料质量、快速更换铸坯断面、沸腾钢和某些高合金钢的连续铸钢技术以及改善铸坯内部质量等有待进一步解决。

本书根据热物理、物理化学、金属学和水力学等原理对连续铸钢过程中诸如连铸的温度规范、钢的二次氧化和防护措施、铸坯的凝固和化学成分均匀性，以及铸坯常见缺陷的产生原因和防止方法等问题作了理论分析。它对我国从事连铸生产的工人、技术人员和干部尚有一定参考价值。为此，我们遵

照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导，将其翻译出来，以供参考。

参加本书翻译工作的有：上海机械学院汪建农同志、上钢一厂金弘熙同志、上海交通大学伍一林同志，并由上钢一厂张铭鼎同志负责全书的校阅。

原书是苏联出版的，有不少属于修正主义的思想观点，我们已把这些部分删去。原书中有一些技术错误，在勘误订正方面虽经译者作了一定努力，但难免有遗漏和不当之处，恳请广大读者批评指正。

本书在翻译过程中，得到了冶金部、一机部上钢一厂板坯连铸攻关组以及上钢一厂技术科的大力支持与帮助，特此志谢。

译者 1977年2月

目 录

第一章 连续铸钢的物理化学过程	1
第一节 过程温度	1
一、出钢时钢液温度	2
二、钢包中钢液温度	6
三、中间包钢液温度	8
第二节 钢的二次氧化和保护方法	19
一、过程特征	19
二、钢液与大气的接触表面	23
三、注流与大气的接触时间	24
四、结晶器中钢液面与大气的接触时间	25
五、用液态润滑剂保护	30
六、液体和气体综合保护	36
七、采用液体和气体保护介质时钢液的增碳和增氢	47
八、合成渣保护	56
第三节 钢液与耐火材料的相互作用	66
一、钢液与耐火内衬的作用	66
二、钢液与中间包水口的作用	69
第二章 连续铸钢的水力学过程*	87
第一节 连续铸锭中液态金属流股的作用	87
一、研究方法	87
二、中间包内液态金属流股对注流特征的影响	89
三、中间包内液态金属流股对非金属夹杂物移动的影响	95
四、钢液从中间包自由流出的过程和水口直径的选择	100

* 在原书中,本章仅一节,译时根据原书内容分成二节——译注。

第二节 结晶器中的金属流股	107
一、结晶器中金属流股的特征	107
二、铸坯内金属流股对凝固的影响	119
三、铸坯内金属流股对非金属夹杂物排出的影响	120
第三章 连铸坯成形过程和均匀性	124
第一节 连铸坯成形的热物理过程研究	124
一、研究方法	124
二、结晶器中坯壳形核和成长的规律	127
三、沿结晶器高度的热流分布和铜壁温度	131
四、结晶器导热量和坯壳厚度的关系	133
五、结晶器锥度对凝固条件的影响	138
六、保护渣浇注时的传热特点	140
七、关于结晶器传热计算的一些情况	144
八、二次冷却区内铸坯的散热	146
九、喷射型二次冷却	146
十、喷雾型二次冷却	147
十一、液相穴深度	150
第二节 连铸坯的均匀性	153
一、结构不均匀性	153
二、化学成分的显微不均匀性	155
三、轧坯上的微观不均匀性	174
四、化学成分的宏观不均匀性	176
五、化学成分沿铸坯长度上的不均匀性	178
六、带状不均匀性	184
七、轴外不均匀性	184
八、轴心化学不均匀性	185
九、物理不均匀性	189
十、内裂纹	190
第三节 连铸坯形成时坯壳的应力状态	194
一、钢在高温下的机械性能	194

二、平面结晶器中坯壳的应力状态	199
三、波纹结晶器中坯壳的应力状态	208
四、坯壳角部金属的凝固	221
五、二次冷却区铸坯的应力状态	222
六、坯壳的应力和鼓肚	224
七、考虑到钢液静压力的铸坯鼓肚	236
八、应力和形成热裂纹的关系	243
九、轴心裂纹的形成	246
十、拉坯速度	247
参考文献	250
附 录	253

第一章 连续铸钢的物理化学过程

第一节 过程温度

合理地选择稳定的温度制度是连续铸钢过程基本参数之一。

浇钢温度对钢锭质量的影响已为人们所熟知。“低温”钢液是锭模或结晶器中钢液面上出现浮游壳皮的原因，它会导致钢锭表面形成翻皮、结疤、截痕以及由于夹杂上浮条件恶化而形成夹渣的局部聚集。“低温”钢还导致塞头砖与盛钢桶、中间包水口座砖焊粘，以及造成水口通道结瘤。由于用氧气烧穿水口，注流组织就严重恶化，钢液被喷洒到结晶器壁。

“高温”钢液是耐火材料被浸蚀的主要原因之一。由于袖砖或塞头的破坏，塞棒很快就失灵了。因为浇钢水口不断被浸蚀着，所以必须经常用塞棒调节金属流量，这就导致注流组织的恶化，并将金属喷洒到钢锭模或结晶器的壁上。

高温钢液也是钢锭热裂纹和夹层出现率增加的原因之一。它还促使二次氧化过程加剧，增加金属被耐火材料冲蚀物的污染。

如果说温度过低或过高的钢液在模注时尚能顺利浇注或是只损失一部分钢的话，那么在连铸时，温度制度的破坏则常常是损失整包钢水或造成大量铸坏废品的原因，有时还会引起连铸过程的严重事故。

因此，连续铸钢对于熔炼温度制度的要求比普通浇注严格得多。

正如已完成的试验研究工作所指出,要实现稳定的连铸过程,只是确定一个合适的钢包中的钢液温度范围来满足正常的浇注条件和钢锭质量要求,还是不够的。

人们还必须知道在各种具体条件下,从出钢到浇注的各个阶段里钢液的热损失,以及影响热损失变化的因素。

钢液在各个阶段上的热损失是一个十分复杂的热工过程。实际上它不能用解析法求解,因为有很多变数影响着钢液的温降数值。因此,为了估计某些一般的规律性,曾经采用近似解析计算,而在部分情况下则是采用统计方法来确定影响钢液热损失值的因素。

一、出钢时钢液温度

出钢时钢液的热损失几乎同时取决于三种不同形式的传热过程。

在下渣之前,以钢流表面和钢包内钢液面传出的辐射热损失最大。同时,此热损失数量随出钢温度、出钢时间、钢流和钢包内钢液的表面积而变。在出钢过程中,对流传热也起着重要作用,其传热强度取决于出钢时间、钢流注入的高度和角度。

因钢包内衬蓄热而引起的热损失,取决于钢液温度、包衬的热物理性质、传热面积、包壁内表面温度。

出钢时,加入钢包的合金与脱氧剂成分及数量对于钢液温度的变化也有显著影响。

曾经确定,在向60吨钢包倾注沸腾钢时,当出钢时间从3分钟增加到7分钟时,就使得出钢过程的钢液温度损失从 30°C 增加到 80°C ^[1]。当20吨钢包内衬温度从 200°C 提高到 800°C 时,出钢过程的温度降就从 $30\sim 40^{\circ}\text{C}$ 降低到 $15\sim$

20°C。钢包内衬的浸蚀程度和钢液在 60 吨钢包中的停留时间对钢液温度降的影响示于图 1^[2]。当包衬重量很小时(用坏了的包衬)它的热阻太小,而当包衬重量很大时,则使包衬的蓄热能力增加。如图所示,60 吨钢包合理的包衬重量应为 13~14 吨。

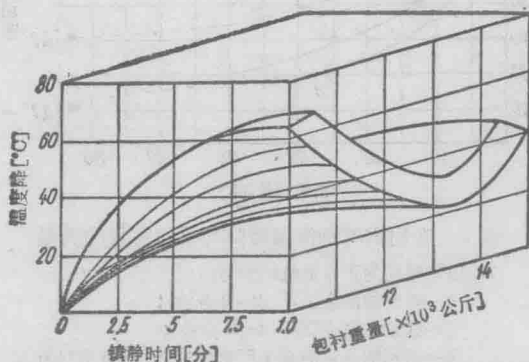


图 1 65 吨钢包中钢液温度降与包衬状态及镇静时间的关系

在其他条件相同时,钢包容量对出钢过程的钢液温度降有很大影响(图 2)。同时,这个关系对 80~100 吨以下的钢包表现得最强烈。当继续增加钢包容量时,钢液温度降的变化就不显著了。

钢液温度变化的规律与包衬表面积对包内钢液重量之比 S/G 的变化曲线(当钢包的高与平均直径之比是常数时)相似,因为这个比值反映着损失于包衬蓄热的钢液热损失强度。

钢包衬砖和渣层(作了一些假设)的蓄热量可以下式表示:

$$Q = q(2\pi Rh + 2\pi R^2) = q \cdot 2\pi R^2 \cdot (k+1), \quad (1)$$

式中 q ——热量密度*[千卡/米²];

* 原文称“比热流”不当——译注。

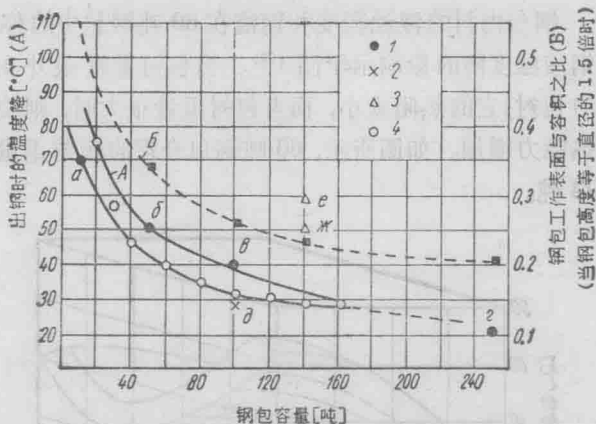


图2 在出钢时钢液温度降与钢包容量的关系

1—出钢时间为正常数值的炉号:

a—新土拉冶金工厂 (2~3 分钟);

b—红索尔莫夫钢厂 (4~6 分钟);

c—新利别茨克冶金工厂转炉车间 (3~5 分钟);

d—切列波凡也兹克冶金工厂 (5~6 分钟)

2—快速出钢的炉号:

d—新利别茨克冶金工厂电炉车间 (3~4 分钟)

3—出钢时间较长的炉号:

e—顿涅茨克冶金工厂镇静钢 (11~13 分钟);

ж—沸腾钢 (10~12 分钟)

4—文献数据

R ——钢包平均半径;

h ——钢包高度;

$$k = \frac{h^*}{R}$$

此外, $Q = \pi \gamma R^3 k \cdot c \cdot \Delta t^{**}$ (1a)

* 原文误为 $\frac{R}{h}$ ——译注。

** c 为比热, γ 为比重——译注。

因此,
$$\Delta t = A \cdot \frac{q}{cR}, \quad (16)$$

式中
$$A = \frac{2(k+1)^*}{\gamma \cdot k}. \quad (2)$$

即, 钢包中的钢液温度降与其半径 R 成反比。

从上图可以看出, 在实际条件下, 钢包中钢液温度降与钢包容量的关系, 在某些情况下与上式所描述的规律有所偏差。诸如在向 140 吨钢包出钢时, 钢液温度降有的就比向 100 吨钢包出钢时还要大一些。

在这种情况下, 140 吨钢包的温度降主要是由于出钢时间较长(13~15 分钟)之故, 而从电炉向 100 吨钢包出钢的时间则只有 3~4 分钟, 并且出钢时钢流有熔渣覆盖。当从转炉向 100 吨钢包出钢时, 虽然出钢时间相同, 但温度降却比从电炉出钢时大 10~15°C。

在连铸 100 吨转炉冶炼的钢水时, 曾利用回归分析方法来估计各个工艺因素对于从出钢至浇注过程中钢液热损失的影响。并且, 预先考虑了出现非线性关系和一些变量相互作用的可能性。在利用电子计算机按逐步淘汰法处理数据的过程中, 方程式中只保留了那些回归系数以 ≥ 0.95 的机率显著区别于零的因素。

在根据 50 个规定炉号的数据确定出钢时钢液温度降 Δt_1 的时候, 考虑了具有一定数值范围的下述各因素的影响:

t_1 ——出钢前转炉中的钢液温度(1640~1680°C);

t_2 ——出钢后钢包中钢液温度(1580~1630°C);

$\Delta \tau_1$ ——从测温到开始出钢的间隔时间(5~14 分);

$\Delta \tau_2$ ——出钢时间(3~11 分);

* 原文误为 $A = \frac{2(k-1)}{\gamma k}$ ——译注。

$\Delta\tau_3$ ——钢包周转时间;

N_1 ——炉数(5~11);

h_1 ——钢包中渣层厚度(150~300 毫米);

G_1 和 G_2 ——钢包中硅铁和锰铁的加入量 ($G_1=1150\sim 1300$ 公斤, $G_2=0\sim 350$ 公斤)。

得到的回归方程为

$$\Delta t_1 = 689.1 + 0.43t_1 + 1.894\Delta\tau_1 + 2894 \frac{1}{h_1} \quad (2a)$$

可见, 出钢前的钢液温度 t_1 对出钢时钢液温度降的影响最为显著。出钢温度提高 10°C , Δt_1 就平均增加 4.3°C 。此外, 从测温到出钢的间隔时间每增加 5 分钟, 就使 Δt_1 增加 9.5°C 。若渣层厚度从 300 毫米减少到 200 毫米, 则温度降 Δt_1 就增加 4.8°C 。

二、钢包中钢液温度

出钢完毕后, 钢包中的钢液温度将继续下降。在这一时期内, 钢液与包衬之间的热交换起着主要作用。此时, 靠近包衬附近的钢液因受到冷却而下沉, 处于钢包中心较热的钢液则向钢包表面上浮, 这样就发生着自然对流。

在这种条件下, 采用热电偶在钢包中固定位置和一定的插入深度处测温, 显然钢液温度在通常的镇静时间内不应有显著的变化 (在连铸转炉钢时, 镇静时间波动在 15~20 分钟)。

在统计处理 100 吨钢包的数据时得到了下列回归方程:

$$\begin{aligned} \Delta t_2 = & -870.5 + 0.547t_1 + 1.415\Delta\tau_4 \\ & -0.051h_1 + 0.01007(t_2 - 1620)^2 \\ & -0.02735(\Delta\tau_4 - 9.1)(h_1 - 200)^2, \end{aligned} \quad (26)$$

式中 Δt_2 ——钢液在钢包中镇静时的温度降[°C];

$\Delta \tau_4$ ——钢液在钢包中的镇静时间[分]。

正如前述,出钢后钢包中的钢液温度值对温度降 Δt_2 的影响最大。渣层厚度减薄 100 毫米时,温度降平均增加 5.5°C,镇静时间从 10 分钟增加到 20 分钟,则使温度降 Δt_2 增加 15°C。

然而,知道了钢包中渣层下钢液温度及其随时间的变化,尚不足以估计此炉钢液能否稳定地进行连续铸锭,因为沿着钢包高度的温度梯度很大。已经查明,钢包底部水口区域的钢液和渣层下面的钢液(这里是通常进行测温的地方)的温度差对于 50 吨钢包达 70~100°C^[3, 4], 同时钢包容量越大则此温度差越小。在图 3 上表示了钢液沿 50 吨钢包高度方向的温度降情况及其在浇注过程 10 分钟内的变化^[3]。

在钢包水口出口附近和在注流接近中间包金属液面处分

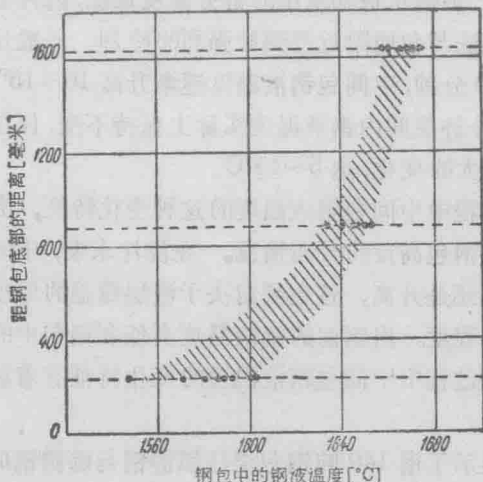


图 3 沿 50 吨钢包高度的钢液温度变化

别测量钢流温度表明, 注流中的钢液温度降一般波动在 $7\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。

这样, 根据开浇前测量钢包渣层下钢液温度和中间包中浇注了大约等于中间包容积的钢水之后测得的钢液温度, 并考虑到注流的热损失, 就能近似地估计钢液沿钢包高度的温度降。根据文献 [5] 的数据, 随着钢包容量与出钢条件的不同, 沿钢包高度的钢液温度降变化在下列范围:

钢包容量 [吨]	50	100	140	250
沿钢包高度的温度降 $^{\circ}\text{C}$	60~70	50~60	40~50	35~40

三、中间包钢液温度

钢液沿钢包高度显著的温度降决定着浇注过程中中间包钢液温度变化的特征。

通常, 一炉钢水最初浇出的部分温度最低, 因为它们在钢包和中间包底与包墙附近受到最强烈的冷却。一般开浇以后经过 $15\sim 20$ 分钟, 中间包钢液温度逐渐升高 $10\sim 15^{\circ}\text{C}$, 然后在 $30\sim 40$ 分钟期间内钢液温度实际上保持不变, 仅在浇注末期它又有较大的变化, 达 $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。

浇注过程中中间包钢液温度的这种变化特征, 完全符合钢液温度沿钢包高度的分布情况。在浇注末期, 中间包钢液温度是降低还是升高, 这主要取决于渣层覆盖的厚度和钢包内衬的浸蚀程度。出钢前的钢液温度高低和钢包中的脱氧操作也对浇注过程中中间包钢液温度的变化特征有着显著的影响。

图 4 表示了用 140 吨钢包浇注镇静钢与沸腾钢时中间包钢液温度的变化。

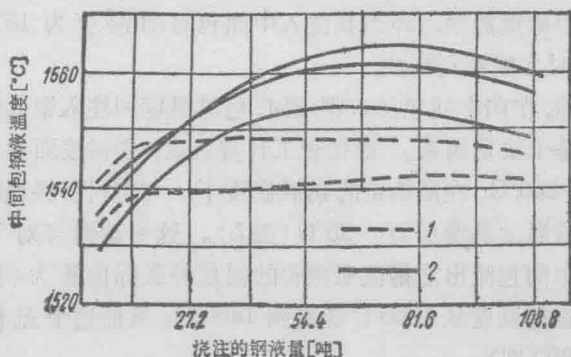


图4 浇注过程中中间包钢液温度的变化

1—镇静钢；2—沸腾钢

镇静钢温度的变化特征已如上述。浇注沸腾钢时，发现在一炉钢的前面 40~50% 浇注时期内，钢液温度逐渐升高而达到一个最大值，然后，直到浇注终了，钢液温度又逐渐地略微降低。看来，这一差别是由于钢包底层被冷却的那部分钢液析出气体造成更强烈的对流作用的结果。因此，钢液温度沿钢包高度分布得比较均匀。

应该指出，在同样的出钢温度时，镇静钢和沸腾钢在中间包内的温度是不同的：镇静钢的最高温度较沸腾钢低 10~20°C；但在浇注的最初时期内，沸腾钢温度比镇静钢低 7~10°C。

由于钢包开始浇出的一部分最冷的钢液会导致中间包水口堵塞和结晶器壁挂钢，所以中间包内最初的钢液温度常常决定着能否顺利连铸。

根据文献[3]的数据，最先浇出的那部分靠近水口的钢液温度和预热到 800~850°C 的 4 吨中间包浇注过程中钢液平均温度的差值达 40~50°C。也就是说在这种情况下，只有