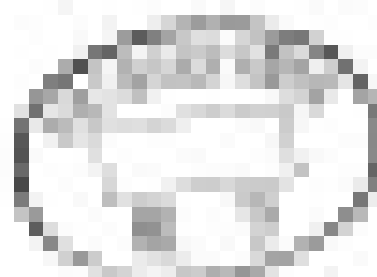


● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

● ● ● ● ● ● ● ● ● ●



● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

● ● ● ● ● ● ● ● ● ●

TG204-43
1

137440

高等学校教学用书

浇注与凝固

北京钢铁学院 蔡开科 主编

冶金工业出版社

高等学校教学用书

浇注与凝固

北京钢铁学院 蔡开科 主编

冶金工业出版社出版

（北京北河沿大街嵩祝院北巷35号）

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 13 字数 309 千字

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数00,001~5,500册

统一书号：15062·4639 定价2.20元

ISBN 7-5024-0051-6/TF·12

序 言

从炼钢炉初炼和炉外精炼得到的合格钢水，还需要经过浇注和凝固加工处理。凝固就是液态金属转变为固体的过程。从微观来看，凝固就是金属原子由“近程有序”向“远程有序”的过渡，使原子成为按一定规则排列的晶体；从宏观来看，就是把液态金属储存的热量传给外界而凝固成一定形状的固体。因此，可以说凝固是液态金属转变为固态金属的“桥梁”。

钢凝固的工艺方法有钢锭模浇铸和连续铸锭。凝固的产品就是钢锭或连铸坯。然后，再经各种热加工或冷加工以得到适合于工程上应用的产品。

浇注和凝固是衔接炼钢和轧钢之间的一项特殊作业。它的特殊性表现为钢水转变为固体的凝固过程。当钢水一旦凝固成固体后，在以后的热加工过程中就不能对钢质量有本质上的改进了。因此浇注和凝固对产品质量和成本有重大影响。

一般来说，对凝固产品的质量要求是：

- 正确的低倍结构；
- 杂质和合金元素分布均匀；
- 气体和夹杂物含量要少；
- 表面和内在质量要好；
- 产品的合格率要高。

因此，浇注和凝固是炼钢生产中非常重要的一个环节，直接影响产品质量和成本，必须予以足够重视。要达到上述要求，必须了解钢水在浇注和凝固过程中所发生的一系列物理化学现象，这些现象可归纳为：

- 合格钢水质量的获得；
- 钢水在传递过程中的物理和化学行为；
- 钢水由液态向固态的转变；
- 凝固冷却过程热量的释放和传输；
- 凝固过程中溶质元素的再分配；
- 凝固过程中新相质点的生成；
- 凝固坯壳的应力状态。

上述诸方面对模铸和连铸来说都是共同的，但是又各有其特点。这些现象的变化是互相联系相互制约的。它们的综合效应将决定设备的生产效率和产品的质量。因此，必须深入研究，掌握规律，为制订合理的工艺对策提供理论指导。

本书从金属凝固原理出发，结合钢的凝固工艺，力图从理论和实践上来阐明浇注和凝固过程中所发生的诸种现象。从内容的广度和深度方面，尽可能反映国内外在浇注和凝固方面的最新研究成果。

本书是根据冶金部高等院校教材会议制订的钢铁冶金专业教学计划选修课程要求编写的。本书可作为钢铁冶金专业本科生和研究生选修课的教材。也可供从事钢铁冶金、材料的工程技术人员参考。

本书共分十三章。第三章第四节由王利亚同志协助编写，第十一章第二、三节由刘新华同志协助编写。

限于编者的学识水平，书中错误及不妥之处，敬请读者批评、赐教。

编 者

1986年7月

目 录

第一章 钢水质量控制	1
第一节 钢水温度的控制.....	1
第二节 钢水氧含量控制.....	5
第二章 钢水传递过程的物理化学	13
第一节 出钢钢流的化学反应.....	13
第二节 注流与空气的作用.....	14
第三节 钢液与耐火材料的作用.....	22
第四节 水口结瘤.....	24
第三章 浇注过程的液体流动现象	27
第一节 钢液流动特性.....	27
第二节 浇注过程流动水力学.....	27
第三节 流动的物理模拟.....	30
第四节 流动数学模拟.....	38
第四章 钢液结晶与凝固结构	43
第一节 液固相变的热力学特点.....	43
第二节 均质形核.....	43
第三节 非均质形核.....	46
第四节 晶核长大.....	47
第五节 树枝晶凝固.....	51
第六节 凝固结构.....	55
第七节 凝固结构的控制.....	64
第五章 钢锭凝固传热	68
第一节 钢液凝固热平衡.....	68
第二节 钢锭传热机构.....	69
第三节 传热与凝固定律.....	73
第四节 传热方程在钢锭凝固的应用.....	74
第六章 连铸坯凝固传热	83
第一节 连铸机热平衡.....	83
第二节 结晶器传热.....	84
第三节 二冷区传热.....	90
第四节 连铸坯凝固传热数学模型.....	98

第七章 凝固显微偏析	107
第一节 结晶的不平衡性.....	107
第二节 凝固过程溶质再分配.....	108
第三节 凝固显微偏析.....	116
第四节 影响显微偏析因素.....	122
第八章 凝固宏观偏析	125
第一节 凝固产品的宏观偏析.....	125
第二节 凝固过程液体流动.....	126
第三节 宏观偏析溶质分配方程.....	130
第四节 钢锭锥形偏析.....	134
第五节 连铸坯中心偏析.....	136
第六节 宏观偏析的控制.....	138
第九章 凝固坯壳应力与裂纹	141
第一节 钢的高温力学行为.....	141
第二节 凝固坯壳的应力.....	143
第三节 铸坯裂纹形成.....	147
第四节 减少裂纹形成的控制技术.....	152
第十章 凝固收缩	155
第一节 凝固过程体积变化.....	155
第二节 缩孔的形成.....	156
第三节 收缩与裂纹.....	159
第十一章 凝固过程的非金属夹杂物	161
第一节 凝固过程中新相生成.....	161
第二节 钢锭中夹杂物.....	165
第三节 连铸坯夹杂物.....	169
第十二章 凝固过程的气体	175
第一节 镇静钢凝固过程气体的析出.....	175
第二节 沸腾钢凝固过程气体析出.....	178
第十三章 浇注保护渣	182
第一节 浇注过程中保护渣的行为.....	182
第二节 保护渣的冶金特性.....	193
参考文献	200

第一章 钢水质量控制

众所周知，要得到良好质量的钢锭或连铸坯，供给合格质量的钢水是先决条件。钢水质量应包括钢水温度、钢水成分和钢中氧含量几个方面的指标。这三个要求决定于钢水精炼的物理化学过程。

第一节 钢水温度的控制

一、钢水温度控制的重要性

合理选择浇注温度是铸锭（连铸）的基本参数之一。注温对钢质量影响甚大。注温偏低会使：1）模内产生凝壳，导致钢锭翻皮缺陷，2）钢水粘，夹杂物不能上浮而形成局部聚集，3）水口冻结，浇注中断。注温偏高会使：1）耐火材料严重冲蚀，钢中夹杂物增多，2）二次氧化加剧，3）钢锭裂纹增加，轴向疏松偏析加重。

如果说不合适的钢水温度在模注时还能勉强浇注，而在连铸时就会造成拉漏事故。因此，对连铸钢水温度的要求比模注要严格得多。对连铸钢水温度的要求是：

（1）高温：由于增加了中间包热损失，中间包水口小，浇注时间长，因此连铸钢水温度要比模铸高 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$ ，才能保证顺利浇注。

（2）稳定：温度不能波动太大，否则会造成拉漏事故。

（3）均匀：要求钢包内钢水温度上下均匀。实际上是钢包内上下部温度偏低，中间偏高，这样在中间包钢水温度是两头低中间高，不利于浇注过程的控制。

二、钢水温度控制的热工过程

要确定合适的浇注温度，必须要确定出钢至浇注各个阶段上的温度损失（图1-1）。这是一个复杂的热工过程。要解决这个问题有两个办法。第一，近似解析法：根据传热定律，计算各个阶段（出钢、钢包、中间包等）的热损失，以确定合适的浇注温度和出钢温度。第二，统计方法：试验测定各阶段的温度损失，得出规律性以指导生产。

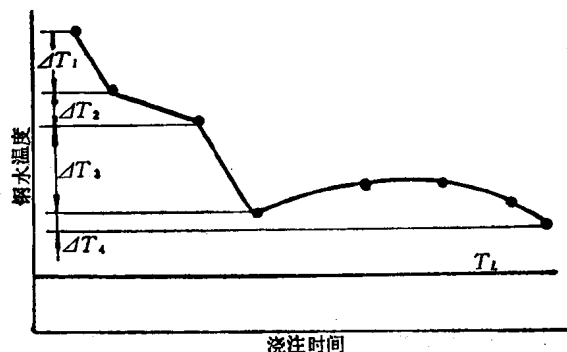


图 1-1 各阶段钢水温降示意图

下面以连铸为例分析从出钢到浇注过程中的温度损失。

1. 出钢过程温降 ΔT_1 出钢钢流充满钢包过程中, 某一时刻钢水的热平衡可表示为:

$$Q_m C_p \left[-t \frac{dT}{dt} + (T_c - T_i) \right] = \Phi_r + \Phi_c + \Phi_f \quad (1-1)$$

式中: Q_m 为充满钢包时的钢水流量; C_p 为钢水比热; T_c 为出钢时钢水温度; T_i 为某时刻钢水温度; Φ_r 为钢流辐射热损失; Φ_c 为包衬传导热损失; Φ_f 为对流热损失。

由式 (1-1) 可知, 出钢温降决定于:

(1) 钢流的辐射和对流热损失: 这种热损失与出钢温度、出钢时间和钢流表面有关。如60吨钢包出钢时间由3分增加到7分钟, 温降由30°C增加到70°C。

(2) 钢包衬吸热: 它决定于钢水温度、包衬材质、受热面积和包壁温度等。如20吨钢包内衬温度由200°C增加到800°C, 出钢温度降低由30~40°C减小到15~20°C。

(3) 钢包容量: 钢包容量越大, 温降就越小。

(4) 加入铁合金数量: 加入铁合金引起钢液热焓变化为:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

式中: Q_1 为加热铁合金到钢液温度所需热量; Q_2 为合金熔解热; Q_3 为合金元素氧化放热。

故加入铁合金引起的温度变化 ΔT :

$$\Delta T = \frac{Q}{C_p \times 100}$$

表 1-1 计算的温度变化 (Q : 千焦耳/千克)

铁 合 金	Q_1	Q_2	Q_3	Q	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
SiFe45	-2140	1060	1750	670	7.9
SiFe75	-2710	2820	2960	3030	36.0
MnFe1	-1480	-30	670	-840	-10
MnFe5	-1530	30	600	-900	-10.8
CrFe0	-1370	-	320	-1050	12.5

计算的 ΔT 如表1-1。

2. 钢包内温降 ΔT_2 钢包充满后的钢水热平衡:

$$MC_p \frac{dT}{dt} = \Phi_r + \Phi_c + \Phi_f \quad (1-2)$$

$$\Phi_c = -\lambda_r \frac{dT_r}{dx} \cdot S_r - \lambda_l \frac{dT_l}{dy} \cdot S_l \quad (1-3)$$

$$\Phi_r = \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_o^4) S \quad (1-4)$$

$$\Phi_f = h(T_r - T_o) S \quad (1-5)$$

式中: M 为钢水重量; λ_r 、 λ_l 为耐火材料和炉渣的导热系数; T_r 、 T_l 为耐火材料和炉渣的表面温度;

S_r, S_l 为耐火材料和炉渣的表面积; ϵ 为辐射系数, 液体钢为0.4, 钢板为0.8; σ 为斯蒂芬—波兹曼常数 $4.9 \times 10^{-8} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{K}^4$; T_r, T_o 为表面温度和环境温度; h 为自然对流传热系数, $h = 1.53(T_r - T_o)^{0.25} (\text{kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

根据 (1-2)~(1-5) 式计算钢包内钢水温降。

$$\Delta T = \frac{Q_r}{MC_p}$$

如图1-2所示, 钢包内钢水有四个区域: 邻近于包壁的边界层, 钢包底部的冷钢层, 钢包中心的热钢区, 钢包表面的辐射区。所以沿钢包高度钢水温度分布是不均匀的(图1-3), 钢包容量越大, 上下温差越小。如50吨钢包为 $60 \sim 70^\circ\text{C}$, 250吨钢包为 $35 \sim 40^\circ\text{C}$ 。

对连铸来说, 钢包内温度分布不均匀, 就会引起中间包内钢水温度波动, 给正常操作带来麻烦, 因此要进行钢包吹Ar处理, 以均匀温度和成分, 保证浇注过程中钢水温度均匀稳定性。

3. 注流温降 ΔT_3

注流辐射热损失: $\Phi_1 = \Sigma \sigma T^4 S$

注流冷却: $\Phi_2 = QC_p \Delta T$

注流温降: $\Delta T = \frac{\epsilon \sigma T^4 S}{QC_p} \quad (1-6)$

式中: Q 为水口流量; S 为注流表面积。

如中间包内钢水温度为 $1540 \sim 1560^\circ\text{C}$, 板坯尺寸为 $250 \times 1550 \text{ mm}$, 拉速为 0.7 m/min , 计算钢水经中间包水口的温降为 0.4°C , 因此可以认为中间包钢水温度就能代表浇注温度。

4. 中间包温降 ΔT_4 开始从钢包浇入到中间包钢水温度偏低, 又受到中间包的冷却, 故温度较低, 浇注后10~15分, 钢液温度升高, 到后期温度又下降, 这完全符合钢包内钢水温度上下低中间高的情况。图1-4表示钢包吹Ar与未吹Ar中间包钢水温度分布。开始钢包底部温度较低的钢水到中间包又受到冷却, 往往会造成中间包水口堵塞, 因此浇注开始中间包钢水温度对连铸能否顺利浇注非常重要。

中间包钢水热平衡可表示为:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{QC_p T_o - qC_p T_e - \Phi - C_p T_e (Q - q)}{MC_p} \quad (1-7)$$

式中: M 为中间包钢水量; Q 为钢水进入中间包钢水流量 (在 T_o 温度); q 为出中间包钢水流量在 (T_e 温度); Φ 为中间包热损失。

当中间包液面高度稳定时:

$$\frac{dM}{dt} = Q - q = 0$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{QC_p (T_o - T_e) - \Phi}{MC_p}$$

要使中间包钢水温度稳定, 则 $\frac{dT}{dt}$ 要趋近于零:

$$QC_p(T_o - T_s) = \Phi$$

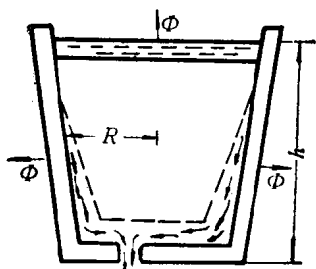


图 1-2 钢包热损失示意图

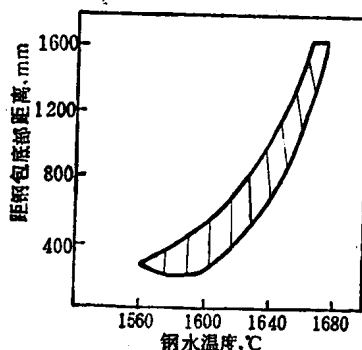


图 1-3 钢包内钢水温度分布

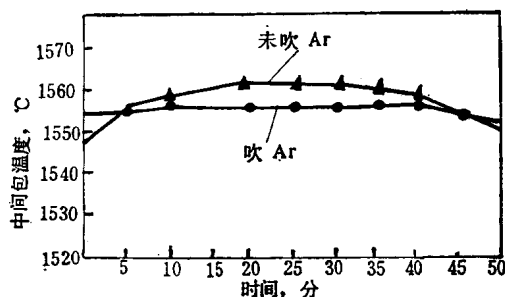


图 1-4 中间包钢水温度分布

若补充到中间包内钢水热量损失等于中间包散热损失，则中间包钢水温度趋于稳定。

由计算和实际测定看出，浇注开始后十几分钟，中间包钢水温度基本上能稳定在某一温度范围，拉速微小的变化，对中间包钢水温度影响不明显。

三、合适浇注温度的确定

连铸浇注温度是指中间包钢水温度，一般表示：

$$T_o = T_L + \Delta T$$

T_L 为液相线温度，根据钢种不同可由公式计算。文献中有多 种公式，兹介绍几种如下：

- (1) $T_L = 1537^\circ\text{C} - [88\%C + 8\%Si + 5\%Mn + 30\%P + 25\%S + 5\%Cu + 4\%Ni + 2\%Mo + 2\%V + 1.5\%Cr]$
- (2) $T_L = 1536.6^\circ\text{C} - [88\%C + 25\%S + 30\%P + 8\%Si + 5\%Mn + 18\%Ti + 2\%Mo + 4\%Ni + 5\%Cu + 2\%V + 1.5\%Cr]$
- (3) $T_L = 1534^\circ\text{C} - [80.5\%C + 33.5(\%S + \%P) + 17.8\%Si + 3.75\%Mn + 3.4(\%Cu + \%Al) + 3\%Ni]$
- (4) $T_L = 1539^\circ\text{C} - [(65 - 100)\%C + 8\%Si + 5\%Mn + 30\%P + 25\%S + 5\%Cu + 4\%Ni + 2(\%Mo + \%V) + 1.5\%Cr]$

如考虑气体的影响,可减去 2°C 。可根据钢种成分不同来选择公式,计算 T_L 。

ΔT 为钢水过热度,根据钢种不同而异。对厚板材,为减少内部裂纹和中心疏松, ΔT 以偏低为好($5\sim 20^{\circ}\text{C}$);对于冷轧薄板,要求良好的表面质量, ΔT 以偏高为好($15\sim 30^{\circ}\text{C}$)。根据钢种计算 T_L ,再加上 ΔT 就可决定浇注温度,再加上各个阶段上温度损失,就可决定出钢温度。钢水温度与钢中C%关系如图1-5。

在实际生产上,对于出钢温度往往控制得不那么准确。因此要调节出钢后钢水温度,以满足浇注温度要求,调节方法有:

(1) 钢包顶部或底部吹气(Ar 或 N_2)搅拌钢水,使钢包上下部温度和成分均匀;

(2) 吹气搅拌并加入废钢,借助于废钢熔化吸热来降温;

(3) 钢包镇静,控制镇静时间,靠自然降温来调节温度;

(4) 保温:为控制浇注过程钢水温度下降,在钢包、中间包加入覆盖材料(如稻壳)或加盖,以防止热量损失。

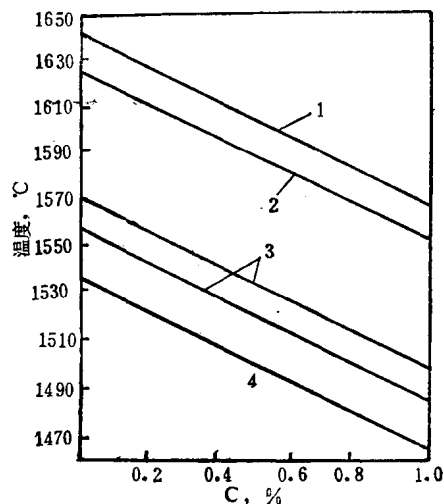


图 1-5 钢水温度与C%关系

1—出钢温度; 2—吹Ar后温度; 3—中间包温度; 4—液相线温度

第二节 钢水氧含量控制

一、钢中氧的行为

钢中的氧是控制冶炼和钢质量的重要因素。液体钢中氧含量决定冶炼的进程、脱氧剂消耗和合金元素的回收率、钢锭凝固行为、固体钢的纯净度。

长期以来,人们一直在为生产洁净高质量的钢而努力,其中关键在于控制钢中 $[\text{O}]$ 行为,但是钢中 $[\text{O}]$ 含量分析困难,往往不能迅速为现场提供数据,作为控制冶炼和浇注的依据。近年来,固体电解质直接测定钢中氧的活度 a_{O} 方法的出现,提供了一个控制钢中氧含量的有力手段,正在工厂中广泛应用。

炼钢是属于氧化性熔炼。在冶炼末期,钢中除含有规定的 $[\text{C}]$ 外,还含有过多的 $[\text{O}]$ 。钢中 $[\text{O}]$ 受许多操作因素影响。以氧气转炉为例,终点钢水中 $[\text{O}]$ 与各工艺参数关系如表1-2。由表可知,钢水氧化性主要决定于钢中 $[\text{C}]$ 含量和渣中 (FeO) 含量。

大家知道,在出钢时必须加入脱氧剂脱除钢水中过多的氧。根据脱氧程度不同,可得到不同类型的钢锭。沸腾钢脱氧后钢水中仍含有高于与 $[\text{C}]$ 相平衡的 $[\text{O}]$, $[\text{C}] = 0.05\sim 0.20\%$, $[\text{O}] = 0.03\sim 0.08\%$ (图1-6曲线5)。半镇静钢脱氧后钢水中含氧量大致保持与 $[\text{C}]$ 相平衡的水平, $[\text{C}] = 0.10\sim 0.25\%$, $[\text{O}] = 0.015\sim 0.02\%$ (图1-8曲线3)。镇静钢脱氧后钢水中含氧量比与 $[\text{C}]$ 相平衡的 $[\text{O}]$ 低得多, $\text{C} \geq 0.02\%$, $[\text{O}] < 0.005\%$ (图1-6曲线4)。

二、沸腾钢氧控制

钢包内沸腾钢 $\text{C-Mn-}a_{\text{O}}-T$ 处于平衡。沸腾钢在模内的凝固前沿有 C-O 反应,析出

表 1-2 各参数对钢中氧的影响

[C], %	炉子容量 (吨)	各参数影响所占比例, %			
		C	Mn	温度	Σ (FeO)
0.07~0.18	50	73	7.0	4.8	15.2
0.08~0.30	100	88.3	1.6	3.8	6.3
0.07~0.18	50	51.8	6.3	4.3	—
0.08~0.30	100	45.9	3.1	3.8	—

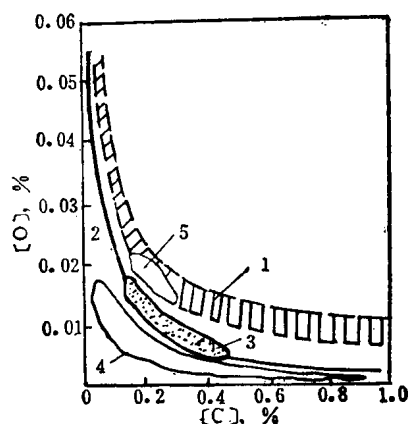


图 1-6 钢中 [C] 与 [O] 关系

1—熔池实际 [O]；2—与 [C] 相平衡的 [O]；3—半镇静钢 [O]；
4—镇静钢 [O]；5—沸腾钢 [O]

CO。沸腾钢锭质量标准是：起沸时间、沸腾延续时间、沸腾强度、钢锭头部形状和竖壳带厚度。要得到良好的沸腾钢质量，除钢中 [O] 以外，还与浇注温度、浇注速度和模子特性有关。

研究指出，凝固前沿 CO 气泡的析出，只有当钢水中 [O] 超过了与 [C] 相平衡 [O] 才有可能。

$$[O] = [O]_e + \Delta[O]$$

与 [C] 相平衡的 $[O]_e$ ：

$$[O]_e = \frac{m p_{CO}}{[C]}$$

式中： p_{CO} 为气泡中 CO 的分压； m 为在一大气压 [C][O] 浓度积。

气泡产生的条件是：

$$P_T \geq P_0 + \rho h + \frac{2\sigma}{r}$$

式中： P_0 为大气压力； ρ 为钢水密度； h 为生成气泡时钢液面高度； r 为气泡半径； σ 为钢液表面张力。

气泡中的 CO 分压：

$$p_{CO} = \{CO\} P_T$$

式中： $\{CO\}$ 为气泡中 CO 含量； P_T 为气泡总压力 ($p_{CO} + p_{H_2} + p_{N_2}$)。

由以上各式, 可以决定在钢锭某一位置 h 气泡生成的 $[O]$ 含量。

$$[O] = \{CO\} \frac{m}{[C]} \left(p_0 + \rho h + \frac{2\sigma}{r} \right) + \Delta[O] \quad (1-8)$$

利用 (1-8) 式决定合适的 $[O]$ 含量, 应该知道气泡离开凝固前沿所形成的坚壳带厚度。由凝固定律得:

$$e = k\sqrt{t} - b$$

式中: k 为凝固系数; b 为与钢水过热度有关的常数。而凝固时间 t 是与模内钢水上升速度 v 有关的 (v 可直接测定)。气泡从钢锭中逸出的高度:

$$h = vt$$

$$[O] = \{CO\} \frac{m}{[C]} \left[P_0 + \rho vt + \frac{2\sigma}{r} \right] + \Delta[O] \quad (1-9)$$

试验指出, $\Delta[O] = 0.004\%$, 可利用 (1-9) 式建立钢水中 $[O]$ 、 $[C]$ 、浇注温度、浇注速度之间的关系, 以估计坚壳带厚度 (图1-7), 决定浇注时钢水中合适的 $[O]$ 含量。

例如: 已知钢包内钢水 $C = 0.08\%$ 、 $T = 1550^\circ\text{C}$, 从图 (1-7) 得到第一点, 要求坚壳带厚度为 25mm, 从第一点向下至 25mm 处, 水平向右到注速等于 1m/min, 再向上交到 $C = 0.08\%$ 得出 $a_0 = 290\text{ppm}$ 。如钢包内测定的 $a_0 \neq 290\text{ppm}$, 则要在模内进行调整钢水的氧化性。

在实际生产条件下, 钢水成分 (C 、 Mn)、注温、钢锭模高度等因素是固定了, 可以说调整钢水的氧化性是工厂调整沸腾强度的有效手段。调整的办法是:

(1) 模内沸腾太强, 可在浇注过程中用手投入 5~8mm 的铝粒, 减少与 $[C]$ 相结合的 $[O]$, 以减弱沸腾;

(2) 模内沸腾太弱, 可用强化沸腾措施:

- 加入氧化剂提高钢中 $[O]$ 含量,
- 加入气泡形核剂,
- 加入表面活性剂。

对于超低碳钢, $[O]$ 过剩起沸困难, 就可加入表面活性剂 (NaF 、 Na_2CO_3); 对于 $C = 0.2\%$ 钢, 缺少 $[O]$, 不易沸腾, 就可加入氧化性的助沸剂。助沸剂有各种类型:

- 在注流周围吹氧,
- 在模内加入粉剂如 FeO 、 NaF 、 NaNO_3 等。

试验指出, 80% 轧钢屑 + 20% NaF 混入醋酸纤维素压成 10 克圆饼, 加入量为 0.3~0.5kg/t, 可使坚壳带厚度提高 20~80%。

三、半镇静钢氧控制

在一定温度下钢包中 $\text{Si-Mn-}a_0\text{-}T$ 处于平衡。在模内凝固时, C-O 反应产生 CO 量必须补偿凝固收缩, 要求钢锭顶部是平的或稍微隆起, 才能保证质量。根据钢水成分 (C 、 Mn) 和包内测定的 a_0 与理想的曲线不相一致的话, 就必须在钢包内或模内调整 a_0 含量。

如同沸腾钢一样, 钢中 C 、钢水温度、钢锭表面形状、封顶时间与 a_0 之间关系示于图 1-8。由此可得出合适钢锭顶部形状所必须的 a_0 。例如: $C = 0.16\%$ 、 $T = 1560^\circ\text{C}$, 在图中相交于第一点, 向下相交于稍为凸顶 (250) 处, 水平相交于封顶时间 25 秒处, 再向上交到 $C =$

0.16%处得出 $a_o = 70\text{ppm}$ 。如果测定钢包 $a_o \approx 70\text{ppm}$ ，就在包内或模内进行调整。

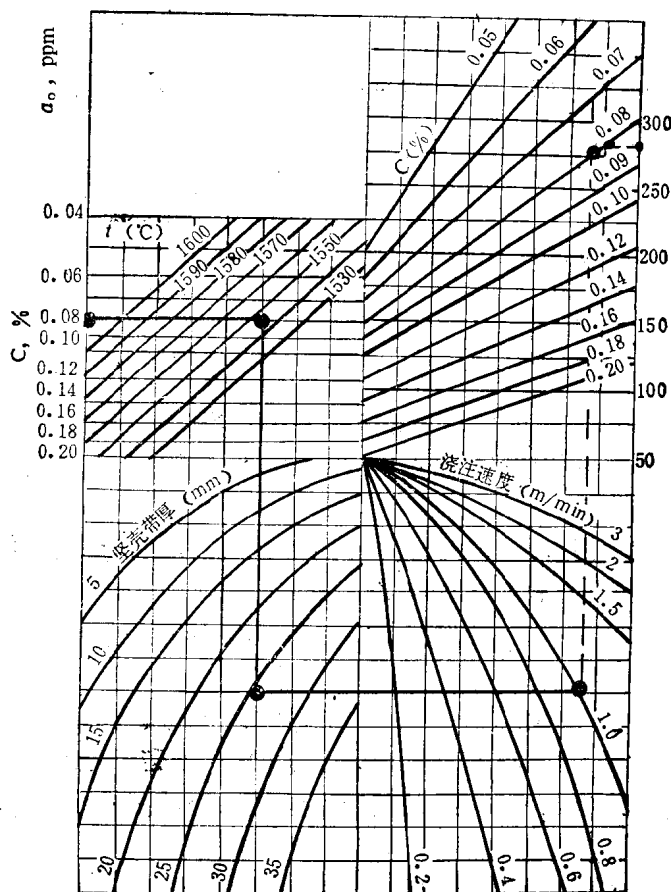


图 1-7 沸腾钢 a_o 控制

四、镇静钢氧控制

目前连铸只能浇镇静钢。一般加铝作终脱氧剂。因此镇静钢中 $[\text{O}]$ 含量实质上就是控制钢中残Al含量。钢中残Al含量与铸坯缺陷关系见图1-9。

——A区： $[\text{Al}] < 0.0015\%$ ，铸坯容易产生皮下气泡和表面缺陷，

——B区： $[\text{Al}] > 0.006\%$ ，钢水粘水口易堵塞，铸坯夹杂物增加。

根据钢中Al含量的不同，连铸钢水可分为铝镇静钢和硅镇静钢。

1. 铝镇静钢 对细晶粒钢，要求钢中 $\text{Al} \geq 0.02\%$ ；对深冲用钢，要求钢中 $\text{Al} = 0.04 \sim 0.07\%$ 。当钢中 $\text{Al} > 0.01\%$ 时， $\text{Al}-\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 处于平衡，钢中溶解氧是很低的。

由于Al的比重小，不易加入到钢水中去，常常浮到钢水表面氧化掉，Al回收率很低，钢中残Al量不稳定。因此对铝镇静钢中氧的控制就是如何保证得到稳定铝含量。在炼钢生产中加入铝的方法：

——一步法：在出钢过程中，把全部铝块一次加入钢包，加铝量由终点钢水中 $[\text{C}]$ 和钢水温度来决定（图1-10）。这种加铝方法简单，但铝回收率低，钢中残铝含量波动大，影响钢性能。

——两步法：把所需加入钢中的铝量分为两部分，一部分随钢流加入钢包，加入量是

脱去钢水中过氧化的氧量，起预脱氧作用。其余部分的铝是出钢后加入钢包内，脱去与[C]相平衡的[O]，并溶解于钢中保证钢中达到规定的残Al量。这种加Al工艺（图1-11）还有两种方法：

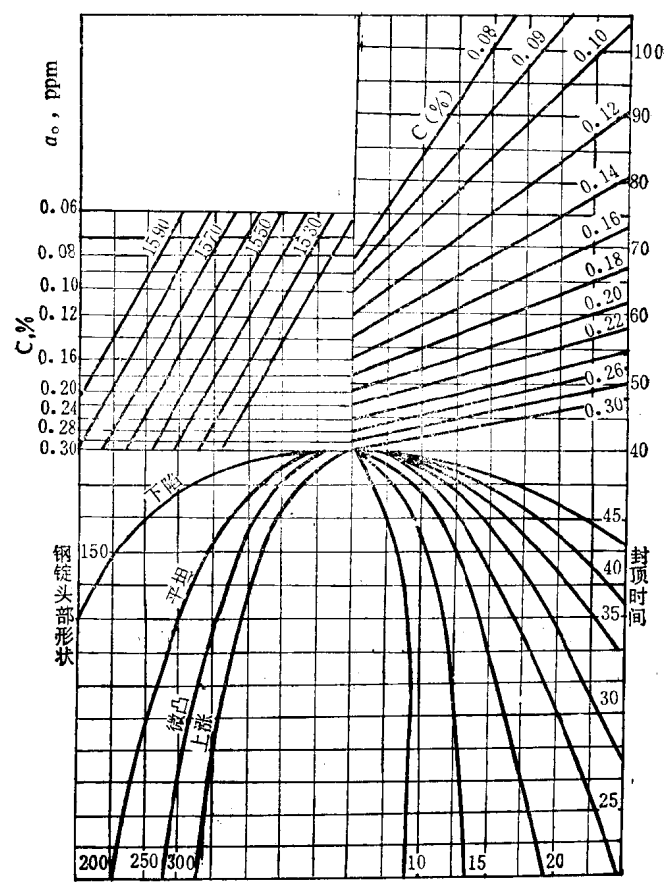


图 1-8 半镇静钢 a_O 控制

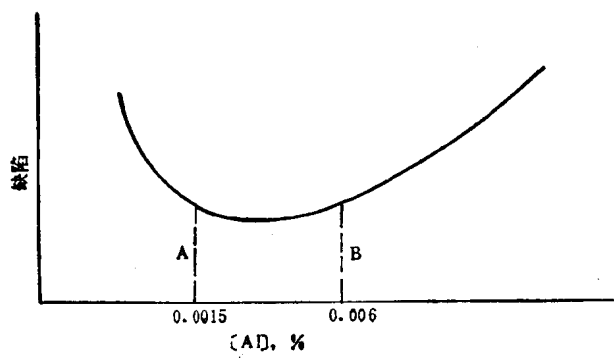


图 1-9 钢中Al与铸坯缺陷关系

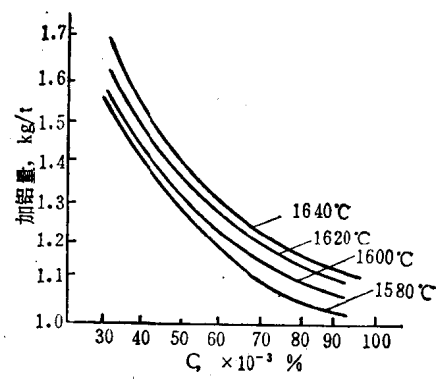


图 1-10 钢[C]含量与加铝关系

(1) 固定出钢时投入钢流的Al块数量, 然后在吹Ar站用直接定氧法测定钢中 a_o , 根据钢中要求的残Al含量, 用铝线机把铝条插入钢包内, 铝线直径为 $\phi 15 \sim 20 \text{ mm}$ 或 $25 \times 12 \text{ mm}$ 的扁线, 加入速度为 $60 \sim 70 \text{ kg/min}$ 。如220吨转炉, 在出钢时加铝量为 0.6 kg/t , 吹Ar站加Al量为 1.7 kg/t , 可使钢中残Al含量达 0.065% 。

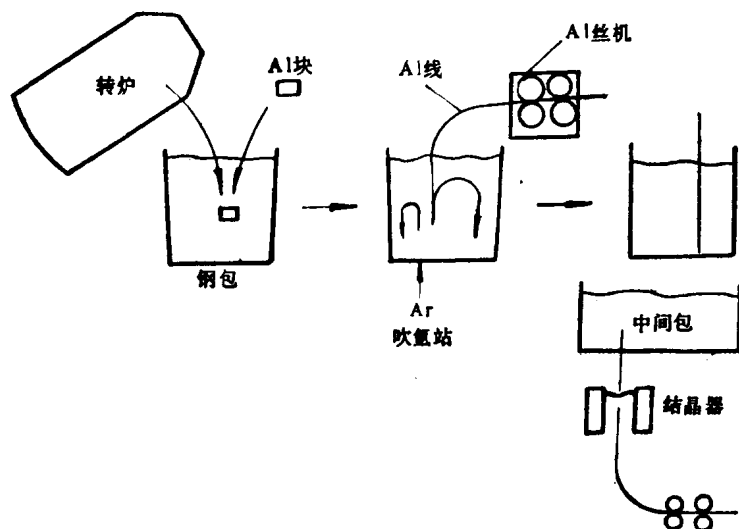


图 1-11 加铝工艺示意图

(2) 固定吹Ar站的加铝量, 测定转炉出钢时钢水中的 a_o , 以调节加入钢包起预脱氧作用的铝量。如160吨转炉, 在吹Ar站固定加铝为 120 kg , 出钢时钢流加铝为 $15 \sim 45 \text{ kg}$, 钢中残Al可以稳定在 $0.035 \sim 0.04\%$ 。

2. 硅镇静钢 硅镇静钢用Si-Mn和少量Al脱氧, 钢中残Al含量很低。对连铸来说, 钢水从钢包到结晶器, 随温度下降与Si、Mn相平衡的 $[O]$ 就要析出, 生成 MnO 、 SiO_2 , 在结晶器形成浮渣, 会从弯月面卷入到凝固壳而形成夹渣, 这种渣导热性不好, 使凝固壳减薄以致造成拉漏事故。或者析出的氧与碳反应生成 CO , 在铸坯中形成皮下针孔的表面缺陷。因此低碳钢仅用Si-Mn脱氧, 不能把钢中 $[O]$ 降到较低的水平。为保证铸坯质量, 必须加铝脱氧, 进一步把 $[O]$ 降到凝固时不能生成C-O反应的水平。但是用铝脱氧后, 钢中酸溶铝含量控制不当, 会形成串状 Al_2O_3 , 浇注时会导致中间包水口堵塞, 影响浇注的正常进行。

那么, 对硅镇静钢来说, 钢中酸溶铝含量有多大既能保证铸坯质量又不影响浇注正常进行呢? 下面从理论上做一分析。

钢水仅用Si、Mn和少量Al脱氧, 在平衡状态下的脱氧反应:

