

原创性声明

本人声明：所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已发表或撰写过的研究成果。参与同一工作的其他同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名：王文华 日期 2005.3.31

本论文使用授权说明

本人完全了解上海大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留论文及送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

签 名：王文华 导师签名：洪华 日期：2005.3.31

摘要

在 AOD 冶炼中终点碳和终点温度的命中率是提高生产率和产品质量的关键。只有控制好终点碳和终点温度，才能保证质量、提高炉龄并减少铬的吹损。目前，大多数 AOD 冶炼中终点碳控制是借助经验公式来预测的，主要还是通过取样分析来确定，终点温度往往取决于终点碳和多次摇炉测温来获得。由于不能做到通过吹气量和氩氧气体比例的调整来控制，因此自动化程度低，经验操作的因素大，容易造成工艺不稳定，其结果不但浪费气体，而且使铬的回收率降低，还造成炉衬损耗严重，炉龄下降。本课题的目的就是在充分利用现有操作数据的基础上应用冶金原理建立终点碳及终点温度预报数学模型，通过分级调整氧气、氩气、氮气比例达到所需的控制效果。

通过本模型，由初始温度、初始成分及补加合金量等原始数据作为输入参数，可预报达到目标终点碳所需要的脱碳时间以及相应的终点温度。本模型计算得到的终点碳与实际终点碳极为接近，可作为一般 AOD 冶炼中预报终点碳与脱碳时间关系之用，还可根据不同工况（如炉令，氧压等）随时调整模型相关系数，得到更佳脱碳效果并提高终点碳的命中率。终点碳命中率可由原来的 95% 提高到 98% 以上，最高温度可以控制不超过 1750℃。

本模型可与基础级自动化配合进行脱碳全过程的 (O₂:Ar) 比自动控制，使之获得最佳脱碳效果，最优化的气体消耗，最长的炉衬寿命，为小型 AOD 炉的改造提供理论基础。

关键词：不锈钢，AOD，脱碳，(O₂:Ar) 比，计算机模拟

ABSTRACT

The hit rate of aim carbon content and final temperature is a key for raising productivity and quality in AOD smelting. Only if aim carbon content and final temperature are well controlled can furnace life be prolonged and Cr loss be decreased. At present, the control of aim carbon content is determined by empirical formula, which is mainly determined by sampling analysis. Final temperature depends normally on aim carbon content and is obtained with multiple temperature measurement from furnace tilting but not controlled with adjustment of gas quantity and decreasing O_2/Ar_2 blowing ratio. Low automation level and more influence of empirical operation cause variability and instability, which wastes not only gas, but also decreases Cr recovery ratio, makes loss of lining severs and reduce furnace life. The purpose of this study is to apply metallurgical theory and plenty of operation data to build mathematical model for forecasting aim carbon content and final temperature, and to realize optimum control from different adjusting ratio of O_2 , Ar and N_2 .

Taking initial temperature, initial composition and amount of added alloys as input data, the decarburization time needed for realizing aim carbon content can be forecasted through this model, the final temperature at aim carbon content can also be estimated.

At the same condition, the aim carbon content calculated by this model is identical with measured value and can be used for prediction of relationship between aim carbon content and decarburization time during the ordinary and small AOD smelting , in order to increase hit-rate of aim carbon content. The relative coefficient in model can also be adjusted for better decarburization result and hit-rate of aim carbon content, according to various working conditions (like furnace life, oxygen pressure, etc).

Concerting with basic automation system, this model may control ($O_2:Ar$) ratio for whole decarburization process so as to achieve best decarburization result, optimal gas consumption and longest lining life thus providing theoretical basis for further

modification of small AOD furnace.

Key words: stainless steel ,AOD , decarburization, (O₂:Ar) ratio , computer simulation

第一章 序言

1.1 AOD 冶炼发展历史

克虏伯公司于 1912 年发明了不锈钢，并进行了工业性生产，但是直到 50 年代中期以前，世界不锈钢的年产量始终未超过 100 万吨，主要原因是不锈钢冶炼工艺技术一直没有得到重大突破。不锈钢应用和发展从成本，质量和工艺适应性方面提出以下要求：

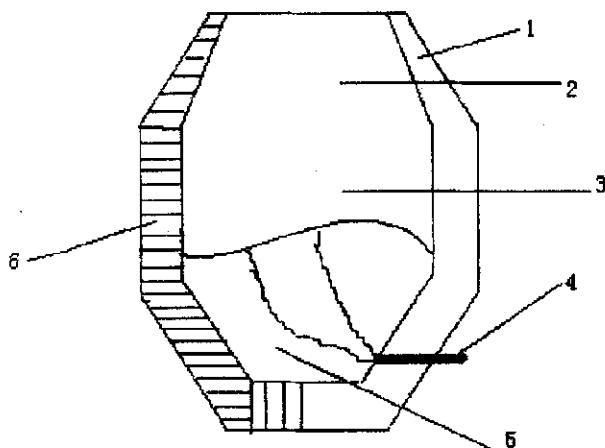
- (1) 允许选用更廉价的原料，降低生产成本。如采用高碳或中碳铬铁代替价格昂贵的微碳铬或金属铬。应用不锈钢返回料以回收合金元素。
- (2) 能生产出高纯度，高均匀性的不锈钢，在冶炼过程中能大幅度地去除原材料中带入的碳、硫、磷、气体、夹杂以及其他有害元素，使这些杂质元素的含量只有按常规方法冶炼的同钢种中含量的几分之一或几十之一。如要求碳小于 $200 \times 10^{-4}\%$ ，硫、磷小于 $50 \times 10^{-4}\%$ ，氮小于 $30 \times 10^{-4}\%$ ^[1]。
- (3) 冶炼工艺能更好地与浇注配合，特别是与连铸的配合。如冶炼的生产率能适应连铸的要求。

AOD 法就是为了解决上述问题而发展起来的一种专门用于冶炼高铬不锈钢的方法，该方法可以在不太高的冶炼温度下，在大气中将高铬钢液中的碳降到极低水平，而铬又没有明显的烧损。在冶炼一般超低碳不锈钢（如 316L、304L）时，碳含量一般在 0.02% 左右，如有特殊要求，可将碳含量降至 0.01% 以下（真正的超低碳不锈钢）。由于 AOD 炉对钢水有非常强的搅拌能力，有利于脱硫、脱氧及去除其他气体，使钢水中的杂质含量、气体含量达到理想值，可充分保证钢材的内在质量和改善钢材的冷热加工性能。通过精炼，使不锈钢杂质得到有效控制，从而大大提高不锈钢的耐腐蚀性能。此外，这种氩氧精炼工艺还具有投资省、生产效率高、生产费用低、产品质量高、操作简便等优点。所以，在世界各国得到迅速推广。发达国家的不锈钢产品百分之七十五以上是由 AOD 炉生产的。现在世界上约有 AOD 设备 140 台，最大容量 160 吨。据资料介绍^[33]，全世界不锈钢总产量的 75% 以上是由 AOD 生产的。西欧、美国、日本等主要不锈钢生产国 AOD 法生产不锈钢的比例，美国 95%、芬兰 100%、英国 88%、意大利 95%，原西德为 75%，日本 65%。

1. 2 AOD 工艺过程

AOD 工艺是氩氧脱碳法 (Argon Oxygen Decarburization) 的简称，其基本原理是在常压下向钢液吹氧脱碳的同时加入氩气或氮气降低 CO 分压以实现去碳保铬。

AOD 炉的炉体类似于氧气转炉，是由钢板围制的炉壳和内砌耐火材料的炉衬所组成见图 1-1。为了提高炉子的作业率，通常采用活动炉壳。吹入精炼用混合气体的风口安装在出钢口侧对面、靠近炉底的侧壁上。当装料和出钢时，炉体前倾一定角度，风口处于钢液面以上。正常吹炼时，风口沉入熔池深部。根据炉容量的大小，可安有二个或三个以上的风口。由于炉体下部设计成 20° 倾斜的圆台形，所以风口喷出的气体在熔池中上浮时，不会冲刷风口上方的炉壁。AOD 炉风口的型式是特有的，它属于是用气体冷却的消耗式风口。风口采用双层套管结构，其外管只通氩气（或氮气）以冷却风口，内管通氩氧混合气体。



1---炉壳；2---炉帽；3---炉堂；4---喷枪；5---钢水；6---炉衬

图 1-1 18 吨 AOD 炉示意图

采用 AOD 工艺精炼不锈钢时，可用电炉或氧气转炉作为初炼炉。当用电炉熔炼供 AOD 炉精炼的半钢时，电炉的炉料可由废钢、不锈钢的返回钢、高碳铬铁、高碳镍铁等原料组成，按需要还可使用少量的铬矿。电炉所炼的半钢对碳含量没有严格的要求，通常波动于 1%-2%。它比 VOD 法对原料选择的自由度要更量没有严格的要求，通常波动于 1%-2%。它比 VOD 法对原料选择的自由度要更

大些。考虑到 AOD 炉的炉衬寿命，硅的含量一般控制在 0.2%-0.4%。电炉熔化终了，如果硅高，可以进行脱硅处理。脱硅用氧化剂可以是氧气、氧化镍或氧化铁皮，但考虑到钢液温度，一般建议吹氧。为了还原炉渣中的氧化铬，初炼炉出钢前可加硅铁和碳化硅等还原剂。AOD 精炼条件下具备较强的脱硫能力，所以在初炼炉中一般不强调脱硫。初炼炉的出钢温度控制在 $1620 \pm 10^{\circ}\text{C}$ ^[18]。

初炼炉出钢后，在运往 AOD 炉的过程中，对钢液称量和除渣，然后兑入 AOD 炉中。为防止钢液灌入风口，兑钢液时由风口吹入氩或氮气。根据初炼炉出钢的碳、硅、锰含量和钢液的质量，计算出吹入氧的总量。为了尽量减少铬的氧化和防止钢液温度过高，在吹炼时要改变氩氧的混合比。在理想的情况下，应按照熔池的含碳量和温度，连续地变化混合比。但是，由于操作、检测、控制等方面的原因，目前，在实际操作中，则是分三或四个阶段变化氩氧比例。每个阶段所用的混合比，按该阶段终了时的含碳量和温度来确定。一般吹炼初期，碳含量较高，采用 $\text{O}_2: \text{Ar}=4:1$ （或 3: 1）^[2]。在这个比例下，将熔池中含碳量降到 0.2% 左右。这时的温度大约为 1700°C 左右。第二阶段按 $\text{O}_2: \text{Ar} = 2:1$ 的比例供气。将含碳量降到 0.1% 左右，此时熔池温度大约为 1700°C 。第三阶段按 $\text{O}_2: \text{Ar} = 1:2$ 的比例，将碳含量降至 0.02%，此时温度约为 $1700\text{--}1750^{\circ}\text{C}$ 。当吹炼碳含量小于 0.01% 的极低碳钢种时，可增设第四阶段，以 $\text{O}_2: \text{Ar}=1:3$ （或 1: 4）的比例继续脱碳。

第二章 课题目的

2. 1 五钢 AOD 目前的现状

上海五钢 AOD 精炼装置投产 10 多年来，主要生产各种不锈钢诸如：304L、316L、310L、304、316、321、3RE60（双相钢），尿素级 00Cr25Ni20Mo3Mn3N（U3）等超低碳不锈钢和特种合金，制造出了大批无缝钢管、焊丝、焊带、锻件、棒材、耐高温材料及市场难以寻购的多品种、多规格、制造难度大的产品。五钢 18 吨 AOD 炉龄一般在 40-50 炉之间，炉膛的内形为炉帽部分的圆台体、炉体中部的圆柱体和下部的倒置圆台体所组成。炉容比为 $1-0.7\text{m}^3/\text{t}$ ，从而保证有较大熔炼室空间，以减少喷溅。熔池深度、熔池直径、炉膛的有效高度三者之比取 1: 2: 3。

目前，五钢 AOD 生产面临着四个方面的问题：

- (1) 炉龄不高。目前平均为 48 炉，而国内现在较好的炉龄在 70-100 炉之间。
- (2) 终点碳控制与终点温度控制过于保守，使得终点碳过低，终点温度过高，这一高一低是造成炉龄不长的主要原因。
- (3) 气体配比采用固定模式(见图 2-1)，不能结合炉况随机调整。
- (4) 铬回收率不稳定，铬损较大。

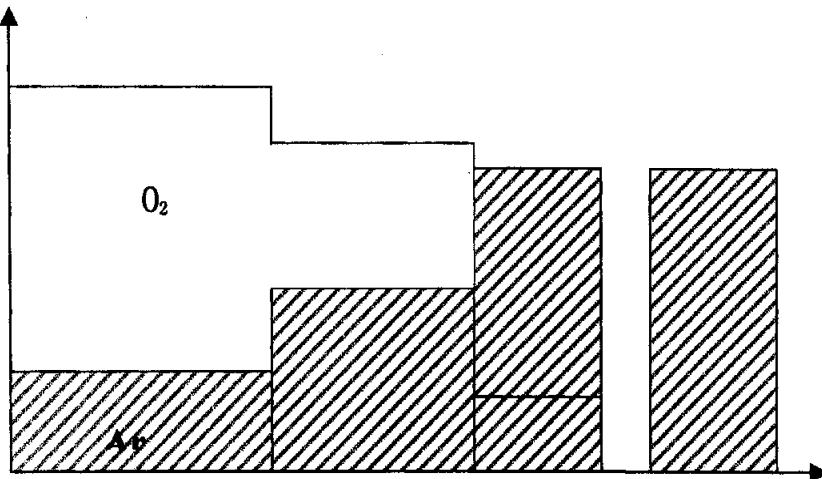


图 2-1 气体配比

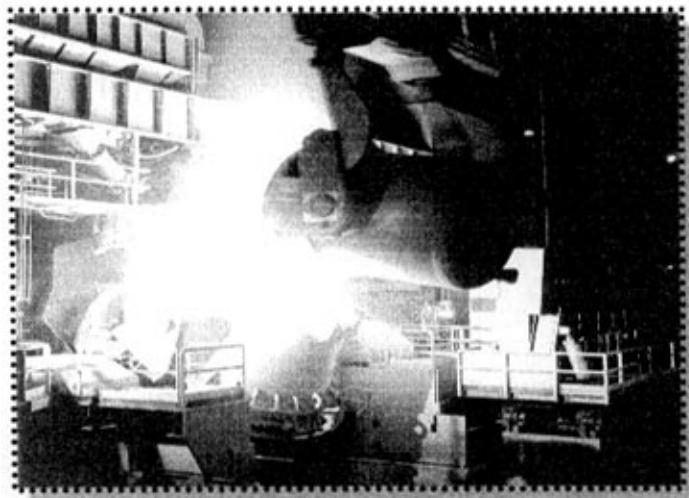


图 2-2 AOD 精炼现场

2. 2 本课题研究的内容和目的

根据五钢 AOD 冶炼情况，终点碳和终点温度的命中率是影响 AOD 冶炼的关键。只有控制好终点碳和终点温度，炉龄才能提高，铬的吹损才能减少。目前，大多数 AOD 工厂中终点碳控制是借助经验公式来预测的，主要还是通过取样分析来确定，终点温度往往取决于终点碳和多次摇炉测温来确定，由于不能做到通过吹气量和气体比例的调整来控制，因此自动化程度低，经验操作的因素大，容易造成工艺不稳定，不但浪费气体，而且使铬的回收率降低，炉衬损耗严重，炉龄下降。本课题的目的就是应用冶金物化理论及大量数据，建立终点碳及终点温度控制数学模型，通过调整 O_2 、Ar、 N_2 气比例达到控制最佳效果。

根据冶炼时间，实际温度、成分、炉龄，通过数学模型调节气体流量和配比，使铬损减少到最低，同时提高炉龄并降低包括气体消耗在内的生产成本，最终获得最佳经济效益。

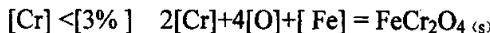
根据实际生产已知，多吹 O_2 能使 [C] 降低，但铬损增加，温度升高，炉衬损耗增加，多吹 Ar 能使温度降低，铬损减少，但成本增加。为此，在冶炼过程中，每一时间点上，必须寻找一个能使温度保持一定值的条件下，成本最低的 Ar、 O_2 配比和流量。

第三章 课题研究的依据

为了研制数学模型，首先必须确定工艺参数。AOD 吹炼过程的工艺参数可分为两类。一类是与吹炼供气系统有关的参数，如氧氩比、氧气流量、氩气（氮气）流量、吹纯氩的时间、风口直径、风口个数、风口距熔池表面距离、混合气体压力等。另一类是与冶炼工艺有关的参数，如炉容量、入炉半钢的化学成份、半钢的温度、吹氧脱碳时间等。以上两类参数均可在冶炼过程中获得，并把这些参数代入数学模型，通过计算机来控制终点碳和终点温度。

3.1 热力学方面的理论依据

铬溶解在铁液中，它和铁的原子、离子半径相近似，Fe-Cr 系近似理想溶液。在炼钢温度下最稳定的氧化物是 Cr₂O₃。据 Fe-Cr-O 系平衡研究的结果^[1]，稳定的析出相随铁液中的铬的含量而变化。以[Cr]表示铁液中的铬，当[Cr]<[3%]时，稳定的析出相为 FeO·Cr₂O₃，当[Cr]>[3%]时，平衡的析出相尚未得到完全确认。由实测结果^[1]，[Cr]在[6%]-[30%]时，平衡析出相为 Cr₂O₃。考虑到测定精度的问题，目前认为铬的氧化产物在[Cr]<[3%]时是 FeCr₂O₄，[Cr]>[3%]时是 Cr₂O₃。因此，按熔池中[Cr]含量的不同，其氧化反应的热力学值如下^[2]：



$$\Delta G^0 = -843100 + 371.8T$$

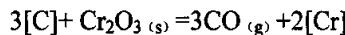
$$\lg K = \lg a_{\text{Fe}} \cdot a_{[\text{Cr}]}^2 \cdot a_{[\text{O}]}^4 = -\frac{53420}{T} + 22.92$$



$$\Delta G^0 = -1022700 + 438.8T$$

$$\lg K = \lg a_{[\text{Cr}]}^2 \cdot a_{[\text{O}]}^3 = -\frac{44040}{T} + 19.42$$

当金属液中[C]和[Cr]同时氧化时，按下列反应可以达到碳铬间的平衡：



$$K = \frac{a_{[Cr]}^2 \cdot P_{CO}^3}{a_{[C]}^3 \cdot a_{Cr_2O_3}}$$

假定：

$$a_{Cr_2O_3} = 1$$

可以得出：

$$a_{[Cr]}^2 / a_{[C]}^3 = K \cdot P_{CO}^{-3}$$

根据中村^[7]的测定，在 $P_{CO}=1$ 、 $[Cr]=10\text{-}25\%$ 时

$$\lg \frac{a_{[Cr]}^2}{a_{[C]}^3} = -\frac{40990}{T} + 25.83$$

推广到 $P_{CO} \neq 1$ 时

$$\lg \frac{a_{[Cr]}^{2/3}}{a_{[C]}^{1/3}} = -\left(\frac{40990}{T} + 25.83\right)^{1/3} - \lg P_{CO}$$

$$a_{Cr} = f_{Cr} \cdot [Cr]$$

$$a_C = f_C \cdot [C]$$

f_{Cr} 、 f_C 由表 3-1 求得。

表 3-1 各元素的相互作用系数 e_i^j ^[13]

	C	Cr	Cu	Mn	Mo	Ni	O	P	S	Si	Sn	W
C	0.14	-0.024	0.016	-0.012	-0.008	0.012	-0.34	0.051	0.046	0.08	0.041	-0.006
Mn	-0.07						-0.083	-0.004	-0.048			
Si	0.18	-0.001	0.014	0.002		0.005	-0.23	0.11	0.056	0.11	0.017	
Cr	-0.12	-0.001	0.016		0.002	0.001	-0.14	-0.053	-0.02	-0.004	0.009	

$$\begin{aligned} \lg f_C &= 0.14[C] - 0.024[Cr] + 0.016[Cu] - 0.012[Mn] - 0.008[Mo] + 0.012[Ni] \\ &\quad - 0.34[O] + 0.051[P] + 0.046[S] + 0.08[Si] + 0.041[Sn] - 0.006[W] \end{aligned}$$

$$\lg f_{Mn} = -0.07[C] - 0.083[O] - 0.0035[P] - 0.048[S]$$

$$\begin{aligned} \lg f_{Si} &= 0.18[C] - 0.001[Cr] + 0.014[Cu] + 0.002[Mn] + 0.005[Ni] \\ &\quad - 0.23[O] + 0.11[P] + 0.056[S] + 0.11[Si] + 0.017[Sn] \end{aligned}$$

$$\lg f_{Cr} = -0.12[C] - 0.001[Cr] + 0.016[Cu] + 0.002[Mo] + 0.001[Ni]$$

$$-0.014[O] - 0.053[P] - 0.020[S] - 0.004[Si] + 0.009[Sn]$$

由以上分析可得到：平衡时终点[C]与 P_{CO} 、温度、各成分之间存在一定的关系。

终点[C]与 P_{CO} 、温度、各成分关系式如下：

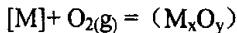
$$\begin{aligned} 3\lg[C] + 0.66[C] = & 2\lg[Cr] + 3(40990T^{-1} + 25.83)^{0.333} \\ & + 3\lg P_{CO} + 0.07[Cr] - 0.016[Cu] + 0.036[Mn] \\ & + 0.0028[Mo] - 0.035[Ni] + 0.74[O] - 0.312[P] - 0.178[S] \\ & - 0.248[Si] - 0.105[Sn] + 0.018[W] \end{aligned}$$

----- (3-1)

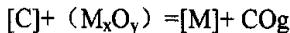
由式(3-1)可见，当 CO 分压一定时，要实现降碳保铬就必须提高熔池温度。碳越低，转化温度就越高。如果 CO 分压降低，则转化温度也可降低。AOD 就是利用这个原理来进行降碳保铬的。

3.2 冶金动力学依据

AOD 过程中吹入钢水的氧首先与 Cr、Mn、Si、Fe 发生反应，产生混和氧化物：



它们吸附于吹入气体形成的气泡并随之上浮，在吹氧初期，混和氧化物中的 NiO、 Cr_2O_3 、 FeO 等在上浮时被[C]、[Si]、[Mn]还原，随着[Si]、[Mn]的不断降低，熔池中碳对氧化物的还原速度不断增大，此时混和氧化物的还原基本由碳来完成。



该过程从冶金动力学上讲应分为三步进行^[4]：

- (1) 熔池中[C]对流扩散至混和物；
- (2) 发生界面化学反应；
- (3) 产物 CO、M 分别进入气泡和熔池。

因为高温使界面化学反应处于化学平衡，气相扩散速度比液相扩散速度快得多，所以(1)为限制性环节^[8]：

$$\frac{d[C]}{dt} = -K_c \cdot \frac{A}{V} ([C] - [C]^*) \rho_{\text{钢水}} / 1200 \quad \dots \dots (3-2)$$

其中：

$[C]^*$ ----- 反应界面碳的浓度。(%)

$[C]$ ----- 熔池中碳的浓度。(%)

K_c ----- 碳的传质系数。 $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

A ----- 反应界面面积。 (cm^2)

V ----- 钢水体积。 (cm^3)

$\rho_{\text{钢水}}$ ----- 钢水密度。 $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$

t ----- 脱碳时间。(s)

对上式分离变量积分：

$$\int_{[C]_0}^{[C]} \frac{1}{[C] - [C]^*} \cdot d[C] = K_c \frac{A \rho_{\text{钢水}}}{V 1200} \int dt$$

得：

$$\frac{[C] - [C]^*}{[C]_0 - [C]^*} = \exp(-K_c \cdot \frac{A \cdot \rho_{\text{钢水}}}{1200 \cdot V} \cdot t) \quad \dots \dots (3-3)$$

式中：

$[C]_0$ ----- 钢液中碳初始浓度。(%)

由(3-2)式可从理论上得到钢液中碳与时间的关系。

3.3 国外已研究的 AOD 过程模型

AOD 自投产以来，随着生产量不断提高，工艺过程的改进也在不断推进。

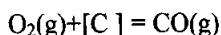
各种 AOD 过程模型也相继推出。下面是几种含铬金属液脱碳反应模型。

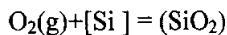
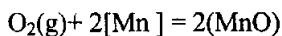
3.3.1 Tetsuya 和 Watanabe 脱碳反应模型^[9]

该模型适合于初始碳大于 2.5%，顶底复合吹的 AOD 炉。

AOD 工艺中的脱碳反应可以设想为以下几个步骤：

- (1) 通过吹入的精炼气体产生气泡。这些气泡的氧全部与铁水中的 C、Si、Mn 和 Cr 反应生成 CO、SiO₂、MnO 和 Cr₂O₃。





这些氧化物的数量取决于向气体—金属界面的物质传递速率。

每种元素向一个气泡的质量流量 J_i ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 可用下述等式表示。

$$J_i = (\rho_{\text{钢水}} / 100M_i) k_i A_b ([C]_{b,j} - [C]_{i,j}) \quad (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \dots \dots (3-4)$$

k_j ---元素 (j) 的质量传递系数.

A_b ——气泡总表面积 (cm^2) .

M_j ——元素 (j) 的摩尔质量($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

$\rho_{\text{钢水}}$ ----- 钢水密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

$[C]_{b,j}$, $[C]_{i,j}$ ---分别表示反应界面上和气泡中元素 (j) 百分含量 (%).

(2) 通过[C]和[Si]来还原上升气泡中的氧化物。可根据(3-5)-(3-8)等式的反应速度来确定哪一种反应较快，从而计算钢水中元素的物质传递速率。

$$\frac{1}{3}(\text{Cr}_2\text{O}_3) + \frac{1}{2}[\text{C}] = \frac{2}{3}[\text{Cr}] + \text{CO}_g \dots \quad (3-5)$$

热平衡计算：

钢水的温度变化由下式计算：

$$\frac{dT_M}{dt} = \frac{Q_{RT}}{(C_{p,s} \cdot W_s + C_{p,M} \cdot W_M)}$$

T_M ——— 钢水的温度.(K)

C_{PS} ——渣的比热 ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)。

C_{PM} ——— 钢水的比热 ($J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1}$)。

Q_{BT} -----单位时间内产生的热量($J \cdot s^{-1}$)

通过以上分析及计算得到钢水的温度、各主元成分和时间的关系。

3.3.2 韩企韬脱碳模型^[10]

低碳铁水的脱碳速度与喷吹气体中的氧分压、流量以及铁水的碳含量有关。作为支配整个反应速度的主要因素，要考虑氧的传递速率和碳的传递速率以及生成 CO 的气相物质移动等等。

最初，铁水的脱碳速度为单纯的氧的传递速率所控制，脱碳后期由碳的传递速率所支配，故用下列等式计算脱碳速度：

脱碳前期：



$$K_C = \frac{P_{CO}}{f_C[C] \cdot f_O[O]}$$

$$\frac{dC_o}{dt} = 2(K_{G,O_2} / RT)(A / V)(P_{O_2} - P_{O_{2,i}})$$

脱碳后期：

$$-\frac{dC_c}{dt} = K_{L,C}(A/V)([C_c] - [C_c]_i)(\rho_{钢水}/100M_c)$$

式中：

C_c ——铁水中碳的百分浓度 (%)

C_o ——铁水中氧的摩尔浓度 (mol/cm³)

$K_{L,C}$ 、 K_{G,O_2} ——物质移动系数 (cm/s)

R——气体常数 (cm³·atm/K·mol)

T——温度 (K)

A——铁水表面积 (cm²)

V——铁水体积(cm³)

P_{O_2} ——氧气压力(atm)

M_c ——碳的分子量 (g/mol)

注脚字母：

C 表示碳； O₂ 为氧气； G,L 分别为气体和液体； i 表示反应界面。

应用以上分析通过计算可得到铁水吹氧时的脱碳速度。

第四章 AOD 脱碳反应的建立

以上两个模型在工业生产中都取得较好的结果，但两模型均建立在高碳铁水条件下，不适应目前 AOD 的状况。另外，在处理钢液中各组元氧化速率时，将反应速率常数作为定值是不尽合理的，随着钢液中成分，温度的变化，各反应速率常数间的差别还会加大，这样无疑对实际操作会带来相当大的偏差。本课题就是要建立一个能真实反映 AOD 脱 C 过程的数学模型，能服务于生产，能取得最大效益的模型。

4.1 AOD 脱 C 过程基本假设

关于 AOD 脱碳过程中氧气吹炼金属时元素氧化机理的问题，目前还存在着几种不同的看法，本论文假定：

- (1) 精炼初期，吹入熔池的氩氧混合气体中的氧与钢液中碳、铬、硅、锰和铁等元素发生反应而被吸收，生成的 CO 进入氩气泡中。也就是说，氧气直接进行氧化反应。各元素的氧化速率与氧气流量成比例。
- (2) 生成的氧化物在上浮过程中部分分解，碳、铬、锰、硅等元素的氧化在钢液/渣/气泡界面同时进行，达到平衡，即各反应物在界面处达到一总的平衡。
- (3) 精炼后期，只有碳和铬继续氧化，碳的浓度较低，此时碳的氧化速率将受碳的传质控制。
- (4) 吹入熔池的氧气除大部分参与氧化反应外，其余部分将逸出反应熔池，不在钢液中溶解。
- (5) 假设脱碳至一定时有一临界碳含量 $[C]_{tr}$ 。当钢水中碳含量大于 $[C]_{tr}$ 时，脱碳速率由供氧量控制。当钢水中碳含量小于 $[C]_{tr}$ 时，脱碳速率由 [C] 的扩散控制。

4.2 AOD 吹炼过程数学模型的建立

4.2.1 吹炼过程中钢液各组元的变化速率

根据假设，氧气射流喷射到钢液中，气泡中的氧与钢液中的 C、Si、Mn、Cr、Fe 反应，生成 CO、 SiO_2 、 MnO 、 Cr_2O_3 、 FeO 。在气泡-液界面上发生下列化学反应^[2]。



$$\triangle G^0 = -275280 - 84.12T$$

$$\Delta G_C = \Delta G^0 + RT \ln \frac{P_{CO}^2}{a_C^2 \cdot P_{O_2}}$$



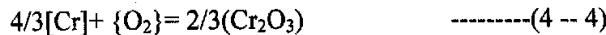
$$\triangle G^0 = -747260 + 177.8T$$

$$\Delta G_{Si} = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_{SiO_2}}{a_{Si} \cdot P_{O_2}}$$



$$\triangle G^0 = -806475 + 240.54T$$

$$\Delta G_{Mn} = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_{MnO}^2}{a_{Mn}^2 \cdot P_{O_2}}$$



$$\triangle G^0 = -774693 + 233.4T$$

$$\Delta G_{Cr} = \Delta G^0 + RT \ln \frac{\frac{2}{4} a_{Cr_2O_3}^3}{a_{Cr}^3 \cdot P_{O_2}}$$



$$\triangle G^0 = -476140 + 98.9T$$

$$\Delta G_{Fe} = \Delta G^0 + RT \ln \frac{a_{FeO}^2}{a_{Fe}^2 \cdot P_{O_2}}$$

根据所作假设，精炼初期各元素的氧化速率为：

$$\frac{dc_c}{dt} = -\delta_c \cdot s$$

$$\frac{dc_{si}}{dt} = -\frac{1}{2} \delta_{si} \cdot s$$

$$\frac{dc_{Mn}}{dt} = -\delta_{mn} \cdot s$$

$$\frac{dc_{Cr}}{dt} = -\frac{2}{3} \delta_{cr} \cdot s$$

其中：

s:供氧速度

$$s = \frac{2\zeta Q_0}{22400} \quad (mol/s)$$

c_j —各组元摩尔浓度(mol/cm^3)

$a_i \cdots j$ 组元活度。

Q_0 ——吹 O_2 量(Nm^3/s)

ξ --- 氧气利用率.

δ_j ---- 氧气在各元素间的分配比。

分配比 δ , 由下列式子得到。

$$\delta_C = \Delta G_C / \sum \Delta G_j$$

$$\delta_{\text{cr}} = \Delta G_{\text{Cr}} / \sum \Delta G_i$$

$$\delta_{Mn} = \Delta G_{Mn} / \sum \Delta G_j$$

$$\delta_{Si} = \Delta G_{Si} / \sum \Delta G_j$$

$$\sum \Delta G_j = \Delta G_C + \Delta G_{Cr} + \Delta G_{Mn} + \Delta G_{Si}$$

其中：

ΔG_j ——j 物质氧化反应吉布斯自由能变化。

精炼后期，只有碳和铬继续氧化，碳的浓度较低，此时碳的氧化速率将受碳的传质控制^[18]。

$$\frac{1}{3}(\text{Cr}_2\text{O}_3) + [\text{C}] = \frac{2}{3}[\text{Cr}] + \text{CO(g)} \quad \dots\dots\dots(4-6)$$

$$\lg K_{CCr} = -\frac{31132}{T} + 19.518$$

$$K_{CCR} = \frac{P_{CO} \cdot f_{Cr}^{\frac{2}{3}} [Cr]^{\frac{2}{3}}}{a_{Cr_2O_3}^{\frac{1}{3}} \cdot f_C [C]} \quad \dots \dots \dots (4-7)$$

$$j_C = (\rho_{\text{钢水}} / 100M_C) k_C \frac{A_b}{V} ([C]_b - [C]_i) \quad (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \dots \dots (4-8)$$

$$j_{Cr} = (\rho_{钢水}/100M_{Cr})k_{Cr} \frac{A_b}{V} ([Cr]_b - [Cr]_i) \quad (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad \dots \dots (4-9)$$

假定，反应瞬间在界面得到平衡，则由(4-7)式得：

由(4-8),(4-9),(4-10),(4-11)得

$$[\text{Cr}]_i = [\text{Cr}]_b - \frac{2k_C M_{\text{Cr}}}{3k_{\text{Cr}} M_C} \left\{ [C]_b - \frac{P_{\text{CO}} f_{\text{Cr}}^{\frac{2}{3}} [\text{Cr}]_i^{\frac{2}{3}}}{K_{\text{CCr}} a_{\text{Cr}_2\text{O}_3}^{\frac{1}{3}} f_c} \right\} \quad \dots \dots \dots (4-12)$$

由(4-12)求得 $[\text{Cr}]_i$ 代入(4-11)中求得 $[C]_i$,把 $[\text{Cr}]_i$, $[C]_i$ 分别代入(4-8)(4-9)中求得 j_c 和 j_{cr} ,然后应用标准四阶龙格-库塔公式求解。见第五章。

式中:

K_{CCr} ----- 平衡常数.

k_C 、 k_{Cr} ----- 传质系数.(cm/s)

A_b ----气泡总表面积 (cm²) .

V ——钢水体积(cm³)

下标 i 表示反应界面, b 表示钢水。

M_j -----j 元素的分子量 (g/mol)

j_j -----传质速率 (mol · cm⁻³ · s⁻¹) .

精炼前期和精炼后期的分界线是由临界碳含量 $[C]_{tr}$ 来划分的。临界碳含量 $[C]_{tr}$ 由下列方法确定,当由供氧量控制的脱碳速率与由[C]的扩散控制的脱碳速率相等时,此时的[C]就是 $[C]_{tr}$ 。

4.2.2 吹炼过程钢液中温度的变化率

熔池温度 T 可由针对熔池的热量衡算得出。

$$\frac{d[(C_{ps} \cdot w_s + C_{pm} \cdot w_m)T]}{dt} = Q_i + Q_{sm} - Q_{sr} - Q_g - Q_m - Q_{se} \quad \dots \dots \dots (4-13)$$

C_{ps} : 渣子热容, (J · g⁻¹ · K⁻¹)

C_{pm} : 钢水热容, (J · g⁻¹ · K⁻¹)

w_s :渣量 (g)

w_m :钢水量(g)

Q_i : 反应表面单位时间的直接氧化放热。(J/s)

$$Q_i = [\Delta[C] \cdot \frac{(\Delta H_{CO})}{M_C} + \frac{1}{2} \Delta[Si] \cdot \frac{(\Delta H_{SiO_2})}{M_Si} + \Delta[Mn] \cdot \frac{(\Delta H_{MnO})}{M_Mn} + \frac{2}{3} \Delta[Cr] \cdot \frac{(\Delta H_{Cr_2O_3})}{M_Cr}] \frac{W_m}{100}$$

Q_{sm} : 单位时间内钢和渣携带的热量^[23](J/s)

$$Q_{sm} = \{0.0175[-\frac{d[Cr]}{dt}] + 0.01545[-\frac{d[Mn]}{dt}] + 0.02564[-\frac{d[Si]}{dt}]\} \frac{W_m}{100}$$

Q_{sr} : 单位时间内通过炉渣表面的辐射热损失 (J/s)

$$Q_{sr} = k_{sr} \cdot A_s \cdot (T^4 - Ta^4)$$

$$= 1.633 \times 10^{-8} \times A_s [T^4 - 373^4]$$

k_{sr} —辐射当量传热系数, 取 $k_{sr}=1.633 \times 10^{-8} (J \cdot cm^{-2} \cdot K^{-4})^{[7]}$

T_a —炉口温度, 取 $100^\circ C = 373K$

A_s ---- 炉渣表面面积 (cm^2)

Q_g : 气体带走的热量 (J/s).

$$Q_g = Q_N \rho_N C_N T_g + \frac{W_m}{100} \left[-\frac{d[C]}{dt} \right] \cdot \frac{28}{12} C_{CO} T_g$$

$Q_N \rho_N C_N T_g$: 为辅助气体带走的热量 (J/s)

$$\frac{W_m}{100} \left[-\frac{d[C]}{dt} \right] \cdot \frac{M_{CO}}{M_c} \cdot C_{CO} T_g \quad \text{为一氧化碳带走的热量 (J/s)}$$

式中: Q_N 是 Ar(或 N) 气的流量 cm^3/s

ρ_N 是 Ar(或 N) 气的密度 $1.2499 \times 10^{-3} g/cm^3^{[13]}$

C_N 是 Ar(或 N) 气的比热 $2.448 (J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})^{[13]}$

T_g 是炉气温度, 取 $T_g=1000^\circ C = 1273K$

C_{CO} 是 CO 的比热 $1.234 (J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})^{[13]}$

$$Q_g = 1.2499 \times 10^{-3} \times 2.448 \times 1773 Q_N + W_m \left[-\frac{d[C]}{dt} \right] \frac{28}{12} \cdot \frac{1.234}{100} \times 1773 \\ = 5.425 Q_N + 51.05 \left[-\frac{d[C]}{dt} \right] W_m$$

Q_m : 炉壳对环境散热 $[27] (J)$

$$Q_m = \frac{A_L}{\sum \frac{1}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_0}} (T - Ta)$$

$$= \frac{9.363 \times 10^4}{3349.6} (T - 298)$$

$$= 27.95(T - 298)$$

A_L —AOD 炉壁与钢水接触的面积 (cm^2), 是与炉龄有关的函数。

l_i —各层耐火材料的厚度 (cm)

λ_i —各层耐火材料的导热系数 ($J \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$)

α_0 —炉壳对环境散热的给热系数 $0.035 (cm^{-2}k^{-1})$

T_a —环境温度 (K) $T_a=25^\circ C=298K$

$$A_L = \pi\sqrt{(R-r)^2 + h^2} + h(R+r) + \pi R^2$$

1₁ ——镁铬厚度是与炉龄有关的函数

$$\lambda_1: \text{导热系数 } 1.98 \times 10^{-2} (\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})^{[13]}$$

1₂: 粘土砖厚度 3cm

$$\lambda_2: \text{粘土砖导热系数 } 1.77 \times 10^{-2} (\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})^{[13]}$$

$\lambda_2 l_3$: 石棉板厚度 1cm

$$\lambda_3: \text{石棉板导热系数 } 0.16 \times 10^{-2} (\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})^{[13]}$$

1₄: 钢板厚度 0.6cm

$$\lambda_4: \text{钢板导热系数 } 50 \times 10^{-2} (\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})^{[13]}$$

Q_{sc} —为单位时间内加入合金的熔化热^[23]

$$Q_{sc} = \sum \Delta H_m \cdot \frac{d[(W_{sc} \cdot f_{sc}(t))]}{dt}$$

式中: ΔH_m —固体合金的热含 (J/g)

W_{sc} —固体合金的质量(g)

$f_{sc}(t)$ —固体合金的熔化分数

$$C_{ps}: \text{渣子热容, 取 } C_{ps}=1.1966 \times 10^3 (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})^{[23]}$$

$$C_{pw}=\text{钢水热容, 取 } C_{pw}=0.84 \times 10^3 (\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})^{[23]}$$

4.2.3 迭代格式

Δt 时间步长节点 $i=n+1, n$ 上的数值解

模型的数值解:

应用标准四阶龙格-库塔公式求解。

公式如下:

$$x_{n+1}=x_n+(a_1+2a_2+2a_3+a_4)/6$$

式中:

x_{n+1}, x_n -----在离散节点 $i=n+1, n$ 上的数值解。

$$a_1 = \Delta t * f(x_n)$$

$$a_2 = \Delta t * f(x_n + a_1 / 2)$$

$$a_3 = \Delta t * f(x_n + a_2 / 2)$$

$$a_4 = \Delta t * f(x_n + a_3 / 2)$$

由以下微分方程组通过本数学模型, 可求出钢水温度及钢水中 j 组元浓度随时间的变化。

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{ps} \cdot w_s + C_{pm} \cdot w_m} (Q_i + Q_{sm} - Q_{sr} - Q_g - Q_m - Q_{se}) \quad (4-14)$$

$$\frac{W_m}{100M_C} \frac{d[C]}{dt} = -\delta_C \cdot s \quad (4-15)$$

$$\frac{W_m}{100M_{Cr}} \frac{d[Cr]}{dt} = -\frac{2}{3} \delta_{Cr} \cdot s \quad (4-16)$$

$$\frac{W_m}{100M_{Si}} \frac{d[Si]}{dt} = -\frac{1}{2} \delta_{Si} \cdot s \quad (4-17)$$

$$\frac{W_m}{100M_{Mn}} \frac{d[Mn]}{dt} = -\frac{1}{2} \delta_{Mn} \cdot s \quad (4-18)$$

当 $[C] < [C]_{tr}$ 时,

$$\frac{\rho_{钢水}}{100M_C} \frac{d[C]}{dt} = -j_C \quad (4-19)$$

$$\frac{\rho_{钢水}}{100M_{Cr}} \frac{d[Cr]}{dt} = -j_{Cr} \quad (4-20)$$

数学模型的初值如下:

- 1) 原始成分按第一个炉前分析成份。
- 2) 熔池温度 T 按炉前测温 $T=t+273$
- 3) 钢水重量 W_m =电子称重 $\times (1-0.02) \times 10^6$ (g)
- 4) 钢渣重量 W_s =电子称重 $\times 0.02 \times 10^6$ (g)
- 5) 气体流量 Q_g , Q_N 按仪表读数
- 6) 时间步长 Δt 取 1 秒。

6) 初始一氧化碳分压 P_{CO} 取约等于 P_a 。?

4.3 参数的确定

4.3.1 分子量

$$M_c=12 \quad M_{cr}=52 \quad M_{Mn}=55 \quad M_{si}=28$$

$$M_{Fe}=56$$

4.3.2 气泡总表面积

气泡总表面积 A_b , 利用 Diaz^[27]的表达式求得:

$$A_b=6Q_G L/(d_b \mu_b) \quad (\text{cm}^2)$$

式中 Q_G ——气体流率 $Q_G = Q_o + Q_{Ar} \quad (\text{cm}^3/\text{s})$

μ_b : 气泡上升速率见下式^[15]

$$\mu_b = 1.02\sqrt{gr}$$

$r=1/2d_b$ ----- 气泡半径(cm)。

$$d_b = \left(\frac{6\sigma d}{g\rho_m} \right)^{\frac{1}{3}}$$

d -----喷嘴直径 2.4 (cm).

σ ----- 表面张力, 18.65 (N/cm)

g ----- 重力加速度 981(cm/s^2)

ρ_m ----- 钢水密度(g/cm^3)

L -----熔池深度.(cm)

4.3.3 传质系数 k_C 、 k_{Cr}

与气相邻接的熔体中的传质, 可以通过表面更新理论^[7]来描述, 取流体微元在界面上运动距离为 L , 则

$$Sh = \frac{k_j L}{D_j} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} Re^{\frac{1}{2}} Sc^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{则: } k_j = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot D_j^{\frac{1}{2}} L^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{4}} r^{\frac{1}{4}}$$

式中：

Sh -----谢伍德 (Sherwood) 数

Sc -----施密特 (Schmidt) 数

Re -----雷诺 (Reynold) 数

D_j ——钢水中 j 组元的扩散系数 cm^2/s

$D_j = D_{0j} \exp(-E_{Dj}/RT)$

E_{Dj} ----- 扩散活化能 (kJ/s^{-1})

$D_{0c} = (1.2 + 1.7[\%C]) \times 10^{-3}$ $D_{0cr} = 3.04 \times 10^{-5}$

$E_{0c} = 57.74$ $E_{0cr} = 66.94$

r——气泡半径(cm).

L——熔池深度.(cm).

g ----- 重力加速度 $981(\text{cm}/\text{s}^2)$.

4.3.5 平衡常数

平衡常数 K 由下式给出^[2]:

$$\lg K_{Cr} = -\frac{31132}{T} + 19.518$$

4.3.6 活度系数

钢液和钢渣中各组分的活度系数会随着温度的变化而有所不同，在计算不同温度条件下的活度系数时，可对已知活度系数做修正^[4]。对不锈钢液，可以选择正规溶液修正模型。因此有：

$$\epsilon_{i(T)}^j = \epsilon_{i(T_0)}^j (T_0/T)$$

式中：

T_0, T -----分别表示给定温度和炼钢温度。

$\epsilon_{i(T)}^j, \epsilon_{i(T_0)}^j$ ----- 分别表示 T, T_0 时的活度相互作用系数。

钢液中各组分的活度系数可通过表 (3-1) 及以上公式计算得到。

钢渣中各组分的活度系数使用以下公式^[25]计算得到^[23]:

$$\begin{aligned} \lg \gamma_{FeO} = & (5900(N_{CaO} + N_{MgO})(N_{SiO_2} + 0.25N_{Al_{2O_3}}) + 2458N_{MnO}(N_{SiO_2} + 0.45N_{Cr_{2O_3}}) + \\ & + 1780N_{Al_{2O_3}}N_{SiO_2} + 60N_{MnO}N_{SiO_2} + 988N_{Cr_{2O_3}}N_{SiO_2})/T \end{aligned}$$

$$\lg\gamma_{Cr_2O_3} = \lg\gamma_{FeO} - (2564(N_{CaO} + N_{MgO}) + 1106N_{MnO} + 988N_{SiO_2})/T$$

$$\lg\gamma_{MnO} = \lg\gamma_{FeO} - (2458(N_{SiO_2} + 0.45N_{CrO_1.5}) + 60N_{AlO_1.5})/T$$

$$\lg\gamma_{SiO_2} = \lg\gamma_{FeO} - (5900(N_{CaO} + N_{MgO}) + 2458N_{MnO} + 1780N_{AlO_1.5} + 988N_{CrO_1.5})/T$$

式中: $N_j = (\%)j\rho_s/(100M_j)$

(%) -----熔渣化学组成, 见表(4-1)。

ρ_s -----熔渣的密度(g/cm³)。

表 4-1 不锈钢冶炼中氧化渣化学组成 (%)

炉号	MnO	SiO ₂	P ₂ O ₅	S	Cr ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
炉号 1	6.53	23.10	.01	0.02	36.74	7.19	11.20	6.05	3.93	3.57
炉号 2	7.40	18.72	0.015	0.018	31.52	9.05	12.00	9.88	5.61	4.76
平均	6.96	20.9	0.012	0.019	34.13	8.12	11.6	7.96	4.77	4.16

4.3.7 一氧化碳分压

P_{CO} 由下式求得:

在氧氩混合气体, 吹入钢液后, 氧气与钢中 C 等反应, 而 Ar 气仍留在气泡中, 而反应生成的一氧化碳也进入气泡。

假设气泡中有氩气、一氧化碳和残留氧则^[15]:

根据道尔分压定律

$$\begin{aligned}
 P_{CO} &= \frac{dN_{CO}}{dN_{CO} + dN_{Ar} + dN_O^*} \cdot P_{总} \\
 &= \frac{\frac{dN_{CO}}{dt}}{\frac{dN_{CO}}{dt} + \frac{dN_{Ar}}{dt} + \frac{dN_O^*}{dt}} \cdot P_{总} \\
 &= \frac{-\frac{W_M}{100M_C} \cdot \frac{d[C]}{dt} P_{总}}{-\frac{W_M}{100M_C} \cdot \frac{d[C]}{dt} + \frac{Q_{Ar}}{22400} + \frac{Q_O(1-\xi)}{22400}}
 \end{aligned}$$

式中:

P_{CO} -----一氧化碳分压(atm)

- P_g ----- 总压(atm)
 Q_{Ar}-----Ar 气的流量(cm³/s)
 W_m -----钢水重量(g)
 M_C-----碳的分子量 (g/mol)
 Q_O -----吹 O₂量(cm³/s)
 ξ ---氧气利用率.
 Q_{Ar}-----辅助气体(氩气或氮气) 吹入量(Nm³/s)

4.3.8 元素氧化焓

碳的氧化焓:

$$\begin{aligned} 2[C] + \{O_2\} &\rightarrow 2\{CO\} \\ \Delta H_C = (2\Delta H_{CO} - 2\Delta H_{[C]} - \Delta H_O)/2 \\ &= 11852 - (2.367T + 1.708 \times 10^{-4}T^2 + 3.835 \times 10^3/T) \end{aligned}$$

铬的氧化焓:

$$\begin{aligned} 4/3[Cr] + \{O_2\} &= 2/3(Cr_2O_3) \\ \Delta H_{Cr} = 3/4 \cdot (2/3\Delta H_{Cr_2O_3} - 4/3\Delta H_{[Cr]} - \Delta H_O) \\ &= 11519 - (1.148T + 4.4 \times 10^{-5}T^2 + 1.5 \times 10^4/T) \end{aligned}$$

硅的氧化焓:

$$\begin{aligned} [Si] + \{O_2\} &= (SiO_2) \\ \Delta H_{Si} = (2\Delta H_{SiO_2} - \Delta H_{[Si]} - \Delta H_O)/2 \\ &= 30658 - (2.15T + 1.45 \times 10^{-4}T^2) \end{aligned}$$

锰的氧化焓:

$$\begin{aligned} 2[Mn] + \{O_2\} &= 2(MnO) \\ \Delta H_C = (2\Delta H_{MnO} - 2\Delta H_{[Mn]} - \Delta H_O)/2 \\ &= 7581 - (0.845T + 7.38 \times 10^{-5}T^2 + 6.69 \times 10^4/T) \end{aligned}$$

以上相关数据取自《高温工艺物理化学》^[29]自《炼钢常用图表数据手册》^[13].

第五章 计算机模拟计算及实验验证

5.1 模拟计算框图

程序用 Visual Basic 语言编制(见附录 1), 包括 4 个模块: 主模块(MAIN), 输入子模块(INPUT), 计算子模块(CALCULATE) 和输出子模块(OUTPUT)。主模块控制和调用其他子模块完成输入、计算和输出各功能。输入子模块完成初始值的输入, 包括钢中各组元初始值、处理时间和处理温度等; 计算子模块完成计算功能并将计算结果存入数据文件 METAL.DAT; 输出子模块提供计算结果的屏幕输出或打印输出, 模拟计算预报终点碳的电脑屏幕见图 5-1, 程序框图如图 5-2 所示。

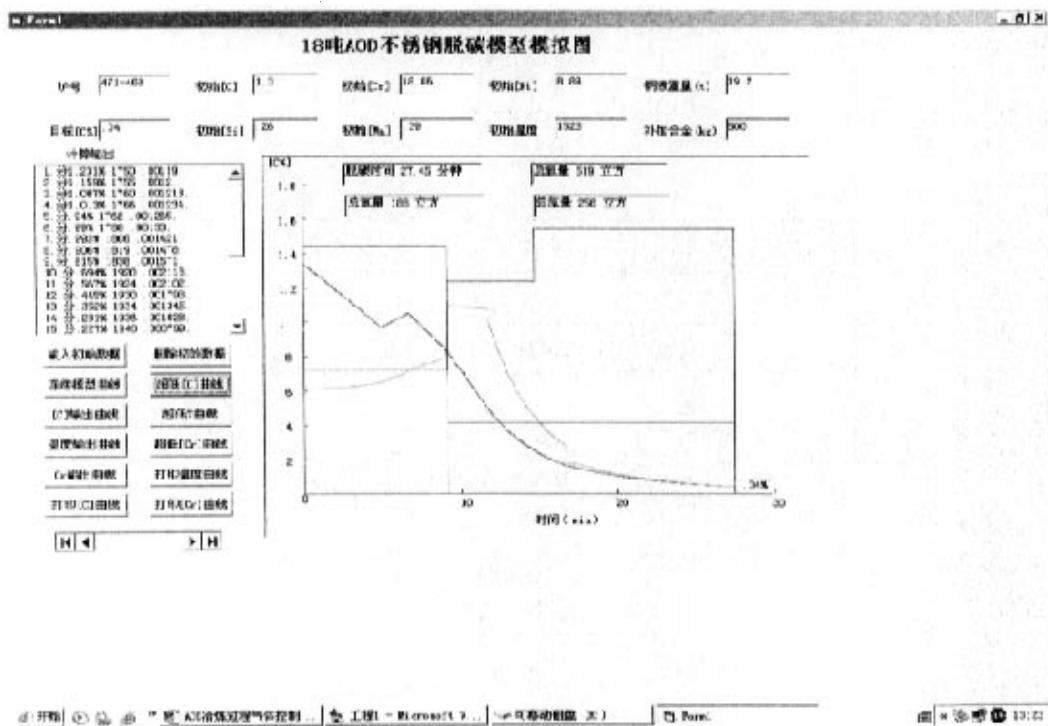


图 5-1 模拟计算预报终点碳的电脑屏幕

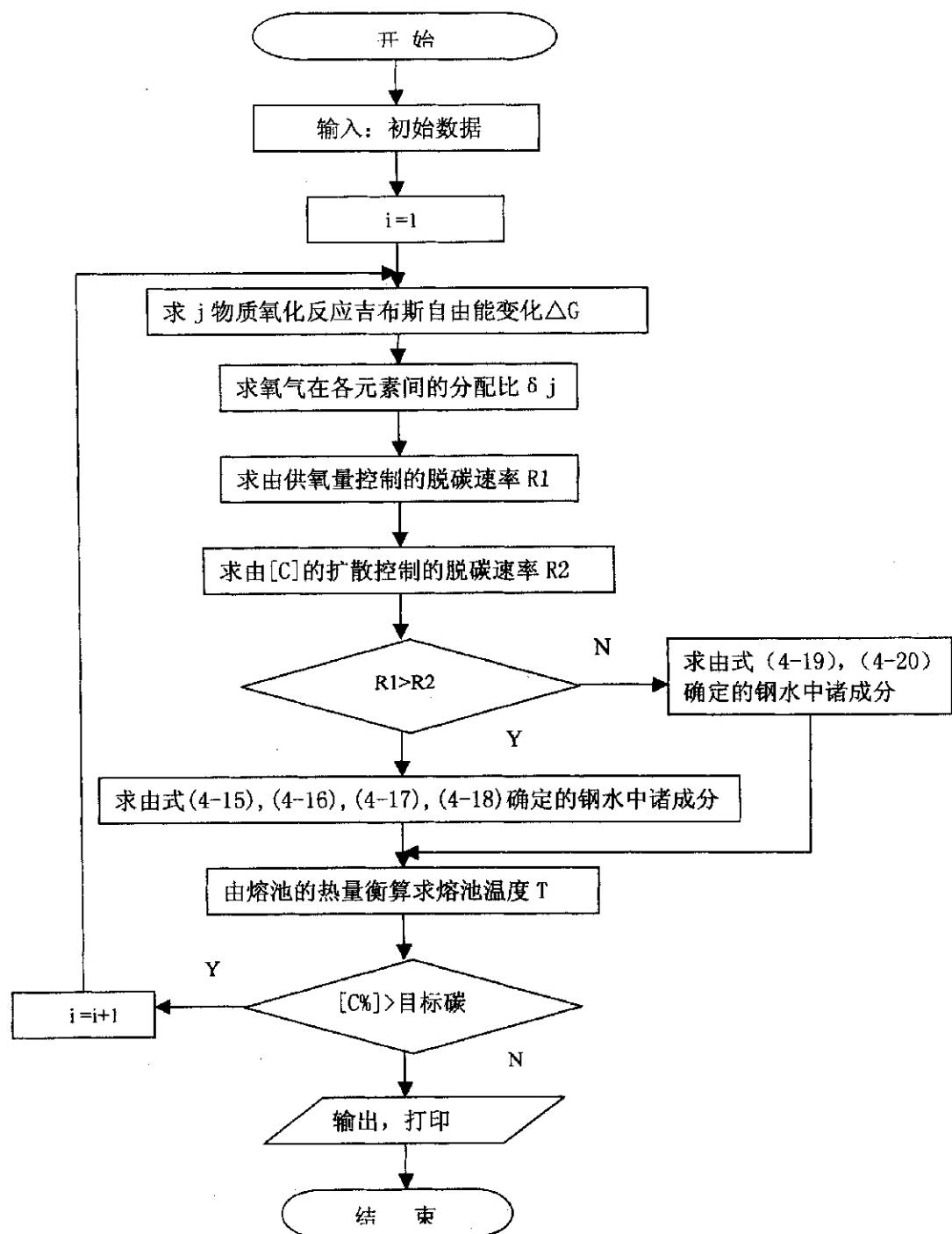


图 5-2 模型计算程序框图

可选择将结果数据列表或绘制成曲线图（见图 5-3 和图 5-4）。

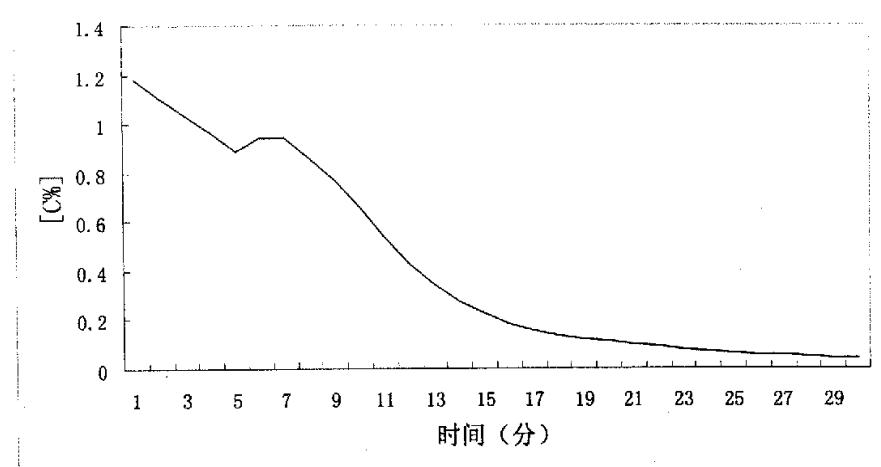


图 5-3 AOD 吹氧过程中[C%]的氧化曲线

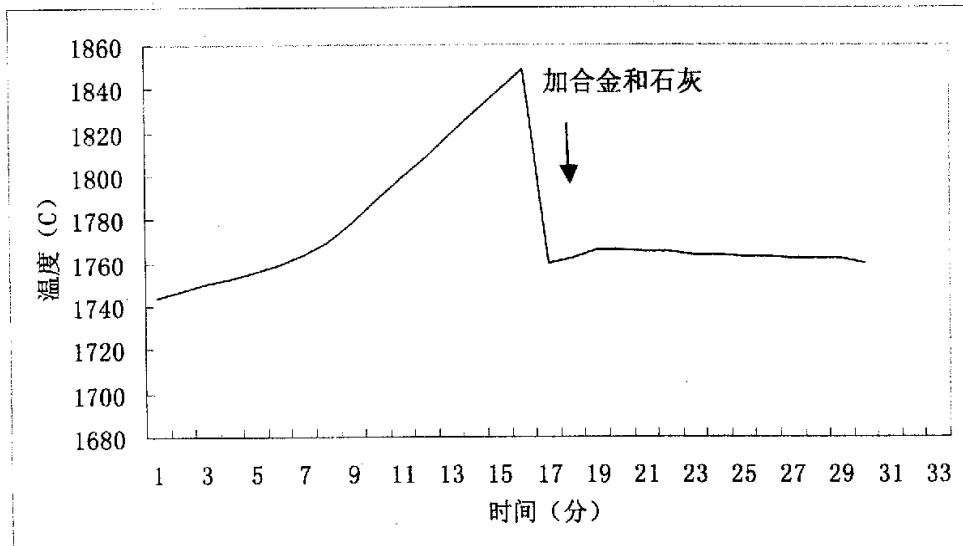


图 5-4 AOD 吹氧过程中温度的变化曲线

应用本模型对 AOD 中不锈钢脱碳动力学过程进行了模拟计算。通过计算得到了相应的动力学数据，并和实验数据进行了比较以此来考查本模型对不锈钢脱碳过程的适用性，同时对影响不锈钢脱碳的因素进行分析和讨论，从而为实际

生产制定合理的工艺路线提供参考和依据。

5. 2 对模型测试所用数据的说明

测试所用数据中出现异常的炉次已经被剔除，不用来测试。由于跟踪记录的时间有限，用来测试的炉数为 58 炉。

5. 3 测试方式说明

由于目前测试的是离线模型，兑钢后炉前得到的原始信息，由跟踪测试的人员手工将这些信息输入离线模型并启动模型进行计算。测试方式是：由炉前按原来经验操作，同步数据输入模型进行计算得到理论终点[C]。再与实际终点[C]进行比较，共采集了 30 炉数据，见表 5-1。

由图 5-5、图 5-6 和表 5-1 可见，用这种方法得到的终点[C]实际值与计算值的命中范围在 (-0.01, +0.01) 可达 100%，命中范围在 (-0.005, +0.005) 可达 86%，命中范围在 (-0.003, +0.003) 可达 63%。

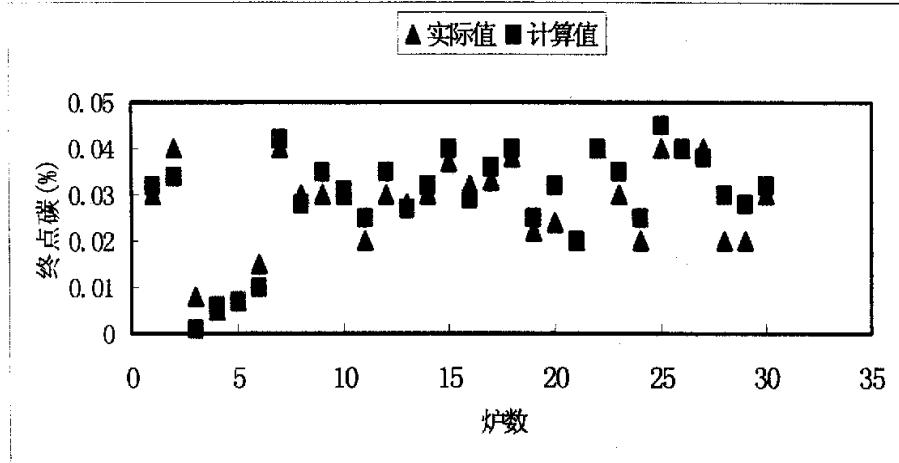


图 5-5 终点[C]实际值与计算值的偏差

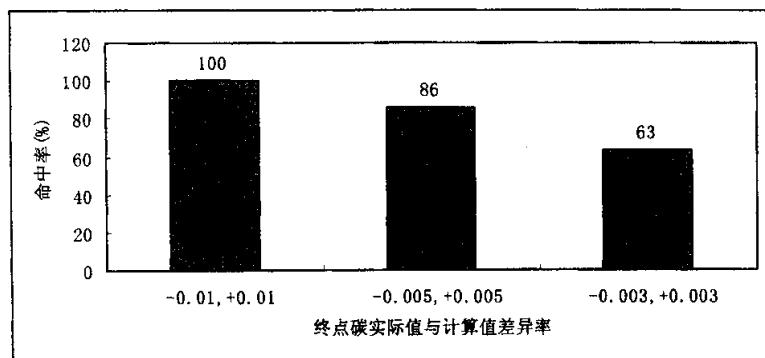


图 5-6 终点[C]实际值与计算值的命中率

表 5-1 终点[C]模型计算结果与实测值的对比表

炉号	钢种	终点[C]实际值	终点[C]计算值	差异
446	304	0.03	0.032	-0.002
447	304	0.04	0.034	0.006
450	316L	0.008	0.001	0.007
451	316L	0.005	0.006	-0.001
452	316L	0.007	0.007	0
455	316L	0.015	0.01	0.005
468	321	0.04	0.042	-0.002
469	321	0.03	0.028	0.002
470	321	0.03	0.035	-0.005
471	321	0.03	0.031	-0.001
472	321	0.02	0.025	-0.005
473	321	0.03	0.035	-0.005
480	304	0.028	0.027	0.001
481	304	0.03	0.032	-0.002
484	304	0.037	0.04	-0.003
527	304	0.032	0.029	0.003
528	304	0.033	0.036	-0.003
529	304	0.038	0.04	-0.002
532	304	0.022	0.025	-0.003
533	304	0.024	0.032	-0.008
534	304	0.02	0.02	0
535	304	0.04	0.04	0
536	304	0.03	0.035	-0.005
537	304	0.02	0.025	-0.005
540	304	0.04	0.045	-0.005
541	304	0.04	0.04	0
542	304	0.04	0.038	0.002
543	304	0.02	0.03	-0.01
544	304	0.02	0.028	-0.008
545	304	0.03	0.032	-0.002

同时，得到的 30 炉终点温度实际值与计算值的比较见表 5-2、图 5-7 和图 5-8。命中范围在 (-50, +50) 可达 100%，命中范围在 (-30, +30) 可达 96%，命中范围在 (-10, +10) 可达 75%。命中范围在 (-5, +5) 可达 50%。

表 5-2 第一种方法终点温度模型计算结果与实测值的对比表

炉号	钢种	终点温度实际值	终点温度计算值	差异
446	304	1701	1750	-49
447	304	1678	1700	-22
450	316L	1675	1680	-5
451	316L	1740	1720	20
452	316L	1749	1739	10
455	316L	1699	1689	10
468	321	1722	1726	-4
469	321	1697	1700	-3
470	321	1685	1687	-2
471	321	1723	1720	3
472	321	1668	1670	-2
473	321	1675	1680	-5
480	304	1751	1730	21
481	304	1682	1700	-18
484	304	1687	1700	-13
527	304	1688	1680	8
528	304	1660	1668	-8
529	304	1720	1715	5
532	304	1720	1724	-4
533	304	1655	1658	-3
534	304	1740	1720	20
535	304	1699	1700	-1
536	304	1720	1726	-6
537	304	1707	1700	7
540	304	1668	1680	-12
541	304	1724	1723	1
542	304	1673	1680	-7
543	304	1708	1705	3
544	304	1706	1703	3
545	304	1676	1680	-4

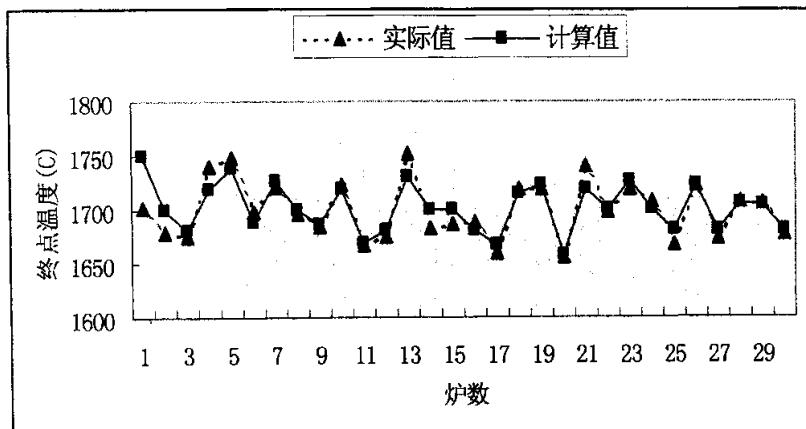


图 5-7 终点温度实际值与计算值的偏差

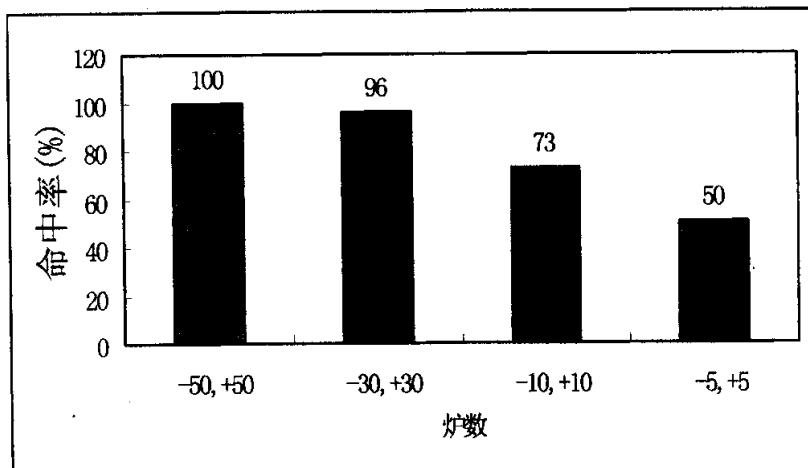


图 5-8 终点温度实际值与计算值的命中率

另外，在吹炼前先设定目标终点[C]（如设定为 0.03%），输入模型进行计算，由模型输出吹炼时间。炉前按照模型计算输出的数据进行吹炼时间的控制，得到实际终点[C]。这就是吹炼预报。把设定的终点[C]与实际终点[C]进行比较。共试验了 28 炉，见表 5-3。

由表 5-3、图 5-9 和图 5-10 可见，通过预报时间得到的终点[C]实际值与计算值的命中范围在 (-0.01, +0.01) 达到 96.4%，命中范围在 (-0.005, +0.005) 可达 64.3%，命中范围在 (-0.003, +0.003) 可达 50%。

表 5-3 第二种方法终点[C]模型计算结果与实测值的对比表

炉号	钢种	终点[C]实际值	终点[C]计算值	差异
485	304	0.037	0.03	0.007
486	304	0.032	0.03	0.002
487	304	0.051	0.03	0.021
488	304	0.034	0.03	0.004
489	304	0.03	0.03	0
492	304	0.03	0.03	0
493	304	0.03	0.03	0
494	304	0.04	0.03	0.01
495	304	0.03	0.03	0
476	321	0.02	0.03	-0.01
477	321	0.04	0.03	0.01
478	321	0.03	0.03	0
479	321	0.03	0.03	0
524	321	0.03	0.03	0
525	321	0.02	0.03	-0.01
526	321	0.03	0.03	0
456	316L	0.017	0.01	0.007
457	316L	0.02	0.01	0.01
460	316L	0.011	0.01	0.001
461	316L	0.011	0.01	0.001
462	316L	0.01	0.01	0
463	316L	0.007	0.01	-0.003
464	316L	0.003	0.01	-0.007
465	316L	0.006	0.01	-0.004
509	316L	0.014	0.01	0.004
510	316L	0.015	0.01	0.005
511	316L	0.01	0.01	0
512	316L	0.018	0.01	0.008

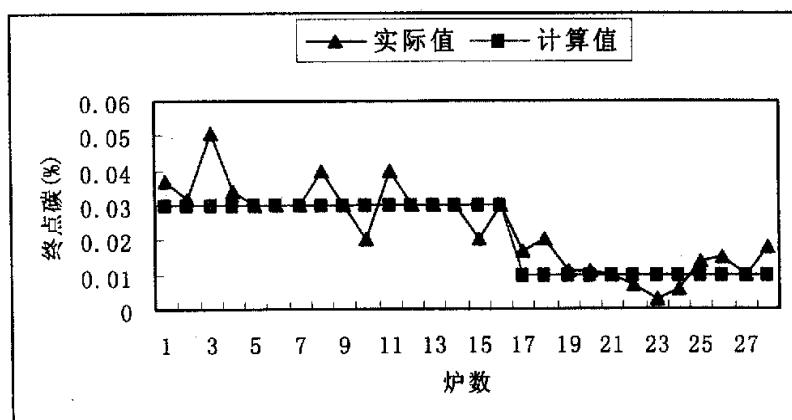


图 5-9 终点[C]实际值与设定值的偏差

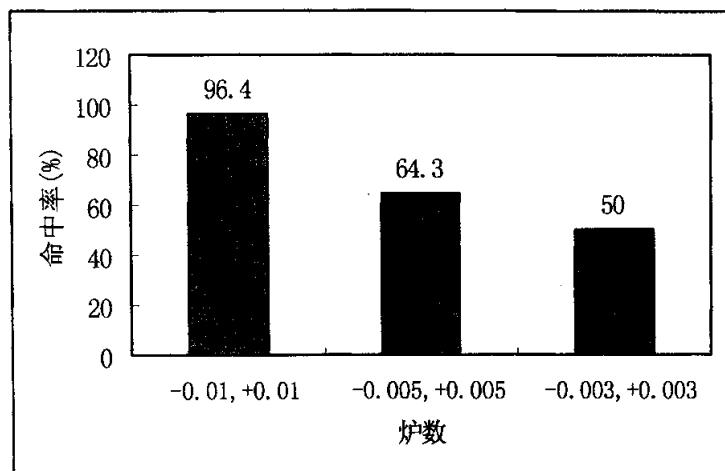


图 5-10 终点[C]的命中率

同时,用预报方法得到的 28 炉终点温度实际值与计算值的比较见图 5-11、图 5-12 和表 5-4。命中范围在 (-50, +50) 可达 100%, 命中范围在 (-30, +30) 可达 96.4%, 命中范围在 (-10, +10) 可达 75%。命中范围在 (-5, +5) 可达 28.6%。

以上二种测试方法对比结果见表 5-5。

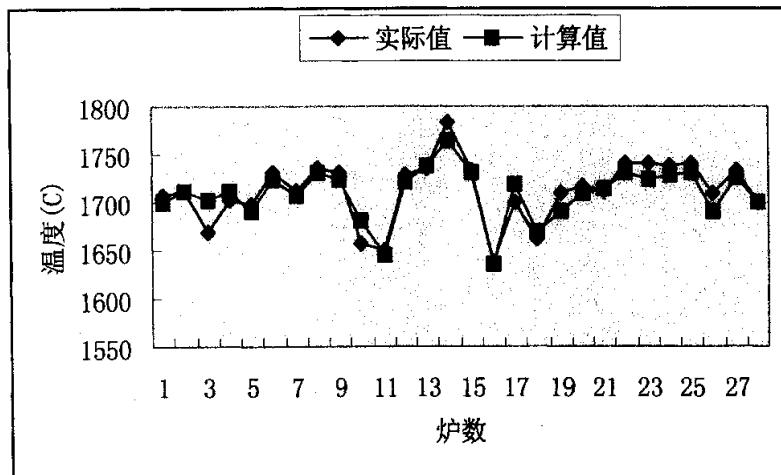


图 5-11 预报方法终点温度实际值与计算值的偏差

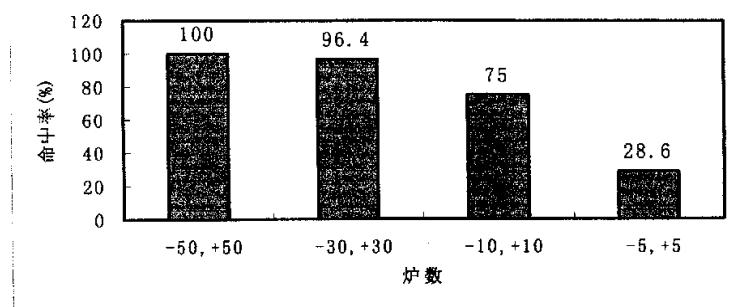


图 5-12 预报终点温度的命中率

表 5-4 预报终点温度与实测值的对比表

炉号	钢种	终点温度实际值	终点温度计算值	差异
485	304	1708	1700	8
486	304	1712	1711	1
487	304	1670	1702	-32
488	304	1702	1711	-9
489	304	1698	1690	8
492	304	1730	1724	6
493	304	1712	1706	6
494	304	1735	1732	3
495	304	1731	1725	6
476	321	1657	1680	-23
477	321	1650	1646	4
478	321	1729	1721	8
479	321	1735	1738	-3
524	321	1783	1765	18
525	321	1733	1732	1
526	321	1639	1635	4
456	316L	1700	1720	-20
457	316L	1661	1668	-7
460	316L	1710	1690	20
461	316L	1716	1710	6
462	316L	1711	1715	-4
463	316L	1740	1732	8
464	316L	1740	1724	16
465	316L	1739	1729	10
509	316L	1740	1732	8
510	316L	1710	1690	20
511	316L	1734	1726	8
512	316L	1700	1701	-1

表 5-5 二种测试方法对比结果

测试方法	碳最大差异(%)	碳命中率 (-.005,+0.005)	温度最大差异(C)	温度命中率 (-10,+10)
方法 1	0.01	86	49	73
方法 2	0.011	64.3	32	75

5. 4 现场测试结论

模型计算结果与实际结果从以上的分析可见，吻合度较好。测试的 58 炉数据结果表明，终点[C]的命中率在 (-0.01, +0.01) 可达到 100%。温度的命中率在 (-50, +50) 可达到 100%。温度的命中率在 (-10, +10) 可达到 75%。同时可见，无论是一般不锈钢 (304) 和超低碳不锈钢 (316L)，模型计算结果与实测值都比较相近，模型对实际生产具有良好的指导意义，完全可以应用在生产实际中。

5. 5 气体用量计算值与实际值的比较

各类气体用量计算值与实际值的偏差见表 5-6 和图 5-13。可看出偏差较小，完全可用本模型计算结果来预测各类气体用量。

表 5-6 气体理论用量与实际用量的比较

炉号	实际氧气 用量 (Nm ³)	理论氧气 用量 (Nm ³)	实际氮气 用量 (Nm ³)	理论氮气 用量 (Nm ³)	实际氩气 用量 (Nm ³)	理论氩气 用量 (Nm ³)
471-0446	634	592	247	224	128	120
-447	587	567	253	215	93	115
481	563	567	240	215	117	115
488	510	506	200	191	128	103
489	593	592	227	224	163	120
492	585	529	213	238	222	128
493	387	395	160	149	93	80
495	480	481	207	182	93	98
528	513	518	187	196	163	105
532	547	543	240	205	93	110
535	502	543	213	205	105	110

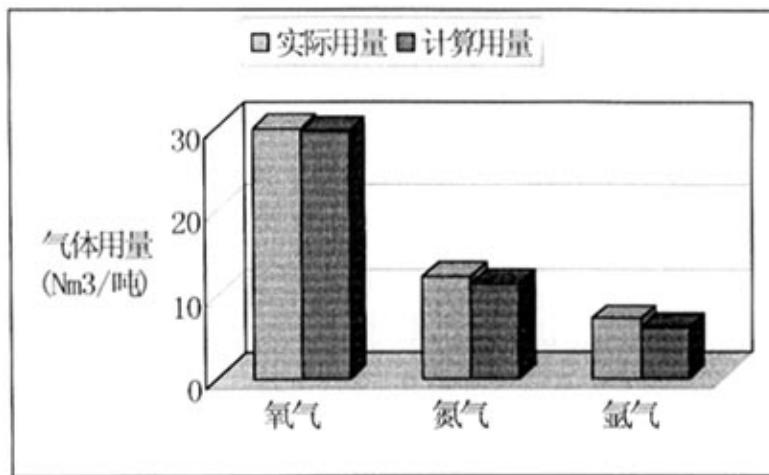


图 5-13 气体用量计算值与实际值的比较

第六章 有关因素对 AOD 操作的影响

6. 1 原始[C]的影响

原始[C]影响脱C时间，原始[C]太高，吹炼总时间会延长，影响生产节奏，相反，原始[C]太低会影响氧的脱[C]效率。

氧的脱[C]效率定义为：^[2]

$$\text{氧的脱[C]效率} = (\text{碳的氧化量} \times 22400) / (\text{实际的供氧量} \times 12 \times 2) \times 100$$

由图（6-1）知，原始[C]不易太低，太低会使脱[C]效率明显降低，一般控制不小于 0.80%。原始[C]太低还会使[Cr]损增加，原始[C]应当控制在略高于[Cr]-[C]选择性氧化转化点的碳含量，[C]一般控制在 1.10-1.50%之间为好。

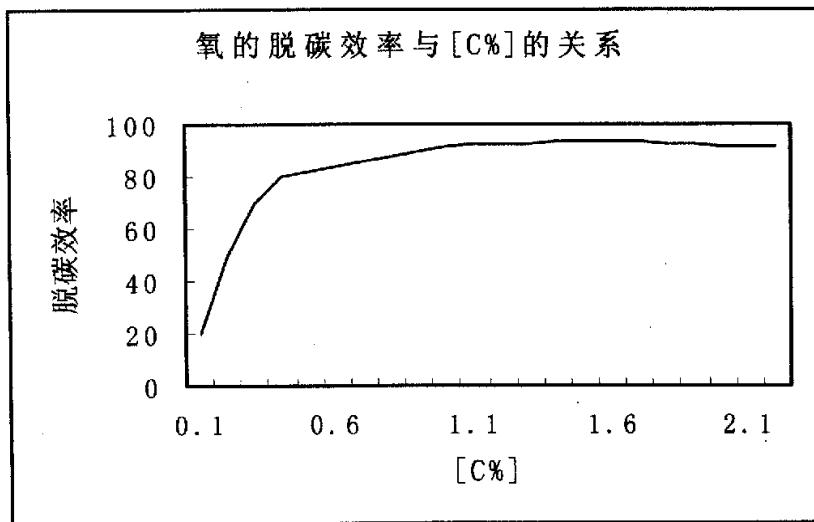


图 6-1 氧的脱[C]效率与[%C]的关系

6. 2 供氧强度对脱[C]速率的影响

图 6-2 是在不同供氧强度下脱[C]速率变化曲线的模型，可见随着供氧强度的增大，中期脱[C]速率明显增大，但是脱[C]速率变化曲线仍保持台阶型特征。

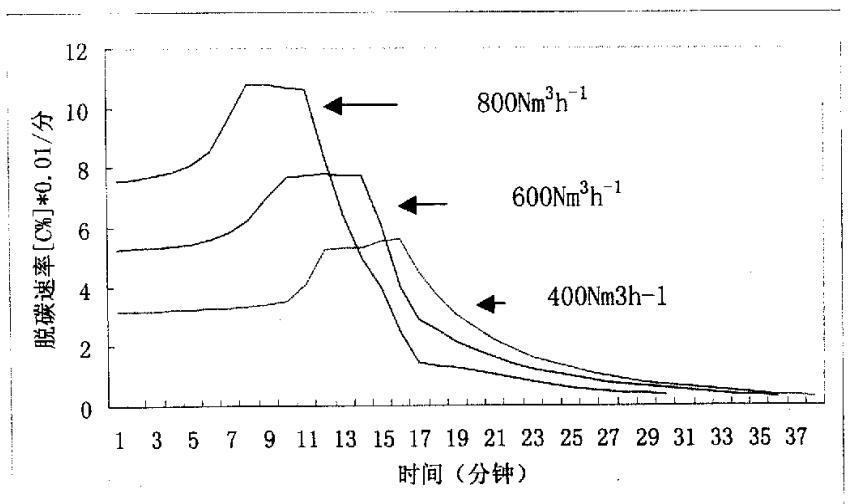


图 6-2 供氧强度对脱[C]速率的影响

供氧压力在较大程度上影响着 AOD 炉的脱碳速率，见图 6-3。供氧压力一般控制在 $1.8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 左右，当供氧压力每降低 $0.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ ，则脱碳时间将会延长 6-10 分钟。

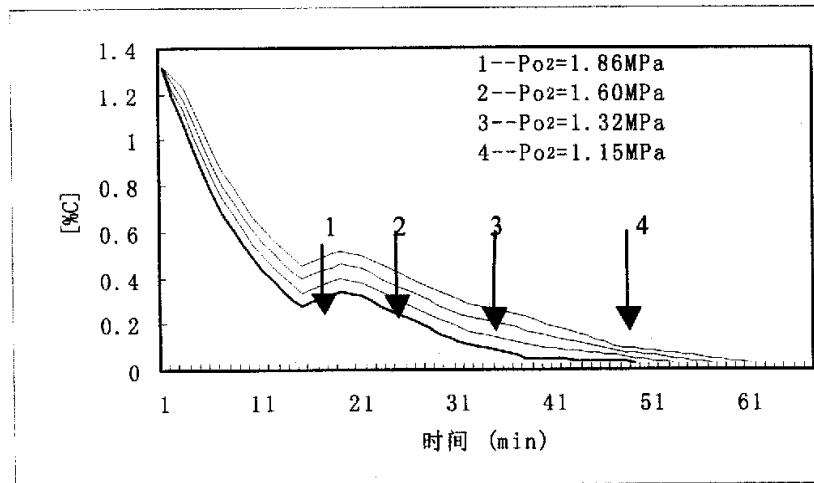


图 6-3 不同氧气压力下的脱碳曲线

6. 3 [Mn] [Si]的影响

由于竞争氧化的原因，刚开始吹炼时 [Mn]、[Si]二元素的浓度下降很快，[Si]的氧化速率很高，见图 6-4，同时使钢液温度升的也很快。钢液温度太高会严重侵蚀炉衬，为了提高炉龄，初始[Mn]、[Si]不易太高，一般控制在 0.30—0.50%之间为好。

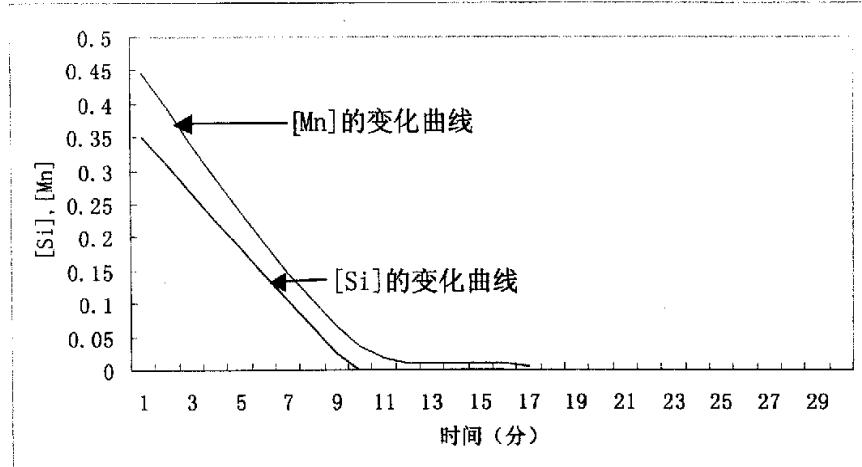


图 6-4 [Si], [Mn] 的氧化

6. 4 [Cr]的影响

为了降低原材料的费用，降低炼钢成本，一般都希望充分利用不锈钢的返料和含碳量较高的 Cr-Fe。这样势必会造成原始[Cr]较高，给冶炼带来一定的困难。这就是高铬钢液的降碳问题，在冶炼中希望尽可能降低钢中的碳，而[Cr]的氧化损失却要求保持在最低的水平，AOD 能解决这个问题。

在 AOD 操作中原始[Cr]与原始[C]有一个匹配问题见图 6-5。

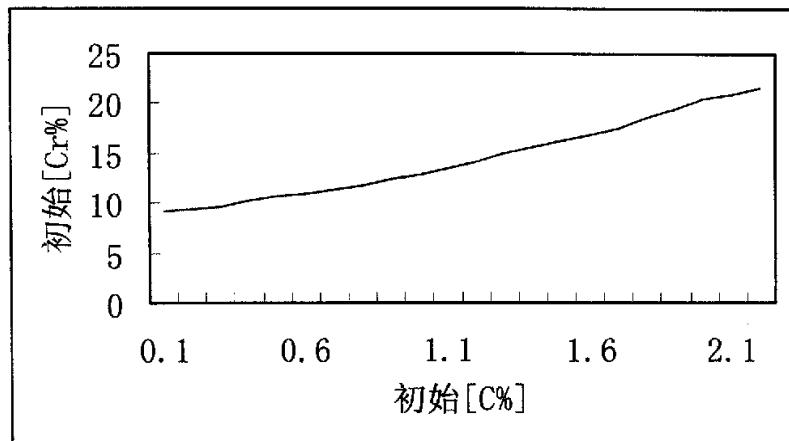


图 6-5 原始[Cr]与原始[C]的匹配

由图 6-5 可见，原始[Cr]适当提高时相应的原始[C]也应该提高，否则会影响冶炼效果，[Cr]损增加。另一方面，当原始[Cr]高，会造成吹炼中 CrFe 作为冷却剂加料的量减少。温度控制就会要用其它废钢切头来调整，造成总钢水量多，对后期操作带来困难，所以也是不希望的。实际操作中 CrFe 作为冷却剂又作为调整成分，一般控制在 20-50 kg/t.

[Cr] 烧损速度由图 6-6 可知，[Cr] 氧化速率前期比后期要大得多，这主要是前期 N₂(Ar) 气较小。后期增加吹 Ar 量，[Cr] 氧化速率几乎为零。冶炼“304”不锈钢，[Cr] 烧损大约在百分之十五左右，与模型计算值相近。

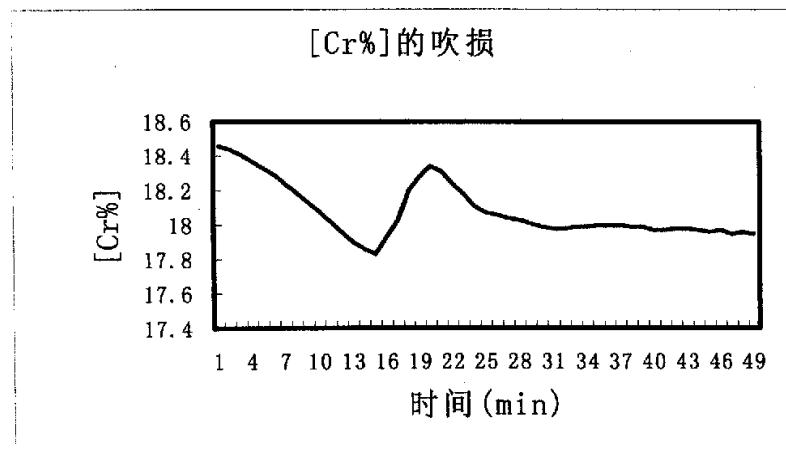


图 6-6 [Cr]的氧化

6. 5 熔池温度对炉龄的影响

AOD 脱[C]过程中，熔池温度变化对炉龄的影响很大，熔池温度越高对炉衬的侵蚀越严重，炉龄越低（见图 6-7）。根据资料^[30]介绍，在 AOD 炉衬中镁钙砖和镁铬砖在 1700—1750℃温度范围内的涡流冲蚀作用下各项性能还是相当稳定。所以，在 AOD 实际操作中最高温度不应超过 1750℃。

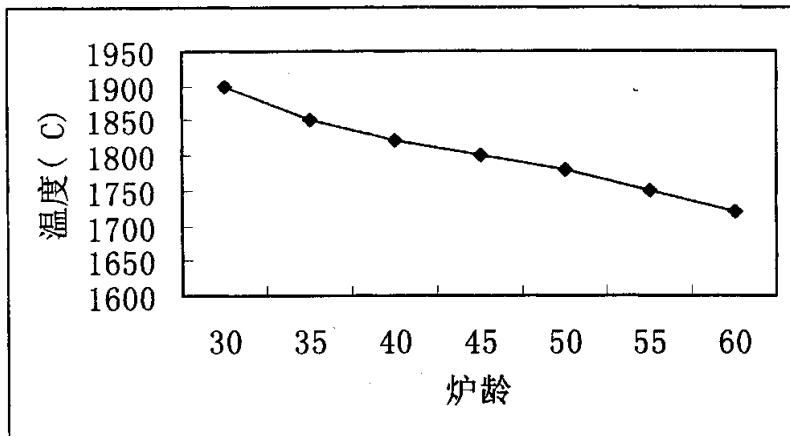


图 6-7 熔池温度对炉龄的影响

6. 6 气体对脱碳过程的影响

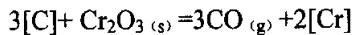
AOD 工艺本质上就是研究惰性气体与 O₂供气强度和供气比例来控制脱碳，达到最佳脱碳效果。氧氩比是一个很重要的参数，影响着 AOD 炉的脱碳速率和铬的氧化及溶池的升温速率，为了尽可能减少铬的氧化和控制温度，在吹炼过程中将根据溶池的含碳量和温度来调节该参数。

本模型建立的基础是在不连续气体控制上，是阶段性的，符合目前 20 吨以下 AOD 炉操作实际，一般情况下“304”不锈钢分二期吹炼，“超低 C”不锈钢分三期吹炼，在第一阶段里，一般用氮气作为惰性气体 O₂:N₂=800:200，在这个比例下，将溶池中的含碳量降到 0.2%左右，这时温度大约在 1700 °C 左右，第二阶段用 Ar 气作为惰性气体，O₂:Ar=400:700 将碳含量降到 0.04 左右，此时温度大约在 1720°C 左右，如果冶炼“超低 C”则进入第三期，O₂:Ar=200:700，将含碳量降到 0.02 以下，此时温度大约在 1700°C 左右。为了保护炉体耐火材料，钢液温度不宜超过 1750°C，可以补加冷却料和控制 O₂:Ar 比来控制温度。氮含量要求<50ppm 的钢种可以全程使用 Ar 气来保证质量要求，相反的如无氮含量

的质量要求，则可以用全程氮气代替氩气，降低生产成本。

氩氧比的确定是控制 AOD 操作的基础，本论文在分级氧氩比模型上提出一个控制的思路和方法。

假定吹炼过程中，为保持一定的温度同时[Cr]又不会被烧损，与某一含碳量对应地存在着某一 CO 的分压 P_{CO} ，在此值下，优先氧化的是钢中的碳，而温度又不会超过某一定值，此时就称 P_{CO} 分压为临界 $P_{CO_{临界}}$ 值。



$$\lg \frac{a_{[Cr]}^{2/3}}{a_{[C]}} = -\left(\frac{40990}{T} + 25.83\right)^{1/3} - \lg P_{CO}$$

假定[Cr]在吹炼过程中不变，可整理得到： $P_{CO_{临界}}$ ：

$$\lg P_{CO_{临界}} = 0.22[C\%] + \lg[C\%] - 12947.54/T + 7.25 \quad \dots \quad (6-1)$$

在 AOD 吹炼过程中利用惰性气体的稀释作用来使碳氧反应生成的 CO 分压低于临界的 $P_{CO_{临界}}$ ，即可。

假设吹入的氧气只与碳起反应，并且能全部作用完。并假设气泡中只有氩气和一氧化碳，则 P_{CO} 与氩氧比的关系由以下各式给出。

$$\frac{P_{CO}}{P_{Ar}} = \frac{dN_{CO}}{dN_{Ar}}$$

$$P_{CO} = (O_2:Ar) / \{ 0.624 + (O_2:Ar) \}$$

得到： $P_{CO} < P_{CO_{临界}}$

由此得到 P_{CO} 临界时的 $(O_2:Ar)$ 比或称理论 $(O_2:Ar)$ 理论比

理论 $(O_2:Ar)$ 比为：

$$(O_2:Ar)_{理论} = 0.624 * P_{CO_{临界}} / (1 - P_{CO_{临界}})$$

$P_{CO_{临界}}$ 由式 6-1 给出

$$(O_2:Ar) \leq 0.624 * e^{0.22[C\%] + \lg[C\%] - 12947.54/T + 7.25} / (1 - e^{0.22[C\%] + \lg[C\%] - 12947.54/T + 7.25})$$

只有 $(O_2:Ar)$ 符合上式 [Cr] 损才能最低。

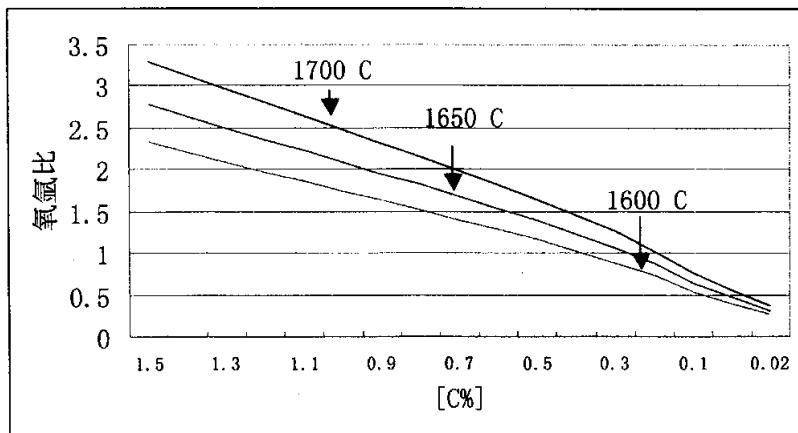


图 6-7 氧氩比与温度和[C]的关系

由图 6-7 可知冶炼初期氧氩比可控制高一点，大约 3:1 以下，后期应该不断降低，控制在 1:4 以下。

由于(O₂:Ar)比的变化，会造成对熔池内各组分的影响，根据实际操作，18 吨 AOD 炉的实际供气制度如表 6-2:

表 6-2 实际供气制度

钢种	吹炼期	时间(min)	氧气 Nm ³ /m	氩气 Nm ³ /n	氮气 Nm ³ /n
304	一期	25-40	800		400
	二期	5-15	600	600	
超低碳	一期	20-30	800		400
	二期	10-15	500	700	
	三期	0-10	240	920	

根据以上对(O₂:Ar)比分析可知，调正(O₂:Ar)比对优化 AOD 是有利的，为了优化冶炼，可采用预报模式，根据各元素及熔池温度的变化，通过计算机的计算，预报(O₂:Ar)比的变化，再调整(O₂:Ar)比，使之控制好终点碳和熔池温度，减少气体消耗和铬的烧损。

6. 7 添加合金料及冷却剂对脱碳的影响

由于 AOD 吹炼过程中，前期各元素的氧化使熔池温度升得较快，严重影响

响炉衬寿命，当熔池温度大于 1750 °C 炉衬的蚀损程度成倍增加，所以实际操作中吹 O₂ 脱[C]10 分钟左右，必须加入合金料或冷却剂调节温度，同时加入高碳铬铁适当增加碳的浓度，有利于减少铬铁的烧损。

第七章 结论

- 1) 通过本模型在 AOD 冶炼中，可预报要达到目标终点[C]所需要的脱[C]时间及终点[C]时的终点温度。终点[C]的命中范围在 (-0.01, +0.01) 可达 100%。终点温度命中范围在 (-50, +50) 可达 100%，命中范围在 (-30, +30) 可达 96%。
- 2) 本模型计算得到的终点[C]与实际终点[C]，两者极为接近，可作为一般小 AOD 冶炼中预报终点[C]与脱[C]时间关系之用，可提高终点[C]命中率。
- 3) 可随时调整模型相关系数，修整不同工况（如炉令，氧压等）下的脱[C]效果，使之得到更佳的终点[C]命中率。
- 4) 为小 AOD 进一步的改造，为基础级自动化进行脱[C]全过程的自动控制 ($O_2:Ar$) 比，使之获得最佳脱[C]效果，最优化的气体消耗，最长的炉衬寿命，打好了基本理论基础。
- 5) 原始[C] 一般控制不小于 0.80%。原始[C]太低还会使[Cr]损增加，原始[C]应当控制在略高于 [Cr]-[C] 选择性氧化转化点的碳含量，[C]一般控制在 1.10-1.50% 之间为好。

参考文献

- [1] 陈家祥主编. 钢铁冶金学(炼钢部分) [M]. 冶金工业出版社, 1999. 5
- [2] 曲英主编. 炼钢学原理 [M]. 冶金工业出版社, 1989. 12
- [3] 马廷温主编. 电炉炼钢学 [M]. 冶金工业出版社, 1990. 5
- [4] 魏寿昆. 冶金过程热力学 [M]. 上海科技出版社, 1989. 10
- [5] V. Grigoryaa. Theoretical Principles of Electric Steelmaking [M]. Mescow, 1983
- [6] 韩其勇等. 冶金过程动力学 [M]. 冶金工业出版社, 1983. 11
- [7] 鞍岩等著, 蔡志鹏译. 冶金反应工程学 [M]. 科学出版, 1981. 5
- [8] R. J. Fruehaa 著, 李景等译. 盛钢桶冶金学 [M]. 冶金工业出版社, 1988. 10
- [9] 第三届中日钢铁学术会议 1985 [J]
- [10] 铁与钢, 1991, 77 (3) [J]
- [11] 商宝禄, 季玮. 冶金过程原理 [M]. 西北工业大学出版社, 1986. 9
- [12] 杜荷聪等编. 计量单位及其换算 [M]. 中国计量出版社, 1982. 12
- [13] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册 [M]. 冶金工业出版社, 1984. 11
- [14] 刘述临. 冶金单元设计概论 [M]. 中国金属学会, 1988. 12
- [15] J. Szekely, 彭一川等译. 冶金中流体流动现象 [M]. 冶金工业出版社, 1985. 8
- [16] 佟庆理. 两相流动理论基础 [M]. 冶金工业出版社, 1982. 12
- [17] H. M. 邱依科等著, 苗华鲜等译. 提高钢质量的炉外方法 [J]. 攀枝花钢铁研究所, 1983. 7
- [18] 徐匡迪. 不锈钢精炼 [M]. 上海科技出版社, 1985. 12
- [19] 梅炽编著. 冶金传递过程原理 [M]. 中国工业大学出版社, 1987. 9
- [20] H. Y. Sohn 等著, 郑蒂基译. 提取冶金速率过程 [M]. 冶金工业出版社, 1984. 12
- [21] Inoue R, Usui t, Yamada K. Dephosphurization of chromium containing iron with various oxide-halide fluxes [M]. Trans., 1988, 28: 192

- [22] Suito N. et al. Dephosphueization of crude stainless steel [J]. Trans., 1987: 992
- [23] 格里古良 BA 著, 曲英等译. 炼钢过程的物理化学计算 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993
- [24] 蒋国昌. 纯净钢及二次精炼 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996: 245
- [25] 盛利贞. 日本金属学会会志, 1984:354
- [26] Mohanty AK, et al. Metall. Trans., 1975, 6B: 159
- [27] 陈襄武. 钢铁冶金物理化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 134, 206
- [28] Ohguchi S, Robertson D G C. Kinetics model refining by submerged powder injection: part 1: transitory and parameter contact reaction [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1984, 11 (5): 202
- [29] ET 特克道根著, 魏季和, 博杰译, 高温工艺物理化学, 冶金工业出版社, 1988
- [30] 高振昕, 平增福等著, 耐火材料显微结构, 冶金工业出版社, 2002 年
- [31] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题 [M]. 冶金工业出版社, 1983
- [32] 中村. 和鋼, 61 (4) S137 (1975)
- [33] 陆世英等. 不锈钢 [M]. 原子能出版社, 1995
- [34] 魏振宇, 吴玖主编. 双相不锈钢论文集 [J]. 钢铁研究总院, 1992
- [35] 徐曾启. 炉外精练 [M]. 冶金工业出版社, 1994

附录 1

计算机程序：

```
Dim c(3600) As Single
Dim mn(3600) As Single
Dim si(3600) As Single
Dim cr(3600) As Single
Dim ni(3600) As Single

Dim crcr(3600) As Single
Dim t(3600) As Single
Dim dctxx(3600) As Single
Dim dctxx(3600) As Single

Dim dt As Single
Dim wm As Single
Dim ws As Single
Dim qo As Single
Dim qn As Single
Dim pz As Single
Dim gcrfe As Single
Dim gcao As Single
Dim mc As Single
Dim mcr As Single

Dim mmn As Single
Dim msi As Single
Dim ddc As Single
Dim ddcr As Single
Dim ddmn As Single
Dim ddsi As Single
Dim ddo As Single
Dim kc As Single
Dim kcr As Single
Dim kmn As Single
Dim ksi As Single
Dim kkc As Single
Dim kkcr As Single
Dim kkmn As Single
Dim kksi As Single
Dim mk As Single
Dim bc As Single
Dim bcr As Single
Dim bmn As Single
Dim bsi As Single
```

Dim mbc As Single
Dim mbcr As Single
Dim mbmn As Single
Dim mbsi As Single
Dim mbfe As Single
Dim fc As Single
Dim fmn As Single
Dim fcr As Single
Dim fsi As Single
Dim fo As Single
Dim aa As Single
Dim ii As Single
Dim dhco As Single
Dim dhero As Single
Dim dhmno As Single
Dim dhsio As Single
Dim ti As Single
Dim coi As Single
Dim kcro As Single
Dim kcrsi As Single
Dim kmnc As Single
Dim kmnsi As Single
Dim jj As Single
Dim alf As Single
 Dim bt As Single
 Dim ss As Single
 Dim dsit As Single
 Dim dmnt As Single
 Dim dcrt As Single
 Dim pco As Single
 Dim ccri As Single
 Dim jccr As Single
 Dim cmni As Single
 Dim po As Single

Dim gx As Single

Dim qi As Single
Dim qsm As Single
Dim qr As Single
Dim qg As Single
Dim qm As Single
Dim qsc As Single

```
Private Sub Command1_Click()
Text1.SetFocus

Data1.Recordset.MoveLast

Data1.Recordset.AddNew

Data1.Recordset.Update

c(1) = Val(Text1)
cr(1) = Val(Text2)
ni(1) = Val(Text3)
mn(1) = Val(Text4)
si(1) = Val(Text5)
t(1) = Val(Text6)
wm = Val(Text7)
gcrfe = Val(Text10)
End Sub
```

```
Private Sub Command1_Click()
List1.Clear
```

```
With Picture1
```

```
.ScaleMode = 6
oldx = 10
```

```
oldy = 95
heig = Picture1.ScaleHeight
widt = Picture1.ScaleWidth
```

```
.Cls
```

```
Picture1.Line (oldx, oldy)-(oldx, oldy - .ScaleHeight + 20), RGB(255, 0, 0)
```

```
Picture1.Line (oldx, oldy)-(oldx + .ScaleWidth - 20, oldy), RGB(255, 0, 0)
```

End With

```
c(1) = Val(Text1)
c(1) = Val(Text1)
cr(1) = Val(Text2)
ni(1) = Val(Text3)
mn(1) = Val(Text4)
si(1) = Val(Text5)
t(1) = Val(Text6)
wm = Val(Text7)
gcrfe = Val(Text10) * 1000
dt = 1
crcr(0) = cr(1)
c(0) = c(1)
cr(0) = cr(1)
mn(0) = mn(1)
si(0) = si(1)
t(0) = t(1)
t(1) = 273 + t(1)
```

```
ws = wm * 1000000 * 0.02
wm = wm * 1000000 - ws
```

```
qo = 800 * 1000000 / 3600
qn = 400 * 1000000 / 3600
pz = 1
```

```
gcao = 300000
```

```
mc = 12
mcr = 52
mmn = 55
msi = 28
db = Exp(1 / 3 * Log(6 * 18.65 * 100 * 2.4 / 981 / 7.8))
```

```

po = 0.001
gx = 0.9

pco = 1

ii = 1
xii = 1
5      If c(ii) <= 0 Then c(ii) = c(ii - 1)

If cr(ii) <= 0 Then cr(ii) = cr(ii - 1)
If si(ii) <= 0 Then si(ii) = si(ii - 1)
If mn(ii) <= 0 Then mn(ii) = mn(ii - 1)
ddc = (1.2 + 1.7 * c(ii)) * 0.001
ddcr = 0.00304

kc = 2 * Sqr(Sqr(981 * db * 0.5) / 100 / 3.14 * ddc)

kcr = 2 * Sqr(Sqr(981 * db * 0.5) / 100 / 3.14 * ddcr)
fc = Exp(Log(10) * 1873 / t(ii) * (0.14 * c(ii) - 0.024 * cr(ii) + 0.016 * 0.1 - 0.012 *
mn(ii) - 0.008 * 0.1 + 0.012 * 8 - 0.34 * 0.01 + 0.051 * 0.03 + 0.046 * 0.04 + 0.08 * si(ii) - 0.005
* 0.05))
fmn = Exp(Log(10) * 1873 / t(ii) * (-0.1 * c(ii) - 0.083 * 0.01 - 0.004 * 0.03 + 0.048 * 0.04))
fsi = Exp(Log(10) * 1873 / t(ii) * (0.018 * c(ii) - 0.0003 * 17))
fcr = Exp(Log(10) * 1873 / t(ii) * (-0.092 * c(ii) - 0.0129 * cr(ii) + 0.0018 * 0.1 - 0.0093 * 8 -
0.22 * 0.01 + 0.144 * 0.03 - 0.064 * 0.04 + 0.023 * si(ii)))
fo = Exp(Log(10) * 1873 / t(ii) * (-0.65 * c(ii) - 0.064 * cr(ii) - 0.01 * 0.1 - 0.026 * mn(ii) -
0.005 * 0.1 + 0.006 * 8 - 0.2 * 0.01 + 0.07 * 0.03 + 1 * 0.04 - 0.16 * si(ii)))
aa = 6 * 100 * (qo + qn) / db / (1.02 * Sqr(981 * db * 0.5))

mbc = (-275280 - 84.12 * t(ii) + 8.314 * t(ii) * Log(pco * pco / (fc * fc * c(ii) * c(ii) * po)))
mbcr = -774693 + 233.4 * t(ii) + 8.314 * t(ii) * Log(1 / (po * Exp(4 / 3 * Log(cr(ii) * fcr))))
mbsi = -747260 + 177.8 * t(ii) + 8.314 * t(ii) * Log(1 / (po * si(ii) * fsi))
mbmn = -806475 + 240.54 * t(ii) + 8.314 * t(ii) * Log(1 / (po * mn(ii) * fmn * mn(ii) * fmn))
mbfe = -476140 + 98.9 * t(ii) + 8.314 * t(ii) * Log(1 / po)
If mbc > 0 Then mbc = 0
If mbcr > 0 Then mbcr = 0
If mbsi > 0 Then mbsi = 0
If mbmn > 0 Then mbmn = 0
If mbfe > 0 Then mbfe = 0
mk = mbc + mbcr + mbsi + mbmn

```

bcr = mbcr / mk

bc = mbc / mk

bsi = mbsi / mk

bm_n = mbm_n / mk

dhco = -119302 + 28.41 * t(ii) + 0.00205 * t(ii) * t(ii) + 46000 / t(ii)

dhero = -1170912 + 119.37 * t(ii) + 0.0046 * t(ii) * t(ii) + 1565000 / t(ii)

dhmno = -400376 + 46.48 * t(ii) + 0.00406 * t(ii) * t(ii) + 368000 / t(ii)

dhsio = -893931 + 58.91 * t(ii) + 0.00502 * t(ii) * t(ii)

ti = t(ii) + (dhco * (c(ii) - c(ii - 1)) / 12 + dhsio * (si(ii) - si(ii - 1)) / 2 / 28 + dhmno * (mn(ii) - mn(ii - 1)) / 55 + dhero * (cr(ii) - cr(ii - 1))) * wm / 100 / (1.1966 * ws + 0.84 * wm)

kcro = Exp(-31132 / ti + 19.518)

kcrsi = Exp(864.4 / ti + 1.7837)

kmnc = Exp(-26714 / ti + 17.7)

kmnsi = Exp(10565 / ti - 0.065)

100 If ii > 1000 Then GoTo 1100

GoTo 2600

1100 'If ii > 1500 Then GoTo 2100

qo = 400 * 1000000 / 3600

'GoTo 2600

2100 'qo = 200 * 1000000 / 3600

2600 ss = 2 * qo * gx / 22400

If ii < 700 Then GoTo 2650

GoTo 2660

2650 xxx = 100 * mc * bc * ss / wm * 3

dctxx(ii) = xxx

dct = dctxx(ii)

GoTo 2700

2660 crcri(ii) = cr(ii) - 2 * kc * 52 / (3 * kcr * 12) * (c(ii) - pco * Exp(Log(fcr) * (2 / 3)) * Exp(Log(cr(ii - 1)) * (2 / 3)) / kcro / fc)

ccri = pco * Exp(Log(fcr) * (2 / 3)) * Exp(Log(crcri(ii)) * (2 / 3)) / kcro / fc

dctxx(ii) = 7.8 * kc / 1200 * (c(ii) - ccri) * 25
dct = dctxx(ii)

2700 dsit = 100 * msi / wm * bsi * ss
dmnt = 100 * mmn / wm * bmn * ss
dcrt = 100 * mcr / wm * bcr * ss
2800 pco = pz / (1 + (qn + qo * (1 - gx)) / 22400 / wm * 1200 / dct)

If ii < 300 Or ii > 400 Then GoTo 400
c(ii) = c(ii) + gcrfe * 0.08 / wm
cr(ii) = cr(ii) + gcrfe * 0.62 / wm

400 cr(ii + 1) = cr(ii) - dcrt * dt

si(ii + 1) = si(ii) - dsit * dt
mn(ii + 1) = mn(ii) - dmnt * dt
c(ii + 1) = c(ii) - dct * dt

qi = (1.1966 * ws + 0.84 * wm) * (ti - t(ii)) * 29
qsm = (dsit * 0.02564 + dmnt * 0.01545 + dcrt * 0.0175) * wm * t(ii)
qsr = 1.633 * 3.14 * 100 * 100 * 1 * (t(ii) / 100 * t(ii) / 100 * t(ii) / 100 * t(ii) / 100 - 1473 /
100 * 1473 / 100 * 1473 / 100 * 1473 / 100)
If ii > 300 Then GoTo 1000

GoTo 2500

1000 If ii > 600 Then GoTo 2000

1800 qn = 400 * 1000000 / 3600
GoTo 2500
2000 qn = 720 * 0.9 * 1000000 / 3600
2500 qg = 5.425 * qn + 51.05 * wm * Abs(dct)
qm = 27.95 * 150 * (t(ii) - 298)
If ii < 300 Then GoTo 3100

t(ii) = t(ii) - (402 * gcrfe + 40.38 * gcao) / (1.1966 * ws + 0.84 * wm)
 3100 t(ii + 1) = t(ii) + (qi - qsm - qsr - qg - qm) * dt / (1.1966 * ws + 0.84 * wm)

tt = t(ii + 1) - 273

If ii < 60 * xii Then GoTo 4000

List1.AddItem Format(" ") & Format(ii / 60, "#.##") & Format(" 分 ") &
 Format(c(ii), "#.###") & Format("%") & Format(" ") & Format(dctxx(ii) * 60, "#.#####")
 dctxx(ii) = Abs(dctxx(ii) * 100 * 60 * 100) / 100

sssss = sssss + Str(t(ii))

xii = xii + 1
 4000 ii = ii + 1
 If c(ii) > Val(Text14) Then GoTo 5
 'If ii < 2000 Then GoTo 5

Clipboard.Clear
 Clipboard.SetText sssss

sii = ii

oii = 800 * ii / 3600 / 2 + 400 * ii / 3600 / 3 + 200 * ii / 3600 / 6
 nii = 400 * ii / 3600 / 2
 aii = 800 * ii / 3600 * 0.2 + 400 * ii / 3600 * 0.3
 Text8.Text = " "
 Text9.Text = " "
 Text11.Text = " "
 Text12.Text = " "

```
Text9.SelText = Format("脱碳时间 ") & Format(sii / 60, "###.##") & Format(" 分钟")
Text8.SelText = Format("总氧量 ") & Format(oi * 2, "###") & Format(" 立方")
Text11.SelText = Format("总氮量 ") & Format(nii * 2, "###") & Format(" 立方")
Text12.SelText = Format("总氩量 ") & Format(aii * 2, "####") & Format(" 立方")
hei = oldy - Picture1.ScaleHeight + 20
wid = oldx + Picture1.ScaleWidth - 40

Picture1.CurrentX = oldx - 2

Picture1.CurrentY = oldy
Picture1.Print 0

For xt = 1 To 5
    If xt <> 0 Then
        st = xt * wid / sii * 600
        Picture1.CurrentX = oldx + st - 2
        Picture1.CurrentY = oldy + 1

        Picture1.Print xt * 10
        Picture1.Line (oldx + st, oldy - 1)-(oldx + st, oldy), RGB(255, 0, 0)
    End If
    Next xt

For yt = 1 To 9
    If yt <> 0 Then
        st = yt * (heig - 10) / 10
        Picture1.CurrentX = oldx - 8

        Picture1.CurrentY = oldy - st - 1

        Picture1.Print yt * 0.2

        Picture1.Line (oldx, oldy - st)-(oldx + 1, oldy - st), RGB(255, 0, 0)
    End If
    Next yt
    Picture1.CurrentX = oldx - 9

    Picture1.CurrentY = oldy - 95
```

```
Picture1.Print "[C%]"
Picture1.CurrentX = oldx + 60
Picture1.CurrentY = oldy + 6

Picture1.Print "时间 (min) "
For iii = 1 To ii Step 1

Picture1.PSet (oldx + iii * (wid) / sii, oldy - (c(iii) * 50)), RGB(225, 0, 0)

Picture1.PSet (oldx + iii * (wid) / sii, oldy - (dctxx(iii) * 25000)), RGB(0, 225, 0)
Next iii
Picture1.CurrentX = oldx - 0

Picture1.CurrentY = oldy - 70
Picture1.Line -(oldx + (wid) / sii * (ii) * 0.5 / 1.5, oldy - 70), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + (wid) / sii * (ii) * 0.5 / 1.5, oldy - 42), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + (wid) / sii * (ii) * 0.5 / 1.5, oldy - 42), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + (wid) / sii * (ii) * 0.5 / 1.5, oldy - 20), RGB(225, 0, 0)

Picture1.Line -(oldx + (wid) / sii * sii, oldy - 20), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + (wid) / sii * sii, oldy - 0), RGB(225, 0, 0)

Picture1.CurrentX = oldx - 0
Picture1.CurrentY = oldy - 35
Picture1.Line -(oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (wid) / sii, oldy - 35), RGB(0, 225, 0)
Picture1.Line -(oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (wid) / sii, oldy - 0)-(oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (wid) / sii, oldy - 35), RGB(0, 225, 0)
Picture1.Line -(oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (wid) / sii, oldy - 60), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.8 / 1.5 * (wid) / sii, oldy - 60), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.8 / 1.5 * (wid) / sii, oldy - 75), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii * (wid) / sii, oldy - 75), RGB(0, 0, 225)

Picture1.Line -(oldx + ii * (wid) / sii, oldy - 0), RGB(0, 0, 225)
Picture1.CurrentX = oldx + ii * (wid) / sii + 2
Picture1.CurrentY = oldy - (c(ii) * 50) - 2
Picture1.Print (Format(c(ii), "#.###") & ("%"))
```

```
End SubPrivate Sub Command11_Click()
List1.Clear
With Picture1
.ScaleMode = 6
oldx = 10
oldy = 95
heig = Picture1.ScaleHeight
widt = Picture1.ScaleWidth
.Cls
Picture1.Line (oldx, oldy)-(oldx, oldy - .ScaleHeight + 20), RGB(255, 0, 0)
Picture1.Line (oldx, oldy)-(oldx + .ScaleWidth - 10, oldy), RGB(255, 0, 0)
End With
Picture1.CurrentX = oldx - 2
Picture1.CurrentY = oldy
Picture1.Print 0
For xt = 1 To 8
If xt <> 0 Then
st = xt * (widt - oldx) / 7
Picture1.CurrentX = oldx + st - 2
Picture1.CurrentY = oldy + 1
Picture1.Print xt * 10
Picture1.Line (oldx + st, oldy - 1)-(oldx + st, oldy), RGB(255, 0, 0)
End If
Next xt
For yt = 1 To 9
If yt <> 0 Then
st = yt * (heig - 10) / 10
Picture1.CurrentX = oldx - 8
Picture1.CurrentY = oldy - st - 1
Picture1.Print yt * 50 + 1450
Picture1.Line (oldx, oldy - st)-(oldx + 1, oldy - st), RGB(255, 0, 0)
End If
Next yt
Picture1.CurrentX = oldx - 9
Picture1.CurrentY = oldy - 95
Picture1.Print "温度 C"
Picture1.CurrentX = oldx + 60
Picture1.CurrentY = oldy + 6
Picture1.Print "时间 (min) "
c(1) = Val(Text1)
cr(1) = Val(Text2)
ni(1) = Val(Text3)
mn(1) = Val(Text4)
```

```

si(1) = Val(Text5)
t(1) = Val(Text6)
wm = Val(Text7)
gcrfe = Val(Text10) * 1000
dt = 1
crci(0) = cr(1)
t(1) = 273 + t(1)
ws = wm * 1000000 * 0.02
wm = wm * 1000000 - ws
qo = 800 * 1000000 / 3600
qn = 400 * 1000000 / 3600
pz = 1
gcao = 300000
mc = 12
mcr = 52
mmn = 55
msi = 28
ddc = 0.0025
ddcr = 0.00304
ddmn = 0.0018
dds1 = 0.0013
ddo = 0.00134
kc = 2 * Sqr(Sqr(981 * 0.167) / 100 / 3.14 * ddc)
kcr = 2 * Sqr(Sqr(981 * 0.167) / 100 / 3.14 * ddcr)
kmn = 2 * Sqr(Sqr(981 * 0.167) / 100 / 3.14 * ddmn)
ksi = 2 * Sqr(Sqr(981 * 0.167) / 100 / 3.14 * dds1)
kkc = 9.433 * Exp(2 / 3 * Log(ddc))
kkcr = 9.433 * Exp(2 / 3 * Log(ddcr))
kkmn = 9.433 * Exp(2 / 3 * Log(ddmn))
kksi = 9.433 * Exp(2 / 3 * Log(dds1))

ii = 1
5   If c(ii) <= 0 Then c(ii) = c(ii - 1)
      If cr(ii) <= 0 Then cr(ii) = cr(ii - 1)
      If si(ii) <= 0 Then si(ii) = si(ii - 1)
      If mn(ii) <= 0 Then mn(ii) = mn(ii - 1)
      mk = kc * c(ii) / mc + kcr * cr(ii) / mcr + kmn * mn(ii) / mmn + ksi * si(ii) / msi
      bc = kc * c(ii) / mk / mc
      bcr = kcr * cr(ii) / mk / mcr
      bmn = kmn * mn(ii) / mk / mmn
      bsi = ksi * si(ii) / mk / msi
      fc = Exp(Log(10) * (0.14 * c(ii) - 0.024 * cr(ii) + 0.016 * 0.1 - 0.012 * mn(ii) - 0.008 * 0.1 +
      0.012 * 8 - 0.34 * 0.01 + 0.051 * 0.03 + 0.046 * 0.04 + 0.08 * si(ii) - 0.005 * 0.05))
      fmn = Exp(Log(10) * (-0.1 * c(ii) - 0.083 * 0.01 - 0.004 * 0.03 + 0.048 * 0.04))
      fsi = Exp(Log(10) * (0.018 * c(ii) - 0.0003 * 17))

```

```

fcr = Exp(Log(10) * (-0.092 * c(ii) - 0.0129 * cr(ii) + 0.0018 * 0.1 - 0.0093 * 8 - 0.22 * 0.01 +
0.144 * 0.03 - 0.064 * 0.04 + 0.023 * si(ii)))
fo = Exp(Log(10) * (-0.65 * c(ii) - 0.064 * cr(ii) - 0.01 * 0.1 - 0.026 * mn(ii) - 0.005 * 0.1 +
0.006 * 8 - 0.2 * 0.01 + 0.07 * 0.03 + 1 * 0.04 - 0.16 * si(ii)))
aa = 137.6 * (qo + qn)
dhco = -119302 + 28.41 * t(ii) + 0.00205 * t(ii) * t(ii) + 46000 / t(ii)
dhcro = -1170912 + 119.37 * t(ii) + 0.0046 * t(ii) * t(ii) + 1565000 / t(ii)
dhnmo = -400376 + 46.48 * t(ii) + 0.00406 * t(ii) * t(ii) + 368000 / t(ii)
dhsio = -893931 + 58.91 * t(ii) + 0.00502 * t(ii) * t(ii)
ti = t(ii) - 1 / 200 / aa * (bc * dhco / 12 + bsi * dhsio / 2 / 28 + bmn * dhnmo / 55 + bcr *
dhero / 52) * wm / 100
coi = Exp(Log(10) * (-6320 / ti + 2.734)) / 1600
kcro = Exp(-31132 / ti + 19.518)
kcrsi = Exp(864.4 / ti + 1.7837)
kmnc = Exp(-26714 / ti + 17.7)
kmnsi = Exp(10565 / ti - 0.065)
jj = 0.5
alf = Sqr(3.14 * dt * (kc * (1 - jj) * coi + mk))
bt = (alf / 2 + 3.14 / 4 / alf) * (alf / Sqr(3.14)) + 0.5 * Exp(-alf * alf / 3.14)
If Abs(bt - jj) < 0.01 Then GoTo 100
If ii > 300 Then GoTo 1100
GoTo 2600
1100 If ii > 500 Then GoTo 2100
qo = 600 * 1000000 / 3600
GoTo 2600
2100 qo = 200 * 1000000 / 3600
2600 ss = 2 * qo / 22400
dct = -100 * mc / wm * bc * ss
dsit = -100 * msi / wm * bsi * ss
dmnt = -100 * mmn / wm * bmn * ss
dcrt = -100 * mcr / wm * bcr * ss
pco = pz / (1 + qn / 22400 / wm * 1200 / (-dct))
crcri(ii) = cr(ii) - 2 * kkc / (3 * kkcr) * (c(ii) - pco * Exp(Log(fcr) * (2 / 3)) *
Exp(Log(crcri(ii - 1)) * (2 / 3)) / kcro / fc)
ccri = pco * Exp(Log(fcr) * (2 / 3)) * Exp(Log(crcri(ii)) * (2 / 3)) / kcro / fc
jccr = kkc * (c(ii) - ccri)
cmni = pco * fmni / kmnc / fc * (mn(ii) - kkc * c(ii) / kkmn) / (1 - kkc * pco * fmni /
(kkmn * kmnc * fc))
jsicr = kkcr * (cr(ii) - crcri(ii)) * 100
jemn = kkc * (c(ii) - cmni)
If ii < 300 Or ii > 400 Then GoTo 400
c(ii) = c(ii) + gcrfe / 50 * 0.08 * 100 / wm
cr(ii) = cr(ii) + gcrfe / 200 * 0.62 * 100 / w
400 cr(ii + 1) = cr(ii) - 52 * 100 / wm * (2 / 3 * bcr * ss - jsicr) * dt

```

```

si(ii + 1) = si(ii) - 2800 / wm * (1 / 2 * bsi * ss + (3 / 4) * jsicr) * dt
mn(ii + 1) = mn(ii) - 5500 / wm * (bmn * ss) * dt
c(ii + 1) = c(ii) - 1200 / wm * (bc * ss * 10 + jccr * 100 + jcnn * 150) * dt
qi = 2 * aa * (ti - t(ii))
qsm = (bsi * 0.02564 + bmn * 0.01545 + bcr * 0.0175) * wm
qsr = 1.633 * (t(ii) / 100 * t(ii) / 100 * t(ii) / 100 - 273 / 100 * 273 / 100 * 273 /
100 * 273 / 100)
If ii > 300 Then GoTo 1000
    GoTo 2500
1000      If ii > 600 Then GoTo 2000
    qn = 720 * 1000000 / 3600
    GoTo 2500
2000      qn = 920 * 1000000 / 3600
2500      qg = 5.425 * qn * 16 + 51.05 * wm * Abs(dct) * 10
        qm = 27.95 * 220 * (t(ii) - 298)
        If ii < 300 Then GoTo 3100
            t(ii) = t(ii) - (402 * 4 * gcrfe + 40.38 * gcao) / (1.1966 * ws + 0.84 * wm)
3100      t(ii + 1) = t(ii) + (qi + qsm - qsr - qg - qm) * dt / (1.1966 * ws + 0.84 * wm)
            tt = t(ii + 1) - 273
            List1.AddItem Format(" ") & Format(ii / 860 * 40, "##.##") & Format(" 分钟")
            & Format(tt, "####.##") & Format(" C 度")
            ii = ii + 1
            If c(ii) > Val(Text14) Then GoTo 5
            sii = ii / 860 * 40
            oii = 800 * ii / 860 * 40 / 60 * 0.5 + 500 * ii * 0.3 / 860 * 40 / 60 + 240 * ii * 0.2 / 860 * 40
            / 60
            nii = 400 * ii / 860 * 40 / 60 * 0.5
            aii = 920 * ii / 860 * 40 / 60 * 0.2 + 720 * ii / 860 * 40 / 60 * 0.3
            Text8.Text = " "
            Text9.Text = " "
            Text11.Text = " "
            Text12.Text = " "
            Text9.SelText = Format("脱碳时间 ") & Format(sii, "##.##") & Format(" 分钟")
            Text8.SelText = Format("总氧量 ") & Format(oii, "##") & Format(" 立方")
            Text11.SelText = Format("总氮量 ") & Format(nii, "##") & Format(" 立方")
            Text12.SelText = Format("总氩量 ") & Format(aii, "##") & Format(" 立方")
            For iii = 1 To ii
                Picture1.PSet (oldx + iii * (widt - oldx) / 1.5 / 860 * 6 / 7, oldy - (29 + (t(iii) - 273) *
                (heig - 10) / 500 - 29 * heig / 10)), RGB(225, 0, 0)
                Next iii
                Picture1.Line (oldx + 300 * (widt - oldx) / 1.5 / 860 * 6 / 7, oldy - (29 + (t(299) - 273) *
                (heig - 10) / 500 - 29 * heig / 10))-(oldx + 300 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - (29 +
                (t(300) - 273) * (heig - 10) / 500 - 29 * heig / 10)), RGB(255, 0, 0)
                Picture1.CurrentX = oldx - 0

```

```
Picture1.CurrentY = oldy - 70
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.5 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 70), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.5 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 42), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.8 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 42), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.8 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 20), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + (ii - 30) / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 20), RGB(225, 0, 0)
Picture1.Line -(oldx + (ii - 30) / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 0), RGB(225, 0, 0)
Picture1.CurrentX = oldx - 0
Picture1.CurrentY = oldy - 35
Picture1.Line -(oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 35), RGB(0, 225, 0)
Picture1.Line (oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 0)-(oldx + (ii + 2) *
0.5 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 35), RGB(0, 225, 0)
Picture1.Line -(oldx + (ii + 2) * 0.5 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 60), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.8 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 60), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii * 0.8 / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 75), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 75), RGB(0, 0, 225)
Picture1.Line -(oldx + ii / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7, oldy - 0), RGB(0, 0, 225)
Picture1.CurrentX = oldx + ii / 1.5 * (widt - oldx) / 860 * 6 / 7 + 2
Picture1.CurrentY = oldy - (29 + (t(ii) - 273) * (heig - 10) / 500 - 29 * heig / 10) - 2
Picture1.Print (Format(t(ii) - 273, "#####") & (" C"))
End Sub
```

附录 2：

主要符号表

a_{FeO}	炉渣中 FeO 的活度
a_o	钢中氧活度
a_j	钢液中 j 元素的活度
A	铁水表面积 (cm^2)
A_b	气泡的表面积 (cm^2)
A_t	炉壁与钢水接触的面积 (cm^2)
C_c	熔池中碳的百分浓度 (%)
C_o	熔池中氧的摩尔浓度 (mol/cm^3)
C_j	j 组元在熔池内的摩尔浓度 (mol/cm^3)
$[C]^*$	反应界面碳的浓度 (%)
[C]	熔池中碳的百分浓度 (%)
$[C]_0$	钢液中碳初始百分浓度 (%)
C_{ps}	渣的比热 ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C_{pm}	钢水的比热 ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C	铁水中熔质的体积摩尔浓度 (mol/cm^3)
d	渣滴直径 (cm)
d_b	气泡的当量直径 (cm)
d_n	喷嘴直径 (cm)
D_j	钢水中 j 组元的扩散系数 (cm^2/s)
E_{Dj}	扩散活化能 (kJ/s)
e_1^j	相互作用系数
$e_{i(T)}^j, e_{i(T_0)}^j$	分别表示 T, T_0 时的活度相互作用系数。
g	重力加速度 $981(\text{cm}/\text{s}^2)$
H	熔池深度; 金属液的深度
(%j)	熔渣化学组成。
J_i	质量流量 ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

J_j	j 元素传质速率 ($\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) .
k_C, k_{Cr}	传质系数.(cm/s)
K_{co}	平衡常数. (cm/s)
$K_{C \cdot O_2}, K_{G \cdot O_2}$	物质移动系数 (cm/s)
k_{O_2}	氧的传质系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
k_j	元素 (j) 的传递系数 ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
K	物质移动系数 (cm/s)
L	熔池深度.(cm)
l_i	各层耐火材料的厚度 (cm)
M_j	元素 (j) 的摩尔质量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$).
N_{O_2}	气泡中的氧克分子
P_{O_2}	氧气压力(N/m^2)
P	压力(N/m^2)
P_{CO}	一氧化碳分压(N/m^2)
P_{O_2}	氧分压(N/m^2)
P_{Ar}	氩气压力(N/m^2)
Q_{Ar}	氩气流量 (cm^3/s)
Q_O	氧气流量 (cm^3/s)
Q_i	反应表面单位时间的直接氧化放热(J/s)
Q_{RT}	单位时间内产生的热量(J/s)
r	气泡半径(cm).
R	气体常数 ($\text{cm}^3 \cdot \text{atm}/\text{K} \cdot \text{mol}$)
Re	雷诺 (Reynold) 数
S	供氧速度(mol/s)
Sc	施密特 (Schmidt) 数
Sh	谢伍德 (Sherwood) 数
T_a	环境温度 (K) $T_a=25^\circ \text{ C}=298\text{K}$
T_M	钢水的温度.(K)
$T_0,$	表示给定温度.(K)。

T	温度 (K)
t	时间 (s)
V	钢水体积, (cm^3)
W_m	钢水重量(g)
α_0	炉壳对环境散热的给热系数 (cm^{-2}k)
δ_j	j 元素反应的氧所占分数(%)
λ_i	各层耐火材料的导热系数 $\text{J}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$
η	黏度(Pa.s)
v	渣滴上升速度. (cm/s)
ξ	氧气利用率.
ρ	密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
ρ_m	钢水密度($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
$\rho_{钢水}$	钢水密度。($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
ρ_s	熔渣的密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)。
σ	表面张力(N/cm)
$\sigma_{金属}$	金属的表面张力(N/cm)
u_b	气泡平均上浮速度 (cm/s)
μ	运动粘度(Pa.s)
ΔH	反应产生的焓($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$)

致 谢

从 2002 年到现在，这个课题断断续续地进行了两年多时间。自然，在这两年多的时间里，本人在做课题时经历了不少困难。但本人最终还是完成了这个课题及相关的硕士学位论文，这是与我的导师的关注和支持分不开的。从课题中每一个困难的解决，到学位论文里每一个错误的纠正，无不倾注着洪新教授的心血。在此，我向洪教授致以衷心的感谢和敬意。

在我读研究生的三年多时间里，丁守忠教授和魏季和教授也给了我很大帮助。

在做这个课题的过程中，五钢公司电炉厂很多技术人员和炉前工人也给了我很大的帮助。不仅提供了大量现场数据和操作资料，还积极协助我做好现场操作。在此，我衷心地表示感谢。