

高等院校教学用书

# 钢铁冶金模拟试验研究方法

王舒黎 编著

33

东北工学院出版社

## 前 言

钢铁冶金过程中的任何一项生产技术,都受许多工艺参数的影响,例如,在铁水预处理过程中,铁水温降受渣剂种类、加入量、加入方法以及处理时间等工艺参数的影响;在转炉炼钢过程中,熔池金属的脱磷、脱硫,受炉渣碱度、渣中( $\sum$ FeO)、熔池温度以及金属液成分等工艺参数的影响;在连铸过程中,小方坯的拉漏,受结晶器冷却强度、二冷区冷却特点、拉坯速度以及开浇前钢水原始条件等工艺参数的影响。

某项生产技术与影响它的工艺参数之间的关系,一般来说,采用三种表达方式。

(1)用文字叙述来表达某项生产技术与影响它的工艺参数之间的关系。

这种表达方式是比较常用的,但某项技术问题与影响它的许多工艺参数之间的关系,很难用简短的词句表达完整和提供定量的关系。

(2)列微分方程,建立数学模型,比较准确地用数学语言描述钢铁冶金过程中的某项生产技术与影响它的工艺参数之间的关系。

这种表达方式,对改进生产操作,优化工艺参数,建立各工艺参数之间的定量关系,逐步实现生产自动控制,无疑是很有价值的。

钢铁冶金过程中所出现的冶金现象,是比较复杂的。例如,冶金反应绝大多数是高温、多组元、多相而又同时进行的反应。钢铁冶金过程中的技术问题,也是比较复杂的。例如,

复吹转炉底枪寿命,与底枪材质、结构、布置方式、底吹气种、底吹供气强度以及熔池沸腾情况等,有极其密切的关系。这些复杂的冶金现象和生产技术问题,很难用数学模型表达清楚。一个层流流体的浓度梯度、温度梯度和速度梯度的分布,需要列出 11 个微分方程式来表达。毫无疑问,复杂的冶金现象和生产技术问题,将需要列出更多的方程式来表达。这是建立钢铁冶金数模的难点之一。

另外,钢铁冶金过程中的冶金现象和生产技术的边界条件,绝大多数是非稳态的,给求解方程式带来一定的困难,甚至根本无法求解。这是建立钢铁冶金数模的难点之二。

可见,不应该建立那些无目的的、不联系生产实际的而又难以在生产实践中取得验证的数模。

(3) 通过模拟试验研究得出无因次式(准数),用无因次式(准数)描述钢铁冶金过程中的某项生产技术与影响它的工艺参数之间的关系。

这种表达方式是简单的无因次式(准数)定量地描述钢铁冶金过程中某项生产技术与影响它的工艺参数之间的关系,它既不像文字叙述方式那样冗长而又无准确的定量概念,也不像数模表达方式那样复杂而又难以求解。因此,很受冶金工作者的欢迎。近年来,应用模拟试验研究方法研究钢铁冶金问题的专业人员,越来越多。

为了正确地运用模拟试验研究方法研究钢铁冶金问题,本书主要介绍以下四方面的内容:

(1) 模拟试验研究方法在钢铁冶金中的应用,钢铁冶金中的哪些技术问题需要通过模拟试验得到答案,或通过模拟试验获得解决的途径;

(2) 模拟试验研究的模型设计,如何运用已有的经典准数、自行设计的准数和非准数公式进行模型设计;

(3)模拟试验结果的归纳和整理,将试验数据整理为指数函数式,变文字叙述钢铁冶金的生产技术问题为用准数来表达;

(4)钢铁冶金模拟试验研究方法实例,选择什么模拟物质进行试验。

本书可作为高等院校钢铁冶金专业研究生、本科生的选修课教材,也可供冶金专业教师、科研工作者和工程技术人员参考阅读。

由于作者水平有限,差错难免,欢迎批评、指正。

王舒黎

1990年5月

# 目 录

## 前 言

### 第一章 模拟试验研究方法在钢铁冶金中的应用

- 一、模拟试验研究方法在钢铁冶金中的应用 ..... (1)
- 二、钢铁冶金试验研究工作的阶段划分 ..... (7)

### 第二章 模拟试验研究方法的基础理论

- 一、模拟试验研究方法的步骤和内容 ..... (10)
- 二、因次分析法 ..... (12)

### 第三章 模拟试验的模型设计

- 一、模拟试验的相似理论 ..... (24)
- 二、流体流动模拟试验的模型设计 ..... (37)
- 三、传热模拟试验的模型设计 ..... (48)
- 四、化学反应速度模拟试验的模型设计 ..... (62)
- 五、钢铁冶金模拟试验模型设计 ..... (67)
- 六、模拟试验结果的归纳整理和表达式 ..... (94)
- 七、半工业性模拟试验(中间试验厂)的规模 ..... (97)

### 第四章 钢铁冶金模拟试验的模拟物质和模拟方法

- 一、钢铁冶金模拟试验常用的模拟物质 ..... (100)
- 二、钢铁冶金模拟试验方法实例 ..... (102)

附录 1 典型的相似准数 ..... (112)

附录 2 20°C 水和 1600°C 钢水的物理性能 ..... (115)

附录 3 各种物理量的因次 ..... (116)

参考文献 ..... (117)

# 第一章 模拟试验研究方法在 钢铁冶金中的应用

在这章中,叙述两个问题:(1)钢铁冶金中的哪些技术问题需要进行模拟试验研究?(2)钢铁冶金试验研究工作的几个阶段,模拟试验研究所处的地位,模拟试验研究方法与其它试验研究方法相比,有何特点。

## 一、模拟试验研究方法在钢铁冶金中的应用

当遇到下列五种情况时,或遇到与这五种情况相类似、或有一定关系的技术问题时,需要进行模拟试验研究。

1. 在钢铁生产的实际设备中,很难或根本不可能进行试验,或进行试验也得不到满意的结果,这时需要进行模拟试验研究

### 例1 高炉开炉若干年后炉底温度的变化

高炉点火生产以后,随着生产时间的推移,炉底耐火材料变薄,这时炉底各部分的温度,与开炉初期不同,也就是说,不同生产时期,高炉炉底的温度场不同(见图 1-1)。

掌握高炉炉底温度随生产时间的推移而变化的情况,对

指导日常生产、日后选用炉底耐火材料和设计炉底厚度,都是非常重要的。

在修砌高炉时,在炉底预先埋设热偶进行跟踪测温,其难度是相当大的。高炉生产一段时间后,在炉底上临时钻孔埋设热偶进行测温,这不仅很难测准,而且也很难做到。

在实际高炉中,很难或根本不可能测定炉底温度时,需要通过模拟试验来研究高炉炉底温度随时间的变化。

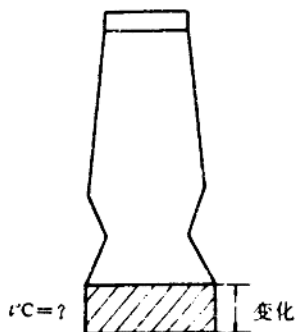


图 1-1 高炉炉底温度

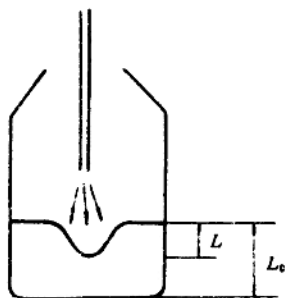


图 1-2 转炉冲击坑

例2 顶吹转炉氧枪向熔池吹氧,熔池冲击坑( $L/L_0$ )与熔池冶金反应和吹炼效果的关系

如图1-2所示, $L/L_0$ 称熔池冲击坑深度比,简称冲击坑,也称冲击强度。

影响冲击坑深度比( $L/L_0$ )的工艺因素有:

- (1)顶吹氧枪枪位;
- (2)氧气压力和喷出速度;
- (3)氧枪喷嘴结构;
- (4)渣、钢体积及其成分;
- (5)渣、钢物理化学性质;
- (6)熔池尺寸。

受熔池冲击坑深度比( $L/L_0$ )影响的冶金反应和吹炼效果有:

- (1)渣中( $\Sigma\text{FeO}$ )和化渣速度;
- (2)熔池脱碳速度;
- (3)熔池升温速度;
- (4)熔池脱磷、脱硫;
- (5)渣、钢、气的乳化情况;
- (6)喷溅和吹损;
- (7)炉衬寿命。

要想在实际转炉中,通过试验研究清楚上述13个问题之间的关系,特别是某些问题之间的定量关系,很显然是比较困难的。因此,需要通过热态模拟试验来研究这些问题之间的关系。

例3 复吹转炉熔池渣、钢流态及其冶金特点

复吹转炉熔池渣、钢流态,常以熔池混合均匀时间,简称混匀时间来表示。混匀时间短表示熔池搅拌良好,渣、钢流态



有利于冶金反应。在实际生产中,又常以渣中( $T_{Fe}$ )表示渣、钢流态和熔池搅拌情况。

影响混匀时间( $\tau$ )、或渣中( $T_{Fe}$ )的因素,如单从流体力学的角度来考虑,则有:(1)顶吹氧枪结构;(2)顶吹氧压力;(3)顶吹供氧强度( $m^3/(min \cdot t)$ );(4)顶吹氧枪枪位;(5)底吹喷嘴(底枪)结构;(6)底吹气体种类;(7)底吹气体压力;(8)底枪在炉底上的布置;(9)底吹供气强度( $m^3/(min \cdot t)$ )。

上述9个影响因素与熔池混匀时间( $\tau$ )、或与熔池搅拌之间的定量关系,也要通过冷态或热态模拟试验进行研究。

以上三例表明,在实际设备中进行试验研究有一定的困难,或根本无法进行时,可通过冷态、热态模拟试验进行研究。但这类模拟试验在模型设计和模拟物质的选择上,都有较高的要求。

## 2. 开发新工艺流程,研制新型设备

由于各地区原料条件不同,设备类型不同,对产品质量和品种的要求不同,经常会遇到开发新工艺、研制新设备的问题。这时,需要进行模拟试验研究。

### 例1 熔融还原炼铁法

即所谓的熔态还原法。此法不用高炉炼铁,在设备上、原料条件上和产品成本上,具有许多优点。但采用什么类型设备、什么工艺方法进行熔态还原,例如,当前最引人注目的两种方法:转炉金属熔池法和竖炉法,哪种方法更好些,还需要作深入的试验研究,需要进行模拟试验研究。

### 例2 最佳炼钢工艺流程的完善和实用化

有人提出,下列工艺流程是当前钢铁生产的最佳工艺流

程。



上述钢铁生产工艺流程中,各工序工艺参数的选定,各工序之间最佳工艺参数的配合,都需要先做小型热态模拟试验取得数据后,再进行半工业试验,最后设计实际生产设备,制定操作工艺,进行工业生产。

### 例3 某钢铁公司铁水炼中、高碳钢的冶炼工艺

某钢铁公司铁水的主要特点是含Nb(平均约0.08%)、磷高(平均约0.6%)。采用什么样的炼钢工艺流程,既能回收Nb,又能炼出低[P]的优质钢,首先需用模拟试验进行研究。

### 例4 复吹转炉底吹多种气体的冶金行为

复吹转炉底吹多种气体的最佳搭配、底吹供气强度、底吹不同气体渣、钢成分和温度的变化规律,可应用小型热态模拟试验进行研究。

## 3. 改进现行生产工艺流程,改造现有生产设备

生产工艺流程要不断地改进,现有生产设备要不断地改造,以适应增加产量、提高质量、扩大品种和降低成本的要求。百年前的托马斯转炉、贝士麦转炉,经过不断地改造而成为今天的顶吹氧气转炉、顶底复吹转炉。以前没有的连铸、钢水真空脱气,现在也有了。大型现代化高炉代替了小型木炭高炉。钢铁生产工艺流程和设备,发生了这样的巨大变化,与开展模拟试验研究有密切关系。

#### 4. 利用新原料、采用新工艺、生产新产品

当遇到利用新原料、采用什么样的新工艺生产新产品时，应先进行小型模拟试验，取得结果后，再进行半工业试验。

例如，开发新钢种，一般分三步进行试验。

第一步试验：在 10~100kg 小型真空熔炼炉中，熔炼多种成分不同的钢号，从中进行筛选。

为什么选用小型真空熔炼炉进行试验？因为小型炉子机动灵活性比较好，可对广范围不同成分的钢种进行调查研究。在大气下冶炼，钢水易氧化，成分难控制，不易达到试验设定的成分，采用真空熔炼炉，可提高钢种规格成分的命中率。

为什么要熔炼为数较多的成分不同的钢种？因为钢的成分决定了钢的金相组织，而不同的金相组织又决定了钢的性能不同。在冶炼、浇铸、轧制相同的条件下，从为数较多的新钢种试样中，选出性能较好的钢号，缩小下步试验新钢种的成分范围。

第二步试验：在大气气氛下，用吨位稍大的(100kg~5t)电炉熔炼第一步试验筛选出来的钢种。在第二步试验中，将冶炼的工艺技术条件包括进去进行研究，考查非真空条件将给冶炼工艺带来什么影响，再一次缩小成分合适的钢种范围。

第三步试验：在实际炉子中熔炼最后筛选出来的钢种。

第一二步试验需用模拟试验研究方法来完成。

5. 将影响因素比较多而又关系比较复杂的钢铁冶金中的技术问题，由文字叙述，转为用数学式进行定量描述

近年来，钢铁冶金工作者迫切希望能有定量的数学式描

述钢铁冶金过程中的技术问题。解决的方法就是应用模拟试验研究结果,推导出无因次式(准数),用无因次式描述所研究的技术问题。

模拟试验研究方法,应用于研究钢铁冶金中的技术问题,越来越得到发展。日本八幡钢铁公司,利用 3t 小高炉研究富氧鼓风操作和喷油技术,在大型高炉上应用了这种小型模拟试验研究结果,取得了较好的效果。这说明模拟试验研究方法,在钢铁冶金中,占有相当重要的地位。又如,日本从奥地利引进 LD 转炉技术以后,建立了 6t LD 试验转炉,通过热模拟试验,专为大型转炉开发新工艺、吹炼新钢种提供技术数据。

苏联、德国等国家的钢铁冶金工作者,也常用模拟试验研究方法,研究钢铁冶金中的技术问题。

近年来,我国钢铁冶金工作者也非常重视小型模拟试验研究,发表了不少有价值的冷态、热态模拟试验研究结果。

## 二、钢铁冶金试验研究工作的阶段划分

钢铁冶金的科研试验工作,大致可分为四个阶段,各阶段的试验研究内容和主要目的,列于表 1-1。

当然,并不是所有要研究的技术问题,都要经历表 1-1 中列出的四个试验阶段。同时,也不要把这四个试验阶段截然分开。当所要研究的技术问题比较简单、已有的模拟试验已基本上查清问题时,可省去小型试验,直接进行半工业试验。开发新操作工艺,研制新设备,必须进行小型模拟试验。

小型模拟试验花钱少,试验周期短,灵活性比较大,试验方便,能获得在实际设备上不易测量、不易得到的技术数据。

半工业试验和工业试验,其特点恰好与小型模拟试验相

反。这类大型试验投资多,难度大,不易测定数据,不易查明众多影响因素之间的关系,试验周期长,如出意外损失是很大的。当然,在小型模拟试验的基础上进行大型的半工业、工业试验,则大型试验的缺点就可变小。

表 1-1 试验研究的阶段、内容和目的

特点	阶段名称	试验研究的主要内容和目的
灵 活 机 动 性	第一阶段(小型热模拟试验阶段)	<p>(1)研究某项工艺流程的合理性、可行性,有无进行半工业试验的必要性;</p> <p>(2)研究某项技术的主要影响因素,例如,应用小型热态模拟试验研究复吹转炉底枪蚀损和结瘤的主要影响因素;</p> <p>(3)进行新技术的基础理论研究,例如,应用小型热态模拟试验研究复吹转炉底吹多种气体的冶金行为;</p> <p>(4)开发新型炉子,研制新型设备,例如,开发新型熔融还原炉</p>
	第二阶段(半工业试验的准备阶段)	<p>从第一阶段的模拟试验中,选出最佳的工艺流程、最合理的设备,抓住某项技术的主要影响因素,根据模拟试验得到的数据,设计试验方案,准备进行半工业试验</p>

续表 1-1

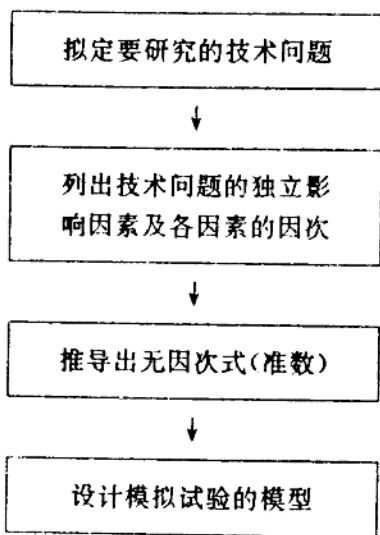
特点	阶段名称	试验研究的主要内容和目的
相似性、可靠性	第三阶段(半工业试验)	<p>(1)为工业试验提供新工艺流程的技术资料;</p> <p>(2)为工业试验提供有关新开发的技术工艺方面的资料;</p> <p>(3)为工业试验提供新设备的设计和操作方面的资料;</p> <p>(4)提供成本核算和经济效益方面的资料。</p> <p>通过半工业试验,为制定新工艺操作、设计新设备,提供充分的依据</p>
	第四阶段(工业性试验)	<p>(1)设计和制造新的实际设备,用新设备进行工业性试验;</p> <p>(2)用新工艺流程进行工业性试验;</p> <p>(3)用新操作进行工业性试验</p>

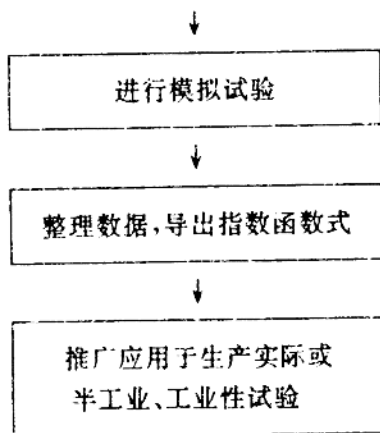
## 第二章 模拟试验研究方法的基础理论

本章叙述两个问题：(1)模拟试验研究方法的步骤和内容；(2)模拟试验研究的因次分析法(准数法)。

### 一、模拟试验研究方法的步骤和内容

模拟试验研究方法的步骤和内容示意于下。





拟定要研究的技术问题:根据前面介绍的在什么情况下需要进行模拟试验研究的原则,由试验研究者参考国内外的研究情况进行拟定。例如,拟定对复吹转炉底吹  $\text{CO}_2$  与底枪蚀损和结瘤的问题进行研究,在当前来说,是很有必要的。

列出技术问题的独立影响因素及其因次:例如,复吹转炉底吹  $\text{CO}_2$  对底枪的蚀损和结瘤的独立影响因素及其因次为:(1)底枪直径,  $[L]$ ; (2)底吹气体压力,  $[M \cdot L/t^2]$ ; (3)  $\text{CO}_2$  密度,  $[M/L^3]$ ; (4)底吹供气强度,  $[\frac{M/L^3}{t \cdot M}]$ 。

推导出无因次式(准数):正确地选用已有的准数或自己推导的准数,表示所研究问题的各独立影响因素之间的关系。

设计模拟试验模型:正确设计模型是模拟试验的基础。模型设计的主要内容有:(1)选择和计算各单值的模拟比;(2)确定是采用冷态试验还是采用热态试验。冷态试验容易做,热态试验相似性比较好。

进行模拟试验:根据设计的模拟试验模型,检测和记录试验过程中各单值的变化,分析化验取出的各类试样。



整理数据,推导出指数函数式:归纳整理试验结果,处理加工试验数据,推导出指数函数式,用于表达所研究的技术问题与各独立影响因素之间的定量关系。

推广应用于生产实际或半工业、工业性试验:指出试验结果推广应用的条件和范围,实际应用时,是否还需要作某些修正,为工业试验或试生产提供可靠的技术数据。

## 二、因次分析法

因次分析法也叫作相似准数分析法、量纲分析法、单位系分析法。

因次分析法是把所研究的技术问题与各独立影响因素之间的关系用无因次式(准数)表达的方法。

据不完全的统计,现有准数 38 个(其中 22 个准数见附录 1),是否可以从这 38 个准数中选出 1 个或几个准数来表达所研究的技术问题与各独立影响因素之间的关系,设计模拟试验模型,安排模拟试验?这样做也可以,也不可以。当所研究的技术问题的各独立影响因素都包括在所选用的准数中时,也就是说,所选用的、已有的典型准数能表达所研究的技术问题时,是可以利用已有的典型准数进行模拟试验模型设计的。否则,当所选用的、已有的典型准数不能把所研究的技术问题的各独立影响因素包括进去时,是不可以用已有的典型准数进行模拟试验模型设计的。例如,选用雷诺准数( $Re$ )设计模拟试验模型,研究复吹转炉底吹气体对底枪蚀损、结瘤的影响,将是不可以的,因为雷诺准数( $Re$ )没包括温度、( $FeO$ )、冲刷等影响底枪寿命的因素。

已有的典型准数,都是从典型的传热、流动、传质和化学