

冶/反/工/  
金/应/程/从  
学/书/

# 化工冶金模型实验 研究及其测试技术

冶金工业出版社

国家自然科学基金资助

冶金反应工程丛书

# 化工冶金模型实验 研究及其测试技术

蔡志鹏 梁 云 张春霞 著

北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2001

## 内 容 提 要

本书着重介绍用模型实验研究的方法研究化工冶金过程中的传递现象并探索其中某些规律。本书共分7章,分别为:模型实验研究的理论基础、冶金过程中射流与熔池的作用、摇包模型实验研究、VOD过程模型实验研究、转炉过程模型实验研究、有色金属冶炼中某些过程的模型实验研究、在线测量系统。

本书可供化工冶金领域博士生、硕士生、高年级本科生阅读,也可作为相关领域科研、生产、管理、教学人员学习、提高的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工冶金模型实验研究及其测试技术/蔡志鹏等著.  
—北京:冶金工业出版社,2001.7  
(冶金反应工程学丛书)  
ISBN 7-5024-2786-4

I. 化… II. 蔡… III. 化学冶金—模型实验—研究 IV. TF11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 26644 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 刘小峰 杨传福 美术编辑 王耀忠 责任校对 侯 璐 责任印制 刘 静

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2001年7月第1版,2001年7月第1次印刷

850mm×1168mm 1/32; 11.25印张; 299千字; 341页; 1-1500册

30.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 序 言

---

冶金学是研究人类从自然资源中提取有用金属和制造材料的科学。从人类最早使用金属到今天,已有数千年历史。在近一百多年的现代工业生产发展中,冶金工业作为一门基础材料工业,发挥了重大作用。本世纪上半叶以来,许多冶金学家应用化学热力学知识,对冶金过程中气体-熔渣-金属间的反应平衡和熔体的物理化学性质进行了大量的测定和研究,这些研究成果促进了现代冶金工艺的发展。冶金学也逐步完善为一门主要以热力学为理论基础的、独立的专业学科。

近几十年来,冶金学知识体系和结构,随着冶金技术的发展和相关学科的进步,也在发生变化。计算机技术的发展和广泛应用,使冶金学理论和工艺的研究方法、冶金生产及其控制技术发生了重大变革。由传统冶金学和传统冶金工艺学所构成的知识体系和结构,已不能完全满足现代冶金工艺发展和理论研究的需要。因此,诸如,对微观和宏观过程的认识、单元过程或现象的定量解析、反应过程的数学物理模拟、反应和生产速率的预测、反应器的仿真研究和设计、人工智能技术的应用以及反应器运行和整体生产过程的控制等等,均逐渐成为现代冶金学必须包括的内容。近二三十年中,许多冶金学学者努力学习相关学科,如现代化学工程学、计算流体力学(CFD)、传输理论等方面的知识,积极利用数学解析

方法和计算技术,来定量分析和解决冶金学理论和工艺方面的问题,并获得重要进展。日本学者鞭岩、瀬川清等根据上述冶金学内容和研究方法的新发展,于70年代提出冶金反应工程学概念,并分别出版了《冶金反应工程学》和《铁冶金反应工程学》等专著。

我国在冶金学上述新兴内容方面的研究,起步于70年代末。近二十多年,国内许多冶金学者根据现代冶金学发展的趋势,吸收国外先进经验,注意促进多学科知识的交叉,逐步将传输理论、反应工程学的方法以及计算技术引入冶金学的理论研究和工艺开发中,并取得较大的进展。为及时总结冶金学近几十年的发展成果,增进国内外学术交流,改善专业教学、基础研究和工艺发展的条件,中国金属学会冶金反应工程学学术委员会决定组织我国冶金领域内的专家学者,并争取国外学者的参与或合作,编辑出版一套《冶金反应工程学丛书》。

本套丛书可大致划分为介绍冶金反应工程学理论的著作(一部分为高校教材或教学参考书)和介绍冶金反应工程学知识应用成果和经验的专著两类。第一批著作于1996年开始出版发行。欢迎国内外冶金学者参加《冶金反应工程学丛书》书目的著述。

《冶金反应工程学丛书》的编委会,由下列学者组成(按姓氏笔画排列,带\*号者为执行小组成员):

干 勇(冶金部钢铁研究总院)

\* 曲 英(北京科技大学)

任崇信(冶金工业出版社)

仲增墉(中国金属学会)

杨天钧(北京科技大学)

张丙怀(重庆大学)

李尚诣(冶金工业部科技司)

贺友多(包头钢铁学院)

柯家骏(中国科学院化工冶金研究所)

徐德龙(西安建筑科技大学)

梅 炽(中南工业大学)

- \* 萧泽强(东北大学)
- 赫冀成(东北大学)
- \* 蔡志鹏(中国科学院化工冶金研究所)
- 戴永年(昆明理工大学)
- 魏季和(上海大学)

由于《冶金反应工程学丛书》内容涉及面较宽,编写工作量大,且系初次组织,经验不足,错误和不足之处在所难免,请读者批评指正。

《冶金反应工程学丛书》编委会  
1996年5月

# 前 言

---

本书着重介绍用模型实验研究的方法研究化工冶金过程中的传递现象并探索其中某些规律。从化工冶金过程中遇到的实际问题出发,应用相似原理和模型实验方法及一些常用的、比较先进的和自行开发的测试手段来开展各项课题的研究。

我国著名冶金学家叶渚沛先生早在 20 世纪 50 年代初期就提倡用化学工程的方法研究冶金,称之为化工冶金。作者在中国科学院化工冶金研究所结合各种任务开展化工冶金中的模型实验研究,特将所积累的经验进行总结撰写成本书。

书中第 1 章简要介绍了相似理论及其应用实例,它是本书的重要理论基础。其绝大多数内容是学习和理解前人工作经验,结合实际课题加以消化吸收和应用而归纳整理成文,内容由浅入深,便于读者理解。只有少数部分是作者结合具体情况加以发挥,作为探索过程中的经验予以介绍。

书中其余各章的绝大部分内容是作者和所在课题组全体成员在过去所承担的各项课题(包括科技攻关、厂矿合作项目、国家自然科学基金和国际合作项目中的部分内容)的研究成果的总结。

本书编写的特点在于研究每一课题时尽量注意叙述所采取的新措施、运用的新方法和采用新的测试手段并特别注意研究结果有所新的发现和新的见解。

例如第2章内容主要是结合氧气炼钢中所用氧枪喷头的超音速射流进行了一系列的分析研究,对超音速射流特性及其表达式进行了分析和实验研究,并进行了改进。特别是在对超、亚音速多股射流的流场分析和实验研究的基础上提出了动量迭加模型、配合应用自行开发的大型在线实测流场技术证明了该模型可用。第3章描述了摇炉内的液体(包括有渣、无渣和渣液远多于金属液的情况)运动规律,大量的实验证实了四种临界转速的不同波动状态的存在。第4章和第5章主要描述 VOD 过程和转炉过程中射流与熔池作用所形成的凹坑,采用自制的多点探针在线测量系统准确地测出了凹坑形状,并提出了数学模型。第6章重点介绍有色金属冶炼新过程(QSL 炉)中的流动现象和底吹过程中气液上升速度模型(包括初始段、等速上升段和近液面凸起等数学模型),还介绍了特种容器(梨形缓冷结晶器)的流场数值模拟研究和搅拌杆法炉外脱硫过程的模型实验研究。第7章主要介绍本书中所用的在线测量系统的基本原理和自行开发的测试设备及其应用实例。

本书第1章由蔡志鹏和梁云共同完成,第2章由张春霞执笔,第3~6章由蔡志鹏执笔,第7章由魏伟胜执笔,张春霞做了补充。最后由蔡志鹏总纂定稿。全书由曲英教授和萧泽强教授进行了认真的审阅并提出了宝贵意见和修改建议,在此表示衷心感谢。在定稿过程中得到中国科学院化工冶金研究所谢裕生所长的大力支持和郝国防工程师的帮助,在此深表谢意。

由于作者水平所限,书中错误和不当之处,诚请广大读者给予批评指正。

蔡志鹏

2000 年 12 月

# 目 录

|                            |      |
|----------------------------|------|
| 1 模型实验研究的理论基础 .....        | (1)  |
| 1.1 相似的基本概念 .....          | (2)  |
| 1.1.1 几何相似 .....           | (2)  |
| 1.1.2 时间相似 .....           | (5)  |
| 1.1.3 运动相似 .....           | (6)  |
| 1.1.4 动力相似 .....           | (9)  |
| 1.1.5 温度相似 .....           | (10) |
| 1.1.6 相似三定理 .....          | (11) |
| 1.1.7 异类相似 .....           | (15) |
| 1.2 相似准数的导出 .....          | (15) |
| 1.2.1 相似常数转换法求相似准数 .....   | (16) |
| 1.2.2 相对单位测量转换法求相似准数 ..... | (21) |
| 1.2.3 根据特征量的意义求相似准数 .....  | (24) |
| 1.2.4 用两种力的比例求相似准数 .....   | (26) |
| 1.2.5 用积分类比法求相似准数 .....    | (27) |
| 1.2.6 因次分析法求相似准数 .....     | (31) |
| 1.3 相似模型的设计 .....          | (38) |
| 1.3.1 模拟的基本原则 .....        | (38) |
| 1.3.2 选择实验模型的比例和实验介质 ..... | (41) |

|          |                                     |             |
|----------|-------------------------------------|-------------|
| 1.3.3    | 自模拟 .....                           | (42)        |
|          | 参考文献 .....                          | (42)        |
| <b>2</b> | <b>冶金过程中射流与熔池的作用 .....</b>          | <b>(44)</b> |
| 2.1      | 单股射流的流动特性 .....                     | (45)        |
| 2.1.1    | 湍流自由射流稳定流动的相似分析 .....               | (45)        |
| 2.1.2    | 可压缩气体射流稳定流动的相似分析 .....              | (48)        |
| 2.1.3    | 超音速湍流自由射流的特性 .....                  | (51)        |
| 2.2      | 多股射流流动特性 .....                      | (64)        |
| 2.2.1    | 冶金过程多股射流的应用 .....                   | (64)        |
| 2.2.2    | 多孔喷头的经验设计 .....                     | (67)        |
| 2.2.3    | 多股射流的流场速度分布 .....                   | (69)        |
| 2.3      | 多孔氧枪喷头射流流场速度分布的数学<br>模型研究 .....     | (72)        |
| 2.3.1    | 多股射流流场动量迭加模型 .....                  | (73)        |
| 2.3.2    | 多股射流流场速度分布的特点分析 .....               | (76)        |
| 2.3.3    | 考虑抽引和偏转效应的多股射流流场<br>速度分布的数学模型 ..... | (80)        |
| 2.4      | 多股射流流速度分布数学模型的应用 .....              | (85)        |
| 2.4.1    | 氧枪喷头的设计参数范围 .....                   | (85)        |
| 2.4.2    | 射流中心线的偏转 .....                      | (86)        |
| 2.4.3    | 抽引系数 .....                          | (88)        |
| 2.4.4    | 副氧流的射流特点 .....                      | (89)        |
| 2.5      | 数学模型的实验验证 .....                     | (90)        |
| 2.5.1    | 一般3孔喷头 .....                        | (91)        |
| 2.5.2    | 二次燃烧氧枪 .....                        | (93)        |
| 2.6      | 氧气射流对熔池穿透深度的研究 .....                | (95)        |
| 2.7      | 超音速射流冲击面积的研究 .....                  | (101)       |
| 2.7.1    | 射流冲击面积的计算公式 .....                   | (101)       |
| 2.7.2    | 枪位对射流冲击面积影响的实验研究 .....              | (103)       |
| 2.7.3    | 枪位对射流冲击面积影响的理论分析 .....              | (105)       |

|       |                             |       |
|-------|-----------------------------|-------|
| 2.7.4 | 滞止压力对射流冲击面积的影响 .....        | (109) |
| 2.8   | 大型转炉氧枪多孔喷头设计 .....          | (110) |
| 2.8.1 | 喷头的主要设计参数 .....             | (111) |
| 2.8.2 | 喷头主要操作参数的选择 .....           | (116) |
|       | 参考文献 .....                  | (119) |
| 3     | 摇包模型实验研究 .....              | (125) |
| 3.1   | 摇包内液体运动的类型 .....            | (125) |
| 3.1.1 | 摇包脱铬研究的背景与意义 .....          | (125) |
| 3.1.2 | 测试摇包内液体运动的实验设备和<br>装置 ..... | (126) |
| 3.1.3 | 摇包内液体运动规律 .....             | (128) |
| 3.1.4 | 临界转速 .....                  | (130) |
| 3.1.5 | 10t 摇包的试验 .....             | (134) |
| 3.2   | 液体粘性对摇包内液体波动的影响 .....       | (135) |
| 3.2.1 | 液体的运动形态 .....               | (135) |
| 3.2.2 | 粘度对波形及波高的影响 .....           | (139) |
| 3.3   | 摇包内两相液体间的传质模拟研究 .....       | (143) |
| 3.3.1 | 实验装置和测试方法 .....             | (144) |
| 3.3.2 | 摇包内两相液体的运动规律 .....          | (145) |
| 3.3.3 | 摇包内两相间的传质 .....             | (148) |
| 3.3.4 | 结论 .....                    | (152) |
|       | 参考文献 .....                  | (155) |
| 4     | VOD 过程模型实验研究 .....          | (156) |
| 4.1   | VOD 过程混合特性 .....            | (156) |
| 4.1.1 | 混合特性的模型实验方法 .....           | (156) |
| 4.1.2 | 搅拌功率计算 .....                | (159) |
| 4.1.3 | 影响 VOD 过程混合特性的因素 .....      | (161) |
| 4.2   | 熔池气—液界面的测定和数学模型 .....       | (165) |
| 4.2.1 | 熔池气—液界面位置测定 .....           | (165) |
| 4.2.2 | VOD 过程气—液边界模型的试验结果 .....    | (167) |

|       |                                       |       |
|-------|---------------------------------------|-------|
| 4.3   | VOD 过程传质数学模拟研究 .....                  | (171) |
| 4.3.1 | 传质速率的模型实验方法 .....                     | (172) |
| 4.3.2 | 传质模型 .....                            | (172) |
| 4.3.3 | 影响 VOD 过程传质速率的因素 .....                | (174) |
|       | 参考文献 .....                            | (177) |
| 5     | 转炉过程模型实验研究 .....                      | (179) |
| 5.1   | 氧气炼钢过程中射流对熔池作用的模型<br>实验研究 .....       | (179) |
| 5.1.1 | 射流超音速核心流长度 .....                      | (179) |
| 5.1.2 | 超音速射流对熔池的穿透作用 .....                   | (183) |
| 5.1.3 | 热试验 .....                             | (187) |
| 5.2   | 转炉二次燃烧双流道氧枪多股射流<br>流场特性 .....         | (188) |
| 5.2.1 | 二次燃烧氧枪多股射流特性的实验<br>测试 .....           | (189) |
| 5.2.2 | 测试结果分析 .....                          | (190) |
| 5.3   | 氧气炼钢过程中超音速射流湍流特性的<br>实验研究 .....       | (196) |
| 5.3.1 | 脉动速度 .....                            | (197) |
| 5.3.2 | 湍流强度 .....                            | (201) |
| 5.3.3 | 自相关系数 .....                           | (203) |
| 5.4   | 细孔多管式底吹元件的流动特性实验<br>研究 .....          | (205) |
| 5.4.1 | 实验条件和试验装置 .....                       | (205) |
| 5.4.2 | 试验结果 .....                            | (207) |
| 5.4.3 | 热阻塞现象 .....                           | (210) |
|       | 参考文献 .....                            | (212) |
| 6     | 有色金属冶炼中某些过程的模型实验研究 .....              | (214) |
| 6.1   | 氧气底吹连续炼铅模型实验研究 I<br>——底吹喷嘴的合理距离 ..... | (214) |

|       |                    |       |
|-------|--------------------|-------|
| 6.1.1 | 模型实验装置和实验方法        | (215) |
| 6.1.2 | 喷嘴合理距离的讨论          | (219) |
| 6.2   | 氧气底吹连续炼铅模型实验研究Ⅱ    |       |
|       | ——隔墙的合理布置          | (222) |
| 6.2.1 | 氧化段停留时间分布的测定       | (222) |
| 6.2.2 | 湍流扩散模型             | (224) |
| 6.2.3 | 实验参数的选择            | (225) |
| 6.2.4 | 对影响氧化段返混及停留时间的讨论   | (227) |
| 6.3   | 侧吹熔池炼铜反应器流动特性的模型   |       |
|       | 实验研究               | (230) |
| 6.3.1 | 实验研究内容和方法          | (231) |
| 6.3.2 | 喷射区中心轨迹            | (232) |
| 6.3.3 | 侧吹熔池炼铜反应炉的设计参数     | (234) |
| 6.4   | 浸入式氧枪喷射条件下梨形缓冷结晶器内 |       |
|       | 渣液循环流场的研究          | (241) |
| 6.4.1 | 梨形容器内流场显示          | (241) |
| 6.4.2 | 梨形缓冷结晶器中渣液流动的      |       |
|       | 数学模拟               | (242) |
| 6.4.3 | 梨形容器内液体流场的特点       | (247) |
| 6.5   | 搅拌法炉外脱硫的水模型实验研究    | (252) |
| 6.5.1 | 试验的相似条件            | (252) |
| 6.5.2 | 测试粒子混合浓度的试验装置      | (255) |
| 6.5.3 | 粒子混合浓度的影响因素        | (256) |
| 6.6   | 底吹过程喷射区含气率分布及气—液   |       |
|       | 上升速度模型             | (262) |
| 6.6.1 | 两相区含气率和上升速度的测量     | (262) |
| 6.6.2 | 喷射区内气—液上升速度的物理模型   | (267) |
| 6.7   | 底吹熔池自由表面状态的数学模型    | (270) |
| 6.7.1 | 自由表面状态的测量          | (271) |
| 6.7.2 | 数学模型               | (271) |

|          |                           |              |
|----------|---------------------------|--------------|
| 6.7.3    | 模型的计算结果 .....             | (274)        |
|          | 参考文献 .....                | (276)        |
| <b>7</b> | <b>在线测量系统 .....</b>       | <b>(280)</b> |
| 7.1      | 常用传感器 .....               | (281)        |
| 7.1.1    | 压力传感器 .....               | (281)        |
| 7.1.2    | 测温传感器 .....               | (282)        |
| 7.1.3    | 光电传感器 .....               | (282)        |
| 7.1.4    | 光电频率转速传感器 .....           | (283)        |
| 7.2      | 信号调理器 .....               | (284)        |
| 7.2.1    | 运算放大电路 .....              | (284)        |
| 7.2.2    | 电源的制作 .....               | (288)        |
| 7.3      | 微机接口技术 .....              | (290)        |
| 7.3.1    | PIO 接口 .....              | (291)        |
| 7.3.2    | D/A 转换 .....              | (294)        |
| 7.3.3    | 多路开关 .....                | (295)        |
| 7.3.4    | 采样—保持器 .....              | (296)        |
| 7.3.5    | A/D 转换器 .....             | (298)        |
| 7.4      | 外设控制单元 .....              | (299)        |
| 7.4.1    | 开关的控制 .....               | (300)        |
| 7.4.2    | 步进电机的控制 .....             | (300)        |
| 7.4.3    | 外设位移机构 .....              | (305)        |
| 7.4.4    | 电动机的调速 .....              | (305)        |
| 7.5      | 软件设计方法 .....              | (306)        |
| 7.5.1    | 问题定义 .....                | (306)        |
| 7.5.2    | 程序设计和编码 .....             | (307)        |
| 7.5.3    | 验证程序和修正程序 .....           | (308)        |
| 7.5.4    | BASIC 语言调用机器语言子程序方法 ..... | (308)        |
| 7.6      | 大型氧枪多股射流流场测试系统 .....      | (312)        |
| 7.6.1    | 测试原理和测量内容 .....           | (312)        |
| 7.6.2    | 多股射流流场测试装置 .....          | (313)        |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| 7.7 大型转炉氧枪多股射流三维流场的数<br>据与图形化处理..... | (318) |
| 7.7.1 测试要求与功能 .....                  | (318) |
| 7.7.2 网格化处理 .....                    | (319) |
| 7.7.3 图形处理原理及软件 .....                | (319) |
| 7.7.4 应用实例 .....                     | (322) |
| 7.8 气—液两相流流动特性的在线测量系统.....           | (324) |
| 7.8.1 测量系统 .....                     | (325) |
| 7.8.2 在线测量系统的应用 .....                | (327) |
| 参考文献 .....                           | (333) |
| 索引.....                              | (336) |
| 主要符号表.....                           | (339) |

# 1

## 模型实验研究的理论基础

由于计算机技术的飞跃发展,促使科学实验和物理现象的分析方法也有了很大的跃进。过去进行科学实验时,一些物理量的测试必须使用专用的仪器,并采用人工记录或仪器记录,然后用大量的时间和人力来整理和分析这些测试数据。现在实验数据可用微型传感器或微型探针,只要能取得电信号,就可以直接应用微型计算机采集,不必经过二次仪表,通过模拟/数字量的转换和编制的程序可直接得到所需要的温度、压力、速度、流量等数据及曲线或图形。甚至整个测试过程也可通过计算机用数字/模拟量转换来控制,自动完成<sup>[1]</sup>,比过去更加快捷而且精确。

现代化的大型生产设备,特别是化工冶金过程,受高温和恶劣环境的限制,像冶金过程中的大型高炉和大型转炉、电炉、炼铅炉、炼铜炉,往往很难直接进行试验和测试。因此,常常采用相似的模型实验来近似进行研究。其他领域,如飞机和船舶、航天和宇宙飞船的研究,要在地球上实现无重力场的实验也是困难的。大型桥梁设计等,在实物尚不存在之前进行实物实验是不可能的。对于这类工程问题,只有利用相似原理和模型实验研究的办法来取得所需要的可靠信息和数据,为设计大型设备提供依据。

对任何一种物理过程都可以用模拟实验的方法来研究。模拟包括数学模拟和物理模拟(即模型实验法)。

把某一过程或现象用数学方程式或一组微分方程组来描述,然后进行简化,忽略次要或影响很小的因素,抓住主要关键,确定边界条件求解,阐明主要过程的实质或规律,叫做数学模拟。然而,经过数学模型或数值求解的结果是否符合实际或与实际相差多少,有时还必须通过模型实验来验证或修正。有些系数的确定及适用范围也需要用模型实验来确定。可见,模型实验研究是很

重要的手段。

所谓模型实验研究方法,就是应用方程分析或因次分析的方法导出相似准则,并在根据相似原理建立的模型上进行试验,把得到的数据按相似准则整理,求出相似准则之间的函数关系式,再将此函数关系推广到实型设备上,从而近似地认识实型设备内在规律的一种研究方法。

一般来说,有两种方法来求相似准则,即求有关模型的设计、制作和实验的准则。一种方法是根据支配现象的微分方程求出无因次数,然后找出相似准则<sup>[2,3]</sup>。还有一种新的方法是首先选定支配现象的物理法则,然后根据这些法则直接导出相似准数<sup>[4]</sup>。后者比前者简单得多,而且容易理解现象的物理意义。另外,还可以解决如何放宽不相容的相似准则(即不可能实现的模型设计的准则)问题,这也是模型实验中最困难的问题之一。

## 1.1 相似的基本概念

### 1.1.1 几何相似

相似的概念最早是由初等几何学中引出来的。在几何学中定义两个图形相似(如图 1-1 所示的多边形的相似),其对应边必成比例,其相应的角也必相等。

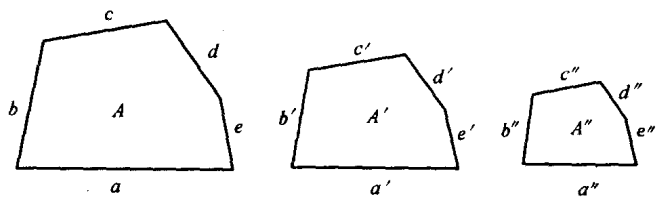


图 1-1 相似多边形

由此可知,如果两个图形或两个物体相似,则其对应部分的比值必相等,且都等于一个常数。这就叫做几何相似。图 1-1 中: