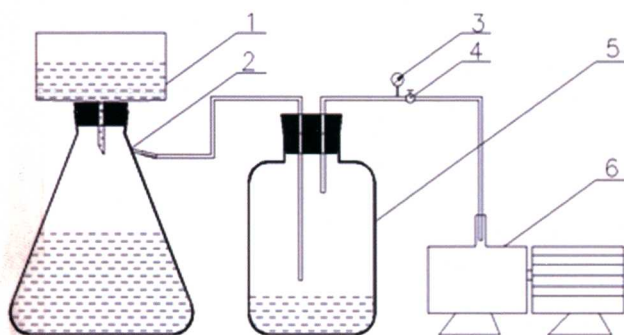
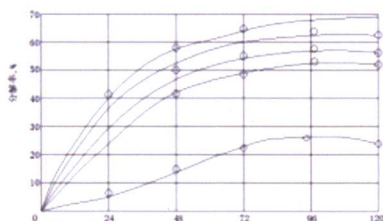




普通高等院校“十三五”规划教材

冶金工程专业课 实验教程

马雅琳 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

非外借

冶金工程专业课实验教程

马雅琳 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

图书在版编目 (C I P) 数据

冶金工程专业课实验教程 / 马雅琳编著. --长沙:
中南大学出版社, 2017. 8
ISBN 978 - 7 - 5487 - 2980 - 8

I. ①冶… II. ①马… III. ①冶金—实验—高等学校—教材
IV. ①TF - 33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 212080 号

冶金工程专业课实验教程

YEJIN GONGCHENG ZHUANYEKE SHIYAN JIAOCHENG

马雅琳 编著

☐责任编辑 胡 炜

☐责任印制 易红卫

☐出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

☐印 装 长沙市宏发印刷有限公司

☐开 本 787 × 1092 1/16 ☐印张 8 ☐字数 205 千字

☐版 次 2017 年 8 月第 1 版 ☐2017 年 8 月第 1 次印刷

☐书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 2980 - 8

☐定 价 24.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

内容简介

本书是与冶金工程专业学生必修的专业课配套的实验教程,内容涉及无机化学、分析化学、物理化学、冶金学、实验设计与数据处理等基础理论和专业知识。实验内容包括重金属冶金学、轻金属冶金学、稀有金属冶金学以及钢铁冶金四个部分的专业课实验 28 个。本书可以帮助学生验证、巩固和加深课堂所学的基础理论和专业知识,掌握基本的冶金实验研究方法和技能,培养学生分析和解决冶金工程实际问题的能力,为学生从事冶金科学研究打下初步基础。本书也可供从事冶金专业相关科研及生产单位的工程技术人员参考。

前 言

加快建成一批世界一流大学和一流学科,是我国现代教育改革和发展规划的战略方针。本科教育的首要任务就是把学生培养成适应国家现代化建设并具有综合素质的人才,而实验教学在“双一流”新工科学科建设中恰恰是确保本科教学质量,实现素质教育、能力塑造和创新人才培养的重要环节,在培养学生实验技能、创新能力和综合研究能力等方面发挥着不可替代的作用。

中南大学冶金与环境学院的冶金工程专业为国家级综合改革试点专业和教育部“卓越工程师教育培养计划”的首批专业,在2016年通过了中国工程教育委员会专业认证协会的专业认证。为了适应冶金工程专业“双一流”新工科专业的建设,积极探索人才培养新模式,对实验课程进行新的规划和改革,加强实验教学过程中的研究性和创新性,编写了《冶金工程专业课实验教程》。编写本教材的目的在于,帮助学生验证、巩固和加深课堂所学的基础理论和专业知识,掌握基本的冶金实验研究方法,提高综合分析问题和解决问题的能力,养成严肃认真、实事求是的科学态度和严谨的工作作风,使学生具有从事冶金科学研究的初步能力,为日后继续深造、从事冶金及相关行业的教学、科研与开发打下坚实的基础。

本教材是与冶金工程专业学生必修的专业课配套的实验教程,内容涉及无机化学、分析化学、物理化学、冶金学、实验设计与数据处理等基础理论和专业知识。全书包括重金属冶金学、轻金属冶金学、稀有金属冶金学以及钢铁冶金四个部分的专业课实验,共列出硫化铜精矿的造钼熔炼、硫化锌精矿沸腾焙烧、硫化铅精矿富氧直接熔炼实验、硫化锌精矿高压酸浸出、方铅矿的三氯化铁浸出、含金银原料的氰化过程、贵铅坩埚熔炼、酸性水溶液中铁分离实验、用硫和二氧化硫从镍-钴-铜硫酸盐溶液中除铜实验、从铝土矿中制备 Al_2O_3 系列实验、钨矿浸出制备钨系列实验、氧化镁真空还原、铁水脱硫脱磷实验、铁矿石性能实验、铁矿粉烧结实验、炼钢工艺实验等28个实验项目,系统地介绍了金属的熔炼、浸出、萃取、电解、制备等实验过程的研究方法,也为我院2016版冶金工程专业培养方案中专业课实验的独立开课打下了基础。

本教材的编写总结了我院冶金工程专业专业课堂教学中多年的实践和探索的经验,也选用了部分冶炼企业一些现行的先进工艺流程,融合了冶金与材料学科发展的最新成果,经过反复论证,使实验教学内容在具有实用性、综合性、设计性的同时,也具备了创新性和前瞻性。

本书在编写过程中得到了湛菁、孙召明、陈爱良、刘智勇、戴曦、张贵清、田忠良、彭志宏、齐天贵、周向阳等老师的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编著者

2017年6月26日

目 录

实验一 硫化铜精矿的造钼熔炼	(1)
1.1 实验目的	(1)
1.2 实验原理	(1)
1.3 实验仪器	(1)
1.4 安全措施	(2)
1.5 实验步骤	(2)
1.6 冰铜中铜、铁、硫的分析	(2)
1.6.1 钢铁连续测定冰铜中铜、铁含量	(2)
1.6.2 燃烧法测定冰铜中的硫含量	(3)
1.7 实验报告内容要求	(3)
1.8 思考题	(3)
实验二 硫化锌精矿的沸腾焙烧	(4)
2.1 实验目的	(4)
2.2 实验原理	(4)
2.3 仪器设备与实验方法	(6)
2.4 实验步骤	(7)
2.5 试样的制备与主要元素的分析方法	(8)
2.6 实验注意事项	(8)
2.7 实验数据整理	(8)
2.8 实验报告内容要求	(8)
2.9 思考题	(8)
实验三 硫化铅精矿富氧直接熔炼实验	(9)
3.1 实验目的	(9)
3.2 实验原理	(9)
3.3 仪器设备及装置	(9)
3.4 实验步骤	(9)
3.5 实验注意事项	(10)
3.6 实验报告内容要求	(10)

实验四 硫化锌精矿高压酸浸出 (11)

4.1 实验目的 (11)

4.2 实验原理 (11)

4.3 仪器设备 (12)

4.4 实验步骤 (12)

4.5 实验注意事项 (12)

4.6 实验报告内容要求 (12)

4.7 思考题 (13)

实验五 方铅矿的三氯化铁浸出 (14)

5.1 实验目的 (14)

5.2 实验原理 (14)

5.3 仪器设备与实验材料 (15)

5.3.1 仪器设备 (15)

5.3.2 实验材料 (15)

5.4 实验步骤 (15)

5.5 实验注意事项 (16)

5.6 实验记录 (16)

5.7 数据处理与实验报告内容要求 (17)

5.7.1 数据处理 (17)

5.7.2 实验报告内容要求 (17)

5.8 思考题 (17)

实验六 含金银原料的氰化过程 (18)

6.1 实验目的 (18)

6.2 实验原理 (18)

6.3 仪器设备 (18)

6.4 实验步骤 (18)

6.5 实验注意事项 (19)

6.6 实验报告内容要求 (19)

实验七 贵铅坩埚熔炼 (20)

7.1 实验目的 (20)

7.2 实验原理 (20)

7.3 熔炼过程物料的计算 (21)

7.4 实验步骤 (23)

7.5 实验报告内容要求 (23)

实验八 酸性水溶液中铁分离实验	(24)
8.1 实验目的	(24)
8.2 实验原理	(24)
8.3 仪器设备与实验材料	(25)
8.3.1 仪器设备	(25)
8.3.2 实验材料	(25)
8.4 实验步骤	(26)
8.5 实验报告内容要求	(26)
实验九 用硫和二氧化硫从镍 - 钴 - 铜硫酸盐溶液中除铜	(27)
9.1 实验目的	(27)
9.2 实验原理	(27)
9.3 仪器设备与实验装置	(27)
9.4 实验步骤	(28)
9.5 注意事项	(28)
9.6 数据处理与实验报告内容要求	(29)
9.6.1 数据处理	(29)
9.6.2 实验报告内容要求	(29)
9.7 思考题	(29)
实验十 P204 萃取分组分离稀土元素	(30)
10.1 实验目的	(30)
10.2 实验原理	(30)
10.3 仪器设备与实验材料	(33)
10.3.1 仪器设备	(33)
10.3.2 实验材料	(33)
10.4 实验步骤	(33)
10.5 注意事项	(34)
10.6 数据处理与实验报告内容要求	(34)
10.6.1 数据处理	(34)
10.6.2 实验报告内容要求	(35)
10.7 思考题	(35)
实验十一 铜电解精炼——电流效率的测定	(36)
11.1 实验目的	(36)
11.2 实验原理	(36)
11.3 仪器设备与实验材料	(37)
11.3.1 仪器设备	(37)

11.3.2 实验材料	(37)
11.4 实验步骤	(37)
11.5 数据处理与实验报告内容要求	(38)
11.5.1 数据处理	(38)
11.5.2 实验报告内容要求	(38)
实验十二 硫酸锌溶液电沉积实验	(39)
12.1 实验目的	(39)
12.2 实验原理	(39)
12.3 实验装置与实验材料	(40)
12.3.1 实验装置	(40)
12.3.2 实验材料	(40)
12.4 实验步骤	(41)
12.5 数据处理与实验报告内容要求	(41)
12.5.1 数据处理	(41)
12.5.2 实验报告内容要求	(42)
12.6 思考题	(42)
实验十三 铝土矿拜耳法溶出实验	(43)
13.1 实验目的	(43)
13.2 基本原理	(43)
13.3 仪器设备与实验材料	(43)
13.3.1 仪器设备	(43)
13.3.2 实验材料	(44)
13.4 配料计算	(44)
13.5 实验步骤及注意事项	(44)
13.5.1 实验步骤	(44)
13.5.2 实验注意事项	(44)
13.6 实验报告内容要求	(44)
13.7 思考题	(45)
实验十四 铝酸钠溶液晶种分解法制备 Al_2O_3 实验	(46)
14.1 实验目的	(46)
14.2 实验原理	(46)
14.3 实验步骤	(47)
14.4 注意事项	(48)
14.5 实验报告内容要求	(48)
14.6 思考题	(48)

实验十五 熔盐铝电解实验	(49)
15.1 实验目的	(49)
15.2 实验原理	(49)
15.3 仪器设备与实验装置	(50)
15.3.1 仪器设备	(50)
15.3.2 实验装置	(50)
15.4 实验步骤	(51)
15.5 实验报告内容要求	(51)
实验十六 $\text{Na}_3\text{AlF}_6 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 熔体中 Al_2O_3 分解电压的测定	(52)
16.1 实验目的	(52)
16.2 实验原理	(52)
16.3 仪器设备	(53)
16.4 实验步骤及注意事项	(54)
16.4.1 实验步骤	(54)
16.4.2 实验注意事项	(54)
16.5 数据处理与实验报告内容要求	(55)
实验十七 钨矿碱压煮浸出实验	(56)
17.1 实验目的	(56)
17.2 实验原理	(56)
17.3 仪器设备	(58)
17.4 氢氧化钠的分解流程	(59)
17.5 实验步骤(碱压煮工艺)	(59)
17.6 实验报告内容要求	(60)
17.7 思考题	(60)
实验十八 膜法回收钨矿苛性钠浸出液游离碱实验	(61)
18.1 实验目的	(61)
18.2 实验原理	(61)
18.3 仪器设备及实验材料	(62)
18.3.1 仪器设备	(62)
18.3.2 实验材料	(62)
18.4 实验步骤及数据处理	(62)
18.4.1 膜电解实验步骤及数据处理	(62)
18.4.2 扩散渗析实验步骤及数据处理	(63)
18.5 实验报告内容要求	(63)

实验十九 溶剂萃取法从钨酸钠溶液中制取钨酸铵溶液实验	(64)
19.1 实验目的	(64)
19.2 实验原理	(64)
19.3 仪器设备与实验材料	(65)
19.3.1 仪器设备	(65)
19.3.2 实验材料	(65)
19.4 实验步骤	(65)
19.5 注意事项	(66)
19.6 实验报告内容要求	(66)
实验二十 离子交换法制取仲钨酸铵	(67)
20.1 实验目的	(67)
20.2 实验原理	(67)
20.3 实验仪器及连接图	(68)
20.4 实验步骤	(69)
20.5 数据处理与实验报告内容要求	(69)
20.5.1 数据处理	(69)
20.5.2 实验报告内容要求	(70)
20.6 思考题	(70)
实验二十一 氢气还原法制备钨粉	(71)
21.1 实验目的	(71)
21.2 实验原理	(71)
21.3 实验装置和实验材料	(73)
21.3.1 实验装置	(73)
21.3.2 实验材料	(74)
21.4 实验步骤	(74)
21.5 实验报告内容要求	(74)
21.6 思考题	(75)
实验二十二 氧化镁真空还原实验	(76)
22.1 实验目的	(76)
22.2 实验原理	(76)
22.3 实验设备	(76)
22.4 物料计算	(77)
22.5 实验步骤与注意事项	(78)
22.5.1 实验步骤	(78)
22.5.2 注意事项	(78)

22.6 实验报告内容要求	(78)
实验二十三 铁水脱硫实验	(79)
23.1 实验目的	(79)
23.2 实验原理	(79)
23.2.1 脱硫的重要性	(79)
23.2.2 脱硫的基本原料	(79)
23.3 实验设备	(81)
23.4 实验步骤	(82)
23.5 实验报告内容要求	(83)
实验二十四 铁水脱磷实验	(84)
24.1 实验目的	(84)
24.2 实验原理	(84)
24.2.1 铁水脱磷	(84)
24.2.2 还原脱磷	(84)
24.2.3 氧化脱磷	(84)
24.3 实验步骤	(85)
24.4 实验设备	(85)
24.5 实验报告内容要求	(85)
实验二十五 铁矿石还原实验	(87)
25.1 实验目的	(87)
25.2 实验原理	(87)
25.3 仪器设备	(87)
25.4 实验步骤	(88)
25.5 实验报告内容要求	(89)
实验二十六 铁矿粉烧结实验	(91)
26.1 实验目的	(91)
26.2 实验原理	(91)
26.3 实验装置	(92)
26.4 实验方法与实验步骤	(92)
26.4.1 实验方法	(92)
26.4.2 实验步骤	(93)
26.5 实验数据处理	(93)
26.6 实验报告内容要求	(94)
26.7 思考题	(95)

实验二十七 铁矿石冶金性能综合实验	(96)
27.1 实验目的	(96)
27.2 实验内容	(96)
27.3 实验设备及操作	(96)
27.3.1 铁矿石 900℃ 间接还原性能 RI 检测实验	(96)
27.3.2 铁矿石 500℃ 低温还原粉化性能 RDI 检测实验	(99)
27.3.3 球团矿 900℃ 还原膨胀 RSI 性能检测实验	(99)
27.3.4 块矿热裂性能检测实验	(100)
27.3.5 铁矿石荷重还原软化温度测定实验	(100)
27.3.6 焦炭反应性及反应后强度	(102)
27.4 气体的制备与净化	(103)
27.5 铁矿石冶金性能实验报告内容要求	(103)
实验二十八 炼钢工艺实验	(105)
28.1 实验目的	(105)
28.2 实验原理	(105)
28.3 实验装置	(106)
28.4 实验步骤	(106)
28.5 实验报告内容要求	(108)
28.6 实验中要注意的问题	(108)
28.7 思考题	(108)
附录 1 溶液及固体物料中的铁分析方法	(109)
附录 2 铝酸钠溶液的化学分析方法	(112)
参考文献	(115)

实验一 硫化铜精矿的造钼熔炼

1.1 实验目的

通过实验学习有关造钼熔炼的基本反应，熟悉造钼熔炼的主要技术经济指标，掌握脱硫率、铜熔炼直收率、冰铜品位、渣含铜、冰铜及炉渣的产出率等的计算方法，并编制造钼熔炼的物料平衡表。

1.2 实验原理

硫化铜矿造钼熔炼是将硫化铜精矿与适当的熔剂混合后，置于高温(1300℃)熔炼炉中，经过一系列物理化学变化后，得到熔炼产物冰铜、炉渣和 SO₂，同时使贵金属金、银进入冰铜以利于后续过程回收。其原理是：铜对硫的亲合力大于铜对氧的亲合力，铁对氧的亲合力大于铁对硫的亲合力。在有足够的硫存在时，几乎所有的铜都会形成 Cu₂S，其中余下的硫与铁反应生成 FeS，之后 FeS 便与 Cu₂S 一起形成冰铜，且余下的铁被氧气氧化生成 FeO，并进一步与熔剂(一般为 SiO₂)化合，形成一种硅酸盐炉渣。熔炼之后，因冰铜和炉渣两种熔体互不相溶，且它们的比重不相同，故可经过澄清分层分别获得冰铜和炉渣。其主要反应式为：



1.3 实验仪器

图 1-1 为硫化铜矿的造钼熔炼设备连接示意图。所用仪器有：①高温电炉(≥1300℃)及控温器；②高温燃烧管状电炉(≥1200℃)及控温器；③长柄坩埚钳；④刚玉坩埚或石墨坩埚；⑤铸模；⑥铁研钵及瓷研钵；⑦分析天平等。

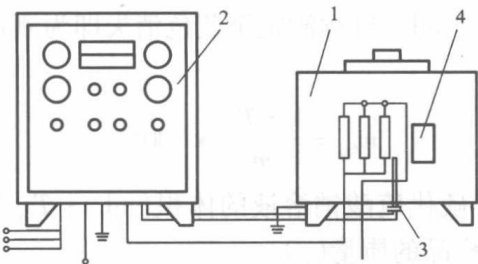


图 1-1 造钼熔炼设备连接示意图

1—高温电炉；2—可控硅温度控制器；3—热电偶；4—坩埚

1.4 安全措施

- (1) 遵循高温操作规程, 熔炼操作时需戴墨镜和石棉手套或帆布手套。
- (2) 严格按升温制度进行炉子升温, 并注意用电安全。
- (3) 防止腐蚀性化学药品的危害。
- (4) 熔炼过程有 SO_2 逸出, 通风开关必须一直打开。

1.5 实验步骤

- (1) 升温: 仔细阅读温度控制仪的操作说明书, 按说明书中程序进行升温。
- (2) 配料: 在升温的同时, 根据冶金计算结果准确地称取试料(一般为硫化铜精矿)、添加料(如铜焙砂、转炉渣等)和熔剂(石英砂、石灰), 经充分混合后装入已预热的坩埚内(采用刚玉坩埚时需预先称好干重), 并做好数据记录。
- (3) 进料: 当炉温升至 $900 \sim 1000^\circ\text{C}$ 时即可将装好料的坩埚放入炉内。
- (4) 观察: 当炉料入炉后, 仔细观察熔炼过程中发生的现象, 并做好记录。
- (5) 出料: 炉温继续上升, 使物料熔化后在 $1280 \sim 1300^\circ\text{C}$ 温度下恒温澄清 20 min 即可取出, 并迅速倒入已预热的铸模内或在原坩埚内缓慢冷却。
- (6) 取样: 待熔体冷却后(切忌用水强制冷却), 将其从铸模内倒出, 用水锤将冰铜与炉渣分开并分别称重(注意: 如果用刚玉坩埚, 还有一小部分炉渣黏结在坩埚壁上, 也应称量其质量), 取出部分冰铜和炉渣按阿基米德原理测定各自的比重, 余下的冰铜取样并磨细至 120 ~ 150 目, 作为测定 Cu、Fe、S 含量的试样。

1.6 冰铜中铜、铁、硫的分析

1.6.1 钢铁连续测定冰铜中铜、铁含量

(1) 精确称取样品 0.1000 g 于 500 mL 三角烧瓶中, 加浓硝酸 3 mL、硫酸(1:1) 1.5 mL 及溴水 2 ~ 3 滴, 在电热板上缓慢加热使之溶解, 蒸发至冒尽浓白烟, 稍冷, 加水 20 ~ 25 mL, 加热使盐类溶解, 然后加入 0.2 g 尿素煮沸 2 ~ 3 min, 取下冷却, 小心滴加氨水(1:1)中和至生成稳定的铁沉淀物为止, 加入氟氢化铵溶液(25%) 2 mL 左右, 摇匀使 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沉淀消失, 用水吹洗, 加入碘化钾 2 g, 摇匀, 立即用 0.05 mol/L 的硫代硫酸钠标准溶液滴定至溶液呈淡黄色后, 加入 0.5% 淀粉溶液 3 mL, 继续滴定至蓝色消失即为测定铜的终点, 样品中 Cu 的含量按下式计算:

$$w_{\text{Cu}} = \frac{V \cdot T_{\text{Cu}}}{m} \times 100\%$$

式中: V 为滴定时消耗的标准硫代硫酸钠溶液的体积(mL); T_{Cu} 为标准硫代硫酸钠溶液对铜的滴定度(g/mL); m 为称取样品的质量(g)。

(2) 在滴定铜之后的溶液中, 加入 6 滴饱和碳酸铵溶液, 再立即加入三氯化铝溶液(60%) 1 mL, 摇匀, 放置 5 min 后用 0.05 mol/L 的标准硫代硫酸钠溶液滴定至蓝色消失即为滴定铁的终点。样品中 Fe 的含量按下式计算:

$$w_{\text{Fe}} = \frac{V \cdot T_{\text{Fe}}}{m} \times 100\%$$

式中： V 为滴定时消耗的标准硫代硫酸钠溶液体积(mL)； T_{Fe} 为标准硫代硫酸钠溶液对铁的滴定度(g/mL)； m 为称取的样品质量(g)。

1.6.2 燃烧法测定冰铜中的硫含量

(1) 炉子升温参照造钼熔炼过程的升温程序。

(2) 精确称取 0.100 g 样品均匀地放入瓷舟内。

(3) 取 3 个 250 mL 的锥形瓶，在其中两个中各装入 150 mL 0.5% 双氧水及 2~3 滴混合指示剂。准备好一个空瓶，并用胶管、玻璃管及橡皮塞串联好。

(4) 当炉温升至 1100℃ 左右时，迅速将装样瓷舟送入炉管内高温区，马上塞紧塞子，开动真空泵将经过净化洗涤后的空气抽入炉内，控制空气抽入速度，直到观察到连续起泡时，停止抽入空气，在该温度下燃烧 10 min 左右即可取出瓷舟。

(5) 将锥形瓶中的溶液用 0.1 mol/L 的氢氧化钠标准溶液滴定至出现亮绿色即为终点，样品中 S 的含量按下式计算：

$$w_{\text{S}} = \frac{V \cdot T_{\text{S}}}{m} \times 100\%$$

式中： V 为消耗的标准氢氧化钠溶液的体积(mL)； T_{S} 为氢氧化钠标准溶液对硫的滴定度(g/mL)； m 为称取的样品质量(g)。

1.7 实验报告内容要求

(1) 实验原理及冶金计算。

(2) 绘出设备连接示意图。

(3) 整理实验数据，填写实验记录表。

(4) 对实验结果(脱硫率、回收率)进行评述。

1.8 思考题

(1) 如何提高冰铜品位？

(2) 为什么冰铜品位越高渣含铜越高？

(3) 为什么加入转炉渣能提高造钼熔炼的脱硫率？

实验二 硫化锌精矿的沸腾焙烧

2.1 实验目的

- (1) 采用电导率法间接测定硫化锌精矿氧化焙烧速度与时间变化关系的曲线。
- (2) 采用化学分析法直接测定不同时间下的硫化锌精矿氧化焙烧转化率。
- (3) 利用所得数据以及由反应转化率—无因次停息时间的函数关系求得的公式或反应器设计曲线，推测速率机理和实验装置的放大设计。
- (4) 熟悉实验室沸腾焙烧设备和烟气中 SO_2 分析设备的使用。

2.2 实验原理

硫化矿物的焙烧是火法冶金中的重要过程，对焙烧过程的主要反应中的非催化反应来说，生成物 S 要残留在反应物 B 上，S 上通常会产生气孔或龟裂，从而降低了固相扩散的作用。其反应通式如下：



对于 $\text{A}_{(\text{气})} + \text{B}_{(\text{固})} \longrightarrow \text{R}_{(\text{气})} + \text{S}_{(\text{固})}$ 一类反应，反应过程中，颗粒可能长大、缩小或不变。颗粒粒度基本不变的例子有硫化矿的焙烧、铁矿石的还原、石灰石的煅烧等。

在固体颗粒连续进料的操作中，出口物料由不停留时间产出的不同反应转化率的颗粒组成。所以，这种物料的平均转化率取决于：

- ① 在反应器的条件下，单个颗粒的反应速率；
- ② 在反应器中固体颗粒的停留时间分布。

固体颗粒反应的动力学模型中，固体颗粒反应可表示为两种极端情况，一种为致密固体的未反应核模型（气体反应物进入反应颗粒的扩散是缓慢地进行的，反应区局限于一个薄层，这个薄层由外表面逐渐进入颗粒内部），另一种为多孔固体的连续反应模型（气体反应物扩散进入颗粒的速度很快，因而使得固体反应物 B 的消耗在整个颗粒上大体是均匀的），实际反应的情况是介于这两种极端之间。由于这两种模型易于处理，因而在本实验中得以采用。以固体颗粒保持不变的连续反应模型为例，推导速率公式。

气体反应物 A 存在于整个颗粒中，并能在任何地方与固体反应物 B 反应，以 B 的消耗速率来建立方程，当气体反应物为均匀浓度时，速率表达式为：

$$\frac{dX_B}{dt} = K_y C_A (1 - X_B) \quad (2-3)$$

式中： X_B 为反应物 B 的转化率； C_A 为气体反应物 A 的浓度，由于 C_A 为常数，故可积分得到