高级技工学校教材

无机物工艺

马 瑛 主编

化学工业出版社
教材出版中心
·北京·

需要全本请访问 www.ertongbook.com

图书在版编目（CIP）数据

无机物工艺/马瑛主编. —北京：化学工业出版社，
2005.12
高级技工学校教材
ISBN 7-5025-8069-7

Ⅰ. 无… Ⅱ. 马… Ⅲ. 无机物-生产工艺-技工学校-教材 Ⅳ. TQ110.6

中国版本图书馆 CIP **数据核字**（2005）**第** 154909 **号**

高级技工学校教材
无机物工艺
马 瑛 主编
责任编辑：于 卉 何 丽
文字编辑：林 丹
责任校对：陈 静
封面设计：于 兵

*

化学工业出版社
教材出版中心 **出版发行**
（**北京市朝阳区惠新里** 3 **号 邮政编码** 100029）
购书咨询：（010）64982530
（010）64918013
购书传真：（010）64982630
http://www.cip.com.cn

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印装
开本 787mm×1092mm 1/16 **印张** 17¾ **字数** 450 **千字**
2006 **年** 1 **月第** 1 **版** 2006 **年** 1 **月北京第** 1 **次印刷**
ISBN 7-5025-8069-7
定 价：29.00 **元**

版权所有 违者必究
该书如有缺页、倒页、脱页者，本社发行部负责退换

全国化工高级技工教材编审委员会

主　任　毛民海

副主任　孔广友　王黎明　刘　雄　张文兵　苏靖林　曾繁京
律国辉

委　员　（排名不分先后顺序）

毛民海　孔广友　王黎明　刘　雄　张文兵　苏靖林
曾繁京　律国辉　王跃武　王万侠　李文原　胡仲胜
雷　俊　林远昌　李晓阳　韩立君　武嘉陵　简　祁
周仕安　米俊峰　王春湘　黄益群　郑　骏　王　宁
程家树　金跃康　韩　谦　张　荣　马武飚　宋易骏
何迎健　董吉川　郭养安

前　言

本书是依据2003年劳动和社会保障部颁发的《高级技工学校教学计划（试行）》，由全国化工高级技工教育教学指导委员会组织编写的全国化工高级技工化工工艺专业教材，亦可作为全国化工企业工人培训教材和参考书。

本书分三篇：酸（硫酸、硝酸）、化学肥料（尿素、硝铵、磷肥、钾肥、复合肥料、液体肥料）、碱（纯碱、烧碱）。本教材旨在使学生进一步掌握无机物生产过程的基本原理，影响工艺的因素，操作指标的确定，工艺流程，主要设备构造及操作要点，开停车和不正常过程的调节与一般事故的分析处理。掌握一定的工艺计算技能。

本教材在编写过程中，力求做到知识面与深度相结合，注重理论联系实际，强调工艺特点，介绍近年来的新工艺、新技术和新方法，指出这些工艺过程的发展趋势。书中重点放在分析和讨论生产工艺中反应部分的工艺原理、影响因素、确定工艺条件的依据、反应设备的结构特点、流程的组织等内容。对工艺路线、流程的技术经济指标、能量回收利用、副产品的回收利用也做了一定的论述。各章均附有思考题，并提供一定数量的参考文献，以便于学生自学和开阔眼界。鉴于本门课程时数有限，教师可有针对性地选择书中部分内容讲授，其余可供学生自学。

本书由马瑛主编。第一篇、第二篇第四章由赵伟编写，第二篇第三章、第二篇第七章第二节、第三篇第十章由魏葆婷编写，第二篇第五、七章由赵志刚编写，第二篇第六章、第三篇第八、九 章由马瑛编写。姜志生老师主审，对教材提出了宝贵的意见和建议。

吴团生老师为该书流程图的绘制做了大量的工作，编者表示衷心的感谢。

编写本书参考了有关专著与文献（见主要参考资料），在此，谨向作者致以崇高的敬意和诚挚的感谢。

本教材在编写过程中得到中国化工教育协会、化学工业出版社、全国化工高级技工教育教学指导委员会及相关学院领导和同行们的支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者和同行们批评指正。

编　者

2005年8月

目　　录

第一篇　硫酸与硝酸

第一章　硫酸 …… 3
第一节　概述 …… 3
一、硫酸的性质 …… 3
二、硫酸的用途 …… 4
三、硫酸的生产方法 …… 4
第二节　硫铁矿制取二氧化硫炉气 …… 5
一、硫铁矿焙烧的基本原理 …… 5
二、沸腾焙烧的工艺条件 …… 7
三、沸腾焙烧工艺流程及沸腾焙烧炉 …… 7
四、焙烧操作要点和不正常现象处理 …… 9
第三节　炉气的净化与干燥 …… 10
一、炉气的净化 …… 10
二、炉气的干燥 …… 14
第四节　二氧化硫的催化氧化 …… 15
一、二氧化硫催化氧化的基本原理 …… 15
二、二氧化硫氧化的工艺条件 …… 17
三、二氧化硫催化氧化的工艺流程 …… 19
四、二氧化硫转化器 …… 20
五、二氧化硫氧化操作要点和不正常现象处理 …… 21
第五节　三氧化硫的吸收及尾气的处理 …… 22
一、吸收的工艺条件 …… 22
二、吸收工艺流程 …… 24
三、尾气的处理 …… 25
四、干燥吸收过程操作要点和不正常现象处理 …… 26
思考与练习题 …… 27
第二章　硝酸 …… 28
第一节　概述 …… 28
一、硝酸的性质 …… 28
二、硝酸的用途 …… 28
三、硝酸的生产方法 …… 28
第二节　稀硝酸的生产 …… 29
一、氨的接触氧化 …… 29

需要全本请访问 www.ertongbook.com

二、一氧化氮的氧化 …… 39
三、氮氧化物的吸收 …… 41
四、硝酸尾气的处理 …… 45
五、稀硝酸生产的工艺流程 …… 46
第三节　浓硝酸的生产 …… 48
一、从稀硝酸制造浓硝酸 …… 48
二、直接合成法制浓硝酸 …… 49
三、超共沸酸精馏制取浓硝酸 …… 50
思考与练习题 …… 51

第二篇　化 学 肥 料

第三章　尿素 …… 55
第一节　概述 …… 55
一、尿素的性质 …… 55
二、尿素的用途与规格 …… 57
三、尿素的生产方法 …… 57
四、尿素生产对原料的要求 …… 59
第二节　尿素的合成 …… 59
一、尿素合成的基本原理 …… 59
二、合成尿素工艺条件的选择 …… 68
三、尿素合成的工艺流程及主要设备 …… 70
四、尿素合成塔的操作要点和不正常现象处理 …… 72
第三节　未反应物的分离与回收 …… 78
一、减压加热法 …… 78
二、未反应物的回收原理与工艺条件的选择 …… 82
三、未反应物分离回收循环工艺流程及主要设备 …… 86
四、二氧化碳汽提法 …… 90
第四节　尿素溶液的蒸发与造粒 …… 93
一、尿素溶液的蒸发 …… 93
二、尿素的造粒 …… 95
三、蒸发造粒工艺流程 …… 96
四、尿液蒸发与造粒操作要点 …… 97
五、不正常现象处理 …… 99
六、各工序安全操作注意事项 …… 99
思考与练习题 …… 101
第四章　硝酸铵的生产 …… 103
第一节　概述 …… 103
一、硝酸铵的物理化学性质 …… 103
二、硝酸铵的用途 …… 104
三、硝酸铵的生产方法 …… 104
第二节　氨与硝酸中和制造硝酸铵 …… 105
一、基本原理 …… 105

二、中和反应工艺条件的选择…… 105
三、中和操作要点及不正常现象处理…… 106
第三节　稀硝酸铵溶液的蒸发、结晶和干燥…… 107
一、稀硝酸铵溶液的蒸发及工艺条件的选择…… 107
二、硝铵的结晶和干燥…… 107
第四节　硝酸铵生产工艺流程…… 107
一、常压中和三段蒸发造粒法流程…… 108
二、常压中和二段真空蒸发结晶法流程…… 108
三、加压中和无蒸发法流程…… 108
思考与练习题…… 109
第五章　磷肥的生产 …… 110
第一节　概述…… 110
一、磷肥的作用…… 110
二、磷肥的品种及加工方法分类…… 110
三、生产磷肥的主要原料…… 111
第二节　湿法磷酸…… 112
一、湿法磷酸生产的基本原理…… 112
二、二水物法制湿法磷酸…… 113
三、主要技术经济指标核算…… 117
四、湿法磷酸的浓缩…… 117
第三节　酸法磷肥…… 119
一、普通过磷酸钙的生产…… 119
二、重过磷酸钙的生产…… 125
第四节　热法磷酸和热法磷肥…… 127
一、热法磷酸…… 127
二、热法磷肥…… 130
思考与练习题…… 132
第六章　钾肥的生产 …… 133
第一节　概述…… 133
一、钾肥的原料来源…… 133
二、氯化钾和硫酸钾的性质…… 134
第二节　氯化钾…… 134
一、用钾石盐制氯化钾…… 134
二、用光卤石制氯化钾…… 139
第三节　硫酸钾…… 142
一、复分解法生产硫酸钾…… 142
二、以明矾石生产硫酸钾…… 143
思考与练习题…… 144
第七章　复合肥及液体肥料 …… 145
第一节　磷酸铵…… 145
一、磷酸铵的性质…… 145
二、生产磷酸铵的基本化学反应…… 146

三、转鼓氨化流程及主要设备…… 146
四、磷铵生产的操作要点…… 148
第二节　硝酸磷肥…… 149
一、硝酸磷肥生产的基本原理…… 149
二、硝酸磷肥生产的工艺条件…… 149
三、硝酸磷肥的生产方法…… 150
四、间接冷冻法生产硝酸磷肥的工艺流程…… 151
五、主要岗位操作要点…… 152
第三节　复混肥料…… 153
一、混配过程的主要化学反应…… 154
二、复混肥料的原料配料量计算…… 156
三、造粒…… 158
四、复混肥生产的工艺流程…… 159
第四节　液体肥料…… 161
一、液体氮肥…… 162
二、液体复合肥…… 162
思考与练习题…… 163

第三篇　纯碱和烧碱

第八章　氨碱法生产纯碱 …… 167
第一节　概述…… 167
一、纯碱的性质…… 167
二、纯碱的用途和规格…… 167
三、纯碱的生产方法…… 167
第二节　石灰石的煅烧与石灰乳的制备…… 169
一、石灰石煅烧的原理…… 169
二、石灰窑及操作指标…… 170
三、窑气中的二氧化碳浓度及窑气的净化…… 171
四、石灰窑物料和热量衡算…… 171
五、石灰乳的制备…… 173
六、安全操作要点…… 174
第三节　盐水的制备…… 174
一、饱和食盐水的制备…… 174
二、盐水的精制…… 174
三、安全操作要点…… 176
第四节　精盐水的氨化…… 176
一、盐水氨化的基本原理…… 177
二、氨化工艺流程和工艺条件选择…… 177
三、吸氨操作要点及不正常现象处理…… 179
第五节　氨盐水的碳酸化…… 180
一、碳酸化过程的基本原理…… 180
二、氨盐水碳酸化过程的工艺条件分析…… 181

三、氨盐水碳酸化工艺流程…… 184
四、碳化塔及其操作要点…… 185
五、不正常现象、原因及处理办法…… 189
第六节　重碱的过滤…… 190
一、真空过滤的原理…… 191
二、过滤设备的主要构造及作用…… 191
三、真空过滤流程…… 192
四、重碱过滤操作要点及不正常现象处理…… 193
第七节　重碱的煅烧…… 195
一、重碱煅烧的基本原理…… 195
二、重碱煅烧的工艺流程…… 196
三、重碱煅烧工艺条件选择…… 197
四、重碱煅烧的主要设备…… 198
五、湿法分解…… 200
六、重质纯碱的制造…… 201
七、蒸汽煅烧炉物料和热量衡算实例…… 202
八、蒸汽煅烧炉的操作要点及不正常现象处理…… 206
第八节　氨的回收…… 207
一、蒸氨的原理…… 208
二、蒸氨的工艺流程及工艺条件选择…… 209
三、主要设备…… 210
四、蒸氨塔物料和热量衡算实例…… 212
五、操作要点…… 215
六、不正常现象处理…… 217
第九节　氨碱法生产纯碱综述…… 217
一、氨碱法生产纯碱小结…… 217
二、氨碱法生产纯碱总流程…… 218
思考与练习题…… 218
第九章　联合法生产纯碱和氯化铵 …… 219
第一节　概述…… 219
一、联合法制碱简介…… 219
二、联合制碱法工艺流程…… 219
第二节　制碱与制铵工艺条件…… 221
一、温度…… 221
二、压力…… 221
三、母液成分…… 221
第三节　氯化铵的结晶…… 223
一、氯化铵的结晶原理…… 223
二、影响氯化铵结晶的因素…… 226
三、氯化铵结晶工艺流程和主要设备…… 226
四、氯化铵结晶操作要点及不正常现象处理…… 230
第四节　洗涤法精制原盐…… 231

一、洗涤法精制原盐的原理…… 231
二、精制流程及设备…… 231
第五节　母液喷射吸氨…… 233
一、工艺流程…… 233
二、喷射吸氨器简介…… 233
第六节　纯碱工业发展趋势…… 234
一、氨碱法、联合制碱法比较…… 234
二、新旭法联碱工艺…… 234
三、由天然碱直接加工制纯碱…… 236
思考与练习题…… 236
第十章　电解法生产烧碱 …… 237
第一节　概述…… 237
一、烧碱的性质和用途…… 237
二、烧碱生产方法简介…… 237
三、烧碱工业概况…… 238
第二节　电解食盐水溶液的基本原理…… 239
一、法拉第（Faraday）电解定律 …… 239
二、电极反应…… 240
三、理论分解电压与槽电压…… 241
四、电能效率…… 241
第三节　隔膜法电解…… 242
一、电极与隔膜材料…… 243
二、隔膜电解槽的构造…… 245
三、隔膜法电解工艺流程…… 247
四、隔膜法电解的操作条件…… 248
第四节　离子交换膜法电解…… 249
一、电解原理 …… 250
二、离子交换膜…… 251
三、流程及工艺条件 …… 252
四、离子交换膜电解槽 …… 254
第五节　固碱及氯化氢的制造…… 257
一、电解液的蒸发…… 257
二、固碱的制造 …… 258
三、氯化氢的制备…… 260
第六节　操作技术…… 262
一、化盐操作要点…… 262
二、电解操作要点…… 262
三、蒸发操作要点…… 263
四、不正常现象处理…… 264
五、岗位安全操作注意事项…… 266
思考与练习题…… 266
参考文献 …… 268

第一篇

硫酸与硝酸

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第一章　硫　　酸

学习目标

1. 了解硫酸的性质、用途和生产方法；了解炉气净化和干燥的原理及工艺流程。
2. 掌握硫铁矿焙烧、二氧化硫催化氧化、三氧化硫吸收的基本原理、工艺条件的选择及工艺流程。
3. 理解沸腾焙烧炉、炉气洗涤器、二氧化硫转化器、吸收塔的基本结构；各工序的操作要点及不正常现象处理。

第一节　概　　述

一、硫酸的性质

纯硫酸（H_2SO_4）是一种无色透明的油状液体，相对密度为 1.8269。工业生产的硫酸系指 SO_3 和 H_2O 以一定比例混合的溶液，而发烟硫酸则是 SO_3 和 H_2O 摩尔比大于 1 的溶液。SO_3 蒸气压较大，暴露在空气中释放出的 SO_3 和空气中的水蒸气迅速结合凝聚成酸雾，发烟硫酸因而得名。硫酸浓度是以所含 H_2SO_4 的质量分数表示的，而发烟硫酸浓度是以所含游离 SO_3（或总 SO_3）的质量分数表示的。

硫酸是最活泼的无机酸之一，具有强酸的通性，浓硫酸还具有脱水性、吸水性和氧化、磺化等性质。下面主要介绍硫酸的结晶温度、密度、沸点等性质。

1. 结晶温度

浓硫酸中结晶温度最低的是 93.3%硫酸，结晶温度为 −38℃。高于或低于这个浓度，结晶温度都要提高。特别应当注意，98%硫酸结晶温度是 0.1℃，99%硫酸结晶温度是 5.5℃，所以，冬季生产时要注意保温防冻，以防浓硫酸结晶，必要时调整产品浓度。

2. 硫酸的密度

硫酸水溶液的密度随着硫酸含量的增加而增大，于 98.3%时达到最大值，过后则递减；发烟硫酸的密度也随其中游离 SO_3 的含量的增加而增大，达 62% SO_3（游离）时为最大值，继续增加游离 SO_3 含量，则发烟硫酸的密度减小。在生产中，可以通过测定硫酸的结晶温度和密度来测定硫酸的浓度。

在常压下，硫酸水溶液的沸点是随着浓度的升高而增加的。浓度为 98.3%的硫酸沸点最高（338.8℃），浓度再增加沸点反而下降，100%时的硫酸沸点为 296.2℃。发烟硫酸的沸点则随着游离 SO_3 的增加而下降，直到 44.7℃（液体 SO_3 的沸点）为止。

当硫酸溶液蒸发时，它的浓度不断增高，直到 98.3%后保持恒定。此时，气、液两相组成相同，浓度不再继续升高，即 98.3%的硫酸是一个恒沸混合物。由此可知，稀硫酸浓

缩浓度最高只能达到98.3%，不可能达到100%。

二、硫酸的用途

硫酸的性质决定了它的用途极其广泛，在国民经济中占重要地位。

某些磷肥、氮肥和其他多元复合肥料的制造都需要大量的硫酸，如生产1t普通过磷酸钙就要消耗约310kg的硫酸。在冶金工业中，如钢材加工及其成品的酸洗，有色冶金工业中炼铝、炼铜、炼锌也需要大量的硫酸。对于基本化学工业来说，硫酸是生产各种酸类和盐类的原料；在有机化学工业方面，它是塑料、人造纤维、有机染料生产中不可缺少的原料之一。在国防工业中，浓硫酸和浓硝酸的混合物用于制取硝化甘油、硝化纤维、三硝基甲苯等炸药。原子能工业及火箭工业也大量使用硫酸。此外，农药、除草剂、石油炼制、制革、制药、印染等工业都使用大量的硫酸。

三、硫酸的生产方法

硫酸的工业生产基本上有两种方法，即亚硝基法和接触法。亚硝基法中又可分为铅室法和塔式法。因亚硝基法存在诸多不足，已全部被接触法所取代。

接触法硫酸生产的原料有多种，其中每一种原料的制酸工艺亦有多种，因此接触法制酸的工艺过程种类很多。但从化学途径看，不同原料的制酸过程基本上是相同的。

硫酸是三氧化硫和水化合后的产物，即：

$$SO_3 + H_2O = H_2SO_4 \tag{1-1}$$

水很容易获得，而获得SO_3较难，因此制取SO_3是制酸的关键。

硫黄及硫化物在空气中易于燃烧，同时生成SO_2，即：

$$S + O_2 = SO_2 \tag{1-2}$$

并在此基础上，使SO_2催化氧化，即可获得SO_3，即：

$$SO_2 + \frac{1}{2}O_2 = SO_3 \tag{1-3}$$

这就是说，接触法制造硫酸的过程由式（1-1）、式（1-2）、式（1-3）反应构成。生产过程包含以下三个基本工序。

第一，由含硫原料制取含二氧化硫气体。实现这一过程需将含硫原料焙烧，故称之为焙烧工序。

第二，将含二氧化硫和氧的气体催化转化为三氧化硫，称之为转化工序。

第三，将三氧化硫与水结合成硫酸。实现这一过程需将转化所得三氧化硫气体用硫酸吸收，称之为吸收工序。

不论采用何种原料、何种工艺和设备，以上三个工序是必不可少的。除此之外工业上实现硫酸生产还需要其他辅助工序。

首先，含硫原料运进工厂后需贮存，在焙烧前需对原料加工处理，以达到一定要求。原料贮存和加工成为必要工序。最初得到的二氧化硫气体包含有矿尘和气体杂质等，为避免堵塞管道设备和引起催化剂中毒，要求在转化前对二氧化硫原料气进行净化处理。成品酸在出厂前需要计量贮存，应设有成品酸贮存和计量装置。另外，生产中排出的含有害物的废水、废气、废渣等需要处理后才能排放，因而还需要相应的处理装置。总之，除三个基本工序之外，再加上原料的贮存与加工、二氧化硫原料气的净化、成品酸的贮存与计量、三废处理等工序才构成一个接触法硫酸生产的完整系统。

生产硫酸的原料种类不同决定了生产工序和辅助工序的多少不同。

硫化氢制酸，是一典型的无辅助工序的生产过程，硫化氢燃烧后得到无催化剂毒物的二氧化硫气体，可直接进入后续转化和吸收工序。

硫黄制酸，如使用高纯度硫黄作为原料，整个制酸过程可以简化到只设空气干燥一个辅助工序。

冶炼烟气制酸和石膏制酸，焙烧处于有色冶金和水泥制作过程之中，所得二氧化硫气体含有矿尘、气体杂质等，因而需在转化前设置气体净化工序。

硫铁矿制酸，是辅助工序最多且最有代表性的。前述的原料加工、焙烧、净化、催化转化、吸收、三废处理、成品酸贮存和计量工序在该过程中均有。通过对硫铁矿制酸过程中各生产环节的深入了解，可举一反三了解其他原料的制酸过程。而且，由于我国硫酸工业原料以硫铁矿为主，故本教材着重阐述硫铁矿制酸。

第二节 硫铁矿制取二氧化硫炉气

一、硫铁矿焙烧的基本原理

1. 焙烧反应

硫铁矿的焙烧，主要是矿石中的二硫化铁与空气中的氧反应生成二氧化硫炉气。一般认为，焙烧反应分两步进行。

第一步：硫铁矿在高温下受热分解为硫化亚铁和硫。

$$2FeS_2 \xlongequal{} 2FeS + S_2 \qquad \Delta H^{\ominus}_{298} = 295.68kJ \tag{1-4}$$

此反应在400℃以上即可进行，500℃时则较为显著，随着温度升高反应急剧加速。

第二步：硫蒸气的燃烧和硫化亚铁的氧化反应。分解得到的硫蒸气与氧反应，瞬间即生二氧化硫。

$$S_2 + 2O_2 \xlongequal{} 2SO_2 \qquad \Delta H^{\ominus}_{298} = -724.07kJ \tag{1-5}$$

硫铁矿分解出硫后，剩下的硫化亚铁逐渐变成多孔性物质，继续焙烧，当空气过剩量大时，最后生成红棕色的固态物质三氧化二铁。

$$4FeS + 7O_2 \xlongequal{} 2Fe_2O_3 + 4SO_2 \qquad \Delta H^{\ominus}_{298} = -2453.30kJ \tag{1-6}$$

综合式（1-4）、式（1-5）、式（1-6）三个反应式，硫铁矿焙烧的总反应式为：

$$4FeS_2 + 11O_2 \xlongequal{} 2Fe_2O_3 + 8SO_2 \qquad \Delta H^{\ominus}_{298} = -3310.08kJ \tag{1-7}$$

当空气过剩量小时，则生成黑色的固态物质四氧化三铁，其反应为：

$$3FeS + 5O_2 \xlongequal{} Fe_3O_4 + 3SO_2 \qquad \Delta H^{\ominus}_{298} = -1723.79kJ \tag{1-8}$$

综合式（1-4）、式（1-5）、式（1-8）三个反应式，则总反应式为：

$$3FeS_2 + 8O_2 \xlongequal{} Fe_3O_4 + 6SO_2 \qquad \Delta H^{\ominus}_{298} = -2366.28kJ \tag{1-9}$$

上述反应中硫与氧反应生成的二氧化硫及过量氧、氮和水蒸气等气体统称为炉气；铁与氧生成氧化物及其他固态物质统称为烧渣。

此外，焙烧过程还有大量的副反应发生。这里值得注意的是，矿石中含有的铅、砷、硒、氟等，在焙烧过程中会生成PbO、As_2O_3、HF、SeO_2。它们呈气态随炉气进入制酸系统，是有害杂质。

2. 焙烧速率

硫铁矿的焙烧属于气固相不可逆反应，从热力学观点来看，反应进行得很完全，因而对生产起决定作用的是焙烧速率。硫铁矿焙烧速率不仅和化学反应速率有关，还与传热和传质过程的速率有关。

如上所述，硫铁矿的焙烧反应是分两步进行的，为了提高焙烧的反应速率，应该研究上列反应中哪一步反应是整个过程的控制步骤。根据实验测得的结果，硫化亚铁的焙烧反应速率是整个焙烧过程的控制步骤。

硫化亚铁与气相中氧的反应是在矿料颗粒的外表面及整个颗粒内部进行的。当矿料外表面上的硫化亚铁与氧发生作用后，生成 Fe_2O_3 矿渣层，而氧与矿料内部硫化亚铁继续作用时，就必须通过矿渣层。反应生成的二氧化硫气体也必须通过氧化铁层扩散出来。随着焙烧过程的进行，氧化铁层越来越厚，氧与二氧化硫所受的扩散阻力也越来越大，这样硫化亚铁的焙烧速率不仅受化学反应本身因素的影响，同时也受扩散过程各因素的影响。硫化亚铁的焙烧过程，温度对反应速率的影响不明显。但增大两相接触表面和提高氧的浓度，对反应速率的影响很大，由此可知，硫化亚铁的焙烧过程是扩散控制。

根据实验测得，二硫化铁的分解速率随温度升高而迅速增大，而改变矿粒大小和气流速率并不影响 FeS_2 的分解速率，所以二硫化铁的分解是化学动力学控制。

综上所述，影响硫铁矿焙烧速率的因素有：温度、矿料的粒度和氧的浓度等。

温度对硫铁矿焙烧过程起决定作用，提高温度有利于增大二硫化铁的焙烧速率，同时硫化亚铁燃烧的反应速率也有所增大，所以硫铁矿的焙烧是在较高温度下进行的。但是温度不能过高，因为温度过高会造成焙烧物料的熔结，影响正常操作。在沸腾焙烧炉中，一般控制温度在 900℃ 左右。

由于硫铁矿的焙烧是属于气固相不可逆反应，因此，焙烧速率在很大程度上取决于气固两相间接触表面的大小，而接触表面的大小又取决于矿料粒度的大小。矿料粒度愈小，单位质量矿料的气固相接触表面积愈大，氧气愈容易扩散到矿料颗粒内部，而二氧化硫也愈容易从内部向外扩散，从而使焙烧速率加快。

氧的浓度对硫铁矿的焙烧速率也有很大影响。增大氧的浓度，可使气固两相间的扩散推动力增大，从而加速反应。但采用富氧空气来焙烧硫铁矿是不经济的，工业上用空气中的氧来焙烧，即能满足要求。

3．沸腾焙烧

硫铁矿的焙烧过程是在焙烧炉内进行的。随着固体流态化技术的发展，焙烧炉已由固定床型的块矿炉、机械炉发展成为流化床型的沸腾炉。硫铁矿的沸腾焙烧，就是应用固体流态化技术来完成焙烧反应。

固体流态化，是指固体颗粒在流体（气体或液体）流动的带动下，具有类似流体性质的操作技术。流态化技术在工业生产中的应用一般在容器（或管道）中进行，如图 1-1 所示。在容器底部安装多孔分布板，分布板上盛有一定数量的固体颗粒。当气体经过多孔板小孔通过固体颗粒层时，随着气体流速的变化将会出现下列几种情况。气体流速较低，只是从固体颗粒间的缝隙通过，固体颗粒静止不动，此时叫做固定床，如图 1-1（a）所示。许多气固相催化反应均属此类，如二氧化硫催化氧化器、氨合成塔等。

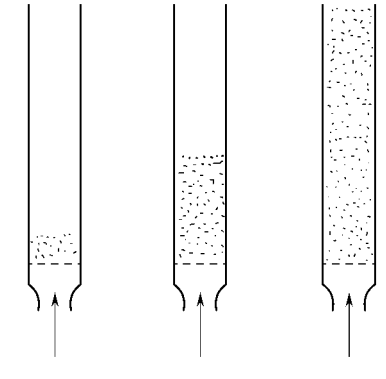


图 1-1　流化床的形成

气体流速逐渐增大到一定程度时，固体颗粒层开始膨胀松动，向上流动的气体带动每个固体颗粒都浮动起来，这是流化床开始形成的界线，叫做临界流态化，此时的气体流速称临界流化速率。气体流速继续增加时，固体颗粒的浮动加剧，达到上下翻腾如同液体沸腾一般，固体颗粒已流态化，此时流化床又称沸腾床，如图 1-1

(b) 所示。沸腾炉的名称也由此而来。气体流速再增大时，固体颗粒被气体流动带出容器，此时称输送床，如图 1-1 (c) 所示，此时的气体流速称为最终流化速率。

生产中，在决定沸腾焙烧的操作速率时，既要保证最大颗粒能够流态化，又要力图能使最小颗粒不致被气流所带走，这只有在高于大颗粒的临界速率、低于最小颗粒的吹出速率时才有可能。即首先要保证大颗粒能够流态化，在确定的操作气速超过最小颗粒的吹出速率时，被带出沸腾层的最小颗粒还应在炉内空间保持一定的停留时间以达到规定的烧出率（硫铁矿中所含硫分在焙烧过程被烧出的质量分数）。

采用沸腾焙烧与常规焙烧相比，具有以下优点：①操作连续，便于自动控制；②固体颗粒较小，气固相间的传热和传质面积大；③固体颗粒在气流中剧烈运动，使得固体表面边界层不断被破坏不断更新，从而使化学反应速率、传热和传质效率大为提高。

但沸腾焙烧也有一定的缺点，如焙烧炉出口气体中的粉尘较多，增加了气体除尘负荷。

二、沸腾焙烧的工艺条件

沸腾焙烧工艺条件主要是控制沸腾层温度、炉气中 SO_2 的浓度、炉底压力。控制沸腾层的温度对保证沸腾焙烧正常操作尤其重要。

1. 沸腾层温度

沸腾层温度一般控制在 850～950℃，影响温度的主要因素是投矿量、矿料的含硫量以及空气加入量。为使沸腾层温度保持稳定，应使投矿量、矿料的含硫量以及空气加入量尽量固定不变。矿料的含硫量一般变化不大。通过调节空气加入量来改变温度，会影响炉气中 SO_2 的浓度，也会造成沸腾层气体速率的变化，进而影响炉底压力。故常用调节投矿量来控制沸腾层温度，当然投矿量的变化会使炉气中 SO_2 浓度和焙烧强度有相应的变化。另外，沸腾层温度受到烧渣熔点的限制，对于含铅或含二氧化硅杂质多的矿料，沸腾层温度应适当控制低些。

2. 炉气中二氧化硫的浓度

空气加入量一定时，提高炉气中 SO_2 的浓度可以降低 SO_3 的浓度。SO_3 浓度的降低对净化工序的正常操作和提高设备能力是有利的。而 SO_2 浓度增大，空气过剩量就减少，造成烧渣中残硫量增加，这是不利的。故炉气中 SO_2 浓度一般控制在 10%～14%之间为宜。

实际生产中观察烧渣的颜色有助于判断空气过剩量的大小。当空气过剩量大时，烧渣呈红棕色；反之，因有四氧化三铁生成，烧渣呈棕黑色。控制空气过剩量就可使炉气中 SO_2 浓度保持在一定范围内。

3. 炉底压力

炉底压力（表压）一般在 8.8～11.8kPa 之间。炉底压力应尽量维持稳定，压力波动会直接影响空气加入量，随后沸腾层温度也会波动，一般用连续均匀排渣来控制炉底压力稳定。影响炉底压力的因素有：沸腾层高度、矿料密度、矿料平均粒度等。矿料平均粒度大时，炉底压力会升高，反之亦然。投矿量较少时也会引起炉底压力的变化，此时应特别注意维持炉底压力的稳定。当炉内负压大时，炉底压力容易升高，会影响正常排渣，此时不宜随便开大风量，而应采用减少系统抽气量的方法降低炉内负压。

三、沸腾焙烧工艺流程及沸腾焙烧炉

1. 工艺流程

沸腾焙烧工艺流程如图 1-2 所示。矿料先由皮带输送机送到加料贮斗，经圆盘加料器连续加料。矿料从加料口均匀地加入沸腾炉，鼓风机将空气鼓入沸腾炉下部的空气室，炉内进行焙烧反应。焙烧生成的炉气出沸腾炉后先到废热锅炉，炉气在废热锅炉内降温（利用炉气的热量产生蒸汽），同时除去一部分矿尘。炉气出废热锅炉再进入旋风除尘器，在此除去大

部分矿尘进入电除尘器，经过废热锅炉、旋风除尘器、电除尘器多次除尘，使炉气（标准状态）中矿尘含量降到 0.2～0.5g/m³，最后送净化工序进行净化。沸腾炉的烧渣和上述除去的矿尘均由埋刮板机送到渣尘贮斗，再由运渣车运走。

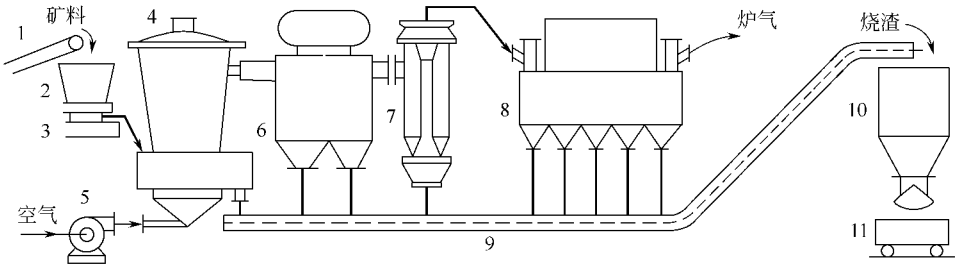
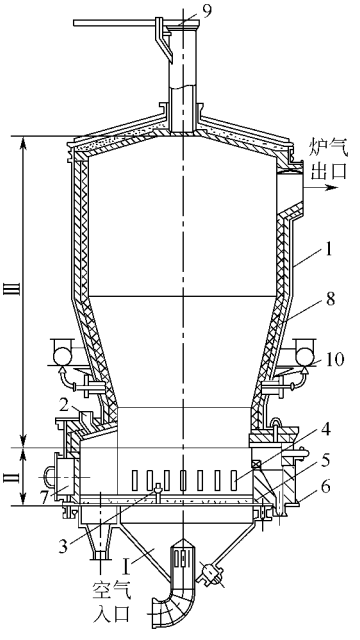


图 1-2　沸腾焙烧工艺流程

1—皮带运输机；2—加料贮斗；3—圆盘加料器；4—沸腾焙烧炉；5—鼓风机；6—废热锅炉；7—旋风除尘器；8—电除尘器；9—埋刮扳机；10—渣尘贮斗；11—运渣车

2．沸腾焙烧炉

沸腾炉的炉体为钢壳，内衬耐火砖，如图 1-3 所示。炉内空间可分为空气室、沸腾层、上部燃烧空间三部分。



1—炉壳；
2—加料口；
3—风帽；
4—冷却器；
5—空气分布板；
6—卸渣口；
7—人门；
8—耐热材料；
9—放空阀；
10—二次空气进口；
Ⅰ—空气室；
Ⅱ—沸腾层；
Ⅲ—上部燃烧空间

图 1-3　沸腾焙烧炉

空气室也称为风室。鼓风机将空气鼓入炉内先经空气室，为使空气能均匀经过气体分布板进入沸腾层，空气室一般做成锥形。气体分布板为钢制花板（板上圆孔内插入风帽），其作用是使空气均匀分布并有足够的流体阻力，有利于沸腾层的操作稳定。风帽的作用是使空气均匀喷入炉膛，保证炉截面上没有任何“死角”，同时也防止矿粒从板上漏入空气室。

沸腾层是矿料焙烧的主要空间，炉内温度以此处为最高，为防止温度过高而使矿料熔结，在沸腾层设有冷却装置来控制温度和回收热量。沸腾层的高度一般以矿渣溢流口高度为准。上部燃烧空间的直径比沸腾层有所扩大，在此加入二次空气，使被吹起的矿料细粒在此

需要全本请访问 www.ertongbook.com