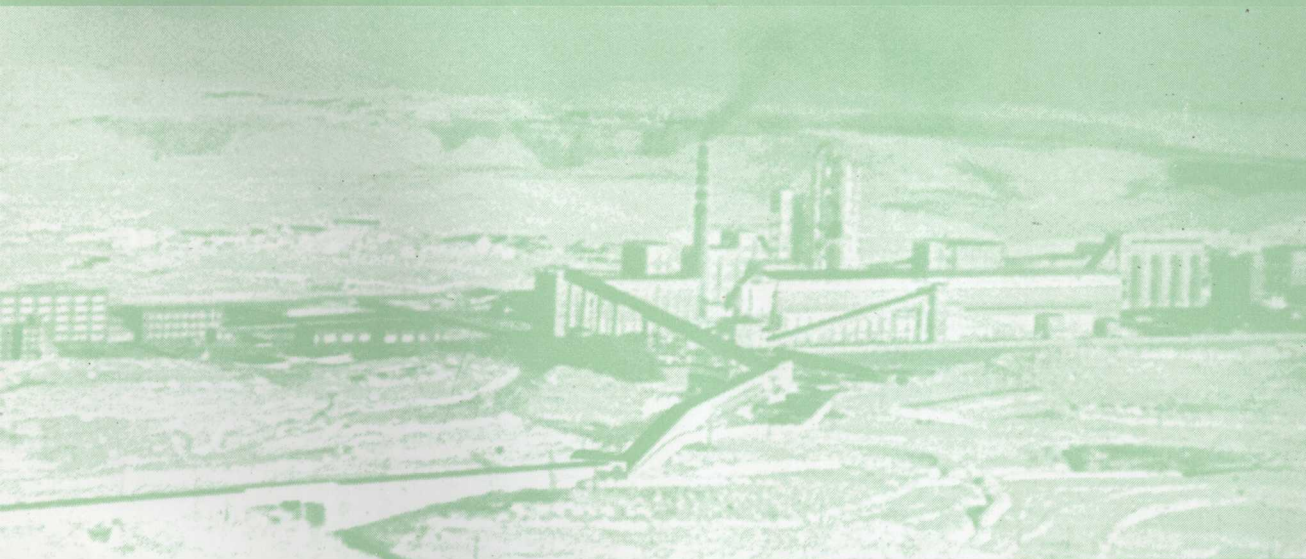


高等院校工科类试用教材

硅酸盐反应工程学

主编 方荣利



成都科技大学出版社

国家出版基金项目

硅酸盐反应工程学

李强 曹德利

化学工业出版社

硅酸盐反应工程学

方荣利 主编

林

成都科技大学出版社

(川)新登字 015 号

责任编辑:刘预知

封面设计:罗 光

尹 东

硅 酸 盐 反 应 工 程 学

方荣利 主编

成都科技大学出版社出版发行

西南工学院印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 20.25

1998 年 1 月第 1 版 1998 年 1 月第 1 次印刷

印数 1—1000 字数 500 千字

ISBN 7-5616-3606-7/TQ·85

定价:22.00 元

“硅酸盐”材料原来泛指陶瓷、耐火材料、玻璃、水泥等以硅酸盐为主要组成的材料,但近数十年来,在传统硅酸盐材料的基础上生产出了许多高强材料、高温材料、电子材料、光学材料,以及其它各种功能性材料与结构材料,其成分早已超出硅酸盐范畴,硅酸盐材料实际上已成为无机非金属材料的总称。与此相应,物理化学、化学反应工程、应用数学等许多邻近科学和技术不断渗透进来,促进了硅酸盐反应工程基础理论的进展。特别是近年来新材料、新工艺的发展及近代实验技术手段及高速电子计算机的应用,有了把硅酸盐反应规律与工业装置中的传递过程规律综合起来进行分析和处理的可能,从而促进了硅酸盐反应工程学的形成。

硅酸盐反应工程学是硅酸盐工程学的重要分支学科,是化学反应工程学的理论研究渗入至硅酸盐工业生产领域的必然结果。目前,化学反应工程学已渗入不同的生产领域,形成了若干重要的分支科学,如《无机化工反应工程》、《基本有机反应工程》、《高分子反应工程》等。这些分支学科的形成不仅使化学反应工程学的理论日趋完善,而且为不同生产领域中的问题提供了解释、方法与理论,促进了生产的进一步发展。

硅酸盐反应工程学作为一门独立的学科虽然至今才提出,但是,这门学科却是客观存在的,只不过受基础理论与实验手段等方面的限制,未能形成较为系统的体系。硅酸盐反应工程学作为一门学科现虽已被提出,但它毕竟还是一门很年轻的科学,还有许多理论不够成熟,还有许多问题亟待解决,这就要求从事硅酸盐材料研究的学者与生产人员共同努力,为这门学科的完善与发展做出贡献。

硅酸盐反应工程学的形成与发展,将为硅酸盐材料生产中的许多问题提供解释、方法与理论,这些理论、方法在生产实践中又将得到进一步完善与发展,成为指导生产的有力工具。可以预料,随着生产技术的发展,硅酸盐反应工程学在各生产领域中的作用将愈来愈大,正如初升的太阳,具有广阔的前景。

全书共分五章,比较全面系统地介绍了硅酸盐反应工程学内容,可作为高等院校硅酸盐工程、无机非金属材料、耐火材料、建筑材料等专业的教材,也可供从事硅酸盐材料研究、开发、设计、生产的工程技术人员参考。

本书由西南工学院方荣利教授主编。编写分工是:方荣利:第1章,第2章除2.2外全部,第3章除3.5外全部,第4章除4.2.7外全部,第5章除5.4外全部;西南工学院金成昌:第2章2.2;西南工学院廖其龙:第3章3.5,第4章4.2.7,第5章5.4。

1998. 1

目 录

第一章 绪论	1
1.1 硅酸盐反应工程学概述	1
1.1.1 反应工程学发展概况	1
1.1.2 硅酸盐工业生产过程特点	2
1.1.3 硅酸盐反应工程学的形成	2
1.2 硅酸盐反应工程学的任务与研究内容	3
1.2.1 硅酸盐反应工程学与其它学科的关系	3
1.2.2 硅酸盐反应工程学的任务	5
1.2.3 硅酸盐反应工程学的研究内容	5
1.3 硅酸盐反应工程学的研究方法	6
1.3.1 经验模型法	6
1.3.2 机理模型法	6
1.3.3 混合模型法	7
第二章 硅酸盐工业反应动力学	8
2.1 硅酸盐工业反应动力学概述	8
2.1.1 硅酸盐工业反应动力学研究对象	8
2.1.2 硅酸盐工业反应动力学研究内容	8
2.1.3 硅酸盐工业反应动力学研究方法	9
2.2 硅酸盐工业反应动力学基础	9
2.2.1 均相反应动力学基础	9
2.2.2 非均相反应动力学基础	16
2.3 硅酸盐固相反应动力学	19
2.3.1 硅酸盐固相反应	19
2.3.2 固相反应一般动力学方程	23
2.3.3 受化学反应控制的固相反应动力学方程	24
2.3.4 受扩散控制的固相反应动力学方程	26
2.3.5 受扩散——反应控制的固相反应动力学方程	30
2.3.6 固相反应动力学实例	30
2.4 硅酸盐烧结反应动力学	36
2.4.1 概述	36
2.4.2 固相烧结动力学	38
2.4.3 液相烧结动力学	42
2.4.4 晶粒生长与二次再结晶动力学	44

2.4.5	特种烧结动力学	46
2.5	玻璃熔制过程动力学	48
2.5.1	概述	48
2.5.2	玻璃熔制过程中的物理化学变化	50
2.5.3	玻璃熔制过程动力学	57
2.6	水泥熟料烧成动力学	65
2.6.1	水泥熟料烧成过程	65
2.6.2	水泥熟料烧成过程物理化学变化	70
2.6.3	水泥熟料烧成动力学	76
2.7	硅酸盐材料受蚀过程动力学	85
2.7.1	硅酸盐水泥及其制品受蚀过程动力学	85
2.7.2	硅酸盐玻璃受蚀过程动力学	92
2.7.3	硅酸盐耐火材料受蚀过程动力学	95
第三章	硅酸盐工业反应器	98
3.1	硅酸盐工业反应器基础	98
3.1.1	工业反应器类型	98
3.1.2	反应器内物料的流动	100
3.1.3	物料在反应器内的停留时间分布	106
3.2	固定床反应器	114
3.2.1	概述	114
3.2.2	固定床反应器的传递特性	115
3.2.3	固定床反应器数学模型	122
3.3	流化床反应器	128
3.3.1	概述	128
3.3.2	流化床反应器的传递特性	133
3.3.3	流化床数学模型	144
3.4	回转式反应器	149
3.4.1	概述	149
3.4.2	回转式反应器的传递特性	150
3.4.3	回转式反应器数学模型	162
3.5	玻璃熔窑	171
3.5.1	概述	171
3.5.2	玻璃熔窑的传递特性	172
3.5.3	玻璃熔窑数学模型	176
3.6	陶瓷窑炉	181
3.6.1	概述	181
3.6.2	陶瓷窑炉的传递特性	186
3.6.3	陶瓷窑炉数学模型	198

第四章 硅酸盐工业反应器设计	219
4.1 概述	219
4.1.1 设计目标	219
4.1.2 反应器设计的基本内容	219
4.1.3 反应器设计基本方法	220
4.1.4 反应器设计计算的基本方程式	222
4.2 典型反应器的设计计算	223
4.2.1 间歇操作理想搅拌釜的设计计算	223
4.2.2 平推流反应器的设计计算	229
4.2.3 全混流反应器的设计计算	230
4.2.4 固定床反应器的设计计算	232
4.2.5 流化床反应器的设计计算	237
4.2.6 陶瓷窑炉的设计计算	241
4.2.7 玻璃窑炉的设计计算	247
4.3 反应器的工程放大	252
4.3.1 概述	252
4.3.2 数学模拟放大	254
4.3.3 数学模型	257
4.4 反应器的最优化	261
4.4.1 反应器最优化模型	261
4.4.2 最优化方法	263
4.4.3 最优化设计	269
4.4.4 操作控制最优化	270
4.4.5 最优化装置实例	
——低阻高效预热器旋风筒的优化设计	271
4.5 反应器的热稳定性	276
4.5.1 反应器热稳定性判断	277
4.5.2 反应器的生热曲线	277
4.5.3 反应器的去热曲线	278
4.5.4 提高反应器热稳定性途径	279
第五章 硅酸盐工业技术开发	281
5.1 概述	281
5.1.1 硅酸盐工业反应技术	281
5.1.2 硅酸盐工业反应技术开发方法	282
5.1.3 硅酸盐工业反应技术开发步骤	283
5.1.4 放大程度与开发周期	284
5.2 水泥工业技术开发	285
5.2.1 概述	285

5.2.2	窑外分解回转窑烧成水泥熟料技术发展	286
5.2.3	流化床烧成水泥熟料技术	290
5.3	陶瓷工业技术开发	292
5.3.1	陶瓷工业烧咀技术开发	292
5.3.2	辊道窑耐火材料开发	296
5.3.3	液压机技术开发	297
5.3.4	陶瓷色釉料生产技术开发	299
5.3.5	建筑卫生陶瓷表面装饰技术开发	301
5.4	玻璃工业技术开发	303
5.4.1	概述	303
5.4.2	浮法玻璃工艺新技术	307
5.4.3	玻璃熔窑与熔制新技术	312

第一章 绪 论

1.1 硅酸盐反应工程学概述

1.1.1 反应工程学发展概况

早在古代,人们就会生产陶瓷、土水泥、酿酒、冶炼金属等,但却没能从这些看起来互不相干,变化多端的反应过程中认清它们的共同规律。因此,尽管生产陶瓷、土水泥、酿酒、冶金等都是些化学反应的结果,却直到本世纪 50 年代初也未能形成一门独立的学科。多少世纪以来,生产主要依靠经验。随着生产技术及设备的更新,特别是石油化工的兴起,20 至 30 年代间才提出了“单元操作”和“单元过程”的概念。单元操作指诸如流体的输送、过滤、蒸馏、干燥、萃取等物理工序,单元过程指诸如磺化、水解、加氢等化学反应工序。随着长期的实践,人们的认识逐渐深入,意识到单元操作与单元反应间并非毫无联系的孤立现象,而是存在着密切的相互作用关系。1937 年, G·丹克勒提出了流动因素和边界层对化学反应的影响,为反应工程学的发展和形成奠定了良好的基础。自此以后,对于反应器内化学因素和物理因素对化学反应的影响研究日益发展。

40 年代,随着生产规模的大型化,对反应过程开发和反应器设计提出了迫切要求。同时,单元操作理论,特别是流体流动、传热、传质方面的理论研究和实验技术也取得了较大进展,促使流化床、催化裂化反应、丁苯橡胶的聚合反应和曼哈顿计划中气体扩散法提炼浓缩铀工厂的放大设计等开发研究工作取得了巨大的成功,给当时的化学工程界以极大的振动。40 年代后期,人们纷纷注意研究单元操作理论,并以越来越复杂的数学表达式定量描述单元设备的操作性能,化工应用数学的研究相当普遍,出现了不少与化学反应工程有关的专著。1947 年,霍根和瓦特逊出版了不少化学反应动力学的书。同年,弗兰克一卡明里茨基在其所著的《化学动力学中的扩散和传热》一书中,就流动、扩散和热现象对化学反应的影响做了重要论述。所有这些,都对化学反应工程学的产生奠定了基础。

50 年代,人们逐渐认识到,大多数“单元操作”所遵循的基本规律有共同之处,它们都属于广义的“速率过程”,可归纳为动量传递、质量传递和热量传递,即所谓“三传”。任何一个工业规模的化学反应过程都伴随着“三传”,必须将化学反应与“三传”同时合并起来考虑和分析,才能较好地解决工业规模化学反应过程中出现的问题,“三传一反”构成了反应工程学基础。这期间又提出了“返混”、“反应器稳定性”、“微观混合”等重要概念,在化学反应动力学和传递过程方面的研究也取得了重要进展,积累了大量数据,并提出了有关理论。同时,计算机技术的迅速发展,高速电子计算机的投入使用,解决了许多过去人们不能解决的复杂工程计算问题,有了把化学反应规律与工业装置中的传递过程的规律综合起来进行分析和处理的可能。于是,在 50 年代末,形成了一门新的学科——化学反应工程学。

1957 年,在荷兰首都举行的第一次欧洲化学反应工程会议上,正式提出了“化学反应工程学”的概念。1960 年召开了第二次欧洲化学反应工程学术会议,从那以后,欧洲化学反

应工程学术讨论会每四年举行一次。1970 年第一次国际化学反应工程讨论会在美国首都华盛顿举行,以后每两年一次。在这些会议上,报告了许多有价值的论文;讨论了化学反应工程学这个重要学科的作用、地位和发展方向;正确评价了化学反应工程学在化工生产中的重要性,从而有力地推动了这门学科的迅速发展。

近十多年来,化学反应工程这门新学科的发展为许多问题提供了解释、方法和理论,这些理论和方法在生产实践中又得到了进一步的完善和发展,成为指导生产的有力工具。目前,化学反应工程学已渗入不同的生产领域,如催化反应工程应用于石油化工,聚合反应工程应用于高分子化工,高温反应工程应用于冶炼工业,生物化学反应工程应用于生命科学中研究肾和肺等的生物功能,设计人工肾、人工肺等以及在能源问题和环境工程中的应用等等都各有特色,并具有广阔前景。

1.1.2 硅酸盐工业生产过程特点

硅酸盐工业生产过程与其它化工生产过程相似,硅酸盐工业生产过程中发生的反应是在工业规模反应器内进行的,其反应速率与各参数间的关系,远比在实验室小反应器内进行的反应要复杂得多,必须将硅酸盐反应与动量传递,质量传递和热量传递同时合并起来考虑和分析,才能设计出优良的硅酸盐反应装置,定出合适的反应参数,得到质量好,成本低的产品。因此,化学反应工程学的问世,引起了硅酸盐工程技术人员极大的兴趣。近年来已逐步采用它的理论、方法和概念来研究窑炉的热工理论,指导新型反应器或换热器的研究开发。尽管这方面的研究工作尚处于起步阶段,但随着生产技术和研究工作的不断深入,资料的不断积累,硅酸盐反应工程学有着广阔的发展前景。

硅酸盐工业生产过程中的成品或半成品多数都需要在窑炉内进行高温煅烧。烧成过程实质是原料或坯体在窑炉内的燃料燃烧、气体流动、传热、传质过程的同时完成的一系列复杂的高温反应过程。因此,硅酸盐工业产品质量的好坏,不仅与反应过程的参数有关,而且还与气体流动、传质、传热条件有关。只有将硅酸盐反应装置的结构,尺寸适应反应参数的需要,才能实现硅酸盐化学反应与硅酸盐装置的最优化,使硅酸盐化学反应的选择性最佳、反应速率最佳、反应装置最佳,反应过程的操作简便,能耗低,并实现安全生产。

硅酸盐工业生产过程多数是复杂的非均相反应过程,非均相反应过程既包含化学过程,又包含物理过程,所涉及的问题极为复杂。主要表现在影响非均相反应过程的因素比较复杂,这些影响因素间又相互关联,变量呈非线性关系;气体的流动、传热、传质过程复杂,导致了浓度分布、温度分布、速率分布以及物料停留时间的分布均比较复杂,许多理论问题至今没有很好解决。深入开展硅酸盐反应工程的理论研究和工程实践,不断积累经验和数据,逐步完善硅酸盐反应工程理论,促进硅酸盐反应工程理论不断发展,是广大从事硅酸盐工业生产及研究的广大科技工作者的一项光荣而又艰巨的任务。

1.1.3 硅酸盐反应工程学的形成

硅酸盐反应是硅酸盐生产的核心。在硅酸盐生产过程中,尽管原料及产品不同,生产工艺不同,但硅酸盐反应在任何生产过程中是必不可少的。硅酸盐反应在整个生产过程中起决定作用,因此,有人把反应器比做硅酸盐生产的心脏。

在硅酸盐生产实践中,人们发现,同一硅酸盐反应,在实验室条件下可以得到 90% 的转化率,但在完全相同的温度、压力、反应时间条件下,在生产规模的反应装置中只能得到 70% 或更低的转化率。上述数据说明,同一硅酸盐反应,即使反应条件完全相同,由于反应器规模不同,或是反应器类型不同,其反应结果也是大不相同的。这主要是在生产规模条

件下进行的硅酸盐反应,其影响因素错综复杂,不仅受一般化学热力学、化学动力学因素的制约,流体的流动与混合、传热、扩散传质等也将影响反应的结果。因此,同其它化工生产一样,为正确处理硅酸盐生产过程中出现的问题,必须把硅酸盐反应与“三传”因素结合起来加以分析和处理,这便促进了硅酸盐反应工程学的形成。

在硅酸盐反应过程中,硅酸盐反应是反应过程的主体,而装置则是实现这种反应的客观环境。硅酸盐反应动力学是影响过程的本质因素,而反应器结构、形式和尺寸则在物料流动、混合、传热、传质等方面发挥其影响,因此反应装置中上述传递特性也是左右反应结果的一个重要方面。硅酸盐反应过程从物料进入反应器起到离开反应器止的全过程是具有一定动力学特性的反应物系在具有一定的传递特性的装置中进行转变的过程,这与其它化工生产过程极其相似。因此,化学反应工程学的出现,引起了硅酸盐工程技术人员的高度关注,近年来已逐渐将化学反应工程学的理论、方法和概念应用于硅酸盐工程中处理硅酸盐工业生产过程中出现的问题,研究窑炉的热工理论,改造现有硅酸盐生产设备,指导优化设计、优化操作和开发新型反应器或预热器,于是,在 80 年代末便形成了一门新的学科——硅酸盐反应工程学。尽管这方面的研究尚处于起步阶段,但硅酸盐反应工程学作为硅酸盐工程学的重要组成部分,其发展前景是十分广阔的。

1.2 硅酸盐反应工程学的任务与研究内容

1.2.1 硅酸盐反应工程学与其它学科的关系

硅酸盐反应工程学是硅酸盐工程学的重要分支学科,既有高度的综合性,又有广泛的基础性。它是在硅酸盐化学、硅酸盐工艺学、传递工程及工程控制等学科基础上发展起来的,而它的发展又为这些学科提供了有参考价值的知识,促进了这些学科的发展。它与这些学科的关系,正如化学反应工程学与其它学科的关系一样,可以用图 1-1 表示。从图中我们可以看出,硅酸盐反应工程学与硅酸盐化学、硅酸盐工艺学,传递工程及工程控制这四个方面有交错重合的部分,这表明它是综合了这四个方面的知识而发展起来的一门独立的新学科。

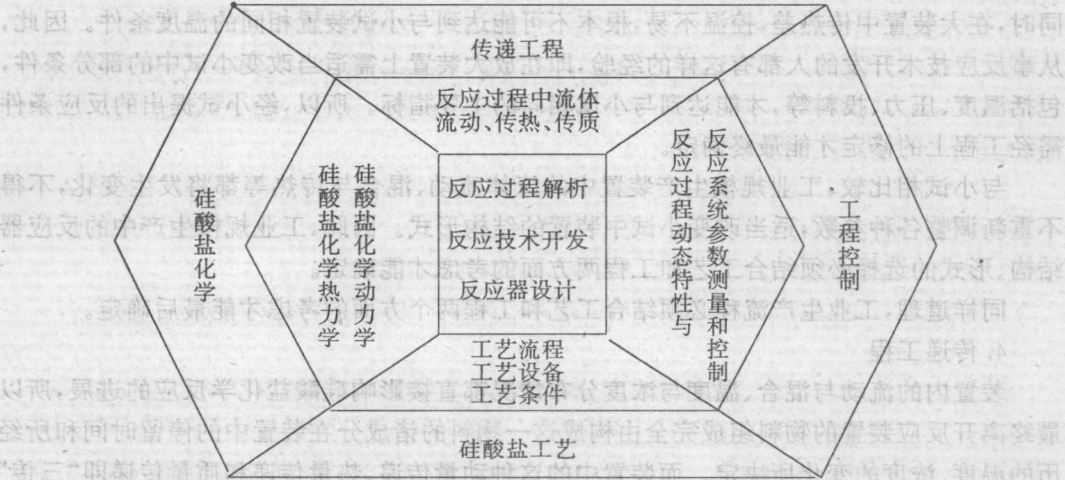


图 1-1 硅酸盐反应工程学与其它学科关系

1. 硅酸盐化学热力学

硅酸盐化学热力学主要研究硅酸盐物系的各种物性常数(反应热)和分析硅酸盐化学反应的可能性和可能达到的反应程度等,计算反应平衡常数与转化率,寻求合适的反应条件和设计反应装置。

2. 硅酸盐化学反应动力学

硅酸盐化学反应动力学研究硅酸盐化学反应速率与各物理因素(浓度、温度、压力等)间的定量关系,从而创造条件使硅酸盐化学反应向需要的方向快速进行,生产出人们需要的产品。例如,实验数据表明,升温速率越大, CaCO_3 分解曲线越向高温区域移动,快速升温煅烧使 CaCO_3 的分解在较高温下进行,其结果使 CaCO_3 分解反应与 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 及 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 的生成反应基本重叠,由于 CaCO_3 分解产生的新生 CaO 活性大,这样便有利于水泥熟料矿物的形成。这就是利用 CaCO_3 分解反应动力学的研究成果,通过提高升温速率加快水泥熟料烧成,提高水泥熟料质量和产量,达到优质、高产、节能生产目的的一个成功例子。因此,对有实际生产意义的硅酸盐反应过程动力学的深入了解是硅酸盐反应技术开发的一大关键。

从工程技术的角度来看,硅酸盐化学反应动力学的主要任务是:

- 1) 确定硅酸盐化学反应机理。
- 2) 用数学方式或其它方法关联反应速率数据,建立硅酸盐化学反应速率表达式。
- 3) 设计合适的硅酸盐化学反应装置及辅助设备。
- 4) 确定硅酸盐工业生产操作条件及控制方法。

硅酸盐化学反应研究的结果,通常用数学方程式表达出来,以便于在各项设计中方便地使用。由于测定硅酸盐化学反应有关数据比较困难,再加上经过数据处理,其误差常达10%左右,因此,提高实验精度和改进数据处理方法又是较准确的了解和利用硅酸盐化学反应动力学的关键。

3. 反应条件、设备与流程

由于工业生产装置的高径比与小试情况不同,因此与小试装置中的空间速率,线速率往往不同,而线速率的大小又影响压降、混合和传热等,从而使化学反应结果与小试不同。同时,在大装置中传热差,控温不易,根本不可能达到与小试装置相同的温度条件。因此,从事反应技术开发的人都有这样的经验,即在放大装置上需适当改变小试中的部分条件,包括温度、压力、投料等,才能达到与小试相同的主要指标。所以,经小试提出的反应条件需经工程上的修定才能最终确定。

与小试相比较,工业规模生产装置中的流体流动、混合与传热等都将发生变化,不得不重新调整各种参数,适当改变小试中装置的结构形式。因此,工业规模生产中的反应器结构、形式的选择必须结合工艺和工程两方面的考虑才能确定。

同样道理,工业生产流程必须结合工艺和工程两个方面的考虑才能最后确定。

4. 传递工程

装置内的流动与混合、温度与浓度分布情况都直接影响硅酸盐化学反应的进展,所以最终离开反应装置的物料组成完全由构成这一物料的诸成分在装置中的停留时间和所经历的温度、浓度的变化所决定。而装置中的这种动量传递、热量传递和质量传递即“三传”过程往往极其复杂,当装置规模放大时,“三传”的情况也将发生变化,出现所谓的“放大效应”。“放大效应”是由于在大装置中未能创造出与小装置中相同的传递条件而出现的差

异,如果能使大小装置中有相同的传递过程,则放大效应不会出现,但通常情况下这是做不到的。因此,传递过程是硅酸盐反应工程学的一个重要方面,解决硅酸盐反应装置中的传递问题,是硅酸盐反应技术开发中的一个关键。

5. 工程控制

一项硅酸盐化学反应技术的实施,依赖于有效的操作控制。为此,需了解硅酸盐化学反应过程的动态特性和有关的最优化问题,以便对硅酸盐化学反应进行良好的控制。近年来,随着硅酸盐工业和自动化科学技术的迅速发展,硅酸盐工业生产自动化技术有新的进展;以现代控制论为基础的各种新型控制方法和调节系统、自动化控制技术工具和电子计算机的广泛应用,促进了硅酸盐反应工程学的发展。

1.2.2 硅酸盐反应工程学的任务

硅酸盐反应工程学是一门实验、实践与数学分析相结合的科学,它是利用化学反应工程学和数学的基本原理来研究硅酸盐工业生产系统各装置特性之间,以至技术经济之间的定量关系,从而深入理解工艺系统,建立系统的数学模型,以便对系统进行研究设计,模拟放大和生产控制,达到优质、高产、低消耗和安全生产效果的一门学科。

硅酸盐反应工程学的任务是:

1. 通过研究,掌握硅酸盐反应与传递过程相互联系和相互制约的基本规律,从而改进和强化现有硅酸盐反应技术和设备,挖掘潜力,降低消耗,提高经济效益。
2. 开发新的技术和设备。
3. 指导和解决硅酸盐反应过程开发中的放大问题。
4. 实现硅酸盐反应器的最优化设计和硅酸盐反应过程的最优化控制。

鉴于目前硅酸盐反应工程学的理论还不能完全定量地阐明复杂的硅酸盐工业反应过程,因此,我们面临着两方面的任务,一方面致力于硅酸盐反应工程学的理论研究,以求运用数学模型方法最终能定量地表述各种复杂的硅酸盐工业反应过程;另一方面应善于在已有的硅酸盐反应工程理论指导下分析硅酸盐工业中的反应过程,抓住主要矛盾进行研究,半经验半理论或半定性半定量地解决当前硅酸盐工业生产中的实际问题,以获得硅酸盐工业生产的最佳经济效益,从解决的实际问题中不断积累数据,逐步完善硅酸盐反应工程理论,促进硅酸盐反应工程学理论不断发展。

1.2.3 硅酸盐反应工程学的研究内容

硅酸盐反应工程学是研究以工业规模进行的硅酸盐反应过程与设备的科学,研究的主要目的是为了使硅酸盐反应与设备最优化。硅酸盐反应与设备最优化的实质是:(1)硅酸盐反应的选择性最佳;(2)硅酸盐反应速率最佳;(3)硅酸盐反应装置最佳;(4)操作控制简单;(5)能耗最低,经济效益最佳;(6)生产安全,即使硅酸盐工业生产在一组条件(物料组成、温度、压力、流量等)下能达到优质、高产、低消耗和安全生产的效果。这不仅要求硅酸盐反应装置设计和操作控制最优化,而且要求整个硅酸盐反应过程及系统最优化,即寻找反应过程中各种决定性因素的最佳值,这就是本学科研究的内容。

虽然硅酸盐工业反应的最优化问题的核心是硅酸盐反应的选择性和反应速率最优化等硅酸盐反应动力学问题,但在工业规模的反应器内进行的硅酸盐反应,其反应选择性和反应速率与各参数之间的关系,远比在实验室小反应器内进行的反应复杂。工业生产装置体积大,靠近器壁处与反应器中心处的反应温度、浓度难于一致,从而造成了反应器内反应速率和选择性的分布;同时,工业反应器内也存在着物料的停留时间分布;因此,在工业

反应器内,用以描述硅酸盐反应选择性和反应速率的一些反应参数不是一个简单的数值,而是具有一定分布规律的复杂变量。而这种分布特性又取决于工业反应器内的传递特性,如停留时间分布取决于流体流动与混合,反应物浓度取决于反应器的质量传递和动量传递特性,温度分布取决于反应器的热量传递特性等等,因此,工业反应器内的硅酸盐反应动力学问题的研究与一般的硅酸盐反应动力学问题的研究不同。工业反应器内的硅酸盐反应速率和选择性既受反应本征速率和选择性的影响,也受装置传递特性的影响,必须将硅酸盐反应动力学与装置的传递特性相结合进行研究,才能得出合乎实际的有意义的结论。

但我们同时也应注意,反应与传递虽是相互联系、相互制约的,反应与传递所起的作用却并非等同的。有时其中一方对反应过程的进行起决定性作用,而有时另一方又起决定性的作用,因此,在不同场合、不同情况下,硅酸盐工业反应器的型式与结构将各不相同。随着硅酸盐反应工程学理论水平的不断提高,新的硅酸盐工业反应器和操作条件也将不断出现。

总之,硅酸盐工业反应器内的最优硅酸盐反应过程是硅酸盐化学反应过程与传递过程有机统一的过程。硅酸盐反应工程学研究内容的实质就在于研究硅酸盐反应过程与硅酸盐反应器结构、尺寸和操作条件统一的规律,找出使系统最优的各因素的最佳值,以达到优质、高产、低消耗和安全生产的目的。本课程将主要从以下两个方面来介绍硅酸盐反应工程学的理论,第一部分为硅酸盐工业反应动力学,主要介绍硅酸盐反应本身的特性和反应过程的普遍规律;第二部分为硅酸盐工业反应装置,主要介绍有关反应装置的基本理论和典型反应装置的传递过程规律。通过这两部分内容的学习,为把硅酸盐反应和传递过程规律结合起来研究,为设计最优硅酸盐工业反应器,为实现硅酸盐工业生产过程的最优化控制提供理论与方法。但鉴于硅酸盐工业反应过程极其复杂,这方面的基础理论研究工作尚待进一步深入,不少内容尚有待今后不断的补充和完善。

1.3 硅酸反应工程学的研究方法

硅酸盐反应工程学的研究方法主要有“经验模型法”、“机理模型法”和“混合模型法”。

1.3.1 经验模型法

经验模型法是一种以小型试验、中间试验或生产装置上的实测数据为基础而建立的一种模型。建立该模型有两种方法,一种利用大量生产操作测定数据,研究影响因素,然后用回归法处理数据,找出自变量与因变量间的函数关系。另一种采用正交试验设计法,即通过有计划地做一些因素试验,测定这些因素变化引起的因变量变化,对测定数据进行正交试验数据的数理统计,找出主要影响因素及其最佳参数。后一种方法若利用生产装置进行试验,往往要影响正常生产,但该法可通过较少试验数据的分析找到反应过程的最佳参数,为优质、高产、低消耗生产提供可靠的依据。

1.3.2 机理模型法

硅酸盐工业反应既有化学过程,又有物理过程,是一个十分复杂的过程。其复杂性表现在多影响因素及这些影响因素之间的相互关联作用,表现在变量的非线性关系和由于传热、传质、流体流动所导致的浓度分布、温度分布以及物料停留时间分布。事实证明,不可能在满足系统几何相似及时间相似的同时又满足化学相似,因此,经典研究方法——

“因次分析”和“相似方法”已不完全适用来研究硅酸盐反应工程中的基本规律,直到 50 年代数学模型发展后,才逐渐找到了解决硅酸盐工业反应器中问题的途径,硅酸盐反应工程学才得以较快的发展。

机理模型法是从分析硅酸盐工业过程的物理和化学本质的机理出发,利用硅酸盐反应工程学的基本理论,建立硅酸盐工业反应过程的数学描述方程式。这种数学方程式通常是相当复杂的,但却具有明确的物理意义。这种模型的优点无需先有真实过程装置,可充分利用基础理论研究的成果来探索新过程,这对于从理论上指导实际生产有重大意义,缺点是必须对反应过程的机理有较深入的研究,要求有较全面的基础数据。

机理模型法的一般程序可归纳如下:

1. 建立简化模型

通过大量实验数据的分析,在对反应过程的内在规律有较深刻认识的基础上,将复杂的研究对象合理地简化成与原有过程(或原型)近似等效的简化模型,该模型便于用简单明确的数学语言来描述。

2. 建立数学模型

按简化模型和相关的已知原理,写出简化模型的数学方程及其初始边界条件。

3. 利用数学模型的方程解讨论原型的特性规律

机理模型法为解决硅酸盐反应工程问题提供了一条有效途径,其成功与否,取决于简化模型的近似等效性,即模型化的技巧,既要使复杂过程简化,便于用数学式描述,又要不至于失真,电子计算机的迅速发展为机理模型提供了有效的数值计算工具。

由于硅酸盐反应工程学形成的时间不长,其基础理论的研究尚待深入,有的理论还不够成熟,为机理模型的建立带来了困难。

1.3.3 混合模型法

混合模型是把机理模型和经验模型结合起来得到的一种模型。它通过理论分析,确定参数间的函数关系式,再通过生产实测数据或试验数据来确定函数中各系数的大小。