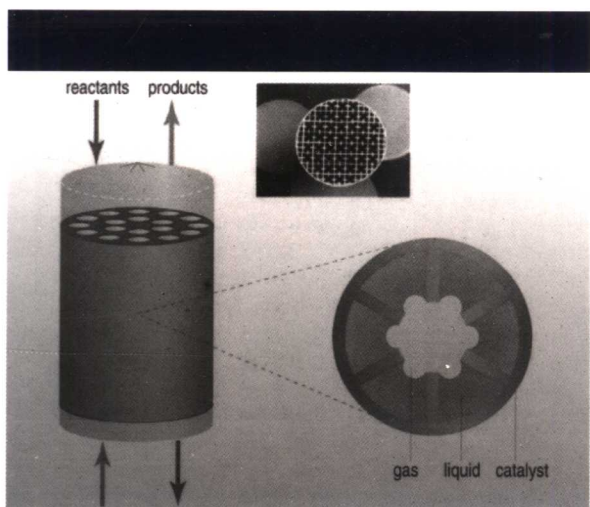


邵潜 龙军 贺振富 等编著

规整结构催化剂 及反应器



Chemical Industry Press



化学工业出版社

规整结构催化剂及反应器

邵 潜 龙 军 贺振富 编著
田辉平 段启伟 李 阳



化学工业出版社

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

规整结构催化剂及反应器/邵潜等编著. —北京: 化学工业出版社, 2005. 6

ISBN 7-5025-7193-0

I. 规… II. 邵… III. ①催化剂②催化-反应器
IV. ①TQ426②TQ052. 5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 060571 号

规整结构催化剂及反应器

邵潜 龙军 贺振富 编著
田辉平 段启伟 李阳
责任编辑: 黄丽娟
责任校对: 于志岩
封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社出版发行

(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

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市海波装订厂装订

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 8 $\frac{1}{4}$ 字数 233 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7193-0

定 价: 25.00 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

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 规整结构催化剂的发展	3
1.3 规整结构催化剂的研究与前景	5
参考文献	8
第 2 章 规整结构催化剂	10
2.1 蜂窝结构规整载体	10
2.1.1 材质	10
2.1.2 规整载体的孔道构造	21
2.1.3 规整载体的制备	37
2.1.4 规整载体的选择	41
2.2 规整结构催化剂	42
2.2.1 规整结构催化剂的制备	42
2.2.2 规整结构催化剂结构	51
2.3 规整结构催化剂的特点	52
2.4 小结	58
参考文献	58
第 3 章 规整结构催化剂在气固相催化反应中的应用	61
3.1 规整结构催化剂用于机动车源污染治理	64
3.1.1 汽车尾气催化转化器	64
3.1.2 汽车尾气催化剂工作原理	70
3.1.3 汽车尾气催化剂的老化机理	71
3.1.4 催化剂涂层结构模型	76
3.1.5 汽车尾气催化剂性能	76
3.1.6 汽车尾气催化剂评价方法	81
3.1.7 举例	88

3.1.8	汽车尾气催化剂研究开发程序	93
3.1.9	汽车尾气催化剂市场准入程序	95
3.1.10	规整载体用于柴油车尾气治理	95
3.2	排放控制和催化燃烧	98
3.2.1	飞机舱内臭氧的分解	99
3.2.2	工业废气排放控制	105
3.2.3	催化燃烧	108
3.3	对气相反应的非常规应用	114
3.3.1	制氢反应	114
3.3.2	合成反应	122
3.3.3	气化反应	127
3.3.4	氧化反应	129
3.4	小结	131
	参考文献	132
第4章	规整结构催化剂在气液固多相反应中的应用	134
4.1	加氢反应	136
4.2	氧化反应	147
4.3	生物技术	149
4.4	工业应用及未来展望	152
4.4.1	蒎醌工艺生产过氧化氢	152
4.4.2	PA 生产流程中补充反应器概念	156
4.4.3	规整催化剂在多相反应中的应用研究	157
	参考文献	158
第5章	气固两相催化反应中的规整结构反应器	159
5.1	规整结构反应器特征	160
5.1.1	流动特性	160
5.1.2	压力降	161
5.1.3	入口效应	163
5.1.4	轴向分散	165
5.1.5	传质和传热	166
5.2	反应器模型	168
5.2.1	建立模型	169
5.2.2	模型结果	173

5.3 气固两相催化反应中的规整结构反应器	177
参考文献	181
第6章 气液固三相催化反应中的规整结构反应器	182
6.1 气液固三相催化反应中规整结构反应器的特征	182
6.1.1 流动特征	184
6.1.2 压力降	188
6.1.3 膜厚	189
6.1.4 传质	189
6.1.5 轴向分散	190
6.2 反应器模型	190
6.2.1 建立模型	190
6.2.2 模型结果	200
6.2.3 CFD 计算	203
6.3 规整结构反应器和一些常规反应器之间的比较	204
6.3.1 规整结构反应器与浆态反应器的比较	204
6.3.2 规整结构反应器与填充床反应器的比较	206
6.3.3 工程放大方面的比较	209
6.4 三相催化反应中规整结构反应器的操作	210
6.4.1 并流操作	210
6.4.2 逆流操作	212
6.5 反应器工程问题	224
6.5.1 反应器放大	224
6.5.2 液体分布	224
6.5.3 空速	225
6.5.4 规整载体的排列	226
6.5.5 气液分离	226
6.5.6 循环	227
6.5.7 温度控制	227
6.6 小结	227
参考文献	228
第7章 规整结构催化剂研究进展	230
7.1 规整结构催化剂结构影响与制备	230
7.1.1 结构影响	230

7.1.2	催化剂制备	233
7.2	规整结构反应器	236
7.2.1	反应器设计	236
7.2.2	规整结构催化剂的反应器应用形式	237
7.3	反应应用研究	240
7.3.1	规整结构催化剂在 Fischer-Tropsch 合成中的应用	240
7.3.2	乙苯脱氢成苯乙烯	249
7.3.3	肉桂醛选择加氢成肉桂醇	253
7.3.4	规整结构催化剂在湿空气氧化 (WAO) 法中处理污泥	255
7.3.5	规整结构催化剂处理燃料气去除 H_2S 和 NH_3	255
7.3.6	规整结构催化剂在酯化反应中应用	258
7.3.7	用于 CHC 的完全氧化	261
7.3.8	短接触时间规整催化剂	263
7.3.9	规整催化剂/反应器用于炼制原料的脱硫	263
7.3.10	四氢化萘和 1-己烯加氢	264
7.4	展望	264
	参考文献	266

第 1 章 绪 论

1.1 引言

近年来，化学工业已确立了一个十分清晰的发展方向，即实现安全、清洁、高效能的生产方式，最终目标是实现零排放的生产过程，以满足环保和可持续发展的要求。实现这些的途径包括化学和工程两个方面：前者要开发新的、选择性更高的催化剂（如生物催化剂），寻找新的高效、污染产物更少的生产路线；后者要研究改进的或新的工艺手段。目前将它们实现的过程称之为过程强化。这两个途径的交汇处是，在反应器中催化剂以结构化方式使用，包括多功能的和结构化的反应器^[1]。

长久以来，催化反应，尤其是非均相催化反应在化学反应中占有重要的地位，涉及从炼制到精细、特种化学的许多化学过程。气固相和气液固相催化反应是其中重要的反应类型。这些领域对催化剂的选择性、活性或/和稳定性有十分高的要求。因此催化剂设计和制备技术是此类反应中研究的重点。通常，催化剂设计的讨论主要是在活性位的分子层面，在催化剂工程方面，如孔隙率、催化剂形状、微观结构和组成等也会分开考虑。但在多相催化反应中，有效的多相接触、对反应速率影响的最小化以及对反应物扩散、产物反扩散选择性影响的最小化，一直促使许多学者在催化剂构造方面——宏观尺度上考虑催化剂的设计，即研制新颖的宏观结构化催化剂。另外选择这些技术还考虑一些其他优点：(a) 催化剂分离和处理；(b) 源于催化剂的溶液污染物的最小化；(c) 安全操作；(d) 改进供热与取热；(e) 更容易的放大和技术管理^[2,3]。

在实际的化学工业生产过程中，催化剂的应用离不开化学反应工程方面的问题，二者不可分离。反应器是催化剂装填和催化反应进行的场所，是化学反应工程研究的核心，它的设计及相关的工程技术问题的研究也同样备受关注。因此如何将二者（催化剂和反应器）的研究或设计结合起来，也自然成为近年来工业催化领域更多考虑和研究的方向。在多相催化反应中，已有多种商业反应器在应用，重要的如鼓泡塔、浆态床、滴流床和固定床反应器。每种反应器都有优点和局限，选择取决于如催化剂特性、传质和传热限制、放大、流体力学和流动状态、压力降和液体持量等因素。但是在选择高效多相接触的最佳条件、高催化剂效率、高润湿效率、低结垢/磨损和低压降之间经常存在着一个权衡。如固定床反应器是此类反应中应用最广泛的反应器类型，应用于各种化学反应过程和反应体系。常规的固定床反应器是由众多具有一定形状和大小的催化剂颗粒堆积填充于反应容器内，构成反应进行的催化床层。此床层的一个内在特征是结构的随意性和不均匀分布。这种不均匀分布源于颗粒催化剂在反应器壁附近的较松散的填充，即使流体最初的分佈是均匀的。这会导致迂回床层中心的趋势，造成沟流或短路。不均匀分布的液体倾向于流向壁，并且能够彻底地改变停留时间，不同于设计值。任意的不均匀分布导致反应物不均匀越过催化表面，破坏整个过程性能，以及不希望的过热点和放热反应（主要在三相反应中）。此外还有过多的压力降，不耐灰尘堵塞，整体效率低，高成本催化剂恢复和催化剂磨损等问题^[2~4]。而浆态床虽然在传递方面更有利于反应，但是不可避免的分離问题一直是令人头疼的工程难题。

从上述化工发展的趋势、克服常规反应器上述缺点的需要，以及多相催化剂反应性能优化的要求，都促使从事工业催化研究的学者们开始在研究中注意到催化剂的结构化，从催化反应工程完整的角度考虑，将催化剂设计和反应器设计相结合，研究结构化催化剂/反应器。它兼有催化剂和反应器的特点与性能，能够提高催化剂的活性和选择性，消除反应床层上不均匀分布，改善反应器中催

化反应床层上的物质传递，降低压力降减少操作费用。

正是在这样的背景下，一种基于结构化催化剂的新型反应器，如规整结构催化剂，成为替代常规多相反应器的一个有吸引力的选择。它能够结合浆态床和固定床反应器的优点同时摒弃它们的缺点。尤其是催化剂能够以薄层涂覆在孔道壁上，成为具有浆态催化剂特性（细小粉末）的固定催化剂，但不存在催化剂磨损和分离的问题。它较高的几何表面积、较低的压力降和较短的扩散距离，能够提高催化剂效率，是近年来被较多研究的结构催化剂。大量研究实例结果表明它具有良好的应用前景，越来越多地受到化学工业界的重视^[1,3,4]。

对于有众多非均相催化反应存在的石油化工领域，面对化学工业环保和可持续发展的要求，进行结构化催化剂/反应器的研究与应用，具有十分重要的意义。

1.2 规整结构催化剂的发展

从 20 世纪 50 年代开始就制造了多孔陶瓷体并用于多种用途，如热交换器^[5]。Johnson 等^[6]描述了有关此技术在 50 年代后期的情形，是没有催化组分的结构陶瓷。Anderson 等^[7]对规整结构催化剂用于硝酸尾气的脱色进行了讨论，这是其第一个重要工业应用；而 Keith 等^[8,9]则讨论了其用于汽车尾气排放控制，结构陶瓷中已有催化组分。

20 世纪 60 年代后期，汽车制造商和那些排放大量有害气体的工业界开始研究规整载体。研究规整结构催化剂的主要原因是它们的低压力降，对于汽车后燃器和尾气焚烧是一个很重要的因素。研究表明常规的催化反应器会在反应单元前造成不希望的压力增加，而这种催化燃烧器有极高的效率。在汽车尾气处理上的应用促进了陶瓷规整载体制造技术的发展，从早期的缠绕或层叠构造发展到挤出成型技术，材质上也发明了适合于高温应用的堇青石配方^[10,11]，从而有了稳定的规整载体工业产品，可满足燃烧单元的高要求。

1975年，有了第一辆安装了催化转化器的汽车。如今，全球50亿辆汽车中超过27.5亿辆，以及超过85%的新车都装配有这类尾气净化催化剂。此后的二、三十年至今，围绕排放控制、催化氧化、选择催化还原和规整结构催化剂在燃烧上的应用，包括用于加热系统、电站的排放控制和燃烧燃料，进行了大量的研究和应用^[5,12,13]。

随着对规整结构催化剂在气固催化反应体系中的研究不断地深入和它在工业反应器应用中所表现出的性能，吸引了催化剂研究者将它引入到其他催化应用中。从20世纪80年代开始，瑞典Chalmers科技大学化学反应工程的学者对规整结构催化剂在气液固多相催化反应方面的应用展开了研究^[14]。其中他们提出的将规整结构催化剂应用于萘醌加氢的想法，被EKA化学公司所采纳，进行工业化拓展；在并入Akzo-Nobel公司后仍继续研究，最终实现了生产。这是规整结构催化剂在气液固多相催化反应中实现的第一个工业化应用，现已全部应用于Akzo-Nobel公司的双氧水生产，产量约20万吨/年^[15]。

人们越来越多地认识到规整结构催化剂在多相催化反应体系中所体现出的优越性能。从20世纪90年代至今，国外以荷兰Delft科技大学工业催化专业的学者为代表的研究人员进行了大量的研究、探索工作，涉及更多的催化反应过程、反应器应用形式，并建立了一定的数学模型^[16]。在此期间以规整结构催化剂为主要内容的《结构催化剂和反应器》一书汇集了大量相关的研究成果^[4]。在此基础上，2001年召开了第一届国际结构催化剂及反应器会议(ICOSCAR-1)，提出应从整体角度来考虑催化剂和反应器，在结构反应器中它们之间的区别已被消除，一个催化剂颗粒（如一个规整结构催化剂个体）就已经是一个化学反应器^[17]，催化剂的设计在宏观尺度上进行，将催化剂设计与反应器设计结合起来^[3]。目前，在结构催化剂/反应器的研究与应用方面，Delft大学的“反应器和催化剂工程”研究课题小组处于世界领先地位。

1.3 规整结构催化剂的研究与前景

规整结构催化剂具有众多相互平行的、规则的直通孔道，催化活性组分被制成极薄的涂层结构（ $10\sim 150\mu\text{m}$ ）负载在孔道的内壁。装有规整结构催化剂的反应器被称为规整反应器。由于规整结构催化剂所具有的特殊蜂窝孔道结构，使规整反应器具有低压力降、床层分布均匀、无催化剂磨损、放大简单、操作灵活等特点，能够克服常规颗粒型固定床反应器中的问题^[1,12,18]。

规整结构催化剂的研究属结构催化的研究范畴，既涉及催化剂性能，还包括反应器工程方面的问题，最早是在气固反应体系中有较多的研究和应用，但最近的研究表明，在气液固反应体系中，它独有的结构特点不仅能够进行常规的并流（向上或向下）操作，而且还能进行逆流操作，这对转化率受产物限制或/和平衡限制的反应可以有更高的转化率，增加反应器效率。由此可见，利用规整结构催化剂能够为化学工业的革新提供有力的工具，特别是在石油化工、化学催化、精细化工等较多涉及多相催化反应的领域中，有许多新的、潜在的发展可能，被认为可能在多相催化反应中替代固定床反应器和浆式反应器。

到目前为止，规整结构催化剂最主要的应用是环保和燃烧领域所涉及到的气固相催化反应，其中汽车尾气净化是应用量最大、技术最成熟、最重要的领域。与规整结构催化剂技术改进有关的许多问题都是为了满足汽车尾气净化控制和大气环保法规而发明的。由于规整结构催化剂具有良好的适应于汽车行驶条件下使用的物理特性、对污染气体高效的催化转化能力以及低压力降，现已成功地替代了早期的颗粒型催化剂/反应器，成为现代汽车的标准配置。而且随着汽车工业的发展，规整结构催化剂/反应器也几乎成为最普遍使用的一类催化反应器。

对于来自固定源空气污染，如电厂、炼厂尾气和化工厂烟道气的排放，烟道气规整结构净化器现已是一个标准单元。规整结构

催化剂还在气轮机、沸腾炉、加热器等的燃料燃烧方面也接近商业化。催化燃烧减少 NO_x 形成，而低压力降催化剂的使用使过程更为经济。规整结构催化剂的一些特殊性质还使低热值 (LHV) 燃料在规整单元中的燃烧比在颗粒催化剂中容易得多。此外机舱内臭氧的破坏也大量使用规整结构催化剂。

汽车尾气净化催化剂的发展为规整结构催化剂的工业应用提供了许多成熟的技术。借助汽车尾气净化催化剂的生产线，规整结构催化剂能够被自动化、连续地、大批量地生产。而蜂窝结构规整体的生产也得以大规模工业化生产，降低了其应用成本，为规整结构催化剂在其他催化反应中更广泛应用提供了技术上和经济上可行的有利条件。

规整结构催化剂在处理汽车尾气污染和气固相催化反应方面的成功应用，吸引人们对这种结构催化剂存在的不断增加的潜在应用进行研究。这可由计算机 CA 文献检索示例说明 (见表 1.1)。此外，规整结构催化剂在其他一些非常规应用，如制氢、合成、气化等气相反应中的应用，也正处于研究过程中。而基于气固反应建立的相应模型研究增加了对此结构的认识，使人们看到了它相比于常规固定颗粒床反应器的优势。

表 1.1 计算机检索关于 monolithic/honeycomb structures 的出版物结果

时 期	出版物数量	
	专利和专利出版物	非专利论文
1967~1970	5	14
1971~1975	57	79
1976~1980	149	150
1981~1985	208	166
1986~1990	731	234
1991~1995	1 035	507
1996~2000	1 426	692
2001~2004.5	983	421

规整结构催化剂对处理单流体 (气体) 反应而言，反应体系是相当简单的。目前人们开始尝试更多地将规整结构催化剂应用到其

他催化反应体系中。瑞典 Chalmers 科技大学的 Said Irandoust 和 Bengt Andersson 最早对规整结构催化剂应用于气液固相催化反应进行了介绍和研究^[13]。这促使了近年来对规整结构催化剂的研究逐步延伸到气液固多相催化反应过程中，特别是集中在加氢、氧化和生化反应方面。荷兰的 Delft 科技大学（加氢）、美国 Tulsa 大学（氧化，通过狭窄孔道的两相流动）和日本 Kyushu（九州）大学（生化过程）在相应领域内开展了研究^[4]。此类反应体系中同时存在三相而且气体和液体同时流动，气相物质必须通过液体层扩散到发生反应的固体催化剂表面，因此反应器结构设计对界面传输的影响十分重要。规整结构催化剂具有高几何表面积（表面积/体积比），均匀直通的孔道结构，使内扩散阻力小的催化剂薄涂层结构，以及低压力降等特点，从而表现出特有的流体力学性质和传递性质。

研究规整结构催化剂主要原因是此体系所表现出的低压力降和能够有更大的反应器产量或更高的转化水平和更好的选择性控制。在操作模式上它也是灵活多样的——（半）间歇或连续方式，活塞流或搅拌釜反应器，并流、逆流或交叉流动等，这对于大量使用多相催化反应的石油化工过程是有意义的。目前许多气液固三相过程中应用规整结构催化剂正处于研发之中。

规整结构催化剂在多相催化反应中的潜在应用吸引了众多化学公司的注意。作为蜂窝载体的发明者和世界上此类载体最大的供应商，美国 Corning 公司一直在致力于此方面的研究^[19,20]。而世界三大汽车尾气净化催化剂生产商 Engelhard^[21,22]、Degussa 和 Johnson Matthey 也都在加紧利用其在汽车尾气净化催化剂生产上的技术优势，与上述大学开展合作和给予资助在此方面进行应用研究。而 Johnson Matthey 已和 Air Products 公司在 2002 年建立合作，在精细化工领域中的有关加氢反应上实现规整反应器技术的商业化应用。同时 Shell、DSM^[23]、The Dow Chemical Co.^[24] 等大公司也在纷纷资助相关的研究与开发，有关的国际会议和讨论也已举行过多次。

随着对规整结构催化剂/反应器研究的深入, 规整结构催化剂会在石油化工等有众多催化反应的领域中得到很好的应用^[1,18], 具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Freek Kapteijn, Johan J Heiszwolf, T A (Xander) Nijhuis, Jacob A Moulijn. *CATTECH*, 1999, 3 (1): 24~41
- 2 朱炳辰主编. 化学反应工程. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2001
- 3 Gabriele Centi, Siglinda Perathoner. *Catalysis Today*, 2003, 79-80: 3~13
- 4 Andrej Cybulski, Jacob A Moulijn. *Structured Catalysts and Reactors*, Chemical, Industries, (V. 71). Marcel Dekker, Inc., 1998
- 5 Irwin M Lachman. *Monolithic Catalyst Systems*, Alumina Chemicals. The American Ceramic Society, Inc., 1990. 617
- 6 Johnson L L, Johnson W C, O'Brein D L. *Chem. Eng. Progr., Symp. Se.*, 1961, 35: 55~67
- 7 Anderson H C, Green W J, Romeo P L. A New Family of Catalysts for Nitric Acid Tail Gases, Engelhard Industries Inc., *Techn. Bull.* 7, 1966, 100
- 8 Keith C, Kenah P, Bair D. A Catalyst for Oxidation of Automobile and Industrial Fumer. US 3565830, 1971
- 9 Keith C, Schreuders T, Cunningham C. Purifying Exhaust Gases of an Internal Combustion Engine. US 3441381, 1969
- 10 Lachman I M, Lewis R M. US 3885977, 1975
- 11 Bagley R D. US 3790654, 1974
- 12 Andrej Cybulski, Jacob A Moulijn. The Present and Future of Structured Catalysts an Overview, *Structured Catalysts and Reactors*, Chemical Industriex (V. 71), Marcel Dekker, Inc., 1998
- 13 John W Geus, Joep C van Giezen. *Catalysis Today*, 1999, 47 (1-4): 169~180
- 14 Said Irandoust, Bengt Andersson. *Catal. Rev. -Sci. Eng.*, 1988, 30 (3): 341~392
- 15 Edvinsson R Albers, Nyström M, Sellin A, et al. *Catalysis Today*, 2001, 69: 247~252
- 16 Andrzej Cybulski, Jacob A Moulijn. *Catal. Rev. -Sci. Eng.*, 1994, 36 (2): 179~270
- 17 Jacob A Moulijn. *Catalysis Today*, 2001, 69: 1
- 18 Kapteijn F, Nijhuis T A, Heiszwolf J J, Moulijn J A. *Catalysis Today*, 2001, 66: 133~144

- 19 Jimmie L Williams. *Catalysis Today*, 2001, 69: 3~9
- 20 Liu Wei, Addiego William P, Sorensen Charles M, Boger Thorsten. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2002, 41 (13): 3 131~3 138
- 21 Marius Vaarkamp, Willem Dijkstra, Bennie H Reesink. *Catalysis Today*, 2001, 69: 131~135
- 22 Ronald M Heck, Suresh Gulati, Robert J Farrauto. *Chem. Eng. J.*, 2001, 82: 149~156
- 23 Anderzej Stankiewicz. *Chem. Eng. Sci.*, 2001, 56, 359~364
- 24 David H West, Vemuri Balakotaiah, Zoran Jovanovic. *Catalysis Today*, 2003, 88: 3~16

第 2 章 规整结构催化剂

规整结构催化剂由活性组分、助催化剂、分散担体和骨架基体等四部分构成。活性组分、助催化剂和分散担体以涂层结构负载在骨架基体的内部孔道壁内表面上。充当骨架基体的是规整结构载体，它一般是一个整块的陶瓷或金属材质的载体块，内部成型有大量的宏观尺度上的中空孔道结构。从催化剂活性组分负载的角度来看，起骨架基体作用的规整载体（或规整载体的壁）可看作是规整结构催化剂的第一载体——规整载体，起到为涂层催化剂做支撑体的作用；分散担体部分被视为第二载体，一般使用常规的催化剂担体材料，如氧化铝、氧化硅等，起到增加表面积、分散、负载催化活性组分的作用。

2.1 蜂窝结构规整载体

规整载体个体的外形截面直径从几厘米到几十厘米，内部的孔道截面直径是几个毫米（一般 1~6mm）。规整载体可以有不同的构造，相应也有不同的规整结构催化剂类型，主要有蜂窝型（孔道为直通的，在轴向上相互平行，没有径向连通）、泡沫型（有 3 维相互连通的海绵结构）和交叉流动型（相邻孔道层相互成十字交叉），如图 2.1 所示。蜂窝结构的规整结构催化剂是其中研究最多、最成熟、应用最广泛的一个，也是本书将要讨论的对象。

2.1.1 材质

目前制造蜂窝状规整载体的材料主要有多孔陶瓷材料和金属箔片。

陶瓷材质的规整载体又可分为低表面积规整载体和高表面积规整载体。由于多年来规整载体主要用于排放控制，大多数规整载体