

我国硅材料产业发展现状、发展趋势及政策建议

白洪强

(中国化工信息中心, 北京 100029)

摘要:介绍了我国硅材料产业发展现状和目前硅材料产业发展需要解决的问题,分析了硅材料产业未来的发展趋势,最后对国家制定相关政策提出了一些建议。

关键词:硅材料;产业;发展趋势;政策

中图分类号:TQ127.2

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2012)01-0004-05

Current situation, development trends and policy suggestions for silicon industry in China

BAI Hong-qiang

(China National Chemical Information Center, Beijing 100029, China)

Abstract: The current status and the problems to be solved for silicon industry in China are introduced. The development trends of silicon industry are analyzed. Some suggestions on the policy of silicon industry in China are put forward in the end.

Key words: silicon; industry; development trends; policy

我国硅材料经过几年的高速发展,已初步形成有机硅、多晶硅、金属硅三大硅材料产业体系,特别是有机硅和多晶硅产业的进步更加明显,我国已成为全球绝大部分硅材料基础原料的供给国,成为全球最大的硅材料生产国,并已发展成为世界上最大的硅材料产业体系。当前及“十二五”期间,我国硅材料产业进入了一个关键时期,摆在面前的是:如何提高产业发展质量,以先进技术进一步装备硅材料产业;如何提高产业国际竞争力,在国际硅材料产业竞争中获得更大的利益,成为最大、最强的硅材料生产国;如何加快建立世界上最强大的硅材料产业体系等重大的产业发展课题。对此,笔者通过分析硅材料产业发展现状,研究产业发展趋势,并提出有关政策建议,旨在推动这方面的深入研究。

1 我国硅材料产业发展现状

1.1 硅资源极其丰富

我国乃至世界硅材料产业资源都极其丰富,硅的地壳丰度为27%,仅次于氧(46%),大约是碳的1000倍,开发潜力巨大。目前,硅质原料资源主要包括天然石英砂、石英岩、石英砂岩和脉石英等。地球上石英矿产资源比较丰富,目前不属于稀缺资源。我国已累计探明具备工业化开发潜力的资源储量在数百亿吨以上,资源极其丰富。

通过化学手段大规模、低成本利用硅资源生产满足人类社会需要的能源及材料,并以此应对化石原料危机带来的威胁,减少碳排放及温室效应,可以说是一条人类社会通向未来的必经之路,因此,硅材料的开发和利用正在成为工业界和全社会关注的焦点。目前,符合人类对碳基能源及材料的替代需求,具有产业和科技基础,已经大规模利用的硅材料主要是有机硅和多晶硅2大类品种,其中有机硅是目前唯一一种使用量已经达到百万吨级以上的不依赖于石油的有机合成材料,发展潜力不可限量。作为原料的金属硅行业近两年发展迅猛,这3者构成了硅材料产业的骨架,也是未来产业发展的重点和希望所在。

1.2 产业高速发展,初具产业规模

在多晶硅光伏产业迅猛发展的推动下,世界硅材料产业也出现高速增长的势头,据统计,目前硅材料产业链的市场价值已经超过400亿美元,整个产业最近5年的年均增速超过10%,高出同期世界经济的平均增速。

截至2010年,全球金属硅、有机硅(折聚硅氧烷)、多晶硅产量分别约为190万、150万和16万t,气相法白炭黑产量也达到21万t。截至2010年,估计我国硅材料产业实现销售收入约700亿元,较2005年增长了1倍,其中有机硅产业约250亿元,

多晶硅行业约 300 亿元,金属硅行业约为 100 亿元(扣除化学级硅);以现价美元计算,分别相当于世界总体市场价值的 1/5、1/3 和 1/4。我国已发展成为世界上硅材料产业的大国。

1.3 硅材料应用领域广泛,国际国内市场需求旺盛

近几年,国内经济保持高速增长,硅材料市场需求保持连年增长,硅材料的各个应用领域都呈现出市场活跃的新特点,国际国内旺盛的市场需求拉动了硅材料主要产品的市场比重不断提高。例如

表 1 我国与国外主要硅材料产品生产企业概括对比

	万 t/a·家		
	最大规模	平均规模	企业数量
多晶硅			
中国	2.1	0.21	55
世界其他	3.6	1.75	8
金属硅			
中国	20	2	100
世界其他	22.3	7	20
有机硅单体			
中国	20	9.1	16
世界其他	124	59	4
沉淀法白炭黑			
中国	0.61	0.21	15
世界其他	8.5	5.01	5

表 2 中国硅材料信息研究中心发布的 2010 年世界主要硅材料生产商排名

位次	金属硅	国家	聚硅氧烷	国家	多晶硅	国家	气相白炭黑	国家
1	Ferroatlantica	西班牙	道康宁	美国	Hemlock	美国	赢创德固赛	德国
2	道康宁	美国	瓦克	德国	瓦克	德国	卡博特	美国
3	Elkem	挪威	蓝星	中国	OCI	韩国	瓦克	德国
4	合盛	中国	迈图	美国	中能	中国	德山	日本
5	Globe Metallurgical	美国	信越	日本	赛维 LDK	中国	OCI	韩国
6	新安	中国	新安	中国	Memc	美国	吉必盛	中国
7	Rima	巴西	合盛	中国	Rec	美国	卡路什	乌克兰
8	Timminco	加拿大	东岳	中国	Tokuyama	日本	沈阳化工	中国
9	蓝星	中国	宏达	中国	三菱	日本	浙江新安	中国
10	瓦克	德国	金岭	中国	洛阳中硅	中国	洛阳中硅	中国

1.5 国内硅材料企业数量猛增,市场竞争进一步加剧

随着硅材料企业数量的增加,市场竞争也进一步加剧。尽管有机硅、多晶硅行业目前的资金门槛和技术门槛仍比较高,仍有一部分大型国有企业和

2010 年,我国有机硅氧烷产能达到约 70 万 t/a,消费量约为 47 万 t,产量(含再生)约为 40 万 t,分别占世界总体水平约 1/3、1/3、1/4;再如多晶硅产能达到约 12 万 t/a,消费量达到近 9 万 t,产量约为 4.5 万 t,分别占世界总体水平约 1/2、1/2、1/4;还有我国金属硅产业经过发展,目前已形成占世界金属硅产能 80% 以上的生产能力,国内金属硅消费量达到 46 万 t,产量接近 110 万 t,分别相当于世界总体水平 1/4 和 1/2 强,金属硅净出口超过 60 万 t,几乎垄断了世界金属硅散货市场。

1.4 涌现一批规模以上大企业

硅材料行业规模以上企业数量持续增加,大型企业加快涌现。截至 2010 年底,我国硅材料行业规模以上生产企业数量超过 400 家。其中,金属硅行业约 80 家,达到 2 万 t/a 以上生产能力的约 22 家,宁波合盛产能为约 20 万 t/a,名列世界第二;有机硅及制品行业约 100 家,其中已投产硅氧烷企业 16 家,最大规模的蓝星集团硅氧烷产能达到 21 万 t/a,名列世界第三;多晶硅行业约 60 家,其中 3 000 t/a 以上的企业 11 家,保利协鑫产能达到 1.8 万 t/a,名列世界第四;另有相关配套企业约 200 家,以广州吉必盛、湖北武大有机硅为代表的气相白炭黑、硅烷偶联剂等行业领军企业,在世界相关行业中的排名也不断上升。一批较大规模企业的出现,为产业的技术进步、市场开发和提高竞争力创造了条件。

一部分民营企业进入硅材料领域。作为经济规模标准的 3 000 t/a 多晶硅装置和 5 万 t/a 聚硅氧烷装置的建设资金均超过 10 亿元,折合近 2 亿美元,项目投资强度高于大部分人工合成材料项目,也高于大炼油、大乙烯类大型石化项目和大部分钢铁、有色

金属项目的投资成本。不容忽视的是硅材料产业其技术要求较高,一方面表现为目前难以获得成熟技术;而另一方面表现在已建成的装置因技术水平低,成本、消耗、产品质量和稳定性方面与世界先进水平差距明显,赶超路途漫长。从产业总体发展来看,自“十一五”以来,进入硅材料产业的门槛在降低。在产业高速发展的情况下,大量中小厂商通过工程技术公司和设备公司获得了有关技术支持,建成了一批新的装置,其中部分装置运行良好;企业数量的增加使得这个行业的市场竞争进一步加剧,在激烈的市场竞争环境下,仍有一部分企业进入这个领域,原有一部分厂商却不再固守这些行业,开始寻求向其他行业领域转移。

2 目前硅材料产业发展需解决的问题

2.1 进一步调整产业结构

近几年,虽然我国硅材料企业数量不断增加,但企业平均规模偏小,大多数企业综合实力不强,市场影响力小、技术储备不足、经营管理层次不高,与国外企业相比存在不小差距。我国金属硅、有机硅(硅氧烷)、多晶硅生产企业平均规模仅为约2万、5万、2 000 t/a,而国外同类企业约为8万、25万、2.1万 t/a,差距十分明显。我国至今尚无一家企业发展成为产业链上下游一体化经营的大型企业,个别企业尝试通过产业链扩展扩大企业规模,一般也只是上游或下游进行松散型组合,各小行业企业之间相对封闭,缺乏产业互动机制,技术、资金、人才等资本难以集聚,形成不了产业合力,难以抗衡国外实施集约化生产的大型企业。而国外硅材料生产高度集中,几乎垄断在国外的一体化巨头手中,如瓦克、道康宁等,这些企业通过多年积累,在产业链各个环节都形成了规模化生产,同时掌握了最先进的技术,可以根据市场变化协调生产、争取最大效益,并且为后续发展做了相当的技术储备,发展势头强劲。因此,我国硅材料产业应加快进行组织结构调整,通过企业重组、并购、联合、参股等多种形式,扩大企业规模,探索一体化经营模式,做大做强企业。

2.2 加快自主创新步伐,改变技术水平普遍偏低的情况

我国有关硅材料的科学研究严重滞后,已开展的研究多集中在对引进技术的改进与模仿,缺少自主创新,关系产业根本的基础研究目前接近空白,导致我国硅材料产业整体发展后劲不足。如有机硅单体生产成本普遍较国外高20%。金属硅冶炼炉仍

普遍使用12 500 kWh甚至以下规模,较国外平均30 000 kWh以上水平差距明显,单吨电耗高出国外平均水平2 000 kWh以上,还原剂、电极等原材料用量偏高,化学级硅生产尚未形成规模。再如国内多晶硅新建项目仍依赖引进国外技术,在国外封锁先进技术的条件下,国外二流技术在国内大行其道,现有建成装置综合成本在50~60美元/kg,高出国外一半以上。硅烷法、流化床工艺等只有极少数企业或科研单位开展新一代生产技术研发,整个行业后续发展缺乏先进技术支持。国际上,美国、德国、日本等国硅材料产业发达,硅材料相关技术处于领先水平,主要产品产、需增长迅猛。我国硅材料产业发展必须加快自主创新步伐,特别是针对有机硅、金属硅技术进展缓慢、缺乏大型装置、生产成本居高不下的状况,应迎头赶上,这一点是关系全行业未来发展的关键。

2.3 开发下游应用领域,促进上下游平衡发展

硅材料产业的发展还在于下游应用领域的开发,目前我国硅材料产业下游开发能力较为落后,基础工厂吨平均硅氧烷产品实现销售收入约为国外水平的1/3,平均仅约3.5万元/t。对苯基单体、倍半硅氧烷等热点产品的生产、开发仍处于初始水平。目前,我国大宗硅材料初级产品已能够规模化生产,附加值不高,产品链较短,在国际市场的竞争中,其优势主要来自于初级产品的低成本,即比较低的能源价格、环保投入和人力成本,而其发展则主要依赖于要素投入,如土地、能源、资本和劳动力等,这在今后的发展中已经很难做到持续。因此,我国硅材料产业必须向下游发展,目前我国有机硅产业下游高端产品缺口很大,2010年进口约10万t,对外依存度较高。有机硅下游高品质和功能性产品开发滞后。应着力抓好下游开发,推动有机硅材料由特种化学品向通用化学品转变,应用领域继续向汽车、建筑、人的护理用品及化妆品、微电子、太阳能电池、风能、半导体等行业延伸。逐渐实现有机硅产品替代部分石油基产品。

2.4 节能减排任务仍很繁重

我国硅材料产业在安全、环保与节能减排等方面也比较落后,突出表现在我国硅材料产业总体能耗偏高、副产物综合利用率很低,安全事故时有发生。如大量中小型企业四氯化硅副产物不能得到有效利用,偷排现象仍然普遍。西门子法工艺平均还原能耗目前仍超过国外水平约50%,硅粉/三氯氢硅消耗高出国外先进水平2~3倍。据不完全统计,自2008年以来,被媒体披露的安全事故超过20起,

因原料三氯氢硅和副产物四氯化硅运输发生的倾泻等事故更多;有机硅单体副产物处理水平低,尚未掌握成熟的副产物重整技术,大量一甲、三甲副产物只能密封保存,成为安全隐患。单体生产周期短、选择性差、效率低,抬高了原料和能源消耗水平,也带来了减排压力。例如国内生产系统 HCl 回收率仅约 60% 左右,而国外在 90% 以上;金属硅方面,因企业普遍较小,在尾气回收等环保措施方面与国外差距明显,能源和还原剂消耗量较国外偏高。据蓝星集团统计,我国每生产 1 t 金属硅所产生的二氧化碳排放当量约为 6.5 t,远高于巴西、挪威等国。2005 年,我国金属硅生产带来的二氧化碳排放总量占世界总量的 2/3。安全环保是我国硅材料产业实现科学发展必须跨过的难关,现在已到了攻关克难的时候。全行业应树立安全环保的意识,大面积研发安全环保先进技术,大量采用安全环保先进技术,大幅度提高节能减排指标,制订和完成绿色硅材料产业发展的目标。

3 硅材料产业发展趋势分析

3.1 硅材料产业积极探索一体化发展模式

近几年的世界石油和化工产业调整的实践证明,石油化工行业走一体化经营之路,已成为业内的共识。通过一体化经营,对降低成本,提高研发能力,提高产品附加值,防控市场风险和经济危机都有积极的作用。

(1) 现有企业不应盲目扩张,以避免低水平重复建设,引导企业通过走一体化经营之路,扩大企业规模。扩大企业规模,延伸产业链。金属硅行业中大型下游企业集团为了确保自身的原料供应,大手笔收购上游金属硅企业,这导致近两年来金属硅领域的投资和并购大幅度增加,上下游紧密结合,可以合资、参股、长期的供货采购合同。

(2) 大型企业集团应进行产业链的整合,重新规划企业的业务链条,通过对产业链上下游的整体把控,降低经营风险,获得稳定收益。如瓦克收购 holla、道康宁收购 GSM 旗下工厂等,国内蓝星、新安等在这方面也有大手笔收购和投资。在未来一段时间内,大型企业围绕这一目的进行的并购、重组、联合等方式实现一体化经营。

(3) 鼓励太阳能光伏发电企业和硅材料企业尝试上下游一体化发展,硅材料和光伏发电 2 个领域既是上下游的产业关系,又是生产和应用的一个系统,因此,加强这 2 个产业的分工与协作至关重要。

建议太阳能光伏发电企业与硅材料生产企业密切合作,有条件的可以尝试上下游一体化经营新模式。这样做可以促进生产和应用领域的密切衔接,可以有针对性地开展技术研发活动,还可以使有资本实力的光伏发电企业或硅材料企业做好上下游带动。

(4) 围绕硅材料产业与光伏发电产业建立产学研技术联盟。尝试跨产业建立技术联盟,就能着力解决上下游产业面临的共同技术成本问题,主要是解决硅材料生产成本降低,硅材料在光伏发电领域的更好应用等问题。

3.2 低碳发展绿色硅材料产业

随着我国对环保的要求日益严格,企业的环保责任将进一步落实。我国硅材料产业内的金属硅、有机硅、多晶硅三大行业都存在能耗偏高、排放严重的问题,据初步统计,我国三大硅产品的产量约占世界总量的 1/3,但是碳排放约占全球的一半(有机硅和多晶硅按照能耗折算),单位销售收入对应的碳排放更几倍于发达国家。我国企业 EHS 管理水平也远低于国外发达国家,例如各行业的副产物还没有得到及时的处理及回收。金属硅产业发展目前相对成熟,但因其冶炼方法大量消耗能源,发达国家已经逐渐将其生产转移至低电力成本地区,特别是中国等发展中国家,近几年,随着中国政府节能减排政策的实施,企业增加环保投入使成本不断提高。应通过政策手段和经济手段,逐渐淘汰落后产能,提高能源价格,推动装置大型化,推广绿色新型工艺技术,降低行业总体的污染物排放水平,特别是单位产出的碳排放水平,确定时间表,在一定时间内能耗和碳排放指标达到发达国家水平。在行业内部建立环保和安全监督制度,推动行业落实环保责任,提高企业 EHS 管理水平,使行业安全和环境事故发生率在“十二五”末有大幅降低。各企业应通过技术手段,减少硅材料在生产、加工、使用、回收的全周期中对环境的损害,特别是减少二氧化碳排放;通过对硅材料原料的合理使用,降低其在下游加工过程中对环境的损害和二氧化碳排放。

3.3 硅材料与非硅材料的结合

随着我国新材料产业的战略性发展,各种新材料产业都将获得较快的发展,硅材料与非硅材料的竞争或者替代也在所难免。因该说,既有竞争,也有互补,完全的相互替代在短期内不大可能。从长远发展来看,我国硅材料产业必须走出自己的产业发展之路,着眼于降低生产成本,不断扩大企业的生产规模,提高自主创新能力,把产业发展成为世界一流

的新材料产业。从硅系新材料的应用领域来说,应不断扩大应用范围,使硅材料产品真正成为人类日常生活中须臾不能离开的生产和生活用品。通过不断的科技进步,促进各种新材料越来越多地实现交叉利用。未来,使用市场选择非硅材料与硅材料的主要因素还是产品的性价比(仍然是成本的实际水平和产品的功能性),这将是主要的竞争因素,对此,硅材料产业应给予足够的重视,只有不断提高产品质量,降低生产成本,提高产品功能性,才能使硅材料的应用领域不断扩大,也才能使硅材料产业处于不败之地。

3.4 提高硅材料产业竞争力与市场开发

近几年,我国硅材料三大产业程度不同出现低水平重复建设,初级产能出现过剩。从有机硅行业来看,随着中国产能的快速扩张,甲基氯硅烷原料的生产目前出现过剩。其初级原料、大宗中间产品及制成品价格在世界范围内滞涨甚至下跌,在成本高的发达国家的生产进入平稳或萎缩阶段,已经少有新建计划,发达国家的这类生产有向低成本地区转移的迹象。现有大型企业集团纷纷调整这类大宗原料的市场策略,如减少或停止初级产品的对外供应,或通过网络技术减少销售环节以提高销售效率,如道康宁公司成功建立了用于大宗原料销售的 ximeter 网络销售平台,并在一些特定的下游制品行业,采取合作方式推广道康宁公司的产品和技术,扩大市场占有率。

另一方面,由于原料价格的下降,大宗有机硅产品价格相对石油基合成材料显现出价格优势,开始替代其他合成材料的应用市场,如游泳装备、家电、新能源、可移动电子设备、建筑等领域。与此同时,有机硅下游仍属于特殊化学品行业的部分则因高额的回报仍在吸引大量投资,也仍旧是大型企业集团的业务重点,如信越采取了名为“SHIFT”的企业策略,即不再扩大原料产能,而将业务开拓重点放至有机硅精细化学品特别是电子化学品领域。道康宁公司也将技术资源转向开发特种有机硅产品,研发工作以利润更高和创新性为目标,主要开发面向电子工业、太阳能工业、建筑工业和个人护理用品等领域的特种有机硅产品和多晶硅。多晶硅市场形势的发展目前看较为乐观,由于仍属于政策性的市场,发达国家给予光伏市场的补贴可以看作当前市场最主要的驱动因素。由于多晶硅生产规模扩大,生产效率提高,因此导致多晶硅和光伏组件成本降低,欧洲国家正在有意减少单位光伏发电能力的补贴幅度,但

总的补贴面即享受补贴政策的光伏安装量持续高速增长,这导致最近几年市场对多晶硅的需求几乎每年要翻一番。这意味着虽然多晶硅价格已经很难高涨,但多晶硅企业的总收益增加,其用于扩大再生产的投资也在增加。

4 硅材料产业发展的政策建议

4.1 国家应制定和完善硅材料产业政策

在国家新公布的七大战略新型行业的新材料、新能源 2 大行业中,硅材料都是重点基础原料和产业关联度极高的行业。硅材料与稀土材料、氟材料等受到国家高度重视的资源性产品相比,其资源特性不算太强,但其应用范围巨大,产业关联度极高。应该在有关产业政策和发展规划的制定中作为独立的重要门类加以考虑并给予扶持。国家和部分省分别出台了一些推进光伏发电领域发展的政策,但是给硅材料产业发展的政策支持却远远不够,使得现有政策体系不够协调。硅材料直接影响着光伏发电的应用和光伏电站建设的成本,因此,应该重视硅材料产业政策的制定和实施。

4.2 扶优限劣,加快扶持优势企业

大型跨国公司的出现是产业发展进入新阶段的标志,也是我国硅产业提升整体实力的标志,反映产业发展水平的标志,但是,目前我国硅材料产业还很缺乏大型企业集团,特别是还没有培育出纵向和横向联合组成的一体化的大型硅企业集团。在“十二五”期间,国家应通过政策扶持,尽快扶持一批产业基础好,掌握一定先进技术和综合实力强的大中型企业,力争在“十二五”期间形成 3~5 家大型龙头企业,带动中国硅材料产业的整体发展,提升行业的国际国内竞争力,开拓和占领国际国内市场,在优势企业带动下,早日把我国硅材料产业发展成为具有世界一流的企业和技术的强势产业。

4.3 加大鼓励自主创新的政策支持

建议国家集中硅产业基础科研单位、大型企业集团和大专院校的相关科研力量,立足硅材料工业化现状,着眼未来,系统开展相关基础研究和创新性研究,特别应重视对现有生产工艺的技术改进与节能减排技术的攻关,支持研发新型高效环保技术与应用,关注硅材料应用技术的研究开发。依靠政府政策支持,加大财税扶持政策支持力度。建议将技术先进、优势明显、带动和支撑作用强的重大项目,纳入国家和省级项目规划重点,并给予重点支持。

(下转第 10 页)

水热合成法和后嫁接合成法两大类^[6]。

直接水热合成法是指在 SBA-15 骨架的形成和晶化过程中引入杂原子前驱体化合物。通过该前驱体在合成体系中的原位水解以及由此产生的杂原子物种与硅骨架的结合,可将杂原子嵌入 SBA-15 骨架。如在 SBA-15 骨架中掺杂 3 价金属离子(B^{3+} 、 Fe^{3+} 和 P^{3+})等可以在 SBA-15 骨架中引入酸性中心。如掺杂一些具有氧化还原性能的变价金属离子(Ti^{4+} 、 V^{5+} 、 Mo^{4+})等,则可以在骨架中引入具有氧化还原活性的催化活性中心。目前通过上述过程嵌入硅基骨架的原子有 B、Fe、Ti、Zr 等^[7]。由此衍生出多种催化材料已在石油加工、大宗化学品生产以及精细化学品制备方面显示出良好的应用前景。

后嫁接法是在合成 SBA-15 并去除模板剂以后,通过金属氯化物、金属醇盐、有机金属化合物及金属的配合物同 SBA-15 表面的硅醇键 Si—OH 进行反应,形成 M—O 共价键而将金属固定在 SBA-15 的骨架上^[8]。此方法能够在孔道中引入大量的金属离子或其他的催化活性中心。

2 SBA-15 的改性研究

2.1 金属改性

关于 SBA-15 负载金属催化剂的报道较多,故而把金属改性的侧重点偏向于金属氧化物、双组分金属的负载和金属配合物的负载。

2.1.1 金属氧化物负载

早在 2000 年就已有对 MCM-41 进行金属氧化物负载的报道^[9],从实验效果上来看,这种方法用

在 SBA-15 上也收到了较好的效果。Perea 等^[10]分别报道了 $CeO_2/SBA-15$ 和 $Au/CeO_2/SBA-15$ 的合成以及在 CO 催化氧化的应用研究。当 CeO_2 的负载量为质量分数 10% 时,催化活性达到最大。而同时 Au 和 CeO_2 的存在影响了该催化反应的催化活性。 $CeO_2/SBA-15$ 的催化活性小于 $Au/CeO_2/SBA-15$ 。作者认为,催化效率的高低,主要原因有二:其一是 Au 的高分散性能利于催化的进行;其二是在 Au 和 CeO_2 之间可能存在协同作用。Hess 等^[11]报道了 $VO_x/SBA-15$ 的制备,并分析了其合成机理。首先利用有机硅烷偶联剂 3-胺基丙基-三甲基硅烷(APTMS)预先与 SBA-15 表面硅羟基键合,功能化后再负载活性组分,使活性组分与硅烷偶联剂相互作用,再经焙烧将硅烷偶联剂除去,进而使活性组分进入载体 SBA-15 孔道中。而 APTMS 与 SBA-15 的硅羟基作用,使得质子化 APTMS 在 SBA-15 的表面形成单齿与多齿结构,这样的结构利于负载更多的 VO_x ,而且 SBA-15 表面的 APTMS 更利于 VO_x 在 SBA-15 表面的分散。Zhang 等^[12]分别采用原位法和浸渍法合成了 Cr-SBA-15 和 $CrO_x/SBA-15$ 。结果表明,随着 Cr 含量的增加,SBA-15 的外貌结构从长链状向棒状发展。同时,对其中 Cr 的配位方式分析发现,在 Cr-SBA-15 中,Cr 的配位方式是四配位的 Cr^{6+} 和八配位 Cr^{3+} ,而在 $CrO_x/SBA-15$ 则主要是以四配位的 Cr^{6+} 存在。这种配位方式的不同也导致了 $CrO_x/SBA-15$ 具有比 Cr-SBA-15 更好的还原能力。

(上接第 8 页)

加大对硅材料产业自主创新和科技成果转化的支持力度。支持符合条件的硅材料企业申报国家科技重大专项、高技术产业化专项、重点行业结构调整专项和装备制造业发展专项,对国家重大产业化专项、科技重大专项给予地方配套(配套资金不少于专项资金的 50%)。加快建立和完善以硅材料行业优势企业为核心的自主创新体系,加快硅材料高层次人才队伍建设,支持产学研战略联盟的建设与发展。

4.4 加强行业管理,指导产业健康发展

我国硅材料产业体系涉及产业领域较多,如冶金、有色金属、化工、电子、军工等,长期以来各产业间各自封闭,产业之间分割严重,使行业间的内在链接断裂。特别是在产业政策制订、基础科研、原料及产品供需统筹等方面往往着眼于单一产业,而忽视

了从全行业进行科学统筹考虑。相关行业组织包括有色金属工业协会、有机氟硅材料工业协会、电子材料工业协会、可再生能源学会等,在推动产业发展的工作中,大都从自己的归属工作范围考虑,使行业组织之间缺少必要的联系,这些都在一定程度上影响了国家相关产业政策的统揽性、连贯性和科学性。我国至今仍没有出现大型一体化生产企业与现有条块分割的行业管理体制不无关系。建议由工信部、发改委、能源局、商务部、科技部等有关部门,吸收各行业协会,建立一个涵盖硅材料生产、加工、应用的行业协调机制,加强各个部门在政策制定等方面的有机协调,使政策更科学,执行更高效,效果更突出。建议从长远角度出发,制定科学、可行、有针对性和指导意义的行业整体发展规划,并采取行之有效的调节手段。■