

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2009.03256

石油化工自主创新——规律性认识及案例

闵恩泽, 谢文华

(中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院, 北京 100083)

摘要: 提高自主创新能力, 建设创新型国家, 是国家发展战略的核心。自主创新包括原始创新、集成创新、引进装置消化吸收再创新。笔者认为, 在自主创新中, 原始创新最为重要, 原始创新的构思来自联想, 联想源于博学广识和集体智慧; 验证原始创新构思和实现工业化, 道路曲折崎岖, 必须要有各尽所能的团队精神以及战胜困难、坚持到底的奋斗精神。本文基于三个石化行业催化技术的创新案例, 探讨了这些自主创新的科研思想和工作方法。

关键词: 石油化工; 自主创新; 科研思想; 工作方法

中图分类号: TE6

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2009)03-0256-09

胡锦涛总书记在党的十七大报告中提出, 要
提高自主创新能力, 建设创新型国家, 促进国民
经济又好又快发展。可见, 创新是国家发展战略
的核心, 是提高综合国力的关键。因此, 我们每
个人, 每个单位都要努力去创新。自主创新包括
原始创新、集成创新、引进装置消化吸收再创新。
在自主创新中, 原始创新最为重要。那么, 如何
实现原始创新? 根据以往的创新实践, 笔者认为,
新构思常常来自联想, 而联想源于博学广识和集
体智慧; 有了新构思, 还要在实验中加以验证,
并进一步将新构思实现产业化, 其间的道路曲折崎
岖, 困难重重; 因此, 在创新和产业化过程中, 必
须有各尽所能的团队精神, 不断战胜困难坚持到底,
才能最终实现自主创新^[1]。本文以石油化学工程中的
创新案例来佐证上述基本认识。

1 关于工程技术创新的若干规律性认识

1.1 原始创新的本质: 原有科学知识基础的转移

福斯特(R.Foster)在《创新: 进攻者的优势》一

书中总结了1930—1980年间化学工业中的重大
新技术的进步规律^[2], 发现技术进步一般都要经
历一个S型曲线的发展周期(图1)。

图1表明, 在开发一个新产品或新工艺的初
期, 投入人力、物力后, 技术进展比较缓慢, 直
到发现了一个有意义的开端, 技术进步才开始加
快; 之后, 技术不断改进, 取得连续式的技术进
步, 达到较高的技术水平; 最后技术进步又会变
得困难, 进展速度减慢以至于接近或达到其发展
极限。这时候, 技术进步就需要转移到一个全新
的科学知识基础上去, 从而形成相对于现有技术
的非连续式技术进步。从胶卷照相到数码照相,
从阴极射线显像管电视到液晶电视等, 都是非连
续式技术进步的具体例子。在炼油工业中, 当然
也存在着非连续式的技术进步。20世纪60年代,
裂化催化剂从无定型硅铝发展到分子筛, 开辟了
催化科学从表面催化到晶内催化的新纪元。分子
筛裂化催化剂代替无定型硅铝催化剂应用于移动
床催化裂化装置后, 催化裂化的转化率由49.5%

收稿日期: 2009-08-25; 修回日期: 2009-09-10

作者简介: 闵恩泽(1924-), 男, 四川成都人, 博士, 中国科学院院士, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为石油化工
催化剂与工艺的研发。E-mail: minenze@ripp-sinopec.com
谢文华(1968-), 女, 河北献县人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为酸性催化剂的研究。

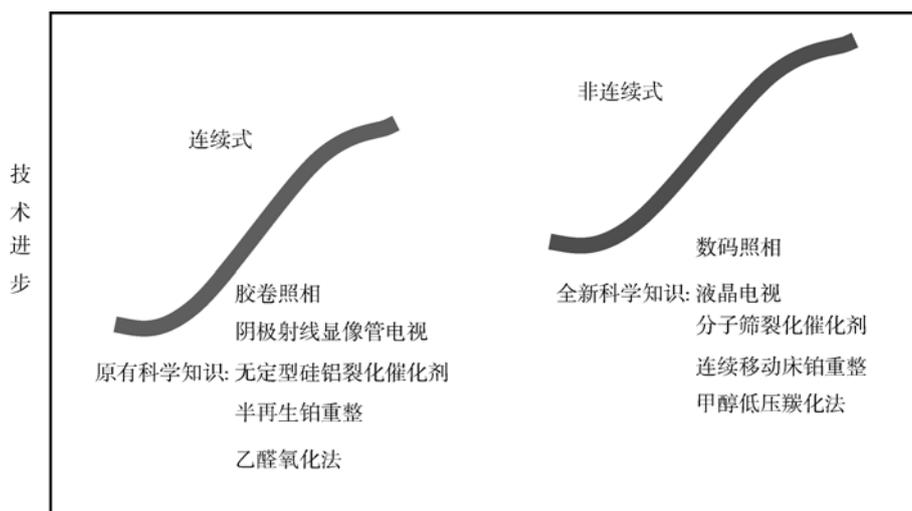


图 1 化工技术进步的 S 型曲线

提高到 73.4%，汽油产率从 32.9% 增加到 48.7%。这一成就被誉为“60 年代炼油工业的技术革命”^[3]；这一创新性成果是通过新催化材料的发明来实现的。另一个例子是铂重整。为了提高芳烃产率，需要把半再生铂重整反应压力降低以达到烷烃的芳构化，但压力降低后，催化剂迅速结焦，于是人们开发了连续移动床铂重整。这是通过转移反应工程的科学知识基础来实现技术创新的实例。20 世纪 50 年代，醋酸的生产工艺是以乙烯为原料的乙醛氧化法；70 年代，人们发明了甲醇低压羰化法，由于原料便宜、工艺简化、副反应少、产品质量高，结果迅速取代了乙醛氧化法。这是通过发明新反应机理来转移原有技术的科学知识基础进而实现技术创新的实例。由此可见，原始创新的本质在于现有技术的科学知识基础发生了转移，从而开启了全新的技术发展路线。

1.2 新构思的源泉：基于博学广识和集体智慧的联想

既然原始创新非常重要，那么原始创新的构思从哪里获得呢？2006 年，本文第一作者与来自重庆的画家古月闲谈四川民国初年的往事。出于对美术创作的好奇，就问他：“您在绘画中是如何创新的？”古月说，要广泛写生。四川的名山大

川，如峨眉山、青城山、都江堰、三峡等他都去过多次。他在创作一幅画时，就会把在这些写生中所见的险峻的奇峰、陡峭的崖壁、奔腾的江流、壮阔的瀑布等联想起来，组成他的创作。由此，古月归纳出“创新来自联想”的结论。

这次看似平凡的对话使人深受启发：画家是临摹古今中外的名画；而在石油化工技术研发中，科研人员要博览古今中外的论文、专利、著作，汲取精华；科研的起点不仅要“详人之不详，补人之所缺”，更要“自主开拓创新”。为此，科研人员不是要去“游历名山大川，师法自然”，而是要到国家政府部门、技术市场、企业工厂、产品用户中去了解国家和市场需求，然后去设想研究课题，安排好近、中、远的研究课题。在石油化工领域，新催化材料、新反应工程、新反应机理都是应该研究的重点，它们是实现原始创新的科学知识基础。之所以这样说，是因为新催化材料是创造发明新催化剂和新工艺的源泉；新反应工程是开发新工艺的必由之路；新反应的发现是发明新工艺的基础；新催化材料与新反应工程的组合往往带来集成创新。

1.3 自主创新的精神支柱：团队精神和坚韧不拔

电视剧《西游记》的主题歌是：“你挑着担，我牵着马，迎来日出送走晚霞。踏平坎坷成大道，

斗罢艰险又出发, 又出发。你挑着担, 我牵着马, 翻山涉水两肩霜花。风云雷电任叱咤, 一路豪歌向天涯, 向天涯。啦……啦……一番番春秋冬夏, 一场场酸甜苦辣。敢问路在何方, 路在脚下。”

这里面有两种精神: 一是“你挑着担, 我牵着马”的各尽所能的团队精神; 二是体现在“踏平坎坷成大道, 斗罢艰险又出发”、“翻山涉水两肩霜花, 风云雷电任叱咤”以及“一番番春秋冬夏, 一场场酸甜苦辣”之中的坚韧不拔的精神。这两种精神也是走自主创新之路、攀登科技高峰所不可缺少的。

这是因为, 原始创新来自联想, 联想源于博学广识和集体智慧, 验证原始创新构思和实现工业化, 其间有多学科、多层次的合作, 有重重的困难需要克服, 因此, 在自主创新中, 一定要有各尽所能、团结协同的团队精神。

2 工程技术创新的若干案例

上述规律性认识, 部分来源于自身亲历的几项工程技术创新实践。因此, 下面以案例形式, 简要回顾我们在新材料、新反应和新反应工程创新中的科研活动, 进一步剖析和印证这些规律性认识。

2.1 非晶态镍合金的发明和迈向工业化的崎岖之路——新催化材料领域的案例

非晶态合金作为磁性材料早已广泛应用在电子工业等行业中。鉴于非晶态合金表面缺陷多, 形成的催化活性中心数目多, 表面原子配位不饱和度高, 催化活性高; 加之所有金属和类金属均可以形成非晶态合金, 找到新催化剂的机会多, 因此, 我们于 1985 年决定选择非晶态合金作为新催化材料开展研究。

由于镍(Ni)是石油化工反应中常用的加氢活性组元, 因此我们先用急冷法制备 Ni-P 非晶态合金, 探讨其作为催化剂的表面活性中心的性质, 还

研究了氢的吸附态及其与乙烯的反应宏观动力学。结果证实, 非晶态 Ni-P 的苯乙烯加氢活性高于晶态 Ni-P 合金^[4]。这说明, 非晶态合金作为新催化材料具有发展前景。随后, 又认识到, Ni-P 非晶态合金的催化活性与预处理条件有关, 只有经过酸洗、氧化、氢还原等预处理过程后, Ni-P 非晶态合金才表现出优良的加氢活性。这是因为, 表面氧化的 Ni 和 P 在催化反应中起着重要作用, 而 Ni-P 非晶态合金中加入稀土元素 Y 能稳定催化剂表面的氧化态, 从而使表面 Ni-P-O 还原的温度大幅度提高, 这对提高 Ni-P 非晶态合金的稳定性有重要作用^[5]。然而, 现有的 Ni-P 非晶态合金的比表面积小于 $1 \text{ m}^2/\text{g}$, 只有提高比表面、扩大孔体积, 制成非晶态的多孔、骨架镍合金, 才能发挥出更高的加氢活性。

为此, 我们借鉴了雷尼镍(Raney-Ni)催化剂的制备方法: 先制成 Ni-Al 合金, 再将其中的 Al 溶解掉, 形成孔道。在试制 Ni-Al 体系合金的过程中, 发现这一类合金熔点高、粘稠且易氧化。因此, 开发了适于这种 Ni-Al 体系的急冷法关键设备, 如坩埚、喷嘴、铜辊等, 制备出了非晶态 Ni-Al 合金^[6]。而后, 采用化学法抽铝, 形成大孔、高比表面积的非晶态骨架镍合金。接下来, 加入稀土混合物以提高非晶态合金的热稳定性, 再经预处理来提高非晶度。试验结果令人振奋。图 2 表明了在各种有机合成的加氢反应中这种催化剂的活性。

上述成果是对 1925 年美国科学家 Murray Raney 发明的并以其名字命名的雷尼镍加氢催化剂(广泛应用于医药、农药、化纤、化工等多种行业, 世界上消耗巨大的催化剂)的一种技术突破, 由此带来了跨越式的技术发展^[7-8]。在上述成果的基础上, 国内建成了 100t/a 非晶态合金工厂, 开发了一系列品种, 应用于己内酰胺加氢精制、药物中间体、山梨醇等的加氢反应。

在本文中的“我们”是指闵恩泽带领的石油化工科学研究院的研究团队。

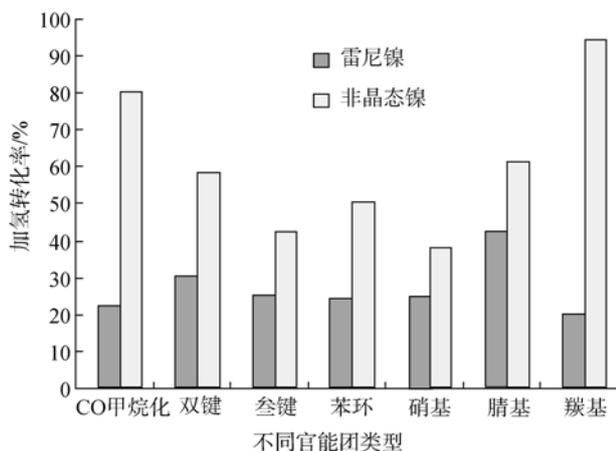


图 2 多种有机合成的加氢反应中催化剂的活性

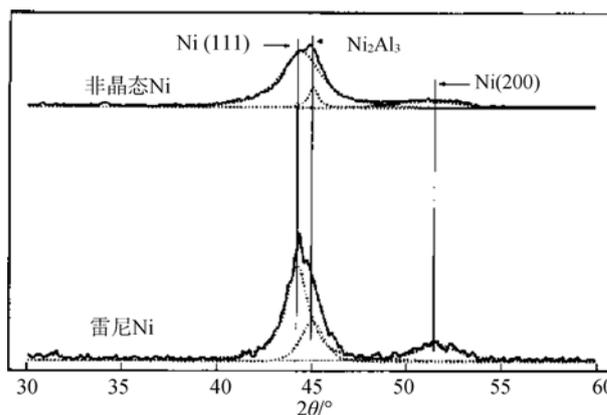


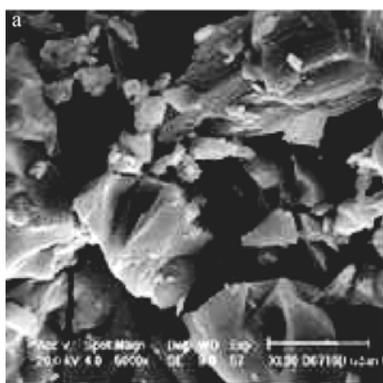
图 3 雷尼镍和非晶态合金的 XRD 图

如前所述，原始创新必须转移技术的科学知识基础。雷尼镍合金是晶态的，这种规整的晶态合金的活性中心一般存在于晶体的边角，而非晶态合金的活性中心不仅仅限于边角，还存在于合金表面。对于非晶态多孔骨架镍合金催化剂加氢活性高的原因，石油化工科学研究院与北京科技大学材料物理系、大连化学物理研究所联合开展了基础性研究。图 3 和图 4 是雷尼镍和非晶态合金的 XRD 和 SEM 图，展示了两者的结构差别^[9]。

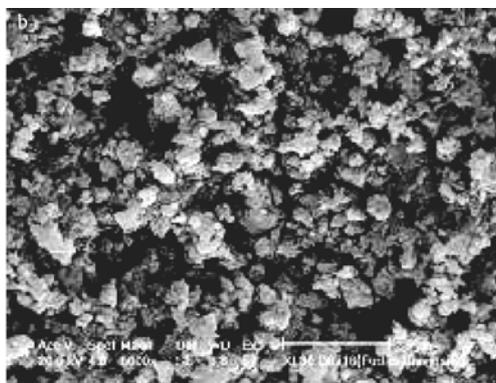
在非晶态镍合金的发明过程中，创新的火花是怎样出现的？由于非晶态镍合金是利用冶金工业的急冷法制造非晶态合金和化学工业中制造催化剂的化学抽铝法制造出来的，所以，其重要启示就是，不同专业知识的交叉与集成能带来原始创新和集成创新的思想火花。

2005 年这项发明获得国家科学技术发明一等奖。非晶态合金催化剂的研究历时 20 年，其间石油化工科学研究院形成了一个相互合作、彼此支持的团队。该团队与复旦大学化学系和东北工学院在研发中有着密切合作，而在工业生产和工业应用中岳阳建长催化剂分公司以及中石化巴陵石化分公司则投入了大量的人力、物力，由此走出了一条产、学、研三结合的创新之路。

当然，这二十年的研发历程是坎坷不平的。初期只用急冷法研制 Ni-P 非晶态合金，未获成功。后来通过急冷法与化学抽铝法集成，来试制骨架镍合金，并选择了合适的反应体系，才终于走上成功之路。在工业试验中，同样遇到很多困难。例如，在第一次工业试用时，加入催化剂后未能显示加氢活性，第二次试用才显示了良好加氢活性，但一周后，催化剂又先后失去活性。可以说，



Raney 镍 SEM 图



非晶态镍合金 SEM 图

图 4 雷尼镍和非晶态合金的 SEM 图

其间所遇到的挫折难以尽数。这说明,要自主创新首先必须要有一个明确的目标,同时要坚定信念,克服困难,不怕失败,具有坚持到底的精神。

2.2 磁稳定流化床反应器的发明与应用——新反应工程的案例

利用非晶态镍合金在低温下的优异加氢活性和磁性,与磁稳定流化床集成来开发新加氢工艺,是新催化材料和新反应工程的集成创新^[10-16]。

1970年,本文第一作者去伊朗参加第二届国际化学工程会议,听到来自埃克森美孚公司的研究人员关于磁稳定流化床的报告,开始认识到这是一种新型反应器,具有流化床和固定床的优点。后来,又读到埃克森美孚公司基础研究实验室主任在美国西北大学所做的一份报告,他把金属原子簇、液膜分离、磁稳定流化床作为长远研究的领域。这使我们进一步认识到磁稳定流化床的重要意义。

经验表明,每逢一个新催化材料发现后,都要配套开发新型反应器,只有这样,才能充分发挥其优越性。例如,20世纪60年代分子筛裂化催化剂出现后,人们先是在原有催化裂化的流化床反应器中使用,由于相对于分子筛的高活性,几分钟的反应时间过长,造成催化剂上积炭多,选择性变坏,于是开发了提升管反应器,使反应时间缩短为几秒钟,从而使分子筛的高活性、高选择性得到充分发挥。基于这种考虑,在发明了非晶态镍合金催化剂后,就开始思考如何开发配套的新反应器的问题。由于非晶态镍合金具有优异的低温加氢活性,同时又具有磁性,正好符合磁稳定流化床加氢催化剂的要求,于是就想到要开展非晶态镍合金与磁稳定流化床的集成研究。

为此,我们组织力量开展了一次有关国内外磁稳定流化床的调研。结果发现,磁稳定流化床是磁场流化床的特殊形式,它是以磁性颗粒为固相,在不随时间变化的轴向均匀磁场下形成的只

有微弱运动的稳定床层。磁稳定流化床兼有固定床和流化床的许多优点:(1)它可以像流化床那样使用小颗粒固体而不至于造成过高的压力降,外加磁场的作用有效地控制了相间返混,均匀的空隙度又使床层内部不易出现沟流;(2)细小颗粒的可流动性使得装卸固体非常便利;(3)使用磁稳定流化床不仅可以避免流化床操作中经常出现的固体颗粒流失现象,也可以避免固定床中可能出现的局部热点;(4)磁稳定流化床可以在较宽范围内稳定操作,还可以破碎气泡、改善相间传质。总之,磁稳定流化床是不同领域知识(磁体流体力学与反应工程)结合形成新思想的典范,是一种新型的、具有创造性的床层形式。从这一时期的文献中可以看出,当时对磁稳定流化床的研究大多采用铁粉、钢球等惰性磁性颗粒,而不是具有磁性的催化剂;所用介质一般为空气和水,尚未采用工业反应体系;而且对于气固两相、液固两相的研究居多,而对气液固三相的研究偏少。

基于上述认识,从1992年开始,我们首先选择了磁稳定床重整生成油加氢来进行研究。小型试验虽然显示了其相对于传统的Mo-Co/Al₂O₃催化剂和改性Pt/Al₂O₃催化剂固定床加氢工艺的一些优点,但是优越性不够突出。于是,转而把科研力量集中于开发磁稳定床己内酰胺加氢精制。1998年,通过建立冷模装置,研究了液固两相磁稳定床流体力学特性和气液固三相磁稳定床流体力学特性。冷模试验发现,随磁场强度增加,床层磁化结构依次为散式、链式和磁聚状态,而最佳状态是链式。后来,又对磁稳定床中最低磁化速度、颗粒带出速度等进行了系统研究,得出了由非晶态镍合金催化剂颗粒和水形成的液固两相磁稳定床的操作相图(图5),用以指导磁稳定床在链状区的操作^[17]。

在此基础上,我们为磁稳定床的工业化设计了具有均匀磁场的磁稳定床反应器,设计制造了四种不同尺寸的线圈,研究了磁场轴向、径向分

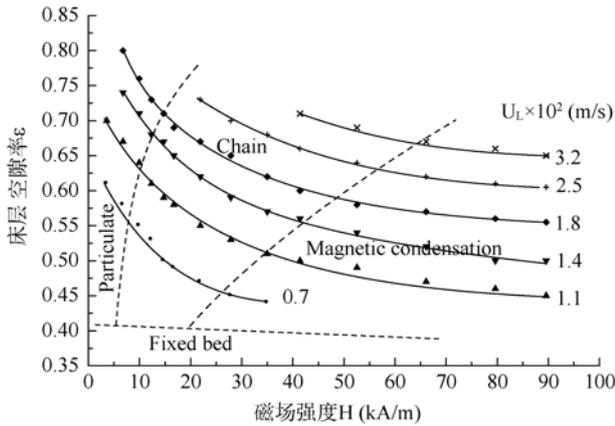


图5 非晶态镍合金催化剂和水形成的液固磁稳定床相图

布规律，考察了各种参数对磁场的影响。根据这些结果，最终设计出了磁场均匀的磁稳定床反应器(图6)。其中，通过采用特殊设计的磁格栅内构件，实现了磁场径向均匀分布；通过巧妙安排电磁感应器布局，实现了磁场轴向均匀分布；通过采用强制水冷取热，实现了长周期安全和稳定运转。与此同时，还建立了均匀磁场设计的数学模型。

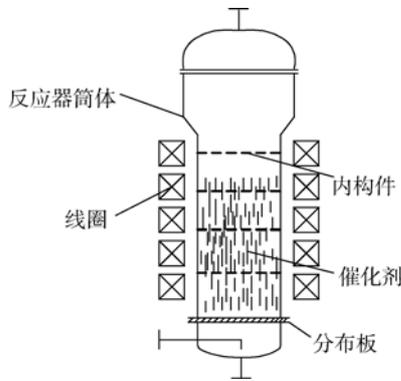


图6 磁稳定床结构示意图

2000年，在冷模试验的基础上，我们考察了各种加氢方案。结果表明，搅拌釜与磁稳定床串联方案加氢效果好，空速也可较大，比较适合现有搅拌釜式加氢装置的技术改造；而溶解氢方案投资较少，操作更方便，适合于新建加氢精制装置。此外，还建立了己内酰胺水溶液加氢精制的液固磁稳定床反应器数学模型，对处理能力为

6000 t/a 的中试液固磁稳定床反应器进行了模拟，模拟结果与实验结果吻合良好。并对处理能力为 7×10^4 t/a 的工业磁稳定床反应器进行了模拟计算，为工业磁稳定床反应器的设计奠定了基础。

2003年，基于上述成果，石家庄化纤有限责任公司建成了国际上第一套磁稳定床己内酰胺加氢精制工业装置。与搅拌釜反应器相比，反应器体积由 20 m^3 降低为 3.2 m^3 ，催化剂单耗由 0.21 kg/t 己内酰胺降低到 0.06 kg/t 己内酰胺，己内酰胺优级品率得到较大提高，从而取得了巨大的经济效益。

目前，磁稳定流化床已成为中国石化独有的、积累了丰富工艺试验数据的、国际领先的新型反应器。磁稳定床己内酰胺加氢精制新工艺的工业应用成功，对于原始创新和集成创新有下列启示：

(1) 原始创新和集成创新导源于科学知识基础的转移。非晶态镍合金催化剂的使用，从搅拌釜式反应器发展到磁稳定床，转换了反应器的科学知识基础，进而带来了新工艺的全新发明。事实上，在开发一个以前没有的新工艺过程中，需要开展一系列基础研究去攻克科技难关。例如，探讨液固磁稳定床流体力学特性和相关的相图，建立磁稳定床均匀磁场设计的数学模型等。因此，必须进行导向性基础研究以建立新工艺的科学知识基础。

(2) 博学多识，了解科技发展前沿是原始创新和集成创新的基础。通过去伊朗参加第二届国际化学工程会议，了解到磁稳定流化床这一国际前沿新反应工程的优越性，进而产生了非晶态合金催化剂与磁稳定流化床集成的想法，这充分说明了博学广识、了解国际科技前沿的重要性。

(3) 原始创新和集成创新也需要借鉴前人的经验。在发明了新催化材料后，接着开发了与其配套的新反应器。这个思路吸收了他人的成功经验，因为此前分子筛催化剂发明后就配套开发了提升管反应器，由此才实现了该发明的潜力。这

个思路也表明,新催化材料与新反应工程的集成往往能形成重大的集成创新。

(4) 原始创新和集成创新要具体落实到工业应用中,在这个过程中,要认真分析新工艺的优越性和局限性。多年的工业实践表明,非晶态合金催化剂/磁稳定床加氢工艺特别适合加氢精制脱除微量杂质,耗氢量极低,甚至只需要原料中的溶解氢即可发生反应,这时形成液固磁稳定流化床,就能实现高空操作,充分发挥其优越性。

2.3 环己酮制环己酮肟的“原子经济”反应——新反应领域的案例

己内酰胺是一种重要的有机化工原料,主要用于生产尼龙6纤维和工程塑料。其中尼龙6广泛用于丝绸、帘子布、地毯等的制造,而尼龙6工程塑料则广泛用于电子、汽车以及包装薄膜中。

己内酰胺的生产过程是,以苯为原料,先加氢生成环己烷,再氧化生成环己酮,而后环己酮经过氨氧化、 NO_x 吸收、羟胺、肟化等四步工序转化成环己酮肟,而环己酮肟经过重排才能生产出己内酰胺,最后还要经过多步工序精制过程才可制得己内酰胺产品。这个生产过程非常复杂,且伴有环境污染。在这一系列的反应过程中,环己酮氨氧化生成环己酮肟是一个关键环节。从国外引进的工艺是“四步法”(图7),要在三套装置中才能完成。笔者的研究团队开发了“一步法”反

应,从而取代了进口工艺。这种“原子经济”新工艺以环己酮、氨和双氧水为原料,由原来的不使用催化剂变成使用新型钛硅分子筛为催化剂;氧化剂由原来的空气变为双氧水;在连续式搅拌釜中一步反应合成环己酮肟;并采用膜分离技术实现催化剂与产物的分离,环己酮转化率和选择性都很好。

环己酮肟一步法“原子经济”反应的创意来自意大利 ENI 集团,但后者只建成了2万吨/年工业示范装置,其工艺为采用钛硅分子筛成型催化剂的二段反应工艺。我们的工艺创新点为:(1)采用钛硅分子筛原粉,颗粒为亚微米,有利于反应的进行,同时省去了国外采用分子筛成型中喷雾干燥等制造设备,减少了损失;(2)开发了单釜连续淤浆床催化反应—微孔膜分离和循环使用分子筛原粉的新工艺,成功地解决了碱性反应中膜堵塞的难题,同时还发明了添加硅助剂抑制分子筛流失的工艺方法;(3)在设备工程方面,还开发了防止钛硅分子筛粘壁的技术。在工业试验的长期运转中,发现了钛硅分子筛原粉粘附沉积到金属管道上的“粘壁”现象。对此,采用一种特殊的惰性材料涂在管壁内并使用特殊结构的金属波纹管等,最终解决了问题。

与现有装置相比,新工艺省掉了氨氧化、 NO_x 吸收、Pd/C催化剂加氢等工序;不需要循环压缩机、空压机等大型辅助设备,设备投资和能耗大



引进的四步法工业装置



一步法氨肟化装置

图7 原子经济反应代替原四步法反应

大降低；反应条件温和，运行成本低，产品质量好。不仅如此，这项新工艺属于环境友好型，因而深受企业领导、技术人员和操作人员的欢迎。7万吨/年工业装置已建成投产，投资为引进的21.1%，平均每吨己内酰胺的可变成本降低了644元。目前，工业装置已扩建为14万吨/年。

这项成果，由石油化工科学院、中国石化巴陵分公司、设计单位、催化剂厂、设备制造商等多家单位合作才能把实验室经过20年努力得到的成果产业化，所以这项成果也是集体智慧的结晶，是发挥各尽所能、团结合作、不断克服困难，坚持到底的精神的又一范例。

3 结语

从上述这些创新案例中，可以看到：原始创新有赖于技术的科学知识基础的转换；创新来自联想，联想又源于博学广识和集体智慧；而团队精神和坚持到底的精神是完成自主创新的精神支柱。在石化领域，科研人员要进行原始创新和集成创新，还需要把新催化材料、新反应工程、新反应机理的研究作为重点，并充分重视不同学科之间的交叉。

回顾这些新技术研发活动，笔者认为，中国科技人员有信心也有能力走出一条有自主科学实践经验、具有独特路径和优势的自主创新之路。同时，笔者也深信，在未来的自主创新道路上，中国的工程创新一定能取得辉煌成绩。

参考文献

- [1] 闵恩泽. 石油化工：从案例探寻自主创新之路[M]. 北京：化学工业出版社. 2008: 2.
- [2] Foster R. Innovation: The Attacker's Advantage[M]. New York: Summit Books, 1986.
- [3] Plank C J. The Invention of zeolite cracking catalysts: a personal viewpoint[G]//Davis B H and Hettinger W P, Jr Heterogenous Catalysis: Selected American Histories, ACS Symposium Series 222. Washington DC: American Chemical Society, 1983: 253-271
- [4] 宗保宁, 闵恩泽, 董树忠, 等. 非晶态金属合金作催化材料的研究 : N-P 非晶态合金对苯乙烯加氢活性的研究[J]. 化学学报, 1989(47): 1052-1055.
- [5] 宗保宁, 闵恩泽. 非晶态合金催化剂和磁稳定床反应工艺的创新与集成[C]//中国工程院化工、冶金与材料工程学部学术会议论文集. 北京: 中国工程院化工、冶金与材料工程学部, 2005: 166-168.
- [6] 宗保宁, 闵恩泽, 朱永山. 大比表面非晶态合金及其制备: 中国, ZL91111807.1 [P]. 1991-12-24.
- [7] 宗保宁, 闵恩泽, 王正国, 等. 一种烯烃或芳烃的饱和加氢方法: 中国, CN1146443 [P]. 1995-9-26.
- [8] 慕旭宏, 宗保宁, 闵恩泽. 一种高铁磁性非晶态合金催化剂, 中国, CN1152475 [P]. 1995-12-10.
- [9] Hu H R, Qiao M H, Wang S, et al. Structural and catalytic properties of skeletal Ni catalyst prepared from the rapidly quenched Ni50Al50 alloy[J]. J. Catal., 2004, 221(2): 612-618.
- [10] 慕旭宏, 王宣, 汪颖, 等. 一种己内酰胺加氢精制方法: 中国, ZL99106165.9 [P]. 1999-04-19.
- [11] 慕旭宏, 王宣, 孟祥堃, 等. 己内酰胺加氢精制方法: 中国, ZL99106167.5 [P]. 1999-04-29.
- [12] 朱泽华. 磁稳定床反应器中己内酰胺加氢精制过程研究[D]. 北京: 石油化工科学研究院, 2004.
- [13] 孟祥堃, 慕旭宏, 江雨生, 等. 液固磁稳定床流体力学特性[J]. 化工学报, 2004, 55(1): 134-137.
- [14] 孟祥堃, 朱泽华, 慕旭宏, 等. 己内酰胺加氢精制磁稳定床反应器的模拟[J]. 石油学报:石油加工, 2005, 21(1): 1.
- [15] 孟祥堃, 宗保宁, 慕旭宏, 等. 磁稳定床反应器中己内酰胺加氢精制过程研究[J]. 化学反应工程与工艺, 2002, 18(1): 26-30.
- [16] Meng Xiangkun, Mu Xuhong, Zong Baoning, et al. Purification of caprolactam in magnetically stabilized bed reactor[J]. Catalysis Today, 2003, 79-80(1): 21-27.
- [17] 孟祥堃. 磁稳定床反应器中己内酰胺加氢精制过程研究[R]. 北京: 石油化工科学研究院博士后研究报告, 2000.

Independent Innovations in Petrochemical Technology: Principles and Cases

Min Enze, Xie Wenhua

(SINOPEC Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083)

Abstract: To improve the innovation capability and to build an innovative country are among the essential strategies for the national development of China. The independent innovation includes original innovation, integrated innovation, and digestion, absorption and re-innovation of the imported foreign technologies, of which the original innovation is the most important one. It is presented that the innovative ideas come from association of different ideas, originally derived from extensive knowledge and collective wisdom, that it always takes a long and rugged way to validate the original innovative ideas and to realize their value in the market, and that to achieve these targets, team spirit, perseverance and courage are required to overcome difficulties. Such principles and methods for the independent innovation are confirmed through an analysis of three innovation cases of catalytic technologies in the petrochemical industry.

Key words: petrochemical industry; independent innovation; research methodology; working methods

责任编辑：王大洲