

徐振刚：中国现代煤化工近 25 年发展的回顾、反思与展望

煤化工技术是指以煤为原料生产各种能源或化工产品的工艺过程，一般包括煤炭转化和后续加工 2 个环节。煤炭转化是指煤炭经过化学反应过程得到气态、液态或固态产物的过程，主要有煤炭气化、煤炭直接液化、煤炭高温炼焦、煤炭中低温热解等工艺过程。显然，上述不同形态的煤炭转化产物并不一定是市场上需要的最终产品，因而往往还要对这些不同形态的产物进行适当的后续加工，以最终获得可以直接使用的各种能源或化工产品。后续加工主要包括以煤气中的 H_2 、 CO 等气体组分为原料的化工合成和对煤炭转化液态产物进行加氢提质与改性等深加工的工艺过程。传统煤化工的典型代表有煤炭炼焦、煤制合成氨、煤制甲醇、煤制电石—乙炔—聚氯乙烯等。现代煤化工相对于传统煤化工而言，不仅表现在产品种类的逐渐增多和生产规模的日益扩大，更体现在新工艺、新装备、新材料的不断涌现和工艺过程控制水平的大幅提升以及安全手段和环保措施的日臻完善等。现代煤化工的典型代表有煤直接液化、煤气化、合成气费托合成(煤间接液化)、大型煤制甲醇、甲醇制烯烃、甲醇制芳烃、煤制乙二醇、煤制天然气等。从 20 世纪末开始，中国现代煤化工经过了近 25 年的快速发展，取得了举世瞩目的辉煌成就，在国民经济的高速、健康、可持续发展中发挥着不可小视的作用。

1 煤化工发展历程

中国现代煤化工在近 25 年快速发展过程中，一直受到国家领导人和相关政府部门的高度关注。现代煤化工发展刚起步时，时任国家主席江泽民于 1996 年 1 月 19 日视察了煤炭科学研究总院煤直接液化技术研发实验室，并在现场作出重要指示，从此拉开了中国现代煤化工快速发展的序幕。20 年后，2016 年 7 月 19 日国家主席习近平视察了神华宁煤 400 万 t/a 煤间接液化工业化示范项目现场并发表重要讲话，对中国现代煤化工持续快速发展提出了新的目标和要求。中国现代煤化工近 25 年的快速发展过程，贯穿了从“九五”到“十三五”的 5 个国民经济发展的“五年计划”。实际上，从“六五”(1981—1985 年)起，国家就已经开始重视和加强煤化工技术实验室研究，并不断加大科研力度和经费投入，组织全国科研机构及相关力量，广泛而深入地开展了煤炭基本性质与转化特性研究，建立了国家级煤炭资源、基本性质及转化特性数据库。到“八五”(1991—1995 年)末期，已经完成煤气化、煤直接液化、煤间接液化(合成气费托合成)以及其他化工合成等大量实验室研究工作，取得了一批重要研究成果，为中国现代煤化工的快速发展奠定了坚实的理论基础。现代煤化工技术从实验室走上工业化的创新发展历程，先后经历了实验室研究、工程化开发、工业化示范、商业化验证、产业化应用等各具时代特征的历史发展阶段。

1.1 “九五”期间，梳理实验室成果，开始试验验证

1) 煤直接液化方面取得的成果。“九五”期间(1996—2000 年)，煤直接液化、煤气化、费托合成等一批现代煤化工单项技术开始加快实验室研发，国家和企业逐渐加大科研开发经费投入，梳理后取得了一批实验室研发成果，为进入新世纪后中国现代煤化工的快速发展奠定了坚实的技术基础。特别是在煤直接液化方面，完成了当时国内主要煤田的煤质研究与液化性能评价试验工作，筛选出 15 处可供建厂考虑的候选煤田及煤种(表 1)，并分别对内蒙古(用鄂尔多斯长焰煤)、云南(用先锋褐煤)、黑龙江(用依兰长焰煤)建设工业化示范项目开展了较详细的工程建设可行性研究工作。

2) 煤气化方面取得的成果。在学习并考察发达国家大型先进煤气化技术的同时，对国内已经引进的典型水煤浆和干燥粉气流床加压气化技术进行了认真消化吸收，总结了国内已有各种煤气化技术的特点及应用情况。经过分析对比认为，生产能力更大、原料煤适应范围更广的气流床加压煤气化技术应该是中国现代煤化工需要的发展方向。多家研发机构在实验室内进行了大量的理论研究、

基础试验及放大验证，积极为加快自主知识产权煤气化新技术的工程化开发做好了必要的准备。特别是华东理工大学系统地完成了多喷嘴水煤浆气流床加压气化中试装置建设前的技术研发工作。

3) 合成气费托合成方面取得的成果。合成气费托合成技术的关键是专用催化剂和配套反应器，对此国内均已有大量实验室研究成果和工程化开发积累。在认真总结已完成研发工作取得的创新经验和教训的同时，重新梳理在催化剂和反应器等方面值得进一步开展科技创新工作的重点方向和在工程化开发工作中取得的宝贵经验，并完成了必要的补充研发工作，为下一步开展中试研究在各方面做好了必要的前期准备。特别是中国科学院山西煤炭化学研究所开始启动了合成气费托合成(煤间接液化)中试装置的建设工作。

表 115 种适宜直接液化的中国煤炭在投煤量 100kg/d 连续液化装置上的试验结果

序号	原料煤	转化率/%	油产率/%	氢耗/%	气产率/%	水产率/%
1	甘肃天祝气煤	96.17	69.62	6.61	14.5	11.43
2	辽宁沈北褐煤	96.13	68.04	6.75	15.93	16.74
3	山东北宿气煤	93.84	67.58	5.36	12.77	9.97
4	山东滕县气煤	94.33	67.02	5.56	13.47	10.46
5	吉林梅河口长焰煤	94	66.54	6.03	16.85	13.6
6	山东龙口褐煤	94.16	66.37	5.24	15.66	15.69
7	云南先锋褐煤	97.91	62.68	6.22	17.43	18.83
8	黑龙江依兰长焰煤	94.79	62.6	5.9	16.9	12.33
9	内蒙古元宝山褐煤	94.18	62.49	5.63	16.42	14.91
10	辽宁抚顺长焰煤	89.33	62.35	4.48	12.2	11.24
11	内蒙古胜利褐煤	97.02	62.34	5.72	17.87	20
12	辽宁阜新长焰煤	95.91	62.05	5.5	14.9	14.04
13	陕西神木长焰煤	88.02	60.74	5.46	12.9	11.05
14	黑龙江双鸭山长焰煤	93.27	60.53	5.12	16.05	9.24
15	内蒙古宝日格勒褐煤	97.17	59.25	5.31	16.63	16.37

1.2 “十五”期间，转入工程化开发，开始中间试验

“十五”(2001—2005年)是进入新世纪后的首个“五年计划”，国家开始高度重视现代煤化工新技术的中试研究，在相关政策上大力支持企业作为主体发展现代煤化工，并以国家重点基础研究发展计划(973计划)、国家高技术研究发展计划(863计划)、国家科技支撑计划(科技攻关计划)等途径投入更多的研发经费，从此掀起了煤化工新技术中试项目建设的热潮，先后完成了煤直接液化、煤气化、合成气费托合成、大型煤制甲醇、甲醇制烯烃、合成气制乙二醇、合成气制天然气等一大批现代煤化工单项技术的中试验证研究。到“十五”末期，形成了一批具有自主知识产权的现代煤化工高新技术，为下一步中国现代煤化工的工业化示范项目建设提供了多途径的技术选择。图1—图4为“十五”期间完成的4个有代表性的现代煤化工单项技术的中试装置。“十五”末期，国家开始倡导现代煤化工产业化发展。2004年7月，国务院出台《能源中长期发展规划纲要》，

在重点领域和重点工程中都涉及到了煤制油领域，现代煤化工产业迎来发展机遇期。2005 年 9 月，国务院“关于促进煤炭工业健康发展的若干意见”中指出，要稳步实施煤炭液化、气化工程，从而为接下来一批现代煤化工的工业化示范项目建设奠定了政策基础。



图 1 原料煤处理能力 6t/d 的煤直接液化制油中试装置



图 2 原料煤处理能力 750t/d 的多喷嘴水煤浆气流床加压气化中试装置



图 3 产油能力 5000t/a 的煤间接液化(合成气费托合成)中试装置



图 4 甲醇处理能力 50t/d 的甲醇制烯烃(DMT0)中试装置

1.3 “十一五”期间，转入产业化开发，开始工业示范

进入“十一五”(2006—2010年)后，国家开始加大对现代煤化工发展的规划设计、政策引领及宏观调控的力度。国务院及国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)相继出台了一系列相关文件和法规。2006年7月，国家发改委“关于加强煤化工项目建设管理促进产业健康发展的通知”中提出，在有条件的地区适当加快以石油替代产品为重点的煤化工产业的发展，稳步推进工业化试验和示范工程的建设，加快煤制油品和烯烃产业化步伐，适时启动大型煤制油品和烯烃工程的建设。同年12月，拟出台的《煤化工产业中长期发展规划》(征求意见稿)中，规划了煤制油、煤制二甲醚、煤制烯烃以及煤制甲醇在未来5年、10年、15年的发展规模，规划增量均很大。同时，国家开始注重宏观调控现代煤化工产业的发展，明确限制煤化工项目建设的类型和规模。2007年1月，

国家发改委颁布的《煤炭工业发展“十一五”规划》提出，调控煤化工建设规模，防止低水平、小规模盲目建设。同年 11 月，国家发改委颁布的《煤炭产业政策》中提出，在水资源充足，煤炭资源富集地区适度发展煤化工，限制在煤炭调入地区和水资源匮乏地区发展煤化工，禁止在环境容量不足地区发展煤化工。同年 12 月，国家发改委颁布的《能源发展“十一五”规划》中明确，要有序建设石油替代重点示范工程。2008 年 8 月，国家发改委颁布的“关于加强煤制油项目管理有关问题的通知”，叫停了除神华集团 2 个项目外其余所有的煤制油项目。2009 年 5 月和 9 月，国务院先后颁布的《石化产业调整和振兴规划》和“关于抑制部分行业产能过剩和重复建设，引导产业健康发展若干意见的通知”均提出，今后 3 年停止审批单纯扩大产能的焦炭、电石等煤化工项目，不再安排新的煤化工试点项目。

“十一五”期间，在国家相关政策的引导、鼓励及调控下，先后建设了多个现代煤化工工业化示范项目，包括煤直接液化制油、合成气费托合成、甲醇制烯烃(MTO)、甲醇制汽油、合成气制天然气、合成气制乙二醇等，特别值得提及的煤直接液化制油和煤制甲醇转制烯烃(DMT0)2 个工业化示范项目世界上首次实现了大规模商业化运行。

1.4 “十二五”期间，转入商业化开发，开始升级示范

“十二五”期间(2011—2015 年)，国家及相关政府部门又接连频繁制订和出台了多项鼓励、规范及调控现代煤化工技术发展和项目建设的政策法规，要求以企业为主体，重点开展现代煤化工产业升级示范，进一步强有力地推动了中国现代煤化工产业的有序、快速、健康发展。国家注重统筹规划、合理布局，强化煤炭资源与水资源统一调配和社会、经济、环境协调发展，追求煤化工项目布局园区化、建设大型化、生产集约化、管理规范化的现代煤化工发展实现煤炭价值梯级利用、园区理念循环经济、技术集成多联产、节能降耗零排放。特别强调“量水而行”，尽最大努力减轻现代煤化工项目工程建设和企业生产运行对生态环境造成的不利影响。

2011 年 3 月，国家发改委发布“关于规范煤化工产业有序发展的通知”，明确煤化工禁建项目：年产 50 万 t 及以下煤经甲醇制烯烃项目、年产 100 万 t 及以下煤制甲醇项目、年产 100 万 t 及以下煤制二甲醚项目、年产 100 万 t 及以下煤制油项目、年产 20 亿 Nm³ 及以下煤制天然气项目、年产 20 万 t 及以下煤制乙二醇项目，上述标准以上的项目须报经国家发改委核准。同年 12 月，工业和信息化部发布《石化和化学工业“十二五”发展规划》，在生产布局方面要求现代煤化工项目要综合考虑煤炭资源、水资源、生态环境等多种因素，在重点产煤省(区)适度布局；其余省(区)严格限制现代煤化工的发展。国家对发展现代煤化工继续抱以谨慎态度，在重点推进煤制油和煤制天然气示范工程的同时，更加强调环境保护标准和水资源保障。2012 年 1 月，国家能源局编制完成的《煤炭深加工示范规划》中，有 15 个煤炭深加工项目获得了核准。同年 3 月，国家能源局颁布了《煤炭工业发展“十二五”规划》，重点任务包括：稳步推进煤炭深加工示范项目建设，在内蒙古等六省(区)选择煤种适宜、水资源相对丰富的地区，重点支持大型企业开展升级示范工程建设。2013 年 1 月，国务院印发了《能源发展“十二五”规划》，国家能源局发布了《煤炭产业

政策》，均指出要稳步开展煤炭深加工升级示范，能源加工转化建设重点为大规模工程示范项目；限制在煤炭供给不足和水资源匮乏地区发展煤炭深加工产业，禁止在环境容量不足地区发展煤炭深加工产业；重点开发中西部煤炭净调出省(区)中水资源相对丰富、配套基础条件好的地区；“十二五”时期新开工建设的煤制天然气、煤间接液化、煤制烯烃项目能源转化效率预期分别达到 56%、42%、40%以上。2014 年 1 月，国家能源局发布《2014 年能源工作指导意见》，指出要按照最严格的能效和环保标准，积极稳妥推进煤制天然气、煤制油产业化示范，鼓励煤炭分质利用，促进自主研发应用和装备国产化。同年 5 月，国家能源局发布《能源行业加强大气污染防治工作方案》，指出要发挥煤制油产品超低硫优势，推进陕西榆林、内蒙古鄂尔多斯、山西长治等煤液化项目；在坚持最严格的环保标准和水资源有保障的前提下，推进煤制天然气示范工程建设。同年 7 月，国家能源局发布“关于规范煤制油、煤制天然气产业科学有序发展的通知”，再度明确禁止的建设规模，提出不宜过热发展，指出煤制油(气)处于产业化示范阶段、要适度发展。同年 11 月，国务院发布《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》，要求在重点地区稳妥推进煤制油、煤制天然气技术研发和产业化升级示范工程，掌握核心技术，严格控制能耗、水耗和污染物排放，形成适度规模的煤基燃料替代能力。2015 年 5 月，国家发改委发布“关于做好《石化产业规划布局方案》贯彻落实工作的通知”，将煤制烯烃项目委托省级发展改革部门核准，规定新建煤经甲醇制烯烃升级示范项目指标要求：单系列甲醇制烯烃装置年产能应在 50 万 t 及以上，整体能效高于 44%，吨烯烃耗标煤低于 4t，吨标煤转化耗新鲜水低于 3t，废水实现“近零排放”，固体废弃物实现资源化利用。同年 12 月，环境保护部发布《现代煤化工建设项目环境准入条件(试行)》，要求现代煤化工项目优先布局在水资源丰富，环境容量较大的地区，并符合环境保护规划，已无环境容量的地区必须先腾出环境容量，京津冀、长三角、珠三角和缺水地区严格控制新建项目。

“十二五”期间，在煤间接液化、煤制甲醇转制烯烃、煤制乙二醇、煤制天然气等方面形成了可观的现代煤化工产业规模，并开始打造宁夏宁东煤化工基地、内蒙古鄂尔多斯煤化工园区、陕西榆林煤化工园区等现代煤化工园区和基地，现代煤化工行业雏形已基本形成。一批现代煤化工工业化示范项目相继建成投运，取得了很好的经济效益、环境效益及社会效益。

1.5 “十三五”期间，转入企业化运营，继续升级示范

“十三五”期间(2016—2020 年)，国家有关政策明确煤炭深加工定位为国家能源战略技术储备和产能储备示范工程，指出“十三五”继续处于升级示范阶段，进一步细化产业政策，并提出未来发展目标。2016 年 5 月，国家发布的《现代煤化工“十三五”发展指南》提出了规模、技术和节能减排 3 方面目标：预计到 2020 年，将形成煤制油产能 1200 万 t/a、煤制天然气产能 200 亿 Nm³/a、煤制烯烃产能 1600 万 t/a、煤制芳烃产能 100 万 t/a、煤制乙二醇产能 600 万~800 万 t/a；突破 10 项重大关键共性技术，完成 5~8 项重大技术成果的产业化，项目设备国产化率不低于 85%；在 2015 年基础上，到 2020 年实现单位工业增加值水耗降低 10%、能效提高 5%、碳排放降低 5%。同年 5 月国务院颁布的“关于石化产业调结构促转型增效益的指导意见”和同年 9 月工业和信息化部颁

布的《石化和化学工业发展规划(2016—2020年)》均指出,在中西部符合资源、环境条件的地区,结合大型煤炭基地开发,按照环境准入条件要求,有序发展现代煤化工产业;继续开展煤制烯烃升级示范,积极促进煤制芳烃技术产业化。同年12月,国家能源局发布《煤炭工业发展“十三五”规划》,内容包括推进煤炭深加工产业示范,提出以国家能源战略技术储备和产能储备为重点,在水资源有保障、生态环境可承受的地区,开展5种模式和技术装备的升级示范,加强先进技术攻关和产业化。同年12月,国家发改委及能源局发布《能源发展“十三五”规划》提出,煤炭深加工的定位是国家能源战略技术储备和产能储备示范工程,要合理控制发展节奏,强化技术创新和市场风险评估,严格落实环保准入条件,有序发展,稳妥推进煤制燃料、煤制烯烃等升级示范;“十三五”期间,煤制油、煤制天然气生产能力分别达到年产1300万t和170亿Nm³左右规模。2017年2月,国家能源局发布“关于印发《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》的通知”,指出主要任务是要重点开展5种模式和技术装备的升级示范。同年3月,国家发改委与工业和信息化部发布《现代煤化工产业创新发展布局方案》,明确指出煤化工产业整体仍处于升级示范阶段,重点任务包括:重点开展煤制烯烃、煤制油升级示范,有序开展煤制天然气、煤制乙二醇产业化示范,稳步开展煤制芳烃工程化示范。在“十三五”已经过去的几年(2016—2019年)相继建成投运了一批现代煤化工工业化升级示范项目。其中有些项目强化了最严格的环保设施配套,实现了烟气的超低排放和煤化工废水(有的项目包含了配套或周边煤矿的矿井水资源化利用)的近零排放;有的项目在煤化工生产过程智能化控制方面取得了良好的进展。特别值得提及的是世界上单厂生产规模最大的煤间接液化工业化示范项目和煤制甲醇转制烯烃(SMT0)工业化示范项目,这2个产业化示范工程将在后面章节中详细阐述。总体上看,“十三五”期间的现代煤化工升级示范项目的推进速度是比较慢的,产业化进程未能跟上规划要求的节奏。分析原因,主要有以下3个方面:

1)油、煤、气、化工产品的比价关系发生了大幅度变化,煤价大幅上涨,油价低位波动,相关化工产品价格总体下滑,使得现代煤化工项目“两头受挤”,“煤价低”优势已基本不复存在。与2013年初比,2017年末秦皇岛国内动力煤价上涨了76%,同期的原油价格只上涨了4%、液化天然气(LNG)价格上涨了9%、甲醇价格上涨了24%,而油品、双聚产品和乙二醇的价格降幅达12%~15%,国内天然气门价格在2013年6月至2018年5月期间先后历经4次调整后下降了16.8%。高煤价、低油价、低气价以及化工产品价格走低,使现代煤化工“转化煤”的经济性受到严重挑战。现代煤化工产业既是原料价格的接受者,也是煤化工产品价格的接受者,处于两头受挤的艰难状态。

2)示范项目承担的关键技术产业化示范任务较重,每个示范项目一般至少都要承担2~3项具有开拓性的创新任务,需要慎重对待。《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》和《现代煤化工产业创新发展布局方案》均对每个示范项目提出了具体的示范任务要求,《现代煤化工建设项目环境准入条件(试行)》还要求有环保方面的示范任务。这都在客观上对这一阶段的示范项目带来了严峻的技术性挑战。

3)某些外部原因对此也产生了不同程度的影响:①当前化工行业清洁生产、治污降霾、危化品企业搬迁等方面的压力很大,现代煤化工项目的用煤、用水、用能、环境容量指标的获取难度越来越

越大，有的省份甚至要求“不新增煤炭消费量”，尽管不直接针对现代煤化工示范项目，但仍需要事先腾出相应的控制指标；②煤炭行业深化改革导致煤化工项目的配套煤矿不能如期开工或者煤炭资源配置不能及时到位；③虽然天然气管输政策在逐步改革深化，但市场化和第三方参与等具体措施仍有待落实；④大型石化项目和轻烃化工（以乙烷、丙烷、C4 为原料的化工）项目发展提速，也对现代煤化工的市场空间判断有所影响。

2 煤化工核心技术

在近 25 年快速发展过程中，中国现代煤化工科技创新取得了一系列重大突破，技术水平和产业化规模均已位居世界前列，有些已达到国际领先。先后突破了大型先进煤气化、煤直接液化、煤间接液化（合成气费托合成）、煤制烯烃（甲醇制烯烃）、煤制乙二醇、煤制芳烃等一批煤转化与后续加工的核心技术难题，并取得了自主知识产权。现代煤化工的典型技术路线及其主要产品类型如图 5 所示。

2.1 煤气化技术

煤气化是指煤在一定温度和压力条件下与气化剂反应，转化为气态产物的工艺过程。煤气化技术是现代煤化工的龙头技术，无论是以生产油品为主的煤液化，还是以生产化工产品为主的其他煤化工，选择合适的煤气化技术都是决定项目全流程生产装置连续稳定运行和煤化工生产企业经济效益的关键。

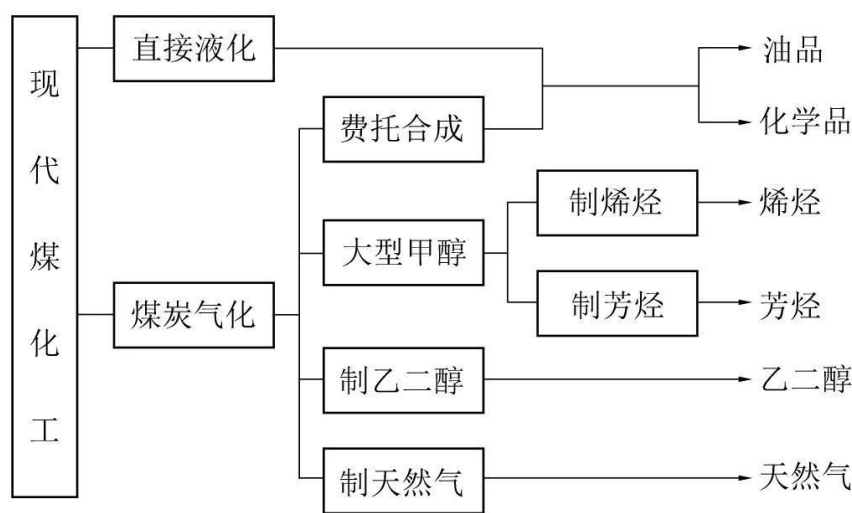


图 5 现代煤化工典型技术路线及其主要产品类型

目前，已形成具有自主知识产权的大型加压煤气化新技术主要有：多喷嘴对置式水煤浆气流床加压气化技术、航天干煤粉气流床加压气化技术、水煤浆水冷壁废锅流程气流床加压气化技术（晋华炉）、“神宁炉”干煤粉气流床加压气化技术、“东方炉”干煤粉气流床加压气化技术等。目前，在煤化工项目中应用最多的是前 2 种煤气化技术。

多喷嘴对置式水煤浆气流床加压气化技术的气化炉喷嘴位于炉体上部，四嘴两两对喷，气流携带水煤浆下行，炉内衬有特制耐火砖，粗煤气在下部用水激冷后进入后面的文丘里洗涤器和洗气塔冷却和除尘。该煤气化技术的单台气化炉日投煤量最大已达 4000t。多喷嘴对置式水煤浆气流床加压气化技术工艺流程如图 6 所示。

航天干煤粉气流床加压气化技术的气化炉喷嘴位于炉体顶部，气流携带干煤粉下行，炉内设置有盘管结构的水冷壁，粗煤气在下部用水激冷后进入后面的文丘里洗涤器和洗气塔冷却和除尘。该煤气化技术的单台气化炉日投煤量最大达 3000t。航天干煤粉气流床加压气化技术工艺流程如图 7 所示。

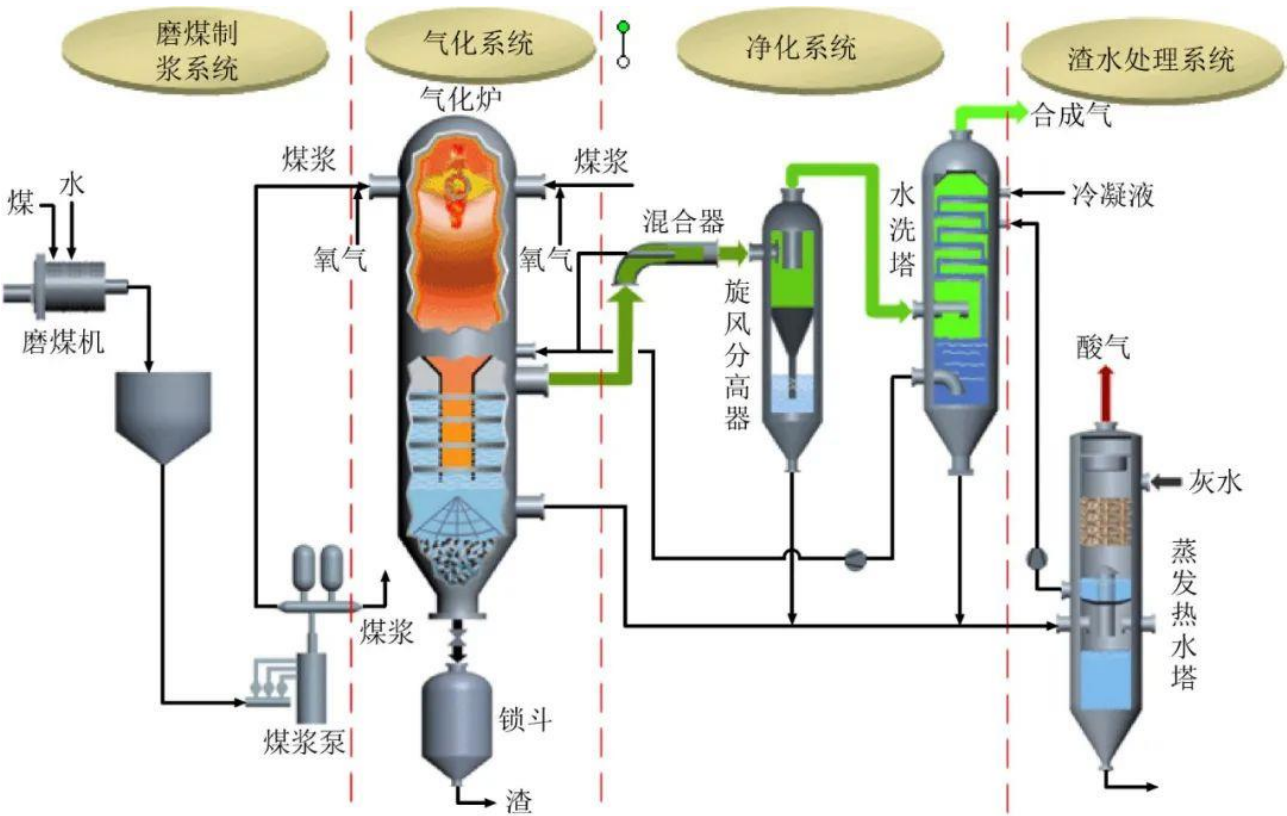
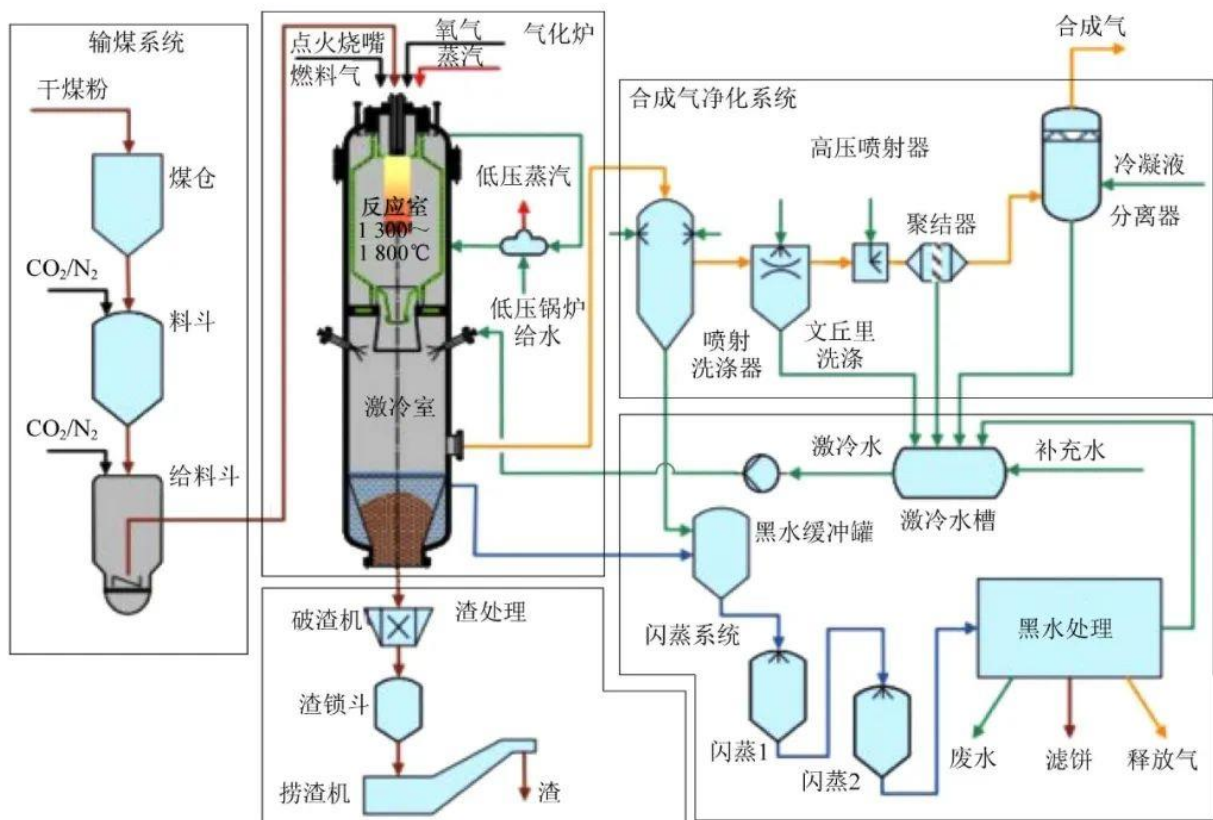


图 6 多喷嘴对置式水煤浆气流床加压气化技术工艺流程



7 航天干煤粉气流床加压气化技术工艺流程

2.2 煤直接液化技术

煤直接液化是指煤在一定温度和压力条件下催化加氢裂解转化为液态产物的工艺过程。20 世纪初，神华集团和煤炭科学研究总院等单位联合，成功开发出神华煤直接液化成套技术及装备。依托具有自主知识产权的神华煤直接液化技术建设的当今世界上首套百万吨级产品的煤直接液化工业化示范项目，于 2008 年 12 月在内蒙古自治区鄂尔多斯建成投运，该工业化示范项目的工艺流程如图 8 所示。神华煤直接液化技术的特点是：①采用纳米级超细水合氧化铁(FeOOH)作为液化催化剂，将其担载在部分原料煤粉上，氧化铁粒径小，催化活性高；②采用催化预加氢的供氢溶剂，可制备质量分数 45%~50%流动性好的高浓度油煤浆，供氢溶剂还可提高煤液化转化率和油收率；③采用强制循环悬浮床反应器，使得反应器内轴向温度分布均匀，且温度容易控制，反应器液相利用率高；④采用减压蒸馏进行固液分离，馏出物中几乎不含沥青，是循环溶剂催化加氢的合格原料，残渣含固体 50%左右；⑤循环溶剂和煤液化初级产品采用强制循环悬浮床加氢，延长了稳定加氢的操作周期，避免了固定床反应由于催化剂积炭压差增大的风险。因此，神华煤直接液化技术具有单系列处理量大(液化煤量 6000t/d)、催化剂添加量少、蒸馏油收率高、装置运行稳定性好、反应条件较缓和(温度 455℃，压力 19MPa)等明显优势。

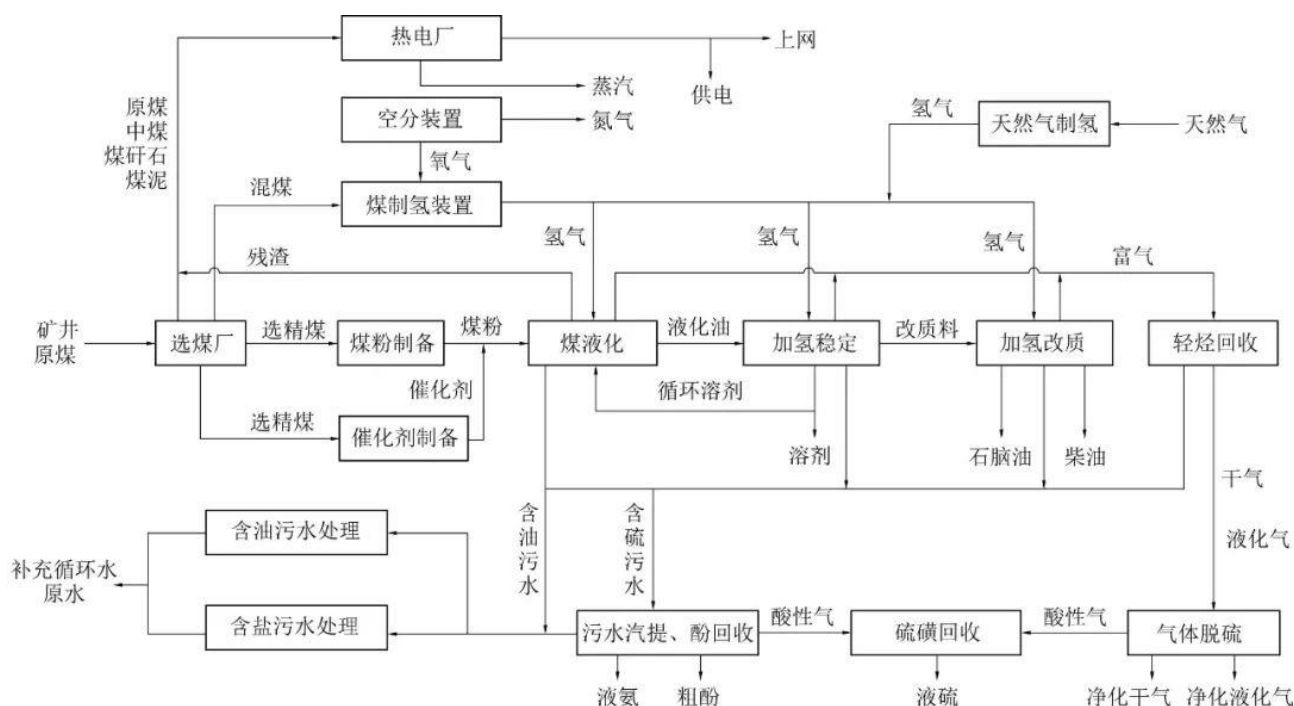


图 8 神华煤直接液化工业化示范项目工艺流程

2.3 煤间接液化

煤间接液化实质上是煤气化后接合成气费托合成。费托合成是以合成气 (H_2 和 CO 按一定比例混合的气体) 为原料在适当条件下催化合成液态烃类产物的工艺过程。按照反应温度的不同，费托合成可分为高温 ($310\sim 350^\circ C$)、中温 ($260\sim 280^\circ C$) 和低温 ($190\sim 230^\circ C$) 费托合成。中国科学院山西煤炭化学研究所和山东兖矿集团分别成功开发出各自的煤间接液化成套技术及装备。依托具有自主知识产权的中科合成油费托合成技术建设的世界上单厂生产能力最大的煤间接液化工业化示范项目，于 2016 年 12 月在宁夏回族自治区宁东煤化工基地建成投运，煤间接制油产品总规模为 400 万 t/a。

宁东 400 万 t/a 煤炭间接液化费托合成采用中科合成油技术有限公司开发的浆态床中温费托合成技术 (图 9)，将煤气化生产的合成气转化为烃类产物，然后通过加氢精制和加氢裂解技术生产洁净液体燃料。该技术具有以下特点：①采用大型浆态床反应器 (直径 9.6m，高 50m) 共 8 台，设置有 2 条生产线 (2×4 台)，每条线配置 4 台费托合成反应器、2 台还原反应器和 1 个尾气脱碳单元；②采用铁基中温费托合成催化剂，解决了中温条件下铁基催化剂活性结构控制和产物选择性控制的技术难题；③费托合成反应器在中温条件下操作，产物中 C+5 收率比低温费托合成高，轻油 ($C_5\sim C_{12}$) 中烯烃含量高于低温费托合成。

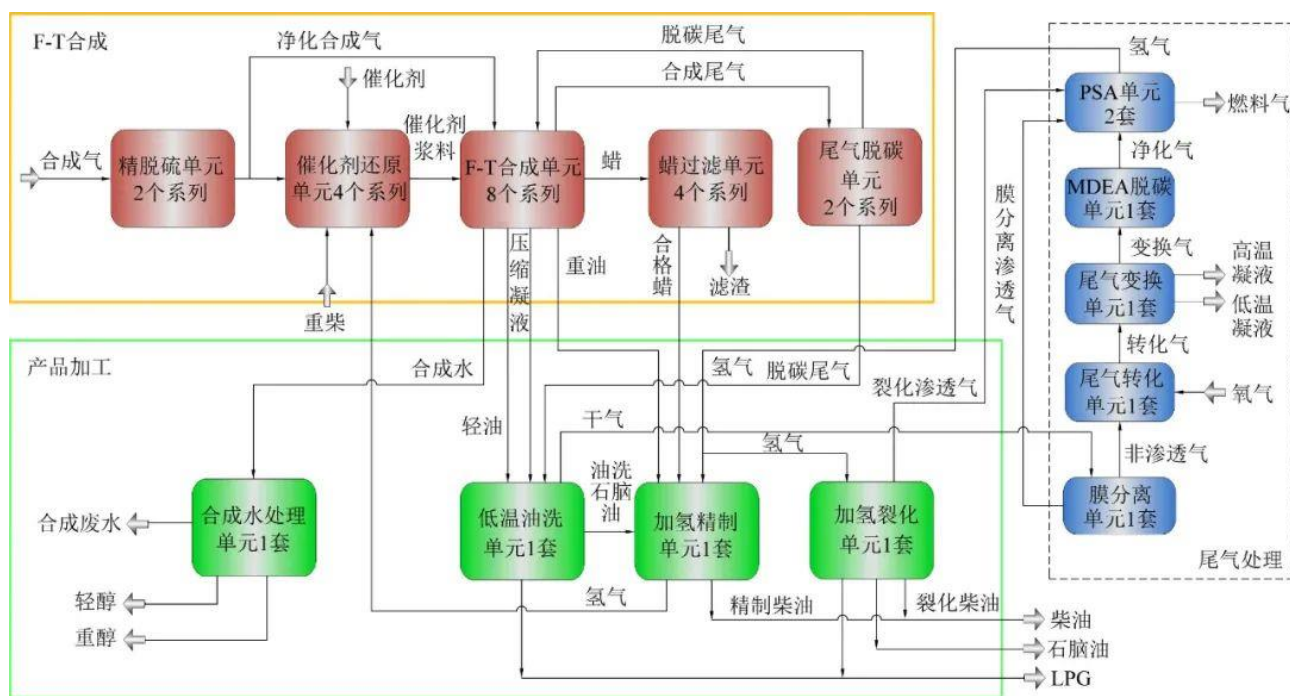


图 9 宁东煤间接液化工业化示范项目的费托合成、产品加工及尾气处理的工艺流程

2.4 煤制烯烃技术

煤制烯烃技术是指先用煤气化生产合成原料气制甲醇，然后用甲醇作原料制乙烯和丙烯。甲醇制烯烃技术是以甲醇为原料在催化剂作用下生产低碳烯烃（以乙烯和丙烯为主）产品的工艺过程。中国科学院大连化学物理研究所成功开发出甲醇制烯烃（DMTO）成套技术及装备。依托具有自主知识产权的中国科学院大连化学物理研究所 DMTO 技术建设的世界上首套神华包头煤制 60 万 t/a 烯烃工业化示范项目，于 2010 年 8 月在内蒙古包头建成投运。神华包头煤制 60 万 t/a 烯烃工业化示范项目的甲醇制烯烃工艺流程如图 10 所示。

神华包头煤制烯烃项目的甲醇制烯烃装置采用 DMTO 专用催化剂，该催化剂具有良好的催化活性、产物选择性及抗磨损性能。该项目的技术特点是：采用流化床甲醇制烯烃反应器，反应温度为 400~550℃，反应压力为 0.1~0.3MPa，可以更好地发挥催化剂性能，保障反应器内床层恒温及提高运行可靠性。DMTO 工业装置稳定运行时甲醇转化率接近 100%，双烯选择性达到 80%。72h 连续稳定运行标定结果显示，生产 1t 烯烃所需要的甲醇原料约为 2.97t。

2.5 煤制乙二醇技术

煤制乙二醇是指 CO 气相催化羰基化合成草酸二甲酯和草酸二甲酯催化加氢合成乙二醇的工艺过程。即首先是煤气化生产 CO 和 H₂，然后用甲醇生产亚硝酸甲酯，再用亚硝酸甲酯经 CO 羰基化生成草酸二甲酯，草酸二甲酯加 H₂ 生成乙二醇，这种工艺也被称为“草酸酯法”。中国科学院福建物质结构研究所成功开发出煤制乙二醇成套技术及装备。依托具有自主知识产权的中国科学院福建物质结构研究所煤制乙二醇技术建设的世界上首套煤制 20 万 t/a 乙二醇工业化示范项目，于 2009 年 12 月在内蒙古通辽建成投运。中国科学院福建物质结构研究所新一代煤制 1000t/a 乙二醇中间试验装置于 2018 年初在贵州兴仁建成投运，该中试装置主要包括 CO 脱氢、草酸二甲酯合成、草酸二甲酯精馏、草酸二甲酯加氢、乙二醇精馏、尾气处理、硝酸还原等 7 个工序。新一代煤制乙二醇中试装置上得到的试验数据和研究结果将用于拟在位于中

试装置附近煤化工园区建设的新一代煤制 60 万 t/a 乙二醇工业化示范项目的可行性和工程设计。煤制乙二醇工艺流程如图 11 所示。

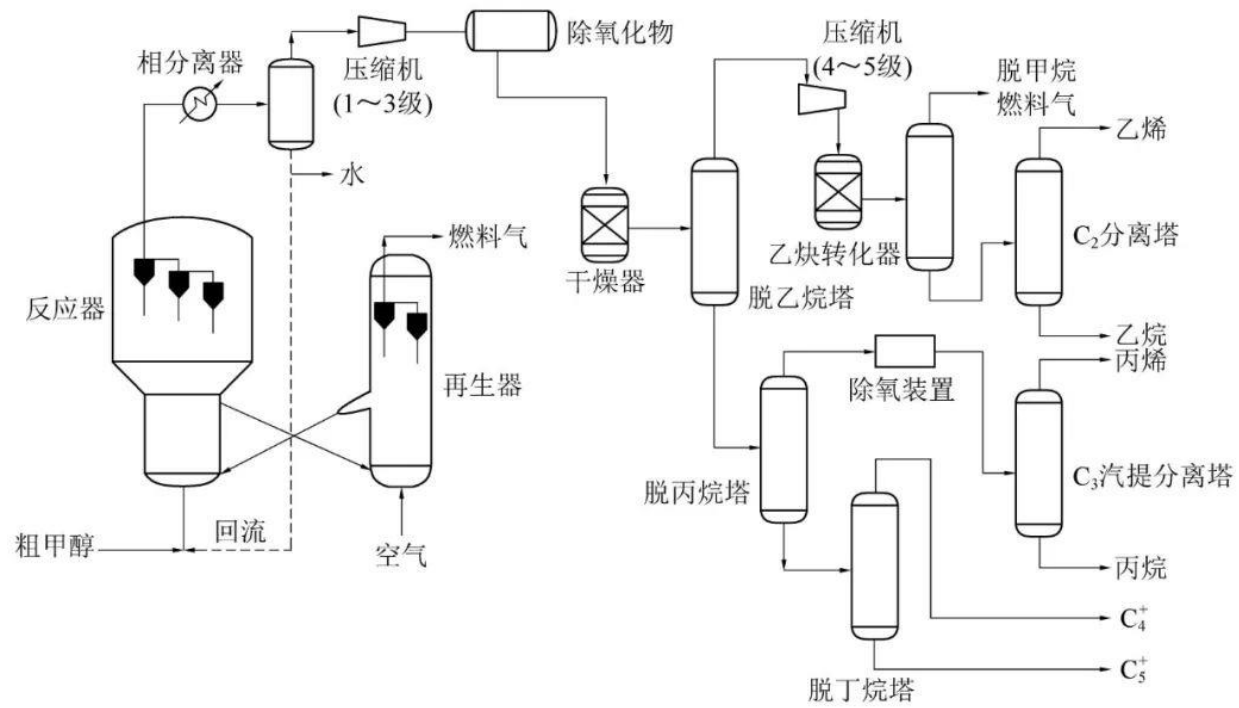


图 10 神华包头煤制 60 万 t/a 烯烃工业化示范项目的甲醇制烯烃工艺流程

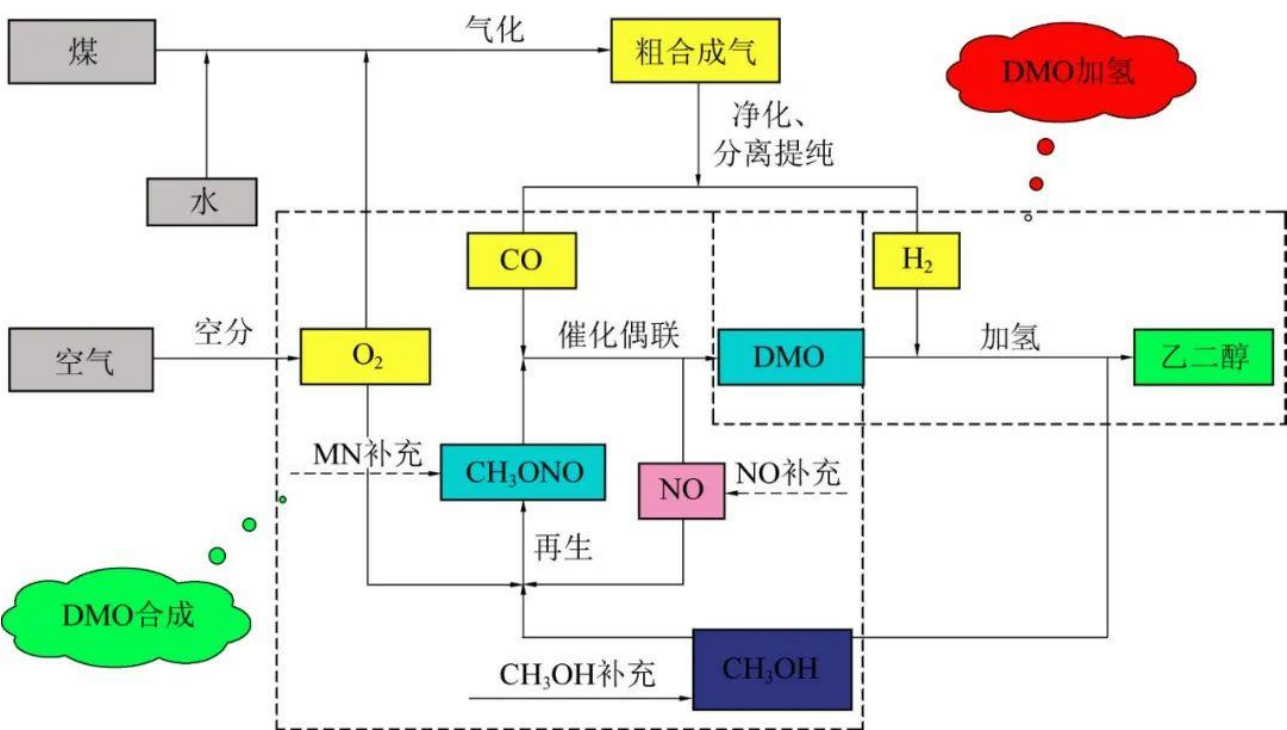


图 11 煤制乙二醇工艺流程

中国科学院福建物质结构研究所开发的煤制乙二醇技术，特别是其新一代技术的特点是：①CO 脱氢、草酸二甲酯合成、乙二醇合成 3 种催化剂高效稳定，贵金属含量更低，性能更好，制备成本

可下降 60%;②采用独特的氧化酯化技术和稀硝酸还原技术,可实现氮氧化物等物料的高效利用;③采用特殊分离技术有效提高了中间产物及乙二醇产品分离效率;④工艺流程更合理,反应物料可充分利用,能实现较大幅度的节能降耗,从而使得乙二醇的产品成本大幅度下降。

2.6 煤制芳烃技术

煤制芳烃技术类似于煤制烯烃,先是煤气化制甲醇,然后以甲醇为原料,在双功能(酸性和脱氢)活性催化剂作用下,通过脱氢、环化等步骤生产芳烃。以煤为原料生产芳烃的技术路线包含 3 大关键技术,即煤制甲醇、甲醇芳构化和芳烃分离转化。其中,煤制甲醇和芳烃分离转化在国内外均已成熟技术,但甲醇制芳烃技术到目前为止在国内外尚未得到商业化项目验证。甲醇制芳烃的反应机理主要包括 3 个关键步骤:①甲醇脱水生成二甲醚;②甲醇或二甲醚脱水生成烯烃;③烯烃最终经过聚合、烷基化、裂解、异构化、环化、氢转移等过程转化为以芳烃为主的产物。甲醇制芳烃的工艺流程如图 12 所示。

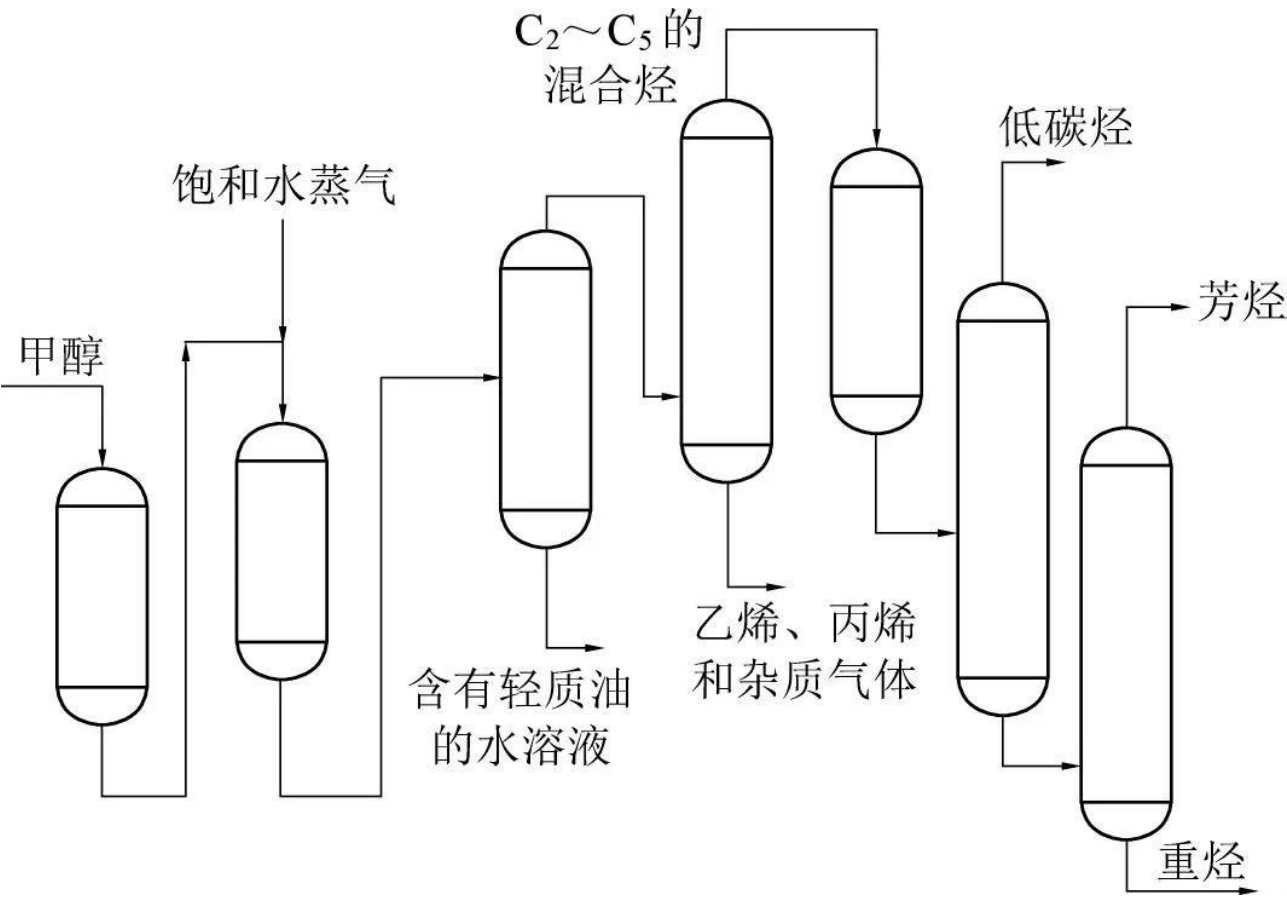


图 12 甲醇制芳烃工艺流程

依托具有自主知识产权的清华大学甲醇制芳烃技术建设的全球首套年产能万吨级产品的工业化示范装置(图 13)于 2012 年在华电煤业集团陕西榆林煤化工基地建成,2013 年完成试验。结果表明:原料甲醇转化率高于 99.99%,吨芳烃耗原料甲醇 3.07t,油相产物中甲基苯(主要指甲苯、二甲苯和三甲苯)的总含量达 90%以上。



图 13 全球首套年产能万吨级产品

3 煤化工专用催化剂

绝大多数煤化工过程，无论是煤直接液化，还是后续加工，都需要在一定的温度和压力条件下，通过加入合适的催化剂，才能达到较大规模工业化生产的要求。在中国现代煤化工近 25 年跨越发展过程中，先后成功开发出了具有自主知识产权的煤直接液化催化剂、合成气费托合成催化剂、甲醇制烯烃(MTO 和 MTP)催化剂及合成气制乙二醇系列催化剂等一批专用催化剂。

3.1 煤直接液化催化剂

煤直接液化专用催化剂在进入反应器前，首先需要与原料煤混合均匀，才能保证其在煤液化过程中充分发挥出催化作用。因催化剂回收不仅技术难度大，而且经济上也不合算，因此，神华煤直接液化工艺采用的专用催化剂，是煤炭科学研究总院和神华集团共同承担的国家高新技术研究发展计划(863 计划)的一项课题成果，包括可弃型“863 催化剂”成套合成技术及装备，并已成功用于当今世界上首套年产能百万吨级产品的的神华煤直接液化工业化示范项目。

神华煤直接液化工业化示范项目专用催化剂的扫描电镜图如图 14 所示。该催化剂的主要特点是：①铁基催化剂原料为常见铁系无机化学工业生产的废料，价廉易得，催化剂制备工艺简单，催化剂成本低(吨原料煤分摊催化剂成本低于 20 元)；②催化剂为纳米级(图 14 中条形物)，担载在占比约 15%的原料煤粉上，使得其添加量大幅度减少，仅为常规铁基催化剂的 1/4~1/2；③液化油收

率高，比常规催化剂高 4~5 个百分点；④催化剂无毒无害，属于可弃型，反应后随液化残渣排出系统，不污染环境。

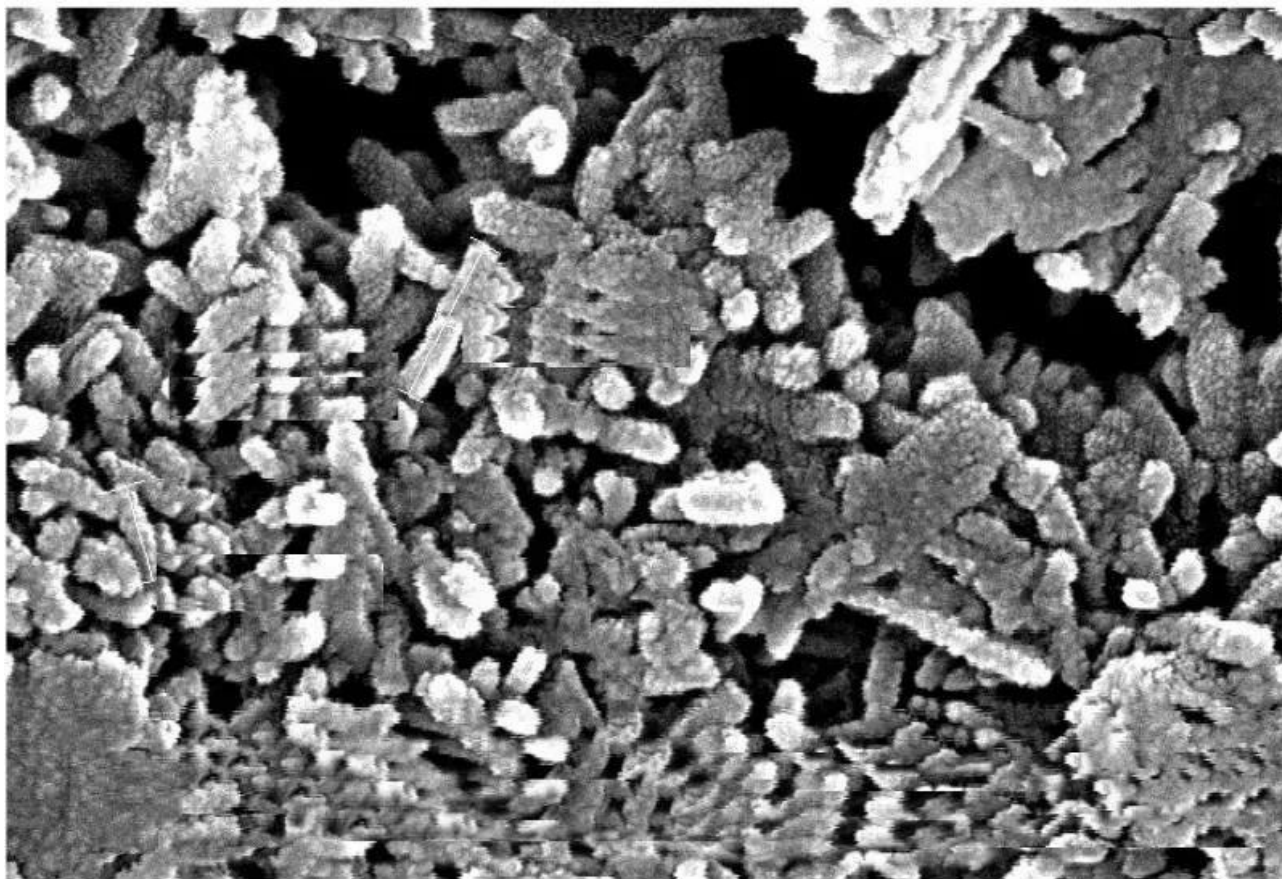


图 14 神华煤直接液化工业化示范项目专用催化剂扫描电镜图

3.2 费托合成催化剂

费托合成分为高温(310~350℃)、中温(260~280℃)和低温(190~230℃)费托合成，费托合成催化剂一般分为钴系和铁系 2 大类。较高温度的费托合成使用铁基催化剂，主要生产汽油和直链低分子量烯烃；较低温度的费托合成使用铁或钴基催化剂，主要生产高分子量石蜡烃。中国科学院山西煤炭化学研究所和山东兖矿集团均开发出各自的煤间接液化费托合成专用催化剂，并均已成功用于大型煤间接液化工业化示范项目。宁东煤间接液化工业化示范项目的费托合成催化剂的扫描电镜图如图 15 所示。该催化剂的应用很好地解决了 260~290℃ 温度范围内铁基催化剂活性结构控制和产物选择性控制的技术难题，在年产能百万吨级产品煤间接液化制油工业化示范项目中的应用效果良好，CH₄ 选择性低于 3.0%，C₅ 选择性高于 92%(质量分数)。

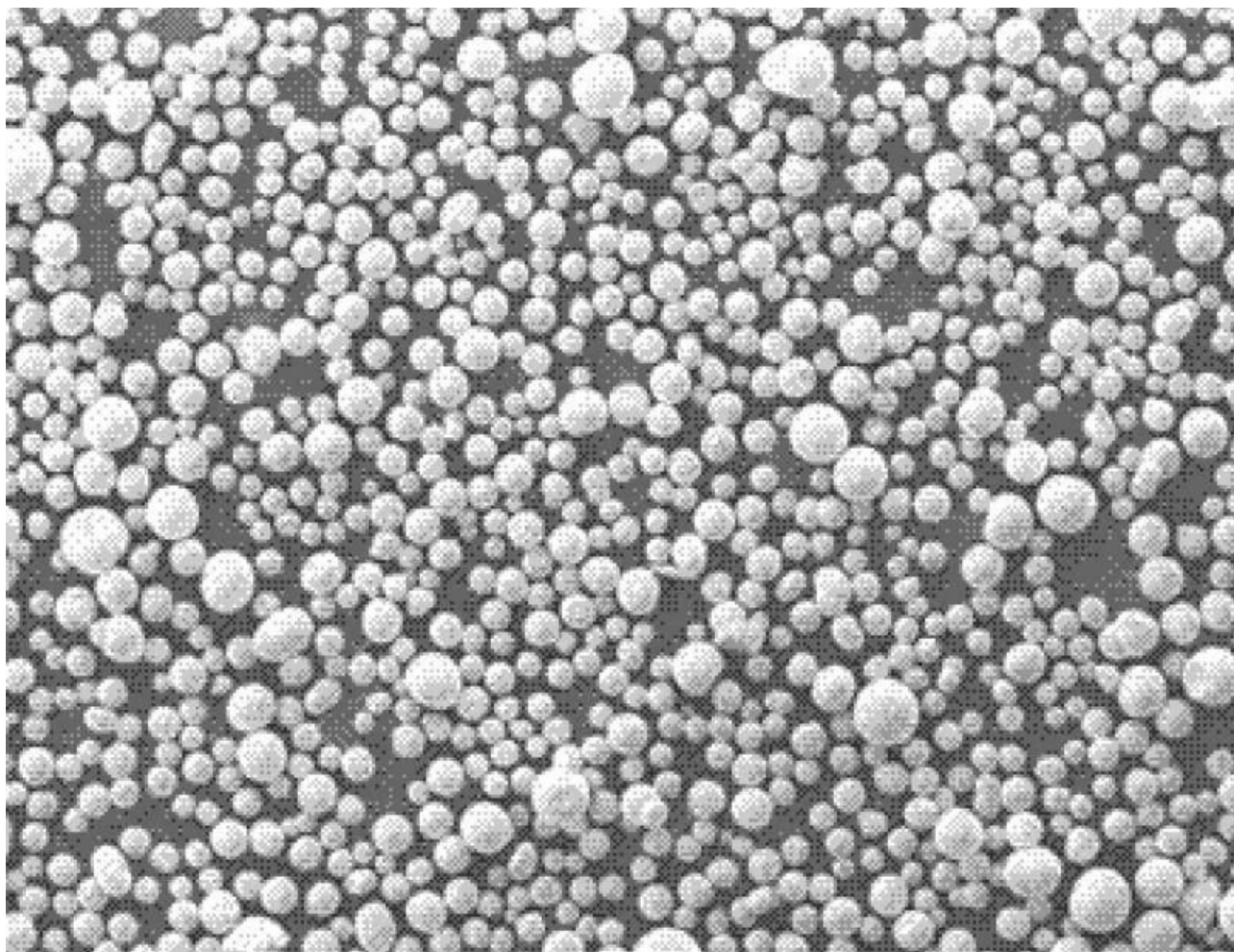


图 15 宁东煤间接液化工业化示范项目的费托合成催化剂扫描电镜图

3.3 甲醇制烯烃 (MTO) 催化剂

在技术路线上，甲醇制烯烃 (MTO) 与炼油行业的催化裂化差不多，我国可以解决工艺问题，但甲醇制烯烃的问题主要不在工艺上，而在专用催化剂上。具体涉及到催化剂的配方、制备工艺、单程转化率、产品收率、副产物的组成，催化剂、原材料和公用工程的消耗定额，催化剂衰减的特性曲线，废催化剂的毒性和处理、催化剂制备的污水组成和数量，催化剂生产过程产生的废液、废气排放控制等问题。

中国科学院大连化学物理研究所成功开发出甲醇制烯烃 (MTO) 专用 SAPO-34 催化剂，不仅成功用于世界上首套神华包头煤制 60 万 t/a 烯烃工业化示范项目，而且在随后兴建的多个煤制烯烃 (DMTO) 商业化项目中得到了广泛应用。

DMTO 甲醇制烯烃专用 SAPO-34 催化剂上化学反应过程如图 16 所示。该催化剂具有如下特点：①采用小孔磷硅铝 (SAPO-34) 分子筛催化剂，乙烯的选择性大幅提高 (50%~60%)；②在 SAPO-34 分子筛合成与降低催化剂成本方面有较大突破，对于流化床反应工艺具有特别重要的意义；③采用流化反应器可有效地导出反应热，实现反应—再生连续操作，从而使能耗大幅降低。

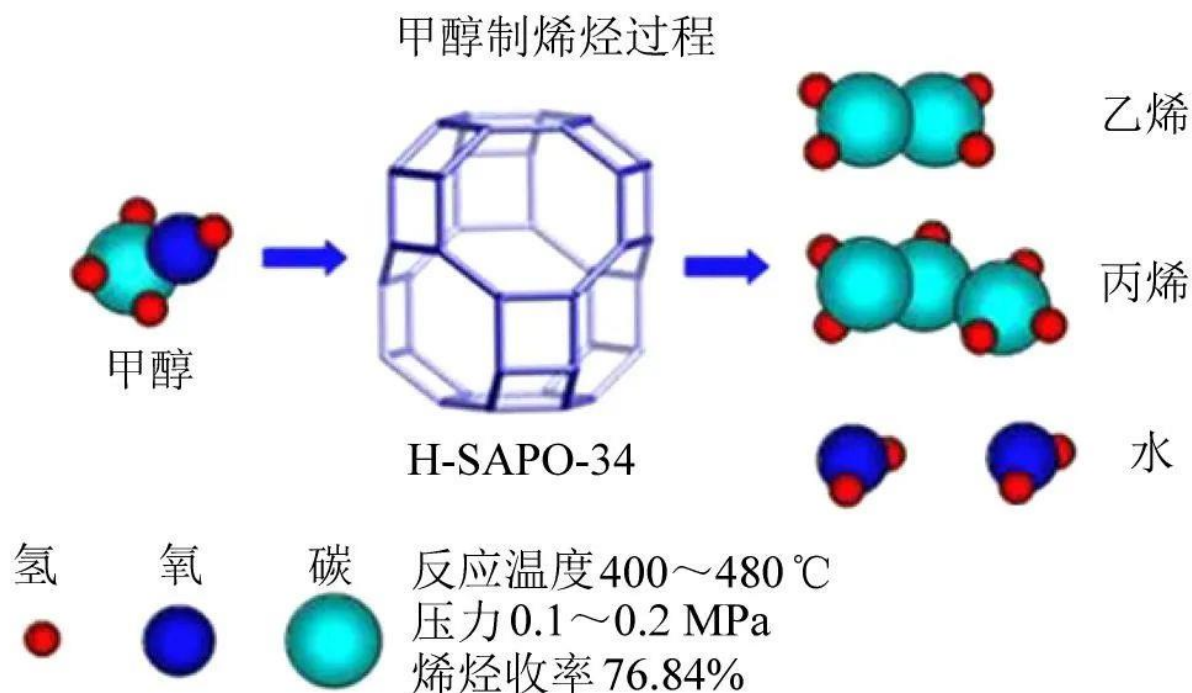


图 16DMTO 甲醇制烯烃专用 SAPO—34 催化剂化学反应过程

3.4 煤制乙二醇系列催化剂

目前工业化应用的煤制乙二醇技术主要是草酸酯法工艺：首先原料煤经过气化、变换、净化及分离提纯后分别得到 CO 和 H₂，然后 CO 通过催化偶联（亚硝酸甲酯 CO 羰基化）合成及精制生产草酸二甲酯，草酸二甲酯再与 H₂ 进行催化加氢并经过精制后获得聚酯级乙二醇。其中的亚硝酸甲酯是由 NO、氧气和甲醇反应生成。该工艺流程短、成本低，是目前国内受到煤化工行业及相关企业关注最多的煤制乙二醇技术。通常所说的“煤制乙二醇”就是特指该工艺。

中国科学院福建物质结构研究所在原有基础上成功开发的具有自主知识产权的新一代煤制乙二醇系列催化剂主要有：CO 脱氢催化剂、草酸二甲酯合成（亚硝酸甲酯 CO 羰基化）催化剂、草酸二甲酯加氢（乙二醇合成）催化剂等，它们在草酸酯法煤制乙二醇工艺的各关键工序上发挥各自重要的催化作用。3 种催化剂的显著特点是高效稳定，贵金属含量更低，性能更好，制备成本下降 60%，从而大幅度降低了乙二醇的成本。

4 煤化工关键设备

中国现代煤化工近 25 年跨越发展过程中，在先后突破了大型先进煤气化、煤直接液化、煤间接液化、煤制烯烃（甲醇制烯烃 MT0）等一批煤转化与后续加工的核心技术难题的同时，成功开发了一批具有自主知识产权的大型反应器设备、大型空分设备和压缩机设备以及特殊泵类、阀门等现代煤化工专用关键设备。

4.1 大型煤气化炉设备

煤气化反应需要在高温和高压条件下进行，气体产物易燃、易爆，同时还存在有磨蚀性物料和腐蚀性介质，因而不仅对大型煤气化炉的材质提出了很高的要求，而且需要在反应器结构形式上有一些特殊考虑，因此对气化炉的设计和制造就提出了更高的要求。随着大型气流床加压煤气化新技术的创新研发，先后成功开发了一批具有自主知识产权的大型加压煤气化炉设备。到目前为止，工业化应用较多的典型代表主要有：多喷嘴水煤浆气流床加压气化炉(图 17)已经有 74 台在工业化示范项目中运行；航天干煤粉气流床加压气化炉(图 18)已经有 58 台在工业化示范项目中运行。



图 17 多喷嘴水煤浆气流床加压气化炉



图 18 航天干煤粉气流床加压气化炉

加压气流床煤气化技术,是指磨到一定细度的干煤粉(或制成水煤浆)被气化剂气流携带进入气化炉,并在高温、高压条件下瞬间转化为粗煤气的工艺过程。加压气流床煤气化炉内的气化温度一般高达 1300~1700℃,气化压力高达 4.0~8.7MPa。因此,对气化炉的结构设计、炉体用材及设备制造均有非常高而特殊的要求。其中最关键的是让炉体外壳在较低温度下承受高压,同时靠炉内特殊构件在较低压差下承受高温。

4.2 煤直接液化反应器

虽然煤直接液化过程的温度不太高,但工作压力相当高,而且有 H₂ 存在。因此,要求反应器采用非常特殊的材质和很厚的板材,内衬要求为一定厚度的耐氢侵蚀的特殊材料和设置特殊形式的内构件,这样设备设计和制造的难度都很大。神华鄂尔多斯年产能百万吨级产品的工业化示范项目使用的煤直接液化反应器如图 19 所示。该反应器为内环流反应器,反应器内气、液、固三相共存,通过内构件的特殊结构和循环泵实现反应器内反应物料的内部循环,以促进液化反应进行和防止结焦发生。



图 19 神华年产百万吨级产品的工业化示范项目使用的煤直接液化反应器

4.3 煤间接液化反应器

虽然煤间接液化过程中合成气费托合成的反应温度和压力都不算高,但单套设备的生产能力可达 50 万 t/a,反应器直径 9.6m、高 50m,总质量 2032.5t。宁东 400 万 t/a 煤间接液化工业化示范项目使用的费托合成反应器如图 20 所示。该反应器为浆态床反应器,反应器内气、液、固三相共存,因其催化剂利用效率高、物料传热效果好、床层温度均匀可控、操作条件弹性大、投资费用低等优点,被认为是费托合成工艺的首选设备。但由于浆液的存在也带来一些缺点,如催化剂较易磨损、液固分离难度较大、易发生返混和传质阻力高等。

4.4 大型空分设备及压缩机组

近年来,国内一些颇具实力的空分设备制造企业通过自主创新研发,在大型空分设备国产化方面取得了长足的进步。仅用不到 15 年时间就相继实现了 3 万、4 万、5 万、6 万、8 万、10 万 Nm³/h

等级空分设备的国产化。国产 6 万 Nm³/h 等级及以上空分设备在国内市场的占有率已经超过 50%。特别是宁东 400 万 t/a 煤间接液化工业化示范项目采用的 6 套国产 10 万 Nm³/h 等级空分设备的顺利投产，彻底打破了国外在特大型空分设备上的垄断。宁东 400 万 t/a 煤间接液化项目采用的 10 万 Nm³/h 大型空分设备及配套压缩机组(压缩机与增压机同轴)如图 21 所示。



图 20 宁东 400 万 t/a 煤间接液化工业化示范项目使用的煤间接液化费托合成反应器



(a) 10万Nm³/h大型空分设备



(b) 空分配套压缩机组

图 2110 万 Nm³/h 大型空分设备及配套压缩机组

随着现代煤化工项目生产规模的日益扩大，需要配套的空分制氧能力也与日俱增，对空分设备的大型化和国产化的需求越来越迫切。宁夏煤业集团有限责任公司联合杭州制氧机集团股份有限公

司研制出了环境适应性强、综合氧单耗小于 0.595kWh/Nm³、制氧能力 10.15 万 Nm³/h 的特大型空分成套技术，产氧量达到 10.2 万 Nm³/h(设计值 10 万 Nm³/h)，氧气纯度 99.74%(设计值 99.6%)，打破了国外对特大型空分技术的垄断局面。

4.5 特种泵设备

现代煤化工装置中的泵类设备，除空分装置中的液氧泵、液氮泵正在国产化外，其余泵型全部实现了国产化，并有着良好的运行业绩。图 22 为用于水煤浆气流床加压气化过程中用来输送高压水煤浆的隔膜泵。连续运转率是隔膜泵的最主要参数。隔膜泵的易损件主要有隔膜、过流件中的阀橡胶及其他金属阀件，其使用寿命直接影响泵的连续运转率。该高压水煤浆隔膜泵设计先进、结构合理、制造工艺成熟可靠，总体技术参数的匹配技术、橡胶隔膜技术、重载曲轴结构、磁信号传感器检测技术、自动化技术、高压密封技术等均具有非常明显的技术创新性，很好地解决了隔膜泵在苛刻工况条件下实现连续运转的关键问题。



图 22 水煤浆气流床加压气化中输送高压水煤浆的隔膜泵

5 煤化工工业化示范和升级示范典型项目

5.1 世界上首个煤直接液化工业化示范项目

神华鄂尔多斯当今世界首套煤直接液化制油大型工业化示范项目，以煤炭为原料，通过化学加工生产油品和石油化工产品。项目总建设规模为年产油品和石油化工产品 500 万 t，分 2 期建设。

一期工程由 3 条生产线组成，建成投产后，每年可用煤 970 万 t；可年产油品和石油化工产品合计 320 万 t，其中汽油 50 万 t、柴油 215 万 t、液化气 31 万 t、苯和混合二甲苯 24 万 t。

为了有效规避和降低风险，工程采取分步实施的方案，先建设 1 条生产线，待装置运转平稳后，再建设其他 2 条生产线。第 1 条生产线包括煤液化、煤制氢、溶剂加氢、液化产物加氢改质、催化剂制备等 14 套主要生产装置。工程总投资 123 亿元，年产油品和石油化工产品 108 万 t。此外，作为煤液化工业化示范项目，同时还建有一套年产 18 万 t 油品的间接液化(合成气费托合成)工业化示范装置。该项目经过多年的筹备，于 2001 年 3 月由国务院批准项目建议书，2002 年 8 月批准项目可行性研究报告。经过大量前期准备工作，2005 年 4 月项目开工建设，2007 年底项目建成投运。经过 1 年的调试开车和消缺创优，于 2008 年 12 月 31 日打通全流程，生产出合格的石脑油和柴油等目标产品。2011—2018 年累计生产油品 660 万 t，生产持续维持 85%左右负荷运行，实现了单周期稳定运行突破 420d，远超过了 310d 的设计单周期运行时间。煤直接液化工业化示范项目的试车成功，标志着中国煤直接液化制油技术实现了里程碑式的跨越，也使中国成为了世界上首个掌握百万吨级煤直接液化关键工程技术的国家，对增强国家科技创新能力和能源保障能力具有深远意义。图 23 为神华产油能力 108 万 t/a 的煤直接液化工业化示范项目。



图 23 神华产油能力 108 万 t/a 的煤直接液化工业化示范项目

5.2 世界上首个煤制烯烃(DMT0)工业化示范项目

神华包头世界首套煤制烯烃大型工业化示范项目，以煤炭为原料，经煤气化、合成气净化、甲醇合成与精馏、甲醇制烯烃(DMT0)、聚乙烯、聚丙烯等工艺过程，生产双聚烯烃等产品。项目集成了美国 GE 公司煤气化技术，德国 Linde 公司低温甲醇洗合成气净化技术、英国 Davy 公司世界级甲醇合成技术，中国科学院大连化学物理研究所自主开发的世界领先的甲醇制低碳烯烃技术(DMT0)，美国 ABBLummus 公司烯烃分离技术、美国 DOW 化学公司聚丙烯(PP)技术、美国 Univation 公司聚乙

烯(PE)技术等,主要建设合成气($\text{CO}+\text{H}_2$)产量 53 万 Nm^3/h 的煤气化装置、合成气处理量 76 万 Nm^3/h 的低温甲醇洗装置、180 万 t/a 甲醇合成装置、甲醇制 60 万 t/a 烯烃(DMT0)装置、30 万 t/a 聚乙烯装置、30 万 t/a 聚丙烯装置、4 套制氧能力 6 万 Nm^3/h 空分装置、3 台 480 t/h 燃煤锅炉、2 台 50MW 自备发电机组、12 万 m^3/h 循环水装置以及配套的公用工程、辅助设施、厂外工程等。项目实际总投资 175 亿元,年消耗原料煤 345 万 t 、燃料煤 128 万 t ,年产聚乙烯 30 万 t 、聚丙烯 31 万 t ,副产丁烯 9.4 万 t 、 $\text{C}+\text{S}$ 53.7 万 t 、乙烷和丙烷 1.4 万 t 。

项目于 2006 年 12 月 11 日获得国家发改委核准。2010 年 5 月 28 日,项目煤气化装置投煤成功,6 月生产出 MT0 级甲醇,8 月 8 日煤制烯烃核心技术 DMT0 装置一次投料试车成功,实现煤制烯烃项目“打通全流程、投料试车成功,生产出合格聚烯烃产品”的目标。从 2011 年 1 月 1 日起,项目正式进入商业化运行阶段。2014 年 4 月 26 日,项目通过国家发改委委托内蒙古自治区发改委组织的项目验收。特别值得一提的是,该项目是国家“十一五”期间 5 个现代煤化工工业化示范工程中第一批进入商业化运行阶段的项目,实现了建成当年投料试车成功,当年试生产后立即进入商业化运行,开创了中国现代煤化工工业化示范项目从建成投运到实现商业化生产运营的高速度(图 24)。



图 24 神华包头煤制烯烃工业化示范项目甲醇制烯烃(DMT0)的主要装置

5.3 世界上单厂生产规模最大的煤间接液化制油工业化升级示范项目

宁东 400 万 t/a 煤间接液化制油工业化升级示范项目(图 25),是国家“十二五”期间重点建设的煤炭深加工示范项目。项目位于宁夏回族自治区银川宁东能源化工基地,于 1999 年开展前期工作,2013 年 9 月 18 日获得国家核准批复,同年 9 月 28 日正式全面开工建设。2016 年 9 月项目工程建设实现全面中交,12 月 5 日投料试车成功,12 月 21 日打通项目工艺全流程产出合格产品。2017 年 12 月 17 日实现全厂满负荷运行。

该项目是目前世界上单厂投资规模最大、大型装置最多、拥有中国自主知识产权的煤间接液化工业化升级示范项目，建设有动力、空分、气化、煤气净化、油品合成与加工的工艺生产装置以及配套的公用工程。项目总占地 560hm²，概算投资 550 亿元，是青藏铁路投资的 1.7 倍，比三峡大坝枢纽工程静态投资还多 50 亿元。全厂动静设备 1.3 万台，仪表设备 11 万台，电气设备 1.5 万台，阀门 25 万台，控制点 21.7 万个，管道总长 3728km，电气和仪表电缆总长 1.8 万 km，相当于目前中国高铁的运营里程总数。项目规模之大、投资之高、工艺之复杂、技术创新点之多，在任何一个已有的化工项目里都极为罕见。项目每年转化煤炭 2046 万 t，年产清洁油品等产品总量高达 405 万 t。其中：主产品柴油 273 万 t、石脑油 98 万 t、液化气 34 万 t，副产品硫磺 20 万 t、混醇 7.5 万 t、硫酸铵 14.5 万 t。图 25 为宁东 400 万 t/a 产品煤间接液化制油工业化升级示范项目。



图 25 宁东 400 万 t/a 产品煤间接液化制油工业化升级示范项目

5.4 世界上单厂生产规模最大的煤制烯烃(SMT0)工业化升级示范项目

中天合创鄂尔多斯现代煤化工项目由中国石化股份公司、中煤能源股份公司、上海申能股份公司、内蒙古满世煤炭集团公司合资开发，计划总投资为 619 亿元，股权比例分别为 38.75%、38.75%、12.50%、10.00%。该项目是目前世界上最大的煤制甲醇转制烯烃项目，是国家现代煤化工工业化升级示范项目和内蒙古自治区煤化工产业发展的重点工程。项目主要包括建设煤炭总产能 2500 万 t/a 的 2 座配套煤矿，煤制 360t/a 甲醇转制 137 万 t/a 烯烃生产装置、67 万 t/a 聚乙烯装置、70 万 t/a 聚丙烯装置等多项工程，以及为项目配套的铁路、输水等辅助设施。其中：煤制 360t/a 甲醇转制 137 万 t/a 烯烃项目工程投资建设 425 亿元，煤矿及铁路和输水等配套项目和辅助设施工程投资建设 194 亿元。项目配置煤炭资源 52.7 亿 t、黄河水资源 2729 万 m³/a。

中天合创煤制甲醇转制烯烃(SMT0)工业化升级示范项目位于内蒙古鄂尔多斯图克工业园区，采用美国 GE 煤气化技术、德国 Linde 低温甲醇洗煤气净化技术、德国鲁奇公司甲醇合成技术、中石化炼化工程与中国石油化工股份公司合作开发的甲醇制烯烃(SMT0)技术、中石化环管法聚丙烯(ST)

技术、英国 Ineos 公司 Innovene 气相法聚丙烯技术、美国 ExxonMobil 公司聚乙烯技术、中石化气相法全密度聚乙烯 (SGPE) 技术等。

2013 年 8 月 19 日, 该项目煤制 360 万 t/a 甲醇工程获内蒙古自治区发展改革委核准。2014 年 3 月 16 日, 项目的煤气化工程开工建设。2016 年 6 月 30 日, 项目主生产装置实现中交, 8 月甲醇装置开始投料试车准备, 9 月 24 日产出合格甲醇。环管聚丙烯装置于 10 月 23 日产出合格聚丙烯粒料产品, 线性聚乙烯装置于 10 月 26 日产出合格聚乙烯粒料产品。10 月 28 日, 打通项目工艺全流程, 产出合格聚乙烯、聚丙烯产品。2017 年 7 月, 项目实现全面投产; 12 月底, 甲醇装置实现满负荷运行。2018 年是该项目全面进入运营管理考核的第一年, 全年装置负荷率稳定在 105%。12 月, 甲醇和 MTO 装置运行负荷达 109%。全年生产 MTO 级甲醇 398.06 万 t、双聚烯烃产品 127.07 万 t, 实现营业收入 113.76 亿元, 利润 21.84 亿元。2019 年该项目实现了产量、综合指标双提升。全年生产 MTO 级甲醇 423.40 万 t, 比 2018 年增产 6.36%; 生产双聚烯烃产品 137.53 万 t, 同比增长 8.23%, 并实现产品全产全销; 实现营业收入 115.35 亿元, 实现利润总额 19.35 亿元。图 26 为中天合创煤制 360t/a 甲醇转制 137 万 t/a 烯烃 (SMT0) 工业化升级示范项目。



图 26 中天合创煤制 360t/a 甲醇转制 137 万 t/a 烯烃 (SMT0) 工业化升级示范项目

该现代煤化工工业化升级示范项目的另一大亮点是, 为其配套的葫芦素和门克庆 2 座煤矿不仅已经建成投产实现为本项目供煤, 而且已经实现矿井水资源化利用和分盐结晶“近零排放”。2018 年 8 月 31 日, 作为国内规模最大的矿井水深度处理零排放系统, 投资 8.49 亿元的中天合创矿井水综合利用工业化示范项目整体投用。项目设计日处理矿井水 7.2 万 m³, 处理后的日出水量达到 5.4 万 m³。矿井水的深渡处理、资源化利用及其与煤化工项目废水的分盐结晶“近零排放”有机结合, 不仅实现了项目水资源的全部循环利用, 而且还实现了水中盐分的资源化利用。中天合创矿井水深度处理项目每年可实现废水回收利用 470 万 t, 废水回用率达 98%, 每年可节约成本约 500 万元, 具有很好的环境效益和社会效益, 同时更具有非

常好的中国现代煤化工绿色发展的示范和带动作用。图 27 为中天合创矿井水深度处理资源化利用工业化示范项目的反渗透脱盐系统。



图 27 中天合创矿井水深度处理资源化利用工业化示范项目的反渗透脱盐系统

6 煤化工产业规模

中国现代煤化工经过近 25 年的跨越发展，相继建成投运了一批工业化示范项目，产业发展已经初具规模。据不完全统计，截至 2018 年底，已经建成投产的煤制油、煤(含甲醇)制烯烃、煤制乙二醇及煤制气等现代煤化工工业化示范项目累计投资约为 5260 亿元，年生产主要产品约 1828.3 万 t，年转化煤炭约 9560 万 t。全国已建成投产的煤制油项目 9 个，包括 1 个煤直接液化项目、7 个煤间接液化项目和 1 个煤油共炼项目，总产能达 951 万 t/a；建成投产的煤制烯烃项目 11 个和甲醇制烯烃项目 9 个，总产能达 1192 万 t/a；建成投产的煤制乙二醇项目 18 个，总产能达 373 万 t/a；建成投产的煤制天然气项目 4 个，总产能达 51.1 亿 Nm³/a。

6.1 煤制油(包括直接液化、间接液化、煤油共炼)

截至 2018 年底全国已经建成投产的煤制油工业化示范项目见表 2。到 2018 年底，全国已建成投运煤制油项目 9 个，总产能为 951 万 t/a。其中，煤直接液化项目 1 个，产能为 108 万 t/a；煤间接液化项目 7 个，总产能为 798 万 t/a；煤油共炼(陕西延长石油集团公司工业化示范项目)项目 1 个，产能为 45 万 t/a。

表 2 截至 2018 年底全国已经建成投产的煤制油工业化示范项目

序号	煤制油工业化示范项目	建成规模/ (万 t·a ⁻¹)	投产时间
1	神华鄂尔多斯煤直接液化项目	108	2011 年起商业运行
2	神华鄂尔多斯煤间接液化项目	18	2009 年 12 月投产*
3	山西潞安煤间接液化项目	16	2009 年 7 月投产
4	内蒙古伊泰鄂尔多斯煤间接液化项目	16	2009 年 3 月投产
5	神华宁煤宁东煤间接液化项目	400	2016 年 12 月投产
6	兖矿陕西未来能源煤间接液化项目	115	2015 年 8 月投产
7	内蒙古伊泰鄂尔多斯煤间接液化项目	120	2017 年 7 月投产
8	山西潞安高硫煤综合利用间接液化项目	108	2017 年 12 月投产
9	陕西延长石油煤油共炼项目	45	2015 年 1 月投运
合计		951	—

注:*2010 年 3 月停产。

6.2 煤制烯烃(包括煤制烯烃和甲醇制烯烃的 MTO 与 MTP)

截至 2018 年底全国已经建成投产的煤制烯烃和甲醇制烯烃工业化示范项目见表 3。到 2018 年底,全国已建成投产 20 个煤制烯烃和甲醇制烯烃项目,合计产能达 1192 万 t/a。其中:煤制烯烃项目 11 个,合计产能为 714 万 t/a;甲醇制烯烃项目 9 个,合计产能为 478 万 t/a。

表 3 截至 2018 年底全国已经建成投产的煤制烯烃和甲醇制烯烃工业化示范项目

煤制甲醇制烯烃项目				甲醇制烯烃项目			
序号	项目	建成规模/ (万 t·a ⁻¹)	备注	序号	项目	建成规模/ (万 t·a ⁻¹)	备注
1	神华包头煤制烯烃项目	60	全球首套工业化示范	12	中原石化甲醇制烯烃项目	20	—
2	大唐多伦煤制烯烃项目	46	MTP	13	宁波禾元甲醇制烯烃项目	60	—
3	神华宁煤煤制烯烃项目(一期)	50	MTP	14	南京慧生甲醇制烯烃项目	30	—
4	中煤榆林煤制烯烃项目	60	—	15	神华宁煤甲醇制烯烃项目(二期)	50	MTP
5	延长石油靖边混合原料制烯烃项目	60	煤气化生产的甲醇约占 甲醇制烯烃原料的 1/3	16	山东神达甲醇制烯烃项目	100	—
6	宁夏宝丰焦炉煤气制烯烃项目	60	焦炉煤气制甲醇合成气	17	中煤蒙大甲醇制烯烃项目	60	—
7	陕西蒲城煤制烯烃项目	70	8.7 MPa 水煤浆气化示范	18	神华榆林甲醇制烯烃项目	68	—
8	神华乌鲁木齐煤制烯烃项目	68	—	19	阳煤山东恒通甲醇制烯烃项目	30	—
9	青海盐湖煤制烯烃项目	33	—	20	山东久泰内蒙古甲醇制烯烃项目	60	—
10	中天合创鄂尔多斯煤制烯烃项目	137	—	—	—	—	—
11	中石化淮南中安联化煤制烯烃项目	70	—	—	—	—	—
小计		714	—	小计		478	—

注:未备注 MTP 的项目均为 MTO。

6.3 煤制乙二醇(包括其他气源制 CO 和 H₂)

截至 2018 年底全国已经建成投产的煤制乙二醇工业化示范项目见表 4。到 2018 年底，全国已经建成投产的煤制乙二醇项目共 18 个，总产能达 373 万 t/a。

表 42018 年底全国已经建成投产的煤制乙二醇工业化示范项目

序号	煤制乙二醇工业化示范项目	建成规模/(万 t·a ⁻¹)
1	内蒙古通辽金煤煤制乙二醇项目	20
2	河南永金化工安阳煤制乙二醇项目	20
3	河南永金化工濮阳煤制乙二醇项目	20
4	河南永金化工新乡煤制乙二醇项目	20
5	河南永金化工永城煤制乙二醇项目	20
6	新疆天业电石尾气制乙二醇项目①	5
7	中石化湖北化肥合成气制乙二醇项目②	20
8	上海华谊集团煤制乙二醇项目	1
9	山东华鲁恒升合成气制乙二醇项目②	5
10	新疆天业煤制乙二醇项目	20
11	新航能源鄂尔多斯煤制乙二醇项目	30
12	山西阳煤深州煤制乙二醇项目	22
13	山西阳煤寿阳化工煤制乙二醇项目	40
14	山西阳煤平定煤制乙二醇项目	20
15	贵州黔希煤化煤制乙二醇项目	30
16	河南永金化工洛阳煤制乙二醇项目	20
17	山东华鲁恒升煤制乙二醇项目	50
18	安徽淮化煤制乙二醇项目	10
合计		373

注:①电石尾气提 CO 和 H₂;②合成气提 CO 和 H₂。

6.4 煤制天然气

截至 2018 年底，全国已建成投产的煤制天然气项目共 4 个，总产能为 51.1 亿 Nm³/a。加上 2020 年将建成投产的大唐阜新煤制天然气项目，总产能上升到 64.35 亿 Nm³/a。全国已建成投产的煤制天然气工业化示范项目见表 5。

表 5 全国已建成投产的煤制天然气工业化示范项目

序号	煤制天然气示范项目	建成规模/ (亿 Nm ³ ·a ⁻¹)	投产时间	备注
----	-----------	--	------	----

1)				
1	内蒙古大唐克旗煤制天然气项目	13.3	Dec-13	块煤固定床气化
2	内蒙古汇能煤制天然气项目	4	Oct-14	水煤浆气流床气化 (终端产品为 LNG)
3	新疆庆华煤制天然气项目	13.75	Dec-13	块煤固定床气化
4	新疆伊犁新天煤制天然气项目	20	Mar-17	块煤固定床气化
5	大唐辽宁阜新煤制天然气项目	13.3	2020	块煤固定床气化
合计		64.35	—	—

7 现代煤化工发展回顾与思考

回顾中国现代煤化工近 25 年的快速发展历程，取得了巨大的成就，并积累了丰富的实践经验。但也确实出现过一些问题值得认真反思，很有必要总结以往工作得到的宝贵经验和深刻教训，方便有关方面在今后的相关工作中借鉴和吸取。

7.1 技术研发与经费投入

中国现代煤化工快速发展的源头是技术研发。技术研发成果的涌现不仅需要多年潜心研究的丰富积累，而且更需要短期内的强力攻关。前者是打好理论基础，后者是快速见效，为学术成果走出实验室，进入工程化，变为生产力做必要准备工作。此阶段需要注意的是：①选题是技术研发工作的切入点，也是决定能否尽快取得学术研究成果的关键，因此必须慎重对待；②在具体研发工作中要坚持求真务实，不简单重复别人做过的工作，不轻易误入前人走过的弯路；③技术研发工作的主要内容是先做基础试验去探索，然后还需放大试验来验证，要耐心细致地认真做好这些耗时、费力、花钱的必要研究工作；④不是所有的技术研发工作都能取得满意的结果，要允许技术研发工作不成功，因为能够证明“不能成功”实际上也是一种“成功”；⑤现代煤化工技术研发涉及领域众多，因此产、学、研、用、商、政、金等多方联合参与和密切协作的必要性日益显现，应加强相关的组织与协调工作。

在中国现代煤化工近 25 年的快速发展过程中，国家和各相关方面在技术研发上投入了大量的人力、物力、财力，进行了大量卓有成效的技术创新研发工作，获得了一大批具有自主知识产权的学术研究成果，为中国现代煤化工的快速发展奠定了坚实的理论基础。实践经验表明，在现代煤化工技术研发投入的经费中，国家研发经费的定向投入引导与及时足额到位是非常关键和重要的。同时，各相关方面的补充和配套的资金投入也是非常必要的，有时甚至是必须的。

7.2 中间试验与工程示范

煤化工新产品开发的技术创新工作程序通常包括：①实验室基础研究，煤化工新产品成套技术从无到有；②实验室放大试验，煤化工新产品成套技术补充完善；③中间试验，煤化工新产品成套技术从实验室迈入工程化开发；④工业化示范，煤化工新产品成套技术从工程化开发迈入工业化开发；⑤升级示范，煤化工新产品成套技术从工业化开发迈入工业化应用。

煤化工新产品开发的技术创新工作内容一般包括:①专用催化剂研制,确定催化剂的配方和制备工艺;②催化剂性能评价,确定专用反应器的结构形式和温度、压力等工艺条件;③工艺流程开发,确定从原料到最终产品的工艺过程中各个环节的具体内容;④专用反应器开发,设计和制造出反应器整套装置;⑤工艺软件包开发,确定工程化开发设计的基础数据及必要信息;⑥最终形成煤化工新产品的成套技术与装备。

正常情况下,学术研究成果走出实验室,从科学理论上升到实用技术,必须要经过工程化开发这一不可逾越的重要过程。工程化开发一般包括中间试验和工程示范 2 个必要环节,只有个别情况下,可能只经过其中的一个环节。

中间试验指学术研究成果在完成实验室内所有研发工作后但还未进行工业化示范前,需要通过一定的试验装置、试验车间或试验场地,对其技术可行性、生产合理性以及经济效果做进一步研究和验证,以取得一些更接近生产实际的数据;是在一定规模的验证装置上进行实验室验证装置的进一步放大试验,模拟全流程中的关键部分(含核心技术、关键设备等),以期获得工业化示范装置设计所需的基础数据及必要信息。工程示范指根据中间试验获得的基础数据及必要信息,按照基本建设程序及相关要求,建设可以商业化运行的工程项目,来验证技术研发成果全流程的可行性、核心技术与关键设备的可靠性,获得整个工程项目的全部技术、经济等完整分析数据,从而获得可在市场上工业化推广应用所需的必要基础信息和相关参考资料。

大量实践经验表明,技术研发成果转化为直接生产力的最关键制约因素就是中间试验和工程示范能否顺利按计划、高质量完成,并能得到满意的结果。这其中的影响因素往往是多方面的,因为中间试验,特别是工程示范不仅需要一定的资金投入,更需要多方面齐全且可靠的配套条件和保障措施。因此,在进行中间试验和工程示范之前的准备工作中,选对合作现场和依托工程是至关重要的。否则,在实际工作过程中,当出现难以解决的实际问题时,特别是在面临意想不到的严峻挑战时,往往会因为现场依托工程“搁浅”,而导致工程化进程严重受阻甚至终止,这样的先例已不止一次发生,教训是深刻的,损失是巨大的。

7.3 项目准备与工程建设

现代煤化工技术创新成果一旦经过工程示范后,就可以实施商业化推广应用了。商业化工程项目应该由企业作为主体负责建设和运营。企业应该按照政府部门对基建项目的规定程序和相关要求办理立项手续,按照所在行业的规范和标准进行工程设计。工程项目建设必须要满足合规性要求,否则难以通过项目验收和获得生产许可证。

在实施项目工程建设之前,对整个项目的工艺流程、技术方案,特别是产品方案、关键技术、核心设备等重要内容进行反复对比分析和优化完善是完全必要的,这对保证项目运行的可靠性和降低工程建设投资与产品生产成本是非常关键的。有的现代煤化工项目因考虑的生产规模很大,往往需要统筹规划设计、分期实施建设。此时值得注意的是,要慎重考虑和反复权衡工程建设分期的合理性、各期工程衔接的时效性以及前期工程为后期工程预留和待建的经济性,以避免造成完全没有必要的投资特别是效益损失。这方面的教训是深刻的,有的项目后期工程无法按计划实施,甚至不

再实施。项目建设过程中，必须做好安全、进度、质量、投资等各方面的有效控制。要按照事先制定好的工程建设实施方案和绘制好的详细工程进度网络图合理安排，严格监管。同时，还必须处理好工程建设和生产运行的有机衔接问题，尽可能让未来负责生产运行的人员提前进入角色，参与工程建设质量的控制和验收工作，特别是应该让其亲自负责并执行设备调试前的“三查四定”以及接下来的全面整改工作，使之真正能够掌握工程建设的实际质量情况。大量项目经验表明，这一点非常重要。

7.4 企业运营与精细管理

项目工程建设完成后，一般要经过设备调试进入试生产阶段，再经过投资转固和项目验收并获得生产许可证后便进入正式的企业生产运营期。实践表明，同类甚至还同在一个区域内的现代煤化工项目，企业运营的效果往往有差别，有时相差可能很大。这与项目建设的工程设计和过程管控差别有关，也与项目生产过程中企业运营管理水平及管控精细程度有关。在所有影响因素中，人的因素是最重要的。所以，必须拥有一支强有力的专业化技术和管理员工队伍。现代煤化工企业运营的宗旨应该是：“安全第一、环保至上、效益为本”。安全和环保是前提，经济效益是最终目标和根本目的。不安全、不环保的企业不能存续，经济效益不好的企业无法生存，更谈不上可持续发展。企业运营管理应追求精细化，精细化管理的最有效手段是实行全员责任制加量化考核，并真正实施科学的奖励与惩罚机制。

7.5 行业规范与专业管理

20 多年前，现代煤化工还是一个亟待发展的新兴产业。在发展之初严重缺乏行业应有的必要条件，所以只能参照相近和相关行业的情况和经验探索前行。随着发展进程的推进，现代煤化工具有一些明显的自身特点，特别是项目建设和企业运营过程中，都需要有本行业专门制定的要求、标准和规范。而简单参照相近和相关行业，有时是行不通的，甚至还会出现较大偏差。经过多年发展和实践，现代煤化工行业已经基本形成，其发展已步入规范、有序的轨道。现代煤化工行业的业务内容是纷繁复杂的，涉及多领域、多学科，有许多方面的业务是跨行业、跨专业的。现代煤化工项目属于技术密集型和投资密集型，还需要考虑齐全的安全手段、配套严格的环保设施。因此，在现代煤化工发展的全过程中需要实施相关的专业化管理，特别在项目建设和企业运营过程中的专业化管理更是必不可少。

7.6 政策引导与宏观调控

任何一个新兴产业从小到大的发展，要想实现快速、健康、可持续，至关重要的是始终能够维护好发展过程中的良好秩序，否则就容易出现“忽冷忽热”的现象，导致发展无序甚至出现混乱。因此，国家的统筹规划和政策引导必不可少，必须要站在国家需求的高度上制定切实可行的发展目标，统一部署、规划设计、合理调配和有效利用好各方面资源，控制好发展进程和质量，避免出现简单重复、无序竞争和资源浪费。同时，国家政策和相关规划一般是具有一定时效性的，必须要根据实际情况的变化适时、适当地进行必要的修正和调整，及时纠偏、补充及完善。因此，国家及政府部门的宏观调控也是非常必要的，需要持续出台新的相关政策，及时更新滚动发展规划，以尽可

能避免走弯路、争取零失误。宏观调控不仅需要慎重考虑与科学论证，而且更要把控好实施的时机和调控的力度，要尽量避免“忽左忽右”和“大起大落”，以尽量争取不产生“超额”的经济损失和资源浪费。

7.7 发展质量与科技创新

在国家实施科技创新驱动战略、国民经济步入高质量发展轨道的大好形势下，中国现代煤化工的高质量发展自然应顺应大势，必须依靠科技创新提升煤化工产业发展质量。在现代煤化工科技创新的具体工作中，应充分借鉴以往工作积累的宝贵经验，要特别注意以下几点：①国家统筹规划设计和安排部署，并继续发挥好政策引领和宏观调控作用；②在行业层面上认真做好规范、组织及协调工作；③相关部门、机构、企业及其他各有关方面密切配合、通力合作；④认真梳理制约发展质量提升的短板和弱点，找准科技创新的突破口和发力点；⑤潜心研究与强力攻关并重，力争实现早出成果、早见效。要实现中国现代煤化工的高质量发展，应充分认清以下 5 个问题：

1) 把握一个总原则非常必要，即认真总结“十三五”以来现代煤化工工业化升级示范的经验。中国现代煤化工离大规模产业化发展的要求还有一定差距，系统集成水平和污染控制水平尚有待进一步提升，企业生产的稳定性和经济性有待于进一步长期验证和精细考核，行业标准和市场体系还有待进一步补充和完善。

2) 技术创新仍然是中国现代煤化工产业高质量发展的关键。应该在进一步加大原始创新与核心技术和关键装备创新力度的基础上，着力突出集成创新和产业化技术配套及其优化水平，要重点突破集成创新和产业化技术配套的创新。

3) 绿色发展是中国现代煤化工产业高质量发展的根本要求。绿色发展已经成为科技革命和产业结构优化升级的主要方向。由于资源性和能源性的属性，中国现代煤化工产业的“三废”排放量在国民经济各工业领域中排在前列。因此，现代煤化工绿色发展还面临着诸多挑战。

4) 煤化工产品的差异化和高端化是现代煤化工产业高质量发展的重要途径。中国缺油、少气、相对多煤，决定了中国现代煤化工有广阔的发展前景和巨大的市场空间。加上石化行业的高端产品数量缺乏，低端产品能力过剩，进口石化产品多是化工新材料和专用化学品，使得中国现代煤化工在与石化行业优势互补、共同促进上大有用武之地。

5) 产业集群化发展是现代煤化工产业高质量发展的重要方向。打造现代煤化工产业集群是党的“十九大”提出的建立现代经济体系的一个重要组成部分，有关部委正在研究制定国家着力培育具有全球竞争力的世界一流现代煤化工企业的方案和实施意见。中国现代煤化工的高质量发展需要有 5 个标准：①技术创新上要突破一批制高点技术；②产业结构调整上要实现从量变到质变的重大转折；③产业布局上要培养一批有国际竞争优势的典型企业和标杆基地；④绿色发展上要形成安全、清洁的企业形象；⑤现代煤化工要成为推动国民经济高速、健康、可持续发展新的经济增长点。

8 现代煤化工发展存在的问题及展望

8.1 存在的问题与面临的挑战

中国现代煤化工产业，无论从产品结构、产业规模，还是创新能力、运营管理等方面，都已走在世界前列，且已经进入高质量发展的新阶段。从现在到“十四五”（2021—2025年），是中国现代煤化工转型升级、高质量发展的重要时期。中国现代煤化工发展至今，虽然已经具备一定的产业规模，且已经显现出“有创新、有引领、有特色、有优势”4大亮点。但客观讲，中国现代煤化工产业的总体质量还不算高，具体表现在：①生产安全事故还时有发生；②有些环保措施的实施效果还不能令人满意；③有的生产装置连续稳定运行的可靠性还需更长周期验证；④有的项目主要产品质量和成本的市场竞争能力还不够强，且产品低端化较普遍，同质化竞争趋势日益显现，企业经济效益存在较大不确定性；⑤总体技术水平发展不平衡，还有短板和薄弱环节，因而应对国际局势动荡的能力还需进一步加强；⑥全行业高质量、可持续发展还面临诸多挑战。结合实际情况，中国现代煤化工产业还存在以下问题：①在共性关键技术、前沿引领技术、现代工程技术、“卡脖子”（指国际局势动荡时可能会受制于人）技术上都有待进一步创新和突破，现代煤化工本身的资源利用与能源转化的效率均偏低，环保问题仍然比较突出；②由于现代煤化工工艺中调氢（通过CO变换来调节H₂和CO的比例）反应的不可缺失，导致项目耗水与碳排放均较多；③由于现有项目的主要产品多为比较普通的低端或初级产品，而高端化、精细化、差异化、专用化的下游产品开发不足，造成现代煤化工产业的比较优势不明显，总体竞争力还不强；④由于技术集成度和生产管理水平上的差距，使得现代煤化工产品成本偏高，企业运营的整体效能还有待提高。

在当前世界经济下行压力加大，中美贸易摩擦持续进行，“不确定”因素大幅增加的新形势下，中国现代煤化工行业不仅面临着产业结构优化调整的突出矛盾，而且还面临着许多具有自身特点的严峻挑战，主要表现在：①国际油价长期处于低位运行，现代煤化工企业经营将面临长期压力；②国内“炼化一体化”规模快速增长，加剧了现代煤化工产品的市场竞争；③安全和环保形势日益严峻，现代煤化工企业生产成本随之上升；④技术创新仍是制约中国现代煤化工行业高质量、可持续发展的瓶颈。

石油价格与供给、产品产能与市场、资源配置与税收、信贷融资与回报、环境容量与用水、温室气体排放与减排等都影响着中国现代煤化工的发展。因此，单一因素或多因素叠加不仅严重制约着现代煤化工的健康发展，也大幅降低了现代煤化工产业抵御经济风险的能力。

在国民经济高质量发展的新形势下，我国石油和化学工业结构性矛盾更加凸显，现代煤化工高端产品数量短缺，低端产品能力过剩，产业结构还主要集中在产业链的中低端，而且产品趋同问题日益突出。如何通过实施科技创新驱动战略，走出一条“高端化、差异化、绿色化”的产业发展新路，是现代煤化工行业的努力方向和艰巨任务。中国现代煤化工科技创新需要在共性关键技术、前沿引领技术、现代工程技术、“卡脖子”技术上实现新突破，同时还需要在部分重大装备、重要材料上实现新突破；石油替代和醇、醚、醛、酸、芳烃、烯烃下游含氧化合物是高质量现代煤化工主要产品的合理选择；以“现代化、大型化、标准化和智能化”的理念，“能源发展替代互补与化工产品高效高值”的思路，以“高

效利用、耦合替代、多能互补、规模应用”的路线，通过科技创新实现全产业的高质量提升，大力发展中国能源体系下的现代煤化工。

8.2 研究重点及方向

煤化工行业的本质特征是通过不同的生产工艺过程，为国民经济发展提供各种用途的化工产品。煤化工技术的核心与关键是催化剂，并配套相应的反应器及形成成套工艺。因此，现代煤化工科技创新的突破口应是煤化工高端差异化新产品，特别是高性能、高附加值类新产品的开发，具体工作内容和程序要遵循行业习惯及专业通行规则。中国现代煤化工科技创新在各主要技术方向上的重点研发工作应该集中在：

1) 煤气化技术。加强基础研究，掌握煤气化过程中污染物的迁移转化机理；继续推动煤气化技术向更大规模方向发展；拓宽对高灰熔点等难气化原料煤的适应性；继续完善煤气化工艺，优化大型煤气化系统，进一步提高煤气化过程效率。

2) 煤直接液化技术。继续进行煤直接液化技术升级，开发新产品，提升煤制油产品价值，重点是生产高密度、高稳定性、高热容、低凝点、低硫氮的特种油品（包括低硫、低氮汽、柴油，军用柴油，低凝柴油，航空煤油（喷气燃料），火箭燃料等）和高端化学品（包括苯类芳烃及其他下游高端、高附加值产品等）。

3) 煤间接液化技术。按照差异化、高附加值化的原则延伸煤间接液化产业链，以费托合成轻油为原料，通过精馏等提纯技术及精细加工，生产多种高附加值的差异化产品，包括戊烷、正庚烷、正己烷、异庚烷、异己烷、W2 系列轻质白油等；通过加氢异构脱蜡等工艺技术，生产高黏指（140～150）、低温流动性好、蒸发损失低的 APIIIII+润滑油基础油；通过分子蒸馏工艺，生产熔点为 105、95、62、56℃ 的用于塑料、色母粒以及蜡烛等行业的费托制蜡深加工产品。

4) 煤制烯烃技术。聚乙烯发展高档聚乙烯牌号产品（包括茂金属聚乙烯、乙烯高压共聚物、聚烯烃弹性体与塑性体、双向拉伸聚乙烯、聚乙烯三元共聚物等）及乙烯下游产品（包括碳酸二甲酯、甲基丙烯酸甲酯、丙醛/正丙醇等）；聚丙烯发展高档聚丙烯牌号产品（包括低 VOCs、高流动性、高模量、高冲击性能汽车料，三元共聚聚丙烯，医用聚丙烯，超高橡胶含量聚丙烯，低收缩率聚丙烯，高熔体强度聚丙烯，茂金属聚丙烯，丙丁无规共聚物，电工膜等）及丙烯下游产品（包括环氧丙烷等）；副产品发展下游高端、高附加值产品（包括己二腈、烷基化油等）。

5) 煤制乙二醇技术。继续加强技术拓展和产品链延伸，生产高附加值大宗化学品和精细化学品（包括聚乙醇酸等）。

6) 煤制天然气技术。继续加大具有自主知识产权的甲烷化技术开发，对具备条件的国产甲烷化工艺技术开展 10 亿 Nm³/a 及以上规模的工业化示范，在催化剂材料与合成方法上实现有效突破，替代国外催化剂。

7) 煤制芳烃技术。开展 100 万 t/a 级产品规模的工业化示范，验证产品方案与工艺流程的合理性、核心技术与关键设备的可靠性，获得项目投资和产品成本等经济数据。

8)合成气制含氧化合物技术。加大力度开发一步法合成气制二甲醚技术、一步法合成气制乙醇技术、合成气制低碳混合醇技术、合成气制高碳混合醇技术等。

9)合成气短流程技术。加大力度开发一步法合成气制烯烃技术、一步法合成气制芳烃技术、甲烷直接制烯烃技术等。

10)二氧化碳资源化利用技术。开发甲烷和二氧化碳自热重整制合成气(H_2+CO)技术(该过程可实现 CO_2 和 CH_4 两种温室气体的同时高效利用)和二氧化碳催化转化制高值化学品和燃料技术(可利用太阳能等可再生能源,通过光催化、光电催化或电解水制氢,进行 CO_2 加氢制甲醇等燃料及化学品)等。

11)由于资源性和能源性的属性,中国现代煤化工产业的“三废”排放量在国民经济各工业领域中排在前列。要以环保标准为优先考虑因素,建立绿色化现代煤化工产业体系。同时,发展高效污染物脱除技术、多污染物协同控制技术、废水零排放技术以及“三废”资源化利用技术。另外,还要加快制定科学完善的现代煤化工清洁生产标准与相关环保政策,综合考量大气环境、水环境与土壤环境后,科学布局现代煤化工产业,建立现代煤化工项目审批全过程监管以及后评价的清洁生产管理体系。

中国现代煤化工经过近 25 年的快速发展,获得了一大批具有自主知识产权的创新成果,且总体技术水平已位居世界前列、部分已属国际领先。相继建成投运了数十个工业化示范项目,形成了一定产业规模。尽管现代煤化工未来发展还会面临诸多问题、矛盾和挑战。但继续高质量发展现代煤化工,对国民经济的高速、健康、可持续发展将起到特有的作用。(转自《煤炭科学技术》2020 年 08 期)

作者简介:



徐振刚（1960—），男，吉林梨树人，研究员，博士生导师，煤化工专家。1982年毕业于鞍山钢铁学院（现为辽宁科技大学）煤化工专业，获工学学士学位；1985年获煤炭科学研究总院有机化工专业工学硕士学位；2004年获煤炭科学研究总院化学工艺专业工学博士学位。1991年9月—1992年11月，在德国克虏伯·考伯斯公司煤气化工程部进修煤气化与IGCC技术；自1985年在煤炭科学研究总院北京煤化学研究所气化研究室工作以来，历任煤炭工业洁净煤工程研究中心办公室副主任、北京煤化学研究所副所长、北京煤化工研究分院副院长、院长等职务。2011年4月—2019年8月，在中国中煤能源集团有限公司煤化工研究院工作，历任煤化工研究院副院长，院长，兼任煤化工技术管理部总经理及煤化工管理部（分管技术创新）副总经理等职务。2019年9月至今，在中国煤炭科工集团有限公司煤炭科学研究总院工作，任（煤化工）首席科学家。徐振刚研究员长期从事煤化工技术的研究开发和成果转化工作，以及现代煤化工项目的方案优化、工程建设、生产运营的技术管理工作。先后负责或参加完成国家重点基础研究发展计划（973计划）项目2项，国家高技术研究发展计划（863计划）项目3项，国家科技支撑计划项目5项，洁净煤技术国际合作研究与咨询项目5项，煤化学与煤化工技术咨询、技术服务项目10多项；煤气化项目工程设计与工程建设项目技术咨询、技术服务项目近10项；地方或企业煤化工产业规划、循环经济园区规划编制10多项，大型现代煤化工项目方案优化、工程设计、项目建设、生产运营、优化升级等技术管理工作6项。作为项目组长、专家或顾问，参与完成20多项国家研发项目或课题的立项评审、验收或鉴定，10多个大型现代煤化工园区规划咨询论证，20多个大型现代煤化工项目可行性研究报告论证评审和项目申请报告立项评估，以及3个大型现代煤化工建设项目安全预评价等专项技术工作。徐振刚研究员为中国石油和化学工业联合会专家委员会委员，中国石油和化学工业联合会煤化工专业委员会专家组成员，中国煤炭学会第七届理事会理事，第五届国家安全生产煤化工专业组专家；科学技术部、中国石油和化学工业联合会、中国煤炭工业协会等科学技术奖评审专家，国家知识产权局中国专利审查技术专家。荣获省部级科技奖5项，参与制订《煤化工术语》等3项国家标准，获得国家发明专利3项，发表科技论文140余篇，主编或参编专著11部，培养硕士研究生9名，博士研究生7名（其中2名在读）。