

天然气化工的发展动向

陈赓良*

(四川石油管理局天然气研究所)

徐文渊

(四川石油管理局)

陈赓良等. 天然气化工的发展动向. 天然气工业, 1997; 17(1): 63~69

摘要 天然气不仅是一种优质的清洁燃料, 也是近代化学工业的重要原料。以天然气为原料生产合成氨、甲醇、乙炔三大产品与油、煤为原料相比较, 具有投资省、成本低的优点。目前, 世界合成氨以天然气为原料的占 76%, 以天然气为原料生产甲醇的占 80%。近年来其技术开发重点是节能降耗, 改进造气工艺, 生产装置规模向单系列大型化趋势发展。着重阐述了甲醇通过羰基化、氧化羰基化、还原羰基化等反应和乙炔的雷佩反应合成一系列精细化工产品, 同时还介绍了天然气制合成气工艺; 甲烷氧化偶联制乙烯; 二氧化碳化工利用等的发展简况。

主题词 天然气加工 合成氨 甲醇 乙炔 化学工业 开发 装置 工艺 发展趋势

发展背景

天然气不仅是一种优质的清洁燃料, 也是近代化学工业的重要原料。以甲烷为主要原料的天然气化工从本世纪 20 年代以来一直保持稳定发展。目前在美国、西欧等工业发达国家, 天然气化工都已成为化学工业的重要组成部分。由甲烷出发的一次加工产品主要有合成氨、甲醇、乙炔、氢气、合成气(OXO 产品系列)、卤代烷、二硫化碳、硝基甲烷、炭黑等近 20 个品种, 经二次或三次加工后的重要化工产品则

在 50 种以上, 世界年生产总值在 1.6×10^8 以上, 用途几乎涉及国民经济各个领域**。

80 年代以来, 天然气在能源工业中的地位日益重要, 而作为化工原料也同样迅速发展; 尤其在中东、南美和东南亚许多发展中国家, 都把天然气化工作为重点发展的产业。因此, 70 年代世界上仅有 5% 左右的天然气用作化工原料, 1994 年世界天然气总产量已达 $2.2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 以上, 而用作化工原料的量也上升至 10%。

天然气化工在世界范围内普遍受到重视的原因

行安全评价基本没有开展。

1993 年, 四川石油管理局利用世行贷款项目, 由加拿大努发国际咨询公司对四川天然气管网改造及扩建项目进行咨询论证, 其基本结论是安全无污染, 平稳供气 20 年***。但由于四川石油管理局现有的南干线不具备管内检测条件, 因此建议以我们现有的技术力量为主进行检测评价, 可考虑用最普通的检测方法: 采用测量管—地电位和土壤电位的方法, 然后用所得数据计算第一次发生泄漏的时间及随后将要发生泄漏的频率; 采用加大密度的方法挖坑测壁厚, 然后计算腐蚀, 对已经发生腐蚀的管段, 如果管壁尚未穿孔, 应了解剩余管壁的最大允许

工作压力条件下还有多大承压能力; 对重点管段和无法挖坑测厚的管段, 可采用引进的国外先进技术设备, 加以检测评价。

4. 开展风险管理

风险管理的任务是提高有成本效益的风险损失预防, 有预见的进行风险分析及筹措长期稳定的风险资金。风险管理的宗旨是确保公众和人员的安全; 保护与公司操作有关的环境; 为公司的发展和利润尽力; 保护公司的资产和利益; 锻炼队伍, 培养技术人才。

审稿人 高级工程师 李梓丰
收稿日期 1996-05-24 编辑 王瑞兰

* 作者简介请见 1995 年第 1 期。

** 陈赓良, 天然气化工技术开发动向和我们的任务, 四川石油管理局天然气研究所, 内部资料, 1995 年。

*** 加拿大努发国际咨询公司对 SPA 咨询报告。

可以归纳如下:

(1) 天然气储量和产量的增长速度均超过石油,而且天然气的成因有多种来源,其探明地质储量(按油当量计)远大于石油。由于资源有保证,当前天然气工业发展很快,据预测至2000年将出现天然气生产的高峰,这就为天然气化工的发展奠定了基础。

(2) 天然气用作化工原料的经济效益优于燃料,尤其以天然气为原料生产合成氨、甲醇和乙炔三大产品,具有投资省、成本低、可简化流程等一系列优点。以天然气、轻油和煤生产甲醇的技术经济对比见表1。

表1 三种原料生产甲醇的技术经济对比

Table 1. Technical and economic comparison of methanol production with 3 kinds of material

项 目	天然气	轻 油	煤
占 地	100	200	300
人 员	100	140	200
成 本	100	140	150

注: 单位均为%。

同时,天然气化工企业还可以对原料综合利用以进一步节省投资,降低成本。例如天然气制乙炔的尾气可用于生产合成氨或甲醇,比直接用天然气制备的投资低,成本也分别降低20%和30%以上。

(3) 70年代以来,随着天然气化工工艺技术的不断进步,经济上有竞争力的二次和三次加工产品的开发也取得较快发展,现已形成了甲醇下游产品和乙炔下游产品两大体系^[1,2]。这样不仅提高了经济效益*,又可减少石化工业对乙烯的过分依赖,见表2。

(4) 以往天然气化工只着眼于甲烷的转化,但甲烷本身活性不高,通常把甲烷先经蒸汽转化或部分氧化转化为合成气($H_2 + CO$)后再进一步加工。而且在转化过程中往往还把二氧化碳作为原料加入其中以调节 H_2/CO 比例。因此,目前国内外都把甲烷、合成气、甲醇和二氧化碳四种碳—化合物为原料的化工称为碳—化工,从而使天然气化工的概念及其领域大为扩展。同时,碳—化工领域内的新技术开发非常活跃,如甲烷氧化偶联制乙炔,甲醇转化为乙烯和液体燃料,二氧化碳加氢合成甲烷和其它烃类等一系列课题的研究正在向纵深发展。

表2 国外天然气化工产品的经济效益

Table 2. Rconomic benefits of natural gas chemicals abroad

产品名称	加工次数	生产成本	售 价	利 润
乙 炔	1	44.33	62.81	18.48
合成氨	1	13.09	16.72	3.36
甲 醇	1	15.25	17.16	1.91
醋酸乙烯	2	59.62	61.60	1.98
甲 醛	2	29.15	33.88	4.73
尿 素	2	13.09	16.72	3.63
氯乙烯	2	51.70	55.22	3.52
聚氯乙烯	2	64.28	72.60	8.32
醋 酸	2	25.19	45.10	19.91
丁二醇	2	94.40	127.60	33.20
聚醋酸乙烯	3	115.50	145.20	29.70
尿醛树脂	3	117.50	140.80	23.30

注: 单位均为美分/kg。

天然气制合成氨和甲醇的发展动向

合成氨和甲醇是天然气化工最重要的两种产品。目前世界合成氨总生产能力约 $1.5 \times 10^8 t/a$,其中以天然气为原料的占76%,美国、英国、荷兰等国则几乎100%以天然气为原料。我国合成氨总生产能力约 $3000 \times 10^4 t/a$,1995年合成氨总产量 $2761 \times 10^4 t$,其中以天然气为原料的占25%。合成氨的下游产品主要是尿素,只有少量合成氨加工为硝酸、硝酸铵或其它胺类化合物。

目前世界甲醇总生产能力约 $2500 \times 10^4 t/a$,其中以天然气为原料的占80%。1995年我国甲醇产量为 $113.5 \times 10^4 t$,其中以天然气为原料的占12%。甲醇下游产品众多,主要为甲醛、醋酸、甲基叔丁基醚、各种甲酯等。以甲醇羰基化反应为基础的各种精细化工产品,以甲醇为原料制备液体燃料和烯烃,则是当前的开发重点^[1]。

天然气制合成氨的工艺技术发展动向大致可归纳如下:

(1) 天然气工业中虽有多种流程,但大同小异,主要区别在于转化炉和合成塔的结构。近年来技术开发的重点是节能降耗,在开发的不少新工艺和新技术中,目前具有竞争力,技术成熟和低能耗的国外

* 陈赓良,对我局发展天然气化工的几点认识,四川石油经济,1995年第6期。

工艺,有美国 Kellog 公司的 MEAP、KAAP、KRES 工艺,美国布朗公司的 Purifier 工艺,英国 ICI 的 AMV 工艺,丹麦 Topsoe 公司的 HT A/S 工艺等。

(2) 工艺过程的各个环节都研制了新型催化剂。如天然气蒸汽转化用的 ICI 公司节能型 57—3, Topsoe 公司的 RKG—2 和 RKS 等;变换用的 ICI 公司节能型 71—3/71—4 和 Topsoe 公司 LK—811 和 LK—821 等;氨合成用的 ICI 公司节能型 74—1 和 Topsoe 公司的 KM 和 KMR 等。

(3) 装置规模向单系列大型化发展。现在单系列装置的生产能力为 1 000 ~ 1 500 t/d, 最大规模已达到 1 800 t/d。与此同时,关闭了很多规模小的老厂,因为在原料和工艺基本相同的条件下,大型厂的能耗要比小型厂低 10% ~ 15%。

(4) 合成氨是能耗较高的产品,因而能耗是衡量工艺技术水平的主要指标。在以上三个因素的影响下,60 年代中期以来,合成氨工艺的节能降耗已取得了明显的效果,并在进一步改善之中,见表 3。

表 3 天然气制合成氨典型工艺的能耗

Table 3. Energy consumption in typical process of synthetic ammonia producing from natural gas

建设时期	装置规模 (NH ₃ t/d)	能耗 (NH ₃ GJ/t)	典型工艺
1956~1963	300	50.24	ICI 加压蒸汽转化
1964~1975	600~1 500	41.03	Kellog 标准工艺
1976~1982	1 000~1 500	38.73	Kellog 改进工艺
1986~	1 000~1 500	29.31	Kellog 节能工艺

天然气制甲醇的工艺技术发展动向与制合成氨有颇多相似之处,大致可归纳如下:

(1) 天然气制甲醇主要包括造气和合成两大部分,几乎都采用相同的流程,但工艺上分为高压法和低压法两种,前者目前已基本不用。低压法主要有不同公司开发的 4 种工艺,即英国的 ICI 法、德国的 Lurgi 法、丹麦的 Topsoe 法和日本三菱公司的 MGC 法,其中尤以 ICI 法和 Lurgi 法应用最广泛,前者占世界总生产能力的 60%,后者占 20%。这两种方法的主要区别在合成塔的结构,ICI 法用绝热式冷激型,Lurgi 法用列管式等温型,后者能量回收利用较好,但结构复杂,投资额高。两者综合技术经济指标并无显著区别。当前技术开发的重点也是节

能降耗,关键在造气工艺的改进。

(2) 造气和合成都研制了新型催化剂。蒸汽转化造气用的催化剂基本与合成氨工艺相同,但对需调入二氧化碳调节 H₂/CO 比的造气工艺,抗结炭的新型催化剂研制已取得重大进展。合成部分近年研制出了新一代的铜—锌—铝催化剂,如 ICI51—3,该催化剂具有很高的活性和选择性,寿命也比原用的 51—2 延长了 50% 左右。

(3) 装置规模向单系列大型化发展的趋势比合成氨更明显。60 年代 600 t/d 已属大型装置,70 年代发展到 1 000 t/d,目前已达到 2 500 t/d。大型化的结果是投资和成本均有大幅度降低,见表 4。

表 4 天然气制甲醇装置规模与投资成本的关系

Table 4. Relation between installation scope investment and cost of methanol producing from natural gas

生产能力(10 ⁴ t/a)	10	20	30	40	50	80	100
单位产品投资(%)	100	76	69	63	59	52	49
产品成本(%)	100	67	60	57	54	51	50

在上述诸因素的影响下,国外大型甲醇装置的能耗已从 60 年代的 42 GJ/t(甲醇)下降到目前的 30 GJ/t(甲醇)。

(4) 应该指出,在向大型化发展的同时也需因地制宜建了一些轻便型的小装置,最小的规模只有 20 t/d。这类装置主要用途是供炼油厂生产甲基叔丁基醚的原料和将一时难以集中加工的天然气就地利用^[3]。美国已开发了一种组装式撬装装置,专供后一个用途使用,装置有陆上和海上浮式两种类型。陆上撬装装置安装在 7 块撬板上,其中 6 块已标准化,第 7 块则是根据现场条件设计的特殊设备(如压缩机、原料气预处理设备等)。海上浮式装置则建在船上,根据天然气供应和甲醇需求状况可在油气田之间移动,这样能避免天然气放空,既有经济效益,也有环境效益*。

甲醇的羰基化反应 及精细化工产品开发

甲醇是一种重要的有机化工产品,其产量在基本有机原料中居第四位,在当代化学工业中占有重要地位。甲醇可生产一系列下游化工产品,如甲醛、甲基叔丁基醚、甲胺、甲基丙烯酸甲酯、对苯二甲酸

* 四川天然气工业研究,天然气净化加工利用部分,中国石油天然气总公司科技情报研究所等,1992 年。

二甲酯、丙烯酸甲酯、硫酸二甲酯、氯甲烷、二甲醚等。甲醇下游产品数量很大,开发方向众多,当前最受重视的方向是甲醇通过羰基化,氧化羰基化、还原

羰基化等反应合成一系列精细化工中间体和产品。甲醇羰基化反应的类型及其产品见表5。

甲醇羰基化制醋酸(Mansanto法)已于1968年

表5 甲醇羰基化反应的类型及其产品

Table 5. Carbonylation types of methanol and the products

类型	反应式	备注
羰基化	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COOH}$ (1)	羰基加在碳原子上
	$2\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} \longrightarrow (\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O}$ (2)	羰基加在碳原子上
	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} \longrightarrow \text{HCOOCH}_3$ (3)	羰基加在氧原子上
氧化羰基化	$2\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow (\text{CH}_3\text{O})_2\text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ (4)	氧化偶联
	$2\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow (\text{COOCH}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$ (5)	
还原羰基化	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{CHO} + \text{H}_2\text{O}$ (6)	同系化反应
	$\text{CH}_3\text{OH} + \text{CO} + 2\text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$ (7)	同系化反应
	$2\text{CH}_3\text{OH} + 2\text{CO} + \text{H}_2 \longrightarrow \text{CH}_3\text{COOCH}=\text{CH}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (8)	同系化反应

在美国实现了工业化(反应1),70年代后发展甚快,现世界醋酸总产量中以Mansanto法生产的已占50%以上,与英国BP公司协作国内也有两套大型装置正在建设之中。甲醇与醋酸反应生成醋酸甲酯后再羰基化制醋酐(Halcon-Eastman法)也于1983年在美国实现了工业化(反应2)。这两项工艺可认为是近30年来天然气化工的杰出成就。

按表5中反应3合成的甲酸甲酯(MF)可直接作为杀虫剂、杀菌剂和处理谷物、水果和烟草的熏蒸剂,也是有机合成的重要中间体,可用于生产甲酸、甲酰胺、二甲基甲酰胺等等。国内现有小型生产装置(1000~2000t/a)都采用甲醇气相脱氢工艺,而80年代后国外大型装置都采用美国Leonhard公司开发的甲醇液相羰基化工艺。由于MF的应用日益广泛,其下游产品的开发正在形成体系,故从发展看甲醇液相羰基化制甲酸甲酯的工艺有重要意义。

表5中反应4和5都属氧化羰基化反应,后者在氧化过程中同时进行碳原子的偶联。甲醇经反应4合成的碳酸二甲酯(DMC)是取代光气和硫酸二甲酯的新一代甲基化剂和羰基化剂,对保护环境有重要意义,且DMC本身也是用途广泛的精细化工中间体。1994年世界产量 $2.5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ t,估计今后3~5年内将剧增至 $25 \times 10^4 \sim 30 \times 10^4$ t^[6]。目前国外工业上已形成以日本宇部兴产公司的气相法和意大利埃尼(ENI)集团的液相法为代表的两大生产工艺。国内有西南化工研究院、中国科学院成都有机所等单位都开展了实验室研究,正准备进一步放大试验。

甲醇经反应5制得的草酸二甲酯(DMO)也是重要的精细化工原料,可用于合成草酸、草酰胺以及某些药物和染料的中间体。DMO的合成也形成类似反应4的气相法和液相法两大生产工艺,其中有亚硝酸酯参与的加压液相法合成工艺已由宇部兴产公司实现了工业化(6000t/a)。目前宇部兴产公司、美国联碳公司和意大利蒙特爱迪生集团以及国内的一些单位相继开展了反应条件更为温和的常压气固催化法合成DMO的研究,并取得了很大进展^[6]。鉴于草酸酯类在发展精细化工中的重要作用,此项目的开发应引起充分重视。

表5中反应6~8又称为同系化反应^[6],即n个碳的醇经还原羰基化反应而生成(n+1)个碳的醇、醛、缩醛或其它衍生物。甲醇经同系化反应合成乙醇及其衍生物在工业上很有意义,尤其在缺乏石油乙烯原料的地区,这是利用天然气为原料发展精细化工的重要途径。但同系化反应条件很苛刻,近年来研究工作虽有进展,但实现工业化还有相当距离。

乙炔的雷佩(Reppe)反应及精细化工产品开发

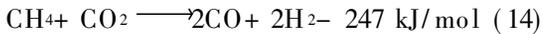
生产乙炔原料为天然气或电石,国内大部分工厂用电石生产,四川维尼纶厂用天然气生产乙炔。乙炔通过雷佩反应制成一系列下游产品。

雷佩反应是对乙炔与一氧化碳、醇类、醛类和羧酸的一系列反应的总称,当前工业上有代表性的主要有以下3个反应:



中试结果表明,按不同水碳比进料,反应温度控制在950~1 030 之间,合成气中的 H_2/CO 比可在0.99~2.97 之间灵活调节。

另一解决途径是在原料气中掺入 CO_2 ,使部分 CH_4 按反应式 14 与 CO_2 反应而提高 H_2/CO 比。



反应 13 和反应 14 有相似之处,两者均为强吸热反应,都用镍基催化剂,且都有结炭倾向,但反应 14 更容易结炭。虽然直接用 CO_2 和 CH_4 制合成气的工艺尚未工业化,但以 $CH_4-CO_2-H_2O$ 混合原料制合成气使其 H_2/CO 比降至 2 以下的工艺已经工业化^[10]。丹麦 Topsoe 公司利用簇效应硫对镍催化剂活性位置的阻塞(硫钝化),在基本不影响 $CH_4-CO_2-H_2O$ 转化速度的情况下有效地抑制了催化剂结炭,奠定了制备低 H_2/CO 比合成气新工艺——Sparg 工艺的基础。此工艺在美国德克萨斯州 Sterling 工厂已运转多年,结果表明技术可靠,经济

合理。

从天然气化工的发展趋势看,常规蒸气转化工艺的改进势在必行,ATR 工艺和 Sparg 工艺在技术经济、资源利用和环境保护等方面均有优势,值得借鉴。

甲烷氧化偶联制乙烯

在固体催化剂方面 CH_4 氧化偶联(OCM)制乙烯是近 10 多年来国内外天然气技术开发的热点课题。这是由于 OCM 在利用丰富天然气资源生产乙烯或液体燃料方面的潜在重要性;同时,由于 CH_4 是烃类中最稳定的一种,它的催化活化和选择转化研究在理论上具有重要意义。

OCM 工艺的核心是催化剂,对此国内外都开展了大量研究,国内的研究获得了较好的进展^[11],主要结果见表 7。目前,国外已开始工程开发研究,重点是反应器结构、工艺流程安排、产品分离与利用

表 7 国内 OCM 催化剂研究结果

Table 7. Research results of OCM catalyst in China

单 位	催 化 剂	温 度 (K)	压 力 (kPa)	CH_4/O_2	转 化 率 (%)	C_2 选 择 性 (%)	C_2 收 率 (%)
东北师范大学	Li—Mn—Ti	1 073	—	2.5	43.9	77.7	34.1
北京师范大学	Li—Mn	1 023	—	1.7	47.3	59.4	28.1 ¹⁾
天津大学	Li—Na—Mn	1 073	—	3.0	38.3	68.3	26.2
兰州化学物理所	Na—W—Mn/SiO ₂	1 073	—	2.6	38.1	58.2	22.2
南京大学	Li—Na—Sn	1 073	常压	2.0	41.2	52.2	21.5
沈阳化工学院	Li—Mn—Ti	1 073	常压	2.5	37.3	82.5	30.8
厦门大学	SnO ₂	953	—	1.5	44.9	45.2	20.3
北京化工研究院	Li—Mg	998	常压	1.7	47.3	51.9	24.5
北京大学	Li—Mg—Nd	1 003	—	2.0	57.1	53.0	30.3
成都有机化学研究所	Li—Re	873~1 073	—	—	41.3	—	23.5
吉林大学	Li—Mg—Mn	973	—	—	44.35	—	24.55
西南化工研究院	Na—Mn—B	1 013	—	—	36.4	—	27.8
华东化工学院	Na—Mg—Sn	993	—	—	—	—	25.8

注: 1) 为乙烯收率。

方案以及工艺条件的优化。虽然迄今 OCM 工艺尚未开展中间试验,但因其技术经济意义巨大,专家们估计在今后 10 年中有实现工业化的可能。

二氧化碳的化工利用

天然气和各类烟气中所含的二氧化碳也是一种潜在的碳源。目前全世界因各种矿物燃料而排入大

气的二氧化碳总量每年达到 $185 \times 10^8 t$,而利用来生产碳酸盐、液体二氧化碳、制合成气和合成尿素的二氧化碳,总量还不到 $1 \times 10^8 t$ 。因此,若能通过回收、固定以及再资源化而合理地综合利用二氧化碳,不仅有很大经济效益,还有减少温室效应气体排放的环境效益。联合国关于全球气候变化的框架协定已于 1994 年 3 月 23 日开始生效,协定要求工业化国

家到 2000 年把二氧化碳排放量降至 1990 年水平, 这样就更促进二氧化碳化工利用的发展^[2]。

除上述传统的利用途径外, 大量实验室和中试研究正在开展, 主要有以下几项^[3]:

(1) 二氧化碳催化加氢制甲醇。德国 Lurgi 公司的两步法新工艺已完成中间试验。日本京都大学和东京瓦斯公司正在开发新型合成催化剂, 国内也正在开展这方面研究。

(2) 二氧化碳加氢还原转化为甲烷。日本东北电力公司与日立公司联合开发了以活性氧化铝为载体, 目前正在进行中试。国内四川联合大学和同济大学等单位正在开展催化剂研究。

(3) 二氧化碳和环氧化物合成共聚物。利用此反应合成脂肪族碳酸酯系列高聚物可以不经能耗很高的二氧化碳还原反应, 这样, 不仅二氧化碳利用率高, 而且制得的聚合物具有生物降解性能, 降解产物对人体无害, 是理想的医用聚合物, 故这是当前世界上颇受重视的利用途径。

总体看来, 目前二氧化碳的化工利用尚在起步阶段, 国外也仅有少数几种产品进入了中试阶段, 国内则基本上还处于实验室探索和机理研究阶段, 实现工业化尚有较大距离。但由于二氧化碳资源量大, 开展综合利用具有经济和环境两方面的重大意义, 应该引起我们重视。

几点认识

(1) 当前国内外的动向表明, 随着天然气工业的发展, 天然气化工正在迅速发展。我国的天然气化工仅在合成氨制备上有较好的基础, 而在天然气制甲醇和乙炔以及甲醇和乙炔的下游产品开发方面还有大量工作要做。

(2) 合成氨和甲醇是天然气化工的主要产品, 当前工艺技术的开发重点是通过新工艺和新型催化剂的应用进一步节能降耗。

(3) 甲醇下游产品的开发重点是通过羰基化反应制备一系列精细化工产品, 如甲酸甲酯、碳酸二甲酯和草酸二甲酯等。

(4) 乙炔下游产品的开发重点是通过雷佩反应制备醋酸乙烯、丙烯酸及其酯类和 1,4-丁二醇。目前 1,4-丁二醇的下游产品开发也很活跃, 且已形成

了自身的体系。

(5) 天然气制合成气工艺的开发重点是灵活调节 H_2/CO 比和降低造气装置的投资, ATR 工艺和 Sparg 工艺是其典型代表, 目前正在推广之中。

(6) 甲烷氧化偶联制乙烯和甲烷选择性氧化制甲醇/甲醛是当前天然气化工技术开发的两大前沿课题^[4], 但技术难度很大, 实现工业化还有相当距离。

(7) 目前二氧化碳的化工利用虽还在起步阶段, 但由于有巨大的经济效益和环境效益, 已在国内外引起普遍重视。

参 考 文 献

- 1 陈贻良. 甲醇下游产品的研究与开发. 油气加工, 1992; 2(4): 26
- 2 李正清. 天然气乙炔工业国内外差距及技术发展建议. 天然气化工, 1990; 15(6): 20
- 3 天然气化工, 1990; 15(2)
- 4 张广遇. 开创二十一世纪化工的碳酸二甲酯. 化学世界, 1995; (6): 283
- 5 陈贻良等. 一氧化碳和亚硝酸酯合成草酸酯和草酸. 天然气化工, 1995; 20(4): 5
- 6 Herm an R G. Catalytic Conversion of Synthesis Gas and Alcohols to Chemicals, 1984
- 7 李玲. 醋酸乙烯的现状和发展. 化工技术经济, 1994; (2): 13
- 8 李锦春. 当代乙炔化工研究开发领域探讨. 天然气化工, 1993; 18(1): 38
- 9 Christensen T S *et al.* Improve syngas production using autothermal reforming. Hydr Proc, 1994; 73(3): 39
- 10 U dengaard N R *et al.* Sulfur passivated reforming process lowers syngas H_2/CO ration. Oil and Gas J, 1992; 90(10): 62
- 11 王开岳. 甲烷氧化偶联制乙烯研究开发现状与展望. 天然气工业, 1995; 15(4): 59
- 12 王坚庭. 国外碳—化学技术进展. 天然气化工, 1995; 20(4): 39
- 13 陈华. 国内碳—化学进展. 天然气化工, 1995; 20(4): 35
- 14 蔡启瑞等. 碳—化学中的催化作用. 北京: 化学工业出版社, 1995

(收稿日期 1996-06-19 编辑 王瑞兰)