



化学工程学科发展及战略研究

高金森^①, 徐春明^{①*}, 何静^②, 段雪^②, 何鸣元^{③④}^① 中国石油大学(北京)重质油国家重点实验室, 北京 102249^② 北京化工大学化工资源利用国家重点实验室, 北京 100029^③ 中国石化石油化工科学研究院, 北京 100083^④ 华东师范大学化学系, 上海 200241

*通讯作者, E-mail: xcm@cup.edu.cn

收稿日期: 2014-06-17; 接受日期: 2014-07-06; 网络版发表日期: 2014-09-01
doi: 10.1360/N032014-00175

摘要 化学工程学科经过百年发展, 经历了“单元操作”、“三传一反”两个里程碑, 进入“产品工程”、“三传一反+X”、“多(介)尺度理论与方法”等新阶段, 初步形成了以化学、物理学、数学和生物学基本原理和方法为基础, 以传递过程原理与化学反应工程为核心的学科知识体系。我国在化学工程学科建成了良好的学科研究平台和队伍。应用基础研究进展显著, 论文发表数量及引用评价影响等方面已与美国并列站在最高水平线上。对国民经济支柱产业也做出了重要贡献。通过分析美国基金委员会近 10 年资助的化工重点领域, 以及对 *AIChE Journal*、*Chemical Engineering Science*、*Industrial & Engineering Chemistry Research* 三大化工主流刊物关键词索引汇聚研究, 并结合国家自然科学基金委员会“十二五”化工学科发展规划, 归纳出了化学工程学科发展的三个层次: 学科基础、交叉前沿领域、重大需求, 共计 15 个重点领域方向。建议化学工程学科应优化自身理论体系、完善学科评价体系、争取“工程转化”环节的多方支持。

关键词化学工程
学科体系
重点领域
措施建议

1 化学工程学科的发展历程

化学工程学科是运用自然或实验科学(如化学、物理)、生命科学(如生物学、生物化学)以及数学、经济学知识, 实现化学品、原材料、能量的生产、转化、运输和合理使用的一门工程科学和技术学科。其核心内涵是揭示物质转化过程中质量传递、能量传递、动量传递以及分离和反应之间的内在关系, 创建高效、清洁、节能、安全、经济的物质转化工艺和相关系统。其主要研究对象包括: 能源和资源、生物和制药、新材料、物质合成与转化、环境污染治理等化学工程与技术。

现代化学工程学科是 19 世纪末为适应化学品大规模生产的需要, 在工业化学的基础上逐步形成的

一门工程技术学科。美国 Purdue 大学的 Phillip C. Wankat 对化学工程发展历史做了总结^[1]。

1880 年, “化学工程”概念首次被英国学者 George E. Davis 正式提出^[2]。1888 年, 美国学者 Lewis M. Norton 在美国麻省理工学院(MIT)开设了第一个以“化学工程”命名的学士学位课程, 标志着化学工程学科的诞生^[3~5]。1915 年, 美国学者 Arthur D. Little 正式提出了“单元操作”概念, 将各种化学品的工业生产工艺分解为若干独立的物理操作“单元”, 并阐明了不同工艺相同操作“单元”所遵循的相同原理, 实现了化学工程学科发展的第一次质的飞跃^[3]。1921 年 MIT 组建了世界第一个化工系, 决定把机械系的流体力学、传热学和化学系的热力学、动力学、扩散、

混合等核心内容加合, 确立了“化工单元操作”课程的理论体系^[6, 7]。

20 世纪 50 年代后期, 美国学者 R. B. Bird 等把相关物理和数学理论引入“单元操作”, 将所有单元操作归纳为质量、热量和动量的传递过程, 并阐明了传递过程基本原理。随后, 传递过程原理与化学反应相结合, 于 1957 年欧洲第一届化学反应工程学术会议界定了化学反应工程学的学科范畴、研究方法等, 推动了传递过程原理和化学反应工程(“三传一反”)理论的发展, 完成了化学工程科学由“单元操作”向“三传一反”过渡的第二次飞跃^[8]。

世纪之交前后, 化学工业规模迅速扩大, 计算机技术的融入使多变量、强耦合的大系统分析在化工中大量使用, 分子热力学、生物化工等学科边界不断扩展, 孕育出多种具有突破意义的化学工程学范式。比如 James Wei 教授等^[9, 10]提出的“产品工程”范式, 以产品性能和物质结构的关系及其产品设计和制造作为主要特征; 郭慕孙教授等^[11]提出的“三传一反+X”范式(其中 X 是待定的、可变的和形成中的要素), 很好地保留了与第一阶段、第二阶段范式概念的延续性; 李静海院士等^[12, 13]提出的“多尺度理论与方法”, 以及近期在国际上首次提出的不同尺度间的共性行为的“介尺度理论与方法”^[14, 15], 为解决学科复杂工程问题奠定了坚实的理论基础。

化学工程学科的贡献也从传统的化学工业扩展到能源、材料、冶金、环境、生物、医药、食品等诸多进行物质与能量转化的过程工业, 并不断与其他学科进行交叉融合, 在满足国民经济发展的重大需求方面, 占据了不可替代的地位。如经过近 30 年的持续高速发展, 我国化学工业产值占 GDP 的 16.6%。化肥产量居世界第一, 石油化工产业生产能力居世界第二, 石油产量居世界第四^[16, 17]。当然, 化学工业在为人们生活带来巨大利益的同时, 也产生了污染、排放, 消耗了大量能源与资源。正因为如此, 化学工程学科还将在未来“绿色环保、低碳节能”中发挥不可替代的作用。

2 我国化学工程学科发展现状分析

2.1 建立了水平高、素质好、能力强的学科研究队伍

目前, 我国高等学校和科研院所建有化学工程学

科的国家重点实验室 6 个、国家工程中心 7 个。此外, 科技部在大型国企等还建有化学工程学科企业国家重点实验室 6 个。据不完全统计, 我国目前 40 余家高校和科研单位建有化学工程学科省部级(含地方)重点实验室 51 个。与此同时, 也建立起了完善的化工高等教育体系, 包括本科生和研究生的专业设置、培养方案、课程体系和管理机制, 为国家培养了大批高水平的化工专业人才。

迄今为止, 国家自然科学基金委员会化学工程学科创新群体 2 个, 教育部“长江学者”创新团队 11 个。化学工程学科国家杰出青年基金获得者 58 人。另外, 国有大型企业也建有高水平的科研机构并拥有很强的研究力量。

2.2 取得了基础研究方面的显著成绩和重要进展

近些年来, 我国化学工程学科在基础研究和应用基础研究方面取得了显著成绩和重要进展, 国际学术影响力日益增加。中国科学院情报研究所专门进行的文献检索和分析结果表明, 在 2002~2006 年间, 中国化工领域论文产出量世界排名第二, 但产出量 6786 篇仅为美国(12765 篇)的一半左右。但在 2007~2011 年化工领域论文数量急增到 16812 篇, 超过了美国的 14413 篇, 位列世界首位。中国化工领域的 SCI 论文占世界的份额也从 9.29% 增长到 16.6%, 详见表 1。因此, 中国以 7.31% 的前后两个 5 年的份额增量, 位居世界化工领域论文产出增长最快的国家。

SCI 检索研究表明, 中国化工领域论文的被引用次数在 2002~2006 年与美国有较大的差距, 被引用次数(66050 次)仅相当于美国(174818 次)的 38%。而在 2007~2011 年中国论文的影响力取得了长足进步。引文总量占世界份额的 15.75%, 已接近于美国的 17.55%。虽然两个 5 年间, 中国都是排名世界第二, 但中国在该领域论文质量的提升已经使得中国与美国站在同一个水平线上(详见表 2)。

表 3 给出了世界化工领域 2002~2011 年被引用次数 TOP 20 机构。其中, 中国机构占据了 9 个席位(包括中国台湾的国立台湾大学), 在论文影响力方面十分抢眼。按照被引用次数排序, 有 3 所中国机构进入前十名。中国科学院雄踞榜首, 清华大学和天津大学位列第 6 和第 10 名; 浙江大学、大连理工大学、华东理工大学、北京化工大学和中国石油大学在 TOP 20 机构排行榜中, 分别排在 12、15、16、18 和 20 位。

表 1 化工领域 2002~2011 年论文数 TOP 20 国家(地区)^{a)}

国家(地区)	2002~2011	2002~2006			2007~2011			份额 增量(%)	排名 变化
		论文数	世界份额(%)	世界排名	论文数	世界份额(%)	世界排名		
美国	27178	12765	17.5	1	14413	14.2	2	-3.2	-1
中国	23598	6786	9.3	2	16812	16.6	1	7.3	1
德国	11192	5649	7.7	3	5543	5.5	4	-2.3	-1
日本	10729	5253	7.2	4	5476	5.4	5	-1.8	-1
印度	9080	3441	4.7	7	5639	5.6	3	0.9	+4
法国	8631	3781	5.2	6	4850	4.8	6	-0.4	0
英国	8601	4227	5.8	5	4374	4.3	9	-1.5	-4
韩国	8062	3361	4.6	8	4701	4.6	8	0.0	0
西班牙	7795	3036	4.2	10	4759	4.7	7	0.5	+3
加拿大	7481	3282	4.5	9	4199	4.1	10	-0.3	-1
波兰	5691	2628	3.6	11	3063	3.0	12	-0.6	-1
土耳其	5458	2409	3.3	12	3049	3.0	13	-0.3	-1
澳大利亚	4426	1741	2.4	16	2685	2.7	14	0.3	+2
俄罗斯	4405	2073	2.8	13	2332	2.3	18	-0.5	-5
意大利	4277	1774	2.4	14	2503	2.5	15	0.0	-1
中国台湾	4223	1772	2.4	15	2451	2.4	16	0.0	-1
伊朗	4134	897	1.2	20	3237	3.2	11	2.0	+9
巴西	3861	1511	2.1	18	2350	2.3	17	0.3	+1
荷兰	3346	1631	2.2	17	1715	1.7	20	-0.5	-3
罗马尼亚	3046	1302	1.8	19	1744	1.7	19	-0.1	0

a) 按 2002~2011 年论文数量排序, 数据来自 Incites 2012. 位次变化是指 2007~2011 年与 2002~2006 年两个时间段相比的变动情况. 正数表示位次上升, 负数表示位次下降, “0”表示位次无变化

表 2 化工领域 2002~2011 年被引用次数 TOP 20 国家(地区)^{a)}

国家(地区)	2002~2011	2002~2006			2007~2011			份额 增量(%)	排名 变化
		被引用次数	世界份额(%)	排名	被引用次数	世界份额(%)	排名		
美国	239261	174818	21.8	1	64443	17.6	1	-4.3	0
中国	123865	66050	8.2	2	57815	15.7	2	7.5	0
日本	72784	54957	6.9	3	17827	4.9	8	-2.0	-5
德国	72728	53145	6.6	4	19583	5.3	5	-1.3	-1
西班牙	71694	46804	5.8	7	24890	6.8	3	0.9	+4
法国	70113	49743	6.2	5	20370	5.5	4	-0.7	+1
英国	67324	48589	6.1	6	18735	5.1	7	-1.0	-1
印度	61515	42613	5.3	8	18902	5.1	6	-0.2	+2
韩国	48108	32370	4.0	10	15738	4.3	9	0.2	+1
加拿大	47083	32497	4.1	9	14586	4.0	10	-0.1	-1
土耳其	44026	29884	3.7	11	14142	3.9	11	0.1	0
意大利	38279	26149	3.3	12	12130	3.3	12	0.0	0
荷兰	33733	25032	3.1	13	8701	2.4	15	-0.8	-2
澳大利亚	31864	21216	2.6	14	10648	2.9	13	0.3	+1
中国台湾	26583	17780	2.2	15	8803	2.4	14	0.2	+1
巴西	22975	14804	1.8	16	8171	2.2	16	0.4	0
波兰	20364	14080	1.8	18	6284	1.7	20	0.0	-2
瑞士	19970	14697	1.8	17	5273	1.4	22	-0.4	-5
希腊	19601	13874	1.7	19	5727	1.6	21	-0.2	-2
葡萄牙	18164	11504	1.4	21	6660	1.8	18	0.4	+3

a) 按 2002~2011 年论文数量排序, 数据来自 Incites 2012. 位次变化是指 2007~2011 年与 2002~2006 年两个时间段相比的变动情况. 正数表示位次上升, 负数表示位次下降, “0”表示位次无变化

表 3 2002~2011 年世界化工领域被引用次数 TOP 20 机构^{a)}

序号	机构	国家(地区)	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	10 年总数
1	中国科学院	中国	2296	3552	3752	3172	3629	2969	3389	2171	1200	256	26386
2	印度理工学院	印度	1685	2171	2726	3392	3444	3155	2127	1634	704	325	21363
3	西班牙国家科学研究委员会	西班牙	2069	3217	2920	2610	2192	2300	1869	1546	654	108	19485
4	新加坡国立大学	新加坡	1530	1960	1730	1858	1793	1338	1178	912	400	74	12773
5	代尔夫特理工大学	荷兰	1407	2330	1485	1926	1409	976	655	622	333	49	11192
6	清华大学	中国	1279	1159	1236	1599	1428	1368	1455	934	467	103	11028
7	帝国理工学院	英国	1542	1654	1344	1497	1180	1190	1063	1060	656	325	10284
8	法国国家科学研究中心	法国	1388	1156	1306	1396	854	926	808	895	512	255	10117
9	日本产业技术综合研究所	日本	1294	1319	1167	1202	862	601	845	549	372	226	9043
10	天津大学	中国	805	949	1032	1345	1293	1215	1162	651	297	58	8807
11	丹麦科技大学	丹麦	1188	1219	1661	953	1106	722	781	426	466	85	8607
12	浙江大学	中国	384	727	825	978	1115	1234	1089	781	359	50	7542
13	首尔国立大学	韩国	706	748	981	573	645	462	663	317	157	50	5302
14	台湾国立大学	中国台湾	787	607	852	811	757	416	617	244	151	33	5275
15	大连理工大学	中国	419	365	813	608	1010	594	543	480	298	57	5187
16	华东理工大学	中国	663	353	498	491	680	532	604	695	386	80	4982
17	俄罗斯科学院	俄罗斯	726	816	674	715	660	461	383	353	114	17	4919
18	北京化工大学	中国	351	358	281	681	829	813	709	492	339	36	4889
19	阿尔伯特大学	加拿大	693	640	885	793	458	453	342	290	145	19	4718
20	中国石油大学	中国	159	223	361	301	516	330	392	314	170	42	2808

a) 按 2002~2011 年被引用次数排序, 数据来自 Incites, 2012

显示出中国在化工领域已经具备相当强的实力。

2.3 发挥了对行业发展的重要支撑作用

我国广大的化工科技工作者直接面向国民经济建设的主战场, 面向国家的重大战略需求, 在传统化工产业的结构调整与产品升级换代, 面向高新技术产业的特种与专用化学品的创制等方面, 对行业的可持续发展发挥了重要的支撑作用, 在满足国家重大需求方面做出了重要贡献。

中国科学院信息情报研究所以 DII 数据库为数据来源, 利用德温特手工代码分类中的化工类作为检索依据, 对化工领域专利授权情况进行了检索, 最终得到全球 40 多个国家和地区专利机构受理的 2001~2010 年间化工领域专利数据 251187 项, 世界范围内化工专利申请分布在 47 个国家和地区。表 4 是 TOP 10 国家的化工领域专利保护数量分布。由表中数据可见, 受理量最多的是日本、中国和美国, 这三个国家专利受理量均超过了 10 万件。世界知识产权局组织以 8 万多件专利受理量位居第四。

再以国家技术发明奖和科技进步奖为例, 2001~2011 年期间, 化工领域产生国家技术发明奖一等奖 1 项, 二等奖 35 项; 产生国家科技进步一等奖 6 项, 二等奖 38 项, 对我国国民经济发展发挥了重要支撑

表 4 2001~2010 年 DII 收录化工领域专利保护地域分布

排名	国家	数量(件)
1	日本	141451
2	中国	136143
3	美国	115630
4	世界知识产权组织	84082
5	欧盟	66047
6	韩国	42284
7	德国	36755
8	澳大利亚	23798
9	加拿大	13156
10	俄罗斯	12103

作用。图 1 给出的是三类奖项中数据较大的二等奖中化工类获奖的比例。其中最为抢眼的是化工学科所获的国家技术发明二等奖占总获奖比例高达 30% 以上。

2.4 存在的问题

近年来, 随着工业需求不断扩大、国家投入不断增加、基础研究队伍不断壮大, 我国化学工程学科的研究水平不断提高。与此同时, 还存在一些亟待解决的问题, 可归纳为以下三个方面。

(1) 学科自身发展带来的新问题。一方面是基础理论需要不断完善。传统化学工程学科的基础理论

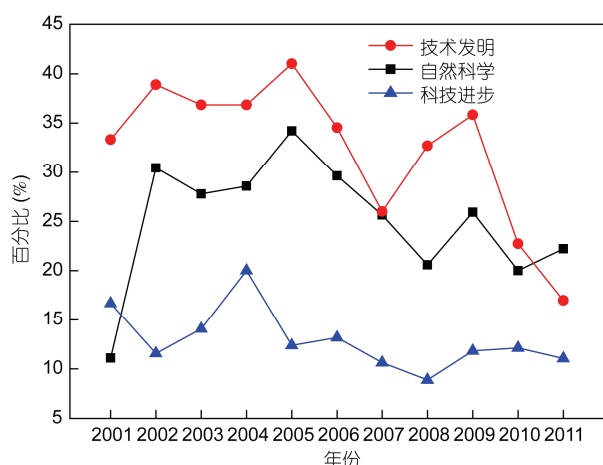


图 1 三类奖项的二等奖中化工类获奖比例比较(自然科学奖为化学化工总获奖)

从“单元操作”到“三传一反”，高度凝练，内容丰富，内涵明确、表达统一。但是，现代化学工程学科已经呈现出一个明显的特点就是多学科交叉，化工不仅与化学交叉，而且还向新的其他邻近学科交叉渗透。虽然“三传一反”奠定了学科基础，但应用于非常规新体系、极端过程新条件时仍面临新的问题。当向其他学科或应用领域拓展时，它的工程问题和内涵都发生了一定的变化。因此，化学工程学科除了继续深化原来的学科基础内容外，还要加强学科交叉的工程学内涵研究，以适应新研究对象带来的新挑战，其研究范围和应用前景也将远远超越原有的含义。由此需要形成形式统一、内涵完整的基础理论体系。另一方面，化学工程学科作为一门工程科学，所具有的重要特征就是要求学术研究与工程研究紧密结合，其研究成果水平的高低需要有产业实践来进行检验，特别是一些具有重要原创性的研究成果更需要长时间的工程化运行效果来考验。此外，传统化学工业由于往往被贴上了“污染”、“排放”、“耗能”等标签，甚至出现了“谈化色变”的情况，发展遇到了前所未有的困难局面，因此化学工程学科需要新理论、新方法、新工艺、新装备、新技术的出现，变传统化工为“绿色”化工，使挑战转化为机遇，为化学工业本身的发展与变革提供支撑。同时也需要化学工程学科在教育、宣传、科普等方面发挥作用，彻底扭转当前的困难局面。

(2) 缺乏适合学科自身发展规律的评价指标体系。目前，化学工程学科尚未建立起适合自身应用背

景强的学科评价体系，更多地是“被动”地采用偏重基础研究评价的通用体系，导致“SCI”导向。这一导向的有利方面促进了化学工程学科在基础研究领域的快速进步，如最新 SCI 检索表明，近 5 年在化工领域世界平均增长为 30.8% 的大背景下，中国增长了 156.6%，而与之形成鲜明对比的是美国则仅增长了 12.3%。可以预见在不久的将来，中国在该领域的基础研究成果的产出将超过美国。但不利的方面是，忽视了基础研究成果向实用技术的转化。从最新检索的专利授权和专利实施量以及国家科技进步奖所占总获奖比例约 10%(图 1)等情况分析，明显出现了学科发展与工业实际结合不够密切的现象。

(3) 科研体制机制协同创新程度不足。现在国家对于基础研究、技术转化研究和工程化研究都有相应的比较完备的资助体系，如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”)和支撑计划等。但在从基础研究向技术转化方面缺乏资助体系，其结果间接导致化学工程学科从事成果转化研究的科技人员队伍流失。由于学科发展评价指标体系不全面、不合理，使得难以发表 SCI 论文的研究工作，如过程放大和工程运行等方面的研究工作少有人问津，出现了基础研究与工程应用明显脱节的现象，很多基础研究的成果束之高阁无法实现产业化应用，难以将科研成果转化为生产力。从国家层面来看，缺乏化学工程学科发展的协同创新平台，科技资源分散，“政产学研用”缺少有效的组织合作。大型企业由于行业管理、区块分割和企业利益驱动，其科技创新针对具体应用，技术协同不足、基础研究薄弱、技术壁垒严重，立足长远的自主创新能力缺乏；高等院校和科研院所面对行业产业的发展，具有学科集成优势、高层次人才聚集优势、创新人才培养优势，善于开展相关基础研究和应用基础研究，但研究与应用结合不紧密，难以高效完成化学工程学科至关重要的“过程放大”环节，技术转化能力不足。此外，各单位发展的利益诉求不同，自成体系，在整体布局、方向任务等方面尚存在资源浪费、财力分散、重复建设等突出问题。

3 我国化学工程学科发展重要领域分析

表 5 是学科领域优先发展方向汇总表。其中包括美国自然科学基金委员会 2000~2011 年化工领域重点资助情况分析；中国自然科学基金委员会《化学工

程学科前沿与展望》^[18]中列出的重点发展领域; 关键词汇聚是对专家提出的 100 多个关键词在 *AIChE Journal*、*Chemical Engineering Science*、*Industrial & Engineering Chemistry Research* 三大化工主流期刊上出现频次及热点领域进行汇聚分析得到; 成果领域方向是指 2001~2011 年我国化工科研主要获奖成果所在的领域方向。

对表 5 进行详细对比分析研究, 确定了化学工程学科未来发展重点领域方向归纳为如下三个层次, 共 15 个研究方向。

(1) 化学工程的学科基础

做为传统化学工程学科的理论基础——“三传一反”或“三传一反+X”, 在近代科学技术快速发展的推动下, 面对非常规新体系、极端过程条件、多尺度关联等问题, 需要拓展, 以解决新的科学问题和技术难题。具体包括:

(i) 反应与分离工程。重点展开从传统颗粒(包括固体颗粒、气泡、液滴)尺度向微纳米直至分子层次的传递和反应特性与规律研究, 发展计算、理论与实验结合的研究方法, 建立分子反应与分离工程新理论、新方法和新模型, 发展能源、制药、精细化学品、聚合、纳米材料、温室气体减排等领域应用的新技术。

(ii) 化工过程中的表(界)面科学与工程。从分子、纳米尺度出发, 重点研究多相复杂系统中的表(界)面现象, 预测和调控纳微结构界面, 发展新的化工过程和设备, 建立适合于非常规介质或新介质体系的

分子热力学模型, 实现界面传递与化工反应过程的耦合及调控。

(iii) 化工热力学与传递过程。重点研究化工过程的热力学分析方法和复杂系统的化学平衡, 建立具有可靠理论基础的状态方程, 要求方程适用于极性物质、含氢键物质和高分子化合物, 并能同时用于气相、液相和临界区域。非常见物质的汽液平衡、液液平衡和液固平衡, 以及与超临界流体萃取新技术有关的气液平衡和气固平衡, 与气体吸收、湿法冶金、海洋能源开发有关的电解质溶液及化工热力学在生物化学工程中的应用。

随着高分子化工和生物化学工程的发展, 传递过程重点研究高黏度、非牛顿型流体中传递过程。从单相中的传递扩大到两相流中的传递, 特别是两相界面及其附近区域中的传递。湍流传递以及多相湍流和非牛顿型流体湍流下的传递过程。

(iv) 化工过程放大。重点研究复杂多相化工体系的计算与模型化方法, 在分子、纳/微尺度层次上进行纳米材料、大分子、生化体系、仿生材料等对象的量化计算与分子模拟, 实现分子设计、结构筛选与性能计算, 为发现功能分子产品提供理论指导; 发展完善不同尺度的计算流体力学、过程优化等模拟技术, 以解决化工过程提出的各种复杂问题。

(v) 催化材料与催化剂工程。以近代化学和物理为基础, 重点研究与过程工业及材料、能源、环境、食品、生物等领域密切联系的表面催化、分子催化、

表 5 化学工程学科未来主要发展方向汇总

项目	美国自然科学基金委员会	国家自然科学基金委员会	关键词汇聚	成果领域方向
主要 发展 方向	颗粒与多相过程	反应与分离工程	多相流动与反应	颗粒流体多相体系
	流体动力学	化工过程中的表(界)面	流动动力学	复杂化工系统
	界面过程与热力学	计算化学工程	计算流体力学	多尺度模拟
	环境工程	化工过程放大	颗粒、结晶、沉淀	化学反应工程和反应器
	热传输过程	化学产品工程	部分氧化/合成气	化工热力学状态方程
	化学与生物分离	多尺度复杂化工过程	状态方程	结构特征与反应性能
	工艺与反应工程	过程强化与非常规化工过程	热力学性质	离子液体构效关系
	催化与生物催化	生物与食品化工	吸附/吸收过程	化工过程强化
	生物技术	能源化工	膜分离	新型催化材料与催化剂
	生物化学与生物工程	材料化工	湍流流动与混合	新型高效分离过程
	燃烧、火焰与等离子系统	资源与环境化工	过程优化	新工艺
	纳米相关环境健康安全	过程系统工程与化工过程安全	反应蒸馏	新反应工程与装备
	能源可持续发展		微通道/微反应器	化学产品工程
	环境可持续发展			能源(石油)化工
	生物医学工程			
	生物化学与生物工程			

生物催化、催化剂制备科学与工程、催化反应工程、催化新材料、新型催化剂与新催化过程开发、环境催化、能源与资源转化过程中的催化、化学工业与石油炼制与石油化工催化等。

(2) 化学工程学科交叉前沿

化学工程学科作为一个工具性学科,在近代科学技术快速发展的需求下,与其他学科的交叉与融合势在必行,且日益扩大,由此产生了新的研究领域——学科前沿。具体包括:

(i) 多尺度复杂化工系统。重点研究多尺度复杂化工过程中结构稳定性的共性规律及其对流动、传递和反应的影响和调控机制,发展从分子层次到微元和微粒层次,再到反应器和系统层次的多尺度模拟与系统集成方法,建立跨尺度关联的工业应用软件,实现准实时的虚拟过程的物理模型和计算方法,促成过程设计与开发领域的创新,形成介尺度理论与方法。

(ii) 化学产品工程。重点研究分子结构-产品功能间关系,研究分子化学产品设计方法,研究分子自组装、分子反应合成、结构可控制备等过程技术,建立分子产品工程基础理论,为新化学产品、新材料、新能源产品的开发提供支撑。

(iii) 过程强化与非常规化工过程。重点研究高压高温、外场、新介质等非常规条件下分子混合、传递与反应规律及其调控机制,建立非常规化工过程强化理论与新方法,结合能源、资源、环境、材料化工需求,形成若干具有原创性的非常规化工过程强化新工艺与新技术。

(iv) 生物化工。生物化工的研究重点将在分子层次如新型高效生物催化剂酶的发现、改性、固定化新体系和新方法、模拟及其人工酶等方面,以及多酶复杂反应体系构建等;发酵过程的研究重点已由发酵条件优化转移到细胞代谢网络研究,包括代谢工程、具有一定功能的代谢网络的重构、合成生物学,以低值生物质和废弃生物质为原料,提高转化率,减少排放;生物转化过程优化包括耦合技术,如反应和分离耦合技术、生物复杂体系物质和能量耦合和过程集成、化学和生物过程的耦合、生物过程废渣和废水的资源化利用等。

(v) 计算化学工程。重点研究复杂化工体系的计算与模型化方法,在分子、纳/微尺度层次上进行纳米材料、大分子、生化体系、仿生材料等对象的量化

计算与分子模拟,实现分子设计、结构筛选与性能计算,为发现功能分子产品提供理论指导;发展完善不同尺度的计算流体力学、过程优化等模拟技术,以解决化工过程提出的各种复杂问题。

(3) 化学工程学科满足国家重大需求

化学工业是国民经济发展的主导,化学工程学科为国民经济发展做出了重大贡献。在人类社会可持续发展的背景下,化学工程学科的发展为满足国家重大需求提供了有力的支撑,形成了明确的研究领域。具体包括:

(i) 食品与医药化工。食品化工技术基础研究,包括食品功能性成分的分离纯化新技术,食品加工过程和预处理中的新化工单元技术;生物制药过程中的化工基础研究,药物剂型制备和可控释放中的化工基础等。共性研究重点在高效生物催化剂及其催化过程技术,细胞转化过程优化技术,生物过程废渣和废水的资源化利用等。

(ii) 能源化工。重点研究重油、天然气、煤高效清洁转化过程的新催化材料及其化学工程问题,煤高效清洁燃烧、生物质能高效转化的工程基础问题,氢能、太阳能新能源利用中的关键化学工程问题,从而提高传统能源转化效率、发展替代能源或新能源。

(iii) 材料化工。重点研究基于化工原理的新材料制备方法和新技术,研究材料结构控制、材料应用中的化学工程基础问题,以及材料服役中生命周期评价的化学工程基础等,依托新材料发展新的分离与反应过程,提高我国化工新材料技术水平,促进化学工程学科的发展。

(iv) 资源与环境化工。通过资源结构调整和化工过程技术的创新与改进,将理论、实验及计算相结合,研究资源转化和环境污染控制过程中所伴随的复杂的化学及物理变化的微观机理及宏观规律,通过分子调控和系统优化集成,发展资源与环境化工的科学理论基础,形成新一代资源高效转化和环境友好的新技术,实现资源利用与环境保护的协调发展。

(v) 过程系统工程与化工过程安全。重点研究基于机理与运行信息融合的系统建模、优化方法及性能调控,多功能复杂系统多目标多约束优化集成与控制策略和方法,化工过程本质安全/故障诊断与自愈调控的理论和方法等,建立过程系统工程与化工过程安全的基础理论和方法。

4 我国化学工程学科发展措施与建议

针对前面指出的化学工程学科发展存在的问题, 为进一步加快推动化学工程学科的发展, 具体提出如下措施与建议:

(1) 凝练学科理论体系、规划学科总体布局. 针对化学工程学科自身发展的特点, 强调“化学工程与技术”一级学科下 7 个二级学科的特点与定位, 推动学科协同创新, 明确目标, 科学管理与引导. 化学工艺、工业催化、应用化学、生物化工、材料化工、生态化工各二级学科要结合能源、资源、环境、材料等需求, 形成若干具有原创性的非常规化工过程强化新工艺与新技术. 为此, 在一级学科框架内, 按照重点研究领域和优先发展方向, 结合各二级学科的明确定位, 建立 4~5 个学科内涵相近、研究方向密切互为支撑的“学科协作组”, 着重于多学科交叉和学科内部科研热点的讨论与集成, 从而有效开展创新性工作.

(2) 完善学科评价体系. 兼顾定性评价与定量评价、学术评价和应用评价相结合. 定性评价着重同行权威对成果创新水平、实际影响和贡献的客观评价. 定量评价着重成果的量化产出. 其中学术评价沿用

目前对 SCI 论文数量和引用评价上, 特别是对论文的引用更能体现研究成果的影响力. 根据化学工程学科的国际主流期刊数量和论文数量不大、影响因子不高的特点, 应加强对“篇均引用次数”和“单位影响因子引用次数”的关注和采纳. 应用评价主要体现在研究成果及其研究人员的能力与水平、贡献与影响, 具体看专利的授权与实施, 成果的鉴定以及成果转化效果. 建议采取相应措施改变目前普遍对成果鉴定认可度不高的局面, 比如专家组成的权威性、鉴定程序的科学性等. 成果鉴定应重在评价认可成果在什么方面取得了创新, 在多大规模实现了产业化、对相关行业有多大份量的影响等.

(3) 设立“工程转化基金”, 加大学科投入力度, 鼓励基础研究成果的转化. 以基础研究为先导, 导向性基础研究为方向, 以成果转化为目标, 开展化工创新技术研究, 形成“基础研究—导向基础研究—应用基础研究—成果转化—应用技术”研究路线. 设立工程转化基金, 引导研究走向“基础研究—导向性基础研究—成果转化”这一完整的科研链条. 特别是对于无法进行投资大的中试及工业实验的科研单位, 工程转化基金尤为重要, 这对于建设创新型国家有重要意义.

致谢 感谢中国科学院学部学科发展战略研究合作项目“化学工程学科发展战略研究”和国家自然科学基金委员会的支持. 感谢中国科学院文献情报中心的冷伏海、朱相丽等辛勤检索工作. 感谢参与“化学工程学科发展战略研究”项目和讨论会议并提出宝贵意见的所有人员.

参考文献

- 1 Phillip CW. The history of chemical engineering pedagogy: the paradox of tradition and innovation. *AIChE Journal*, 2008, 208: 13
- 2 Davis GE. *Handbook of Chemical Engineering*. Manchester: Davis Brothers, 1901
- 3 Weber HC. The Improbable Achievement: Chemical Engineering at MIT. In: Furter WF, Ed. *History of Chemical Engineering*. Washington DC: American Chemical Society, 1980. 77–96
- 4 Westwater JW. The beginnings of chemical engineering education in the United States. In: Furter WF, Ed. *History of Chemical Engineering*. Washington DC: American Chemical Society, 1980, 140–152
- 5 Van Antwerpen FJ. The Origins of Chemical Engineering. In: Furter WF, Ed. *History of Chemical Engineering*, Washington DC: American Chemical Society, 1980. 1–14
- 6 Williams GC, Vivian JE. Pioneers in Chemical Engineering at MIT. In: Furter WF, Ed. *History of Chemical Engineering*, Washington DC: American Chemical Society, 1980. 113–128
- 7 Johnston BS, Meadowcroft TA, Franz AJ, Hatton TA. The MIT Practice School. *Chem Engr Educ*, 1994, 28: 38
- 8 Bird RB, Stewart E, Lightfoot EN. *Transport Phenomena*. New York: Wiley, 1960
- 9 Cussler EL, Wei J. Chemical Product Engineering. *AIChE J*, 2003, 49: 1072–1075
- 10 Cussler EL, Moggridge GD. *Chemical Product Design*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 11 郭慕孙, 李静海. 三传一反多尺度. 自然科学进展, 2000, 10: 1078

- 12 李静海. 浅谈 21 世纪的化学工程. 化工学报, 2008, 59: 1879–1883
- 13 Li JH, Kwauk M. Exploring complex systems in chemical engineering—the multi-scale methodology. *Chem Engin Sci*, 2003, 58: 521–535
- 14 Li J, Ge W, Wang W, Yang N. Focusing on the meso-scales of multi-scale phenomena—In search for a new paradigm in chemical engineering. *Particuology*, 2010, 8: 634–639
- 15 Li J, Ge W, Kwauk M. Meso-scale phenomena from compromise—A common challenge, not only for chemical engineering. arXiv preprint. arXiv: 0912. 5407, 2009
- 16 李勇武. 加快转变经济发展方式建设石油和化学工业强国. 中国科学院院刊, 2011, 26: 446–451
- 17 李寿生. 从石化大国向强国跨越的战略选择——中国石油和化学工业“十二五”发展研究. 中国石油和化工, 2012, 8–13
- 18 孙宏伟, 段雪. 化学工程学科前沿与展望. 北京: 科学出版社, 2012

Strategic studies and perspectives on chemical engineering in China

GAO JinSen¹, XU ChunMing^{1*}, HE Jing², DUAN Xue², HE MingYuan^{3,4}

1 State Key Laboratory of Heavy Oil, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Chemical Resource Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

3 Sinopec Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China

4 East China Normal University, Shanghai 200241, China

*Corresponding author (email: xcm@cup.edu.cn)

Abstract: Chemical Engineering applies the natural (or experimental) sciences (e. g. chemistry and physics) and life sciences (e.g. biology, microbiology and biochemistry) together with mathematics and economics to produce, transform, transport, and properly use chemicals, materials and energy. Chemical engineering passed two mile-stones of the unit operation and mass transfer, heat transfer, momentum transfer and chemical engineering reaction. Before and after the new century, chemical engineering entered a new stage, involving chemical product engineering, “three transfers and reactions plus X”, multi-scale theory and methods and meso-scale theory and methods. In the recent decade, chemical engineering in China has achieved great progress. Powerful research platform and strong research teams were constructed. The publications not only in quantity but in citation quality have been in the same position with the United States. Many scientific achievements and technologies contributed to the fast development of society and economy in China. Based on the analysis of key support areas of United States NSF between 2001–2011, key words index studies on the papers published in *AIChE Journal*, *Chemical Engineering Science*, *Industrial & Engineering Chemistry Research* in recent ten years, three main categories, the fundamental research, transdisciplinarity and the requirements for society and economy, totally fifteen research areas were figured out. Finally, three main suggestions for the development of chemical engineering were presented.

Keywords: chemical engineering, disciplinarity, research area, suggestions