

颗粒间的智慧：化学工程专家李洪钟院士的流态化人生

邹正^{1,2*}, 闫冬¹, 古爱学¹, 刘伟¹

1. 中国科学院 过程工程研究所 介科学与工程全国重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 李洪钟是我国著名化学工程学家, 流态化研究领域的学术带头人之一。他建立了非流态化气固两相流理论, 丰富了多相流学科的科学内涵, 有效解决粉体工业生产技术难题; 通过自研微观摄像机, 在国际上首次拍到快速流化床的颗粒聚团和稀密两相结构, 引起了学术界广泛关注; 提出了气固流态化散式化理论方法, 大幅提高了传统多相反应器的转化效率; 构建了气固流化床结构传递关系与反应行为的量化调控方法, 推进流态化工业开发与过程工程学科研究。文章从李洪钟求学经历、创新科研、工业开发和著书育人等方面揭示了他献身报国的科学家精神。

关键词: 李洪钟; 流化床; 气固两相流; 散式流态化; 结构传递理论

中图分类号: TF1; K826.1

文献标识码: A

文章编号: 1674-4969(2024)04-0451-11



李洪钟

李洪钟 1941 年生于山西省昔阳县, 中国科学院院士。1965 年获太原理工大学学士学位, 1981 年获中国科学技术大学硕士学位, 1986 年获中国科学院化工冶金研究所博士学位, 1986—1988 年在加拿大不列颠哥伦比亚大学进行博士后研究, 回国后一直在中国科学院化工冶金研究所工作 (现中国科学院过程工程研究所)。1986 年加入中国共

产党, 2005 年当选为中国科学院院士, 2019 年光荣退休。主要学术成就: 建立了非流态化气固两相流理论, 提出了气固流态化散式化理论, 构建了气固流化床结构传递关系与反应行为的量化调控方法, 推进了流态化技术在化工冶金工业中的多项产业化应用^[1]。先后获中国科学院自然科学奖一、二等奖各 1 项, 中国石油和化学工业联合会科技进步奖一等奖 3 项, 中国颗粒学会技术发明奖一等奖 1 项, 国家技术发明奖二等奖 1 项等。

本文致力于深入探究李洪钟的科研生涯, 通过

收稿日期: 2024-03-05; **修回日期:** 2024-03-28

基金项目: 中国科协“2022 年度老科学家学术成长资料采集工程”(20220504HT06140004)

作者简介: *邹正 (1983—), 男, 研究员, 研究方向为流态化技术和多相流反应工程。E-mail: zzou@ipe.ac.cn (通讯作者)

闫冬 (1992—), 男, 工程师, 研究方向为流态化技术和多相流反应工程。

古爱学 (1987—), 女, 高级工程师, 研究方向为科研管理。

刘伟 (1981—), 男, 六级职员, 研究方向为科学技术史。

引用格式: 邹正, 闫冬, 古爱学, 等. 颗粒间的智慧: 化学工程专家李洪钟院士的流态化人生[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2024, 16(4): 451-461. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240021

Zou Z, Yan D, Gu A X, et al. Li Hongzhong, a Chemical Engineering Expert, Leads a Fluidized Life that is Full of Wisdom Among Particles[J]. Journal of Engineering Studies, 2024, 16(4): 451-461. DOI: 10.3724/j.issn.1674-4969.20240021

搜集分析他的个人资料、发表的论文著作、亲友同事的访谈记录以及中国科学院过程工程研究所的相关档案,力求真实勾勒出李洪钟的科研追求和学术风采。文章旨在客观评价他在流态化技术研究中的杰出成就,全面反映其作为化学工程学家的成长历程,并倡导学习他崇高的爱国主义精神。

1 成长历程与发展求索

1.1 梦想的种子

1941年1月21日,李洪钟出生于山西省晋中市昔阳县巴洲村。这是一个风景秀丽、依山傍水的山村,三面被群山环绕,蜿蜒的巴洲河从村前潺潺流过,该地物华天宝,人杰地灵,民风淳朴。当时因日本帝国主义的入侵,昔阳县以平辽公路为界被分为昔(阳)东县和昔(阳)西县两部分,巴洲村属于昔(阳)西县。由于毗邻县城,日伪军经常来村里“扫荡”,烧杀抢掠、无恶不作,当时的巴洲村一片残垣断壁,满目疮痍。

中国共产党在昔(阳)西县建立了抗日民主政府,领导该县人民抗击日本侵略者。昔(阳)西县是日军的“强化治安试验县”,敌人十分凶狠残暴,抗日斗争异常激烈。当时李洪钟的父亲李经绪担任该县抗日民主政府秘书一职,在党的领导下,他秘密组织和发动群众,与日伪军进行着艰苦卓绝的斗争。

1945年8月抗日战争胜利后,李经绪奉调到冀南银行工作,1947年重返昔阳县担任小学教师。这一年,昔阳县开展土地改革,他编写了许多快板和顺口溜,热情讴歌共产党的丰功伟绩,鼓励年轻人参军参战支援全国的解放事业。李经绪亲自教授幼的李洪钟这些快板和顺口溜,并让儿子上街演唱宣传,这在李洪钟幼小的心灵中埋下了“没有共产党就没有新中国”的红色种子。图1为2012年李洪钟回故乡在祖屋前的留影。

1.2 求知的岁月

李洪钟的母亲商维元是一位心灵手巧、勤劳节俭的家庭妇女,受丈夫的影响,十分尊重敬佩见多识广的读书人,心里深知学习文化知识的重要性。新中国成立前,家里生活非常拮据,她便节衣缩食、含辛茹苦地供养家中的5个孩子上学。1951年,李经绪调往



图1 2012年李洪钟回故乡在祖屋前留影

Figure 1 Li Hongzhong returned to his hometown and took a photo in front of his ancestral house in 2012

山西日报社编辑部工作,李洪钟随父来到太原市,就读于该市第十五完全小学。1954年,李洪钟以优异的成绩考入太原市第五中学校,这里各科教师都很优秀,授课生动而富有启发性,使他对自然科学萌生了浓厚的兴趣。李洪钟如饥似渴地汲取着丰富的知识营养,这为今后的科研工作奠定了坚实而稳定的基础。

1960年,李洪钟考入太原工学院工程数理力学系高分子化学专业,后经学院调整专业设置,转为太原工学院化工系基本有机合成专业。李洪钟在这里奋进苦读,各科学学习成绩一直保持优秀,并且热心集体事业,诚心诚意为同学服务,受到老师与同学们的一致好评。1965年,李洪钟大学毕业,他的毕业论文课题是《流化床挡板效应的研究》。由于在中国科学院山西煤炭化学研究所毕业实习时显露出扎实的学术知识和出众的创新思维,李洪钟被该所择优录用,从此走上了自己钟爱的科学研究道路。

1978年,我国恢复了研究生招生考试,时年已37岁的李洪钟在父母和爱人的支持与鼓励下,积极备考,被中国科学技术大学北京研究生院录取,师从我国流态化学科的奠基者、时任中国科学院化工冶金研究所所长郭慕孙先生。在名师的指导下,1981年6月,李洪钟的硕士论文《锥形移动床溢流管的研究及其流体动力学分析》通过答辩,获得中国科学技术大学研究生院硕士学位。1985年9月,他的博士论文《垂直气力移动床输送》通过答辩,1986年获得中国科学院化工冶金研究所工学博士学位,同年加入中国共产党。1989年和1991年,李洪钟的博士和硕士论文内容先后发表在国际著名化学工程期刊上。这些经

历使李洪钟独立从事研究工作的能力明显提升, 更重要的是, 经过导师多年的言传身教, 他领会到了一位合格的科研工作者所须具备的基本素质: 第一, 应具有严谨认真、精益求精的科学态度; 第二, 应具有追求创新、不断进取的科学精神。

1986年11月, 李洪钟作为中国科学院自费公派出国留学人员, 到加拿大不列颠哥伦比亚大学做博士后工作, 合作教授为国际流态化成就奖获得者、加拿大工程院院士 J. R. Grace 先生, 课题领域包括“多种燃料在中试规模循环流化床中的燃烧特性”“超细颗粒在循环流化床中的流动特性”和“循环流化床燃烧尾气中 CO 的流化床催化氧化净化”等, 这在当时均属该学科的国际前沿领域。

李洪钟在两年留学期间开阔了视野, 但我国和发达国家之间的明显科研差距也成为他心中的痛楚, 也成为鞭策他奋起直追的不竭动力。让自己所研究的学科抢占世界科学前沿阵地, 早出成果、快出成果, 并尽快转化为生产力, 是李洪钟孜孜以求的梦想。他在国外结识了许多科学界的朋友, 对于后期交流科研信息、探讨研究难题多有裨益。图2为1981年李洪钟与郭慕孙先生一同参加硕士毕业典礼。



图2 1981年李洪钟(右二)与郭慕孙先生(右一)一同参加硕士毕业典礼

Figure 2 Li Hongzhong (second from the right) attended the Master's graduation ceremony with Mr. Kwauk Moosoon (first from the right) in 1981

1.3 科研报国情

1965—1978年, 李洪钟在煤化所工作期间, 参加了全国顺丁橡胶攻关项目会战, 具体从事丁烯氧化脱氢制丁二烯反应器的开发, 主要研究内容是挡板流化床反应器, 包括反应与再生合一的单流化床反应器和反应与再生分开的双流化床反应器^[2]。当初李洪钟

作为一名初出茅庐的科研新兵, 参与了这一重大科研项目从实验室小试、中试到工业放大的全过程, 不仅增长了见识、得到了锻炼, 更重要的是认识到了科学研究对于建设社会主义现代化国家的重要性与紧迫性, 并愿意将自己的一生献给这项事业。1985年, 与顺丁橡胶项目相关的“顺丁橡胶工业生产新技术”荣获国家首届科学技术进步特等奖。期间, 李洪钟还坚持对科学知识和科研业务的学习, 尽可能挤出时间到图书馆翻阅专业书籍和阅读学术期刊, 不断更新自己的知识储备, 掌握世界相关科学研究的最新动态。他同时还进行着“砂子循环流化床原油热裂解制烯烃工艺研究”、“异丁烯和甲醛催化缩合一步法合成异戊二烯循环流化床反应器研究”和“C4氧化制顺丁烯二酸酐催化剂及流化床反应器研究”等前沿课题攻关。

李洪钟在1988年底留学回国后, 于1989年被聘为化工冶金所副研究员。同年, 李洪钟关于循环流化床燃烧的论文在美国召开的第十届国际流化床燃烧会议上发表, 获大会最佳论文奖。1992年, 他被聘为化工冶金所研究员、博士生导师。后李洪钟相继承担了国家自然科学基金“七五”重大项目“传质分离与化学反应工程中若干重要课题的基础研究”、“八五”重大项目“临界流态化输送技术及气控气球式高压加料器”、“九五”重点项目“气固流态化的非线性问题和放大技术”、国家自然科学基金项目“超细颗粒快速循环流化床研究”、中国科学院多相反应重点实验室基金项目“气固流态化的散式化”和“超细颗粒的聚团流态化”、“十二五”国家科技支撑计划项目“10万吨/年难选铁矿流态化磁化焙烧示范工程”、国家重点基础研究发展(973)计划“反应器内反应本征过程和传递的匹配及放大规律”和“流化床反应器结构—传递关系理论及节能新工艺”等重要项目课题。

李洪钟说: “作为一名新中国培养出来的科技工作者, 用自己的知识报效祖国是我义不容辞的义务和责任”。

2 理论突破与关键创新

2.1 建立了非流态化气固两相流理论, 丰富了多相流学科的科学内涵, 有效解决粉体工业生产技术难题

工业移动床气固两相流装置中普遍存在串气、架拱、气压与固体流率波动等不连续、不稳定现象, 这

造成设备操作困难, 甚至酿成事故。由于缺乏正确的理论指导, 该类问题长期以来都难以准确预测并得到有效解决。

李洪钟根据移动床中气固相互作用的特点, 提出颗粒群体内的气固间曳力与重力相似而具有体积力特性, 所以散料力学同样适用于气固移动床的论点。之后, 李洪钟将散料力学与多相流基本原理相融合, 建立了移动床气固两相流理论, 并绘制出垂直气固移动床流动相图^[3-5]。根据该理论, 李洪钟进一步提出了垂直与倾斜移动床气固流动模型、架拱与孔口落料的理论预测模型、V型与L型料阀动力学模型, 并均得到实验验证^[6-14]。李洪钟提出的非流态化气固两相流理论可用于定量预测和调控气固移动床的运行现象和操作状态, 从而使该领域的研究由传统经验、半经验阶段上升为理论阶段^[15,16]。李洪钟同时与郭慕孙等共同发明了临界流态化输送、V型/圆周锥型排料阀、移动床输送床顶约束与分离装置、抗压稳流加料器、气控气球式高压连续加料器等多项与移动床相关的专利技术^[17-19]。

李洪钟提出的移动床气固两相流理论和发明专利技术不仅丰富了多相流学科的科学内涵, 并且指导了解决实际生产中的关键技术难题, 产生了显著的经济与社会效益, 受到了国内外学术和工业界的关注和好评^[20, 21]。例如, 移动床相图和料封理论已应用于工业循环床料腿料封的设计与计算: V型排料阀不仅成功应用于国内工业循环流化床锅炉的开发, 而且已被韩国、加拿大和澳大利亚等国家选用, 被国外专家誉为“循环输送固体颗粒到加压反应器底部的极好设备”; 提出的L型排料阀动力学模型被国外专家认为“这是迄今为止预测L型阀固体流率的最好方法”。图3为李洪钟在临界移动床输送成果鉴定会现场讲解。

2.2 提出了气固流态化散式化理论, 大幅提高传统多相反应器的转化效率

传统气固流化床中存在着大量的气泡和颗粒聚团现象, 大大降低了气固接触效率与传热传质及化学反应速率, 从而降低了流化床反应器的生产能力^[22]。为减小和抑制气固流化床尤其是纳微颗粒流态化过程中的气泡和聚团现象, 实现气固均匀分布的散式流态化, 提高传热、传质和化学反应速率, 李洪钟对该类气

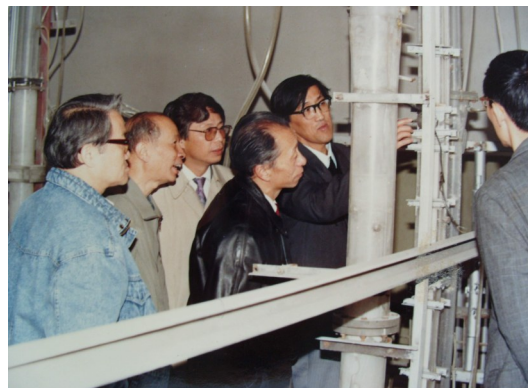


图3 1995年李洪钟(左5)在临界移动床输送成果鉴定会现场讲解

Figure 3 Li Hongzhong (fifth from the left) explained at the research appraisal meeting of the critical moving bed conveyance in 1995

泡和聚团的形成与调控机制进行了深入而系统的研究。

李洪钟领导科研人员用自制的微观摄像探头, 首次在快速床中捕捉到瞬态聚团与非均匀稀密两相结构的真实照片, 证实了颗粒聚团的存在, 从而有效消除了国际上关于快速床内部是否存在聚团的学术疑惑, 引起同行的广泛关注^[23]。相关论文被国内外学者引用达百余次, 例如他人引用称: “快速床中具有广泛尺寸分布的聚团物首先于1991年由李洪钟等采用微观摄像技术观察到, 随后于1994年由Horio等采用颗粒成像技术观察到, 并由Jiang(1994年)和Soong等(1995年)采用局部颗粒浓度分析法予以识别”; 又称: “Yerushlmi, Grace和Kwauk等推断快速床中颗粒有集聚行为, 虽然这种假说也曾受到怀疑, 但李洪钟等利用微观图像摄影系统, 实拍到快速流化床内的颗粒团聚物(cluster), 证实床中确实存在团聚物和分散体两相微观结构。”此后许多研究者先后根据李洪钟等的上述发现建立了各自描述快速床两相结构的数学模型^[24]。

随后, 李洪钟继续带领科研团队在深入分析气固流化床, 尤其是纳微颗粒流化产生气泡和聚团内外因形成机制的基础上, 系统地提出并建立了散式流态化的理论与方法, 即通过颗粒与添加组分设计、流体设计、外力场设计、床型及内构件设计等显著抑制气泡和聚团的形成, 并对气泡与聚团的尺寸进行有效的调控, 从而实现了气固均匀分布, 使原本不均匀流态化转化为均匀流态化^[25-27]。在研究过程中还提出了一系

列评价流化质量的指标与方法。

该部分工作具有十分重要的理论意义与应用价值。在理论方面, 研究非均匀(气固)与均匀(液固)两类流化体系间的彼此联系与相互转化条件, 使之形成统一的体系, 这将进一步完善两相流基本理论。在应用方面, 使原本非均匀的流化状态转化为均匀状态, 从而提高流化质量和设备效能, 推动资源高效利用和反应器合理设计。相关论文受到国内外学术界广泛好评, 并被多次引用。例如, 有研究者根据该工作关于在快速床中加入环形内构件可促进气固均匀分布、增强气固接触、减少返混的结果, 在其快速床中加入内构件, 以提高脱硫效率^[28]。有论文引用该工作关于纳微颗粒聚团流态化特征的研究结果, 借鉴其中采用高气速循环流化床及添加颗粒实现均匀流态化的方法, 进行以超细石灰粉为脱硫剂的煤快速流态化燃烧研究^[29]。有报导采用该工作提出的聚团密度模型预测聚团密度, 进而实现对系统模型的计算验证^[30]。有人在研究流化催化裂化装置的催化剂磨损带出损失时, 引用了该工作关于“由于细颗粒会聚集成团, 不易被气流带出而损失”的结论^[31]。有论文在研究纳米颗粒振动流态化时, 应用了该工作提出的聚团尺寸预测模型, 并引用了关于“高气速有利于破碎聚团”的结论^[32]。有的综述性文章还详细介绍了该工作关于恒定与旋转磁场流态化的实验结果, 认为“思想新颖, 是引人注目的发展趋势”^[33]。图4为1999年李洪钟主持的《气固流态化的散式化理论与方法》项目获中国科学院自然科学奖一等奖。



图4 1999年李洪钟主持的《气固流态化的散式化理论与方法》项目获中国科学院自然科学奖一等奖

Figure 4 In 1999, the project "Particulation Theory and Method of Gas-solid Fluidization" conducted by Li Hongzhong won the First Prize in Natural Sciences from the Chinese Academy of Sciences

2.3 构建了气固流化床结构传递关系与反应行为的量化调控方法, 推进流态化工业开发与过程工程学科研究

李洪钟一直特别关注过程工程新理论和新方法的研究^[34]。他认为目前化学工程的研究领域和服务范畴已不限于化学工业, 而进一步扩展到冶金、能源、材料、环境和生物等诸多物质与能量转化的过程工业^[35-36]。化学工程学有可能在“三传一反”理论上发展新的科学内涵而转变为过程工程学。结构、界面、多尺度问题, 系统优化集成和物质循环利用等将成为过程工程新的科学课题^[37-38]。他倡导理论、实验和计算机模拟三者并重的研究方法, 并相继提出鼓泡床、湍动床和快速床局部结构的预测模型, 以及局部结构与“三传一反”的关系理论, 并经试验验证, 力图取代传统化学工程中忽视不均匀结构的平均化方法, 以实现化工过程的优化调控和模拟放大^[39]。

流化床中存在着气泡、液滴和颗粒聚团等特征结构, 其尺寸不等、分布不均、运动速度和方向各异, 呈现出复杂的非线性非均匀内部结构, 然而以往的研究却将其简单拟均匀化, 造成计算机模拟结果和实验数据间的较大偏差, 以致目前该类反应器的开发设计很难应用于相关基础科学的新发现和新应用, 并成为实际工业生产过程物耗/能耗高、副产物多和产品质量低的关键原因。针对这一问题, 李洪钟对流化床内的非均匀结构给予充分重视, 首先研究各类床型流态化的结构特征及形成机理, 根据动量、质量和能量守恒原理和经典流态化理论, 建立非均匀结构的预测模型; 然后研究该种非均匀结构对“三传一反”(指动量、质量和热量传递与化学反应)的影响规律, 借助将复杂问题解析再综合的方法, 将复杂非均匀结构分解为若干简单均相结构; 最终将已知各均相的“三传一反”行为加以综合, 得出非均匀结构与“三传一反”的定量关系模型^[40]。他始终倡导理论、实验和计算机模拟三者并重的研究方法, 将上述非均匀结构模型取代以往拟均匀化模型, 并耦合CFD(计算流体力学)双流体计算方法, 分别对快速床、鼓泡床、湍动床和下行床中的流动、传质和化学反应行为进行计算, 后将模拟结果与文献中的相关实验数据对比, 用来检验和修正非均匀结构与“三传一反”的定量关系模型。经过不断的优化使其达到实用的目标, 并成功应用于多项流态化工业装置的开发放

大^[41]。图5为2010年李洪钟主编的《过程工程——物质·能源·智慧》一书出版。

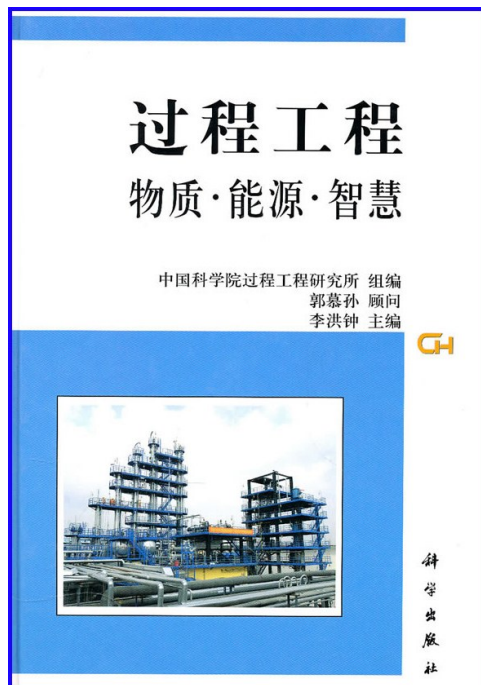


图5 2010年李洪钟主编的《过程工程——物质·能源·智慧》一书出版

Figure 5 The book "Process Engineering: Matter, Energy and Wisdom" edited by Li Hongzhong was published in 2010

3 工程理论至实践的桥梁

李洪钟非常重视科研成果的工业应用, 长期以来, 他始终致力于流态化技术的工程开发, 其身影一直活跃于祖国大江南北的项目建设现场一线。

2005年, 李洪钟采用高气速与内构件强化技术, 在上海焦化厂设计建造了新型超细颗粒流化床工业中试装置, 实现了超细炭黑的臭氧氧化表面改性, 用于生产高品质特种炭黑材料; 2007年, 与云南曲靖越钢集团合作, 他指导课题组设计建设了10万吨级快速鼓泡复合床低品位难选铁矿磁化焙烧生产线, 2008年完成了该系统的调试运行, 铁回收率达到93%~95% (质量), 单位原矿焙烧能耗较传统技术下降30%以上; 2008年, 与攀枝花钢铁集团开展万吨级攀西钛铁矿制备人造金红石技术中试示范工程项目, 2011年实现连续稳定运行, 解决了钛铁矿经酸浸除

钙镁杂质过程的粉化难题, 为氯化法制钛白提供了合格原料; 2009年, 在国家攻关计划、973项目和攀钢集团的共同支持下, 建成了年处理1.2万吨钛精矿流态化氧化-还原焙烧工业示范线, 2012年该生产线实现连续稳定运行, 各项经济技术指标良好, 后被鉴定为“达到国际先进水平”; 2014年, 与云南锰业集团公司合作启动20万t/a软锰矿低温高效流态化还原技术示范工程开发, 2015年完成全系统热态连续调试并正式投产运行, 为我国大量软锰矿资源的有效利用开辟了新途径, 同时解决了国内电解锰行业传统碳酸锰原料短缺的局面; 2017年, 与中铝山东分公司合作400 t/d氢氧化铝煅烧技术研发项目, 2018年正式投入生产运行, 设备运转良好, 工艺技术可靠, 解决了传统煅烧技术无法准确调控产品 α - Al_2O_3 含量的行业共性难题, 生产能耗也较传统技术降低约15%~20%; 2022年, 与云天化环保科技有限公司合作开展磷石膏资源化处理技术攻关, 通过形成磷石膏多功能柔性煅烧集成新工艺, 开发建设了45万t/a磷石膏流态化煅烧示范线, 实现单套系统可柔性生产II型无水石膏和 β -半水两类石膏再值化产品, 且较国内常规工艺能耗下降约5%, 有效缓解我国巨量磷石膏堆存所带来的安全和环保压力^[42]。

“老骥伏枥, 志在千里”。尽管年逾古稀, 李洪钟仍多次到攀枝花钢铁集团、唐山钢铁集团、国网新余电力等单位指导企业解决实际生产难点, 随院士考察团深入河北唐山、山东淄川、新疆石河子、安徽铜陵、山西晋中、黑龙江哈尔滨等为地方发展出谋划策, 并多次应邀到高等院校、科研院所作学术报告, 以其前瞻性和开放性视野, 讲授传播流态化领域的创新理论与先进技术。图6为2010年李洪钟在新疆石河子考察流化床氯乙烯生产线运行参数。

4 教育传承与智慧启迪

李洪钟为人正直、生活简朴、平易近人、师德高尚。他的贡献不仅限于科学研究和著书立说, 在教书育人方面同样成绩斐然。作为传道授的教师, 李洪钟从不吝惜将自己辛苦探索总结的成果传授给后辈。每次当有学生到他办公室请教问题时, 他常会从书柜中翻出自己早年的工作笔记, 借助相关手稿为大家答疑



图6 2010年李洪钟在新疆石河子考察流化床氯乙烯生产线运行参数(左起:魏飞、李洪钟和卢春喜教授)

Figure 6 Li Hongzhong inspected the operating parameters of the vinyl chloride production line in Shihezi, Xinjiang province in 2010 (from left to right: Profs. Wei Fei, Li Hongzhong and Lu Chunxi)

解惑。在李洪钟的指导下,课题组积极有序地开展相关科研创新工作,取得一项又一项科研硕果。作为一名知名化工冶金专家,李洪钟从不强求学生毕业后从事相关行业,而是始终强调他们要树立“服务社会,报效祖国”的理想信念。

李洪钟十分重视对青年人的培养。作为博士生导师,这些年来他共培养博士后4名,研究生34名(其中博士生已毕业21名,在学1名,出国留学2名,硕士生已毕业10名)。在已毕业的21位博士生中,1人获国家自然科学基金委员会杰出青年基金,1人入选中组部青年千人计划,2人获中国科学院自然科学奖一等奖,1人获中国科学院自然科学奖二等奖,4人获中国科学院院长奖学金优秀奖,2人获宝钢优秀学生奖,1人获刘永龄优秀学生奖,8人获所长奖学金一等奖,3人获中国科学院化工冶金研究所最佳论文奖。李洪钟还被连续评为研究所1999—2001年度优秀研究生指导教师。

李洪钟对自己子女的教育同样是成功的。他育有两女一子,长女李清从北京信息工程大学计算机专业毕业后赴美留学,获美国新泽西理工学院计算机专业硕士学位。二女李洁从首都医科大学毕业后赴美留学,获美国纽约大学计算机硕士学位。儿子李琛,15岁考入中国科学技术大学少年班选学计算机专业,1995年毕业后赴美留学,2000年获美国纽约大学计算机专业博士学位。

李洪钟在科研上是学界大师,在生活中更是良师益友。曾经有个学生毕业后要出国留学,但资金困

难,得知消息后他毫不犹豫地主动资助了该生5000元钱,还多次询问刚入组的其他学生是否需要帮助。今年,李洪钟已83岁高龄,过程工程研究所医务室定期为他准备不少降压和止痛药,但他却从未将病痛表现在脸上,依然不辞辛劳为学生们认真修改论文,经常关注最新的科研动态和进展、关心研究所的发展建设。

5 学术荣誉与社会成就

李洪钟的人生道路,正可谓:低调做人、勤恳做事,活到老、学到老。他凡事先国后家无私无畏,为人智慧豁达有情有义,在科学研究和高等教育领域均取得不凡成就。

李洪钟凭借自身的真才实学,赢得了学术界的一致认可,可谓实至名归。1992年,享受国务院政府津贴;1994年,“运动颗粒图像分析装置的研制及应用”获评国家科技成果鉴定;1996年,“临界流态化输送技术及气控气球式高压加料器”获中国“八五”科学技术成果;1997年,“移动床气固两相流理论及应用”获中国科学院自然科学奖二等奖;1999年,“气固流态化的散式化理论与方法”获中国科学院自然科学奖一等奖;2009年,“彩色激光打印粉系列产品的大规模生产关键技术及集成”获中国石油与化学工业协会科技进步奖一等奖;2010年,《流态化手册》获第二届中国出版政府奖图书奖;2012年,“细粉流态化过程强化理论与方法”获中国石油与化学工业联合会科技进步奖一等奖;2016年,个人获中国颗粒学会特殊贡献奖;2018年,“流态化矿物焙烧关键技术及应用”获中国颗粒学会技术发明奖一等奖;2019年,“粘性粉体流态化过程强化与放大技术”获国家技术发明二等奖;2021年,《气固流化床颗粒停留时间调控理论及应用》获中国石油和化学工业优秀出版物图书类二等奖。

李洪钟于1990—1997年任中国科学院多相反应重点实验室副主任,1995—1999年任中国科学院化工冶金研究所学位委员会副主任,1995—2000年任中国科学院化工冶金研究所副所长和党委代理书记、党委书记,1997—2006年任中国科学院多相反应重点实验室学术委员会副主任,1999—2003年任中国科学院过程工程研究所(原化工冶金研究所)学术委

委员会主任, 2003—2007 年任中国科学院过程工程研究所工程技术委员会主任, 2006 年至今任多相复杂系统国家重点实验室学术委员会副主任, 2008—2021 年任中国科学院过程工程研究所学术委员会主任。

李洪钟的社会工作也很繁多。在各种社会成就中, 他曾任国家自然科学基金委员会专家评审组成员, 国家杰出青年科学基金评审委员会委员, 国家科学技术奖评审专家, 英国皇家化学会会士, 中国颗粒学会副理事长、对外工作委员会主任, 中国化工学会常务理事、流态化专业委员会主任, 中国力学学会多相流专业组成员。此外, 他还担任《中国粉体技术》期刊编委会主任, 《化工冶金》期刊第五、六届副主编, 《计算机与应用化学》《工程研究——跨学科视野中的工程》《燃料化学学报》和《基础研究》等期刊编委。

李洪钟常常用“盛名之下, 其实难副”来提醒和激励自己要始终不忘初心、脚踏实地, 在科研岗位上为祖国繁荣富强作出应有的贡献。

6 典范论著影响深远

李洪钟在国内外学术期刊和会议上先后发表论文 350 余篇, 出版中英文专著 6 部和 4 章, 获得授权发明专利 60 余项。以下为其部分代表著作, 这些论著是李洪钟多年科学研究和工业实践的结晶, 以其跨学科的视角和创新性的方法, 为流态化领域的研究发展提出了一系列开创性的理论成果, 在学术界内外产生了深远的影响。

Li H Z, Kwauk M. Vertical pneumatic moving-bed transport—I. Analysis of flow dynamics[J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44(2): 249-259.

Li H Z. The fluid-particle flow phase diagram and the ideal sealing state for a vertical moving bed[J]. Powder Technology, 1991, 67(1): 37-42.

Li H Z, Xia Y S, Tung Y, et al. Micro-visualization of clusters in a fast fluidized bed[J]. Powder Technology, 1991, 66(3): 231-235.

Li H Z. The dynamics of non-fluidized gas-particle flow [J]. Powder Technology, 1992, 73(2): 147-156.

李洪钟, 郭慕孙. 非流态化气固两相流: 理论及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.

李洪钟, 郭慕孙. 气固流态化的散式化[M]. 北京: 化学

工业出版社, 2002.

Li H Z, Lu X S, Kwauk M. Particulation of gas - solids fluidization[J]. Powder Technology, 2003, 137 (1/2): 54-62.

郭慕孙, 李洪钟. 流态化手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

李洪钟. 过程工程: 物质·能源·智慧[M]. 北京: 科学出版社, 2010.

Li H Z. Important relationship between meso-scale structure and transfer coefficients in fluidized beds[J]. Particology, 2010, 8(6): 631-633.

李洪钟, 郭慕孙. 回眸与展望流态化科学与技术[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 52-62.

李洪钟. 流化床结构传递理论与工业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.

朱庆山, 李洪钟, 邹正. 气固流化床颗粒停留时间调控理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.

7 科学家精神励志共勉

李洪钟作为中国化学工程领域的杰出代表, 在他身上充分体现了中国优秀知识分子的高尚品格, 充分诠释了科学家精神的丰富内涵。李洪钟始终牢记是党和人民培养了自己, 应该为祖国、为人民努力工作, 争取为祖国多作贡献, 报答党和人民的教育培养。他常说: 科学无国界, 科学家有祖国, 做一个爱祖国、爱人民、爱科学, 对祖国富强和人类文明有所贡献的中国人。图7为2006年李洪钟自勉手稿。

以此作为文章结尾, 与读者共勉。

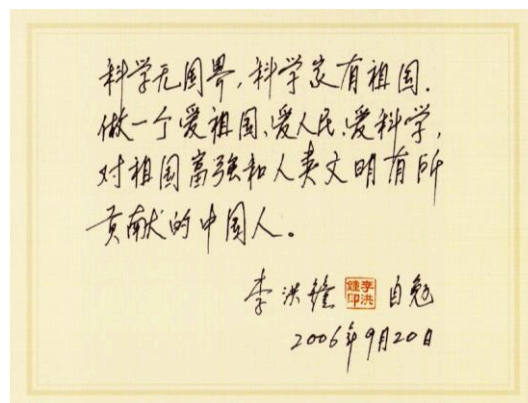


图7 2006年李洪钟自勉手稿

Figure 7 Li Hongzhong's self-encouragement manuscript in 2006

致谢

谨以此文致敬李洪钟等老一辈科学家!

同时感谢过程工程研究所党委书记朱庆山研究员对采集工作的指导支持, 感谢宋宝珍、巴敬莉、王启梅等退休同志的热心帮助, 感谢李洪钟的儿女、同事和学生提供的珍贵访谈实录, 感谢北京科技大学王传超老师以及过程所王雪、汤瑞祥、路帅、薛雪等老师同学在档案收集与资料编写等方面的真诚协助!

参考文献

- [1] 郭慕孙, 李洪钟. 流态化手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
Kwauk M, Li H Z. Handbook of Fluidization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [2] 李洪钟. 忆顺丁橡胶科研攻关会战的火红年代[J]. 化工学报, 2019, 70(10): 3629-3632.
Li H Z. Recollection of fiery age of research and development for butadiene rubber[J]. CIESC Journal, 2019, 70(10): 3629-3632.
- [3] 李洪钟. 立管移动床气固流动相图及理想料封状态[J]. 化学工程, 1989, 17(5): 28-34, 4.
Li H Z. Gas-particle flow phase-diagram and the ideal sealing state for vertical moving bed[J]. Chemical Engineering (China), 1989, 17(5): 28-34, 4.
- [4] 李洪钟. 非流态化流体—颗粒流[J]. 高校化学工程学报, 1990, 4(4): 321-334.
Li H Z. Non-fluidized fluid-particle flow[J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 1990, 4(4): 321-334.
- [5] Li H Z. The fluid—particle flow phase diagram and the ideal sealing state for a vertical moving bed[J]. Powder Technology, 1991, 67(1): 37-42.
- [6] 李洪钟, J.R.Grace. 气凝胶粉在V型阀循环流化床中的流动行为[J]. 化工冶金, 1990(1): 1-6.
Li H Z, Grace J R. Hydrodynamic behaviour of pure aerogel in a CFb with V-valve unit[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 1990(1): 1-6.
- [7] 李洪钟, 杨守朴, 束善根, 等. 倾斜压差移动床中的气固流动[J]. 化学工程, 1991, 19(6): 49-55, 73-5.
Li H Z, Yang S P, Shu S G, et al. Gas-solid flow in a slant moving bed with gas pressure difference[J]. Chemical Engineering (China), 1991, 19(6): 49-55, 73-5.
- [8] 李洪钟, 柳华, 孙敦明. 被动应力状态下非流态化颗粒流通过孔口的流率[J]. 化工学报, 1993, 44(6): 708-711.
Li H Z, Liu H, Sun D M. Nonfluidized particle flow rate through an orifice under passive stress state[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 1993, 44(6): 708-711.
- [9] Li H Z, Kwauk M. Vertical pneumatic moving-bed transport—I. Analysis of flow dynamics[J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44(2): 249-259.
- [10] Li H Z, Kwauk M. Vertical pneumatic moving-bed transport—II. Experimental findings[J]. Chemical Engineering Science, 1989, 44(2): 261-271.
- [11] Li H Z. Mechanics of arching in a moving-bed standpipe with interstitial gas flow[J]. Powder Technology, 1994, 78(2): 179-187.
- [12] 李洪钟. 立管移动床中架拱现象的力学分析[J]. 化工冶金, 1993(4): 327-337.
Li H Z. Mechanics of arching in a moving-bed standpipe with interstitial gas flow[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 1993(4): 327-337.
- [13] 李洪钟. 锥形移动床溢流管的研究及其流体动力学分析[J]. 应用化学, 1983(0): 120-121.
Li H Z. Study on overflow pipe of conical moving bed and its hydrodynamic analysis[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 1983(0): 120-121.
- [14] 李洪钟. 垂直气力稀相输送压降计算中几个问题的讨论[J]. 化学工程, 1983, 11(1): 90-97.
Li H Z. Discussion on several problems in pressure drop calculation of vertical pneumatic dilute phase transportation[J]. Chemical Engineering (China), 1983, 11(1): 90-97.
- [15] Li H Z. Theory of nonfluidized gas solids flow and its application[J]. China Particuology, 2005, 3(1-2): 27-39.
- [16] Li H Z. The dynamics of non-fluidized gas-particle flow[J]. Powder Technology, 1992, 73(2): 147-156.
- [17] 李洪钟, 郭慕孙. 气力临界流态化输送装置: CN2132724Y[P]. 1993-05-12.
Li H G, Kwauk M. Carry device for pneumatic critical fluidization: CN2132724Y[P]. 1993-05-12.
- [18] 刘得金, 李洪钟, 郭慕孙. 气控式圆周形锥阀流态化下料腿: CN2082263U[P]. 1991-08-07.
Liu D J, Li H Z, Kwauk M. Air-controlling type fluid conic taphole: CN2082263U[P]. 1991-08-07.
- [19] 李洪钟, 郭慕孙. 气控气球式高压粒料连续加料器: CN2101033U[P]. 1992-04-08.
Li H Z, Kwauk M. Pneumatic balloon type high pressure granular material continuous feeder: CN2101033U[P]. 1992-04-08.

- [20] 李洪钟, 郭慕孙. 非流态化气固两相流: 理论及应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
Li H Z, Kwauk M. Non-Fluidized Gas-Solid Two-Phase Flow: Theory and Applications[M]. Beijing: Peking University Press, 2002.
- [21] 李洪钟, 郭慕孙. 两相流中固体散料对器壁压力的测量[J]. 化工冶金, 1990(2): 109-113.
Li H Z, Kwauk M. Measurement of pressure exerted on the wall by particles in a two-phase flow[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 1990(2): 109-113.
- [22] 李洪钟, 李静海, 郭慕孙. 颗粒多相反应[J]. 中国科学院院刊, 1991, 6(4): 292-296.
Li H Z, Li J H, Kwauk M. Particle heterogeneous reaction[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 1991, 6(4): 292-296.
- [23] 李洪钟, 夏亚沈, 董元吉, 等. 快速流化床中两相结构的微观显示[J]. 化工冶金, 1990(1): 68-73.
Li H Z, Xia Y S, Dong Y J, et al. Micro-visualization of two-phase structure in a fast fluidized bed by micrograph transducer[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 1990(1): 68-73.
- [24] Li H Z, Xia Y S, Tung Y, et al. Micro-visualization of clusters in a fast fluidized bed[J]. Powder Technology, 1991, 66(3): 231-235.
- [25] Li H Z, Lu X S, Kwauk M. Particulation of gas - solids fluidization[J]. Powder Technology, 2003, 137(1-2): 54-62.
- [26] Li H Z, Tong H. Multi-scale fluidization of ultrafine powders in a fast-bed-riser/conical-dipleg CFB loop[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(8-9): 1897-1904.
- [27] 李洪钟, 郭慕孙. 气固流态化的散式化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
Li H Z, Kwauk M. Particulation of Gas-Solids Fluidization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [28] Hu J H, He S L, Zhao J Z, et al. Modeling of sulfur plugging in a sour gas reservoir[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2013, 11: 18-22.
- [29] Wang Y H, Gui K T, Shi M H, et al. Removal of dust from flue gas in magnetically stabilized fluidized bed[J]. Particuology, 2008, 6(2): 116-119.
- [30] Yu H, Zhang Q F, Gu G S, et al. Hydrodynamics and gas mixing in a carbon nanotube agglomerate fluidized bed[J]. AIChE Journal, 2006, 52(12): 4110-4123.
- [31] Wang L L, Chen T, Zhang J, et al. High catalytic activity and stability quasi homogeneous alkali metal promoted Ni/SiO₂ aerogel catalysts for catalytic cracking of n-decane[J]. Fuel, 2020, 268: 117384.
- [32] Li H Z, Hong R Y, Wang Z L. Fluidizing ultrafine powders with circulating fluidized bed[J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(22): 5609-5615.
- [33] Zhu X L, Zhang Q, Wang Y, et al. Review on the nanoparticle fluidization science and technology[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(1): 9-22.
- [34] 李洪钟, 郭慕孙. 回眸与展望流态化科学与技术[J]. 化工学报, 2013, 64(1): 52-62.
Li H Z, Kwauk M. Review and prospect of fluidization science and technology[J]. CIESC Journal, 2013, 64(1): 52-62.
- [35] 李洪钟. 浅论过程工程的科学基础[J]. 过程工程学报, 2008, 8(4): 635-644.
Li H Z. Discussion on basic theories for process engineering[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(4): 635-644.
- [36] 李洪钟. 过程工程: 物质·能源·智慧[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
Li H Z. Process Engineering: Material, Energy and Wisdom[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [37] 李洪钟. 化学工程前沿: 结构、界面与多尺度问题[C]//中国化工学会化学工程专业委员会, 中国化工学会生物化工专业委员会. 第三届全国化学工程与生物化工年会邀请报告. 2006:1.
Li H Z. Frontiers in chemical engineering: Structure, interface, and multiscale problems[C]// Chemical Engineering Committee of Chemical Industry and Engineering Society of China, Biochemical Engineering Committee of Chemical Industry and Engineering Society of China. Invited report of the 3rd National Annual Conference on Chemical Engineering and Biochemistry. 2006:1.
- [38] 李洪钟. 聚焦结构、界面与多尺度问题, 开辟化学工程的新里程[J]. 过程工程学报, 2006, 6(6): 991-996.
Li H Z. Focus attention on structure, interface and multi-scale issues to open up new mileage of chemical engineering[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(6): 991-996.
- [39] 李洪钟. 化学工程中的结构问题[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2013, 5(1): 12-22.
Li H Z. Structure issue in chemical engineering[J]. Journal of Engineering Studies, 2013, 5(1): 12-22.
- [40] Li H Z. Important relationship between meso-scale structure and transfer coefficients in fluidized beds[J]. Particuology, 2010, 8(6): 631-633.
- [41] 李洪钟, 朱庆山, 谢朝晖, 等. 流化床结构传递理论与工业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Li H Z, Zhu Q S, Xie Z H, et al. Fluidized Bed Structure Transport Theory and Industrial Applications[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [42] 李洪钟. 过程所与流态化: 庆祝过程工程研究所建所60周年[J]. 过程工程学报, 2018, 18(4): 657-668.
Li H Z. Fluidization science and technology at institute of process engineering: 60th anniversary celebration for the foundation of Institute of Process Engineering[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(4): 657-668.

Li Hongzhong, a Chemical Engineering Expert, Leads a Fluidized Life that is Full of Wisdom Among Particles

Zou Zheng^{1,2*}, Yan Dong¹, Gu Aixue¹, Liu Wei¹

1. State Key Laboratory of Mesoscience and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Li Hongzhong is a well-known chemical engineering expert and one of the academic leaders in the field of fluidization research. Prof. Li is a full-time professor at the Institute of Process Engineering (IPE) (formerly the Institute of Chemical Metallurgy (ICM) before 2001), Chinese Academy of Sciences (CAS) and was elected Member of the CAS in 2005. He was born in Xiyang County, Shanxi Province in 1941 and graduated from the Department of Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology in 1965. Since then, he worked as an Assistant Fellow at the Institute of Coal Chemistry (ICC), CAS before 1978, after which he started his postgraduate study. He received his master degree in chemical engineering from the University of Science and Technology of China in 1981 and his doctor degree in chemical engineering from the ICM, CAS in 1986. He worked as a postdoctoral fellow and visiting scholar at the Department of Chemical Engineering, University of British Columbia, Canada during 1986—1988. Since 1988, Prof. Li worked at ICM, CAS as a full-time research scientist. His research interests focused on the theoretical foundation and industrial application of fluidized/non-fluidized bed technology. When he worked at ICC, CAS, he engaged in developing a fluidized bed reactor to convert butene into butadiene, which belonged to the state key project for butadiene rubber and this project was awarded the State Top Class Prize for Science and Technology Progress in 1985. When he worked at UBC, Canada, he engaged in the combustion of different fuels in a pilot scale circulating fluidized bed combustor, and the paper titled "Combustion characteristics of different fuels in a pilot scale circulating fluidized bed combustor" was awarded the Best Paper Prize at the 10th International Conference on Fluidized Bed Combustion in 1989 in San Francisco. When he studied and worked at IPE, CAS, he established the dynamic theory of gas-solids moving beds and the models to describe the gas and solids flows in vertical and inclined moving beds by coupling the basic principles of multi-phase flow with the particulate media mechanics. This theory can predict the gas and solids flow rates, the distributions of the gas pressures, the particle-particle and particle-wall contacting stresses, as well as the arching width. He developed the dynamic models and design methods for the different kinds of non-mechanic valves such as L-valve and U-valve, which are used to pneumatically control the solids flow rate in gas-solid multi-phase flow systems. He invented moving-bed type V-valve and pneumatically controlled peristaltic feeder, vertical pneumatic critical moving bed transport etc. He establishes the theory of non-fluidized gas-solid two-phase flow, which enriches the scientific connotation of multi-phase flow and solves the practical issues with industrial manufacturing of powder. He is the first person who photographs the particle clusters and the dilute/dense two-phase structure in the fast fluidized bed. By using a self-developed optic fiber micrograph probe, he succeeded in taking photos of transient clusters and the two-phase structures of dilute and dense phases in the fast fluidized bed. His creative work leads to the proof of the agglomerating phenomena and the great attention of scientists from both domestic and overseas. He also proposes the theory of gas-solid particulatization, including particle and additive design (the particle design involves density, size and size distribution, shape and surface status *etc.*, the additive selection means to select suitable fine particles or coarse particles as the additives.), fluid design (fluid density and viscosity), external field design (vibrating field, acoustic field, centrifugal force field, and magnetic field *etc.*), and internals-vessel configuration design (ring internals, perforated plate, remiform internals, shutter typed internals, shallow bed, conical bed, fast fluidized bed, turbulent bed *etc.*), which can restrain and eliminate the bubbles and agglomerates in gas-solids fluidized beds. This is of great help to the realization of the particulate and homogeneous fluidization, which significantly improves the conversion efficiency of traditional multiphase reactors. He establishes the quantitative control method of structure-transfer relationship and fluidized bed reaction behavior, which guides the reactor design and optimization. Based on the above research foundations, he promoted many applications of fluidization technology in the chemical engineering and metallurgy industries, such as iron ore reduction and manganese dioxide ore reduction. This paper introduces Li's spirit of dedicating to serving the country from the aspects of his educational experience, innovative scientific research, industrial development, book writing and talent cultivation.

Keywords: Li Hongzhong; fluidization; gas-solid two-phase flow; particulatization; structure-transfer theory