

成果与应用**流态化研究的新进展——无气泡气固接触**

郭慕孙* 李佑楚 刘淑娟 董元吉 李静海

(化工冶金研究所)

流态化是现代的多相(气-固、液-固、气-液-固)相际接触的工程技术,无气泡气固接触则是新近开拓的流态化研究领域,旨在提高气固接触效率,强化气固间的传递过程。大量事实说明,气固接触方式的创新和理论的发展,都会不同程度地促进有关工程技术的更新和进步,从而提高工艺过程的生产效率,赢得较好的经济效益和社会效益。广为人知的煤的燃烧,正是由于气固接触方式的不断发展而使燃烧技术由原始的固定床层燃烧、粉煤气流悬浮燃烧、粒煤鼓泡流化床燃烧发展到新近的无气泡气固接触的快速循环流化床高效清洁燃烧,并取得一个个划时代的成就,就是一个明显的例证。

流态化作为一种技术创新,首先应用于煤的气化、石油催化裂化和硫铁矿的焙烧。由于气体对颗粒乳化相鼓泡搅拌作用,造成流化床层的均匀温度分布和反应器生产能力的大幅度提高。流化床在德国被称为 Wirbelschicht 苏联称之为 Капающей слое,中国叫做沸腾床,均突出了它的鼓泡特征。然而,鼓泡意味着气体以气泡形式从流化床短路,恶化了气体与固体颗粒间的热量和质量的传递。跟颗粒固定床和单颗粒悬浮的气固接触相比,鼓泡流态化床中的有效传递系数通常降低 1~2 个,甚至 3 个数量级。

50 年代后期,为了设计鼓泡式气固接触设备,许多流态化技术工作者致力于发展描述鼓泡现象的有关模型,而中国科学院化工冶金研究所则另辟途径,力求建立没有气泡短路的气固接触方式。如果一旦成功,这种无气泡气固接触方式在它们的传递特性方面,完全有可能优于现有的鼓泡流态化的气固接触过程。其模拟将基于完全不同的物理模型。自那时起,根据上述指导原则,从完全不同的物理概念出发,先后提出如下的无气泡气固接触的实施方案:

- 淋雨式稀相气固接触系统
- 快速流态化
- 浅床流态化

上述每种无气泡气固接触的研究都包含理论分析、实验技术和方法及设备的实用化设计。

对于第一种气固接触方式,即淋雨式稀相气固接触系统,其原理是将分散下落的固体颗粒与呈连续相上升的气体相互接触,消除了通常流化床中产生气泡的条件、并利用颗粒相对于气体的加速运动(一级或多级加速系统)和建立起来的温度梯度,以提高气固间传递系数。本研究建立了评价颗粒在气流中作加速降落时的热传递特性的模型方法,并设计了特殊的实验装置用以测定真实的气固传递系数和对模型方法加以验证。这种气固接触方式及其模型方法,1959 年已应用于湖北大冶含铜铁矿硫酸化焙烧提铜的中间工厂(每天 15 吨规模)。随后又用于安徽铜官山的低品位铜矿离析法焙烧提铜(每天 250 吨处理能力),马鞍山的贫赤铁矿磁化焙烧富集铁的示范中试厂(每天 100 吨能力)和贵州万山低品位汞矿焙烧提汞和硫铁矿焙烧等工业过程中。1964 年公开发表了有关理论研究结果,1979 年在国外发表了上述有关过程的设

* 中国科学院学部委员。

计原理和部分实验研究结果获得了较好的反响。随后美国国际化学工程杂志 (International Chemical Engineering 21(1), 95, 1981) 予以全文译载。1982 年法国才报道了类似的实验研究。

淋雨式稀相气固接触系统的基本特点是: 气固间热传递系数高——达到散料气固传递系数水平; 压降低——10 多米高的床层压降仅几十毫米水柱; 投资省——设备结构类似烟囱。上述工艺过程都是以中国资源特点和社会经济为依据的创新设计, 而工艺设备的设计和操作则以稀相气固接触的基本原理为基础才取得了成功。

淋雨式稀相气固系统的一个缺陷是其颗粒浓度很稀, 这意味着设备的体积利用率较差。从广义流态化的研究可知, 采用固体循环有利于提高载气中的固体浓度。这一事实本文第一作者早在 1948 年我们的有关研究论文中已予以说明。1966 年, 我们在每天 100 吨贫赤铁矿的磁化焙烧中试装置上, 利用这一原理设计了新型的焙烧工艺方案, 当时称之为“半载流焙烧”, 这是快速流态化原理应用的初次尝试。到 60 年代末期, 德国人把这一现象用于氢氧化铝的煅烧过程。这大大激发了人们开发快速流态化新领域的努力。

快速流态化是基于早期研究出现的现象, 利用颗粒物料具有成团运动的特性, 采用固体物料部分循环的方法, 建立起高参数(高气速、高通量、高固体浓度)的流化操作。其特征在于颗粒物料为时而形成、时而解体的非连续相团聚体、气体则为携带颗粒团聚体的连续相, 从而抑制或消除了气泡的形成, 成为一种新型的无气泡气固接触方式。

直到 70 年代中期, 人们对快速流态化的流体力学问题仍了解甚少。由于这属气固流态化, 尽管没有气泡, 但拥有颗粒团的聚式流态化特征, 散式广义流态化理论已不适用。为便于工程应用, 建立了颗粒团向上扩散和向下沉降通量之间动态平衡的新型流动模型, 从而可求得轴向固体浓度分布的解析解。所有的模型参数均与固体颗粒、气体的物理特性及操作参数相关联。这一模型方法已被同行广泛采用。随后, 径向颗粒浓度分布的研究, 又形成了一个可计算局部断面固体浓度的关联式, 从而可根据物系基本特性参数标绘出三维固体浓度分布。

其他研究包括快速流态化下的气固传递系数测定和固体颗粒团的特征及分析。前者是在特定吸附柱中用超低浓度示踪气体、电子捕集检测法进行测定, 后者是通过光导纤维技术进行摄像记录。这些基础资料满足了快速流化床反应器数学模拟的基本需要。

在流化床燃烧方面, 当快速流化床很快取代鼓泡流化床而成为国内外前沿领域之际, 中国科学院化工冶金研究所获得的研究结果还被成功地用于国内菱镁矿的煅烧、硼酸的热分解、江西含钒石煤的处理和以粉煤、粉矿为原料的钢铁冶炼新流程中铁矿预还原的假固-固反应。

快速流态化研究领域的开拓和发展并不是一开始就为人们所理解。尽管在 70 年代西德、美国、瑞典, 中国的部分学者已开始了实验研究, 但迟到 1980 年前后, 有关“快速流态化是否存在”这一基本问题, 国际上争论激烈, 还未能得到广泛接受。1979 年我们在化工学报上发表了系统试验结果, 美国的国际化学工程杂志全文译载, 随后许多国家的学者来函索取。1980 年我们在第三届国际流态化会议上发表了快速流态化流动状态图和流动数学模型, 说明了快速流态化形成的条件、状态特征及其过渡的影响因素, 后被称之为李-郭模型, 得到国际上 10 多个国家的几十位教授和著名学者的认可和普遍关注。并引起近来越来越多的国家或学者从事这一研究, 并从 1985 年起, 形成了快速循环流化床技术的专门性国际学术会议。1988 年会议组委会决定第三届会议于 1990 年在中国北京举行。

第三种无气泡气固接触方式,萌发于 50 年代后期关于流化床分布板上附近床层流动特性的观察,即靠近分布板有薄层无气泡的射流区,在其上则是通常的鼓泡流化区。浅床流态化就是基于上述分布板附近薄层无气泡区的概念。对浅流化床,我们首先研究了当气体通过分布板进入床层时气体射流的湍流特性,同时采用荧光颗粒示踪技术记录颗粒运动情况。研究结果表明,浅床区具有与鼓泡流化床完全不同的流体力学特性。然后,用非稳态传热的方法测定了气体射流与固体颗粒之间的传热系数,它比鼓泡条件下的传热系数有明显的提高。

然而,浅床区的颗粒接近全混的特性难于建立起有利于传热过程的任何温度梯度。为此,设计了一种顺流多层浅流化床以便把固体颗粒分割为具有不同温度的区域,造成所需的温度梯度。在顺流多层浅床的操作中,意外地发现颗粒从一层输送至另一层时发生滞后现象。对此,建立了统一的参数关联图,用以描述和解释这一现象。

上述基础研究的发现为实用化研究提供了启示,如铁矿的气体还原过程应该用顺流多层浅流化床取代单级深流化床,这样可大大缩短还原过程的反应时间。另一个创新设计是从烟气中回收废热的活化颗粒浅床换热器,其传热系数高而压降很低。当然,抑制气固流化床中气泡的发生还可借助于许多其它效应,例如脉动、离心力、磁场、电场等。

开发无气泡气固接触的主要目标在于使气固聚式流态化系统达到颗粒与流体接触良好的液固散式流态化系统的水平,然而,自采用流态化技术以来,对气固鼓泡流态化与液固散式流态化之间存在的巨大差别一直未曾给予合理的解释。本研究提出的多尺度能量最小化模型则可使所有的颗粒流体体系统一起来。根据该模型,说明只用连续性和守恒方程来描述多相体系将会忽略一个系统能量必须处于最小这一重要约束条件。将这约束条件考虑在内,则得到一个只能用数值求解的复杂方程组。求解该方程组得到以下结果:(1)气固聚式流态化与液固散式流态化可在同一的基础上统一起来;(2)给出描述各种不同流化状态的不同类型的流动状态图;(3)指出流化过程,特别是气固流化体系改善的途径。

在理论工作者和工程师们致力于研究鼓泡流态化的同时,我们已着手使聚式流态化达到散式化的学术思想和技术措施形成了无气泡气固接触的种种模式。然而,这些预见曾一度被误认为是一种、脱离实际的理论。因此,直至本文第一作者应邀参加 1980 年澳大利亚化工年会并发表重点演讲时才公开这一学术思想。1983 年他又应日本学术振兴会的邀请,在北海道作了内容经重新组织的学术演讲。此后,他接二连三地收到国外邀请前往作专题学术报告,如 1984 年美国国家科学院所属中国学术交流委员会请他作为高级访问学者,1985 年在英国戴维斯-斯韦登的纪念演讲等等,他多次作了无气泡气固接触的学术报告。1989 年在加拿大彭佛召开的第六届国际流态化学术会议上,他获国际流态化研究成就奖、并作了题为“流态化状态”的获奖发言,综合介绍了有关无气泡气固接触学术思想形成过程中许多早先的研究结果和多尺度能量最小化模型,尔后在美国阿贡国家研究所再次进行了无气泡气固接触的介绍。

该研究成果,1989 年获中国科学院自然科学一等奖。目前,第一作者正在撰写一本流态化专著,内容包括散式流态化和无气泡气固接触两大部分,即将完稿付诸出版。

自 50 年代后期我们致力于发展气固系统无气泡气固接触的思想概念以来,30 年的研究历程不仅有力地证明了这一新开拓的研究领域的巨大潜力,而且说明这一研究方向已成为当前流态化发展的主要潮流。但如果不给现在从事这一领域研究的年青一代科学工作者以足够的激励,将来的胜利就有可能落入其它更加进取的国家之手。