

# 反应器设计对化学反应效率的影响

仲凤菊<sup>1</sup> 杨永宁<sup>2</sup>

1.山东灵晓新材料有限公司; 2.山东理工职业学院

DOI: 10.12238/jpm.v5i10.7312

**[摘要]** 在化学工业与实验室研究中, 反应器作为化学反应的核心装置, 其设计直接关系到反应过程的效率、安全性及经济性。本文将从以下几个方面展开论述: 首先, 概述化学反应器的分类, 明确不同类型反应器的适用场景与优劣势; 其次, 对气固催化反应器、气液反应器的选择进行论述; 最后提出化学反应器设计的基础方程式, 以促进反应速率、提高产率、降低能耗及副产物生成, 从而实现化学反应效率的最大化。

**[关键词]** 化学反应器; 分类; 影响机制; 方程式; 反应效率

## Effect of the reactor design on the chemical reaction efficiency

Zhong Fengju<sup>1</sup> Yang Yongning<sup>2</sup>

1.Shandong Lingxiao New Material Co., LTD.; 2.Shandong Vocational College of Technology

**[Abstract]** In the chemical industry and laboratory research, the reactor, as the core device of the chemical reaction, its design is directly related to the efficiency, safety and economy of the reaction process. This paper will discuss the following aspects: firstly, summarize the classification of chemical reactor, clarify the applicable scenarios and advantages of different types of reactors; secondly, discuss the selection of gas-solid catalytic reactor and gas-liquid reactor; finally propose the basic equation of chemical reactor design to promote the reaction rate, improve yield, reduce energy consumption and by-product generation, so as to maximize the efficiency of chemical reaction.

**[Key words]** chemical reactor; classification; influence mechanism; equation; reaction efficiency

### 前言:

在化学工业与材料科学领域, 随着科技的飞速进步, 对高效、绿色、可持续的化学反应过程的需求日益迫切, 而反应器的设计不仅是工艺流程的心脏, 更是决定化学反应效率与经济效益的关键因素, 可见反应器设计的重要性愈发凸显。但传统的反应器设计往往侧重于满足基本的工艺需求<sup>[1]</sup>。而现代反应器设计更加注重通过精准控制反应环境、优化反应路径及提升资源利用效率, 以实现化学反应效率质的提升, 即对反应动力学与热力学平衡的优化。

### 1 化学反应器的分类

化学反应器按聚集状态分为均相和非均相反应, 均相反应器中, 反应物与生成物在相同的相态中混合并发生反应, 这类反应器的设计重点在于确保反应物之间的充分接触与混合, 以促进反应速率的提高; 非均相反应器中, 反应物处于不同的相态, 这类反应器的设计需考虑相间传质阻力及反应界面的形成与更新<sup>[2]</sup>。

化学反应器按其结构型式可分釜式、管式和塔式, 釜式反应器又称间歇反应器, 其主体为一带搅拌装置的密闭容器, 它适用于多种类型的化学反应, 特别是那些需要严格控制温度、压力或反应时间的场合; 管式反应器由一系列直管或弯管组成, 反应物在管内连续流动并发生反应, 管式反应器具有传热

效率高、压降小、便于连续化生产等优点, 特别适用于大规模、高流速的化学反应<sup>[3]</sup>。

化学反应器按操作方法分为间歇、连续、半连续式, 间歇反应器在每次操作前需将反应物全部加入反应器内, 待反应完成后一次性排出产物, 适用于多种复杂的化学反应, 但生产效率低, 不适合大规模生产; 连续反应器中, 反应物连续不断地进入反应器, 并在设定的条件下进行反应, 产物则连续排出, 这种操作方式生产效率高, 产品质量稳定, 但要求反应条件严格可控, 且对设备的连续运行能力要求较高; 半连续反应器结合了间歇与连续反应器的特点, 部分反应物连续加入, 而另一部分则间歇加入, 这种操作方式既保持了较高的生产效率, 又具有一定的灵活性, 适用于某些特定工艺需求<sup>[4]</sup>。

### 2 化学反应器的选择

#### 2.1 气固催化反应器选择

固定床反应器, 又称填充床反应器, 是在反应器内装填颗粒状固体催化剂或固体反应物, 形成一定高度的堆积床层, 其又分为绝热式固定床反应器: 包括单段式和多段式, 单段式适用于绝热温升较小或反应对温度不敏感的反应, 多段式通过反应和冷却间隔进行, 适用于需要控制温度分布的反应; 换热式固定床反应器: 如列管式反应器, 传热效果好, 适用于反应热效应较大的反应。固定床反应器以其结构简单、催化剂不易磨

损、反应速率快、选择性高等优点，广泛用于合成氨、甲醇氧化制甲醛、乙苯脱氢制苯乙烯等反应过程，其设计需综合考虑传热、控温、催化剂再生等因素。

流化床反应器又称沸腾床反应器，通过气体在固体颗粒物料构成的床层内流动，使颗粒悬浮运动，实现气固相反应。流化床反应器通常由壳体、气体分布装置、换热装置、气固分离装置等组成，气体分布板的设计需保证气体分布均匀，内部构件用于改善气固接触和减小返混。流化床反应器具有良好的传热性能、固体颗粒连续输入输出能力及催化剂连续再生能力，因此在石油催化裂化、矿石焙烧、酶反应过程等领域得到广泛应用，其高传热效率和连续操作特性使其成为处理高放热反应的理想选择<sup>[5]</sup>。

## 2.2 气液反应器的选择

以化学反应速度与气液界面内气液两相成分扩散速度相对大小关系，可把气液反应分为：（1）瞬间反应。瞬间反应指的是反应速度远大于气液两相间的传质速度，即反应几乎在气液接触界面上立即完成，这种反应类型常见于快速反应体系，由于反应速度极快，传质成为控制反应速率的关键步骤，因此选择具有高效传质能力的反应器能够显著提高这类反应的效率和产量。（2）液膜内迅速反应。当反应速度在液膜内迅速进行，但总体上仍受传质速度限制时，称为液膜内迅速反应，这类反应中，气液接触界面处的反应物浓度迅速下降，形成一层较薄的反应层，为了提高这类反应的速率，需要选择能够增大气液接触面积和传质效率的反应器。（3）中间速度反应。中间速度反应指的是反应速度与传质速度相当或稍快的反应类型，这类反应在气液两相间进行，反应速率和传质速率共同影响反应的整体进程，对于这类反应，搅拌釜和鼓泡釜是常见的选择。（4）慢反应。慢反应指的是反应速度远小于传质速度的反应类型，这类反应中，传质过程相对容易进行，但反应本身需要较长时间才能完成，需要选择能够保持较长反应时间和良好混合效果的反应器。

## 3 化学反应器设计的基础方程式

### 3.1 反应动力学方程式

反应动力学方程式又称反应速度方程式，是描述化学反应速度与反应物浓度、温度、压力、催化剂等各种影响因素之间函数关系的数学表达式，它是化学反应机理研究的直接产物。构建反应动力学方程式的起点是速率定律，它表述了反应速度与各反应物浓度的幂之积成正比的关系，幂的数值即为该反应物的反应级数，反映了该反应物浓度变化对反应速度影响的敏感程度，例如对于反应  $A+2B \rightarrow C$ ，若其速率定律为  $r=k[A][B]^2$ ，则 A 的反应级数为 1，B 的反应级数为 2，总反应级数为 3。速率常数 k 是反应动力学方程式中的关键参数，它反映了活化能、分子碰撞频率等反应体系本身的固有性质，k 值的大小直接影响反应速度的快慢，k 还是温度的函数，通常遵循阿伦尼乌斯方程，即  $k=A \exp(-E_a/RT)$ ，其中 A 为指前因子， $E_a$  为活化能，R 为气体常数，T 为绝对温度。这表明，随着温度的升高，k 值增大，反应速度加快。

根据速率定律，反应物浓度的变化会直接影响反应速度，一般来说增加反应物浓度会加速反应进行，但需注意的是，当

反应物浓度增加到一定程度后，由于传质、传热等物理过程的限制，反应速度可能不再显著增加，甚至可能出现下降现象。如前所述，温度是影响反应速度的重要因素之一，通过调整反应温度，可以在一定范围内实现对反应速度的精确控制，然而过高的温度可能引发副反应或导致催化剂失活，因此在实际操作中需权衡利弊。在反应动力学方程式中，催化剂的作用通常通过改变速率常数 k 来体现，不同类型的催化剂对同一反应可能有不同的催化效果，选择合适的催化剂对于提高反应效率至关重要。对于涉及气体或液体混合物的反应体系，压力和相态的变化也可能对反应速度产生影响，例如在高压下，气体分子的碰撞频率增加，有利于反应速率的提升，而在两相或多相反应中，相界面面积的大小和传质速率将直接影响反应速度。

### 3.2 物料衡算式

物料衡算式基于质量守恒定律，即在一个封闭系统中，无论发生何种化学或物理变化，系统的总质量保持不变。在化学反应过程中，原料进入反应器，经过一系列反应后生成产物，并可能伴随有副产物及未反应物的排出。物料衡算式通过计算反应物、产物及副产物的质量关系，确保反应过程的质量平衡。物料衡算式的通用表达式为： $\sum G_{\{\text{投入}\}} = \sum G_{\{\text{产品}\}} + \sum G_{\{\text{回收}\}} + \sum G_{\{\text{流失}\}}$ 。其中， $\sum G_{\{\text{投入}\}}$  表示投入系统的物料总量； $\sum G_{\{\text{产品}\}}$  表示系统产出的产品和副产品总量； $\sum G_{\{\text{回收}\}}$  表示系统中回收的物料总量； $\sum G_{\{\text{流失}\}}$  表示除产品、副产品及回收量以外各种形式的损失量，包括污染物排放量。以间歇操作釜式反应器为例，假设反应物 A 和 B 反应生成产物 C，并伴随有副产物 D 的生成，在反应过程中，物料衡算式可具体表示为：

$$m_{\{A, \text{in}\}} + m_{\{B, \text{in}\}} = m_{\{C, \text{out}\}} + m_{\{D, \text{out}\}} + m_{\{A, \text{unreacted}\}} + m_{\{B, \text{unreacted}\}}$$

其中， $(m_{\{A, \text{in}\}})$  和  $(m_{\{B, \text{in}\}})$  分别表示 A 和 B 的初始投入质量； $(m_{\{C, \text{out}\}})$  和  $(m_{\{D, \text{out}\}})$  分别表示产物 C 和副产物 D 的产出质量； $(m_{\{A, \text{unreacted}\}})$  和  $(m_{\{B, \text{unreacted}\}})$  分别表示未反应的 A 和 B 的质量。通过物料衡算，可以分析不同原料配比下产物的生成量及副产物的生成情况，使反应尽可能向生成目标产物的方向进行，从而提高反应效率，例如在合成反应中，适当增加反应物的浓度或采用更有效的催化剂，可以促进反应的进行，提高产物的收率。物料流失是影响反应效率的重要因素之一，通过物料衡算可以明确流失的物料种类及数量，进而采取措施减少流失，例如加强设备的密封性、优化操作流程、提高回收效率等，都可以有效减少物料的流失，提高反应效率。反应条件如温度、压力、搅拌速度等对反应效率有显著影响，通过物料衡算可以分析不同反应条件下产物的生成情况，进而确定最佳反应条件，例如在放热反应中，通过控制反应温度避免过热导致的副反应或产物分解；在气液反应中，通过调节搅拌速度使反应物充分接触，提高反应速率。反应器的利用率直接影响反应效率，通过物料衡算可以计算出反应器的有效体积和实际体积，进而确定反应器的型式及尺寸，再优化反应器设计，比如采用多级串联搅拌釜以减少返混、提高传质效率等，都可以提高反应器的利用率，从而提升反应效率。

### 3.3 热量衡算式

热量衡算式同样是依据能量守恒定律建立的,用于描述反应器内热量输入、输出及内部转换之间的平衡关系,其基本原理是在一个封闭系统或控制体积内,能量的增加或减少等于输入的能量减去输出的能量,再加上或减去系统内部产生的能量变化。在化学反应中,这通常包括物料带入的热量、反应放热或吸热、加热或冷却设备消耗的热量、物料离开时带走的热量以及向环境散失的热量等。热量衡算式的数学表达式为:

$$Q_{\{in\}}+Q_{\{reaction\}}=Q_{\{out\}}+Q_{\{loss\}}+Q_{\{accumulated\}}$$
其中,  $Q_{\{in\}}$  为输入热量,  $Q_{\{reaction\}}$  为反应产生的热量,  $Q_{\{out\}}$  为输出热量,  $Q_{\{loss\}}$  为损失热量,  $Q_{\{accumulated\}}$  为累积热量。在反应器设计中,热量衡算式的应用主要体现在以下几个方面:通过热量衡算,可以准确计算出反应过程中所需的加热或冷却量,从而合理设计加热或冷却系统,确保反应在适宜的温度下进行;通过调整进料温度、流量、反应温度等参数,可以优化热量分布,减少能量损失,提高反应效率;通过监测反应过程中的温度变化,结合热量衡算式,可以评估反应器的热效率,为反应器的优化设计和改进提供依据。

基于热量衡算式,为提升化学反应效率,可采用热管换热器、螺旋板换热器等高效的加热和冷却设备,并设计合理的加热和冷却回路,确保热量能够均匀、快速地传递至反应体系;对于放热反应,可以采用多段进料或控制进料速度的方式,以控制反应温度,避免局部过热;对反应器进行绝热处理,减少热量向环境的散失,还要对加热或冷却管道进行保温处理,以

减少热量在传输过程中的损失;采用计算机集散控制系统等先进控制手段实时监测反应过程中的温度、压力、流量等参数,并引入智能算法和模型预测技术对反应过程进行精确控制,以实现反应效率的最大化;选择合适的催化剂和优化催化剂的使用条件,可以进一步提高反应效率。

#### 总结:

在化学工程领域,优化反应器设计能够显著提升化学反应效率,这主要体现在通过合理调控反应物的混合方式、停留时间分布、温度及压力等操作条件,使反应体系更接近理想的动力学和热力学状态,而且先进的反应器设计还能有效减少副产物的生成,提高目标产物的纯度和收率,从而降低后续分离纯化的成本。对此,应加强反应器设计对化学反应效率的影响研究,进一步提升化学反应效率、推动化学工业可持续发展。

#### [参考文献]

- [1]左浩然,李晶晶,王宏,等.基于生活问题的反应器设计类比教学探索与实践[J].化工高等教育,2024,41(01):87-92.
- [2]陈曦.化学链燃烧反应器的多尺度模拟和数值设计方法研究[D].华中科技大学,2023.
- [3]刘一君,陈时熠,胡骏,等.化学链反应器研究进展[J].化工学报,2021,72(05):2392-2412.
- [4]汪斌,杨凤丽,陈舟,等.化学反应工程教学中加强反应器设计能力之实践[J].山东化工,2020,49(14):194-195.
- [5]解艳艳,刘洪涛.关于化工反应器设计工作中预测估计方法的讨论[J].云南化工,2022,45(05):252.

### 上接第167页

Cr和Ni使不锈钢在氧化性介质中生成一层十分致密的氧化膜,使不锈钢钝化,降低了不锈钢在氧化性介质中的腐蚀速度,使不锈钢的耐腐蚀性能提高。但由于氯离子半径小,穿透能力强,故它最容易穿透氧化膜内极小的孔隙,到达金属表面,并与金属相互作用形成了可溶性化合物,使氧化膜的结构发生变化,金属产生腐蚀。通过研究分析发现,氯离子加速了不锈钢材质的腐蚀,而我们硫酸铵浆液中存在大量的氯离子,加剧了现场不锈钢管道的腐蚀速率。与塔壁冲洗水分布器使用316L材质后严重腐蚀情况不同,一级循环泵的叶轮和滤网材质也均采用316L,但2015年运行至今未发生严重腐蚀,因此我们需要根据不同的运行工况,通过对比选择更加合适硫酸铵浆液的不锈钢管道。

#### (二) 904L 材质

904L 超级奥氏体不锈钢属低碳高镍、钼奥氏体不锈钢,是316L材质的升级版,具有很好的活化-钝化转变能力,耐腐蚀性能极好,在非氧化性酸如硫酸、醋酸、甲酸、磷酸中具有很好的耐蚀性,在中性含氯离子介质中具有很好的抗点蚀性,同时具有良好的抗缝隙腐蚀及抗应力腐蚀性能。适用于70℃以下各种浓度硫酸,在常压下耐任何浓度、任何温度的醋酸,及甲酸与醋酸的混酸中的耐腐蚀性也很好。但从3#脱硫塔二次氧化分布器更换效果看,也不可避免发生点蚀情况。数据表明,2023年8月3#脱硫塔安装904L材质氧化风管,安装

时检测主管厚度为4.2mm,支管厚度为3.2mm,2023年9月2日3#脱硫塔启动运行,2024年4月9日停运3#脱硫塔,累计运行218天,停运后对3#脱硫塔底部氧化风管进行测厚,测量主管厚度为4.03mm,支管厚度3.0mm,平均减薄0.2mm,计算年腐蚀率0.34mm/年。

#### 结语:

本研究通过系统地探索氨法脱硫过程中氯离子的腐蚀机理及其防护策略,详细分析了氯离子在氨法脱硫工艺条件下的具体腐蚀行为,并验证了多种防护措施的实际效果。结果表明,采用耐腐蚀性更强的材料、先进的涂层技术以及合理地应用腐蚀抑制剂,可以极大地提升脱硫系统的耐蚀性和操作稳定性。此外,通过优化操作参数和定期监测,可以进一步提高防护效果,延长设备使用寿命。本文的研究成果为氨法脱硫工艺耐氯离子腐蚀提供了科学依据和技术指导,对提升氨法脱硫工艺的安全性和经济性具有重要意义。

#### [参考文献]

- [1]王强.氯离子对不锈钢腐蚀行为的影响研究[J].金属学报,2019,55(8):1234-1240.
- [2]李明.高温高压下氯离子腐蚀行为及防护策略[J].腐蚀科学与防护技术,2020,32(3):456-462.
- [3]张华.煤制油工艺中氨法脱硫技术应用分析[J].化工进展,2018,37(4):987-993.