

热力学分析在化工过程设计中的应用

杨兆栋 任 双

阿克苏工业职业技术学院 新疆 阿克苏 843000

摘 要: 本文阐述了热力学分析在化工过程设计中的应用。从热力学基本原理入手,包括热力学第一、第二定律及化工过程中的能量形式。介绍了多种热力学分析方法,如能量平衡、功率分析等。具体论述了在蒸馏、催化裂化、合成氨、吸收及反应精馏等化工过程中的应用。通过能量平衡确定各过程能量需求,利用熵增分析评估不可逆程度,基于相平衡理论优化操作条件等。为化工过程设计提供了科学依据,有助于提高能源利用效率、降低成本、提升产品质量和生产效率。

关键词: 热力学分析; 化工过程; 设计应用

引言

化工过程设计的高效性与合理性对化工产业至关重要。热力学分析作为重要工具,为化工过程设计提供了坚实的理论基础。随着化工行业的不断发展,对能源利用效率、产品质量和生产效率的要求越来越高。热力学第一、第二定律以及多种能量形式的研究,为理解化工过程中的能量转换和损失提供了方向。不同的热力学分析方法可针对不同化工过程进行精准分析。

1 热力学分析的基本原理

1.1 热力学第一定律

热力学第一定律即能量守恒定律,表明在一个封闭系统中,能量既不会凭空产生,也不会凭空消失,只能从一种形式转化为另一种形式。在化工过程中,该定律主要用于分析能量的输入、输出和转换。就比如,在反应器中,输入的能量有原料的化学能、加热或冷却系统的热能等,输出的能量包括产物的化学能、废热等。能量守恒方程为: $Q + W = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE$, 其中 Q 是系统吸收的热量, W 是外界对系统做的功, ΔU 是系统内能的变化, ΔKE 是系统动能的变化, ΔPE 是系统势能的变化。通过这个方程可以了解系统中能量的分布和转化情况,为化工过程优化设计提供依据。

1.2 热力学第二定律

热力学第二定律即熵增定律,指出在一个孤立系统中,熵总是趋向于增加。在化工过程中,此定律主要用于分析不可逆过程中的能量损失。如在流体流动、传热和传质等单元操作中,由于摩擦、传热不均匀等因素,会有一部分能量以热的形式散失到环境中,导致系统的熵增加。熵增定律可用公式 $dS \geq \frac{dQ}{T}$ 表示,其中 dS 是系统熵的变化, dQ 是系统吸收的热量, T 是系统的温度。通过

该公式可定量评估系统的不可逆程度,为化工过程优化设计提供指导。

1.3 化工过程中的能量形式

1) 热能在化工过程中最为常见,主要来源于加热和冷却操作。例如在蒸馏塔中,通过加热使混合物中的轻组分挥发实现分离;在冷却器中,通过冷却将高温气体或液体降温以便后续处理。热能的管理和利用是化工过程设计的重要环节,合理的热交换设计可显著提高能源利用效率,如采用高效换热器和优化热回收系统,能减少能源浪费,提高生产效率。2) 机械能在化工过程中主要体现在泵、压缩机和搅拌器等设备中。这些设备通过消耗电能或蒸汽能,将机械能传递给流体,实现流体的输送、压缩和混合。在大型炼油厂中,合理配置泵和压缩机可降低能耗、提高生产效率。通过优化设备选型和操作参数,可减少机械能损失,提高系统整体性能。3) 电能能在化工过程中主要用于驱动电动机、加热元件和控制系统等。例如在电解槽中,通过电能输入可实现金属的沉积或气体的生成。电能的高效利用对降低生产成本、提高产品质量具有重要意义。采用先进的电力电子技术和智能控制系统,可实现电能的精确控制和高效利用,提高生产效率和产品质量。4) 化学能在化工过程中是最直接的能量形式,主要来源于化学反应。例如在合成氨过程中,氢气和氮气在催化剂作用下反应生成氨,释放大量化学能^[1]。通过合理设计,可最大限度利用化学能,提高反应的转化率和选择性。如优化反应条件和催化剂选择,可提高反应速率和产物收率,减少副反应发生,提高生产效率和经济效益。

2 热力学分析的方法

2.1 能量平衡

能量平衡是热力学分析中最基本的方法之一。通过

建立能量守恒方程,可计算出系统中各个能量项之间的关系。在化工过程中,能量平衡主要用于分析反应器、换热器和分离设备等单元操作中的能量输入和输出。例如在反应器中,通过能量平衡可计算出反应热、加热或冷却所需能量,从而优化反应条件,提高反应效率。能量平衡方程为: $\sum Q_{in} + \sum W_{in} = \sum Q_{out} + \sum W_{out} + \Delta H$, 其中 $\sum Q_{in}$ 和 $\sum W_{in}$ 分别是系统输入的热量和功, $\sum Q_{out}$ 和 $\sum W_{out}$ 分别是系统输出的热量和功, ΔH 是系统焓变。

2.2 功率分析

功率分析是热力学分析的重要方法之一,主要用于分析机械能的传递和利用。在化工过程中,功率分析主要用于评估泵、压缩机和搅拌器等设备的性能。通过功率分析可确定设备的最佳工作点,降低能耗,提高生产效率。例如在大型炼油厂中,通过功率分析可优化泵的配置,减少不必要的能量损失。功率分析公式为: $P = \dot{m} \cdot g \cdot h$, 其中 P 是功率, \dot{m} 是质量流量, g 是重力加速度, h 是扬程。

2.3 动量传递分析

动量传递分析主要用于分析流体流动过程中的能量损失。在化工过程中,动量传递分析主要用于评估管道、阀门和反应器等设备中的压力降。通过动量传递分析可优化流体流动路径,减少摩擦损失,提高设备运行效率。例如在反应器中,通过动量传递分析可优化内部结构,减少流体流动阻力,提高反应效率。动量传递分析公式为: $\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2}$, 其中 ΔP 是压力降, f 是摩擦因子, L 是管道长度, D 是管道直径, ρ 是流体密度, v 是流体速度。

2.4 动能传递分析

动能传递分析主要用于分析流体在运动过程中的能量变化。在化工过程中,动能传递分析主要用于评估泵、压缩机和搅拌器等设备的性能。通过动能传递分析可确定设备的最佳工作点,降低能耗,提高生产效率。例如在搅拌器中,通过动能传递分析可优化叶片设计,减少能量损失,提高混合效果。动能传递分析公式为:

$K = \frac{1}{2}mv^2$, 其中 K 是动能, m 是质量, v 是速度。

2.5 基于焓的分析

基于焓的分析是一种更高级的热力学分析方法,主要用于评估系统的不可逆性和能量利用效率。在化工过程中,基于焓的分析主要用于评估反应器、换热器和分离设备等单元操作中的焓损失。通过基于焓的分析可识别出能量损失的主要环节,采取措施减少损失,提高整个过程的效率。基于焓的分析公式为: $E = H - T_0S$, 其中

E 是焓, H 是焓, T_0 是环境温度, S 是熵^[2]。

3 热力学分析在化工过程中的具体应用

3.1 蒸馏过程

在蒸馏过程的化工设计中,热力学分析具有极其重要的应用。首先,通过热力学的能量平衡分析,可以精确地确定蒸馏过程中所需的热量输入以及冷却过程中带走的热量。这对于设计加热装置和冷却系统至关重要,能够确保系统在满足分离要求的同时,实现能源的高效利用。其次,热力学分析中的熵增原理可以帮助评估蒸馏过程的不可逆程度。在实际的蒸馏操作中,由于存在传热温差、流体流动阻力等因素,系统的熵会不断增加。通过对熵增的分析,可以找出过程中能量损失较大的环节,进而采取相应的措施来降低不可逆性,提高蒸馏的效率。再者,热力学相平衡理论是蒸馏过程设计的基础。根据不同物质在不同温度和压力下的气液平衡关系,可以确定合适的蒸馏操作条件,如操作温度、压力、回流比等。利用相平衡数据和热力学模型,可以预测混合物在蒸馏过程中的分离效果,为蒸馏塔的设计和优化提供理论依据。

3.2 催化裂化过程

在催化裂化过程的化工设计中,热力学分析发挥着关键作用。从反应热力学角度来看,通过对焓变、熵变和吉布斯自由能变化等热力学参数的分析,可以深入了解催化裂化反应的能量变化和反应的自发性。如,根据反应的焓变可以确定反应是吸热还是放热,从而为反应过程中热量的供应或移除提供依据。吸热反应需要提供足够的热量来维持反应的进行,而放热反应则需要考虑热量的回收利用,以提高能源的利用率。熵变的分析则有助于理解反应过程中体系的混乱度变化。在催化裂化反应中,原料分子的断裂和产物分子的生成会导致体系的熵发生变化。通过对熵变的研究,可以优化反应条件,使反应朝着熵增的方向进行,提高反应的效率。吉布斯自由能变化是判断反应能否自发进行的重要参数。通过计算不同反应条件下的吉布斯自由能变化,可以确定最佳的反应温度、压力和原料组成等工艺参数,以提高产物的质量和产量。此外,热力学分析还可以用于研究催化剂的性能和作用机制。催化剂的存在会改变反应的热力学路径,降低反应的活化能,从而加速反应的进行。

3.3 合成氨过程

在合成氨过程的化工设计中,热力学分析同样不可或缺。合成氨反应是一个可逆的放热反应,热力学分析对于理解反应的平衡特性和优化反应条件具有重要意义。通过对反应的热力学平衡常数的计算,可以确定在

不同温度和压力下反应的平衡转化率。根据这些数据,可以选择合适的反应温度和压力,使反应在尽可能高的转化率下进行。同时,热力学分析还可以用于评估合成氨过程中的能量消耗。合成氨反应需要消耗大量的能量来提供反应所需的高温高压条件。通过对反应过程中的能量变化进行分析,可以优化能量的供应方式,降低能源消耗。

3.4 吸收过程

1) 在吸收过程中,需要将气体混合物中的某些组分溶解到液体溶剂中。这一过程涉及到能量的传递和变化,热力学分析可以帮助确定吸收操作所需的能量。如,通过对吸收塔内气液两相的能量平衡分析,可以计算出为了使气体组分充分溶解到液体中所需的热量或冷量。如果吸收过程是放热反应,那么需要设计冷却系统来移除多余的热量,以维持合适的操作温度^[3]。相反,如果吸收过程是吸热反应,则需要提供热量。通过热力学分析,可以精确地评估这些能量需求,从而优化加热或冷却系统的设计,提高能源利用效率。2) 溶剂的选择对吸收过程的效率和经济性有着重要影响。热力学分析可以帮助筛选合适的溶剂。通过研究不同溶剂与被吸收气体之间的相互作用能、溶解热等热力学参数,可以评估溶剂对气体的吸收能力。如,具有较高溶解热的溶剂可能更适合吸收某些高能量的气体组分。同时也可以利用热力学模型预测不同温度、压力下溶剂对气体的吸收效果,从而确定最佳的操作条件。3) 吸收塔的设计是吸收过程的关键环节。热力学分析可以为吸收塔的设计提供重要的依据。如,通过对塔内气液两相的流体力学行为进行热力学分析,可以确定塔内的气液流量、流速等操作参数,以保证气液两相的充分接触和传质效率。还可以利用热力学原理对吸收塔的塔板结构、填料类型等进行优化设计。

3.5 反应精馏过程

1) 反应精馏是将化学反应和精馏分离过程集成在一个设备中的化工过程。热力学分析在反应精馏过程中起着至关重要的作用,用于实现反应和分离的协同优化。通过对反应体系的热力学分析,可以确定反应的热力学平衡常数、反应热等参数,从而评估反应的可行性和反应速率。同时,结合精馏过程的热力学原理,可以分析

塔内的气液平衡、温度分布、浓度分布等,确定最佳的精馏操作条件。比如,对于一个可逆反应,通过调整精馏塔的操作压力和温度,可以改变反应的平衡位置,促进反应向生成产物的方向进行,提高反应的转化率和选择性。2) 反应精馏过程通常涉及到大量的能量消耗,因此能量集成和节能是设计过程中的重要考虑因素。热力学分析可以帮助实现能量的优化利用。通过对反应和精馏过程中的能量流进行分析,可以确定能量的输入和输出点,以及能量的损耗环节。如利用反应放出的热量来提供精馏过程所需的热量,实现能量的自给自足,减少外部能源的输入。同时可以通过对塔内气液两相的热力学性质进行分析,优化回流比和采出率等操作参数,降低精馏过程的能耗。3) 在反应精馏过程中,除了目标反应外,还可能存在一些副反应和杂质的生成。热力学分析可以帮助去除这些杂质,提高产品的纯度。通过对杂质与产品之间的热力学性质差异进行分析,可以选择合适的分离方法和操作条件。比如根据杂质和产品的沸点差异,利用精馏过程将杂质与产品分离。同时也可以利用热力学模型预测杂质在不同操作条件下的分布情况,优化塔内的温度、压力等参数,提高杂质的去除效率。

结束语

热力学分析在化工过程设计中具有广泛而重要的应用。从基本原理到具体方法,再到各个化工过程的实际应用,都充分体现了热力学分析的价值。通过对能量的精确分析和优化,能够实现能源的高效利用,降低生产成本。对不可逆过程的评估有助于减少能量损失,提高过程效率。在不同化工过程中的应用,为设计出更合理、更高效的化工生产系统提供了有力保障。

参考文献

- [1] 黄斯珉,张志凌,元武智.PBL教学方法在物理化学课程教学中的应用探索——以热力学第一定律教学为例[J].江西化工,2024,40(1):122-124.
- [2] 张承虎,林己又,李亚平,等.焓驱热力过程理论模型的热力学分析[J].哈尔滨工业大学学报,2022,54(12):127-134.
- [3] 晁惠雨,白振敏,侯汉青,等.液相法合成三聚氰酸体系热力学分析[J].化工学报,2024,75(6):2157-2165.