# 异丁烷脱氢工艺优化设计

乔因利　高永兴　尚英超

利华益利津炼化有限公司

**摘要：**为了提高异丁烷脱氢工艺的稳定性和生产效率，对工艺流程、设备选型及自动控制系统展开研究。本工艺流程包括原料加氢处理、异丁烷脱氢、产品分离及催化剂再生 4 个部分，以优化生产过程，提高异丁烯的选择性。对反应器、换热器、加热炉及催化剂再生系统的设备进行了工艺计算和选型，确保生产装置的合理配置。

**关键词：**异丁烷脱氢；工艺优化；自动控制；催化剂再生

为提高异丁烯收率，降低能耗，并延长催化剂寿命，本工艺流程涵盖原料加氢处理、异丁烷脱氢、产品分离及催化剂再生等关键环节。采用先进的工艺优化策略，并引入自动控制技术，提高系统运行的稳定性和经济性。本文重点探讨工艺流程的优化设计、关键设备选型及自动控制方案，以提升生产效率，实现节能降耗与可持续发展。

## 1　工艺流程简介

### 1.1　原料加氢处理

异丁烷原料先进入缓冲罐，经输送泵送入蒸汽预热器预热，然后进入换热器，与加氢后物料换热，提高温度后，与经过压缩的氢气混合，进入加热炉加热至适宜温度后送入加氢反应器。在反应器内，不饱和烃被加氢饱和，同时去除硫、氮等杂质，以防止催化剂中毒。加氢后的物料经减压后，再与原料换热降温，进入碱洗罐去除杂质。气相部分再经降压，进入分液罐进行气液分离，为后续脱氢反应提供纯净的异丁烷原料。

### 1.2　异丁烷脱氢

经过加氢处理的异丁烷，依次通过换热器预热后，进入加热炉加热至高温，随后进入脱氢反应器。在催化剂作用下，异丁烷发生脱氢反应，生成异丁烯和氢气。由于该反应是强吸热反应，为保证反应持续进行，需要在不同阶段补充热量，并通过换热方式回收热能，减少损失 [1]。脱氢后的气体先经过换热冷却，然后通过冷却器进一步降低温度，最后进入分液罐进行初步气液分离，为产品分离提供稳定的物料。

### 1.3　产品分离

脱氢后产物先通过压缩机增压，再经过冷却器降温，进入分离罐，分离出大部分碳四组分，罐顶的氢气和轻烃进入变压吸附装置，分离出高纯度氢气。一部分高纯度氢气用于循环，其余储存作为产品。解吸出的低纯度氢气经压缩后，再进入另一个分离罐，得到部分可燃气送入燃烧系统，进一步提高资源利用率。碳四组分经加热器升温后，送至产品罐进一步气液分离，液相碳四产品送至储罐储存，气相部分作为燃气使用。

### 1.4　催化剂再生

催化剂使用一段时间后会因积碳失活，需要定期再生，工艺流程如图 1 所示。失活的催化剂先通过气力输送至待生罐，然后依次进入两个烧焦罐，分阶段燃烧催化剂上的积碳。经过处理后的催化剂进入干燥活化罐，进行氯化活化，使催化剂表面的铂重新分布，提高催化活性。再生后的催化剂再经过输送系统送回反应器继续使用。整个催化剂再生系统独立运行，确保催化剂循环使用，提高装置的稳定性和生产效率。

## 2　工艺流程方案的确定

### 2.1　反应原料及组成

本工艺原料为工业异丁烷，装置年处理能力为 5 万 t，见表 1，主要成分为异丁烷，占比超过 90%，同时含有少量正丁烷、丙烷和甲烷等轻质组分，以及微量烯烃、不饱和烃和杂质（如硫化物、氮化物等）。原料的纯度直接影响脱氢反应的效率和催化剂的使用寿命，因此需通过加氢处理去除杂质，提高原料质量，以保证后续脱氢工艺的稳定性和高选择性 [2]。

### 2.2　催化剂规格

本工艺流程涉及两种催化剂：加氢催化剂和脱氢催化剂。加氢催化剂以氧化铝为载体，主要活性成分为钼，并添加钴作为助催化剂，提高加氢效率。脱氢催化剂同样以氧化铝为载体，活性金属为铂，同时添加锡、铯、钾等助剂，以提高催化剂的稳定性和选择性。催化剂的合理选择可提高异丁烷脱氢转化率，并减少副产物的生成。

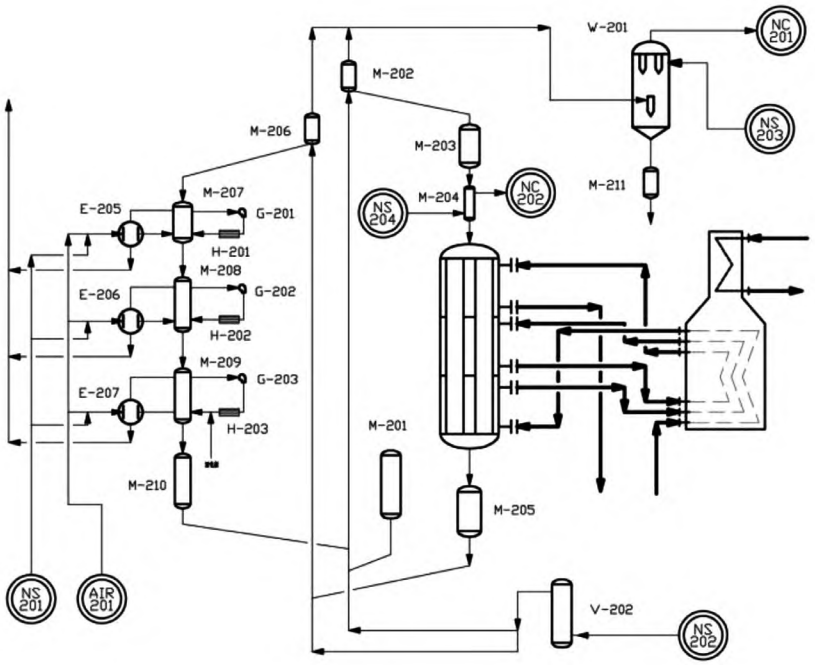


图 1　催化剂再生工艺流程图

### 2.3　产品规格

本工艺主要产品为高纯度异丁烯和氢气。异丁烯选择性需达到 92% 以上，C4 损失率低于 3%。副产品包括低纯度氢气及弛放气，其中氢气纯度可达 99.9%，部分循环使用，部分作为产品回收。副产气体中的甲烷、乙烷、丙烷等可作为燃料气综合利用，提高能源利用率，降低生产成本。

### 2.4　辅助材料及燃料

本工艺主要消耗的辅助材料包括低压蒸汽、热水、冷却水和冷却盐水（见表 2），分别用于工艺中的加热、冷却和热回收。燃料主要为天然气，供加热炉使用，确保反应所需的热量。合理优化能源利用，提高热回收效率，可有效降低装置运行成本，提高经济效益。

### 2.5　工艺流程方案确定

1）混合制冷液化分离流程。混合制冷液化分离流程主要采用深冷分离技术，通过多个换热器和闪蒸罐逐步冷却脱氢产物，使烷烃和烯烃在不同温度下分离。首先，来自脱氢反应器的高温气体先与进料换热预冷，再进入加热炉进一步升温，随后送入脱氢反应器进行反应。脱氢后的产物经过水冷和盐水冷却后，进入闪蒸罐进行气液分离，罐底液相组分进一步通过多级冷凝和蒸馏，最终得到高纯度的异丁烯和氢气。

2）闪蒸结合变压吸附分离流程。闪蒸结合变压吸附分离流程利用闪蒸和变压吸附（PSA）技术对脱氢产物进行分离。首先，脱氢产物经过换热冷却后，进入闪蒸罐，分离出大部分 C4 组分，其中液相部分送至产品储罐 [3]。气相部分进入变压吸附装置，利用吸附剂在不同压力下对不同气体的吸附能力差异，将高纯度氢气分离出来，一部分循环使用，另一部分作为产品储存，而解吸气则进一步送入燃料燃烧系统，减少浪费。

3）流程对比及方案选择。为选择最优的工艺流程，需对两种方案进行综合对比，主要考虑因素包括设备投资、运行能耗、产品收率、工艺操作难度及经济效益，详见表 3。

由表 3 综合对比发现，闪蒸结合变压吸附分离流程在设备投资、能耗、操作难度及异丁烷损失率等方面均优于混合制冷液化分离流程，尤其是在降低异丁烷损失率和提高氢气回收率方面更具优势。最终选择闪蒸结合变压吸附分离

表 1　原料组成

| 物质名称 | wt% | 物质名称 | wt% |
|---|---|---|---|
| 甲烷 | 0.0004 | 丁烯 | 0.88 |
| 乙烷 | 0.0015 | 异丁烯 | 0.2 |
| 丙烷 | 1.87 | 顺二丁烯 | 0.05 |
| 丙烯 | 0.13 | 1,3- 丁二烯 | 0.0002 |
| 异丁烷 | 92.93 | 碳五 | 0.0051 |
| 正丁烷 | 3.81 | 二甲醚 | 10ppm |
| 反 -2- 丁烯 | 0.12 | | |

表 2　辅助材料及燃料规格

| 项目 | 低压蒸汽 | 热水 | 冷却水 | 冷却盐水 | 天然气 |
|---|---|---|---|---|---|
| 温度 /℃ | 200 | 50 | 32 | -15 | 25 |
| 压力 /MPa | 0.55 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.2 |

表 3　两种分离流程对比分析

| 项目 | 混合制冷液化分离流程 | 闪蒸结合变压吸附分离流程 |
|---|---|---|
| 设备投资 | 高（需多级冷凝、低温分离设备） | 低（仅需闪蒸罐和变压吸附装置） |
| 运行能耗 | 高（制冷和压缩设备耗能大） | 低（闪蒸和变压吸附能耗低） |
| 操作难度 | 高（涉及深冷技术，维护复杂） | 低（操作简单，维护方便） |
| 异丁烷损失率 | 5.50% | 0.40% |
| 氢气回收率 | 90% | 99.90% |
| 产品纯度 | 高（可达工业级要求） | 高（氢气可达 99.9%，异丁烯可直接使用） |
| 经济性 | 投资及运行成本较高 | 投资及运行成本较低 |

流程作为本工艺的产品分离方案，以确保经济效益和工艺稳定性。

## 3 设备工艺计算和选型

### 3.1 反应器设计

#### 3.1.1 原料加氢反应器设计

原料加氢反应器的主要作用是对异丁烷原料进行加氢处理，去除其中的不饱和烃（如少量的烯烃）以及硫、氮等杂质。这一过程可以减少脱氢催化剂表面的积碳，降低结焦量，并防止催化剂中毒失活，确保后续异丁烷脱氢工艺的稳定运行。由于原料中烯烃含量较低，反应放热效应不明显，因此采用绝热固定床方式进行反应器设计。

本工艺采用固定床加氢反应器，按照绝热固定床设计。反应器的高径比需符合工程规范，以确保合理的催化剂装填量及流体流动特性。根据经验，固定床反应器的高径比通常在 4 ~ 9，本设计中选取的高径比约为 5.83，以满足传质和传热要求。

催化剂用量计算：$V_c = \frac{q_V}{S_V}$

其中 $V_C$——催化剂的体积（$m^3$），$q_v$——物料的体积流量（$m^3$），$S_v$——空速（$h^{-1}$）

#### 3.1.2 异丁烷脱氢反应器设计

异丁烷脱氢反应器是本工艺的核心设备，其主要作用是催化异丁烷脱氢，生成高纯度的异丁烯和氢气。由于脱氢反应是强吸热反应，为保证反应的稳定性和效率，需采用合理的反应器结构，以优化传热效果，提高异丁烷的转化率和异丁烯的选择性。本设计选择连续操作的径向流式反应器，确保物料均匀分布，提高催化剂利用率，同时减少副反应，提高生产效率 [4]。

催化剂用量由进料量和反应空速决定。本工艺中，反应器最大进料量为 7 900 $m^3$/h，选取反应空速 1 000 $h^{-1}$，计算得到催化剂的体积需求。考虑催化剂的装填系数，最终确定实际装填的催化剂体积，以满足反应需求。反应器的性能与中心管和扇形筒的设计密切相关。为了提高流体分布均匀性，中心管内径选为 800 mm，外壁内径为 2 100 mm。扇形筒的体积需与中心管体积相等，以确保流体在径向流动过程中压力分布合理，计算得出扇形筒的内径为 1 800 mm。

### 3.2 催化剂再生系统的设备计算与选型

1）烧焦时间计算。一段烧焦的主要目的是去除催化剂表面约 75% 的焦炭，使催化剂上的焦炭含量由 2.32% 降至 0.59%。本段烧焦在温度 450 ℃、氧含量 1%（体积分数）、总压 0.3 MPa 的条件下进行。在此过程中，催化剂逐步恢复部分活性，并为后续二段烧焦创造良好条件。二段烧焦的目的是进一步去除残余焦炭，将催化剂上的焦炭含量从 0.59% 降低至 0.05%。该阶段在更高温度 480℃、氧含量 0.8%、总压 0.3 MPa 的条件下进行。由于催化剂表面焦炭已大部分去除，反应速率较快，计算得出二段烧焦所需时间为 2.26 h。综合计算，两段烧焦的总时间为 8 h，确保催化剂再生达到预期效果，使其能够再次投入使用，保证异丁烷脱氢反应的高效稳定运行。

2）再生系统中设备的计算与选型。催化剂循环周期为 5 天，每小时循环量计算得出单次再生催化剂量为 1 123.3 kg。根据催化剂密度，计算得到一段烧焦罐和二段烧焦罐的体积需求，并依据工程规范确定高径比。一段烧焦罐直径 750 mm，高度 3 000 mm，二段烧焦罐直径 580 mm，高度 1 740 mm，确保反应空间充足。

3）电加热器和鼓风机选型。根据热量需求计算，一段烧焦段需补充热量，选用功率为 60 kW 的电加热器，二段烧焦段补充 45 kW 的加热器，干燥活化段采用 6 kW 加热器。各加热器采用耐高温电阻材料，确保加热均匀，提高催化剂再生效率。根据风量和升压需求计算，一段烧焦选用风量 17 $m^3$/min、功率 11 kW 的鼓风机，二段烧焦选用风量 4.8 $m^3$/min、功率 3 kW 的鼓风机，干燥活化段选用风量 1.1 $m^3$/min、功率 0.75 kW 的鼓风机，确保空气输送稳定。

## 4 控制系统设计

### 4.1 反应器自动控制

原料加氢反应器为固定床反应器，其主要控制参数为反应压力和床层温度，自动控制系统如图 2 所示。压力控制采用自动调节阀，根据设定压力调节氢气的进料量，确保反应平稳 [5]。床层温度采用多点测温，若温度偏离设定值，通过调整进料预热温度或循环氢流量进行调节，防止过热影响催化剂活性。

异丁烷脱氢反应器采用移动床设计，控制指标包括各段反应器的压差、床层温度及压力。温度控制通过调节进料加热炉的燃料气流量实现；压差和压力通过调节反应器内部物流分布及催化剂循环速率进行优化，以确保反应稳定，提高异丁烯选择性。

### 4.2 换热器自动控制

工艺流程中涉及大量换热设备，为提高能量利用率，采用自动控制系统优化温度调节。对于工艺物流与公用工程换热，采用出口温度与公用工程流量的串级控制，确保换热稳定。对于工艺物流间换热，采用冷物流出口温度与高温物流旁路流量的串级控制，若冷物流温度过高，则增加高温物流流量，以实现精准温控，提高换热效率。

### 4.3 加热炉自动控制

加热炉是提供工艺所需热量的关键设备，采用自动控制系统优化热量分配。对流室温度由出口物流温度与旁路流量的串级控制实现，若温度偏离目标值，则调整烟囱挡板开度进行补偿。辐射室温度通过燃料气流量控制，保证出口温度稳定。整体系统通过计算机监测，实现燃烧优化，提高热效率，降低

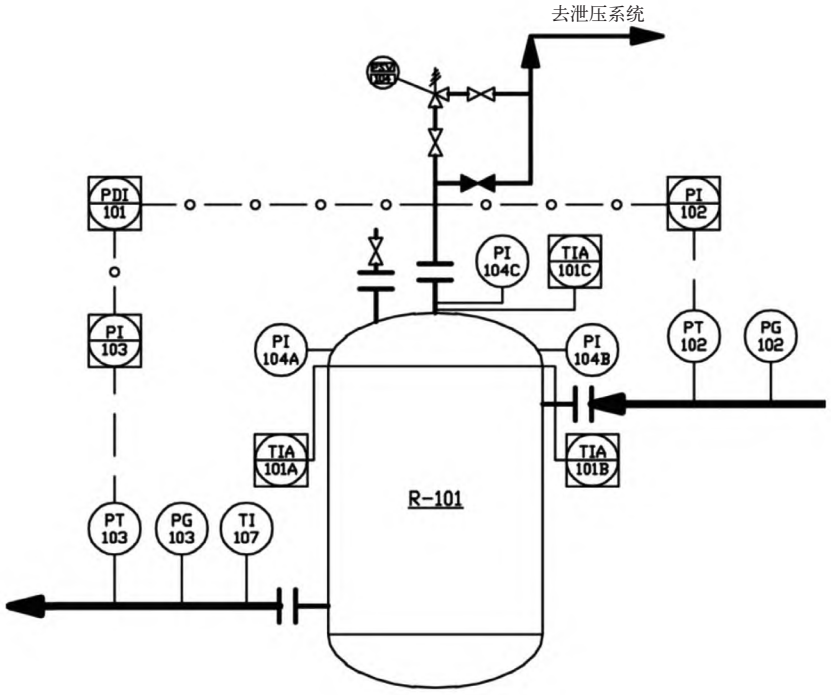


图 2　反应器自动控制系统

能耗。

### 4.4　催化剂再生自动控制

催化剂再生过程需严格控制氧含量和压力，以保证反应系统与再生系统之间的安全切换。通过氮封罐和接收罐调节反应系统与再生系统的压力差，避免烃类与氧气混合。氧含量由氮气和空气的比例控制，确保烧焦过程稳定。催化剂输送时，监测气体成分，防止氧或烃类物质泄漏，确保催化剂安全高效再生。

## 5　总结

本工艺流程围绕异丁烷脱氢工艺，系统设计了原料加氢、异丁烷脱氢、产品分离及催化剂再生等关键环节，并对核心设备进行了详细计算与优化。通过选用合适的催化剂，提高反应选择性，降低副产物生成，同时采用闪蒸结合变压吸附的分离工艺，提高产品纯度，减少能耗。自动控制系统的应用，实现了反应器、换热器、加热炉及催化剂再生系统的精准控制，提高了生产稳定性与安全性。

本研究优化了异丁烷脱氢工艺，提高了经济效益，为工业化应用提供了参考，为后续工艺改进奠定了基础。

**参考文献：**

[1] 易天立，王刚，党法璐，等．异丁烷反向异构化反应热力学分析及反应规律 [J]. 石油学报（石油加工），2023, 39 (04): 780-790.

[2] 景媛媛，董炳利．丁烷脱氢催化剂的研制技术进展 [J]. 合成材料老化与应用，2022, 51 (03): 132-134.

[3] 孟繁胜．异丁烷脱氢进料系统工艺技术研究 [J]. 精细与专用化学品，2021, 29 (11): 51-53.

[4] 吴萍．异丁烷脱氢分离工艺的模拟与分析 [J]. 炼油技术与工程，2020, 50 (11): 5-8.

[5] 刘浩，刘培亮，王政．异丁烷脱氢装置蒸汽降压节能研究 [J]. 精细与专用化学品，2020, 28 (04): 22-24.

广告