

低热值天然气合成氨工艺中的节能技术

黄国祥 刘志刚 田志文 林道君
海洋石油富岛有限公司 海南 东方 572600

摘要：低热值天然气合成氨工艺中，节能技术贯穿原料气预处理、合成气制备、氨合成及系统整体优化环节。预处理阶段通过脱硫工艺优化、转化工序能量回收及增压技术节能；合成气制备环节聚焦甲烷化反应控制、空分装置运行及组分利用；氨合成环节注重合成塔结构、循环气压缩系统及压力调控优化。系统整体通过能量梯级利用、参数协同及柔性调节技术，提升能量利用效率，减少能耗浪费，为工艺节能提供全面技术路径。

关键词：低热值天然气；合成氨；节能技术；能量回收；工艺优化

引言：海洋石油富岛公司化肥二期合成氨装置主要以南海东方1-1气田的天然气为原料，

化剂中毒风险，降低因活性下降增加的能耗补偿，间接实现节能。

表1 天然气设计基础

组成	设计值（体积%）
CH ₄	60.739
C ₂ H ₆	1.212
C ₃ H ₈	0.239
CO ₂	20.700
N ₂	16.800
LHV*（低热值）	5553kcal/Nm ³
总硫（以H ₂ S计）	30mg/Nm ³
有机硫（硫醇COS）	3mg/Nm ³ （以H ₂ S计）

低热值天然气作为合成氨原料，受输气终端供气稳定性制约，组分、压力一直是运行中的变量，在工艺过程中易出现能耗偏高问题。原料气预处理的脱硫、转化及增压环节，合成气制备的甲烷化反应、空分装置运行及组分利用环节，氨合成的合成塔运行、循环气压缩及压力调控环节，均存在能量损耗空间。针对这些环节开发并应用节能技术，可有效降低工艺能耗，提升生产效益，对推动低热值天然气在合成氨领域的高效利用具有重要意义。

1 低热值天然气原料气预处理环节的节能技术

1.1 脱硫工艺的节能优化

低热值天然气中硫成分复杂且含量波动较大，优化脱硫剂选型需结合硫形态特性。选择高活性和稳定性的脱硫剂，可在较低温度下完成反应，减少维持高温的能量输入。^[1]改进脱硫反应条件需精准调控压力和空速。合理提升压力能加快反应速率，缩短气体在反应器内停留时间，降低输送能耗。优化空速参数可避免流速过快导致脱硫不完全或过慢造成能量浪费，使反应在高效与节能的平衡点运行。脱硫效率提升能减少后续转化工序催

1.2 转化工序的能量回收技术

天然气蒸汽转化炉是通过高温高压条件，使天然气与蒸汽在催化剂作用下反应生成合成气的核心设备，正常生产时，流量为380,090kg/hr热的烟道气由引风机驱动，这些烟道气从转化炉辐射段出口的五个烟道和燃机101-JTG旁路乏气来。这些烟道开口的口径，在设计上使烟气通过其的速度与在辐射段内的流速相等。烟道气通过对流段时，与盘管内的介质交换大量的热，这样就实现热量最有效的回收。设计低热值即一段炉的热效率大于88.2%，如表2所示。

表2 烟道气加热盘管设计条件

辐射段转化管	854℃	4,170KPag
辐射段上升管	855℃	3,970KPag
混合原料气盘管	651℃	5,500KPag
热工艺空气盘管	552℃	4,560KPag
HP蒸汽过热盘管	538℃	13,100KPag
原料气预热盘管	440℃	5,500KPag
冷工艺空气盘管	468℃	4,560KPag
锅炉给水预热盘管	343℃	17,600KPag

天然气转化过程会产生大量高温反应热，高效换热设备的应用能够最大限度地提高热交换效率,从而减少能源浪费。随着设备运行时间的延长，盘管翅片管外壁缝隙内沉积附着的积尘、金属氧化物、硫化物垢、粉尘等污垢会降低转化炉热效率，导致烟气出口温度升高，增加了炉管本体和翅片的腐蚀，同时污垢可能堵塞烟气流动，转化炉正压操作。为了保证转化炉盘管的高效节能，应利用装置检修对盘管进行化学清洗，以达到提高热效率，降低能耗的目的。转化炉节能优化还可以从炉体保温和燃烧系统两方面着手。炉体长期在高温高压下

运行,保温砖会出现不同程度裂纹,热量通过炉壁散失,定期对炉体维保和采用新型耐火保温材料,也是有效的节能措施;燃料气含有杂质或凝析油,是影响燃烧器正常工作的原因之一,燃烧器合理布局可使火焰分布更均匀,提高燃料燃烧效率,降低不完全燃烧造成的能量损失。回收的热量可用于原料气预热,提升进入转化炉的天然气温度至反应起始区间,减少燃料消耗。多余热量通过废热锅炉产生饱和蒸汽,直接用于工艺加热,或驱动蒸汽透平带动压缩机等运转,形成能量梯级利用链条,使不同温度热能有效利用,最大限度减少能量浪费。

1.3 低热值原料气的增压节能技术

低热值天然气压力偏低会影响后续工艺的稳定运行,优化增压设备的运行参数需结合原料气的组分和流量特性。通过实时监测原料气的压力和流量变化,动态调整增压设备的输出功率,使增压过程与原料气的实际需求相匹配,避免因功率过剩造成的能量损耗。多级压缩方式通过将总压缩比分配到多个阶段,降低每个阶段的压缩负荷。在各压缩阶段之间设置冷却装置,可及时移除压缩过程中产生的热量,避免气体温度过高导致的压缩效率下降。冷却过程中回收的热量可用于预热工艺用水或其他低温物料,实现能量的二次利用。单级压缩若要达到相同的最终压力,需承受更高的压缩比,容易导致设备运行温度骤升,不仅增加能耗还会缩短设备使用寿命,多级压缩则能有效规避这一问题。

2 低热值天然气合成气制备环节的节能技术

2.1 甲烷化反应的节能控制

甲烷化反应中催化剂性能的优化需兼顾活性与稳定性,选择低温活性优异的催化剂可降低反应启动所需的预热能耗。调整反应温度与压力参数,在满足反应转化率的前提下,避免过度提升反应条件造成的能量损耗^[2]。催化剂的载体结构改良能增强反应物的吸附能力,加快反应速率,缩短达到反应平衡的时间,减少持续加热带来的能源消耗。反应器设计的改进聚焦于强化热量传递效率,采用内置式换热构件可直接将反应产生的热量导出,用于预热未反应的原料气。反应器内壁采用高导热性能材料,减少热量在器壁的积聚损耗,使反应热及时被利用。合理设计气体流动路径,避免局部温度过高或过低导致的能量分布不均,让反应在更均匀的温度场中进行,提升整体能量利用水平。

2.2 低热值气体组分的高效利用技术

低热值天然气中各组分的燃烧特性存在差异,依据不同组分的燃点和燃烧速率调整配气比例,可减少不完全燃烧现象。轻质组分与重质组分的合理搭配能形成

更稳定的燃烧火焰,提升燃烧过程的热释放效率。针对难以转化的轻烃组分,专用转化技术通过调整催化剂的活性中心分布,增强对特定组分的催化作用。优化转化反应的温度和压力条件,打破轻烃分子的稳定结构,使其更易参与后续合成反应。调整反应条件包括精准控制反应体系的氢碳比和反应氛围,使烷烃、烯烃等不同组分均能找到适宜的反应路径。通过优化反应器内的物料混合方式,减少因组分分布不均导致的局部反应效率低下,让原料气中的各类组分充分参与转化,提升整体转化率,避免部分组分闲置造成的能量损失。

3 低热值天然气氨合成环节的节能技术

3.1 合成塔的结构优化

低热值天然气合成氨的反应特性对合成塔内的传质与传热提出特殊要求,优化内件结构需结合反应的放热特点与气体流动规律。新型分布器设计可使原料气在塔内均匀扩散,避免局部气流速度差异导致的反应效率波动,让更多气体参与合成反应。内件中换热元件布局调整能增强热量导出能力,及时将反应热传递至塔外,避免塔内温度过高影响催化剂活性。改进合成塔内衬材料,采用耐高温且导热优良的材质,减少热量在塔壁的散失。合理设计气体通道截面,降低流动阻力,减少推动气体循环的能量输入。内件与塔体间隙优化可避免死体积形成,提高有效反应空间利用率,间接减少维持反应环境的能耗。这些结构改进共同降低能量消耗,提升氨合成整体效率。

3.2 合成气压缩系统的节能改造

合成气压缩机是氨合成环节的主要能耗设备,改进运行方式需关注气体循环量与反应需求的匹配度。变频技术可根据合成塔出口未反应组分含量,实时调整压缩机转速,在循环气量减少时降低输出功率,避免恒定转速下的能量浪费。压缩系统管道布局优化能减少气体输送阻力损失,通过缩短管道长度和减少弯头,降低压缩机额外负荷。压缩机与后续工序的衔接优化体现在压力匹配,使出口压力与合成塔入口压力保持合理差值,避免压力不匹配导致的节流损失。进出口设置缓冲装置,稳定气体压力波动,减少气流冲击造成的能耗增加。定期维护压缩机组,保持设备部件良好配合,降低机械摩擦带来的能量损耗。这些改造从运行和衔接两方面着手,显著降低合成气压缩系统的无用功消耗。

3.3 低热值气源下的合成压力调控技术

低热值天然气的供气稳定性受组分变化影响较大,动态调整氨合成反应压力需建立在气源组分实时监测基础上。气源中有效成分含量较高时,适当提升反应压力

可加快合成速率;有效成分减少时,适度降低压力以减少能量投入,使压力与原料气反应活性适配。气源组分波动时,阶梯式压力调节通过设置多个中间压力等级,使压力变化平稳过渡。每次调节幅度控制在较小范围,避免压力骤变导致的系统能量冲击,维持反应效率稳定^[1]。调节过程中结合反应放热情况,利用压力与温度变化的关联性,通过换热设备将压力调整时释放的能量转化为可利用热能。压力调控与热量回收装置联动,在压力升高阶段利用反应额外热量预热原料气,在压力降低阶段回收系统释放的势能转化为热能。这种协同作用使压力变化中的能量损耗被最大限度回收,确保合成系统在气源波动时仍保持较低能耗水平。

4 低热值天然气合成氨工艺系统整体节能优化技术

4.1 能量梯级利用系统构建

工艺各环节产出多种能量,涵盖高温烟气、中温蒸汽和低温热水等。梳理其温度等级与产出量,结合工序需求,构建多层次梯级利用系统。高温位余热来自转化炉和合成塔产物,适合驱动汽轮机等设备,通过转换带动压缩机或发电机,替代外购电力或机械动力。中低温余热分布在脱硫、空分等环节,适配加热或蒸发工序,经管道输送至原料气预热器、溶液蒸发器等,替代传统加热方式。能量分配中避免高品位低用,通过合理匹配减少降级损耗。设置缓冲装置平衡供需时差,确保体系稳定运行,提升利用效率。

4.2 工艺参数的协同优化

低热值天然气特性对各环节参数设置有特殊要求,需打破单一工序局限,实现全流程协同调整。原料气处理的脱硫温度与压力,需匹配后续转化入口条件,避免预处理参数不当降低转化效率。转化工序的水碳比和反应温度,兼顾合成气制备对氢碳比的需求,减少中间产物不必要转化。合成环节的压力与循环量,适配原料气供应强度,避免合成系统负荷失衡造成上游能耗浪费。建立参数关联模型,气源组分变化时同步调整脱硫时

间、转化炉热负荷和合成塔循环速率,形成全流程有机整体。协同优化需考虑设备运行极限,在安全前提下寻求参数最佳组合,减少局部失衡引发的连锁能耗增加。

4.3 低热值气源波动下的精细化操作

低热值天然气组分与压力受终端供气影响,各个单元的操作是紧密关联互相影响的,精细化操作能有效避免系统的操作难度成倍增加,气源入口设在线分析装置,捕捉组分变化、监测压力波动,数据传至中央调控系统,系统按预设阈值自动发出调节指令。原料气热值下降时,转化炉减燃料并调空气配比,避免燃烧效率下降;供气压力降低时,合成气压缩机调转速匹配下游需求。各工序调节相互关联形成协同响应,转化炉负荷调整时保反应氛围稳定,合成气流量调控时合成塔循环量相应变化以维效率。这种分散式调节分摊波动冲击,避免单一工序过度调节致能耗激增。调节中保持参数在合理区间,渐进调整减少系统震荡,使整体能耗稳定,气源波动时亦无大幅波动。

结束语

低热值天然气合成氨工艺的节能技术从各环节具体优化到系统整体协同,形成了多维度的节能路径。预处理、合成气制备、氨合成环节的技术改进,结合系统层面的能量梯级利用、参数协同及柔性调节,显著提升了能量利用效率。这些技术的应用,不仅降低了工艺能耗,还为应对低热值天然气特性带来的挑战提供了有效方案,为合成氨行业的节能降耗与可持续发展奠定了基础。

参考文献

- [1]宋栋东.合成氨工艺技术的现状及发展趋势[J].山西化工,2022,42(05):31-33.
- [2]熊启海;.合成氨生产过程的节能降耗分析[J].化工管理,2023(07):66-68.
- [3]张婷.煤化工合成氨工艺分析及节能优化对策[J].中国石油和化工标准与质量,2023,43(03):50.