

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

绿色甲醇合成工艺系统设计技术指南

Technical guide for system design of green methanol synthesis process

征求意见稿

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国西部开发促进会 发 布

目 次

前 言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 1

5 总体设计要求 1

 5.1 设计原则 1

 5.2 设计基础条件 2

6 工艺单元系统设计 2

 6.1 原料预处理单元 2

 6.2 合成反应单元 3

 6.3 分离与精制单元 3

 6.4 能量集成与余热回收 4

 6.5 柔性运行适配设计 4

7 主要设备选型设计要求 4

 7.1 核心设备选型 4

 7.2 材料选型 5

 7.3 设备布置 5

8 自控与安全设计 5

 8.1 控制系统 5

 8.2 关键参数控制 5

 8.3 安全防护 5

9 环保与节能设计 5

 9.1 污染物排放控制 5

 9.2 碳排放管控 5

 9.3 节能设计 5

10 施工与验收指导 6

 10.1 施工安装 6

 10.2 试车与验收 6

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

绿色甲醇合成工艺系统设计技术指南

1 范围

本文件规定了绿色甲醇合成工艺系统设计的缩略语、总体原则、工艺单元设计要求、主要设备选型、自控与安全设计、环保与节能设计及施工验收等内容。

本文件适用于绿色甲醇合成工艺系统。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 338—2025 工业用甲醇
GB/T 34250 二氧化碳制甲醇安全技术规程
GB 50160 石油化工企业设计防火规范（附条文说明）（2018版）
GB/T 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准（附条文说明）
NB/T 11968—2025 绿色甲醇
NB/T 12001 甲醇合成反应器制造技术条件

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

绿色甲醇 green methanol

以可再生能源、生物质或捕集的二氧化碳为原料生产，全生命周期碳排放显著低于传统化石基甲醇的甲醇产品。

[来源：NB/T 11968—2025，3.1，有修改]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

DCS：分散控制系统（Distributed Control System）
ESD：紧急停车系统（Emergency Shutdown Device）
SIS：安全仪表系统（Safety Instrumented System）
HAZOP：危险与可操作性分析（Hazard and Operability Analysis）
LOPA：保护层分析（Layer of Protection Analysis）

5 总体设计要求

5.1 设计原则

5.1.1 安全可靠原则

工艺系统设计应符合国家现行安全、消防、防爆相关标准要求，保障装置长周期稳定运行，有效管控物料泄漏、火灾、爆炸、高压设备失效等安全风险。

5.1.2 低碳高效原则

应优先采用能量梯级利用、余热深度回收、物料循环复用等节能降碳技术，优化工艺路径与参数，降低单位产品能耗与碳排放，契合绿色甲醇的低碳属性。

5.1.3 因地制宜原则

宜结合项目所在地的原料供应条件（如二氧化碳气源、可再生能源资源、生物质资源）选择适配的技术路线，兼顾技术先进性、经济性与落地可行性。

5.1.4 协同集成原则

宜推动绿电制氢、二氧化碳捕集与甲醇合成系统的深度耦合，提升系统整体能效与柔性调节能力，适配可再生能源出力波动特性。

5.2 设计基础条件

5.2.1 原料条件

设计前应明确原料气的来源、组分、压力、温度及杂质含量：

- a) 二氧化碳原料纯度不宜低于 98.5%，绿氢纯度不宜低于 99.9%；
- b) 硫化物、氯化物等催化剂毒物含量应低于催化剂耐受阈值，合成气入口总硫含量应控制在 $0.1 \mu\text{L/L}$ （体积分数）以下，总氯含量应控制在 $0.05 \mu\text{L/L}$ （体积分数）以下。

5.2.2 产品要求

产品甲醇质量应符合GB/T 338—2025中 I 型指标要求，同时满足NB/T 11968—2025中4.1规定的绿色甲醇碳足迹分级要求。

5.2.3 公用工程条件

应明确装置所需的循环水、蒸汽、电力、仪表风、氮气等公用工程的供应参数与保障能力，作为系统设计的边界输入。

5.2.4 环境与场地条件

应明确项目所在地的气温、海拔、地震烈度、腐蚀环境等级等自然条件，以及场地红线、周边防护距离等场地约束。

5.2.5 系统边界

绿色甲醇合成工艺系统设计范围宜涵盖原料预处理单元、合成反应单元、分离精制单元、余热回收单元及相应的辅助公用工程系统，边界两端分别接原料气入口与成品甲醇储罐入口。

6 工艺单元系统设计

6.1 原料预处理单元

6.1.1 二氧化碳原料预处理

针对工业捕集的二氧化碳原料气，宜设置脱硫、脱烃、干燥等净化工序，脱除硫化物、氮氧化物、重烃、水分等杂质，保护合成催化剂。预处理后的二氧化碳气体应经多级压缩机加压至合成反应压力等级，压缩过程宜配置中间冷却器，降低压缩能耗。

6.1.2 氢气原料预处理

绿氢原料应根据其产出纯度设置纯化装置，去除电解水制氢携带的微量氧、饱和水分，满足合成反应对原料气的纯度要求。氢气加压宜与二氧化碳加压分开设置，根据原料初始压力匹配压缩级数，出口压力应满足合成回路压力要求。

6.1.3 生物质合成气预处理

生物质气化产生的粗合成气应依次经过除尘、脱焦油、脱硫、脱氯等净化步骤，去除固体颗粒物、焦油、硫化物等杂质。应设置水气变换工序调节合成气的氢碳比，使 $(\text{H}_2-\text{CO}_2)/(\text{CO}+\text{CO}_2)$ 摩尔比控制在2.05~2.15范围内，适配甲醇合成反应的化学计量要求。

6.1.4 原料配比调控

二氧化碳加氢路线中，入塔合成气 H_2/CO_2 摩尔比宜控制在3.0~3.2，保障二氧化碳转化率与甲醇选择性。应设置在线组分分析仪表与流量调节回路，实现原料气配比的动态精准调控。

6.2 合成反应单元

6.2.1 反应器选型

6.2.1.1 甲醇合成反应器宜优先选用等温反应器，通过管间沸腾水移走反应热，稳定床层温度，适用于二氧化碳加氢与合成气制甲醇两类路线。

6.2.1.2 小规模装置可选用绝热多段冷激式反应器，通过段间注冷原料气控制反应温度，降低设备投资与运行压降。

6.2.1.3 反应器制造应符合 NB/T 12001 的相关要求。

6.2.2 工艺参数设计

合成反应操作温度宜控制在220℃~280℃，操作压力宜控制在5.0 MPa~8.0 MPa，具体参数应根据选用催化剂的活性温度窗口与项目技术经济比选确定。反应器床层热点温度不应超过催化剂最高耐受温度，温度偏差宜控制在±5℃以内，避免催化剂高温烧结失活。

6.2.3 合成回路设计

应设置循环气压缩机，将未反应的原料气加压后返回反应器入口，提高原料总转化率，循环比宜控制在5~8之间。应设置弛放气排放管线，持续排放部分循环气以避免惰性气体累积，弛放气宜回收其中的甲醇组分后送入燃料系统综合利用。反应器出口气应依次通过废热锅炉、原料气预热器、水冷器逐级降温，回收反应余热并冷凝粗甲醇。

6.2.4 合成回路设计

6.2.4.1 设置循环气压缩机，将未反应原料气加压后返回反应器入口，提高原料总转化率：

a) 二氧化碳加氢路线循环比宜为6~10；

b) 合成气制甲醇路线循环比宜为5~8。

6.2.4.2 设置弛放气排放管线，持续排放部分循环气以避免惰性气体累积；弛放气宜经氢气回收装置（膜分离或变压吸附）回收氢气后，送入燃料系统综合利用。反应器出口气应依次通过废热锅炉、原料气预热器、水冷器逐级降温，回收反应余热并冷凝粗甲醇。

6.2.5 催化剂保护设计

反应器入口宜设置保护反应器，装填专用脱毒剂，深度脱除原料气中的微量毒物，延长主催化剂使用寿命。系统设计应考虑催化剂升温还原、钝化、卸料的完整操作流程，配置相应的氮气、氢气等公用工程接口与安全泄放设施。

6.3 分离与精制单元

6.3.1 粗甲醇分离

冷却后的反应产物应进入甲醇分离器进行气液分离，分离出的气相作为循环气返回合成回路，液相粗甲醇送入精馏系统。甲醇分离器的设计应保证气液分离效率，避免气相夹带大量液态甲醇造成物料损失与循环机组故障。

6.3.2 甲醇精馏

6.3.2.1 粗甲醇精制宜采用三塔精馏工艺（预精馏塔、加压塔、常压塔），通过能量耦合降低精馏能耗，产品纯度可达 GB/T 338—2025 中 I 型标准。小规模装置可采用双塔精馏工艺，简化流程、降低投资。

6.3.2.2 预精馏塔应脱除粗甲醇中的轻组分杂质，如二甲醚、甲酸甲酯等；常压塔侧线宜抽出杂醇油，保障产品质量稳定。

6.3.3 副产物与废水处理

精馏产生的工艺废水应经汽提回收甲醇后，送入污水处理站处理，出水水质应满足 GB 31571 中的排放要求。杂醇油等副产物宜收集后外销或送入焚烧系统规范处置。

6.4 能量集成与余热回收

6.4.1 合成反应热回收

甲醇合成反应为强放热反应，应通过反应器壳程副产中压饱和蒸汽，回收反应热量，蒸汽可用于精馏再沸器或全厂公用工程。反应器出口高温气体应设置多级换热网络，依次预热原料气、加热锅炉给水，实现余热的梯级利用。

6.4.2 精馏系统能量集成

三塔精馏工艺中，加压塔塔顶蒸汽宜作为常压塔再沸器的热源，降低生蒸汽消耗。精馏塔顶冷凝热宜用于预热进料或全厂生活热水，提升热能综合利用率。

6.4.3 低温热回收利用

系统低温余热（80℃～150℃）宜用于原料预热、伴热、厂区采暖或驱动有机朗肯循环发电，减少低品位热浪费。

6.5 柔性运行适配设计

6.5.1 负荷弹性设计

系统设计负荷弹性不宜小于30%～110% 额定负荷，核心设备选型应满足宽负荷运行要求，操作弹性不小于40%～120%。

6.5.2 缓冲设施设计

设置氢气、二氧化碳原料气缓冲罐，单种气体有效缓冲容量不小于15min额定进料量，平抑原料供给波动，保障合成单元稳定运行。粗甲醇缓冲罐有效容量不小于30min精馏进料量，隔离合成单元波动对精馏系统的冲击。

6.5.3 多能协同接口

耦合可再生能源发电的装置，应预留绿电调度系统接口，支持根据绿电出力调整装置负荷，配套相应的控制逻辑与安全联锁，提升可再生能源消纳能力。

7 主要设备选型设计要求

7.1 核心设备选型

7.1.1 合成反应器

设计压力应高于最高操作压力0.5MPa～1.0MPa，床层压降不宜大于0.3MPa，气体分布器偏流系数不大于5%。内件应保证气体分布均匀、换热效率高，满足宽负荷运行下的温度稳定性要求。

7.1.2 循环气压缩机

宜选用离心式压缩机，压比应满足循环回路压降要求，机组绝热效率不低于78%。大容量装置优先采用蒸汽透平驱动，利用副产蒸汽降低电力消耗。

7.1.3 精馏塔

宜采用浮阀塔或高效填料塔，根据分离精度要求选型。塔内件应保证传质效率高、操作弹性大，浮阀塔板效率不低于60%，填料塔等板高度不大于0.5m。

7.2 材料选型

接触甲醇、氢气的设备与管道材质，应满足介质的腐蚀特性与压力温度等级要求，符合压力容器与压力管道相关设计标准。含硫介质的设备管道应选用耐硫腐蚀材质，避免腐蚀泄漏引发安全风险。

7.3 设备布置

设备布置防火间距应符合GB 50160的相关要求，满足工艺流程顺畅、操作检修方便、安全可靠的原则。合成反应器、高压压缩机等核心设备宜布置在装置中心区域，周边设置环形消防通道与应急疏散通道。

8 自控与安全设计

8.1 控制系统

装置应配置分散控制系统（DCS），实现全流程工艺参数的集中监控、自动调节与数据记录。涉及重大安全风险的环节应配置安全仪表系统（SIS），安全完整性等级应符合风险评估结果。

8.2 关键参数控制

应对反应器床层温度、系统压力、原料气流量、氢碳比等关键参数设置自动调节回路，控制精度应满足以下要求：

- a) 反应器热点温度控制偏差 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ ；
- b) 合成回路压力控制偏差 $\leq 0.1\text{MPa}$ ；
- c) 原料气氢碳比控制偏差 ≤ 0.1 （摩尔比）；
- d) 精馏塔塔顶温度控制偏差 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

8.3 安全防护

8.3.1 可燃气体与有毒气体检测报警设计应符合 GB/T 50493 的相关规定，在甲醇储罐、压缩机厂房、反应器区域等重点部位设置检测探头。装置防爆、防雷、防静电设计应符合 GB 50160 及相关标准要求，爆炸危险区域划分应准确合规。

8.3.2 应设置紧急停车系统（ESD），在出现超温、超压、物料泄漏等异常工况时实现紧急切断与停车，保障人员与设备安全。二氧化碳加氢路线的装置设计还应符合 GB/T 34250 的相关要求。

9 环保与节能设计

9.1 污染物排放控制

装置大气污染物排放应符合GB 31571的相关限值要求，工艺废气宜收集处理后达标排放，无组织排放应得到有效管控。废水排放应满足GB 31571的水污染物排放限值，优先实现废水资源化回用。固体废物应分类收集、规范处置，废催化剂、废吸附剂等危险废物应委托有资质单位处置。

9.2 碳排放管控

装置设计阶段应同步开展全生命周期碳足迹核算，核算方法符合GB/T 24040的相关要求，支撑绿色甲醇产品等级认证。应通过工艺优化、余热回收、绿电替代等措施持续降低装置碳排放强度。

9.3 节能设计

工艺系统宜采用夹点分析方法优化换热网络，减少公用工程消耗。机泵、压缩机等动设备宜选用高效节能型产品，降低电力消耗。装置能量利用效率应作为设计方案比选的核心指标之一。

10 施工与验收指导

10.1 施工安装

装置施工应符合HG/T 20519.1规定的设计深度要求，施工单位应具备相应的化工工程施工资质。高压设备、压力管道的安装与焊接应符合特种设备相关法规标准要求，施工过程中留存完整质量记录。

10.2 试车与验收

装置试车应按照HG 20231的相关要求，依次完成吹扫、气密、单机试车、联动试车与投料试车。装置验收应核查设计文件、施工记录、检测报告等完整资料，考核产品产量、质量、能耗、环保等指标是否达到设计要求。
