

# 大型甲醇合成塔在煤化工项目中的应用

宋全祝\*

(中国神华煤制油化工有限公司北京工程分公司,北京 100011)

**摘要:**通过戴维、鲁奇和托普索甲醇合成塔工艺性能、结构设计、选材、制造、运行维护等方面对比分析,研究各种技术特点,分析甲醇合成塔各自的技术优势和不足,对于甲醇合成塔设计、制造、操作运行以及今后甲醇合成技术选择都具有一定借鉴和指导意义。

**关键词:**甲醇合成塔;工艺性能;结构;对比分析

**中图分类号:**TQ052.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2016)05-0133-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.05.034

## Application of large scale methanol converters in coal chemical projects

SONG Quan-zhu\*

(China Shenhua Coal to Liquid and Chemical Beijing Engineering Company, Beijing 100011, China)

**Abstract:** The process performance, structure design, material selection, manufacture, operation and maintenance, and other aspects of the methanol converters of Davy, Lurgi and Topsoe are analyzed. The technical characteristics are studied. The advantages and disadvantages of each methanol converter are discussed. It has boht referential and instructional significance for the design, manufacture, operation and maintenance of methanol converters and the selection of the methanol synthesis technology in the future.

**Key words:** methanol converter; process performance; structure; comparative analysis

随着煤化工项目装置的大型化,甲醇合成装置规模不断扩大。近几年,神华集团投资建成了3套大型甲醇合成装置,主要原料均为通过煤气化、净化装置生成新鲜合成气,其中,神华内蒙古某煤化工项目甲醇合成装置于2010年建成并投入使用,采用英国戴维(Davy)公司甲醇合成技术,生产规模为180万t/a甲醇;神华宁夏某煤化工项目甲醇合成装置于2011年建成并投入使用,采用德国鲁奇(Lurgi)公司甲醇合成技术,生产规模为167万t/a甲醇;神华陕西某煤化工项目甲醇合成装置于2009年建成,2010年初投入使用,采用丹麦拓普索(Topsoe)公司甲醇合成技术,生产规模为60万t/a。

大型甲醇合成塔是甲醇合成装置核心设备,该设备性能将直接影响甲醇合成过程的效率、能耗,同时也会影响到项目的投资以及甲醇合成装置长期稳定运行。这3套甲醇装置自投产以来总体运行良好,保证了甲醇下游装置原料供应。现就上述3套装置甲醇合成塔工艺性能、结构设计、选材、安装、运行维护等方面进行对比分析。

## 1 甲醇合成塔工艺性能和结构特点

戴维、鲁奇、托普索均采用低压法(5~10 MPa)甲醇合成技术,工艺流程类似,主要区别在于甲醇合成塔结构、催化剂以及反应热回收利用方式不同。

为了确保甲醇合成装置长期稳定、高效运行,甲醇合成塔工艺性能和结构设计应满足下列要求<sup>[1]</sup>。

(1)结构简单,运行可靠,易于制造、安装和维护,避免产生热应力。

(2)能保证气体均匀地通过催化剂层,阻力小,气体处理量大,甲醇单程转化率高,循环比低,确保甲醇产量高。

(3)充分利用合成塔内部空间,多装催化剂,容积利用系数高,且便于催化剂装卸。

(4)有效移除反应热,合理控制反应温度,提高反应效率,延长催化剂使用寿命。

(5)操作稳定,调节方便,满足各种操作工况。

(6)设备尺寸应充分考虑道路运输条件的限制以降低制造成本。

### 1.1 戴维甲醇合成塔

戴维甲醇合成系统采用的是串并联的流程方式,其工艺流程详见图1。新鲜合成气经升压、脱硫后与第二甲醇分离器分离出的循环气混合,经预热后进入第一甲醇合成塔,在催化剂作用下进行甲醇合成反应,反应热被换热管内的水吸收,并副产1.8~2.3 MPa的饱和蒸汽。离开第一甲醇合成塔的反应气经第一入塔预热器对入塔合成气进行预热,经冷却后进入第一甲醇分离器进行分离。分离出的循环气与部分新鲜合成气混合后进入循环气压

压缩机升压后,经第二入塔预热器预热后进入第二甲醇合成塔,该反应气同样副产 1.8~2.3 MPa 的饱和蒸汽,离开第二甲醇合成塔的反应气经第二入塔预热器预热入塔气后,经冷却后进入第二甲醇分离器分离。分离出的大部分循环气与新鲜合成气混合后进入第一合成回路,并同时释放出一部分驰放气。2 台甲醇分离器分离出的粗甲醇去甲醇闪蒸槽。

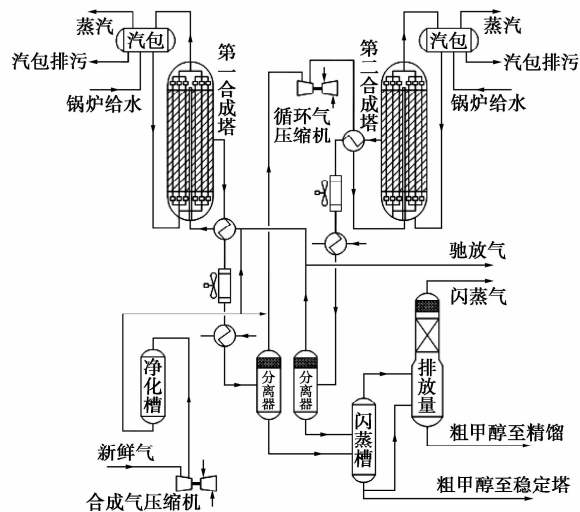


图1 戴维甲醇合成流程示意图

神华内蒙古某煤化工项目设有 2 台甲醇合成塔,结构形式完全相同。该塔采用管束作为冷却换热元件,换热管内走冷却水移走甲醇合成反应热,产

生中压饱和蒸汽。从甲醇合成塔中心到壳体依此同心布置气体分布器、换热管束和气体收集器。催化剂布置在换热管外,从塔顶部人孔填装,管束底部填装惰性瓷球用于支撑催化剂,更换催化剂时,从塔底部人孔卸出。冷却系统包括合成塔内的管束、汽包、上升管和下降管,采用蒸汽动力自循环,不需要外部动力。该合成塔由专利商指定的国外设备供应商制造,在专利商指导下在项目现场填装催化剂和安装气体分布器<sup>[2]</sup>。

该塔工艺设计参数如下:最大操作温度为 317℃(壳程)和 240℃(管程);最大操作压力为 7.61 MPa(壳程)和 3.35 MPa(管程),设计压力为 8.9 MPa(壳程)和 -0.1~4.0 MPa(管程),设计温度为 330℃(壳程)和 260℃(管程),壳程介质为变换合成气和甲醇蒸气,管程介质为蒸汽和水,设备直径约为 3.8 m,筒体切线长度约为 14 m,结构形式为立式,采用中间裙座支撑。壳程合成气入口设置在底部,在筒体上设置 4 个气体出口,设置 4 个冷却水入口,位于塔底部,对应地设置 4 个水/蒸汽出口,位于塔顶部。内件包括管束、气体分布器、气体收集器、催化剂框、开工喷射器以及热电偶等。壳体材料为 SA387 Gr. 22 Cl. 2,换热管材料为碳钢,管板材料为 SA336 Gr. F11 Cl. 3 + 堆焊碳钢,采用应力分析法进行设计和制造,其结构形式如图 2 所示。

(上接第 132 页)

影响,根据物料沸点升高,选择合适的压缩比有助于合理安排设备投资和操作费用。

(3) 维持进料温度处于最佳进料温度有助于减少系统能耗,本文中设计条件下,氯化钠溶液的进料温度为 72.5℃。

## 参考文献

- [1] Hiroyuki Mizuno, Yasuki Kansha, Masanori Ishizuka, *et al.* Agglomeration behluidized-bed evaporator for thermal seawater desalination [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 1(8): 1-8.
- [2] Yasu Zhou, Chengjun Shi, Guoqiang Dong. Analysis of a mechanical vapor recompression wastewater distillation system [J]. *Desalination*, 2014, 353: 91-97.
- [3] Kansha Y, Tsuru N, Sato K, *et al.* Self-heat recuperation technology for energy saving in chemical processes [J]. *Ind Eng Chem Resour*, 2014, 21: 43-50.
- [4] Kansha, Kishimoto A, Tsutsumi A. Application of the self-heat recuperation technology to crude oil distillation [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 43: 153-157.
- [5] Mizuno H, Kansha Y, Kishimoto A, *et al.* Thermal seawater desali-

nation based on self-heat recuperation [J]. *Clean Techn Environ Policy*, 2013, 15(10): 765-769.

- [6] 吴易飞, 韩东, 何玮峰, 等. 维生素低温蒸发结晶单元的自回热设计分析 [J]. *化工学报*, 2014, 65(12): 4831-4838.
- [7] Han Dong, Yue Chen, He Weifeng, *et al.* Energy saving analysis for a solution evaporation system with high boiling point elevation based on self-heat recuperation theory [J]. *Desalination*, 2015, 355: 197-203.
- [8] Han D, He W, Yue Ch, *et al.* Analysis of energy saving for ammonium sulfate solution processing with self-heat recuperation principle [J]. *Appl Energy*, 2014, 73: 641-649.
- [9] Martin Fehlau, Specht E. Optimization of vapor compression for cost savings in drying processes [J]. *Chemical Engineering Technology*, 2011, 23(10): 901-908.
- [10] 梁林. 处理高浓度含盐废水的机械蒸汽再压缩系统设计及性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [11] 韩东, 彭涛, 梁林, 等. 基于机械蒸汽再压缩的硫酸铵蒸发结晶实验 [J]. *化工进展*, 2009, 28(s1): 187-189.
- [12] 高丽丽, 张琳, 杜明照. MVR 蒸发与多效蒸发技术的能效对比分析研究 [J]. *现代化工*, 2012, 32(10): 84-86.
- [13] 顾永泉. 石油化工用离心式压缩机的效率及选取 [J]. *华东石油学院学报*, 1981, (2): 61-69. ■

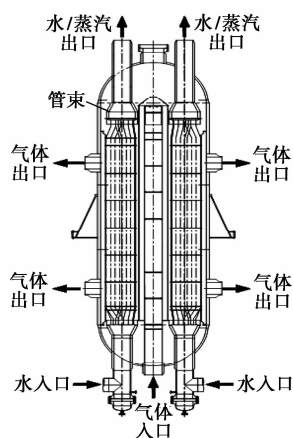


图2 戴维甲醇合成塔示意图

## 1.2 鲁奇甲醇合成塔

神华宁夏某煤化工项目甲醇合成系统采用3台甲醇合成塔,包括1台气冷甲醇合成塔(简称气冷塔)和2台水冷甲醇合成塔(简称水冷塔),其工艺流程详见图3。新鲜合成气经升压、脱硫后,与来自循环气压缩机的循环气混合后进入气冷塔的管程,被壳程的甲醇合成反应热预热,然后分别进入2台并联的水冷塔的管程,管内填满催化剂,底部由惰性瓷球支撑,甲醇合成反应热由管外沸水带走,副产2~4 MPa的饱和蒸汽。产品气从水冷塔底部出来后先混合,然后进入气冷塔的壳程,气冷塔壳程装填催化剂,此股气体在壳程进一步发生甲醇合成反应。最终产品气经冷却、甲醇分离器分离后,将粗甲醇送入膨胀罐,未反应的原料气继续循环<sup>[2]</sup>。

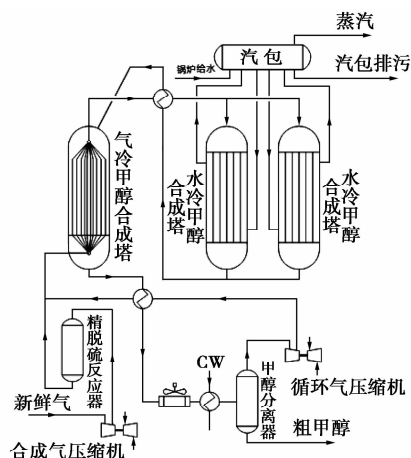


图3 鲁奇甲醇合成流程示意图

3台甲醇合成塔均采用应力分析法进行设计和制造,其中气冷塔内件拥有鲁奇专有技术,该塔外壳为压力容器,由业主委托国内压力容器制造厂制造,其内件由专利商指定厂商供货,在专利商的指导下

在项目现场设备组装和催化剂填装。壳程和管程设计压力均为9.5 MPa,设计温度为300℃(壳程)和270℃(管程),设备直径约为4.3 m,筒体切线长度约为9.7 m,结构形式为立式,采用裙座支撑。管程的合成气入口设置在底部,经气冷塔内件气体轴向流动,在顶部封头上设置2个预热合成气出口。从水冷塔返回的反应气,其入口设置在气冷塔顶部封头上,数量为2个,在壳程催化剂作用下,未反应的合成气进一步发生甲醇合成反应,其反应热用于预热管程进料,产品气出口位于底部封头上。壳体材料为SA387 Gr. 11 Cl. 2,内件材料为不锈钢,设备重量约为280 t,其结构形式如图4所示。

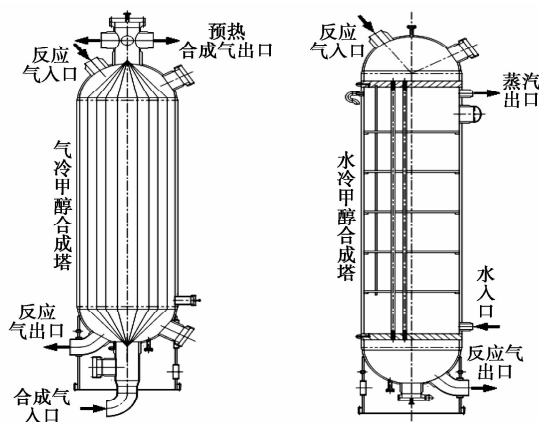


图4 鲁奇甲醇合成塔示意图

2台水冷塔为管壳式反应器结构,其结构形式完全相同,由专利商指定的国内压力容器制造厂供货。工艺设计参数如下:设计压力为5.1 MPa(壳程)和9.5 MPa(管程),设计温度为265℃(壳程)和280℃(管程),管程介质为合成气和甲醇蒸气,壳程介质为蒸汽和水,设备直径约为4 m,管板间距约为7 m,结构形式为立式,采用裙座支撑。管程的反应气入口位于顶部封头,气体经换热管轴向流动,在管内催化剂作用下,部分发生甲醇合成反应,其反应热被管外的沸水带走,副产中压蒸汽,反应气出口位于底部封头上。壳程冷却水从底部进入,管口数量为8个,蒸汽从顶部排出,管口数量为12个。冷却系统包括合成塔内的管束、汽包、上升管和下降管,采用蒸汽动力自循环,不需要外部动力。该塔壳体材料为SA387 Gr. 11 Cl. 2,换热管材料为双向钢,管板材料为铬钼钢+堆焊双向钢,设备单重约为230 t。

## 1.3 托普索甲醇合成塔

托普索60万t/a甲醇合成系统采用1台甲醇合成塔的流程方式,其工艺流程参见图5。新鲜合成气经升压、第一进气/出气换热器预热后,进入硫

保护罐脱硫,并与经升压、预热后循环气混合,从顶部进入甲醇合成塔管程,其管内填满催化剂,底部由惰性瓷球支撑,部分发生甲醇合成反应,反应热由管外沸水带走,产生2.6~3.88 MPa中压蒸汽。产品气从甲醇合成塔底部排出后,经冷却、高压分离器分离后,将粗甲醇送入低压分离器,未反应的原料气继续循环<sup>[2]</sup>。

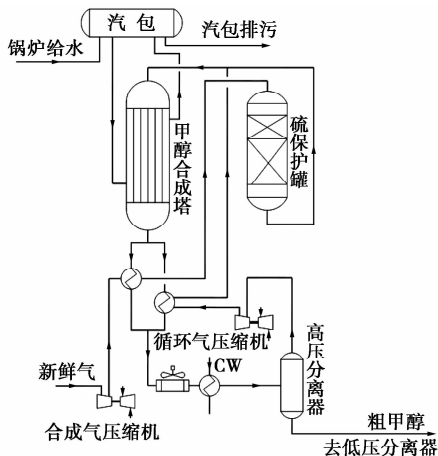


图5 托普索甲醇合成流程示意图

托普索甲醇合成塔为管壳式反应器结构,其结构与鲁奇水冷塔类似,工艺设计参数如下:最大操作温度为253℃(壳程)和261℃(管程);最大操作压力为4.08 MPa(壳程)和8.91 MPa(管程),设计压力为4.65 MPa(壳程)和9.9 MPa(管程),设计温度为260℃(壳程)和300℃(管程),管介质为合成气和甲醇蒸气,壳程介质为蒸汽和水,设备直径约为3.9 m,管板间距约为7.7 m,结构形式为立式,采用裙座支撑。管程的反应气从顶部进入,气体经换热管轴向流动,在管内催化剂作用下,部分发生甲醇合成反应,其反应热被管外沸水带走,副产中压蒸汽,

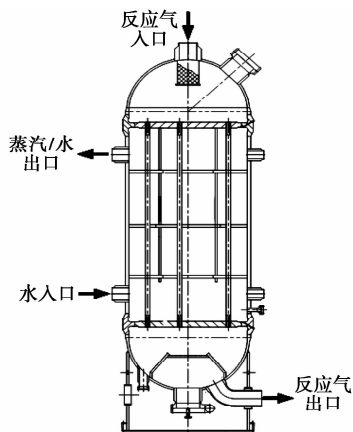


图6 托普索甲醇合成塔示意图

反应气出口位于底部封头。壳程冷却水从底部进入,蒸汽和水从顶部排出,进出管口数量均为8个。冷却系统包括合成塔内的管束、汽包、上升管和下降管,采用蒸汽动力自循环,不需要外部动力。该塔壳程材料为SA516 Gr. 70,管程材料为SA387 Gr. 11 Cl. 2,换热管材料为双向钢,管板材料为铬钼钢+堆焊双向钢,设备重量大约为200 t,采用应力分析法进行设计和制造,其结构形式如图6所示。

## 2 甲醇合成塔对比分析

### 2.1 戴维甲醇合成塔

戴维采用径向甲醇合成塔结构形式,换热管内冷却水移走反应热,催化剂填充在管外,采用专利商指定的催化剂,装填系数高。甲醇合成反应接近绝热温度曲线,从催化剂初期至末期甲醇产量基本稳定。由于采用径向塔,床层阻力小,正常操作情况下,压力降不大于0.05 MPa,且操作稳定。

以年产180万t/a煤制甲醇生产规模为例,设置2台甲醇合成塔,塔径相对较小,单系列生产能力大,适合于大型甲醇合成装置。该技术在国内已经得到广泛应用,运行经验丰富。神华内蒙古某煤化工项目180万t/a甲醇合成装置是国内首次采用戴维甲醇合成技术大规模工业应用。迄今为止,戴维60万t/a及以上甲醇合成技术在国内应用业绩最多。

由于催化剂填充在壳程,便于催化剂装卸。该技术副产1.8~2.3 MPa饱和蒸汽,且压力稳定,便于蒸汽的回收利用。该塔换热管采用碳钢,壳体采用铬钼钢,设备材料成本相对较低。

与其他技术相比,戴维甲醇合成塔单程甲醇转化率偏低,循环比偏大。该塔因内件复杂,设备制造难度较大,而且水压试验后,液体不易排净。在神华项目中,甲醇合成塔货到现场后,经检查发现内部锈蚀严重,由北京某公司进行化学清洗。

从实际运行情况来看,由于合成塔壳体和内件采用铬钼钢和碳钢,存在结蜡现象;甲醇合成塔催化剂上部床层局部热点易出现超温现象,2台甲醇合成塔最高时可达303℃和299℃,合成系统曾出现过因床层超温而导致联锁停车。经过分析论证,首次工业化的甲醇合成塔换热面积设置偏小,未能及时移走反应热,造成局部超温。而催化剂床层局部超温,副反应增多,结蜡更加严重。为了稳定生产,采用以下措施:①控制合成塔汽包压力至1.6 MPa,低于设计值,从而减低床层热点温度;②降低原料气入塔温度,控制床层内部反应热,可降低床层温度;

③调整新鲜合成气的组分,降低氢碳比,从而控制反应热;④调整合成塔热点温度联锁温度设定值,由设计值 290℃ 提高到 295℃<sup>[3]</sup>。

针对运行存在的问题,戴维在神华新疆新建某煤化工项目合成塔的设计上进行了 3 个方面的改进:①增大换热面积,增加换热管根数;②原料气采用合成塔上下同时均匀进气;③顶部增设排气口等措施。

## 2.2 鲁奇甲醇合成塔

鲁奇采用串联式甲醇合成工艺,2 台水冷塔并联后与 1 台气冷塔串联形式,采用专利商指定的催化剂。由于水冷塔出口温度较高(260℃),使得甲醇合成反应能够较快地进行,换热管外沸水较快地移走反应热,有利于甲醇合成。其余的甲醇转化发生在气冷塔中。因此,气冷塔和水冷塔的配置显著提高了反应的单程转化率,降低了循环比,节省了循环气压缩机的功率<sup>[2]</sup>。

鲁奇甲醇合成反应接近等温度曲线,床层温度变化较小,易于操作,副反应少,结蜡现象少,从催化剂初期至末期甲醇产量基本稳定。由于水冷塔操作温度较高,使得副产蒸汽压力比戴维工艺要高,有利于蒸汽的利用<sup>[4]</sup>。

水冷塔采用管壳式反应器结构,催化剂装在换热管内,床层阻力大,正常操作情况下压力降大约为 0.3 MPa。以年产 180 万 t/a 煤制甲醇生产规模为例,设置 2 台水冷塔,塔径大约 4.1 m,配备 1 台气冷塔,塔径大约为 4.3 m,单系列生产能力大,适合于大型甲醇合成装置。由于水冷反应器催化剂装在管内,气冷反应器催化剂装在壳程,便于催化剂装卸。从神华宁夏某煤化工项目甲醇装置运行情况来看,气冷反应器甲醇实际转化率还不理想,需要进一步改进。

由于气冷塔结构比较复杂,其壳体采用铬钼钢,内件为不锈钢;水冷合成塔壳体材料为铬钼钢,换热管材料为双向钢,管板材料为铬钼钢+堆焊双向钢,且管板厚、加工难度大,设备费用较高。专利商已对国内几家设备制造厂授权,合成塔已实现国产。截至目前,鲁奇 60 万 t/a 及以上甲醇合成技术在国内应用业绩比戴维要少。

## 2.3 托普索甲醇合成塔

以年产 180 万 t/a 煤制甲醇生产规模为例,托普索采用 3 台并联甲醇合成塔工艺,采用专利商指定的催化剂。由于甲醇合成塔出口温度较高(261℃),在专用催化剂作用下,使得甲醇合成反应

能够较快地进行,依据神华陕西某煤化工项目实际运行情况,该装置甲醇反应器出口甲醇体积分数为 17.14%,高于设计值 14.63% 的要求,循环比为 1.8~1.9,满足 1.77~2.26 设计要求,因此,托普索甲醇合成工艺甲醇单程转化率高,循环比低,节省了循环气压缩机的功率<sup>[5]</sup>。

在合成塔上管板上设置了一层绝热催化剂床层,减小了合成塔尺寸,且催化剂装满换热管,有效地利用了换热管长度。托普索甲醇合成反应接近等温度曲线,床层温度变化较小,易于操作,副反应少,结蜡现象少,从催化剂初期至末期甲醇产量基本稳定。由于甲醇合成塔操作温度较高,使得副产蒸汽压力比戴维工艺要高,有利于蒸汽的利用。

甲醇合成塔结构与鲁奇水冷塔类似,采用管壳式反应器结构,采用应力分析法设计,减少了设备的重量,催化剂装在换热管内,床层阻力大,正常操作情况下压力降大约为 0.3 MPa。

甲醇合成塔壳体材料为碳钢,管程材料为铬钼钢,换热管材料为双向钢,管板材料为铬钼钢+堆焊双向钢,管板加工难度大,设备费用较高。专利商已对几家国内设备制造厂授权,合成塔已实现国产。迄今为止,托普索 60 万 t/a 及以上煤制甲醇技术在国内应用业绩还不是很多。

## 3 结语

通过神华 3 套甲醇合成装置甲醇合成塔对比分析,可以看出各自的特点、技术优势和不足,选用戴维、鲁奇、托普索 60 万 t/a 及以上甲醇合成技术都有成熟的大型装置成功运行经验,风险都较小。在甲醇合成技术选择阶段,建议借鉴已有装置成功运行经验,根据装置规模、建设地点以及运输条件等,尽量避免甲醇合成塔现场制造以降低设备造价,合理选择甲醇合成技术。

## 参考文献

- [1] 冯元琦. 甲醇工学[M]. 北京:化学工业出版社,1991:180-195.
- [2] 吴秀章. 煤制低碳烯烃工艺与工程[M]. 北京:化学工业出版社,2014:181-271.
- [3] 李雪冰,闫国富. 甲醇合成塔床层超温原因分析[J]. 化工设计通讯,2011,(4):69-72.
- [4] 邓刚荣. Lurgi 甲醇合成塔与 Davy 甲醇合成塔的比较[J]. 化工设计通讯,2014,(4):67-69.
- [5] 王剑峰. 托普索甲醇合成技术的应用与实践[J]. 神华科技,2013,(4):71-73. ■