

# 高含氮天然气冷油吸收工艺参数 模拟分析

马国光<sup>1</sup>, 郭海星<sup>1\*</sup>, 姚丽蓉<sup>2</sup>

(1.西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;

2.中石化西北油田分公司石油工程技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:**为脱除高含氮天然气中氮气, 获得满足商品气指标的天然气, 采用C<sub>5</sub>作为吸收剂在低温下吸收天然气中的甲烷, 利用HYSYS软件对冷油吸收工艺过程中温度、压力、溶剂循环量以及吸收塔板数进行研究分析, 同时采用多指标正交模拟试验考察工艺参数对甲烷回收率、净化气氮气含量以及过程功耗等工艺指标的影响程度, 并通过综合平衡法优选出较优方案。结果表明, 当温度为-20℃、压力为3.5 MPa、循环量为5 000 kmol/h、塔板数为14时可达较好的处理效果。

**关键词:**高含氮天然气; 冷油吸收工艺; HYSYS模拟; 综合平衡法

中图分类号: TE645

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)07-0227-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.07.052

## Parameters simulation and analysis of cold oil absorption process for high nitrogen-containing natural gas

MA Guo-guang<sup>1</sup>, GUO Hai-xing<sup>1\*</sup>, YAO Li-rong<sup>2</sup>

(1.College of Petroleum Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2.Petroleum Engineering Technology Research Institute, Sinopec Northwest Oil Field Company, Urumqi 830011, China)

**Abstract:** In order to remove nitrogen from high nitrogen-containing natural gas to meet commercial gas specifications, C<sub>5</sub> is used as an absorbent to absorb methane in natural gas at a low temperature, and the temperature, pressure, solvent circulation amount and the number of absorber trays of the cold oil absorption process are studied and analyzed by HYSYS software. Meanwhile, multi-index orthogonal simulation test is used to explore the influences of process parameters on the methane recovery rate, nitrogen content in purified gas and process power consumption. A better solution is selected by comprehensive balance method. The results show that the treatment effect will be better when the temperature is -20℃, the pressure is 3.5 MPa, the circulation amount of solvent is 5 000 kmol per hour and the number of plate is 14.

**Key words:** high nitrogen-containing natural gas; cold oil absorption process; HYSYS simulation; comprehensive balance method

部分常规和非常规天然气中含有较高浓度的氮气, 氮气的存在会降低天然气的热值, 使得天然气无法满足管道输送的要求(氮气体积分数小于4%), 同时也会降低管输能力、增加动力和燃料消耗<sup>[1-2]</sup>。因此, 脱除天然气中的氮气具有十分重要的意义。

目前国内外有5种天然气脱氮工艺<sup>[3-6]</sup>: 深冷脱氮工艺(CNR)、溶剂吸收工艺、变压吸附工艺(PSA)、膜分离工艺和水合物技术。其中, 深冷脱氮应用最为广泛<sup>[7]</sup>, 但其能耗高, 工艺复杂。变压吸附技术工艺简单<sup>[8]</sup>, 但现有吸附剂的选择性系数较低。膜分离技术能耗低, 但现有分离膜的分性能

不够高。水合物技术工艺条件温和, 能耗低, 但气体分离效率低<sup>[9]</sup>。溶剂吸收工艺操作条件温和, 操作弹性大, 大多设备可采用碳钢制造<sup>[10]</sup>, 投资较小, 存在的主要问题是溶剂对烃类(主要是甲烷)的溶解度较小, 造成溶剂循环量较大, 能耗较高。目前, 国内对溶剂吸收法脱氮工艺的研究和应用很少, 而国外对该工艺有所研究, 并有少量工业应用, 实践证明该工艺可以用于处理中小规模的含氮天然气, 并能获得较高的产品纯度和甲烷回收率, 具备一定的工业应用价值。

冷油吸收工艺是溶剂吸收的一种, 原理是利用

收稿日期: 2018-03-27; 修回日期: 2018-05-02

作者简介: 马国光(1964-), 男, 博士, 副教授, 主要从事天然气的集输与处理、LNG技术等研究工作; 郭海星(1993-), 男, 硕士生, 通讯联系人, 1793576722@qq.com。

天然气中甲烷等烃类物质与氮气在溶剂中的溶解度不同而达到分离的目的。基于 HYSYS 软件,本文中着重对冷油吸收过程中的几个关键参数进行了模拟分析。

## 1 HYSYS 模型建立

### 1.1 天然气气质条件

天然气进料温度 25℃, 进料压力 2.7 MPa, 原料气组成见表 1。原料气处理量为  $50 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表 1 天然气组成 %

组分	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	N <sub>2</sub>
体积分数	69.4	0.63	0.22	0.15	30.6

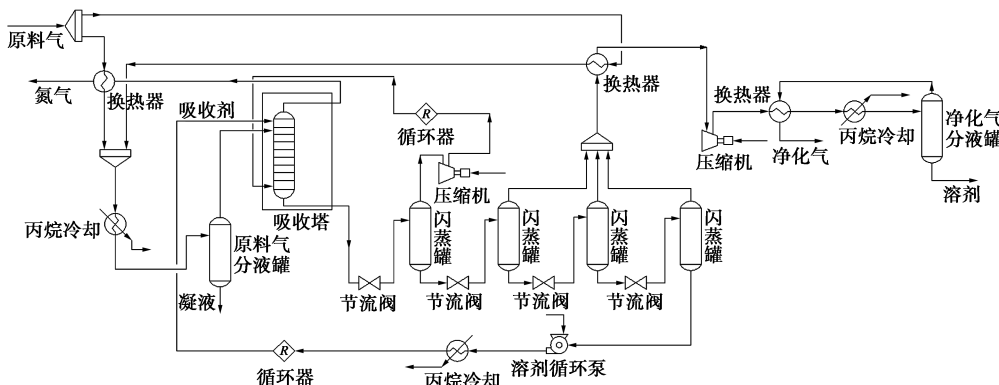
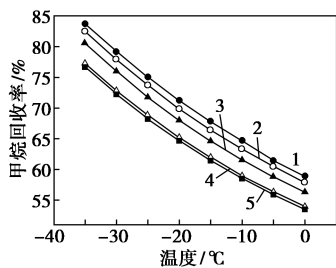


图 1 HYSYS 工艺流程

### 1.3 吸收剂选择

吸收剂是工艺的关键,所选吸收剂需对烃类溶解度大、稳定性高、黏度小。由相似相溶原理<sup>[11]</sup>,甲烷可溶于与其结构相似的非极性溶剂,本文中首先研究几种正构烷烃作为吸收剂时对 CH<sub>4</sub> 的回收效果。

图 2 中,甲烷在几种吸收剂中的回收率随着温度的降低而升高。温度一定,溶剂碳原子数越多,甲烷回收率越低。以 C<sub>5</sub> 作为吸收剂时的甲烷回收率要高于其余几种溶剂,另外,由图 3 过程功耗与温度

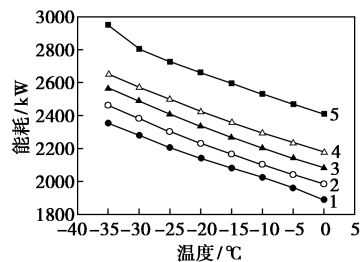


1—C<sub>5</sub>; 2—C<sub>6</sub>; 3—C<sub>7</sub>; 4—C<sub>8</sub>; 5—C<sub>10</sub>

图 2 甲烷在正构 C<sub>5</sub>、C<sub>6</sub>、C<sub>7</sub>、C<sub>8</sub>、C<sub>10</sub> 烷烃中的回收率和温度的关系

### 1.2 工艺流程

图 1 为 HYSYS 工艺流程。原料气预冷至 18℃ 左右,之后由丙烷冷却系统冷却。脱除凝析液后的气体物流进入吸收塔中部,与塔顶贫液逆向流动接触,甲烷溶解于其中,氮气物流则由塔顶离开。富液流出塔底,经逐级闪蒸解吸出甲烷后再生,压力降至 150 kPa。再生后的贫液经溶剂循环泵增压至塔顶压力,冷却至原料气进塔温度后送回塔顶。在吸收塔内,少量氮气溶解于溶剂中,导致一级闪蒸气中氮含量较高,这部分气体经增压后送回吸收塔底部进行再次吸收。二、三、四级闪蒸气经过换热、增压、冷却并回收其中携带的少量轻油溶剂后输出。



1—C<sub>5</sub>; 2—C<sub>6</sub>; 3—C<sub>7</sub>; 4—C<sub>8</sub>; 5—C<sub>10</sub>

图 3 甲烷回收过程的功耗和温度的关系

的关系曲线可知,在几种溶剂中,以 C<sub>5</sub> 作为吸收剂时的功耗最小。综上,本研究采用 C<sub>5</sub> 作为吸收剂。

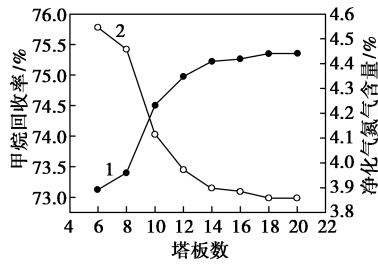
## 2 吸收过程模拟分析

### 2.1 工艺参数模拟

#### 2.1.1 塔板数

塔板数变化对甲烷回收率以及净化气氮气含量(体积分数,下同)的影响如图 4 所示。随着塔板数的增加,甲烷回收率先增加,之后趋于平缓;净化气氮气含量逐渐降低,之后基本保持不变。当塔板数超过 14 时,塔板数的增加对净化效果影响很小。因

此,塔板数取 14 块。

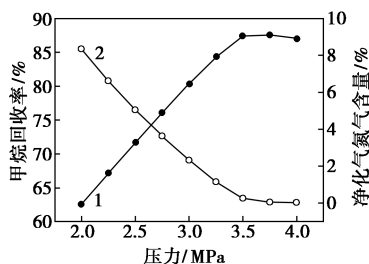


1—甲烷回收率;2—净化气氮气含量

图4 塔板数对甲烷回收率及净化气氮气含量的影响

### 2.1.2 吸收塔压力

吸收塔压力对净化效果的影响如图 5 所示。随着吸收塔压力的升高,净化气中氮气含量逐渐降低,甲烷回收率逐渐增大。当压力达到 3.5 MPa 时,此时增大压力对处理效果的影响不明显,且会增大能耗。经计算,当压力由 2 MPa 增大到 4 MPa 时,甲烷回收率由 62.59% 增大到 87.08%,而能耗增长了 1 倍左右。为了在获得较高回收率的同时降低能耗,压力可取 2.6~3.5 MPa。

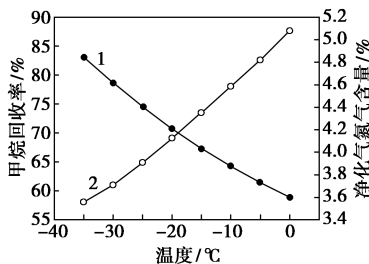


1—甲烷回收率;2—净化气氮气含量

图5 吸收塔压力对甲烷回收率及净化气氮气含量的影响

### 2.1.3 温度

温度是影响吸收效果的一个关键参数。考察天然气进塔前的冷却温度对净化效果的影响,如图 6 所示。



1—甲烷回收率;2—净化气氮气含量

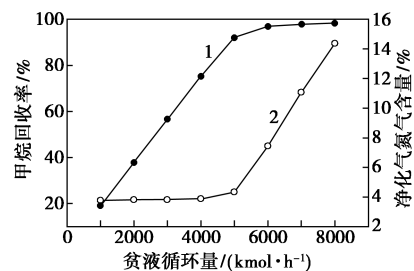
图6 原料气进塔温度对净化气氮气含量的影响

净化气氮气含量随着温度的降低而减小,甲

烷回收率随温度降低而增大。这是因为吸收过程是放热的,温度降低使得相平衡常数减小,促进甲烷在溶剂中的溶解。当温度从 0℃ 降到 -35℃ 时,甲烷回收率由 58.89% 增大到 83.13%,增长率 41.16%;能耗由 1 886.64 kW 增大到 2 303.07 kW,增长率 22.07%。可以看出降低温度更有利于提高甲烷回收率,为回收更多的甲烷,操作温度可取 -35~-20℃。

### 2.1.4 贫液循环量

贫液循环量对净化效果的影响如图 7 所示。随着循环量的增大,甲烷回收率快速上升,当超过 5 000 kmol/h 时,增大溶剂循环量对提高甲烷回收率作用很小,而这时净化气中氮气含量快速上升。另外,溶剂循环量的增大会导致能耗快速增加,当循环量由 1 000 kmol/h 增加到 8 000 kmol/h 时,甲烷回收率由 19.11% 增大到 98.38%,增长了 4 倍;能耗由 786.47 kW 增大到 3 429.58 kW,增长了 3.4 倍。由此可知,循环量的变化对能耗及甲烷回收率均有很大影响。该工艺循环量可取 4 000~5 000 kmol/h。



1—甲烷回收率;2—净化气氮气含量

图7 贫液循环量对甲烷回收率以及净化气氮气含量的影响

## 2.2 综合平衡分析

研究中涉及到 3 个指标,故本文中对模拟结果采用综合平衡法进行分析。首先对各个指标分别进行单指标直观分析,对工艺参数重要性进行排序,找出各个指标下的最优组合,之后根据各指标重要性及各指标影响因素主次顺序,综合分析确定出一个对各个指标都较好的共同方案<sup>[12]</sup>。

### 2.2.1 单指标直观分析

采用  $L_{16}(4^5)$  正交表安排模拟试验,将温度、塔压力、循环量分别安排在第 1、2、3 列,E、F 列为空白列。 $R$  为极差,反应了因素水平波动时,指标的变动幅度。根据  $R$  值大小,可以判断各因素对指标的影响主次。 $R$  越大,说明因素对试验指标的影响越大,因素越重要<sup>[13]</sup>。模拟结果见表 2,结果分析见表 3。

表 2 正交模拟计算结果

序号	因素				结果			
	温度 A/°C	压力 B/MPa	循环量 C/(kmol·h <sup>-1</sup> )	E	F	甲烷回收率/%	净化气氮气含量/%	能耗/kW
1	-20	2.6	4100	1	1	70.69	4.76	2066.98
2	-20	2.9	4400	2	2	81.05	3.11	2464.07
3	-20	3.2	4700	3	3	90.97	1.85	2941.20
4	-20	3.5	5000	4	4	96.28	1.85	3411.50
5	-25	2.6	4400	3	4	79.66	4.58	2261.81
6	-25	2.9	4100	4	3	79.71	2.88	2382.04
7	-25	3.2	5000	1	2	96.03	3.06	3077.52
8	-25	3.5	4700	2	1	96.02	1.53	3317.09
9	-30	2.6	4700	4	2	89.15	4.53	2456.48
10	-30	2.9	5000	3	1	95.87	4.21	2817.03
11	-30	3.2	4100	2	4	88.97	1.40	2760.50
12	-30	3.5	4400	1	3	95.95	1.15	3234.93
13	-35	2.6	5000	2	3	95.51	5.39	2614.12
14	-35	2.9	4700	1	4	95.83	3.90	2751.44
15	-35	3.2	4400	4	1	95.86	2.39	2922.83
16	-35	3.5	4100	3	2	95.53	0.84	3150.46
甲烷回收率								
$k_1$	84.75	83.75	83.72	89.62	89.61			
$k_2$	87.86	88.12	88.13	90.39	90.44			
$k_3$	92.48	92.95	92.99	90.51	90.54			
$k_4$	95.68	95.95	95.92	90.25	90.19			
$R$	10.93	12.19	12.20	0.88	0.93			
净化气氮气含量								
$k_1$	2.89	4.81	2.47	3.22	3.22			
$k_2$	3.01	3.52	2.81	2.86	2.88			
$k_3$	2.82	2.17	2.95	2.87	2.82			
$k_4$	3.13	1.34	3.63	2.91	2.93			
$R$	0.31	3.47	1.16	0.36	0.40			
能耗								
$k_1$	2720.94	2349.85	2590.00	2782.72	2780.98			
$k_2$	2759.61	2603.65	2720.91	2788.95	2787.13			
$k_3$	2817.24	2925.52	2866.55	2792.63	2793.08			
$k_4$	2859.72	3278.49	2980.04	2793.21	2796.31			
$R$	138.78	928.65	390.04	10.49	15.33			

表 3 结果分析表

指标	主次顺序	优化水平组合
甲烷回收率/%	CBA	A <sub>4</sub> B <sub>4</sub> C <sub>4</sub>
净化气氮气含量/%	BCA	A <sub>3</sub> B <sub>4</sub> C <sub>1</sub>
能耗/kW	BCA	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>

表 3 中列出了工艺参数对各个指标的影响主次排序。对 3 个指标分别进行计算分析后,得出 3 个较优水平组合。

### 2.2.2 方案优选

各因素对指标的极差值及相应优选方案如表 4

所示。

表4 各因素极差及优方案汇总表

	温度/℃	压力/MPa	循环量/(kmol·h <sup>-1</sup> )
甲烷回收率/%			
极差	10.93	12.19	12.20
优方案	A <sub>4</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>
净化气氮气含量/%			
极差	0.31	3.47	1.16
优方案	A <sub>3</sub>	B <sub>4</sub>	C <sub>1</sub>
能耗/kW			
极差	138.78	928.65	390.04
优方案	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>

压力对各指标的影响:对于净化气氮气含量和能耗来说,压力的极差都是最大,说明压力对这2个指标影响最大;对于甲烷回收率,压力极差与循环量极差相差无几,压力对回收率影响较大。另外,对甲烷回收率以及净化气氮气含量来讲,压力均取 B<sub>4</sub> 水平为最好,对3个指标综合分析,压力取 B<sub>4</sub> 水平为好。

循环量对各指标的影响:对甲烷回收率来说,循环量极差最大。而对另外2个指标,循环量极差均不是最大,不是影响最大的因素。这里选取循环量作为主要影响因素时的优水平,即 C<sub>4</sub>。

温度对各指标的影响:在3个指标中,温度的极差均不是最大,均为次要影响因素。这里以节能为选取依据,温度水平取为 A<sub>1</sub>。

通过综合分析,得出一个新的方案:A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>4</sub>,即温度取-20℃,压力取3.5 MPa,循环量取5 000 kmol/h。对新方案追加模拟试验,经过计算,甲烷回收率为96.37%,净化气中氮气含量为1.83%,功耗为3 416.69 kW。在新的方案条件下,甲烷回收率高于之前16组,净化气中氮气含量较低,但功耗较高。

### 3 结论

(1)借助 HYSYS 软件,对温度、压力、溶剂循环量及塔板数进行了模拟,结果表明,合适的温度范围为-35~-20℃,压力为2.6~3.5 MPa,循环量为4 000~5 000 kmol/h,塔板数为14块。

(2)通过直观分析,确定了各参数对不同指标的影响程度。对甲烷回收率来说,影响因素主次顺序依次为循环量、压力、温度;对净化气氮气含量来说,影响因素主次顺序依次为压力、循环量、温度;对能耗来说,影响因素主次顺序依次为压力、循环量、温度。

(3)采用综合平衡法为多因素多指标过程确定出一个较优的共同方案 A<sub>1</sub>B<sub>4</sub>C<sub>4</sub>,即温度取-20℃,压力取3.5 MPa,循环量取5 000 kmol/h。在实际应用中,应根据需求,通过调节相关指标的主要影响因素来达到目标。

### 参考文献

- [1] 李雯,王志,李潘源,等.用于甲烷-氮气体体系分离的膜技术研究进展[J].化工学报,2016,(2):404-415.
- [2] 刘成军,王志刚,钟建强.天然气脱氮工艺综述[J].石油规划设计,2000,(4):18-20.
- [3] Rufford T E, Smart S, Watson G C Y, et al. The removal of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub> from natural gas: A review of conventional and emerging process technologies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, 94/95: 123-154.
- [4] Kuo J C, Wang K H, Chen C. Pros and cons of different nitrogen removal unit (NRU) technology[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2012, 7: 52-59.
- [5] 赵娜.低浓度煤层气提纯技术与应用的研究进展[J].广东化工,2016,(20):133-135.
- [6] 郭璞,李明.煤层气中 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 分离工艺研究进展[J].化工进展,2008,(7):963-967.
- [7] 操璞.贫天然气分离净化过程模拟与优化[D].湘潭:湘潭大学,2012.
- [8] 黄丽平,李广学.变压吸附技术在工业上的应用与发展[J].广东化工,2011,38(3):14-15.
- [9] 杨西萍,刘煌,李赞.水合法分离混合物技术研究进展[J].化工学报,2017,68(3):831-840.
- [10] Mehra Y R, Wood G C, Ross M M. Noncryogenic N<sub>2</sub>-rejection process gets Hugoton field test[J]. Oil and Gas Journal, 1993, 91: 62-70.
- [11] 夏立先,纪丙全.相似相溶原理的几种重要应用[J].中学化学教学参考,1998,(S1):74-75.
- [12] 苑玉凤.多指标正交试验分析[J].湖北汽车工业学院学报,2005,19(4):53-56.
- [13] 滕海英,祝国强,黄平,等.正交试验设计实例分析[J].药学服务与研究,2008,(1):75-76. ■