

# 盐卤伴生气用作 CNG 的 脱水脱重烃撬装化技术方案研究

李良均<sup>1</sup>, 马 宁<sup>1</sup>, 王治红<sup>2\*</sup>

(1. 四川科宏石油天然气工程有限公司, 四川 成都 610213; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

**摘要:**提出了盐卤伴生气脱水脱烃的 4 种撬装化技术方案: 预增压+GWF 方案、级间抽出+GWF 方案、预增压+丙烷制冷方案和级间抽出+丙烷制冷方案, 通过模拟计算获得了各方案的主要工艺参数, 并对各个方案的投资、能耗进行了对比分析。结果表明, 2 种级间抽出方案不如 2 种预增压方案的工艺简单, 在投资、能耗、装置的稳定性方面均不具优势; 预增压+GWF 方案虽然在能耗方面较预增压+丙烷制冷方案略高, 但它在投资、管理、操作、维护以及收益方面均优于后者, 且无需考虑水合物冻结问题。因此, 该盐卤伴生气用作 CNG 利用的脱水脱烃撬装化技术方案中, 预增压+GWF 方案是 4 种方案中最具优势的一种。

**关键词:**伴生气; CNG; 超音速分离; 脱水脱重烃; 撬装装置

中图分类号: TE644

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2019)01-0222-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.01.048

## Using salt-brine associated gas in skid-mounted technology scheme for dehydration and removing water heavy hydrocarbons from CNG

LI Liang-jun<sup>1</sup>, MA Ning<sup>1</sup>, WANG Zhi-hong<sup>2\*</sup>

(1. Sichuan Kehong Petroleum and Natural Gas Engineering Co., Ltd., Chengdu 610213, China;

2. Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Four skid-mounted technology schemes are proposed, including pre-pressurization + GWF scheme, interstage pressure boosting+GWF scheme, pre-pressurization+propane refrigerant cycle scheme and interstage pressure boosting+ propane refrigerant cycle scheme. Through analog computation, the primary technological parameters are obtained for four schemes, and the investment and energy consumption for each scheme is compared and analyzed. Consequently, it is proved that two interstage pressure boosting schemes are inferior to two pre-pressurization schemes in terms of process simplicity, investment, energy consumption and facility stability. Although the pre-pressurization+GWF scheme needs higher energy consumption than the pre-pressurization+propane refrigerant cycle scheme, it is superior to the latter in terms of investment, management, operation, maintenance and profit, and it does not exist the problem of freezing and plugging of hydrate. So there comes to a conclusion that the pre-pressurization+GWF scheme is the best among the four schemes.

**Key words:** associated gas; CNG; supersonic gas separation; dehydration and removing heavy hydrocarbons; skid-mounted facility

四川省川中地区拥有丰富的盐卤伴生气资源, 该类伴生气富含重烃, 且 CO<sub>2</sub> 含量低, 不含 H<sub>2</sub>S, 是一种优质的清洁能源。但往往因单井产量较小、井口压力低和温度高, 导致回收利用成本高, 往往通过放空至火炬处理, 造成了资源的巨大浪费。压缩天然气(CNG)作为一种最理想的车用替代能源, 以低成本、高效益、无污染、使用方便等特点备受青睐<sup>[1]</sup>。近年来, 随着国家力求改变城市燃料结构, 对使用天然气的要求日益迫切, CNG 的使用量也大幅攀升。四川省为人口大省, 特别是川中地区又是西南的交通要道, CNG 汽车拥有量大, 现有 CNG 产量无法满足加气需求, 供需矛盾较为突出。而川中地区的盐卤伴生气与天然气成分相近, 若将其加工成 CNG 销售, 可提高资源利用率, 并能产生可观的

经济效益。本文中针对四川省川中地区某盐化公司的盐卤伴生气用作 CNG 的脱水脱烃撬装化技术方案进行研究, 为小气量、低压力盐卤伴生气或者其他类似伴生气的回收利用指供参考。

## 1 原料气气质及特性分析

### 1.1 原料气气质

原料气为四川省川中地区某盐井副产的伴生气, 气量 2.5 万 m<sup>3</sup>/d 左右, 井口压力 0.25~0.30 MPa, 井口温度 68℃左右, 组成如表 1 所示。该盐卤伴生气中 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 等非烃类组分含量低, 且不含 H<sub>2</sub>S 及其他硫化物, 但重烃含量高, C<sub>3</sub>+含量达到 6%左右, 气质属于富气, 若直接用作 CNG, 存在液态重烃析出的隐患, 容易对天然气增压设备以及 CNG 使用

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-10-30

作者简介: 李良均(1965-), 男, 本科, 高级工程师, 从事油气田地面建设和储运工程设计技术研究及管理工作; 王治红(1974-), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为油气处理与加工、化工过程节能, 通讯联系人, 228298112@qq.com。

过程造成影响甚至安全风险。因此,需要进行脱水脱烃后才能用作CNG。

表1 伴生气干基组成 %

组分	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	<i>i</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	<i>n</i> -C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	<i>i</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>
摩尔分数	86.15	6.74	3.04	0.63	0.7	0.29
组分	<i>n</i> -C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> +	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	He
摩尔分数	0.19	1.15	0.01	0.62	0.44	0.04

## 1.2 冷凝特性分析

以P-R状态方程作为相平衡和热力学计算模型,利用Aspen Hysys模拟软件,获得伴生气的相图及冷凝特性数据,为脱水脱烃撬装化方案的选择提供依据。

### 1.2.1 相态特征

由相平衡计算数据绘制出的原料气 $p$ - $T$ 相图如图1所示,其中临界点C的温度 $T_c = -57.6^\circ\text{C}$ ,压力 $p_c = 7.4\text{ MPa}$ ;最高临界冷凝温度 $T_c' = 58.01^\circ\text{C}$ ,最高临界冷凝压力 $p_c' = 13.76\text{ MPa}$ 。

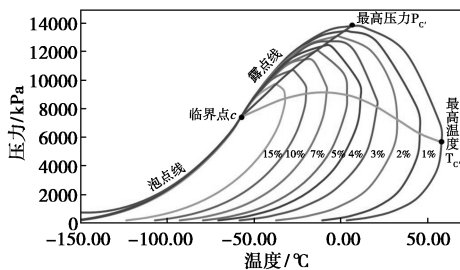


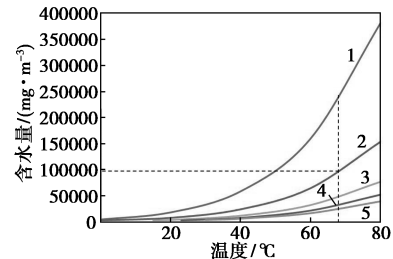
图1 伴生气 $p$ - $T$ 相图

从图1可知,该伴生气泡点线和露点线之间的区域为气液两相区,并存在反凝析区域。当压力高于9 MPa时,气体完全处于 $cT_c'$ 与露点线构成等温反凝析区,此时随着压力升高,冷凝率迅速下降。该区域还包含一个由 $cp_c'$ 与露点线构成的等压反凝析区。在9 MPa时,当温度低于 $-50^\circ\text{C}$ ,伴生气即进入等压反凝析区,其显著特征是冷凝率随温度降低而迅速下降。在天然气增压成为CNG过程中,最高压力需要达到25 MPa;在CNG使用过程中,需要通过减压将压力调整至0.7~0.9 MPa。因此,若将该伴生气作CNG利用,在增压成为CNG和CNG使用过程中的温度、压力下可能存在液烃凝析,因此,在该伴生气作CNG利用过程中,必须避免液烃的出现,以防止该伴生气增压成CNG和CNG使用过程中的安全隐患。

### 1.2.2 水含量分析

根据原料气的组成,绘制了不同压力、温度下伴生气的含水量预测曲线,如图2所示。可以看出,在该伴生气的井口温度、压力条件下,该伴生气含有大

量的水分,其饱和含水量接近 $100\ 000\text{ mg/m}^3$ ,如此高的含水量,在该伴生气增压成为CNG以及CNG作车用燃料使用过程中,会有液态水出现。



1—100 kPa;2—250 kPa;3—500 kPa;4—750 kPa;5—1 000 kPa

图2 含水量预测图

### 1.2.3 水合物生成条件分析

该盐卤伴生气水合物生成条件的预测如图3所示。从水合物生成曲线可以看出,当该伴生气的压力为0.7 MPa、温度低于 $0^\circ\text{C}$ 时就开始有固体水合物形成,并且压力越高,形成水合物的温度也越高,当压力高于4 MPa后,水合物的形成温度迅速升高。当压力高于10 MPa时,水合物生成温度达到 $20^\circ\text{C}$ 。因此,该伴生气作CNG利用过程中必须脱除其中的饱和水。

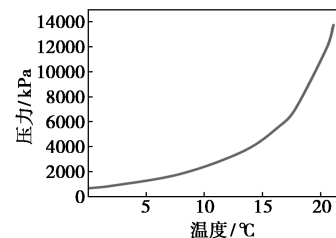


图3 水合物生成条件的预测曲线

## 2 伴生气CNG利用方案

### 2.1 CNG对原料气的要求

车用CNG的气质指标应符合国家强制标准GB 18047—2017的规定,部分指标见表2所示。

表2 压缩天然气部分技术指标

项目	技术指标
高位发热量/(MJ·m <sup>-3</sup> )	>31.4
硫化氢/(mg·m <sup>-3</sup> )	≤15
二氧化碳 $\gamma_{\text{CO}_2}/\%$	≤3.0
水/(mg·m <sup>-3</sup> )	在汽车驾驶的特定地理区域内,压力不大于25 MPa和环境温度不低于 $-13^\circ\text{C}$ 的条件下,水的质量浓度应不大于 $30\text{ mg/m}^3$
水露点/ $^\circ\text{C}$	在汽车驾驶的特定地理区域内,压力不大于25 MPa和环境温度不低于 $-13^\circ\text{C}$ 的条件下,水露点应比最低环境温度低 $5^\circ\text{C}$

注:气体体积的标准参比条件是101.325 kPa,20°C。

根据 GB 18047—2017 中对水露点的要求,天然气必须采用分子筛深度脱水,同时要求在操作压力和温度下,压缩天然气中不应存在液态烃。因此,根据前述对该伴生气相态特征以及水含量分析可知,该伴生气的初始含水量高达  $100\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ ,为保证分子筛的寿命及降低脱水负荷,需要对盐卤伴生气进行脱水;同时,为防止发动机点火燃烧不正常,应脱除该伴生气中易液化的重烃,使 CNG 中  $\text{C}_3+$  含量小于 3%<sup>[2]</sup>。

## 2.2 撬装化技术方案

小型伴生气作 CNG 利用方案要求工艺流程简

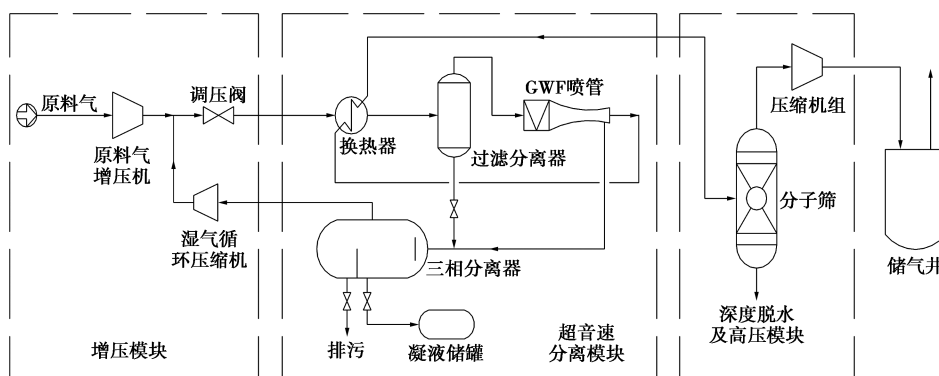


图 4 预增压+GWF 处理工艺流程

伴生气经缓冲、冷却和调压装置后,稳定压力为 0.2 MPa,温度 45℃。先由原料气增压机增压至 1.0 MPa,与 GWF 喷管出来的循环湿气混合,再经过换热器预冷,然后由过滤分离器除去伴生气中的液体。离开过滤分离器的伴生气进入 GWF 喷管脱水脱烃,并产生 50%~60% 的压降。分离出来的气液混合物进入三相分离器,凝液进入储罐,被分离出的湿

单、操作方便,装置撬装化、模块化,在保证安全性的同时兼顾经济性。根据前述分析,分子筛深度脱水和高压增压压缩机是必不可少的,因此重点考虑该盐卤伴生气的预脱水脱烃模块,提出了脱水脱烃的 4 种撬装化技术方案。

### 2.2.1 预增压+GWF

高速旋流分离器(GWF,亦称超音速分离)是分离天然气中的水分和天然气液态烃组分的一种新型、高效分离设备<sup>[3-7]</sup>,其应用于伴生气回收的预增压工艺流程如图 4 所示。

气则由湿气循环压缩机增压后输入原料气增压机出口与之混合,重新进入 GWF 喷管脱水脱烃。喷管出口干气被直接进入 CNG 加气站分子筛进行深度脱水,再由站内压缩机增压至 25 MPa。

### 2.2.2 级间抽出+GWF

该工艺不需要单独设置压缩机,可以很好地利用压力能,图 5 为级间抽出与 GWF 相结合的工艺流程。

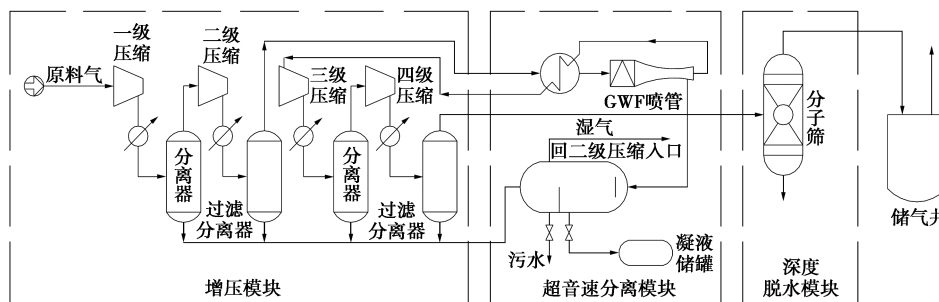


图 5 级间抽出+GWF 处理工艺流程

该处理工艺与前述预增压+GWF 处理工艺相似,不同的地方在于从井口出来的伴生气经初步处理后(0.2 MPa)直接进入压缩机增压,经两级压缩后压力达到 2.6 MPa,抽出压力为 2.6 MPa 的原料气进入过滤分离器分离,过滤分离器顶部的洁净原料气通过预冷换热器后进入 GWF 喷管进行脱水脱

烃,凝液进储罐,湿气循环进入二级压缩入口,处理后的干气再次进入压缩机进行三级、四级压缩至 25 MPa。

### 2.2.3 预增压+丙烷制冷

采用预增压+丙烷制冷的脱水脱烃工艺流程如图 6 所示。

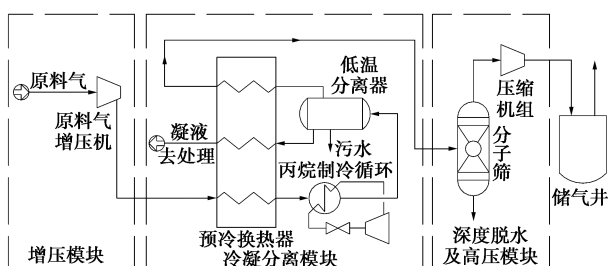


图6 预增压+丙烷制冷处理工艺流程

伴生气经缓冲、冷却和过滤,除去其中夹带的机械杂质和游离水后,进入原料气增压机增压至 1.2

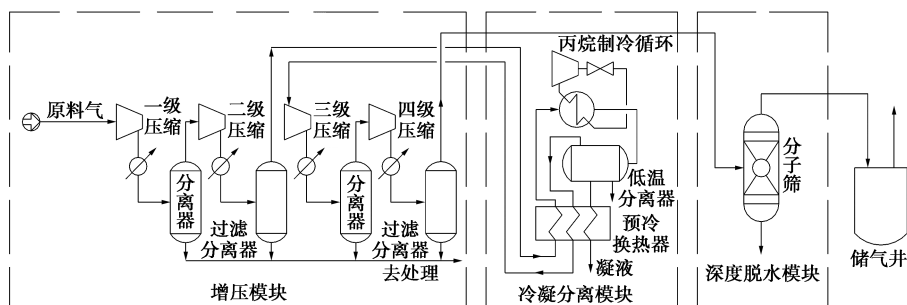


图7 级间抽出+丙烷制冷处理工艺流程

该工艺没有使用额外的增压设备,而是将初步分离、过滤后的原料气输入压缩机进行一、二级压缩,经两级压缩后压力达到 2.6 MPa,二级压缩出口的原料气通过预冷换热器进入丙烷压缩制冷单元降温至 $-12^{\circ}\text{C}$ 左右,并分离出重烃。此过程也需要加入水合物抑制剂防冻堵。低温分离出的气、液相均返回到预冷换热器与原料气换热。然后凝液去处理回收,贫气则进压缩机三、四级增压,经高压脱水后输入储气井。

### 3 方案对比

#### 3.1 关键参数基准

计算表明,该盐卤伴生气在 1.0 MPa、 $-12^{\circ}\text{C}$ 时脱除重烃,即可满足文献[2]中车用 CNG 对  $\text{C}_3+$ 含量的要求。因此,本文中以 $-12^{\circ}\text{C}$ 作为液烃回收的标准温度,以增压至 25 MPa 的能耗作为基准能耗。

#### 3.2 脱水脱烃效果对比

针对该盐卤伴生气,4种预脱水脱烃工艺方案的效果如表3所示。

表3 各工艺方案的预脱水脱烃效果对比

项目	预增压+	级间抽出+	预增压+	级间抽出+
	GWF	GWF	丙烷制冷	丙烷制冷
水含量/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	289.84	110.30	402.30	150.61
$\text{C}_3+$ 含量/%	2.79	2.21	2.96	2.58

MPa。然后经过预冷换热器,与低温分离器出来的产品气及液烃换热,预冷后再至丙烷制冷单元降温至 $-12^{\circ}\text{C}$ 左右。冷却后的原料气进入低温分离器进行气液分离,分离出产品气、醇烃混合物。凝液和原料气换热后去处理回收,产品气与原料气换热后输入分子筛深度脱水。最后洁净的干气经 CNG 加气站的压缩机增压至 25 MPa。

#### 2.2.4 级间抽出+丙烷制冷

将丙烷制冷运用于压缩机级间的级间抽出+丙烷制冷处理工艺流程如图7所示。

由表3中数据可知,4种工艺方案都能够脱除伴生气中的绝大部分水分,降低分子筛深度脱水的负荷;同时,4种工艺方案都能够使伴生气中  $\text{C}_3+$ 含量小于 3%。

#### 3.3 投资与能耗对比

4种方案装置的主要设备投资和主要工程量估算如表4所示。

表4 各工艺方案的主要设备与投资对比

项目	主要设备	设备投资/	
		万元	工程量
预增压+	原料气增压机、湿气循环增压机、	525	较小
GWF	GWF 脱烃(水)撬、液烃储罐、压缩机组、分子筛		
级间抽出+	GWF 脱烃(水)撬、液烃储罐、压	503	一般
GWF	缩机组、分子筛		
预增压+	原料气增压机、丙烷制冷脱烃	580	较大
丙烷制冷	(水)撬、液烃储罐、压缩机组、分子筛		
级间抽出+	丙烷制冷脱烃(水)撬、液烃储	572	大
丙烷制冷	罐、压缩机组、分子筛		

4种方案主要区别在伴生气预脱水脱烃部分,对4种撬装化、模块化技术方案进行了模拟,各方案的能耗、液烃回收量等数据如表5所示。

对比4种方案流程,结合表3、表4的数据可得如下结论。

表 5 各工艺方案的主要性能参数对比

项目	能耗/ kW	液烃产量/ (kg·h <sup>-1</sup> )	CNG 产量/ (万 m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	年总销售 额/万元
预增压+GWF	239	38.24	2.459	3432
级间抽出+GWF	269	48.48	2.452	3463
预增压+丙烷制冷	230	34.74	2.460	3418
级间抽出+丙烷制冷	237	41.36	2.456	3440

注:年总销售额按年生产 8 000 h, CNG 售价为 4 元/m<sup>3</sup>, 液态烃售价为 5 000 元/t 计。

(1) 相同增压方式下, GWF 工艺的投资成本比丙烷制冷工艺的成本低 12% 左右, 这是由于丙烷制冷工艺的装置及辅助生产设施较复杂, 使得投入必然增多。

(2) GWF 工艺的能耗高于外加丙烷制冷的能耗。因为 GWF 运行的时候有一定的能量损失, 而丙烷制冷单元在这方面能量损失较少。

(3) 相同增压方式下, GWF 工艺回收的液态烃量较丙烷制冷工艺多 10% 以上。这得益于流体在 GWF 喷管内形成强烈的旋流场, 提高了液态烃的分离效率和回收率。

(4) 级间抽出的 GWF 工艺的产品年销售额比预增压的 GWF 工艺多 20 万~30 万元。但其工艺更加复杂, 设备维护、维修、折旧的费用高, 同时操作难度大, 故其利润应略低于预增压工艺。

### 3.4 超音速技术可行性

在天然气处理领域, Twister、Translang 等跨国公司对超音速分离技术进行了全面测试和商业化应用。Twister 公司于 2003 年在马来西亚的 B11 平台成功开启了第一个商业化的超音速处理系统<sup>[6]</sup>; 加拿大的 Translang 公司也于 2004 年在西伯利亚建成了一套工业装置<sup>[4]</sup>。中国石油采用俄罗斯 3S 技术的超音速处理装置已于 2011 年在牙哈凝析气处理厂投产成功<sup>[7]</sup>。这些装置一直在工业生产条件下稳定运行, 标志着该技术完成了从试验研究到工业化应用的过程<sup>[8]</sup>, 表 6 列出了部分装置的运行情况。

表 6 部分 GWF 装置运行参数

装置	单管 处理量/ (万 m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> )	入口 压力/ MPa	入口 温度/ ℃	出口 压力/ MPa	干气水/ 露点/ ℃
B11 平台 Twister 处理系统	170	15.50	25.0	10.40	<-3.0
西伯利亚天然气厂 3S 装置	140	11.57	-10.1	6.86	<-30.8
牙哈凝析气处理厂 3S 装置	180	9.60	5.3	6.94	<-38.2
莫斯科试验场 3S 装置	14~30	7.50	20.0	5.50	<-10.0
胜利油田海五联合站	2.25	3.40	30.0	1.36	<0.0

注:均为干气出口压力下的水/烃露点。

目前,国内已有企业、研究院、高校有 GWF 装置的专利及设备,能够提供此类小处理量的 GWF 装置及技术支持,使得 GWF 工艺的核心部件能够完全国产化。因此,基于 GWF 工艺的 CNG 方案在工程化技术上是可行的。

## 4 结论

针对四川省川中地区小气量、低压力的盐井伴生气,提出了 4 种作 CNG 利用时预脱水脱烃撬装化工艺方案,并通过模拟计算,对方案的主要工艺参数进行了对比分析。结果表明,4 种方案均能够满足该伴生气作 CNG 利用的预脱水脱烃要求。其中,对于预脱水脱烃模块而言,预增压工艺简单、操作简便、运行稳定、能耗较低, GWF 方案流程简单、分离效率高,因此,预增压+GWF 方案更适合撬装化。且对于整个流程而言,预增压+GWF 方案的各项费用较低,容易撬装化,在投资、建设速度、烃类回收方面也更具优势,非常符合此类小型加工方案的要求。因此,对于小气量、低压力的盐卤伴生气作 CNG 利用时,其预脱水脱烃撬装化装置采用预增压+GWF 方案是最适宜的。同时,该方案也可以作为类似小型伴生气回收利用工艺方案。

## 参考文献

- [1] 陈庚良,王开岳.天然气综合利用[M].北京:石油工业出版社,2004:96-97.
- [2] 中国石油天然气集团公司人事服务中心.CNG 加气站操作工(上)[M].北京:石油工业出版社,2006:50-130.
- [3] Schinkelshoek P, Epsom H, Twister BV. Supersonic gas conditioning—low pressure drop TWISTERTM for NGL recovery [C]//paper 17884-MS presented at the Offshore Technology Conference (OTC), 1-4 May 2006, Houston, USA: OTC, 2006.
- [4] Alfyorov V, Bagirov L, Dmitriev L, et al. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components [J]. Oil and Gas Journal, 2005, 103 (20): 53-58.
- [5] Schinkelshoek P, Epsom H. Supersonic gas conditioning-commercialization of TWISTERTM technology [C]//87th GPA Annual Convention, 2-5 March 2008, Grapevine, USA: GPA, 2008.
- [6] Brouwer J M, Epsom H, Twister B V. Twister supersonic gas conditioning for unmanned platforms and subsea gas processing [C]//paper 83977-MS presented at the SPE Offshore Europe 2003, 2-5 September 2003, Aberdeen, UK: SPE, 2003.
- [7] 温艳军,梅灿,黄铁军,等.超音速分离技术在塔里木油气田的成功应用[J].天然气工业,2012,32(7):84-86.
- [8] Betting M, Epsom H. Supersonic separator gains market acceptance [J]. World Oil, 2007, 228(4): 197-200. ■