

天然气 J-T 阀节流制冷工艺脱汞因素探讨

王用良 李海荣 赵海龙 毛立军 杜通林

中国石油集团工程设计有限责任公司西南分公司,四川 成都 610041

摘要:为了合理开发含汞气田,优化天然气净化工艺设计,有必要弄清楚汞及其化合物在天然气处理过程中的分布规律及影响因素。利用稳态流程模拟 VMGSim 软件对含汞气田的 J-T 阀节流制冷工艺流程进行模拟,研究了原料气汞含量、天然气处理量、乙二醇注入量、原料气组成及 J-T 阀制冷温度对天然气中汞的脱除率的影响。结果发现:原料气重烃组分越多,J-T 阀制冷温度越低,天然气中的汞越易脱除;在 J-T 阀节流制冷工艺中,乙二醇溶液对天然气中的汞具有较强的富集作用,能有效降低干天然气中汞含量;当原料气中的汞含量小于一定值时可以不设置天然气脱汞装置。研究结果对我国脱汞装置的优化设计具有一定的实用性。

关键词:天然气;J-T 阀;脱汞;VMGSim 软件

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2013.04.009

0 前言

汞具有高挥发性、高毒性、强腐蚀性,在含汞天然气处理过程中使用铝钎焊式换热器、液化天然气设施和注氮装置,都极易受到汞的腐蚀^[1],在天然气化工中还会引起催化剂(铂、钨、镍、铬等)中毒,危害操作人员健康、腐蚀管线设备以及污染环境。因此,必须将天然气中的汞脱除,降低天然气中汞含量,安全开发和利用含汞天然气,以保护人身安全,防止汞污染环境^[2-3]。针对含汞气田天然气处理厂的 J-T 阀节流制冷脱水脱烃工艺,利用稳态流程模拟 VMGSim 软件进行模拟,研究该工艺过程对脱汞效率的影响因素,有助于明确低温分离工艺中汞的分布规律,指导天然气处理工艺流程设计,并为含汞气田的开发处理选择适当的汞防护措施提供依据。

1 汞的分布、危害及浓度控制

全球许多天然气气田含有单质汞及有机汞化物,已经报道天然气含汞量较高的地区有北海、东南亚、南美、北非及东欧等,天然气中含汞量的变化很大,从

0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 到 2 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。全球典型含汞气田地区、天然气汞含量分布见表 1。

表1 不同地区天然气中的汞含量

地区	汞的浓度 / ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	地区	汞的浓度 / ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)
东南亚	10~2 000	欧洲	1~50
南美	1~105	北美	1~25
北非	1~100	南美	1~10

汞是高毒金属,其蒸汽压相对较高,容易挥发形成汞蒸气。天然气处理设备中汞的富集可能对操作及检修人员的健康构成危害。在气体处理厂低温系统中,汞会使常用的铝质换热器发生汞齐脆化和电化学腐蚀,并引起设备故障。在北美、北非和亚太地区已有汞造成气体处理设施中设备故障的案例^[1,4]。

荷兰和德国的相关机构研究表明天然气中汞含量低于 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,不会对设备、人身安全、环境造成危害。参照国外商品气供应合同中对汞含量的规定,相关学者推荐我国管输商品天然气中汞含量小于 28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;对于 LNG 液化装置或天然气凝液回收装置的

收稿日期:2013-05-12

基金项目:中国石油集团工程设计有限责任公司重大专项(KY2012-21-6)

作者简介:王用良(1986-),男,四川资阳人,硕士,主要从事石油天然气化工工程研究与设计工作。

原料气,汞含量不超过 $0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [5]。

2 含汞天然气 J-T 阀节流制冷工艺

对于采用 J-T 阀节流制冷脱水脱烃工艺的含汞气田天然气处理厂,主要工艺单元包括脱水脱烃单元、乙二醇再生及注醇单元和凝析油稳定单元 [6]。脱水脱烃单元的工艺流程见图 1, 自集气装置来的原料天然气,从上部进入原料气预冷器。自乙二醇再生及注醇装置来的乙二醇贫液通过雾化喷头雾化, 喷射入原料气预冷

器,和原料气在管程中充分混合接触后,与自干气过滤分离器来的冷干气进行换热,被冷却至 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。原料天然气再经 J-T 阀作等焓膨胀, 气压降至 8.1 MPa , 温度降至 $-25\text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 再从中部进入低温分离器进行分离, 分离出液态醇烃液, 醇烃液经三相分离器分离后, 醇液去乙二醇再生及注醇单元, 烃液去凝析油稳定单元。干气进入原料气预冷器壳程与原料天然气逆流换热, 换热后的干气至脱汞装置。

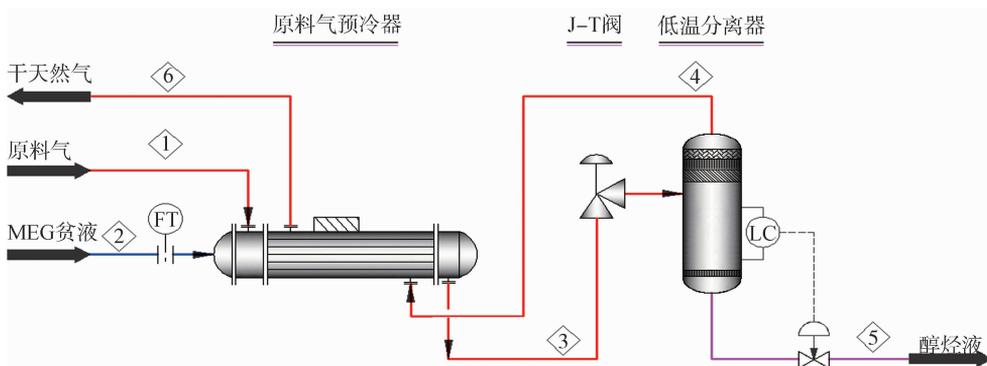


图 1 天然气 J-T 阀节流制冷工艺流程示意图

3 J-T 阀节流制冷工艺流程模拟

假设某含汞气田天然气处理厂脱水脱烃装置的处理规模为 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ($20\text{ }^\circ\text{C}$, 101.325 kPa , 下同), 原料气温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$, 压力为 $12.0 \text{ MPa}\cdot\text{a}$, 汞浓度为 $500\sim 2\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 原料气组成见表 2。所用乙二醇贫液流量为 $1\,965 \text{ kg/h}$ (3 倍理论注醇量), 质量浓度 80% 。要求外输干气的水露点 $\leq -5\text{ }^\circ\text{C}$, 烃露点 $\leq -5\text{ }^\circ\text{C}$ 。

表 2 原料气组成

组分	摩尔组成 $x/(%)$	组分	摩尔组成 $x/(%)$
CH_4	94.674 2	C_7H_{16}	0.098 7
C_2H_6	2.930 5	C_8H_{18}	0.094 8
C_3H_8	0.459 1	C_9H_{20}	0.038 4
$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.099 8	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$	0.019 9
$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.113 0	H_2O	0.095 8
$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.051 1	N_2	0.756 1
$i\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.035 0	CO_2	0.470 1
C_6H_{14}	0.063 3	Hg	$500\sim 2\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$

利用 VMGSim 软件模拟含汞天然气脱水脱烃流程。原料天然气节流前的温度为 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 、压力为 $12.0 \text{ MPa}\cdot\text{a}$, 节流后的温度为 $-25\text{ }^\circ\text{C}$, 压力为 $8.16 \text{ MPa}\cdot\text{a}$,

外输干气的水、烃露点满足商品气的气质指标要求。汞浓度在 $500\sim 2\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间变化时, 低温分离器顶部干气中汞含量变化见表 3。通过模拟分析可知, 含汞天然气经过 J-T 阀节流制冷低温分离后, 原料气中 $92.88\% (w)$ 的汞进入了醇烃液中, $7.12\% (w)$ 的汞进入了低温分离器顶部干气中。随原料气中汞含量增大, 低温分离后的干气中汞含量成比例增加, 但天然气中汞的脱除率不变。根据产品天然气汞含量控制要求, 干气中汞含量应小于 $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 故应在低温分离后设置干天然气脱汞装置, 以保证产品天然气达到管输要求。另外, 从理论上分析, 在该工况条件下, 当原料气中汞含量低于 $390 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时, 便可不设置天然气脱汞装置。此外, 根据模拟结果, 原料气中大部分汞进入了乙二醇富液, 经乙二醇再生后最终进入再生塔塔顶未凝气及污水中。因此, 需要经过脱汞处理后才能排放。

表 3 J-T 阀节流制冷工艺天然气中汞浓度变化

处理量/ ($10^4 \text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$)	80% (w) 乙二醇 注入量/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	原料气 汞含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	低温分离 器顶部干气 汞含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	天然气 脱汞率/ (%)
500	1.965	500	35.6	92.88
500	1.965	1 000	71.2	92.88
500	1.965	2 000	142.4	92.88

4 J-T 阀节流制冷工艺脱汞因素分析

为了定量分析含汞天然气低温分离过程中天然气脱汞率的影响因素,以上工况作为基本条件,固定原料气中汞含量为 $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$,利用 VMGSim 软件对 J-T 阀节流制冷工艺流程进行模拟,分别考察了乙二醇注入量、天然气处理量、原料气组成及 J-T 阀制冷温度等对天然气脱汞率的影响。

乙二醇注入量及天然气处理量对脱汞率的影响结果见图 2。

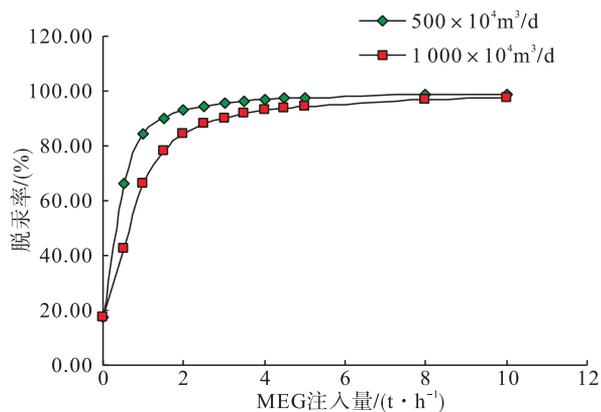


图 2 不同处理量时脱汞率与 MEG 注入量关系

由图 2 可知,根据软件模拟结果,当原料气中不注入乙二醇抑制剂时,处理量为 $500 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 和 $1\ 000 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 的天然气脱汞率都仅有 15.94%(实际工况下要注醇),随乙二醇注入量的增加,天然气脱汞率迅速增大。当注入量为 1.5 t/h,处理量为 $500 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 的天然气脱汞率达 90.24%;注入量为 3 t/h,处理量为 $1\ 000 \times 10^4\ \text{m}^3/\text{d}$ 的天然气脱汞率也是 90.24%。说明乙二醇对汞的富集作用十分明显^[6],且达到同样脱汞率所需的乙二醇注入量与天然气处理量成正比。

通过调整原料气的组成,见表 4,分别为 A、B、C 三种组分,模拟分析了三种原料气组成情况下的天然气脱汞率情况,结果见图 3。

由图 3 可知,对于原料气组成 A,轻组分多,重组分少,无乙二醇的情况下脱汞率最低,仅为 6.92%;对于原料气组成 C,轻组分少,重组分多,无乙二醇的情况下脱汞率最高,为 26.06%。说明天然气中的重烃对汞也有一定的富集作用。但随乙二醇的注入,含重烃较多的原料气 C 的脱汞率增加幅度却不如重组分少的原料气 A、B。说明乙二醇对轻组分较多的天然气中汞的富集作用更强。

通过调整 J-T 阀后温度,分别为 -25 、 -30 、 $-35\ ^\circ\text{C}$,模拟分析了三种制冷温度下的天然气脱汞率情况,结果见图 4。

表 4 原料气组成

组分	A		B		C	
	摩尔含量 $x/(\%)$	组分	摩尔含量 $x/(\%)$	组分	摩尔含量 $x/(\%)$	
CH ₄	97.913 9	CH ₄	94.674 2	CH ₄	93.268 1	
C ₂ H ₆	0.976 0	C ₂ H ₆	2.930 5	C ₂ H ₆	3.150 1	
C ₃ H ₈	0.232 0	C ₃ H ₈	0.459 1	C ₃ H ₈	0.749 0	
<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	0.050 5	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	0.099 8	<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	0.163 0	
<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	0.057 2	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	0.113 0	<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	0.184 0	
<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	0.025 8	<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	0.051 1	<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	0.083 4	
<i>i</i> -C ₅ H ₁₂	0.017 7	<i>i</i> -C ₅ H ₁₂	0.035 0	<i>i</i> -C ₅ H ₁₂	0.057 1	
C ₆ H ₁₄	0.032 0	C ₆ H ₁₄	0.063 3	C ₆ H ₁₄	0.103 0	
C ₇ H ₁₆	0.049 9	C ₇ H ₁₆	0.098 7	C ₇ H ₁₆	0.161 0	
C ₈ H ₁₈	0.048 0	C ₈ H ₁₈	0.094 8	C ₈ H ₁₈	0.155 0	
C ₉ H ₂₀	0.019 4	C ₉ H ₂₀	0.038 4	C ₉ H ₂₀	0.062 7	
C ₁₀ H ₂₂	0.010 1	C ₁₀ H ₂₂	0.019 9	C ₁₀ H ₂₂	0.032 5	
H ₂ O	0.048 5	H ₂ O	0.095 8	H ₂ O	0.156 0	
N ₂	0.281 0	N ₂	0.756 1	N ₂	0.908 0	
CO ₂	0.238 0	CO ₂	0.470 1	CO ₂	0.767 0	

注:原料气中汞含量均为 $1\ 000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

由图 4 可知,通过调整 J-T 阀制冷温度,可以改变天然气脱汞率,且温度越低,脱汞率越高。

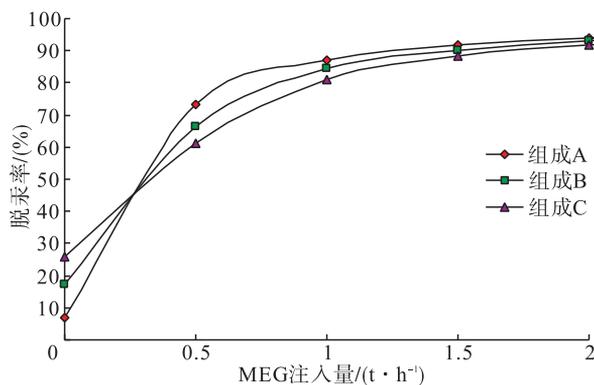


图 3 原料气组成对脱汞率的影响关系

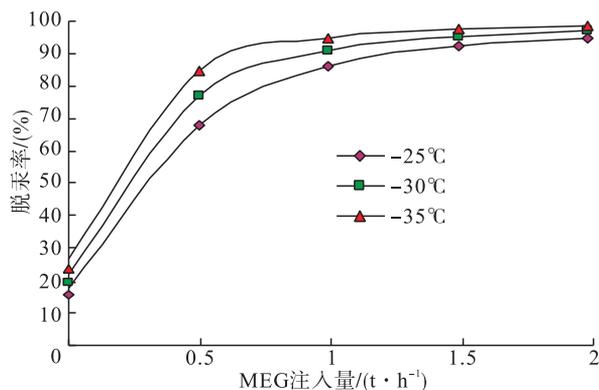


图 4 J-T 阀制冷温度对脱汞率的影响关系

5 结论

a) 在含汞气田天然气的 J-T 阀节流制冷工艺流程中, 节流阀制冷温度越低、其脱汞率越高。

b) 在天然气脱汞过程中, 乙二醇对 Hg 具有富集作用, 在条件相同时达到同值(等值)脱汞率, 应注入的乙二醇与天然气处理量成正比。

c) 天然气中轻组分含量越高, 乙二醇对汞的富集作用越强。

d) 当原料气中的汞含量小于一定值时可以不设置天然气脱汞装置, 从低温分离器分离后的干天然气便能达到管输商品天然气要求。

参考文献:

- [1] 熊光德, 汤晓勇. 天然气脱汞新技术[J]. 天然气与石油, 2011, 29(5):36-40.
Xiong Guangde, Tang Xiaoyong. New Technologies of Mercury Removal from Natural Gas [J]. Natural Gas and Oil, 2011, 29(5):36-40.
- [2] 蒋洪, 梁金川, 严启团, 等. 天然气脱汞工艺技术[J]. 石油与天然气化工, 2011, 40(1):26-31.
Jiang Hong, Liang Jinchuan, Yan Qituan, et al. Technology of Mercury Removal from Natural Gas [J]. Oil and Natural Gas Chemical Engineering, 2011, 40(1):26-31.
- [3] 王阳, 田利男. 凝析油脱汞工艺[J]. 天然气与石油, 2012, 30(2):32-35.
Wang Yang, Tian Linan. Technology for Removal of Mercury from Condensate Oil [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(2):32-35.
- [4] 李明, 付秀勇, 叶帆. 雅克拉集气处理站脱汞工艺流程改造[J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(2):112-114.
Li Ming, Fu Xiuyong, Ye Fan. Improving Techniques Process of Mercury Removed in Yakela Gas Condensate Treating Station [J]. Oil and Natural Gas Chemical Engineering, 2010, 39(2):112-114.
- [5] 蒋洪, 王阳. 含汞天然气的汞污染控制技术[J]. 石油与天然气化工, 2012, 41(4):442-444.
Jiang Hong, Wang Yang. The Control Technology for Mercury Contamination of Hg-containing Natural Gas [J]. Oil and Natural Gas Chemical Engineering, 2012, 41(4):442-444.
- [6] 蒋洪, 刘支强, 严启团, 等. 天然气低温分离工艺中汞的分布模拟[J]. 天然气工业, 2011, 31(3):80-84.
Jiang Hong, Liu Zhiqiang, Yan Qituan, et al. A Simulation Study of the Mercury Distribution in the Low-temperature Gas Separation Process [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(3):80-84.

