

再生塔回流介质温升分析及优化

李 龙¹ 何琳琳² 王 刚¹ 任玉生³ 黄 锐⁴

1. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
2. 中国石油西南油气田成都天然气化工总厂, 四川 成都 610213;
3. 襄垣县国新液化天然气有限公司, 山西 长治 046299;
4. 重庆博杰能源有限公司, 重庆 408324

摘 要: 液位回流控制是容器液位工艺过程控制的重要手段, 对精馏工艺、吸收和再生工艺及容器的液位维持等生产过程起到关键作用。介绍了 MDEA 再生塔顶回流系统介质温度升高的现象, 从能量平衡的角度对介质温度升高的原因进行了系统分析, 确定了介质温度升高的能量来源, 计算了系统内介质温升的最大值, 提出了保持分离罐回流系统平稳运行的工艺设计优化措施和建议, 对类似液位回流控制系统的工程设计及运行操作具有参考意义。

关键词: 再生塔; 液位控制; 介质温升; 优化

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2019.03.007

Analysis on Reflux Medium Temperature Rise at Regeneration Tower and Its Optimization

Li Long¹, He Linlin², Wang Gang¹, Ren Yusheng³, Huang Kun⁴

1. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
2. Chengdu Natural Gas Chemical Works, PetroChina Southwest Oil & GasField Company, Chengdu, Sichuan, 610213, China;
3. Xiangyuan Guoxin LNG Co., Ltd, Changzhi, Shanxi, 046299, China;
4. Chongqing Bojie Energy Co., Ltd, Chongqing, 408324, China

Abstract: Liquid level recirculation control is an important means of process control, which plays a key role in the production process of rectification process, absorption and regeneration and liquid level maintenance of the vessel. The phenomenon of medium temperature rise which occurs in the top reflux system of MDEA regeneration tower is introduced. The reason of medium temperature rise is systematically analyzed from the perspective of energy balance. In the system, the source of medium temperature rise is determined, and the maximum value of temperature rise is calculated. In order to maintain the liquid level smoothly in the separation tank, the design optimization measures and suggestions are proposed, which has guiding significance for the engineering design and the operation of liquid level control in the similar system.

Keywords: Regeneration tower; Liquid level control; Medium temperature rise; Optimization

收稿日期: 2019-02-06

基金项目: 中国石油工程建设有限公司“浮式 LNG 技术发展研究”项目 (CPECC 2017 KJ 20)

作者简介: 李 龙 (1983-), 男, 湖南攸县人, 工程师, 硕士, 主要从事天然气加工和深冷液化的工艺技术研究及工程设计工作。

0 前言

液位回流控制是容器液位工艺过程控制的重要手段,对精馏工艺、吸收和再生工艺及容器的液位维持等生产过程起到关键作用^[1-3]。液化天然气(LNG)是天然气的液态形式,生产过程中采用 MDEA 醇胺法作为天然气深度脱酸的常用工艺处理方法^[4-9]。其中,MDEA 溶液再生采用低压高温操作,在再生塔顶部设置再生塔顶回流罐,对再生塔顶部被带出的水分及 MDEA 溶液进行回收操作,该过程对溶液再生效果和脱酸系统平衡操作具有重要作用^[10-12]。本文针对液化天然气生产过程中 MDEA 再生塔顶回流罐中液体温度升高的现象进行原因分析,提出防止再生塔因溶液回流循环造成溶液温度升高的优化设计方案,对类似具有回流液位控制回路的工程设计和操作具有参考意义。

1 设计简介

某日处理天然气 $50 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的 LNG 工厂,采用 MDEA 醇胺法深度脱除天然气中的 H_2S 、 CO_2 酸性气体,使净化气中 CO_2 的体积分数含量低于 50×10^{-6} , H_2S 含量低于 3.5 mg/m^3 ,满足天然气液化的要求。天然气摩尔组分见表 1。

再生塔顶工艺流程见图 1。来自再生塔的高温工艺物流 1 进入冷却器中,经冷却器冷却至 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 以下的物流 2 进入分离罐中的分离气液相。气相物流 3 从分离罐顶部分出进入后序装置处理,液相物流 4 进入回流泵中,经回流泵增压后返回至再生塔中,同时分出部分流量作为泵的最小回流量通过物流 5 返回分离罐中。分离罐液

位控制采用单回路控制方案,液位变送器安装在再生塔分离罐上,流量调节阀安装在回流泵输送至再生塔顶部的管线上。根据再生塔分离罐的液位波动情况,通过调节调节阀的开度,从而稳定再生塔顶分离器液位,防止液位过高或过低操作。同时,为了保护泵的回流泵的安全启动和正常运转,设置了泵的最小流量回流保护线^[13-16]。

表 1 天然气摩尔组分

组分	含量 / (%)	组分	含量 / (%)
N_2	1.291	$n\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.097
CO_2	0.716	$i\text{-C}_4\text{H}_{10}$	0.116
CH_4	94.004	$n\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.035
C_2H_6	3.085	$i\text{-C}_5\text{H}_{12}$	0.027
C_3H_8	0.567	C_6H_{14}	0.062

注:根据设计要求, CO_2 处理设计负荷按天然气中最大含量 3.5 % (v/v) 考虑。

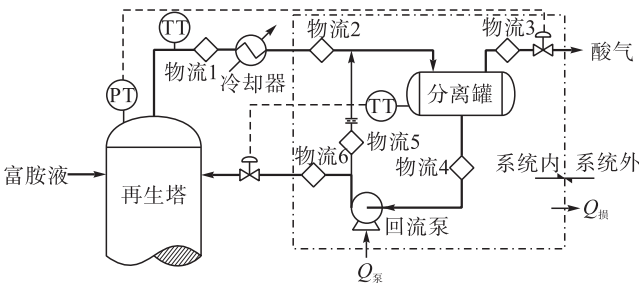


图 1 再生塔顶工艺流程

根据脱酸工艺设计计算数据,再生塔顶设计工况数据见表 2。

表 2 再生塔顶操作条件

物流号	气相分数	温度 / $^\circ\text{C}$	压力 / kPa	密度 / $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	比热 / $(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.72 % CO_2 工况质量流量率 / $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$	3.5 % CO_2 工况质量流量率 / $(\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$
1	1	105	100	1.78	1.34	461.08	2 255.30
2	0.407 5	40	80	4.728	2.24	461.08	2 255.30
3	1	40	80	2.908	0.93	282.92	1 384.00
6	0	40	120	996.2	4.31	178.16	871.3

根据设计计算,在满足最大 CO_2 处理负荷情况并考虑装置的操作弹性为 50 % ~ 110 % 工况下,再生塔顶回流泵选型为 $Q=1.0 \text{ m}^3/\text{h}$, $H=60 \text{ m}$, $W_{\text{轴}}=2.3 \text{ kW}$,离心泵的允许工作流量为 $0.46 \sim 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$,满足最大工艺设计要求。

2 介质温升情况

2017 年 8 月,LNG 生产装置经投产并达到满负荷生产能力后,在装置连续运行过程中,发现回流泵出口管

线及最小回流保护线管道外壁温度偏高,设计条件下要求经冷却器冷却之后的工艺介质温度应小于 $40\text{ }^\circ\text{C}$,经检测,再生塔顶回流罐及回流泵出口温度分别维持在 $45\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $47\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,均已超出工艺设计温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 。

经现场检查确认,再生塔顶冷却器出口温度良好,冷却气工艺介质出口温度为 $37.5\text{ }^\circ\text{C}$,低于设计温度 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 要求。再生塔顶分离罐液位控制良好,液位维持在 $40 \pm 2\%$ 的正常范围内波动,回流泵出口控制阀有小量开度,操作正常。回流泵运行良好暂无异常声响。

在连续观测 10 h 后,再生塔顶回流罐及回流泵出口温度并无明显变化,分别在 45 ℃ 左右保持稳定,但该现象不符合正常操作参数要求,且超出了设计规定范围值。因此针对再生塔顶回流操作状况进行研究分析,查找再生塔顶回流罐液体温度升高的原因、规律及影响因素,最大限度地保持再生塔顶回流操作平稳,并满足设计要求。

3 介质温升原因分析

通过检测,再生塔顶冷却器出口工艺介质温度为 37.5 ℃,表明该设备运行正常且满足工艺设计要求,回流系统介质温升并不是由于冷却器冷却效果差造成的。

对回流系统在全回流工况下做能量平衡分析,分析范围见图 1 虚线标注部分。其中能量输入部分主要包括主物流 2 带入的能量 Q_2 和回流泵电能输入 $Q_{\text{泵}}$;能量输出部分主要包括分离罐顶部物流 3 带出的能量 Q_3 、回流泵外输物流 6 带出的部分能量 Q_6 和系统与外界因温度差造成的热量损失 $Q_{\text{损}}$ 。

当 $Q_2 + Q_{\text{泵}} > Q_3 + Q_6 + Q_{\text{损}}$ 时,系统内温度将升高;

当 $Q_2 + Q_{\text{泵}} = Q_3 + Q_6 + Q_{\text{损}}$ 时,系统内温度将维持;

当 $Q_2 + Q_{\text{泵}} < Q_3 + Q_6 + Q_{\text{损}}$ 时,系统内温度将降低。

通过能量平衡分析可以看出,主物流 2 带入的能量 Q_2 ,正常可以通过物流 3 的能量 Q_3 和物流 6 的能量 Q_6 以及少量的热损失 $Q_{\text{损}}$ 带出系统,因此回流泵的电能输入 $Q_{\text{泵}}$ 是造成系统内能量累积的主要原因,最终通过机械能转化为系统热能,从而使系统内介质温度升高。

从工艺设计角度分析,实际设计工况带出液量:回流泵的选型额定流量 = 178.16 kg : 996.2 kg = 0.179,仅为回流泵额定工作流量的 17.9%,低于离心泵允许工作区的下限流量 0.46 m³/h。这主要是由于天然气中 H₂S 和 CO₂ 含量少,导致脱酸装置处理负荷低,从而造成再生塔顶带出液量少。因此,为确保泵的安全操作,离心泵部分流量将通过最小回流线返回至分离罐中。该部分循环所需的电能将在系统内循环积累并转化为热能,且该部分能量未被及时移走,从而造成系统内介质温度升高的现象。在泵的最小回流线正常开启的情况下,根据回流泵的性能曲线,其允许工作区的下限操作流量为 0.46 m³/h,此时输入的轴功率为 2.13 kW/h。

从现场观察发现,系统内温度维持在 45 ℃ 左右,并未出现持续上升的趋势,主要原因是回流泵选型后功率固定,能量输入有限。系统热损失及物流带出的能量将随系统介质温度的升高而增加,当系统介质温度上升至一定程度后,此时系统累积的能量与系统热损失及物流带走的能量达到平衡状态,从而使系统内介质温度出现维持现象。

因回流泵循环输入的能量有限,因此系统内介质温升有极限值。根据系统物料平衡分析,由物流 2 带入的物料最终通过物流 3 和物流 6 带出系统。在不考虑系统热损失 $Q_{\text{损}}$ 及物流 3 不被加热的情况下,能量全部用于加热分离出的液相介质并被带出系统,此时系统能量平衡,液相介质获得最大温升。根据热量计算公式:

$$Q = c_p \times m \times \Delta t$$

式中: c_p 为介质平均比热容, kJ/(kg·℃); m 为介质的质量, kg; Δt 为介质温升, ℃。

可计算介质最大温升为 $\Delta t_{\text{max}} = Q_{\text{max}} \div (c_p \times m_{\text{min}}) = 2.3 \times 3\,600 \div (4.31 \times 178.16) = 10.78$ ℃,即该系统最大温升约为 10.77 ℃。通过平衡分析可知,随着物流 6 外输量的加大,系统内介质温升累积将减少,同时考虑到物流 3 和系统热损失带走部分,系统内介质温升将更低,对系统影响更少。

4 介质温升处理措施

4.1 优化回流设计流程

考虑到液位控制系统持续回流状态下,能量将不断通过泵输送至系统内,为持续移走富余能量,将泵的最小回流线接入至前端冷却器入口,通过冷却器将能量带出系统。

4.2 优化泵的选型

针对离心泵功率较大的类似工况,建议结合系统设计最大负荷处理工况与实际运行工况需求,选择负荷匹配、经济高效的输送泵。同时在经济性可行的情况下,选用变频控制方式节省能耗^[17-19],尤其确保在低流量工况下减少能量输入,提高能量利用效率,同时又满足输送要求。

4.3 优化回流控制方式

针对离心泵功率较大的类似工况,建议在泵的最小回流线上安装调节阀^[13-14],减少泵的最小回流量,充分利用泵的额定外输能力,从而减少系统能量累积和因最小回流线关闭造成憋泵伤害,防止泵空转造成汽蚀^[20-22]。

5 结论

1) 造成再生塔顶回流系统介质温升的主要原因是脱酸装置 H₂S 和 CO₂ 处理负荷低,造成再生塔顶带出液量少,回流泵处于小流量回流状态,持续向系统内输入能量,电能将在系统内累积并最终转化为热能,使系统内介质温度升高。由于在回流泵选型后系统内介质温升将存在上限值,因此在系统设计时,可进行各工况下的能量平衡和物料平衡计算,分析回流系统最大温升情况。

2) 在系统无法接收介质温度升高的情况下,可将离

心泵最小回流线返流至前端换热器入口,从而将回流系统内的能量通过冷却器移走,确保系统内能量平衡,有效防止回流系统内介质温度升高。

3) 回流系统流程设计及泵的选型需进行详细计算和整体分析,尽量减少全回流工况的出现。针对大功率离心泵,建议在离心泵的最小回流线上安装调节阀,控制泵的最小回流量,充分利用泵的额定外输能力,从而减少系统能量累积和因最小回流线关闭造成憋泵伤害,防止泵空转造成汽蚀。

参考文献:

- [1] 薛美盛,祁飞,张庆武,等. 一种全新的精馏塔回流罐液位控制系统[J]. 化工自动化及仪表, 2006, 33(2): 57-60.
Xue Meisheng, Qi Fei, Zhang Qingwu, et al. A Novel Level Control System for Reflux Tank of Distillation Column [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2006, 33(2): 57-60.
- [2] 禾志强,马松玲,祁利明,等. 湿法脱硫系统吸收塔液位控制[J]. 电站系统工程, 2012, 28(4): 66-67.
He Zhiqiang, Ma Songling, Qi Liming, et al. Liquid Level Control in Absorber of Limestone-gypsum Wet FGD System [J]. Power System Engineering, 2012, 28(4): 66-67.
- [3] 孙孟洋,曹增力. 卧式储罐液位与液体体积的关系[J]. 化工进展, 2013, 32(增刊一): 53-55.
Sun Mengyang, Cao Zengli. Relationship Between Horizontal Tank Level and Liquid Volume [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2013, 32(Suppl 1): 53-55.
- [4] 陈文杰. 液化天然气工厂天然气净化工艺的选择[J]. 化学工业与工程技术, 2014, 35(5): 16-19.
Chen Wenjie. Selecting Natural Gas Purification Process in Liquefied Natural Gas Factory [J]. Journal of Chemical Industry & Engineering, 2014, 35(5): 16-19.
- [5] 曾树兵,陈文峰,郭洲,等. MDEA 混合胺法脱碳在珠海天然气液化项目中的应用[J]. 石油与天然气化工, 2007, 36(6): 485-487.
Zeng Shubing, Chen Wenfeng, Guo Zhou, et al. The Application of MDEA-based Solvent for CO₂ Removal in NGL Project [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2007, 36(6): 485-487.
- [6] 曾桃,王海洋. 内蒙古某 LNG 项目脱碳单元参数优化[J]. 天然气与石油, 2015, 33(6): 37-40.
Zeng Tao, Wang Haiyang. Parameters Optimization of CO₂ Removal Unit of Certain LNG Project in Inner Mongolia [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33(6): 37-40.
- [7] 蒲远洋,罗绍春,闵刚,等. 天然气净化工艺设计要点及优化[J]. 天然气与石油, 2012, 30(1): 36-40.
Pu Yuanyang, Luo Shaochun, Min Gang, et al. Key Points of Natural Gas Purification Process Design and Their Optimization [J]. Natural Gas and Oil, 2012, 30(1): 36-40.
- [8] 韩淑怡,王科,黄勇,等. 醇胺法脱硫脱碳技术研究进展[J]. 天然气与石油, 2014, 32(3): 19-22.
Han Shuyi, Wang Ke, Huang Yong, et al. Research Progress of Natural Gas Decarbonization and Desulfurization Based on Alkanolamine [J]. Natural Gas and Oil, 2014, 32(3): 19-22.
- [9] 王遇冬,王登海. MDEA 配方溶液在天然气脱硫脱碳中的选用[J]. 石油与天然气化工, 2003, 32(5): 291-294.
Wang Yudong, Wang Denghai. Selection and Application of Formulated MDEA Solutions for H₂S and CO₂ Removal in Natural Gas Treating [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2003, 32(5): 291-294.
- [10] 高明. MDEA 脱碳再生塔液泛与工况优化[J]. 天然气化工, 2007, 32(3): 52-55.
Gao Ming. Flooding Problem and Operation Optimization of The MDEA Solution Regenerator of the CO₂ Removal Unit [J]. Natural Gas Chemical Industry, 2007, 32(3): 52-55.
- [11] 裴贵彬,李克见,赵炯,等. 脱硫系统溶剂再生塔操作波动分析及优化[J]. 石油炼制与化工, 2016, 47(2): 74-78.
Pei Guibin, Li Kejian, Zhao Jiong, et al. Analysis of Operation Fluctuation of Solvent Regeneration Tower in Sour Gas Desulphurization System and Its Optimization [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2016, 47(2): 74-78.
- [12] 黄河,王玉福,王飞,等. MDEA 再生塔工艺计算[J]. 天津化工, 2014, 28(5): 20-22.
Huang He, Wang Yufu, Wang Fei, et al. The Design of MDEA Regeneration Tower [J]. Tianjin Chemical Industry, 2014, 28(5): 20-22.
- [13] 陈智强. 离心泵最小流量旁路设计[J]. 石油化工设计, 1998, 15(3): 42-44.
Chen Zhiqiang. Design of Minimum Flow Bypass for Centrifugal Pump [J]. China Petrochemical Design, 1998, 15(3): 42-44.
- [14] 喻芳. 离心泵最小流量控制方案的选择[J]. 化工设计, 2017, 27(1): 19-20.
Yu Fang. Selection of Minimum Flow Control Scheme for Centrifugal Pump [J]. Chemical Engineering Design, 2017, 27(1): 19-20.
- [15] 邵晨,王小鹏,邢桂坤,等. 石油化工装置离心泵最小流量浅析[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(6): 51-54.

(下转第 45 页)

计, 2008, 19(2): 44-48.

Chen Xue. Process Selection of LNG Receiving Terminal [J].

Petroleum Planning and Design, 2008, 19 (2): 44-48.

- [16] 姜国良, 侯志强, 刘 骁, 等. 山东 LNG 接收站再冷凝器工艺及控制系统[J]. 油气储运, 2015, 34(1): 42-45.

Jiang Guoliang, Hou Zhiqiang, Liu Xiao, et al. Recondenser Process and Control System of Shandong LNG Terminal [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34 (1): 42-45.

- [17] 陈 帅, 宫 明, 魏念鹰, 等. LNG 接收站不同运行参数下最小外输量的计算[J]. 油气储运, 2015, 34(3): 303-309.

Chen Shuai, Gong Ming, Wei Nianying, et al. Calculation of Minimum Sendout Rate of LNG Terminal with Different Operating Parameters [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2015, 34 (3): 303-309.

- [18] 陈桃强, 李 宁, 魏光华, 等. 用户负荷特性对 LNG 接收站经济运行策略的影响[J]. 化工学报, 2018, 69(增刊 2): 436-441.

Chen Taoqiang, Li Ning, Wei Guanghua, et al. Influence of

Load Characteristic on Economic Operation of LNG Receiving Terminal [J]. CIESC Journal, 2018, 69 (Suppl 2): 436-441.

- [19] 傅铸红. LNG 站再冷凝工艺及运行控制[J]. 化学工程与装备, 2015, (12): 179-180.

Fu Zhuhong. Re-condensation Process and Operation Control of LNG Station [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2015, (12): 179-180.

- [20] 汪 蝶, 张引弟, 杨建平, 等. LNG 接收站 BOG 再冷凝工艺 HYSYS 模拟及优化[J]. 石油与天然气化工, 2016, 45(5): 30-34.

Wang Die, Zhang Yindi, Yang Jianping, et al. HYSYS Simulation and Optimization of BOG Recondensation Process at LNG Receiving Terminal [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2016, 45 (5): 30-34.

- [21] 周宇军, 杨伟红, 蔡主斌, 等. LNG 接收站 BOG 系统运行模式优化[J]. 天然气与石油, 2018, 36(2): 36-40.

Zhou Yuhuan, Yang Weihong, Cai Zhubin, et al. Optimization of BOG System Operational Mode in LNG Terminal [J]. Natural Gas and Oil, 2018, 36 (2): 36-40.

(上接第 39 页)

Shao Chen, Wang Xiaopeng, Xing Guikun, et al. Analysis of Minimum Flow of Centrifugal Pump Used in Petrochemical Plant [J]. Process Equipment & Piping, 2015, 52 (6): 51-54.

- [16] 王 宇, 龙秉文, 黄 海, 等. 离心泵的流量调节与节能控制[J]. 北京化工大学学报, 2007, 34(3): 234-237.

Wang Yu, Long Bingwen, Huang Hai, et al. Flow Control of a Centrifugal Pump and Its Energy-saving Operation Control [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2007, 34 (3): 234-237.

- [17] 聂世全. 离心泵机组变频调速节能运行稳定性规律[J]. 油气储运, 2001, 20(8): 45-48.

Nie Shiquan. Energy Saving with Waring Frequency and Speed Adjusting of Centrifugal Pump Set and Its Operating Stability Law [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2001, 20 (8): 45-48.

- [18] 冯 浩. 变频调速技术在离心泵节能中的应用[J]. 石油化工设计, 2009, 26(3): 45-47.

Feng Hao. Application of Variable Frequency Control Technology in Centrifugal Pump for Energy Saving [J]. Petrochemical Design, 2009, 26 (3): 45-47.

- [19] 刘耀宇, 谢恪谦. 变频调速离心泵节能分析及应用效果举例[J]. 炼油技术与工程, 2004, 34(9): 45-48.

Liu Yaoyu, Xie Keqian. Energy Conservation Analysis of Variable Frequency and Speed Centrifugal Pump and Its Application [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2004, 34 (9): 45-48.

- [20] 耿媛媛. 石化离心泵汽蚀问题及防止措施[J]. 山东化工, 2015, 44(17): 110-112.

Geng Yuanyuan. Cavitation and Preventive Measures of Petrochemical Centrifugal Pump [J]. Shandong Chemical Industry, 2015, 44 (17): 110-112.

- [21] 张 娜, 张 晶. 离心泵汽蚀现象分析及防汽蚀措施[J]. 流体机械, 2013, 41(7): 53-55.

Zhang Na, Zhang Jing. Cavitation Phenomena Analysis and Improvement of the Centrifugal Pump [J]. Fluid Machinery, 2013, 41 (7): 53-55.

- [22] 陈亚林, 刘益才. 离心泵汽蚀及防止方法[J]. 真空与低温, 2009, 15(4): 244-246.

Chen Yalin, Liu Yicai. Centrifugal Pump Cavitation and Its Prevention [J]. Vacuum and Cryogenics, 2009, 15 (4): 244-246.