天然气管道干燥技术综述

吴小平[1], 苏　欣[2], 张　琳[2], 杨　罗[1]

(1. 中国市政工程西南设计研究院, 四川 成都 610081; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘　要: 天然气管道内若有水存在, 不仅会引起管道内壁腐蚀而且还有可能形成水合物, 造成管道堵塞甚至引发事故。因此, 在管道投产运行之前, 必须对管道进行干燥。综述了目前常用的干燥剂法、流动气体蒸发法和真空干燥法的原理和应用情况; 重点介绍了现在常用的干空气干燥法, 包括基本原理、典型的工艺流程、干空气的制取, 分析了影响干空气干燥法的各种因素。

关键词: 输气管道; 干燥技术; 工艺

文章编号: 1006-5539(2006)04-0020-04　　文献标识码: A

0　引言

天然气管道中如果含有水, 则液态的水就有可能与天然气中的少量酸性气体生成酸性物质, 腐蚀管道内壁, 影响管道系统使用寿命及其可靠性; 同时有可能形成天然气水合物或造成冰堵, 造成管道堵塞, 影响管道安全运行。因此, 为了避免这些问题的发生, 在管道投产前必须对管道进行干燥, 脱除管道中游离的水和大部分的水蒸气, 使其露点压力处于 −16 ~5 ℃[1]。

1　天然气长输管道常用干燥方法

天然气长输管道干燥技术起步很早, 发展也较为迅速, 干燥方法多样。目前, 国外天然气长输管道常用的干燥方法有: 干燥剂法、流动气体蒸发法(包括干空气干燥法、氮气干燥法、天然气干燥法)、真空法等。

1.1　真空干燥法[1~2]

真空干燥法是利用水的沸点随压力降低而降低, 当压力降到一定低时, 水就会在低温下沸腾而蒸发、汽化这一原理。一般利用真空泵从管道中抽气, 降低管道压力, 直到达到管壁环境温度下的饱和蒸气压(SVP), 使除水后残留在管道内壁上的水沸腾而迅速蒸发, 随后将水蒸气抽出管道, 达到干燥目的。日本的 JGC 公司对阿尔及利亚的一条长 220 km、管径 1 067 mm 的输气管道进行了真空干燥, 结果管道压力降到了 0.2 kPa, 达到了预定的露点; 我国的崖城 13-1 输气管道也是采用此方法进行干燥的, 最后经测算, 管壁上水膜厚度为 0.3 mm。

此方法技术要求较高, 只有选择合适的真空泵, 才能较好地控制抽气速率, 如抽气较快, 则管内水蒸发过快热损失较多, 容易结冰, 反之蒸发慢, 效率低, 能耗高。干燥时不能同时清管, 不适于长距离的小口径管道。但是此法优点很多: 空气可以任意排放, 成本低, 可靠性高, 可使管道到达很低的露点, 同时不会产生多余的废物, 干燥进度容易掌握, 易于气体输入完成投产。特别在使用氮气扫线时最低能达到 −68 ℃, 设备占地小, 在管道的一段作业, 这对于海底管道和不能用其他方法干燥的多汇管管道非常有利。真空泵的选择、环境温度、残留水量和液态水的分布等是影响其干燥的主要因素。

1.2　流动气体蒸发法[2~4]

流动气体蒸发法的原理是: 流动的干燥气体在管道里与残留在管内壁及低洼处的水接触后使水蒸

收稿日期: 2005-07-18

作者简介: 吴小平(1980-), 男, 重庆忠县人, 助理工程师。2004 年重庆大学城市燃气专业本科毕业, 主要从事城市燃气设计研究工作。电话: (028)83310873。

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

发，达到干燥的目的。这种气体可以是干燥的空气、氮气或天然气，所以流动气体蒸发法又可以分为干空气干燥法、氮气干燥法和天然气干燥法。其中，氮气干燥法在实际应用中一般是和其他方法合用，作为其他方法的一种补充[4]。现在最为常用的是干空气干燥法。与真空干燥法相比，此法技术要求低，干燥速度短，尤其在吹扫过程中还可以加发泡沫清管器来增大扰动，进一步使水膜摊开，提高干燥速率，缩短干燥时间。

1.3　干燥剂法

干燥剂干燥法一般用甲醇、乙二醇或三甘醇作为干燥剂，干燥剂和水可以任意比例互溶，所形成的溶液中水的蒸气压大大降低，从而达到干燥的目的。残留在管道中的干燥剂同时又是水合物抑制剂，能抑制水合物的形成。在应用过程中，由于乙二醇或三甘醇的价格费用较高，故一般选用甲醇作为干燥剂。随着工业生产重视环境程度的不断提高，干燥剂干燥法在工业现场的应用受到一定限制[4]。常采用天然气或氮气作为推动力，在两个清管器间夹带一定的干燥剂，从而达到彻底脱水干燥的目的，这就是国外常用的两球法。在两球法的基础上，国外又发展了三球法，与两球法相比，三球法能使残留在管内壁上的液膜中干燥剂的浓度高于两球法，且干燥剂损耗量小于两球法[1]。

甲醇干燥的优点是除了小口径管道，其干燥速度最快，可干燥管道的长度仅受限于清管器的性能，可用于陆上和海底管道，在干燥的同时投产，低温环境下同样有效。其缺点是单独使用不能达到负露点，对含硫天然气管道和纯石化管道不太适合；由于甲醇和天然气都容易燃烧，因此现场的热工设备的运行安全将受到影响；甲醇易燃、易爆，而且有剧毒，储存运输要求较高，易对环境造成污染和发生安全事故；同时甲醇干燥需要天然气或惰性气体，在实际操作中需要气井或氮气制备设备，难度较大[1~2]。

2　国内天然气长输管道干燥技术概况

由于以前对天然气长输管道内液态水的水蒸气的危害认识不够，20 世纪 90 年代以前建成的天然气长输管道在投产之前是不直接进行干燥的，随着长输管道建设水平的提高，以及大口径、高压、大排量天然气长输管道的兴建，国内才开始认识到干燥的必要性，因此天然气长输管道干燥技术在我国起步较晚。以下是 90 年代以后所做的几条重要管道干燥处理[3]：

a. 1992 年建成的上海平湖海底输气管道，内径 334 mm，长 388 km，全线采用了凝胶清管器夹带三甘醇的干燥方法进行干燥，最终干燥效果很好。

b. 1993 年建成的海南崖城 13-1 天然气输送管道，管径 711 mm，长 778 km，全线采用了真空法进行干燥，最终干燥效果很好。

c. 1997 年建成的陕京输气管道，采用甲醇干燥法进行干燥，干燥不彻底，效果不太理想，导致后来发生水合物冰堵。

d. 2000 年京－石输气管道，管径 525 mm，长 300 km，全线采用了干空气干燥，干燥效果很好。

e. 2001 年建成的涩宁兰输气管道，其中 9.5 km 试验段采用了干空气法进行干燥，达到了预期的效果。

f. 2002 年建成的沧淄输气管道，全线采用了干空气法进行干燥，干燥效果很好。

g. 2003 年西气东输天然气输送东段（靖边－上海），管径 1 016 mm，长 1 573 km，全线采用干空气干燥，最终露点为－20 ℃。

2.1　干空气干燥法工艺及原理[1, 5~7]

西气东输工程采用的天然气管道干燥方法主要是干空气干燥法。干空气干燥法是指将干燥空气低压进入管道内进行吹扫，利用的露点空气对水分的吸附能力到达干燥的目的。在理想状态下管道内的水分会被露点干空气吸附并被后面的干空气吹扫出管道，但在实际中干空气不可能将吸附水分的湿空气全部吹扫出管道。干空气干燥法有两种工艺：**a.** 在通干空气吹扫的同时间隔一定时间通泡沫清管道辅助干燥；**b.** 只用于空气连续低压吹扫。前一种工艺由于泡沫清管器的辅助作用，干燥速度较快，但由于泡沫清管器较易磨损，一般只适用于干燥距离较短的管段，一次可干燥的最长距离在 150 km 左右；后一种工艺可干燥很长的管道，目前为止采用此工艺干燥的距离最长的管道是 Europipe，距离长达 620 km，但要求空压机和制取干空气设备的规模很大。从干燥效率和效果上讲，后者不如前者；从应用范围上讲，前者适用于通径管线，而后者适用于所有管线，包括变径管线。

当干空气在管道中流动时，低露点的干空气很

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

快会吸湿至饱和，但随着空气在管道中的继续流动，压力逐渐下降，压力下降又会使空气的吸水饱和浓度增加，于是空气流将继续吸水，直至最终从管道末端被排出。在一定程度上，增加空气的流速可以缩短干燥所需的时间，但是水的快速蒸发会使得吸热量增加，从而降低了管道中的温度，减缓了水的蒸发速度。同时，增加流速就意味着需要更大规模的制干空气的设备和压缩机，而且会增加管道中空气的压力，压力增加又会导致空气吸湿能力下降。

干燥合格的标准及注意事项[1]：

a. 清管、干燥的合格标准是管道内水膜厚度不大于 0.1 mm。

b. 根据情况可对泡沫清管器进行称重，如含水量偏高，可进行一次高密封直板清管器清管。

c. 验收时如发现与合格标准仍有一定差距，可直接用干空气低压吹扫，直至达到合格标准为止（水露点小于－20 ℃）。

d. 为了收到更好的干燥效果，泡沫清管器的速度应控制在 0.5 ~ 1 m/s。

e. 干燥合格后如不立即进行注氮或置换，应采用 0.02 ~ 0.05 MPa 的干空气填充密封。

2.2 干空气制取[1]

制取干空气的主要方法有直接冷却法，冷却后加压法，干燥剂吸收法和分子筛法等。由于水在零度就要结冰，而且随空气温度降低，通过降温除水蒸气的效率将成倍下降，因此制冷的方法常用于制取常露点的空气，一般不用于直接制取管道干燥所需露点为低于－20 ℃的超干空气，但该方法可以作为干燥剂吸收工艺的一部分对空气进行初步干燥。

使用干燥剂除水是比较陈旧但有效的方法，干燥剂是指具有亲水力的固体或液体。常用的固体干燥剂有硅胶、氧化铝、分子筛、氯化锂、溴化锂、氯化钙等。常用的液体干燥剂有三甘醇、乙二醇等。其中硅胶、氧化铝、分子筛、三甘醇可将空气分别干燥到露点－60，－73，－90，－60 ℃，由于采用液体干燥剂具有腐蚀性，重量大，需要控制的液体晃动和飞溅等缺点，因此常用固体干燥剂进行干燥。

2.3 干空气干燥法的优点[1~3]

目前在我国广泛使用的是干空气干燥法。干空气干燥是采用经过除油、过滤和脱水的干燥纯净压缩空气吹扫管线，由于其低露点的特点使管道内壁附着的水分蒸发，并利用后继干空气将管道内的湿空气排出管外，达到干燥管道的目的。干空气干燥法具有以下优点：

a. 干燥效果均匀一致，露点可达到－25 ℃以下，且干燥时间相对较短。

b. 经济实用，设备费用低，可充分利用现有设备加快干燥进度。工艺简单，容易控制，有完整的干燥检测标准，能保证管道在较短时间内达标，对操作技术要求不高。干燥成本低，适用范围广，既适用于陆地管道，也适用于海底管道，既适用于通径管道，也适用于变径管道，且受管径、管道长度的影响相对最小。

c. 干燥同时如果采用除尘工艺，可使管道到达很高的清洁水平。

d. 空气来源广不受地区限制，空气可以任意排放，无毒、无味、不燃、不爆、无安全隐患。

e. 易与管道建设和水压试验相衔接。

在海底管道方面，干空气干燥法应用成功的例子：

第一条是 1995 年建成的 Europipe，是目前为止采用干空气干燥的距离最长的天然气管道，管径 1 016 mm，全长 620 km；另一条是刚建成的蓝色气流工程（Blue Stream Project Pipeline），两条 24″，深 1 000 m 的海底管道，每条 350 km，全线采用了干空气干燥。在国内，干空气干燥法成功应用于京－石、涩宁兰、沧淄、西气东输等天然气输送管道。还有东方 1－1 气田生产管道实际干燥操作时，干空气气量介于 1 200 ~ 1 300 m^3/h 之间，末端测得的空气露点至－40 ℃，用时 18.2 h；吸水阶段进行约 4 h 后，测得的空气露点为－33.4 ℃，之后空气露点基本不变。

这种方法的缺点是对于大口径管道，设备占地面积很大，需消耗大量燃油或电力来制取干空气。

2.4 影响干空气干燥法干燥效果的因素[3,6~7]

2.4.1 空气的最初含水量

理论上使用的干空气越干，干燥时间越短。但实际干燥施工是一般采用露点为－40 ~ －50 ℃的干空气，很少采用更低的露点。因为露点低于－50 ℃的干空气对缩短干燥时间的能力越来越小，而相应的制取费用越来越高。

2.4.2 环境温度

管线所处的环境温度越高，越有利于水分的蒸

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

发, 同时干空气的吸水能力越大, 干燥效果越好。

2.4.3　管道内的残留水量

没有内涂层的管道, 用清管器扫水后, 可以使管内残留水量减小至相当于管道内壁只有一层 0.05 ~0.1 mm 厚度的水膜。残留水计算公式如下[7]:

$$W=\frac{\pi}{4\rho(D_l^2-D_i^2)L}$$

$$D_i=D_l-2T$$

式中　W——残留水质量, kg;

D_l——管道内径, m;

D_i——管道内径减去水膜厚度, m;

ρ——水的密度, kg/m^3;

T——管内壁水膜厚度, m;

L——管段长度, m。

2.4.4　干空气的流量

干空气流量越大, 干燥时间越短, 5 ~8 m/s 的干空气流速在效果和经济上都比较好, 再增加干空气的流速对于干燥的效果影响不大。

2.4.5　液态水的分布状态

在干燥初期, 管道内的流态水聚集在管子的较低部位, 如间歇发送泡沫清管器, 可以将水推成薄膜, 增大了与干空气的接触面积, 提高干燥效果。

2.4.6　气量的大小

气量的增加在一定程度上可以缩短干燥所需的时间, 但投入费用与干燥时间之比也会相应下降。因此, 在实际操作时须根据现场设备、时间要求等具体条件来决定气量的大小。

2.4.7　降低管道末端的压力、保持持续低压吹扫可以缩短干燥所需的时间

在西气东输东段的干燥过程中, 由于地势起伏较大, 水压试验后管线低洼处的积水并不能完全清除干净, 中国石油天然气管道第四工程公司采用的是前面介绍的第一种干燥工艺, 即泡沫管道器辅助干空气吹扫, 同时摸索出了“慢送清管器空气置换法”。取得了非常理想的干燥效果, 每段干燥均取得了-25 ℃以下的干燥效果。

3　几种干燥方法的比较[3]

各种干燥方法有各自特点, 使用范围也不同, 各种管道干燥方法的优缺点见表 1。

表 1　各种干燥方法比较

比较项目	干燥剂法	流动气体蒸发法			真空干燥法
		干空气干燥法	氮气干燥法	天然气干燥法	
干燥成本	比较高	最低	昂贵	低	较低
干燥时间	较短	最短	较短	极长	较短
干燥效果	较好	很好	很好	较差	最好
适应范围	海底管道居多	不受区域限制, 受管径、长度的影响相对较小	只适用于小范围的管道干燥	不受任何限制	适用于较大管径
应用情况	趋于淘汰	应用最多、最广	受气源限制	长距离大口径、高压、温度较低管道不适用	海底管道、较大口径管道应用较多

4　结束语

国外天然气管道干燥技术发展已经比较成熟, 而对于我国来说, 这项技术才刚刚起步, 面临许多问题。随着天然气管道工业的发展, 天然气管道干燥技术必将越来越受到重视, 我们对于各种干燥技术的研究也将越来越深入, 管道干燥技术必将迎来发展的春天。

参考文献:

[1] 常景龙, 苏红春, 张黎霞, 等. 新建天然气管道的除水与干燥技术[J]. 油气储运, 2001, 20(12): 5-14.

[2] 郝建斌, 王宜建, 孙　盛, 等. 干空气吹扫干燥法在输气管道中的应用[J]. 油气储运, 2002, 21(2): 51-54.

[3] 倪洪源, 孙树山. 天然气长输管道干燥技术[J]. 石油工程建设, 2004, 30(6): 13-16.

[4] 刘　炀, 焦永涛, 王　波. 世界天然气管道干燥技术进展[J]. 清洗世界, 2004, 20(6): 19-23.

[5] 高发连. 天然气管道干燥施工方法[J]. 油气储运, 2003, 22(10): 43-45.

[6] 曹学文, 林宗虎, 陈振瑜, 等. 海底输气管道干空气干燥工艺技术[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 116-119.

[7] 宋小琴, 朱珊珊. 龙忠输气管道应用复合干燥法的可行性[J]. 油气储运, 2004, 23(6): 35-37.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net