

超临界 CO₂管道放空特性研究*

李顺丽¹ 潘红宇¹ 李玉星¹ 滕霖¹ 张大同¹

摘要: 大规模长距离输送二氧化碳 (CO₂) 时一般采用管道输送, 管内压降和温降是影响超临界 CO₂管道放空安全问题的重要因素。与天然气管道相比, 超临界 CO₂管道放空时 CO₂的降压可能导致管道内低温, 甚至形成干冰从而对管道及设备造成损伤, 危害管道安全。采用 OLGA 软件对超临界 CO₂管道放空过程参数变化规律进行动态模拟, 研究表明: 初始压力越高或者初始温度越低, 放空时间越长, 管内越早产生气液两相, 管内最低温度值越小, 生成干冰的风险也越大。超临界 CO₂管道放空时宜采取加热、保温等措施, 使管道内流体保持气态泄放, 从而有效防止干冰的生成以及管道低温损伤。

关键词: 超临界 CO₂; 管道输送; 放空; 干冰; 动态模拟

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.5.007

The Blow Down Characteristics of Supercritical CO₂ Pipeline

LI Shunli, Pan Hongyu, LI Yuxing, Teng Lin, Zhang Datong

Abstract: Pipeline is commonly used in large-scale long-distance transportation of carbon dioxide (CO₂), pipeline pressure drop and temperature drop are important influence factors of supercritical CO₂ pipeline blow down issues. Compared with natural gas pipeline, the decompression of CO₂ pipeline may cause a low temperature in the pipeline, and even the formation of dry ice, which damages the pipeline and equipment. By the OLGA software, the parameters variation in the pipeline during supercritical CO₂ pipeline blow down is simulated. The results show that: The higher the initial pressure or lower the initial temperature, the longer blow down time, the earlier generation of gas-liquid two-phase in inner tube, and the smaller minimum temperature value, the greater the risk to generate dry ice. Heating or insulation and other measures should be taken to keep the gaseous fluid discharge during the blow down of supercritical CO₂, thereby the generation of dry ice and pipeline low temperature injury can be effectively prevented.

Key words: supercritical CO₂; pipeline transportation; blow down; dry ice; dynamic simulation

在实际生产中, 当输气管道进行计划放空或事故泄压时, 可以通过放空系统使管道压力尽快泄放至安全范围内, 以防止事故的蔓延、扩大, 并为抢修赢得时间^[1]。与天然气管道相比, 超临界 CO₂管道放空过程存在特殊性以及一定的安全隐患。超临界 CO₂的放空不仅要考虑 CO₂释放到环境中后产生的高浓度窒息风险以及噪声危害^[2], 而且还要考虑对管道完整性的影响。从管道完整性的角度来说, CO₂和天然气不同, CO₂的临界点温度 (31.1 °C)

和三相点温度 (-56 °C) 较高, 降压时易引起相变, 若降压过快, CO₂到达三相点后会导致干冰的形成以及流动阻塞, 而且使钢管变得易碎^[3]。可见管内压降和温降是影响超临界 CO₂管道放空安全问题的重要因素。

本文采用 OLGA 软件^[4-5]对超临界 CO₂管道放空过程进行模拟, 并研究管内参数变化规律, 对 CO₂管道放空过程的安全控制和干冰形成预防有一定指导意义。

*基金论文: 国家自然科学基金项目 (51374231); 国家科技支撑计划项目 (2012BAC24B01)。

¹中国石油大学 (华东) 山东省油气储运安全省级重点实验室

1 计算模型

为了保证安全，参考US DOT CFR规范，在管道沿线一般每隔15 km（最大距离）设置截止阀和放空站，在管道破裂或者发生自然灾害时，可以关闭截止阀，进行维修，充满或放空该管段^[6]。结合国内东部平原某示范工程，根据CO₂放空站场的设置要求建立管段模型进行放空模拟。管道设计输量为100 × 10⁴ t/a，即33 kg/s。忽略地形起伏，需要放空的管道总长度为12 km，管径为300 mm，管内表面粗糙度为0.028 mm，管道总传热系数取0.9 W/(m²·K)。放空管位于管道11.99 km处，管径为200 mm，高度为2 m。管道起点采用流量控制，管道终点和放空管末端采用压力控制。平均大气温度为15 °C，管道埋地温度为6 °C。具体模型如图1所示。



图1 CO₂管道放空模型

2 放空过程管内参数变化规律

进行放空计算时首先打开管道两端截止阀，关闭放空阀，进行稳态计算以确定初始条件；然后关闭两端截止阀，打开放空阀开始放空。分别控制初始温度和初始压力，得到不同超临界工况下放空过程中管道内温度和压力随时间的变化规律以及管内相变过程，如图2、图3和图4所示。

2.1 管内温度及压力随时间的变化规律

从图2可以看出，对于初始温度均为45 °C的

超临界CO₂，当以不同初始压力放空时，管内压力均随时间增加逐渐降低，趋于大气压力。在3 MPa之前各工况的压降速度几乎相同。各工况管内温度首先随压力降低而降低，当温度降到一定值后回升，逐渐升至管道埋地温度（6 °C）。初始压力为8、10以及12 MPa时，对应的放空时间分别为4.6、5.3和6.1 h，即初始压力越低，放空所需的时间越短；对应的温度最低点分别达到-61.3 °C（0.37 MPa）、-65.3 °C（0.36 MPa）和-66.6 °C（0.31 MPa），即初始压力越低，管道内最大温降越小。

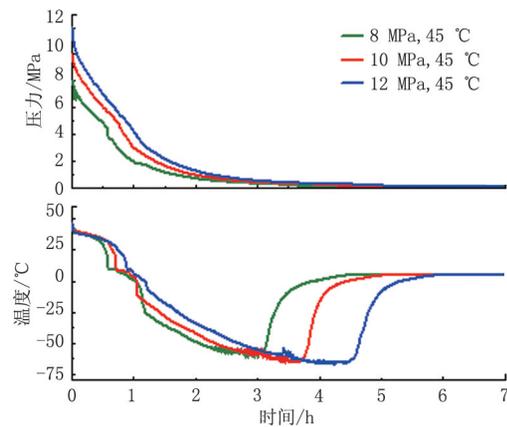


图2 相同初始温度下管内温度及压力随时间的变化规律

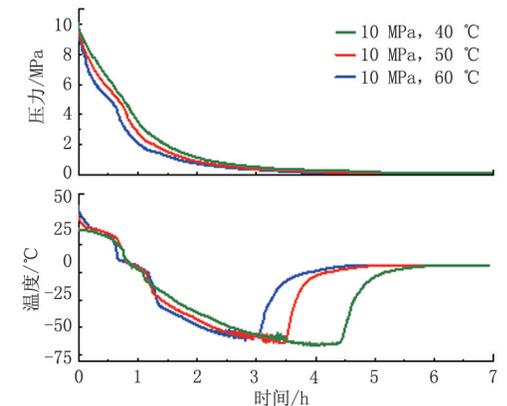
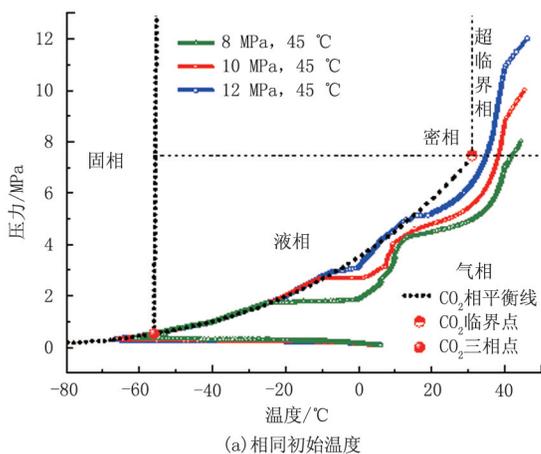
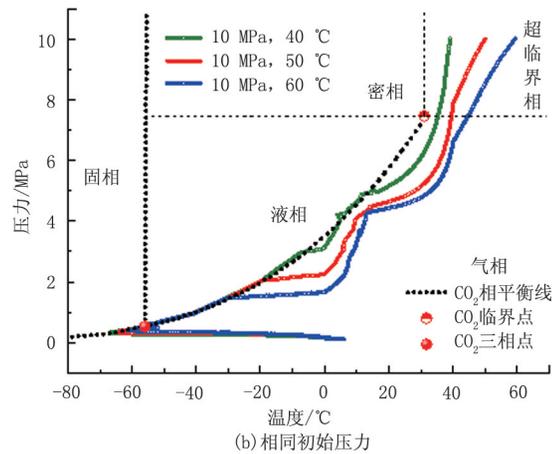


图3 相同初始压力下管内温度及压力随时间的变化规律



(a) 相同初始温度



(b) 相同初始压力

图4 超临界CO₂放空管内相变过程

从图3可以看出,对于初始压力均为10 MPa的超临界CO₂,压力与温度的变化规律与相同初始温度下的参数变化规律基本一致。当初始温度为40、50以及60 °C时,对应的放空时间分别为5.9、5.0和4.5 h,即初始温度越低,放空所需的时间越长;对应的温度最低点分别达到-66.6 °C (0.31 MPa)、-64.2 °C (0.33 MPa)和-61.1 °C (0.38 MPa),即初始温度越低,管道内最大温降越大。

由上面分析可看出,在其他条件不变的情况下,超临界CO₂管道放空时初始压力越高,或者初始温度越低,放空时所需要的时间越长,而且在放空过程中管道内部达到的最低温度值越小。因此,适当提高放空前的CO₂温度,或者在放空过程中对管道进行加热保温,可以有效降低放空时间,减小管道低温损伤的可能。

2.2 管内相变过程

CO₂放空与天然气放空的不同之处在于需要考虑泄放过程可能存在的潜在风险(如干冰堵塞以及冻伤),研究管内的相变过程可更直观地看出是否会出现以上风险,对控制干冰生成有一定的指导作用。

从图4可以看出,超临界CO₂从超临界相向气相过渡时温度和压力没有明显波动,在一定压力之前保持气相放空。随着压力和温度的继续下降,CO₂进入气液共存区,放空过程沿着气液相平衡线进行。当放空到达三相点(0.53 MPa, -56 °C)后,管道内生成干冰。随后压力和温度沿着气固相平衡线继续降低,当到达0.3~0.4 MPa之间某点时,从外界吸收的热量足够使管内干冰全部升华成气相CO₂,于是管内温度发生转折,随压力下降而逐渐升高至管道埋地温度。

在本文研究的各超临界工况下,管内流体参数均达到三相点,即产生了干冰。

3 结论

对超临界CO₂放空过程可能出现的潜在风险进行分析后,借助OLGA软件对固定容积的超临界CO₂管道的放空进行模拟,分析了管道内部压力和温度变化规律,得到以下结论:

(1) 管内压降和温降是影响超临界CO₂管道放空安全问题的重要因素。

(2) 超临界CO₂放空时首先从超临界相变为气相,若生成液相则沿着气液相平衡线继续泄放;若产生干冰则沿着气固相平衡线继续泄放;当压力降到一定值后,温度不再随压力继续下降,逐渐升至管道埋地温度。

(3) 初始压力越高或者初始温度越低,放空时间越长,管内越早产生气液两相,管内最低温度值越小,生成干冰的风险也越大。

(4) 超临界CO₂管道放空时宜采取加热、保温等措施,使管道内流体保持气态泄放,从而有效防止干冰的生成以及管道低温损伤。

参考文献

- [1] 晏伟. 输气站场放空系统设计思路[J]. 石油工程建设, 2012, 38 (6): 39-43.
- [2] 赵立丹. 天然气长输管道站场放空系统计算[J]. 油气田地面工程, 2011, 30 (8): 51-52.
- [3] Det Norske Veritas. Design and operation of CO₂ pipelines: DNV-RP-J202-2010 [S]. Oslo: DNV, 2010: 24-25.
- [4] DE KOEIJER G, BORCH J H, DRESCHER M, et al. CO₂ transport-depressurization, heat transfer and impurities[J]. Energy Procedia, 2011 (4): 3 008-3 015.
- [5] CLAUSEN S, OOSTERKAMP A, STROM K. Depressurization of a 50 km long 24 inches CO₂ pipeline[J]. Energy Procedia, 2012 (23): 256-265.
- [6] US Department of Transportation, Office of Pipeline Safety. Code of Federal Regulation (CFR) Title 49-Transportation of Hazardous Liquid by Pipeline[ED/OL]. [2010]. <http://se-tonresourcecenter.com/49CFR/Docs/wcd00007/wcd00773.asp>.

作者简介

李顺利: 硕士研究生, 就读于中国石油大学(华东)油气储运工程专业, 主要从事CO₂输送及安全泄放控制方向的研究工作, 15820033747, lsl_upc@163.com, 山东省青岛经济开发区长江西路66号中国石油大学(华东)储运学院储运工程系, 266580。

收稿日期 2015-07-14

(栏目编辑 杨军)