

# Characteristic and method of low temperature pipe stress analysis

Lina Wang

Daqing Oilfield Design Institute Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163712, China

## Abstract

The low temperature pipe is an important part of the cryogenic separation unit of natural gas and the LNG liquefaction station. However, the strength of the pipe material is easy to be changed and brittle break in the low temperature environment. Its safe and reliable operation is the key to the smooth operation of the plant. In this paper, the natural gas cryogenic unit is taken as an example, and CAESAR II software is used to discuss the change of operating temperature, combination of load conditions and setting of boundary conditions, so as to master the change of stress distribution and pipeline strength.

## Keywords

Low temperature pipe; Stress analysis; Cryogenic gas

## 低温管道应力分析的特点和方法

王丽娜

大庆油田设计院有限公司, 中国 · 黑龙江 大庆 163712

## 摘 要

低温管道是天然气深冷分离装置和LNG液化站的重要组成部分,然而低温环境下,管道材料的强度易发生变化出现脆断,其安全可靠运行是工厂平稳运行的关键。本文以天然气深冷装置为实例,采用CAESAR II应力分析软件,从操作温度变化、载荷工况组合和边界条件的设置等方面进行论述,以掌握低温管道的应力分布和管道强度的变化情况。

## 关键词

低温管道; 应力分析; 天然气深冷

## 1 概述

在石油天然气项目建设和运行中,常常会出现低温工况,如安全阀和调压阀出口管道、天然气深冷分离装置、LNG 液化站以及东北寒冷冬季温度低于  $-20^{\circ}\text{C}$  的环境。长期处于低温环境下,管道材料的强度易发生变化,甚至出现脆断,影响工厂的安全性和平稳运行。因此,对低温管道进行应力分析以掌握材料强度和管道应力的变化尤为重要。

### 1.1 温度变化对管道材料性质的影响

压力管道输送介质的温度以及外界环境温度的变化对管道材料的性能有较大的影响。当介质温度过高时(如碳钢温度超高  $300^{\circ}\text{C}$ 、合金钢温度在  $400^{\circ}\text{C}$  以上时)材料的应力超过一定限度,会出现应力保持不变,应变随时间增加而不断增加的情况,即发生了高温蠕变现象。而当介质温度过低时,材料将产生脆变,容易造成管道的脆性断裂。

材料低温脆性的形成,与屈服强度  $\sigma_s$  和强度极限  $\sigma_b$  的温度依赖性密切相关。其中,强度极限  $\sigma_b$  受温度波动的影响较小,而屈服强度  $\sigma_s$  的变化规律则取决于材料本身的属性。具体而言,体心立方晶体结构的金属及合金、或是部分密排六方晶体的金属及合金,其屈服强度  $\sigma_s$  会随温度降低而显著攀升。这一特性使得  $\sigma_s$  与  $\sigma_b$  随温度变化的两条曲线会相交于某一特定温度点,该点对应的温度即为  $t_k$  (脆性转变温度)。当材料温度高于  $t_k$  时,强度极限  $\sigma_b$  始终大于屈服强度  $\sigma_s$ ,材料在承受载荷时会先发生屈服变形,随后才出现断裂;而当温度低于  $t_k$  时,强度极限  $\sigma_b$  会小于屈服强度  $\sigma_s$ ,材料受载后会优先达到断裂强度,此时材料将表现出脆性断裂的特征。<sup>[1]</sup> 因此,低温管道在进行选材时,要求材料具有良好的低温韧性、抗腐蚀性能和焊接性能等。

管道材料在工程设计中的选用通常将  $t_k$  值作为材料使用下限温度。经过大量的试验和工程实践,各类材料所适用的温度下限值在国内外标准中均有详细的规定。因此,在进行管道选材时,要充分考虑管道设计温度和材料使用温度下限值来确定管道基材。然而当管道操作条件符合“低温低应力工况”条件时,可以通过控制管道整体应力值远低于断裂

【作者简介】王丽娜(1989-),女,中国黑龙江绥化人,硕士,工程师,从事油气田地面场站及配套设施的配管设计和管道材料研究。

强度  $\sigma_s$  来适当放宽管道材料的适用温度下限, 同时又能满足标准规范和工程设计的需求。

1.2 管道应力分析的类型和方法

管道应力分析包括静力分析和动力分析, 根据管道所承受载荷的类型, 静力分析中管道受力分为一次应力、二次应力和偶然应力, 管道自重和介质重量、压力载荷属于一次应力范畴, 二次应力主要由温度变化引起的热胀冷缩和端点位移产生; 动力分析主要为管道的振动分析。<sup>[2-3]</sup> 对管道进行静力分析计算和校核, 要求管道的一次应力和二次应力值均小于规范规定的许用应力。控制管道的一次应力值使管道满足刚度条件, 最直接的办法是减小管道弯矩, 即要减小管道跨距, 可以通过适当补充增加支架的数量来减小一次应力; 对管道进行二次应力分析使管道满足强度条件, 要求管道具有足够的柔性, 在进行管道布置时可以增大非约束段管道长度和适当增加  $\pi$  型弯来减小二次应力。<sup>[4]</sup>

对低温管道进行应力分析时, 装置运行中温度变化引起的热胀冷缩和端点位移易造成支架脱空, 因此节点位移的大小和对二次应力的校核是应该关注的重点。同时在开停车、预冷阶段, 易出现热拱、水锤等现象, 也是低温管道应力分析的关注重点。

2 天然气深冷装置管道应力分析实例

以北方某天然气深冷分离装置管道安装设计为例, 本文选取膨胀机出口去脱甲烷塔下部进口管线进行应力分析。

2.1 模型参数输入

管道介质: 天然气; 介质密度:  $0.74\text{kg/m}^3$ ; 设计温度:  $-82.8^\circ\text{C} \sim 86.0^\circ\text{C}$ ; 设计压力:  $2.5\text{MPa}$ ; 规格:  $\Phi 219 \times 6$ ; 材质: 06Cr19Ni10 不锈钢; 材质密度:  $7.93\text{kg/dm}^3$ ; 管道保冷层厚度为  $180\text{mm}$ 。

为了对比温度变化对管道应力的影响, 本文对输入的设计温度参数分别取常温  $20^\circ\text{C}$  和低温  $-82^\circ\text{C}$ 。

2.2 模型建立

为使一次应力和二次应力满足许用应力要求, 在管道布置设计时合理增设支吊架和充分考虑管道柔性。建立管道模型见图 1。



图 1 管道模型示意图

2.3 工况选取与组合

本文在对深冷分离单元管道进行应力分析时, 考虑了管道和介质重力载荷  $W$ 、温度载荷  $T1$ (常温)、温度载荷  $T2$ (低温)、压力载荷  $P1$ , 按照应力载荷的不同分类进行工况组合, 采用 CAESAR II 软件分别对不同温度、不同工况下的应力进行校核分析。各种组合工况见表 1。

表 1 载荷工况组合统计表

序号	载荷工况	应力类型
1	$L1=W+T1+P1$	OPE
2	$L2=W+P1$	SUS
3	$L3=L1-L2$	EXP
4	$L4=W+T2+P1$	OPE
5	$L5=L4-L2$	EXP

2.4 计算结果分析

2.4.1 常温下管道的应力情况

通过 CAESAR II 软件计算, 在常温下, 管路模型节点位移较小, 均小于  $1\text{mm}$ , 管路各节点没有出现支架脱空现象, 一次应力和二次应力均在许用应力允许范围内。应力校核情况见表 2。

表 2 常温下管道应力校核

载荷工况	节点	应力最大值 /kPa	许用应力 /kPa	比值 %
L2 (SUS)	50	35410.5600	137895.1000	25.6793
L3 (EXP)	180	4063.4410	254546.1000	1.5963

2.4.2 低温下管道的受力情况

通过软件计算可知, 当管路温度降低后, 低温操作工况的二次应力较常温工况有明显增大, 但仍然在许用应力允许范围内, 应力校核情况见表 3。

表 3 低温下管道应力校核

载荷工况	节点	应力最大值 /kPa	许用应力 /kPa	比值 %
L2 (SUS)	50	35410.5600	137895.1000	25.6793
L5 (EXP)	140	79757.0600	323313.1000	24.6687

该管路模型节点 120-140 处 DY 方向节点位移较大, 见表 4, 可知塔前进口管线部分管段在低温作用下产生变形, 管线局部向上拱起, 支架出现脱空现象, 造成支撑失效。

表 4 不同操作温度工况下节点位移 DY (mm)

载荷工况	节点		
	120	130	140
L1	-1.1453	0.0000	0.2002
L4	-3.5434	8.8244	14.6024

可在节点 130 处设置弹簧支架, 借助弹簧支架的辅助支撑作用来缓解该管段的低温变形。这是由于弹簧支架既能

承受管道荷载，又允许其存在垂直位移，解决了管道在有垂直位移时的支撑问题，增加了管道的柔性。

表 5 不同操作温度工况下增加弹簧后节点位移 DY ( mm )

载荷工况	节点		
	120	130	140
L1	-1.1453	0.0000	0.2002
L4	-17.2675	0.0000	23.1146

3 结语

本文采用 CAESAR II 软件对天然气深冷分离装置的低温管道进行了应力分析，考虑了重力载荷、压力载荷 ( 内压 )

和不同温度载荷变化的影响；对载荷分类组合并进行应力校核，通过计算结果可知温度降低容易引起管道局部变形，出现支架脱空现象，可以通过借助弹簧支架等辅助作用对管道模型进行优化。

参考文献

[1] 阳东升，费珂，何旭东，蔡晓峰.“低温低应力工况”下管道材料的应用[J].化工设计，2019，29(3):29~31.

[2] 唐永进.压力管道应力分析[M].北京:中国石化出版社,2010.

[3] 李家栋. CAESAR II用于应力计算时的载荷类型及要求[J].广州化工，2018,46（22）：100~102.

[4] 于国鹏，赵广明，张彦新. LNG罐区低温管道应力分析[J].石油化工设计，2015，32（3）：22~25