

高温合成气管道选材及柔性实证分析

宋海军

安徽华东化工医药工程有限责任公司上海分公司 上海 201315

摘要: 本文主要探讨天然气、炼厂干气、石脑油重整制氢中高温合成气管道的选材及柔性布置分析问题。涉及重整制氢等过程中的高温转化气管道的高温氢腐蚀问题和蠕变应力问题。针对这些问题,文章以合金钢UNS NO8811材质为例,根据管道布置方案,进行了详细柔性分析操作介绍。通过实证分析,旨在为高温合成气管道的布置提供更为科学、合理的指导。

关键词: 高温合成气管道; 高温临氢; 柔性分析

引言

随着能源行业的快速发展,高温转化在天然气、炼厂干气、石脑油重整制氢等领域的应用越来越广泛。然而,高温环境下,合成气管道面临着严重的腐蚀和应力问题,严重影响了管道的安全性和使用寿命。因此,对高温合成气管道的布置进行分析和研究,具有重要的现实意义和经济价值。

1 高温合成气管道的特性及选材

1.1 合成气管道特性

合成气管道主要用于输送高温的合成气,合成气主要组分为CH₄、H₂、H₂O、CO、CO₂。为使甲烷更充分的与水蒸气反应,提高氢产率,重整炉温度通常在800-1000摄氏度之间。重整炉合成气出口温度一般控制在750-870摄氏度。

1.2 合成气管道选材

1.2.1 合成气管道主要失效形式

合成气管道钢材在高温、临氢的情况下失效的形式很多,影响的因素也很复杂。本文以几种常见的,也是主要的失效形式进行分析。

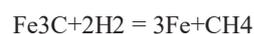
1.2.2 氢脆

在一定的温度和氢分压下,氢气将分解成氢原子,当它与钢材接触时,由于氢原子体积小,它会被钢材吸附,并向钢材内部扩散。随着时间的延长,氢气会越聚越多,形成的内压则越来越大。同时,孔隙中的氢气也将部分还原为氢原子。当内外压力和相近时,氢气的形成与分解趋于平衡。在一定的外界条件下,它不会使金属的微观孔隙增大或急剧增大。此时,钢材中溶解的氢并没有与钢材中的组分起化学反应也没有改变钢的组织,在显微镜下观察不到裂纹。钢材的强度极限和屈服极限也无大的改变。但它使钢材显著变脆,塑性减小。^[1]这种脆性是可逆的,可通过在真空中加热缓冷或常温静

置除去溶解的氢气即减少其脆性。

1.2.3 氢腐蚀

温度和氢分压升高并达到一定值时,扩散到钢材内部的氢原子会与钢材内部中的碳体发生化学反应,生成甲烷气,引起钢材内部脱碳。从而引起钢材的组织变化。其化学反应式为:



由于晶界上的元素位能较高,故该反应通常先在晶界上发生。生成的甲烷气不断从钢材中逸出,而聚集在晶界上原有的微观孔隙内,产生高压,使晶界变宽,继而产生微观裂纹。或者在钢材表面的夹杂中聚集产生鼓泡。由于晶粒表面的脱碳,使晶粒内部的碳向晶界扩散,为甲烷的继续生成提供了条件。甲烷气越多,压强越大,产生的内压力越大,从而加速了微观裂纹的扩展。裂纹的扩展又为氢和碳的扩散提供了条件,使反应不断地进行下去,最终使钢材完全脱碳,裂纹形成网络。此时,钢材的机械性能急剧恶化,甚至遭到破坏。此过程是逐渐进行的,而且有一定的过度期,称之为孕育期。孕育期随氢分压和温度的升高而变化,这是因为氢分压升高有利于氢杂钢材中的溶解,而温度的升高则增加了氢在钢材的扩散速度和脱碳反应的速度。孕育期的长短与钢材的组织也有关系。合金钢中由于诸如铬、镍、钼、钛等元素的存在,它们与碳有较强的亲合力,能形成比渗碳体更稳定的合金碳化物,从而能抑制或阻止脱碳反应的进行。^[2]而且随着合金元素量的增加,其抗脱碳的能力就越高。当钢材所处环境中的介质操作条件低于它的脱碳温度的氢分压时,不会产生氢腐蚀,或者氢腐蚀的发展比较缓慢,以致孕育期超过管子的正常使用寿命。

1.2.4 表面脱碳

与内部脱碳相同,在一定的氢分压和温度下,氢将与钢材表面的渗碳体反应生成甲烷或一氧化碳,造成钢

材的表面脱碳。对于碳钢和低合金钢来说，因其晶界上的位能高于钢材表面上的元素的位能，故其内部脱碳先于表面脱碳发生。而对于高合金钢来说，由于其稳定的合金碳化物的存在，使其内部和表面都不容易产生脱碳。钢材的表面脱碳不象内部脱碳那样会造成严重后果。通常是造成钢材的强度和硬度略有减少，而延性增加。钢材发生表面脱碳也有一个起始温度和起始氢分压，低于这个温度和压力不会发生表面脱碳。

1.3 合成气管道选材

根据合成气管道特性，其材质通常采用UNS N08811

等耐高温合金材料。本文以UNS N08811为例进行实证分析。UNS N08811物理性能：密度 8.0g/cm^3 ，熔点： $1350\sim 1400^\circ\text{C}$ ，比热容： $500\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ，电阻率：0.93。具有较高的镍、铬含量，使得其合金具有优秀的抗氧化性，同时也具有出色的抗碳化、氮化性以及抗硫化气体腐蚀的能力。另外在材料热处理的升、降温 and 保温过程中将在金属表面形成一层氧化膜，在材料投入使用前进行这种预氧化能提高抗碳化性能。UNS NO8811合金还具有优秀的耐氢腐蚀的能力，是烃重整制氢工艺中的合适选材。UNS N08811材料成分见表1。

表1 UNS N08811材料成分表CHEMICAL REQUIREMENTS

合金牌号	%	碳 C	硅 Si	锰 Mn	铬 Cr	镍 Ni	铜 Cu	钛 Ti	磷 P	硫 S	铝 Al
UNS N08811	MIN	0.06			19.0	30.0		0.15			0.15
	MAX	0.10	1.0	1.5	23.0	35.0	0.75	0.60	0.03	0.015	0.60

2 高温合成气管道的柔性实证分析

高温合成气管道在运行过程中，受到热膨胀、温度变化等多种因素的影响，使得管道的应力分布和变形情况十分复杂。在高温环境下，UNS N08811材质的管道容易发生蠕变和应力集中，尤其是在管道弯头、三通等连接部位。在高温环境下，UNS N08811材质具有良好的抗蠕变性能和抗腐蚀性能，但仍然存在应力集中和氢脆等问题。

为了验证柔性布置方案的有效性，本文选取了一个典型的高温合成气管道进行了实证分析，分析工具为CAESAR II。^[3]通过布置方案的柔性分析，发现柔性布置

方案能够显著降低管道的应力集中和氢脆风险，提高管道的安全性和使用寿命。

由于CAESAR II材质库中不含UNSN08811材料，需用户自定义材料库。自定义材料库允许用户添加、修改和删除材料，以适应不同的工程需求。在自定义材料库中，我们需要输入指定材料的名称、密度、弹性模量、泊松比、屈服强度、不同温度下的许用应力等。根据工艺条件、ASTM Boiler and Pressure Vessel Code Section II以及材料厂家提供的数据，该管道设计条件、材料参数详见图1。

管道材质 Pipe Material And Specification: ASTM SB407 Gr.800HT
管道壁厚 Pipe Schedule: UNS N08811 (Sch.80)
执行标准 Applicable Design Code: B31.3 Or 100,000 Hours Creep To Rupture
最高操作温度 Maximum Operating Temperature, Deg. F 1,550
最大操作压力 Maximum Operating Pressure, psig: 280
热膨胀系数 Corresponding Coefficient Of Thermal Expansion 10.125x10-6 (0.015"/IN) Of Piping Mtl., in / in /deg.F
材料密度 Density Of Pipe Material, lbs/cubic inch : 0.287
弯头半径 Pipe Diameter Bends: 6D Bends
弹性模量 (70 摄氏度) Modulus Of Elasticity At 70 Deg.F,psi:28,730,000
弹性模量 (操作温度)Modulus Of Elasticity At Max.Operating Temp.,psi: 19,665,000
许用应力 (70 摄氏度) Allowable Stress @70 Deg.F,lbs/sq.inch: 16,700
许用应力 (操作温度)Allowable Stress @1550 Deg.F,lbs/sq.inch: 3,100
管道保温 Insulation: Cerwool Inner Layer, Thickness (Inches) 3 Calcium Silicate Outer Layer, Thickness (Inches) 2
绝热层平均密度 Average Weight Density Of Insulation,lbs/cubic inch : 0.00617

图1 管道设计材料参数图

另外加入偶然荷载即风荷载和地震荷载。

风荷载的分析计算在静态荷载工况下进行。风荷载不与其它偶然荷载进行工况组合。

自定义材料库完成后按管道布置图建立模型，详见图2。

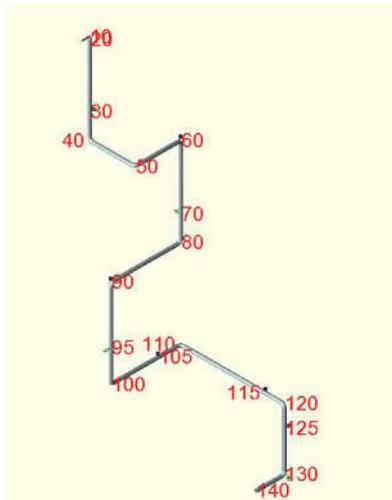


图2 管道布置图

本案例在柔性布置方案的实施中，主要采取了以下几点具体措施：

首先，优化管道弯头选用形式。本案例选用6倍直径弯头，有效的增加了管道柔性，吸收管道因热膨胀产生的应力，减少应力集中的风险。

其次，增加柔性支撑。柔性支撑包括弹簧支吊架、滑动支吊架等，这些支撑能够在管道发生热膨胀时提供一定的自由度，避免管道因过度约束而产生应力集中。同时，柔性支撑还能有效减少管道的振动和噪声，提高管道的运行稳定性。

通过分析，该管系具有良好的柔性，满足设计工况荷载要求。部分分析结果详见图3。

NO CODE STRESS CHECK PROCESSED: LOADCASE 3 (OPE) W+D1+T1+P1+H

Highest Stresses: (lb./sq.in.)			
Ratio (%)	0.0	@Node	39
OPE Stress:	15129.5	Allowable Stress:	
Axial Stress:	763.2	@Node	8
Bending Stress:	13917.6	@Node	40
Torsion Stress:	5380.0	@Node	30
Hoop Stress:	1589.4	@Node	8
Max Stress Intensity:	15197.8	@Node	39

CODE STRESS CHECK PASSED : LOADCASE 4 (SUS) W+P1+H

Highest Stresses: (lb./sq.in.)			
Ratio (%)	88.1	@Node	50
Code Stress:	2731.7	Allowable Stress:	3100.0
Axial Stress:	831.1	@Node	8303
Bending Stress:	1999.0	@Node	50
Torsion Stress:	224.0	@Node	79
Hoop Stress:	1589.4	@Node	8
Max Stress Intensity:	2733.7	@Node	50

图3 分析图

结束语

本文对高温合成气管道的选材和柔性布置分析问题进行了深入的研究和分析，对高温合成气管道材料的选择提供了依据，对管道的柔性分析提供了详细的工程案例参考。持续优化高温合成气管道材料的选择和完善管道柔性布置方案，能进一步提高高温合成气管道的安全性和可靠性。同时，还能为工程降低投资，创造更大的经济效益。

参考文献

- [1]侯桂军.管道应力分析与柔性设计浅谈[J].中国化工贸易,2014(34):152-153.
- [2]姜崴.管道应力分析软件在化工设计中的应用[J].山西化工,2004,24(2):65-67.
- [3]李靖.压力管道应力分析[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(10):151-152.