

低温下双温区多管道绝热支撑设计及数值模拟研究

艾丽斯佳, 胡石林[†], 储诚节

中国原子能科学研究院, 北京 102413

收稿日期: 2022-02-22; 接收日期: 2022-05-31

【摘要】 本文以液氢温区下的双温区多管道为研究对象, 对其进行了热流分析, 建立了几何模型, 采用有限元方法进行了热-结构耦合分析求解, 分析了不同壁厚及不同支撑宽度下漏热、应力及形变的变化规律. 研究表明: 壁厚减小时, 漏热值减少, 绝热支撑总体应力增加, 支撑形变增大; 宽度减小时, 20 K 温区漏热量减少, 80 K 温区漏热增加, 总漏热量减少, 支撑应力增大, 最大形变量增大. 最终, 针对某工程使用的双温区四管道, 拟合出了壁厚与漏热、最大应力及最大形变量变化规律的曲线、方程, 宽度与双温区漏热、最大应力及最大形变量变化规律的曲线、方程. 在应力、漏热、形变量均允许的情况下, 得出最薄壁厚可取到 1.576 mm; 在壁厚取为 2 mm 时, 得出最小宽度可取为 0.572 mm.

关键词: 低温管道; 绝热支撑; 热-结构耦合; 双温区多管道; 数值模拟

PACS: TQ 050.2

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.03.002

Design and Numerical Simulation of Thermal Insulation Support for Cryogenic Multi-Pipeline in Double Temperature Zone

AI Lisijia, HU Shilin[†], CHU Chengjie

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China

Received date: 2022-02-22; accepted date: 2022-05-31

【Abstract】 In this paper, taking the double temperature zone multi-pipeline under the liquid hydrogen temperature zone as the research object, the heat flow analysis is carried out, the geometric model is established, the thermal structural coupling analysis is solved by the finite element method, and the variation laws of heat leakage, stress and deformation under different wall thickness and support width are analyzed. The results show that when the wall thickness decreases, the heat leakage value decreases, the overall stress of the adiabatic support increases and the support deformation increases; When the width decreases, the heat leakage in 20 K temperature zone decreases, the heat leakage in 80 K temperature zone increases, the total heat leakage decreases, the support stress increases and the maximum deformation increases. Finally, for the double temperature zone four pipes used in a project, the curves and equations of wall thickness and heat leakage, maximum stress and maximum deformation variable change law, and the curves and equations of width and heat leakage, maximum stress and maximum deformation variable change law in double temperature zone are fitted. When the stress, heat leakage and deformation are allowed, it is concluded that the thickness of the thinnest wall can be 1.576 mm; When the wall thickness is 2 mm, the minimum width can be 0.572 mm.

[†] husl@ciae.ac.cn

Keywords: Cryogenic pipeline; Heat insulation support; Thermal structural coupling; Double temperature zone multi-pipe; Numerical simulation

PACS: 7460,7490,0290

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.03.002

Reference method: AI Lisijia, HU Shilin, CHU Chengjie, Low. Temp. Phys. Lett. **43**, 0173 (2022)

1 引言

低温制冷系统是影响大科学工程、航空航天、新能源、超导电力、生物、交通、医疗、信息产业、天文等各个领域与行业的高端应用核心支撑技术^[1]. 低温传输管道是低温制冷系统中的关键部件, 主要作用是传输制冷工质, 而为了获得这些制冷工质, 需要消耗很多能量. 因此为了保证制冷系统的经济性, 低温管道必须具有良好的绝热. 目前, 对于低温管道通常采用高真空多层绝热进行绝热.

高真空多层绝热低温管道需承受较大温差及管道内压的共同作用, 这时的绝热支撑不仅应尽可能的减少冷量的损失, 还需保证自身强度不被破坏而导致管道的失效. 因此, 在保证强度、刚度的要求下, 设计低温管道结构减少漏热是核心技术问题.

工程中经常遇到低温下双温区多管道的情况, 此时低温不仅与环境之间有热流传导, 本身双温区之间的温差, 也会引起热流传递、温差应力及形变, 需要对其规律进行研究分析, 以优化绝热支撑的设计.

2 双温区多管道模型

2.1 真空多层绝热热流分析

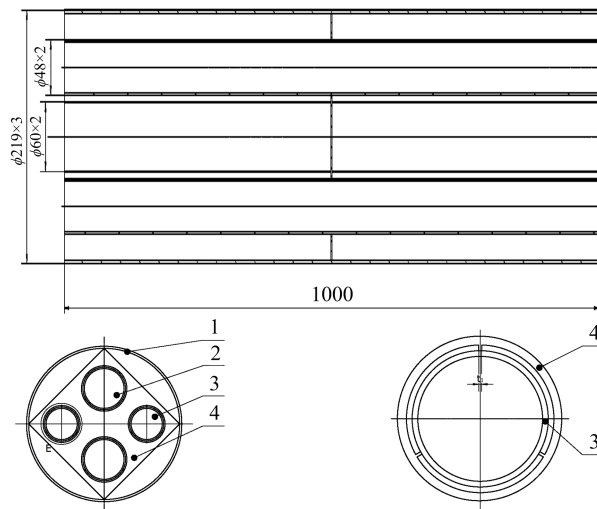
低温管道热量传入主要包括以下三个途径: 残余气体分子的传热量、低温管和外管的辐射传热、管道支撑的导热. 真空下, 残余气体分子的传热量大大减少. 同时, 多层绝热能大幅降低辐射传热, 因此通过绝热支撑的导热是漏热的主要途径.

本文针对双温区多管道的绝热支撑厚度及支撑宽度对漏热量及支撑应力、形变的影响规律进行研究分析, 忽略辐射传热和残余气体导热.

2.2 双温区多管道几何模型

本文采用 1000 mm 长的低温管道, 外管尺寸为 $\Phi 219 \times 3$, 内管四根, 内管介质分为 20 K 和 80 K 两个温区, 20 K 温区管道尺寸为 $\Phi 48 \times 2$, 80 K 温区管道尺寸为 $\Phi 60 \times 2$, 内外管材质为奥氏体不锈钢. 内外管间采用正方形绝热支撑, 材质为环氧玻璃钢. 几何模型如图 1 所示.

玻璃钢绝热支撑材料性能参数如表 1^[2].



1-外管; 2-80 K 内管; 3-20 K 内管; 4-绝热支撑

图 1 双温区多管道几何模型

表 1 玻璃钢力学性能

Table 1 Thermal conductivity of typical metal materials

材质	主轴 方向	密度 /(kg/m ³)	导热系数 /(W/(m·K))	弹性模 量/GPa	切变模 量/GPa
环氧玻	1、2 方向	1800	0.45	25.5	48
璃钢	3 方向		0.35	16	287

注: 1、2 方向沿管道径向, 3 方向沿管道轴向. 玻璃钢许用应力值取 125 MPa.

2.3 双温区多管道传热方程

根据传热学知识可知, 低温管道内外管的导热属于常物性、无内热源、稳态的情况, 满足拉普拉斯 (Laplace) 方程^[4]:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

上述导热微分方程常用的边界条件为:

第一类边界条件, 边界温度为常数, 且不随时间变化 $t_w = C$, t_w 为边界温度, C 为常数.

第二类边界条件, 已知边界上的热流密度:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \Phi \quad (2)$$

第三类边界条件, 已知边界与周围流体之间的传热系数和流体的温度:

$$-\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = h(t_w - t_f) \quad (3)$$

n 为边界外法线方向余弦; h 为对流换热系数; t_w

为边界温度; t_f 为流体温度.

在低温管道中,玻璃钢绝热支撑是各项异性材料,各向异性材料沿各个方向的导热系数不同;温度场内任一点的温度梯度与热流密度矢量不共线;各向异性材料在某一方向上的热流密度分量不仅与该方向上的温度变化率有关,还与其他方向上的温度变化率有关.沿直角坐标系三个方向的热流密度分量为^[3]:

$$q_x = -\lambda_{xx} \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda_{xy} \frac{\partial t}{\partial y} - \lambda_{xz} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (4)$$

$$q_y = -\lambda_{yx} \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda_{yy} \frac{\partial t}{\partial y} - \lambda_{yz} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (5)$$

$$q_z = -\lambda_{zx} \frac{\partial t}{\partial x} - \lambda_{zy} \frac{\partial t}{\partial y} - \lambda_{zz} \frac{\partial t}{\partial z} \quad (6)$$

对于几何形状和边界条件复杂的工程导热问题,上述导热微分方程由于数学上的困难,很难求出其分析解,本文用有限元方法求取其数值解.

3 双温区多管道有限元分析

3.1 有限元模型及边界参数

采用 ANSYS WORKBENCH,针对双温区多管道的绝热支撑进行应力场与温度场的耦合分析,建立有限元模型,为保证求解值的精确性,对绝热支撑处的网格进行了细化处理.模型网格划分结果如图 2 所示,共划分单元 125548 个,节点 619637 个.

温度场分析的边界条件为:与低温液体接触的内壁面为温度边界条件, $\Phi 48$ 管内壁面温度取 20 K, $\Phi 60$ 管内壁面温度取 80 K.外管外壁面为对流换热边界条件,对流传热系数取 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[3],环境温度取为 295.15 K.

静力学分析边界条件:将各节点温度施加到结构分析模型上,并施加相应载荷条件与边界条件进行结构求解.外载荷包括各节点温度载荷、双温区内管介质内压与自重载荷,边界条件为约束外管外表面及管道端面的所有自由度.

3.2 基于稳态热-结构耦合的数值模拟分析

3.2.1 支撑壁厚优化分析

对 8 mm、7 mm、6 mm、5 mm、4 mm、3 mm、2 mm 七种不同厚度的绝热支撑进行数值模拟分析,得到不同厚度下的温度场、应力场及形变场.图 3 为厚度为 8 mm 时的温度场分布图.

20 K 温区漏热、80 K 温区漏热及总漏热随支

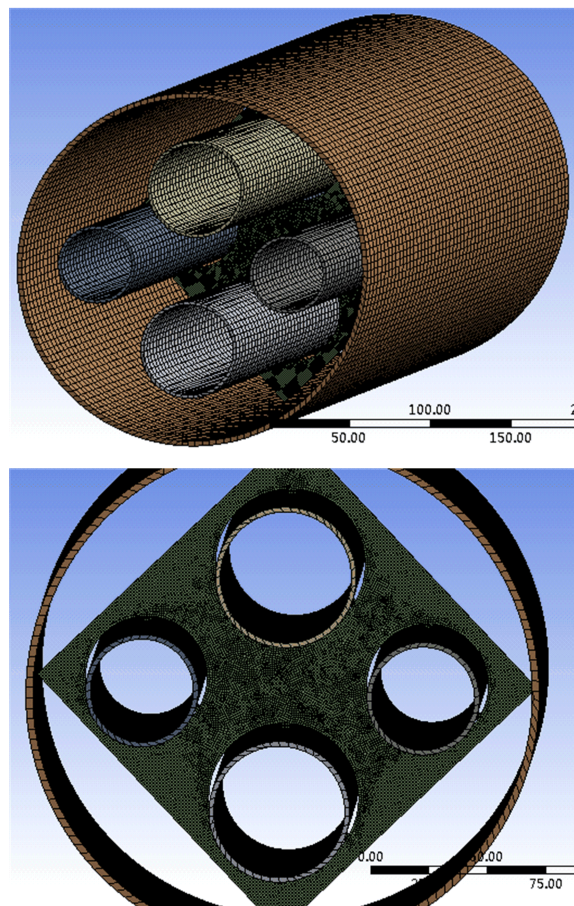


图 2 双温区多管道模型网格划分

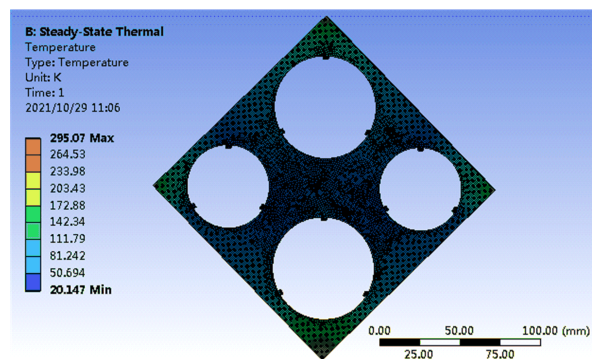


图 3 厚度 8 mm 的绝热支撑温度场

撑壁厚的变化曲线如图 4 所示.由图可看出,随着支撑厚度减薄,20 K 温区漏热、80 K 温区漏热及总漏热均逐渐减少.

图 5 为支撑厚度为 8 mm 及 2 mm 的应力云图,由图可以看出,当厚度较厚时,应力最大处位于支撑与 80 K 内管下部连接处,随着厚度减薄,应力最大处由与 80 K 内管连接处转移到支撑最下端与外管连接处.图 6 为厚度为 8 mm 及 2 mm 的形变

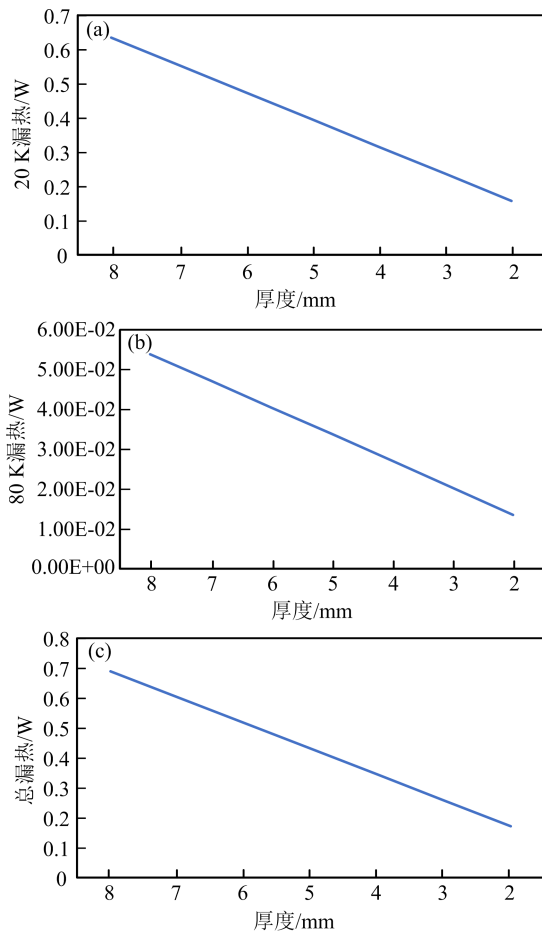


图4 (a)支撑厚度与20 K低温管道漏热关系曲线图;
(b)支撑厚度与80 K低温管道漏热关系曲线图;
(c)支撑厚度与低温管道总漏热关系曲线图

图,由图可看出,形变最大处位于支撑与80 K内管下部连接处。

应力及形变随厚度的变化曲线如图7、图8所示,由图可看出,随着壁厚的减薄,初始的支撑应力没有很大的变化,当壁厚小于3 mm之后,最大应力值快速升高。而随着壁厚的减薄,最大形变量不断增大。

为了确定最佳壁厚,对漏热量-壁厚曲线、最大应力-壁厚曲线及最大形变量-壁厚曲线进行拟合,得拟合的函数关系式如下:

$$\text{漏热: } Q = 0.08618t + 0.0008214 \quad (7)$$

$$\text{最大应力: } p = 728.7t^{-4.713} + 39.58 \quad (8)$$

$$\text{最大形变量: } s = 0.0001619t^2 - 0.002655t + 0.01802 \quad (9)$$

式中: Q 为总漏热量,W; t 为壁厚,mm; p 为最大应力,MPa; s 为最大形变量,mm。

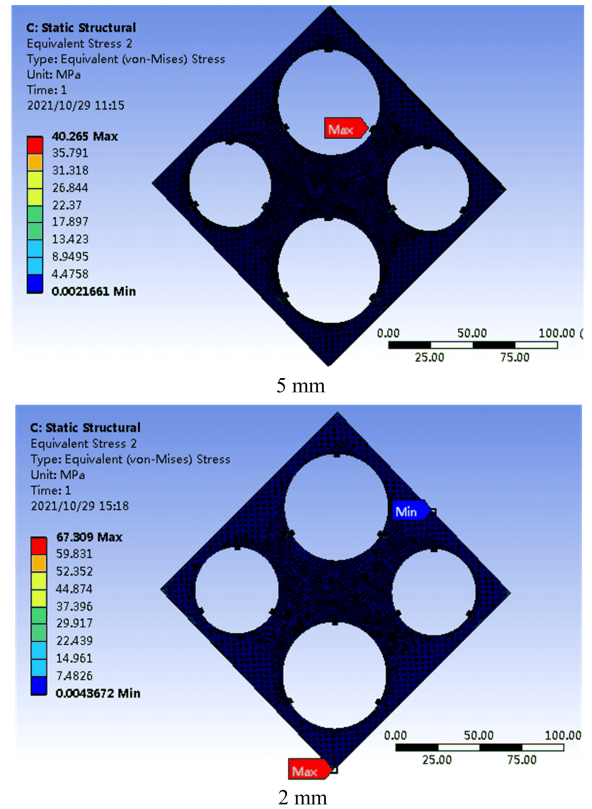


图5 厚度为8 mm及2 mm时的支撑应力云图

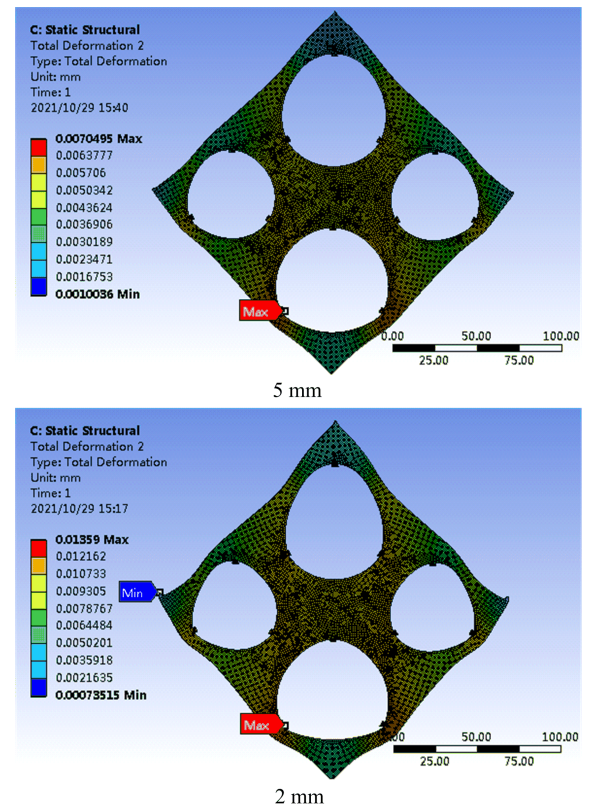


图6 厚度为8 mm及2 mm的支撑形变图(放大比例为1000)

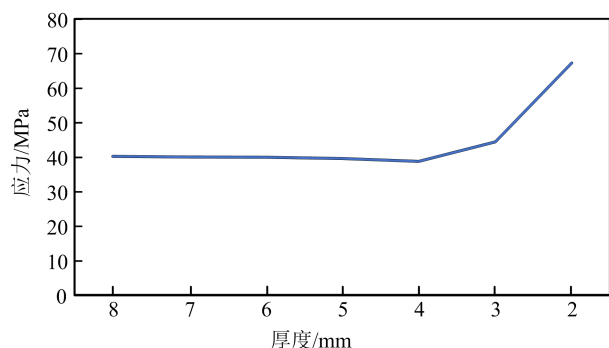


图7 最大应力随厚度变化曲线

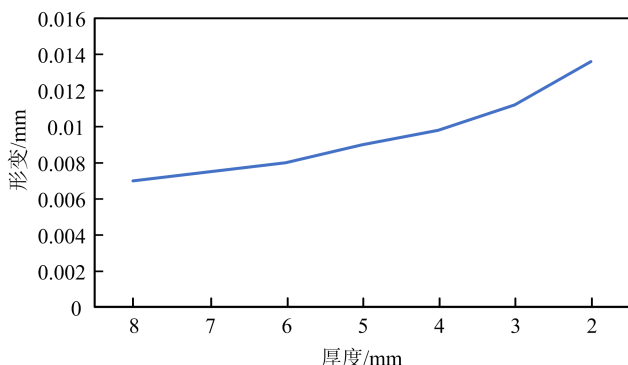


图8 最大形变随厚度变化曲线

此时,将玻璃钢的许用应力值 125 MPa 带入式 (8)中,得最小壁厚值 $t = 1.576$ mm,此时的漏热量 $Q = 0.137$ W,最大形变量 $s = 0.014$ mm.

3.2.2 管道支撑宽度优化分析

考虑到工程中的其他因素,绝热支撑厚度取为 2 mm,对管道支撑处的宽度(见图 1 中 t_1)进行优化设计.管道支撑处的宽度取 3 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm,对绝热支撑进行数值模拟分析,得到不同宽度下的温度场、应力场及形变场.

20 K 温区漏热、80 K 温区漏热及总漏热随支撑宽度的变化曲线如图 9 所示.由图可看出,随着支撑宽度减小,20 K 温区漏热不断减少,80 K 温区漏热却逐渐增加,往环境中的总漏热不断减少.由于 20 K 冷量比 80 K 冷量更加珍贵及难以获得,因此有利于低温管道的绝热.出现这种趋势的原因是由于支撑宽度减小,低温管道与外管的热传导的截面积减小,漏热得到抑制;同时 20 K 温区管道与 80 K 温区管道间的热传导也受到影响,二者综合影响得到这种趋势结果.

图 10 为支撑宽度为 3 mm、2 mm、1.2 mm、0.5 mm 时的应力云图,由图可以看出,随着支撑宽度变

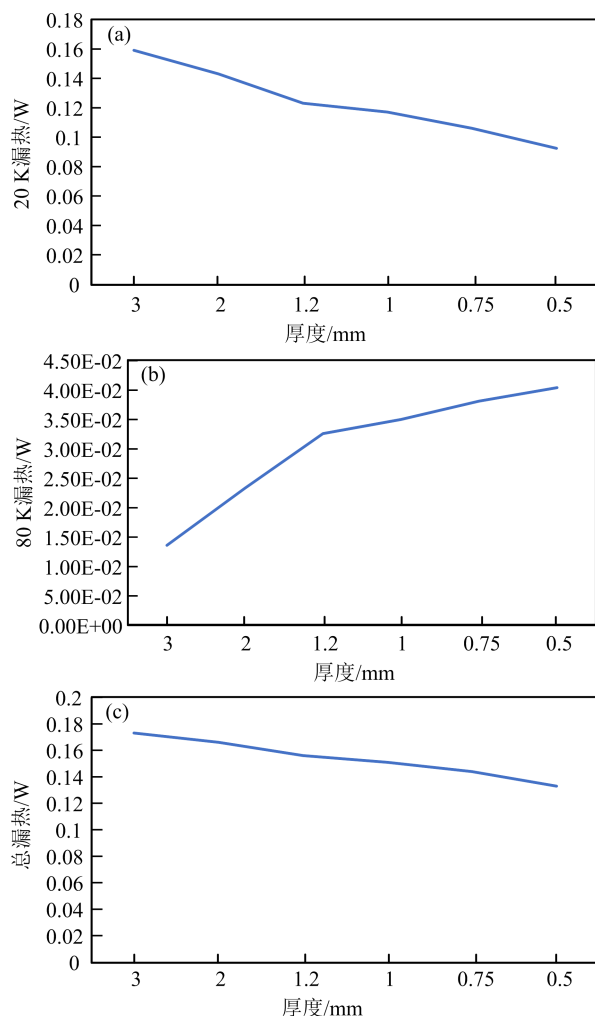


图9 (a)支撑宽度与 20 K 低温管道漏热关系曲线图;
(b)支撑宽度与 80 K 低温管道漏热关系曲线图;
(c)支撑宽度与低温管道总漏热关系曲线图

小,支撑应力最大处由最下端转移到 80 K 内管支撑处.

应力及形变随厚度的变化曲线如图 11、图 12 所示,由图可看出,随着宽度的减小,最大应力值逐渐升高,当转移至 80 K 内管支撑处时快速升高,宽度减至 0.5 mm 时,最大应力值为 139.64 MPa,已超出支撑许用应力值 125 MPa.而随着宽度的减小,最大形变量不断增大.

为了确定最佳宽度,对 20 K 漏热量-宽度曲线、80 K 漏热量-宽度曲线、最大应力-宽度曲线及最大形变量-宽度曲线进行拟合,得拟合的函数关系式如下:

$$20 \text{ K 漏热: } Q_{20} = -0.008165t_1^2 + 0.05427t_1 + 0.06908 \quad (10)$$

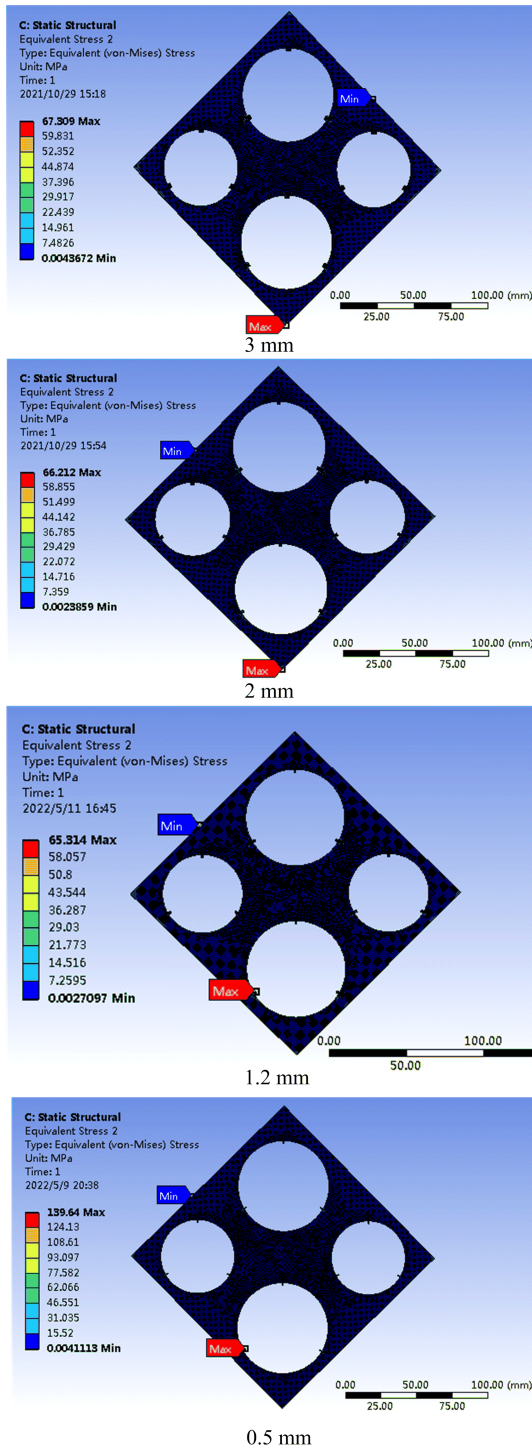


图 10 宽度为 3 mm、2 mm、1.2 mm、0.5 mm 时的支撑应力云图

$$80 \text{ K 漏热: } Q_{80} = 0.0005178t_1^2 - 0.01273t_1 + 0.04702 \quad (11)$$

$$\text{最大应力: } p = -585.3t_1^3 + 1485t_1^2 - 1290t_1 + 486.5 \quad (12)$$

$$\text{最大形变量: } s = -0.001444t_1^3 + 0.009296t_1^2$$

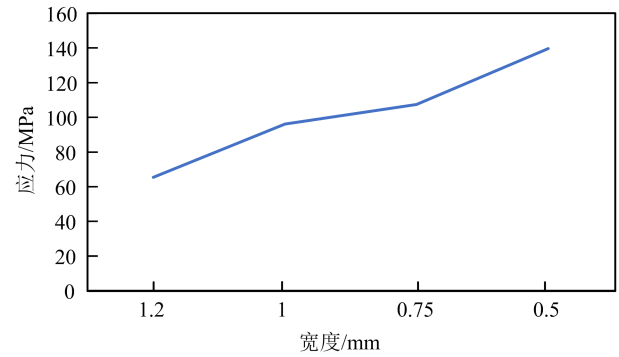


图 11 最大应力随厚度变化曲线

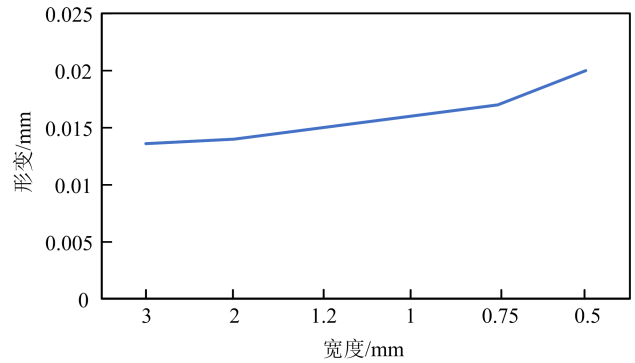


图 12 最大形变随厚度变化曲线

$$-0.01951t_1 + 0.02744 \quad (13)$$

式中: Q_{20} 为 20 K 温区漏热量, W; Q_{80} 为 80 K 温区漏热量, W; t_1 为支撑宽度, mm; p 为最大应力, MPa; s 为最大形变量, mm.

此时, 将玻璃钢的许用应力值 125 MPa 带入式 (12) 中, 得最小宽值 $t_1 = 0.572$ mm, 此时的 20 K 温区漏热量 $Q_{20} = 0.097$ W, 80 K 温区漏热量 $Q_{80} = 0.04$ W, 最大形变量 $s = 0.019$ mm.

4 结 论

本文针对双温区多管道, 建立了基于稳态热-结构耦合的数值模拟分析模型, 采用有限元方法对某工程中的双温区四管道不同支撑壁厚及不同支撑宽度下的漏热量、应力及最大形变量的变化规律进行了研究, 得到以下结论:

1. 随着支撑壁厚的减薄, 漏热量减少, 支撑的应力增大, 最大形变量增大. 根据有限元分析结果, 拟合出了壁厚与漏热, 壁厚与最大应力, 壁厚与最大形变量的函数关系式. 由支撑材料的许用应力值, 按拟合的函数关系式, 计算得出支撑的最薄厚度可取到

1.576 mm,此时漏热值较小,最大形变量在允许的范围内.

2. 在支撑厚度取 2 mm 时,随着支撑宽度减小,20 K 温区漏热量减少,80 K 温区漏热增加,总漏热量减少,支撑应力增大,最大形变量增大. 根据有限元分析结果,拟合出了支撑宽度与双温区漏热,

宽度与最大应力,宽度与最大形变量的函数关系式. 由支撑材料的许用应力值,按拟合的函数关系式,计算得出支撑的最小宽度为 0.572 mm,此时最大形变量在允许的范围内,且漏热值较小,满足工程的需求.

参 考 文 献

- [1] 邓笔财,谢秀娟,杨少柒,张宇,李青. 液氮传输管线的支撑设计和静力学分析[J]. 低温工程,(2017),23
- [2] 张财功,李长俊,贾文龙,何乾伟. 基于稳态热-结构耦合的低温管道绝热支撑研究[J]. 低温工程,(2018),47
- [3] 毛红威. L形高真空多层绝热低温管道热-结构耦合分析[D]. 兰州:兰州理工大学,2017
- [4] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京:高等教育出版社,2018:41-44