

基于有限元的 SMA 管道连接件温度场分析

王 伟,郭兴野

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 分析形状记忆合金管道连接件在不同橡胶垫环厚度与管道连接件尺寸下加热回复过程的温度场分布,为实际工程中管道设计提供理论依据.方法 建立圆管壁导热微分方程,对 SMA 管道连接件在加热回复过程中的温度场分布情况进行分析,然后运用有限元软件 ABAQUS 模拟橡胶垫环厚度与 SMA 管道连接件尺寸对温度场的影响.结果 软质垫环的蓄热性能较强,SMA 管道连接件加热回复的过程中,温度在软质胶垫环的传导过程中温度场范围最大,同时管道尺寸对温度场的影响较强.结论 SMA 管道连接件内增加一定厚度的软质胶垫环可以在一定程度上有效地起到保护被连接管道在 SMA 加热回复过程温度传导的作用.另外,在软质垫环厚度相同的情况下,大尺寸管接头中的热阻作用比在小尺寸管接头小.

关键词 形状记忆合金;管道结构;温度场;有限元分析;软质胶垫环

中图分类号 TU391

文献标志码 A

Temperature Field Analysis of SMA Pipe Joint Based on Finite Element Method

WANG Wei, GUO Xingye

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: During heating recovery of temperature field distribution of shape memory alloy pipe joint under different thicknesses of rubber washers and sizes of pipe joint is analyzed, which provides a theoretical basis for pipe design in practical engineering. Firstly, the differential equation of heat conduction in circular tube wall is established, and the temperature field distribution of the SMA pipe joint during heating recovery is analyzed. Secondly, ABAQUS is used to simulate the effect of the thickness of the rubber washer and the size of the SMA pipe joint on the temperature field. The soft rubber washer has strong heat storage performance. During the heating and recovery process of the SMA pipe joint, the temperature field range is the largest range during the conduction process of the soft rubber washer, and the pipe size has a strong influence on the temperature field. Thenumericalresultsshowthat the soft rubber washer with a certain thickness in the SMA pipe joint can effectively protect the temperature of the connected pipe during the heat recovery process of the shape memory alloy, moreover, in the case of the same thickness of the soft rubber washer,

收稿日期:2019-01-25

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51308357);辽宁省自然科学基金项目(201602627)

作者简介:王伟(1978—),女,副教授,博士,主要从事形状记忆合金材料等方面研究.

the thermal resistance in the large-sized pipe joints is smaller than which in the small-sized one.

Key words: shape memory alloy (SMA); pipe structures; temperature field; finite element analysis (FEA); soft rubber washer

形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 是一种具有驱动性、感知性的功能材料,具有形状记忆效应、超弹性效应、高阻尼、抗疲劳、抗腐蚀等特性^[1],在土木工程、运输工程、航空航天工程、医疗器械、尖端仿生学等领域应用广泛^[2-3].许多学者针对 SMA 做了相关研究,取得了丰硕的研究成果.鲁世强^[4]等采用低温扩径、水浴加热等方法,研究了预变形温度对直径 8 mm 的 NiTiNb 合金管接头恢复性能的影响,得到在室温下满足储存、运输和连接管接头的最佳预变形温度及其径向可恢复应变和恢复率的范围.孟祥刚^[5]对 Fe - Mn - Si - Cr - Ni 的 SMA 管接头问题进行了研究,得到其变形后,在约束下进行温度场加热时,淬火工艺对产生的回复应力的影响和理论机制;同时,研究了热机械循环训练对其约束下加热时产生的回复应力的影响及理论机制,以及预变形量、回复退火温度等不同工艺对 SMA 管接头形状记忆性能的影响.然而,目前对设置橡胶垫环的 SMA 管道连接接头的温度场分析还不够深入,基于此,笔者针对形状记忆合金管道连接件在不同橡胶垫环厚度与连接件尺寸下加热回复过程的温度场分布进行研究.结果表明,在 SMA 管道连接件内增加一定厚度的软质橡胶垫环,可以在一定程度上起到保护被连接管道在 SMA 加热回复过程温度传导的作用.

1 圆筒壁导热微分方程

要确定 SMA 管道连接件在加热回复过程的温度分布情况以及规律,需要建立非稳态的导热微分方程,即傅立叶导热微分方程^[6].在 SMA 管接头中选择一个边长分别为 dx 、 dy 和 dz 的微型单元,研究过程中将其

视为控制体(见图 1).

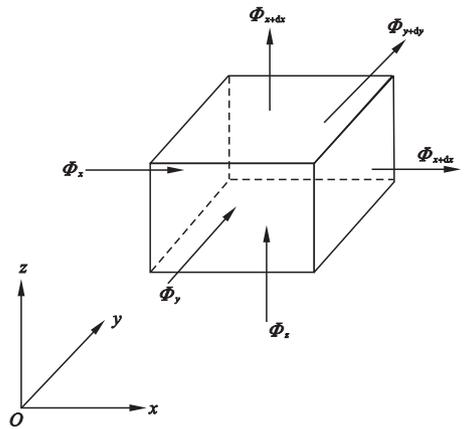


图 1 微元体的导热分析

Fig. 1 Analysis of heat conduction element

通过该微元的任何一次能量传递,其热流量都可以分解为三个坐标轴方向上的热流量.即在任何一个微面上都将发生热传递^[7].将 x 、 y 与 z 三个轴向热传导过程中的热流量分别记作 Q_x 、 Q_y 和 Q_z .则 $(x + dx)$ 、 $(y + dy)$ 和 $(z + dz)$ 三个方向的热传导为 $Q_{(x+dx)}$ 、 $Q_{(y+dy)}$ 和 $Q_{(z+dz)}$ ^[8].

因为 Q_x 是在 $(x + dx)$ 区间内连续可微分的 x 的函数,所以可将其展开成级数表示.即可以用 Q_x 来表示 $Q_{(x+dx)}$:

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} \frac{dx^2}{2!} + \dots + \frac{\partial^2 Q_x}{\partial x^2} \frac{dx^2}{n!} \quad (1)$$

由于该级数从第三项之后对函数值的影响可以忽略,因此 $Q_{(x+dx)}$ 、 $Q_{(y+dy)}$ 和 $Q_{(z+dz)}$ 又可以表示为

$$Q_{x+dx} = Q_x + \frac{\partial Q_x}{\partial x} dx \quad (2)$$

$$Q_{y+dy} = Q_y + \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy \quad (3)$$

$$Q_{z+dz} = Q_z + \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz \quad (4)$$

微型单元的能量方程可通过式(5)计算:

$$E_i - E_o + E_g = E_s. \quad (5)$$

式中: E_o 表示能量流出项, $E_o = Q_x + Q_y + Q_z$; E_i 表示能量流入项, $E_i = Q(x + dx) + Q(y + dy) + Q(z + dz)$; E_s 表示内热源的发热率, $E_s = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz$, 其中 c 为薄壁圆筒比热容, ρ 为薄壁圆筒的材料密度^[9]. 由此可以得到微型单元能量方程变形形式:

$$Q_x + Q_y + Q_z - Q_{x+dx} - Q_{y+dy} - Q_{z+dz} = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz. \quad (6)$$

将式(2)、式(3)、式(4)代入(6)式得:

$$-\frac{\partial Q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial Q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial Q_z}{\partial z} dz + q_v dx dy dz = \rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} dx dy dz. \quad (7)$$

依据傅立叶定律, 可得单位时间内传导至微元体中的热流量为^[10]

$$\begin{cases} Q_x = -\lambda dy dz \frac{\partial t}{\partial x}, \\ Q_y = -\lambda dx dz \frac{\partial t}{\partial y}, \\ Q_z = -\lambda dx dy \frac{\partial t}{\partial z}. \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)可得:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v. \quad (9)$$

式(9)可转化为

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + q_v / \rho c. \quad (10)$$

由于笔者研究的是 SMA 管接头的温度场问题, 因此选取圆柱坐标系(见图2), 可以便捷地计算圆筒的导热问题.

通过坐标的变换, 将式(10)转换为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + q_v. \quad (11)$$

在 SMA 管道连接件加热回复的过程中, 整个构件的升温过程主要是通过一个加热器加热空气, 空气加热管接头的过程, 因

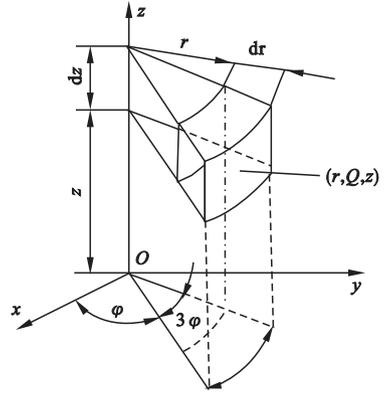


图2 圆柱坐标系中的微元体

此, 不考虑 $\varepsilon \rightarrow \gamma$ 的相变热效应, 即不考虑 SMA 管道连接件的内热源^[11]. 即 $q_v = 0$, 这样式(11)可以简化为

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (12)$$

式(12)即为 SMA 管道连接件的导热微分方程.

2 SMA 管道连接件的温度场模拟

2.1 有限元模型建立

笔者所设计的形状记忆合金管道连接件如图3所示, 形状记忆合金管道连接件横截面如图4所示, 主要包括被连接管件、SMA 管接头、软质橡胶垫环. 因此, 可根据式(12)列出具有初值条件、边界条件的微分方程组, 对方程组进行求解即可得到 SMA 管道连接件在加热回复过程中的温度场分布情况.

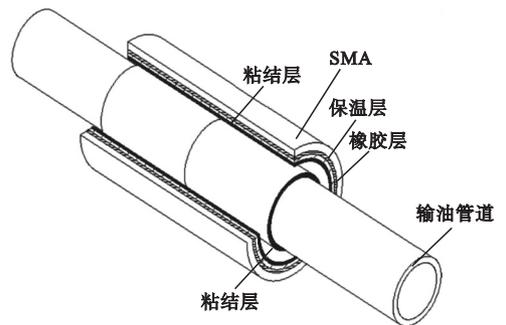


图3 SMA 管道连接件

Fig. 3 SMA pipe joint

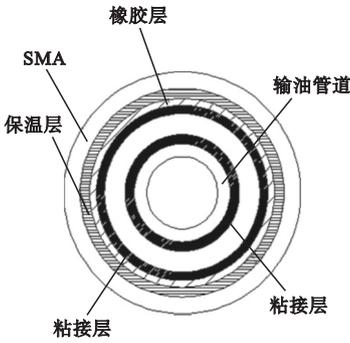


图4 SMA管道连接件横截面图

Fig. 4 Cross section of SMA pipe joint

被连接管内径 $R_a = 34$ mm, 外径 $R_b = 42$ mm, 长度取 150 mm. 为了达到隔热抗震作用, 连接管和被连接管之间加入环氧胶垫环层, 垫环厚度 δ 取 3 mm. SMA 管接头内径 $R_a = 45$ mm, 外径 $R_b = 50$ mm. 模拟过程中, 假设在加热时 SMA 的尺寸以及软质橡胶垫环的厚度不发生变化, 通过 ABAQUS 装配后的管道连接件如图 5 所示.

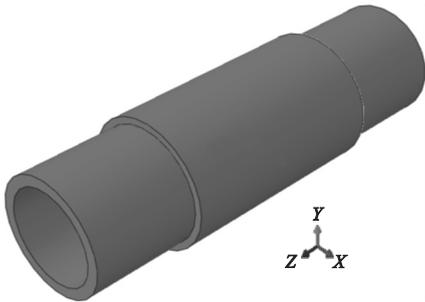


图5 SMA管道连接件装配图

Fig. 5 Assembly diagram of SMA pipe joint

形状记忆合金管道连接件受到温度的影响, 因此在网格划分过程中选用八结点线性传热六面体单元(DC3D8), 网格划分见图 6.

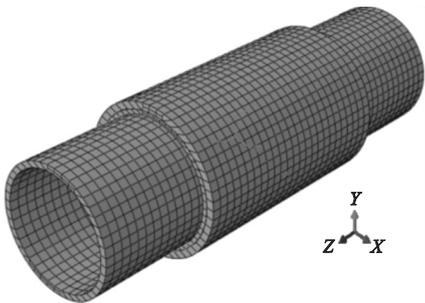


图6 网格划分

Fig. 6 Mesh generation

2.2 SMA 管道连接件热力学参数

确定材料热物性参数 SMA 管道连接件中的 SMA、软质垫环以及被连接管等材料的热物性能一般都随着温度的变化而变化^[12], 数值模拟的精度将受影响. 因此, 精确地描述和确定各项材料的热物性参数是模拟分析中的一项重要环节, 为了简化计算以及得到较为准确的结果^[13], 笔者采用 18-8 钢以及环氧树脂的参数来近似代替 Fe-Mn-Si-Cr-Ni 的 SMA 和环氧胶的热物性参数^[14]. 对于加热时产生的焓变忽略不计^[15]. SMA 的热物性参数见表 1, 软质胶垫环的热物性参数见表 2, 304 钢管的热物性参数见表 3.

表1 SMA的热物性参数

Table 1 Thermal and physical properties of SMA

温度/℃	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
20	7 500	500	10
100	7 500	510	12
200	7 500	530	13
300	7 500	550	15
400	7 500	580	17

表2 软质胶垫环的热物性参数

Table 2 Thermal and physical properties of Soft rubber backing ring

温度/℃	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
20	1 600	2 400	0.06
100	1 480	2 900	0.05
200	1 360	3 400	0.04
300	1 240	3 900	0.03
400	1 120	4 400	0.02

2.3 温度场模拟和后处理

垫层厚度为 3 mm、加热 10 min 时温度场云图如图 7 所示. 从图中可以看出, 对 SMA 管道连接件进行加热回复 10 min 时, SMA 的温度场分布状况可以发现, 由外到内温度逐渐降低, 最外层温度为 342 ℃, 内部被连接件温度为 70 ℃.

表3 304 钢管的热物性参数

Table 3 Thermal and physical properties of 304 steel tube

温度/℃	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$)
20	7 800	470	47
100	7 800	490	45
200	7 800	516	42.9
300	7 800	529	38.7
400	7 800	541	35.8

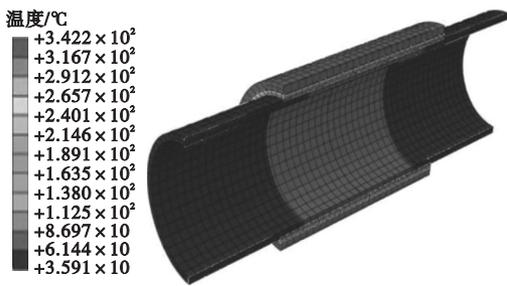


图7 垫层厚度 3 mm,加热 10 min 时温度场云图

Fig.7 The temperature field contour plot when the cushion is 3 mm and heated for 10 minutes

加热至 960 s 时,温度场云图如图 8 所示,SMA 管接头外壁最高温度为 366 ℃,内部被连接件最高温度为 86 ℃。

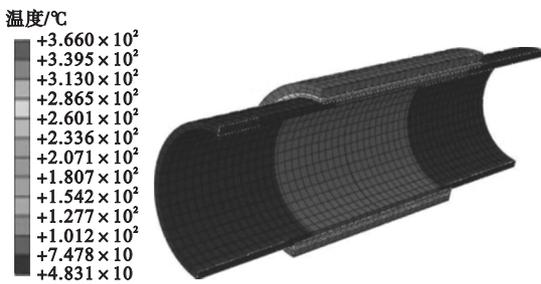


图8 垫层厚度 3 mm,加热 16 min 时温度场云图

Fig.8 The temperature field contour plot when the cushion is 3 mm and heated for 16 minutes

3 有限元模拟结果及分析

3.1 橡胶垫环厚度对温度场的影响

为了分析整个构件在加热过程中的温度变化情况,选取被连接管内壁中任意一点以及 SMA 管外壁的数字模拟结果进行处理^[16],得到温度变化曲线(见图 9)。SMA 最

高温达到 361 ℃左右,高于奥氏体向马氏体转化的温度。因此,管接头可以得到充分形状回复。由图 9 可以看到,软质垫环层具有很大的温度阶梯,虽然厚度仅有 3 mm,然而温度从靠近管接头的 300 ℃左右降低到被连接管的 100 ℃以下,至此可以保证被连接管温度不会过高。因此,软质垫环很好地解决了 SMA 管接头加热回复时需要高温,而被连接管无法承受较高温度的问题。

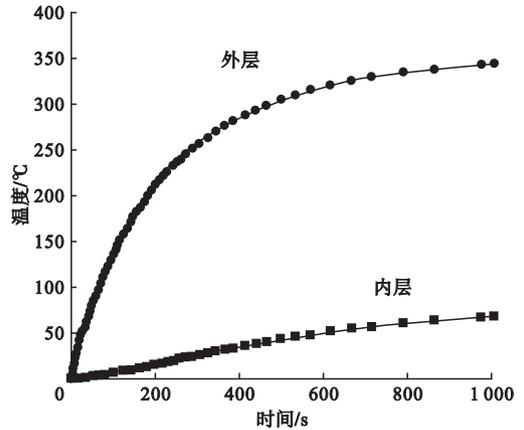


图9 垫层为 3 mm 时系统内外层温度变化曲线

Fig.9 The temperature variation curves of the inner and outer layers of the system when the cushion is 3 mm

笔者对软质垫层的厚度改进后进行了模拟研究,温度场云图如图 10 所示。结果表明即使软质垫层厚度变薄也能在整个连接件系统中起到阻热作用。从图中可以看出,在加热 960 s 后,被连接管内壁的温度从 87 ℃增加至 156 ℃。

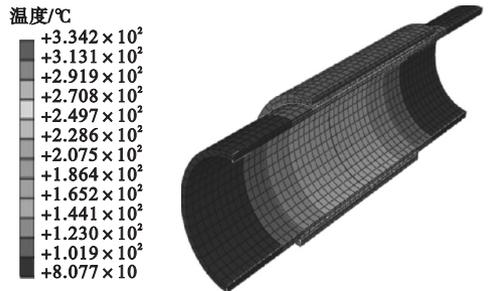


图10 垫层为 1 mm 时加热 16 min 时温度场云图

Fig.10 The temperature field contour plot when the cushion is 1 mm and heated for 16 minutes

系统内外层温度变化曲线如图 11 所示. 软质垫环的导热系数在 $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 左右, 由于其导热系数比被连接钢管以及 SMA 管接头的导热系数都小很多, 所以导热能力偏低. 另外, 软质垫环的比热一般在 $3000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 左右^[17], 要比 SMA 管接头以及被连接钢管大很多, 表明软质垫环的蓄热性能较强, 可以在构件加热回复的过程中吸收大量热量.

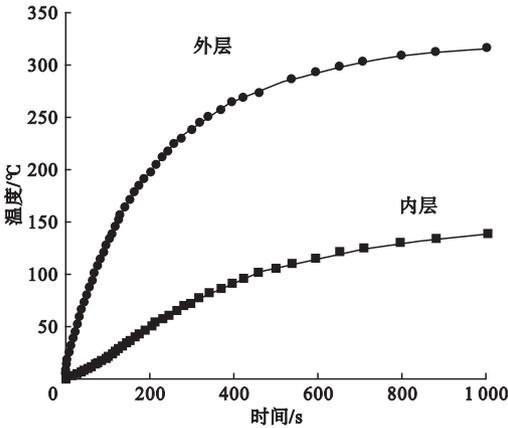


图 11 垫层为 1 mm 时系统内外层温度变化曲线

Fig. 11 The temperature variation curves of the inner and outer layers of the system when the cushion is 1 mm

综上所述, 在 SMA 管道连接件内增加一定厚度的软质胶垫环可以在一定程度上起到保护被连接管道的作用, 解决了 SMA 管道连接件受加热温度过高的这一限制. 另外, 在保证 SMA 管道连接件具有良好的耐压性能以及紧固力的基础上, 增加一定的软质垫环厚度, 能防止被连接管道内涂抹的防腐层被高温破坏.

3.2 管道连接件尺寸对温度场的影响

工程上一般采用的都是大尺寸管道, 直径一般在 $108 \sim 260 \text{ mm}$ ^[18]. 由于管道尺寸对温度场的影响较强, 因此, 在之前数值模拟的基础上, 笔者增加了几种不同被连接管外径的 SMA 连接件温度场模拟. 软质垫层厚度选择为 1.0 mm. 加热 16 min 时温度场云图见图 12, 系统内外层温度变化曲线见图 13.

当管道尺寸增加至外径为 108 mm 时, 由图 12 可以看出, 在增大被连接管外径, 厚度不变时, 整个温度场分布规律与小尺寸管径被连接管的热分布基本一致. 从 SMA 外壁到被连接管外壁的温度降低明显, 说明软质垫环起到了很好的阻热作用.

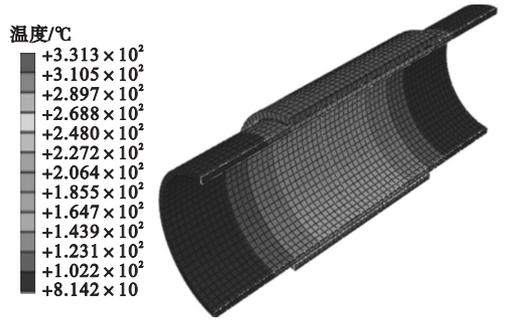


图 12 加热 16 min 时温度场云图

Fig. 12 The temperature field contour plot when heating for 16 minutes

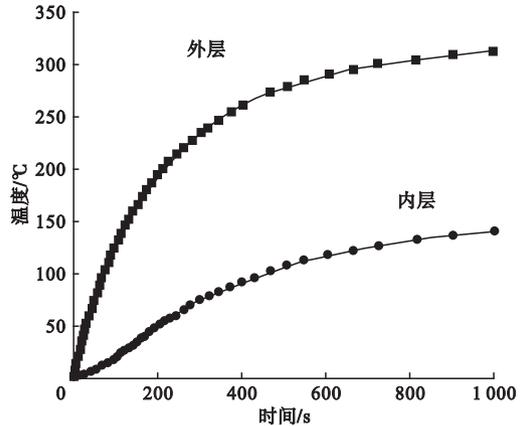


图 13 系统内外层温度变化曲线

Fig. 13 The temperature variation curves of the inner and outer layers

不同壁厚管道内壁温度变化曲线如图 14 所示. 从图中可以看出, 大尺寸管径系统内壁的温度在开始的时候比小尺寸管径内壁要小, 但是随着加热时间的持续, 大尺寸管径内壁的温度开始高于同时期小尺寸管径的内壁温度. 在加热开始时大尺寸被连接管内壁温度明显低于小尺寸被连接管内壁的温度. 但当加热时间达到 25 s 左右时, 大尺寸被连接管内壁温度开始逐渐超过小尺寸被连接管内壁温度, 主要由于在加热初期被连接管尺

寸比较大时需要吸收的热量比较多,所以温度升高比较慢;加热 25 s 之后,SMA 管道连接件温度升高的速度减慢,此时软质垫环的隔热作用开始明显.然而,相同尺寸厚度的软质垫环在大尺寸管接头中的热阻作用比在小尺寸管接头中要小,所以大尺寸管径被连接管在 25 s 后温度升高比小尺寸管径被连接管更快.

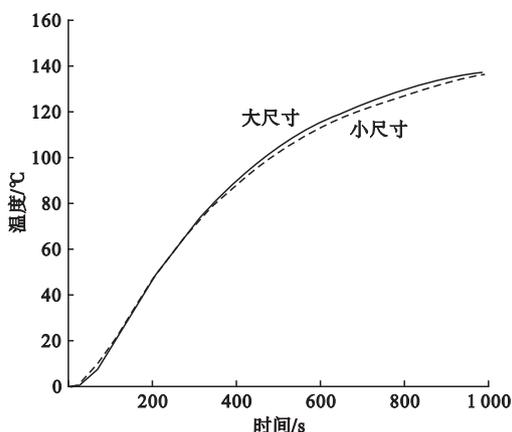


图 14 不同壁厚管道内壁温度变化曲线

Fig. 14 The inner layer temperature variation curves of the different thickness

当管道尺寸增加至外径为 216 mm 时,加热 16 min 时温度场云图如图 15 所示,内外层温度变化曲线如图 16 所示.从图中可以看出,在加热时间达到 800 s 左右时,管内壁温度达到了 200 °C,高于内壁保护层允许温度.因此,在该尺寸以上应相应增加橡胶垫环厚度以保护结构的安全性.

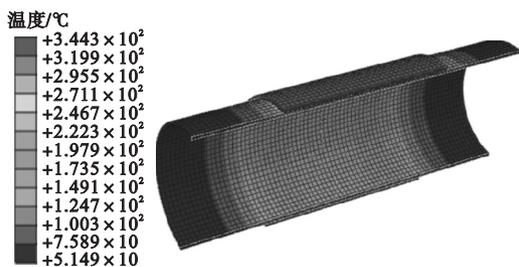


图 15 外径为 216 mm、加热 16 min 时温度场云图

Fig. 15 The temperature field contour plot when the outside diameter is 216 mm and heating for 16 minutes

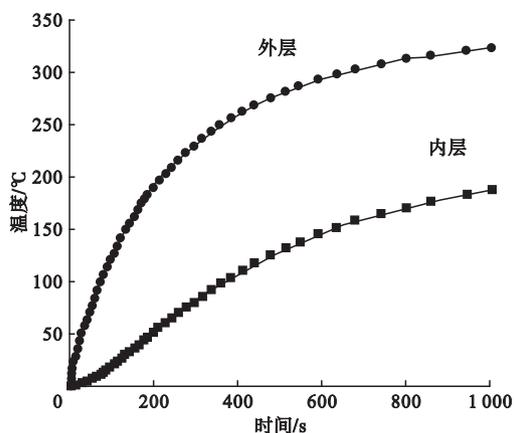


图 16 外径为 216 mm 时系统内外层温度变化曲线

Fig. 16 The temperature variation curves of the inner and outer layers when the outside diameter is 216 mm

4 结论

(1)使用软质环氧胶垫环,提高形状记忆合金管道连接件系统的抗震性和耐压性等性能的同时,还可以在连接件加热回复的过程中发挥很好的隔热作用.适当增加垫环厚度,即可很好地解决 SMA 管道连接件在加热过程中需要高温与被连接钢管内壁涂层无法抗高温之间的矛盾.不但可以保证 SMA 良好的回复率,还可以确保被连接内壁高分子防腐层不会被高温破坏.

(2)当软质垫环厚度不变,而改变被连接管道管径尺寸时,大尺寸管径管道内壁温度在加热初期温度相对较低.而在加热一段时间后,大尺寸管径被连接管道内壁温度逐渐升高超过小尺寸管径,这是由于相同厚度的软质垫环对大尺寸被连接管的系统热阻要相对较小,在长时间加热后大尺寸被连接管内壁温度升高较快.

(3)SMA 层内虽然有温度梯度,但变化不大,能够确保 SMA 连接件充分发挥形状记忆效应,并给被连接件相对均匀的压应力,保证连接效果.

参考文献

[1] 黄秀金.基于粘滞阻尼器和调谐质量阻尼器

- 的转子系统振动控制研究[D].北京:北京化工大学,2015.
(HUANG Xiujin. Research on the vibration controlling of the rotor system by means of viscous dampers and tuned mass dampers [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.)
- [2] MICHEL F, MECHELE M, EISABETTA R. Collisions in shape memory alloys [J]. GAMM-Mitteilungen, 2018, 40(3) : 157 - 183.
- [3] YANG J, DENG L J, LIN Y H, et al. Research on shape memory effect and corrosion resistance of the pipe joint of Fe-Mn-Si-Cr-Ni base shape memory alloy [J]. Journal of functional materials, 2012, 43(11) : 1389 - 1391, 1395.
- [4] 金炼炼, 鲁世强, 李贵发, 等. 预变形温度对 Ni₄₇-Ti₄₄-Nb₉ 合金 Φ8mm 管接头恢复性能的影响 [J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2012, 26(4) : 71 - 77.
(JIN Lianlian, LU Shiqiang, LI Guifa, et al. Effect of pre-deformed temperature on recovery property of Ni₄₇ Ti₄₄ Nb₉ Alloy Φ8 mm pipe joint [J]. Journal of Nanchang hangkong university(natural sciences), 2012, 26(4) : 71 - 77.)
- [5] 孟祥刚. 铁基记忆合金管接头在油田应用技术研究 [D]. 大庆: 大庆石油学院, 2007.
(MENG Xianggang. The applied technique of the union joint of Fe-based memory alloy studies in oilfield [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2007.)
- [6] 刘旺中, 陈照波, 侯守武, 等. 基于 Preisach 理论的形状记忆合金温度-位移迟滞仿真研究 [J]. 振动与冲击, 2012, 31(16) : 83 - 87.
(LIU Wangzhong, CHEN Zhaobo, HOU Shouwu, et al. Simulation on modeling of temperature-displacement hysteresis in SMA based on preisach theory [J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(16) : 83 - 87.)
- [7] 李素超, 郭安薪, 王文韬, 等. 形状记忆合金橡胶层状力学模型研究 [J]. 建筑结构学报, 2016, 37(9) : 149 - 157.
(LI Suchao, GUO Anxin, WANG Wentao, et al. Study on constitutive model of shape memory alloy pseudo-rubber based on layer decomposition [J]. Journal of building structures, 2016, 37(9) : 149 - 157.)
- [8] 张华伟, 夏伟, 吴智恒, 等. 大型压铸设备模板温度场模拟与热力耦合的有限元分析 [J]. 机床与液压, 2011, 39(7) : 106 - 110.
(ZHANG Huawei, XIA Wei, WU Zhiheng, et al. Temperature field simulation and thermo-mechanical coupled FEA of mould board for large die-casting equipment [J]. Machine tool & hydraulics, 2011, 39(7) : 106 - 110.)
- [9] ZHANG Jiang, MA Yonghong, WU Ruolin, et al. Shape memory effect of dual-phase NiMnGaTb ferromagnetic shape memory alloys [J]. Journal of iron and steel research international, 2019, 26(3) : 321 - 328.
- [10] 刘建辉. Fe-Mn-Si-Cr-Ni 形状记忆合金管接头的研究 [D]. 成都: 四川大学, 2001.
(LIU Jianhui. Research of coupler of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alldys [D]. Chengdu: Sichuan University, 2001.)
- [12] 赵祥, 王社良, 周福霖, 等. NiTi 形状记忆合金材料力学性能的试验研究 [J]. 中国科技论文, 2012, 7(2) : 101 - 106.
(ZHAO Xiang, WANG Sheliang, ZHOU Fulin, et al. Experimental study on the mechanical properties of NiTi shape memory alloys [J]. China science paper, 2012, 7(2) : 101 - 106.)
- [13] WANG Wei, YAN Shi. Derivation and simulation of an improved two-dimensional constitutive law for shape memory alloys [C]. San Diego: [s. n.], 2007.
- [14] WANG L, RONG L J, YAN D S, et al. DSC study of the reverse martensitic transformation behavior in a shape memory alloy pipe-joint [J]. Intermetallics, 2004, 3(4) : 403 - 407.
- [15] ARJUN K I. Temperature and field induced strain in polycrystalline Ni₅₀ Mn₃₅ In_{15-x} Si_x magnetic shape memory Heusler alloys [J]. Journal of alloys and compounds, 2010, 509(4) : 1106 - 1110.
- [16] 谷凡, 张玲, 王伟, 等. 形状记忆合金管道连接件综述 [J]. 建筑与预算, 2017(12) : 30 - 37.
(GU Fan, ZHANG Ling, WANG Wei, et al. Review of shape memory alloy pipe fittings [J]. Construction and budget, 2017(12) : 30 - 37.)
- [17] WANG Wei, YAN Shi. An improved two-dimensional constitutive law for shape memory alloys [J]. Key engineering material, 2009(410/411) : 429 - 437.
- [18] 张玲. 形状记忆合金管道连接件的设计研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
(ZHANG Ling. Design research on shape memory alloy pip joints [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)