

基于聚酰亚胺泡沫的蒸汽管路绝热结构与性能验证

王在铎¹ 马晶晶² 赵一搏² 贾地³ 刘军刚²

(1 海装驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076)

(2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

(3 海军研究院, 北京 100161)

摘 要 针对核潜艇动力装置蒸汽管路对新型绝热材料的需求,设计并制造了一种以聚酰亚胺泡沫为主要功能层的用于潜艇蒸汽管路表面的新型绝热结构。参照潜艇二回路管路应用要求,对绝热结构的绝热功能和使用过程中的结构稳定性进行了验证,阐明了绝热机理。结果表明:新型绝热结构经280℃、480 h连续加热考核试验和720 h静置试验,该绝热结构件外表面温度控制在45.2~46.5℃,整个考核期间结构和尺寸变形量几乎为0且趋于稳定。在蒸汽管路构件表面施工多层聚酰亚胺泡沫作为绝热结构,解决了现有无机岩棉类体系存在的工艺性差、环保性差等问题,该研究可为舰艇新型绝热结构的应用发展提供工程技术参考。

关键词 聚酰亚胺泡沫,绝热,耐高温,蒸汽管路

中图分类号:TQ328

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2021.04.012

Design and Performance Verification of Thermal Insulation Structure of Steam Pipeline Based on Polyimide Foam

WANG Zaiduo¹ MA Jingjing² ZHAO Yibo² JIA Di³ LIU Jungang²

(1 First Military Representative Office in Beijing Area for Naval Equipment Department, Beijing 100076)

(2 Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

(3 Research Institute for Navy, Beijing 100161)

Abstract In order to meet the requirements of new thermal insulation materials for the steam pipeline of nuclear submarine, a new kind of thermal insulation structure based on polyimide foam was designed and manufactured for the surface of submarine steam pipeline. The thermal insulation performance and structural stability of the thermal insulation structure during use were studied according to the application requirements of submarine steam pipeline. The thermal insulation mechanism was also investigated. The results indicate that the external surface temperature of the insulation structure is 45.2 to 46.5 °C during the continuous heating at 280 °C for 480 hours. Furthermore, it is also found that the structural and dimensional deformation is almost 0 during the continuous heating test and the subsequent static test for 720 hours. It is noteworthy that the multi-layer polyimide foams applied as insulation structure of steam pipeline can solve the processing and environmental problems related to the inorganic rock cotton system. The data in this paper will provide technical and practical support for the practical application of polyimide foams on steam pipeline surface.

Key words Polyimide foam, Thermal insulation structure, High temperature, Steam pipeline

0 引言

核潜艇动力装置二回路蒸汽管道表面温度高达280℃,长度达到100 m以上,长时间在舱内暴露时,蒸汽中的热量会通过管道外壁扩散到舱室内部,导

致动力装置的总效率下降,以及舱内环境温度的升高。为了提高能量输送效率,有效改善舱室温度环境,需要在管路表面包覆绝热材料。

现有潜艇型号采用的是以岩棉为主体的绝热材

收稿日期:2021-03-29

第一作者简介:王在铎,1967年出生,本科,高级工程师,主要从事舰船绝热材料论证工作。E-mail:879689965@qq.com

通信作者:马晶晶,1988年出生,博士,高级工程师,主要从事绝热结构材料研究工作。E-mail:majingjingbh@126.com

料^[1-3], 岩棉的主要成分是玻璃纤维, 在潮湿的海洋环境中使用时极易吸湿受潮, 导致局部结块变脆, 隔热性能降低; 长期使用过程中还易发生外层开裂, 导致玻璃纤维粉末在受热情况下扩散到空气中, 引起艇员皮肤过敏, 并对呼吸系统造成危害。另外, 现有绝热材料的问题还在于岩棉难以预成型, 在管路表面主要通过多层铺放后胶带缠绕的方式施工, 厚度均匀性难以保证, 工艺稳定性差且外形很不美观; 从施工角度讲, 岩棉材料在管路包覆的弯折过程中极易发生玻璃纤维破碎, 导致玻璃纤维粉末扩散到空气中, 造成环境污染。因此, 针对现有蒸汽管路使用的岩棉类绝热材料存在的性能稳定性差、工艺性差、使用及施工污染环境等问题, 迫切需要开发一种具有环境适应性好、工艺可靠、无毒、低热导率和吸声性能好的新型绝热材料, 以满足未来核潜艇型号研究对舱内人员生存环境改善的要求。

聚酰亚胺泡沫^[4-6]由于具有密度低、热导率低、阻燃性好、降噪系数高、发烟量低、施工便捷等优点, 是理想的船用绝热材料, 已在国内外各类船舰等绝热吸声领域得到一定的应用。美国海军已把聚酰亚胺泡沫用作所有水面战舰和潜艇的隔热隔声材料^[7], 具体应用场合包括: 有隔热、吸声要求的船侧壳体、舱壁和舱顶, 船上高于 37 °C 的冷却水管线和高温蒸汽管线, 要求做声音透射损失处理的潜艇壳体和框架部件, 为防止起雾进行热和蒸汽隔离处理的潜艇壳体和框架部件, 低温容器的保温, 其中美国 CG-47 护卫导弹巡洋舰区全部采用聚酰亚胺泡沫作为保温材料, 相比于使用传统的纤维隔热材料减轻了 50 t; 此外, 聚酰亚胺泡沫作为隔热材料也应用于航天飞机舱壁、哈勃太空望远镜太阳能电池帆、运载火箭贮箱等。国内方面, 聚酰亚胺泡沫材料已经试验性应

用于某船集装箱实验室的改造, 克服传统隔热保温材料缺点, 提高船舶的经济性和安全性^[8]; 此外, 聚酰亚胺泡沫还作为隔热材料应用于某卫星体装式太阳翼外侧板^[9]、飞机舱内侧壁、高铁列车内部壁板等^[7]。尽管如此, 高温蒸汽管路表面包覆聚酰亚胺泡沫类绝热材料仍然未见报道, 因此, 需要以蒸汽管路作为应用对象, 以聚酰亚胺泡沫作为绝热层材料, 根据实际应用环境, 对其绝热结构展开设计, 验证绝热性能, 为聚酰亚胺泡沫在蒸汽管路表面的实际应用提供技术支撑。

本文首先设计制造具有电加温功能的直线型管路, 然后以聚酰亚胺泡沫为主要功能层, 设计并施工上述直线型管路表面的绝热结构, 而后参照潜艇二回路管路使用环境要求, 对绝热结构进行 280 °C、480 h 连续加温和停止加温后 720 h 静置实验, 对此过程中管路表面温度及绝热结构尺寸稳定性进行验证, 并与理论技术数据进行对比, 阐明绝热机理。

1 实验

1.1 加温管路的设计与制造

设计并制造了具有电加温功能的直线型管路, 作为蒸汽管路绝热结构件绝热性能验证试验装置。管路材质为不锈钢, 直径为 108 mm, 壁厚为 4 mm, 其内部设置 6 根电加热棒, 周围通过铸铝进行填充, 管路表面加热温度最高可达到 400 °C。图 1 给出了直线型加温管路设计简图, 本套直线型管路由管路、配电箱、数字功率计、控温仪、无纸记录仪等组成, 其中配电箱功能是为加热控制装置合理分配电力; 数字功率计功能是接收控温仪的输出信号, 转换为加热功率进行输出; 测温仪功能是接收管路外表面测量温度信号, 并与设定温度进行运算, 输出控制信号; 无纸记录仪功能是存储、处理测温点的测量数据。

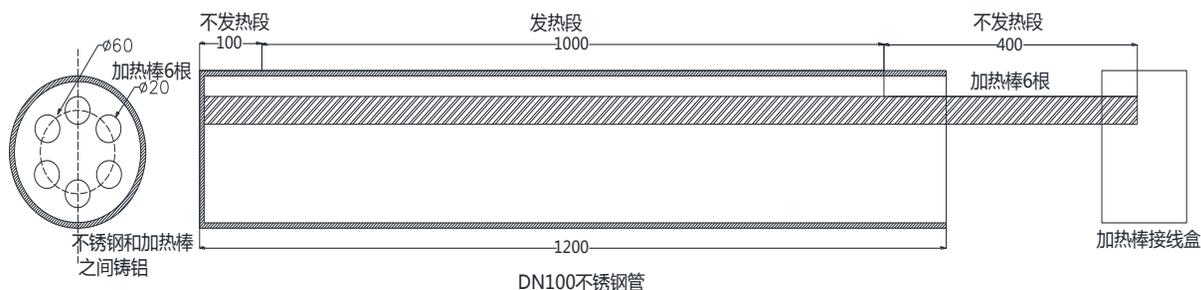


图 1 直线型加温管路结构图

Fig. 1 The structure of linear pipeline of heating system

设计制造完成后, 对加热管路(未包覆绝热结构)的加温性能进行了温度调试和验证, 管壁温度从室温升至 280 °C 需要 1 h 左右, 通过设定控温仪的自整定模式, 管壁温度可以恒定在 280 °C。

1.2 管路表面绝热结构设计及制造

蒸汽管路表面绝热结构设计如下: 外蒙皮保护层采用与蒸汽管路相同的 304 不锈钢滤网, 厚度为 2 层, 采用 304 不锈钢扎带捆扎, 捆扎间距不大于 300

mm;保温主体层厚度以 10 mm 为分级单位,总厚度约为 50 mm,由 5 层软质聚酰亚胺泡沫组成,其中第一层泡沫层、第三层泡沫层、第五层泡沫层各缠一层厚度为 15 μm 的聚酰亚胺铝箔作为防潮层,以防止水分和蒸汽进入保温主体层,也保证了保温层表面平整、美观。图 2 给出了绝热结构示意图,由图 2 可知,整个绝热结构可看作是多层绝热组件,聚酰亚胺铝箔可看作是具有高反射能力的反射屏,聚酰亚胺泡沫则作为间隔层,这样的结构具有极好的隔热性能。

为了验证上述绝热结构的绝热功能,在绝热结构内部布置温度测点,主要测点分别为管壁表面(测

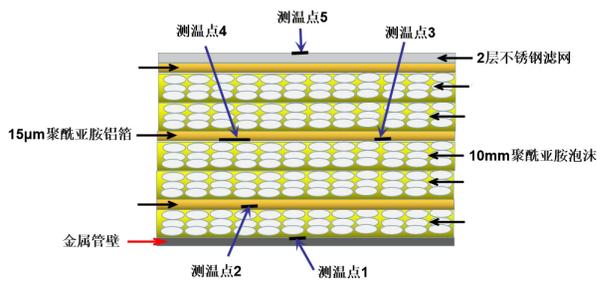


图 2 绝热结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of thermal insulation structure

点 1)、距底部 10 mm 处(测点 2)、距底部 20 mm 处(测点 3)、距离底部 20 mm 处拼缝处(测点 4)、绝热吸声结构表面(测点 5)。

通过前期材料调研选型,选用航天材料及工艺研究所^[6]研制的 PIFT1m1-F30 体系密度为 30 kg/m^3 聚酰亚胺泡沫作为绝热层材料,其外观照片如图 3 所示。聚酰亚胺泡沫塑料呈黄色,轻质,表面无 $> \Phi 2$ mm 泡孔,无贯穿性通孔,且经过热压后表面均匀无鼓胀凸起、无分层现象,质地均匀且平整性好,泡沫具有优良的柔韧性,能够直接通过缠绕方式包覆在管路表面。其主要性能数据如表 1 所示,由表 1 可知,本规格软质开孔聚酰亚胺泡沫隔热性能好、耐高温、阻燃,可满足蒸汽管路表面绝热要求,且施工工艺便捷。



图 3 聚酰亚胺泡沫样件照片

Fig. 3 The photographs of polyimide foam

表 1 聚酰亚胺泡沫的性能¹⁾

Tab. 1 Properties of polyimide foam¹⁾

牌号	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_{5\%}/^\circ\text{C}$	LOI /%	拉伸强度/MPa	开孔率/%	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$			
						25 $^\circ\text{C}$	100 $^\circ\text{C}$	200	250
PIFT1m1-F30	265	560	41	0.19	97.5	0.032	0.038	0.045	0.054

注:1) T_g 表示玻璃化转变温度; $T_{5\%}$ 表示热失重 5% 时的温度; LOI 表示极限氧指数。

按照上述绝热方案进行绝热结构施工,包覆后的绝热结构外观如图 4 所示。由图 4 可知,选用软质

聚酰亚胺泡沫作为保温主体层的绝热结构施工便捷、工艺性好、结构美观、无毒。

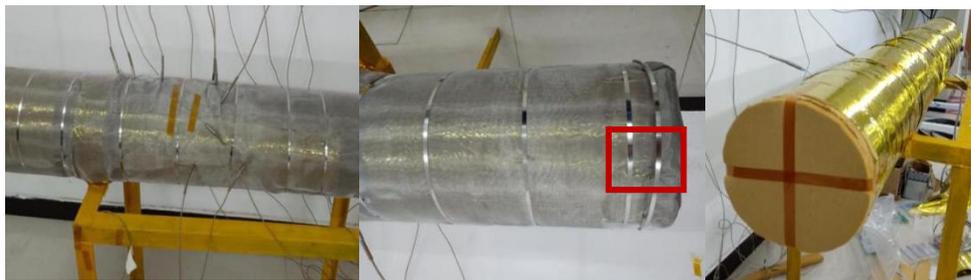


图 4 绝热结构包覆完毕后外观结构图

Fig. 4 The photographs of thermal insulation structure

1.3 管路绝热结构表面温度及尺寸稳定性表征

设置直线型管路加热温度为 280 $^\circ\text{C}$,加温过程中,监测各测温点的温度变化情况,在形成稳定的温度梯度后,记录各测温点的温度随时间变化的稳定情况,比对外表面实测值与理论值之间的对应关系,对其绝热性能进行评价,要求绝热结构最外层温度 \leq

50 $^\circ\text{C}$ 。本步骤中,开始加温后,要求每 5 min 记录一次温度,待温度升高至 280 $^\circ\text{C}$ 后,温度稳定后要求每隔 1 h 记录一次各测温点的温度;在温度梯度稳定的情况下,连续工作试验 480 h。

参照 GB/T 17430—2015 表征绝热结构的尺寸稳定性,测试前检查确认各部位结构完整、无破损、裂

缝等问题,并测量绝热结构直径、圆弧长;然后,加热后每隔 12 h 对包覆完绝热结构直径、圆弧长(距离端面 300、550、800 mm 处)进行测量并记录;停止加热后,保持安装状态不变,每 2 d 对管路直径、圆弧长进行测量并记录,连续监测 30 d,以对绝热结构的应用符合性进行考核。尺寸稳定性数据处理方法如下:

$$r_1 = 1 - \frac{t_2}{t_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$r_2 = 1 - \frac{l_2}{l_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, r_1 代表厚度方向形变比例, t_1 代表加温前绝热管路直径, t_2 代表加温试验后绝热结构直径; r_2 代表弧长方向形变比例, l_1 代表加温前绝热层弧长, l_2 代表加温试验后绝热层弧长。最终以 r_1 和 r_2 评价绝热结构稳定性。

2 结果与讨论

2.1 绝热层厚度及表面温度的理论计算结果

绝热结构绝热试验时,利用电控箱控制加热功率以满足结构样件外表面温度要求,绝热结构设计输入见表 2。

表 2 保温层计算输入参数

Tab. 2 Input parameters of thermal insulation layer

样件外表面 温度/℃	保温层外表 面温度/℃	环境温 度/℃	保温材料热导率 /W·(m·K) ⁻¹	
			25 ℃	200 ℃
280	50	25	0.032	0.045

样件绝热材料厚度采用经验公式进行工程计算,传热过程的总热阻包括保温材料热阻和保温材料外的复合热阻(对流换热和辐射换热两部分构成)。保温层厚度计算时,结构样件外表面温度取 280 ℃,环境温度取 25 ℃,保温层外表面温度 50 ℃,计算过程涉及公式如下

空气自然对流的格拉晓夫数

$$Gr = g \cdot \alpha_v \cdot (t_s - t_f) \cdot l^3 / \nu^2 \quad (3)$$

式中, g 表示重力加速度; α_v 表示体膨胀系数; t_s 表示保温层表面温度; t_f 表示环境温度; l 表示特征尺度; ν 表示运动黏度。

大空间自然对流努塞尔数

$$Nu_f = C \cdot (Gr \cdot Pr_f)^n \quad (4)$$

式中, $10^4 < Gr < 5.76 \times 10^8$, C 表示 0.48; n 表示 0.25; Pr_f 表示普朗特准数。

辐射换热系数

$$\alpha_c = \frac{5.67 \times 10^{-8} \varepsilon}{t_s - t_f} (t_s^4 - t_f^4) \quad (5)$$

式中, α_c 表示辐射换热系数; ε 表示保温结构表面黑度为 0.7。

管道保温层温度

$$t_s = \frac{q}{\alpha D_1 \pi} + t_f \quad (6)$$

$$q^* \left(0.5 \ln \frac{D_1}{D_0} \frac{1}{\lambda_1 \pi} + \frac{1}{\alpha \pi D_1} \right) = (t_s - t_f) \quad (7)$$

式中, q 表示单位长度热流密度; α 表示保温层外换热系数; D_1 表示保温层外径; D_0 表示保温层内径; λ_1 表示保温层热导率。

保温层外表面温度为 50 ℃时,保温层厚度计算值为 44.8 mm,考虑实际过程中的误差后,并对包覆厚度进行圆整后为 50 mm。

以实际包覆 50 mm 的保温层的进行绝热效果校核,采用上述公式进行计算,可得保温层外表面温度计算值为 47.6 ℃。

2.2 管路绝热结构绝热性能

加温过程中各测温点温度随时间变化关系如图 5 所示。由图 5 可知,加温开始后各测量点温度逐渐增加,约 2 h 后各测温点温度趋于稳定,各测温点之间形成了稳定的温度梯度;此外,同一厚度测温点处,拼缝处温度要高于相同厚度部位平整区的温度,且温度升高至一定程度后,两者之间温差降低,趋于稳定,这是由于拼缝处是漏热区,热量传递快,升温快,而平整区不存在漏热点,热量传递慢,升温慢。经过保温层绝热之后,最外层温度稳定在 45 ℃左右,这与理论计算结果基本一致,这表明 50 mm 厚绝热结构可以满足实际应用表面温度低于 50 ℃的要求。

对加温过程进一步分析可知,管路绝热结构在加温过程中表现出动态隔热规律,由于热量传递的滞后效应,与金属管路表面间隔一定距离的绝热结构表面在热端温度突变一定时间后才对此做出响应;在整个升温过程中,绝热结构内部每一处都经历了温度的升高,即贮存了能量,同时每一处与绝热结构外表面相邻处的温度梯度增大,于是按照傅里叶定律热能将以一定热流密度向绝热结构外表面传导,整个动态过程驻热和导热同时发生,由于伴随能量的贮存,所以同一时刻由加热端向绝热结构外表面温度逐渐降低;金属管壁表面温度升高至 280 ℃后,经过一定时间后,由于绝热结构内部最终趋于线性温度分布状态,绝热结构外表面温度趋于平衡。

温度升高至 280 ℃,各测点之间形成稳定的温度梯度后,加热管路连续工作 480 h,整个过程中各测

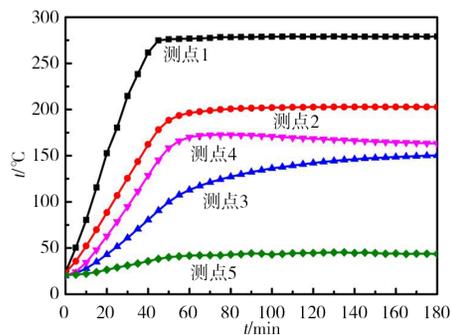


图5 不同位置测点加温过程中温度随时间变化曲线
Fig. 5 The temperature in different temperature sensing locations with respect to the time during heating

量点温度随时间变化如图6所示。由图6可知,连续280℃试验480h的时间内,各个测点的温度趋于稳定,距离管壁20mm厚的中间平整层和拼缝处温度差逐渐降低,温差约为5℃;绝热结构最外层温度保持在45.2~46.5℃,这与理论计算结果47.6℃基本一致,这表明管路绝热结构绝热效果良好,可满足二回路蒸汽管路使用要求。

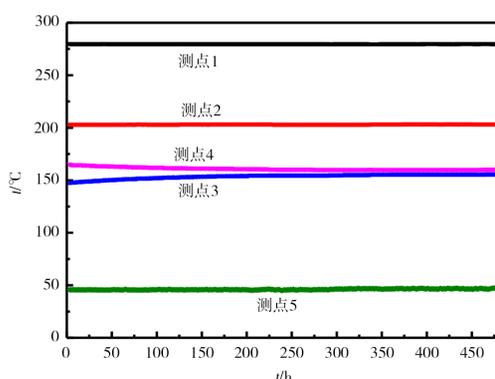


图6 不同位置测点温度稳定后温度随时间变化曲线
Fig. 6 The temperature in different temperature sensing locations with respect to the time after temperature stabilization

对绝热结构绝热机理进行分析,温度平衡后,绝热结构表现出静态隔热性能,在静态过程中,绝热结构四周被绝热材料包裹,边界处的温度扰动对绝热结构的影响不计,那么绝热结构可以看作是传热学意义上的半无限大固体;金属管壁温度恒定后,静态过程就是恒壁温边界条件下半无限大固体的非稳态导热问题,该过程与绝热结构热扩散系数有关,热扩散系数则取决于材料的热导率。从结构方面分析,整个绝热结构可看作是多层绝热组件,反射屏聚酰亚胺铝箔具有高反射能力,能够有效减小辐射传热量。间隔保温层聚酰亚胺泡沫塑料的泡孔结构如图7所示,泡沫正面表现为开孔结构,由泡壁、泡膜构成,泡孔间有共同的孔壁相邻航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2021年 第4期

连,由于二次压缩模塑作用,泡沫侧面表现为椭圆形的孔;因此,泡沫的热传导由泡沫中聚合物固体的热导率、通过泡沫泡孔中气体的热导率、通过孔穴的热对流热导率,以及通过孔壁和孔隙的辐射热导率,其中气体热传导为泡沫热传导的主要贡献项。这是由于气体可在泡孔结构中流通,如果将空气视为介质,它在泡孔间流通的热导率为25 mW/(m·K);利用Gibson关系,根据气体热导率与泡沫中空气体积分数,可得到泡沫体系气体的热导率约为0.024 W/(m·K),室温下泡沫塑料热导率大部分由该项贡献^[7]。综上所述,间隔层聚酰亚胺泡沫具有良好的隔热性能,反射层聚酰亚胺铝箔具有良好的反射性能,这两者共同促成了绝热结构的优良绝热性能。

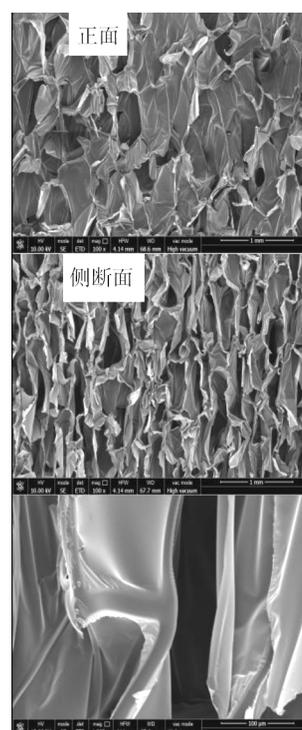
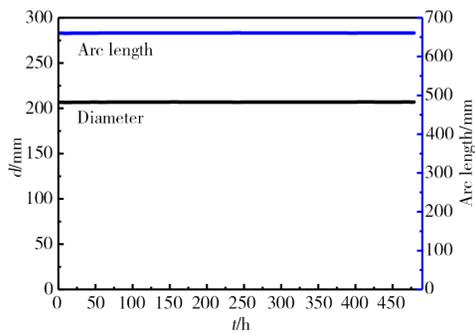


图7 聚酰亚胺泡沫泡孔结构的FESEM照片
Fig. 7 FESEM micrographs of polyimide foam

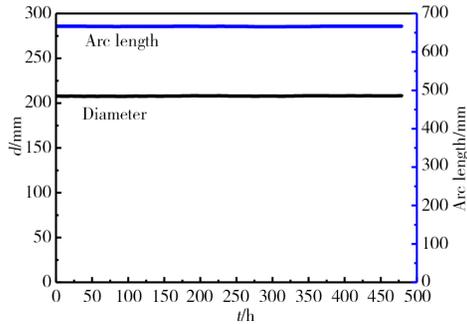
2.3 管路绝热结构尺寸稳定性

加热过程中,绝热结构直径、圆弧长随时间变化的关系图如图8所示,对三个位置管路直径、圆弧长变化情况进行计算,结果如表3所示。由图8和表3可知,相比于加热前的绝热管路直径、弧长,整个加热过程中绝热结构厚度、弧长趋于稳定,变化率趋于0,几乎没有变化。

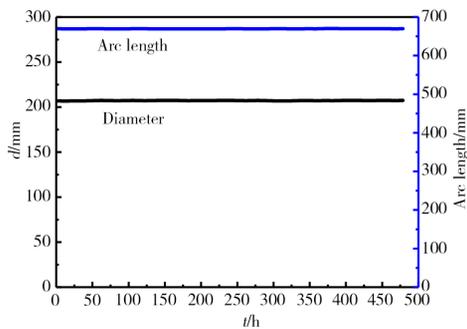
停止加热后,保持安装状态不变,每2d对包覆绝热结构的管路(距离端面300、550、800mm处)直径、圆弧长进行测量并记录,连续监测30d,管路直径、弧长随时间变化的关系图9所示。由图9可知,停止加热后,相比于加热前直径、弧长,绝热结构厚度、弧长几乎没有变化,结构趋于稳定。



(a) 距离端面 300 mm



(b) 距离端面 550 mm



(c) 距离端面 800 mm

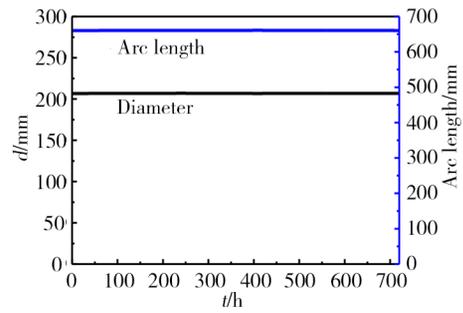
图8 加温过程中不同位置直径、弧长随时间变化图

Fig. 8 The diameter and arc length at different positions with respect to the time during heating

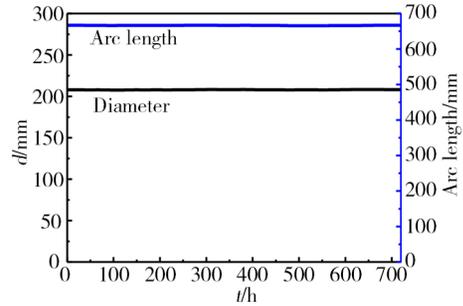
表3 加温过程中,3个位置特定时间直径、弧长变化率

Tab. 3 The diameter and arc length change rate at different positions during heating %

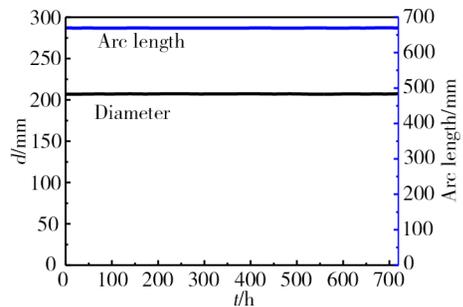
时间 /h	距离端面 30 mm		距离端面 55 mm		距离端面 80 mm	
	直径变 化率	弧长变 化率	直径变 化率	弧长变 化率	直径变 化率	弧长变 化率
60	-0.04	-0.06	0.09	0.02	-0.2	-0.06
120	-0.09	-0.09	0.05	0.03	-0.13	-0.03
240	-0.04	-0.04	0	0	-0.24	-0.04
360	-0.1	-0.3	0.2	0	-0.14	0
480	-0.09	-0.3	-0.15	-0.06	-0.4	-0.06



(a) 距离端面 300 mm



(b) 距离端面 550 mm



(c) 距离端面 800 mm

图9 加温完成后中不同位置直径、弧长随时间变化图

Fig. 9 The diameter and arc length at different positions with respect to the time after heating

由上可知,软质聚酰亚胺泡沫作为保温主体层的绝热结构加热过程中及加热停止 720 h 内,绝热结构尺寸无明显变化,具有优良尺寸稳定性。根据目前试验数据可知,加热、降温、外界环境等因素对绝热吸声结构尺寸变化影响很小,由此可推测,在保持相近环境条件下,该绝热结构尺寸仍无明显变化,这是由绝热层材料聚酰亚胺泡沫特定的微观结构决定的。聚酰亚胺泡沫呈开孔结构,由泡壁、泡膜构成,相邻泡孔间具有共同的孔壁相连,经过二次压缩模塑定型,泡壁、泡膜组织结构稳定性提高,且形成泡壁泡膜的聚酰亚胺树脂的分子链结构中存在苯环和酰亚胺环, T_g 达到 265 °C,在此温度之下分子链处于冻结状态,表现出优异的抗蠕变能力,因此,在本研究要求的加热范围内,泡沫表面不会发粘,且体积变化率几乎为 0;另一方面,聚酰亚胺泡沫线膨胀系数很低,约为 $31 \times 10^{-6} / K$,这与金属管路热匹配性良好,在高温环境下材料内应力小,因此,表现出好的热尺寸稳定性。

3 结论

(1)在蒸汽管路表面施工多层聚酰亚胺泡沫作为绝热结构,外观良好,解决了现无机岩棉类体系存在的工艺性差、环保性差等问题。

(2)绝热结构经历了280℃、480h连续加温考核试验和720h静置试验,结构完整、无破损、裂缝等问题。480h加温期间典型蒸汽管路绝热结构外表面温度控制在45.2~46.5℃,这与理论计算基本一致;720h静置期间结构和尺寸变形量几乎为0且趋于稳定。

(3)间隔层聚酰亚胺泡沫具有良好的隔热性能,反射层聚酰亚胺铝箔具有良好的反射性能,这两者共同促成了绝热结构的优良绝热性能。

本研究可为舰艇新型绝热结构的应用发展提供技术实践参考,具有一定的理论和实际工程价值。

参考文献

[1] 王在铎. 纳米隔热材料在舰船上的应用前景[J]. 宇航材料工艺, 2011,41(3):12-15.

WANG Z D. Nano-Insulation materials and its application on warship [J]. Aerospace Materials & Technology, 2011, 41(3): 12-15.

[2] 石明伟,胡津津,孙娇华. 无机绝热材料在船舶建造中的应用[J]. 上海造船,2008(2):46-47.

SHI M W, HU J J, SUN J H. Application of inorganic thermal insulating material in shipbuilding [J]. Shanghai Shipbuilding, 2008(2): 46-47.

[3] 虞子森. 船舶绝热保温材料的最新研究与开发[J]. 上海造船,2008(2):46-47.

YU Z S. The novel research and development of marine

thermal insulating materials [J]. Shanghai Shipbuilding, 2005(1):49-53.

[4] LIU X Y, ZHAN M S, WANG K, et al. Preparation and performance of a novel polyimide foam [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2012, 23(3):677-685.

[5] MA J J, ZHAN M S, WANG K. Ultralightweight silver nanowires hybrid polyimide composite foams for high-performance electromagnetic interference shielding [J]. ACS Applied Materials and Interface, 2015, 7(1): 563-576.

[6] 马晶晶,熊春晓,酒永斌,等. 基于粉末微波发泡法制备超轻质聚酰亚胺泡沫的结构与性能[J]. 高分子材料科学与工程,2019,35(6):66-72.

MA J J, XIONG C X, JIU Y B, et al. Structures and properties of lightweight polyimide foam based on powdered precursor process by aid of microwave [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2019,35(6):66-72.

[7] 詹茂盛,王凯. 聚酰亚胺泡沫[M]. 北京:国防工业出版社,2010.

ZHAN M S, WANG K. Polyimide foam [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.

[8] 李坤. 聚酰亚胺泡沫材料装船应用研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.

LI K. Application of polyimide foam in shipping [D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2016

[9] 崔志刚,张鑫,马立. 加压预处理对软质聚酰亚胺泡沫力学性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 2019, 49(3): 51-55.

CUI Z G, ZHANG X, MA L. Effect of pressure pretreatment on mechanical properties of soft polyimide foam [J]. Aerospace Materials & Technology, 2019,49(3): 51-55.