

# 纳米隔热材料在舰船上的应用前景

王在铎

(海军驻中国运载火箭技术研究院军代表室,北京 100076)

**文 摘** 概述了舰船隔热保温材料的种类及优缺点,特别介绍了具有广阔应用前景的纳米隔热材料及其性能特点,并通过分析国外纳米隔热材料在舰船上的应用现状及国内研究基础,展望了纳米隔热材料在国内舰船上的应用前景。

**关键词** 舰船,纳米隔热材料,热导率

## Nano-Insulation Material and Its Application on Warship

Wang Zaiduo

(Navy Representative Office in the China Academy of Launching Vehicle Technology, Beijing 100076)

**Abstract** The latest species and characteristic of thermal insulating materials for warship are depicted synthetically in this paper. Especially, the performance of the prospective nano-insulation materials is emphasized. Based on reviewing the application of nano-insulation materials on warship abroad and domestic research, the future developments of nano-insulation materials for warship are summarized.

**Key words** Warship, Nano-insulation, Thermal conductivity

### 0 引言

隔热材料在各类舰船上获到广泛应用,主要发挥耐火分隔、舱室绝缘及高温管道保温等功能,其性能优劣直接关系到舰船及其人员安全和生活质量、维修保养周期和费用、环保等多方面的问题<sup>[1]</sup>。舰船上应用的隔热材料主要分有机和无机材料两大类。以美国为首的发达国家对舰船的防火等级提出了明确的要求和试验方法,过去常用的聚氨酯泡沫材料体系逐渐被淘汰<sup>[2-3]</sup>。舰船常用的无机隔热材料主要有“三棉(矿棉、玻璃棉、岩棉)”、“三板(硅酸钙板、膨胀蛭石板、膨胀珍珠岩板)”等<sup>[4]</sup>。与有机类材料相比,无机隔热材料在使用温度、老化稳定性、防火、无毒等方面具有明显优势,但是仍然存在一定的不足:(1)热导率偏高,防火保温效率较低,不仅影响有效载重,而且造成动力舱和热力管道间温度偏高、操作空间狭小,导致能量散失,容易引起人员烫伤;(2)无机陶瓷材料表面含有羟基等亲水基团,易吸水(潮),进一步增加无效质量和能量散失,运行过程中因为析晶等原因造成纤维材料粉化失效;(3)残留的氯离子和碱性元素对金属管道具有一定的腐蚀性,容易造成管道泄漏等灾难性后果,进一步加大了维护保养的难度。

针对存在的问题,各国学者在开发新型舰船隔热材料方面做了大量工作,并取得了一定的成果。其中在有机隔热材料方面,发展了具有非自燃特性的聚酰亚胺泡沫材料、韧性酚醛泡沫耐高温材料体系;在无机隔热材料方面,发展了玄武岩和多晶莫来石纤维、碳泡沫和纳米隔热材料等<sup>[3-4]</sup>。

聚酰亚胺隔热材料具有良好的阻燃性、抗明火、不发烟、环境友好,质量轻、柔韧性好、易于安装维护等优点,在舰船上已经获得广泛的应用,例如美国的CG-47 护卫导弹巡洋舰、HSS900 双体船、登陆气垫船、海军水面战舰、潜艇和航空母舰等,其隔热性能优异,船体结构质量大大减轻<sup>[5-6]</sup>。聚酰亚胺隔热材料的缺点是使用温度偏低,热导率较高,以应用最广泛的聚酰亚胺泡沫为例,其最高使用温度仅为 200℃,室温热导率达到 0.043 W/(m·K)<sup>[3]</sup>。

酚醛泡沫具有良好的隔热性能、较高的使用温度、耐燃性、烟密度低、无毒等优点。酚醛泡沫的缺点是脆性大,国外采用韧性好、耐温高的硅氧烷化合物与酚醛树脂复合形成半互穿网络或全互穿网络,可望显著提高其韧性<sup>[3,7-8]</sup>,目前相关技术还不成熟。

碳泡沫材料具有价廉、质轻、阻燃、抗冲击、无毒等众多优点,与 Kevlar 纤维和酚醛树脂复合形成的

复合材料可用于舰船的舱壁、甲板、通风管道、壳体等部位<sup>[3]</sup>;缺点是热导率偏高,室温为  $0.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $300^\circ\text{C}$  达  $0.53 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

新型陶瓷纤维渣球少,不含碱金属或者含量极低,化学性质更为稳定,相比“三棉”具有一定优势。缺点是热导率较高,施工工艺较为复杂。

对比上述隔热材料,陶瓷基纳米隔热材料具有更高的使用温度和环境友好特点,成型性好,施工较为方便,特别是“超级隔热”特性显著优于其他材料,备受各国学者和舰船技术人员的关注。

### 1 纳米隔热材料的性能特点

“超级隔热材料”的概念是美国学者 A. J. Hunt 在 1992 年的国际材料工程大会上提出的,是指在预定使用条件下热导率低于“无对流空气”的一类隔热材料<sup>[9]</sup>。纳米隔热材料的孔隙体积分数一般高于 90%,密度较低,且固体骨架和孔隙的尺寸均小于  $100 \text{ nm}$ 。纳米隔热材料的结构特点决定了它具有极低的热导率:纳米骨架累积传热面积小,抑制了固体导热;气体分子的运动被限制在极小的空间内,相互之间通过碰撞传递热量受到极大抑制,气体导热的贡献率显著下降;在材料内部引入红外阻隔成分(遮光剂),能够显著抑制辐射传热。因此,纳米隔热材料在常温常压下的热导率最低仅为  $0.012 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,不到相同条件下静止空气 [ $0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] 的一半,显著低于其他种类<sup>[10-11]</sup>。

图 1 是 Microtherm 公司生产的纳米隔热材料与常用的几种隔热材料热导率对比。可以看出,纳米隔热材料的热导率远小于传统隔热材料,特别是随着温

度的升高,纳米隔热材料热导率增加的幅度明显小于其他隔热材料。目前,此类纳米隔热材料可加工成各类形状,适用于不同的使用环境,如图 2 所示。从图 1 可以看出,纳米隔热材料在高温下的热导率约为常用隔热材料的  $1/4$ ,保温隔热效率大幅度提高。这意味着在相同的传热控制过程中,采用纳米隔热材料的厚度要远小于传统的隔热材料,如图 3 所示。这种体积优势在空间和总体质量受到严格限制的环境中显得尤为重要,也是设计人员优先考虑的重要因素。

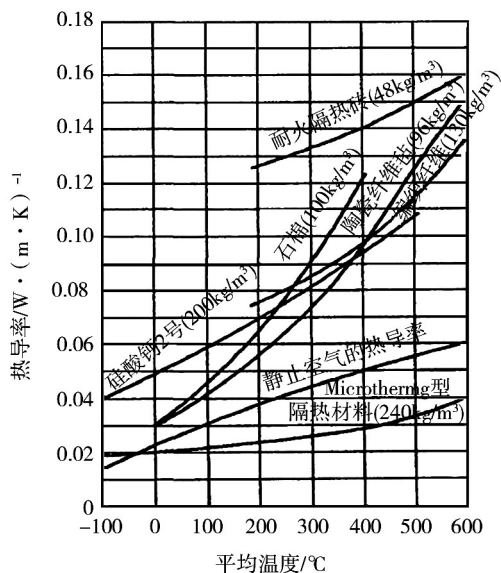


图 1 Microtherm 型与其他隔热材料热导率的对比  
Fig. 1 Thermal conductivities of microtherm nano-insulation and other materials

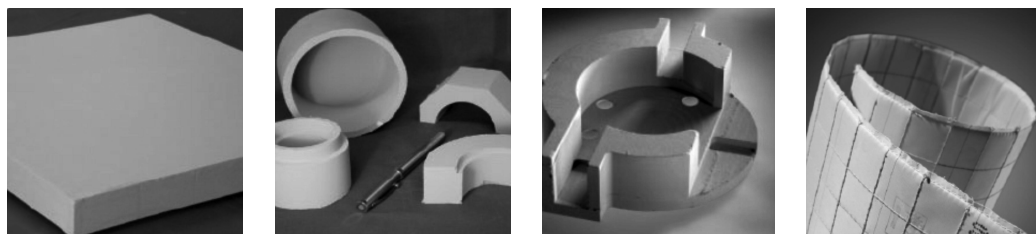
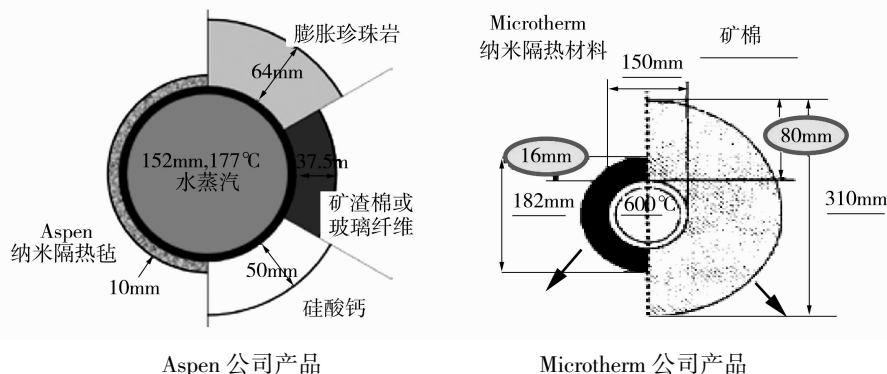


图 2 纳米隔热材料产品

Fig. 2 Products of nano-insulation materials



Aspen 公司产品

Microtherm 公司产品

图 3 相同条件下隔热效果对比

Fig. 3 Effectiveness of different thermal insulation materials

## 2 纳米隔热材料国内研究现状

国内有多家单位开展了纳米隔热材料相关的研究,如同济大学、北京科技大学、航天材料及工艺研究所等。其中同济大学在国内较早开展纳米隔热材料方面的研究工作,波耳固体物理实验室制备的材料各项性能较优<sup>[12]</sup>。北京科技大学研究了硬硅钙石/气凝胶复合隔热材料的制备工艺和结构特点<sup>[13]</sup>,材料的隔热性能优异,显示出较好的应用前景;近年来,在航天型号需求牵引下,航天材料及工艺研究所对纳米隔热材料的组分、制备工艺、材料结构、大尺寸试件成型工艺等进行了深入系统的研究,取得了丰富的成果,工艺稳定性和技术成熟度较高。研制的纳米隔热材料室温热导率最低仅为 $0.015 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,产品的热导率可稳定在 $0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 以下,最高使用温度达到 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ [热导率约为 $0.05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ],与国外报道的最高水平相当,可生产具有复杂型面及特殊要求的大尺寸构件,并且初步开展了防水(潮)新技术研究,取得明显进展。

## 3 纳米隔热材料在舰船上的应用现状及优势分析

在舰船上,隔热材料主要用于动力舱室、高温排气管道和耐火分隔等部位。据文献<sup>[14-15]</sup>报道,美国海军研究实验室、水面作战中心和海岸警卫队研究发展中心都对舰船的隔热保温材料进行了大量的试验研究,并对舰船耐火分隔提出了更高的N级要求。在对几种新发展的船舶耐火隔热材料,包括可溶性硅酸盐纤维、膨胀型防火涂层和纳米隔热复合材料的对比研究后得出结论:纳米隔热复合材料与传统的隔热材料相比具有优异的隔热效果,在减轻质量和节约空间方面有明显的先进性,因而受到美国海军部门的重视<sup>[15]</sup>,美国“Conqueror”号潜艇、“Superseacat”号高速艇以及航空母舰、大型驱逐舰上都已采用该隔热材料。美国的Therdyne公司、Thermal Ceramic公司、英国的Microtherm公司及德国的Wacker公司都有系列产品应用于舰船制造业,其中以英国的Microtherm公司产品最成熟,应用的数量和船级社认可的结构形式最多<sup>[5]</sup>。

在美国国防部(DAC)计划2006年的报告中指出,Aspen公司生产的纳米隔热毡已经完成全面测试,并提出在下一代战舰上将采用纳米隔热材料体系,可比现有隔热材料结构质量减轻4倍,能够提高武器装备和电子设备等有效载荷;可提高防火等级,保护钢铁和复合材料结构,改善舰船的安全性和生存几率;可有效降低红外信号,阻止爆炸发生<sup>[16]</sup>。

综上所述,纳米隔热材料之所以可在舰船上获得广泛应用,其优点主要体现在以下几个方面。

(1)隔热性能优异:纳米隔热材料的热导率从室温到高温范围内相比传统隔热材料明显降低,隔热性能大幅提高,能够显著减少舰船无效质量。隔热材料用量的减少,一方面增大了舰船的有效载重,另一方面能够增

加操作空间,提高了舰船的综合性能和人员舒适性。以国内目前采用的A-60级耐火分隔为例,采用纳米隔热材料耐火分隔的隔热层厚度和质量都远低于传统隔热材料,如表1所示。可以看出,纳米隔热材料对舰船、潜艇等有限空间的利用率优势尤为明显。

表1 A-60级耐火分隔的隔热层厚度对比<sup>[2,17-19]</sup>

Tab.1 Thickness of thermal insulation materials for A-60

| 材料        | 隔热层厚度 |   |
|-----------|-------|---|
|           | /mm   | 单位面积需要<br>隔热材料/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ |
| 陶瓷棉       | 40    | 6.8   |
| 岩棉        | 60    | 9.0   |
| 喷涂型耐火纤维   | 50    | 7.2   |
| 碱土金属硅酸盐纤维 | 50    | 6.4   |
| 纳米隔热材料    | 15    | 3.0   |

(2)使用温度高:目前纳米隔热材料的使用温度可达 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ ,且在高温下不分解,无有毒气体放出,安全性和环保性能明显提高。

(3)安装工艺简单:纳米隔热材料有刚性和柔性两大类,可制成不同形状和规格的标准产品,相对传统的岩棉、陶瓷纤维等隔热材料而言,安装操作简单易行,维护方便,刚性隔热制品可现场加工,柔性隔热制品可现场裁减,能够满足舰船上复杂部位的隔热要求。

(4)不含氯离子等有害成分,对设备和管道没有腐蚀问题,连续运行时间长,可有效降低维护保养的费用,提高舰船的安全性能。

## 4 纳米隔热材料在我国舰船上的应用前景

纳米隔热材料要实现在舰船上的推广应用还必须解决以下几个方面的问题。

(1)纳米隔热材料在舰船作业环境下的稳定性问题。舰船在海上航行和复杂环境下作业时对纳米隔热材料构件整体结构、性能的影响及后续可维护性能必须进行严格的评估。

(2)纳米隔热材料的防潮问题。纳米隔热材料容易吸收空气中的水汽而导致粉化、出现裂纹等现象,影响其性能及后续维护保养。因此,开发简便的纳米隔热材料防水(潮)技术也是纳米隔热材料应用中面临的问题之一。

(3)成本的问题。舰船对隔热材料的需求量是巨大的,对降低材料成本的要求较高,能否突破材料的低成本制备技术,达到经济可承受的范围,也将成为一个必须解决的重要问题。

(4)安全防护问题。纳米隔热材料成分中含有陶瓷纳米颗粒及纤维,在施工及维护过程中可能产生粉尘,因此,必须考虑粉尘的消除方法以及对人体健康的影响。

国外经过几十年的研究和开发,纳米隔热材料已成功应用于动力、冶金、化工、核能、船舶等领域,并通过了不同工作环境的检验,其优异的综合性能得到实践证明。舰船保温隔热材料一直是舰船设计及建造

中备受重视和关注的课题,实现纳米隔热材料在舰船保温隔热领域的推广应用无疑将会推动我国舰船整体性能的显著提高。

### 参考文献

[1] 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

[2] Parker A J, Beitel J J, Beyler C L. Fire test program to verify the calculation method of determining the A-30 and A-15 thickness of approved deck and bulkhead insulation materials. ADA 414235 [R]. Baltimore, MD: Technical Information Center, Hughes Associates Inc., Defense, 2003

[3] Wild W J, Gauthier R D, Seligman P F, et al. Investigation of PCB release rates from selected shipboard solid materials under laboratory-simulated shallow ocean (Artificial reef) environments[R]. ADA452595, 2006 APR

[4] 虞子森. 船舶绝热保温材料的最新研究与开发[J]. 上海造船,2005(1):49-53

[5] 石明伟,胡津津. 美国海军舰船的耐火分隔技术发展[J]. 中国舰船研究,2008(5):77-80

[6] Venkateswara R A, Wagh P B. Preparation and characterization of hydrophobic silica aerogels[J]. Materials Chemistry and Physics, 1998(5):313-318

[7] Beeston A. Reducing the weight of structural fire protection in composite ships. Brand Posten. 2006,34:16-17

[8] Microtherm. Fire safety ensured with lightweight insulation[J]. The Naval Architect, 2003(4):11

[9] Hunt A J. Aerogel: a transparent porous super insulator [C]. Materials Engineering Congress, Sponsored by: ASCE, Puslo-

by, ASCE, 1992:398-403

[10] Fricke J. Aerogel and their applications[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1992,219:356-362

[11] Fricke J, Emmerling A. Aerogels-recent progress in production techniques and novel applications[J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 1998,13:299

[13] 沈军,王珏,吴翔,等. 硅气凝胶的结构控制研究[J]. 材料科学与工艺,1994,2(4):87-93

[12] Yang Hailong, Ni Wen, Chen Deping, et al. Mechanism of low thermal conductivity of xonotlite-silica aerogel nanoporous super insulation material[J]. Advanced Powder Technology, 2008,19:311-320

[14] Hirsch D B, Beeson H D. Ignition and combustion of low density polyimide foam[J]. Fire and Materials, 2003,27:119-130

[15] 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

[16] Kubricky, John J. Department of defense annual report to congress on defense acquisition challenge program for FY 2006 [R]. ADA487481, 2007 01 Jun

[17] 石明伟. 船用耐火分隔材料及发展概况[J]. 造船技术,2005(3):32-34

[18] 陈伟林. 舰船管路安全技术工艺探讨[J]. 广东造船,2008(1):62-64

[19] 倪家俊. 船舶耐火分隔的试验研究[C]//中国造船工程学会船用非金属材料学组. 船用非金属材料研究与应用论文集(1981-1992), 1993:31-40

(编辑 李洪泉)

(上接第4页)

[13] 莫建华,韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状[J]. 中国机械工程,2008,19(4):491-497

[14] Zhang Q, Wang Z R, Dean T A. The mechanics of multi-point sandwich forming[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008,48(12/13):1495-1503

[15] 金川. 无模成形技术的研究概况及其进展[J]. 光机电信息,2006(8):46-50

[16] 李明哲,付文智,阎雪萍. 板材无模成形压力机[J]. 新技术新工艺,2002(7):36-37

[17] Dohmann F, Hartl C H. Hydroforming-applications of coherent FE-simulations to the development of products and processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004,150(1/2):18-24

[18] Dohmann F, Hartl C H. Hydroforming-a method to manufacture lightweight part[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996,60(1/4):669-676

[19] Hartl C H. Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,167(2/3):383-392

[20] Soo-Ik Oh, Byung-Hee Jeon, Hyun-Yong Kim, et al. Applications of hydroforming processes to automobile parts[J]. <http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2011年 第3期

Journal of Materials Processing Technology, 2006,174(1/3):42-55

[21] 苑世剑. 我国内高压成形技术现状与进展[J]. 锻压技术,2004(3):1-6

[22] Stancu-Niederborn S, Engel U, Geiger M. Ultrasonic investigation of friction mechanism in metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994,45(1/4):613-618

[23] 李荣德,刘敬福. 喷射成形技术国内外发展与应概况[J]. 铸造,2009,58(8):797-803

[24] 汪哲能. 现代制造业的发展方向——绿色制造[J]. 装备制造技术,2010(3):73-74

[25] Muammer Koc, Taylan Altan. An overall review of the tube hydroforming technology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001(108):384-393

[26] 王仲仁,滕步刚,汤泽军. 塑性加工技术新进展[J]. 中国机械工程,2009,20(1):108-112

[27] Lee W B, Cheung C F, Li J G. Applications of virtual manufacturing in materials processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001,113(1-3):416-423

(编辑 吴坚)