

特约专栏

热透波材料技术研究进展

张大海, 李仲平, 范锦鹏

(航天材料及工艺研究所 先进功能复合材料科技重点实验室, 北京 100076)

摘要: 热透波材料技术是高超声速飞行器实现通讯与精确导航的关键技术, 文章从热透波材料体系、热透波材料热电行为和高温电性能测试技术等方面对热透波材料及其相关技术的发展现状进行了简要介绍。在材料体系方面, 石英陶瓷及二氧化硅基复合材料是目前应用的主要材料品种, 多孔氮化物陶瓷及陶瓷基复合材料是未来发展的重要方向。在热电行为研究方面, 对典型氧化物、氮化物、氮氧化物材料热电行为规律及杂质离子对材料热电行为的影响等方面的研究获得重要进展, 并获得试验验证。在高温电性能测试方面, 近年来突破了1 600 °C高温宽频测试关键技术, 并获得了氧化硅熔融态介电性能实测数据, 国外和国内已实现8 MW/m²热透波实时测试。

关键词: 热透波材料; 热电行为; 高温电性能测试; 介电常数; 介电损耗; 热透波行为

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962 (2012)08-0001-06

Review on the Research of High Temperature Wave-Transparent Materials

ZHANG Dahai, LI Zhongping, FAN Jinpeng

(National Key Laboratory of Advanced Functional Composite Materials, Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: the technique of high temperature wave-transparent materials is the key technique for the communication and navigation of hypersonic vehicles. This paper reviews the research and developments of high temperature wave-transparent materials and relative fields in recent years, including the material system, the high temperature dielectric properties and the high temperature dielectric parameters measurement. For material system, the quartz ceramics and quartz fiber reinforced composites are the main applicable materials so far; the porous nitride ceramics and composites will be an important development trend in the future. For the high temperature dielectric properties, the important progress and experimental verification have been made on the high temperature dielectric behaviors of typical oxides, nitrides and nitrogen oxide as well as the effects of impurities on dielectric properties. For the high temperature dielectric parameters measurement, the key technique of board band dielectric measurement from room temperature to 1 600 °C has been developed recently and the dielectric parameters of fusing silicon oxide have been successfully obtained for the first time. Moreover, the real-time measurements for high temperature wave-transparent properties under the condition of 8 MW/m² heat flux are achieved.

Key words: high temperature wave-transparent materials; high temperature dielectric properties; high temperature dielectric parameters measurement; dielectric constant; dielectric loss; high temperature wave-transparent behavior

1 前言

热透波材料是指在高温甚至烧蚀状态下具有良好介电性能的一类特殊绝缘电介质材料, 在各类高速航天飞行器的电磁传输窗口上具有广泛而重要的应用^[1-2]。以天线罩为典型代表的热透波材料构件不仅是飞行器结构的重要组成部分, 也是发射和接受电磁信号的窗口, 同

时还是罩体内部天线系统不受严重气动加热影响的保护屏障(极端条件下可达3 000 °C以上)。因此, 热透波材料必须在很宽的温度范围内具有优良稳定的介电性能, 同时还要具有良好的力学、耐热/烧蚀、隔热以及抗热冲击等综合性能, 是一种典型的多功能一体化材料。热透波材料的性能及其应用技术水平不仅直接影响通讯与制导系统的正常工作和性能指标, 还关系到飞行器的气动特性和结构可靠性, 相关的材料技术研究涉及材料科学与工程、电介质物理、气动热力学和高温电性能测试等多个学科和专业, 具有显著的跨学科和难度大的特点。

收稿日期: 2012-06-18

第一作者及通信作者: 张大海, 男, 1968年生, 工学博士, 研究员, 博士生导师

2 热透波材料及相关技术发展现状

热透波材料研究始于 20 世纪 50 年代,最初是为了满足高速防空导弹需求而发展起来的。由于热透波材料的关键作用和无可替代的特点,研究伊始就受到了各国的高度重视,美国、西欧和前苏联均由军方机构牵头组织开展相关研究工作。美国军方从 20 世纪 60 年代开始每 2 年组织召开一次电磁窗会议,但相关内容从未公开发表。

2.1 材料体系研究

2.1.1 陶瓷类材料

热透波材料大致可分为陶瓷(含玻璃)材料和陶瓷基复合材料两大类,早期的研究工作主要是针对耐高温性能和介电性能均较为优良的陶瓷材料开展,除了根据性能进行材料体系筛选,更多的工作集中在改善材料的力学性能,特别是脆性和抗热冲击性能,以提高天线罩构件的安全性和可靠性。

氧化物陶瓷 氧化物陶瓷是研究最早,也是迄今为止品种最多的热透波材料体系,其中的氧化铝陶瓷是第一种商业化热透波天线罩材料。20 世纪 50~80 年代,美国军方与康宁公司(CORNING)、雷声公司(Raytheon)、乔治亚理工学院(Georgia Tech)等多家公司和高校合作,在微晶玻璃、堇青石陶瓷、氧化铍陶瓷、石英陶瓷等材料方面开展了大量研究工作^[3-7]。其中,微晶玻璃和石英陶瓷因优秀的综合性能,在飞行速度 3 Ma 以上的空-空导弹和地-空导弹上获得了广泛应用^[8],特别是石英陶瓷,可以用到 5 Ma 以上,至今仍然在大量使用。国内早期主要发展过微晶玻璃和石英玻璃材料,20 世纪 90 年代以后,石英陶瓷材料技术逐步成熟,是目前地-空导弹和空-空导弹天线罩的主要材料品种。

氮化物陶瓷 氮化物陶瓷热透波材料研究工作始于 20 世纪 60 年代,主要是氮化硅、氮氧化硅、塞隆(SALON)和氮化硼,以及它们的复相陶瓷,该类材料的耐高温和耐烧蚀性能普遍优于氧化物陶瓷。虽然其已有很长的研究历史,但由于技术和成本等综合原因,实际应用并不广泛。根据资料分析,美国 TMD 系统的 PAC-III 导弹天线罩采用的应该是氮化物材料^[9],可适用于 6 Ma 飞行速度。氮化物陶瓷目前仍然是热透波材料研究的热点之一,特别是其中的多孔陶瓷,是一个重要的发展方向,可作为宽频热透波材料使用,是高速反辐射导弹研制必须攻克的关键技术。国内在多孔氮化物陶瓷方面也开展了大量研究工作,研制出的材料样品具有良好的力学和介电综合性能,但工程应用技术尚未突破。

近年,随着计算材料学的发展和材料制备工艺技术的进步,一些多元氧氮化物体系材料得到了重视和研究,其中的 Y-Si-Al-O-N 体系展现出较大的发展潜力。

与单纯的二氧化硅材料相比,该体系内很多材料的本征力学性能大幅度提高,同时具有较好的介电性能,理论上既可以单独作为热透波材料使用,也可以设计为复相陶瓷的重要组成部分或者晶界相。目前,已经可以制备出 Y-Si-O 体系单相陶瓷,其中的 Y_2SiO_5 和 $\gamma-Y_2Si_2O_7$ 综合性能最优,两者均具有特殊的化学键结构,受剪切力时可以发生层间滑移,表现出高的损伤容限和良好的可加工性^[10-13]。另一个值得重视的材料是 Si_2N_2O ,目前制备出的致密陶瓷块体材料,弯曲强度超过 500 MPa,介电常数小于 5.5,且随温度变化很小^[14]。

2.1.2 陶瓷基复合材料

二氧化硅复合材料 为了大幅度提高热透波材料的抗热冲击性能,满足高速再入环境条件需求,20 世纪 70 年代末至 80 年代初,美国菲格福特公司(Philco-Ford)和通用电器公司(General Electric)首先开展了石英纤维增强二氧化硅热透波复合材料研究工作^[15-16],发展了材料制备工艺,比较全面地评价了材料综合性能,但后续研究和应用工作情况未见报道。

国内从 20 世纪 80 年代末开始石英纤维增强二氧化硅复合材料研究工作,经过二十多年的发展,突破了石英纤维制备、高纯硅溶胶制备、增强织物结构设计、织物编织、循环浸渍复合、防潮处理等一系列材料研制和工程应用关键技术,针对不同需求,研制出穿刺结构、三向正交结构、浅弯交联结构等一系列具有优良力学、介电、烧蚀和热物理等综合性能的热透波材料及构件,满足了广泛而重要的背景需求,材料体系也基本成熟,是目前国内高性能热透波材料的主要品种。

磷酸盐复合材料 20 世纪 50~60 年代,从低成本需求出发,前苏联、美国和西德开始硅质纤维织物增强磷酸盐复合材料研究,其中比较具有代表性的是前苏联研制的磷酸铬铝材料,可以 170 °C 低温固化,1 200 °C 高温使用^[17]。国内从 20 世纪 90 年代末开始同类材料研究,突破了低温固化高温使用、介电性能调控等关键技术,采用模压工艺制备的材料获得了少量型号应用。磷酸盐类热透波材料具有明显的低成本优势,但与其它热透波材料相比,其介电和力学综合性能较为普通,不适合苛刻环境使用。

相比于纯陶瓷材料,陶瓷基复合材料的最大优势在于很高的抗热冲击性能和结构可靠性,特别适用于高超声速再入的热力载荷环境。该类材料的不足在于气孔率较高,烧蚀性能低于同类的致密陶瓷材料。围绕提高耐烧蚀性能,一个重要的研究方向是研制氮化物和氮氧化物复合材料。已开展过的氮化物纤维增强氮化物基体复合材料的研究工作比较少,这可能是复杂的工艺流程、苛刻的制备环境和设备要求、以及高昂的材料成本所

致。美国在20世纪70年代曾开展过少量的BN纤维增强BN复合材料研制工作,国内近年也开展过BN纤维增强 Si_3N_4 复合材料探索研究,均没有取得重要突破^[18-19]。21世纪初开始,国内对石英纤维增强氮化硅/氮化硼复合材料开展了较多的研究工作,采用了与二氧化硅基复合材料相似的循环浸渍热处理工艺^[20-21]。由于石英纤维的力学性能高温退化严重,制约了该类材料的热处理工艺,很难充分发挥出氮化物基体在力学和耐腐蚀方面的性能优势,材料的综合性能与二氧化硅复合材料相近。

2.2 材料电性能研究

介电性能随温度的上升而发生变化是限制热透波材料使用温度范围的一个主要因素。美国20世纪70年代曾对9606微晶玻璃天线罩某飞行时刻的瞄准误差进行过仿真分析,发现在最高温度约340℃时,材料介电常数和介电损耗分别比常温时增加了约3.7%和17%,引起垂直极化最大瞄准误差由3'增大到约12'。

早期的飞行器一般速度较低,由于准确的热透波分析计算难度较大,通常采用常温设计加上简单经验修正的办法,通过设计选材,把材料室温到使用温度的介电常数变化限制在7%以内,以减小材料高温电性能变化对电气传输性能的影响。随着飞行器速度的不断提高,气动加热引起的方向畸变和透波率下降问题越来越突出,相关研究工作也逐步得到了重视。

系统性的热透波研究主要涉及3个方面,即材料的热电行为、材料的烧蚀传热行为、三维非均态构件的热透波分析计算。其中,热电行为和烧蚀传热行为是进行热透波分析计算的前提,两者分别为后者提供高温介电性能、温度场和烧蚀外形的输入条件。本文只介绍材料热电行为方面的相关研究工作。

热电行为即固定工作频率下,材料介电常数和介电损耗随温度上升的变化规律,包括本征变化和杂质微成分的影响,热电行为是材料固有物理属性。

2.2.1 早期研究工作

美国早年在研制先进弹道再入飞行器(ABRES)时,受当时认识水平的限制,采用了热压氮化硼陶瓷天线窗,再入飞行时信号衰减意外高达40 dB。通过深入的氮化硼材料热电行为研究发现,在能够直接获得介电损耗测量值的1200℃范围内,氮化硼的介电损耗在 10^{-4} 量级,且随温度变化很小,具有优良的透波性能。但理论分析结合烧蚀热透波试验反算的结果表明,在1400℃附近,氮化硼发生热电行为突变,介电损耗急剧上升,到2700℃时,上升超过5个数量级,实际上在2000℃以上时已基本不具备透波性能^[22-23]。

前苏联对表面熔融状态的高硅氧纤维增强硅树脂材

料也开展过类似的热电行为研究,并基于分层模型建立了大温度梯度条件下的材料热透波性能分析计算方法。

2.2.2 近期研究进展

对材料热电行为的理论研究主要有2类方法,一是建立材料微观结构模型,采用第一原理结合分子动力学等方法进行研究;二是采用经典电介质物理理论,建立极化机制和损耗机制与材料宏观介电常数和介电损耗的关系。后者在工程应用方面更具实用性,本文只介绍后者的研究结果。

2.2.2.1 典型热透波材料热电行为

图1是氧化铝单晶(蓝宝石)介电性能与温度的关系,在熔融之前,材料介电常数和介电损耗均随温度上升缓慢上升,离子键比例较高的大多数氧化物热透波材料均具有类似特点。熔融之后,由于出现正负离子离解,成为导电材料,不再适合作为热透波材料使用。二氧化硅是一个特例,熔融之后,四面体结构单元基本保持,因而仍具有较小的熔融态介电损耗。

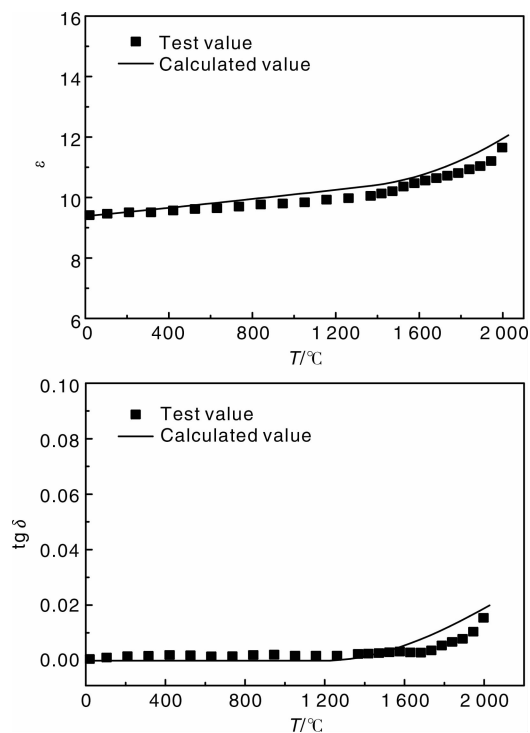


图1 氧化铝单晶(蓝宝石)介电性能与温度关系

Fig. 1 Relationship for sapphire between dielectric properties and temperature

图2是氮化硅材料介电性能与温度关系,在分解气化之前,介电常数随温度上升变化较小,但介电损耗在达到一定温度后(约1600℃)迅速上升,共价键原子晶体的氮化物热透波材料均具有类似变化规律。介电损耗的突变是由于电子电导的迅速增加引起的,与材料的禁带宽度有关,禁带宽度越窄,突变越明显。

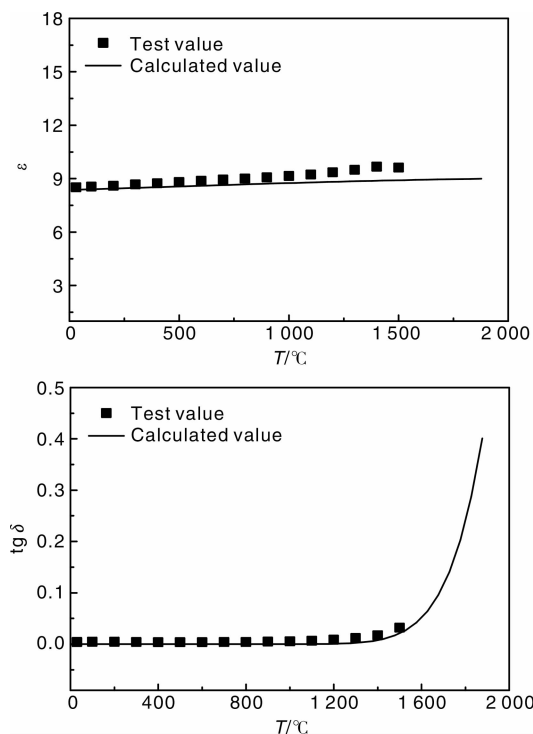


图2 氮化硅材料介电性能与温度关系

Fig. 2 Relationship for silicon nitride materials between dielectric properties and temperature

图3是 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 介电性能与温度关系,其热电行为与 Si_3N_4 材料类似。由于 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 禁带宽度(5.95 eV)大于 Si_3N_4 (5.3 eV),因而高温介电损耗小于 Si_3N_4 。

2.2.2.2 杂质微成分对材料热电行为的影响

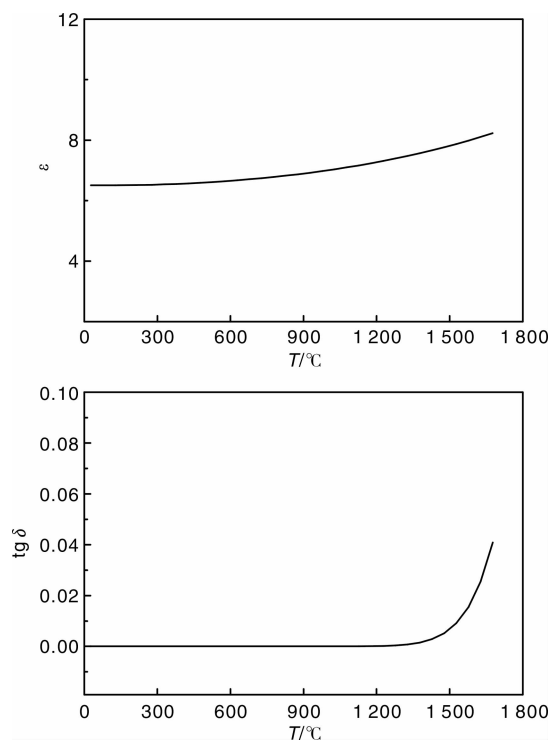
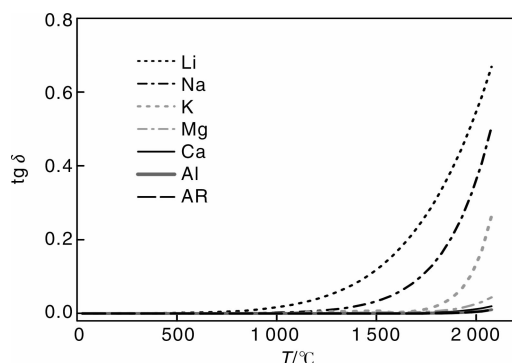
杂质微成分在热透波材料中一般含量较低,对热电行为的影响主要源于高温下产生的离子电导,因而对介电损耗影响较大,对介电常数影响不明显。图4是含有50 $\mu\text{g/g}$ 不同杂质微成分的二氧化硅材料介电损耗随温度的变化关系,可以看见,不同材料高温介电损耗差异很大,一价元素更易于在晶格或网络中迁移,其影响作用远大于三价元素。

2.3 高温电性能测试技术

高温电性能测试主要包括介电性能测试和透波性能测试,前者直接获得高温平衡状态下材料的介电常数和介电损耗等物理性能,后者一般得到的是高温非平衡状态下材料的功率传输系数和插入相位移等使用性能。在材料外形尺寸和温度场分布等边界条件确定的情况下,理论上两者可以相互推算和验证。

2.3.1 高温介电性能测试

在微波及毫米波波带,介电性能的测试方法主要有网络参数法和谐振腔法两大类,两者分别适用于高损耗材料和低损耗材料的测量。前者主要包括传输/反射法、终端开路/短路法和自由空间法,后者包括谐振腔微扰

图3 $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ 介电性能与温度关系(计算值)Fig. 3 Relationship for $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ between dielectric properties and temperature(calculated value)图4 杂质离子(50 $\mu\text{g/g}$)对二氧化硅介电性能的影响(计算值)Fig. 4 Effect of impure ions (50 $\mu\text{g/g}$) on dielectric properties of SiO_2 (calculated value)

法、介质谐振器法和高Q谐振腔法等。国内外利用这些方法进行高温介电性能测试的相关报道很多,由于被测材料对象较多,在测试温度范围内材料介电参数的变化也较大,所以不同方法具有各自不同的适用范围^[24-26]。高温介电性能测试共同需要解决的主要问题是高温测试物理模型、高温测试系统选材和高温校准与误差分析。

目前,对于固体材料,欧美已经建立了微扰法和终端反射法的变温(室温到1650 $^{\circ}\text{C}$)测试标准,国内也进入到例行测试阶段,建立的高Q腔和带状线谐振腔测试

系统,可以进行测试室温到1 600 °C介电性能测试,频率覆盖2~18 GHz。近期,国内突破了高温熔体介电性能测试关键技术,采用波导法获得了不同掺杂石英玻璃样品的熔体高温介电性能实测数据,同类研究工作还未见报道。

2.3.2 热透波性能测试

热透波性能测试需要解决2个主要问题,一是开放环境下的电测准确性问题,二是热源干扰问题。后者更为关键。

当温度不超过1 400 °C时,热源可以选用石英灯、氧乙炔或太阳炉等,对测试结果影响较小。20世纪70年代,沃尔太特(Basstl)和兰利(Langley)研究中心采用无电磁干扰、可控热流的太阳能加热方案,成功进行了热透波模拟测试,总热流接近1 MW/m²量级。

对于高超声速再入飞行,热流环境远高于1 MW/m²,一般需要采用电弧等离子体射流或电弧风洞模拟热环境。但是,由于电极烧损、空气电离等问题,电弧加热器开机时,流场的电子数密度达到10¹⁴个/cm³量级以上,远高于透波性能正常测试(Ku波段)要求的约10¹¹个/cm³上限,流场干扰可造成信号衰减40 dB,完全掩盖了1 dB左右的被测信号。因此,美国国家航空航天局艾姆斯研究中心(Ames)、兰利研究中心和空军飞行动力实验室,以及国内相关研究部门,早期均采用烧蚀关机后立即进行降温过程电测的方法,可以在一定程度上获取有用的热透波信息,但无法进行轨道模拟测试。

近期,国内已突破电弧加热器流场品质控制关键技术,电子数密度下降到10¹⁰个/cm³量级,实现了开机过程热透波实时测试,在8 MW/m²热流条件下,功率分辨率不低于0.1 dB,成功进行了多种热透波材料的烧蚀热透波模拟测试。图5是不同材料烧蚀透波性能模拟测试结果。

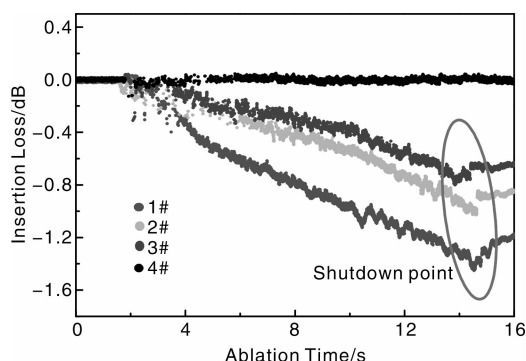


图5 不同材料烧蚀透波性能模拟测试结果

Fig. 5 Simulation test results of ablative wave-transparent properties of different materials

3 结 语

热透波材料及其相关技术作为高超声速精确制导飞行器研制的核心技术,未来很长一段时期内必将继续得到高度重视和大力发展,在耐烧蚀热透波材料新体系及其大型构件制备技术,长时高温隔热透波材料基础研究及材料制备技术,热透波材料用高性能特种氧化物、氮化物纤维等关键原材料制备技术,高温宽频透波、毫米波透波和多模透波新材料,复杂三维构件热透波分析计算方法,2 000 °C以上固态和熔融态介电性能测试技术及高温毫米波介电性能测试技术等方面还存在大量研究工作有待进一步深入开展,这些研究工作将有力促进热透波材料及其应用技术的体系化发展,推动热透波材料技术领域的整体进步。

参考文献 References

- [1] Li Yi(黎 义), Zhang Dahai(张大海), Chen Ying(陈英), et al. 航天透波多功能材料研究进展[J]. *Aerospace Materials & Technology*(宇航材料工艺), 2000, 30(5): 1-5.
- [2] Li Jingang(李金刚), Cao Maosheng(曹茂盛), Zhang Yong(张 永), et al. 国外透波材料高温电性能研究进展[J]. *Material Engineering*(材料工程). 2005, 2: 59-62.
- [3] Lewis D, Spann J R. Assesment of New Radome Material as Replacement for Pyroceram 9606[C]//Proceedings of the 16 th Symposium on Electro-Magnetic Windows. Washington D C: Naval Research Laboratory, 1982: 429-436.
- [4] Kiiko V S, Dmitriev I A, et al. Synthesis and Application of Transparent Beryllium Ceramics[J]. *Glass Physics and Chemistry*, 2004, 30(1): 109-111.
- [5] Banjuraizah J, Mohamad H, Ahmad Z A. Thermal Expansion Coefficient and Dielectric Properties of Non-Stoichiometric Cordierite Compositions with Excess MgO Mole Ratio Synthesized from Mainly Kaolin and Talc by the Glass Crystallization Method[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 494(1, 2): 256-260.
- [6] Harris J N, Bomar S H, et al. High-Strength, Broadband, Lightweight Silicon Oxide Radome Techniques[R]. Technical Report AFAL-TR-68-71.
- [7] Place T M, Bridges D W, Fused Quartz Reinforced Silica Composites [C]. Georgia Institute of Technology: Proceedings of the 10th Symposium on Electro-Magnetic Windows, 1970: 338-342.
- [8] Gao Dongyun(高冬云), Wang Shuhai(王树海), Pan Wei(潘伟), et al. 高速导弹天线罩用无机透波材料[J]. *Advanced Ceramics*(现代技术陶瓷), 2005, 4: 33-36.
- [9] Jane's Information Group. Jane's Strategic Weapon Systems[R]. *Jane's Air-Launched Weapons*, 2009: 51.
- [10] Sun Z Q, Li M S, Zhou Y C. Thermal Properties of Single-Phase

- Y_2SiO_5 [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2009, 29: 551–557.
- [11] Sun Z Q, Wang J Y, Li M S, *et al.* Mechanical Properties and Damage Tolerance of Y_2SiO_5 [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2008, 28: 2 895–2 901.
- [12] Sun Z Q, Zhou Y C, Wang J Y, *et al.* Thermal Properties and Thermal Shock Resistance of $\gamma\text{-Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ [J]. *Am Ceram*, 2008, 91(8): 2 623–2 629.
- [13] Sun Z Q, Zhou Y C, Wang J Y, *et al.* $\gamma\text{-Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$, a Machinable Silicate Ceramics: Mechanical Properties and Machinability [J]. *Am Ceram Soc*, 2007, 98(8): 2 535–2 541.
- [14] Tong Q F, Wang J Y, Li Z P, *et al.* Low-Temperature Synthesis/Densification and Properties of $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$ Prepared with Li_2O Additive [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 2007, 27: 4 767–4 772.
- [15] Gilreath M C, Castellows L. High Temperature Dielectric Properties of Candidate Space-Shuttle Thermal Protection System and Antenna-Window Material [R]. NASA TND-7523. Washington: NASA, 1974: 1–53.
- [16] Brazel J P, Fenton R. ADL-4D: A Silica/Silica Composite for Hardened Antenna Windows [C]. Georgia Institute of Technology: Proceedings of the 13th Symposium on Electro-Magnetic Windows, 1976.
- [17] Hu Liancheng (胡连成), Li Yi (黎义), Yu Qiao (于翹), *et al.* 俄罗斯航天透波材料现状考察 [J]. *Aerospace Materials & Technology* (宇航材料工艺), 1994, 24 (1): 48–52.
- [18] J. Economy, Exploratory development on formation of high strength, high modulus boron nitride continuous filament yarns [R]. AD-901949, 1972.
- [19] Zhang Mingxia (张铭霞), Cheng Zhiqiang (程之强), Ren Wei (任卫), *et al.* 先驱体法制备氮化硼纤维的研究进展 [J]. *Advanced Ceramics* (现代技术陶瓷), 2004, 25 (1): 21–25.
- [20] Han Guifang (韩桂芳), Zhang Litong (张立同), Cheng Laifei (成来飞), *et al.* 二维石英纤维增强多孔 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 基复合材料的制备及其力学性能 [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica* (复合材料学报), 2007, 24(1): 91–96.
- [21] Wang Siqing (王思青), Zhang Changrui (张长瑞), Cao Feng (曹峰), *et al.* 先驱体浸渍裂解法制备三维编织石英纤维/氮化物复合材料 [J]. *Rare Metal Materials and Engineering* (稀有金属材料与工程), 2007, 36(Suppl. 1): 615–618.
- [22] Goldend K E. The Prediction and Measure of Dielectric Properties and RF Transmission through Ablating BN Antenna Windows [C]//AIAA-81-1085, AIAA 16th Thermophysical Conference. California: Palo Alto, 1981: 23–25.
- [23] J. ARNOLD, L. T. HANAWA, Plasma ARC Test Technique for Evaluating Antenna Window RF Transmission Performance [R]. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA-82-0900, 1982: 138–144.
- [24] Cao Jiang (曹江). 介质材料电磁参数测量综述 [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement* (宇航计测技术), 1994, 13(3): 30–34.
- [25] Gregory A P, Etzel S, Clarke R N. Precise Measurements on Dielectric Reference Liquids Over the Temperature Range 5–50/spl deg/C Using Coaxial Line Methods [C]. Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest: 2000: 455–456.
- [26] Baker-Jarvis J, Janezic M, Riddle B, *et al.* Dielectric and Conductor-Loss Characterization and Measurements on Electronic Packaging Materials [C]. NIST Technical Note 1520, 2001.

金属-有机骨架在烷烃/烯烃分离中节约能源

塑料行业需要大量的纯的乙烯和丙烯来生产聚(乙烯)和聚(丙烯)。但这些化合物必须从原油在 500–600 °C 派生出来的烃类混合物中分离。烷烃/烯烃混合物(如丙烷/丙烯)的分离是通过将混合物冷却至 -100 °C, 随后进行低温精馏实现的, 此过程需要巨大的能量输入。为了有效节省能源, 加州大学伯克利分校以及国家标准与技术研究院(NIST)的研究人员在 Jeffrey R. Long 的领导下, 已经开发出一种金属-有机骨架(MOF)材料, 能在较高的温度下进行分离操作。铁(II)金属-有机骨架(MOF)可以在 318 K 从丙烯中分离丙烷, 因为铁(II)协调区域选择性地吸附烯烃化合物的碳-碳双键。《科学》杂志报道指出, 当量分子的丙烷/丙烯混合物在 318K 流经金属-有机骨架时, 在出口处产生的丙烷均被铁(II)吸附; 对于乙烷/乙二醇混合物也获得类似的结果。金属-有机骨架解吸烯烃后, 还可进行重复的分离操作。

(摘译自《MRS Materials Bulletin》)