

防除冰-吸波复合凝胶的制备及多功能优化研究

师 宾^{1,2}, 温佳明^{1,2}, 刘蕊迪³, 吴宏景^{1,2}, 易 贤³

(1. 西北工业大学超常条件材料物理与化学教育部重点实验室, 西安, 710129; 2. 西北工业大学物理科学与技术学院, 西安, 710129; 3. 中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室, 四川绵阳, 621000)

摘要 防除冰/隐身一体化材料在航空航天、特别是无人机领域具有重要的研究价值和应用潜力。采用硅氧烷偶联反应制备了石墨/硅基凝胶复合材料, 研究了石墨添加量对凝胶疏水性、导热性及吸波性能的影响。试验结果表明: 当石墨添加量为40%时, 硅基凝胶的疏水角为 $109.3^{\circ} \pm 2.3^{\circ}$, 样品中央的温度为 69.6°C (100°C 加热60 s), 最大拉伸强度为0.512 1 MPa, 有效吸收带宽 $6.83\text{ GHz}@1.61\text{ mm}$ ($9.70 \sim 16.53\text{ GHz}$)。通过对凝胶电导率和缺陷等微观因素的表征, 阐明了硅基凝胶疏水、导热、吸波性能内在的耦合机制。该研究为同时实现飞行器的隐身和防除冰功能提供了一种工艺简单的材料设计策略。

关键词 无人机; 硅基凝胶; 吸波材料; 导热; 疏水; 耦合机制

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2025.01.002

中图分类号 V218 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2025)01-0010-08

Study on Preparation and Multifunctional Optimization of Anti-Deicing-Wave Absorbing Composite Gel

SHI Bin^{1,2}, WEN Jiaming^{1,2}, LIU Ruidi³, WU Hongjing^{1,2}, YI Xian³

(1. MOE Key Laboratory of Material Physics and Chemistry under Extraordinary, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 210016, China; 2. School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 210016, China; 3. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract The integrated materials of anti/de-icing-stealth have important research value and application potential in aerospace, especially in the field of UAV. In this study, graphite/silicon based gel composites were prepared by siloxane coupling reaction. The results show that when the graphite content is 40%, the hydrophobic angle of the silicon based gel is $109.3^{\circ} \pm 2.3^{\circ}$, the temperature in the center of the sample is 69.6°C (heated at 100°C for 60 s), the maximum tensile strength is 0.512 1 MPa and the effective absorption bandwidth is $6.83\text{ GHz}@1.61\text{ mm}$ ($9.70 \sim 16.53\text{ GHz}$). The intrinsic coupling mechanism of hydrophobic, thermal conductive and microwave absorbing properties of silicon based gel was clarified by characterizing the microscopic factors such as conductivity and defects of gel. This study provides a simple material design strategy for achieving both stealth and anti icing functions of drones simultaneously.

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 国家自然科学基金(51872238, 52074227, 21806129); 中国空气动力研究与发展中心结冰与防除冰重点实验室开放课题资助(IADL20220401); 中央高校基本科研业务费专项资金(3102018zy045, 3102019AX11, 5000220455); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ51162020JM-118); 西北工业大学研究生实践与创新基金项目(CX2023094)

作者简介: 师 宾(1988—), 男, 河南三门峡人, 博士生, 研究方向为新型吸波材料的设计制备。E-mail: shibinyau@163.com

通信作者: 吴宏景(1984—), 男, 浙江衢州人, 教授, 研究方向为新型吸波材料的设计制备。E-mail: wuhongjing@nwpu.edu.cn

引用格式: 师宾, 温佳明, 刘蕊迪, 等. 防除冰-吸波复合凝胶的制备及多功能优化研究[J]. 空军工程大学学报, 2025, 26(1): 10-17. SHI Bin, WEN Jiaming, LIU Ruidi, et al. Study on Preparation and Multifunctional Optimization of Anti-Deicing-Wave Absorbing Composite Gel[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2025, 26(1): 10-17.

Key words UAV; silicon based gel; absorbing materials; thermal conductivity; hydrophobicity; coupling mechanism

无人机具备的高度灵活性和隐蔽性的特点,使其在现代战争中扮演了越来越重要的角色。为提升无人机作战能力,对其进行隐身化已成为各军事大国竞争的研究热点。然而,在无人机执行任务的主要空域上(海拔约 3 km),过冷液滴极易在飞机表面结冰^[1],显著影响无人机的机动性能和可操作性^[2-3],还可能破坏传统涂层类吸波材料的结构,进而破坏其隐身功能,威胁飞行安全。因此,为提高无人机的飞行安全和执行任务能力,研发防除冰/隐身一体化材料十分必要。

常用的防除冰策略分为主动除冰和被动防冰^[4]。主动除冰主要是利用电加热的方法将冰层融化,该方法要求表面材料具有良好的导热性,以确保能在较低能耗下和较短时间内使冰附着处融化进而从飞机表面脱落^[5]。被动防冰主要是通过构建疏水表面来降低过冷液滴的附着,从而达到防冰的目的^[6]。与主动除冰技术相比,被动防冰技术因不需要能耗、环保等优点而成为研究的热点^[7-10]。现有被动防冰研究主要集中在超疏水表面^[11-12]、滑液体注入多孔表面(滑动)^[13-14]、水润滑层表面^[15-16]等领域。在这些被动防冰方法中,超疏水表面除了具有非凡的驱水性外,还能够减少冰雪的积累,甚至完全防止固体表面上冰的形成^[17],因此,被认为是一种可行的防冰方法。然而,设计和制造更高效的防冰表面(如超疏水表面)仍然是一个巨大的挑战^[18]。考虑到单一的主动或被动防除冰技术具有明显的局限性,因此,将主动与被动防除冰技术相结合,构建同时具备疏水性和良好导热性能的材料,是一种更有效的防除冰策略。

作为一类有潜在应用价值的吸波材料,凝胶受到了越来越多的关注。Zhao 等^[19]通过一步法,设计调控制备了高效凝胶基(有机凝胶、离子凝胶)吸波材料。通过调控制备工艺,使离子凝胶在 2.2 mm 厚度下有效吸收带宽(effective absorption bandwidth, EAB)达到 5.59 GHz;有机凝胶在 2~4 mm 厚度下, EAB 覆盖了整个 X 波段。然而,有机凝胶和离子凝胶均不耐高温,且不具有疏水性,限制了其在防除冰吸波材料上的应用。Zhang 等^[20]将氧化石墨烯、氧化多壁碳纳米管(MCNT)和磁性 Fe_3O_4 纳米颗粒按一定比例混合,制备了 $\text{rGO}/\text{MWCNTs}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ 复合水凝胶。通过调节凝胶的厚度为 2.0~4.0 mm,得到该凝胶的 EAB 为 11.4 GHz(6.5~17.9 GHz)。同样的,水凝胶也不能耐高、低温环境,且水凝胶具有亲水性,不适宜作为防除冰材料。作为一类具有天然疏水性的材料,

有机硅凝胶可以很好地弥补以上凝胶的缺点,但是有机硅凝胶复介电常数过低难以有效损耗电磁波。通过向有机硅凝胶中掺入导电性较好的材料来构建导电网络,赋予其较好的电导损耗能力和导热性能,则有望得到一种兼具疏水、导热、吸波性能的凝胶材料。

本文采用硅氧烷偶联反应,通过优化石墨的添加量,制备出一种疏水性好、导热率高、耐高低温、具有一定力学性能且吸波性能优良的有机硅凝胶复合材料。通过研究石墨含量对硅基凝胶复合材料的微观形貌与结构、疏水和导热性能、力学性能以及电磁波吸收性能的影响,阐明了硅基凝胶复合材料疏水、导热、吸波性能一体化耦合机制,为同时实现无人机的隐身和防除冰功能提供了一种工艺简单的材料设计策略。

1 硅基凝胶复合材料的制备

1.1 材料

采用的原材料包括:北京三景信德科技有限公司生产的食品级 AB 硅胶, A 胶(二甲基硅氧烷)、B 胶(甲基乙基硅氧烷);阿拉丁试剂(上海)有限公司生产的石墨粉;上海麦克林生化科技股份有限公司生产的切片石蜡。

1.2 制备工艺

通过硅氧烷偶联反应制备硅基凝胶复合材料的工艺路线如图 1 所示。首先将硅胶 A 溶液与石墨粉混合,以 300 r/min 下机械搅拌 15 min,静置 5 min;之后将同等体积的硅胶 B 溶液加入到上述混合溶液中,以 500 r/min 机械搅拌剧烈搅拌 5 min 得到粘稠的黑色浆料;将浆料倒入模具,在 $-16 \sim -18^\circ\text{C}$ 里静置 24 h 以除去气泡;最后在 80°C 烘箱里固化 12 h,得到均匀的黑色凝胶。所加入的石墨粉占凝胶的质量分数分别为 0%、10%、20%、30%、40%、50%,对应的样品编号分别记为 SM-0、SM-10、SM-20、SM-30、SM-40、SM-50。

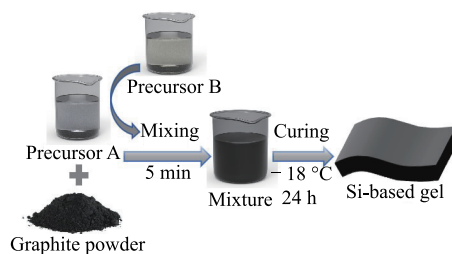


图 1 硅基凝胶复合材料的制备过程

Fig. 1 Preparation process of silicon based gel composites

2 测试与表征方法

2.1 物理化学性能测试

采用场发射扫描电子显微镜 FE-SEM(Hitachi Limited Hitachi SU8010)观察样品的形态和微观结构。采用拉曼光谱(Horiba France SAS, LabRAM Soleil)用于测定材料的石墨化程度。采用 X 射线光电子能谱(kratos axis supra, XPS)对样品的元素组成、化学状态和分子结构进行了分析。采用万能材料试验机对凝胶的拉伸强度进行了表征。

2.2 电磁参数测试

使用矢量网络分析仪 Anritsu MS46322B, 利用同轴法对 2~18 GHz 频率范围内的测试环的电磁参数进行研究。将制得的凝胶直接切割成外径 7 mm、内径 3.05 mm、厚度 3 mm 的测试环。根据式(1)和式(2)计算电磁波吸收特性:

$$RL = 20 \log \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (1)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh(j \frac{2\pi f d}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r}) \quad (2)$$

式中: Z_{in} 、 Z_0 分别为吸收剂的输入阻抗和空气气氛的阻抗; μ_r 为相对磁导率; ϵ_r 为相对复介电常数; f 为电磁波频率; d 为凝胶厚度; c 为电磁波在自由空间中的速度。

3 结果与讨论

3.1 微观结构与形貌表征

为研究石墨添加量对硅基凝胶微观形貌的影响, 对所制备的硅基凝胶复合材料进行 SEM 表征, 结果如图 2 所示。在不加入石墨时, 硅基凝胶微观形貌比较光滑。如图 2(b) 所示, 当石墨加入量较少(低于 20%)的时候, 可以看到明显的片状石墨, 此时由于石墨加入量较少, 不足以形成较为完整的导电网络。随着石墨加入量增多(超过 30%), 石墨开始在凝胶中堆叠, 逐渐形成导电网络。而导电网络的形成会进一步影响导热、吸波等其他性质。

为研究石墨对凝胶微结构和性能的影响, 对样品进行了拉曼光谱测试, 如图 3 所示。在 1582 cm^{-1} 处出现的是 G 峰, 它是由 sp^2 原子对的拉伸运动产生的, 对应于碳环中骨架振动峰, 其强度随着石墨含量增加而明显增大; 而位于 1342 cm^{-1} 处的 D 峰对应于非 c-sp^2 杂化成分, 强度很小, 这表明凝胶中形成的石墨缺陷很小, 且随着石墨加入量的增加变化并不明显。在碳材料中, I_D/I_G 常用于评估碳材料的缺陷水平和杂质含量。在硅基凝胶复合材料

中, 随着石墨加入量从 10% 增加到 30%, I_D/I_G 先增加再略微下降, 此略微下降可能是测试误差带来的, 不影响整体趋势和结论; 当石墨加入量达到 40% 时, I_D/I_G 大幅度增加, 继续增加石墨含量, I_D/I_G 变化不大。可能是在石墨加入量较少时, 凝胶中导电网络随着石墨的加入而逐渐形成(低于 40%), 之后随着石墨量的继续增加, 导电网络基本不变。

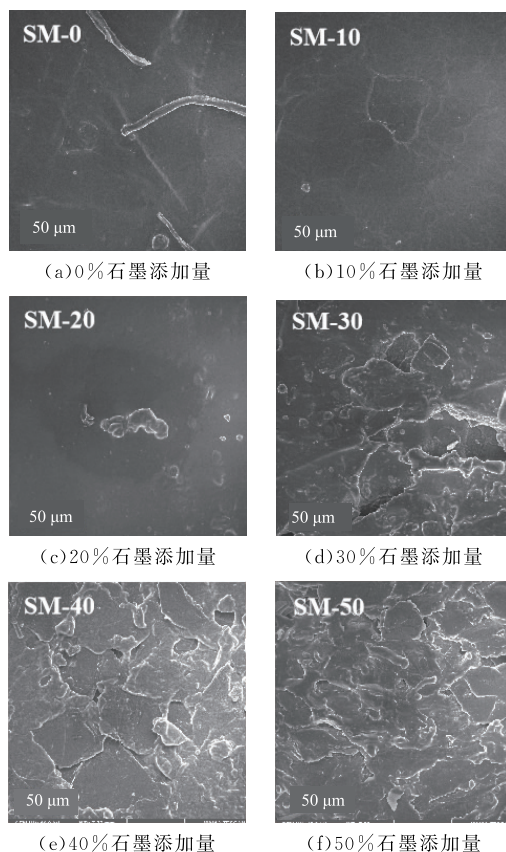


图 2 硅基凝胶复合材料的 SEM 图

Fig. 2 SEM images of silicon based gel composites

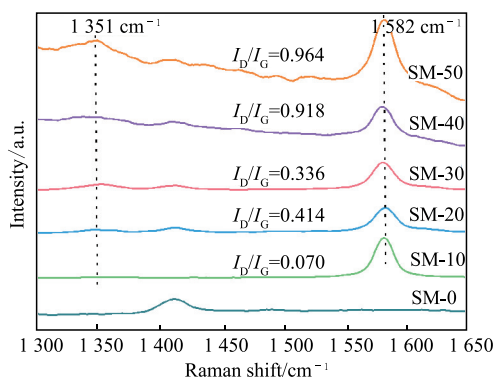


图 3 硅基凝胶复合材料拉曼光谱

Fig. 3 Raman data of silicon based gel composites

采用 X 射线光电子能谱(XPS)研究了有机硅凝胶表面的元素组成及配位环境, 如图 4 所示。有机硅材料的主链为 Si-O-Si 结构, 其中 Si-O 键具有很大的键能(451 kJ/mol), Si-O-Si 结构非常稳定^[21]。因此, 有机硅凝胶基体难以在外部电磁场下产生响应, 即有机硅凝胶基体不易产生极化现

象。C 1s 的分峰拟合结果表明:产物中存在 C—C、C—O、C=O 等结构,其主要来源为有机硅凝胶的基体以及填料石墨。石墨中固有的缺陷(杂质、断裂的化学键等)会带来正负电荷分布不均匀,在电磁场作用下产生偶极子极化,缺陷含量随石墨添加量的增加而增大。此外,硅基凝胶中所含有的 Si—O—Si 键可以在一定程度上增大材料的疏水性能,因为硅氧键的极性较小,使得材料表面不易和水分子发生相互作用,从而增强了样品的疏水性^[22]。

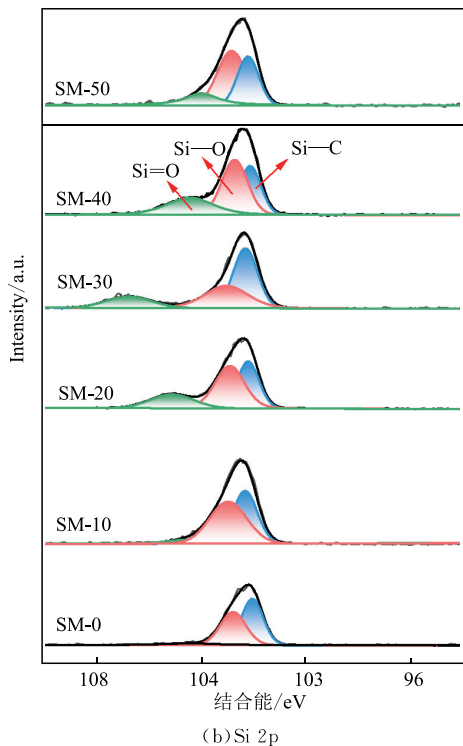
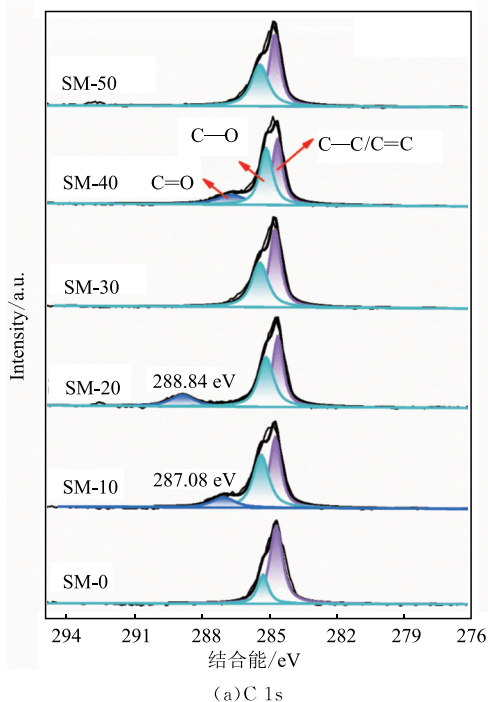


图 4 硅基凝胶 XPS 图谱

Fig. 4 XPS spectrum of silicon based gel

3.2 疏水及导热性能表征

为研究不同石墨添加量硅基凝胶的疏水性的影响,对凝胶表面静态接触角进行测试,如图 5 所示。随着石墨含量升高,得到的样品疏水性增强(与 XPS 结果保持一致),这是由于石墨本身具有疏水性,通过加入石墨量的增加,硅基凝胶的疏水性随之增加。当石墨含量为 0 时,样品的接触角为 $76.4^\circ \pm 2.2^\circ$,说明硅胶基体为亲水性材料,不具备疏水性;当石墨添加量为 10% 时,样品的接触角为 $93.2^\circ \pm 1.9^\circ$,开始展现一定的疏水性;继续增加石墨添加量,接触角逐渐增加,当石墨添加量为 40% 和 50% 时,接触角分别为 $109.3^\circ \pm 2.3^\circ$ 和 $110.4^\circ \pm 2.9^\circ$,均具有较好的疏水性,且两者之间不具有明显差异。这是因为当石墨含量达到 40% 时,已经能够均匀的占据凝胶表面的所有位点,此时疏水性达到最大,继续增加石墨含量,疏水性基本保持不变。因此,仅通过控制石墨添加量为 40%,不采用任何特殊的界面工程,即可得到疏水性能优异的硅基凝胶。

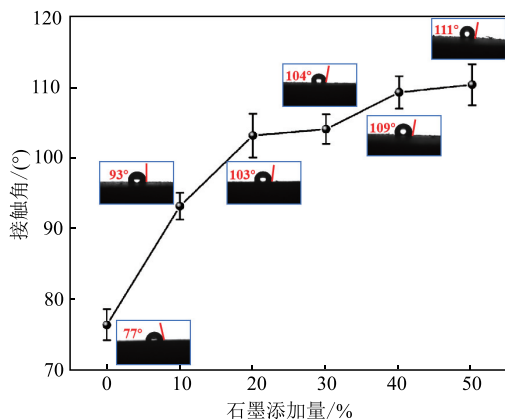


图 5 不同石墨添加量时凝胶表面静态接触角的变化

Fig. 5 Trends of static contact angle of gel surface with different graphite addition

采用红外成像系统分析了样品的导热能力,如图 6 所示,展示了在 100°C 加热平台上放置 60 s 后硅基复合凝胶实时温度的俯视图。虽然凝胶厚度达到 5 mm,所有样品的热红外图像均展现出均匀的温度分布,说明加入的石墨粉均匀的分散在凝胶中。根据凝胶样品中央的温度可以判断凝胶的导热性。当不加入石墨时, 100°C 加热 60 s,样品中央的温度仅为 42.8°C ,随着石墨的加入,导热性能先提高后降低。当石墨添加量为 30% 时,凝胶中央温度达到最高,为 73.1°C 。当石墨添加量为 40% 时,样品中央温度略微降低到 69.6°C 。因此,SM-30 和 SM-40 具有相当的且较为优异的导热性能。SM-50 中,石墨

过量且团聚,降低了凝胶的导热性,且过多的石墨不利于凝胶基体的成型,进而影响凝胶的性能。

综上所述,通过改变石墨的添加量可以调控硅基凝胶中导电网络的形成,完整的导电网络有利于导热性能的提高,为电加热除冰提供了应用基础。此外,石墨的加入显著提高了硅基凝胶的疏水性,可以组织水滴在硅基凝胶表面的附着和沉积,从而防止结冰现象的产生。综合疏水性能和导热性能,SM-40 同时兼具良好的疏水和导热性。

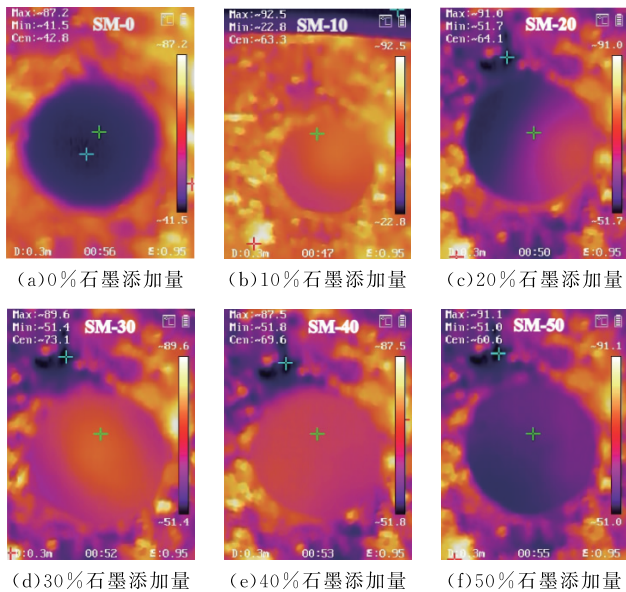
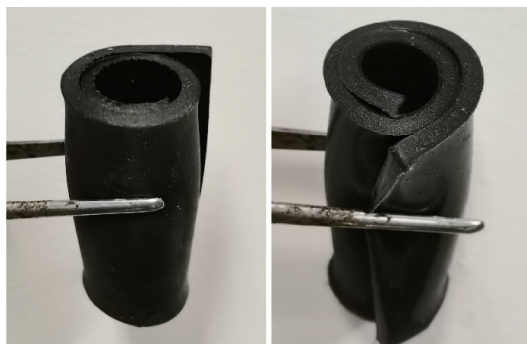


图6 不同石墨添加量硅基凝胶的红外热成像

Fig. 6 Infrared thermography of silicon based gel with different graphite content

3.3 高低温测试

由于样品 SM-40 具有优异的疏水和导热性能,因此对其进行高低温测试,结果如图 7 所示。将样品分别在 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下放置 48 h,取出后立即进行柔韧性测试,可以看出,SM-40 在极端温度下处理后仍能保持良好的柔韧性,因此,具备在防除冰领域应用的潜质。



(a) $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 放置 48 h (b) $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 放置 48 h

图7 样品 SM-40 的高低温测试

Fig. 7 High and low temperature testing of sample SM-40

3.4 力学性能

随着石墨含量的增加,凝胶的拉伸强度呈现出整体先增加后减小的趋势。表 1 为不同凝胶样品力学性能测试结果,从表 1 可以看出,从 SM-0 到 SM-40,拉伸强度从 $0.470\text{ }7\text{ MPa}$ 逐渐增加至 $0.512\text{ }1\text{ MPa}$,之后迅速降低到 $0.398\text{ }2\text{ MPa}$ 。该结果表明石墨的加入一定程度上有助于提高凝胶的拉伸强度,然而,过多的石墨会破坏凝胶结构的均匀性,从而大幅度削弱其力学性能。

表 1 不同凝胶样品力学性能测试

Tab. 1 Mechanical properties of different gel samples

样品	厚度/mm	拉伸强度/MPa
SM-0	4.46	0.470 7
SM-10	4.45	0.495 5
SM-20	4.52	0.502 4
SM-30	4.55	0.498 0
SM-40	4.50	0.512 1
SM-50	4.51	0.398 2

3.5 防除冰/隐身一体化耦合机制

图 8 为硅基凝胶复合材料的电磁波吸收性能。随着石墨含量的增加,硅基凝胶的有效吸收带宽 (EAB) 呈现先增后减的规律,其中 SM-40 在 1.61 mm 时 EAB 最大,为 6.83 GHz ($9.70\sim 16.53\text{ GHz}$), $RL_{\min}$ 为 -49.78 dB ,如图 8(e) 所示。值得注意的是,通过调整厚度从 0.9 mm 到 5.0 mm ,有效的 EAB 可以覆盖整个 C、X 和 Ku 波段。此外,SM-30 也具有较为优良的吸波性能 (1.16 mm 时 EAB 为 4.93 GHz)。另外 4 个样品的吸波性能则不佳,SM-20 和 SM-50 的 EAB 分别只有 1.24 GHz 和 1.32 GHz ,如图 8(c) 和图 8(f) 所示。这是因为当石墨加入量很少时 (低于 20%),凝胶中石墨形成的导电网络不完整,凝胶中留存有较多的空隙使电磁波容易穿透凝胶,从而导致电磁波吸收性能较差。当石墨量过多时 (达到 50%),凝胶中过量石墨导致凝胶材料的导电性过强,产生了电磁反射现象,同样减弱了凝胶的电磁波吸收性能。综上所述,电磁波吸收性能为 $\text{SM-40} > \text{SM-30} > \text{SM-50} > \text{SM-20} > \text{SM-10} = \text{SM-0}$ 。如图 10 所示,硅基凝胶的电磁波吸收性能与石墨的添加量直接相关,在添加量低于 40% 时,随着石墨含量的增加,吸波性能增加。在 40% 时,吸波性能达到最佳。继续增加石墨含量至 50%,吸波性能急剧下降,这是由于过多的石墨导致了较强的电磁波反射。

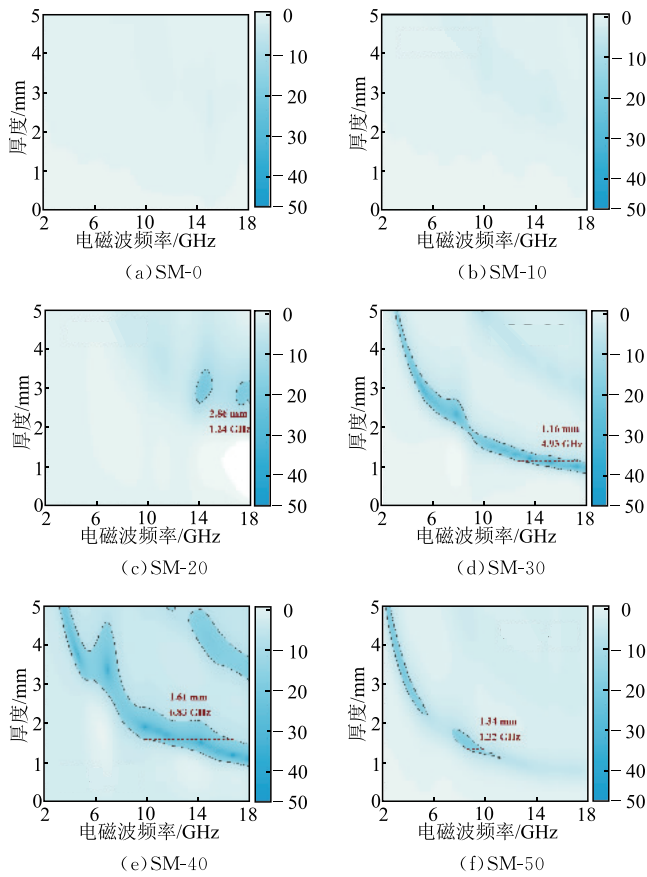


图 8 不同石墨含量硅基凝胶反射损失二维曲线

Fig. 8 2D curves of reflection loss of silicon based gel with different graphite content

为了更好地评估样品作为电磁波吸收材料的实际应用潜力进一步使用频域方法模拟样品 SM-40 的雷达散射截面(RCS)。如图 9 所示,SM-40 样品的 RCS 值在 $\pm 26^\circ$ 时,其最佳值为 $-49.25 \text{ dB} \cdot \text{m}^2$ 。模拟结果证明该吸波凝胶在实际应用中的巨大潜力。

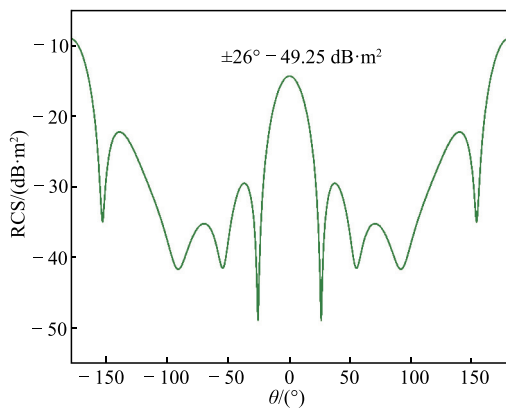


图 9 样品 SM-40 的雷达散射截面模拟图

Fig. 9 Simulation diagram of RCS of sample SM-40

本研究采用同轴法来评估材料的电磁波吸收性能,即通过计算电磁波反射率 R 和透射率 T 来评估

吸波材料的吸收率 A ,其中 $A = 100\% - R - T$ 。通过计算,得到不同样品的吸收率如图 10 所示。随着电磁波频率增大,所有样品的电磁波吸收率均呈现上升趋势,且吸收率 $\text{SM-40} > \text{SM-30} > \text{SM-50} > \text{SM-20} > \text{SM-10} > \text{SM-0}$ 。该趋势与样品的有效吸收带宽(图 8)基本一致。

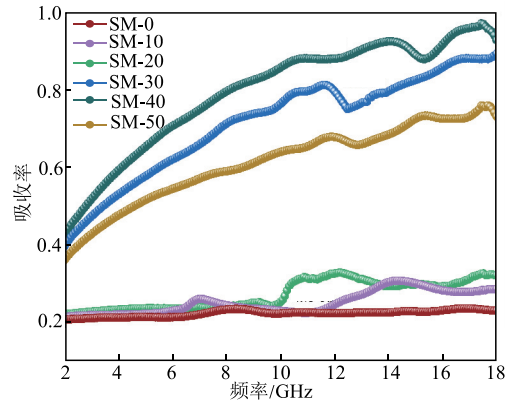
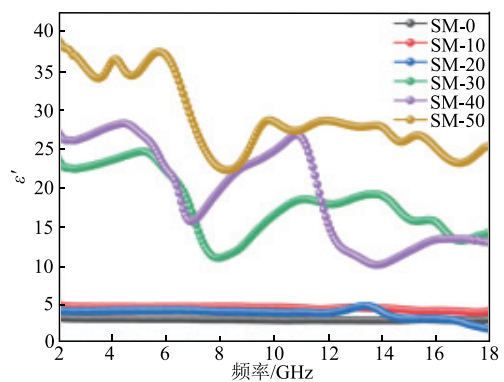


图 10 不同石墨含量硅基凝胶吸收率

Fig. 10 Electromagnetic wave absorptivity of silicon based gel with different graphite content

图 11 展示了不同石墨添加量的 6 个样品的复合介电常数与频率的关系($\epsilon_r = \epsilon' - j\epsilon''$),其中实部 ϵ' 和虚部 ϵ'' 分别表示电能的存储和耗散。总体而言,石墨含量高的样品, ϵ' 整体较高。此外,随着频率的增加,所有样品的 ϵ' 值都呈下降趋势,并有一些小的波动,表现出典型的频率色散行为。就 ϵ'' 而言,SM-40 在 8~18 GHz 频率范围内具有明显更高的 ϵ'' 值,且与其他样品相比,SM-40 在 11.5 GHz 处出现一个强弛豫峰,这可能得益于较高石墨含量产生的较强的缺陷极化。然而,导电性过高会导致电磁波的强烈反射,这不利于阻抗匹配。介电损耗因子($\tan \delta_e$)揭示了 SM-40 在整个频率范围内具有较高的介电损耗,其主要由较强的缺陷极化(石墨中的缺陷)和适当的电导损耗所主导。



(a) 介电实部

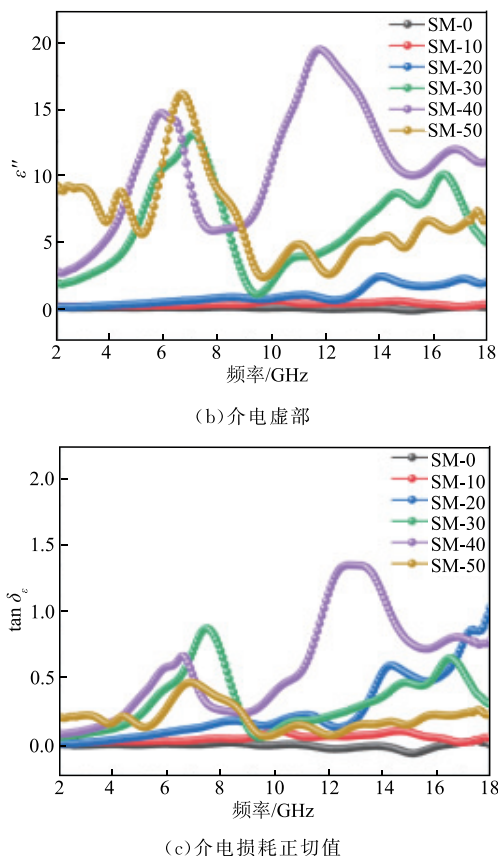


图 11 不同石墨含量硅基凝胶介电常数、介电损耗角正切值
Fig. 11 Complex permittivity and dielectric loss tangent of silicon based gel with different graphite content

虽然有机硅凝胶的三维空间网络结构赋予了其优异的柔韧性和高低温性能,但是稳定而完整的有机网络骨架限制了电子的转移,从而使其不具备电磁波响应能力和较差的导热性能。作为高导电性材料,石墨的加入可以在有机凝胶基体中形成稳定的导电网络,在赋予其电导损耗能力的同时使其具有了电子导热能力。同时,石墨本身具有的疏水性可以显著改善硅基凝胶的疏水性。因此,通过硅氧烷偶联反应制备石墨/硅基凝胶复合材料,通过其内在的耦合机制有效地实现了疏水、导热、吸波一体化凝胶的构建。

4 结论

1) 采用硅氧烷偶联反应制备出均匀的防除冰/隐身一体化有机硅/石墨复合凝胶。通过调节石墨含量,制备出兼具良好的导热和疏水性的吸波材料。

2) 通过改变石墨添加量,可以实现硅基凝胶疏水、导热、吸波性能的调控。当石墨添加量为 40% 时,硅基凝胶复合材料具有综合最优的性能,有效吸收带宽为 6.83 GHz@1.61 mm(9.70~16.53 GHz,

$RL_{\min}$ 为 -49.78 dB)。样品的表面接触角为 $109.3 \pm 2.3^\circ$ 。样品中央的温度为 69.6°C (100 $^\circ\text{C}$ 加热 60 s)。最大拉伸强度为 0.512 1 MPa。

3) 硅基凝胶复合材料优异的疏水、导热、吸波性能耦合机制归因于凝胶中石墨导电网络的形成。通过构建导电网络,同时提升了硅基凝胶的电导损耗能力和电子导热能力。此外,石墨本身具有的疏水基团赋予了硅基凝胶较好的疏水性。

4) 石墨/硅基凝胶复合材料有望成为一种潜在的无人机防除冰/隐身一体化材料。

参考文献

- [1] GAM-DEROUICH S, PINSON J, LAMOURI A, et al. Micro-Patterned Anti-Icing Coatings with Dual Hydrophobic/Hydrophilic Properties [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(40): 19353-19357.
- [2] 胡义明. 结冰对飞机的危害及防除冰方法[J]. 科技风, 2021(5): 17-18.
HU Y M. Ice Accretion Hazards and De-Icing Techniques for Aircraft[J]. Kejifeng, 2021, (5): 17-18. (in Chinese)
- [3] 刘晓林, 朱彦瞳, 王泽林澜, 等. 飞行器仿生防冰涂层技术现状与趋势[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 527331.
LIU X L, ZHU Y T, WANG Z L L, et al. Research Progress and Development Trend of Bio-Inspired Anti-Icing Coatings for Aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 527331. (in Chinese)
- [4] HUANG X, TEPYLO N, POMMIER-BUDINGER V, et al. A Survey of Icephobic Coatings and Their Potential Use in a Hybrid Coating/Active Ice Protection System for Aerospace Applications[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 105: 74-97.
- [5] PAN L, LIU Z H, KIZILTAŞ O, et al. Carbon Fiber/Poly Ether Ether Ketone Composites Modified with Graphene for Electro-Thermal Deicing Applications[J]. Composites Science and Technology, 2020, 192: 108117.
- [6] QI C H, CHEN H, SHEN L Y, et al. Superhydrophobic Surface Based on Assembly of Nanoparticles for Application in Anti-Icing under Ultralow Temperature[J]. ACS Applied Nano Materials, 2020, 3(2): 2047-2057.
- [7] LI Q, GUO Z G. Fundamentals of Icing and Common Strategies for Designing Biomimetic Anti-Icing Surfaces[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018,

- 6(28): 13549-13581.
- [8] GUO H, XING Y, YUAN H, et al. Improving the Anti-Icing Performance of Superhydrophobic Surfaces by Nucleation Inhibitor [J]. *Surface Engineering*, 2020, 36(6): 621-627.
- [9] ZHANG S N, HUANG J Y, CHENG Y, et al. Bioinspired Surfaces with Superwettability for Anti-Icing and Ice-Phobic Application: Concept, Mechanism, and Design[J]. *Small*, 2017, 13(48): 1701867.
- [10] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S A. Anti-Icing Performance of Superhydrophobic Surfaces [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257 (14): 6264-6269.
- [11] PARK C, KIM T, KIM Y I, et al. Supersonically Sprayed Transparent Flexible Multifunctional Composites for Self-Cleaning, Anti-Icing, Anti-Fogging, and Anti-Bacterial Applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 222:109070.
- [12] QIU C, LI M, CHEN S X. Anti-Icing Characteristics of PTFE Super Hydrophobic Coating on Titanium Alloy Surface[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 860: 157907.
- [13] LIU X L, CHEN H W, ZHAO Z H, et al. Slippery Liquid-Infused Porous Electric Heating Coating for Anti-Icing and De-Icing Applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 889-896.
- [14] ZHANG P F, CHEN H W, ZHANG L W, et al. Transparent Self-Cleaning Lubricant-Infused Surfaces Made with Large-Area Breath Figure Patterns [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 355: 1083-1090.
- [15] CHEN J, LUO Z Q, FAN Q R, et al. Anti-Ice Coating Inspired by Ice Skating[J]. *Small*, 2014, 10(22): 4693-4699.
- [16] DOU R M, CHEN J, ZHANG Y F, et al. Anti-Icing Coating with an Aqueous Lubricating Layer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6 (10): 6998-7003.
- [17] CAO L L, JONES A K, SIKKA V K, et al. Anti-Icing Superhydrophobic Coatings[J]. *Langmuir*, 2009, 25(21): 12444-12448.
- [18] GUO P, ZHENG Y M, WEN M X, et al. Icephobic/Anti-Icing Properties of Micro/Nanostructured Surfaces [J]. *Advanced Materials*, 2012, 24 (19): 2642-2648.
- [19] ZHAO Z H, ZHANG L M, WU H J. Hydro/Organo/Ionogels: "Controllable" Electromagnetic Wave Absorbers [J]. *Advanced Materials*, 2022, 34 (43): 2205376.
- [20] ZHANG H, HONG M, CHEN P, et al. 3D and Ternary rGO/MCNTS/Fe₃O₄ Composite Hydrogels: Synthesis, Characterization and Their Electromagnetic Wave Absorption Properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 665: 381-387.
- [21] 冯圣玉, 张洁, 李美江, 等. 有机硅高分子及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- FENG S Y, ZHANG J, LI M J, et al. Organosilicon Polymers and Applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [22] 黄桔煊, 万怡灶, 朱享波, 等. 改性剂对纳米片状羟基磷灰石/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(3): 749-760.
- HUANG Z H, WAN Y Z, ZHU X B, et al. Effect of Modifier on Properties of Nano-Platelet Hydroxyapatite/Poly(lactic Acid) Composites [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2021, 38(3): 749-760. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)